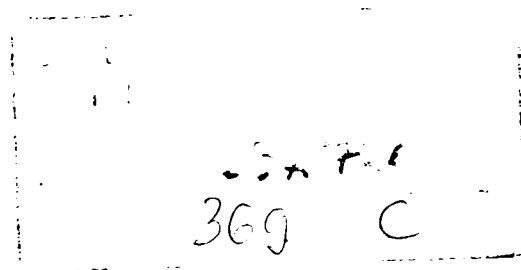


UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
Facultatea de Electronică și Telecomunicații
Departamentul de Electronică Aplicată

Cercetări privind conducerea adaptivă a roboților mobili autonomi



Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Virgil Tiponuț

Doctorand:
Titu Botoș

2003

Cuprins

Capitolul I. Introducere	1
I.1 Ce sunt roboții?	2
I.2 Structura prezentei teze	8
Capitolul II. Sisteme de conducere a roboților mobili	10
II.1 Arhitecturi de conducere ierarhizate	11
II.2 Conducerea comportamentală	15
II.2.1 Fundamentul biologic al conducerii comportamentale	16
II.2.2 Caracteristicile structurilor de conducere comportamentală	20
II.2.3 Arhitectura de tip incluziune	23
II.3 Sisteme hibride	26
II.3.1 Anatomia arhitecturii pe trei nivele	30
II.4 Rețelele neuronale și logica fuzzy în conducerea roboților mobili autonomi	33
II.5 Concluzii	40
Capitolul III. Rețele neuronale artificiale	41
III.1 Introducere	41
III.2 Perceptronul simplu	46
III.3 Rețele competitive simple	50
III.4 Concluzii	54
Capitolul IV. Senzori ultrasonici în robotică	56
IV.1 De ce senzori ultrasonici?	56
IV.2 Parametrii traductoarelor ultrasonice	58
IV.3 Probleme de bază la detectarea cu ultrasunete	60
IV.3.1 Natura reflexiei	60
IV.3.2 Reflexiile totale	62
IV.3.3 Nedeterminarea laterală a obiectului care a determinat reflexia	63
IV.3.4 Reflexiile multiple.	65
IV.3.5 Zona de umbră din domeniul de investigare	66
IV.4 Metode de investigare acustică	69
IV.4.1 Sisteme ortogonale cu maparea intensității.	70

IV.4.2 Sisteme bazate pe metoda puls-ecou.	71
IV.4.3 Sisteme fază-amplitudine	75
IV.5 Senzori ultrasonici	76
IV.6 Tehnici holografice	84
IV.6.1 Principiul holografiei acustice	84
IV.6.2 Tipuri de tehnici holografice	86
IV.6.2.1 Holografia acustică monofrecvență	87
IV.6.2.2 Holografia acustică multifrecvență discretă.	88
IV.6.2.3 Holografia acustică în impuls	90
IV.6.2.3.1 Reconstrucția prin propagarea înapoi a undeii în cazul holografiei acustice în impuls	93
IV.7 Concluzii	95
V. Holografie acustică în impuls cu traductoare de bandă îngustă	96
V.1 Canalul acustic	96
V.2 Studiul traductoarelor electro-acustice	98
V.2.1 Modelul electric echivalent	99
V.2.2 Banda traductoarelor 40L16	104
V.2.3 Caracteristica de directivitate	106
V.3 Studiul excitației traductoarelor 40LT16. Optimizarea duratei de emisie.	106
V.4 Adaptarea traductorului receptor	111
V.5 Concluzii	114
VI. Holografia acustică în impuls bidimensională bitractor	115
VI.1 Sisteme biologice de tip sonar	116
VI.2 Ideea	118
VI.3 Câmpul investigat	121
VI.4 Studiul rezoluției spațiale	124
VI.5 Perceptronul	131
VI.5.1 Răspunsul perceptronului	135
VI.6 Concluzii	144
VII. Aplicații ale holografiei acustice în impuls bidirecțională bitractor	147
VII.1 Evitarea obstacolelor	147
VII.1.1 Agentul evită obstacolele	150
A. Nivelul clasificator	151
B. Nivelul de decizie a corecției azimutului	154
VII.1.2 Simulări	156
VII.2 Concluzii	165
VIII. Contribuții	168
Bibliografie	173

I. Introducere

Domeniul roboților mobili cunoaște o continuă expansiune, subiectul fiind din ce în ce mai des abordat de către un număr tot mai mare de cercetători, din cele mai diferite domenii de specializare.

O dovadă a acestei creșteri este numărul mare de articole ce abordează domeniul, sunt avute în vedere atât revistele de specialitate (cca. 8 titluri din colecția IEEE) precum și paginile de web a majorității instituțiilor universitare de pe întreg globul. Există chiar servere specializate, dedicate, ce încearcă să facă ordine în domeniu. Cel mai elocvent exemplu este cel al serverului: <http://www-robotics.cs.umass.edu/robotics.html> ce oferă circa 130 legături spre adrese de web ce au tangență cu domeniul roboților mobili.

Remarca care trebuie făcută, însă, aici, este că subiectul a început să fie prezentat și în reviste de graniță, ca cele de popularizare a științei și tehnologiei. Astfel, binecunoscuta revistă National Geographic (în numărul din iulie 1997) dedică un întreg articol subiectului, prezentând diferite tipuri de roboți mobili începând cu cei mai mici (și mai stranii: gândacul de bucătărie căruia i s-a atașat un sistem de excitare telecomandat - reușita japonezilor) și până la formele bipede ce se pot întâlni astăzi.

Dave Lavery afirmă, pe parcursul acestui articol de popularizare, că cererea de roboți mobili autonomi destinați serviciilor ar putea fi de 4 ori mai mare decât populația de roboți industriali, care la acel moment (iulie 1997) era estimată la 680.000.

În prezentarea făcută roboților mobili autonomi *inteligenti*, articolul din National Geographic, surprinde caracteristica lor definitorie, și anume ciclul: *a simți - a gândi - a acționa*. Dacă până în prezent au fost abordate și în bună măsură soluționate extremele acestui ciclu, acum este momentul în care - datorită tehnicilor de conducere modernă - se poate aborda faza intermediară: *a gândi*.

I.1 Ce sunt roboții?

Fascinația roboticii constă în încercarea de a crea "mașini" care să aibă câte ceva în comun cu ființa umană. Ideea generală este dominată de exemple de roboți cum sunt cei văzuți în filme. Aceste mașini nu doar că prezintă aptitudini umane cum ar fi, spre exemplu, capacitatea de a vorbi sau gândi, ba chiar mai mult arată ca și ființele umane. Având această imagine ca și referință, un neavizat ar putea fi dezamăgit de o vizită în unul dintre laboratoarele reale, unde, roboții mobili arată mai mult a coșuri de gunoi pe roți decât a ființe (umane).

Prima întrebare ce se ridică natural atunci când apare în discuție subiectul roboticii este firesc "Ce este un robot?" urmată imediat de "Ce poate face un robot?". Dacă prin *robot*, în ipotetica discuție anterior amintită, se subînțelege de fapt un *robot mobil* atunci, răspunsul la prima întrebare devine mai complex, așa după cum se va vedea în continuare. În schimb la cea de a doua s-ar putea răspunde imediat, dând din umeri: "Mai nimic ... încă ...".

Uzual, în cultura generală, termenul de robot are o conotație cu aparență umană. Și asta datorită modului în care termenul de "robot" a apărut. Cuvântul "robot" este pentru prima dată monetizat în piesa lui Karel Capek intitulată R.U.R. (*Rossum's Universal Robot*) ce a debutat în 25 Ianuarie 1921 la Praga. În această piesă un inventator fără scrupule (Rossum) reușește crearea unor ființe prin "îmbinarea" de organe umane. Aceste ființe erau suficient de inteligente pentru a înlocui omul în orice muncă, dar nu aveau conștiință de sine și nici sentimente. Cuvântul utilizat de Capek pentru a descrie aceste ființe a fost pentru prima dată, cel de *robot*, un termen derivat din cuvântul ceh "robota", ce desemnează o muncă plictisitoare și repetitivă. Prin această titulatură, lucrătorii roboți erau mențiți a fi slujitorii oamenilor "reali", nemeritând nici cea mai mică formă de respect.

Probabil ca originea cuvântului "robota" din cehă este una slavă întrucât o formă puțin schimbată a lui este întâlnită și în Moldova, sub forma "a roboti" cu același înțeles de muncă repetitivă, cu un scăzut aport intelectual.

Trecerea de la roboți alcătuiți din părți biologice, la cei construiți din piese mecanice s-a făcut, probabil, datorită literaturii științifico fantastice. Filme devenite clasice ca: "*Metropolis*" (1926), "*The Day the Earth Stood Still*" (1951), "*Forbidden Planet*" (1956), ca să nu mai amintim de seriile "*Star Wars*" și "*Star Trek*", au cimentat ideea originii mecanice a roboților. Concomitent computerele câștigă un loc din ce în ce mai însemnat în industrie și în viața de zi cu zi. Iar prezența lor întărește ideea originii mecanice a roboților, cu atât mai mult cu cât ele sunt considerate de către publicul larg literalmente capabile să gândească. Revine apoi lui Asimov meritul de a pecetlui pentru totdeauna reuniunea termenilor: antropomorf, mecanic și capabil de gândire sub titulatura de *roboți*, în colecția lui de povești "*I, Robot*".

Și totuși, ideea originii mecanice a roboților ar putea fi cu ușurință modificată înapoi la o origine biologică dacă se ține cont de recente și semnificative evoluții ale ingineriei

clonării. Dar acest subiect depășește cu mult scopul prezentei introduceri, fiind amintit aici doar pentru a ilustra întinderea domeniului intitulat generic *roboți mobili*.

Trecerea însă de la forma umană a roboților la orice formă ce reușește executarea funcției pentru care au fost proiectați, se datorează, în schimb, realității. Chiar dacă mecanici, roboții (de astăzi) nu trebuie să semene cu oamenii și nici măcar cu animalele. Spre exemplu, roboții-aspiratoare seamănă mai mult cu un aspirator decât cu femeia de serviciu. La fel roboții dezvoltati pentru a distribui mâncarea în spitale, pentru a degreva timpul surorilor medicale, arată ca niște cărucioare și nu ca o soră medicală.

Nu este clar nici care ar trebui să fie definiția noțiunii de *robot*. Mulți cercetători au sugerat definiții referitor la ceea ce se înțelege prin *robot*, iar aceste definiții cad de obicei de acord asupra miezului subiectului, dar diverg în ceea ce privește nuanțele domeniului. Nici prezenta teză nu va încerca să ofere o definiție universal valabilă, dar este poate interesant să fie amintite câteva dintre aceste definiții.

Astfel, R.R.Murphy în [221] consideră că "*Un robot inteligent este o entitate mecanică ce poate funcționa independent*". În același timp, David Lee în [224] afirmă că "*Un robot este o mașinărie inteligentă ce poate fi programată să execute o varietate de sarcini așa cum un computer este un circuit electronic ce poate fi programat să execute o serie de operații matematice*". Dar, poate că, cea mai sugestivă definiție revine lui M. Brady (1985) care enunță: "*Un robot este conectarea inteligentă a percepțiilor la acțiuni*".

Comun acestor definiții, este termenul de "*inteligent*", care arată că un robot nu face lucruri repetitive fără să gândească, cum ar fi, spre exemplu, cazul roboților industriali de asamblare.

La fel, termenul de "*entitate mecanică*" subliniază natura roboților, deși, nici remarcă anterior făcută, referitor la avansurile tehnicii clonării nu trebuie uitată. În plus, prin "*entitate mecanică*" se subliniază diferența între un calculator și un robot. Un robot este capabil să se miște și să interacționeze cu mediul înconjurător. Un robot poate însă îngloba un computer care să joace rolul unei unități centrale de procesare, spre exemplu.

Prin "*a funcționa independent*", definițiile anterioare doresc să sublinieze că un robot poate funcționa de-sine stătător, ne depinzând neapărat de intervenția unui operator uman. Mai mult, prin "*a funcționa independent*", se mai sugerează că un robot este capabil să se adapteze modificărilor din mediu.

Dacă subiectul roboților este abordat istoric, atunci se poate aminti că primul robot industrial a devenit productiv la începutul anilor '60. Iar de atunci aceștia au fost larg acceptați în industrie, în special în industria de asamblare. Până la finele anilor '80, populația mondială de roboți industriali crește, fiind estimată la 280000 de unități, urmând ca până la finele deceniului '90 să atingă cifra de 680000 unități instalate.

Cercetările în domeniul roboților mobili debutează tot în anii '60. Odată ce un robot devine mobil, problematica atașată lui crește rapid. Acțiunile roboților mobili depind de locul în care aceștia se găsesc, iar, în plus, mediul poate fi împărțit cu impredictibilele ființe umane.

Până la mijlocul anilor '80, s-a considerat, ca regulă cu putere de axiomă, că informația senzorială este compusă întâi într-un model al mediului și abia apoi pe baza acestuia se face planificarea următoarei mișcări. Dar modelul global al mediului se dovedește a fi util doar atât timp cât el reflectă starea reală a mediului. Dacă este așa, atunci modelul poate fi utilizat pentru planificarea mișcărilor următoare, prezicând astfel viitoarele stări ale mediului. Valoarea modelului global al mediului este deci direct legată de gradul de predictibilitate al mediului însuși. Dacă mediul din jurul robotului se găsește complet sub controlul acestuia, cum ar fi, spre exemplu, un depozit automatizat, atunci modelul mediului este extrem de util. Dar dacă robotul are foarte puțin control asupra mediului, cum ar fi, spre exemplu cazul holului unei clădiri cu birouri la orele de vârf, atunci un model global al mediului este mai puțin valoros decât un set de reflexe rapide.

Pe la mijlocul anilor '80, o serie de cercetători, frustrați de rezultatele obținute de aceste structuri de conducere ierarhice, încep să pună sub semnul întrebării necesitatea unui model global al mediului. Ce comportament ar putea rezulta pentru un robot care reacționează direct la excitațiile din mediu? Oare robotul nu ar putea răspunde direct la stimuli senzoriali? Din astfel de întrebări s-a născut conducerea reactivă a roboților mobili.

Încă de la primele experimente roboții conduși reactiv au obținut rezultate impresionante. Brooks (1986) și alții au dovedit că reacții asemănătoare cu cele observate la insecte, pot fi reproduse de roboți cu foarte puțină, dacă nu chiar fără nici o reprezentare internă. Astfel de roboți pot evita obstacole, pot atinge ținte sau pot urma coridoare doar reacționând prompt la stimuli senzoriali. Abilitatea în deplasare a roboților reactivi este egală cu cea a lui R2D2 (din celebra serie "Star Wars"), surclasând pe departe roboții conduși ierarhic, a căror viteză de deplasare făcea chiar și o broască țestoasă să fie mai rapidă.

Susținătorii abordării reactive invocă teoria evolutivă a naturii în suportul metodei de conducere reactive. S-a afirmat că naturii i-a luat mai mult să dezvolte aptitudini simple ca mersul sau evitarea obstacolelor, decât i-a fost necesar pentru a dezvolta abilități superioare, cum ar fi vorbirea sau gândirea. Tocmai de aceea promotorii acestui curent susțineau că trebuie urmată calea prin care se începe cu dezvoltarea abilităților de bază.

Conducerea roboților mobili nu este singura teorie ce ia ca exemplu evoluția naturală. Astfel, din studiul neuro-științelor, s-a născut teoria de control neuronală, algoritmi de căutare genetică implementează un mecanism de evoluție asemănător teoriei Darwiniene, iar, relativ noua disciplină a "Vieții artificiale", studiază sisteme artificiale ce mimează comportamentele sistemelor vii. Interesant este de menționat, însă, că toate aceste discipline de frontieră se suprapun și coexistă, completându-se reciproc.

Numai că eliminarea completă a modelului global al mediului se dovedește, repede, a fi cealaltă extremă. Roboții conduși reactiv au obținut repede succese notabile la capitolul

adaptabilității la schimbările mediului, dar suferă de lipsa oricărui mecanism de planificare sau evidență a evoluției lor. Astfel că, începutul anilor '90, aduce în atenție din nou modelul global al mediului. Noul curent acceptă prezența modelului global, dar o face într-o astfel de manieră încât să nu diminueze performanțele conducerii reactive. Se beneficiază astfel de avantajele ambelor abordări, obținând o așa-numită arhitectură hibridă. Trăsăturile predictibile ale mediului sunt prinse într-un model global, care la rândul lui este utilizat pentru a ghida conducerea reactivă.

Motivele care au determinat interesul crescut și, deci, dezvoltarea rapidă a domeniului sunt două. Primul, roboții mobili au un potențial de aplicabilitate ridicat tocmai datorită mobilității lor. Spre exemplu, un manipulator mobil are aplicații potențiale în domeniul industrial, militar și în domeniul serviciilor, deoarece combină flexibilitatea manipulatorului cu mobilitatea platformei la care acesta este atașat. Al doilea motiv este dat de recente progrese în domeniul calculatoarelor, al senzorilor, al controlului și al tehnologiilor de navigație, progrese ce fac ca roboții mobili să devină tot mai inteligenți, din ce în ce mai autonomi și disponibili la un cost din ce în ce mai scăzut. Ca rezultat, aria de aplicabilitate a roboților mobili se lărgeste continuu.

Cercetările în domeniu au condus la apariția a trei familii de roboți capabili să se deplaseze.

Prima familie este cea a roboților mobili teleghidați. Denumirea lor în literatura de specialitate este *remotely operated vehicles* (ROV) [8]. Acești roboți sunt comandați de către un operator uman, de la distanță, prin unde radio. Prezintă avantajul protejării operatorului uman, putând acționa în spații greu accesibile sau periculoase. Dezavantajele acestui tip de robot mobil sunt două. Primul, este legat tocmai de prezența teleoperatorului. Pe lângă faptul că ocupă timpul unui operator, reclamă în plus prezența acestuia într-o vecinătate mai mică sau mai mare. Spre exemplu în cazul unor roboți teleghidați care lucrează în mediu subacvatic, este necesară prezența unei nave într-o zonă învecinată aceleia în care aceștia evoluează. Cel de al doilea dezavantaj este cel dat de către viteza finită de deplasare a undelor radio de comandă. Nu este astfel posibilă utilizarea acestui tip de robot mobil pe suprafața planetei Marte, spre exemplu. Timpul necesar undelor radio de comandă pentru a parcurge distanța Terra - Marte dus - întors este de 40 minute, timp în care robotul a navigat necontrolat. Apare astfel o limitare a spațiului de operare, la zona în care nu se fac încă sesizabile întârzierile datorate propagării undelor de comandă.

Cea de a doua familie este cea a vehiculelor ghidate. Pentru acestea denumirea consacrată în literatura este de *automated guided vehicles* (AGV) [7]. Vehiculele ghidate sunt roboți capabili să execute o deplasare de-a lungul unei traiectorii impuse de către un anumit ghidaj. Firele îngropate sunt ghidajul cel mai des folosit de către producătorii japonezi. Dar poate fi la fel de bine folosit un marcaj imprimat pe caldarâm. Obiectivul vehiculelor ghidate este acela de recunoaștere și urmărire a marcajului. Sistemele mai avansate sunt capabile chiar să evite obstacole staționare pe marcaj, prin ocolirea lor și recunoașterea marcajului de pe partea opusă. O serie de dezavantaje umbresc utilitatea acestor sisteme ghidate. În primul rând, costul ridicat al unui astfel de sistem, implicând amenajări corespunzătoare ale mediului. Nu

trebuie uitat nici faptul că păstrarea acestor marcaje în condiții de funcționare necesită un efort separat. În plus, este evident că o eventuală modificare a traseelor implică costuri suplimentare, nu tocmai scăzute.

Roboții mobili autonomi alcătuiesc cea de a treia familie. Sunt denumiți concis *roboți mobili* (RM). Din această clasă fac parte sisteme capabile să îndeplinească anumite acțiuni fără intervenția directă a unui operator uman. Referindu-ne la deplasare, așa cum am făcut și pentru cele două clase menționate anterior, roboții mobili autonomi sunt capabili să genereze o traiectorie validă între două puncte de interes, să urmărească această traiectorie fără o intervenție externă, într-un mediu natural în care nu s-au efectuat amenajări prealabile. Studiul acestor roboți mobili constituie tema prezentei teze de doctorat.

Transferul autorității la cele trei clase de roboți prezentate mai sus se face gradat. Dacă pentru clasa roboților teleghidați deciziile, în totalitate, erau luate de către operatorul uman, robotului rămânându-i doar rolul de executor, pentru clasele superioare autoritatea începe să se împartă între operator și sistem. La autovehiculele ghidate apare deja situația în care sistemul trebuie să ia anumite decizii, cum ar fi spre exemplu partea în care să ocolească obstacolul ce staționează pe traseu. În cazul roboților mobili autoritatea le este atribuită în exclusivitate. Pe baza unor algoritmi preprogramați sau pe baza cunoștințelor apriori acumulate, robotul decide singur acțiunea ce urmează a fi executată.

Pentru a completa tabloul întinderii domeniului roboților mobili se va aminti acum, pe scurt, a altă posibilă ramură. Includerea ei sub aceeași umbrelă, a roboților mobili, este însă pusă în discuție de unii cercetători. Este vorba despre protezele mecanice. La acest capitol merită amintită realizarea de ultima oră a cercetătorilor de la University of Virginia Medical Automation Research Centre, care au dezvoltat primul *robot pasiv*, după cum afirma ei. Este de fapt o structură de sprijin cu trei roți destinată persoanelor cu afecțiuni motoare. Acest robot pasiv este capabil să evite obstacolele prin comanda roții directoare, dar nu se poate deplasa decât numai dacă este împins de o persoană.

Tendința cercetărilor din domeniu conduce spre realizarea unor roboți tot mai avansați, având ca finalitate crearea unor roboți care să accepte descrieri de nivel înalt. Acestor roboți li se va comunica “ce să facă” și nu “cum să facă”.

Problema care stă în fața constructorilor este cea dată de programarea roboților astfel încât aceștia să-și îndeplinească sarcinile cât mai flexibil, într-un mod cât mai adaptiv. Lipsa informației complete despre mediu, în momentul proiectării, lipsă la care se adaugă și zgomotul inerent senzorilor, face ca sarcina programatorului să nu fie deloc ușoară. De fapt, complexitatea universului face imposibilă *“programarea totală”*. Soluția care vine să rezolve această dilemă este cea dată de noile teorii conexioniste. Acum nu mai este necesară o informație apriori, cât mai vastă despre mediu (uneori nici măcar despre el însuși, despre robot), ci robotul este învățat să învețe. Această abordare simplifică pe de o parte sarcina constructorului. În momentul actual principala dificultate o constituie modul în care să se îmbine metodologia de programare tradițională cu noile forme de adaptare prin învățare [221][223][225][227].

Clasificarea cea mai generală care poate fi făcută roboților mobili este cea care are în vedere zona specifică de activitate. Apare astfel, implicit în literatură, clasificarea în roboți destinați navigării interioare (*indoor*) și roboți pentru navigarea exterioară (*outdoor*). În ordine cronologică, firesc, primii care au apărut au fost roboții *indoor*.

Roboții *indoor* beneficiază de un număr de avantaje ce simplifică mult munca programatorului. Primul și cel mai important este cel dat de faptul că mediul de lucru este bine structurat, având forme regulate (cum ar fi spre exemplu muchiile drepte). Mai mult, în mediul de lucru pot fi adăugate în mod intenționat repere (*beacons*) care să ajute la orientarea robotului. Dar, chiar și în cazul în care acestea lipsesc, gradul ridicat de structurare reprezintă prin el însuși o formă de ghidare. Cel de al doilea avantaj este legat de predictibilitatea mediului *indoor*. Sunt situații, hale de producție spre exemplu, în care structura mediului poate fi prezisă cu un grad de acuratețe destul de ridicat. Cel de al treilea avantaj major este dat, însă, de condițiile de lucru. Astfel, în mediul interior temperatura și umiditatea sunt controlate, fiind menținute între limite rezonabile. De asemenea și iluminarea este controlată, având un caracter uniform și constant.

În contrast, roboții *outdoor* evoluează într-un mediu mai complex. Ei trebuie să evolueze într-un teren extrem de variat, ale cărui trăsături nu se repetă. În plus, mediul *outdoor* este de cele mai multe ori și inpredictibil. Toate acestea obligă la o capacitate de procesare mare, trebuie prelucrată o cantitate mare de informație pe termen îndelungat. Nu trebuie uitate nici condițiile de lucru, condiții care de această dată pot fi chiar ostile. Un robot exterior poate fi supus unei plaje de temperaturi extrem de largi, în condițiile unei umidități sporite. La toate acestea se adaugă variațiile iluminării care se poate modifica nu numai în cadrul ciclului zi-noapte ci chiar pe parcursul zilei, odată cu evoluția condițiilor atmosferice.

Pe de altă parte, priviți din punct de vedere al domeniului de aplicabilitate, literatura face distincție între alte două mari clase: roboți pentru aplicații industriale și roboți pentru servicii.

În ceea ce privește roboții pentru servicii aceștia sunt definiți ca: *dispozitive cinematice programabile care îndeplinesc servicii semiautomat sau automat* [3]. Pentru termenul servicii, literatura oferă definiția: *serviciile sunt acțiuni care nu contribuie în mod direct la fabricarea de bunuri, dar reprezintă acțiuni utile pentru oameni sau echipamente*.

Există prognoze [3] care alătură pe o scară evolutivă, roboților industriali și celor pentru servicii, roboții personali. Pe această scară a evoluției, gradul de nestructurare a mediului precum și gradul de autonomie crește de la roboții industriali spre cei pentru servicii respectiv roboții personali. Prognoza consideră roboții personali ca fiind clasa cea mai avansată, capabilă de o comunicare naturală cu mediul. Roboții personali vor putea, de asemenea, să-și reprezinte modelat universul în care evoluează și să manipuleze aceste modele în raționamente.

I.2 Structura tezei

Prezenta teză abordează problema conducerii roboților mobili. Este examinat în particular procesul de evitare a obstacolelor pe care un robot mobil le poate întâlni în deplasarea sa.

Pe parcursul tezei se va încerca prezentarea unei soluții complete, începând cu studiul traductoarelor și terminând cu unitatea de comandă, care furnizează vectorul de deplasare pentru următoarea mișcare. Datorită complexității subiectului abordat, teza a fost împărțită pe capitole care țin cont de divizarea logică a procesului de evitare a obstacolelor de către un robot mobil. Astfel:

Prezentul capitol, capitolul I, face o introducere a subiectului roboților mobili în general. Acest domeniu este actualmente atât de vast încât ideile prezentate aici reliefează doar o mică parte a sa. Pentru aprofundarea subiectului se recomandă studierea bibliografiei prezentate la finele tezei, dar și aceasta nu este decât o fracțiune din ceea ce se poate găsi astăzi în paginile dedicate pe web.

Întrucât teza abordează subiectul conducerii roboților mobili, capitolul II face o introducere în teoria sistemelor de conducere a roboților mobili. Este prezentată o succintă istorie, detalind principalele curente ce au influențat teoria conducerii roboților mobili: ierarhică, reactivă și hibridă, punctând pentru fiecare în parte particularitățile lor, cu avantajele și dezavantajele fiecăreia.

Această sumară prezentare a bogatului capitol al sistemelor de conducere a roboților mobili a fost făcută în acest capitol introductiv al tezei deoarece și cel mai recent model de conducere, cel al sistemelor hibride, este construit pe temelia conducerii reactive. Se justifică astfel efortul depus în prezenta teză pentru crearea unui comportament reflex de tipul *evită obstacolele*.

Paradigma de conducere propusă pentru aplicația prezentată pe parcursul acestei teze este cea a rețelelor neuronale artificiale. Capitolul III oferă o introducere a domeniului rețelelor neuronale artificiale, fiind trecute în revistă principalele lor avantaje. Se pune apoi accent pe prezentarea a două tipuri de rețele neuronale, anume perceptronul simplu și rețeaua competitivă simplă. Acestea două rețele sunt apoi utilizate pe parcursul capitolelor VI respectiv VII ca principale motoare de prelucrare a datelor.

Capitolul IV aduce în discuție oportunitatea utilizării senzorilor ultrasonici în robotică. Sunt trecute în revistă principalele metode de investigare acustică. Se studiază câteva din problemele ce stau la baza investigării ultrasonore, cum ar fi: natura reflexiilor, reflexiile totale, reflexiile multiple, nedeterminarea laterală și *zona de umbră*. În plus se subliniază avantajele senzorilor ce au la bază traductoare ultrasonice făcând comparații cu alte tipuri. S-a insistat în finalul capitolului IV asupra holografiei acustice în impuls, deoarece ideile avansate în această teză au la bază acest principiu.

Capitolul V este un prim capitol ce aduce pe lângă studiul teoretic și încercări practice. Este prezentat în acest capitol studiul traductoarelor ultrasonice utilizate în experimentele efectuate. Apar totodată aici, în capitolul V, primele contribuții legate de felul în care sunt utilizate traductoarele ultrasonice de bandă îngustă.

Principala contribuție a prezentei teze este introdusă în capitolul VI, anume ideea prelucrării informație câmpului ultrasonic captat cu ajutorul unei rețele neuronale. Ideea propusă se poate constitui într-o posibilă soluție la problema percepției mediului de către un robot mobil autonom, dotat doar cu senzori ultrasonici. Rezultatul obținut în urma acestei prelucrări este o aproximare în plan orizontal a punctelor de reflexie din mediul ce conține sistemul de traductoare al robotului. În contrast cu exemplele din întreaga literatură studiată, tehnica propusă *nu ocolește ecourile multiple*, ci din contră *se bazează pe apariția acestora*. Principalul avantaj al acestei soluții este dat de viteza cu care se obține imaginea mediului. Dintr-o singură salvă se obține aproximarea poziției punctelor de reflexie din întreg câmpul investigat.

Pe parcursul capitolului VII sunt trecute în revistă câteva posibile aplicații a ideii holografiei acustice în impuls bidirecțională bitraductor în domeniul roboților mobili. Este detaliată o metodă de evitare a obstacolelor, prezentându-se un model de implemetare a unui agent *evită obstacolele*, ca parte componentă a unui posibil sistem de conducere reactiv. Într-o situație reală, agentului *evită obstacolele* prezentat i se pot alătura și alți agenți, formând un sistem de conducere reactiv complex.

Prezenta teză se încheie cu capitolul VIII în care se punctează, încă o dată, contribuțiile aduse pe parcursul conceperii acesteia.

II. Sisteme de conducere a roboților mobili

Inteligența roboților mobili, dealungul evoluției lor, a cunoscut mai multe forme de organizare. Trei sunt curente principale ce definesc sistemele de conducere a roboților mobili: sisteme ierarhice, sisteme reactive și sisteme hibrid deliberativ/reactive, distincție rezultată ca urmare a modului de organizarea a proceselor interne ale robotului.

Procesele ce se desfășoară în interiorul roboților pot fi catalogate, în general, în trei clase de procese primitive: PERCEPȚIE, PLANIFICĂ și ACȚIONEAZĂ [221]. Dacă o funcție oarecare preia informația senzorială și o transformă într-o formă utilă altor funcții, atunci aceasta cade în categoria PERCEPE. O funcție care preia fie direct informația senzorială, fie rezultatul unei funcții din clasa PERCEPE, fie informație din modelul global disponibil și oferă la ieșirea sa un plan ce trebuie executat, este o funcție din categoria PLANIFICĂ. Funcțiile din categoria ACȚIONEAZĂ produc comenzi pentru actuatori, pe baza informațiilor obținute de la funcții din cele două categorii menționate anterior.

Cronologic, sistemele ierarhice au fost cele dintâi elaborate, dominând arhitectura sistemelor de conducere a roboților (mobili) în perioada 1967 - 1990 [221]. Această paradigmă de conducere are o descompunere de-sus-în-jos, încercând să mimeze modelul uman de gândire. Un robot condus în această manieră va sesiza în primul pas mediul înconjurător, va planifica în următorul pas și abia în cele din urmă va acționa.

O altă trăsătură caracteristică a paradigmei ierarhice este concentrarea informației senzoriale într-un singur model complex al mediului, model ce va putea fi apoi folosit de către funcțiile din clasa PLANIFICĂ.

Teoria conducerii ierarhice pare să nu observe că în sistemele biologice conectarea informației senzoriale direct la actuatori oferă rezultate bune (vezi exemplul organismelor biologice). În plus, conjunctura în care această paradigmă s-a născut și maturizat (procesurile perioadei respective nu ofereau o putere de calcul mare) a făcut ca cercetătorii în domeniu să caute noi forme de organizare a *inteligenței* robotice.

Apare astfel în a doua jumătate a anilor '80 teoria conducerii reactive, în parte datorită în-succeselor paradigmei ierarhice, dar și datorită afluxului de idei din științe ca: psihologia cognitivă, biologie, sau etnologie. Cel care a declanșat acest entuziasm a fost Rodney A. Brooks (1986), el fiind considerat și principalul promotor al acestei paradigme. În mod paradoxal însă, inițial paradigma reactivă a fost prezentată ca și o extensie a celei ierarhice, deși ulterior s-a demonstrat totala discordanță între cele două proceduri [221].

Teoria reactivă elimină complet partea de planificare, fluturând sloganul: "Cel mai bun model al mediului este el însuși!". Beneficiul imediat al eliminării modelului global este viteza mare de reacție și până la urmă, de deplasare. Revenind la primitivele constructive, de această dată la roboții reactivi se regăsesc doar două: PERCEPȚIE și ACȚIONEAZĂ. Robotul deține mai multe dublete PERCEPE - ACȚIONEAZĂ (denumite *comportamente*) care rulează în paralel, fiecare fiind particulară unei anumite situații.

Teoria conducerii reactive a obținut imediat succese notabile. Roboții conduși reactiv erau capabili de viteze uimitoare, mișcându-se dintr-o parte în alta cu o dexteritate egală cu cea a lui R2D2 din celebra serie "Star Wars", spre deosebire de cei conduși ierarhic care erau recunoscuți pentru viteza lor de broască-țeastoasă. Datorită acestor succese, paradigma reactivă a dominat scena roboților mobili din 1988 până în 1992.

La începutul anilor '90 s-a ajuns la concluzia că eliminarea etapei deliberative (PLANIFICĂ) este cealaltă extremă, și că soluția optimă trebuie căutată undeva între reactiv și ierarhic. Sistemele de conducere reactive prezintă avantaje clare așa că au fost menținute ca bază de plecare pentru ceea ce urma să devină paradigma de conducere hibridă deliberativ/reactivă.

Aceasta din urmă își face apariția în jurul anului 1990, constituind actualmente principala direcție de cercetare în domeniu [221]. Teoria hibridă readuce pe scenă componenta de planificare, dar o face într-o manieră care să nu deranjeze prea mult eficiența perechii PERCEPE - ACȚIONEAZĂ. Acum robotul planifică mai întâi, descompunând sarcina în obiective mai mici ce pot fi rezolvate la nivel reactiv. După încheierea primului ciclu deliberativ, planificarea și execuția decurg simultan. Descrisă în termenii blocurilor elementare paradigma hibridă are structura: PLANIFICĂ, PERCEPE - ACȚIONEAZĂ.

În acest capitol vor fi detaliate aceste paradigme de conducere. Se vor prezenta de asemenea într-un subcapitol separat (II.4) modalități de implementare ale acestor teorii, cu mecanismele de acum clasice ale rețelelor neuronale și a logicii fuzzy. Capitolul se va încheia cu un paragraf de concluzii.

II.1 Arhitecturi de conducere ierarhizate

Așa după cum s-a arătat și în partea introductivă a prezentului capitol sistemul de conducere a unui robot mobil se poate defini prin relația dintre cele trei componente primitive (PERCEPȚIE, PLANIFICĂ, ACȚIONEAZĂ), ca și prin modul în care informația senzorială este procesată în sistem.

Sistemele de conducere ierarhice au o structură de procesare secvențială, așa cum sugerează și figura 2.1 [221]. În prima fază robotul percepe lumea înconjurătoare și construiește o hartă globală a acestuia. După care cu “ochii închiși”, robotul planifică succesiunea de comenzi necesare îndeplinirii sarcinii curente. În faza finală, robotul execută prima comandă din setul de comenzi stabilit anterior.

Succesiunea descrisă mai sus reprezintă un ciclu PERCEPȚIE - PLANIFICARE - ACȚIUNE, ciclul ce se repetă continuu. Astfel, după încheierea sa, “ochii” sunt redeschiși pentru a detecta consecințele acțiunii anterioare. Se reia apoi faza de planificare a setului de comenzi, chiar dacă acestea nu s-au schimbat și se încheie ciclul cu o nouă acțiune.

Așa după cum se arată în figura 2.1, percepția în cadrul arhitecturilor de conducere ierarhizate este monolitică: toată informația senzorială este fuzionată într-un model unic, global, utilizat mai apoi de către blocul de planificare.

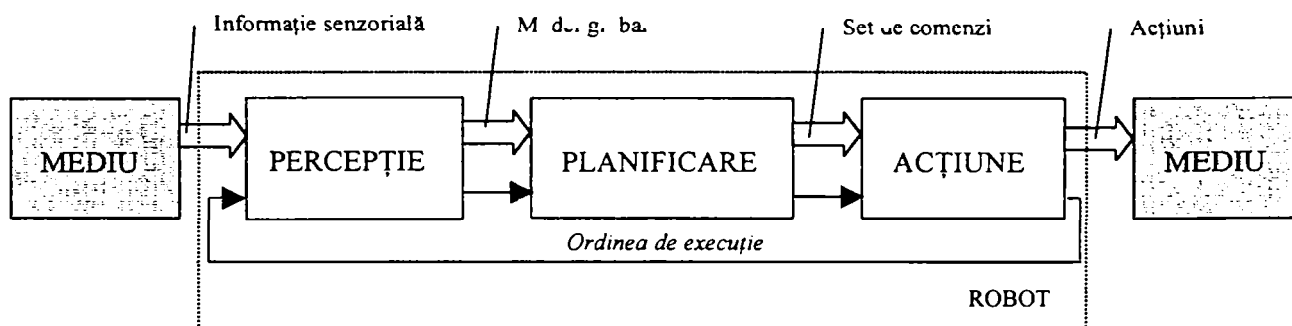


Figura 2.1 Schița unui sistem de conducere ierarhizat. Este prezentat atât fluxul informațional (cu săgeată dublă) cât și ordinea de execuție a blocurilor.

Acest model global este un model al mediului (*world model*) și reprezintă un concept larg, deoarece robotul include aici întreaga lume înconjurătoare lui. Un asemenea model global poate cuprinde:

- O reprezentare *a priori* a mediului în care robotul operează (spre exemplu, o hartă a clădirii);
- Informația senzorială captată;
- Orice cunoștințe adiționale necesare la îndeplinirea sarcinilor.

Din păcate crearea unei astfel de reprezentări globale, care să cuprindă toate aceste categorii de informații reprezintă realmente o problemă. Chiar presupunând că ar fi posibilă alcătuirea unei astfel de reprezentări a-tot-cuprinzătoare, utilizarea ei pentru ghidarea navigării în timp real, unde sunt necesare reacții rapide nu este posibilă. Acest aspect, corelat cu puterea de calcul limitată a anilor '60, a condus la vitezele mici de deplasare a roboților mobili ai acelor timpuri ("*sub-turtle*" speed).

Dintre structurile de conducere ierarhizate, cea propusă de Meyster în 1982, sub denumirea de Nested Hierarchical Controller (NHC) este una din cele mai reprezentative (vezi figura 2.2). NHC este o structură de conducere specializată în planificarea și controlul traiectoriei unui robot mobil.

Se pot identifica cu ușurință în schema din figura 2.2 componentele elementare: PERCEPȚIE, PLANIFICARE și ACȚIUNE. Robotul adună întreaga informație senzorială la intrarea blocului primitiv PERCEPȚIE. Observațiile despre mediu sunt acumulate aici într-un model global, care poate conține așa cum s-a specificat deja și informație *a priori*.

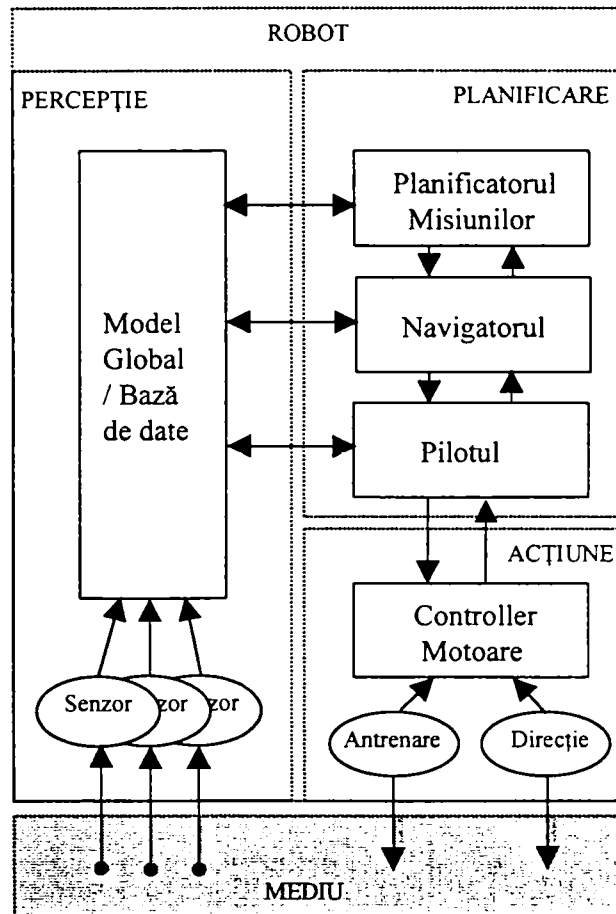


Figura 2.2 Structura de conducere ierarhizată Nested Hierarchical Controller (NHC).

După ce modelul global a fost creat, sau mai târziu actualizat, robotul poate trece la planificarea acțiunilor sale. Pentru planificarea și controlul traiectoriei, blocul PLANIFICARE a fost sub-divizat în trei componente: Planificatorul Misiunilor, Navigatorul și Pilotul. Fiecare din aceste trei componente are acces la modelul global pentru a-și putea îndeplini rolul.

Pilotul oferă la ieșirea sa vectori viteză (“întoarce la stânga”, “mergi înainte cu 0.6m/s”, etc.) care sunt transmiși controllerului sistemului de acționare al robotului. La nivelul acestuia,

vectorii viteză sunt convertiți în profiluri de viteză pentru o deplasare lină. Controller-ul motoarelor împreună cu actuatorile constituie cel de al treilea bloc primitiv: ACȚIUNE.

Descompunerea PLANIFICATORULUI reprezintă totodată atât elementul caracteristic al acestei structuri de conducere cât și elementul său pozitiv. Planificatorul Misiunilor poate primi o sarcină de la un operator uman sau poate crea una, cum ar fi spre exemplu: “culege cutia aruncată și depozitează-o în coșul de gunoi”. În același timp Planificatorul Misiunilor are și sarcina să traducă noțiuni de genul: “cutie” sau ”coș de gunoi” în termeni care să poată fi înțeleși de către nivelul inferior al Navigatorului. Planificatorul Misiunilor definește astfel implicit poziția actuală și cea finală a robotului. Navigatorul preia toate aceste informații și generează o traiectorie de la locația curentă la țintă. Este generat de fapt un șir de puncte de trecere care unite prin segmente de dreapta reprezintă traiectoria ce trebuie urmată. Primul segment al acesteia este transmis apoi Pilotului care determină ce acțiuni sunt necesare pentru parcurgerea lui.

Pentru cazul unui mediu static și cunoscut, când nimic nu intervine în marșul robotului, ciclul se completează după cum urmează: la încheierea parcurgerii primului segment Pilotul raportează acest fapt Navigatorului, care procesează următorul segment din listă. Operațiile se desfășoară în continuare în mod similar, până când după parcurgerea ultimului segment Navigatorul confirmă Planificatorului Misiunilor încheierea deplasării. La rândul său Planificatorul Misiunilor desemnează eventual o nouă sarcină.

Dar ce se întâmplă dacă în calea robotului apare un obstacol? Spre deosebire de alte structuri ierarhizate de conducere, în cazul sistemului NHC robotul nu se deplasează cu “ochii închiși”. Chiar pe parcursul deplasării robotul scanează permanent mediul și actualizează continuu modelul acestuia.

Dacă pe parcursul traseului robotul întâlnește vreun obstacol, Pilotul invocă Navigatorul. Este sarcina acestuia din urmă să definească un nou traseu funcție de noua înfățișare a modelului mediului. Când acest proces este încheiat, mișcarea este reluată în maniera descrisă anterior.

Dintre avantajele structurii NHC trebuie remarcată calitatea acesteia de a îmbina partea de planificare cu cea de deplasare. Robotul construiește un traseu, începe să-l străbată și dacă mediul se modifică, atunci schimbă și traseul. De notat că descompunerea ierarhică este făcută atât ca nivel al inteligenței, cât și ca scop. Planificatorul Misiunilor este mai “inteligent” decât Navigatorul, care la rândul său este mai “inteligent” decât Pilotul. Sau altfel privite lucrurile: Planificatorul Misiunilor poate procesa o informație cu un caracter mai abstract decât Navigatorul, și așa mai departe.

Dar, tocmai gradul mare de specializare în rezolvarea sarcinilor de deplasare este până la urmă principalul dezavantaj al acestui sistem de conducere. Este mai puțin clar care ar fi rolul blocurilor din secțiunea PLANIFICĂ în cazul ridicării unei cutii spre exemplu.

Dacă se extrapolează observația anterioară se regăsește o caracteristică a roboților construiți până în 1990, și anume gradul lor ridicat de specializare pentru o anumită sarcină. Tocmai de aceea portabilitatea (adică capabilitatea de adaptare) a fost serios pusă sub semnul întrebării la roboții perioadei respective.

Dacă sistemul de conducere ierarhic a avut vreun avantaj, atunci acesta este acela al ordonării relației dintre cele trei blocuri primitive. Principalul dezavantaj rămâne totuși partea de planificare. La fiecare ciclu robotul actualiza un model global complex și re-executa partea de planificare. Atât algoritmi cât și puterea de calcul disponibilă la acea dată nu puteau face față volumului mare de informație de procesat. Efectul imediat a fost viteza extrem de mică de deplasare (cca. 4m/h).

Definitoriu pentru sistemele ierarhice este despărțirea PERCEPȚIEI de ACȚIUNE, aspect care elimină orice acțiune declanșată de vreun stimul senzorial. De asemenea, dependența de un model al mediului este o altă caracteristică definitorie. Această dependență a creat mari probleme deoarece robotul făcea față cu greu oricărei modificări a mediului, sau incertitudini în modelarea acestuia. Întru-cât posibilele incertitudini au un spectru larg (zgomot senzorial, semantică bogată, erori ale actuatorilor) robotul era vulnerabil.

II.2 Conducerea comportamentală

Progresul în domeniul roboților mobili, în anii '70 a fost lent. Acest fapt s-a datorat cumulării efectelor unei serii de factori cum ar fi: costul ridicat la construirea unui robot, puterea limitată de calcul disponibilă la acea oră și nu în ultimul rând, datorită teoriei de conducere ierarhizate folosită. Reacția "negativă" care a închis ciclul a fost dată de insatisfacțiile generate de rezultatele în domeniu.

Începutul anilor '80 a găsit comunitatea roboților mobili într-un impas. Ce lipsea oare roboților pentru a putea fi mai versatili, mai robuști la modificările mediului? Soluția a fost găsită în "curtea vecină" a agenților naturali. O serie întreagă de cercetători, dintre care se disting Möravec și mai ales Arbib, au început să investigheze modele ale comportamentului agenților animalii - studiate până atunci doar în biologie și științe cognitive - în speranța de a găsi un model de conducere mai viabil [221].

Tot în acea perioadă Valentino Braitenberg își face cunoscute cercetările în cartea: "Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology". Întregul volum prezintă o serie de idei și mici experimente despre modul în care ar putea evolua inteligența artificială a roboților. Experimentele prezentate pornesc de la sisteme de comandă simple, bazate pe perechea PERCEPȚIE - ACȚIUNE. Ideile sale au fost intuitive și păreau să copieze principiile de evoluție a primatelor.

Aceste încercări nu au făcut altceva decât să deschidă o nouă cale, anume cea a *conducerii reactive*. Studiul științelor biologice, a unor noi metode de organizare și a unui nou mod de

dobândire a inteligenței, a condus în cele din urmă la nașterea, în mijlocul anilor '80, a sistemelor de *conducere comportamentală* (*Reactive Paradigm*).

II.2.1 Fundamentul biologic al conducerii comportamentale

De ce ar trebui studiate științe ca biologia, etnologia sau psihologia cognitivă? Chiar dacă există voci care se ridică împotriva acestui mod de abordare în încercarea de a construi noi tehnici de comandă, nu trebuie uitată "experiența" agenților biologici. Evoluția vieții a condus la adaptarea remarcabilă și uneori chiar surprinzătoare a agenților biologici la mediul lor natural. Durata îndelungată (milioane de ani!) în care a avut loc evoluția agenților naturali este un atu imbatabil [221].

Studiul agenților biologici oferă un punct de plecare, un exemplu. Studiul lor poate oferi confirmări directe asupra teoriilor propuse. Astfel, doar prin faptul că un agent natural procedează într-un anumit fel sau efectuează o anumită acțiune se poate constitui prin ea însăși într-o validare.

Nu trebuie însă uitate calitățile "implicite" ale agenților naturali, care de multe ori trezesc sentimente de gelozie cercetătorilor din domeniului roboților mobili. Astfel, capacitatea de fuzionare a informației senzoriale a agenților naturali este încă un deziderat abia întrezărit în cazul unui robot. De asemenea, în timp ce agenții actuali fac uz de calități moștenite, roboții mobili se bazează încă pe programe compilate. Continuând această serie de observații trebuie subliniat faptul că agenții biologici evoluează într-un mediu deschis, complet nestructurat, în timp ce roboții mobili ai prezentului sunt încă "închiși" în medii puternic structurate.

Presupunând că a fost acceptată ideea studiului agenților naturali, cum este totuși posibilă compararea a două sisteme atât de diferite ca cele două "forme de viață" naturală și respectiv artificială? Prima are la bază "tehnologia" carbonului pe când cea de-a doua pe cea a siliciului. Soluția acestei probleme este oferită de conceptualizarea celor două sisteme și compararea lor la un nivel abstract.

Un prim pas pe calea abstractizării este acela al definirii noțiunii de agent. Conceptul de agent aparține inteligenței artificiale și permite studiul proprietăților inteligenței fără a detalia modul în care agentul a câștigat aceasta experiență. Astfel, un agent este o entitate independentă, de sine stătătoare. Acesta deține propriul creier (sistem de conducere) și este capabil să interacționeze cu mediul înconjurător. Este în plus capabil să "înțeleagă" ceea ce se întâmplă în jurul lui și chiar mai mult are conștiință de sine.

Orice agent este deci capabil să dezvolte o serie de acțiuni caracteristice, de comportamente. Noțiunea de *comportament* (*behavior*) este cel de-al doilea pas pe calea abstractizării propuse. Comportamentul este celula elementară a inteligenței artificiale conform teoriei cognitive. Un comportament este în cele din urmă un mod de a transforma informația senzorială în acțiuni ale actualelor.

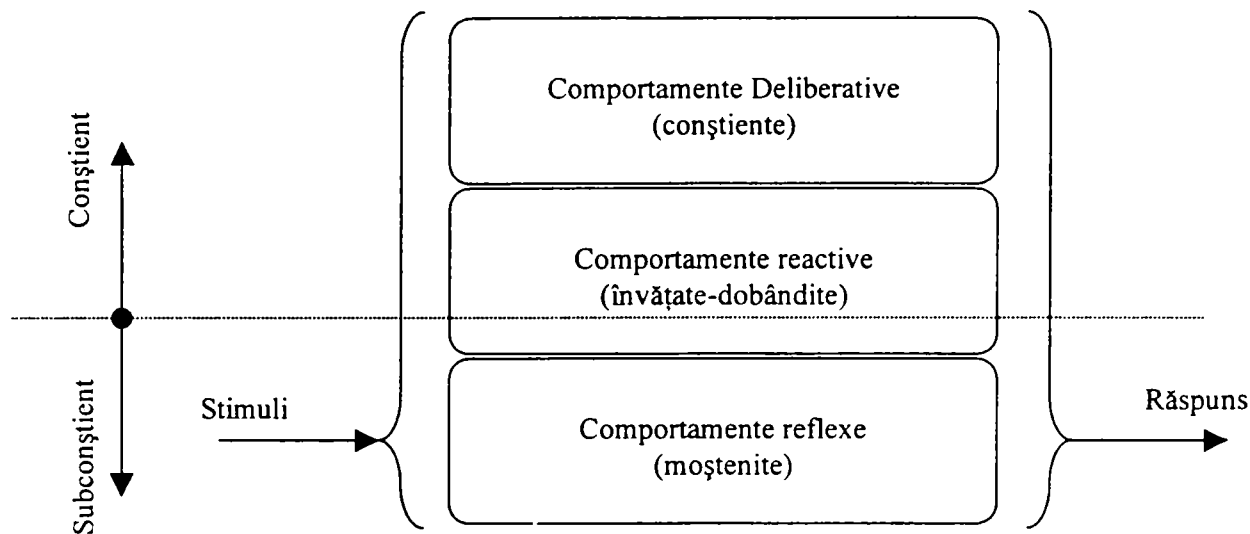


Figura 2.3 Împărțirea comportamentelor.

Conform teoriei inteligenței artificiale comportamentele se pot diviza în trei mari categorii (figura 2.3) [221]:

- *Comportamente reflexive*, sunt cele ce răspund direct stimulului din mediu, fiind dobândite prin moștenire. Un exemplu al acestui fel de comportament este mișcarea involuntară a piciorului atunci când se aplică o lovitură ușoară sub genunchi. Comportamentele reflexive sunt generate în principal de excitația unui neuron din zona de percepție și transmiterea excitației la efector, obținându-se în aceste mod cel mai scurt timp de răspuns posibil.
- *Comportamentele reactive*, sunt cele care se deprind prin învățare și care se execută apoi fără conștientizarea acțiunilor, dar pot fi controlate la o adică prin conștientizarea lor. Această categorie mai este cunoscută și sub denumirea de "memorie a mușchilor". Exemple de comportamente reactive sunt: mersul, înotul și mersul cu bicicleta.
- *Comportamentele conștiente*, constituie cea de-a treia clasă și sunt de fapt acțiuni complexe, compuse prin "concatenarea" unor comportamente dobândite.

Dintre cele trei categorii de comportamente enumerate anterior, prima - cea a comportamentelor reflexive - atrage în mod deosebit atenția deoarece aceasta nu implică nici un fel de model al mediului. Se bazează în schimb pe o filozofie de genul: dacă percepi stimulul, acționează. În cazul unui robot acest mod de operare este benefic din două puncte de vedere [221]:

- elimină modelul complex al mediului, ne mai fiind necesară o capacitate mare de memorare și procesare, și
- asigură un răspuns prompt, dată fiind natura conexionistă a acestora.

La rândul lor, comportamentele reflexive pot fi subdivizate în [221]:

- *Reflexe (reflexes)* când răspunsul durează doar atât cât durează stimulul, iar intensitatea răspunsului este proporțională cu intensitatea stimulului,

637.720
369 C

- *Taxe (taxes)* unde răspunsul la stimul determină deplasarea înspre (sau dinspre) o locație, de obicei locația stimulului, și
- *Clișee (fixed-action patterns)* unde acțiunea durează mai mult decât durata stimulului. Deplasarea unui prădător înspre pradă, chiar dacă pentru scurte momente de timp aceasta este ascunsă de copaci, este un exemplu de comportament reflexiv de tip clișeu.

Trebuie menționat aici că împărțirea anterioară a comportamentelor reactive nu este mutual exclusivă. Chiar ultimul exemplu prezentat este de fapt o îmbinare între un comportament de tip tax (poziția prăzii) și unul de tip clișeu (obținerea pe moment a prăzii de către copaci nu anulează acțiunea).

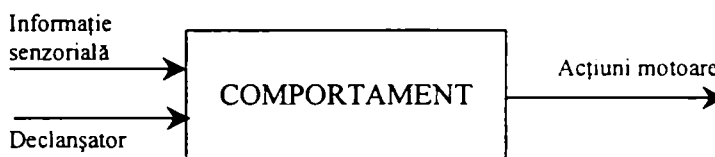


Figura 2.4 Comportament cu declanșare.

Modelarea comportamentelor în teoria inteligenței artificiale adaugă fiecărui comportament un mecanism de declanșare (figura 2.4). Această modelare pare a fi rezonabilă, pentru ca un anumit comportament să poată fi declanșat doar în anumite condiții. Făcând uz de același exemplu al animalului de pradă, acesta nu va recurge la acțiuni de vânatoare până când nu apare senzația de foame care în acest caz este declanșatorul comportamentului de vânător.

Astfel, percepția mediului (incluzând starea internă a robotului) în sistemele reactive are două roluri. Fie ghidează comportamentul, prin furnizarea continuă a datelor din mediu, fie declanșează comportamentul.

Comportamentele pot fi dobândite în câteva moduri. În primul rând acestea pot fi moștenite. Cel mai potrivit exemplu este aici reflexul de hrănire moștenit al tuturor agenților naturali. Există chiar exemple de secvențe de comportamente moștenite, cum ar fi spre exemplu ciclul de împerechere al păsărilor. Există cazuri în care cuibul nu este construit până la formarea perechii. Ouăle nu sunt depuse până când cuibul nu este gata. Iar această succesiune nu este schimbată niciodată.

O altă formă de moștenire a comportamentelor este cea de moștenire cu memorare. Un agent se poate naște spre exemplu cu un comportament ce trebuie inițializat în funcție de condițiile particulare ale agentului. Cazul albinelor este un potrivit exemplu în acest sens. Fiind născute în cuiburi (nu contează care) albinele trec printr-o perioadă de învățare a felului în care cuibul lor arată din exterior. În acest proces albina efectuează câteva zboruri scurte de ordinul metrilor, îndepărtându-se și apoi revenind la cuib. Începe cu un zbor perpendicular pe urdinișul cuibului și continuă cu zboruri oblice din ce în ce mai lungi. Interesant este însă că

acest procedeu de memorare a locației este efectuat de fiecare dată după ce cuibul (stupul) a fost deplasat [228].

Un al doilea mecanism de dobândire a comportamentelor, după cel de moștenire, este acela prin învățare. Comportamente dintre cele mai complexe sunt dobândite în acest fel. Exemplul primatelor, dar nu numai, este grăitor prin el însăși. Puii acestora petrec o bună perioadă din viața lor învățând.

Modurile prin care comportamentele pot fi dobândite sugerează felul în care un robot ar putea fi instruit. La una din extreme se situează varianta în care întregul bagaj de cunoștințe și aptitudini este moștenit, sau altfel spus preprogramat printr-un cod compilat. Dacă aceasta este varianta aleasă atunci cade în sarcina "programatorului" să prevadă toate situațiile posibile pe care robotul le-ar putea întâlni. Experiența filozofiei de conducere ierarhizată a dovedit însă că nu aceasta este calea care trebuie urmată.

La cealaltă extremă se găsește varianta în care robotul va învăța toate cunoștințele necesare. Chiar dacă tentantă din punct de vedere al constructorului robotului, care scapă astfel de un efort considerabil, această variantă nu se dovedește a fii viabilă pentru utilizator. Timpul necesar dobândirii unor cunoștințe utile ar fi prea îndelungat pentru ca un potențial utilizator să fie interesat de un astfel de robot.

Balanța ar putea fi echilibrată prin moștenirea a cât mai multor comportamente, pentru a accelera faza de învățare și pentru a face robotul cât mai repede util. Este esențial însă ca acesta să-și păstreze interesul pentru dobândirea a noi cunoștințe și aptitudini pentru întreg ciclul lui de viață.

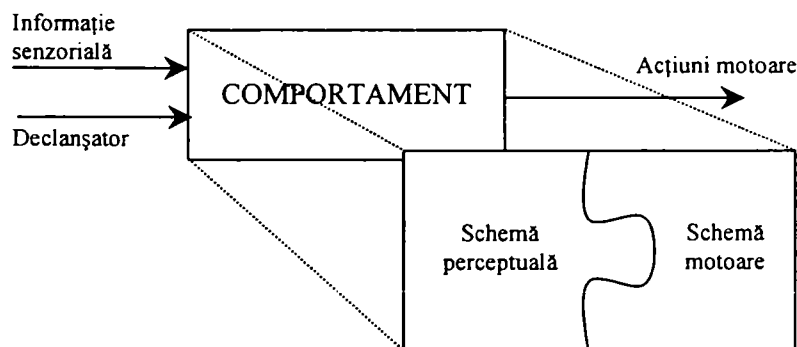


Figura 2.5 Descompunerea comportamentelor într-o schemă de percepție și una motoare.

Revenind pe aceeași cale a abstractizării propuse la începutul prezentului capitol, comportamentele pot fi asimilate cu *conceptul de schemă*. Conform psihologiei o schemă reprezintă unitatea mișcării. Ea conține atât cunoștințe despre cum să perceapă sau cum să (re)acționeze (cunoștințe, modele, structuri de date), precum și metodele computaționale prin care să conecteze percepțiile la acțiuni.

Ceea ce face conceptul de schemă atât de atrăgător este asemănarea lui, până la identitate, cu teoria programării orientată pe obiecte. Un obiect reprezintă o identitate încapsulată care deține atât date, cât și metode de prelucrare a acestora. Se poate beneficia deci de un mediu de lucru puternic, de o unealtă bine stăpânită.

Privit din acest punct de vedere, un comportament poate fi alcătuit din două scheme, o schemă de percepție și una motoare (vezi figura 2.5). Schema motoare reprezintă modelul posibilelor acțiuni fizice, pe când schema perceptuală modelează partea de detecție. În figura 2.5 se sugerează cele două scheme componente ale unui comportament, care fac parte din aceeași unitate funcțională, neputând fi separate.

Concluzionând, principiile care ar putea fi preluate din "experiența" agenților naturali sunt următoarele [221]:

- Agenții artificiali ar trebui să procedeze la descompunerea sarcinilor complexe în componente simple realizabile cu comportamente independente care să conecteze rapid informația senzorială la acțiuni;
- Pentru a simplifica partea de procesare a informației senzoriale ar trebui considerată doar acea parte care este specifică comportamentului (percepere orientată spre scop);
- Comportamentele nu sunt interdependente, dar ieșirilor lor pot fi combinate pentru obținerea unui comportament general aparent inteligent;
- Pentru a simplifica problema conduceri și coordonării, comportamentelor li se poate implementa un mecanism de declanșare.

II.2.2 Caracteristicile structurilor de conducere comportamentală

Sistemele de conducere comportamentală au apărut la mijlocul anilor '80 datorită insatisfacțiilor generate de sistemele de conducere ierarhice și datorită unui aflux de idei provenit din partea etnologiei.

Principala critică adusă sistemelor ierarhice a fost structura lor orizontală (vezi figura 2.1). În contrast, studiul etnologiei arată ca sistemele inteligente naturale au o structură verticală.

Într-o astfel de structură verticală, un agent debutează cu comportamente elementare pentru supraviețuire și adaugă peste acestea altele, mai complicate. Nivelurile inferioare sunt fie reutilizate, fie ieșirile lor sunt suprascrise de nivelurile superioare. Se creează în acest mod căi paralele pentru obținerea unor manifestări mai sofisticate. Căile paralele pot fi privite ca și niveluri de competență suprapuse unul peste altul. Fiecare din niveluri are acces independent la informația senzorială și de asemenea la actuatori.

Paralelismul acestei structuri adaugă un plus de robustețe. Dacă unul din nivelurile superioare se defectează, rămân active cel puțin cele inferioare. Bineînțeles că va rezulta un comportament mai puțin inteligent, dar cel puțin se menține un grad oarecare de funcționalitate.

La apariția sa, sistemul de conducere comportamentală a fost întâmpinat cu suspiciune din partea utilizatorilor, mai cu seamă a celor implicați în structuri militare sau medii critice cum sunt cele ale uzinelor nucleare-electrice. Acest resentiment s-a datorat tocmai filozofie de funcționare a conducerii comportamentale, care nu poate să garanteze care din comportamente va governa conducerea robotului la un moment dat. Nu este posibilă, deci, prezicerea modului de manifestare a robotului, așa cum este posibilă în cazul unui sistem de conducere precompilat unde succesiunea instrucțiunilor determină în mod univoc acest comportament.

Totuși, datorită vitezei mari de reacție, care a condus nemijlocit la obținerea unor viteze mari de îndeplinire a misiunilor, sistemul de conducere comportamentală a fost larg acceptat în cele din urmă.

Principala caracteristică a sistemelor comportamentale constă în obținerea unei manifestări globale prin combinarea comportamentelor elementare. Comportamentele sunt în cele din urmă conectări ale intrărilor senzoriale la actuatore. Matematic privite, ele pot fi asemănată cu funcții de transfer.

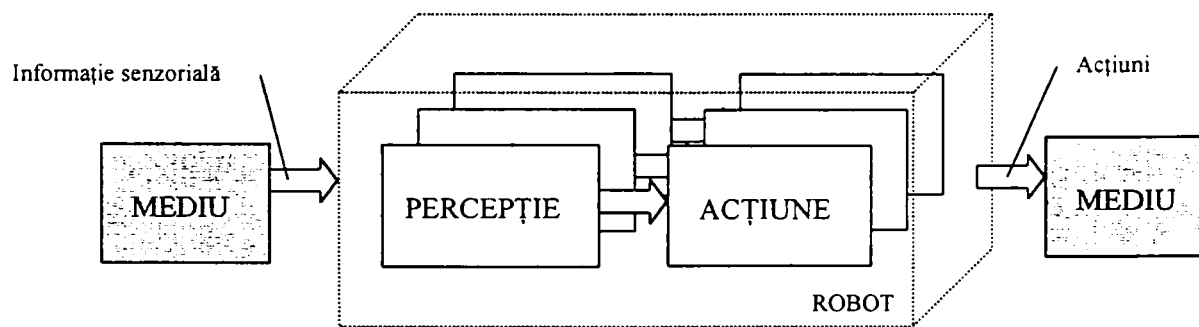


Figura 2.6 Schița unui sistem de conducere comportamental.

Sistemele de conducere reactivă au eliminat pur și simplu partea de PLANIFICARE a sistemelor ierarhice (vezi figura 2.1). Aici PERCEPȚIA și ACȚIUNEA sunt direct legate, așa după cum figura 2.6 sugerează. Modul în care robotul operează va rezulta din combinarea secvențială sau concurentă a comportamentelor elementare. Primele sisteme comportamentale au promovat ideea: un senzor - un comportament. Ulterior pentru a obține componente mai complexe s-a acceptat varianta în care același comportament strânge informație de la mai multe tipuri de senzori, sau același senzor furnizează date mai multor comportamente, dar fiecare comportament are propria sa schemă de procesare. În oricare din variantele amintite comportamentele lucrează în paralel, fără a avea cunoștință unul de existența altuia.

Informația senzorială este disponibilă imediat schemelor perceptuale ale comportamentelor care efectuează doar atâta procesare cât este necesară. Dacă se utilizează un atribut "evident" (ușor de extras) atunci partea de percepere se execută practic instantaneu și acțiunea survine

rapid. Aceasta este diferența fundamentală față de sistemele de conducere ierarhizate, datorată tocmai lipsei modelului global.

Se pot extrage câteva conotații ale conducerii comportamentale [221]:

- Prima conotație a roboților reactivi este răspunsul lor rapid. Conectarea strânsă a percepției cu acțiunea face ca acțiunile roboților să se poată desfășura în timp real. Pentru aceasta, comportamentele se implementează hardware sau cu un minim de cod, conform unui algoritm simplu.
- Cea de-a doua conotație este legată de lipsa memoriei la roboții reactivi. Aceasta conduce la un răspuns pur reactiv. În practică, se apelează totuși la un răspuns ce durează ceva mai mult decât stimulul în sine. Ceea ce este important însă, este că robotul răspunde la modificările din mediu, copiind modul de lucru cu declanșare a comportamentelor întâlnite în natură și nu se bazează pe o informație stocată, încercând să-și aducă aminte ce ar trebui să facă.

Caracteristicile arhitecturilor reactive sunt următoarele [221]:

- Roboții sunt agenți dedicați unui anumit mediu, fiind parte integrantă a acestuia. Pentru că robotul are propriul scop și propriile intenții, el modifică mediul din care face parte. Va primi însă imediat un “răspuns” din partea mediului prin intermediul senzorilor săi. Pentru a sublinia această caracteristică anumiți cercetători ai domeniului consideră ca ei dezvoltă *roboți ecologici*.
- Comportamentele reprezintă celula sistemului reactiv. Manifestarea de ansamblu este rezultatul combinării comportamentelor elementare. Comportamentele elementare evoluează independent și în paralel. Nu există o componentă a sistemului care să decidă “cine” și “când”.
- O structură reactivă pură nu permite decât o percepere locală a mediului. Orice percepere care reclamă o reprezentare face uz de un sistem de referință egocentric.
- Aceste sisteme reactive, prin natura lor, sunt modulare, permițând descompunerea fiecărei sarcini în comportamente componente.
- Este acceptată ca dovadă de viabilitate și adesea citată asemănarea cu lumea agenților naturali.

