

ANALIZA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A ASPECTELOR ALEATORII DIN SCENA DE LUCRU A UNUI ROBOT MOBIL

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor
la
Universitatea Politehnica din Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Mat. Alina Mondoc

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Valer Dolga
Referenți științifici: prof.univ.dr. Radu Bălan
prof.univ.dr.ing. Radu-Cătălin Țarcă
conf.univ.dr.ing. Corina Gruescu

Ziua susținerii tezei: 02.07.2014

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Dezvoltarea sistemelor tehnice a fost, este și va fi influențată de tehnologia disponibilă la un moment dat. Noțiunea de mecatronică a apărut ca o necesitate de corelare a ideilor și activităților în dezvoltarea unor noi produse cu aport mecanic, electronic și informatic. *Filozofia Mecatronică* a intervenit în acest sens ca un concept nou referitor la modul de materializare la nivel organic a unei funcții pentru un produs.

Obiectivul principal al tezei este *analiza teoretică și experimentală a aspectelor aleatorii din scena de lucru a unui robot mobil*. Teza de doctorat este structurată pe 7 capitole, urmate de Bibliografie și Anexe.

Această teză de doctorat a fost realizată în Universitatea "Politehnica" Timișoara în cadrul proiectului POSDRU/CPP 107/DMI1.5/S, ID 77265, dezvoltat în cadrul Programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007–2013, Axa prioritară 1.4: "Tehnologia informației și comunicații - Inteligență artificială, robotică și sisteme autonome avansate".

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat, prof.dr.ing.Valer Dolga, atât pentru atenția, seriozitatea și exigența cu care m-a îndrumat pe parcursul studiilor și cercetărilor necesare elaborării acestei lucrări de doctorat.

Adresez mulțumiri membrilor Departamentului de Mecatronică, din cadrul Facultății de Mecanică.

Mulțumesc prietenilor, pentru sprijinul și înțelegerea acordată în perioada elaborării și finalizării tezei de doctorat.

Nu în ultimul rând, doresc să adresez mulțumiri familiei pentru înțelegerea și suportul moral pe care mi le-au oferit pe întreaga perioadă a desfășurării studiilor doctorale

Timișoara, iulie, 2014

Alina Mondoc

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU/CPP 107/DMI1.5/S, ID 77265, cofinanțat din Fondul Social European „Investește în oameni”, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013.

Mondoc, Alina

Analiza teoretică și experimentală a aspectelor aleatorii din scena de lucru a unui robot mobil

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 152, Editura Politehnica, 2014, 226 pagini, 171 figuri, 59 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-606-554-846-6

Cuvinte cheie: Robot mobil, navigare biologică, obstacol, senzor ultrasonic, senzor infraroșu, probabilitate.

Rezumat,

Teza de față își propune o serie de contribuții, din care enumerăm câteva:

Analiza de principiu a robotului mobil ca structură și activitate, enunțarea obiectivului principal al tezei și al planului de activități
Sistematizarea și prezentarea problematicii roboticii mobile în cadrul unui material coerent și finalizat prin concluzii directe de cercetare;

Prezentarea unei analize detaliate a aspectelor aleatorii, prezentarea noțiunilor de incertitudine, clasificări / taxonomii și modul de corelare cu activitățile robotului mobil;

Concretizarea repartiției probabilistice cu exemple edificatoare pentru procese aleatorii în robotică;

Exemplificarea metodei de estimare a informației de la doi senzori;

Sistematizarea aspectelor funcționale ale senzorilor ultrasonici și în infraroșu și identificarea aspectelor aleatorii din cadrul proceselor de măsurare;

Dezvoltarea modelului matematic al caracteristicii directe și inverse a unui senzor în infraroșu Sharp;

Conceptul extins al traiectoriei unui robot mobil și modul de racordare a tronsoanelor acestuia

CUPRINS

Cuprins	5
Lista de figuri	9
Listă de tabele	13
1. Introducere	15
1.1. Robotică și mecatronică.....	15
1.2. Motivația abordării tematicii alese.....	17
1.3. Obiectivele tezei de doctorat	17
2. Robotică și inspirație biomecanică.....	21
2.1. Caracteristici specifice roboticii mobile	21
2.1.1. <i>Evoluție și perspectivă.....</i>	<i>21</i>
2.1.2. <i>Criterii de clasificare a roboților mobili.....</i>	<i>23</i>
2.2. Modele matematice pentru roboții mobili cu sustentație prin roți ...	26
2.2.1. <i>Modelarea cinematică a structurilor fundamentale.....</i>	<i>26</i>
2.2.2. <i>Robot mobil cu direcție de tip osie frântă</i>	<i>26</i>
2.2.3. <i>Robotul mobil cu roți diferențiale.....</i>	<i>30</i>
2.3. Navigarea biologică și navigarea roboților mobili	31
2.3.1. <i>Navigarea biologică.....</i>	<i>31</i>
2.3.2. <i>Navigarea roboților mobili.....</i>	<i>34</i>
2.4. Concluzii	38
3. Matematica proceselor aleatoare cu aplicații în robotică .	39
3.1. Introducere	39
3.2. Modelarea incertitudinii	39
3.2.1. <i>Introducere.....</i>	<i>39</i>
3.2.2. <i>Incertitudinea. Taxonomii, clasificări</i>	<i>40</i>
3.2.3. <i>Informație, date, semnal și incertitudine.....</i>	<i>45</i>
3.2.4. <i>Noțiuni fundamentale de teoria probabilităților</i>	<i>47</i>
3.2.5. <i>Variabilă aleatoare.....</i>	<i>49</i>
3.2.6. <i>Semnal aleator.....</i>	<i>50</i>
3.2.7. <i>Funcția de repartiție și de densitate de probabilitate a variabilelor aleatoare</i>	<i>52</i>