Uneori, elaborarea unui sistem reactiv este denumită *programare comportamentală*, întrucât comportamentul este elementul de bază al construcției.

Iată și câteva avantaje ale sistemelor de conducere reactive [221]:

- Comportamentele sunt prin ele însele modulare. Consecința imediată este ușurința cu care se poate testa sistemului, prin testarea pe porțiuni.
- Comportamentele sprijină dezvoltarea incrementală prin adăugarea de noi niveluri. Consecință: un robot este cu atât mai inteligent cu cât are mai multe comportamente.
- Implementarea comportamentală se pretează la lucrul în timp real, ne-având pretenții la o putere mare de calcul. Consecință: reacțiile unui astfel de sistem sunt prompte.

Există o multitudine de arhitecturi ce implementează o conducere comportamentală. Dintre acestea, două sunt mai cunoscute, fiind și cele mai bine tratate teoretic, anume: *incluziunea (subsumtion)* și *câmp potențial (potential field)*.

Așa după cum îi arată și numele, incluziunea, implementează filozofia comportamentală având la bază un mecanism de suprascriere a ieșirilor nivelurilor inferioare de către cele superioare.

Varianta câmp de potențial are o altă abordare. Se impune ca toate comportamentele să furnizeze o ieșire compatibilă cu noțiunea de vector. Dacă această condiție este îndeplinită atunci comportamentul per ansamblu se obține ușor prin sumarea ieșirilor modulelor independente.

Există desigur și alte implementări, după cum s-a menționat anterior. În Europa se preferă utilizarea unui *cod de legi* pentru combinarea ieșirilor comportamentelor individuale. La aceasta se mai adaugă și o variantă care utilizează logica fuzzy la combinarea ieșirilor sau una de genul învingătorul-ia-totul. Dar aceste din urmă implementează sisteme cu totul particulare, având o valoare mai scăzută ca și teorie general aplicabilă.

II.2.3 Arhitectura de tip incluziune

Această arhitectură a fost promovată începând cu 1986 de Rodney Brooks, și este la ora actuală arhitectura comportamentală predominantă [221]. Ea are un caracter pur reactiv.

De cele mai multe ori implementarea ei este pur hardware utilizând mici procesoare. De fapt parte din succesul acestei arhitecturi se datorează și avansului tehnologic din anii '80.

Principalele caracteristici ale arhitecturii de tip incluziune sunt [221]:

- Comportamentele sunt grupate în niveluri de competență. Se face astfel o împărțire pe niveluri de inteligență a comportamentelor. Primele niveluri încorporează funcții de supraviețuire (de genul evită obstacolele), în timp ce nivelurile superioare realizează funcții orientate pe sarcini (ca ridicarea unei hați). Fiecare nivel poate fi privit ca și un comportament abstract, dedicat unei anumite sarcini.
- Modulele superioare pot să suprascrie (includă) ieșirile modulelor imediat inferioare. Comportamentele operează întotdeauna în paralel și independent. Prin includerea nivelurilor inferioare se simulează un mecanism de genul învingătorul-ia-totul, unde învingătorul este întotdeauna nivelul superior.
- Se evită deliberat orice reprezentare internă. Se presupune că întreaga informație necesară la un moment dat este disponibilă din mediu. Se subliniază că dacă robotul depinde de un model intern al mediului se poate ajunge în situații critice când acesta diverge față de realitatea înconjurătoare.
- Îndeplinirea unei sarcini se face prin activarea nivelului corespunzător.

În figura 2.7 este prezentată o diagramă a unui sistem de tip incluziune, unde se poate observată clar împărțirea pe niveluri. Nivelul zero corespunde unui robot capabil să evite în deplasarea sa obstacolele. Este presupus că robotul este echipat cu un sonar care are un număr oarecare de detectoare capabile să furnizeze distanța pe direcția lor până la cel mai apropiat obstacol. De asemenea robotul mai are două actuatori: unul pentru deplasare și un al doilea pentru conducerea robotului.

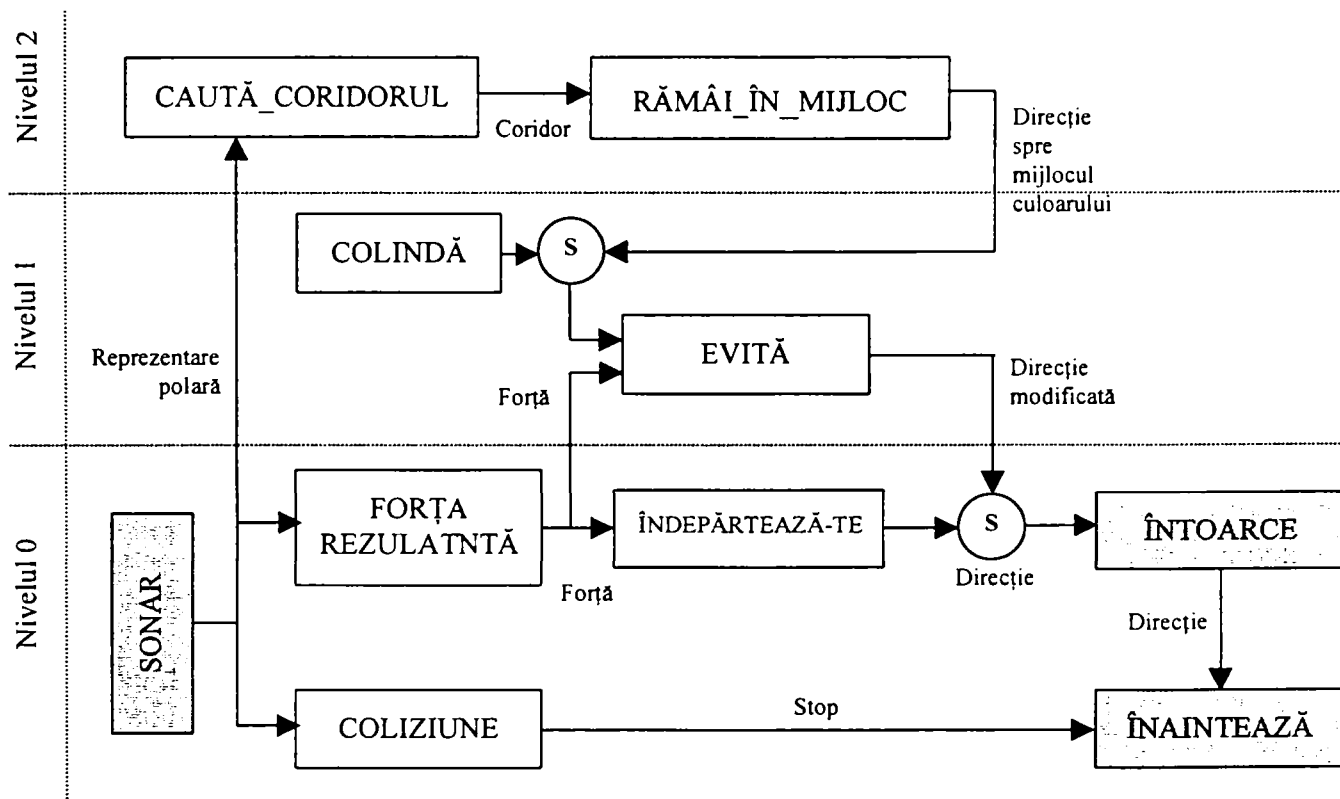


Figura 2.7 Diagrama unui sistem de tip incluziune

Între aceste două extreme ale nivelului zero sunt inserate două comportamente. Primul este denumit **COLIZIUNE**. Dacă detectorul poziționat înspre înainte raportează un obstacol la o distanță mai mică decât un prag prestabilit, atunci modulul coliziune oprește deplasarea înspre înainte a robotului. Ar fi de menționat aici că acest prim și elementar comportament conține în același bloc atât schema de percepție cât și pe cea motoare.

La același nivel se găsește un al doilea comportament ce evită obstacolele. Acesta este însă compus din două blocuri distincte, unul pentru schema perceptuală și altul pentru cea motoare. Blocul schemei perceptuale este denumit **FORȚA REZULTANTĂ**. El preia citirile detectoarelor ce "încing" robotul și le tratează ca fiind forțe repulsive ce îndepărtează robotul de obstacole. Cu cât distanța raportată de un detector este mai mică cu atât forța repulsivă respectivă este mai puternică. Blocul oferă la ieșirea sa rezultanta forțelor repulsive, sugerând astfel direcția ce trebuie urmată.

Vectorul repulsiv găsit este oferit de schema motoare ÎNDEPARTEAZĂ-TE a actuatorilor.

Este interesant de notat că un robot dotat doar cu acest prim nivel de competență ar evita obstacolele, dar în același timp nu ar manifesta o "dorință" de deplasare. Dacă un astfel de robot este plasat într-un mediu lipsit de obstacole el rămâne nemișcat. Dacă însă un alt mobil s-ar apropia de acest robot, el s-ar întoarce și s-ar deplasa pe direcția după care obiectul mobil s-a apropiat de el.

Pentru a adăuga ipoteticului robot, descris mai sus, capacitatea de a investiga mediul mai trebuie adăugat un nivel de competență. Acest nou nivel va conține un modul ce va genera direcții aleatoare de deplasare la fiecare câteva zeci de secunde. Elementul aferent din figura 2.7 este blocul COLINDĂ. Direcțiile generate vor fi prezentate tot ca și vectori.

Pentru ca adăugarea blocului COLINDĂ să aibă efect, trebuie ca ieșirea sa să controleze cumva actuatorii robotului. Dacă s-ar trece la suprimarea directă a ieșirii modulului ÎNDEPARTEAZĂ-TE cu vectorii aleatori generați de COLINDĂ, s-ar pierde capacitatea de evitare a obstacolelor deoarece modulul DIRECȚIE acceptă doar o singură intrare.

Pentru a depăși această dificultate s-a introdus încă un modul la nivelul 1, anume modulul EVITĂ. EVITĂ preia de la modulul FORȚA_REZULTANTĂ forța repulsivă și de la modulul COLINDĂ noua direcție dorită de deplasare. Prin însumarea celor două componente, modulul EVITĂ furnizează direcția ce trebuie urmată, care înglobează atât evitarea obstacolelor cât și "dorința" de a investiga mediul înconjurător.

Rămâne să se decidă în continuare care modul va comanda actuatorii, întrucât există acum doi vectori disponibili, cel oferit de modulul ÎNDEPARTEAZĂ-TE și cel al modulului EVITĂ. Aplicarea incluziunii soluționează dilema. Dacă modulul EVITĂ are o ieșire validă atunci ieșirea modulului ÎNDEPARTEAZĂ-TE este inhibată, iar actuatorii sunt comandate de EVITĂ. Ori de câte ori, și indiferent de motiv (există o rată mai scăzută de adaptare sau poate defectare) modulul superior EVITĂ nu oferă o ieșire validă, actuatorii sunt totuși controlate de ÎNDEPARTEAZĂ-TE.

Se consideră în continuare adăugarea unei noi competențe, și anume aceea a urmării unui culoar. Nivelul al doilea din figura 2.7 realizează această sarcină. Acesta se compune din schema perceptuală implementată în blocul CAUTĂ_CORIDORUL și din schema motoare RĂMÂI_ÎN_MIJLOC. CAUTĂ_CORIDORUL preia informația senzorială și încearcă să determine prezența unui coridor și direcția acestuia. RĂMÂI_ÎN_MIJLOC preia direcția coridorului și orientare actuală a robotului și generează o direcție care va apropia robotul de linia mediană a coridorului. Ieșirea modulului RĂMÂI_ÎN_MIJLOC va suprascrive direcția oferită de COLINDĂ. Ori de câte ori este detectat un coridor se trece la străbaterii acestuia și pe întreaga durată a străbaterii lui se evită mișcările aleatorii de investigare.

Atât modulul CAUTĂ_CORIDORUL cât și RĂMÂI_ÎN_MIJLOC implementează algoritmi mai sofisticăți decât cei implicați în primele două niveluri. Timpul necesar pentru completarea procesării poate să fie mai îndelungat. Ce se întâmplă dacă, spre exemplu,

modulul CORIDOR nu-și mai actualizează ieșirea? Cu siguranță robotul se va ciocni de unul din pereții coridorului la un moment dat. Soluția oferită la acest gen de probleme de către teoria incluzivă este adăugarea unei constante de timp pentru care ultima actualizare a modulelor complexe este încă urmărită. Dacă s-a depășit acest interval, iar nivelul 2 nu a fost capabil să-și actualizeze ieșirea, atunci nivelul 1 preia controlul robotului.

În manieră asemănătoare se procedează la adăugarea de noi niveluri. *Inteligența* robotului poate fi astfel crescută, păstrând mereu "compatibilitatea" cu nivelurile existente.

Concluzionând, caracteristicile arhitecturii de tip incluziune, dar și a sistemelor de conducere comportamental, în general, pot fi reduse la următoarele [221]:

- Definierea comportamentelor este deschisă, este doar o cuplare a stimulilor la acțiunile motoarelor;
- Comportamentele sunt organizate pe niveluri de competență sau altfel denumite comportamente abstracte;
- Nivelurile superioare pot inhiba sau suprascrive ieșirile nivelurilor inferioare dar niciodată acestea nu sunt rescrise. Deși poate pare ciudat pentru un programator, acesta este modul în care se copiază comportamentul natural;
- Construirea comportamentelor și a nivelurilor este mai mult o artă decât inginerie;
- Comportamentele sunt declanșate de anumiți stimuli senzoriali;
- Prin eliminarea modelului mediului se elimină problemele legate de actualizarea acestuia și incertitudinea că modelul ar putea fi "depășit". Comportamentele răspund direct la stimulii percepuți din mediu;
- Percepția utilizează de cele mai multe ori informație ușor de extras din stimulii senzoriali;
- Percepția unui robot reactiv are un caracter profund egocentrist.

II.3 Sisteme hibride

Până spre sfârșitul anilor '90 tendința în programarea roboților mobili autonomi a fost dominată de sistemele reactive, care au eliminat modelul global motivând că comportamentele vor comunica prin intermediul mediului înconjurător. Dar, din păcate, stări asemănătoare ale mediului pot să difere funcție de context, caz în care robotul poate face confuzii grave.

Alte două motive care au condus la eliminarea modulului PLANIFICĂRE în sistemele reactive au fost: timpul îndelungat de procesare și posibilele desincronizări între starea reală a mediului și cea reflectată de model care poate cauza probleme serioase. Această problemă este recunoscută hilaric sub denumirea "sindromul cercetătorului alergător". Cercetătorul este nevoit să prindă robotul din urmă și să apese butonul STOP în cazul unei întoarceri nepotrivite, pentru a preveni o eminentă ciocnire a acestuia de obiectele din mediu [229].

Soluția oferită de sistemele reactive la aceste probleme a fost eliminarea modelului global. Dacă nu există un model intern atunci nu va putea exista nici desincronizare între starea

acestui și starea mediului înconjurător. Sloganul adesea utilizat pentru a exprima această idee a fost: "Cel mai bun model al mediului înconjurător este el însuși". Din păcate însă, perceperea mediului înconjurător face uz de senzori extrem de imprecizi. Inconsistența datelor achiziționate cu ajutorul senzorilor se constituie într-o problemă aproape la fel de greu de depășit ca cea a utilizării unui model global. Este de dorit, spre exemplu, ca un robot să-și aducă aminte de existența unui perete care a fost detectat anterior, dar care datorită reflexiilor speculare dispare brusc, deoarece dispariția subită a peretelui din informația senzorială nu reprezintă de fapt și dispariția lui fizică.

Prin eliminarea modelului, metodele reactive elimină problema desincronizării, dar se lovesc de o alta la fel de complicată, aceea a sesizării corecte a mediului.

Utilizând un sistem de conducere reactiv se poate obține un sistem ce lucrează în timp real, chiar cu procesoare simple, comerciale. Această abordare plătește însă ca tribut eliminarea completă a oricărui model, a posibilității de a memora stările trecute ale robotului și în plus se mai pierde și capacitatea de planificare a acestuia. Roboții reactivi nu sunt capabili să planifice traiectorii optime, să construiască o hartă a mediului, să-și monitorizeze performanțele și nici măcar să decidă care este comportamentul cel mai potrivit la un moment dat pentru îndeplinirea unei sarcini.

De asemenea, paradigma de conducere reactivă mai suferă în opinia multora de o tentă artistică. Este mai mult artă decât știință să assemblezi mai multe comportamente la un loc și să obții manifestarea dorită. Mai mult chiar, teoria conducerii reactive nu soluționează clar, ci lasă mai mult în seama constructorului modul în care comportamentele trebuie să "combinat". Oare nu este posibil totuși ca însuși robotul să aleagă succesiunea comportamentelor?

Datorită acestor observații, începutul anilor '90 a găsit comunitatea științifică din domeniu în situația de a încerca să readucă în sistemul de conducere a roboților partea de deliberare și planificare, fără a afecta însă succesul obținut de conducerea reactivă. Consensul general a acceptat conducerea reactivă pentru nivelul cel mai de jos de conducere al roboților mobili, datorită în primul rând succeselor obținute pe această cale dar și datorită eleganței modelului și a asemănării sale cu sistemele biologice.

Sistemele hibride au fost privite la început doar ca și un artefact ale cercetării, fără vreo valoare oarecare. Unele voci au afirmat chiar că dacă robotul va trebui să evolueze în lumea reală atunci soluția este conducerea reactivă, iar dacă mediul robotului este complet cunoscut atunci modelele ierarhice sunt soluția căutată. Sistemele hibride au fost privite inițial ca fiind o combinație nereușită a celor două lumi. Denumirea lor inițială a fost de *planificare deliberativă* pentru a le putea deosebi de sistemele ierarhice.

Actualmente, însă, sistemele de conducere hibride sunt apreciate din mai multe motive ca fiind soluția generală cea mai bună. În primul rând, utilizarea unui nucleu multiproces asincron permite procesarea funcțiilor deliberative separat de conducerea reactivă. Un proces deliberativ care să decidă următorul "scop" poate evolua lent, în timp ce, robotul se îndreaptă

spre ținta curentă fiind condus reactiv cu o rată de actualizare mare. În al doilea rând, aplicând tehnica programării orientate pe obiect, se pot obține sisteme ușor acordabile la diferite medii și diferite scopuri.

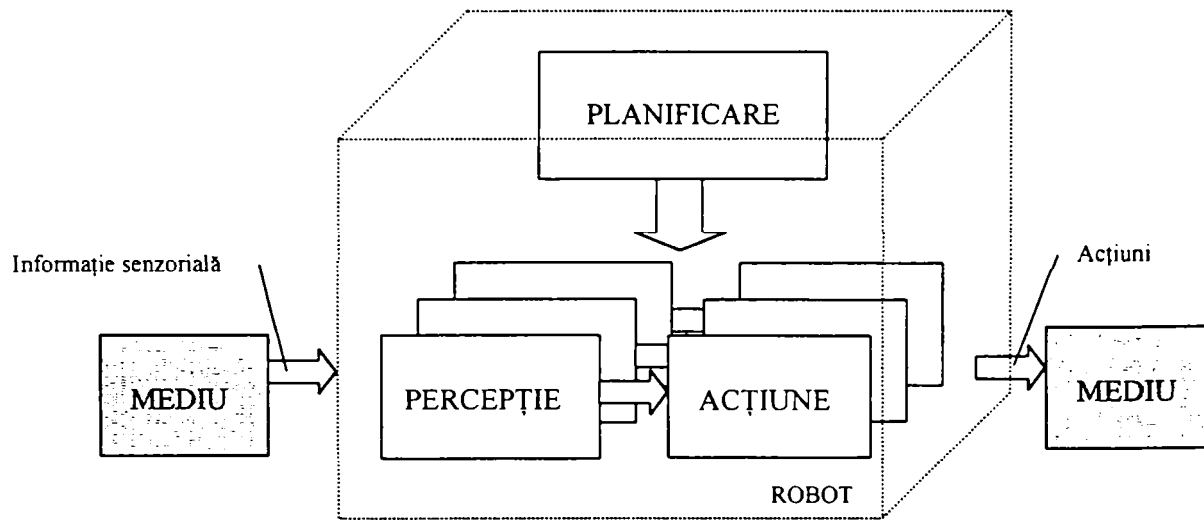


Figura 2.8 Structura unui sistem de conducere hibrid.

Organizarea sistemelor hibride deliberative pot fi descrise prin: PLANIFICĂ, apoi PERCEPE-ACTIONEAZĂ (figura 2.8). În componenta PLANIFICARE sunt incluse toate capacitățile de deliberare, planificare și chiar cele de modelare. Robotul va delibera și planifica întâi cum să îndeplinească o anumită sarcină (folosind modelul global disponibil) după care trece la activarea unui set de comportamente care să conducă la executarea misiunii. La îndeplinirea sarcinii curente setul de comportamente active se va actualiza pentru următoarea sarcină, și așa mai departe. Se decuplează astfel partea de planificare (lentă) de cea de execuție (rapidă).

Organizarea părții de percepție în sistemele hibride este mult mai complexă decât în cazul sistemelor reactive, fiind și ea hibridă. Acum, nu doar comportamentele au acces la informația senzorială ci și componenta deliberativă (PLANIFICĂ). În plus, chiar modelul global poate servi ca și sursă de informații pentru comportamente.

Organizarea în PERCEPȚIE, PLANIFICĂ, ACTIONEAZĂ a sistemelor hibride poate fi conceptual divizată într-o parte *reactivă* și una *deliberativă*. Chiar dacă diferite sisteme hibride particulare procedează la descompunerea mai detaliată a nivelurilor deliberativ și reactiv, toate au însă această delimitare clară a funcțiilor.

Privită astfel, teoria conducerii hibride apare ca o extensie a celei reactive, comportamentele putând să rămână neschimbate. Totuși, în cazul sistemelor hibride comportamentele au o semnificație ușor diferită. În cazul sistemelor pur reactive, comportamentele reprezintă acțiuni reflexe pure. În schimb, pentru cazul sistemelor hibride comportamentele cuprind în plus și aptitudini moștenite sau dobândite. Pentru a face această diferență, a fost propus termenul de *aptitudine (skill)* în loc de cel de *comportament (behavior)*. În plus, sistemele

hibride fac uz mai mult de secvențe de comportamente pentru a atinge țelul dorit, decât utilizarea unor comportamente primitive separate.

Componenta deliberativă a sistemelor hibride conține module și funcții pentru aspecte greu de reprezentat reactiv. Unele din aceste funcții au nevoie de un model global al mediului (cum ar fi spre exemplu: planificarea traiectoriei sau estimarea poziției curente). Dar mai sunt necesare și cunoștințe globale de alt gen, cum ar fi spre exemplu modul în care repertoriul disponibil de aptitudini poate fi îmbinat pentru a obține un anumit mod de comportare. La toate acestea se mai adaugă și funcții specifice monitorizării evoluției robotului (înaintarea spre țintă, monitorizarea parametrilor interni ca: temperatura sau starea de încărcare a bateriilor).

Diferențele între diferite sisteme hibride sunt date de modul în care acestea răspund la trei întrebări:

- Care este distincția între reactiv și deliberativ?
- Cum sunt organizate responsabilitățile în cadrul porțiunii deliberative?
- Cum se formează comportamentul global?

În general un sistem hibrid poate avea următoarele componente: un Secvențiator, un Manager de Resurse, un Cartograf, un Planificator și un Monitor al Performanțelor.

Secvențiatorul (Sequencer) este componenta care instanțiază comportamentele ce pot fi utilizate pentru îndeplinirea unui țel. Determină, de asemenea, succesiunea utilizării lor, împreună cu condițiile lor de activare. De obicei, acest mecanism se implementează prin generarea sau eventual adaptarea unei mașini cu stări finite.

O altă componentă majoră o reprezintă Managerul Resurselor. Acesta alocă resursele hardware disponibile comportamentelor instanțiate de către Secvențiator. Spre exemplu, același robot poate fi dotat atât cu senzori de proximitate în infraroșu, cu traductoare ultrasonice cât și cu camere de luat vederi. Toate aceste trei tipuri de senzori sunt capabile să ofere o estimare a poziției față de obiectele din jur. Dar senzorii în infraroșu pot avea o sensibilitate prea mică, puterea emisă de traductoarele ultrasonice poate să nu acopere distanța cerută, iar camerele de luat vederi pot să nu ofere o rată de actualizare a datelor suficient de bună. Este datoria Managerului Resurselor să facă alocarea acestor resurse diferitelor comportamente, pentru a obține rezultate optime. În contrast, la sistemele de conducere pur reactive această alocare a resurselor era prestabilită prin modul în care erau făcute conexiunile fizice și nu puteau fi realocate.

Următoarea componentă, Cartograful, este responsabil cu crearea, memorarea și actualizarea unui model global al mediului. În particular, în cazul navigării, cartograful menține o hartă a domeniului.

Planificatorul misiunilor este blocul capabil să interacționeze cu operatorul uman. El este capabil să convertească comenzile primite în mărimi cu sens pentru robot și să alcătuiască un plan de acțiune.

Ultimul bloc component este Monitorul Performanțelor. Acest element permite robotului să-și urmărească evoluția, să determine dacă face progrese sau nu în îndeplinirea misiunii.

Principala contribuție a arhitecturilor hibride este aceea că oferă un model pentru combinarea componentei deliberative cu cea reactivă. Dar îmbinarea celor două componente (în timp real) nu este o treabă ușoară, fiind dependentă, în plus și de misiunea curentă. În navigare spre exemplu, cazul cel mai comun, trebuie cuplate planificarea traiectoriei cu execuția reactivă a acesteia, dar trebuie monitorizată totodată și evoluția robotului, dacă acesta se deplasează spre țintă sau nu.

Datorită avansului tehnologiei procesoarelor, algoritmi de planificare a traiectoriei care odinioară necesitau timpi de procesare de ordinul a 10-15 minute, actualmente sunt procesați în circa o secundă. Scurtarea dramatică a timpului necesar planificării face ca distincția între deliberativ și reactiv să-și piardă contrastul. Granița de separare se păstrează totuși datorită nivelului noțiunilor cu care se lucrează. Componenta deliberativă va opera cu simboluri și modele globale, iar cea reactivă procesează direct informația senzorială.

Un alt beneficiu al puterii sporite de procesare este oportunitatea de a utiliza modelul global al mediului ca și sursă de informație pentru așa numiții senzori virtuali. Comportamentele pot procesa nu doar informația senzorială, pentru a decide reacția potrivită ci și informații globale din baza de date oferite de senzori virtuali.

Dintre arhitecturile proeminente ale acestor sisteme de conducere hibridă se evidențiază: AuRA, Sensor Fusion Effect (SFX), Saphira, TCA și în special arhitectura 3T care este organizată pe trei niveluri [223].

Arhitecturile hibride pe trei niveluri organizează algoritmi după tipul memorie implicate: fără memorie, algoritmi care uzează de stări ce memorează trecutul și algoritmi cu stări interne ce reflectă predicții ale viitorului. Algoritmii ce nu au nevoie de o stare interioară ocupa nivelul conducerii reactive, cei ce au "amintiri" despre trecut ocupă nivelul secvențiatorului, iar cei care emit predicții despre viitor sunt componenți ai deliberatorului.

II.3.1 Anatomia arhitecturii pe trei niveluri.

Arhitecturile pe trei niveluri (3T) conțin, așa după cum le arată și numele, trei componente: un nivel reactiv, un mecanism reactiv de execuție a planului și un mecanism pentru procesare deliberativă. Aceste trei niveluri se execută în paralel, de obicei pe un procesor și un sistem de operare care suportă procese multitasking [223].

În sistemele 3T cele trei niveluri sunt denumite: nivelul abilităților (Controllerul), nivelul secvențiatorului și nivelul planificatorului.

Controller-ul

Controller-ul este nivelul cel mai de jos, este nivelul reactiv care cuplează strâns stimulii de acțiuni. Funcția de transfer a controllerului poate fi schimbată din zbor. De obicei acesta conține o bibliotecă de abilități ce sunt instanțiate dependent de starea, misiunea și poziția robotului în mediu.

Există câteva constrângeri arhitecturale ce se impun algoritmilor controllerului. În primul rând, calculul rezultatului unei funcții de transfer trebuie să fie bine definit în complexitate și timp. Durata de calcul a valorii de ieșire a funcției de transfer trebuie să fie suficient de mică pentru a avea o buclă de control stabilă, adică o rată de actualizare a ieșirii (mult) mai mică decât rata de variație a mediului.

În al doilea rând funcțiile controllerului trebuie să fie capabile să se auto-monitorizeze (*fail cognizantly*), adică să fie capabile să detecteze orice eroare în îndeplinirea misiunii pentru care au fost create. În loc să se caute proiectarea unor funcții care să nu "greșească" niciodată, este de preferat să se construiască funcții care să-și detecteze propriile erori, astfel încât o componentă superioară să fie capabilă să ia decizii corespunzătoare de corecție.

În al treilea rând în interiorul controllerului trebuie evitată utilizarea stărilor interne. Chiar dacă, în cazul unui filtru, spre exemplu, trebuie să fie implicate stări anterioare, această dependență trebuie să fie scurtă. În acest fel chiar dacă starea internă nu mai reflectă realitatea, cel puțin această eroare va fi de scurtă durată.

Ultima condiție care se impune algoritmilor controllerului este ca funcțiile de transfer implementate să fie continue. Este sarcina Secvențiatorului să guverneze tranzițiile între regiuni diferite ale funcționării continue, la schimbarea stării de activare a comportamentelor.

Secvențiatorul

Scopul Secvențiatorului este acela de a alege care abilitate (funcție de transfer) este activă la un moment dat. Prin alegerea potrivită a abilității active se poate obține o manifestare sau alta a robotului.

Secvențiatorul trebuie să fie capabil să răspundă în mod corespunzător oricărei situații, indiferent care va fi aceea. Una din posibilele abordări ar fi să se determine toate stările posibile în care robotul ar putea ajunge și să se desemneze la compilare primitiva corectă pentru fiecare stare în parte. Chiar dacă ar fi posibil să se prevadă anterior toate stările viitoare ale robotului, mai rămân totuși de soluționat încă două mari probleme. Mai întâi robotul poate să nu fie capabil să recunoască starea curentă, mai ales dacă a avut loc o schimbare neașteptată în mediu. În al doilea rând această abordare nu ține seama de evoluția robotului, de stările lui anterioare și astfel se pot pierde informații concludente.

O soluție alternativă la problema de mai sus este utilizarea tehnicii denumite *secvențierea condiționată*. În această abordare combinarea abilităților nu este limitată doar la ordonarea, condiționarea și execuția repetată în buclă așa cum se făcea tradițional în sistemele SPA, ci există mecanisme pentru arbitrarea condițiilor contradictorii și este posibilă de asemenea implementarea multitasking a proceselor.

Secvențiatorul nu trebuie să execute algoritmi care necesită timpi mari de procesare, încât să fie depășită rata de modificare a mediului înconjurător. Ce înseamnă “timp mari”, asta depinde atât de mediul în sine cât și de natura abilităților cu care este dotat robotul. În orice caz secvențiatorul nu trebuie să execute nici o căutare sau vreo estimare a viitorului. Diferiți algoritmi de procesare a informație vizuale, care sunt prea greoi vor fi de asemenea evitați în cazul Secvențiatorului, în special dacă resursele de procesare sunt limitate.

Deliberatorul

Deliberatorul este locul unde se desfășoară procesele lente. Sunt incluși aici algoritmi de căutare, de planificare, sau așa cum s-a menționat anterior, algoritmi de procesare a informație vizuale, care reclamă durate mari de timp de procesare. Ceea ce trebuie notat însă, este că din momentul în care un proces deliberativ este invocat și până când acesta oferă un rezultat, pot exista câteva (zeci) de tranziții între comportamentele active la nivelul Controllerului.

Deliberatorul rulează simultan unul sau mai multe procese și nu există restricții pentru algoritmi implicați (de obicei scriși în limbaje uzuale C, C++).

Deliberatorul poate interfera în două moduri cu restul sistemului: fie că oferă la ieșirea sa planuri pentru execuție (situația cea mai uzuală), sau mai poate să fie invocat în cazul în care Secvențiatorul cere ajutor la o problemă întâlnită.

Sintetizând caracteristicile arhitecturii de tip 3T, dar și a sistemelor de conducere hibride în general, rezultă următoarele [221]:

- Sistemele hibride pot fi privite ca PLANIFICĂ, PERCEPE-ACTIONEAZĂ. Componenta PERCEPE-ACTIONEAZĂ este întotdeauna efectuată reactiv, în timp ce componenta PLANIFICĂ include activități inteligente cu caracter mai larg;
- Planificarea este combinată în timp cu execuția;
- Sistemele hibride suportă întotdeauna descompunerea în cele două componente: deliberativă și reactivă;
- Percepția este și ea hibridă. Componenta reactivă utilizează informația senzorială în timp ce componenta deliberativă utilizează modele globale. Aceasta este și regula de bază la împărțirea funcțiilor. Funcțiile care operează cu simboluri vor face parte din componenta deliberativă, iar cele care vor utiliza informația concretă a traductoarelor vor completa componenta reactivă;

- Modulele principale ale componentei deliberative sunt: Planificatorul Misunilor, Secvențiatorul, Managerul Resurselor, Cartograful și Modulul de Monitorizare a Performanțelor;
- Componenta reactivă este organizată în comportamente, care de această dată sunt denumite abilități pentru a sublinia depărtarea lor de comportamentele pur reflexive. Abilitățile pot fi moștenite sau dobândite și sunt compuse dintr-o secvență de comportamente reactive simple;
- Sistemele hibride utilizează o gamă largă de mecanisme pentru combinarea ieșirilor comportamentelor: incluziunea, metoda câmpurilor de potențial, prin votare, filtrare și nu în cele din urmă logica fuzzy;
- Modelul global poate servi ca și un senzor virtual abilităților.

II.4 Rețelele neuronale și logica fuzzy în conducerea roboților mobili autonomi

Cele două mari paradigme de control - rețelele neuronale și logica fuzzy – își găsesc o largă aplicabilitate în domeniul roboților mobili. Domeniul beneficiază de puterea și avantajele acestora, dar la rândul lor ele cunosc un progres tocmai datorită problematicei diverse la care sunt expuse și de ce nu ajustate și rafinate.

Așa cum s-a demonstrat [145], cele două teorii, cea a rețelelor neuronale și cea a logicii fuzzy au multe elemente comune. Ambele pot fi privite ca soluții de reprezentare a unor funcții multi-intrare/multi-ieșire neliniare, sau pot fi considerate ca fiind aproximatori universali. În plus, nici una din ele nu reclamă necesitatea unui model analitic în faza de acordare.

Atât rețelele neuronale cât și logica fuzzy conferă avantajul posibilității învățării *on-line*, o trăsătură esențială sistemelor adaptive, fără de care roboții mobili nu vor putea face față impredictibilității mediilor în care vor evolua [73] [159].

Ceea ce le deosebește însă este natura informației pe care acestea sunt capabile să o proceseze. Rețelele neuronale utilizează exclusiv date numerice/analogice, pe când logica fuzzy este capabilă să încorporeze cunoștințe și sub formă lingvistică.

Criteriile care decid în favoarea uneia sau alteia, sunt următoarele [145]:

- modul în care cunoștințele sunt disponibile;
- complexitatea sistemului rezultat (spre exemplu numărul de neuroni, sau numărul de reguli);
- acuratețea modelării;
- costul implementării;
- capacitatea de memorie necesară de-a lungul învățării, respectiv utilizării;
- durata de învățare; și
- viteza de execuție.

Ca și regulă generală, pentru sistemele mari, cu multe variabile de intrare/ieșire, rețelele neuronale sunt mai performante din punct de vedere al capacității de memorie utilizate. Pe de altă parte, modelele fuzzy necesită un timp mai scurt de învățare și oferă un model sintetizat al procesului mai aproape de înțelegerea umană.

Tendința actuală este reunirea sub aceeași umbrelă [67] [80] [124] [145] a celor două paradigme, în încercarea de a obține un hibrid care să moștenească cât mai multe din avantajele fiecăreia. Există actualmente câteva combinații ale acestor două tehnici de procesare: sisteme cu intrări și/sau ieșiri fuzzy, sisteme neuro-fuzzy independente, sisteme neuro-fuzzy sinergetice și rețele neuro-fuzzy.

Dintre acestea, rețelele neuro-fuzzy sunt cele mai des întâlnite în conducerea roboților mobili. Explicația acestui fapt este dată în [80] unde se arată ca rețelele neuro-fuzzy prezintă avantajul (chiar și față de rețelele neuronale clasice) a accesului la setul de reguli extras în faza de învățare din baza de antrenament, ceea ce contribuie la o mai ușoară înțelegere a modului lor de operare.

Revenind la cele trei blocuri primitive PERCEȚIE, PLANIFICĂ, ACȚIONEAZĂ care stau la baza modelării sistemelor de conducere a roboților mobili și privind prin această prismă cele două paradigme de conducere, acestea se pot regăsi în trei posturi diferite, funcție de porțiunea pe care o ocupă în lanțul SPA.

O primă ipostază, din ce în ce mai des întâlnită, este cea în care rețelele neuronale (sau neuro-fuzzy) acoperă perechea PERCEPE-ACTIONEAZĂ, indiferent dacă deasupra lor se află și alte niveluri superioare de conducere sau nu. În ambele cazuri însă, rețelele neuronale aduc avantajul unei viteze mari de reacție și a unei puteri mari de generalizare, fiind capabile să emuleze funcții de transfer neliniare, complexe. În această ipostază rețelele neuronale memorează perechi de intrare-ieșire (*instinct rules*) care sunt echivalentul comportamentelor reflexe din lumea biologică. În literatură [110] [125] [221] astfel de procesoare paralele sunt referite ca și *conexionist-computing*.

Și în cazul controllerelor conexioniste se poate vorbi de reprezentarea unui model al mediului, dar de această dată acesta va fi unul implicit (memorat prin valorile ponderilor - în cazul rețelelor neuronale - sau prin baza de reguli în cazul logicii fuzzy) și nu unul care apare memorat explicit ca și în cazul metodelor analitice.

Dacă deasupra acestor controlleri conexioniste nu mai există alte niveluri superioare de supervizare atunci roboții astfel echipați fac parte din categoria vehiculelor de tip Breitenberg [229]. Chiar dacă aparent simpli, acești roboți pot dovedi abilități remarcabile strict la mediile pentru care au fost construiți. Sunt în cele din urmă automate capabile să mimeze inteligență la nivelul unei insecte. Astfel de roboți au de asemenea meritul de a fii promotorii teoriei de conducere comportamentală.

O extremă a controllerelor conexioniste o reprezintă conceptul BEAM (acronim pentru Biology, Electronics, Aesthetics, and Mechanics) fondat de către Mark W. Tilden la

Universitatea Waterloo, Canada (www.nis.lanl.gov/projects/robot/). BEAM se constituie într-o platformă de promovare a ideilor originale în domeniul roboților mobili. Ideea de bază ce este promovată, încearcă să copieze evoluția sistemelor biologice, pe drumul: de la simplu la complex. Astfel, aceste automate sunt capabile doar de cele mai elementare reflexe. În speță, fiind echipate cu elemente foto-voltaice, execută mișcări care încearcă să maximizeze cantitatea de lumină captată.

Dacă controllerele conexiunilor sunt organizate într-o manieră ierarhică, fiecare nivel aducând un plus de performanță se pot obține configurații compatibile cu structurile din categoria conducerii comportamentale, așa cum s-a prezentat în subcapitolul II.2.2. Dar mai există și varianta controlului hibrid reactiv/deliberativ (subcapitolul II.3) în care algoritmi superiori decid controllerele conexiunilor active la un moment dat în nivelul reactiv.

Aceste două ultime variante sunt cele mai complexe, oferind totodată și rezultatele cele mai promițătoare. Calea, așa cum s-a arătat deja, a fost deschisă de controllerele comportamentale, iar viitorul se arată promițător pentru sistemele hibride.

Literatura oferă o gamă largă de aplicații ale rețelelor neuronale în conducerea roboților mobili. Vor fi succint prezentate, în cele ce urmează, trei exemple: evitarea obstacolelor, conducerea automata (pilot automat) și parcare vehiculelor.

- Ben Kröse oferă în [130] detalii despre un pilot automat. Rețeaua neuronală utilizată este un perceptron simplu ce primește la intrare o imagine a drumului de mică rezoluție (30 x 32 pixeli). Pentru răspunsurile așteptate de la rețea au fost utilizate, ca exemple, comenzile unui pilot uman, rețeaua fiind antrenată on-line.

Remarcabile sunt rezultatele obținute. După numai 5 minute de învățare rețeaua a fost capabilă să conducă vehiculul cu o viteză maximă de 32 Km/h, adică de circa două ori mai repede decât algoritmi non-neurali ce au rulat pe același vehicul [130].

- Automatizarea parcării autovehiculelor este abordată în [89] încercând să se găsească un sistem care să ofere o facilitate în plus următoarelor generații de autovehicule.

Datorită multitudinii de situații posibile în practică, în care se cere parcare unui vehicul și datorită complexității lor, se face o precalculare off-line a unor traiectorii generalizate. Rețelei neuronale nu îi rămâne decât să interpoleze punctele modelelor stocate în memorie.

În general, rețeaua neuronală cea mai des folosită în conducerea roboților mobili este perceptronul multistrat, iar ca regulă de învățare utilizată cu precădere este învățarea supervizată cu penalizare (*reinforcement learning*).

Sunt de asemenea utilizate [90] și rețele neuronale dinamice (DNN) precum și rețele Hopfield. Ele se pretează conducerii roboților mobili deoarece își modifică continuu starea în funcție atât de stimuli cât și de starea dinamică internă.

- Keigo Watanabe în [67] prezintă o structură de tipul rețelelor neuro-fuzzy, și anume o rețea neuronală fuzzy-Gaussian (a cărei neuroni au funcții de activare Gaussiene).

Cu ajutorul ei este condus un robot de tip șaretă, cu două roți. Primind ca informație de intrare viteza centrului de greutate al robotului și unghiul axei mediane a acestuia, cu un sistem de referință dat se încearcă controlul vitezelor celor două roți, prin intermediul cărora se urmărește traiectoria dorită.

O altă ipostază în care rețelele neuronale pot fi întâlnite în cadrul domeniului roboților mobili este cea a procesării informației senzoriale. Păstrând ca referință cele trei blocuri primitive, rețelele ocupă de această dată doar primul dintre ele, și anume secțiunea PERCEPE.

Procesarea informației senzoriale este poate aplicația de bază a rețelelor neuronale în conducerea roboților mobili. Este, de fapt, aplicația cu care rețelele neuronale și-au făcut debutul în domeniu. Într-un fel sau altul toate celelalte aplicații ale rețelelor neuronale din domeniul roboților mobili apelează implicit la această facilitate, deoarece informația senzorială este oferită de cele mai multe ori în mod direct rețelei neuronale.

Este exploatată capacitatea rețelelor neuronale de a lucra cu date incomplete sau perturbate de zgomote, așa cum este cazul semnalelor întâlnite în situațiile practice. Nu trebuie uitată nici capacitatea de generalizare a rețelelor neuronale, care este o altă trăsătură importantă acum. Rețelele neuronale sunt capabile să ofere rezultate plauzibile chiar și în cazurile în care la intrarea lor sunt aduse modele complet noi.

Ținând seama de gama variată de senzori utilizați în domeniul roboților mobili (vizuali, ultrasonici, proximitate, odometrici, olfactivi și nu în ultimul rând traductoare pentru mărimile de stare internă ale robotului), de multitudinea de tipuri de informație oferită de aceștia, este necesară o prealabilă aducere “la același numitor” a acestora (la o formă numerică de reprezentare), pentru a putea utiliza o rețea neuronală .

Procesarea informației senzoriale cu rețele neuronale urmărește obiective ca: extragerea informației din zgomot și recunoașterea/clasificarea trăsăturilor mediului.

- Alessio Conullo și alții [71] oferă un exemplu de extragere a informației din zgomot. Scopul urmărit este acela de a îmbunătăți precizia de determinare a momentului de întoarcere a ecoului (TOF - time of flight) la un sistem ultrasonic de determinare a distanței utilizând o rețea neuronală.

Sistemul utilizat de ei are o structură formată din două rețele neuronale. Prima rețea este un strat competitiv ce determină care perioadă a ecoului a depășit pragul de comparație. Iar cea de-a doua rețea este un perceptron multistrat, care realizează o interpolare între clasele detectate de stratul competitiv.

Inovația soluției constă în introducerea unui neuron separat (guard neuron) ce primește la intrare mărimile de la ieșirile stratului competitiv. Rolul lui este acela de a invalida măsurarea atunci când ieșirile stratului competitiv au niveluri de activare asemănătoare. Se crește astfel gradul de încredere al rezultatului furnizat, plătind ca preț un număr crescut de măsurători.

- Joris W.M. și alții prezintă în [97] [98] o modalitate de recunoaștere a mediului. Ei încearcă să compenseze caracterul vag al informației senzoriale prin utilizarea în paralel a mai multor tipuri de senzori (în particular senzori video și ultrasonici).

Ideea pe care o urmăresc autorii este aceea de a învăța un perceptron multistrat, funcția inversă a senzorilor, încercând în acest mod să crească imunitatea sistemului la modificări ale mediului sau chiar la modificarea propriei caracteristici de eroare a senzorului.

În final, se obține o reprezentare a mediului sub forma unei grile, ale cărei celule exprimă gradul de certitudine privind ocuparea zonei respective cu obstacole. Este de menționat că informația aplicată la intrarea rețelei neuronale este furnizată de un sistem de determinare a distanței.

- O altă aplicație interesantă a recunoașterii trăsăturilor mediului cu rețele neuronale o oferă Ulrich Nehmzow în [107]. El utilizează o rețea Kohonen pentru recunoașterea trăsăturilor mediului. Ideea inedită pe care o avansează afirmă că între starea mărimilor de comandă a roboților mobili pentru a evita obstacolele din mediu și forma obstacolelor există o legătură biunivocă.

Autorul antrenează rețeaua doar cu informație internă robotului, pornind de la următorul raționament: "Informația provenită de la comanda motoarelor formează un set mai restrâns de tipuri de date, este mult mai puțin afectată de zgomot, caracterizând totodată interacțiunea dintre robot și mediu".

Se reușește astfel, pe baza imaginii oferite de starea de activare a rețelei, o clasificare a diferitelor tipuri de obstacole din mediu (perete, colț, muchie) [107].

- O aplicație clasică de recunoaștere a trăsăturilor este cea de recunoaștere a formelor prezentată în [72], respectiv [120] de către Sumio Watanabe. Informația furnizată de o matrice (8 x 8) de senzori ultrasonici, este aplicată la intrarea unui perceptron multistrat (3 straturi).

Neuronii de pe stratul de ieșire au o astfel de așezare geometrică încât prin nivelurile lor de activare reproduc forma mediului. Se reușește în acest fel în [72] să fie reproduse forme elementare (sfere, piramide, cilindrii, paralelipede) iar în [120] forme mai complexe (litere tridimensionale).

Rețelele neuronale își găsesc aplicabilitate și la nivelurile superioare ale unei ierarhii hibride (blocul PLANIFICĂ), pentru crearea unui model al mediului, în estimarea poziției robotului

și chiar la generarea traiectoriei. Rețelele neuronale sunt utilizate aici datorită capacității lor de a prelucra cu informație vagă, dar și pentru puterea lor de generalizare.

- În cazul în care rețelele neuronale sunt utilizate pentru crearea unui model global al mediului, mai toate exemplele din literatură utilizează structuri de tip Kohonen, care conservă topologia trăsăturilor mediului [65] [88] [93] [104] [129].

Tim Smithens în [107] justifică această alegere astfel: “Hărți topologice sunt comune sistemului nervos biologic. Cortexul, spre exemplu este organizat într-o manieră topografică, fiecare jumătate a câmpului vizual este proiectată într-o hartă a cortexului striat”.

Ce diferă între aplicațiile întâlnite în literatura este modul în care se primește informația senzorială. Dacă în cele mai multe cazuri, ca centru de referință în reprezentare se ia robotul (sisteme egocentriste), există cazuri [129] în care referința se face la însăși semnalul senzorial. Ben J.Kröse [129] poate apela astfel la diferența între semnalul senzorial actual și cel dorit, ca la o mărime ce indică următoarea acțiune pentru atingerea scopului.

Articolele [65] și [88] prezintă un mod de abordare clasic al reprezentării mediului cu rețele Kohonen. Datele senzoriale sunt aplicate direct rețelei, iar modelele suficient de asemănătoare sunt grupate în aceeași clasă. Ideea de bază este că fiecărui punct din spațiu (și vecinătatea lui) îi corespunde o singură formă a datelor senzoriale. Răspândind neuronii rețelei Kohonen peste tot mediul, se va obține o estimare a poziției robotului, prin poziția neuronului activat.

- O aplicație inedită și ingenioasă a rețelelor Hopfield o dă Spyros G.Tzafestas [98]. Acesta folosește o rețea Hopfield particularizată pentru a determina calea ce trebuie urmată pentru a atinge ținta, atunci când are la dispoziție harta întregului mediu.

Rețeaua acoperă ca o plasă mediul robotului, fiecare neuron va reprezenta o celulă cu coordonate bine stabilite. Particularizarea la care s-a recurs constă în faptul că interconectarea neuronilor nu mai este totală, așa cum suntem obișnuiți la modelul Hopfield, ci fiecare neuron are legături recurente doar cu cei opt vecini ai săi.

Celulele (neuronii) ce desemnează spațiul ocupat se mențin forțat la zero, iar rețeaua se inițializează activând neuronul care corespunde țintei. Lăsând apoi rețeaua să itereze, se obține o “undă” ce se propagă de la țintă în toate direcțiile, pe culoarele neocupate (neuroni liberi). Iterarea se oprește atunci când “valul” ajunge într-o poziție imediat învecinată poziției actuale a robotului. În iterația curentă robotul se va deplasa din celula actuală în una din cele 8 celule vecine, anume cea pentru care neuronul aferent are nivelul de activare maxim.

Algoritmul se aplică până când ținta este atinsă. Timpul necesar unei iterații scade pe măsură ce robotul se apropie de ținta finală.

Această variantă de planificare a traiectoriei are avantajul major că va găsi întotdeauna calea spre țintă, dacă acesta cale există. Mai mult calea găsită va fi cea mai scurtă, iar tehnica este aplicabilă și în cazul țințelor mobile. Singurul neajuns al metodei îl constituie presupunerea că mediul este cunoscut în totalitate, adică este disponibilă o hartă globală a acestuia.

Logica fuzzy își găsește aplicabilitate și la nivelurile superioare deliberative unde este exploatată capacitatea ei de a procesa informație reprezentată lingvistic. În cazul deliberatorului unei structuri 3T, acesta trebuie să fie capabil să interpreteze ordine (vagi uneori) primite de la un operator uman. Totuși, mai des, această paradigmă de conducere se regăsește aplicată în ultima parte a lanțului SPA, unde se generează comenzile pentru actuator.

Literatura oferă însă mai puține exemple de aplicații ale logicii fuzzy în domeniul roboților mobili decât în cazul rețelelor neuronale. În general [64] [81], logica fuzzy este utilizată pentru a realiza controllere ce primesc o informație gata preprocesată, furnizând la ieșire comenzi pentru actuator. Aplicațiile găsite în literatură consideră disponibile deja pentru controllere informații ca: poziția robotului, viteza și chiar accelerația sa.

- În [81] Kazuo Tanaka prezintă o soluție cu un controller fuzzy pentru docarea cu spatele a unui camion cu, și respectiv, fără trailer. Controllerul găsește succesiunea potrivită de comenzi pentru docare cu condiția existenței unui spațiu suficient între poziția inițială a camionului și cea finală a docului.
- O aplicație în care intervine atât o rețea neuronală cât și un controller fuzzy este prezentată în [64] de către H.R.Beom. Scopul urmărit este acela al evitării obstacolelor pe traiectorie, spre țintă.

Lanțul logic al procesării informației este următorul: rețea neuronală - controller fuzzy. Rolul rețelei neuronale (un perceptron cu 5 straturi) este acela de a clasifica informația senzorială, diferitele configurații ale mediului fiind grupate în șapte clase reprezentative. În funcție de clasa desemnată, de distanța până la obstacol și ținând cont de mărimile interne ale robotului (viteză, accelerație, unghiul roții directoare) controllerul fuzzy decide următoarea acțiune.

II.5 Concluzii

Acest capitol a prezentat o succintă istorie a sistemelor de control implicate în conducerea roboților mobili autonomi. Au fost prezentate pe rând fiecare din cele trei principale curente de conducere: ierarhică, reactivă și hibridă, punctând pentru fiecare în parte particularitățile lor, cu avantajele și dezavantajele fiecărei.

Această sumară prezentare a bogatului capitol al sistemelor de conducere a roboților mobili a fost făcută în acest capitol introductiv al tezei pentru a oferi o imagine de ansamblu a domeniului și totodată pentru a sublinia importanța și actualitatea conducerii reactive. Chiar și ce mai recent model de conducere, cel al sistemelor hibride, este construit pe temelia conducerii reactive. Se justifică astfel efortul depus în prezenta teză pentru crearea unui comportament reflex de tipul *evită obstacolele*.

S-a prezentat, de asemenea, câteva aplicații ale rețelelor neuronale și a logicii fuzzy în domeniul roboților mobili, făcând totodată și o paralelă comparativă între aceste două paradigme. Așa după cum se va vedea și comportamentul *evită obstacolele*, propus în capitolele următoare, va fi implementat combinând mai multe rețele neuronale.

III. Rețele neuronale artificiale

Chiar dacă industria microprocesoarelor digitale și-a ținut promisiunea, și respectând regula lui Moore, și-a dublat numărul de tranzistoare pe unitatea de silicon la fiecare 18 luni (începând cu 1970), creierul uman este (încă) net superior procesoarelor actuale în acțiunile cotidiene. Excepție fac doar operațiunile matematice la care orice mic procesor al zilelor noastre este mai rapid decât creierul uman. Dar în afara acestei game, până la urmă restrânse, creierul uman este adaptat procesării unei cantități imense de informație, uneori incompletă și mai întotdeauna încărcată cu zgomot.

Întrucât principala paradigmă de conducere propusă pentru aplicația prezentată pe parcursul acestei teze este cea a rețelelor neuronale artificiale, prezentul capitol III va încerca o introducere în domeniu. Se va pune accent pe prezentarea a două tipuri de rețele neuronale, anume perceptronul simplu și rețeaua competitivă simplă, deoarece aceste rețele neuronale artificiale sunt apoi utilizate pe parcursul capitolelor superioare.

III.1 Introducere

Dacă, pe lângă cele anterior amintite mai este necesară vreo dovadă că rețelele neuronale constituie o alternativă viabilă pentru calculul computațional, nu trebuie decât să privim experiența de milioane de ani a naturii care reușește să rezolve probleme complicate, în medii zgomotoase.

Astfel de exemple, au determinat căutarea și a altor forme de conducere decât cele clasice, care să facă față lumii înconjurătoare.

Creierul uman are o serie întreagă de alte calități, ce sunt momentan doar deziderate pentru circuitele electronice ale zilelor noastre. Astfel:

- creierul este robust și tolerant la defecte. În fiecare zi mor zeci de celule nervoase, dar acest fapt nu conduce la scăderea vizibilă a performanțelor de la o zi la alta;
- este foarte flexibil, putându-se (relativ) ușor adapta unor noi condiții prin învățare;
- poate procesa informație vagă, incompletă, încărcată cu zgomot și chiar probabilistică;

- are o structură de procesare cu un înalt grad de paralelism;
- este relativ mic și disipă puțină energie.

Modelele rețelelor neuronale artificiale copiază o mare parte din aceste calități.

Ceea ce face domeniul rețelelor neuronale artificiale atât de atrăgător este tocmai complementaritatea sa față de binecunoscutul, de acum, mod de calcul structurat ce urmează un set de instrucțiuni. În timp ce mașinile *von Neumann* își urmează cursul sacadat al execuției instrucțiune cu instrucțiune, un posibil procesor neuronal își va adapta ieșirea sau ieșirile în mod continuu efectuând o procesare paralelă a datelor de intrare.

Rețelele neuronale artificiale sunt întâlnite în literatura de specialitate sub câteva denumiri alternative, cum ar fi: rețele neuronale, calcul neural, rețele asociative, calcul colectiv, sisteme conexioniste, precum și altele.

Actualmente cercetările din domeniu sunt antrenate de dorința de a obține un procesor neural. Inițial însă, domeniul a debutat încercând să modeleze neuroni reali ai creierului. Modelele matematice obținute în urma acestor studii par a fii extrem de simplificate în comparație cu neuronii biologici naturali, dar cu toate acestea sunt capabile să reconstituie principiile de "calcul biologic".

Cele mai performante rețele ale zilelor noastre, implementate pe un suport hardware dedicat, ating cu greu dimensiuni de până la 100.000 de neuroni. Deși impresionante, totuși acestea pălesc în comparație cu numărul de neuroni ai creierului uman, număr ce este estimat la astronomică valoare de 10^{11} .

$$y_j(t+1) = \Theta \left(\sum_i w_{ji} x_i(t) - \mu_j \right) \quad (3.1)$$

Modelul matematic [223] al unui neuron artificial de tipul McCulloch - Pits este redat de relația (3.1). Unde, y_j este ieșirea neuronului j , x_i sunt intrările sale, w_{ji} sunt ponderile, iar μ_j este valoarea de prag a acestuia. Funcția de activare Θ ia valoarea "1" logic dacă argumentul său este pozitiv, și "0" în rest. Schematic un astfel de neuron este schițat în figura 3.1 [223].

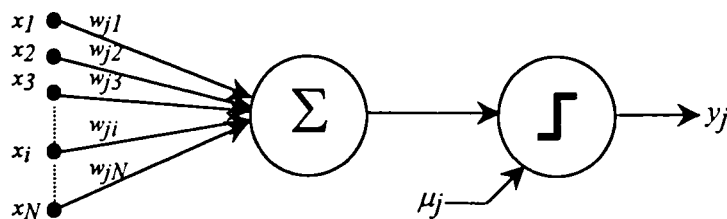


Figura 3.1 Structura generică a unui neuron McCulloch - Pits.

"Programul" unui neuron execută următoarele: calculează o sumă ponderată a semnalelor de intrare furnizate de alți neuroni și oferă la ieșire o singură valoare care este răspunsul unei funcții neliniare la suma calculată. Această valoare de ieșire este apoi oferită altor procesoare asemănătoare care efectuează continuu același fel de prelucrare. Atât ponderile neuronilor cât și expresia funcției de transfer pot fi diferite de la neuron la neuron și din acest motiv pot fi privite ca și informație stocată de către procesor.

Gradul mare de interconectivitate al rețelelor neuronale, cu alte cuvinte, numărul ridicat de intrări al fiecărui neuron, face ca răspunsul acestuia să nu fie puternic afectat dacă câteva intrări sunt eronate. Ca urmare, per ansamblu, rețeaua neuronală are un caracter robust, performanțele sale degradându-se doar ușor în prezența zgomotului, sau a unor erori.

Contrastul dintre acest fel de procesare și clasică linie von Neumann nu poate fi mai mare. În cazul rețelelor neuronale artificiale, un număr mare de procesoare co-există și execută fiecare în parte un algoritm simplu. Abordarea clasică implică însă existența unuia sau a câtorva procesoare ce rulează programe extrem de sofisticate. Acest contrast se reflectă în robustețea scăzută a variantelor clasice, unde un singur bit eronat poate compromite întregul proces.

Pentru a adânci mai mult contrastul față de abordarea clasică, viteza de procesare a neuronilor este mică, un ciclu putând să dureze chiar și câteva milisecunde. Comparată cu viteza procesoarelor actuale, acesta este de zeci sau sute de mii de ori mai mică. Dar cu toate acestea creierul reușește controlul unor procese extrem de complexe cum ar fi: interpretarea imaginilor captate, coordonarea mișcărilor în timp real, sau poate chiar lua decizii având informație incompletă sau încărcată cu zgomot. Aceste "performanțe" sunt obținute tocmai datorită numărului mare de neuroni ce conlucrează simultan.

Unul din motivele pentru care rețelele neuronale stârnesc atâta interes este datorat capacității lor de generalizare. După ce au fost antrenate pentru un set de perechi intrare-ieșire, rețele neuronale pot face față ușor unor modele de intrare cu totul diferite, interpolând sau extrapolând.

Determinarea valorilor ponderilor neuronilor, pentru ca o rețea să efectueze o operație dată, reprezintă până la urmă problema cea mai complicată ce trebuie rezolvată, dacă se dorește o abordare neuronală.

Sunt cazuri, când valorile ponderilor se pot determina analitic. Dacă procesul ce urmează a fi condus de rețea este bine cunoscut, acestea se pot determina a priori, implicând o muncă mai mult sau mai puțin laborioasă. În acest caz putem vorbi de o "pre-programare" a rețelei prin "inserarea cunoștințelor".

Din păcate însă, numărul acestor situații este restrâns. Pentru cazul unor procese complexe cu un număr mare de variabile intrare-ieșire și cu funcții de transfer complicate, programarea a priori a rețelelor nu mai este posibilă. În astfel de cazuri rețeaua poate fi "învățată" prin

ajustarea iterativă a ponderilor pe parcursul unui "perioade de antrenare". Această antrenare poate fi făcută pe două căi supervizat, sau ne-supervizat [223].

Învățarea supervizată se poate face prin prezentarea unor perechi de modele intrare-ieșire rețelei. Aceasta va trebui să-și modifice corespunzător ponderile pentru a răspunde cât mai fidel modelelor prezentate. Această manieră de antrenare este uneori întâlnită sub denumirea de învățare cu profesor.

Un caz particular al învățării supervizate este așa denumita *tehnică cu recompensă* (*reinforcement learning*) în care învățătorul răspunde numai dacă răspunsurile sunt bune sau nu, fără a da nici un exemplu concret.

În cazul celeilalte metode de antrenare – învățarea ne-supervizată – nu există informații despre ieșiri, ci doar despre intrări. Rețelele astfel antrenate vor cataloga de fapt modelele oferite la intrare, producând ieșiri ce corespund unei anumite categorii.

Alternativa antrenării rețelelor față de programarea lor directă este foarte atrăgătoare. Disponând chiar de un număr restrâns de exemple se poate încerca o antrenare, scăpând astfel de o muncă meticuloasă și nu în ultimul rând costisitoare. Presupunând că rețeaua a fost corect inițializată (număr de straturi, număr de neuroni pe strat, funcții de activare și așa mai departe) și disponând de un algoritm de învățare, munca de antrenare se poate lăsa pe seama unui calculator care după un număr mai mic sau mai mare de iterații poate obține o rețea care să se comporte apoi foarte bine.

Totuși, și metoda antrenării are neajunsurile ei. Se pune în primul rând întrebarea dacă setul de date considerat pentru învățare extrage în suficientă măsură caracteristicile procesului. Va avea oare rețeaua la dispoziție suficientă informație din care să extragă complicata funcție de transfer dorită? Mai mult chiar, setul de date inițial ales poate forța o evoluție haotică a antrenării, iar algoritmul de antrenare nu va converge.

Nici alegerea structurii rețelei (număr de straturi, număr de neuroni pe strat, funcții de activare și așa mai departe) nu este o sarcină trivială. Găsirea unui optim prin încercări succesive a mai multor configurații, poate conduce la o perioadă de antrenare foarte lungă.

Istoric privit [223], domeniul rețelelor neuronale artificiale este relativ vechi, primele realizări notabile datând de la începutul anilor '40. Studiul lui a cunoscut trei vârfuri de entuziasm. Primul este cel datorat cercetătorilor McCulloch and Pitts care în 1943 introduc modelul matematic al unui neuron ce apoi le poartă și numele. Este un model simplist în care un neuron consistă dintr-o unitate ce efectuează a sumă ponderată a intrărilor și un comparator cu prag (vezi figura 3.1). Ieșirea uni astfel de neuron va fi activată sau nu, în funcție de rezultatul comparării.

Urmează o perioadă de peste 15 ani în care domeniul nu este dat complet uitării, dar nici nu apar realizări notabile. În 1960 Rosenblatt soluționează problema alegerii ponderilor

neuronilor unei rețele feed-forward cu un singur strat. Deși limitată ca și posibilități de aplicabilitate, soluția lui Rosenblatt stârnește mare interes deoarece deschide calea algoritmilor de învățare.

Numeroasele limitări ale algoritmului de antrenare al lui Rosenblatt, determină o serie de cercetători ca Minsk și Paper (1969) să concluzioneze că nu aceasta este calea ce trebuie urmată pentru dezvoltarea unor sisteme dotate cu inteligență artificială. Astfel că domeniul trece sub umbra uitării pentru următorii aproape 20 de ani.

Domeniul nu este totuși complet abandonat, cercetări fiind consemnate de-a lungul perioadei, dar abia anii '80 îl scot din nou la rampă sub lumina reflectoarelor. Acesta este probabil momentul maturizării lui, când mai mulți cercetători descoperă aproape concomitent, dar independent, algoritmi capabili să antreneze rețele feed-forward multistrat. Acești algoritmi, denumiți generic *cu propagare înapoi a erorii* sunt folosiți și în prezent cu succes sub forme mai rafinate.

Deși cu o istorie de peste 50 de ani, domeniul rețelelor neuronale artificiale își găsește aplicabilitate comercială doar în ultimii 10-15 ani, aflându-se într-o continuă extindere. Prima mențiune a unei aplicații de succes a rețelelor neuronale apare în DARPA Neural Network Study (1988) care listează, printre altele, egalizatorul adaptiv pentru un canal de transmisie realizat în jurul anului 1984. Soluția ce implică o singură rețea neuronală a avut o largă aplicabilitate în sistemele de telefonie de lungă distanță, cu un mare succes comercial.

De la acest prim succes rețelele neuronale au "cucerit" o serie întreagă de domenii, dintre care sunt amintite:

- Militar: ghidarea rachetelor spre țintă, recunoașterea facială și de obiecte în general, procesarea informației senzoriale pentru senzori ultrasonici și radare, procesarea de date ca compresia lor, și extragere din zgomot;
- Aeronautică: pilotul automat, urmărirea traseelor de zbor, sisteme de conducere aeronautic, sisteme pentru detecția erorilor;
- Electronică: sisteme automate de vedere, sinteză a vocii, modelarea neliniară și conducerea proceselor;
- Robotică: controlul traiectoriei, sisteme artificiale de vedere, conducerea manipuletoarelor;
- Bancar: sisteme bancare pentru verificarea și citirea cecurilor, evaluarea cererilor pentru credite;
- Producție: controlul proceselor, analiza și crearea de noi produse, identificarea în timp real a componentelor, sisteme de inspecție și estimare a calității (hârtie, cipuri...), modelarea dinamică a proceselor chimice;
- Medicină: analiza celulelor cancerigene, analiza rezultatelor EEG și EKG, crearea de proteze, reducerea cheltuielilor spitalelor;
- Jocuri: animație și efecte speciale.

Actualmente există o gamă variată de rețele neuronale artificiale [223]. Dintre acestea sunt amintite în continuare cele mai des întâlnite tipuri:

- perceptronul simplu;
- rețele feed-forward multistrat;
- rețele Hopfield;
- rețele recurente;
- rețele competitive simple;
- rețele Kohonen;

Concluzionând scurta prezentare a rețelelor neuronale artificiale, se poate afirma că domeniul este pe cât de interesant pe atât de promițător.

În cazul tezei de față, din întreaga gamă de rețele neuronale artificiale studiate și prezentate în literatură, vor prezenta interes doar două tipuri: perceptronul și respectiv rețelele competitive simple. Perceptronul va fi utilizat în capitolul VI pentru realizarea unui motor de procesare al informației ultrasonice receptate, iar rețeaua competitivă este inima clasificatorului descris în capitolul VII.

III.2 Perceptronul simplu

În prezentul subcapitol se va încerca descrierea punctată a clasei de rețele neuronale cunoscută sub denumirea de *rețele cu hrănire înainte pe straturi (layered feed-forward neural networks)*.

Acestea nu numai că au o structură relativ simplă, fiind din acest motiv mai ușor de înțeles, dar structura rețelelor reale din componența creierului au o organizare asemănătoare. Ceea ce caracterizează rețelele feed-forward este modul în care sunt realizate conexiunile între nivelurile neuronale. Pentru acest tip, de rețea neuronală, nu există conexiuni între neuronii aceluiași strat (spre exemplu între ieșirea unui neuron și intrările altor neuroni de pe același strat) și nici de la un strat superior, înapoi spre un strat inferior. În plus, nu există nici conexiuni înspre înainte care să sară peste un strat.

O denumire alternativă pentru rețelele neuronale feed-forward este cea de perceptron, și se datorează grupului de cercetători condus de Rosenblatt care în anii '60 au studiat minuțios acest tip de rețea neuronală.

Așa cum sugerează și numele, rețelele feed-forward au o structură ierarhizată pe straturi sau niveluri. Primul strat este cel de intrare, ce conține o serie de unități a căror rol este doar cel de a conecta rețeaua la sursa de date.

Urmează apoi nici unul, unul sau mai multe niveluri intermediare. Acestea sunt adesea referite ca și straturi ascunse, deoarece în accepțiunea strictă a rețelelor feed-forward ele nu au conexiuni cu lumea exterioară. Mai mult chiar, în interiorul rețelei nu există conexiuni

care să sară peste un strat. Indiferent de stratul căruia îi aparține, un neuron preia date doar de la stratul anterior și furnizează informații doar stratului superior.

Ultimul strat în ierarhia unei rețele feed-forward este stratul de ieșire. El oferă rezultatul procesării neuronale la ieșirea sa, dar și participă efectiv la procesarea în sine.

Există două moduri în care numărul de straturi din componența unei rețele feed-forward pot fi contorizate. Primul, nu ia în seamă prezența stratului de intrare atunci când sunt numărate nivelurile, însă cel de al doilea, da. Aici părerile sunt împărțite, fiecare autor alegând un mod sau altul. Subscriind pe parcursul acestei teze la primul mod, se va considera în continuare că o rețea neuronală cu N niveluri va avea $N-1$ niveluri ascunse.

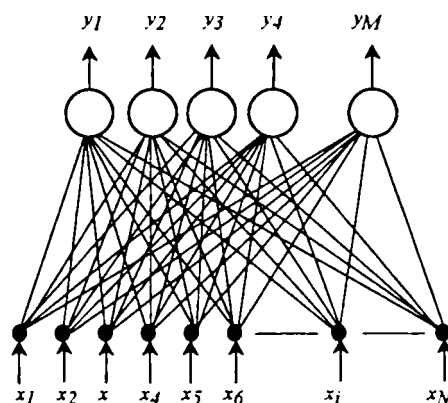


Figura 3.2 Schița unui perceptron simplu.

Întrucât pe parcursul acestei teze, se va face uz de o rețea feed-forward cu un singur strat, în continuare prezentarea se va concentra pe această direcție. O astfel de rețea, cu doar un singur strat poartă denumirea de perceptron simplu. Figura 3.2 face o prezentare schematică a unui perceptron simplu [223]. Există o serie de unități de intrare, ale căror indice este i și una sau mai multe unități de ieșire, indicele lor fiind j . Fiecare unitate de ieșire este conectată la toate unitățile de intrare.

Cu notațiile din figura 3.2, funcția de transfer a unui perceptron simplu este cea dată de relația (3.2) [223]. Fiecare legătură între o unitate de intrare și una de ieșire reprezintă câte o pondere (w_{ji}).

$$y_j = f(h_j) = f\left(\sum_i w_{ji}x_i\right) \quad (3.2)$$

Unde $f()$ este funcția de activare a neuronilor sau, cu alte cuvinte, funcția calculată de neuroni. $f()$ este în general o funcție neliniară, cum ar fi: funcția sigmoidală, o funcție cu prag, sau o funcție de distribuție. Dar, pentru anumite cazuri particulare, funcția de activare poate fi o funcție liniară.

w_{ji} reprezintă ponderile conexiunilor neuronilor. Ele sunt, în cele din urmă, valorile ce înmulțesc intrările de date (x_i), și care prin însumare dau așa numita intrare netă a neuronului, h_j .

Ceea ce este de remarcă în relația (3.2) este că ieșirea unui neuron, în orice moment, depinde doar de valorile prezente ale intrărilor. Nu sunt memorate și nici luate în calcul stările anterioare ale ieșirii. Acest aspect este definitoriu și este valabil pentru toate nuanțele de rețele feed-forward.

În contrast, rețelele neuronale recurente consideră și valorile stărilor de activare anterioare ale neuronilor. Din acest motiv ieșirea curentă este influențată de istoria evoluției rețelei. În plus, rețelele recurente au nevoie de un așa numit timp de relaxare între momentul în care se prezintă noile intrări și până când ieșirea aferentă lor este disponibilă.

Până acum nu s-a menționat noțiunea de prag în contextul rețelelor feed-forward, noțiune ce este atât de importantă în cazul modelului neuronului McCulloch - Pits. Și rețelelor feed-forward li se poate asocia un prag, pentru acestea fiind conținut implicit. Astfel, una din intrări poate fi conectată la valoarea -1, iar ponderea aferentă legăturii să fie setată la valoarea dorită pentru prag θ_j (vezi relația 3.3) [223]. În literatură se face referire la prag sub denumirea de componentă continuă (*bias*), deoarece rețelele feed-forward au funcții de activare continue.

$$y_j = f\left(\sum_i^{N-1} w_{ji} x_i - w_{jN}\right) = f\left(\sum_i^{N-1} w_{ji} - \theta_j\right) \quad (3.3)$$

Intrările rețelelor neuronale feed-forward pot lua atât valori booleene cât și valori continue. În schimb valorile ieșirilor sunt dictate de funcția de transfer aleasă, care fiind continuă va furniza tot valori continue. Uneori însă se dorește aproximarea unor valori discrete pentru ieșiri (± 1 sau 0-1), iar într-un astfel de caz se acceptă aproximarea valorilor logice cu o plajă de valori continue. Spre exemplu, valorile ieșirilor ce depășesc valoarea 0.8 se consideră a fii "1" logic.

Sarcinile pe care rețelele feed-forward le rezolvă sunt în general sarcini de asociere. Unui anumit set de modele de intrare i se asociază un anumit set de modele țintă. În cele mai multe situații modelele țintă diferă de modelele prezentate la intrare (cazul *hetero-asocierii*). Rețelele feed-forward sunt mai rar utilizate în cazuri de *auto-asociere*, unde modelele de intrare sunt practic reproduse la ieșirea rețelei.

Pentru rețelele feed-forward nu există o regulă care să definească o relație între numărul unităților de intrare și de ieșire. Unitățile de intrare pot fii mai multe (cazul cel mai des întâlnit) sau mai puține decât cele de ieșire.

Găsirea ponderilor care să conducă la obținerea unui anumit comportament al rețelei este o problemă pentru rețelele feed-forward, la fel ca și pentru orice fel de tip de rețea. În cazul

unui perceptron simplu se poate demonstra că dacă există un set particular de ponderi pentru o anumită sarcină dată, atunci acestea pot fi găsite într-un număr finit de iterații de învățare.

Există totuși sarcini, chiar simple, pe care perceptronul simplu nu le poate realiza. Una dintre acestea este celebra problemă a funcției logice "XOR", cea care a făcut ca în 1969 Minsky și Paper să sublinieze limitările acestui tip de rețea în cartea lor intitulată "*Perceptronul*" [223].

Pentru ca o problemă să fie rezolvabilă de către un perceptron simplu, se spune că spațiul modelelor de intrare trebuie să fie linear separabil. Deoarece toți neuronii unui perceptron simplu sunt identici, diferind doar prin valoarea ponderilor lor, se va discuta în continuare pe scurt capacitatea de rezolvare a sarcinilor de către un perceptron prezentând lucrurile din punctul de vedere al unui singur neuron.

Un neuron al unui perceptron simplu poate clasifica modelele de intrare în doar două clase, considerându-se că ieșirea lui aproximează două nivele logice, "0" și "1". Pentru ca un neuron să clasifice corect modelele de intrare trebuie deci ca acestea să poată fii separate în două categorii. Dacă se consideră modele de intrare cu doar două dimensiuni ce pot fi reprezentate într-un plan bidimensional, atunci termenul de categorii echivalează cu cel de semiplan. Într-un astfel de caz, este necesar ca spațiul modelelor de intrare să fie (linear) separabil în două semiplanuri distincte. Fiecare semiplan conținând doar modele care produc aceeași valoare de ieșire.

Dacă spațiul modelelor de intrare nu este linear separabil atunci problema nu se poate rezolva cu un perceptron simplu. Este necesar, în acest caz, un perceptron multistrat, adică o rețea feed-forward multistrat. Prin intermediul nivelelor intermediare perceptronul multistrat va realiza convenabil separarea spațiului modelelor de intrare, oferind stratului de ieșire (care este în cele din urmă un perceptron simplu) o problemă linear separabilă.

Pentru un perceptron simplu există mai multe modalități pentru determinarea ponderilor sale. În primul rând există șansa ca acestea să fie calculate. Dată fiind simplitatea unui perceptron simplu și a problemelor relativ simple pe care acesta le poate aborda, există situații când ponderile pot fi precalculate. Acesta este și cazul aplicației prezentate pe parcursul acestei teze (vezi paragrafele VI.5 și VII.1.1.B).

O altă alternativă, ar fi ca ponderile să fie găsite prin antrenare. Indiferent care este metoda aleasă (Hebbiană sau a Gradientului Descendent) ponderile sunt găsite plecând de la valori alese inițial aleator, pe parcursul unui număr finit de iterații. La fiecare iterație, ponderile sunt fin ajustate ținând cont de diferența dintre valoarea actuală a ieșirii și cea dorită (Hebb), sau de gradientul unui funcții de cost convenabil aleasă (metoda Gradientului Descendent).

III.3 Rețelele competitive simple

În paragraful precedent a fost prezentat perceptronul simplu, o variantă a rețelelor feed-forward. O caracteristică a rețelelor feed-forward este aceea că la un moment dat pot fii active mai multe unități ale stratului de ieșire.

În contrast rețelele competitive simple au la un moment dat activă doar o unitate, iar aceasta este una din trăsăturile definitorii. Unitățile unei rețele competitive concurează între ele pentru a deveni active. Doar ieșirea ce câștigă competiția va fi activată, de unde și denumirea: *câștigătorul-ia-totul (winner-take-all)*.

Sarcina pe care rețelele competitive o execută este aceea de a clasifica modelele de intrare. Intrări similare sunt clasificate în aceeași clasă, reprezentată de aceeași unitate de ieșire. Ceea ce trebuie subliniat încă de la început este că rețeaua este capabilă de una singură să realizeze catalogarea în clase a modelelor de intrare.

O rețea competitivă, capabilă să clasifice, are multe aplicabilități. Cea mai des întâlnită este cea de codare și compresie a datelor. Mai poate fi utilizată de asemenea în procesarea de imagini, aproximarea funcțiilor și chiar în analize statistice.

Intenționat a fost lăsat la urmă domeniul inteligenței artificiale, considerându-l ca fiind cel mai spectaculos. Orice entitate artificială va încerca sub o formă sau alta să înțeleagă lumea înconjurătoare ei, iar rețelele competitive pot alcătui un motor de clasificare puternic, cu ajutorul căruia se poate mima un proces de judecată.

Obținerea unui nivel minim de *intelență* este și scopul pe care încearcă prezenta teză să-l atingă. Făcând uz de o rețea competitivă, se încearcă în capitolul VII să se clasifice scenele ce apar în fața robotului pentru a oferi o bază de plecare nivelului de decizie a corecției traiectoriei.

Deși foarte atractive din multe puncte de vedere, rețelele competitive simple au câteva dezavantaje:

- O rețea competitivă dată, cu un număr dat de neuroni, nu poate clasifica decât un număr limitat de clase, egal cu numărul de neuroni ai rețelei;
- Nu sunt robuste la defecțiuni. Dacă un neuron al rețelei "moare", atunci se va pierde clasa reprezentată de acesta;
- Rețelele competitive simple nu pot reprezenta informație în mod ierarhic. Deoarece la un moment dat doar câte un neuron de ieșire este activ, nu există practic informație ce poate fi procesată de un eventual strat superior.

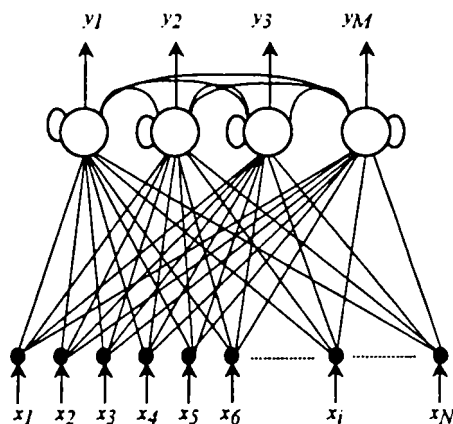


Figura 3.3 Schița unei rețele competitive simple.

Așa cum deja s-a menționat structura unei rețele competitive simple este compusă dintr-un singur strat de neuroni. Schița unei astfel de rețele este cea din figura 3.3 și așa cum se poate vedea neuronii rețelei sunt complet conectați la intrări [223]. Ponderile acestor conexiuni sunt întotdeauna excitatorii.

Ceea ce trebuie remarcat în figura 3.3 sunt conexiunile inhibitorii dintre neuronii rețelei. Chiar mai mult, fiecare neuron are câte o conexiune auto-excitatoare. Aceste conexiuni sunt cele cărora li se datorează comportamentul specific, de genul învingătorul-ia-totul, ele reprezentând caracteristica definitorie a rețelelor competitive simple. Prin acestea se deosebesc de structura unui perceptron simplu, spre exemplu, (vezi pentru comparare figura 3.2).

Intrarea netă a unui neuron dintr-o rețea competitivă simplă se calculează cu aceeași formulă ca și cea pentru cazul unui perceptron simplu [223]:

$$h_j = \sum_i w_{ji} x_i \quad (3.4)$$

Va câștiga competiția neuronul pentru care relația (3.4) va întoarce valoarea cea mai mare.

De fapt, nu contează modul în care caracterul de tipul învingătorul-ia-totul este implementat. Poate fii implementat, în cel mai bun caz, într-o structură hardware, când legăturile laterale între neuroni joacă un rol foarte important. Cu ajutorul lor sunt trimise "impulsuri" inhibitorii între neuroni, fiecare neuron încercând să domine. Iar, prin intermediul propriei legături excitatorii neuronii se "auto-încurajează".

La fel de bine însă, se poate obține același tip de comportament prin implementarea unei proceduri software care să caute maximumul în șirul de valori al intrărilor nete ale neuronilor.

Așa cum s-a menționat deja, o rețea competitivă va căuta "trăsăturile" definitorii pentru setul de date prezentate la intrare. Problema care rămâne este cea a determinării ponderilor neuronilor săi.

Literatura domeniului sugerează să se pornească ciclul antrenării rețelelor competitive simple cu valori mici și aleatoare pentru ponderi. Apoi se aduce la intrarea rețelei un set de modele într-o ordine aleatoare. Pentru fiecare model de intrare se va calcula intrarea netă a neuronilor, se va determina neuronul cu valoarea netă cea mai mare și doar acela va fi declarat învingător.

Acestui neuron câștigător i se vor adapta ponderile utilizând expresia [223]:

$$\Delta w_{ji} = \eta O_i (x_j^\mu - w_{ji}) \quad (3.5)$$

aducându-l prin această ajustare mai aproape de modelul tocmai prezentat. Datorită acestei modificări neuronul care tocmai a câștigat competiția are șanse sporite să câștige și în alte dați, și pentru alte modele, dacă între acestea există unele cât de cât asemănătoare cu modelul tocmai prezentat.

În relația (3.5) Δw_{ji} reprezintă cantitatea cu care se ajustează vectorul pondere, ajustare care se face proporțional (η) cu diferența dintre valoarea actuală a ponderii și modelul x_j prezentat la intrare. Indicele μ este numărul de ordine al modelului curent în setul de modele de antrenare. Termenul O_i , din aceeași relație (3.5), are valoarea 1 pentru unitatea care a câștigat competiția și 0 în rest. η ponderează valoarea ajustării și este așa numita rată de învățare.

Cu cât η este mai mare, cu atât învățarea este mai accelerată, dar există pericolul ca poziția de echilibru să nu fie atinsă niciodată. Pentru un η mare, neuronii sunt puternic ajustați de fiecare dată și în loc să aproximeze poziția de echilibru din ce în ce mai bine, se obține o mișcare haotică de oscilație în jurul ei. Dacă η este mic, se evită apariția oscilațiilor, dar învățarea este lentă. O soluție de echilibru ar fii ca la începutul învățării rata de adaptare (η) să fie mai mare, dar să fie diminuată pe măsură ce rețeaua se adaptează. Acest aspect conduce la problema dilemei stabilității-plasticității menționată spre sfârșitul acestui paragraf.

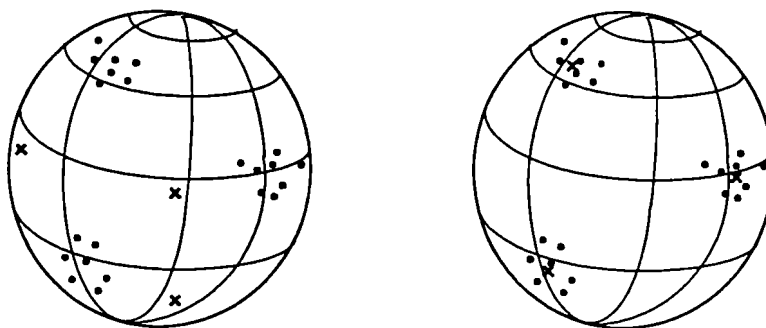


Figura 3.4 O reprezentare grafică a procesului de învățare pentru o rețea competitivă simplă.

Dacă se consideră o variantă normalizată pentru ponderile rețelei, dar și pentru modelele de intrare se poate face o analogie geometrică ce ilustrează perfect procesul de antrenare al unei rețele competitive simple (vezi figura 3.4) [223]. Se prezintă într-o manieră tridimensională cazul unei rețele cu trei intrări. În această accepțiune, fiecărui model de intrare x îi corespunde un punct de pe suprafața sferei de rază unitate.

Prima parte a figurii prezintă cazul inițial: punctele sunt modelele de intrare iar cruciulițele sunt pozițiile neuronilor rețelei competitive datorate ponderilor inițiale. Într-un caz ideal, fiecare neuron va câștiga din când în când competiția. Ponderile sale vor fi astfel adaptate încât poziția sa se va îndrepta spre centrul de greutate al pozițiilor grupului de modele pe care, în final, le va reprezenta.

Partea a doua a figurii 3.4 prezintă sugestiv rezultatul antrenării, când cruciulițele neuronilor rețelei aproximează centrele de greutate ale mulțimilor de puncte de modele de intrare.

Unul din neajunsurile acestui mod de antrenare este posibilitatea apariției așa numitor unități "moarte". Unitățile care prin inițializare au neșansa să cadă departe de orice model prezentat la intrare nu vor câștiga niciodată competiția. Astfel, ponderile lor nu vor fi adaptate iar aceste unități nu vor fi de fapt folositoare. Totuși, în viitor, dacă structura modelelor de intrare se modifică radical, unitățile ne-utilizate anterior pot avea șanse să devină utile. Chiar și aceste unități "moarte" pot avea uneori avantajele lor.

Pentru a preveni apariția unor neuroni "morți" se pot lua totuși o serie de măsuri:

- Inițializarea ponderilor neuronilor rețelei copiind unele dintre modelele de intrare. Se asigură astfel ca toate unitățile să aibe șanse să câștige din când în când competiția și astfel să devină utile;
- La adaptarea ponderilor să nu se facă ajustarea numai a ponderilor învingătorului ci și a învinșilor, dar bineînțeles cu o rată mai mică. În acest fel sunt avantajate și unitățile ce pierd mereu competiția, atrăgându-le spre zonele în care se află modelele de intrare. Crește astfel șansa ca acestea din urmă să câștige vreodată competiția. Acest mod de antrenare este cunoscut sub denumirea de "învățare cu scurgere de informație" (*leaky learning*).
- Se poate adăuga un anumit grad de zgomot peste modelele de intrare. Distribuția zgomotului folosit trebuie să aibe o anvelopă largă pentru ca șansele de a "capta" unitățile îndepărtate să crească.

Un alt neajuns al rețelelor competitive simple este numărul finit de unități de ieșire, număr ce trebuie ales în momentul conceperii rețelei. Acest număr poate fi ales mult prea mare și atunci avem de-a face cu apariția unităților "moarte"; sau prea mic, caz în care rețeaua nu va face față diversității modelelor de intrare.

În acest ultim caz, practic antrenarea nu se încheie niciodată, deoarece unii neuroni nu se vor putea hotărî ce modele să reprezinte. În fiecare epocă de antrenare valoarea cu care aceștia sunt ajustați fiind mare.

Aspectul indeciziei, prezentată mai sus conduce la o altă problemă a rețelelor competitive simple, și anume: “Când se consideră încheiat procesul de învățare?” Chiar dacă ajustarea ponderilor rețelei se face cu valori din ce în ce mai mici, la fiecare epocă neuronii rețelei își modifică ponderile vibrând în jurul unei poziții de echilibru reale.

Există opțiunea ca după un anumit număr de epoci de antrenare, să se înghețe valorile ponderilor neuronilor. Se scapă astfel de indecizia inerentă metodei de învățare, dar se pierde din flexibilitate. Așa cum se menționa și anterior, este posibil ca în viitor structura modelelor de intrare să se modifice radical, ponderile actuale să nu mai facă față acestora, și pentru că procesul de adaptare este stopat rețeaua să nu mai poată să se adapteze în continuare. Acest fenomen este recunoscut în literatură sub denumirea de dilema stabilității-plasticității.

Parte din aceste probleme sunt rezolvate de modele superioare ale rețelelor competitive simple. Carpenter și Grossberg introduc în 1987-88 modelul ART1 și respectiv ART2 ce rezolvă în bună măsură dilema stabilității-plasticității (ART este acronimul pentru Adaptive Resonance Theory) [223].

O altă variantă superioară a rețelelor competitive simple sunt rețelele Kohonen. Ele adaugă un plus de semantică poziției relative a neuronilor unii față de alții. În sinteză, rețelele de tip Kohonen alocă în zone învecinate neuroni ce clasifică stimuli asemănători. Deoarece copiază și mimează modul în care informația este prelucrată în creier ele au stârnit un interes deosebit. Succesul lor a fost atât de mare încât denumirea de rețele Kohonen a ajuns să fie atribuit uneori, din greșeală, și rețelelor competitive simple.

III.4 Concluzii

Deși rețelele neuronale artificiale sunt considerate încă exotice, fiind acceptate cu scepticism de industrie, ele au, fără doar și poate, un potențial ridicat de aplicabilitate.

Bariera majoră ce trebuie trecută însă, pentru a beneficia pe deplin de avantajele lor, este cea a implementării. În momentul în care va devenii comercial disponibil un cip care va putea implementa hardware o rețea de dimensiuni rezonabile, domeniul rețelelor neuronale va lua amploare, cu adevărat.

Ceea ce stă în fața realizării unei astfel de componente este tocmai structura rețelelor neuronale artificiale care, în general, necesită un număr foarte mare de interconexiuni între neuronii acesteia. Tocmai aceste conexiuni ocupă o prea mare parte a pastilei de siliciu, spațiul disponibil pentru procesoarele efective fiind prea mic încât rețeaua rezultată să aibe dimensiuni acceptabile.

O cale pentru depășirea acestui inconvenient, al multiplelor interconexiuni se prefigurează odată cu apariția rețelelor celulare. Prin însăși definiția lor, aceste rețele impun ca un neuron component să aibă conexiuni doar cu vecinii imediați. Dar acest tip de rețea se află abia la început de drum.

O altă cale pentru realizarea fizică a unor rețele neuronale artificiale sunt platformele multiprocesor. Rețelele astfel construite ating dimensiuni de până la 100000 de neuroni cifră ce poate acoperii o gamă destul de largă de aplicații. Problema cea mai mare a acestei implementări este cea a costului prohibitiv.

Reluând în încheierea acestui scurt capitol introductiv calitățile rețelelor neuronale artificiale, se justifică motivul ce a determinat ca acestea să constituie principalul motor a comportamentului propus în prezenta teză.

Gradul mare de robustețe la defecte, zgomot și inconsistență a datelor este doar una din calitățile majore ce recomandă rețelele neuronale artificiale pentru crearea de motoare de judecată, în aplicații ale inteligenței artificiale.

Paralelismul lor le recomandă pentru procesarea unor mari cantități de date. Puterea lor de a generaliza, de a oferi rezultate plauzibile chiar și pentru intrări cu totul noi, aduce un plus de valoare acestui mod de conducere.

Poate că ceea ce face din rețelele neuronale artificiale o alternativă de conducere atât de atrăgătoare este capacitatea lor de a învăța. Nu numai că uzând de această proprietate a lor se ușurează mult munca inginerului, dar ea deschide o cutie a Pandorei. Fără a dori să călcăm câtuși de puțin în lumea de vis a literaturii SF, posibilitatea creării unei mașini/entități care să fie capabilă să învețe din experiență pe parcursul întregii sale vieți este o iluzie pe cât de tentantă pe atât de uimitoare, sau poate chiar înspăimântătoare.

IV. Senzorii ultrasonici în robotică

IV.1 De ce senzori ultrasonici?

Pentru a-și justifica atributul de autonomi, roboții mobili moderni trebuie să fie capabili să evolueze în medii complexe, în care sunt supuși acțiunii la o multitudine de stimuli. Pentru ca ei să poată reacționa corespunzător acestor stimuli, să se adapteze cu alte cuvinte, trebuie să poată percepe acești stimuli.

Roboții mobili utilizează de o gamă foarte variată de senzori, din care, în ordinea frecvenței utilizării lor, amintim: video, ultrasonici, de proximitate, tactili, olfactivi, hodometrici, inerțiali și chiar sisteme de poziționare globală (GPS).

Senzorii ultrasonici ocupă un loc aparte în gama enumerată mai sus, pretându-se aplicațiilor din domeniul roboților mobili, așa cum se va încerca să se prezinte în continuare.

Sunt utilizați în primul rând la evitarea obstacolelor [88] [114] [149], unde se exploatează ușurința cu care se obține distanța până la obstacolele înconjurătoare din semnalul furnizat de ei la ieșire (cea mai simplă metodă: detectoare cu prag). Datorită volumului mic de procesare necesar sunt potriviți lucrului în timp real, atât de necesar în navigația autonomă.

Alte domenii de aplicabilitate a lor în tehnica roboților mobili sunt cele ale recunoașterii trăsăturilor, etapă premergătoare localizării (estimării poziției) robotului și nu în ultimul rând își găsesc aplicabilitate în explorare, la ridicarea hărții mediului înconjurător lor.

Unica condiție ce trebuie îndeplinită ca senzorii ultrasonici să poată fi utilizați într-un mediu oarecare este ca obiectele (obstacolele) din mediu să aibă o impedanță acustică diferită față de cea a mediului în sine, astfel încât să se poată genera reflexii semnificative ale undei ultrasonice la suprafața de separare a obiectului. Această condiție este îndeplinită fără probleme în cazul aplicațiilor din domeniul roboților mobili.

Iată punctate câteva dintre caracteristicile mai importante ale traductoarelor ultrasonice. Sunt enumerate acum pe scurt atât avantajele precum și dezavantaje lor, urmând ca în subcapitolele următoare acestea să fie tratate pe larg. Astfel:

- Au o rezoluție axială bună și una laterală slabă;
- Prezintă un lob larg al caracteristicii de directivitate, o deschidere de circa 60 de grade este comună multor tipuri de traductoare (vezi figura 4.1). Acest atribut poate fi considerat un dezavantaj dacă este privit din punct de vedere al rezoluției laterale. Dar se poate constitui și într-un avantaj după cum se va vedea mai târziu în cazul tehnicilor holografice, unde este de dorit ca atât emițătoarele cât și receptoarele să aibă o caracteristică de directivitate cât mai deschisă;
- Așa cum s-a amintit deja anterior, cu ajutorul lor se poate obține foarte ușor distanța până la obstacole. Necesită un minim de prelucrare.
- Totuși, este necesar un timp lung pentru investigare, cca. 60ms (pentru o rază supravegheată de până la 10m) comparativ cu un timp de 0.1ms necesar scannerelor laser. Ca și consecință directă a acestui timp mare de scanare, există situații când explorarea mediului se face în regim START-STOP pentru a ridica harta mediului (pe timpul achiziției robotul staționează).
- Au probleme cu obstacolele a căror suprafață de reflexie face un unghi prea mare față de axa lor centrală (vezi subcapitolul IV.3.2). Câmpul ultrasonic reflectat de acestea se întoarce în prea mică măsură la receptor, obstacolul fiind din acest motiv invizibil. Dar această problemă, așa cum se va arăta în continuare, își găsește soluție în cazul senzorilor multi-detector sau multi-traductor.
- Nu au probleme de vizibilitate. Pot lucra în condiții de iluminare necorespunzătoare, de vizibilitate redusă, chiar și cu obstacole transparente optic, condiții în care senzorii vizuali nu pot face față.
- Senzorii ultrasonici sunt afectați de zgomote, acesta constituind și cel mai serios neajuns al lor. Zgomotele care îi influențează se împart în două categorii: interferență cu alți senzori ultrasonici (așa numitul *cross-talk*, vezi subcapitolul IV.3.3) și zgomot ambiental (ce poate fi generat, spre exemplu, de scule așchietoare). Literatura abundă în soluții ce încearcă să rezolve aceste dezavantaje. Sunt cunoscute tehnici de control ale momentului emisiei/recepției, precum și a benzii de frecvențe cu care se lucrează [33].
- Suferă de problema reflexiilor multiple ale câmpului ultrasonic emis, problemă unanim recunoscută (vezi subcapitolul IV.3.4). Tocmai soluționarea acestei probleme constituie esența prezentei teze.
- Pot oferi informație despre impedanța acustică a obiectelor din mediu.
- Față de senzorii video, pot oferi direct informație tridimensională, ceea ce senzorii video nu reușesc decât cu un efort important, bazându-se larg pe înțelegerea imaginii.
- Utilizarea ultrasunetelor în vederea artificială beneficiază de viteza redusă în aer a sunetului față de cea a luminii. Este posibilă astfel folosirea informației de fază a undelor sonore pentru determinarea structurii câmpului acustic. Această trăsătură stă la baza tehnicii holografiei ultraacustice, ce va fi prezentată în capitolul IV.6, tehnică care după cum se va vedea, oferă soluții la problemele conducerii roboților mobili.
- Au un cost redus, simplitate constructivă și o fiabilitate mare.

Cu toate aceste avantaje, soluțiile de ultimă oră recurg la o combinarea mai multor tipuri de senzori pentru roboții mobili autonomi [65] [76] [93] [96] [97] [117] [131], senzori ce se completează reciproc în faza de achiziție a informației despre mediu. Se obține astfel un sistem mai viabil, redundant chiar. Pe parcursul prezentei teze se va demonstra însă suficiența senzorilor ultrasonici în multe dintre sarcinile roboților mobili, cum ar fi evitarea obstacolelor.

IV.2 Parametrii traductoarelor ultrasonice

Din întreg șirul parametrilor ce caracterizează traductoarele ultrasonice vor fi punctați doar o parte, anume cei care prezintă interes din punct de vedere al capitolelor ce urmează.

- Poate că cea mai importantă caracteristică a traductoarelor ultrasonice o reprezintă rezoluția lor spațială, cu cele două componente ale sale: rezoluția axială și cea laterală.

Rezoluția spațială este dată de distanța minimă dintre două obiecte din spațiu pe care senzorul le mai poate percepe încă ca fiind distincte. În figura 4.1 sunt prezentate sugestiv rezoluțiile axială și laterală notându-le cu d_x și respectiv d_y . În cazul traductoarelor ultrasonice rezoluția axială este mult mai bună decât cea laterală. Această diferență poate să fie de până la două ordine de mărime.

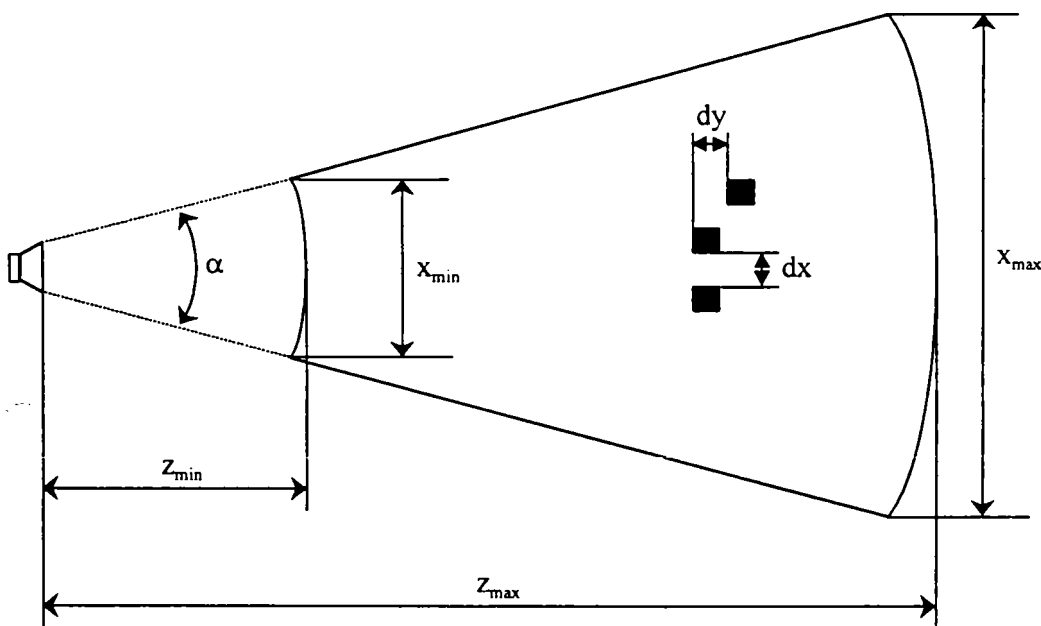


Figura 4.1 Forma câmpului investigat. Rezoluția spațială.

- Domeniul de supraveghere se constituie într-un alt parametru important. El este mărginit inferior (z_{\min} în figura 4.1) de lungimea salvei emise și viteza de deplasare a sunetului în aer, conform relației (4.1).

$$z_{\min} \geq \frac{\Delta t \cdot v}{2} \quad (4.1)$$

În relația (4.1) intervin mărimile:

- z_{\min} : marginea inferioară a câmpului investigat;
- Δt : durata salvei ultrasonice;
- v : viteza undei ultrasonice în aer.

Obiecte ce se găsesc la o distanță mai mică decât jumătatea drumului parcurs de frontul ultrasonic pe durata emisie salvei nu pot fi detectate deoarece ecoul la recepție s-ar suprapune peste însăși salva emisă.

Domeniul de supraveghere este limitat superior de factorul de atenuare a mediului la frecvența de lucru, coroborat cu sensibilitatea traductoarelor (z_{\max} în figura 4.1). Pe părțile laterale, domeniul de supraveghere este delimitat de caracteristica de directivitate a senzorului (vezi figura 4.1).

- Parametrii mecanici: dimensiunile traductorului (mai ales diametrul său) influențează atât forma lobului de directivitate (zone de câmp apropiat și depărtat) precum și domeniul frecvențelor de lucru ale traductorului. În figura 4.1 lobul de directivitate este sugerat prin parametrii: α , x_{\min} și x_{\max} .

În plus, dimensiunile devin critice în cazul unor vectori sau matrice de traductoare, unde amplasarea lor în ansamblu trebuie să aibă poziții bine definite. Deseori, distanța dintre traductoare ar trebui să fie mai mică decât diametrul acestora, pentru o eșantionare spațială corectă.

- Banda frecvențelor de lucru reprezintă de asemenea un parametru demn de menționat. Frecvența de rezonanță serie a traductorului pe care lucrează sistemele în undă continuă va decide până la urmă limita superioară a domeniului supravegheat, deoarece atenuarea crește în aer pătratic cu frecvența. Frecvențele de lucru utilizate în mod curent în aer sunt cuprinse între 30KHz și 200KHz.

Banda de frecvențe în care poate lucra traductorul este importantă în cazul tehnicilor holografice, unde ar fi de dorit ca aceasta să fie cât mai mare, pentru a putea reda impulsuri de durată cât mai redusă [162] [163].

- Un ultim parametru al traductoarelor ultrasonice, important în cazul roboților mobili, este puterea emisă. Pe de-o parte, aceasta se dorește a fi cât mai mare, pentru a putea

supraveghea un domeniu cât mai larg, dar în același timp câmpul ultrasonic trebuie să fie inofensiv pentru subiecții ce populează mediul robotului.

IV.3 Probleme de bază la detectarea cu ultrasunete

Dat fiind potențialul tehnicilor de detecție ultrasonică în domeniul roboților mobili, dar și în robotică în general, se va încerca în acest subcapitol să se puncteze câteva aspecte ale detectării cu ultrasunete. Problemele enumerate în continuarea acestui paragraf sunt valabile indiferent de tehnica de investigare utilizată.

IV.3.1 Natura reflexiei

Toate tehnicile de investigare ultrasonică au la bază fenomenul de reflexie a unei unde emise pe suprafața obstacolelor din mediu, așteptând ca o parte a acestei energii să fie redirectată înapoi spre traductoare.

Totalitatea energiei ultraacustice incidentă pe suprafața unui obstacol este: fie reflectată, fie absorbită de către aceasta. Parametrul care decide cantitatea de energie reflectată este așa numitul *coeficient de reflexie*. Pentru o undă plană, normal incidentă la o suprafață plană, acest coeficient se definește ca fiind raportul între energia incidentă și cea reflectată (relația 4.2):

$$K_r = \frac{I_t}{I_r} = \left(\frac{Z_a - Z_o}{Z_a + Z_o} \right)^2 \quad (4.2)$$

Unde: K_r : este coeficientul de reflexie;
 I_t : este intensitatea undei incidente;
 I_r : este intensitatea undei reflectate;
 Z_a : este impedanța acustică a aerului; iar
 Z_o : este impedanța acustică a obiectului.

Din expresia coeficientului de reflexie se poate observa că cu cât diferența între impedanța acustică a mediului de propagare a câmpului ultrasonic și cea a obstacolelor este mai mare, cu atât coeficientul de reflexie este mai mare, și deci, și cantitatea de energie reflectată înapoi spre traductoare este și ea mai mare.

Din acest punct de vedere aplicațiile din domeniul roboților mobili nu au nici un fel de probleme. Diferența între impedanța acustică a aerului și cea a posibilelor obstacole din lumea roboților mobili asigură pentru majoritatea cazurilor existența unei reflexii semnificative.

Dar, pe lângă coeficientul de reflexie mai există încă un parametru care influențează cantitatea de energie întoarsă la traductoare, și anume *directivitatea* suprafețelor obstacolelor.

Privite astfel, obstacolele se pot împărți în două categorii, funcție de natura reflexiei pe care o realizează. Anume, obstacole cu reflexie speculară respectiv difuză. Este greu de apreciat care dintre acestea este mai favorabilă investigării ultrasonice.

Datorită lungimii de undă cu care se lucrează în aer (8.25mm la 40KHz) majoritatea obstacolelor prezintă o reflexie speculară, comportându-se ca niște oglinzi perfecte. Caracteristic pentru acest caz este prezența unei direcții predominante de reflexie a energiei incidente, respectându-se legile reflexiei (unghiul de incidență este egal cu cel de reflexie).

În contrast, reflexia difuză nu prezintă o direcție predominantă pentru unda reflectată. Energia incidentă este împrăștiată omnidirecțional în urma reflexiei. Privite comparativ, prin prisma investigării ultrasonice, ambele tipuri de reflexie au avantaje și dezavantaje. Reflexia difuză oferă șanse mai mari ca cel puțin o parte a energiei să fie captată de receptor, intensitatea acestei părți va fi însă mult scăzută. Pentru o reflexie speculară în schimb, șansele ca energia să fie redirecționată spre traductor sunt mai mici, dar pentru unghiuri favorabile (vezi paragraful următor) energia captată la recepție va fi mare.

Apare natural întrebarea: Ce determină apariția uneia sau alteia dintre cele două tipuri de reflexie pentru un semnal ultrasonic incident dat? Răspunsul acestei întrebări este dat de rugozitatea suprafețelor obstacolelor. Astfel, dacă rugozitatea suprafeței este mai mică decât lungimea de undă a energiei ultraacustice utilizate apare o reflexie speculară. Pe când, dacă rugozitatea suprafeței este comparabilă sau mai mare decât lungimea de undă utilizată, reflexia va avea o natură difuză.

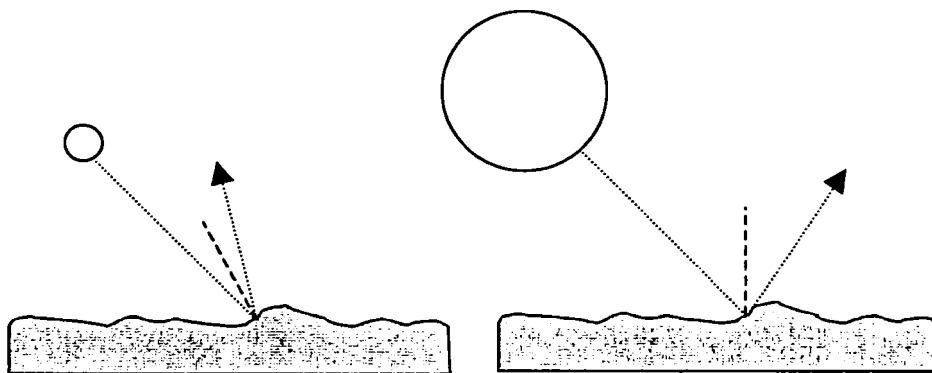


Figura 4.2 Efectul rugozității asupra naturii reflexiei generate.

H. R. Everett utilizează în [164] un exemplu sugestiv pentru ilustrarea acestui fenomen. Se consideră o suprafață cu o rugozitate dată, ca în figura 4.2 și două mingi de dimensiuni diferite. Prima are un diametru mai mic decât rugozitatea suprafeței iar cea de a doua unul mult mai mare. În cazul primei mingi unghiul de reflexie poate fi unul oarecare funcție de normala locală în punctul de contact cu suprafața, pe când în cazul celei de a doua,

neregularitățile sunt prea mici pentru a avea un efect iar unghiul de reflexie va fi dat de normala la întreaga suprafață.

Un alt exemplu ilustrativ este cel al unei lanterne orientată oblic pe suprafața unei oglinzi. Nu va fi vizibil locul în care conul de lumină se reflectă pe oglindă tocmai datorită reflexiei totale, dar dacă aceeași lanternă se îndreaptă spre un perete, pata luminoasă va fi clară, având o reflexie difuză acum.

Un exemplu de reflexie difuză, chiar din domeniul investigației ultrasonice, este cel al situației în care un liliac se poate încâlci între firele de păr ale unei persoane. Datorită naturii sale și dimensiunii firelor de păr uman, se generează o reflexie difuză a câmpului ultrasonic, iar intensitatea câmpului recepționat de liliac este atât de scăzută încât acesta decide că nu are obstacole în fața sa.

Problema naturii reflexiei generate pe suprafața obiectelor are mare importanța, stând și la baza altor aspecte ale investigației cu ultrasunete, așa după cum se va vedea în continuare.

IV.3.2 Reflexiile totale

Exemplul arătat anterior, cel cu lanterna orientată spre o oglindă poate servi și pentru ilustrarea fenomenului de reflexie totală. Presupunând că pentru început se îndreaptă lanterna normal la suprafața oglinzii, observatorul va putea detecta fasciculul reflectat. Dacă lanterna este rotită, unghiul de incidență crește, iar la un moment dat observatorul va pierde din vedere fasciculul reflectat.

Fenomenul reflexiei totale implică o reflexie speculară când rugozitatea suprafețelor este mult mai mică decât lungimea de undă utilizată.

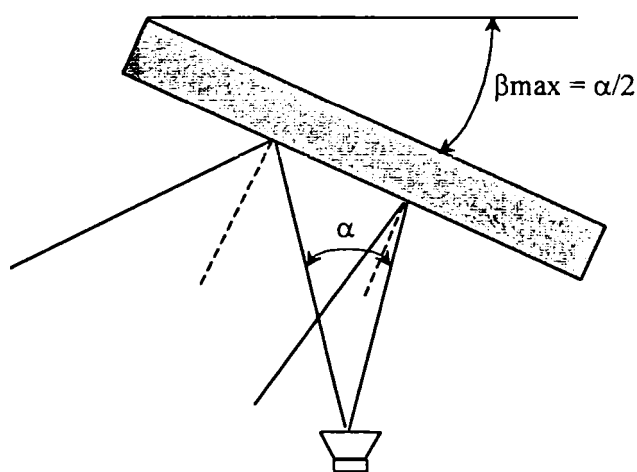


Figura 4.3 Reflexia totală la detecția obiectelor înclinate.

Pentru cazul investigării ultrasonice, în ecuația fenomenului de reflexie totală mai intră și valoarea deschiderii conului de sensibilitate al traductoarelor utilizate [162]. Așa după cum se arată în figura 4.3, din considerente geometrice, pentru ca energia câmpului ultrasonic care se întoarce la receptor să fie nenulă obiectele pot avea abateri de la normala suprafeței de cel mult $\alpha/2$, unde α este deschiderea caracteristicii de directivitate.

Pentru traductoarele uzuale valoarea deschiderii conului de directivitate este tipic de 60 de grade. Astfel că, obiectele poziționate oblic față de sistemul de traductoare cu un unghi mai mare decât 30 de grade nu vor mai putea fi sesizate de către același traductor care a emis impulsul.

Această problemă este critică pentru sistemele cu un singur traductor și este oarecum ameliorată de prezența la recepție a unui șir, sau a unei matrice de traductoare. Dacă totuși se alege o soluție cu un număr mic de traductoare, atunci fie se apelează la o apertură mecanică fie se alege un traductor cu o caracteristică de directivitate largă.

Din păcate, în practică, datorită lungimii de undă mari specifice investigării în aer, mai toate suprafețele se comportă ca fiind oglinzi perfecte, fenomenul de reflexie totală fiind comun multor situații. Merită amintit exemplul menționat de U. Nehmzov [228] în care un robot mobil testat în holul unui oficiu tapetat în oglinzi a eșuat lamentabil deși în laborator, același robot, oferea performanțe mulțumitoare.

IV.3.3 Nedeterminarea laterală a obiectului care a generat reflexia.

Așa după cum s-a amintit deja, un parametru important al traductoarelor ultrasonice este caracteristica lor de directivitate. De obicei acest parametru este specificat de către producător prin grafice ce reproduc scăderea sensibilității cu depărtarea de axa mediană a traductorului. Practic, pentru a ușura modelarea traductoarelor, se consideră că acestea prezintă un con de directivitate cu o deschidere dată. Uzual unghiul de deschidere pentru traductoarele comune este de 60 de grade (vezi figura 4.1).

Un prim efect secundar al unui lob larg este nedeterminarea laterală a obiectului care a generat reflexia. Directivitatea traductoarelor este cea care stabilește rezoluția laterală a sistemului în cazul metodelor cu un singur detector. Pentru un ecou dat, obiectul pe care s-a făcut reflexia se poate găsi oriunde pe un arc de cerc a cărui rază este egală cu distanța detectată și cu o deschidere egală cu valoarea unghiului de directivitate a traductorului.

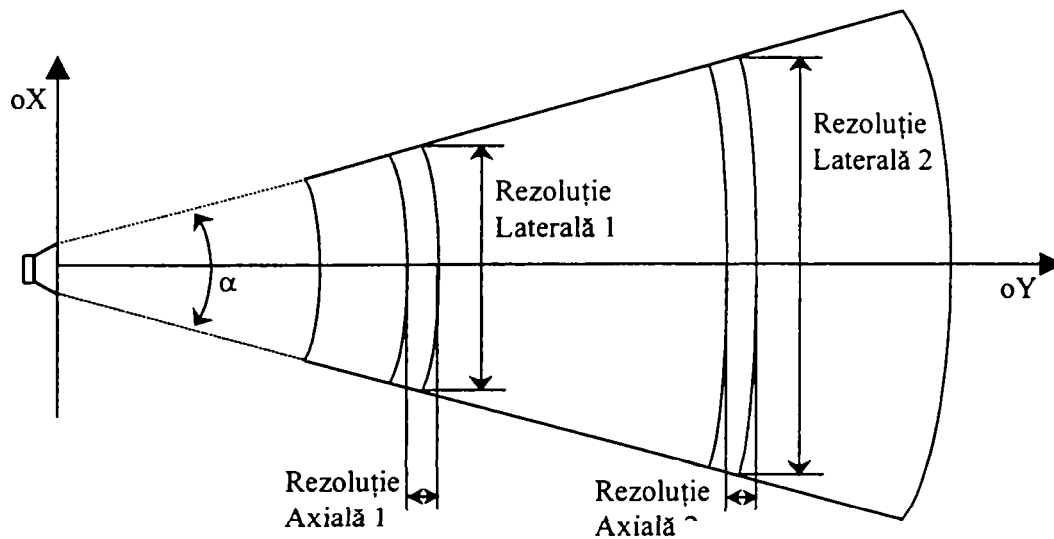


Figura 4.4 Degradarea rezoluției axiale cu creșterea distanței de detecție.

În figura 4.4 se poate observa cum rezoluția laterală scade pe măsură ce distanța detectată crește, în condițiile în care rezoluția axială se păstrează practic constantă.

O primă soluție a acestei probleme este, în mod firesc, utilizarea unor traductoare cu o caracteristică de directivitate cât mai bună. Dar, chiar dacă se trece peste aspectul costului unor astfel de traductoare, adâncimea câmpului investigat este totuși limitată, pentru că, oricât de directiv ar fi un traductor, pentru distanțe mari deschiderea conului devine importantă totuși.

O altă posibilă abordare este cea a lui Borenstein J. și Koren Y. în [6] [49]. Ei țin cont de incertitudinea direcției obiectului care a dat reflexia, dar este speculată șansa ca obiectul reflector să se afle mai aproape de direcția axei acustice decât de marginile conului ultrasonic.

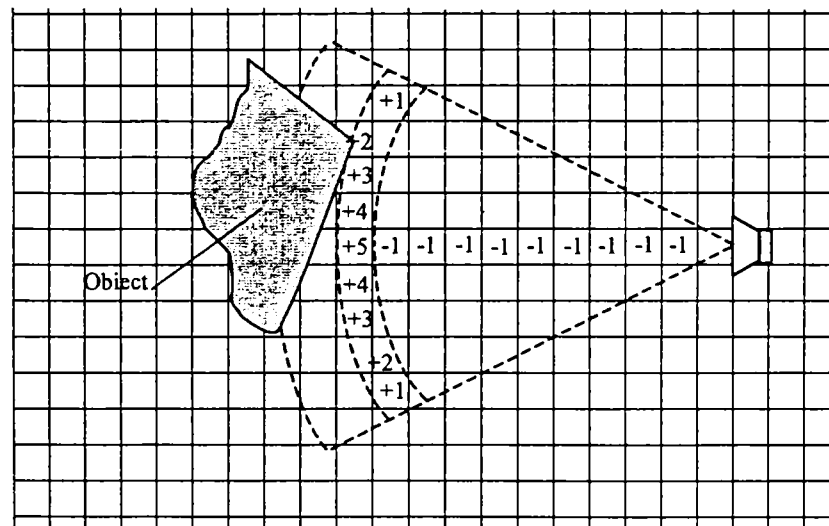


Figura 4.5 Metodă de actualizare a probabilității de ocupare a spațiului care ia în considerare incertitudinea laterală a traductoarelor [49].

Propriu-zis, metoda împarte scena în celule pătrate de dimensiuni ce concordă cu rezoluția axială a senzorului și care inițial sunt considerate libere. În memoria robotului, grilei cu celule (vezi figura 4.5) i se asociază o matrice a cărei elemente sunt inițial nule. În urma unei scanări, celulelor (elementelor matricei) care se află în zona activă a senzorului le este crescută valoarea, pe când celulelor de pe axa acustică le este decrementată valoarea, dacă s-a înregistrat un ecou (vezi figura 4.5). Procedeu se repetă pentru un număr cât mai mare de citiri, elementele matricei din memoria robotului redând prin valoarea lor probabilitatea de ocupare cu obstacole a spațiului.

O a treia soluție, poate cea mai avantajoasă, este utilizarea unui sistem multitractor implicând algoritmi specifici de prelucrare a ecourilor recepționate. O soluție elegantă a acestei probleme este oferită de către holografia acustică în impuls, după cum se va vedea în capitolele următoare.

IV.3.4 Reflexiile multiple.

O altă consecință a unei caracteristici de directivitate largi este creșterea probabilității detectării unor reflexii multiple care conduce, așa după cum se va arăta, la apariția unor obiecte fantomă în imaginea reconstruită a mediului.

Reflexiile multiple se definesc ca fiind succesiunea de reflexii, (cel puțin două), pe care o poate suporta unda ultrasonică în propagarea sa de la emițător la receptor. Ecourile multiple pe de altă parte, sunt ecouri recepționate datorate reflexiei pe suprafața mai multor obiecte din mediu, dar pe calea emițător - receptor fiecare undă suferă doar o singură reflexie.

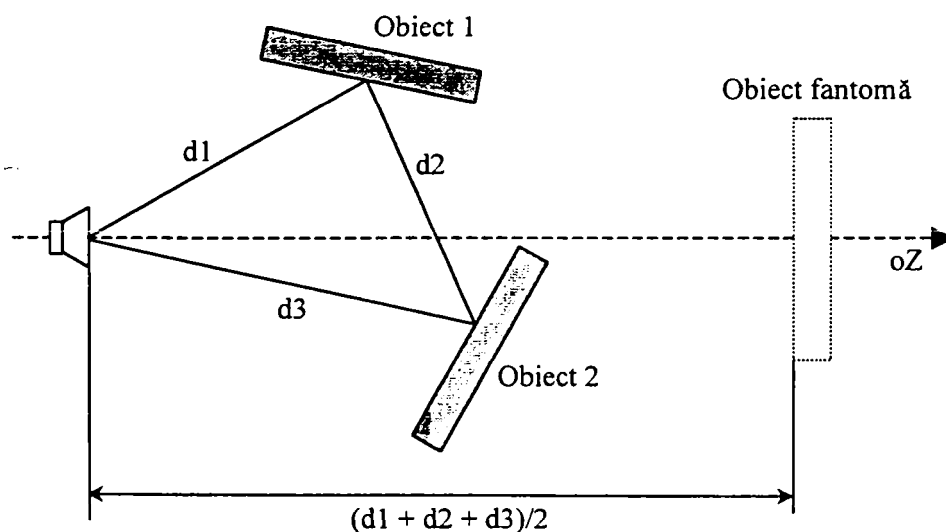


Figura 4.6 Fenomenul reflexiei multiple

Condițiile pentru ca un astfel de efect să apară sunt particulare, dar din păcate realizabile în practică. După cum se poate observa în figura 4.6, pentru a avea o reflexie multiplă este necesar nu numai ca obiectele să cadă în interiorul zonei investigate ci în plus să aibă și o anumită orientare, defavorabilă în acest caz.

Rezultatul detectării unei reflexii multiple este apariția unui obiect fantomă în imaginea reconstruită (obiectul reprezentat punctat din figura 4.6). Distanța la care acesta apare este egală cu jumătatea perimetrului poligonului pe laturile căruia s-a produs reflexia multiplă.

O altă situație des întâlnită în practică, unde efectul reflexiilor multiple este deranjant, este chiar cazul roboților mobili echipați cu un brâu de detectoare. Efectul se face resimțit cu precădere în situațiile în care robotul se găsește la capătul unui coridor. În această topologie, cu trei pereți în imediata vecinătate a robotului se poate întâmpla ca o salvă emisă de unul din detectoare să sufere o reflexie multiplă și să excite la recepție un traductor al unui alt detector din brâul de detectoare.

Această situație este cunoscută ca și fenomenul de cross-talk. Pentru evitarea lui, soluțiile întâlnite în literatură [92] propun aplicarea unor algoritmi complicați pentru determinarea momentului de emisie și respectiv de recepție a fiecărui detector din brâul de senzori al robotului.

O altă posibilă soluție este utilizarea unui sistem multi-traductor și a unui algoritm care să coreleze reflexiile recepționate. Un astfel de procedeu poate elimina detecția reflexiilor multiple, deoarece configurația particulară defavorabilă nu se realizează simultan pentru toate traductoarele sistemului.

Soluționarea problemei reflexiilor multiple este un alt scop urmărit pe parcursul prezentei teze. Se va vedea în capitolele următoare, că utilizând tehnici holografice avansate, această problemă este elegant rezolvată.

IV.3.5 Zona de umbră din domeniul de investigare

Un alt efect secundar al unei caracteristici de directivitate largi este prezența unei așa numite *zone de umbră* în interiorul zonei investigate. Aceasta se manifestă prin obținerea unor ecouri mult mai slabe decât ar fi normal pentru obstacole situate în interiorul unei anumite porțiuni din mediul investigat. Prin "mai slab" înțelegând ecouri cu o amplitudine mai mică decât cea rezultată în urma atenuării la deplasarea prin aer.

Experimentul care a condus la observarea fenomenului de zonă de umbră este schițat în figura 4.7. Sunt arătate aici șirul de traductoare (așezate orizontal), planul de susținere și obstacolul. Acesta din urmă este deplasat dealungul axei mediane a sistemului de traductoare. Pentru fiecare poziție a obstacolului este emisă o salvă ultrasonică, memorând valoarea amplitudinii ecoului recepționat.

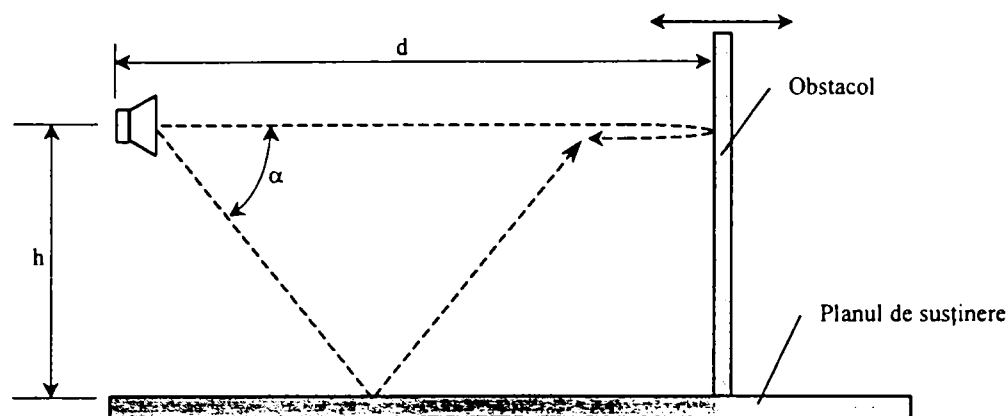


Figura 4.7 Topologia experimentului pentru determinarea zonei de umbră.

În figura 4.8 sunt prezentate rezultatele obținute în timpul experimentelor efectuate. Curba B redă amplitudinea ecourilor recepționate pentru îndepărtarea obstacolului de-a lungul axei mediane a sistemului de traductoare. Trebuie subliniat că suprafața de susținere a experimentului a fost netedă.

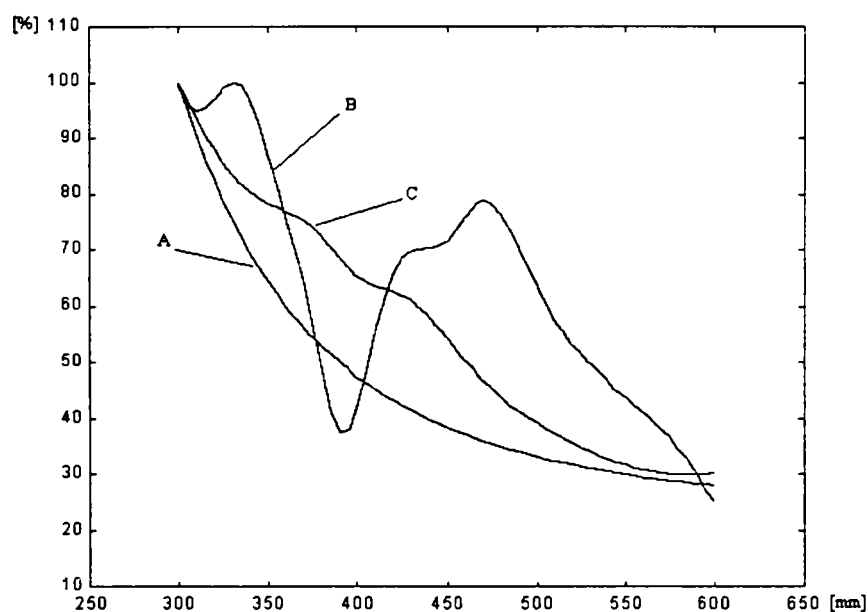


Figura 4.8 Efectul de zonă de umbră.

În aceeași figură 4.8 este redată și evaluarea teoretică a atenuării (curba A) la propagarea impulsului ultrasonic prin aer. S-a avut în vedere pentru calculul curbei A, atât atenuarea datorată propagării în mediul disipativ al aerului cât și atenuarea datorată împrăștierea energiei acustice [166]. Prin compararea celor două curbe se poate ușor sesiza porțiunea cu răspuns atenuat.

Forma acestei regiuni de umbră este sugerată în figura 4.9. Ea reprezintă o porțiune de coroană circulară ce începe să-și facă simțită prezența în jurul valorii de 350 mm depărtare de

traductoare, are un maxim la 390mm și dispăre apoi treptat. Nu trebuie trecute cu vederea nici cele două maxime locale ce mărginesc groapa de răspuns minim.

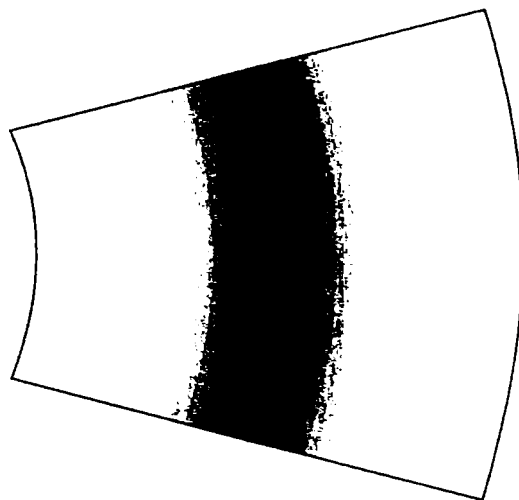


Figura 4.9 Forma zonei de umbră.

O posibilă explicație a fenomenului observat este următoarea. Impulsul acustic emis urmărește două căi de deplasare diferite, așa cum s-a sugerat punctat în figura 4.7. Prima cale, este cea normală, de la emițător la obstacol și înapoi. Componenta câmpului care parcurge această primă cale va interfera la un moment dat cu o alta, care plecând de la traducătorul emițător se reflectă pe suprafața planului de susținere. Pentru anumite poziții ale obstacolului (anumite depărtări față de traductoare) cele două componente se cumulează (vezi maximele curbei B, figura 4.8) sau se atenuază reciproc (minimul curbei B, figura 4.8).

Dacă se impune condiția ca cele două posibile trasee ale impulsului ultrasonic să aibă aceeași lungime, pentru ca ambele salve să ajungă în același punct, în același moment, se poate găsi relația între depărtarea obstacolului, înălțimea suportului traductoarelor și unghiul α (vezi figura 4.7):

$$d = h \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{\sin \alpha} \right) \quad (4.3)$$

Distanța dintre traductoare și obstacol pentru care efectul de zonă de umbră apare depinde de:

- Înălțimea (h) la care sunt dispuși senzorii față de suprafața de susținere;
- unghiul (α) sub care se face emisia impulsului secundar; și
- evident înclinarea suprafețelor din mediu.

Înlocuind în relația (4.3) valoarea înălțimii suportului traductoarelor ($h = 250\text{mm}$) și cunoscând poziția minimumului din graficul amplitudinii ecoului ($d = 390\text{mm}$) se obține, prin mai multe aproximări succesive, valoarea de 65 de grade pentru unghiul α sub care s-a făcut emisia celei de-a doua componente ce se reflectă pe suprafața planului de susținere.

Întrucât, această valoare este mult mai mare decât jumătatea deschiderii caracteristicii de sensibilitate a traductoarelor utilizate (care este de 60 de grade) se presupune că aceasta prezintă un lob secundar.

Pentru a verifica justetea afirmațiilor făcute, s-a procedat la un al doilea experiment. Suprafața planului de susținere s-a acoperit cu un burete poros. Refecând experimentul anterior s-a obținut de această dată curba cu aliura C din figura 4.8. Se observă o diminuare puternică a efectului de zonă de umbră, curba C fiind mai aproape de cea ideală (curba A).

Se dovedește astfel că efectul de umbră se datorează componentei reflectate pe suprafața planului de susținere care interferă cu impulsul principal pe calea lui de întoarcere. Prezența buretelui oferă o reflexie difuză a pulsului secundar, iar interferența între cele două componente ale câmpului este mult diminuată.

Tendința actuală este aceea de a scădea statura roboților mobili, parametrii experimentului efectuat fiind tocmai în această gamă de dimensiuni. Cu cât traductoarele sunt amplasate la o înălțime mai mare față de suport cu atât zona de umbră se îndepărtează față de acestea și probabil că din acest motiv fenomenul nu a fost încă sesizat. Ar mai fi de menționat că literatura nu face deloc referire la prezența unui astfel de fenomen.

IV.4 Metode de investigare acustică

Primele realizări în domeniul vizualizării cu ultrasunete sunt datate încă de la începutul secolului trecut. Se poate menționa ca o posibilă primă aplicație cu ultrasunete realizarea sonarului (*sound navigation ranging*) de către cercetătorul francez Paul Langevin. Principiul de funcționare a acestui dispozitiv este unul des întâlnit încă și azi, anume metoda puls-ecou.

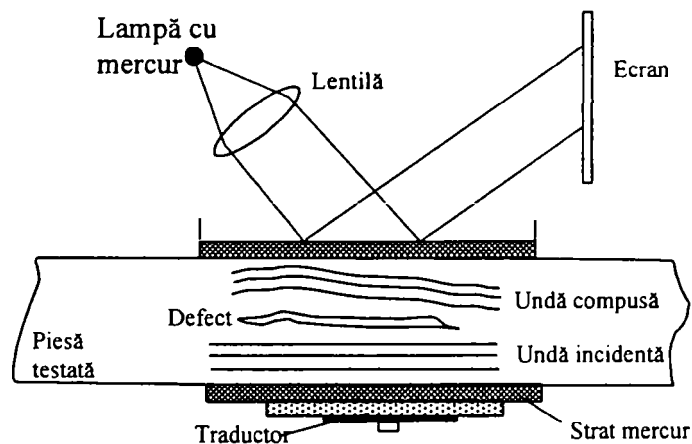


Figura 4.10 Schița microscopului lui Sokolov

Meritul lui Langevin a fost însă acela de a folosi pentru prima dată traductoare piezoelectrice exploatate la rezonanță pentru a produce și dirija un câmp acustic intens. Domeniul de aplicabilitate era însă limitat la medii omogene întinse și cu atenuare redusă, anume mediul

oceanic. De fapt scopul pentru care sonarul a fost conceput, a fost acela al detectării submarinelor germane în Primul Război Mondial.

O altă aplicație a ultrasunetelor, demnă de remarcat, este cea legată de numele cercetătorului rus S.J.Sokolov, care în perioada interbelică a realizat o prima variantă a unui microscop ultrasonic. Sokolov a utilizat câmpul ultrasonic pentru investigarea structurii interne a pieselor metalice. Figura 4.10 ilustrează schematic structura microscopului propus de Sokolov.

Piesa testată este supusă unui câmp ultraacustic intens generat cu ajutorul unui traductor piezoelectric. Pentru a îmbunătății cuplajul între traductor și piesa testată s-a interpus între acestea un strat de mercur (sau apă). Undele care străbat materialul sunt afectate de structura acestuia, producând la suprafața peliculei de apă forme specifice. Prin iluminarea suprafeței lichidului cu o sursă de lumină puternică (lampă cu mercur) se obține o reflexie care captată pe un ecran formează o imagine specifică. Rezultatele obținute pe ecran sunt clar diferite între o piesă omogenă și una cu defecte interioare, putându-se urmări astfel calitatea produselor.

Trebuie notat că Sokolov realizează astfel o primă aplicație în domeniul testării nedistructive. Totodată, datorită principiului folosit, care reconstruiește practic structura câmpului ultrasonic, lui îi este atribuită și realizarea primei holograme, debutul unui domeniu pe cât de vast pe atât de fructuos.

Dacă se trece în revistă întreaga varietate de sisteme, cunoscute astăzi, în care se face uz într-un fel sau altul de câmpul ultrasonic pentru a obține informație spațială despre mediu, se pot sintetiza trei categorii fundamentale de investigare acustică [162] [163]. Și anume:

- Sisteme ortogonale cu maparea intensității;
- Sisteme bazate pe metoda puls-ecou; și
- Sisteme fază-amplitudine.

IV.4.1 Sisteme ortogonale cu maparea intensității.

Aceste sisteme fac uz de principiul de investigare cel mai simplu de formare a unei imagini folosind energia acustică. Sistemele din această categorie produc o imagine (hartă) bidimensională a transmisiei undei ultraacustice prin obiectul investigat.

Sistemul de investigare are aceeași structură schematică cu cea a unui aparat uzual pentru radiografii pulmonare cu raze X, trăsătura de bază fiind aceea că emițătorul și receptorul sistemului sunt poziționate de-o parte și de alta a obiectului supus investigației.