6 Cuprins

3.3. Valoarea medie	53
3.4. Abaterea standard	53
3.5. Repartiții probabilistice și aplicații în robotica mobilă	56
3.5.1. Repartiții probabilistice clasice.....	56
3.5.2. Repartiții în analiza proceselor aleatoare din robotică	57
3.6. Repartiția erorilor aleatoare	60
3.7. Variabile aleatoare multidimensionale	64
3.7.1. Introducere.....	64
3.7.2. Corelația variabilelor aleatoare	65
3.7.3. Variabile aleatoare multiple în analiza procesului aleatoriu din robotica mobilă	66
3.8. Concluzii	70
4. Senzori și localizarea obstacolelor	71
4.1. Introducere	71
4.2. Principiul fizic de funcționare al elementului senzorial acustic	72
4.2.1. Generalități.....	72
4.3. Aspecte biomecanice de inspirație pentru elementul senzorial ultrasonic.....	73
4.3.1. Mărimi acustice și relațiile între acestea	74
4.3.2. Funcțiile Bessel.....	82
4.3.3. Concluzii.....	84
4.4. Elementul senzorial în infraroșu.....	84
4.4.1. Introducere.....	84
4.4.2. Fenomenul fizic	85
4.4.3. Senzorul Sharp.....	88
4.4.4. Concluzii.....	97
4.5. Localizarea obstacolelor pe baza informației elementelor senzoriale acustice	98
4.5.1. Introducere.....	98
4.5.2. Principiul de lucru	98
4.5.3. Concluzii.....	103
4.6. Localizarea obstacolelor pe baza informației senzorilor în infraroșu	103
4.6.1. Introducere.....	103
4.6.2. Principiul de lucru	103

4.6.3. Concluzii.....	104
4.7. Concluzii finale.....	104
5. Robotul mobil în scena de lucru.....	105
5.1. Introducere.....	105
5.2. Conceptul de traiectorie.....	105
5.2.1. Generalități.....	105
5.2.2. Robotul mobil, obstacole și traiectoria.....	106
5.2.3. Situarea robotului mobil în scena de lucru.....	110
5.2.4. Modelul matematic al robotului cu roți diferențiale.....	111
5.2.5. Racordarea unor tronsoane prin arce de cerc.....	115
5.2.6. Racordarea a două tronsoane liniare.....	121
5.3. Roboți mobili în etapa de teste de laborator.....	122
5.3.1. Introducere.....	122
5.3.2. Robot mobil utilizat pentru studiu.....	123
5.3.3. Navigarea robotului mobil în raport cu un obstacol plan.....	127
5.3.4. Aspecte aleatorii în evoluția unui robot mobil.....	129
5.4. Concluzii.....	134
6. Încercări experimentale.....	135
6.1. Introducere.....	135
6.2. Utilizarea elementului senzorial ultrasonic în localizarea obstacolelor.....	135
6.2.1. Introducere.....	135
6.2.2. Standul experimental și considerente teoretice referitoare la scopul urmărit.....	135
6.2.3. Influența temperaturii asupra localizării unui obiect.....	139
6.2.4. Comportamentul senzorului ultrasonic în localizarea unui obiect în scena de lucru.....	142
6.2.5. Localizarea unui obstacol în scena de lucru și influența poziției asupra procesului.....	145
6.3. Localizarea unor obstacole de forme geometrice diferite.....	147
6.4. Localizarea unui obstacol cilindric.....	150
6.4.1. Localizarea unor obstacole cu suprafețe plane.....	155
6.4.2. Localizarea unor obstacole prismatice cu ajutorul senzorilor ultrasonici.....	158
6.5. Localizarea unui obstacol pe baza senzorilor în infraroșu.....	161
6.5.1. Introducere.....	161