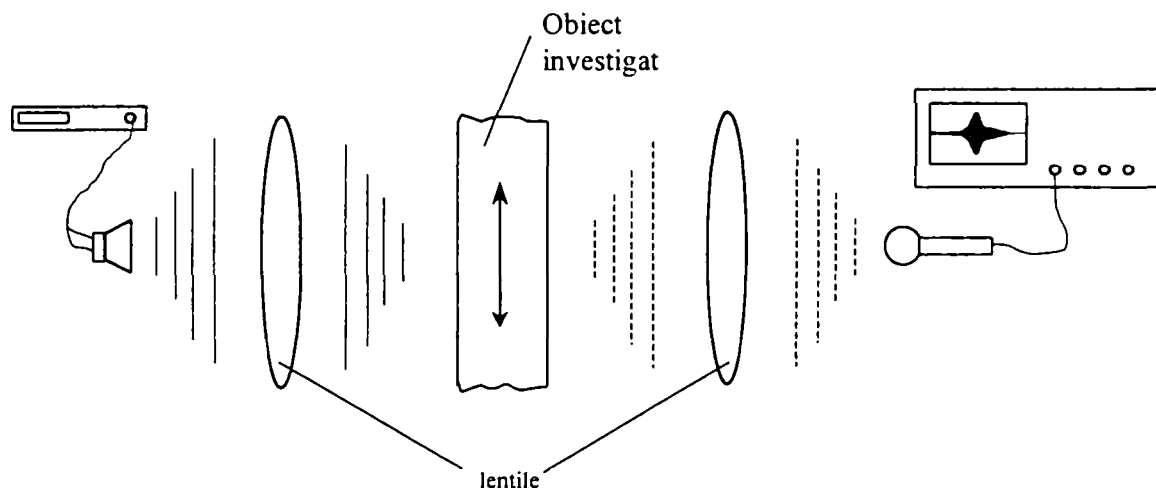


Figura 4.11 Schița sistemelor ortogonale cu maparea intensității

Un asemenea sistem se prezintă schițat în figura 4.11 [162] [163]. Traductorul emițător produce câmpul ultrasonic care este apoi precis concentrat de către lentila acustică în punctul investigat. Câmpul divergent rezultat în urma parcurgerii elementului supus testării este concentrat din nou de către cea de a doua lentilă acustică. Dacă elementul parcurs testării se deplasează consecvent pe două direcții ortogonale se poate obține "harta" transparenței acestuia. În același timp trebuie păstrată sincronizarea între deplasarea mecanică a obiectului testat și cea a spotului pe ecranul catodic. Se va obține astfel o imagine a cărei intensitate luminoasă este modulată de amplitudinea undei ultrasonice recepționate.

Deși principiul e simplu, această categorie de sisteme de investigare acustică sunt greu de aplicat în cazul roboților mobili. Traductoarele trebuie amplasate pe laturi opuse ale mediului investigat, care în cazul roboților mobili este mult mai mare decât în cazul defectoscopiei ultrasonice, fiind total nepractic. Un astfel de sistem nu ar putea oferi detaliile necesare în cazul navigării roboților mobili (spre exemplu: din imediata vecinătate a acestora). Imaginea oferită ca rezultat de aceste sisteme este una bidimensională, ceea ce este din nou impropriu aplicațiilor în domeniul roboților mobili.

În această categorie trebuie notată totuși realizarea de succes a Universității Stanford care a creat microscopul cu scanare acustică SAM (Scanning Acoustic Microscope).

IV.4.2 Sisteme bazate pe metoda puls-ecou.

Dacă sistemele ortogonale cu maparea intensității sunt considerate cele mai simple, sistemele bazate pe metoda puls-ecou sunt cu siguranță cele mai vechi și totodată cele mai răspândite.

Funcționarea acestor sisteme se bazează pe determinarea timpului de propagare dus - întors a impulsului acustic. Impulsul este generat de către traductorul emițător, se propagă în mediu

până la obiectul până la care se măsoară distanța, se reflectă pe suprafața acestuia datorită diferenței impedențelor acustice și se propagă înapoi la traductorul receptor. Practic, din punct de vedere conceptual, metoda a rămas aceeași de la prima ei aplicare de către Langevin în încercarea de a detecta submarinele inamice. Uneori, pentru a simplifica echipamentul, se utilizează același traductor atât pentru emisie cât și pentru recepție. Pentru aceasta este introdus suplimentar un bloc care să blocheze calea semnalului către amplificatorul de recepție pe perioada emisie.

Figura 4.12 redă o schemă bloc simplificată a unui sistem bazat pe metoda puls-ecou. Impulsul aplicat traductorului la emisie declanșează de asemenea și baza de timp a osciloscopului. Pe ecranul acestuia va apare impulsul reflectat întârziat de deplasarea în mediu. Momentul recepției impulsului este univoc corelat cu distanța până la centrul respectiv de reflexie.

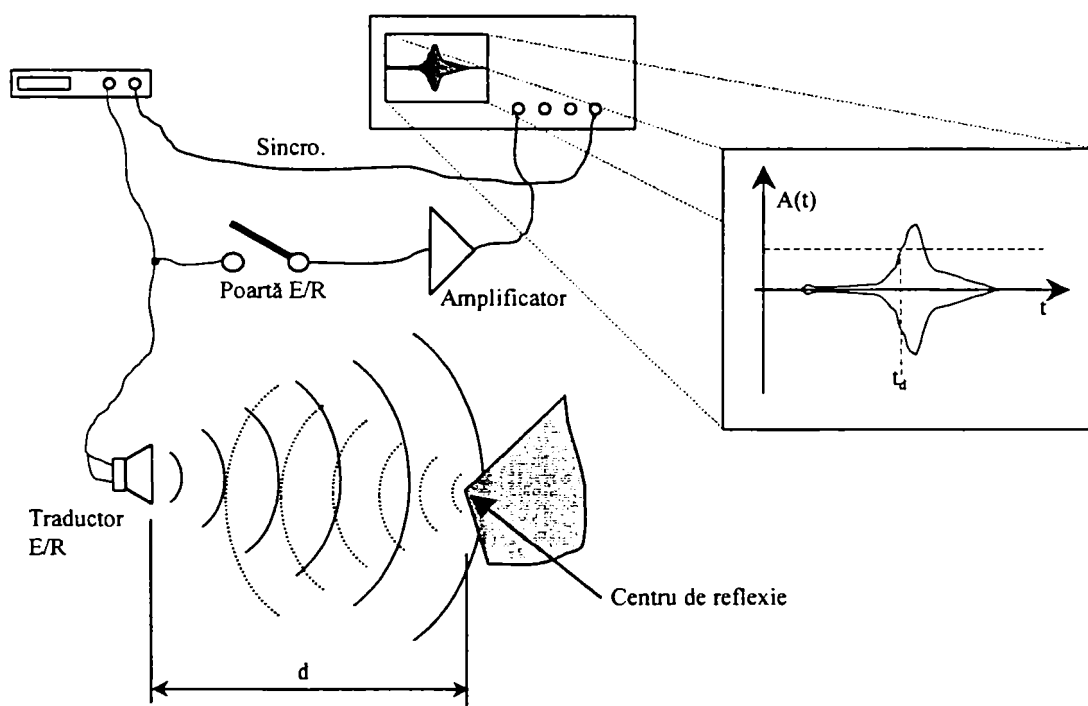


Figura 4.12 Metoda de investigare puls-ecou

Ar fi de subliniat că forma (intensitatea) impulsului ultrasonic recepționat poartă informație nu numai despre distanța până la obiectul pe care s-a făcut reflexia ci și despre mărimea, forma, rugozitatea și înclinarea sa față de traductoare. Simpla procesare cu prag poate fi deci generatorul multor erori. Este rândul tehnicilor holografice să încerce soluționarea răspunsului la un stimul atât de complex.

În literatură [162] [163] se prezintă o clasificare mai profundă a clasei sistemelor bazate pe metoda puls-ecou. Anume, subîmpărțirea este făcută după modul de baleiere a spațiului investigat în scanere de tip A, B și C.

Scanerile de tip A, cele clasice, au o funcționare identică practic cu descrierea făcută anterior. Au atât un traductor emițător cât și unul receptor. Nu produc o imagine în sensul uzual al cuvântului ci furnizează informație despre distanța până la obstacole, mediul fiind investigat în profunzime. Este găsită astfel doar una din dimensiuni fără a avea date referitoare la celelalte coordonate.

Scanerile de tip B, sunt cele mai larg răspândite sisteme ce se bazează pe metoda puls-ecou. Ele provin din cele de tip A, cu mențiunea că au doar un singur traductor (și pentru emisie și pentru recepție). În figura 4.13 se redă schema bloc a unui scaner de tip B.

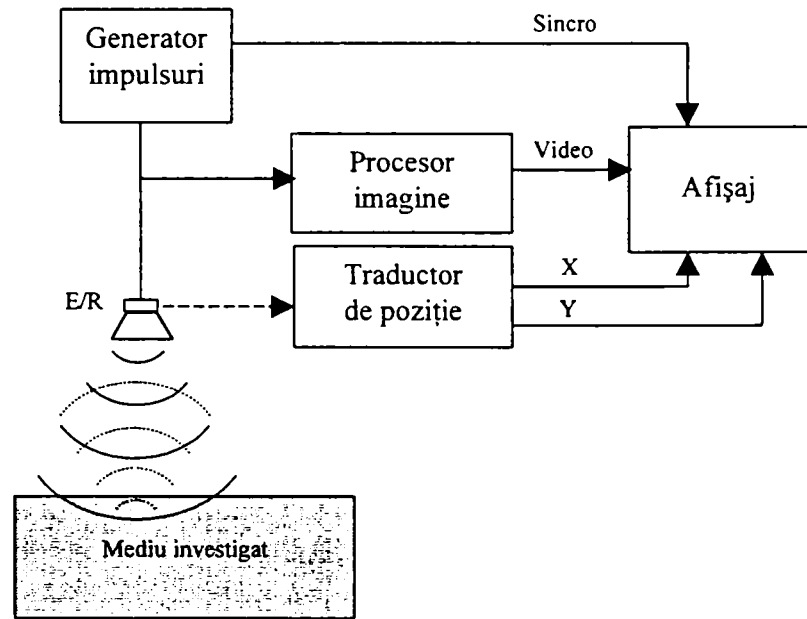


Figura. 4.13 Scanarea de tip B.

Din punct de vedere electric, semnalele se generează și se procesează ca și în cazul scanerelor de tip A. Diferența constă în faptul că traductorul este deplasat după direcțiile X și/sau Y și pentru fiecare poziție este efectuată o măsurare a distanței. Sunt menționate în literatură și aplicații în care traductorul este rotit în jurul obiectului investigat, utilizând coordonate polare în locul celor carteziane. Dar astfel de scanere își găsesc aplicabilitate strict în medicină, la investigarea corpului uman.

Rezultatul scanării de tip B este o imagine a mediului investigat care reprezintă distanța până la cel mai apropiat centru de reflexie pentru fiecare set de coordonate (x, y). Dacă scanarea s-a făcut după a singură direcție, atunci rezultatul este o imagine în secțiune a acestuia.

Prin conservarea legăturii dintre momentul de întoarcere al ecoului și valorile coordonatelor pentru care s-a determinat acea întârziere se poate obține o imagine a mediului. De obicei această imagine redă bidimensional cu niveluri de gri adâncimea mediului investigat. Există însă și variante care oferă o imagine tridimensională, prin interpolare între coordonatele de eșantionare spațială.

Scanererele de tip C sunt folosite atât în cazul metodelor puls-ecou cât și în cazul celor bazate pe maparea intensității. Scannerele de tip C au două traductoare, câte unul pentru emisie respectiv recepție.

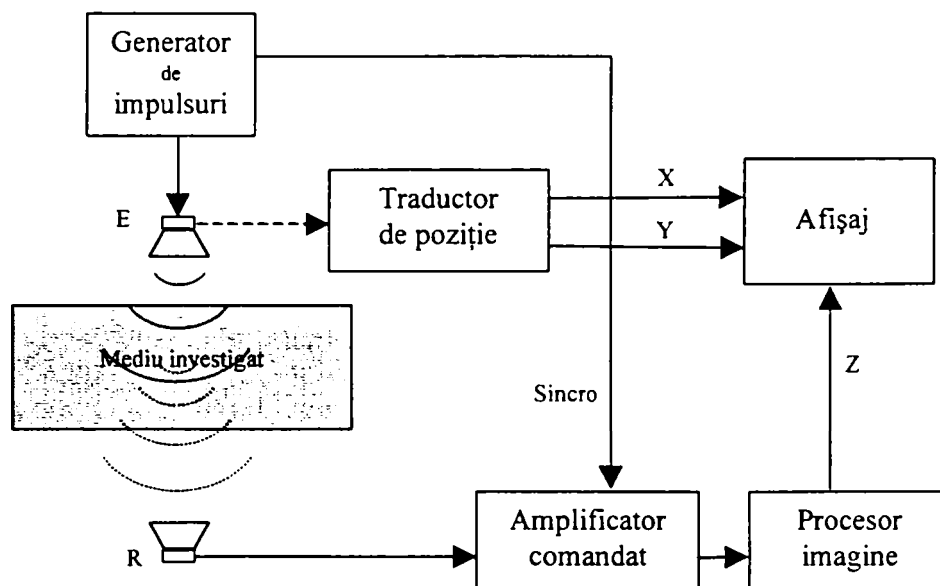


Figura 4.14 Scanarea de tip C.

În figura 4.14 este arătat un scanner de tip C care implementează metoda cu mapare a intensității.

Diferențele față de echipamentele de scanare de tip B constă în primul rând în modul de prelucrare a semnalului recepționat. Este utilizat de această dată un amplificator comandat pentru a îmbunătăți imunitatea la zgomot și la reflexiile multiple. Acesta decupează o fereastră temporală astfel calculată încât să permită deplasarea impulsului ultrasonic de la emisie până la cel mai îndepărtat punct de interes și înapoi. În plus, cunoașterea formei semnalului emis permite aplicarea unor tehnici de corelare pentru determinarea mai precisă a momentului recepției.

Pentru cazul sistemului din figura 4.14, imaginea ce se obține este una bidimensională, cea a transmisiei prin mediul investigat. Sarcina procesorului de imagine este de această dată ușurată. El trebuie numai să codeze în nuanțe de gri sau culoare factorul de transmisie acustică obținut în punctul curent.

IV.4.3 Sisteme fază-amplitudine

Spre deosebire de cele două clase de sisteme menționate anterior, în care era procesată doar amplitudinea oscilațiilor acustice, sistemele fază-amplitudine iau în considerare și faza semnalului întors la recepție, fiind, deci, conceptual mai avansate. Aceste sisteme sunt cunoscute ca sisteme pentru holografie acustică. Principiul fizic este redat în figura 4.15, fiind practic același ca și cel folosit încă în 1920 de Sokolov.

O sursă ultrasonică "luminează" mediul ce urmează a fi investigat. La recepție interferează atât unda emisă direct de sursă cât și undele reflectate pe obiectele din mediu, rezultând o structură complexă de câmp acustic, specifică fiecărei scene. În toate variantele constructive, sursa ultrasonică trebuie să producă o undă coerentă, cu un spectru bine controlat. Extragerea informației se bazează pe cunoașterea strictă a parametrilor câmpului excitator.

Reconstruirea mediului pe cale holografică presupune două etape. În prima fază se înregistrează câmpul acustic, atât ca amplitudine cât și ca fază. Este posibilă înregistrarea fazei deoarece semnalul ultrasonic utilizat în holografia acustică are o frecvență mult redusă (spre deosebire de cazul holografiei optice). Eșantionarea câmpului ultrasonic se face fie dealungul unei drepte, fie pe întinderea unui plan. Se lucrează cu un șir sau cu o matrice de traductoare, fie cu un singur traductor receptor care este deplasat mecanic (figura 4.15). Oricare este însă calea de eșantionare aleasă, este necesară o formă de stocare a informației prelevate în vederea unei prelucrări ulterioare.

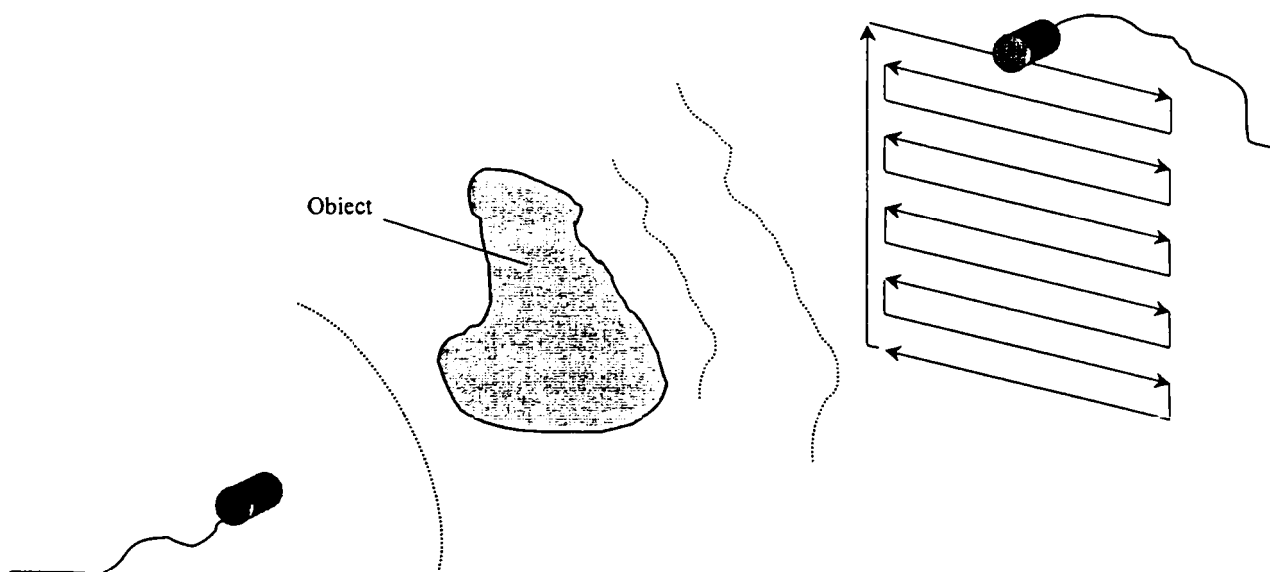


Figura 4.15 Principiul holografiei acustice

Având această informație disponibilă se poate trece la faza de reconstrucție a câmpului ultrasonic. Ideea care stă la baza acestui principiu este aceea că punctele de pe suprafața obiectelor în care se face reflexia sunt surse virtuale și vor apărea ca și maxime în structura de câmp reconstruită.

Reconstrucția câmpului acustic se face sub forma valorilor intensității acestuia, cu ajutorul unui sistem de calcul. Dealungul reconstrucției câmpul, înregistrat pe apertură, este propagat înapoi de la traductoare înspre zonele de mediu investigate. Sursele sonore identificate în structura reconstruită a câmpului reprezintă puncte de pe suprafața obiectelor din mediul investigat. În funcție de modul de înregistrare, pe un vector sau o matrice, se poate obține o imagine 2D, respectiv 3D a mediului.

Sistemele fază-amplitudine sunt cele mai complexe, cu cea mai laborioasă fază de post-procesare dar și cu rezultatele cele mai bune. Sunt utilizate cu succes în medicină, unde calitatea și cantitatea informației sunt importante, sacrificându-se viteza de răspuns a sistemului. Adaptarea procedurilor holografice la domeniul roboților mobili, unde funcționarea în timp real este crucială, este așa după cum se va arăta în capitolele următoare un obiectiv pe care prezenta teză încearcă să-l atingă.

Nu s-a insistat însă asupra descrierii acestor sisteme deoarece subcapitolul IV.6 va detalia acest subiect.

IV.5 Senzori ultrasonici

Correspondențele practice ale celor trei metode de investigație acustică prezentate în IV.4 îmbracă diferite forme sau diferite configurații senzoriale. Acestea se pot împărți la rândul lor în următoarele categorii:

Senzori cu detector unic aplică metoda puls - ecou, cu scanare de tip B. Sistemele de acest tip pot avea un singur traductor atât pentru emisie cât și pentru recepție sau două traductoare specializate [162].

Trebuie subliniat că informația oferită de senzorii cu detector unic este pur informație de adâncime, mai exact ei oferă distanța până la cel mai apropiat centru de reflexie.

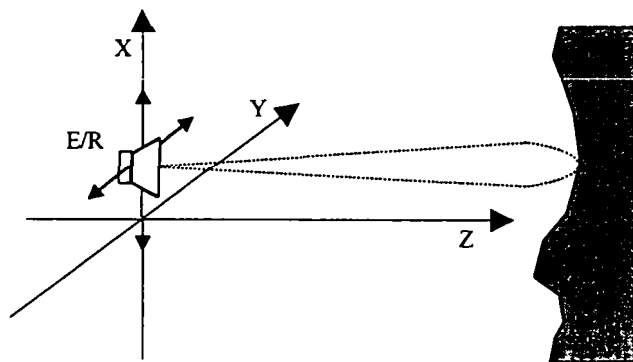


Figura 4.16 Scanarea în cazul senzorilor cu detector unic

Pentru achiziția imaginii mediului, traductorul (sau combinația de traductoare) este deplasat după o direcție a unui sistem de referință atunci când se dorește conturul secțiunii mediului în

planul ce conține direcția pe care s-a deplasat receptorul. Sau dacă se dorește o imagine 2D a mediului, traductorul este deplasat pe două axe, într-un sistem de coordonate cartezian. Iar pentru a obține o imagine 3D, cu ajutorul acestui tip de senzor, traductorul trebuie plimbat de jur împrejurul obiectului investigat respectând un sistem de coordonate polar (vezi figura 4.16).

În pofida simplității principiului (simplitate ce rămâne până la urmă unicul avantaj) senzorii cu detector unic au o serie de dezavantaje:

- prezintă dificultăți în detectarea obstacolelor ce fac un unghi prea mare cu axa mediană a traductorului;
- indicațiile lor sunt afectate de fenomenul reflexiilor multiple, caz în care este raportată existența unor obiecte fantomă;
- timp de achiziție ridicat datorită duratei mari necesară deplasării mecanice;
- fiabilitate scăzută datorată aceluiași sistem mecanic de scanare; și
- ceea ce reprezintă principalul dezavantaj, rezoluția laterală este slabă. Aceasta este dată de deschiderea lobului de directivitate a traductorului receptor [162].

Există totuși și situații în care acest tip de senzor oferă satisfacție. Este cazul detectării (sau și mai simplu doar al contorizării) obiectelor ce se deplasează pe o bandă rulantă. În acest caz particular este suficient ca deplasarea detectorului să se facă după o singură axă (perpendicular pe banda transportoare), deplasarea după cealaltă axă fiind suplinită de mișcarea benzii. Dacă se dorește doar contorizarea obiectelor atunci detectorul nu mai trebuie nici măcar deplasat [69].

Senzorii multi-detector copiază principiul sistemelor cu detector unic numai că față de aceștia dispun de un vector de detectare sau chiar de o matrice de detectoare [69]. Figura 4.17 arată schița unui astfel de sistem.

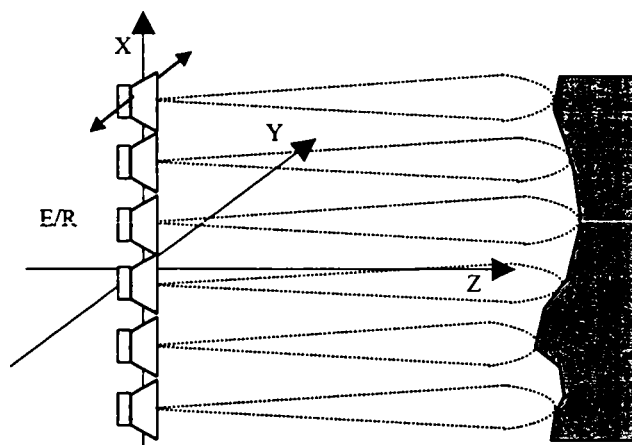


Figura 4.17 Schema unui sistem multi-detector cu dispunere liniară.

Astfel, principalul lor avantaj față de sistemele cu detector unic apare prin eliminarea sistemului mecanic de poziționare. Crește din această cauză fiabilitatea, scăzând totodată

timpul de achiziție necesar. În plus, problema detectării obstacolelor înclinate este minimizată și ea.

Exemplul cel mai la îndemână de senzor multi-detector este cel al soluției frecvent aplicată [64] [87] [92] în care roboții mobili sunt încinși cu un brâu de 12 detectoare. Se reușește în acest mod supravegherea întregului spațiu de jur împrejurul robotului. Soluția rămâne însă în discuție, urmând ca în capitolul V.3 să se prezinte argumente care evidențiază deficiențele ei.

Principala cerință a senzorilor multi-detector este legată în primul rând de directivitatea traductoarelor, care se cere a fi cât mai bună, astfel încât domeniile de interferență a doi detectori adiacenți să fie cât mai mici.

Întrucât, această condiție este greu de satisfăcut în practică, au fost concepuți o serie de algoritmi ce planifică activarea detectorilor, astfel încât aceștia să nu interfereze [92]. Rezultatele sunt notabile, dar nu aceasta este soluția cea mai bună.

Deși reprezintă o variantă îmbunătățită față de cea a senzorilor cu detector unic, senzorii multi-detector au totuși câteva dezavantaje:

- prezintă o dependență puternică a rezoluției laterale cu distanța. Domeniul lor de utilizare este limitat în profunzime, acolo unde lobi de recepție a traductoarelor, chiar presupunându-le directive, încep să se suprapună.
- dacă nu sunt implicate procedee speciale de activare a detectoarelor, protecția față de reflexiile multiple se face exclusiv prin directivitatea traductoarelor; și
- au o complexitate mare, apropiată de cea a sistemelor holografice, fără ca această complexitate să fie justificată de performanțele obținute.

Senzorii cu apertură sintetică constituie cea de-a treia formă de concretizare a metodelor de investigare acustică.

Termenul de apertură sintetică este propriu sistemelor holografice. El poate fi totuși extrapolat și pentru cazul metodelor puls-ecou. O apertură sintetică presupune deplasarea detectorului dealungul unui segment de dreaptă, pe direcția de eșantionare stabilită. Sau la fel de bine deplasarea se face pe o suprafață dată. Respectând regulile impuse de către eșantionarea spațială se determină un număr de coordonate pentru care se înregistrează valorile câmpului ultrasonic.

În fapt, structura mecanică și electrică este identică cu cea a senzorilor cu detector unic (sau multi-detector). Ceea ce îi face să fie superiori calitativ, este algoritmul de prelucrare a informației prelevate.

Un centru de reflexie din mediu poate fi detectat pentru mai multe poziții ale traductorului dealungul aperturii sintetice. Corelând informația senzorială cu coordonatele punctelor de pe apertură ce au sesizat obiectul, se poate detecta cu o precizie superioară poziția centrului de reflexie.

Pentru a putea aplica acest principiu este necesar ca același centru de reflexie să fie captat pentru mai multe poziții ale traductorului pe apertura sa, iar pentru aceasta caracteristica de directivitate a traductorului utilizat trebuie să fie cât mai largă. Figura 4.18 încercă să sugereze modul de funcționare al acestui tip de senzori.

Obiectul detectat din figura 4.18 se găsește la distanțele r_1 , r_2 și r_3 față de cele trei poziții de detecție corespunzătoare: D_1 , D_2 și D_3 . Prin conjugarea acestor informații se poate detecta poziția punctului ce a generat reflexia ca fiind punctul de intersecție a cercurilor C_1 , C_2 și C_3 . Precizia de determinare a coordonatelor punctului de reflexie este îmbunătățită astfel atât axial cât și lateral. Aplicații ale acestui procedeu se întâlnesc în [9] [162].

Procedeul descris mai sus deși îmbunătățește performanțele senzorilor cu detector unic, în ceea ce privește: precizie laterală, axială cât și la detecția reflexiilor multiple, păstrează totuși dezavantajele sistemelor de detecție ce conțin un sistem mecanic de deplasare și anume: timpul îndelungat de scanare și fiabilitate scăzută. În plus, este necesară stocarea informației colectate din fiecare punct de eșantionare spațială, iar rezultatul va fi obținut abia la încheierea întregului proces de scanare.

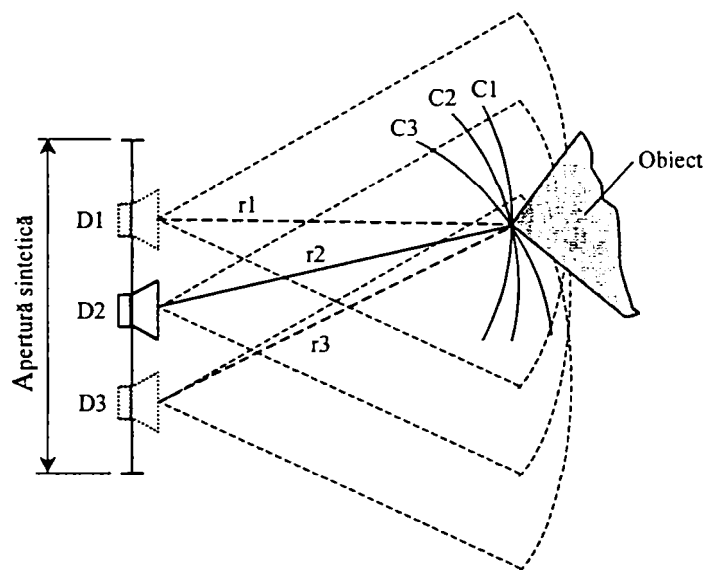


Figura 4.18 Detecția cu apertură sintetică

Totuși, dezavantajul principal al sensorului cu apertură sintetică rămâne *imposibilitatea detectării obiectelor multiple, apropiate*, deoarece pentru fiecare punct de pe apertură sensorul va raporta centrul de reflexie cel mai apropiat, fiind imposibilă corelarea rezultatelor [162].

Senzorii multi-traductor reprezintă o altă cale de abordare a problemei în discuție.

Dacă senzorii multi-detector combină informația dată de detectoare, adică distanțele la care fiecare din ele raportează un centru de reflexie, senzorii multi-traductor combină informația obținută direct de la nivelul traductoarelor [162].

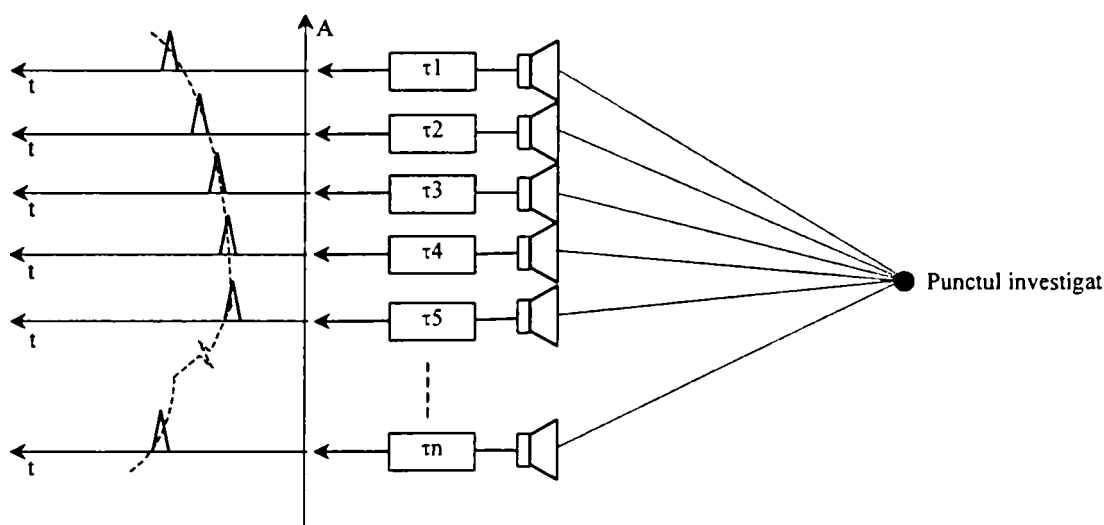


Figura 4.19 Senzori multi-traductor. Focalizarea electronică a câmpului ultrasonic.

Cel mai des folosit mod de exploatare a unui ansamblu de traductoare este focalizarea electronică, utilizând o serie de circuite de întârziere care sunt interpuși între traductoare și partea electronică. Prin ajustarea corespunzătoare a întârzierilor se poate asigura focalizarea fascicului acustic în punctul ce se dorește a fi investigat. Abordarea este similară cu o lentilă acustică orientabilă, având parametrii programabili. Focalizarea este realizabilă atât la emisie cât și la recepție.

Un asemenea ansamblu, care asigură focalizarea electronică, este echivalent cu un traductor unic deosebit de directiv. În plus, focalizarea asigură nu doar stabilirea precisă a direcției de investigație ci și a distanței la care se va realiza convergența fascicului ultrasonic. Directivitatea bună permite eliminarea riscului apariției reflexiilor multiple. Domeniul de recepție al traductorului echivalent este domeniul acoperit de ansamblul de traductoare, ceea ce duce la o comportare bună în cazul obiectelor dispuse geometric defavorabil.

Traductoarele utilizate trebuie să aibe o directivitate scăzută, pentru ca fiecare din ele să acopere o zonă cât mai largă. Porțiunea din mediul investigat, unde lobiile traductoarelor se suprapun trebuie să fie cât mai vastă. Performanțele unui astfel de sistem sunt direct proporționale cu numărul de canale implicate în procesare. Dispunerea traductoarelor poate să fie liniară, când domeniul investigat va fi bidimensional sau într-o matrice, când supravegherea este tridimensională.

Focalizarea electronică se folosește cu precădere în medicină, unde performanțele sistemului și calitatea imaginii primează față de complexitatea și costurile implementării. Sunt utilizate atât în proceduri de investigație cât și de tratament, deoarece se pot obține intensități mari ale unde în focar, fără a fi nevoie să se utilizeze unde intense în întreg mediul.

Performanțele senzorilor multi-traductor sunt de departe cele mai bune așa cum se va putea remarca în paragraful de concluzii de la finele acestui capitol. În schimb prezintă dezavantajul important al unei complexități practice deosebite, care se datorează atât numărului mare de canale cât și a complexității fiecăruia dintre ele. Bine înțeles că există

soluția multiplexării traductoarelor printr-un același canal de prelucrare, dar apare atunci dezavantajul implicat de necesitatea unui sistem de memorare.

Senzorii holografici reprezintă aplicația metodei de investigare acustică fază-amplitudine menționată în subcapitolul anterior IV.4.3, fiind totodată sistemele cele mai complexe.

Senzorii holografici utilizează un singur traductor emițător pentru "iluminarea" scenei. Acesta trebuie să aibe o caracteristică de directivitate cât mai largă pentru a crea un câmp cât mai uniform. De asemenea și traductorul (traductoarele) de la recepție trebuie să aibe o directivitate cât mai redusă, pentru a putea recepta reflexiile dintr-un domeniul cât mai vast.

Așa cum s-a menționat anterior în IV.4.3, sistemele holografice înregistrează atât amplitudinea cât și faza câmpului ultrasonic în planul traductoarelor. Faza măsurată este raportată la faza semnalului emițătorului. Din acest motiv interferența în planul hologramei, între unda de referință și cea reflectată nu mai este o condiție necesară ca în cazul holografiei optice. Aceasta permite poziționarea emițătorului în planul hologramei sau chiar folosirea unui sub-set din ansamblul de traductoare pentru emisie. Montura mecanică a traductoarelor este mult simplificată prin această modificare.

Realizările practice ale senzorilor holografici cunosc trei variante constructive, diferind prin modul de eșantionare spațială a câmpului acustic:

- holografia acustică cu apertură sintetică;
- holografia acustică cu traductor liniar; și
- holografia acustică cu matrice de traductoare.

Toate cele trei variante pot fi utilizate la obținerea unei imagini 3D a mediului, doar că în cazul primelor două este necesară o deplasare mecanică pentru suplinirea numărului redus de traductoare.

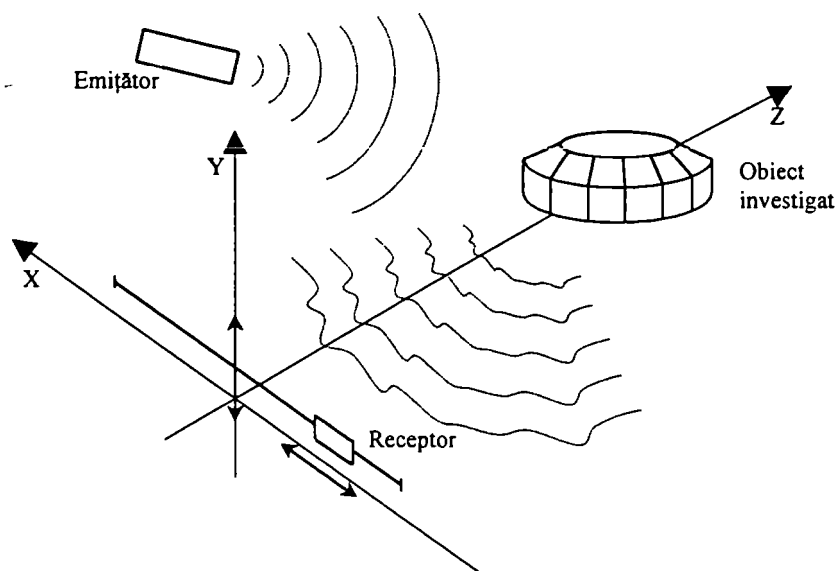


Figura 4.20 Senzor holografic cu apertură sintetică.

În cazul **holografiei acustice cu apertură sintetică** eşantionarea câmpului se face punct cu punct, întrucât se dispune doar de un singur traductor. Figura 4.20 arată că deplasarea se poate face după două coordonate. Pentru fiecare punct de eşantionare spaţială se generează ciclul: emisie -(reflexie)-recepţie-înregistrare.

Avantajele acestei prime variante sunt:

- implementare simplă (cea mai simplă dintre cele trei) cu doar două traductoare, un canal electronic de emisie şi unul de prelucrare la recepţie. Se obţine o calitate a imaginii echivalentă sau chiar mai bună decât în cazul celorlalte două variante deoarece:
- apertura mecanică permite poziţionarea fină a traductorului, cu o rezoluţie mai bună decât dimensiunile acestuia, fiind superioară variantelor cu vector sau matrice de traductoare (care sunt constrânse la o "eşantionare spaţială" dată de dimensiunile traductorului).

Holografia acustică cu apertură sintetică păstrează în schimb dezavantajele timpului mare necesar la scanare şi a fiabilităţii reduse datorate sistemului mecanic (ca şi în cazul sistemelor cu detector unic).

Holografia acustică cu traductor liniar este o variantă mai complexă decât precedenta. Ea reprezintă un compromis între holografia cu apertură sintetică şi cea cu matrice de traductoare, incluzând un vector de traductoare la recepţie. În acest caz, după cum se poate vedea în figura 4.21, deplasarea vectorului de traductoare se va face numai după axa Oy. Se economiseşte astfel timpul necesar baleierii după una din direcţii.

Partea electronică a holografiei acustice cu traductor liniar poate avea şi ea două variante de implementare. Prima variantă recurge la un singur canal de prelucrare, la intrarea căruia sunt multiplexate traductoarele receptoare (scade complexitatea / creşte timpul de achiziţie); cea de a doua variantă presupune câte un canal de prelucrare pentru fiecare traductor receptor în parte. În acest caz complexitatea sistemului creşte "exponenţial", fără a fi însoţită de o creştere la fel de semnificativă a vitezei de scanare, datorate deplasării mecanice pe axa Oy.

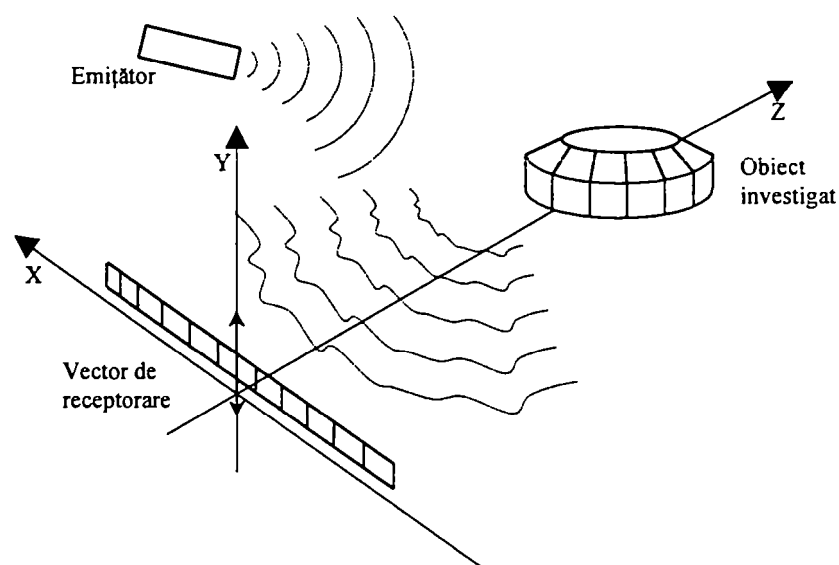


Figura 4.21 Senzor holografic cu vector de traductoare.

Holografia acustică cu matrice de traductoare este varianta cea mai complexă dintre cele trei, dar și cea mai performantă. Aceasta elimină complet deplasarea mecanică a traductoarelor prin utilizarea unei matrice de traductoare la recepție (vezi figura 4.22). Pentru aceste sisteme timpul de achiziție ca și fiabilitatea ating un optim.

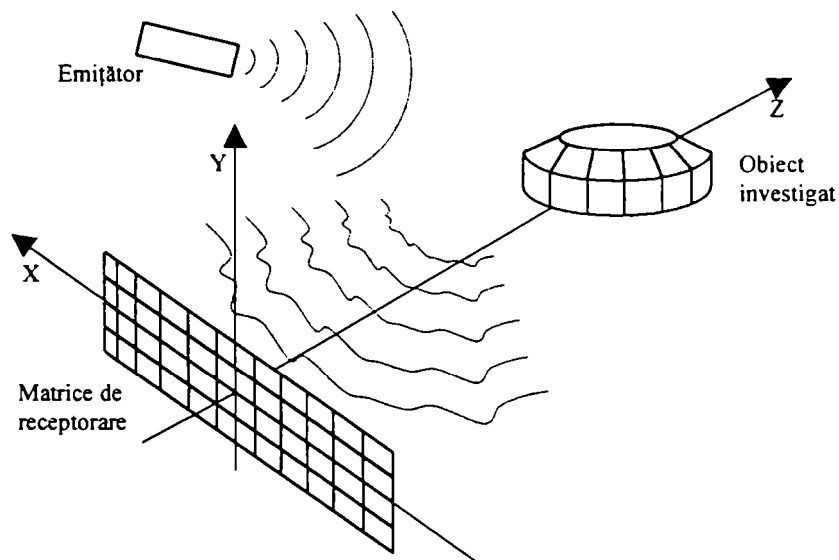


Figura 4.22 Senzor holografic cu matrice de traductoare.

Sistemele cele mai performante procedează la o variantă cu canal de prelucrare pentru fiecare traductor (complexitate maximă), dar se întâlnesc în literatură diferite variante care încearcă o soluție de compromis pentru a reduce complexitatea părții de procesare fără a crește prea mult timpul de achiziție. Spre exemplu, partea de procesare analogică este individuală fiecărui traductor, iar procesarea digitală, începând cu eșantionarea se face cu același sistem digital [162].

În prezentul subcapitol au fost descrise principalele forme de implementare a metodelor de investigare acustică și au fost trecute în revistă, pentru fiecare în parte avantajele, respectiv dezavantajele lor. Pentru a oferi în final o imagine de ansamblu, este reprodus în continuare un tabel din [162] (tabelul 4.1) care redă calitativ performanțele diferitelor procedee.

Se poate observa că rezoluția axială este bună, sau chiar foarte bună, pentru toate tipurile de senzori. În schimb rezoluția laterală nu oferă rezultate notabile, decât doar în cazul procedeelelor mai avansate ca: sistemele cu apertură sintetică, cele cu focalizare electronică sau holografia acustică.

Costurile implicate sunt minime pentru sistemele cu detector unic, dar așa după cum se poate vedea comparând rândurile trei și patru tocmai acestea au și cea mai scăzută viteză de achiziție.

Parametrul	Puls-ecou				Holografie		
	Detector unic	multi-detector	Apertură sintetică	multi-traductor	apertură sintetică	vector traduct.	Matrice traduct.
Rez. Axială	+	+	++	++	++	++	++
Rez. Laterală	--	--	+	++	++	++	++
Economic	++	-	++	--	++	+	-
Viteză	-	+	--	++	--	+	++
Ob. Înclinate	--	--	+	++	++	++	++
Refl.multiple	-	--	+	++	++	++	++
Zgomot	-	+	--	++	+	+	+

Tabelul 4.1 Analiza comparativă a metodelor de investigare acustică.

Parcurgând în continuare tabelul se observă că în situații ca obiecte înclinate, reflexii multiple sau zgomot comportamentul este similar ca și în cazul rezoluției laterale. Cu alte cuvinte, cu cât sistemul este mai complex cu atât performanțele sunt și ele mai bune.

Privind însă tabelul pe coloane, se remarcă senzorii multi-traductor și cei al holografiei acustice cu vector de traductoare ca fiind soluții de compromis, obținând un optim din punct de vedere al criteriilor menționate.

S-a făcut această remarcă deoarece ideea ce se dorește a fi introdusă în capitolul V.2 este asemănătoare celor două variante (senzor multi-traductor și holografiei acustice cu vector de traductoare) preluând avantajele lor și încercând să fie diminuate dezavantajele.

IV.6 Tehnici holografice

IV.6.1 Principiul holografiei acustice

Holografia acustică este, după cum s-a putut observa încă din descrierile făcute în subcapitolul IV.4.3, tehnica cea mai avansată în investigarea cu ultrasunete. Calitatea imaginii oferită de această tehnică este pe departe cea mai bună. Pentru aceasta însă puterea de calcul necesară, precum și complexitatea sistemului sunt mari. Holografia acustică beneficiază de un aparat matematic complex, având la bază conceptul de frecvență spațială.

Frecvența spațială se definește [162] în raport cu o direcție de referință (direcție pe care se face măsurarea), fiind egală cu numărul de perioade a semnalului în unitatea de lungime. Unitatea de măsură pentru frecvența spațială este m^{-1} .

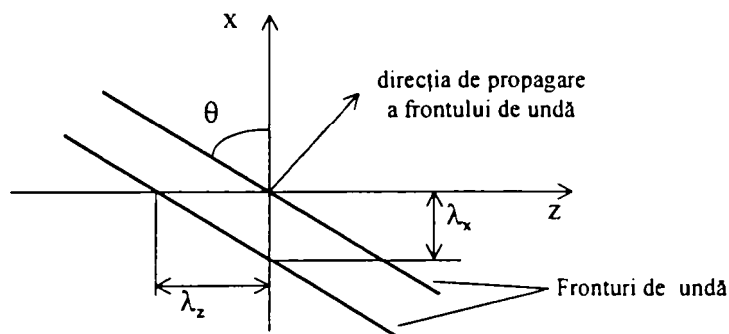


Figura 4.23 Definierea frecvențelor spațiale în raport cu axele x și z.

Figura 4.23 prezintă modul de definire a frecvențelor spațiale după axele x și z. Relațiile ce stabilesc legătura dintre lungimea de undă temporală, unghiul de măsură și frecvențele spațiale sunt:

$$f_x = \frac{1}{\lambda_x} = \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad f_y = \frac{1}{\lambda_y} = \frac{\sin \phi}{\lambda} \quad f_z = \frac{1}{\lambda_z} = \frac{\cos \alpha}{\lambda} \quad (4.4)$$

Dacă frecvența temporală este constantă pentru un anumit mediu (dată fiind de viteză de propagare în mediul respectiv), frecvența spațială variază larg în funcție de unghiul dintre direcția de propagare a frontului de undă și direcția axei de referință.

Tocmai această dependență, a valorii frecvenței spațiale funcție de direcția pe care se face înregistrarea, constituie cheia principiilor holografice [162] [163]. Interpretând câmpul ultrasonic înregistrat ca o suprapunere de unde plane, se poate determina valoarea frecvenței spațiale, pentru fiecare componentă a acestuia. Având valorile frecvențelor spațiale, se poate găsi apoi direcția de deplasare a fiecărei unde plane, în raport cu axa de referință considerată și se poate reface astfel structura câmpului ultrasonic pentru orice punct din spațiu.

Unda ultraacustică emisă de către traductorul emițător se propagă în mediu, se reflectă și se întoarce la recepție, unde se înregistrează atât amplitudinea cât și faza acesteia. Aceste mărimi complexe reprezintă *eșantioanele spațiale* înregistrate în planul hologramei.

Aplicând transformata Fourier spațială (4.5), în raport cu axa de înregistrare, eşantioanelor spațiale se obține *spectrul unghiular* al câmpului acustic. Componentele acestui spectru sunt tocmai frecvențele spațiale ce conțin informație despre unghiul incident, la recepție, al reflexiei care le-a generat [162].

$$A_m(f_x, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z_m) e^{-j2\pi f_x x} dx \quad (4.5)$$

În expresia (4.5) au fost utilizate următoarele notații:

- $\Phi(x, z_m)$: este câmpul acustic înregistrat prin eșantionare spațială pe axa x la distanța z_m față de scena care generează reflexiile;
- $A_m(f_x, z_m)$: este spectrul unghiular a câmpului $\Phi(x, z_m)$, care conține frecvențele f_x .

Cunoscând spectrul unghiular al câmpului ultrasonic în planul recepției, se poate proceda la *propagarea înapoi a acestuia* [162]. Utilizând relația (4.6) se poate calcula spectrul unghiular $A(f_x, z)$ pentru orice deplasare z pe axa Oz.

$$A(f_x, z \neq z_m) = A_m(f_x, z_m) e^{j2\pi \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2} (z - z_m)} \quad (4.6)$$

Având spectrul unghiular calculat pentru o anumită deplasare z dată, se poate reface structura câmpului acustic aplicând transformata Fourier inversă (4.7).

$$\Phi(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f_x, z) e^{j2\pi f_x x} df_x \quad (4.7)$$

Astfel, se calculează structura câmpului ultrasonic pentru felii succesive ale mediului prin determinarea schimbării de fază pentru fiecare undă plană componentă din spectrul unghiular în parte, la deplasarea înapoi și prin recompunerea lor cu ajutorul transformatei Fourier inverse. Alipind și interpretând feliile astfel obținute se poate regăsi structura câmpului ultrasonic a întregului mediu [162] [163].

Pentru detectarea conturilor se are în vedere faptul că suprafețele pe care se face reflexia sunt surse virtuale ce apar ca maxime (și deci vor putea fi detectate) în structura calculată a câmpului.

Determinarea câmpului acustic într-o poziție dorită, prin înregistrarea lui în altă poziție și propagarea înapoi a valorilor de câmp înregistrate reprezintă esența principiului holografic.

Funcție de modul de înregistrare, cu ajutorul unui vector sau cu o matrice de traductoare și funcție de aparatul matematic utilizat se poate reface imaginea mediului bidimensional (o secțiune în planul vectorului de înregistrare) respectiv tridimensional.

IV.6.2 Tipuri de tehnici holografice

Tehnicile holografice descrise în literatură [162] [163] pot fi catalogate funcție de spectrul unei ultrasonice utilizată la investigare. Se pot distinge astfel trei tipuri de tehnici holografice:

- holografia acustică monofrecvență;
- holografia multifrecvență discretă; și

- holografia acustică în impuls.

IV.6.2.1 Holografia acustică monofrecvență

Holografia acustică monofrecvență este varianta cea mai simplă din cele trei anterior menționate, provenind direct din holografia optică cu laser.

Ea poate fi implementată, ca de altfel oricare altă tehnică holografică, utilizând atât senzori cu apertură sintetică, sau senzori cu vectori de traductori cât și senzori matriceali.

Ceea ce definește holografia acustică monofrecvență este modul de "iluminare" a mediului investigat. Emisia se face utilizând un sigur traductor *ce emite continuu o undă sinusoidală*, a cărei frecvență este egală cu frecvența de rezonanță serie a traductorului.

Din acest mod de lucru (emisie sinusoidală continuă) derivă câteva avantaje ale holografiei acustice monofrecvență [162]:

- simplitate a sistemului electronic;
- sincronizare ușoară la recepție cu unda de referință; și
- traductorii utilizați nu trebuie să fie de bandă largă ca și în cazul celorlalte două tehnici holografice.

Față de aceste avantaje holografia acustică monofrecvență prezintă însă o serie de puncte slabe. Pe primul loc se situează calitatea rezoluției spațiale ce nu atinge performanțe deosebite. Rezoluția spațială este scăzută, în particular rezoluția laterală este inferioară rezoluției axiale. Literatura [162] [163] oferă o serie de metode de estimare a rezoluției spațiale pentru întreaga gamă de tehnici holografice.

În plus, holografia acustică monofrecvență reclamă existența unui mediu lipsit de surse ultrasonice proprii. În cazul în care acestea există totuși, ele vor fi declarate ca puncte aparținând unui contur inexistent. Soluția acestei probleme este dată de tehnicile holografice mai avansate (multifrecvență, în impuls), în cazul cărora câmpul acustic are o intensitate variabilă în timp, fapt ce ajută la identificarea corectă a suprafețelor de separație prin evaluarea câmpului la momente de timp determinate. Holografia acustică în impuls, spre exemplu, analizează la un moment dat ecourile generate doar dintr-o anumită porțiune a spațiului, utilizând o fereastră temporală în procesul de achiziție a eșantioanelor.

Holografia acustică monofrecvență prezintă neajunsuri și în ce privește detectarea obiectelor cilindrice sau sferice din mediu. Datorită simetriei formelor cilindrice respectiv sferice, câmpul acustic reflectat va avea aceeași structură de unde concentrice indiferent de raza obiectelor fizice. Pe apertură, imaginea înregistrată va avea aceeași aliură, iar procesul de reconstrucție va conduce evident la același rezultat.

Un alt caz particular la care holografia acustică monofrecvență nu poate oferi un răspuns este cel al obiectelor mari, cu suprafețe de separare plane extinse, ce depășesc în dimensiuni lobul caracteristicii de recepție. Dimensiunile mari conjugate cu rugozitatea scăzută a suprafețelor obiectelor, face ca în condițiile lungimilor de undă relativ mari cu care se lucrează acestea să apară ca și oglinzi perfecte la investigarea ultrasonică monofrecvență. Figura 4.24 prezintă un astfel de caz.

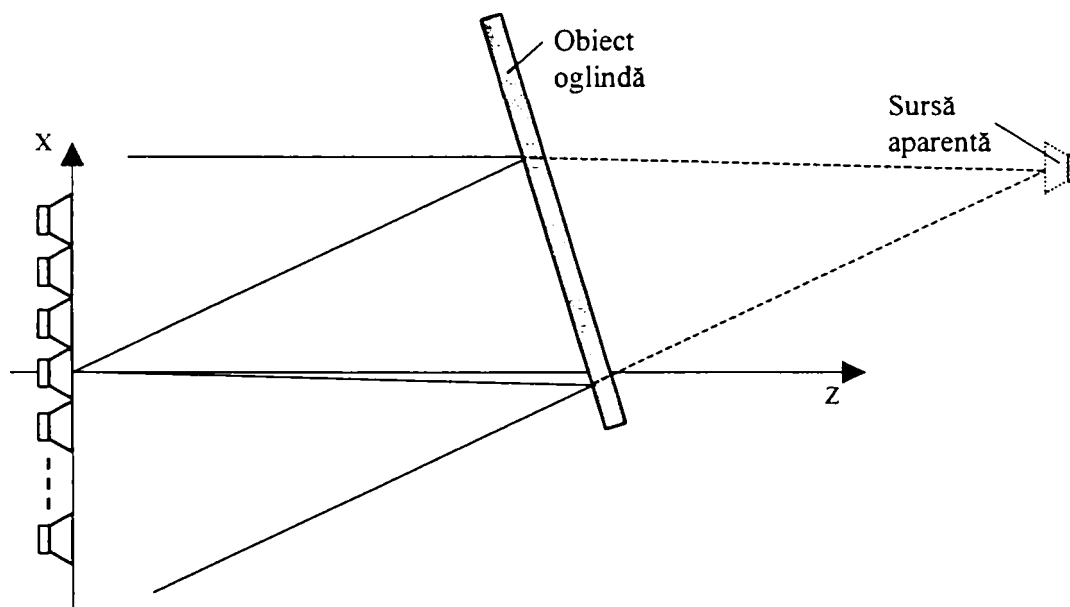


Figura 4.24 Cazul obiectelor "oglină perfectă".

Deoarece suprafața obiectului din figura 4.24 produce la recepție un câmp care acoperă lungimea aperturii pe care se face detecția, maximumul găsit în urma reconstrucție câmpului nu va fi la suprafața de separare ce delimitează obiectul. Simetric față de acest obiect se va găsi, în mod eronat, imaginea fantomă a sursei [162].

Principalul dezavantaj al holografiei acustică monofrecvență rămâne totuși lipsa oricărui mecanism de detectare a reflexiilor multiple [162]. Datorită emisiei continue, a lipsei oricărei referințe temporale, holografia acustică monofrecvență poate oferi rezultate eronate datorită reflexiilor multiple (vezi paragraful IV.3.4).

IV.6.2.2 Holografia acustică multifrecvență discretă.

Holografia acustică multifrecvență discretă este nivelul următor pe scara complexității sistemelor holografice, urmând holografiei acustice monofrecvență [162] [163].

După cum s-a putut vedea anterior, una din problemele holografiei acustice monofrecvență este rezoluția spațială redusă, fiind limitată de valoarea lungimii de undă cu care se lucrează. Deci rezultă firesc că o posibilă primă cale de îmbunătățire a rezoluției spațiale este creșterea frecvenței de lucru.

Este tocmai ceea ce holografia acustică multifrecvență discretă încearcă să facă prin utilizarea nu a unei singure frecvențe, ci a unui spectru mai bogat, compus dintr-un număr de frecvențe discrete (vezi figura 4.25). Semnalul emis va fi astfel suma componentelor spectrale individuale.

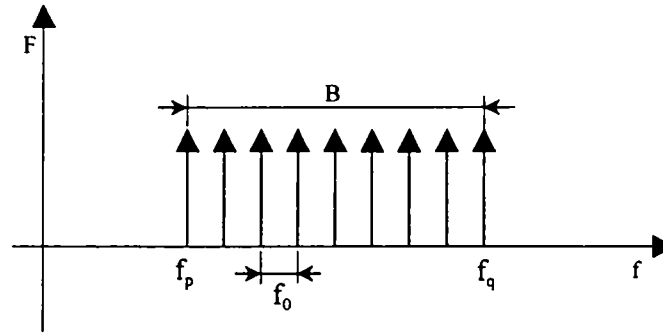


Figura 4.25 Spectrul de frecvențe utilizat în cazul holografiei acustice multifrecvență discretă.

Utilizarea unui set discret (finit) de frecvențe de investigare atrage după sine o serie de efecte benefice. În primul rând, datorită creșterii frecvenței de lucru se îmbunătățește rezoluția spațială obținută.

În al doilea rând, compunerea temporală a componentelor discrete conduce la un semnal cu o variație abruptă în timp, după cum se arată în figura 4.26. Semnalul rezultat prezintă maxime importante ce se repetă cu perioada $1/f_0$. Tocmai prezența acestor variații temporale abrupte a intensității câmpului acustic permite o procesare similară cu cea de la metodele puls-ecou, îmbunătățind imunitatea la zgomot a metodei.

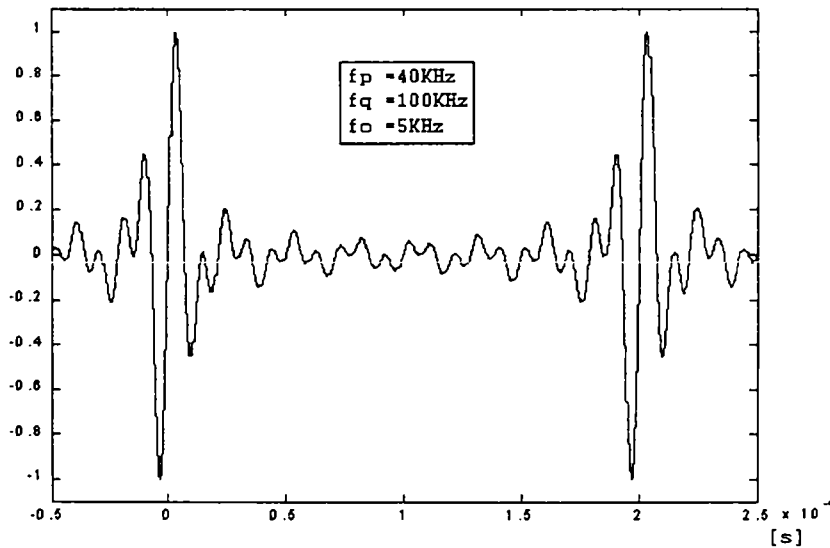


Figura 4.26 Variația temporală a unei compuse utilizate în holografia multifrecvență discretă.

Utilizarea unui spectru mai bogat pentru semnalul emis conduce de asemenea la o identificare corectă a suprafețelor de reflexie, crescându-se totodată imunitatea la reflexii multiple.

Realizarea practică a unui sistem holografic multifrecvență discretă poate lua mai multe forme, după modul în care se face compunerea undei emise:

- Semnalul emis este compus înaintea emisiei. Aceasta se realizează utilizând o serie de generatoare ale căror ieșiri se însumează sau se utilizează un procedeu de însumare numerică a eșantioanelor componentelor spectrale. Această abordare prezintă un timp scurt de achiziție.
- Se poate înregistra câmpul emițând componentă cu componentă spectrală și însumând rezultatele la recepție, dar crește mult durata necesară achiziției.

Pentru performanțele atinse de holografia acustică multifrecvență discretă se plătește un preț mare [162]:

- Dacă se face emisia cu o undă compusă, atunci traductoarele utilizate atât de la emisie cât și de la recepție trebuie să fie capabile să reproducă o bandă cât mai largă din spectrul semnalului, pentru ca o parte cât mai mare a energiei să fie transmisă/recepționată în/din mediul de lucru.

În același timp, necesitatea reproducerii numărului relativ mare de componente necesare (care uzual poate fi 10-15) impune utilizarea unui sistem electronic foarte laborios, cu un cost prohibitiv. Iar dacă însumarea se face numeric, atunci este necesar un sistem de calcul puternic.

- Dacă în schimb baleierea mediului se face componentă cu componentă atunci la recepție e necesar un spațiu mare de stocare a datelor eșantionate.
- În ambele situații algoritmul de prelucrare a eșantioanelor de câmp înregistrate reclamă algoritmi complecși.
- Nu trebuie uitată nici viteza de lucru scăzută a metodei, tocmai datorită motivelor anterior menționate.

IV.6.2.3 Holografia acustică în impuls

Precizia obținută utilizând holografia acustică multifrecvență discretă crește odată cu lărgirea benzii de frecvență și a numărului de componente emise. Dar pentru un număr mare de componente implementarea practică este dificilă, sistemul rezultat fiind foarte complex. Soluția acestei probleme este dată de însumarea prealabilă a componentelor spectrale și emisia direct a undei compuse.

Dacă pentru excitarea traductoarelor la emisie se utilizează în schimb un impuls se va beneficia imediat de câteva avantaje [162]. Un impuls limitat temporal are teoretic un spectru infinit de frecvențe, adică se maximizează concluzia de la holografia acustică multifrecvență discretă referitoare la lărgimea spectrului semnalului utilizat. În plus, aliura impulsului este

ușor controlabilă, și prin aceasta și componența lui spectrală, pentru o mai bună "acordare" cu banda de trecere a traductoarelor utilizate.

Holografia acustică în impuls utilizează acest artificiu. Ea este, de fapt, o tehnică holografică multifrecvență cu spectru continuu (impulsul emis este limitat în timp), putând fi privită ca o extensie a holografiei acustice multifrecvență discretă.

Ceea ce este caracteristic însă holografiei acustice în impuls este modul de înregistrare pe apertură a câmpului. De această dată nu se va face doar o eșantionare a amplitudinii și a fazei, ci și o înregistrare a momentului corespunzător fiecărui eșantion. Mai mult decât atât, timpul de înregistrare trebuie să fie suficient de lung încât să permită impulsului să parcurgă distanța: emițător - limita superioară a domeniului supravegheat - înapoi la receptor. Este adevărat că astfel cantitatea de date ce trebuie memorată crește mult datorită timpului prelungit de înregistrare, dar trebuie ținut totuși cont că eșantionarea se face o dată pentru toate componentele spectrale.

Alegerea unei forme de undă care să prezinte o variație temporală abruptă permite folosirea unor strategii similare cu cele de la metodele puls-ecou sau holografia multifrecvență. Câmpul acustic reconstruit va fi variabil în timp și spațiu și deci va fi necesară stabilirea momentului exact de evaluare a intensității acestuia. Aceasta se poate realiza calculând timpul necesar unde acustice pentru a parcurge distanța de la emițător la punctul de investigație [162].

Rezoluțiile spațiale ce se pot atinge sunt limitate practic doar de banda de frecvență a traductoarelor utilizate. Acestea trebuie să reproducă pe cât posibil o parte cât mai însemnată din întreg spectrul semnalului (95%-98%), dar din păcate nu se dispune întotdeauna de asemenea traductoare.

Este necesar, de asemenea, un sistem electronic capabil să prelucreze un semnal cu un spectru cât mai larg, adică să asigure, printre altele, o conversie analog numerică rapidă. Capacitatea de stocare a eșantioanelor trebuie să fie și ea ridicată.

Datorită sensibilității reduse a traductoarelor de bandă largă raportul semnal/zgomot al canalului de prelucrare trebuie să fie foarte bun. Semnalele cu spectru larg, utilizate, nu permit implementarea unor filtre de ordin superior ca în cazul primelor două tehnici holografice, ceea ce scade considerabil imunitatea la zgomotele ambientale.

Un capitol aparte al teoriei holografiei în impuls este dedicat tocmai formei impulsurilor utilizate pentru excitarea traductorului emițător [162]. Iată prezentate pe scurt doar câteva dintre acestea:

- **Impulsul dreptunghiular aperiodic** este cel mai des utilizat. Rezoluțiile spațiale care se pot obține sunt invers proporționale cu durata impulsului. Dar un impuls foarte scurt

reclamă o bandă de procesare foarte largă, adică eşantionare rapidă și traductoare de bandă largă. Mai are și avantajul că poate fi foarte ușor generat.

- **Semnal multifrecvență cu spectru continuu**, care reprezintă o aproximare a impulsului dreptunghiular descris anterior. Este de fapt semnalul utilizat în holografia acustică multifrecvență discretă, dar numărul componentelor spectrale este crescut foarte mult (teoretic infinit) pentru banda de lucru considerată.

Se deosebește de semnalul multifrecvență discret prin atenuarea în timp, care conduce la obținerea unui singur impuls la emisie. Aperiodicitatea semnalului ușurează algoritmi de reconstrucție.

Față de impulsul dreptunghiular aperiodic, semnalul multifrecvență cu spectru continuu are avantajul unui spectru limitat și ușor de controlat, putând fi adaptat la diferite traductoare. Se obține astfel un randament mai bun al sistemului.

Pentru acest tip de semnal singura alternativă viabilă este generarea lui pe cale numerică și salvarea eşantioanelor în memoria unui sistem de reproducere care să excite traductorul emițător.

- **Semnal modulată în frecvență** este o altă posibilă abordare pentru excitarea traductoarelor ultrasonice. Acest procedeu are două avantaje: se generează relativ ușor, cu ajutorul unui generator comandat și nu suprasolicitează traductoarele ca un impuls aperiodic spre exemplu. Totuși, controlul limitat asupra spectrului semnalului excitator conduce la utilizarea ineficientă a energiei acestuia.

Parametrul	Monofrecvență	Multifrecvență	În impuls
Rezoluție axială	-	+	++
Rezoluție laterală	+	++	++
Economic	++	+	--
Bandă de frecvență	++	+	-
Viteză	++	-	+
Obiecte oglindă	--	+	++
Reflexii multiple	--	+	++
Imunitate la zgomot	++	+	-
Putere de calcul	++	+	--
Calitatea imaginii	-	+	++

Tabelul 4.2 Analiza comparativă a tipurilor de investigație holografică

Dezavantajele holografiei acustice în impuls rămân legate - așa cum se va vedea în prezentarea comparativă ce va urma - de cantitatea mare de informație ce trebuie stocată și prelucrată. Totodată, algoritmi de reconstrucție sunt complecși (vezi IV.6.2.3.1). Ei trebuind

să fie aplicați pentru fiecare punct din mediu pentru care se dorește o estimare a valorii câmpului acustic.

Tabelul 4.2 [162] dorește să facă o prezentare succintă, dar sugestivă, a celor trei tehnici holografice prezentate. Din analiza acestuia se observă cu ușurință că holografia acustică în impuls este superioară din multe puncte de vedere celorlalte două procedee. Calitatea imaginii, rezoluția spațială, comportarea față de obiectele oglindă și reflexiile multiple sunt atuurile acestei tehnici holografice.

Dacă aspectul economic (o implementare mai simplă) și cel al puterii de calcul necesare ar fi îmbunătățite, tehnica holografiei acustice în impuls ar putea deveni o soluție atractivă din mai toate punctele de vedere, chiar și pentru domeniul roboților mobili. Acesta este și scopul urmărit dealungul prezentei teze de doctorat.

IV.6.2.3.1 Reconstrucția prin propagarea înapoi a undei în cazul holografiei acustice în impuls

Metoda de propagare înapoi a undei pentru reconstrucția câmpului acustic este identică cu cea folosită în cazul holografiei acustice monofrecvență, doar că aici trebuie avut în vedere că semnalul emis conține mai multe componente spectrale [162]. Practic, metoda de reconstrucție trebuie aplicată fiecărei componente spectrale din spectrul impulsului excitator.

Astfel, semnalul temporal înregistrat pe apertură se descompune în componentele sale spectrale aplicându-i-se transformata Fourier în timp, cu expresia (4.8):

$$\Phi(x, z_m, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z_m, t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.8)$$

$\Phi(x, z_m, \omega)$ din (4.8) reprezintă spectrul de frecvențe temporale a câmpului acustic $\Phi(x, z_m, t)$ înregistrat prin eșantionare spațială pe axa x la distanța z_m de scena care a produs ecourile.

Următorul pas este determinarea spectrului unghiular pentru fiecare componentă spectrală în parte, ceea ce se face prin aplicarea transformatei Fourier spațiale dealungul axei de înregistrare (Ox), expresia (4.9). De aici încolo, algoritmul se suprapune cu cel de la holografia monofrecvență.

$$A_m(f_x, z_m, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z_m, \omega) e^{-j2\pi f_x x} dx \quad (4.9)$$

În expresia (4.9) $\Phi(x, z_m, \omega)$ este câmpul acustic datorat componentei ω , iar $A_m(f_x, z_m, \omega)$ este spectrul unghiular corespunzător, spectru ce conține frecvențele f_x .

Frecvența spațială f_x poate fi înlocuită în expresia spectrului unghiular cu relația de definiție (4.4)

$$f_x = \frac{\sin \alpha}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi} \frac{\sin \alpha}{c} \quad (4.4)$$

iar expresia (4.9) devine:

$$A_m(\alpha, \omega, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z_m, \omega) e^{-j\omega x \frac{\sin \alpha}{c}} dx \quad (4.10)$$

Propagarea înapoi a câmpului, pentru determinarea structurii sale într-un alt plan decât cel în care a fost înregistrat (z_m), se face cu relația (4.11):

$$A(\alpha, \omega, z \neq z_m) = A_m(\alpha, \omega, z_m) e^{j2\pi f_x (z - z_m)} \quad (4.11)$$

Expresie care depinde de frecvența spațială f_z , fiind din acest motiv greu de prelucrat. Prin înlocuirea expresiei frecvenței spațiale f_z din (4.4) în (4.11) rezultă relația (4.12):

$$A(\alpha, \omega, z) = A_m(\alpha, \omega, z_m) e^{j\omega \frac{z - z_m}{c}} \quad (4.12)$$

Disponând de spectrul unghiular corespunzător planului de coordonată z se poate reface structura câmpului acustic datorat componentei ω dacă se aplică:

$$\Phi(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f_x, z) e^{j2\pi f_x x} df_x \quad (4.13)$$

În care diferențiala frecvenței spațiale f_x se poate deduce din (4.4):

$$df_x = \frac{\omega}{2\pi} \frac{\cos \alpha}{c} d\alpha. \quad (4.14)$$

Cu înlocuirile de rigoare, relația (4.13) se transformă în :

$$\Phi(x, z, \omega) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} A(\alpha, \omega, z) e^{j\frac{\omega \sin \alpha}{c} x} \frac{\omega \cos \alpha}{c} d\alpha, \quad (4.15)$$

expresie ce reprezintă câmpul acustic reconstituit datorat componentei spectrale ω la coordonata z .

Compunerea efectelor tuturor componentelor spectrale se face prin revenirea în domeniul timp, cu ajutorul transformatei Fourier inverse:

$$\Phi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z, \omega) e^{j\omega t} d\omega . \quad (4.16)$$

Transformata Fourier inversă (4.16) trebuie estimată pentru fiecare punct al domeniului de investigație ceea ce conduce, așa cum s-a amintit deja și în subcapitolul anterior, la un volum mare de calcul.

În plus, așa cum se observă din relația (4.16), expresia câmpului din punctele x și z depinde și de timp. Estimarea câmpului cu expresia (4.16) va trebui făcută pentru momente de timp bine definite, cunoscându-se dispunerea geometrică a traductoarelor precum și cea a punctului investigat. Această dependență temporală îmbunătățește rezoluția spațială a holografiei acustice în impuls.

IV.7 Concluzii

Pe parcursul prezentului capitol s-a încercat să se răspundă la întrebarea: "De ce senzori ultrasonici în robotică?"

Pentru a răspunde la această întrebare au fost detaliate câteva dintre avantajele senzorilor ce au la bază traductoare ultrasonice, făcând comparații cu alte tipuri de traductoare. Nu au fost uitate nici dezavantajele acestui principiu de investigație, încercându-se o prezentare realistă. Au fost de asemenea amintiți principalii parametri ai traductoarelor ultrasonice.

Au fost prezentate apoi, succint, principalele metode de investigație acustică. S-au evidențiat și studiat câteva din problemele ce stau la baza investigației ultrasonice, cum ar fi: natura reflexiilor, reflexiile totale, reflexiile multiple, nedeterminarea laterală și *zona de umbră*.

S-au trecut în revistă formele practice de implementare ale metodelor de investigație acustică, pentru fiecare tip de sistem menționând avantajele și dezavantajele lor. S-a insistat în finalul capitolului asupra holografiei acustice în impuls deoarece ideile avansate într-unul din capitolele următoare are la bază acest principiu.

Acest capitol IV, este încă unul introductiv, ce urmărește redarea unei imagini de ansamblu al domeniului bogat al investigației ultrasonice. S-a încercat această sinteză pentru a evidenția calitățile senzorilor ultrasonici, calități ce recomandă pentru a servi ca sursă de informații la conducerea unui robot mobil.

V. Holografie acustică în impuls cu traductoare de bandă îngustă

Dintre metodele de investigare acustică, așa după cum s-a putut vedea deja în capitolul anterior, procedeele holografice sunt cele mai avansate conceptual. La rândul lor acestea cunosc trei variante distincte: holografia monofrecvență, holografia multifrecvență și holografia acustică în impuls. Cea din urmă este cea mai complexă, fiind superioară celorlalte două la capitolele: calitatea imaginii (rezoluție spațială), puterea de a discerne reflexiile multiple și obiecte oglindă, și chiar în viteză [162][163].

Pentru a atinge aceste performanțe holografia acustică în impuls ridică în schimb o serie de pretenții legate în primul rând de calitatea traductoarelor utilizate. Astfel, acestea trebuie să aibă un unghi de directivitate cât mai larg și trebuie să poată reda o bandă de frecvențe cât mai largă (nx10KHz - nx100KHz).

“Pentru a obține o calitate ridicată a imaginii sunt necesare traductoare care pot separa impulsuri ce se succed la intervale scurte de timp” Von Alois Knoll [162]. Cu cât banda traductoarelor este mai largă cu atât impulsurile acustice redade sunt mai scurte și deci rezoluția spațială mai ridicată.

Traductoarele uzuale, cele care au fost disponibile în experimente au însă o bandă îngustă, fiind din acest motiv improprie metodelor holografice. Prezentul capitol prezintă totuși o modalitate de lucru prin care traductoare piezo-ceramice de bandă îngustă pot fi utilizate în sisteme holografice dacă rezoluții spațiale de ordinul zecilor de milimetri sunt mulțumitoare.

V.1 Canalul acustic

Pentru a determina componenta lanțului acustic care limitează spectrul impulsului ultrasonic și conduce la obținerea unor rezoluții spațiale limitate se face în continuare un studiu al acestuia.

Iată, prezentată în figura 5.1 diferența dintre impulsurile recepționate pentru cazul unui canal acustic ideal și respectiv unul real [162]. Diferența este dată tocmai de lățimea spectrului de

frecvență a impulsului recepționat, infinită în primul și respectiv limitată în cel de-al doilea caz.

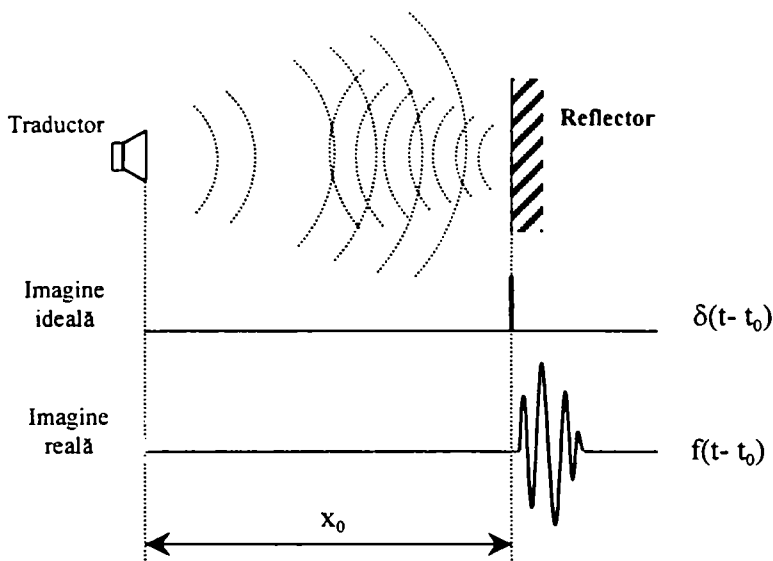


Figura. 5.1 Impulsul acustic recepționat în cazul ideal și real.

Pentru că la recepție, în cazul real, impulsul captat este distorsionat (presupunând că se emite totuși un impuls ideal) se poate concluziona că restrângerea spectrului de frecvență se datorează canalului străbătut de impuls. Undeva pe parcursul acestuia spectrul impulsului este trunchiat.

Din momentul emisie și până la recepție impulsul acustic parcurge traseul: traductor emițător- mediu (aer) - reflexie (suprafața obiectului) - mediu (aer) - traductor receptor [162], așa după cum se arată în figura 5.2.

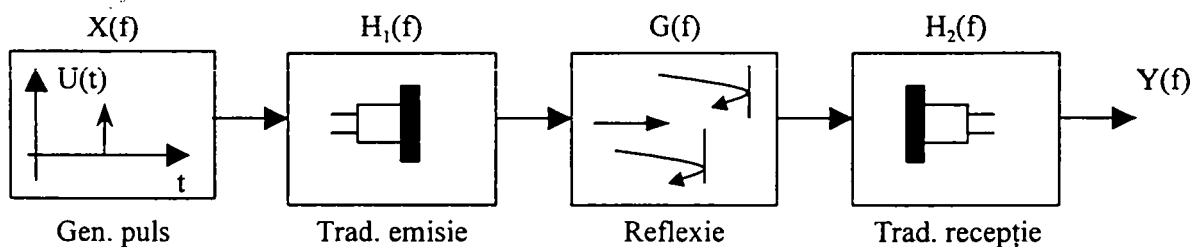


Figura. 5.2 Canalul străbătut de impulsul ultrasonic.

Conform funcțiilor răspuns la frecvență individuale ale blocurilor (vezi figura 5.2) funcția răspuns la frecvență a întregului canal va fi:

$$Y(f) = X(f) \cdot H_1(f) \cdot G(f) \cdot H_2(f) \quad (5.1)$$

Cumulând comportamentul traductorului de emisie cât și a celui de recepție în expresia:

$$H(f) = H_1(f) \cdot H_2(f) \quad (5.2)$$

se obține funcția răspuns la frecvență a canalului ca fiind:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) \cdot G(f) \quad (5.3)$$

În expresia (5.3), a funcției răspuns la frecvență a canalului, termenul $G(f)$ modelează porțiunea: mediu (aer) - reflexie (suprafața obiectului) - mediu (aer). El este format în principiu doar din termeni ce redau întârzierile datorate timpilor diferiți de propagare, corespunzătoare reflexiilor pe diferite obiecte individuale situate la diferite distanțe față de traductoare. Rezultă că $G(f)$ nu afectează componenta spectrală a impulsului emis $X(f)$ [162].

Termenul care reduce spectrul impulsului emis/recepționat este deci $H(f)$ adică tocmai banda traductoarelor utilizate.

Datorită benzii limitate a traductoarelor doar o parte a spectrului impulsului ideal este emis și recepționat. Aceasta duce la o creștere în durată a impulsului și la o scădere a randamentului sistemului de investigare. Componentele ce se găsesc în afara benzii de trecere a traductoarelor se pierd în interiorul acestora. Teoria holografiei acustice în impuls cere ca cel puțin 95% din spectrul unui impuls dreptunghiular să poată fii emis [162] [163].

Se poate sublinia că rezoluțiile spațiale ce se pot obține sunt limitate practic doar de banda de frecvențe a traductoarelor utilizate.

V.2 Studiul traductoarelor electro-acustice.

Pentru a efectua experimentele dorite, cu ajutorul cărora ipotezele avansate în capitolul următor să poată fi verificate, a fost necesar în prealabil însă un studiu al traductoarelor disponibile. Se dorește determinarea unui model electric a acestora, a benzii lor de frecvență precum și a caracteristicilor lor de directivitate.

Traductoarele utilizate sunt traductoare piezo-ceramice din seria 40LT16 produse de către concernul Polaroid, având diametrul exterior de 15mm și o greutate de 1g.

O imagine a acestor traductoare este prezentată în figura 5.3.

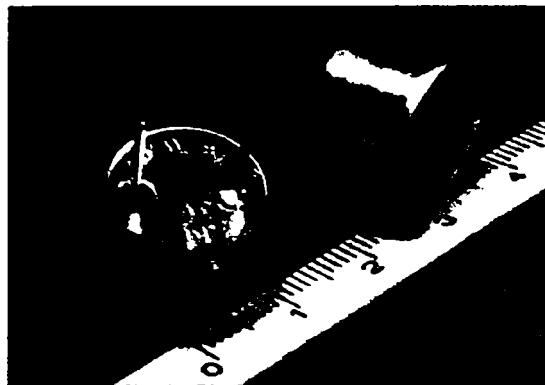


Figura. 5.3 Traductoarele 40LT(R)16.

V.2.1 Modelul electric echivalent

Pe baza analogiei electro-mecanice [213] [214]:

$$\begin{cases} \underline{F} \leftrightarrow \underline{U} \\ \underline{v} \leftrightarrow \underline{I} \end{cases} \quad (5.4)$$

traductorul electro-acustic poate fi reprezentat ca un sistem hibrid diport (vezi figura 5.4),

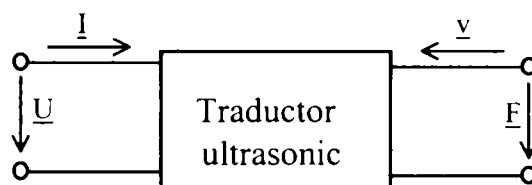


Figura 5.4 Traductorul ultrasonic privit ca un sistem hibrid diport

caracterizat de ecuațiile [213] [214]:

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{Z}_e \underline{I} + K \underline{v} \\ \underline{F} = -K \underline{I} + \underline{Z}_m \underline{v} \end{cases} \quad (5.5)$$

unde:

- $\underline{U}, \underline{I}$ - tensiunea, curentul de excitație la poarta electrică;
- \underline{F} - forța care acționează la poarta mecanică;
- \underline{v} - viteza de vibrație la poarta mecanică;
- $\underline{Z}_e = \left. \frac{\underline{U}}{\underline{I}} \right|_{\underline{v}=0}$ - impedanța electrică parțială (traductorul blocat mecanic);

$$\underline{Z}_m = \left. \frac{F}{\underline{v}} \right|_{I=0} \quad \text{- impedanța mecanică parțială (traductorul în gol, neexcitat);}$$

$$K = \left. \frac{U}{\underline{v}} \right|_{I=0} = - \left. \frac{F}{\underline{I}} \right|_{v=0} \quad \text{- factor de conversie electromecanic.}$$

Funcționarea traductorului electro-acustic se poate modela din punct de vedere electric cu ajutorul unui circuit echivalent, cu parametri concentrați. Forma geometrică, dimensiunile și masa sistemului mecanic al traductorului găsesc corespondent în valorile componentelor sistemului electric echivalent.

Pentru traductoarele electro-acustice piezo-ceramice literatura oferă o schema echivalentă la rezonanță ca cea arătată în figura 5.5 [166] [211] [212] [213] [214].

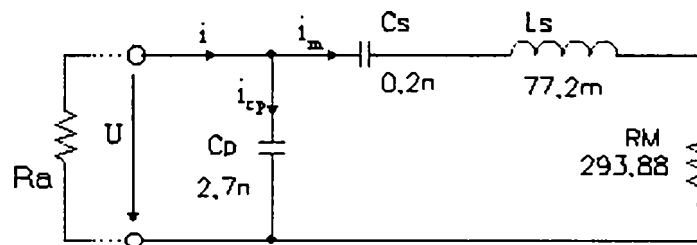


Figura 5.5 Schema echivalentă a traductorului piezo-electric.

Notațiile utilizate aici au semnificațiile:

- C_p : capacitatea statică proprie, măsurabilă la bornele traductorului la frecvențe depărtate de rezonanță;
- C_s, L_s : capacitatea, respectiv inductivitatea dinamică, parametri echivalenți ai circuitului electric acordat pe frecvența de rezonanță;
- R_M : rezistența echivalentă ce înglobează efectul impedanței acustice de radiație a traductorului în gol, a pierderilor mecanice (frecări) în traductor și a impedanței electrice echivalente impedanței acustice complexe a mediului în care radiază traductorul;
- R_a : rezistența de adaptare, utilizată în experimentul descris în subcapitolul V.4
- i : curentul total;
- i_{Cp} : curentul aferent capacității C_p ;
- i_m : curentul corespunzător sistemului mecanic.

Pe baza schemei echivalente de mai sus, se poate deduce impedanța electrică totală a traductorului, sub forma:

$$\frac{1}{H(s)} = \frac{1}{1 / C_p s} + \frac{1}{Z_E(s)} = C_p s + \frac{1}{R_M + L_s s + 1 / C_s s} \quad (5.6)$$

care într-un regim sinusoidal ($s = j\omega$) se transformă în:

$$\frac{1}{H(j\omega)} = j\omega C_p + \frac{1}{R_M + j(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s})} \quad (5.7)$$

respectiv:

$$H(j\omega) = \frac{\omega R_M C_s - j(1 - \omega^2 L_s C_s)}{j\omega^2 C_p C_s R_M + \omega[(C_s + C_p) - \omega^2 L_s C_p C_s]} \quad (5.8)$$

Dacă se reprezintă grafic modulul impedanței $H(j\omega)$ și argumentul acesteia $\arg\{H(j\omega)\}$ se obțin variațiile din figura 5.6. Se poate observa aici prezența a două frecvențe importante, acolo unde modulul impedanței prezintă un minim și respectiv un maxim.

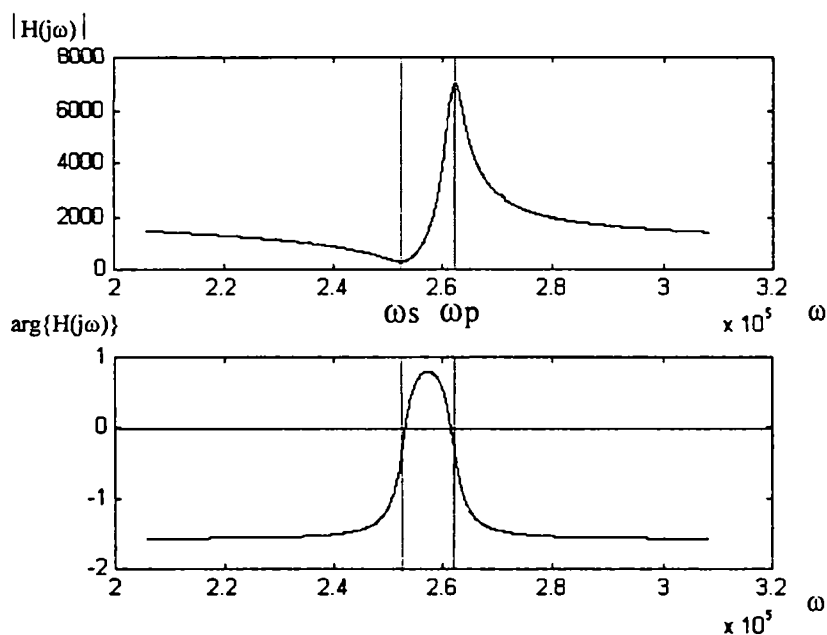


Figura 5.6 Modulul și argumentul lui $H(j\omega)$.

Prima este frecvența naturală a sistemului mecanic, așa numita frecvență serie de rezonanță, frecvență pentru care modulul impedanței $H(j\omega)$ prezintă un minim:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \text{ [KHz]} \quad (5.9)$$

Cea de-a doua frecvență remarcată este cea pentru care modulul lui $H(j\omega)$ atinge un maxim. Ea este denumită și frecvență de rezonanță paralelă sau de antirezonanță:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}}} \text{ [KHz]} \quad (5.10)$$

Aceste două frecvențe decid modul de comportare a traductorului. Pentru frecvențe de lucru cuprinse între f_s și f_p cristalul piezoelectric al traductorului se comportă inductiv. Avem în acest caz un defazaj pozitiv (vezi figura 5.6). Pentru frecvențe din afara acestui interval traductorul ultraacustic se comportă capacitiv, introducând defazaje negative.

Pentru a verifica validitatea modelului preluat din [166] și prezentat în figura 5.5 s-a ridicat experimental variația modulului impedanței $H(j\omega)$ cu frecvența pentru traductorii disponibili, obținându-se alături din figura 5.7.

Din experiment s-a găsit valoarea frecvenței de rezonanță serie ca fiind 40.2KHz, iar pentru frecvența de rezonanță paralelă s-a determinat valoarea de 42KHz. Corespunzător frecvenței de rezonanță serie modulul impedanței a fost măsurat ca fiind egal cu valoarea de 146.39Ω.

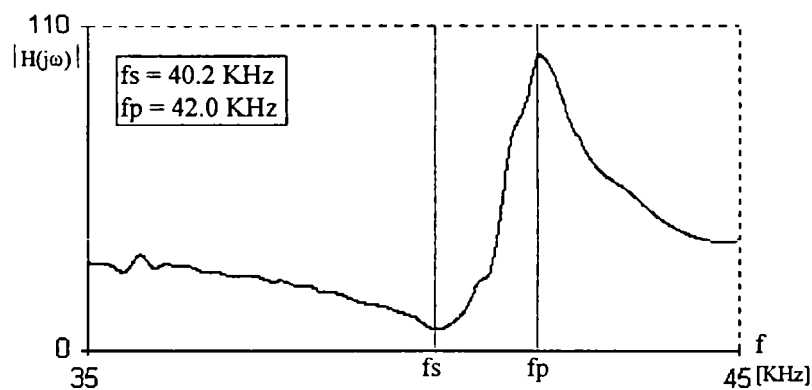


Figura 5.7 Variația modulului $H(j\omega)$ cu frecvența, variație ridicată experimental.

S-a mai măsurat de asemenea valoarea capacității paralele (C_p) găsindu-se o valoare aproximativă de 2,7nF (media valorilor capacităților paralele pentru mai mulți traductori). Având aceste valori experimentale se poate trece la determinarea parametrilor schemei echivalente (figura 5.5) cu următoarele relații de calcul [166] :

- pentru capacitatea dinamică C_s :

$$C_s = C_p \left[\left(\frac{f_p}{f_s} \right)^2 - 1 \right] \quad (5.11)$$

- inductivitatea dinamică L_s :

$$L_s = \frac{1}{C_s (2\pi f_s)^2} \quad (5.12)$$

- rezistența mecanică R_M :

$$R_M = \frac{|Z_s|}{\sqrt{1 - (2\pi f_s C_p |Z_s|)^2}} \quad (5.13)$$

Obținându-se în final valorile $C_s = 0,203 \text{ nF}$, $L_s = 77,2\text{mH}$, $R_M = 293,88$.

Cu aceste valori calculate, având modelul electric echivalent complet definit acum, s-a trecut la analiza SPICE a acestuia. Rezultatele obținute în urma unei analize în frecvență sunt prezentate în figura 5.8.

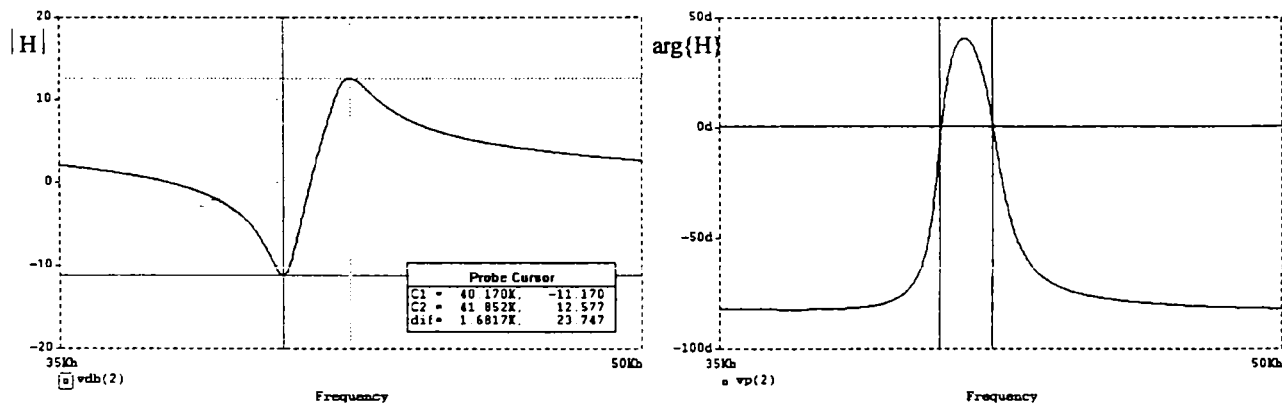


Figura 5.8 Modulul și argumentul lui $H(j\omega)$ a modelului SPICE obținut.

Comparând această ultimă figură cu variațiile din figurile 5.6 și 5.7 și cu valorile frecvențelor serie și paralel determinate experimental se poate certifica validitatea modelului electric echivalent care va constitui baza experimentelor ulterioare.

V.2.2 Banda traductoarelor 40L16

"Cum poate fi utilizat acest tip de traductor?" este întrebarea a cărei răspuns va direcționa experimentele dorite.

Pentru a răspunde la această întrebare se revine la cea de-a doua ecuație a sistemului (5.5). În cazul traductoarelor electro-acustice emițătoare, pentru care $\underline{F} = 0$ se obține :

$$K\underline{I} = \underline{Z}_m \cdot \underline{v} \quad \underline{v} = K \cdot \frac{\underline{I}}{\underline{Z}_m} \quad (5.14)$$

Relația (5.14) afirmă că viteza de vibrație la poarta mecanică a traductorului electro-acustic este direct proporțională cu valoarea curentului ce străbate traductorul. Pentru a obține deci o rată de conversie a energiei electrice în energie acustică cât mai ridicată trebuie să se lucreze la rezonanța serie a traductorului, acolo unde impedanța acesteia este cea mai mică și deci curentul prin dispozitiv va fi maxim.

Din păcate, însă, după cum se poate vedea în oricare din figurile 5.6, 5.7 și 5.8 banda din jurul frecvenței de rezonanță serie, pentru care impedanța traductorului se menține la o valoare scăzută, este redusă și, în concluzie pentru frecvențe care se îndepărtează de cea de rezonanță serie randamentul conversiei va fi scăzut.

În sprijinul acestor concluzii se prezintă, în figura 5.9, caracteristica de transfer emițător-mediu(aer)-receptor. Experimentul care a condus la obținerea acestei alături a dispus cei doi traductori față în față, la o distanță de doar câțiva centimetri, într-un mediu lipsit de obstacole.

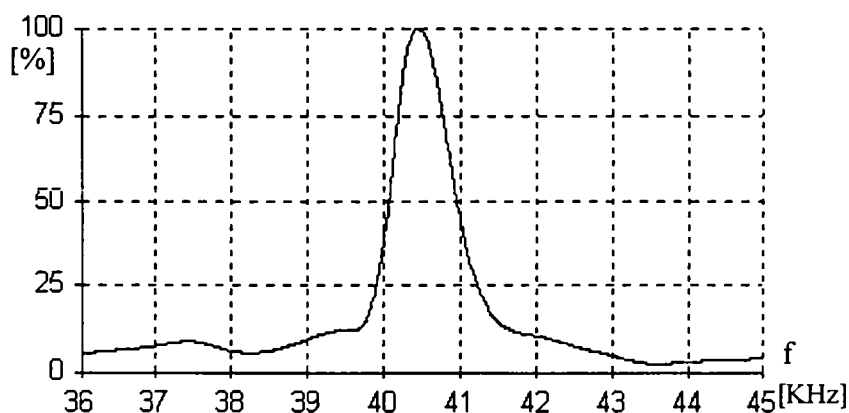


Figura 5.9 Caracteristica de transfer emițător-mediu-receptor.

Din studiul figurii 5.9 se poate observa că transferul energiei între cei doi traductori are un vârf de randament maxim calat pe frecvența de rezonanță serie. În plus, de pe același grafic se poate deduce banda de frecvență de lucru a traductoarelor care este aproximativ egală cu valoarea de 1kHz.

O altă cale pentru determinarea lărgimii benzii de frecvențe pentru aceste traductoare o oferă studiul modelului electric prezentat la punctul V.2.1. Pe acest model se poate determina expresia funcției răspuns la frecvență a circuitului serie a traductorului:

$$H(j\omega) = \frac{1}{RM + j\left(\omega Ls - \frac{1}{\omega Cs}\right)} \quad (5.15)$$

unde notațiile utilizate sunt cele din figura 5.5. Reprezentând în continuare modulul acestei expresii se poate determina banda de lucru a modelului traductoarelor.

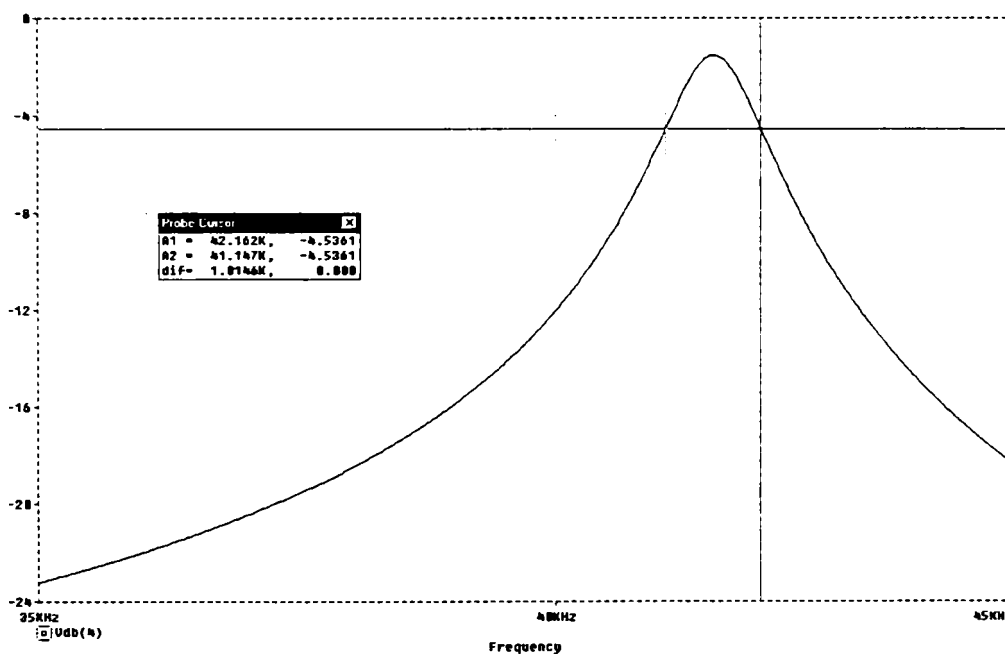


Figura. 5.10 Caracteristica de frecvență a traductoarelor 40LT(R)16 calculată cu expresia (2).

Și rezultatul din figura 5.10 arată că lățimea benzii de trecere definită la 3dB pentru aceste traductoare este egală cu 1KHz.

Traductoarele disponibile sunt traductoare de bandă îngustă, improprii deci tehnicilor holografice. Totuși, pentru că nu s-a dispus de alte traductoare mai performante, s-a căutat o cale care să permită utilizarea lor chiar și în cazul excitării în impuls. Nu s-a urmărit obținerea unui sistem care să ofere o rezoluție spațială deosebită, ci s-a dorit obținerea unui sistem care să permită efectuarea unui set de experimente pentru confirmarea ipotezelor avansate.

V.2.3 Caracteristica de directivitate

Întrucât experimentele ce vor fi prezentate pe parcursul acestei teze, iau în considerare caracteristica de directivitate a traductoarelor, s-a ridicat experimental pentru traductoarele disponibile o astfel de caracteristică.

Experimentul a constatat în deplasarea traductorului emițător pe un arc de cerc cu deschiderea de 90 de grade și înregistrarea semnalului furnizat de traductorul receptor, plasat în centrul cercului. Poziția de plecare a fost cea cu traductoarele față în față pe aceeași axă. Traductorul emițător a fost în permanență orientat spre traductorul receptor. Excitarea traductorului emițător s-a făcut cu o tensiune undă sinusoidală continuă cu frecvența de 40.2KHz. Valorile astfel obținute au fost apoi oglindite față de axa mediană a traductorului receptor pentru a completa lobul.

Rezultatul obținut este prezent în figura 5.11.

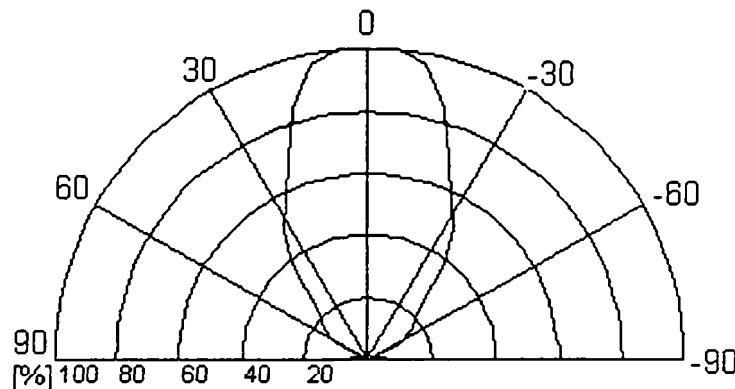


Figura 5.11 Caracteristica de directivitate a traductoarelor utilizate.

Traductoarele electro-acustice receptoare 40LR16 vor putea fi utilizate până la o deschidere de 30° față de axul lor median acolo unde randamentul conversiei scade la 55% din valoarea lui maximă.

Traductoarele disponibile nu au o caracteristică de directivitate largă, așa cum ar fi fost de dorit, dar ea este cunoscută și va fi luată în considerare ca atare în experimentele din capitolul următor.

V.3. Studiul excitației traductoarelor 40LT16. Optimizarea duratei de emisie.

Așa după cum s-a demonstrat în subcapitolul precedent traductoarele 40L16 nu sunt traductoare de bandă largă, fiind proiectate de fapt pentru a lucra în undă continuă. Cu astfel de traductoare singura modalitate de a emite eficient este excitarea lor continuă pe frecvența

de rezonanță serie, adică la 40.2KHz acolo unde caracteristica lor de frecvență are un minim (vezi figura 5.7).

Excitarea acestor traductoare în impuls conduce la rezultate mediocre, întrucât doar o mică parte din energia de excitație va putea fi emisă. Singura posibilitate de a încerca o emisie limitată în timp este emisia unui număr finit de perioade a unei unde sinusoidale, bineînțeles având frecvența egală cu cea de rezonanță serie a traductorului, fiind aproximat în acest fel un impuls.

Dacă se încearcă un experiment simplu cu cele două traductoare de emisie și respectiv de recepție alăturați, cu un mediul liber care conține doar un singur obstacol așezat pe mediana celor două traductoare, și dacă traductorul emițător se excită cu 5 perioade complete a unei unde sinusoidale de 40.2KHz la recepție se obține forma de undă redată în figura 5.12.

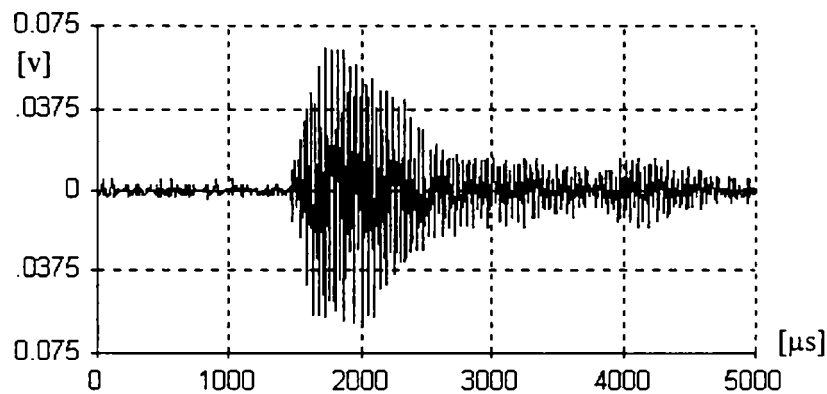


Figura. 5.12 Semnalul recepționat dacă sunt emise 5 perioade (semnal sinusoidal 40.2KHz), iar mediul în care s-a făcut reflexia prezintă un singur obstacol cilindric.

Analizând figura 5.12 se observă că la recepție durata impulsului este de aproximativ 1.5-2ms cu toate că la emisie durata “impulsului” a fost de 124.35μs ($5 \times 1/40.2\text{KHz}$). Cu impulsuri de durată atât de mare rezoluția spațială care se poate obține este în cel mai bun caz de 380mm, fiind o rezoluție total nesatisfăcătoare.

Răspunsul obținut la excitarea cu 5 perioade sinusoidale, prezentat în figura 5.12, se poate explica dacă se studiază excitarea traductorului pe modelul său echivalent. Dacă se face o analiză tranzitorie pentru excitarea circuitului echivalent din figura 5.5 cu 5 perioade ($f = 40.2\text{KHz}$) și se urmărește evoluția în timp a curentului prin partea mecanică a traductorului (RM-Ls-Cs) se obține alura din figura 5.13.

Se observă oscilațiile amortizate ale curentului din traductor, care durează încă 1.5-2ms după excitarea efectivă a acestuia. Conform relațiilor (5.5) (5.14) atâta timp cât există curent în traductor, la poarta sa mecanică se înregistrează vibrații [162] și deci traductorul va emite continuu.

Iată explicația prezenței “cozii de cometă” ce succede impulsul acustic propriu-zis (vezi figura 5.12). Pe durata excitării traductorul acumulează energie pe care apoi o disipă încet dealungul unei durate dată de valorile parametrilor circuitului echivalent.

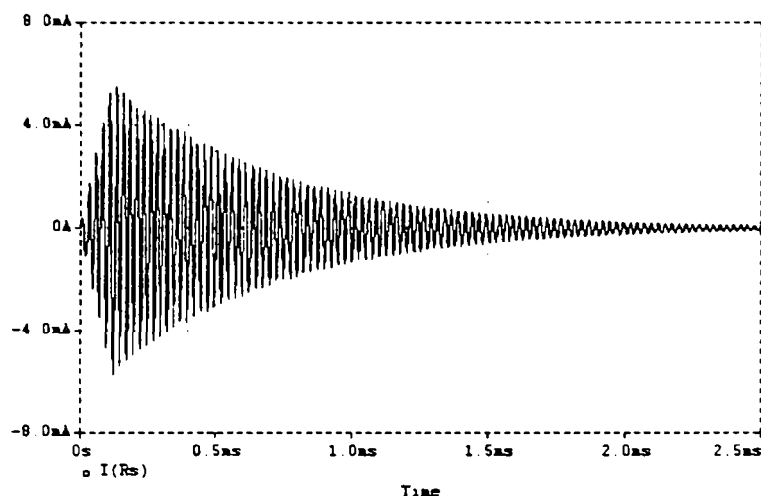


Figura 5.13 Variația în timp a curentului prin traductorul ultrasonic la excitarea cu 5 perioade de semnal sinusoidal.

Pentru a dovedi justetea ipotezei avansate se prezintă în figura 5.14 forma de variație a tensiunii la bornele traductorului emițător pe parcursul excitării (cu cele 5 perioade complete) și pentru câteva momente ulterioare.

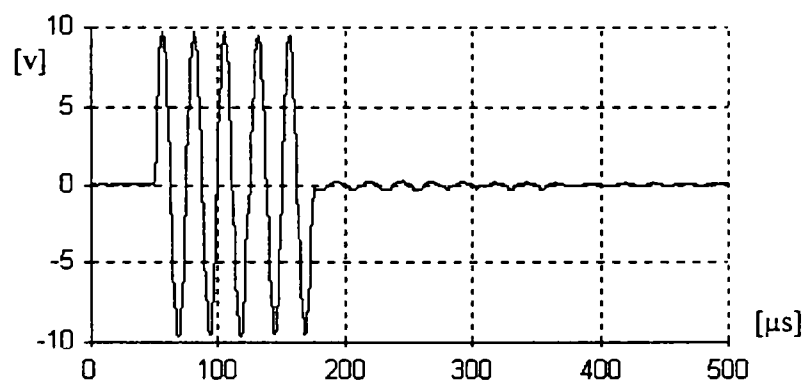


Figura 5.14 Forma de variație a tensiunii la bornele traductorului emițător

Ceea ce trebuie remarcat în 5.14 este apariția la bornele traductorului emițător unor mici oscilații imediat după încheierea “impulsului” excitator. Frecvența lor este egală cu frecvența de rezonanță serie a traductorului, iar amplitudinea lor este atenuată în timp. Prezența lor dovedește că în traductor există într-adevăr energie înmagazinată în urma excitării, care nu dispăre odată cu încheierea perioadei de excitare.

Scurtarea timpului de emisie ar fi deci posibilă dacă s-ar disipa mai rapid energia acumulată în traductor. Dar, cum modificarea parametrilor circuitului echivalent nu este posibilă iar

bornele traductorului reprezintă singura cale de control a acestuia rezultă o unică cale posibilă: extragerea energiei din traductor. Această alternativă a fost sugerată tocmai de prezența acelor mici oscilații reziduale prezentate în figura 5.14.

Este posibilă extragerea energiei dacă, imediat după excitare, traductorul este atacat cu o undă sinusoidală cu o anvelopă identică cu cea după care energia în traductor se disipă în mod natural, dar de fază opusă. Se are în vedere principiul de compunere a două unde de aceeași formă de variație în timp, dar de faze opuse, care conduce la anularea reciprocă a acestora.

S-a ajuns în acest mod la unda compusă de excitare din figura 5.15, care s-a obținut cu ajutorul mediului PSPICE prin concatenarea a 5 perioade sinusoidale complete cu alte 5 dar a căror fază a fost inversată și li s-a impus o anvelopă descrescătoare.

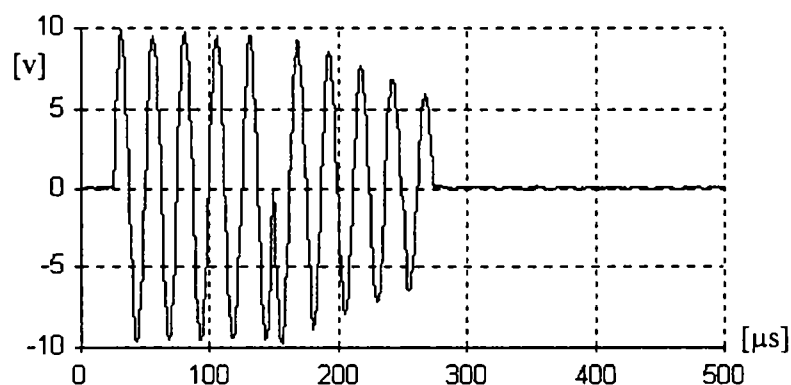


Figura. 5.15 Unda de excitare compusă.

Spectrul acestui semnal are alina prezentată în 5.16 unde se pot observa cele două maxime ale spectrului egal depărtate de frecvența de rezonanță serie a traductorului. Se regăsește astfel concluzia lui Von Alois Knoll [162][163] care recomandă ca spectrul semnalului excitator să compenseze caracteristica de frecvență de tip trece bandă a traductoarelor.

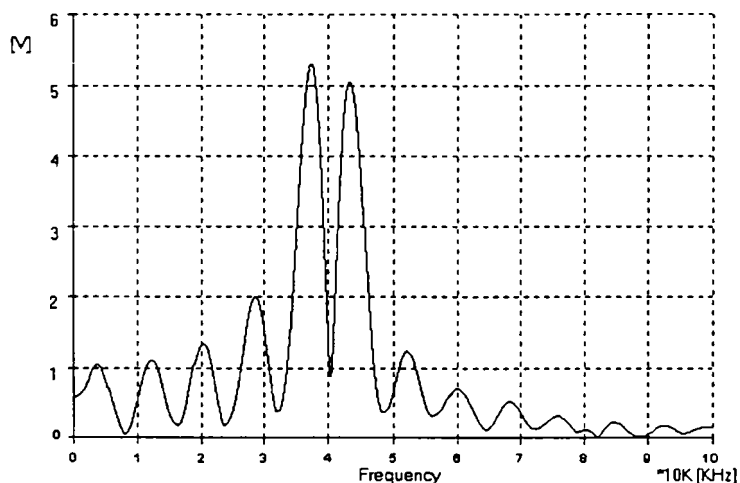


Figura. 5.16 Spectrul semnalului compus de excitare.

Dacă se reface experimentul pe modelul din figura 5.5 și se aplică traductorului emițător un semnal optimizat, de forma celui prezentat în figura 5.15, curentul în partea mecanică a modelului său va scădea brusc după excitare (vezi figura 5.17).

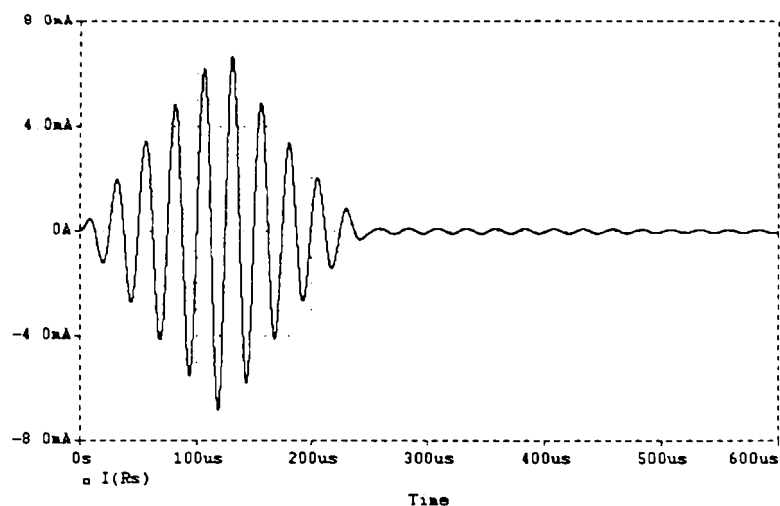


Figura. 5.17 Variația în timp a curentului prin traductorul ultrasonic la excitarea cu undă compusă.

Dacă se reia experimentul care a condus la obținerea la recepție a ecoului din figura 5.12, dar de această dată traductorul de emisie este excitat cu semnalul din figura 5.15 se va obține ecoul din figura 5.18.

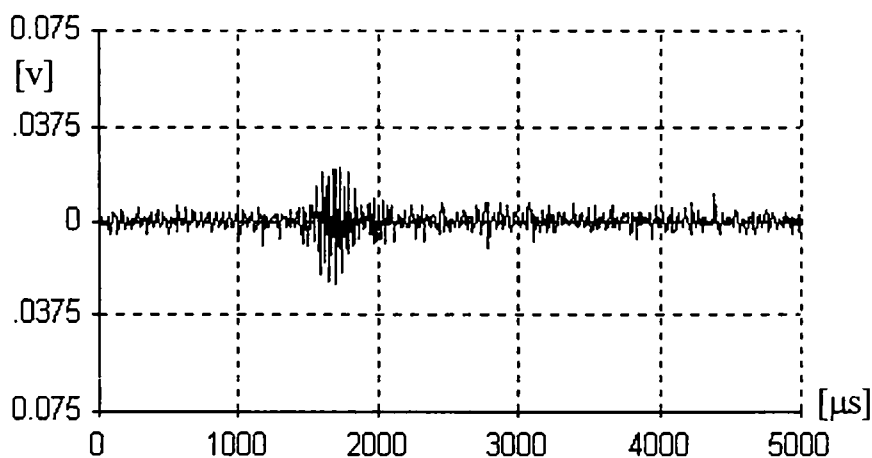


Figura. 5.18 Semnalul recepționat după excitarea traductorului emițător cu undă compusă.

Prin compararea celor două figuri (5.12 și 5.18) se observă că amplitudinea impulsului recepționat a scăzut, dar s-a obținut și o reducere a “cozii de cometă” de 4 ori. Reducerea amplitudinii impulsului emis este de fapt prețul plătit pentru reducerea timpului de relaxare, datorită micșorării energiei transmise senzorului.

Rezultatele cele mai bune privind reducerea duratei impulsului recepționat s-au obținut pentru un număr egal de perioade excitatorii și de perioade de extragere a energiei. S-a studiat

de asemenea excitarea traductorului cu unde compuse din 3 excitație-3 extracție, 5 excitație-5 extracție, 7 excitație-7 extracție. Firesc, s-au obținut amplitudini mai mari ale semnalului recepționat pentru cazul în care i se permite traductorului o oscilație mai îndelungată. Dar, pentru a nu afecta rezoluția spațială se propune compromisul 5 excitație - 5 extracție, caz în care unda compusă are o durată aproximativă de 250μs.

De asemenea numărul de perechi excitare-extragere influențează spectrul semnalului compus. Pentru perechi mai puține semnalul are o durată mai mică, dar și un spectru mai larg și reciproc. Se poate face astfel o corelare între banda de lucru a traductorului și spectrul semnalului, astfel încât o parte cât mai mare a acestuia să fie reprodus de către traductor, dar să se optimizeze și durata impulsului.

Celei de-a doua părți a undei compuse îi este impusă o anvelopă descrescătoare, cu o rată egală cu cea de stingere naturală a oscilațiilor din interiorul traductorului. Inițial însă s-a încercat extragerea energiei cu o undă compusă a cărei a doua componentă să fie doar inversată ca fază. Pentru acest caz s-a obținut o variație a curentului prin traductor ce atingea un minim ca în figura 5.17, dar care revenea apoi cu o oscilație ce se amortiza natural.

Acest tip de excitație este asemănător modului de lucru în holografia acustică în impuls, unde spectrul undei care excită traductorul emițător este controlat pentru a obține rezultate optime.

V.4 Adaptarea traductorului receptor

Eliminarea fenomenului de prelungire a impulsului emis/recepționat nu poate fi făcută doar controlând excitarea traductorului emițător deoarece există pe calea străbătută de semnalul acustic și traductorul receptor (vezi figura 5.2). Odată ce traductorul receptor este excitat, preluând din mediu energia acustică a ecoului, el va rezona relaxat. Fenomenul este similar celui de la emisie, prezentat în figura 5.13.

Și de această dată, ca și în cazul emisieii, se urmărește consumarea cât mai rapidă a energiei electrice pe care traductorul a convertit-o din energie acustică. În cazul traductorului receptor nu este posibilă aplicarea unui artificiu asemănător celui de la emisie. Soluția aplicabilă însă traductorului receptor, este adaptarea sa cu o sarcină care să disipe cât mai rapid energia captată. Problema care apare este găsirea valorii optime a unui rezistor de adaptare pentru care transferul de energie dinspre traductor spre sarcină să fie maxim.

$$\begin{cases} \frac{d^2 i_m}{dt^2} + \frac{R_M}{L_s} \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{L_s C_s} i_m - \frac{1}{L_s C_p} i_{cp} = 0 \\ R_a \frac{di_m}{dt} + R_a \frac{di_{cp}}{dt} + \frac{1}{C_p} i_{cp} = 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

Plecând de la aceeași schemă echivalentă din figura 5.5, dar la bornele căreia s-a adăugat rezistorul de adaptare (R_a) se poate scrie sistemul de ecuații diferențiale (5.16) ce reflectă variațiile temporale ale curenților din circuit. Sursa de tensiune din schema echivalentă a traductorului receptor a fost omisă considerând că momentul începerii analizei este imediat următor stingerii impulsului ultrasonic excitator. Energia preluată se regăsește în întregime în valoarea inițială a tensiunii capacităților C_p și C_s și a curentului prin inductorul L_s . Se mai presupune că după excitare circuitul este lăsat să oscileze liber.

Se urmărește deci obținerea unei durate minime de amortizare a curentului prin traductor variind valoarea rezistorului de adaptare R_a . Pentru aceasta se caută soluția sistemului (5.16) care să permită determinarea formei de variație în timp a curentului prin traductor, având rezistorul de adaptare R_a drept parametru.

Exprimând pe i_{cp} din prima ecuație a sistemului (5.16) și înlocuind această expresie în cea de-a doua se obține o ecuație diferențială omogenă în i_m .

$$R_a L_s C_p \frac{d^3 i_m}{dt^3} + (R_a R_M C_p + L_s) \frac{d^2 i_m}{dt^2} + (R_a R_M + \frac{R_a C_p}{C_s}) \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C_s} i_m = 0 \quad (5.17)$$

Rezolvarea pe cale analitică a ecuației (5.17), cu R_a ca și parametru, conduce din păcate la o expresie atât de complicată a curentului din traductor încât practic aceasta nu este utilizabilă. Au fost utilizate în acest scop atât pachetul MATLAB cât și MATHEMATICA.

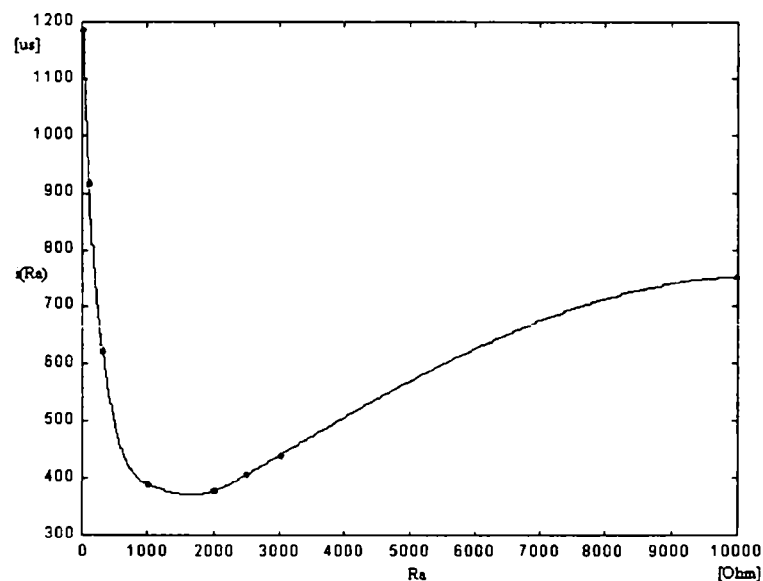


Figura 5.19 Durata de amortizare a curentului din traductor funcție de valoarea rezistorului de adaptare.

S-a recurs, în cele din urmă, la rezolvarea acestui sistem pentru un set de valori a rezistorului de adaptare R_a . Fiecare soluție reprezentând expresia funcție de timp a curentului prin circuit

pentru o valoare particulară a lui R_a . Pentru fiecare soluție în parte s-a determinat apoi durata de amortizare a curentului i_m .

Dependența obținută este redată în figura 5.19, unde pe abscisă se găsesc valorile rezistorului de adaptare iar pe ordonată durata de stingere a curentului din transductor. Sunt punctate aici duratele de amortizare găsite, graficul fiind completat prin interpolare cubică.

Există deci o valoare optimă a lui R_a care conduce la stingerea rapidă a energiei acumulate în transductor. Pentru valorile componentelor din circuitul echivalent considerat (vezi figura 5.5), valoarea optimă a lui R_a este de 1650Ω .

Reluând experimentele care au condus la obținerea impulsurilor din figurile 5.12 și 5.18 dar completând seria optimizărilor cu rezistorul de adaptare la bornele transductorului receptor se obține de această dată la recepție impulsul din figura 5.20.

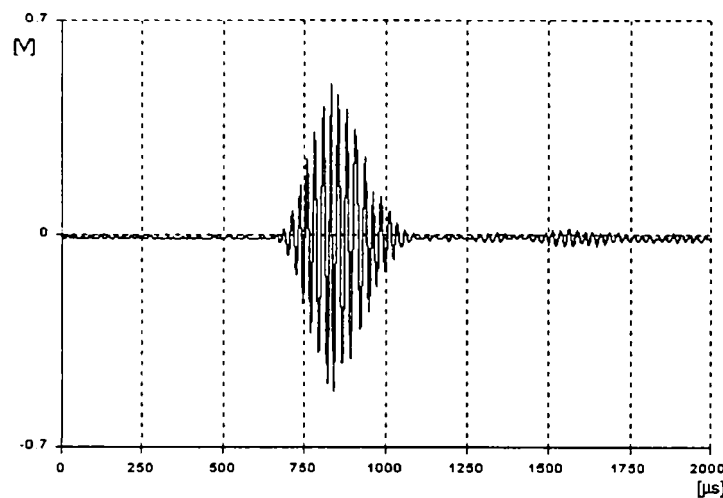


Figura 5.20 Semnalul recepționat după excitarea transductorului emițător cu unda compusă și cu transductorul receptor adaptat.

Prin compararea figurii 5.20 cu 5.12 și 5.18 se constată o reducere suplimentară a duratei impulsului. În total durata impulsului a scăzut de circa 10 ori, fiind acum de $300\mu s$. Cu un astfel de impuls rezoluția spațială ce se poate obține este de $49.5mm$.

Este de notat ca principal dezavantaj al acestei metode este necesitatea adaptării valorii lui R_a fiecărui transductor receptor în parte pentru a obține rezultate optime. Se reamintește că s-a căutat obținerea unui sistem care să poată fi folosit în verificarea ideilor avansate și nu obținerea unei rezoluții spațiale deosebite.

V.5 Concluzii

Utilizând procedeele prezentate în secțiunile V.3 și V.4 s-a obținut, în cazul traductoarelor disponibile, o reducere a duratei impulsului recepționat de la 2.5ms –3ms la 300μs, adică cu aproximativ un ordin de mărime, chiar pentru traductoarele disponibile. Durata impulsului emis a fost de 248.7μs, iar durata impulsului recepționat este 300μs.

Utilizând acest procedeu se poate obține acum o rezoluție spațială de 49.5mm, chiar cu traductoarele disponibile de bandă îngustă, adică o rezoluție de 10 ori mai bună decât în cazul modului de lucru clasic cu o salvă de perioade.

Rezultatele s-au obținut în condițiile în care, la emisie, numărul de perioade excitatorii a fost egal cu numărul perioadelor de extragere a energiei.

Impulsul ultrasonic emis nu este distorsionat ca fază în urma excitării compuse.

Amplitudinea semnalului a scăzut de circa 10 ori față de situația inițială. Aceasta se datorează pe de o parte benzii limitate a traductorului (doar o parte a spectrului semnalului este emis), iar pe de altă parte a sarcinii de adaptare de la recepție care atenuază în plus semnalul recepționat.

Rezoluția obținută este considerată suficientă în cazul explorării mediului de către un robot mobil. Creșterea rezoluției, în continuare, se poate face prin micșorarea numărului de perechi de excitație - extragere la emisie, dar astfel se va lărgii spectrul semnalului ce trebuie emis și ar fi recomandată totuși utilizarea unor traductoare de bandă mai largă.

Dacă se dispune doar de traductoare de bandă îngustă și se dorește totuși un ecou de amplitudine mai mare se poate trece la o secvență de excitație mai lungă 7-7 sau 9-9 care ar conduce la îngustarea spectrului semnalului compus, dar ar lungii implicit durata de emisie, iar rezoluția spațială ar scădea la 58mm, respectiv 75mm.

Funcție de lățimea de bandă a traductoarelor disponibile se poate alege lungimea optimă a secvenței de excitație.

Pentru a obține rezultate optime rezistorul de adaptare atașat traductorului receptor trebuie ajustat pentru fiecare traductor în parte.

Chiar dacă rezoluțiile obținute nu sunt dintre cele mai bune, sistemul propus poate fi utilizat pentru verificarea ideilor ce vor fi avansate pe parcursul următorului capitol.

VI. Holografia acustică în impuls bidimensională bitractor

Atât varietatea, dar mai ales dinamica lumii înconjurătoare reprezintă o serioasă piatră de încercare pentru roboții mobili autonomi. Aceste sisteme trebuie să dovedească un înalt grad de flexibilitate pentru a se putea adapta modificărilor continue ale mediului înconjurător.

Realizarea unui robot mobil autonom reclamă atât perceperea cât și reprezentarea lumii imediat înconjurătoare acestuia. Sunt esențiale aceste două capacități deoarece informația obținută poate fi utilizată apoi în proceduri reflexe de evitare a obstacolelor (conducere reactivă) sau, pentru construirea și apoi actualizarea unei hărți globale (planificarea traiectoriei) și, nu în cele din urmă, determinarea poziției robotului mobil în mediu (localizarea și controlul traiectoriei).

Perceperea mediului imediat înconjurător se face prin intermediul senzorilor. Literatura abundă în metode care încearcă să soluționeze problema percepției și apoi a reprezentării mediului (practic întreaga bibliografie citată). Se întâlnesc o gamă foarte largă de senzori, începând cu senzorii de proximitate, de contact, apoi sisteme odometrice, senzori ultrasonici, sisteme video și chiar senzori olfactivi. Dintre aceștia ies în evidență, datorită frecvenței cu care sunt utilizați, senzorii ultrasonici.

Se va încerca în subcapitolele următoare ale prezentului capitol să se demonstreze că utilizând doar senzori ultrasonici, dar permițând recepția ecourilor multiple, informația captată din mediu este atât de bogată încât este suficientă pentru conducerea reactivă a roboților mobili.

S-a precizat explicit, utilizarea ecourilor multiple, întrucât apariția acestora constituie o problemă importantă pentru metodele clasice de investigare cu senzori ultrasonici. În întreaga bibliografie se prezintă algoritmi și metode pentru evitarea ecourilor multiple. În contrast, ideea prezentată în continuare va accepta ecourile multiple, propunând un mod de tratare și utilizare a acestora.

Ca o dovadă a fiabilității ideii propuse aici, este descris în cele ce urmează exemplul liliacului.

VI.1 Sisteme biologice de tip sonar

Una din cele mai cunoscute, dar după cum se va vedea în scurta descriere ce urmează, poate și cea mai performantă utilizare a principiului sonarului este cazul liliecilor. Aceștia sunt mamifere zburătoare care fac uz de un sonar pentru a naviga sau vâna insecte. Sistemul lor de orientare este întâlnit în literatură sub denumirea de *ecolocator*.

Ca și în cazul sistemelor artificiale, ecolocatorul liliecilor este compus din două părți: un transmițător (adică sistemul vocal al liliecilor) și un receptor (sistemul auditiv al acestora); principiul de funcționare la bază fiind același. Timpul de întârziere dintre momentul de emisie a țipătului și momentul de întoarcere al ecoului poartă informație despre distanța până la obiectul care a generat ecoul.

În urma unei analize atente a sonarului biologic al liliecilor, s-a demonstrat că ecoul ultrasonic poate oferi mult mai multă informație decât numai distanța până "țintă" [175] [227]. Lilieci pot discrimina ținte ce diferă prin distanță, formă, mărime sau chiar după mișcarea lor.

Ecoul recepționat de către liliac este "măsurat" pe mai multe dimensiuni: întârzierea aduce informație despre distanța până la obiectul care a generat ecoul, iar amplitudinea ecoului este dependentă de înclinarea relativă a țintei față de liliac. În plus aceeași amplitudine mai arată și cât de întinsă a fost suprafața pe care s-a făcut reflexia. Din caracteristica spectrală a semnalului la recepție se pot trage concluzii despre rugozitatea suprafeței de reflexie. Prin determinarea deviației Doppler se poate estima viteza țintei. Chiar mai mult, componenta continuă a semnalului recepționat "reflectă" viteza relativă față de țintă, iar componenta alternativă oferă o măsură a frecvenței bătăilor din aripi a prăzii [175]. La întreg acest tablou de informații se adaugă indicația bioaurală ce se traduce până la urmă în informație de azimut.

Pentru a putea procesa această cantitate imensă de informație sistemul auditiv al liliecilor este extrem de dezvoltat și specializat. Încă la nivelul urechii (membrana basilară) este efectuată o analiză spectrală a semnalului recepționat. Divizarea informației purtate de către ecou este făcută tot la nivelul urechii, fiecare "ramură" fiind apoi analizată în profunzime de către creier.

Există peste 700 de specii de lilieci care utilizează acest sistem de orientare, iar țipătul lor variază larg în funcție de specie, vârsta sau mărimea individului. Important este însă că fiecare dintre aceste specii utilizează un semnal ce este bine adaptat mediului și nevoilor individului. Țipătul liliecilor este un semnal complex, fiind compus din patru componente armonice principale. Fiecare armonică este compusă la rândul său dintr-o salvă mai lungă de frecvență constantă urmată imediat de una mai scurtă modulată în frecvență. Țipătul este mereu adaptat condițiilor locale.

Luând spre exemplu [175] liliacul mare brun, *Eptesicus Fuscus*, acesta își modifică caracteristicile țipătului pe parcursul cursei capturării unei insecte, pentru a obține maximum de informație posibilă funcție de distanța față de țintă. Astfel, în timp ce caută o pradă acest liliac emite țipete lungi (5-20ms) care au factor slab de modulare în frecvență. În această fază țipătul lui baleiază plaja cuprinsă între 28KHz și până la 22KHz.

Dacă o posibilă țintă este detectată acest liliac lărgeste gama componentelor spectrale ale țipătului emis, scurtându-l totodată. Astfel, în timp ce se apropie de pradă același liliac emite țipete cu o bandă cuprinsă între 50KHz în jos spre 25KHz, și cu o durată de doar 1-3ms. Pe măsură ce se apropie de prada, durata țipătului este din ce în ce mai scăzută.

Prin modificarea continuă a țipătului său, liliacul nu numai că obține informațiile necesare dar tot odată satisface și constrângerile impuse de sistemul său de locație. Deoarece pentru distanțe scurte până la țintă un impuls scurt are șanse mai puține să se suprapună peste ecoul ce se întoarce acum mai repede. Dealungul fazei de căutare țipătul lung cu o caracteristică de frecvență relativ îngustă, maximizează energia emisă pentru o lățime de bandă dată, astfel crescând șansele detecției unui ecou slab, datorat unei ținte îndepărtate. Pe măsură ce se apropie de țintă un semnal sonor spectral mai bogat poate oferi mai multă informație despre forma ținteii. În final când liliacul este pe punctul de a captura prada, țipetele dese și scurte eșantionează frecvent poziția acesteia și permite compensarea unei eventuale manevre de evitare de ultim moment.

De asemenea liliacii nu modifică doar spectrul semnalelor acustice emise ci și amplitudinea acestora. Pentru ținte îndepărtate sunetul emis va fi mai puternic, pentru a compensa atenuarea datorită propagării prin aer a salvei sonore. Pe măsură ce se apropie de țintă țipătul liliacilor scade în intensitate.

Dată fiind evidența capacităților perceptuale remarcabile ale liliacului, putem conchide că principiul de investigare cu ultrasunete poate oferi informații extrem de detaliate despre mediu. Literatura abundă în exemple de utilizare a sonarului pentru detecția obstacolelor în cazul roboților mobili. Dar aceste aplicații nu utilizează decât în mică măsură capacităților principiului sonarului deoarece nu exploatează întreaga gamă de informații purtată de către ecoul ultrasonic.

Multidimensionalitatea informației conținute în ecoul ultrasonic sugerează că sonarul ar putea avea aplicații în robotică nu doar pentru detecția obiectelor și determinarea distanței până la acestea, ci și pentru a obține informații detaliate despre obiecte.

VI.2 Ideea

Ideea introdusă pe parcursul prezentului capitol încearcă să se constituie într-o soluție la problema percepției și reprezentării mediului ca parte a conducerii reactive a roboților mobili. Se dorește perceperea mediului imediat înconjurător și obținerea unei reprezentări a acestuia care să poată fi utilizată la evitarea obstacolelor întâlnite de robotul mobil în deplasarea sa.

Originea ideii rezidă în exemplul liliacului, care așa după cum s-a prezentat în subcapitolul anterior, folosind doar un singur traductor emițător (gura) și doar două traductoare receptoare (urechile) reușește performanțe remarcabile ca: zborul în spațiul limitat al cavernelor și capturarea fluturilor sau chiar a țânțarilor.

Deși ecolocatorul liliacului are la bază același principiu de funcționare, al analizei ecoului, sistemul nervos dedicat al liliacului efectuează o procesare complexă. Liliacul emite o salvă sonoră bogată, cu un spectru larg și cu nu mai puțin de 8 componente spectrale principale. Acest tipăt este caracteristic fiecărui individ în parte, fiind dependent de dimensiunea și vârsta acestuia, constituindu-se într-o “semnătură” individuală [175]. Ecoul recepționat de către liliac este analizat din mai multe puncte de vedere. Deviația Doppler este convertită în informație de viteză, amplitudinea ecoului poartă informație de orientare a obstacolului relativ la traductoare, iar întârzierea ecoului spune cât de departe se găsește obstacolul. S-a demonstrat că liliacul clasifică ecourile funcție de amplitudine, frecvență și timp [175].

Un alt exemplu similar studiat în literatură este cel al bufniței de hambar [174]. Aceasta se bazează pe două caracteristici ale informației auditive pentru a detecta poziția sursei de sunet. Așa numita diferență temporală interaurală internă, adică diferența momentelor de recepție a salvei sonore la cele două urechi, este transformată în informație de azimut. În timp ce diferența interaurală de nivel sonor se transformă în informație de elevație.