8	Cuprins	
	6.5.2. <i>Standul experimental</i>	162
	6.5.3. <i>Concluzii</i>	167
	6.6. Concluzii finale	167
	7. Concluzii generale și contribuții personale	169
	7.1. Concluzii finale	169
	7.2. Contribuții originale ale tezei	170
	7.2.1. <i>Contribuții la cercetarea fundamentală</i>	170
	7.2.2. <i>Contribuții la cercetarea aplicativă</i>	171
	7.3. Diseminarea rezultatelor cercetării.....	171
	7.4. Direcții viitoare de cercetare în domeniu.....	172
	8. Bibliografie	173
	Anexe	185
	Anexa 4.1	185
	Anexa 6.1	191
	Anexa 6.2	196
	Anexa 6.3	200
	Anexa 6.4	209

LISTA DE FIGURI

Figura 1.1.	<i>Aplicații în robotică</i>	16
Figura 1.2.	<i>Parcursul cercetării teoretice și experimentale.....</i>	18
Figura 2.1	<i>Robotul mobil Shakey</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.2	<i>Variante de roboți mobili navigând în exterior și interior</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.3	<i>Robotul mobil cu direcție de tip osie frână</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.4	<i>Legătura dintre spațiul configurațiilor și spațiul vitezelor.....</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.5	<i>Restricții implicate în planul vitezelor</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.6	<i>Robotul mobil cu roți diferențiale.</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.7	<i>Prezentare schematică a câmpului geomagnetic.....</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.8	<i>Navigarea la pasări.....</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.9	<i>a - navigarea la albine; b - navigarea la furnici</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.10	<i>Niveluri de autonomie și evitare a obstacolelor.</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.11	<i>Formație de roboți (a) și robot lunar (b)</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.12	<i>Diagrama bloc funcțională a sistemului de evitare a obstacolelor</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.13	<i>Navigare globală</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 2.14	<i>Scară de navigare.....</i>	Error! Bookmark not defined.
Figura 3.1.	<i>Taxonomia Smithson a ignoranței.....</i>	41
Figura 3.2.	<i>Interpretarea epistemică a incertitudinii</i>	42
Figura 3.3.	<i>Factori ai imperfecțiunii informației</i>	43
Figura 3.4.	<i>Legătură între incertitudine și informație</i>	44
Figura 3.5.	<i>Moduri de incertitudine.....</i>	44
Figura 3.6.	<i>Informație și cantitate măsurabilă</i>	46
Figura 3.7.	<i>Reprezentarea sistemică a unui sensor.....</i>	47
Figura 3.8.	<i>Reprezentare intuitivă a unei variabile aleatoare</i>	49
Figura 3.9.	<i>Semnale discrete.....</i>	51
Figura 3.10.	<i>Reprezentare intuitivă a unui semnal aleator</i>	51
Figura 3.11.	<i>Schema logică a unu process iterative</i>	55
Figura 3.12.	<i>Densitatea de repartiție</i>	56
Figura 3.13.	<i>Funcția de repartiție uniformă.....</i>	56
Figura 3.14.	<i>Repartiția normală în procesul de măsurare.....</i>	58
Figura 3.15.	<i>Robotul mobil în raport cu un obstacol.....</i>	58
Figura 3.16.	<i>Repartiția exponențială pentru scene dinamice.....</i>	58
Figura 3.17.	<i>a) date înregistrate în procesul de măsurare; b) repartiția uniformă.....</i>	59
Figura 3.18.	<i>Probabilitatea de distribuție uniformă.....</i>	59
Figura 3.19.	<i>Șir de valori și densitățile de probabilitate asociate.....</i>	60