Atât experimentele descrise în [174] cât și în [175] scot în evidență procesarea complexă, la nivelul creierului, pe care sistemele biologice o efectuează pentru a face față varietății și dinamicii ambientale. Prezentul capitol își propune însă să prezinte doar o copie la scară redusă a acestor sisteme. Se va încerca să se demonstreze că o configurație liniară receptor-emițător-receptor este *necesară și suficientă* pentru a reconstrui imagini ale mediului în cazul conducerii reactive a roboților mobili.

O reducere în continuare a numărului de traductoare, ar conduce la unica combinație ce ar mai putea fi posibilă și anume: un singur emițător și un singur receptor (sau utilizarea aceluiași traductor în ambele ipostaze). Eliminarea însă a unuia dintre traductoarele receptoare ar conduce la dispariția diferenței interaurale din informația captată și prin urmare la imposibilitatea determinării azimutului obstacolului, fiind posibilă doar determinarea mărimii razei arcului de cerc unde obstacolul se situează.

Figura 6.1 face o prezentare schematică a ideii propuse.

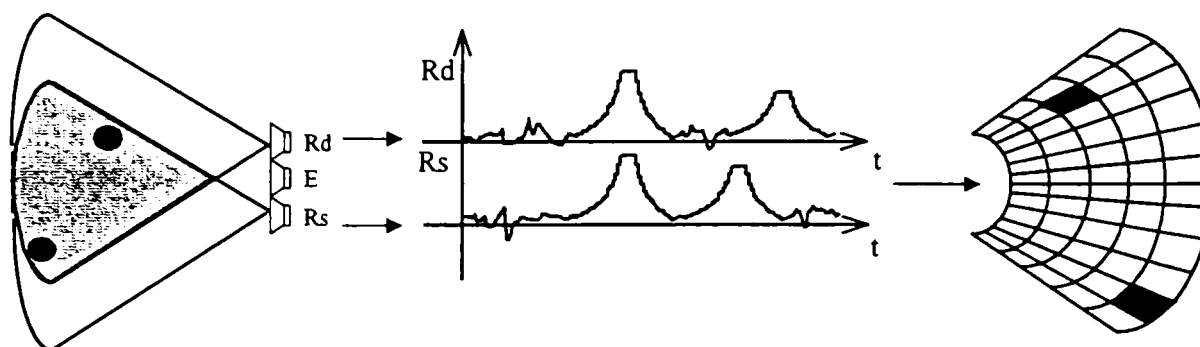


Figura 6.1 Schema holografiei acustice în impuls bidimensională bitractor.

În prima treime a acestei figuri este redat sistemul de traductoare, împreună cu câmpul investigat. Acesta din urmă este reprezentat într-o nuanță de gri, fiind zona comună celor două receptoare. Principiul propus se bazează în esență pe informația interaurală care nu poate fi obținută decât pentru obstacole ce intră în zona de câmp comună ambelor traductoare receptoare.

Prezența unui obstacol în interiorul acestui perimetru va conduce deci la generarea câte unui ecou pentru fiecare traductor receptor. Așa cum graficele temporale din centrul figurii 6.1 sugerează, momentele de recepție a ecourilor diferă funcție de poziția obstacolului. Diferența interaurală la detecția ecoului oferă informație despre azimutul obstacolului care a generat ecoul, relativ la linia mediană a sistemului de traductoare. De notat că referința temporală pentru cele două grafice este dată de momentul emisiei salvei ultrasonice.

Problema care se ridică acum este găsirea unui sistem care să preia imaginile înregistrate ale câmpului ultrasonic, să realizeze analiza ecourilor multiple și să genereze o imagine a obstacolelor generatoare.

Revenind la exemplul liliacului, cercetările prezentate în [175] au relevat că semnalele senzoriale sunt prelucrate prin corelarea lor cu informația "stocată" în creier. Pentru procesarea informației auditive liliacul are antrenate o serie de șiruri de *filtre neuronale*, care acționează ca și operatori de corelare asupra informației culese din mediu. S-a demonstrat că liliacul are neuroni "acordați" pentru fiecare zonă din spațiul supravegheat, mai mult această "acordare" este rafinată, neuronii răspunzând nu numai pentru poziția obstacolului, ci și pentru mărimea și orientarea acestuia. Organizarea sistemului de procesare al liliacului fiind de tip paralel-ierarhizat.

Având această descriere a sistemului nervos pentru prelucrarea informației auditive este firesc să se încerce implementarea unui sistem asemănător făcând uz de teoria de conducere neuronală. Pentru a realiza în versiune neuronală echivalentul procesării prin corelarea

informației este suficient să se conceapă un perceptron simplu, dacă ponderile neuronilor sunt privite ca fiind șirul de valori ai operatorilor de corelare.

Un astfel de perceptron realizează o filtrare spațial-temporală (*spatio-temporal matched-filter*). Porivit lui Jian Shen [189] acest tip de prelucrare suferă de problema apariției unor obiecte fantomă, a unui artefact în imaginile reconstruite. Se va demonstra însă că prin analiza diferenței interaurale se reușește decorelarea ecourilor recepționate de pe obstacole diferite, eliminând astfel artefactul din imaginea reconstruită, cel puțin în cazul scenelor simple, populate cu obstacole izolate.

Prin modul de analiză al câmpului înregistrat, tehnica propusă se aseamănă cu focalizarea electronică a undei ultrasonice atunci când se lucrează cu un șir de traductoare [33]. Diferența constă în faptul că sistemul propus minimizează la două numărul de traductoare receptoare și realizează o focalizare la recepție prin modul în care ecourile recepționate de cele două urechi sunt analizate. Fiecare neuron din componența perceptronului va corespunde unei durate bine determinate pe axa temporală și unui azimut dat (așa cum se va vedea în figura 6.9). Se realizează o corespondență strânsă între poziția obstacolului și activarea neuronilor, suprafața investigată fiind împărțită în zone pentru care se activează mereu același neuron.

Privită dintr-un alt punct de vedere ideea propusă se poate asemana cu tehnica suprapunerii lobilor traductoarelor receptoare (*beam splitting technique*) care reușește să îmbunătățească rezoluția laterală a sistemelor multidetector. Dacă un obiect este raportat de mai multe traductoare, imprecizia de determinare a poziției lui este cu atât mai mică cu cât zona de suprapunere a lobilor acestora este și ea mai mică [164].

Nu în ultimul rând ideea introdusă are părți comune cu tehnica holografiei acustice în impuls. În primul rând prin modul de excitare al traductorului emițător așa cum s-a arătat în capitolul precedent, capitolul V. Prin tehnica prezentată de control al timpului de disipare a energiei din traductoare se obțin impulsuri sonore cât de scurte posibil pentru traductoarele date. În al doilea rând ideea propusă se aseamănă cu tehnicile holografice prin modul de înregistrare a câmpul acustic, pe o durata ce permite impulsului ultrasonic să străbată distanța de la emițător, la cel mai îndepărtat punct al mediului investigat și înapoi la receptori [162] [163] [120].

Reconstrucția holografică ultrasonoră a imaginilor are un număr mare de aplicații în ecografie medicală și în sonare navale, dar aplicațiile în aer a acesteia sunt mai rare, deoarece imaginile obținute în aer sunt puternic distorsionate [120]. Aceste distorsionări se datorează în primul rând lungimii de undă relativ mare cu care se lucrează în aer, a dimensiunii traductoarelor care limitează numărul acestora și nu în ultimul rând a atenuării relativ mari a sunetului la deplasarea în aer. La acestea se mai adaugă [71] [182] și influența următorilor factori perturbatori: variații ale temperaturii, umidității și presiunii aerului, curenții de aer și zgomotele ambientale produse de către echipamente industriale sau chiar de alți roboți mobili.

Utilizând tehnica holografiei ultrasonore în aer se poate mai degrabă determina prezența sau absența unui obstacol decât redarea formei acestuia. Se consideră că și o rezoluție scăzută de ordinul a 40-50 mm este suficientă pentru evitarea obstacolelor în cazul conducerii roboților mobili autonomi. În sprijinul acestei afirmații stau și exemplele din [88] [116], iar în [175] se specifică că rezoluția maximă pe care poate să o atingă liliacul mustăcios din specia *Pteronotus parnellii* este de 16 mm.

Întrucât sunt utilizate doar 3 traductoare dispuse liniar, imaginea reconstruită a mediului va fi una bidimensională, redând de fapt conturul mediului în planul lor orizontal. Din acest motiv o posibilă denumire a acestei idei ar putea fi: holografie acustică în impuls bidimensională bitractor.

VI.3 Câmpul investigat

În literatură sunt prezentate câteva variante constructive pentru investigarea mediului din vecinătatea robotului, prin detecție ultrasonică.

O primă variantă, poate cea mai veche, este aceea care echipează robotul mobil cu o centură de traductori ultrasonici [49] [87] [88] [116] [189]. De regulă, aceasta este compusă din 12 sau 24 de perechi de traductoare care emit și recepționează pe rând. Justificarea acestei abordări este dată în opinia celor care încercă să promoveze această variantă de necesitatea supravegherii omnidirecționale a mediului în jurul robotului. Nu numai că această cerință este exagerată dar această abordare are și o serie de dezavantaje:

- Așa cum se subliniază și în [115] există pericolul unor citiri false pentru cazul unor configurații speciale ale mediului, cum ar fi capetele de coridor, spre exemplu, unde semnalul emis de unul din traductoare este recepționat de un traductor poziționat diametral opus, în urma parcurgerii unui traseu cu multiple reflexii. Pentru a elimina aceste citiri eronate au fost concepuți algoritmi speciali care să decidă momentul de activare a traductoarelor [87] (vezi și subcapitolul IV.3).
- Rezoluția spațială obținută este scăzută, asigurată fiind numai de lățimea lobului de sensibilitate a traductoarelor utilizate.
- Nu în ultimul rând echipamentul necesar pentru un brâu de traductori este mai complicat și deci mai costisitor.

Mai există și variante constructive care utilizează doar un singur traductor emițător și un singur traductor receptor dar apelează la o scanare mecanică pentru a investiga mediul de jur împrejurul robotului [9] [177]. Deși mai simple decât prima variantă amintită, acestea din urmă suferă din cauza timpului îndelungat de scanare, necesar sistemului mecanic. În plus ca de altfel la toate sistemele care conțin un sistem mecanic de baleere, au și o fiabilitate mai scăzută.

Comentând abordarea cu brâu de traductoare, consider că totuși nu este necesară o supraveghere omnidirecțională. Și iată de ce: dacă fiecare mobil din mediu supraveghează

chiar și numai o zonă limitată din fața sa, reușind să ocolească obstacolele apărute aici, se ajunge prin recursivitate la evitarea coliziunilor în mediu.

O dovadă ce sprijină această ipoteză sunt experimentele prezentate în [175] care scot în evidență că liliacul nu răspunde la toate ecourile recepționate atunci când încearcă să atingă o țintă. Pentru o fază intermediară, spre exemplu, sunt ignorate ecourile ce apar la mai puțin de 2-3ms de la emiterea țipătului. Neuronii acestuia încep să aibe nivele de activare semnificative abia pentru ecouri cu o întârziere de 4ms, iar intensitatea maximă a răspunsului se înregistrează pentru ecouri cu întârziere de 5ms. Peste această valoare intensitatea răspunsului neuronilor scade din nou, ajungând ca pentru valori ale întârzierii ecourilor de 8ms, liliacul să nu mai reacționeze. Acest experiment demonstrează clar că liliacul "deucează" o zonă a mediului din fața sa, și numai aceasta este inspectată periodic.

Încurajați de această constatare și susținând în continuare că nu este necesară o supraveghere omnidirecțională a mediului, se propune pentru sistemul de traductoare configurația prezentată în figura 6.2.

În componența sistemului propus intră două traductoare receptoare, așezate de o parte și de alta a unui traductor emițător. Se copiază astfel, chiar dacă stilizat, configurația de "traductoare" de care dispune un liliac.

Se va încerca să se demonstreze pe parcursul acestui capitol că această configurație este *necesară și suficientă* totodată, pentru investigarea mediului din fața unui robot. Combinația două receptoare - un emițător este *necesară* întrucât informația interaurală care conduce la determinarea valorii azimutului obiectului care a generat ecoul este crucială. Renunțarea la unul din traductoarele receptoare ar duce la pierderea informației interaurale și deci la anularea unuia din avantajele principale ale ideii propuse aici.

Cele două traductoare receptoare au fost așezate simetric de o parte și de alta a celui emițător pentru a satisface simetria sistemului, pentru a nu avantaja o parte sau alta a zonei investigate. Distanța la care receptoarele au fost amplasate față de emițător este unul din subiectele ce vor fi abordate în subcapitolul următor, care va cerceta rezoluția spațială, ce se poate obține cu acest sistem de traductoare.

În ceea ce privește *suficiența* numărului de traductoare, se va lăsa deschisă această problemă până la finele prezentului capitol (paragraful VI.5.1), când se va demonstra că două traductoare receptoare sunt suficiente pentru detectarea chiar și a unor forme complicate din mediu.

Numărul mic de traductoare conduce de asemenea la un sistem simplificat, cu un cost redus și o fiabilitate sporită.

Așezarea traductoarelor s-a făcut pe o linie paralelă cu suprafața podelei, pentru ca prezența acestora să afecteze în egală măsură ambii traductori receptori. Este luat în considerare aici efectul de umbrire descris în amănunt în paragraful IV.3.5.

Pentru o astfel de configurație, receptor - emițător - receptor, zona de mediu care poate fi investigată este cea pentru care *ambele* receptoare au încă posibilitatea de a capta un ecou. Este, deci, zona *comună* celor trei caracteristici de directivitate a celor trei traductoare. Mai exact, delimitarea este dată de porțiunea pentru care lobi de sensibilitate a traductoarelor receptoare se suprapun.

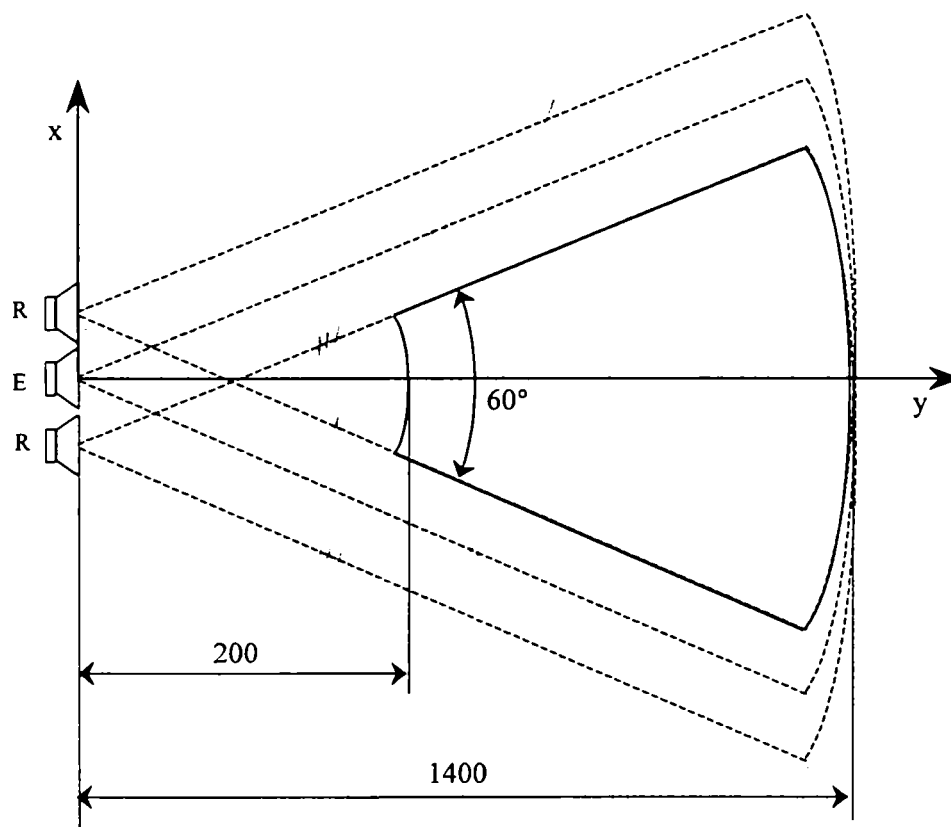


Figura 6.2 Geometria sistemului de traductoare propus.

Componentele care dictează deci forma și dimensiunile câmpului investigat sunt traductoarele utilizate, în speță, caracteristica lor de directivitate (vezi figura 6.2). Pentru a investiga o zonă cât mai largă ar fi de dorit ca unghiul de deschidere a caracteristicii lor de directivitate să fie cât mai mare [162] [163] [164], dar pentru traductoarele utilizate (40LR16) însă, deschiderea maximă față de axa mediană a traductorului, pentru care nu se înregistrează o atenuare pronunțată este de doar 30 grade (vezi figura 5.11).

Deși o rețea neuronală se poate adapta caracteristicii de sensibilitate a traductoarelor, pentru a menține totuși un raport semnal-zgomot acceptabil este de dorit ca lobul de sensibilitate al traductoarelor să fie cât mai larg. Utilizând traductoarele 40LT(R)16 deschiderea maximă a câmpului investigat rezultă de 60 grade (vezi figura 6.2).

De-a lungul axei mediane câmpul investigat este delimitat atât inferior cât și superior. Limita inferioară este dată de condiția de eliminare a recepției impulsului emis pe însăși durata emisiei acestuia. Cum durata impulsului ultrasonic, determinată experimental, este de $300\mu s$

și dacă se ține cont de viteza de deplasare în aer a ultrasunetelor (circa 330m/s), rezultă o distanță minimă de 99mm pentru care nu se poate detecta prezența obstacolelor (vezi paragraful IV.2 relația 4.1).

Pentru experimentele ce urmează, limita inferioară a fost stabilită la 200mm pentru câmpul investigat, considerând că această valoare este suficient de apropiată de robot și nici un obstacol nu poate ajunge mai aproape de robot, fără a fi sesizat în prealabil (vezi figura 6.2).

Limitarea superioară a câmpului supravegheat, este dată de atenuarea impulsului ultrasonic în aer și de sensibilitatea traductoarelor. Pentru a menține un raport semnal-zgomot convenabil s-a determinat valoarea limitei superioare la 1400mm. Limita superioară de 1400mm este suficient de mare, chiar și într-un caz real, pentru a putea evita în timp util obstacolele apărute în cale, presupunând viteze de deplasare pentru robot de ordinul a zecilor de centimetri pe secundă.

Ținând cont de toate aceste considerente, se obține pentru zona supravegheată o formă de coroană circulară decupată, similară celei prezentate în figura 6.2.

Ar mai fi de discutat acum doar orientarea traductoarelor receptoare, relativă la axul median al celui emițător. Acest aspect are ca și corespondent în regnul animal pe cel al "ciulirii urechilor". Ciulirea urechilor, ca de altfel și întoarcerea capului spre sursa de zgomot, are ca efect benefic maximizarea raportului semnal zgomot, întrucât sursa de zgomot se va găsi mai aproape de axul median al lobului de sensibilitate a traductoarelor receptoare și deci semnalul captat va fi maxim.

De asemenea, prin orientarea corespunzătoare a traductoarelor receptoare se poate maximiza zona din mediu comună lor. Se poate obține astfel maximul de mediu investigat pentru această configurație cu doar trei traductoare.

Pentru simplificarea experimentelor însă, s-a considerat că axele mediane a celor trei traductoare sunt paralele, ca în figura 6.2. Deși astfel se sacrifică ușor dimensiunile zonei investigate, experimentele următoare îndeplinesc scopul propus, și anume, validează principiul enunțat.

VI.4 Studiul rezoluției spațiale

Plecând de la rezultatele obținute în capitolul V, unde s-a demonstrat că, lucrând chiar și cu traductoare de bandă îngustă (Polaroid 40LT(R)16), se pot obține impulsuri ultrasonice cu o durată de numai 300μs, se va stabili în cele ce urmează o configurație a mediului de lucru care să conducă la obținerea bazei de antrenament a perceptronului pentru detecția obstacolelor.

Se caută aici coordonatele punctelor din mediu ce pot fi încă discriminate ca fiind locații diferite unele față de altele. Se urmărește, prin urmare, determinarea informației care să poată

caracteriza unic mediul și care să poată fie regăsită apoi în fiecare scenă investigată. Când s-a menționat că se caută coordonatele punctelor, se are în vedere că aceste coordonate sunt relative la poziția curentă a robotului, fiind mereu altele în raport cu un sistem de referință universal.

Pentru fiecare dintre punctele caracteristice se va obține apoi un vector având ca elemente eșantioanele ecoului recepționat corespunzător amplasării în poziția respectivă a unui obstacol. Se va obține astfel o bază de date ce conține informația *esențială* despre mediu, date ce vor putea fi folosite apoi la antrenarea perceptronului pentru detecția obstacolelor.

Așa după cum s-a descris în paragrafele VI.1 și VI.2, tabloul informației oferite de către ecourile ultrasonice este foarte bogat, permițând obținerea unei descrieri detaliate și chiar precise a mediului care le-a generat. Obiectivul propus în această teză vizează obținerea doar a conturului mediului din câmpul investigat și din acest considerent, din informația variată ce se obține la recepție se va reține doar acea parte care este legată de poziția obstacolelor. Adică va fi utilizată doar:

- *întârzierea* față de momentul emisiei, ce va furniza informații despre distanța până la obiectul pe care s-a făcut reflexia; și
- *diferența interaurală* (dată de diferența temporală între momentul recepției aceluiași ecoul de către cele două traductoare) care va determina azimutul obstacolului.

Prin corelarea distanței (razei) și a azimutului, pentru fiecare obstacol în parte se va putea face determinarea suficient de precisă a poziției acestora relativ la robot. Ceea ce merită subliniat din nou, este că această procesare se va face concomitent pentru mai multe obstacole. Pentru o singură salvă emisă se vor obține o mulțime de puncte de reflexie, care corect interpretate, vor da un contur aproximativ al mediului din fața robotului.

În același timp, se va încerca decorelarea amplitudinii impulsului față de mărimea, înclinarea și rugozitatea suprafeței pe care s-a generat reflexia prin aplicarea unui prag convenabil ales, impulsului recepționat. Cercetările descrise în [175] relevă că și liliacul deține o zonă din creier care procesează doar informația de poziție a obstacolelor.

După această prelucrare vectorul rezultat va avea doar valori de "0" sau "1" logic. La alegerea valorii pragului s-a avut în vedere scăderea amplitudinii ecoului cu creșterea distanței până la obiectul generator. Lățimea impulsului obținut diferă cu întârzierea ecoului, scăzând pe măsură ce aceasta crește, dar această diferență nu este mai mare de 20%. Așa cum se va vedea, perceptronul elaborat va putea să se adapteze și acestei variații.

Prin procesarea ecoului cu prag se obține nu numai decorelarea informației necesare de mărimea, înclinarea și rugozitatea suprafeței pe care s-a generat reflexia, dar se obține și o substanțială reducere a cantității de informație ce trebuie procesată.

O posibilă justificare a "discretizării" ecoului recepționat la doar două valori: prezent, respectiv absent, este și existența demonstrată [175] a așa numitului prag audibil în cazul

sistemelor biologice. Sunetele a căror intensitate nu depășesc o anumită valoare, scapă atenției.

După ce s-a stabilit care este natura informației utilizate, se va încerca să se deducă forma optimă pentru obstacolul de test, cu care să se obțină ecourile caracteristice. Se caută o *formă elementară* care să poată fi regăsită apoi în orice scenă întâlnită.

Deși o suprafață plană oferă o reflexie puternică, acesta, intensitatea reflexiei depinde de orientare, adică de unghiul pe care îl face suprafața plană cu axa mediană a sistemului de traductoare. Pentru a evita această problemă s-a ales ca formă pentru obstacolul de test, una cilindrică. Se obține astfel un ecou mai slab, datorită împrăstierii energiei impulsului ultrasonic pe suprafața convexă a cilindrului, dar în schimb experimentele au fost simplificate, ne mai existând cerința de orientare a obstacolului de test, funcție de poziția curentă.

Mai mult chiar, din experimentele efectuate s-a constatat că forma cilindrică din carton (interior goală) oferă un ecou "geamăn" datorat reflexiei pe suprafața interioară a cilindrului. Acesta este un ecou mai slab ce urmează imediat celui principal. Pentru a elimina acest efect nedorit, s-a recurs în cele din urmă la utilizarea unui obstacol de formă semicilindrică, orientat mereu cu partea convexă către traductoare.

Dimensiunea razei formei semicilindrice a obstacolului de test s-a stabilit la valoarea de 50mm fiind comparabilă cu estimările făcute în prealabil, pentru rezoluția spațială obținabilă (vezi capitolul V).

Pentru a putea deduce, în cele ce urmează, condițiile ce impun rezoluția spațială, ar mai fi de punctat două noțiuni, și anume cea a *timpului de zbor (Time Of Flight)* și, respectiv, cea a *distanței de zbor (Distance Of Flight)*. Prin *timp de zbor* se înțelege intervalul de timp necesar impulsului ultrasonic să străbată distanța de la emițător la obstacol(e) și înapoi la recepție. În mod asemănător *distanța de zbor* este distanța pe care o străbate impulsul ultrasonic de la emițător la obstacol(e) și înapoi la recepție.

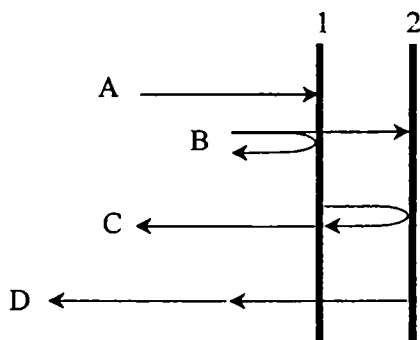


Figura 6.3 Reflexia succesivă, a aceluiași impuls ultrasonic pe două obiecte succesive.

Având definite aceste noțiuni, se va determina în continuare distanța minimă între două obstacole pentru care acestea pot fi încă percepute ca fiind distincte. Pentru a putea prezenta acest raționament, în figura 6.3 se arată diferite stadii ale reflexiei aceluiași impuls ultrasonic pe două obiecte învecinate, succesive.

Faza A este cea în care impulsul ultrasonic abia atinge suprafața primului obstacol. În faza B, parte a energiei impulsului ultrasonic se întoarce, datorită reflexiei pe suprafața primului obstacol, iar parte continuă deplasarea, atingând suprafața obstacolului 2. În faza C, partea impulsului care s-a reflectat pe obstacolul 1 este complet returnată, iar cea reflectată pe obstacolul 2 se întoarce doar parțial. În faza D atât prima cât și cea de a doua parte a impulsului sunt complet întoarse spre receptoare.

Această ultimă fază este cea care permite determinarea rezoluției axiale, funcție de lungimea impulsului. (În figura 6.3, durata impulsului ultrasonic este reprezentată prin lungimea săgeților ce reprezintă impulsul ultrasonic.) Pentru a putea distinge cele două obstacole, este necesar ca frontul celui de al doilea ecou să nu ajungă din urmă pe cel dintâi.

Astfel, pentru o durată a impulsului ultrasonic de $300\mu s$:

$$d_{\min} = \frac{300\mu s \cdot 0.33 \frac{mm}{\mu s}}{2} = 49.5mm \quad (6.1)$$

Acesta este raționamentul care a condus la valoarea estimată de 49.5mm, a rezoluției axiale în paragraful V.4.

Condiția enunțată anterior, prin care se cerea ca ecourile să nu se suprapună deloc pentru a le putea încă distinge ca fiind separate, deși valabilă este una restrictivă. Teoria [175] arată că o suprapunere a ecourilor ce are încă un minim cu 3dB sub valoarea celor două vârfuri ale celor două ecouri succesive sunt încă, teoretic, separabile (vezi figura 6.4). Chiar dacă această condiție este mai slabă decât cea enunțată anterior pentru studiul variației rezoluției spațiale ea nu neagă concluziile anterior obținute.

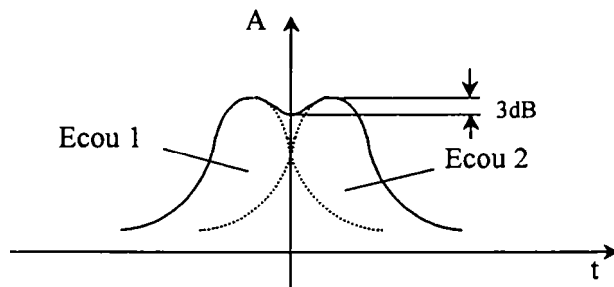


Figura 6.4 Separarea ecourilor suprapuse.

Pentru aplicația dezvoltată pe parcursul prezentei teze s-a ajuns la concluzia că limita suprapunerii a două impulsuri, pentru care acestea să poată fi încă separate iar imaginea

reconstruită să nu conțină artefacte, este de -6dB diferență între minimumul dintre aceste impulsuri și maximele lor. Această valoare de -6dB corespunde de fapt unei suprapuneri de maximum 50% între impulsuri.

Traducând aceste valori pentru cazul particular al unor impulsuri prelucrate prin compararea cu un prag, și ținând cont de funcția implementată de către perceptronul pentru recunoașterea punctelor de reflexie, cifra de -6dB corespunde următoarei reguli: *două puncte consecutive peste unul trebuie să fie suficient de depărtate, în termeni ai distanței de zbor, încât ecourile corespunzătoare lor să nu fie contigue.*

Această regulă stă la baza algoritmului ce determină poziția punctelor de eșantionare spațială. Exprimată în acești termeni, regula cere ca ecourile generate de punctele P_{n-1} și P_{n+1} , spre exemplu, să nu fie contigue în timp. Dacă aceasta se întâmplă totuși, atunci rețeaua neuronală va activa nu numai neuronii corespunzători punctelor P_{n-1} și P_{n+1} dar și pe cel pentru punctul P_n . În caz contrar, intrarea netă a neuronului corespunzător punctului n nu va mai fi maximă iar valoarea sa de activare va depinde numai de deschiderea funcției lui de activare (vezi paragraful VI.5).

Regula prezintă limita maximă, care poate conduce la apariția unor obiecte fantomă în imaginea reconstruită. Pentru a nu obține imagini a unor puncte de reflexie care nu există în realitate, s-a recurs la o soluție mai apropiată de prima condiție enunțată, cea a nesuprapunerii totale. Așa după cum se va vedea însă, în subcapitolul următor, apariția obiectelor fantomă în imaginea reconstruită se poate preveni și prin ajustarea corespunzătoare a parametrilor funcției de activare a neuronilor perceptronului, permițând astfel o condiție mai relaxată la suprapunerea ecourilor.

Este important de menționat această condiție de nesuprapunere a ecourilor trebuie îndeplinită pentru ambele traductoare receptoare.

Astfel, având ca punct de start, punctul cel mai apropiat de pe axa mediană (vezi figura 6.2) de coordonate (0,200mm), s-au căutat succesiv, pe 7 direcții diferite, puncte ce se succed la o distanță de 50 mm unul față de altul. Din nou, prin distanță se înțelege distanță de zbor. Unghiurile celor 7 direcții au fost astfel alese încât deschiderea de 60 de grade a zonei supravegheate să fie cât mai bine acoperită.

Algoritmul de căutare este iterativ, având organigrama din figura 6.5. Acesta pornește de la punctul inițial $R = 200\text{mm}$ și $\rho = 90$ grade ①, așa după cum anterior s-a menționat. Întrucât acest prim punct intră automat în listă ② se trece la determinarea unei noi direcții de căutare ③. Pe noua direcție se pleacă de la o valoare a razei egală cu cea a punctului anterior și se înaintează înspre exteriorul zonei investigate, în incremente suficient de mici. Pentru fiecare poziție se verifică dacă distanța de zbor între punctul curent și cel anterior satisface condiția ④.

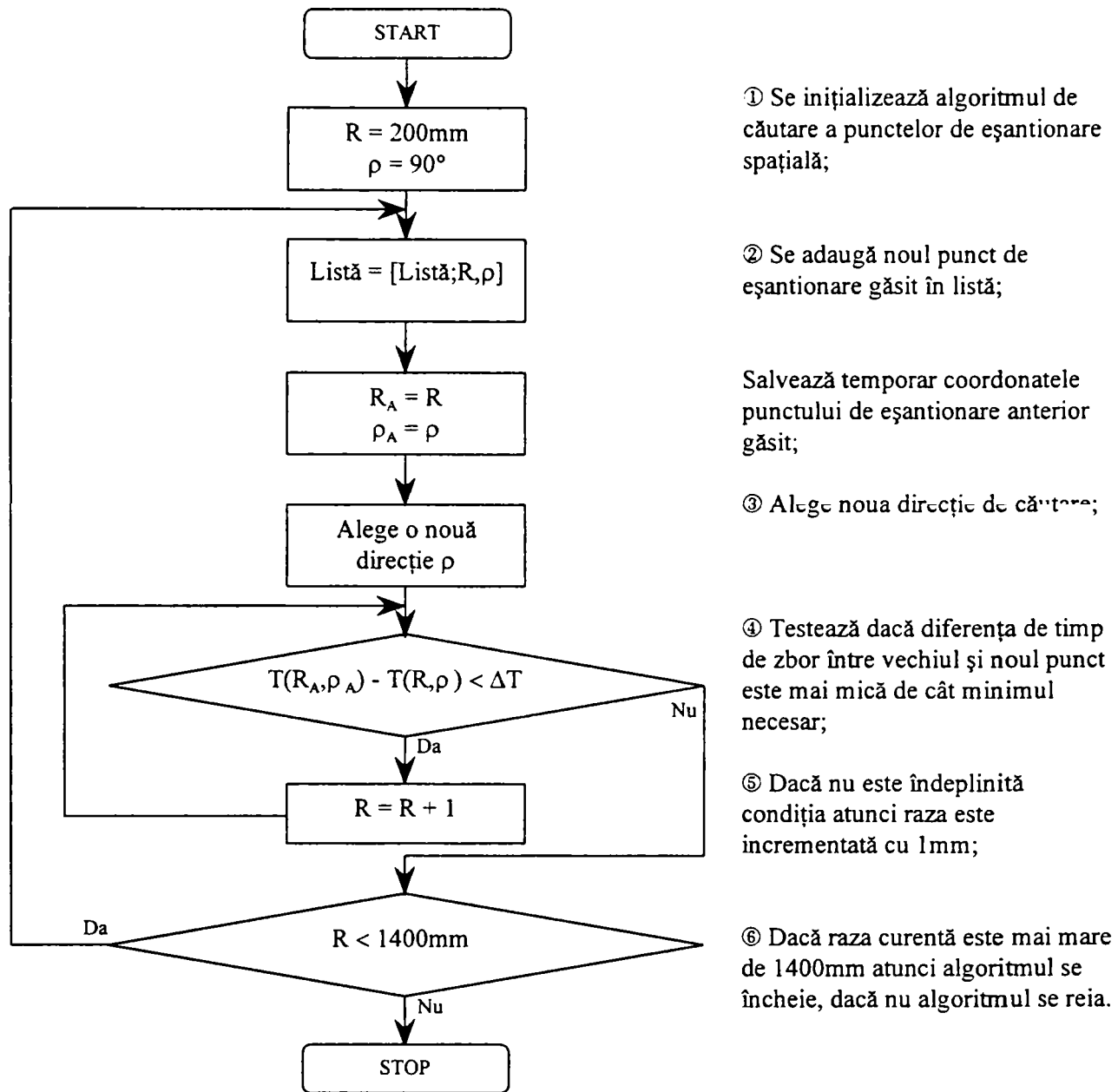


Figura 6.5 Organigrama algoritmului pentru determinarea punctelor de eșantionare spațială

Dacă nu este îndeplinită condiția, se înaintează cu un increment în plus pe direcția curentă ⑤. Dacă este îndeplinită condiția, punctul găsit este memorat și algoritmul se reia pentru următoarea direcție în listă. Algoritmul se încheie atunci când distanța, pe oricare dintre raze la căutarea unui nou punct depășește limita maxima stabilită de 1400mm ⑥.

Aplicând acest algoritm s-au obținut 51 de puncte de eșantionare spațială în configurația din figura 6.6.

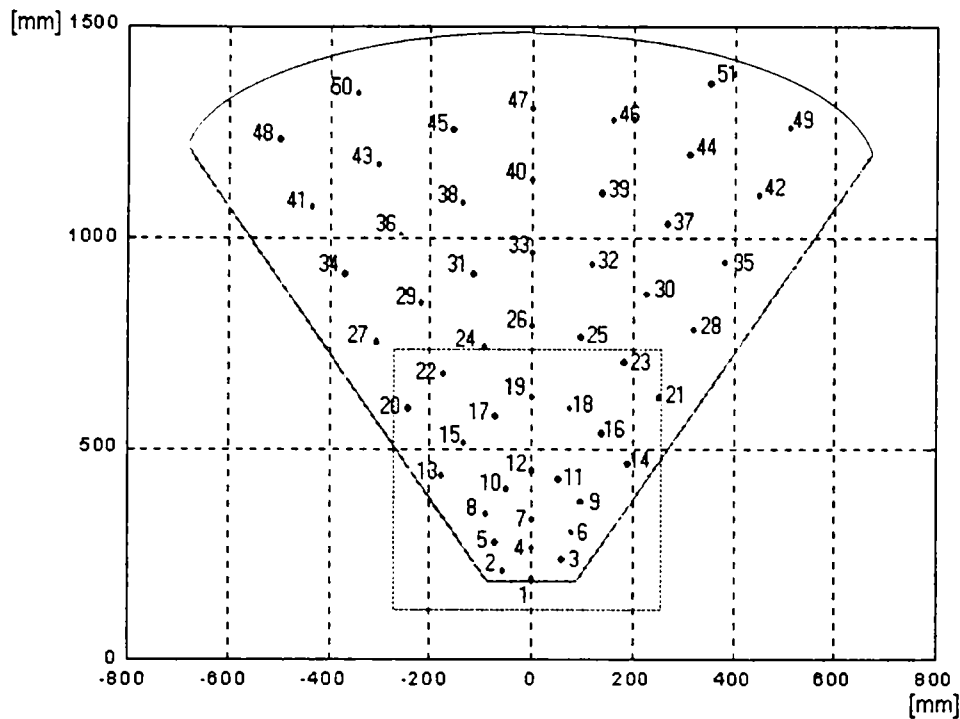


Figura 6.6 Amplasarea punctelor de eșantionare spațială.

Disponerea punctelor caracteristice depinde de asemenea de distanța între traductorii receptori și cel emițător. Contrar teoriei pe care literatura de specialitate o oferă la acest capitol [175] [176], unde se cere ca apertura sistemului de traductoare să fie cât mai mare pentru o calitate a imaginii cât mai bună, experimentele realizate au demonstrat că densitatea punctelor caracteristice este mai mare pe măsură ce traductoarele se apropie. Configurația prezentată în figura 6.6 a fost găsită pentru o distanță între traductoarele receptoare și cel emițător de 20mm, valoare aleasă din considerente practice. Traductoarele 40LT(R)16 au un diametru exterior de 16mm, iar o dimensiune a sistemului de traductoare de 56mm este una practic plauzibilă.

Revenind la figura 6.6 se constată ca răspândirea punctelor caracteristice nu este uniformă, deși regula de amplasare a fost respectată. S-a obținut o densitate a punctelor caracteristice mai ridicată pentru regiunea apropiată unde, de altfel, o rezoluție spațială mai fină este de dorit pentru localizarea mai precisă a obstacolelor. Valoarea medie a rezoluției spațiale obținută aici este de 45mm.

În schimb, pentru regiunea îndepărtată rezoluția spațială obținută este mai scăzută, având valoarea de 144 mm. Pentru această zonă se obține doar o idee despre prezența obstacolelor, urmând ca la apropierea de acestea, când obstacolele ajung în zona de investigare apropiată, să se facă o detectare mai precisă a acestora.

Obstacolul elementar, forma semicirculară de carton, a fost așezat în fiecare din cele 51 de puncte obținându-se câte un ecou pentru fiecare din cele două receptoare în parte. În figura 6.7 se prezintă trei exemple de ecouri recepționate pentru trei puncte diferite (vezi și figura 6.6).

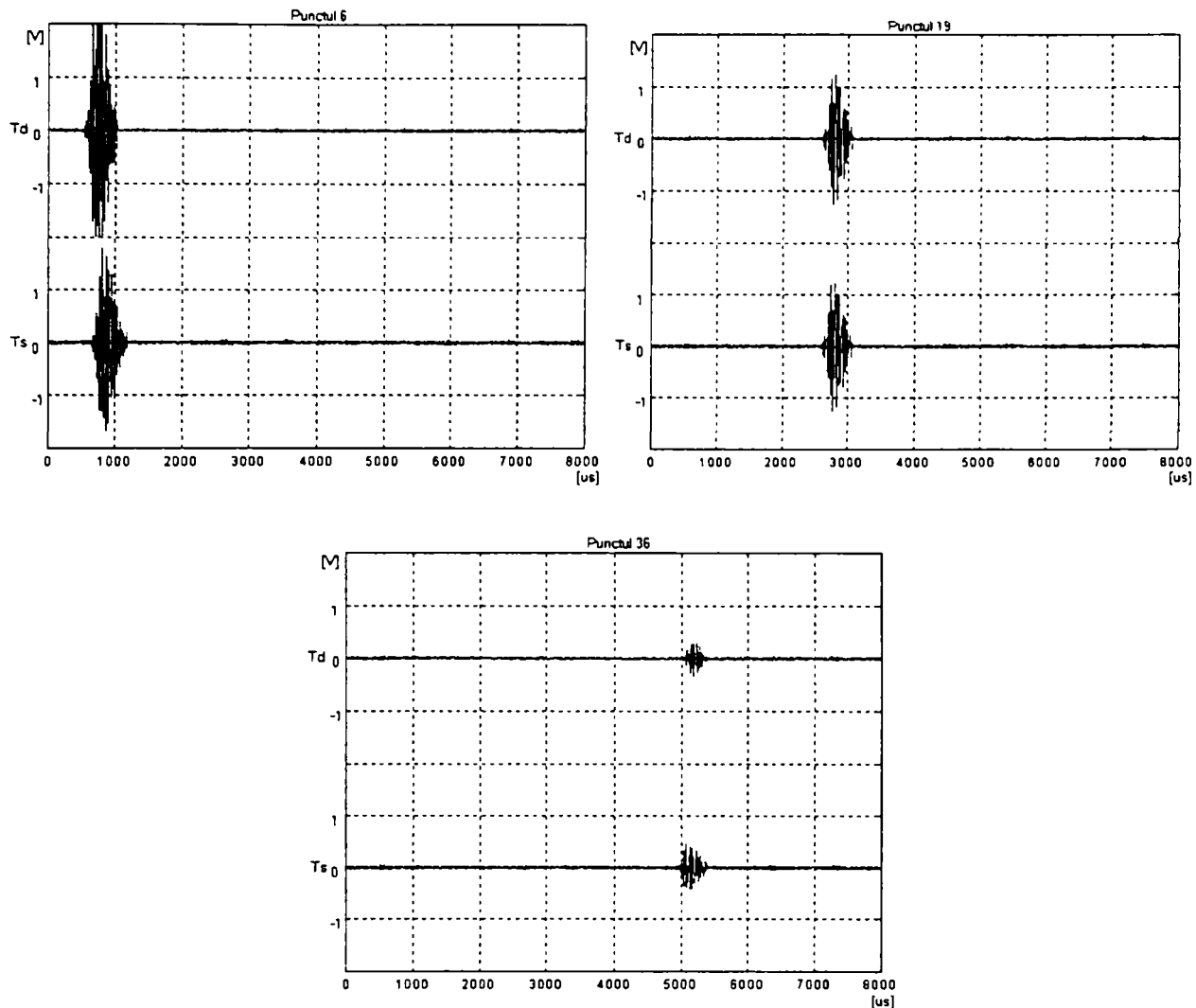


Figura 6.7 Trei exemple de perechi de ecouri obținute pentru punctele cu numerele 6, 19 și respectiv 36.

Durata de eșantionare pentru fiecare ecou a fost aceeași (8ms), permițând impulsului ultrasonic să străbată distanța înainte și înapoi și pentru cel mai îndepărtat punct din zona investigată. Astfel se păstrează totodată și aceeași referință temporală. Eșantionarea s-a făcut cu o frecvență de 100KHz obținând vectori cu câte 800 de elemente. Fiecare vector a fost supus apoi prelucrării cu prag. Baza de antrenament a perceptronului pentru reconstrucția scenelor este constituită deci din 51 perechi de vectori de antrenare.

VI.5 Perceptronul

Idea avansată pe parcursul acestui capitol, idee ce se dorește a fi o soluție la problema perceperii și reprezentării mediului de către un robot mobil ce se deplasează, poate fi o componentă a unui posibil sistem de conducere reactiv. Mai exact, ideea se poate concretiza prin implementarea ei într-un *comportament* de tipul *evită obstacolele*.

Potrivit teoriei avansate de Murphy în [221] comportamentele pot fi divizate, la rândul lor, într-o schemă perceptuală și una motoare (vezi capitolul II.2.1). Schema perceptuală este cea care examinează datele colectate din mediu, aducându-le la o formă ușor de interpretat pentru partea a doua, cea a schemei motoare. Este de fapt, ceea ce ideea de procesare a ecourilor recepționate cu ajutorul unei rețele neuronale, încercă să realizeze: transformarea informației purtate de câmpul acustic reflectat într-o formă care să poată fi apoi utilizată în manevre pentru evitarea obstacolelor.

Așa cum s-a anticipat deja, sistemul propus pentru analiza imaginii ultrasonice înregistrate este un perceptron. A fost ales acest tip de rețea neuronală nu numai pentru simplitatea lui, dar și pentru că procesarea informației prin corelarea datelor captate din mediu, este exact funcția îndeplinită în parte de fiecare neuron al unui perceptron.

Neuronii perceptronului propus pot fi priviți, deci, ca și *filtre neuronale* [175], fiecare păstrând prin ponderile sale un anumit tipar. Activarea unui neuron sau a altuia se va face funcție de cât de bine se suprapune imaginea captată cu tiparul fiecăruia. Procesarea efectuată este de fapt o corelare spatio-temporală, unde combinarea informației de adâncime cu cea a diferenței interaurale este făcută implicit și simultan.

S-a repartizat câte un neuron pentru fiecare punct de eșantionare spațială din figura 6.6, perceptronul rezultat având deci 51 de neuroni. Cum fiecărui neuron îi corespunde o pereche de coordonate (x,y), relativ la poziția robotului, starea de activare la un moment dat a acestora, reprezintă imaginea reconstruită a mediului, din fața robotului. Nivelul de activare a ieșirilor reflectă gradul de încredere cu care respectivele puncte de reflexie au fost recunoscute.

Numărul intrărilor neuronilor a fost ales ca fiind egal cu numărul de eșantioane înregistrate. S-a făcut această alegere pentru a putea asculta întreg câmpul investigat. Date fiind limitele minimă și maximă, în adâncime de 200mm, respectiv de 1400mm (stabilite în paragraful VI.3) și având în vedere că semnalul ultrasonic trebuie să străbătă această distanță dus-întors, pentru o perioadă de eșantionare de 10μs, și mai ținând cont că fiecare neuron trebuie să analizeze informația furnizată de ambele traductoare receptoare, s-a ajuns la un număr de 1600 de intrări (2 x 800).

Pentru a exprima gradul de potrivire a unei imagini ultrasonice cu tiparul memorat de neuroni, ca și nivel de probabilitate, s-a ales ca funcție de activare, pentru neuronii perceptronului, funcția de distribuție Gaussiană. Forma de variație a acestei funcții face o discriminare potrivită a valorii intrării nete a neuronilor. Starea de activare a unui neuron va reda gradul de încredere a recunoașterii punctului de reflexie atribuit. Funcția Gaussiană aleasă este centrată în jurul valorii zero a abscisei, având expresia:

$$y = e^{-|0.25 \cdot h|^2} \quad (6.2)$$

În relația 6.2 y este ieșirea neuronului iar h este intrarea sa netă. Alături acestei funcții este prezentată în următoarea figură .

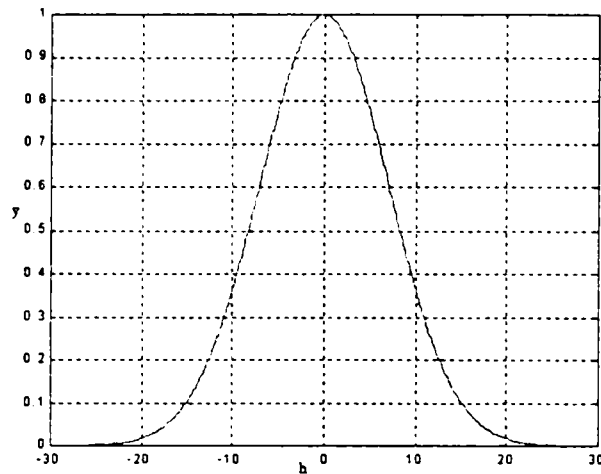


Figura 6.8 Alături funcției de distribuție Gaussiene aleasă ca funcție de activare a neuronilor perceptronului

Fiecare neuron are un prag a cărui valoare a fost aleasă astfel încât pentru potrivirea perfectă a vectorului ultrasonic captat cu tiparul neuronului respectiv, intrarea netă să fie nulă, iar ieșirea să aibe gradul de activare maxim. Cum valoarea pragului este scăzută din valoarea cumulată a intrărilor neuronului, intrarea netă a acestuia va avea mai întotdeauna valoare negativă. Va fi astfel folosită, de fapt, doar jumătatea stângă a clopotului funcție Gaussine, întrucât valoarea netă nu va fi niciodată pozitivă.

Având stabilit numărul neuronilor, numărul intrărilor acestora, și tipul funcției de activare, rămâne să se mai determine ponderile neuronilor perceptronului. Întrucât procesarea pe care neuronii trebuie să o efectueze este bine înțeleasă, iar legătura între intrări și ieșiri este cunoscută, stabilirea ponderilor a fost făcută pe cale analitică, fiind evitat astfel procesul antrenării.

Pentru determinarea valorii ponderilor s-au utilizat ecourile obținute din cele 51 de poziții ale punctelor de eșantionare spațială. Valorile ecourilor au fost matrița ce a fost impusă valorilor ponderilor. Acolo unde ecourile de antrenare depășesc în valoare pragul audibil ales, ponderea a fost setată la unitate (*ponderi excitatoare*), iar unde nu, ponderea a rămas nulă (*ponderi indifferente*).

Ponderile nule s-au catalogat ca fiind *indifferente* întrucât starea de activare a unui neuron nu va fi dependentă de acele valori ale ecoului pentru care ponderile aferente sunt nule. Explicând acest mod de abordare cu ajutorul expresiei intrării nete a neuronilor se poate scrie următoarea relație:

$$h = \sum_{i=1}^T w_i x_i = \sum_{i=1}^N 0x_i + \sum_{i=N+1}^M w_i x_i + \sum_{i=M+1}^T 0x_i \quad (6.3)$$

Din expresia (6.3) se poate observa ușor cum prin utilizarea ponderilor nule neuronul devine indiferent la excitațiile din-afara zonei sale de interes. Prin controlul valorilor parametrilor M și N , pentru fiecare neuron în parte, se face repartizarea spațială a neuronilor perceptronului. Aceste limite sunt determinate prin utilizarea "matriței" ecourilor de antrenare.

Deși inițial numărul intrărilor neuronilor a părut mare (2×800), majoritatea lor sunt nule, și fiecare neuron are de fapt între 35 și 45 de intrări pentru fiecare traductor receptor.

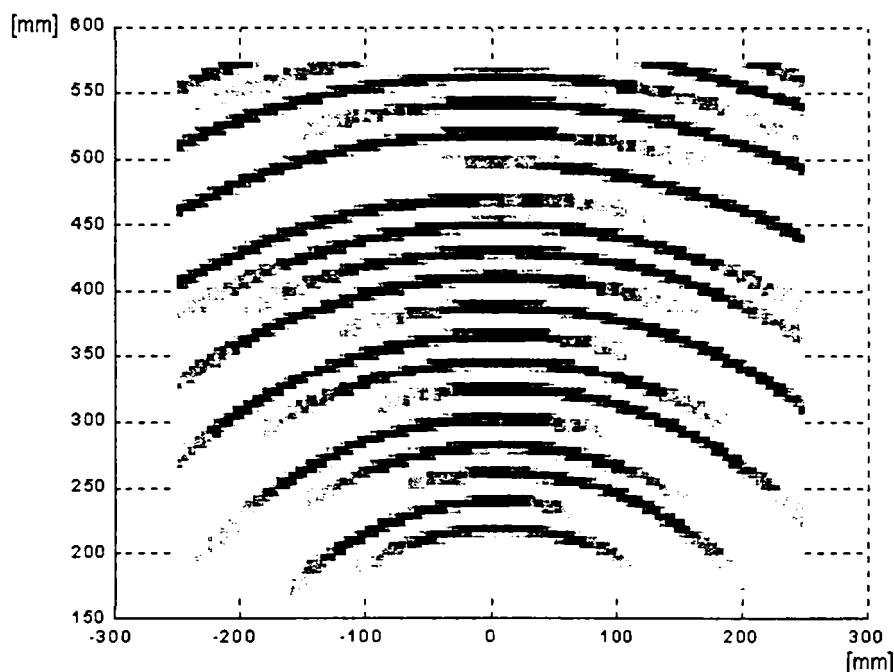


Figura 6.9 Răspunsul perceptronului, împărțirea neuronilor pe zone.

Pe parcursul experimentelor efectuate, a existat o încercare în care ponderile pentru care ecoul nu depășea pragul audibil, au fost setate nu la zero, ci la -1 [174]. S-a crezut că utilizând ponderi inhibitorii, perceptronul va discerne mai ușor obstacolele, dar s-a constatat că pentru scene încărcate, ce generează ecouri multiple (o scenă care conține un colț, spre exemplu), nu se activează nici un neuron și aceasta deoarece componenta inhibitoare domină intrarea netă a neuronilor. Acceptând ca și soluție ponderi nule, pentru porțiunile din imaginea înregistrată unde pragul audibil nu este depășit, se obține un răspuns al perceptronului și în cazul scenelor încărcate.

Prin alegerea ponderilor fiecărui neuron se stabilește zona din fața robotului pentru care aceștia vor răspunde, iar prin modificarea parametrilor funcției de activare Gaussiene se pot determina dimensiunile acestor zone. Figura 6.9 prezintă regiunile pentru care neuronii cuprinși în perimetrul pătrat punctat din figura 6.6, se activează. Nuanțele de gri din figură redau starea de activare a neuronilor pentru diferite poziții ale unui centru de reflexie. Negrul corespunde stării de activare maxime, iar zonele albe sunt cele pentru care nu răspunde nici un neuron.

Alegând un clopot larg pentru funcția de activare se poate ajunge la situația în care zonele de activare a neuronilor se suprapun. În acest mod sunt excluse zonele oarbe din câmpul investigat (zonele albe din figura 6.9) unde nu este simțită prezența obstacolelor. Mergând pe această variantă, indecizia de determinare a poziției exacte a obstacolului este mai mare dacă starea de activare a neuronului are un nivel mai scăzut, situație în care obstacolul se poate găsi oriunde în coroana eliptică gri.

Trecând în cealaltă extremă, alegând un clopot îngust pentru funcția de activare, se micșorează considerabil zona pentru care neuronul răspunde, obținându-se o precizie mai bună la determinarea poziției obstacolului, însă în același timp, zonele insensibile se lărgesc.

Optimul ales pentru forma funcției de activare, a condus la împărțirea câmpului investigat în zone sensibile și insensibile de aproximativ aceleași dimensiuni. Prezența zonelor insensibile în câmpul investigat nu reprezintă neapărat un dezavantaj, deoarece robotul în deplasarea sa va ajunge să suprapună și zone sensibile peste obstacolele ce inițial au căzut într-o zonă insensibilă.

VI.5.1 Răspunsul perceptronului

Subcapitolul curent prezintă rezultatele testelor, la care perceptronul conceput anterior, a fost supus. Pachetul Matlab a fost ales și de această dată ca mediu suport pentru efectuarea testărilor datorită flexibilității și versatilității sale.

Pentru fiecare situație analizată s-a creat în parte un vector ecou ce a fost prezentat perceptronului. Sinteza ecourilor a fost posibilă întrucât situațiile elementare ce au fost testate sunt suficient de simple. Asumându-ne corectitudinea ecourilor generate se poate valida comportamentul perceptronului.

S-a început testarea răspunsului perceptronului cu proprii "vectori de antrenare". Fără excepție, perceptronul clasifică corect acești vectori. Pentru fiecare dintre ei, neuronul corespunzător are starea de activare maximă iar toți ceilalți sunt nuli.

S-a testat apoi răspunsul perceptronului pentru imagini ale câmpului ultrasonic corespunzătoare unui obstacol așezat între punctele de eșantionare spațială. Activarea neuronilor perceptronului s-a încadrat comportamentului sugerat de către "harta termală" din figura 6.9. Deplasarea obstacolului înspre în afara zonei corespunzătoare unui neuron, duce la scăderea gradului de activare a acestuia. Prezența obstacolului în interiorul zonelor albe de insensibilitate nu excită neuronii perceptronului.

Pasul următor a fost testarea răspunsului rețelei neuronale pentru scene ce combină câte două sau trei obstacole semicilindrice distincte. Aceste obstacole sunt asemănătoare cu cel utilizat la generarea vectorilor de antrenament. În figura 6.10 este redat răspunsul rețelei neuronale pentru așezarea simetrică față de mediană a sistemului de traductoare a două obstacole semicilindrice.

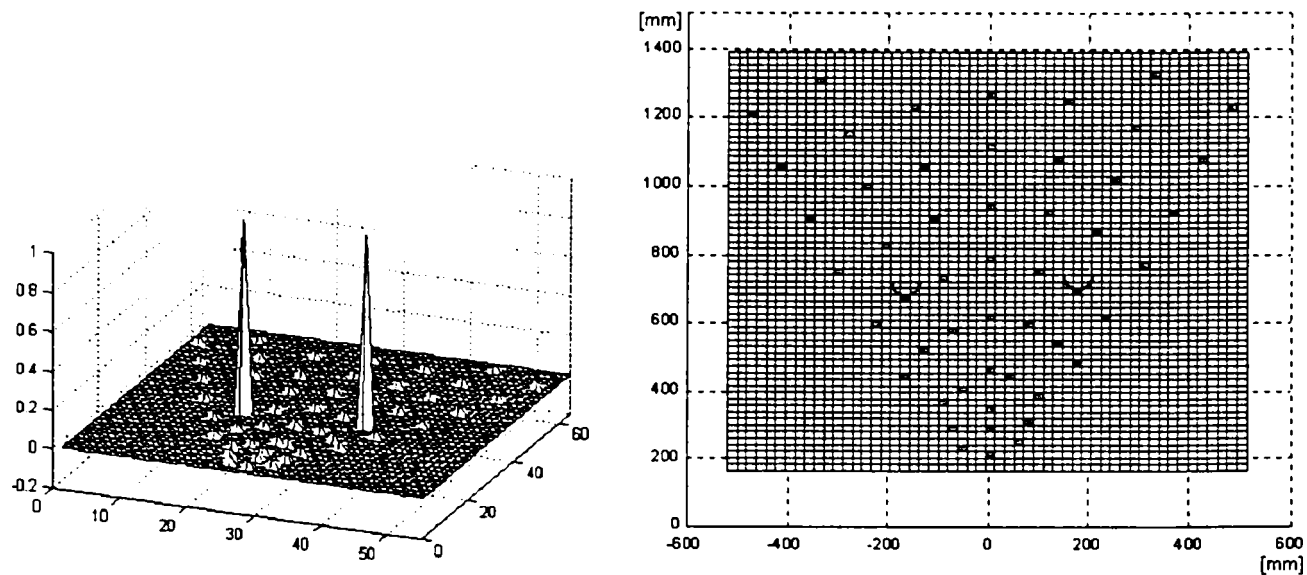


Figura 6.10 Răspunsul perceptronului pentru două obstacole izolate așezate în punctele 22 și respectiv 23.

Punctele în care au fost amplasate obstacolele sunt punctele 22 și 23, fiind sugerate în figura 6.10 cu două arce de cerc. S-a studiat acest caz, a două obstacole distincte simetrice, pentru că el reprezintă un caz particular, mai greu de perceput decât dacă obstacolele ar fi poziționate aleator. Amplasarea simetrică a obstacolelor (împreună cu forma lor) favorizează apariția reflexiilor multiple și deci a unor artefacte în imaginea reconstruită. Dar așa după cum se poate vedea și în figura 6.10 perceptronul folosit pentru recunoașterea imaginilor nu oferă rezultate eronate, care să conțină obiecte fantomă.

În figura 6.10 pe lângă cei doi neuroni activi se pot observa cu ușurință și restul de neuroni ai perceptronului. Deși în realitate nivelul lor de activare este nul, pentru a oferi o figură mai sugestivă, neuronilor inactivi li s-a atribuit un nivel minim pentru a-i face totuși vizibili. Acest artificiu este valabil pentru toate figurile ce urmează în acest subcapitol.

Figura 6.11 prezintă în aceeași manieră răspunsul rețelei pentru o scenă cu trei obstacole semicilindrice amplasate în punctele 16, 27 și, respectiv, 40.

Răspunsul perceptronului este corect pentru toate combinațiile de câte 2, 3 sau chiar mai multe obstacole izolate, așa după cum și ultimele două figuri dovedesc. Chiar și în cazul scenelor simetrice față de axa mediană a sistemului de traductoare, reconstrucția făcută este corectă. În imaginile prezentate privind starea de activare a neuronilor perceptronului nu apar artefacte sau clasificări eronate pentru scene cu obstacole distincte.

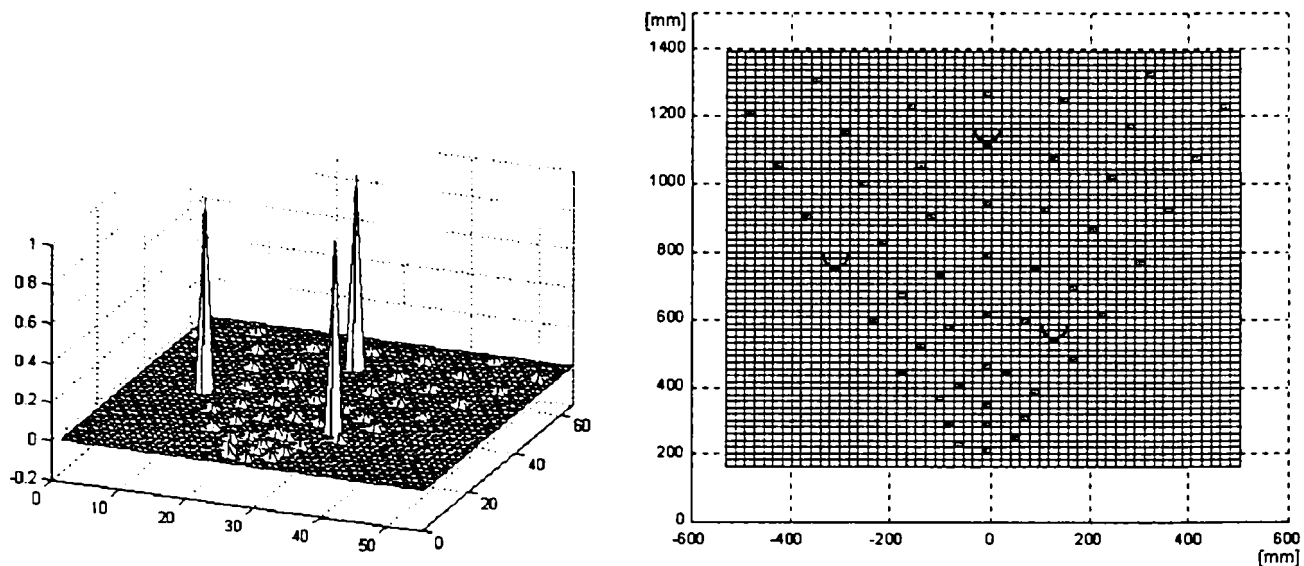


Figura 6.11 Răspunsul perceptronului pentru o scenă cu trei obstacole așezate în punctele 16, 27 și 40.

S-a crescut apoi complexitatea vectorului de test, incluzând în câmpul investigat un perete lung la diferite distanțe și pentru diferite orientări relativ la sistemul de traductoare.

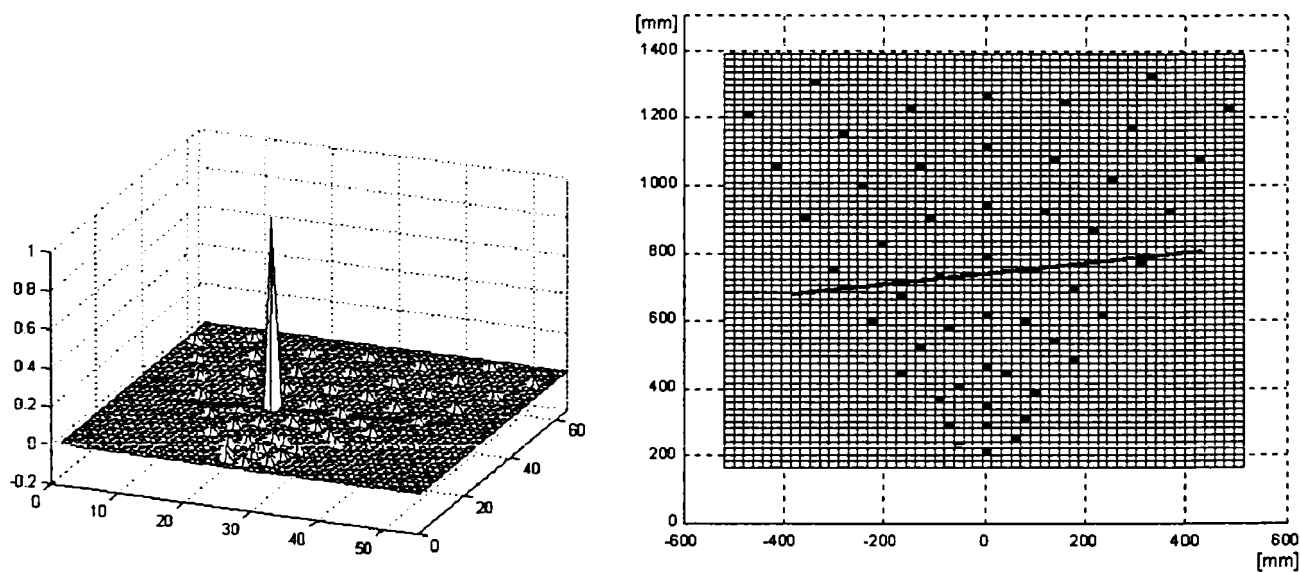


Figura 6.12. Răspunsul perceptronului pentru un obstacol de tip perete. Este sesizat doar punctul de intersecție a perpendicularei coborâtă din poziția traductorului emițător pe dreapta peretelui.

Acest tip de obstacol se comportă ca și o oglindă perfectă dată fiind lungimea de undă relativ mare cu care se lucrează (8.25mm) și rugozitatea scăzută a majorității suprafețelor ce se pot întâlni în mediu [3].

Datorită comportamentului de tip oglindă (a reflexiei speculare), din întreaga lungime a peretelui, va fi sesizat doar un punct și anume piciorul perpendicularei coborâte din poziția emițătorului pe linia peretelui (figura 6.12).

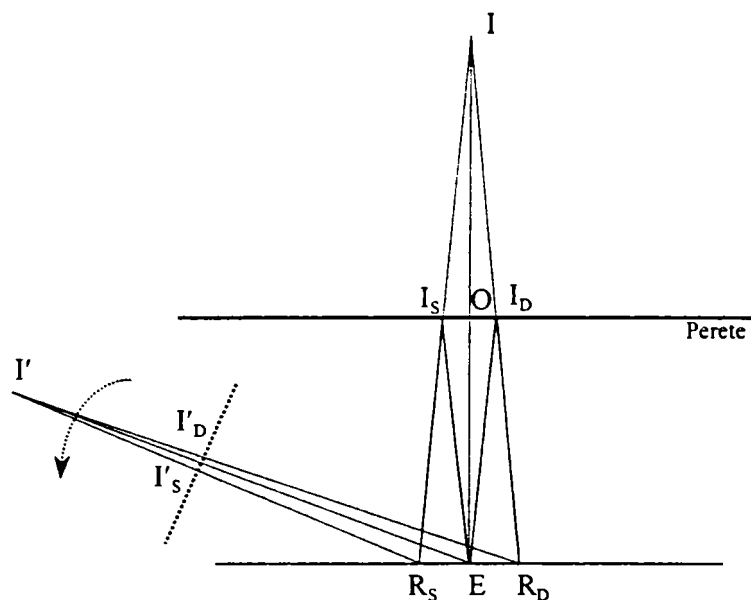


Figura 6.13 Geometria reflexiei pe un perete neted.

Porțiunea de perete care reflectă impulsul ultrasonic, astfel încât acesta să poată fi captat la recepție este totuși mai largă fiind în cea mai favorabilă situație (când peretele este ortogonal pe mediana sistemului de traductoare), egală cu jumătate din distanța între traductoarele receptoare (vezi figura 6.13).

Comportamentul de tip oglindă face ca emițătorul să formeze o imagine fantoma situată simetric, față de acesta, în spatele peretelui. Altfel spus segmentele IO și OE în figura 6.13, sunt egale. În realitate unda ultrasonică se deplasează pe traseele E - I_D - R_D și E - I_S - R_S respectiv. Datorită asemănării triunghiurilor II_SI_D și IR_SR_D se poate scrie:

$$\frac{IO}{IE} = \frac{I_S I_D}{R_S R_D} = \frac{1}{2} \quad (6.4)$$

Și deci lungimea segmentul I_SI_D este egal cu jumătatea distanței dintre traductoare. Pentru o amplasare la 40 mm a traductoarelor receptoare unul față de altul, rezultă că zona de reflexie pe suprafața peretelui este de 20 mm, valoare ce este mai mică decât rezoluția spațială obținută și deci poate fi considerată ca fiind punctiformă.

Dacă însă peretele nu mai este perpendicular pe mediana traductoarelor, porțiunea acestuia ce va reflecta înapoi semnal este din ce în ce mai mică, tinzând spre un singur punct așa cum se sugerează punctat în figura 6.13.

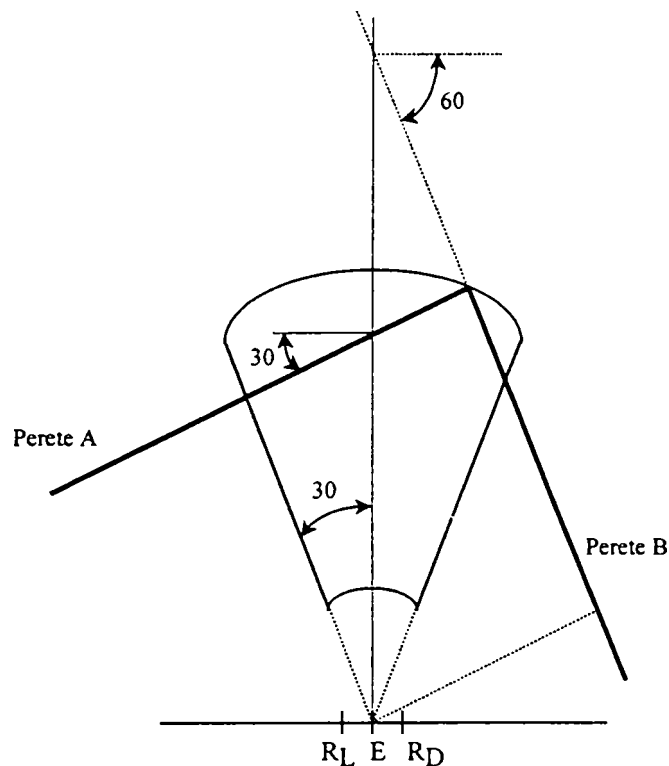


Figura 6.14 Condiția ca un perete să fie detectat este ca înclinarea sa față de mediana traductoarelor să nu fie mai mare de 30° . Peretele A este la limită dar va fi detectat, pe când peretele B nu.

Înclinarea maximă pentru care un perete va putea fi încă detectat este dată de condiția ca piciorul perpendicularei din poziția emițătorului pe dreapta peretelui să cadă încă în interiorul câmpului investigat (vezi paragraful IV.3.2 și figura 6.14). Valoarea limită a înclinării peretelui este deci de 30° , fiind dată de deschiderea maximă a lobului de sensibilitate. Peste această valoare majoritatea energiei ultrasonice va fi reflectată în afară, iar fracțiunea care ajunge totuși la receptoare este atenuată în plus de forma lobului de sensibilitate.

Dacă pereții plani nu oferă decât câte un punct de reflexie, recunoașterea lor de către perceptron făcându-se sub forma unui singur punct, în schimb în cazul pereților curbați concav, care oferă mai multe centre de reflexie și care se suprapun mai bine peste amplasarea în spațiu a punctelor caracteristice, oferă un răspuns mai precis prin activarea mai multor neuroni de-a lungul liniei feței peretelui.

Iată sugerat schematic în figura 6.15 un astfel de caz. Peretele concav concentrează înapoi la recepție câmpul ultrasonic emis, iar starea de activare neuronilor va reflecta mai precis acest tip de obstacol. Bine înțeles că răspunsul rețelei depinde mult de raza segmentului de cerc al peretelui concav. Sunt favorizați pereții a căror rază aproximează mai bine amplasarea punctelor de eșantionare spațială.

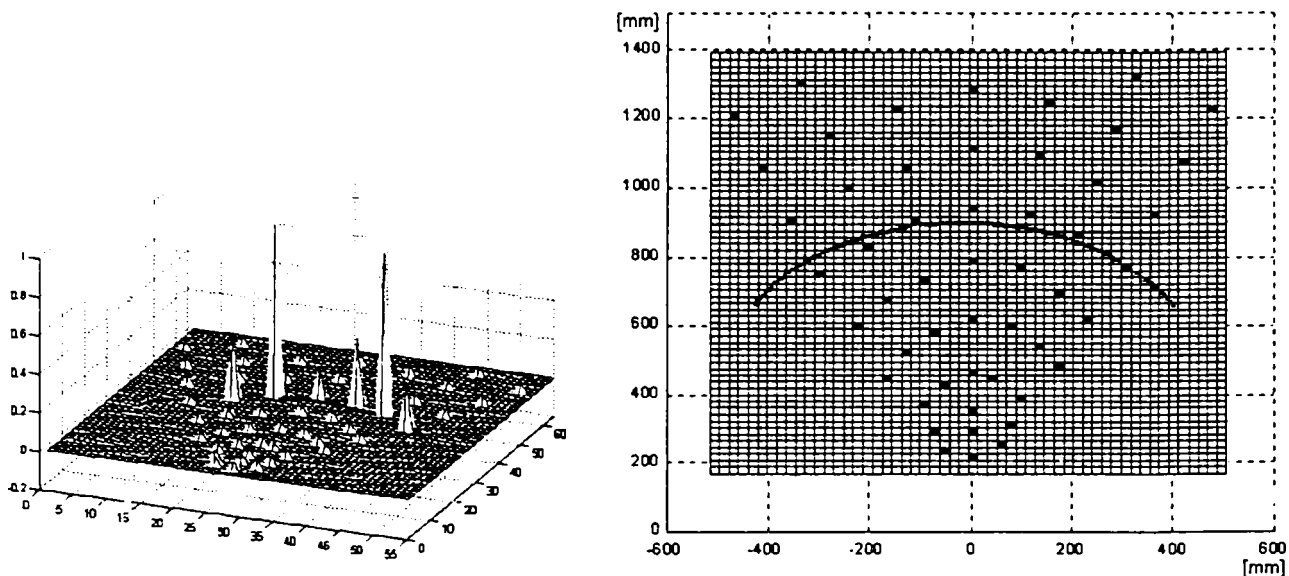


Figura 6.15 Răspunsul perceptronului pentru un obstacol concav. Datorită formei ce avantajează întoarcerea ecourilor la recepție, obstacolul concav va fi mai bine perceput.

Cazul pereților curbați ce sunt văzuți de sistemul de traductoare dinspre partea lor convexă, oferă un rezultat similar cu cel al pereților plani. Se obține și pentru aceștia doar câte un punct de reflexie, anume intersecția arcului peretelui cu dreapta ce se sprijină cu unul din capete în centru arcului peretelui și cu altul pe poziția curentă a traductorului emițător (vezi figura 6.16).

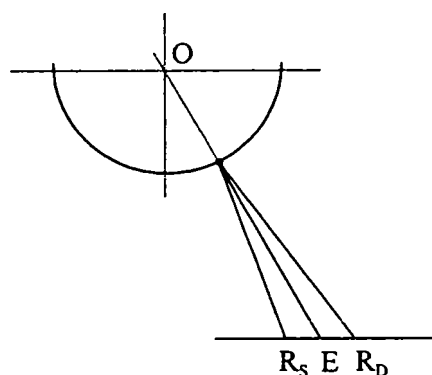


Figura 6.16 Unicul centru de reflexie a unui perete convex se găsește la intersecția între linia peretelui și dreapta ce unește emițătorul cu centrul arcului de cerc al peretelui.

A mai fost testată de asemenea capacitatea de recunoaștere a perceptronului și pentru obstacole de tip colț interior. Răspunsul perceptronului pentru un astfel de obstacol este prezentat în figura 6.17, unde se vede că doar un punct al conturului colțului este recunoscut, anume vârful.

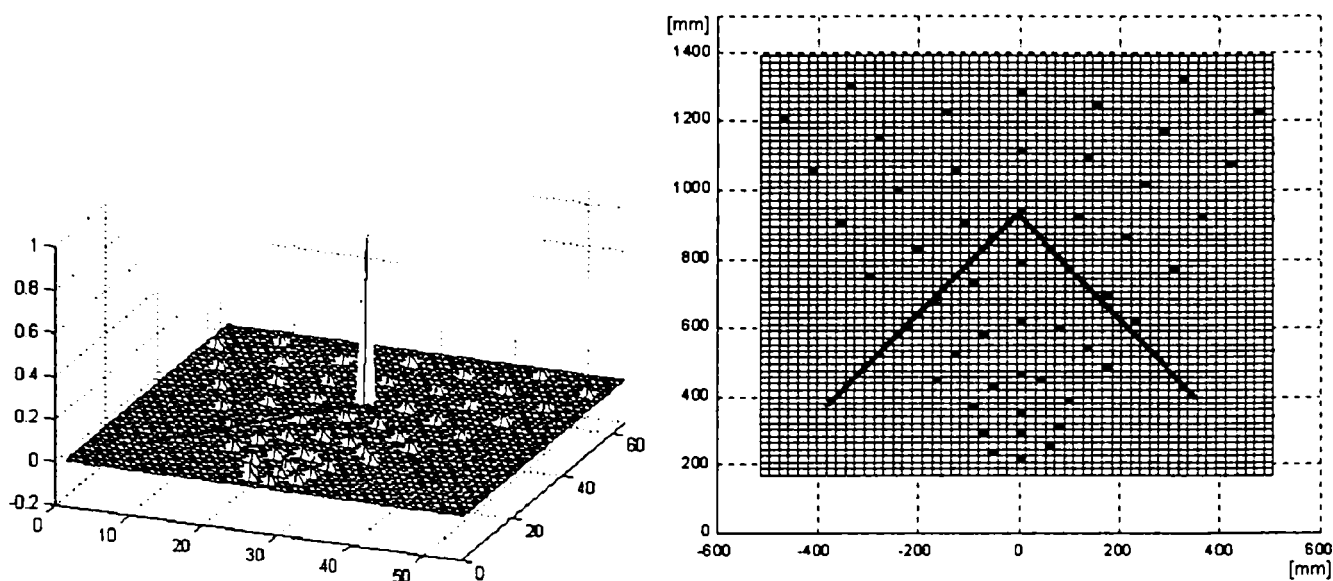


Figura 6.17 Răspunsul perceptronului pentru un obstacol de tip colț interior cu deschidere de 90° .

Un colț interior poate fi privit ca o combinație a două obstacole de tip perete și ar fi de așteptat ca perceptronul să reproducă câte un punct pentru fiecare latură a colțului, ca și în cazul unui perete simplu. Din păcate însă, majoritatea conturilor unui clădiri clasice formează colțuri de 90 de grade. Și așa cum se poate vedea și în figura 6.18, picioarele perpendicularelor coborâte din emițător pe laturile colțului cad în afara zonei investigate și aceste două reflexii scapă neobservate.

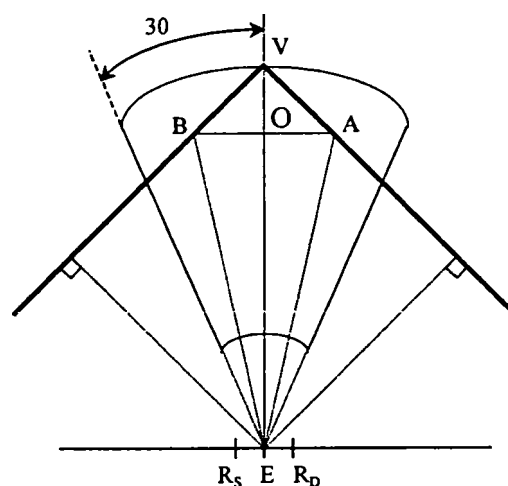


Figura 6.18 Analiza geometriei unei configurații ce include un colț. Nu vor putea fi sesizate laturile acestui deoarece perpendicularele coborâte din emițător cad în afara zonei investigate. În schimb impulsul ultrasonic va găsi întotdeauna o cale de întoarcere E-A-B- $R_S(R_D)$ cu reflexii multiple.

În cazul colțului interior, impulsul ultrasonic găsește însă, întotdeauna, încă o cale de întoarcere la receptoare. Pe această cale impulsul ultrasonic suferă doua reflexii succesive pe laturile interioare colțului, până să fie captat la recepție.

Analizând geometria acestei situații (figura 6.18) se poate observa cu ușurință că segmentul OE este întotdeauna mai mic decât segmentul EA, iar segmentele OA și OV sunt egale deoarece triunghiul ΔVOA este isoscel. Rezultă deci că, distanța de zbor pentru această situație particulară este întotdeauna mai mare decât dublul distanței de la emițător la vârful colțului, și din acest motiv acest ecou ar trebui să genereze un obstacol situat undeva în spatele colțului.

Testele făcute au demonstrat că neuronul din jurul vârfului colțului reproduce acest obstacol așa cum se prezintă în figura 6.17. Situația studiată, robotul se apropie de colț pe bisectoarea unghiului, deși particulară nu restrânge validitatea concluziei obținute. Indiferent de traiectoria pe care se face apropierea de colț va fi detectat numai un punct. Spre exemplu, putem considera că robotul se apropie de colț urmând o traiectorie paralelă cu una din laturile acestuia. Și în acest caz extrem va fi detectat un punct, anume unul pe latura opusă, latura pe lângă care se face deplasarea scăpând cu totul percepției.

Dacă, însă, este întâlnit un colț cu o deschidere mai mare de 90 de grade, a cărui laturi satisfac condiția de înclinare, atunci ecourile recepționate vor putea aduce informație și despre laturile colțului. Figura 6.19 redă acest caz particular, și așa după cum se vede aici se va activa nu doar neuronul corespunzător vârfului colțului ci și alți doi ce reflectă poziția laturilor acestuia.

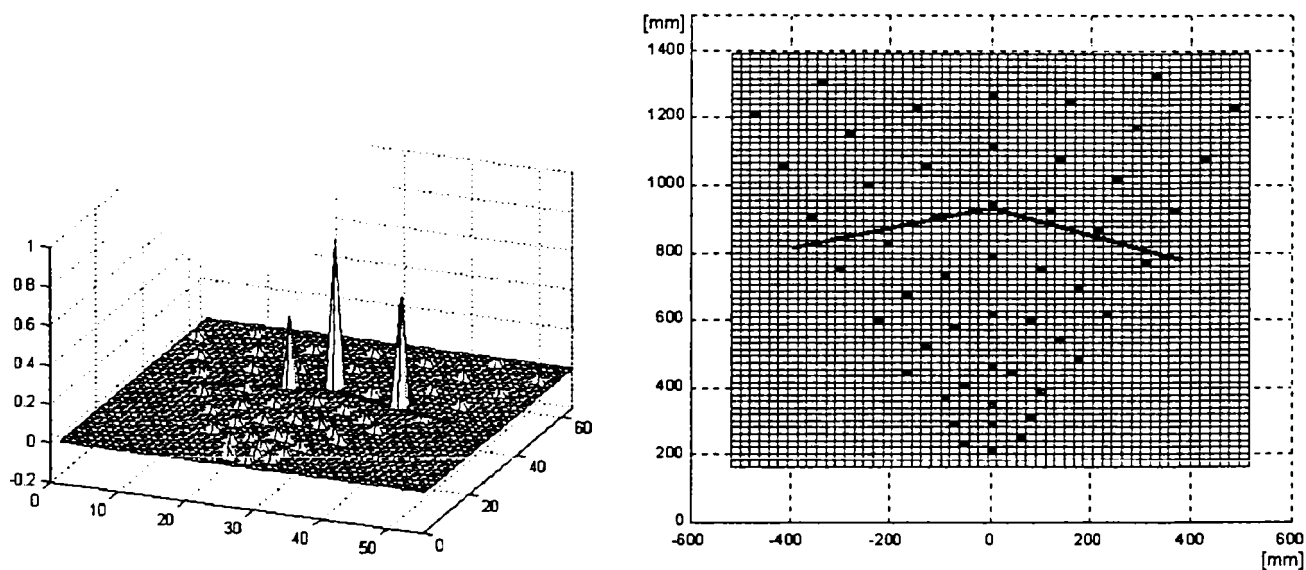


Figura 6.19 Răspunsul perceptronului pentru un obstacol de tip colț interior cu deschidere de 120° . Sunt percepute trei puncte. Doua corespund laturilor colțului, similar cu cazul obstacolului de tip perete, iar cel de al treilea este dat de un parcurs cu două reflexii succesive pe laturile colțului, fiind aproximat de vârful colțului.

În cazul unui obstacol de tip colț exterior (sau vârf) este recunoscut doar vârful acestuia. Figura 6.20 redă acest studiu. Deși asemănător cu cazul colțului interior, de această dată laturile colțului exterior reflectă în afară impulsul ultrasonic. Acum picioarele

perpendiculararelor duse din poziția emițătorului pe laturi cad în afara acestora, neexistând fizic o suprafață pe care să se facă o reflexie (vezi figura 6.21).

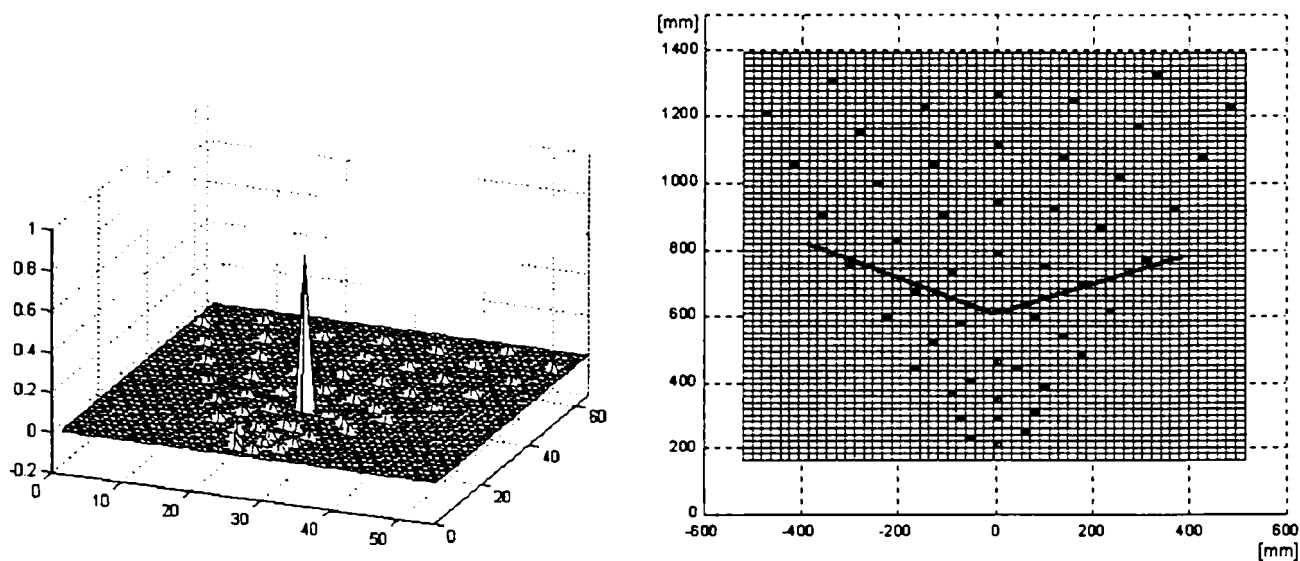


Figura 6.20 Răspunsul perceptronului pentru un obstacol de tip colț exterior. Este perceput doar vârful acestuia.

Singurul punct care reflectă ecoul înapoi înspre traductoarele receptoare este vârful colțului. Și acest ecou este mult atenuat prin împrăștierea energiei acustice datorită formei colțului (vezi figura 6.21). Aceste efecte fac din formele de tip colț unele dintre cele mai greu de recunoscut obstacole.

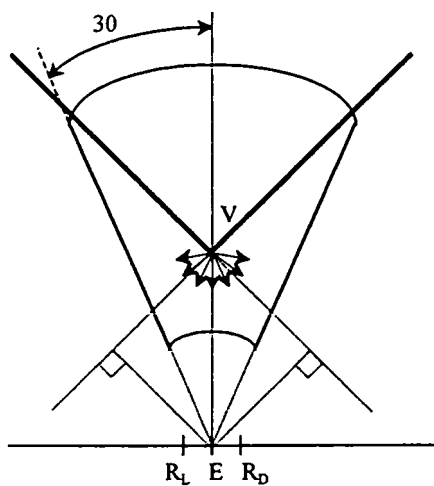


Figura 6.21 Geometria unei configurații ce include un vârf

Au mai fost încercate și combinații între perete, colț sau vârf cu câte un obstacol semicilindric izolat. Activarea perceptronului a fost o combinație a cazurilor anterior prezentate, fără să aibe loc apariția unor obiecte fantomă.

VI.6 Concluzii

Prezentul capitol introduce principala contribuție a prezentei teze, anume ideea prelucrării informației câmpului ultrasonic captat cu ajutorul unei rețele neuronale. Ideea propusă aici se poate constitui într-o posibilă soluție la problema percepției mediului de către un robot mobil autonom dotat doar cu senzori ultrasonici.

Se propune un sistem cu doar un singur traductor emițător și doar doua traductoare receptoare, așezate în linie. Traductorul emițător lucrează în impuls, tehnica de excitare a acestuia fiind adaptată lucrului cu traductoare de bandă îngustă (vezi paragraful V.3). De asemenea și la recepție traductorul lucrează adaptat (vezi paragraful V.4). Achiziția câmpului ultrasonic se face continuu, pe o durată ce permite recepția ecourilor chiar și din cel mai îndepărtat punct al câmpului investigat.

Din imaginea câmpului ultrasonic înregistrat se utilizează doar informația de întârziere a recepției ecoului pentru determinarea distanței până la obstacol și diferența interaurală internă pentru a obține azimutul obstacolului. Pentru aceasta, amplitudinea ecourilor a fost decorelată de mărimea, înclinarea și rugozitatea suprafeței pe care s-a generat reflexia prin aplicare unui prag convenabil ales impulsului recepționat. În plus, prin aplicarea pragului, cantitatea de informație ce trebuie prelucrată scade considerabil.

Procesarea imaginii câmpului ultrasonic se face cu ajutorul unei rețele neuronale, care realizează corelarea spațio-temporală a informației achiziționate, pe baza tiparelor memorate sub forma ponderilor neuronilor săi.

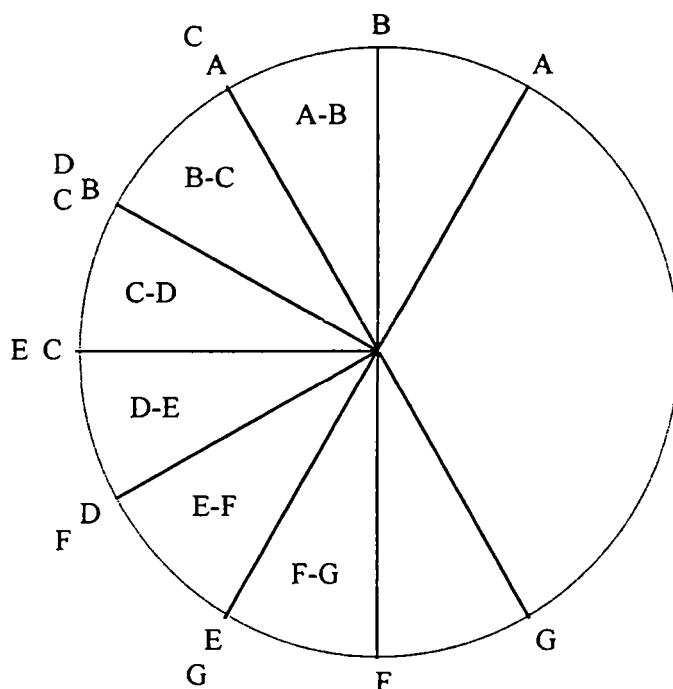


Figura 6.22 Modalitatea de extindere a zonei investigate, sau chiar o posibilitate de investigare omnidirecțională.

Starea de activare a neuronilor perceptronului la un moment dat reprezintă o imagine sintetizată a mediului din fața robotului. Fiecărui neuron îi este atribuită câte o zonă din câmpul investigat. Imaginea reconstruită reprezintă o aproximare a conturului dat de secționarea mediului cu un plan orizontal ce conține sistemul de traductoare. Rezoluția spațială obținută este de 45mm pentru zona apropiată și scade progresiv până la 144mm pentru zona îndepărtată.

Dimensiunile câmpului investigat sunt dictate de traductoarele utilizate. În cazul concret studiat, traductoarele 40LT(R)16 permit o deschidere de doar 60°. Dar nici acest aspect nu este o limitare a tehnicii de investigare propuse. Dacă se dorește un câmp mai larg se pot utiliza mai multe traductoare receptoare dispuse pe același arc de cerc, așa cum sugerează figura 6.22. Prin împerecherea potrivită a semnalelor captate de aceștia și prin construirea unui perceptron pentru fiecare pereche de traductoare receptoare, se poate obține imaginea întregului câmp dintr-o singură salvă emisă.

Soluția prezentată în figura 6.22 poate fi adaptată nu numai pentru cazul utilizării unor traductoare cu un lob îngust de directivitate ci ideea se poate extinde și pentru o supraveghere omnidirecțională dacă aceasta este chiar necesară. Se poate obține o supraveghere de jur împrejurul robotului prin utilizarea unui număr suficient de mare de senzori care să ducă la acoperirea completă a spațiului din jurul robotului.

În cazul soluție arătate în figura 6.22 se obține o supraveghere cu o deschidere de 180°, utilizând 7 traductoare a căror lob de sensibilitate are o deschidere de 60°. Cu aceleași traductoare, pentru a obține o supraveghere omnidirecțională, sunt necesare un număr de 12 traductoare.

Tehnica utilizată pentru reconstrucția imaginii este o derivată a holografiei acustice în impuls. A fost optimizată (simplificată) faza de procesare a informației achiziționate prin implicarea unui perceptron, beneficiind de aici și de paralelismul acestuia.

În contrast cu exemplele din întreaga literatura studiată, tehnica propusă în această teză *nu ocolește ecourile multiple*, ci dimpotrivă *exploatează informația conținută de acestea*. Prin acest mod de abordare, soluția sugerată se apropie odată mai mult de tehnicile holografice.

Principalul avantaj al acestei idei este dat de viteza cu care se obține imaginea mediului. Dintr-o singură salvă se obține aproximarea poziției punctelor de reflexie din interiorul câmpului investigat.

De asemenea numărul redus de traductoare (doar 3) reprezintă un alt avantaj major.

În interiorul câmpului investigat există zone insensibile, pentru care obstacolele nu sunt sesizate. Acest aspect nu reprezintă un dezavantaj real, deoarece robotul în deplasarea sa continuă, ajunge să sesizeze mai devreme sau mai târziu obstacolele, atunci când acestea intră în zonele sensibile. În plus, prin utilizarea unor traductoare mai performante, cu o bandă de

frecvență mai largă, se poate reduce durata impulsului ultrasonic și, de aici, se obține imediat reducerea dimensiunilor zonelor insensibile. În același timp acest lucru presupune creșterea implicită a rezoluției spațiale.

Chiar dacă se lucrează cu traductoare ce nu pot oferi o rezoluție spațială bună, se poate apela la o funcție de activare Gaussiană mai largă, caz în care mai mulți neuroni vor fi activați pentru același punct de reflexie. Într-o astfel de abordare, prin interpolare se poate determina poziția punctului de reflexie ca fiind centrul de greutate al figurii ce are ca vârfuri neuronii activați, rezultatul fiind ponderat de valorile de activare a acestora.

În imaginea reconstruită cu ajutorul perceptronului propus nu apar artefacte, nici chiar în cazul scenelor simetrice.

Procesarea cu ajutorul unei rețele neuronale a informației câmpului ultrasonic captat, se înscrie perfect modelului sugerat de către Murphy [221] pentru un *comportament* al unui nivel de conducere reactiv al unui robot mobil autonom. Este mai exact prima parte a acestui model, anume schema perceptuală.

Frecvența de obținere a imaginilor este dată în principal de timpul relativ lung necesar propagării impulsului ultrasonic (tipic 8ms). Aceasta rată de actualizare permite totuși utilizarea imaginilor reconstruite în manevre de evitare a obstacolelor sau chiar pentru construcția unei hărți așa după cum se va vedea în capitolul următor.

VII. Aplicații ale holografiei acustice în impuls bidirecțională bitractor.

Una din aplicațiile holografiei acustice în impuls bidirecțională bitractor poate fi și cea a evitării obstacolelor în deplasarea unui robot mobil autonom. Dacă se păstrează ca și referință același model pentru comportamente prezentat de Murphy în [221], atunci, ceea ce se va prezenta în continuare reprezintă o *schemă motoare* ce vine în completarea celei *perceptuale*, pentru procesarea informației senzoriale descrise în capitolul VI.

Se va prezenta în capitolul VII o variantă de implementare a unui comportament de tipul *evită obstacolele*, ca parte a unui posibil sistem de conducere reactiv. Soluția descrisă face uz de rețele neuronale, implementând în acest fel un caracter pur reactiv.

Concluziile desprinse în final vor arăta avantajele, dezavantajele și se vor discuta limitările comportamentului propus. Vor fi, de asemenea, trecute în revistă alte câteva posibile aplicații în domeniul roboților mobili a ideii holografiei acustice în impuls bidirecțională bitractor.

VII.1 Evitarea obstacolelor

Planificarea traiectoriei este una din sarcinile vitale în conducerea roboților mobili autonomi. O traiectorie fără coliziuni care să conducă la ținta propusă, este scopul oricărui algoritm de planificare a traiectoriei. Cheia în atingerea acestui scop, este calitatea interacțiunii cu mediul, în special modul și acuratețea cu care acesta este perceput și apoi modelat.

Mediul în care un robot poate evolua, poate fi divizat în spații statice și spații dinamice, după cum urmează: În spațiile statice nu există părți în mișcare, din acest motiv acestea sunt denumite și spații sigure; Pe când, în spațiile dinamice obstacolele se pot mișca sau pot să-și modifice forma, neputând fi înregistrate inițial într-o hartă globală a mediului [64]. Spațiile dinamice mai au și denumirea alternativă de spații nesigure.

Partea statică a mediului se consideră a fi cunoscută a priori și planificarea traiectoriei poate începe cu aceste date, având ca rezultat așa numita *traiectorie statică*. Pentru partea dinamică a mediului rămâne însă ca robotul să se descurce prin mijloace de percepție proprii, care să

ofere suficientă informație încât *traietoria statică* să poată fi corectată pe porțiuni cu *traietorii dinamice* [45], și obstacolele să poată fi evitate.

Planificarea traiectoriei roboților mobili autonomi poate fi divizată, deci, la rândul ei, în două categorii. Una este categoria planificării globale bazându-se pe cunoașterea a priori a mediului, iar cea de a doua este planificarea locală, care se bazează strict pe informația senzorială momentană, fiind utilizată în mediile dinamice. Planificarea globală poate fi efectuată înaintea începerii deplasării, adică *off-line*, pe când algoritmi locali de planificare a traiectoriei trebuie să fie capabili să ruleze *on-line*.

Deși ar fi de dorit o traiectorie optim globală, aceasta nu se poate obține dacă se iau în vedere scenarii realiste. Din păcate, situațiile practice oscilează între două extreme, pentru care nu este posibilă o planificare globală: Fie nu se cunosc date despre întreg mediul (există atât zone sigure cât și nesigure), și neavând date complete nu se poate vorbi de o planificare globală; Fie cantitatea de informație care descrie mediul în totalitatea lui, este atât de mare încât, computațional nu este posibilă o planificare globală.

Istoric, sistemele de conducere a roboților mobili autonomi au debutat cu sisteme de conducere ierarhice, bazate pe ciclul "simte-planifică-acționează" [45] [60] [131] [135] fiind considerate metode tradiționale (vezi capitolul II.1 pentru o descriere mai amănunțită). Literatura oferă și alte denumiri alternative pentru aceste sisteme de conducere, cum ar fi: *metode de planificare de nivel înalt*, *comportament codat (coded behaviour)* [122] sau *metoda analitică* [104].

Modul de abordare tradițional al controlului roboților mobili autonomi, presupune descompunerea sarcinilor în acțiuni componente și îndeplinirea pe rând a acestora. Dar descompunerea în acțiuni componente nu este întotdeauna o procedură viabilă. Spre exemplu, tratarea evitării unui obstacol într-o manieră asemănătoare filozofiei aplicate în programarea structurată utilizând mecanismul de lucru în întreruperi, nu este de fapt posibilă. Aceasta, deoarece la ieșirea din "subrutina" responsabilă pentru evitarea obstacolului, nu mai este posibilă refacerea condițiilor anterioare activării acesteia, pentru simplul motiv că, cel puțin, poziția și orientarea, dacă nu și viteza robotului, sunt modificate, față de valorile anterioare apelării rutinei [122].

În plus, descompunerea fiecărui scenariu în părți componente necesită, un volum mare de muncă din partea factorului uman. Este necesară o "programare" minuțioasă și atentă pentru ca astfel de sisteme mobile să poată evolua în lumea înconjurătoare. Chiar dacă factorul uman încercă să anticipeze și să modeleze toate scenariile posibile, caracterul dinamic al lumii înconjurătoare poate face ca parte din aceste situații anticipate să devină repede învechite și, deci, nepotrivite. Sisteme mobile astfel construite sunt puse în fața unor mari dificultăți atunci când mediul înconjurător diferă față de ceea ce s-a anticipat anterior, când robotul a fost preînvățat.

S-a demonstrat că rezultatele obținute pe această cale nu sunt cele așteptate, deoarece sistemele ierarhice nu sunt capabile să facă față complexității și dinamicii mediului. Sunt

extrem de sensibile la scăpări ale sistemului senzorial, iar robotul nu este capabil să învețe din propria experiență [122]. Abilitatea roboților mobili de a se adapta modificărilor mediului este crucială pentru a obține performanțe adecvate și chiar pentru a supraviețui în lumea reală [83].

Mai recent, pentru conducerea roboților mobili au fost propuse metode reactive, în care simpla reprezentare a mediului din imediata vecinătate a robotului mobil este utilizată în selectarea următoarei acțiuni. Principiul a fost introdus de Brooks (1986), asociindu-se la o anumită informație senzorială o anumită acțiune a sistemului motor pentru a satisface situația particulară dată. Robotul astfel condus răspunde la stimuli senzoriali într-o manieră reflexă (vezi și paragraful II.2).

Ca și variantă de implementare a planificării locale, metodele behavioriste au luat amploare în ultimii ani. Dezvoltarea sistemelor de conducere reactive a evoluat până la încercări de înglobare a unor comportamente de gen dorință, intenție sau chiar emoție [122].

În sinteză, calitățile pe care le reclamă un sistem de conducere eficient sunt [125]:

- Să fie robust și cu un grad ridicat de adaptabilitate la incertitudinile sistemului senzorial și la schimbările din mediu;
- Să prezinte capacitatea de învățare și de auto-organizare cu putere de generalizare a cunoștințelor acumulate;
- Să poată fi implementat în timp real.

Analizând aceste atribute, se constată ca multe dintre acestea pot fi asimilate, dacă se consideră ca și variantă de implementare a sistemului de conducere, varianta ce face uz de rețele neuronale artificiale [125]. Teoria rețelelor neuronale are o importanță ridicată în dezvoltarea de controllere pentru roboți mobili inteligenți. Sistemele cu rețele neuronale utilizate, ca și elemente capabile să învețe în bucle de control a roboților mobili, au avantajul neliniarității, a capacității de învățare și cel al procesării paralele. Nu în ultimul rând, au capacitatea de a generaliza.

Rețelele neuronale sunt modele potrivite pentru reprezentarea mediului. Se va avea de-a face cu o reprezentare implicită a mediului prin ponderile rețelei și nu una explicită, care să poată fi interpretată de către un factor uman. Dar o reprezentare compatibilă cu sistemul cognitiv uman necesită un spațiu mare de stocare, nefiind într-adevăr, necesară robotului. Acesta își poate crea propria *hartă*, iar rețelele neuronale sunt un bun exemplu în acest sens.

În plus, utilizând rețele neuronale, nu este necesară o modelare exhaustivă a mediului, care să fie matematic precisă. Într-adevăr, pentru fiecare situație în parte, există răspunsuri potrivite și nepotrivite din partea robotului. Dar în cazul particular al navigării, doar rareori există o soluție unică bună. În general, pentru fiecare situație există o serie întreagă de răspunsuri posibile care sunt, luate în mare, la fel de bune. Puterea de generalizare a rețelelor neuronale contribuie aici benefic, oferind răspunsuri plauzibile pentru situații ce diferă față de situațiile anterioare.

Dar în fața controller-elor neuronale stau și câteva pietre de încercare [125]:

- necesitatea unor reguli de învățare on-line, fără a face o ajustare preliminară a ponderilor;
- inițializarea ponderilor cu valori care să garanteze stabilitatea;
- capacitatea de calcul în timp real a valorilor de actualizare a ponderilor;
- să rămână stabile și în cazul unor sisteme în care valoarea ponderilor este limitată la un domeniu dat.

VII.1.1. Agentul *evită obstacolele*

Principiul de funcționare al agentului propus copiază modul de conducere pe traiectorie a roboților mobili cu câmpuri potențiale. La fel ca și în cazul metodei clasice de conducere cu câmpuri potențiale, robotului îi este atribuit același tip de potențial ca și cel al obstacolelor, obținându-se în acest fel un efect de respingere reciprocă. De asemenea se consideră că mediul în care robotul evoluează nu este disipativ, iar robotului i-a fost atribuit o anumită energie cinetică inițială. Nu există, în schimb, o componentă atractivă și, în condițiile enumerate, se va obține o mișcare perpetuă a robotului, o mișcare de colindare prin mediu. Această strategie de deplasare este potrivită unui agent autonom atunci când acesta investighează mediul fie pentru recunoaștere (alcătuirea unei hărți) fie în procesul de căutare a hranei.

Plecând de la exemplul modelelor sistemelor biologice de recunoaștere a scenelor și de conducere pe traiectorie, s-a ales ca și componentă principală a agentului *evită obstacolele* o rețea competitivă simplă, care să realizeze clasificarea/recunoașterea situațiilor în care se află mobilul. Și aceasta deoarece regnul animal, de la om în jos, prezintă capacități de învățare excelente, asociind reacții pentru fiecare situație în parte [173].

Maparea senzorială cu auto-organizare joacă un rol important în multe funcțiuni ale creierului uman. Diferiți stimuli senzoriali cum ar fi, de exemplu, cei vizuali și olfactivi, pentru a aminti doar doi, sunt asigurați unor zone diferite ale cortexului într-un mod ce prezervă topologia informației. Stimuli similari, sunt catalogați de zone învecinate. Iar modelul rețelelor competitive simple produce tocmai o astfel de corespondențe [65].

Mai mult, studiind activitatea neuronală a animalelor experimentale, s-a constatat că celulele cerebelului prezintă proprietatea remarcabilă de a se activa relativ la o anumită zonă spațială. Celule individuale se activează consistent atunci când animalul se află în anumite zone, pentru fiecare locație în parte fiind asigurate câte un grup de celule. Astfel, pentru fiecare locație recunoscută a unui mediu cunoscut, se formează o anumită *image* de activare a celulelor, aceasta putând fi privită ca o reprezentare a zonei respective [173].

Tiparul stimulilor senzoriali este puternic corelat cu scena care i-a generat și deci se poate crea o asociere între activarea neuronilor și anumite tipare ale stimulilor senzoriali [88]. Este posibilă, cu alte cuvinte, catalogarea stimulilor senzoriali în clase și realizarea unei legături bijective între clasa activată și poziția mobilului în spațiu.

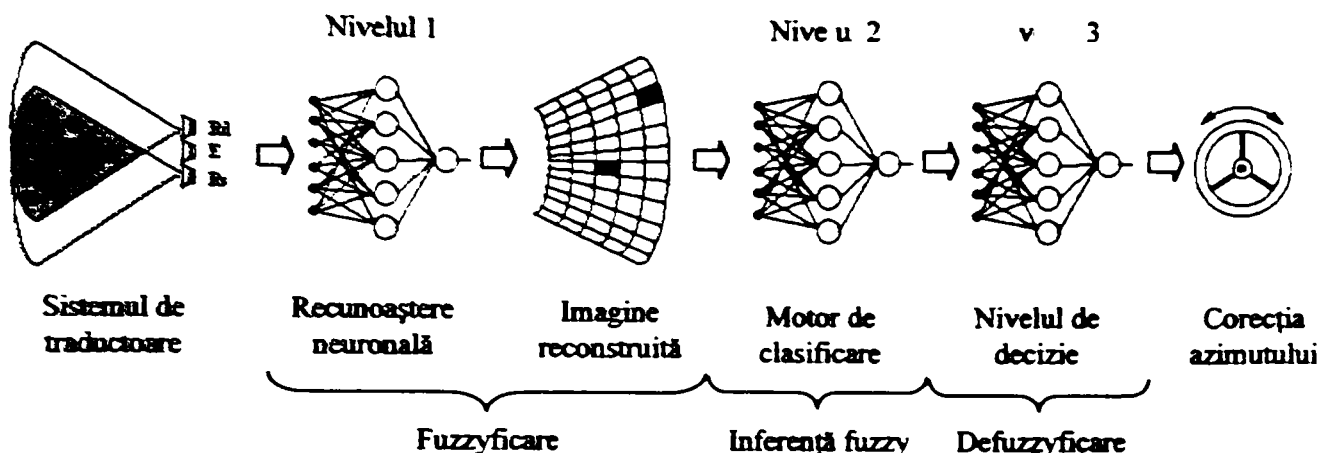


Figura 7.1 Structura pe trei niveluri a agentului *evită obstacolele* propus

Structura propusă pentru agentul *evită obstacolele* este ierarhizată pe trei niveluri (vezi figura 7.1). Primul nivel interpretează informația senzorială ultrasonică înregistrată, el are în componența sa perceptronul descris în capitolul VI. La ieșirea acestui nivel, se obține o estimare a poziției punctelor de reflexie din mediul investigat împreună cu nivelul de încredere a detectării lor.

Cel de-al doilea nivel joacă rolul unui motor de clasificare fiind constituit dintr-un strat competitiv simplu așa cum deja s-a menționat anterior. Aceasta realizează clasificarea / identificarea / recunoașterea situațiilor în care se află mobilul.

Ultimul nivel, al treilea, decide direcția ce trebuie urmată de robotul mobil funcție de clasa câștigătoare a nivelului secundar. Descrierea amănunțită a acestui ultim nivel urmează în secțiunea B a prezentului subcapitol.

Sisteme de control asemănătoare bazate pe aceeași descompunere ierarhizată a funcțiilor se întâlnesc și în [230], [64], [98].

Este posibilă o paralelă între structura cu trei straturi a agentului *evită obstacolele* propus aici și un controller fuzzy. Primul strat unde informația senzorială este analizată este echivalent cu etapa de fuzzyficare. Stratul al doilea implementează motorul de inferență (baza de reguli), iar cel de al treilea strat este echivalent procesului de de-fuzzyficare.

A. Nivelul clasificator

Așa după cum a fost precizat anterior, rolul acestui nivel este acela de a clasifica scenele propuse de către primul strat (al perceptronului) ce procesează informația senzorială. Activarea unui neuron al stratului competitiv va corespunde recunoașterii unei anumite situații particulare [65].

Ideea de la care s-a plecat este dată de modelul acelei părți a sistemului nervos care este specializată în procesarea informației vizuale. Acest model transformă informația recepționată în trăsături din ce în ce mai complicate până reușește să recunoască stimulii. Astfel, neuronii primului strat de prelucrare primesc stimuli doar de pe anumite zone ale retinei, fiind specializați în recunoașterea unor forme particulare ca linii și arce de cerc, cu diferite orientări sau lungimi. Pe stratul următor al modelului sistemului nervos se găsesc neuroni care combină diferitele trăsături recunoscute de stratul anterior în figuri mai complexe. Urmărind un raționament asemănător, straturile superioare adaugă noi "dimensiuni" reprezentării formate (cum ar fi spre exemplu culoare sau strălucire), până când aceasta reușește să fie catalogată [230].

S-a încercat obținerea unui motor de clasificare asemănător cu cel descris anterior din punct de vedere funcțional, clasificator capabil să detecteze atât forme simple cât și dintre cele mai complicate. Implementarea acestuia face uz de o rețea neuronală competitivă simplă care va conduce la un clasificator cu un singur strat, dar ale cărui unități de ieșire se vor împărți în mai multe categorii.

În prima categorie intră neuronii ce vor cataloga scene pentru care doar un singur neuron al perceptronului corelator s-a activat, cu alte cuvinte în mediul investigat a fost detectat doar un singur centru de reflexie. Cea de-a doua categorie este compusă din unități a stratului competitiv ce se activează atunci când în mediul investigat s-au detectat două centre de reflexie simetrice față de axa mediană a robotului (doi neuroni ai stratului corelator). Alte clase superioare vor detecta scene cu un număr din ce în ce mai crescut de puncte de reflexie. Se pot recunoaște obstacole de tip perete (cu diferite înclinări), obstacole colț sau chiar combinații între aceste tipuri de obstacole.

Cea de a doua clasă cataloghează cazurile cu două puncte de reflexie simetrice deoarece cazul scenelor cu două puncte de reflexie asimetrice este lăsat în seama primei clase. În cazul a două puncte asimetrice se va lua în considerare la adaptarea traiectoriei doar cel mai apropiat dintre ele. Această tactică este propusă în [200] unde evitarea obstacolelor se face secvențial, unul câte unul.

Preluând această idee, dar extrapolând-o, principiul propus pentru aceste motor de clasificare ia în considerare la un moment dat doar câte o clasă. Dar aceasta poate reprezenta la fel de bine unul sau o configurație de mai multe obstacole. În acest fel, traiectoria aleasă poate să fie mai aproape de o traiectorie global optimă, întrucât, recunoscând configurații de obstacole se pot adopta strategii de navigare mai potrivite.

Rețeaua competitivă are însă o particularitate ce va fi exploatată mai târziu de stratul de decizie. Anume, neuronul câștigător nu va avea ieșirea saturată la valoarea maximă. La un moment dat, neuronul câștigător va fi singurul activ, iar valoarea ieșirii sale va reprezenta nivelul de încredere a recunoașterii scenei respective prin valoarea ieșirii sale.

Se prezintă în continuare raționamentul care a condus la alegerea ponderilor neuronilor stratului competitiv, în cazul primelor două clase amintite anterior.

Pentru clasa I-a a stratului competitiv s-a atribuit câte un neuron pentru fiecare neuron al perceptronului corelator din primul strat, fiind necesari astfel în total 51 de neuroni. Ponderile acestor 51 de neuroni competitivi au fost stabilite la zero pentru toate conexiunile, mai puțin cele care fac legătura cu neuronul pereche din stratul corelator. Se realizează astfel o legătura directă, una-la-unu între neuronii clasei I-a și cei a stratului corelator. Ponderilor (excitatoare) rămase, li s-au atribuit valori din ce în ce mai mici plecând de la o valoare maximă ce a fost atribuită legăturii cu neuronul cel mai apropiat de robot al stratului corelator. Acesta este neuronul notat cu 1 din figura 6.6. Se avantajează astfel activarea neuronilor mai apropiați (vezi din nou figura 6.6), dar ar putea câștiga competiția și un neuron mai îndepărtat dacă nivelul de activare (nivelul de încredere al recunoașterii punctului de reflexie respectiv) al ieșirii corespunzătoare lui a stratului corelator va avea valoarea cea mai ridicată. Un exemplu pentru ponderile neuronilor primei clase este cel din figura 7.2

$$W_{\text{clasa I}} = \begin{pmatrix} 1.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 1.38 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 1.36 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.34 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.32 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.30 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.28 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.26 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.24 & 0.00 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Figura 7.2. Ponderile primilor 9 neuroni competitivi ai primei clase. Se poate observa aici cum fiecare neuron are doar o legătură excitatoare iar valoarea acestor ponderi excitatorii scade pe măsură ce neuronul din stratul corelator corespunde unei zone mai îndepărtate de robot.

Pentru clasa a doua, cea care cataloghează situațiile cu două puncte de reflexie simetrice, s-au căutat toate combinațiile de câte doi neuroni simetrici ai etajului corelator (vezi figura 6.6). S-au obținut 21 de perechi și pentru fiecare din acestea s-a atribuit câte un neuron în stratul competitiv simplu. Ponderile neuronilor competitivi din clasa a doua sau luate nule pentru toate legăturile cu neuronii stratului corelator, cu excepția a câtor două ponderi pentru fiecare neuron competitiv și anume cele care fac legătura cu neuronii aferenți perechilor de puncte de reflexie simetrice pe care neuronul le reprezintă. Valorile acestor ponderi nenule au fost alese în mod asemănător cu ponderile neuronilor competitivi din clasa I-a, atribuind perechi de valori din ce în ce mai mici pe măsură ce perechea de puncte de reflexie este mai îndepărtată de robot.

$$W_{\text{clasa II}} = \begin{pmatrix} 0.00 & 1.18 & 1.16 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.12 & 1.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.06 & 1.04 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.02 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.96 & 0.94 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Figura 7.3. Ponderile primilor 5 neuroni competitivi ai clasei a doua.

De această dată însă valoarea de la care s-a plecat este mai mică decât în cazul neuronilor competitivi din clasa a I-a (vezi figura 7.3). Această diferență favorizează activarea neuronilor din prima clasă, dacă numai un singur neuron dintr-o pereche este activat. În schimb, dacă ambii neuroni ai stratului corelator corespunzători punctelor de reflexie simetrice se activează, intrarea netă a neuronului respectiv din clasa a II-a a stratului competitiv va fi superioară ca valoare fiecărei intrări nete a neuronilor competitivi din clasa I-a, care reprezintă la rândul lor câte un punct de reflexie.

Se poate observa în figura 7.3 cum fiecare neuron al clasei a II-a are doar două legături excitatoare, iar valoarea acestor ponderi excitatorii scade pe măsură ce perechea de neuroni din stratul corelator corespunde unor zone mai îndepărtate de robot. Astfel, prima linie corespunde activării perechii de neuroni 2 - 3 a stratului corelator. Cea de a doua linie corespunde activării neuronilor 5 - 6. Și așa mai departe, pentru toate perechile de neuroni simetrice din figura 6.6.

Procedând într-o manieră asemănătoare, se pot adăuga și alte clase, ce vor detecta configurații din ce în ce mai complicate. Pentru ca acest algoritm să funcționeze trebuie să îndeplinite următoarele condiții:

- Numărul punctelor de reflexie pe care o clasă este capabilă să le catalogheze trebuie să fie mai mare cu cel puțin unu față de clasa anterioară; și
- Ponderile neuronilor competitivi, conectați la același neuron al stratului corelator, trebuie să fie din ce în ce mai mici, pe măsură ce neuronul competitiv respectiv aparține unei clase mai mari.

Dacă prima condiție favorizează activarea neuronilor aparținând claselor superioare ce au un număr mai mare de ponderi excitatorii, cea de a doua facilitează activarea neuronilor din clasele inferioare, legăturile lor excitatorii având valori superioare. Împreună, aceste două condiții asigură existența întotdeauna a unui neuron cu intrare netă maximă și anume cel care are toate legăturile excitatorii activate.

B. Nivelul de decizie al corecției azimutului

Unul din avantajele majore ale stratului clasificator este răspunsul său clar. La un moment dat doar un singur neuron al stratului competitiv este activ, iar acest lucru simplifică mult sarcina celui de al treilea strat care trebuie să decidă direcția de deplasare pentru momentul următor. Însăși structura nivelului de decizie poate fi mult simplificată.

Dintre mai multe posibilități de implementare, pentru acest strat de decizie a fost ales un perceptron simplu. Mai mult, structura acestuia a fost redusă la un singur neuron, complet conectat la toți neuronii stratului competitiv (vezi figura 7.1).

Fiecare conexiune a neuronului “defuzzyficator” reprezintă câte o situație particulară. Astfel, fiecare pondere va putea deci reprezenta corecția ce trebuie adusă traiectoriei robotului pentru fiecare caz în parte.

Pentru funcția de activare a perceptronului a fost aleasă funcția identitate, care să ofere la ieșire direct valoarea corecției azimutului robotului.

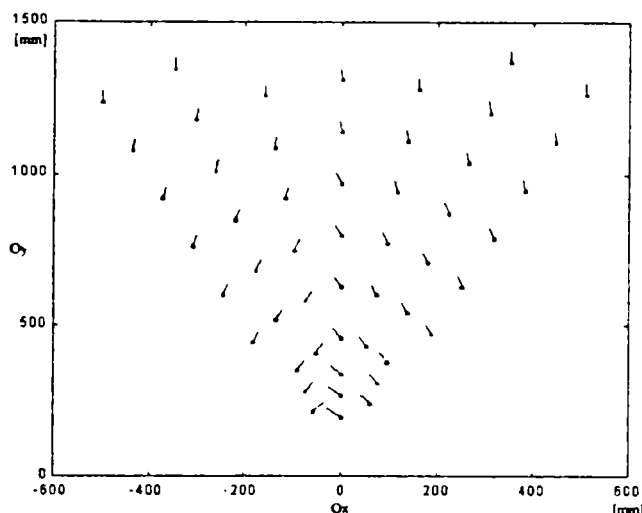


Figura 7.4 Valorile corecției azimutului robotului pentru cazul activării neuronilor competitivi din prima clasă. Înclinarea segmentelor de dreaptă reflectă valoarea corecției care s-ar aduce azimutului robotului dacă obstacolul ar corespunde ca poziție fiecărui neuron al clasei I-a a stratului corelator.

În alegerea valorilor ponderilor neuronului din stratul de ieșire s-a avut ca model judecata umană [64]. S-a procedat prin atribuirea acelor corecții pe care un subiect uman le-ar adopta dacă ar avea în față respectivul tip de obstacol. Iar aceste valori au fost ajustate pe parcursul a câtorva încercări.

Figura 7.4 sugerează într-o grafică 2D valorile corecțiilor azimutului astfel stabilite pentru neuronii competitivi ai primei clase. Robotul se găsește poziționat în punctul de origine a axelor de coordonate. Înclinarea segmentului de dreaptă reflectă valoarea corecției care s-ar aduce azimutului robotului dacă obstacolul ar corespunde ca poziție fiecărui neuron al clasei I-a a stratului corelator.

Așa cum se observă în figura 7.4, zona supravegheată este împărțită între neuronii stratului corelator prin amplasarea acestora. Pentru punctele din dreapta axei mediane a robotului s-au ales valori de corecție pozitive care fac ca robotul să se întoarcă spre stânga, și similar, dar opuse ca valoare, pentru semiplanul stâng când corecția conduce la o întoarcere spre dreapta. Punctelor ce se găsesc pe axul median li s-au atribuit valori pozitive ale corecției, dar la fel de bine acestea puteau fi negative.

Trebuie însă subliniat că aceste valori ale corecției (fie ele negative sau pozitive) sunt valori maxime. Este utilizată acum particularitatea stratului competitiv care păstrează valoarea de activare a celulei învingătoare. Astfel, nivelul de recunoaștere a clasei învingătoare va pondera valoarea corecției corespunzătoare, făcând ca aceasta să varieze între minimul zero (clasa nu a fost recunoscută) și maximul atribuit clasei respective (când nivelul de încredere al recunoașterii clasei respective este maxim).

Într-o manieră asemănătoare s-a procedat la stabilirea corecțiilor (ponderilor) pentru neuronii competitivi ai claselor superioare.

VII.1.2 Simulări

În prezenta secțiune se prezintă câteva dintre rezultatele obținute în urma simulării conducerii unui robot mobil cu agentul propus anterior. Robotul simulat are o formă circulară cu raza de 150mm și este un robot oonom. Viteza de deplasare a acestuia se consideră constantă, fiecare pas echivalând cu o deplasare de 10mm.

Ciclul simulării, a cărui organigramă este redată în figura 7.5, include: ⑤ procesarea informației senzoriale cu determinarea noii direcții de deplasare, ② întoarcerea spre noua direcție de deplasare, ③ emiterea unui impuls ultrasonic, ④ efectuarea unui pas și reluarea ciclului.

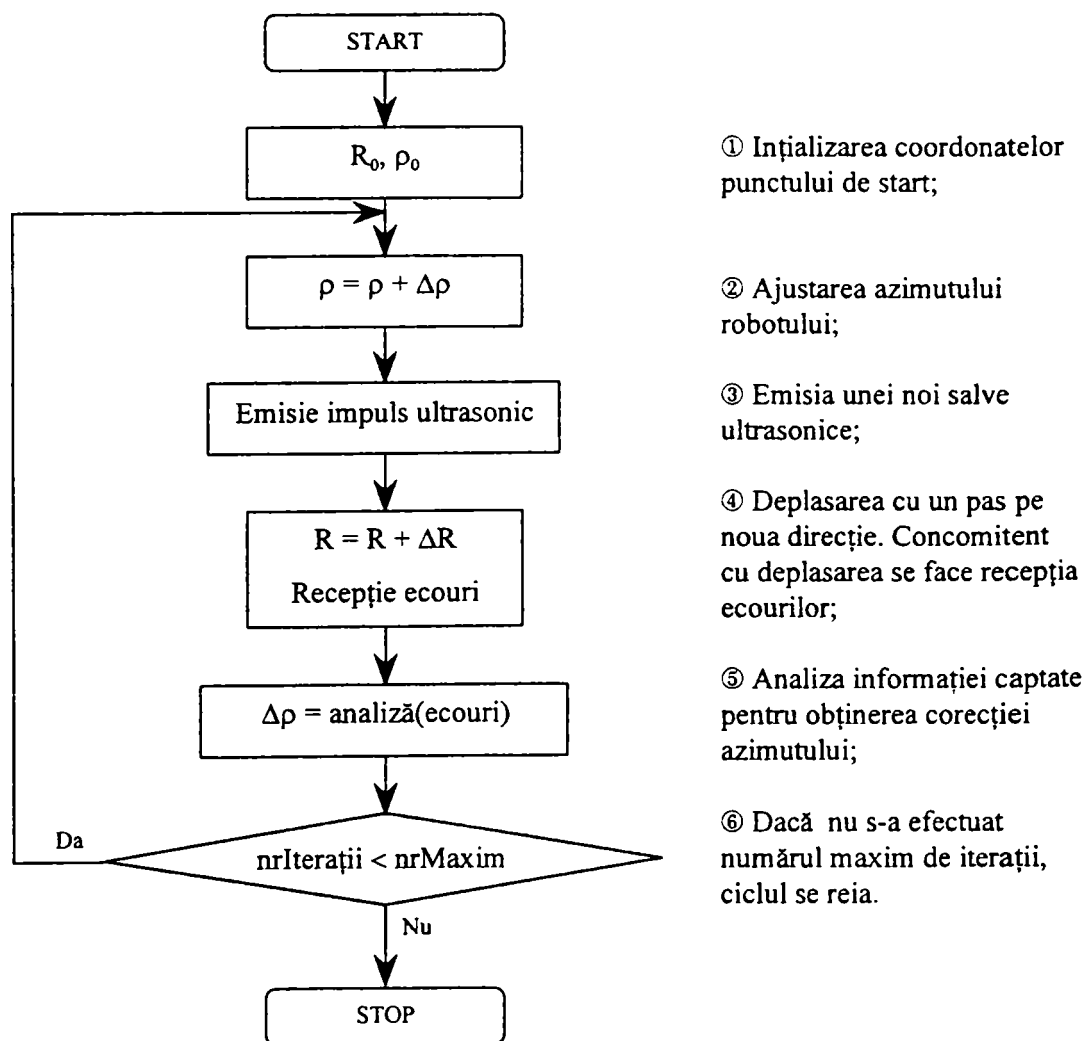


Figura 7.5 Organigrama ciclului simulării.

Ordinea acțiunilor a fost atent aleasă. Emiterea unui nou impuls se face abia după ce direcția de deplasare a fost corectată, eliminând prin aceasta distorsionarea direcției pe care ecourile sunt recepționate.

Se propune efectuarea deplasării în paralel cu recepția pentru a elimina întârzierea dată de timpul relativ lung (circa 8ms) pentru întoarcerea ecourilor. Deși pentru simulările ce urmează acest aspect nu este considerat, totuși într-un caz real este posibilă eliminarea erorii datorate deplasării robotului pe durata de întoarcere a ecourilor. Această compensare se poate face ușor, deoarece se poate cunoaște valoarea vitezei robotului, iar deplasarea se face pe direcția pe care sunt așteptate ecourile. Astfel, spre exemplu, pentru o deplasare cu o viteză de 1m/s în cele 8ms necesare și celor mai îndepărtate ecouri să se întoarcă la recepție, robotul străbate 8mm.

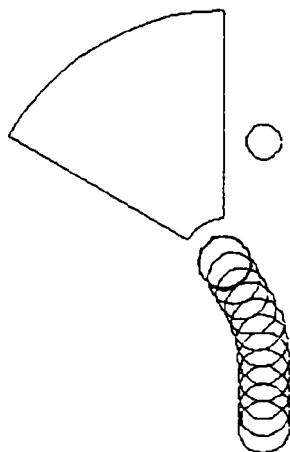


Figura 7.6 Traectoria robotului atunci când în fața acestuia se află un obstacol cilindric cu dimensiuni comparabile cu cele ale robotului.

O primă situație studiată este cea a unui mediu care prezintă un singur obstacol cilindric în calea robotului, iar dimensiunile acestuia sunt comparabile cu cele ale robotului. Traectoria pe care o urmează robotul într-un astfel de scenariu este prezentată în figura 7.6. Întrucât robotul a întâlnit frontal obstacolul și datorită valorilor corecțiilor traectoriei stabilite pentru prima clasă de neuroni a rețelei competitive (vezi figura 7.4) evitarea se face prin întoarcere la stânga.

Dacă în schimb, obstacolul cade inițial în partea stângă robotului, atunci acesta se întoarce spre dreapta pentru a efectua manevra de evitare. Pentru orice altă configurație a poziției inițiale a robotului mobil față de obstacol, comportamentul este asemănător. Robotul reușește întotdeauna să ocolească obstacolul.

Urmărind figura 7.6, se poate remarca că odată ce robotul și-a modificat suficient azimutul, încât obstacolul să nu mai cadă în interiorul zonei supravegheate, robotul își păstrează ultima direcție de deplasare. În absența detectării unor obstacole agentul *evită obstacolele* implementat, conservă direcția de deplasare.

Această observație este întărită dacă se studiază figura 7.7, unde se redă istoria azimutului robotului cu linie punctată pentru cazul obstacolului cilindric și cu linie continuă pentru cazul unui obstacol de tip perete. Urmărind linia punctată se constată că după pasul 123 azimutul robotului rămâne nemodificat, menținând ultima valoare.

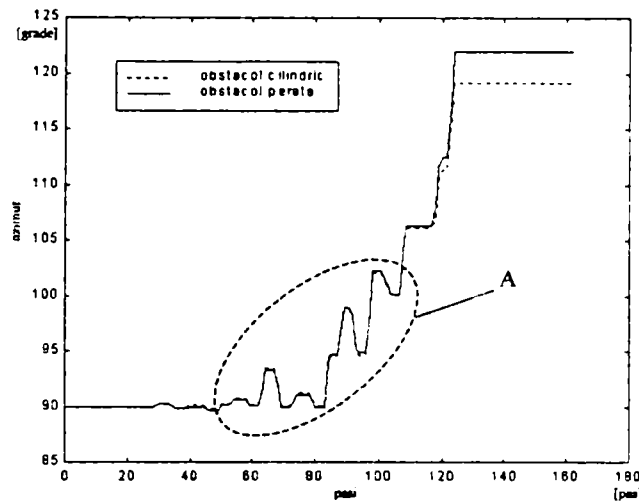


Figura 7.7 Istoria evoluției azimutului robotului pentru un obstacol cilindric (linie punctată) și pentru cazul unui obstacol perete (linie continuă).

Din aceeași figură 7.7 se mai poate desprinde însă încă un aspect. Deși tendința generală a azimutului este de creștere, adică de întoarcere spre stânga, există mici oscilații (zona A). Pentru anumite distanțe ale robotului relativ la obstacol, se activează neuroni ai primului strat care clasifică obstacolul ca fiind prezent în stânga robotului. Activarea acestor neuroni se face însă cu nivele de încredere scăzute și din acest motiv întoarcerile spre dreapta (scăderea valorii azimutului) sunt mai reduse ca valoare.

Amplitudinea oscilațiilor traiectoriei sunt dictate de configurația scenei. Pentru obstacole ce sunt întâlnite frontal, ca și în figura 7.6, acestea sunt maxime. Dar dacă obstacolul cade inițial într-o extremă a câmpului investigat, oscilațiile traiectoriei pe parcursul evitării acestuia sunt mici, sau chiar inexistente.

Oscilațiile pe parcursul corecției traiectoriei, dovedesc caracterul pur reactiv al agentului sintetizat. Ieșirea agentului reflectă condițiile momentane ale stimulilor senzoriali, fără a ține seama de valorile trecute. Un astfel de comportament, în care nu sunt luate în considerare stări anterioare ale ieșirilor agentului, este cunoscut în literatură sub denumirea de "comportament de pui de găină" [77]. Denumirea însăși accentuează incapacitatea de a învăța din propria experiență, cu alte cuvinte se subliniază lipsa oricărei componente memorative.

Adăugarea unei componente de memorare agentului, ar conduce la un răspuns mai întârziat (ar coti mai târziu), dar ar reduce sau chiar elimina oscilațiile direcției urmate de către robotul

mobil. Introducerea, însă, a unui astfel de caracter este discutabilă în cadrul paradigmei de control behavioriste.

O altă variantă studiată este aceea a unui obstacol perete, cu dimensiuni ce depășesc cu mult pe cele ale robotului. Comportarea agentului în fața acestui tip de obstacol este prezentată în figura 7.8, unde se constată că valoarea corecției azimutului nu este atât de puternică încât peretele să fie evitat de către robot. Acest comportament nu se datorează agentului *evită obstacolele* ci traductorilor ultrasonici modelați, ce au o deschidere a lobului de sensibilitate de numai 60 de grade.

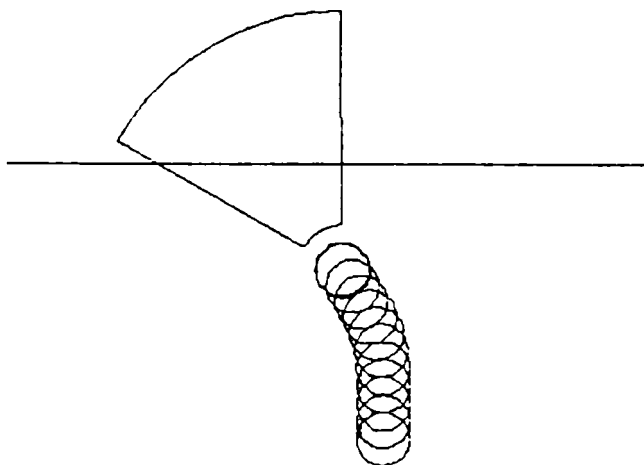


Figura 7.8. Traiectoria robotului atunci când în fața acestuia se află un obstacol perete cu dimensiuni mult mai mari decât cele ale robotului, având o suprafață netedă.

Dacă se revine la figura 7.7, se poate observa, urmărind de această dată linia continuă, că după pasul 127 punctul de reflexie al peretelui cade în afara zonei investigate de către robot. Se pierde astfel informația despre existența peretelui, condiții în care agentul implementat păstrează azimutul curent, deplasându-se înspre înainte.

Valoarea azimutului pentru care peretele scapă "atenției" robotului este de 122 de grade (vezi figura 7.7), valoare ce corespunde unui unghi incident de reflexie de 32 de grade. De la această valoare în sus, reflexia pe suprafața peretelui este totală, nemaexistând energie reflectată înapoi spre traductoarele robotului (vezi paragraful IV.3.2).

Rezolvarea acestei situații se face, evident, prin înlocuirea traductoarelor cu unele a cărei lob de sensibilitate să fie mult mai larg (peste 120 grade), astfel încât peretele să poată fi detectat și pentru unghiuri de incidență largi ai undei ultrasonice. O altă variantă ar fi utilizarea acelorași traductoare dar în configurația propusă în paragraful de concluzii VI.6.

Pentru a dovedi validitatea acestei afirmații s-a procedat la înlocuirea peretelui perfect neted cu unul "rugos", a cărui neregularități să întoarcă energie ultrasonică înapoi spre robot pentru orice unghi de incidență a câmpului ultrasonic.

Comportarea robotului într-un astfel de scenariu este prezentată în figura 7.9, în care peretele este obținut prin alăturarea unei succesiuni de 22 de obstacole cilindrice. De această dată agentul *evită obstacolele* reușește corecția azimutului robotului, astfel încât acesta să evite peretele.

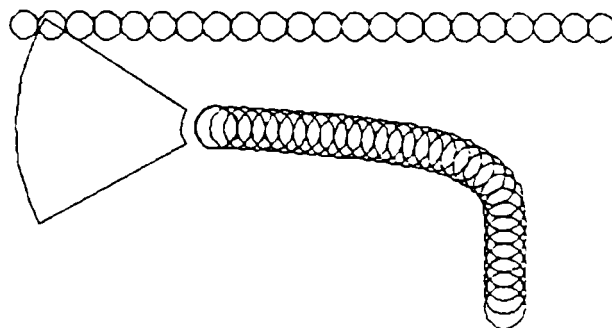


Figura 7.9. Traiectoria robotului atunci când în fața acestuia se află un obstacol perete cu dimensiuni mult mai mari decât cele ale robotului, având o suprafață neregulată.