10 Lista de figuri

Figura 3.20.	Exemplu de calcul	63
Figura 3.21.	Fișierul normspec_1.m pentru determinarea probabilității ca variabila aleatoare X să se încadreze într-un interval dat	64
Figura 3.22.	Rezultatul obținut din utilizarea fișierului normspec_1.m	64
Figura 3.23.	Obstacole în scena de lucru a robotului mobil	67
Figura 3.24.	Robotul mobil în raport cu un obstacol și procesul aleator de investigare	67
Figura 3.25.	Estimarea poziției unui obstacol	68
Figura 3.26.	Densitatea de probabilitate.....	69
Figura 4.1.	Unda sonoră	73
Figura 4.2.	Undele elastic și domenii de frecvență	73
Figura 4.3.	Reprezentare schematică pentru acțiunea liliiecilor	73
Figura 4.4.	Propagarea undei sferice	74
Figura 4.5.	Propagarea undei plane	75
Figura 4.6.	Reflexia și refracția undei elastice	76
Figura 4.7.	Reflexia difuză	77
Figura 4.8.	Surse de erori în procesul de localizare a obstacolului	77
Figura 4.9.	Reflexia pe obstacol în formă de colțar	77
Figura 4.10.	Obstacole multiple în spațiul de lucru	78
Figura 4.11.	Diferența între informațiile celor doi senzori 1 și 2	79
Figura 4.12.	Elementul senzorial și modele de sensibilitate	80
Figura 4.13.	Conul de directivitate pentru o secțiune transversal eliptică	81
Figura 4.14.	Diagrama de directivitate	81
Figura 4.15.	Fișier <code>bessel.m</code> pentru generarea funcției Bessel	83
Figura 4.16.	Graficele funcțiilor Bessel de speța I_a , $J_a(z)$ și ordin $a = -2, 0$	84
Figura 4.17.	Comportamentul conversiei optoelectronice	85
Figura 4.18.	Principiul de lucru al senzorului IR	85
Figura 4.19.	Modelul Phong [Novotny, 1999]	86
Figura 4.20.	Robotul mobil în scena de lucru	86
Figura 4.21.	Spectrul radiației electromagnetice	87
Figura 4.22.	Circuite emitor / detector în infraroșu	87
Figura 4.23.	Senzorul Sharp GP2Y0A21YK	88
Figura 4.24.	Fișierul <code>polifit_1_1</code> pentru aproximarea caracteristicii senzorului Sharp	92
Figura 4.25.	Fișierul <code>polifit_3_1</code> pentru aproximarea caracteristicii elementului senzorial	92
Figura 4.26.	Caracteristica elementului senzorial SHARP	93
Figura 4.27.	Aproximarea caracteristicii printr-o funcție exponențială	94
Figura 4.28.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul $[0, 150]$ mm	94
Figura 4.29.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul $[150, 1500]$ mm	95
Figura 4.30.	Aproximarea caracteristicii $x = x(U)$ printr-o funcție exponențială	96
Figura 4.31.	Aproximarea caracteristicii $x = x(U)$ printr-o funcție de gradul 2	97
Figura 4.32.	Obstacole în mediul de lucru al RM	99
Figura 4.33.	RM, mediul de lucru și scena de lucru	99
Figura 4.34.	Schema bloc principială a sistemului acustic de localizare	99
Figura 4.35.	Variante constructive ale senzorului ultrasonic	100
Figura 4.36.	Caracterul aleatoriu al detectării obstacolelor	100
Figura 4.37.	Senzorul cu ultrasunete PING, de la Parallax	101

Figura 4.38.	<i>Senzorul cu ultrasunte MAX</i>	101
Figura 4.39.	<i>Schema principială de lucru a sistemului senzorial</i>	101
Figura 4.40.	<i>Corelarea timpilor de emisie, recepție și de "zbor"</i>	101
Figura 4.41.	<i>Fereastra de dialog pentru programul de achiziție a informației</i>	102
Figura 4.42.	<i>Detaliu din timpul achiziției informației</i>	102
Figura 4.43.	<i>Principiul de determinare a distanței față de un obstacol</i>	103
Figura 4.44.	<i>Conectarea senzorului Sharp cu placa Arduino</i>	104
Figura 5.1.	<i>Cale rutieră, suport pentru traiectoria unui autoturism</i>	105
Figura 5.2.	<i>Traietorie închisă în formă de elipsă</i>	107
Figura 5.3.	<i>Traietorie închisă în formă dreptunghiulară</i>	107
Figura 5.4.	<i>Traietorie poligonală deschisă</i>	107
Figura 5.5.	<i>Traietorie compusă din segmente de dreaptă</i>	108
Figura 5.6.	<i>Racordarea tronsoanelor 1,2,3</i>	108
Figura 5.7.	<i>Traietorii și modul de racordare geometrică</i>	108
Figura 5.8.	<i>Traietorii posibile și racordarea geometrică</i>	109
Figura 5.9.	<i>Racordări geometrice</i>	109
Figura 5.10.	<i>Robotul mobil în spațiul de lucru</i>	111
Figura 5.11.	<i>Robotul mobil cu roți diferențiale</i>	112
Figura 5.12.	<i>Mișcarea de rostogolire a roții pe un plan</i>	112
Figura 5.13.	<i>Dreapta (Δ) în spațiul cartezian</i>	112
Figura 5.14.	<i>Centrul instantaneu de rotație</i>	113
Figura 5.15.	<i>RM pe traiectoria (Γ)</i>	113
Figura 5.16.	<i>Traietorie circulară a robotului mobil</i>	115
Figura 5.17.	<i>RM pe o traiectorie circulară</i>	115
Figura 5.18.	<i>Viteza v_1 și accelerația la intrarea pe traiectoria circulară</i>	115
Figura 5.19.	<i>Simularea mișcării pe o traiectorie circulară</i>	116
Figura 5.20.	<i>Vitezele periferice ale celor două roți motrice</i>	116
Figura 5.21.	<i>Traietorii circulare descrise de punctul caracteristic</i>	116
Figura 5.22.	<i>Racordarea unui cerc (C) cu cercurile (C_1) și (C_2)</i>	117
Figura 5.23.	<i>Puncte de tangență, arcul de racordare</i>	118
Figura 5.24.	<i>Modul de variație a factorilor K_1 și K_2</i>	121
Figura 5.25.	<i>Racordarea a două tronsoane liniare</i>	122
Figura 5.26.	<i>Sistem biologic</i>	123
Figura 5.27.	<i>Robotul mobil utilizat pentru teste de laborator</i>	123
Figura 5.28.	<i>Sistemul de acționare a roții motrice</i>	124
Figura 5.29.	<i>Schema bloc pentru simulare</i>	124
Figura 5.30.	<i>Răspunsul sistemului la semnal treaptă</i>	125
Figura 5.31.	<i>Schema bloc de simulare</i>	125
Figura 5.32.	<i>Răspunsul sistemului la semnal treaptă</i>	126
Figura 5.33.	<i>Schema bloc de simulare</i>	126
Figura 5.34.	<i>Răspunsul sistemului la semnal perturbator</i>	126
Figura 5.35.	<i>Robotul mobil echipat cu cei doi senzori</i>	127
Figura 5.36.	<i>Detaliu al robotului</i>	127
Figura 5.37.	<i>Robotul mobil și traseul de lucru</i>	128
Figura 5.38.	<i>Fragment din traiectoria robotului mobil</i>	128
Figura 5.39.	<i>Robotul mobil în laborator</i>	130
Figura 5.40.	<i>Schema de lucru și parametri geometrici</i>	130
Figura 5.41.	<i>Schema de lucru și traiectoria reală</i>	131
Figura 5.42.	<i>Obstacol de formă paralelipedică situat pe axa de mișcare a robotului</i>	132

12 Lista de figuri

Figura 5.43.	<i>Obstacol cilindric centrat pe axa de mișcare a robotului</i>	132
Figura 5.44.	<i>Obstacol cilindric poziționat tangential pe axa de mișcare a robotului</i>	132
Figura 5.45.	<i>Schema de lucru</i>	133
Figura 5.46.	<i>Schema de lucru</i>	133
Figura 5.47.	<i>Obstacolul sesizat și semnalizat</i>	133
Figura 5.48.	<i>Obstacolul localizat</i>	133
Figura 6.1.	<i>Aspecte privind standul experimental realizat și instrument de măsurare</i>	135
Figura 6.2.	<i>Configurația geometrică senzor - obstacol</i>	137
Figura 6.3.	<i>Aspecte din timpul măsurărilor</i>	138
Figura 6.4.	<i>Ponderi și densitatea de probabilitate</i>	140
Figura 6.5.	<i>Ponderi și densitatea de probabilitate</i>	141
Figura 6.6.	<i>Densitate de probabilitate .</i>	141
Figura 6.7.	<i>Densitate de probabilitate</i>	141
Figura 6.8.	<i>Valori ai parametrilor statistici</i>	143
Figura 6.9.	<i>Densitatea de probabilitate</i>	143
Figura 6.10.	<i>Comparații pentru densitatea de probabilitate</i>	144
Figura 6.11.	<i>Aspecte de pe racursul măsurărilor</i>	145
Figura 6.12.	<i>Densitatea de probabilitate în diverse puncte din scena de lucru</i>	146
Figura 6.13.	<i>Poziționarea obstacolelor în raport cu senzorul ultrasonic</i>	147
Figura 6.14.	<i>Densitatea de probabilitate din Exp_12</i>	148
Figura 6.15.	<i>Densitatea de probabilitate din Exp_22</i>	148
Figura 6.16.	<i>Poziția relativă robot, senzori și obstacol</i>	150
Figura 6.17.	<i>Variante de situare ale obstacolului pe parcursul experimentelor</i>	150
Figura 6.18.	<i>Aspecte din timpul experimentelor</i>	151
Figura 6.19.	<i>Densitatea de probabilitate în mod comparativ</i>	152
Figura 6.20.	<i>Fișier - funcția densitate de probabilitate</i>	153
Figura 6.21.	<i>Densitatea de probabilitate pentru variabila aleatoare multidimensională</i>	153
Figura 6.22.	<i>Densitățile de probabilitate: informație - senzorul A (a); informație-senzorul B (b); variabila aleatoare multidimensional (c)</i>	154
Figura 6.23.	<i>Obstacol poziționat cu α grade față de axa Ox</i>	155
Figura 6.24.	<i>Repartiție normală a) și respectiv eșec de măsurare b)</i>	155
Figura 6.25.	<i>Ansamblul componentelor incluse în cadrul experimentului</i>	158
Figura 6.26.	<i>Obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări</i>	159
Figura 6.27.	<i>Schița standului experimental pentru localizarea colțarului</i>	159
Figura 6.28.	<i>Obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări</i>	160
Figura 6.29.	<i>Obiectul colțar situat la diferite distanțe</i>	161
Figura 6.30.	<i>Schema structurală a standului din programul experimental</i>	162
Figura 6.31.	<i>Detalii din realizarea standului</i>	162
Figura 6.32.	<i>Schema structurală a standului din programul experimental</i>	163
Figura 6.33.	<i>Ecuția drepte de aproximare a situării obstacolului</i>	164
Figura 6.34.	<i>Ecuția drepte de aproximare a situării obstacolului</i>	164
Figura 6.35.	<i>Ecuția drepte de aproximare a situării obstacolului</i>	165
Figura 6.36.	<i>Ecuția drepte de aproximare a situării obstacolului</i>	166
Figura 6.37.	<i>Ecuția drepte de aproximare a situării obstacolului</i>	167