Evoluția azimutului robotului pentru scenariul cu peretele rugos, evoluție prezentată în figura 7.10, demonstrează manevra de evitare. Robotul începe deplasarea cu un azimut de 90° , are în prima fază câteva oscilații nesigure dar apoi se întoarce consistent spre stânga. Dovada că robotul nu va ciocni acest perete este dată de valoarea azimutului la sfârșitul simulării, valoare ce converge la 180° . Robotul tinde deci spre o deplasare paralelă cu peretele.

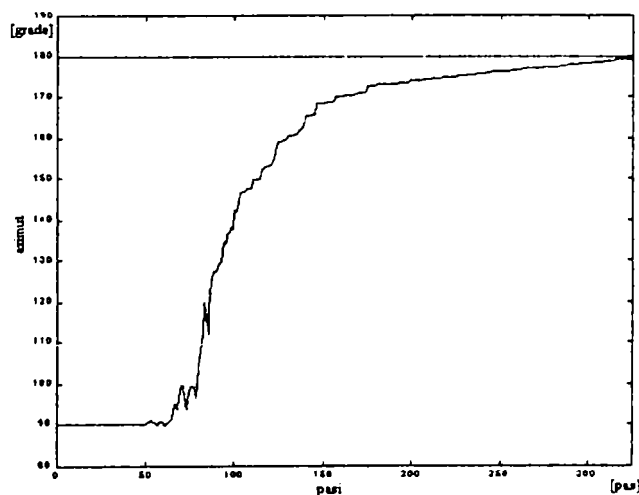


Figura 7.10. Evoluția azimutului robotului pentru cazul peretelui rugos. Valoarea finală a azimutului tinde la 180° de grade, iar robotul va evita peretele.

Revenind încă o dată la figura 7.7, se poate face totuși următoarea constatare ținând cont ca cele două variații au fost obținute plecând din aceeași configurație inițială pentru ambele scene (aceeași distanță inițială între robot și obstacolul cilindric, și respectiv între robot și perete). În cazul peretelui durata de corecție a azimutului este mai îndelungată pentru că

punctul de reflexie "alunecă" pe perete fiind mai mult timp "vizibil". Ca urmare, valoarea finală a azimutului robotului este mai mare pentru cazul peretelui. Încercări repetate au arătat însă că această valoare finală a azimutului după momentul în care peretele nu mai este detectat, depinde de valoarea pasului de deplasare a robotului. Diferența între valorile finale ale azimutului este însemnată în cazul unor pași mici (sub 5mm/pas), dar coboară spre zero pentru pași mari (peste 10mm/pas).

Această particularitate ar putea fi totuși exploatată. Considerând valoarea variației azimutului pentru un obstacol, se poate decide dacă acesta este un perete când variația azimutului depășește o anumită valoare, și deci, se poate face corecția corespunzătoare a direcției robotului.

O altă situație interesantă este cea cu două obstacole așezate simetric față de robotul mobil. Această situație prezintă interes deoarece sistemele clasice de detecție a obstacolelor care procesează informația de timp de zbor a impulsului ultrasonic nu sunt capabile să o detecteze [49] [84]. Acestea raportează în locul a două obstacole unul singur situat în fața robotului, la o distanță egală cu jumătatea perimetrului triunghiular format de obstacole și robot.

În plus, cu acest exemplu se demonstrează puterea de clasificare a rețelei competitive simple a agentului *evită obstacolele*. Se validează astfel algoritmul care a stat la baza alegerii ponderilor de intrare ale stratului competitiv. Astfel, dacă stratul corelator oferă suficientă informație, etajul competitiv poate fi astfel conceput încât să distingă forme din ce în ce mai complexe: perete (cu diferite orientări), obstacole de tip colț și chiar combinații ale acestora.

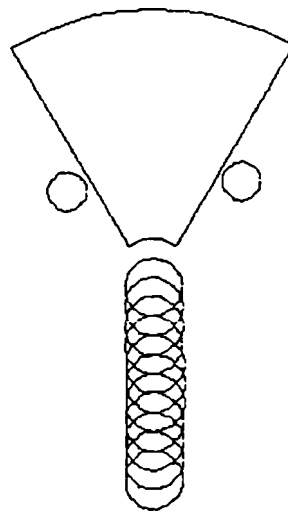


Figura 7.11. Scena și traiectoria urmată de robot pentru cazul a două obstacole cilindrice simetrice.

Figura 7.11 prezintă scena și traiectoria urmată de robot pentru cazul a două obstacole cilindrice simetrice. Robotul reușește să găsească o cale de acces printre cele două obstacole. Trebuie totuși menționat că de-a lungul traiectoriei, în cele mai multe situații este sesizat doar un obstacol. Din acest motiv variația azimutului robotului oscilează în jurul valorii de 90 de

grade ca în figura 7.12. Dar, atunci când ambele obstacole sunt sesizate simultan (cerculețele marchează această situație în figura 7.12), corecția azimutului este zero și nu o valoare oarecare, corespunzătoare unui obstacol fantomă din fața robotului.

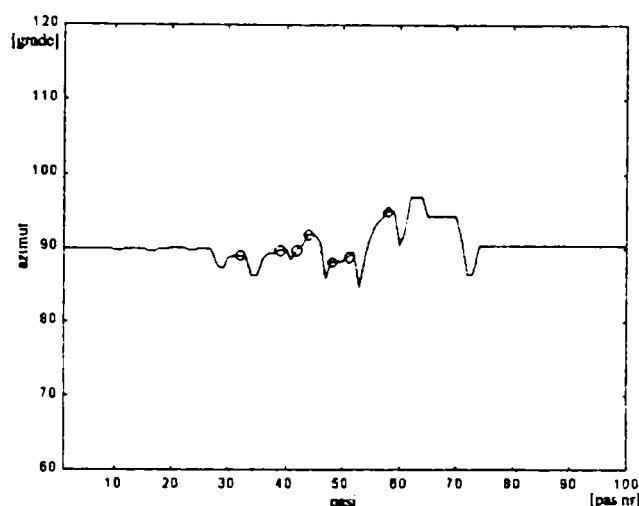


Figura 7.12. Istoria evoluției azimutului robotului pentru o scenă cu două obstacole cilindrice simetrice.

Dacă în fața unui robot controlat de agentul *evită obstacolele* propus se afla un colț de 90° a cărui laturi generează reflexii speculare, atunci comportarea acestuia este cea din figura 7.13.

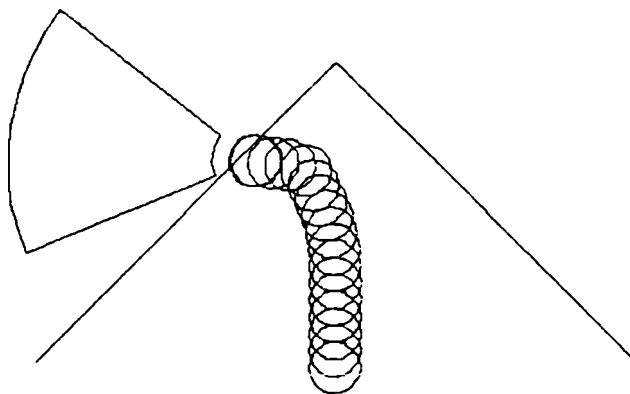


Figura 7.13 Comportarea agentului evită obstacolele în fața unui colț de 90° cu laturi netede.

Din păcate, colțul neted nu poate fi evitat. Întrucât laturile colțului fac un unghi de 45° cu axa mediană a sistemului de traductoare, adică un unghi mai mare decât limita superioară admisă de 30° , reflexiile generate sunt totale iar la recepție nu se înregistrează prezența laturilor colțului, pentru o poziție normală a robotului pe colț.

Dacă laturile colțului nu sunt sesizate, robotul va percepe în schimb vârful acestuia și încearcă să-l ocolească. Cum vârful este situat, pentru această situație particulară, pe mediana

sistemului de traductoare corecția direcției va fi înspre stânga. Dar întorcându-se spre stânga, la un moment dat latura stângă a colțului va deveni “vizibilă”. Acesta din urmă va genera un punct de reflexie ce apare în stânga robotului și deci va încerca să întoarcă robotul înspre dreapta. Robotul va urma o traiectorie cu oscilații (zona A, vezi figura 7.14) până când apropiind-se atât de mult de vârful colțului acesta va genera o corecție atât de puternică de întoarcere spre stânga încât și reflexia laturii stângi va fi percepută ca fiind în dreapta robotului. Având acum, ambele puncte de reflexie în dreapta sa, robotul se va întoarce din ce în ce mai mult spre stânga intersectând latura stângă a colțului.

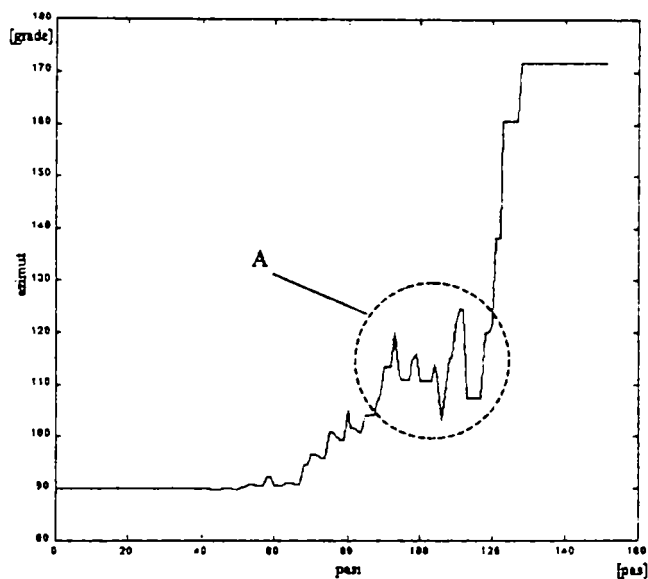


Figura 7.14 Evoluția azimutului robotului pentru o scenă cu un colț, ca cea din figura 7.13

Dacă în schimb pereții colțului nu sunt netezi ci rugoși, iar reflexiile generate sunt difuze, atunci robotul reușește să evite colțul, ca în figura 7.15. Întoarcerea robotului se face spre stânga datorită valorilor pozitive a corecție azimutului atribuite pentru neuronii de pe axa mediană a sistemului de traductoare (vezi figura 7.4). Astfel “balanța” corecțiilor este înclinată, favorizând întoarcerile spre stânga.

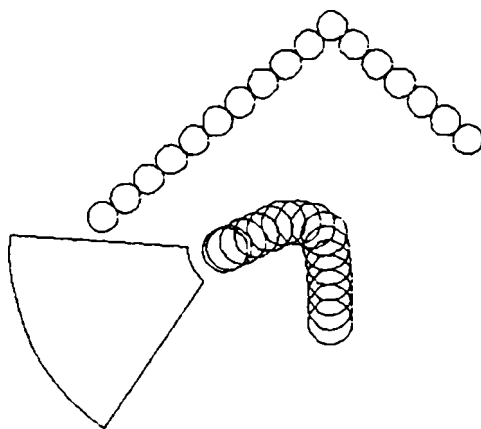


Figura 7.15 Comportarea agentului evită obstacolele în fața unui colț de 90° cu laturi rugoase.

Iată prezentat în figura 7.16 ce se întâmplă dacă în fața unui robot condus cu agentul *evită obstacolele* propus apare un vârf. Pentru această formă particulară de obstacol va fi sesizat pentru început doar un singur punct, anume chiar vârful acesteia. Comportarea robotului va fi deci asemănătoare cazului unei scene cu un obstacol singular.

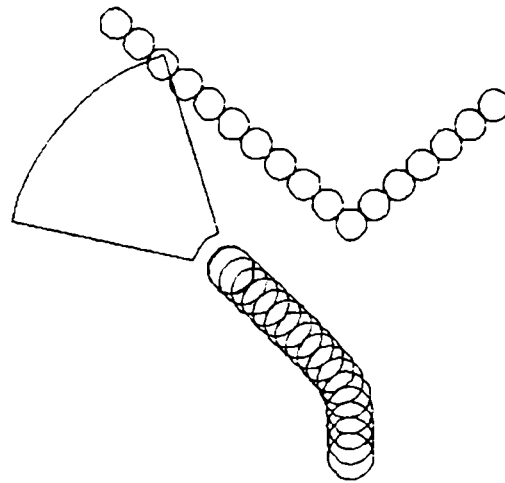


Figura 7.16 Traiectoria robotului atunci când în fața acestuia se află un obstacol de tip vârf cu laturi rugoase.

Evoluția robotului mobil guvernat de agentul *evită obstacolele* într-un mediu complex populat cu o serie de obiecte este asemănătoare cazurilor particulare studiate. Având drept unic controller agentul *evită obstacolele*, mișcarea se continuă la nesfârșit fără un țel anume, decât acela de a "vizita" (figura 7.17).

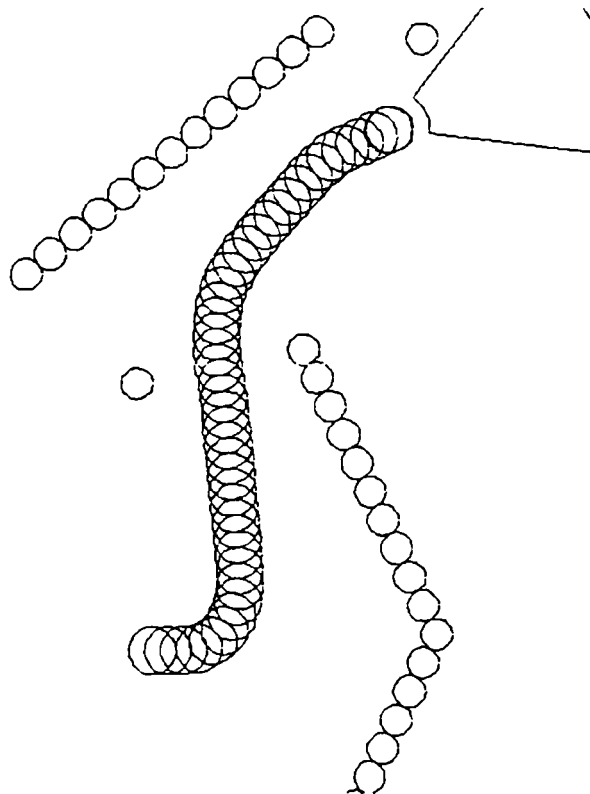


Figura 7.17 Evoluția robotului într-un mediu oarecare (care oferă o multitudine de puncte de reflexie).

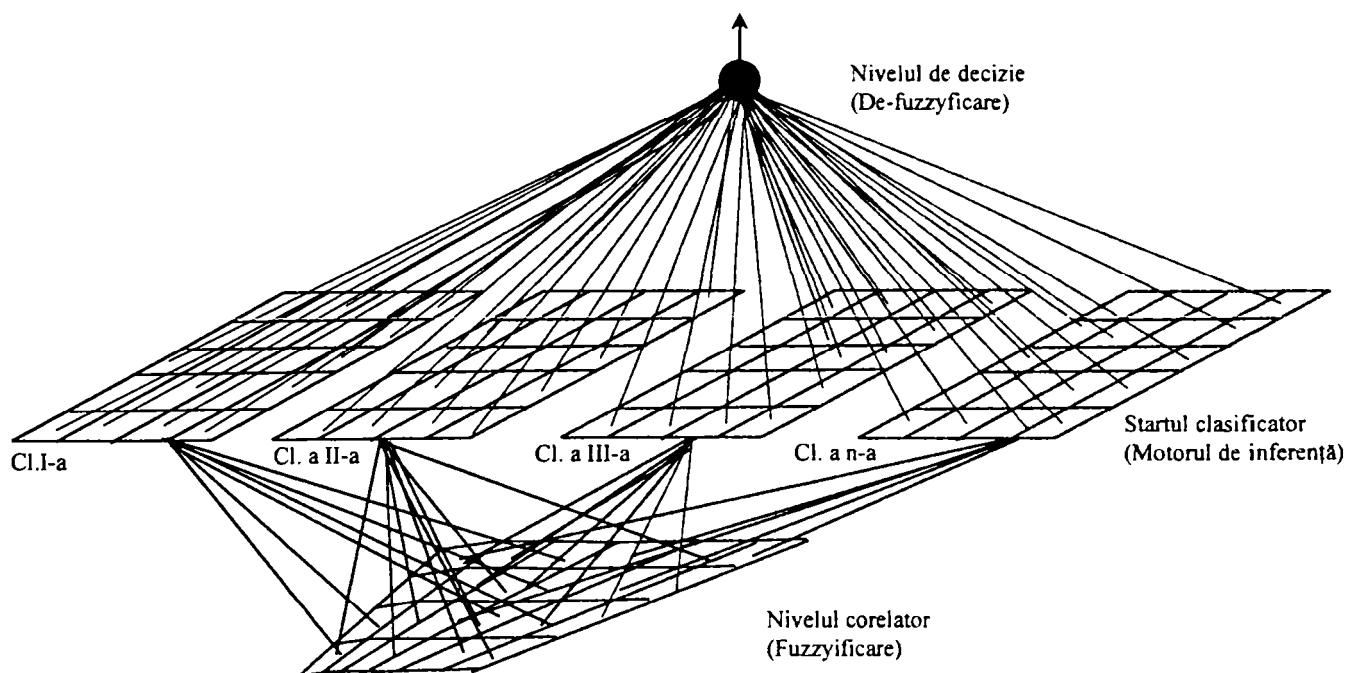
VII.2 Concluzii

Capitolul VII prezintă un model de implementare a unui agent *evită obstacolele* ca parte componentă a unui posibil sistem de conducere reactiv al unui robot mobil autonom. Acest agent este o primă posibilă aplicație a holografie acustice în impuls bidimensională bitractor introdusă în capitolul VI.

Agentul *evită obstacolele* a fost implementat cu rețele neuronale, deoarece această paradigmă de control poate face față unei game largi de situații, fără a avea nevoie de un model explicit al mediului.

Există în literatură și alte abordări ale subiectului evitării obstacolelor, având ca sursă de informație senzorii ultrasonici. Principiul este comun, pe baza citirilor senzorilor ultrasonici se calculează componenta repulsivă care respinge robotul în apropierea obstacolelor [49] [64] [76] [82] [88]. Ideile propuse în prezenta teză (capitolul VI și VII) diferă însă prin modul de înregistrare a câmpului ultrasonic precum și prin modul de procesare a informației înregistrate, acesta făcându-se exclusiv cu rețele neuronale.

Agentul *evită obstacolele* propus conține 3 niveluri, fiecare din acestea cu un rol bine conturat (vezi figura 7.18). Primul nivel este cel al rețelei neuronale care procesează informația senzorială recepționată. Modul de înregistrare a ecoului ultrasonic precum și modul de prelucrare a informației de către acest prim strat sunt redată în capitolul VI. Ieșirea acestui strat oferă o estimare, prin nivelele de activare a neuronilor săi, a poziției punctelor de reflexie din interiorul câmpului supravegheat de către robot.



Figuar 7.18 Structura agentului *evită obstacolele*.

Este rândul stratului următor să preia punctele de reflexie și să alcătuiască o clasificare și în același timp, o identificare a formei scenei din fața robotului. Acest al doilea nivel este implementat cu ajutorul unei rețele competitive simple. S-a prezentat de asemenea concepția unui algoritm de construcție a rețelei competitive și de atribuire a ponderilor neuronilor săi, astfel încât aceasta să fie capabilă să clasifice forme din ce în ce mai complicate.

Peste primele niveluri se suprapune un al treilea care decide corecția azimutului robotului funcție de situația decelată de stratul competitiv. În fapt, acest al treilea strat este un simplu neuron cu funcție de activare liniară, a cărui ponderi au fost astfel alese încât să reflecte pentru fiecare intrare activată valoarea corecției dorite.

S-ar putea imagina pentru acest ultim strat un controller mai complicat. Ar putea fi conceput spre exemplu un controler fuzzy care ar putea fi la fel de ușor acordat, dar care este mai complicat decât un simplu perceptron. S-a dovedit însă, prin simulări, că deși foarte simplu acest strat oferă rezultate bune.

Se poate face o paralelă între structura cu trei straturi a agentului *evită obstacolele* și un controller fuzzy. Primul strat, care analizează informația senzorială, este echivalent cu etapa de fuzzyficare. Stratul al doilea implementează motorul de inferență (baza de reguli), iar cel de al treilea strat este echivalent procesului de de-fuzzyficare.

Așa după cum s-a putut vedea în capitolul VII.1.2, agentul *evită obstacolele* prezentat reușește ocolirea obiectelor izolate a căror dimensiuni sunt comparabile cu cele ale robotului precum și a acelor care prezintă suprafețe neregulate.

În schimb, obstacolele cu suprafețe netede largi (un perete neted spre exemplu) care se comportă ca și oglinzi perfecte pentru unda ultrasonică, nu pot fi ocolite. Incapacitatea de a evita un perete neted se datorează nesensibilității acestuia peste o anumită limită și nu unei deficiențe de control din partea agentului propus. Soluția pentru rezolvarea acestei situații este utilizarea unor traductoare ultrasonice cu o caracteristică de directivitate mult mai largă care să permită colectarea informației din mediu de pe un front cât mai larg.

Caracterul ușor oscilator al corecției traiectoriei, observat în figurile 7.7, 7.12 și 7.14, se datorează caracterului pur reactiv al agentului implementat. Corecția sugerată la un moment dat depinde numai de stimulii senzoriali momentani. Introducerea unui filtru poate corecta acest comportament, dar utilizarea unei componente de memorare nu este proprie sistemelor pur reactive.

Într-o situație reală, agentului *evită obstacolele* prezentat i se pot alătura și alți agenți, formând un sistem de conducere reactiv complex. La ieșirea acestuia se poate adăuga un controller fuzzy care luând în considerare vectorul viteză momentană, vectorul viteză pentru momentul următor și caracteristicile dinamice ale robotului să furnizeze la ieșirea sa comenzile necesare sistemului de deplasare.

Capitolul VII. Aplicații ale holografiei acustice în impuls bidirecțională bitractor

Pe lângă aplicația anterior prezentată, cea a agentului *evită obstacolele*, holografia acustică în impuls bidirecțională bitractor mai poate avea și alte utilizări. Spre exemplu se poate ridica o hartă a mediului dacă se mediază poziția punctelor de reflexie găsite. Se va obține astfel o estimare a conturului mediului văzut din unghiul de investigare a robotului. Precizia cu care se obține poziția punctelor de reflexie este de circa 20-25 de milimetrii.

Memorând doar coordonatele mediate ale punctelor de reflexie întâlnite, se va obține o reprezentare care utilizează un spațiu mai restrâns de memorare decât dacă s-ar memora starea de ocupare a mediului divizat în celule ca în [49].

De asemenea rezultatele schemei perceptuale constituită din perceptronul corelator, ar mai putea fi utilizate pentru estimarea mișcării obiectelor din mediu. Prin compararea pozițiilor succesive ale aceluiași punct de reflexie ce a fost recunoscut cu un grad mare de încredere se poate estima direcția și sensul deplasării obiectului ce a generat ecoul. Mențiunea care trebuie făcută aici este că această aplicație presupune detectarea doar a unui singur obstacol la un moment dat, anume cel al cărui deplasare este monitorizată. Deși această condiție pare restrictivă, ea poate fi satisfăcută restrângând zona din mediu investigată, prin aplicarea unei ferestre de căutare.

VIII. Contribuții

Așa cum s-a putut vedea, din prezentarea făcută în această teză, domeniul roboților mobili ridică o problemă diversă și bogată, navigația autonomă cu evitarea obstacolelor reprezentând una dintre cele mai importante teme abordate în domeniu. Pornind de la această constatare, în prezenta teză s-a urmărit implementarea unui *agent*, anume un *agent evită obstacolele*, cu un comportament reactiv. Acesta poate fi cu ușurință inclus într-un robot mobil capabil să navigheze autonom într-un mediu nestructurat și cu obstacole, folosind în acest scop exclusiv informația furnizată de un număr redus de senzori ultrasonici.

Teza tratează și soluționează complet această problemă, începând cu optimizarea regimului de lucru al transductoarelor ultrasonice, procesarea după metode originale a informației achiziționate și terminând cu implementarea unui controller pentru corecția azimutului. Este de menționat că pentru prelucrarea informației în diferitele etape, cu scop de decizie și comandă, au fost în permanență avute în vedere rețelele neuronale artificiale, datorită potențialului ridicat pe care acestea îl prezintă sub aspectul generalizării, operării cu date inconsistente sau afectate de zgomote și nu în ultimul rând datorită vitezei mari de procesare.

Pe parcursul cercetării au fost aduse o serie de contribuții originale, unele cu caracter teoretic iar altele cu caracter aplicativ.

Dintre contribuțiile teoretice se menționează, în ordinea importanței, următoarele:

1. Elaborarea unei metode originale de detecție cu ultrasunete a obstacolelor, denumită aici „*Holografie acustică în impuls bidirecțională bitractor*”, datorită asemănării, sub multiple aspecte, cu holografia acustică în impuls tradițională. Contribuția de esență în legătură cu acest nou procedeu o constituie elaborarea unui algoritm original de prelucrare cu rețele neuronale a ecourilor ultrasonice achiziționate cu două transductoare receptoare fixe, în scopul evitării calculelor complicate pe care le implică metoda clasică a holografiei acustice în impuls și a reducerii complexității circuitelor utilizate. Mai mult decât atât, metoda nou propusă nu numai că simplifică calculele și prin aceasta scurtează durata lor de execuție, dar fiind implementată cu rețele neuronale care prezintă, așa cum este cunoscut, o viteză de procesare ridicată, poate asigura funcționarea în timp real a întregului sistem.

În contrast cu metodele de detecție cu ultrasunete a obstacolelor, cunoscute în literatură și pentru care evitarea ecourilor multiple constituie o problemă greu de soluționat, metoda propusă în teză, dimpotrivă, exploatează informația conținută în aceste ecouri, fapt ce îi conferă mai multă generalitate și robustețe în luarea unor decizii corecte. Este remarcabil, de asemenea faptul că “imaginea” mediului din fața robotului este *captată printr-o singură scanare*, acesta fiind un al doilea avantaj major al tehnicii nou propuse.

2. În dezvoltarea procedurii de investigare ultrasonică menționat mai sus a fost necesară, la un moment dat, definirea unei noi noțiuni, aceea de *puncte de eșantionare spațială*. Aceste puncte au proprietatea notabilă de a putea fi recunoscute în mod unic de către tehnica de investigare propusă. Trăsăturile mediului din fața robotului sunt cu atât mai corect sesizate, cu cât acestea se suprapun mai bine peste poziția punctelor de eșantionare spațială.

Fiecărui punct de eșantionare spațială i s-a atribuit câte un neuron dintr-o rețea perceptron simplu. Acest perceptron memorează, prin valorile ponderilor sale, tiparul pozițiilor punctelor de eșantionare spațială relativ la robot. Pe de altă parte, nivelul de activare al neuronilor perceptronului va reprezenta gradul de încredere cu care respectivele puncte au fost reconstruite în imaginea ultrasonică captată. Se obține astfel o imagine a conturului unei secțiuni în plan orizontal a mediului din fața robotului, la nivelul sistemului de traductoare.

În paragraful VI.4, pe baza unui studiu al rezoluției spațiale, se propune un *procedeu de căutare a punctelor de eșantionare spațială* în mediul în care evoluează robotul, în funcție de durata impulsurilor ultrasonice pe care sistemul de traductoare este capabil să le prelucreze.

3. În teză se propune o structură de *agent evită obstacolele*, organizată pe 3 niveluri și care prezintă ca element de originalitate modul în care este repartizată și realizată prelucrarea informației pe diferitele straturi. Primul strat generează, așa cum s-a arătat mai sus, o imagine ultrasonică a mediului în care evoluează robotul, în timp ce stratul al doilea are rolul de a clasifica situațiile în care se poate afla acesta din urmă. În acest scop, se propune în teză un *motor de clasificare*, constând în esență dintr-o rețea neuronală competitivă simplă, precum și *algoritmul de alegere a ponderilor* acestei rețele.

Ultimul strat corespunde *nivelului de decizie*. Dintre mai multe opțiuni disponibile s-a optat în cele din urmă pentru alternativa cea mai simplă, construind acest nivel dintr-un singur neuron. Pe baza situațiilor identificate de nivelul intermediar, clasificator, neuronul de decizie va furniza, dependent de ponderile sale, valoarea corecției azimutului direcției de deplasare. Motivațiile alegerii făcute, împreună cu modalitatea de stabilire a ponderilor neuronului de decizie sunt prezentate în detaliu în paragraful VII.1.1.B, toate acestea constituind contribuții ale autorului.

În fine, este interesant de remarcat faptul că se poate face o paralelă între structura cu trei straturi a agentului *evită obstacolele*, prezentată succint mai sus, și un controller fuzzy. Primul strat, care analizează informația senzorială, este echivalent cu etapa de fuzzyficare. Stratul al doilea implementează motorul de inferență (baza de reguli), iar cel de al treilea strat este echivalent procesului de de-fuzzyficare.

Ideea elaborării unei soluții complete de *agent evită obstacolele*, ce stă la baza acestei teze, a condus în mod firesc și la o serie de contribuții cu caracter aplicativ. Dintre acestea se menționează următoarele, ca fiind mai importante:

1. Contribuții legate de optimizarea funcționării transductorului emițător, cu scopul reducerii duratei impulsului emis și a îmbunătățirii pe această cale a rezoluției. Pe baza unui studiu a proceselor ce au loc în transductorul ultrasonic, în teză se propune o formă de undă de comandă care permite scurtarea impulsurilor ultrasonice emise de până la 4-5 ori. Subiectul este tratat pe larg în paragraful V.3. Metoda de excitare propusă permite obținerea unor rezoluții spațiale acceptabile chiar și în condițiile utilizării unor transductoare de bandă relativ îngustă.
2. În scopul îmbunătățirii în continuare a rezoluției spațiale, au fost analizate fenomenele ce au loc în transductoarele ultrasonice receptoare. S-a constatat că printr-o alegere potrivită a rezistenței de sarcină a transductorului, energia receptată de acestea este mai rapid disipată. Se obțin astfel impulsuri mai scurte la recepție.

În paragraful V.4 sunt prezentate considerentele ce stau la baza alegerii rezistenței de sarcină și care au în vedere scurtarea duratei impulsurilor cu o diminuare acceptabilă a amplitudinii acestora.

Eficiența totală, a celor două metode, conduce la o reducere de până la 10 ori a duratei impulsurilor ce pot fi reproduse, chiar dacă transductoarele sunt de bandă relativ îngustă.

3. Pe parcursul experimentelor efectuate pentru optimizarea duratei impulsurilor ultrasonice recepționate s-a observat un fenomen particular, care nu este menționat în literatura de specialitate studiată.

Este vorba de așa numitul fenomen de *zonă de umbră*. A fost astfel denumit, deoarece amplitudinea ecourilor ultrasonice obținute pentru obstacole situate în interiorul unei anumite zone circulare, relativ la transductoarele ultrasonice, au o amplitudine mai mică decât cele rezultate ca urmare a atenuării la deplasarea prin aer a acestora. Aparent obiectele din interiorul acestei zone sunt “umbrite”, fiind sesizate mai greu.

Explicația fenomenului rezidă în aceea că în fața transductorului receptor are loc compunerea a două fronturi de undă, unul reflectat de pe suprafața obstacolului și un al doilea ce vine pe un drum ocolit de la emițător. Pentru anumite configurații geometrice particulare aceste două fronturi se atenuază reciproc, rezultând un ecou

mult atenuat la recepție. Acest fenomen este prezentat în amănunțime în subcapitolul IV.3.5.

4. O contribuție aplicativă majoră o constituie soluția propusă în teză pentru sistemul de transductoare ultrasonice. Din studiul literaturii s-a putut concluziona că tehnica de ghidare a impulsului ultrasonic prin controlul momentelor emisiei/recepției, așa numita lentilă ultrasonică (vezi paragraful IV.5), are rezultate notabile. În plus, tehnica holografiei acustice în impuls (vezi paragraful IV.6.2.3) ar deveni foarte atractivă dacă s-ar soluționa problema calculelor laborioase cerute de aceasta. Păstrând aceste idei s-a căutat un senzor cu cel mai mic număr de transductoare posibile. S-a ajuns astfel la structura sistemului de transductoare descris în paragraful VI.2. Este o structură ce conține *numărul minim de transductoare posibil, un emițător și două receptoare*. Acestea din urmă sunt dispuse simetric la dreapta și la stânga transductorului emițător. O reducere în continuare a numărului de transductoare ar conduce la pierderea unui element important de informație, și anume *informația biaurală*.

Pentru senzorul propus în paragraful VI.2 întârzierea cu care se întorc ecourile ultrasonice poartă informație despre distanța până la obstacole iar informația interaurală se traduce în valoare a azimutului obstacolului care a generat ecoul, raportat la poziția traductoarelor. Soluția pare firească dacă se are în vedere ecolocatorul liliacului, care are la bază un principiu similar de funcționare [174] [175] [227].

Pe parcursul paragrafelor VI.1 și VI.2 se prezintă pe larg ideile care au condus la această soluție, iar rezultatele obținute dovedesc suficiența acestui sistem senzorial.

5. În final, pentru a valida ideile propuse în această teză s-a construit un mediu de simulare. A fost conceput și realizat având ca platformă pachetul MATLAB, un mediu de simulare pentru conducerea roboților mobili dotați cu traductoare ultrasonice. Mediul poate reproduce condiții reale, cu impunerea unui număr cât mai mic de restricții. Rezultatele prezentate în paragraful VII.1.2 au fost obținute utilizând acest mediu.

Agentul evită obstacolele conceput, dovedește prin simulările efectuate validitatea ideilor propuse. Nu poate însă compensa deficiențele traductoarelor ultrasonice modelate, care au un lob de sensibilitate cu o deschidere mică (de doar 60 de grade). Din acest motiv suprafețele netede largi ce generează reflexii speculare sunt mai greu de detectat și urmărit, prezentând un grad ridicat de risc la coliziuni.

Atâta timp cât mediul conține suficiente puncte de reflexie (pereți rugoși ce generează reflexii difuze), agentul propus pentru evitarea obstacolele este capabil să extragă suficientă informație din ecourile ultrasonice încât să poată să se deplaseze liber și în cele mai complicate medii.

Într-o situație reală, *agentului evită obstacolele* prezentat i se pot alătura și alți agenți, formând un sistem de conducere reactiv complex. La ieșirea acestuia se poate adăuga un controller fuzzy care luând în considerare: vectorul viteză momentană, vectorul viteză pentru momentul următor și caracteristicile dinamice ale robotului; să furnizeze la ieșirea sa comenzile necesare sistemului de deplasare.

Bibliografie

- [1] Y.Juergen Ackermann, G.Hirzinger . *Institute for robotics and system dynamics*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1996
- [2] B.Smallridge. *Amateur Robotics: A true story*. IEEE Magazine on Robotics and Automation Sept. 1994.
- [3] R.D.Schraft. *Mechatronics and robotics for service applications*. IEEE Magazine on Robotics and Automation Dec. 1994.
- [4] C.R.Weisbin, D.Lavery. *NASA rover and telerobotics technology program*. IEEE Magazine on Robotics and Automation Dec. 1994.
- [5] Y.F.Zheng, X.Yun. *Introduction to the special issue on mobile robots*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1995.
- [6] E. Byler, W. Chun. *Autonomus hazardous waste drum inspection vehicle*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1995.
- [7] J. S.Bay. *Desygn of the " Army - Ant " cooperative lifting robot*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1995.
- [8] S.K.Choi, J.Yuh. *Development of the omni-directional intelligent navigator*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1995.
- [9] J.H.Ko, W.J.Kim. *A method of acoustic landmark extraction for mobilr robot navigation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1996.
- [10] G.Campion, G.Bastin, B.D'Andrea-Novel. *Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1996.
- [11] B.Thuilot, B.D'Andrea-Novel. *Modeling and feedback control of mobile robots equipped with several steering wheels*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1996.
- [12] F.G.Pin, S.M.Killough. *A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1994.
- [13] S.Fleury, P.Soueres. *Primitives for smoothing mobile robot trajectories*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1995.
- [14] J.P.Laumond, P.E.Jacobs. *A motion planner for nonholonomic mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1994.
- [15] Y.Yagi, S.Kawato. *Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for Vision-guided navigation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1994.
- [16] S.Negahdaripour, B.Y.Hayashi. *Direct motion stereo for passive navigation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1995.
- [17] R.Andrew Russell. *Laying and sensing odor markings as a strategy for assisting mobilr robot navigation tasks*. IEEE Magazine on Robotics and Automation Sept. 1995.
- [18] F.Stein, G.Mediomi. *Map-based localization using the panoramic horizon*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1995.
- [19] H.Schempf, B.Chemel. *Neptune: above - ground storage tank inspection robot system*. IEEE Magazine on Robotics and Automation June 1995.

- [20] W.Oelen, B. Harry. Hybrid stabilizing control on a real mobile robot. IEEE Magazine on Robotics and Automation June 1995.
- [21] F.G.Pin, J.C.Culioli, D.B.Reister. *Using minimax approaches to plan optimal task commutation configuration for combined mobile platform-manipulator systems*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1994.
- [22] A.Blake, G.Hamid, L.Tarassenko. *A design for a visual motion transducer*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1995.
- [23] Z.Zagi, Z.Nishizawa. *Map-based navigation for a mobile robot with onidirectional image sensor*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1995.
- [24] J.Guldner, V.I.Utkin. *Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr. 1995.
- [25] J. Borenstein. *Control and kinematic design of multi-degree-of-freedom mobile robots with compliant linkage*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1995.
- [26] H.Ishihara, F.Arai. *Micro mechatronics and micro actuators*. IEEE Transactions on Mechatronics March 1996.
- [27] A. Zelinsky. *A mobile robot exploration algorithm*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1992.
- [28] B.Barshan, H.F.Durrant-Whyte. *Inertial navigation systems for mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1995.
- [29] H.Schneiderman. *A discriminating feature tracker for vision-based autonomous driving*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1994.
- [30] D.Lange, J.K.Rosenblatt, M.Heber. *A behavior-based system for off-road navigation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1994.
- [31] K.Fujimura. *Path planning with multiple objectives*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1996.
- [32] D.B.reister, M.A.Unseren. *Position and constraint force control of a vehicle with two or more steerable drive wheels*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1993.
- [33] O.J.sordalen, C. Canudas de Wit. *Exponential control law for a mobile robot: extension to path following*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1993.
- [34] R.E.Suoarsa. *A parallel implementation of a multisensor feature-based range-estimation method*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1994.
- [35] X.Lebegue, JK.Aggarwal. *Significant line segments for an indoor mobile robot*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1993.
- [36] R.Schuster, N.Ansari, A.B.Hashemi. *Steering a robot with vanishing points*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1993.
- [37] S.Atiya, G.D.Hager. *Real-time vision-based robot localization*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1993.
- [38] G.Schweitzer. *Mechatronics for the design of human-oriented machines*. IEEE Transactions on Mechatronics June 1996.
- [39] R.C.Luo. *Sensor Technologies and microsensor issues for mechatronics systems*. IEEE Transactions on Mechatronics March 1996.
- [40] K.C.Fan, P.C.Lui. *Solving find path problem in mapped environments using modified A* algorithm*. TSMC Sept. 1994.
- [41] J.Y.Shieh, H.Zhuang, R.Sudhakar. *Motion estimation from a sequence of stereo images: a direct method*. TSMC Dec. 1995.
- [42] B.Volpel, W.M.Theimer. *Localization uncertainty in area-based stereo algorithms*. TSMC Dec. 1995.
- [43] S.B.Skaar, I.Y.Mooshabad, W.Brockman. *Nonholonomic camera-space manipulation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug. 1992.
- [44] O.Partaatmadja, B.Benhabib. *An electrooptical orientation sensor for robotics*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1992.
- [45] R.Sharma. *Locally efficient path planning in an uncertain dynamic environment using propabilistic model*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1992.
- [46] Y.K.Hwang, N.Ahuja. *A potential field approach to path planning*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1992.
- [47] R.Talluri, J.K.Aggarwal. *Position estimation for an autonomus mobile robot in an outdoor environment*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1992.

- [48] E.Rimon, D.E.Koditschek. *Exact robot navigation using artificial potential functions*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1992.
- [49] J.Borenstein, Y.Koren. *Historgramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1991.
- [50] Emil. M. Petriu. *Automated guided vehicle with absolute encoded guide-path*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1991.
- [51] J.J.Leonard, H.F.Durrant-Whyte. *Mobile robot localization by tracking geometric beacons*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1991.
- [52] N.S.V.Rao, N.stoltzfus, S.S.Iyengar. *A " Retraction " method for learned navigation in unknown terrains for a circular robot*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1991.
- [53] V.J.Lumelsky. *A comparative study on the path length performance of maze-erching and robot motion planning algorithms*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1991.
- [54] Z.Shiller, Y.R.Gwo. *Dynamic motion planning of autonomus vehicles*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr. 1991.
- [55] J.C.Ingemar. *Blanche - An experiment in guidance and navigation of an autonomus robot vehicle*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr. 1991.
- [56] D.Zhu, J.C.Latombe. *New heuristic algorithms for efficient hierarchical path lanning*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1991.
- [57] R.Talluri. *Mobile robot self-location using model-image feature correspondence*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1996.
- [58] R.C.Arkin, D.Mackenzie. *Temporal coordination of perceptual algorithms for mobile robot navigation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1994.
- [59] A.Basu. *Active calibration of cameras: theory and implementation*. TSMC Feb. 1995.
- [60] J. Forsberg. *Mobile robot navigation using the Range-Weighted Hough transform*. IEEE Magazine on Robotics and Automation March 1995.
- [61] G. S. Chirikjian, J.W. Burdick. *The kinematics of hyper-redundant robot locomotion*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1995.
- [62] G. S. Chirikjian, J.W. Burdick. *Kinematically optimal hyper-redundant manipulator configurations*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1995.
- [63] T. Botos. *Solutii cunoscute privind conducerea robotilor mobili autonomi*. Universitatea Tehnica Timisoara. Facultatea de Electronica si telecomunicatii. Referat nr. 1 1997.
- [64] Network. H.R.Beom, H.S.Cho. *A Sensor Obstacle Avoidance Controller for a Mobile Robot Using Fuzzy Logic and Neural*. www
- [65] Esfandiari Sorouchyari. *Mobile Robot Navigation a Neural Network Approach*. www
- [66] Marco Domingo,Vitorio Maniezzo and Alberto Colorni. *Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Febr.1996.
- [67] Keigo Watanabe, Jun Tang, Masatoshi Nakamura, Shinji Koga, Toshio Fukuda. *A Fuzzy Neural Network and Application to Mobile robot control*. IEEE Transactions on Control System Technology March.1996.
- [68] W.G.McMullan,B.A.Delanghe and J.S.Bird. *A Simple Rising-Edge Detector for Time-of-Arrival Estimation*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Aug. 1996.
- [69] Frédéric Ossant, Gérard Poison, Louis P.Tran-Huu-Hue. *Airborne Ultrasonic Imaging System for Parallelepipedic Object Localization*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Febr.1996.
- [70] Eduardo Oliveira Freire, Teodiano Freire Bastos and all. *Performance Inprovement of A Mobile Robot Navigation System Through Ultrasonic Sensor Agents..* www
- [71] Alessio Carullo, Franco Ferraris, Salvatore Graziani, Ugo Grimaldi and Marco Parvis. *Ultrasonic Distance Sensor Using a Two-Level Neural Network*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Apr.1996.
- [72] Sumio Watanabe,Masahibe Yoneyama. *An Ultrasonic Visual Sensor for Three-Dimensional Object Recognition Using Neural Networks*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr.1992.
- [73] Yao Zhang, Pratyush Sen and Grant E.Hearn. *An On-Line Trained Adaptive Neural Controller*. IEEE Control Systems Oct.1995.
- [74] Min Meng, A.C.Kak. *Mobile Robot Navigation Using Neural Networks and Nonmetrical Environment Models*. IEEE Control Systems Oct.1993.
- [75] Gordon Cheng, Alexander Zelinsky. *A Physically Grounded Serch in a Behaviour Based Robot*. www

- [76] Larry Banta, John Moddy, Roy Nutter. *Neural Networks for Autonomous Robot Navigation*. www
- [77] Alexander Zelinsky, Yasuo Kuniyoski. *Learning to Coordinate Behaviour for Robot Navigation*. www
- [78] David Jung, Gordon Cheng, Alexander Zelinsky. *Experiments in Realising Cooperation Between Autonomous Mobile Robots*. www
- [79] Erann Gat, Rajiv Desai, Robert Ivlev, John Loch, David P.Miler. *Behaviour Control for Robotic Exploration of Planetary Surfaces*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1994.
- [80] Fabrizio Russo. *Fuzzy Systems in Instrumentation: Fuzzy Signal Processing*. TIM Apr.1996.
- [81] Kazuo Tanaka, Takahio Kosaki. *Design of Stable Fuzzy Controller for an Articulated Vehicle*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1997
- [82] Atsushi Fujimori, Peter N.Nikiforuk, Madan M.Gupta. *Adaptive Navigation of Mobile Robots with Obstacle Avoidance*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Aug.1997
- [83] Ashwin Ram, Roland C.Arkin, Kenneth Moorman, Russell J.Clark. *Case-Based Reactiv Navigation: A Method for On-Line Selection and Adaptation of Reactive Robotic Control Parameters*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1997.
- [84] Frank L.Lewis, Aydin Yşşildirek, Kai Liu. *Multilayer Neural-Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance*. IEEE Transactions on Neural Networks Marchs.1996.
- [85] Design. Yael Edan, Gaines E.Miles. *Systems Engineering of Agricultural Robot*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Aug.1994.
- [86] T.R.Niesler, J.J. du Plessis. *Time-Optimal Control by Means of Neural Networks*. IEEE Control Systems Oct. 1995.
- [87] Johann Borenstein, Ulrich Raschke. *Real-Time Obstacle Avoidance for Non-Point Mobile Robots*. www
- [88] Andres Kurz. *Constructing Maps for Mobile Robot Navigation Based on Ultrasonic Range Data*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Apr.1996.
- [89] D.Gorinevsky, A.Kapitanovsky, A.Goldenberg. *Neural Network Arhitecture for Trajectory Generation and Control of Automated Car Parking*. IEEE Transactions on Control System Technology Jan.1996.
- [90] Steven D.Gray, James C.Preisig, David Brady. *Multiuser Detection in a Horizontal Underwater Acoustic Channel Using Array Observations*. IEEE Transactions Sigal on Processing Jan.1997.
- [91] R.Balakrishna, Ashitava Gnosal. *Modeling of Slip for Wheeled Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr.1995
- [92] J.Borenstein, Y.Koren. *Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robot obstacle avoidance*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr. 1995.
- [93] Rob Spence, Seth Hutchinson. *An Integrated Arhitecture for Robot Motion Planning and Control in the Presence of Obstacle With Unknown Trajectories*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Jan.1995
- [94] Reid G.Simmons. *Structured Control for Autonomous Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Febr.1994
- [95] Fabrice R.Noreils, Raja G.Catila. *Plan Execution Monitoring and Control Arhitecture for Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr.1995
- [96] Joris W.M.van Dam, Ben J.A.Kröse and Franciscus C.A. *Neural Network Applications in Sensor Fusion for an Autonomous Mobile Robot*. www
- [97] Joris W.M. van Dam, Ben J.A.Kröse, Fransciscus C.A.Groen. *Adaptive Sensor Models*. www
- [98] Spyros G.Tzafestas, Konstantinos C.Zikidis *A Mobile Robot Guidance System Based on Three Neural Network Modules*. *Intelligent Automation and Active Systems*. International Conference on Advence Robotics Vienna Sept.1996
- [99] James McLurkin . *Using Cooperative Robots for Explosive Ordonance Disposal*. www
- [100] Thomas Laengle, Ulrich Rembold. *Distributed Control Arhitecture for Intelligent System*. www
- [101] M.Kaiser, M.Deck, A.Retey, K.Berns, W.Ilg, R.Dillmann. *Using Neural Networks for Real-Word Adaptive Control*. www
- [102] Lindsay Kleeman. *A Three Dimensional Localiser for Autonomous Robot Vehicles*. www
- [103] Ulrich Nehmzow . *Animal and Robot Navigation*. www
- [104] Ulrich Nehmzow, Tim Smithers. *Mapbuilding Using Self-organising Networks in "Really Useful Robots"*. www
- [105] Ulrich Nehmzow, Tim Smithers, Brendan McGonigle. *Increasing Behavioural Repertoire in a Mobile Robot*. www

Bibliografie

- [106] Ulrich Nehmzow. *Autonomous Acquisition of Sensor-Motor Couplings in Robots*. IEEE Control Systems Nov.1996
- [107] Ulrich Nehmzow, Tim Smithers, John Hallam. *Location Recognition in a Mobile Robot Using Self-Organising Feature Maps*. www
- [108] Benjamin Kuipers, Karl Åström. *The Composition of Heterogeneous Control Laws*. www
- [109] Benjamin Kuipers, Karl Åström. *The Composition and Validation of Heterogeneous Control Laws*. www
- [110] Ulrich Nehmzow. *Flexible Control of Mobile Robots Through Autonomous Competence Acquisition*. www
- [111] Paul Martin, Ulrich Nehmzow. *"Programming" by Teaching Neural Network Control in the Manchester Mobile Robot*. www
- [112] U.Nehmzow, J.Hallam, T.Smithers. *Really Useful Robots*. www
- [113] P.Stomp, M.P.Wortel, B.J.A.Kröse, F.Stuurman. *Neural Networks for the Analysis of Flight-Booking Profiles*. www
- [114] Kok Seng Chong, Lindsay Kleeman. *Indoor Exploration Using a Sonar Sensor Array: A Dual Representation Strategy*. www
- [115] Lindsay Kleeman. *Scanned Monocular Sonar and the Doorway Problem*. www
- [116] Lindsay Kleeman, Roman Kuc. *Mobile Robot Sonar for Target Localization and Classification*. ww
- [117] Huzefa Akbarally, Lindsay Kleeman. *Sensor Data Fusion of Sonar and Visual Data*. www
- [118] Lindsay Kleeman, Roman Kuc. *An Optimal Sonar Array for Target Localisation and Classification*. www
- [119] Hong Mun Li, Lindsay Kleeman. *A Low Sample Rate 3D Sonar Sensor for Mobile Robots*. www
- [120] Sumio Watanabe, Masahide Yoneyama. *Ultrasonic Robot Eyes Using Neural Networks*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control May 1990
- [121] R.C.Michelini, M.Callegari, G.B.Rossi. *Robots with Uncertainty and Intelligent Automation*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sept.1996
- [122] Pietro Baroni, Daniela Fogli, Giovanni Guida, Silvano Mussi. *Adding Active Mental Entities to Autonomous Mobile Robot Control Architectures*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sept.1996
- [123] Jun Yamamoto, Yuichiro Anzai. *Biologically Inspired Learnable Autonomous Robot.ROBOJUN*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sept.1996
- [124] Gyula Mester, Szilveszter Pletl. *Ganfis Control Algorithm of Intelligent Robots*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sep.1996
- [125] Duško Katić. *Some Recent Issues in Connectionist Robot Control*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sep.1997
- [126] Maria João Rendas, Stefan Rolfes, Isabel Lourtie. *Active Environment Exploration for Safe Operation in Unknown Regions*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sep. 1997
- [127] M.Aissa, K.Djouani, Y.Amirat and J.Pontnau. *Real Time Adaptive Control for Multiple Mobile Robot System*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advance Robotics Vienna Sep.1997
- [128] Tucker Balch. *Learning Roles: Behavioral Diversity in Robot Teams*. www
- [129] Ben J.A.Kröse, Marc Eecen. *A Self-Organizing Representation of Sensor Space for Mobile Robot Navigation*. www
- [130] Ben Kröse, Joris van Dam. *Neiral Vehicles*. www
- [131] C.Innocenti, G.Mondino, P.Regis, G.Sandini. *Trajectory Planning and Real-Time Control of an Autonomous Robot Equipped with Vision and Ultrasonic Sensors*. www
- [132] Stephan ten Hagen, Ben Kröse. *A Short Introduction to Reinforcement Learning*. www
- [133] Roland C.Arkin, Tucker Balch. *Cooperative Multiagent Robotic Systems*. www
- [134] Panagiotis G.Tzionas, Adonios Thanailakis, Philippos G.Tsalides. *Collision-Free Path Planning for a Diamond-Shaped Robot Using Two-Dimensionnal Cellular Automata*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Apr.1997
- [135] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Sebastian Thrun. *The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance*. IEEE Robotics & Automation Magazine March.1997

- [136] Karthik Balakrishnan, Vasant Honavar. *Some Experiments In Evolutionary Sythesis of Robotic Neurocontrollers*. www
- [137] Rodney A.Brooks. *The Behavior Language: User's Guide*. www
- [138] Martin D.Westhead. *Robust Intelligent Control Through The Use of a Behaviour Based Control Paradigm*. www
- [139] Martin D.Westhead. *Synchronous System for Behaviour Based Robot Control*. www
- [140] Martin D.Westhead. *Rigorous Design and Behaviour Based Controllers*. www
- [141] Simon Perkinsand, Gillian Hayes. *Robot Shaping – Principles, Methods and Arhitectures*. www
- [142] B.E.Hallam, J.R.Halperin, J.C.T.Hallam. *An Ethological Model of Learning and Motivation for Implementation in Mobile Robots*. www
- [143] Bridget Hallam. *Fast Robot Learning Using a Biological Model*. www
- [144] Bridget Hallam, Gillian Hayes. *Comparing Robot and Animal Behaviour*. www
- [145] Sorina Zahan. *Neuro-Fuzzy Systems*. www
- [146] Ashok K.Goel, Eleni Stroulia, Zhong Chen, Paul Rowland. *Model-Based Reconfiguration of Schema-Based Reactive Control Arhitectures*. www
- [147] Giovanni Lucarini, Marco Varoli, Morasso. *A Reinforcement Supervised Navigation Neural Net*. www
- [148] Brian Yamauchi. *Dynamical Neural Networks for Mobile Robot Control*. www
- [149] Juan Carlos Santamaria, Aswin Ram. *Multistrategy Learning of Adaptive Reactive Controllers*. www
- [150] V.Gradetsky, I.Kouptsov, V.Zaklarov, G.G.Rizzoto, A.Pagni. *Intelligent Control System for Mobile Vehicle*. Intelligent Automation and Active Systems. International Conference on Advence Robotics Vienna Sept.1997
- [151] J. Borenstein, L. Feng. *Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation December 1996
- [152] Marco Colombetti, Marco Dorigo, Giuseppe Borghi. *Behavior Analysis and Training—A Methodology for Behavior Engineering*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [153] Jean-Yves Donnart, Jean-Arcady Meyer. *Learning Reactive and Planning Rules in a Motivationally Autonomous Animat*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [154] Dario Floreano and Francesco Mondada. *Evolution of Homing Navigation in a Real Mobile Robot*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [155] José del R.Millán. *Rapid, Safe, and Incremental Learning of Navigation Strategies*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [156] Jun Tani. *Model-Based Learning for Mobile Robot Navigation from the Dynamical Systems Perspective*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June. 1996
- [157] R.Andrew McCallum. *Hidden State and Reinforcement Learning with Instance-Based State Identification*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [158] Paolo Gaudiano, Eduardo Zalama, Juan López. *An Unsupervised Neural Network for Low-Level Control of a Wheeled Mobile Robot: Noise Resistance, Stability, and Hardware Implementation*. Coronado IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [159] Brian Yamauchi, Randall Beer. *Spatial Learning for Navigation in Dynamic Environments*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June.1996
- [160] Nikolaos G.Bourbakis. *A Traffic Priority Language for Collision-Free Navigation of Autonomous Mobile Robots in Dynamic Environments*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Aug.1997
- [161] John Budenske, Maria Gini. *Sensor Explication: Knowledge-Based Robotic plan Execution through Logical Objects*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Aug.1997
- [162] Von Alois Knoll. *Forgeschrittene Verfahren zur ultrashallbasierte Objecterkennung in der Robotik*. Technischer Universutät Berlin 1988
- [163] Von Alois Knoll. *Mehrfrequente Verfahren für die ultraschallbasierte Objekterkennung in der Robotik*. Technischer Universutät Berlin 1988
- [164] H. R. Everett. *Sensors for Mobile Robots. Theory and Application*. 1995 A K Peters Ltd.
- [165] T. Botos. *Utilizari ale Retelelor Neuronale si a Logicii Fuzzy in Conducerea Adaptiva a Robotilor Mobili Autonomi*. Universitatea Tehnica Timisoara. Facultatea de Electronica si telecomunicatii. Referat nr. 2 1998

- [166] T. Bohaitel, E. Nastase. *Defectoscopie Ultrasonica Fizica si Tehnica*. Editura Tehnica Bucuresti 1980
- [167] J.M. Benitez, J.L.Castro. *Are Artificial Neural Networks Black Boxes?* IEEE Transactions on Neural Networks Sept. 1997
- [168] C.W.Omlin, K.K.Thorner. *Fuzzy Finite-State Automata Can Be Deterministically Encoded into Recurrent Neural Networks*. IEEE Transactions on Fuzzy Sytems Feb. 1998
- [169] S.H.Huang, M.R.Endsley. *Providing Understanding of the Behavior of Feddforward Neural Networks*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June 1997
- [170] A.Mukerjee, S.Sharma. *When ia an Obstacle a Perfect Obstacle?* IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1998
- [171] Y.Lin, G.A.Cunningham. *Using Fuzzy Partitions to Create Fuzzy Systems from Input-Output Data and Set the Initial Weights in a Fuzzy Neural Network*. IEEE Transactions on Fuzzy Sytems Nov. 1997
- [172] J.Kodjabachian, J.Meyer. *Evolution and Development of Neural Controllers for Locomotion, Gradient-Following, and Obstacle-Avoidance in Artificial Insects*. IEEE Transactions on Neural Networks Sept. 1998
- [173] G.J.van Tonder, J.J.Kruger. *Shape Encoding: A Biologically Inspired Method of Transactions Boundary Images into Ensembles of Shape-Related Features*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Oct. 1997
- [174] M.Rucci, G.M.Endlman. *Adaptation of Orienting Behavior: From the Barn Owl to a Robotic System*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Feb. 1999
- [175] N.Suga. *Cortical Computational Maps for Auditory Imaging*. Neural Networks Vol.3 1990
- [176] P.Wide, F.Winquist, P.Bergsten. *The Human-Based Multisensor Fusion Method for Artificial Nose and Tongue Sensor Data*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Oct. 1998
- [177] G.Bucci, C.Landi. *Numerical Method for Transit Time Measurement in Ultrasonic Sensor Applications*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Dec. 1997
- [178] F.E.Gueuning, M.Varlan. *Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Dec. 1997
- [179] C.C.Tsai. *A Localization System for a Mobile Robot by Dead-Reackoning and Ultrasonic Measurements*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Oct. 1998
- [180] J.E.Wilhjelm, P.C.Pedersen. *Target Velocity Estimation with FM and PW Echo Ranging Doppler System – Part I: Signal Analysis*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control July 1993
- [181] J.Ajanet, R.C.Luo. *Autonomous Mobile Robot Global Motion Planning and Geometric Beacon Collection Using Traversability Vectors*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Feb. 1997
- [182] H.W.When, P.R.Belanger. *Ultrasound-Based Robot Position Estimation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct 1997
- [183] C.C.Chang, K.T.Song. *Environment Prediction for a Mobile Robot in a Dynamic Environment*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1997
- [184] R.Y.Chiao, L.J.Thomas. *Analytic Evaluation of Sample Aperture Ultrasonic Imaging Techniques for NDE*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control July 1994.
- [185] S.K.Tso, Y.H.Fung. *Methodological Development of Fuzzy-Logic Controllers from Multiviable Linear Control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics June 1997.
- [186] Y.G.Leu, T.T.Lee, W.Y.Wang. *On-Line Tuning of Fuzzy-Neural Networks for Adaptive Contol of Nonlinear Dynamical Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Dec. 1997
- [187] Y.Q.Zang, A.Kandel. *Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms*. IEEE Transactions on Neural Networks Jan. 1998
- [188] Y.Shi, R.Eberhart. *Implementation of Evolutionary Fuzzy Systems*. IEEE Transactions on Fuzzy Sytems Apr. 1999
- [189] J.Shen, E.S.Ebbini. *A New Coded-Excitation Ultrasound Imaging System – Part I: Basic Principles*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Jan. 1996
- [190] J.Shen, E.S.Ebbini. *A New Coded-Excitation Ultrasound Imaging System – Part II: Operator Design*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Jan. 1996
- [191] G.R.Lockwood, M.O'Donnell. *Optimizing the Radiation Pattern of Sparse Periodic Linear Arrays*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Jan. 1996

- [192] G.R.Lockwood, F.S.Foster. *Optimizing the Radiation Pattern of Sparse Periodic Two-Dimensional Arrays*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Jan. 1996
- [193] R.Fierro, F.L.Lewis. *Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks*. IEEE Transactions on Neural Networks July 1998
- [194] H.eren, C.C.Fung. *Position Estimation of Mobile Robots Based on Coded Infrared Signal Transmition*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Dec. 1997
- [195] M.Schneider, M.J.Mataric. *Territorial Multi-Robot Task Division*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1998
- [196] K.T.Simsarian, T.J.Olson. *View-Invariant Regions and Mobile Robot Self-Localization*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct.1996
- [197] I.Karmon, E.Rivlin. *Sensor-Based Planning with Global Proofs*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Dec. 1997
- [198] O.Kubitz, O.B.Matthias, R.Stenzel. *Client-Server-Based Mobile Robot Control*. IEEE Transactions on Mechatronics 1998
- [199] D.Z.Chen, R.J.Szezerba. *A Framed-Quadtree Approach for Deteminating Euclidian Shortest Path in a 2-D Environment*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct. 1997
- [200] S.Sundar, Z.Shiler. *Optimal Obstacle Avoidance on the Hamilton-Jacobi-Bellman Equation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1997
- [201] J.H.Kim, P.H.Seong. *Experiments on Orientation Recovery and Steering of an Autonomous Mobile Robot Using Encoded Magnetic compass Disc*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Feb. 1996
- [202] H.B.Nermade, T.Anjaneyulu, P.C.Pandey. *Sensing Turbulance Transit Time by Pulsed Ultrasound for Single-Phase Fluid Flow Measurement*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Feb. 1998
- [203] P.C.Pedersen, D.P.Orofino. *Modeling of Received Ultrasound Signals from Finite Planar Targets*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Mar. 1996
- [204] S.Y.P.Chioen, L.Q.Xue, M.Palakal. *Task Planning for a Mobile Robot in an Indoor Environment Using Object_Oriented Domain Information*. TSMC Dec. 1997
- [205] R.Sun, T.Peterson. *Autonomous Learning of Sequential Task: Experiments and Analyzes*. IEEE Transactions on Neural Networks Nov. 1998
- [206] Z.Chen, I.Suzuki, M.Yamashita. *Time Optimal Motion of Two Omnidirectional Robots Carryng a Ladder Under a Velocity Constant*. IEEE Transactions on Robotics and Automation Oct 1997
- [207] Y.F.Li, X.B.Chen. *On the Dynamic Behavior of a Force/Torque Sensor for Robots*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Feb. 1998
- [208] T.S.Gyan, C.W.Lam, A.W.Campbell. *Development of a Nevel Image Sensor and Its Application to Analysis of Automobile Components*. IEEE Transactions on Mechatronics 1997
- [209] P.Dario, M.C.Carrozza. *A Mobile Microrobot actuated by a New Electromagnetic Wobble Micromotor*. IEEE Transactions on Mechatronics Mar. 1998.
- [210] G.L.Plett, I.Kollar. *Specification for Common IEEE Style*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Dec. 1997
- [211] J.S.Kim, K.Choi, I.Yu. *A New Method of Determining the Equivalent Circuit Parameters of Piezoelectric Resonator and Analysis of the Piezoelectric Loading Effect*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control July 1993
- [212] P.Mattila, F.Tsuzuki, H.Vaataja. *Electroacoustic Model forelectrostatic Ultrasonic Transducer with V-Grooved Backplates*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Jan. 1995
- [213] G.R.Lockwood, F.S.Foster. *Modeling and Optimization of High-Frequency Ultrasound Transducers*. TUFFC. March 1994
- [214] *** *Standard Definition and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Mai 1966
- [215] I.Kolmanovsky, M.H.McClamrock. *Developments in Nonholonomic Control Problems*. IEEE Control Systems Dec. 1995
- [216] T.Tsukiyama. *Mesuring The Distance and Orientation of a Planar Surface Using Nonstructured Lighting - 3-D Mesurement system for Indoor Mobile Robots*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Oct. 1996

Bibliografie

- [217] R.Kimmel, N.Kiryati, A.M.Bruckstein. *Multivalued Distance Maps for Motion Planning on Surfaces with Moving Obstacles*. IEEE Transactions on Robotics and Automation June 1998
- [218] M.E.Froggatt, S.G.Allison, J.P.Moore. *Pulsed Phased-Locked Loop Calibration Over Frequency*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Feb. 1996
- [219] M.E.Froggatt, S.G.Allison. *Pulsed Phased-Locked Loop Technology Improvements for Greater accuracy and Expanded Capabilities*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Feb. 1996
- [220] J.A.Jensen. *A New Approach To Calculating Spatial Impulse Response*. IEEE International Ultrasonic Symposium, Toronto 1997
- [221] R.R.Murphy. *Introduction to AI Robotics*. The MIT Press 2000 ISBN 0-262-13383-0
- [222] D.Kortenkamp, R.P.Banossa. *Artificial Intelligence and Mobile Robots. Case Studi of Succesfull Robot Systems*. MIT Press. 1999 ISBN 0-262-61137-6
- [223] J.Hertz, A.Krogh, R.G.Palmer. *Introduction to the theory of neural computation*. Addisonn-Wesley Publishing Company 1991 ISBN 0-201-50395-6
- [224] David Lee. *The Map-Building and Exploration Strategies of a Simple Sonar-Equipped Mobile Robot*. Cambridge University Press 1996 ISBN 0-521-57331-9
- [225] D. McFarland, T. Bossert. *Intelligent Behavior in Animals and Robots*. The MIT Press 1993 ISBN 0-262-13293-1
- [226] M.D.Adams. *Sensor Modelling. Design and Data Processing for Autonomous Navigation*. Word Scientific 1999 ISBN 9-810-23496-1
- [227] O.Omidvar, P.van der Smagt. *Neural Systems for Robotics*. Acadmic Press 1997 ISBN 012-526280-9
- [228] U. Nehmzow. *Mobile Robotics: A Practical Introduction*. Springer-Verlag 2000 ISBN 1-85233-173-9
- [229] S.Nolfi, D.Floreato. *Evolutionary Robotics. The biology, intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines*. MIT Press ISBN: 0-262-14070-5
- [230] M. Miclea "Psihologie Cognitiva" Casa de Editura GLORIA Cluj-Napoca 1994
- [231] V. Tiponut, T. Botos. *Unitate de conversie A/N si tranzmisie a datelor dintr-un sistem de achizitie a date*. Sesiunea de Comunicări Științifice Oradea, 29 - 30 mai 1992.
- [232] T.Botos, V.Tiponut, P.Gurka. *Simulation Environment for Mobile Robots Guided by Neural Networks*. Proceedings of the Symposium on Electronics and Telecommunication "Etc. '98". "POLITEHNICA" Technical University of Timisoara, Sept. 17-18 1998.
- [233] T. Botoș, C.Gurka Peter, V. Tiponut. *Electronic Device for measuring displacements with continuous ultrasonic wave*. "EMFS'99" Oradea University, 26-29 mai 1999.
- [234] T.Botos, V.Tiponut, P.Gurka. *A neural network for a arm robot control*. "SIELMEC '99" Chișinău 7-8 octombrie 1999.
- [235] T. Botos, C.Gurka Peter, V. Tiponut. *Emularea cu rețele neuronale a câmpurilor potențiale artificiale*. Sesiunea de Comunicări Științifice Hunedoara 4-5 Noiembrie 1999
- [236] T.Botos, V.Tiponut. *Emulating the attractive potential field with neural networks*. În curs de publicare în Buletinul Universității Politehnica Timișoara.
- [237] Titu Botoș, Virgil Tiponut. *Holografie acustică în impuls cu traductoare de bandă îngustă*. Romania Ministry of Defence Military Technical Academy The 29'th Session of Research Topics București November 15-16 2001.
- [238] Titu Botoș, Virgil Tiponut. *Holografie acustică în impuls bidimensională bitractor*. Romania Ministry of Defence Military Technical Academy The 29'th Session of Research Topics București November 15-16 2001.
- [239] Titu Botoș. *O metodă de conducere reactivă a roboților mobili cu implementare neuronală (I)*. În curs de publicare în Buletinul Universității Politehnica Timișoara.
- [240] Titu Botoș. *O metodă de conducere reactivă a roboților mobili cu implementare neuronală (II)* În curs de publicare în Buletinul Universității Politehnica Timișoara.