LISTĂ DE TABELE

Tabel 2.1.	Domenii de utilizare, clase de aplicații și funcții realizate de roboți mobili	22
Tabel 2.2.	Principii fizice de localizare	37
Tabel 2.3.	Tipul măsurării	38
Tabel 3.1.	Intervalul de încredere	61
Tabel 3.2.	Informațiile și parametrii statistici	69
Tabel 4.1.	Corelarea valorilor la aproximarea unei funcții	88
Tabel 4.2.	Coeficienții polinomului de aproximare	92
Tabel 4.2.bis	Format redus de reprezentare a coeficienților	92
Tabel 4.3.	Evaluare erori	93
Tabel 4.4.	Structura calculului de aproximare	93
Tabel 4.5.	Indicii statistici	95
Tabel 4.6.	Indicii statistici	96
Tabel 4.7.	Indicii statistici	97
Tabel 5.1.	Valorile abaterilor față de linia de referință	129
Tabel 5.2.	Valorile abaterilor față de linia de referință	129
Tabel 5.3.	Rezultate și valorile prelucrate	131
Tabel 6.1.	Rezultate furnizate de sistemul senzorial	139
Tabel 6.2.	Rezultate furnizate de sistemul senzorial	139
Tabel 6.3.	Valoarea medie și deviația standard	139
Tabel 6.4.	Ponderile și frecvența relativă	140
Tabel 6.5.	Ponderile și frecvența relativă	140
Tabel 6.6.	Valori de poziționare axială a obstacolului	142
Tabel 6.7.	Rezultate furnizate de sistemul senzorial	142
Tabel 6.8.	Rezultate furnizate de sistemul senzorial	143
Tabel 6.9.	Valoarea medie și deviația standard	143
Tabel 6.10.	Valoarea medie și deviația standard	144
Tabel 6.11.	Valoarea medie și deviația standard	144
Tabel 6.12.	Tablou structural și parametrii statistici	145
Tabel 6.13.	Tipuri de obstacole	147
Tabel 6.14.	Matricea de lucru	147
Tabel 6.15.	Comparații între parametrii statistici	149
Tabel 6.16.	Comparații între parametrii statistici	149
Tabel 6.17.	Comparații între parametrii statistici	149
Tabel 6.18.	Matricea explicativă a variantelor experimentale	150
Tabel 6.19.	Comparații între parametrii statistici	151
Tabel 6.20.	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.21.	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.22..	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.23.	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.24.	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.25.	Valoarea medie și deviația standard	156
Tabel 6.26.	Valoarea medie și deviația standard	156

14 Listă de tabele

Tabel 6.27.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.28.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.29.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.30.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.31.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.32.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.33.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.34.	Valoarea medie și deviația standard	157
Tabel 6.35.	Informațiile celor trei senzori	163
Tabel 6.36.	Valorile coeficienților statistici	163
Tabel 6.37.	Informațiile celor trei senzori	164
Tabel 6.38.	Valorile coeficienților statistici	164
Tabel 6.39.	Informațiile celor trei senzori	165
Tabel 6.40.	Valorile coeficienților statistici	165
Tabel 6.41.	Informațiile celor trei senzori	165
Tabel 6.42.	Valorile coeficienților statistici	166
Tabel 6.43.	Informațiile celor trei senzori	166
Tabel 6.44.	Valorile coeficienților statistici	166

1. INTRODUCERE

1.1. Robotică și mecatronică

Conceptul de „mecatronică” a fost brevetat în anii 1971-1972. În anul 1982 firma Yaskawa renunță la drepturile de autor asupra acestuia pentru a putea fi utilizat pe scară largă. În anul 1986 conceptul este citat și în literatura de specialitate din România pentru roboți industriali. Pe parcursul timpului robotul a trecut să fie definit ca un sistem mecatronic, destinat automatizării interacțiunii omului cu mediul în care operează.

Una din ofertele filozofiei mecatronice în proiectare este abordarea sinergică a problemelor. În acest context, la ora actuală se poate vorbi despre o nouă tendință în robotică în contrast cu robotica clasică. Noua orientare este dictată practic de influențele – idei, principii – din zona biologiei. Punctul de plecare constă în modelarea diverselor aspecte ale sistemelor biologice.

Inspirația biologie - robotică a stârnit dezbateri semnificative în ultimii ani. O serie de autori [Dolga, 2007], [Holland, 2004], [Kolski, 2007] au sugerat că multe caracteristici ale unui animal ar trebui incluse în structura unui robot. Este necesar însă ca aceste caracteristici să confere atribute utile robotului.

Există și păreri conform cărora, introducând prea multe caracteristici, performanțele pot fi afectate [Heath, 2003].

În contextul celor specificate, biorobotica se definește ca un domeniu științific și tehnologic interdisciplinar bazat pe cercetare în robotică, științele naturii și inginerie biomedicală. Principalul scop al bioroboticii este de a analiza sistemele biologice prin prisma filozofiei „biomecatronice”.

O serie de autori se referă la perioada următoare ca la o perioadă în care activitățile curente vor fi „invadate” de o serie de creații artificiale care vor înlocui ceea ce noi denumim astăzi animale domestice și nu numai [Bekey, 2005].

Ideea de a construi mașini care emulează caracteristici ale animalelor pe care le vedem în jurul nostru are o lungă istorie. Desenele lui Leonardo da Vinci despre mașini care zboară ca păsările sunt recunoscute.

Evoluția roboticii în direcțiile aplicative în principal și susținute prin construcții adecvate în secundar este concludentă prin modurile de definire a acestei noțiuni pe parcursul timpului.

Robotul este un manipulator reprogramabil, multifuncțional proiectat pentru a deplasa materiale, componente sau dispozitive specializate pe baza unor mișcări variabile programate și pentru a realiza sarcini specifice.

Robotics Industry Association (~ 1980)

Robotica este o conexiune inteligentă între percepție și acțiune.

Prof. Sir Michael Brady, Oxford University (~ 1985)

Robotul este o mașină capabilă să extragă informație dintr-un mediu și să utilizeze cunoașterea pentru a se mișca sigur în lumea respectivă pentru scopul propus.

Prof. Maja Mataric, Comp. Sc. Dep., Univ. Of Calif., USC Rob. Lab (~1990)

Robotica este știința și tehnologia de a proiecta sisteme mecatronice capabile de a genera și controla mișcare și forță.

Prof. Paolo Dario, Univ. Of Pisa (~ 2000)

Sistemele biologice pot fi prezentate ca sisteme optimizate care pot constitui puncte de plecare pentru realizarea de sisteme artificiale. Toate funcțiile obiectiv au fost orientate spre supraviețuirea individuală a speciei. Dintre aceste funcții obiectiv putem aminti: energia consumată minimă pentru mișcarea biologică în general și respectiv mișcarea umană în particular, multifuncționalitatea și adaptabilitatea, evoluția biologică combinată cu alte mecanisme [***1].

Robotul mobil este în general un dispozitiv mecatronic complex, cu un anumit grad de autonomie ce permite navigarea în scenele de operare naturale sau preparate aprioric, fiind capabil să execute o clasă de sarcini utile pe parcursul deplasării sale. Din acest punct de vedere există o gamă foarte largă de configurații mecatronice ce pot fi încadrate în această clasă:

- un vehicul cu roți este considerat robot mobil numai dacă dispune de un anumit grad de autonomie în navigație;
- roboții manipulatori convenționali, specifici aplicațiilor industriale, pot dobândi mobilitate prin instalarea lor pe o platformă mobilă;
- roboții mobili special proiectați pentru anumite aplicații, al căror sistem de locomoție utilizează șenile, structuri pășitoare, structuri șerpuitoare sau alte soluții constructive neconvenționale.

Aplicațiile roboților mobili sunt extrem de diverse acest lucru fiind susținut de literatura de specialitate [Tatar, 2007], [Sermanet, 2009], [Mamoru, 2007].

Această evoluție în abordarea conceptuală și constructivă s-a făcut simțită și în zona aplicativă (figura 1.1).

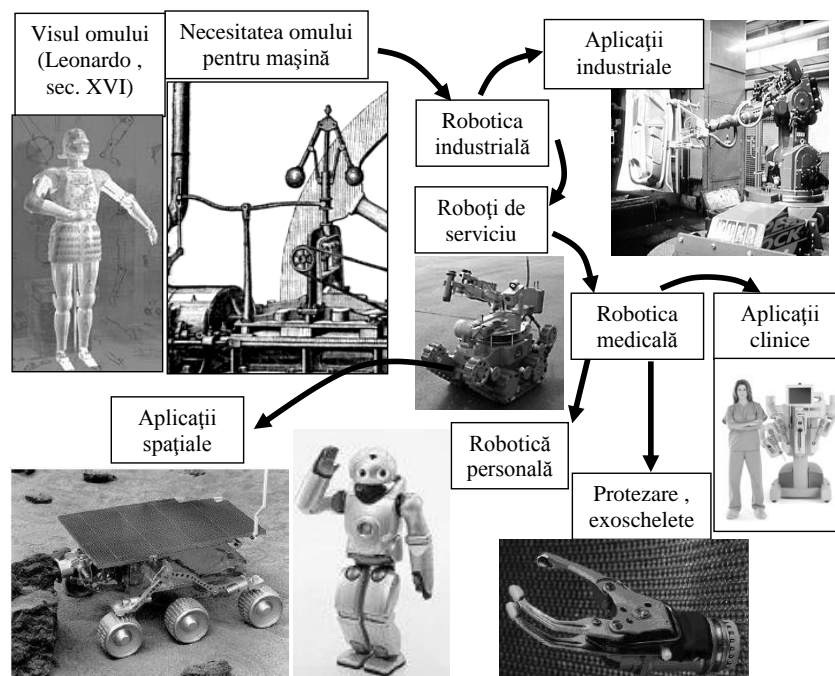


Figura 1.1. Aplicații în robotică

1.2. Motivația abordării tematicii alese

Ultima perioadă din activitatea specialiștilor din domeniul mecatronic, și nu numai, se poate caracteriza printr-o orientare accentuată spre o cercetare multidisciplinară. Acest lucru se face simțit prin integrarea unor subdomenii în domeniul mecatronic sau prin apelarea la domenii clasice pentru modelarea, simularea și rezolvarea unor probleme de cercetare.

Aplicațiile din domeniul roboticii mobile – pentru toate categoriile – au fost orientate spre aplicații în medii nestructurate ca o copie din domeniul biomecanic.

Multe aplicații cu roboți mobili au constituit subiecte de cercetare [Rozhok, 2008], [Sermanet, 2009], [Otomanski, 2008], [Mubarak, 2013]. Cu toate acestea, dezvoltarea de sisteme mecatronice mobile reprezintă o provocare pentru cercetători atunci când mediul nu este structurat, când mediul se schimbă în mod dinamic cu mai multe obstacole. Există medii nestructurate în care este dificil sau periculos pentru operatorii umani să îndeplinească anumite sarcini. Un exemplu este detectarea și dezarmarea câmpurilor minate. Nevoia de roboți mobili să lucreze în aceste medii nestructurate este evident.

Navigarea într-un mediu nestructurat include probleme de evitare a obstacolelor, evitarea pericolelor de genul găuri, bolovani sau locații periculoase. O altă problemă este abilitatea de a trece la o locație dorită – punct țintă și, uneori, de a cerceta o întregă regiune din spațiul de lucru. Se pot imagina diferite scenarii de lucru care trebuie rezolvate în timp real.

1.3. Obiectivele tezei de doctorat

Prezenta cercetare se încadrează conform "*Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare, 2007-2013, PNII*" pe axa prioritară 1.4 "*Tehnologia informației și comunicații-Inteligentă artificială, robotică și sisteme autonome avansate*" subdomeniul 1.4.6 "*Dezvoltarea de sisteme de interacțiune naturală om-calculator minimal dependente de universul discursului*", de asemenea lucrarea de cercetare urmează și axa prioritară 6.1 "*Biotehnologii*" subdomeniul 6.1.2 "*Elaborarea unor protocoale de diagnostic și tratamente medicale cu impact asupra stării de sănătate și creșterii speranței de viață*" [***16].

Planul Național de Cercetare Dezvoltare și Inovare pentru perioada 2007-2013, cunoscut sub denumirea de PN II reprezintă principalul instrument prin care Autoritatea Națională pentru Cercetare Științifică (ANCS) implementează strategia națională pentru cercetare-dezvoltare-inovare (CDI). În conceperea PN II s-a avut în vedere rolul sistemului național de cercetare-dezvoltare-inovare care este acela de a dezvolta știința pentru creșterea competitivității economice, îmbunătățirea calității sociale și sporirea cunoașterii cu potențial de valorificare și lărgire a orizontului de acțiune. Prin PN II se urmărește atingerea celor trei obiective strategice ale sistemului național de cercetare-dezvoltare-inovare și anume [***16]:

- Crearea de cunoaștere respectiv obținerea unor rezultate științifice și tehnologice de vârf competitive pe plan global în scopul creșterii vizibilității internaționale a cercetării românești și a transferării ulterioare a rezultatelor în practica socio-economică.
- Creșterea competitivității economiei românești prin inovare cu impact la nivelul agenților economici și transferul cunoștințelor în practica economică.
- Creșterea calității sociale respectiv găsirea de soluții tehnice și științifice care susțin dezvoltarea socială și îmbunătățește condiția umană a acesteia.

Teza de doctorat își propune să aducă contribuții în analiza probabilistică a unui spațiu nestructurat și să prezinte studiul experimental al navigării unui robot mobil într-un astfel de mediu.

În acest sens putem enunța obiectivul principal al tezei de doctorat: *analiza teoretică și experimentală a aspectelor aleatorii din scena de lucru a unui robot mobil.*

Obiectivului principal al tezei îi sunt asociate obiectivele secundare specifice fiecărui capitol. Schema capitolelor este prezentă în figura 1.2.

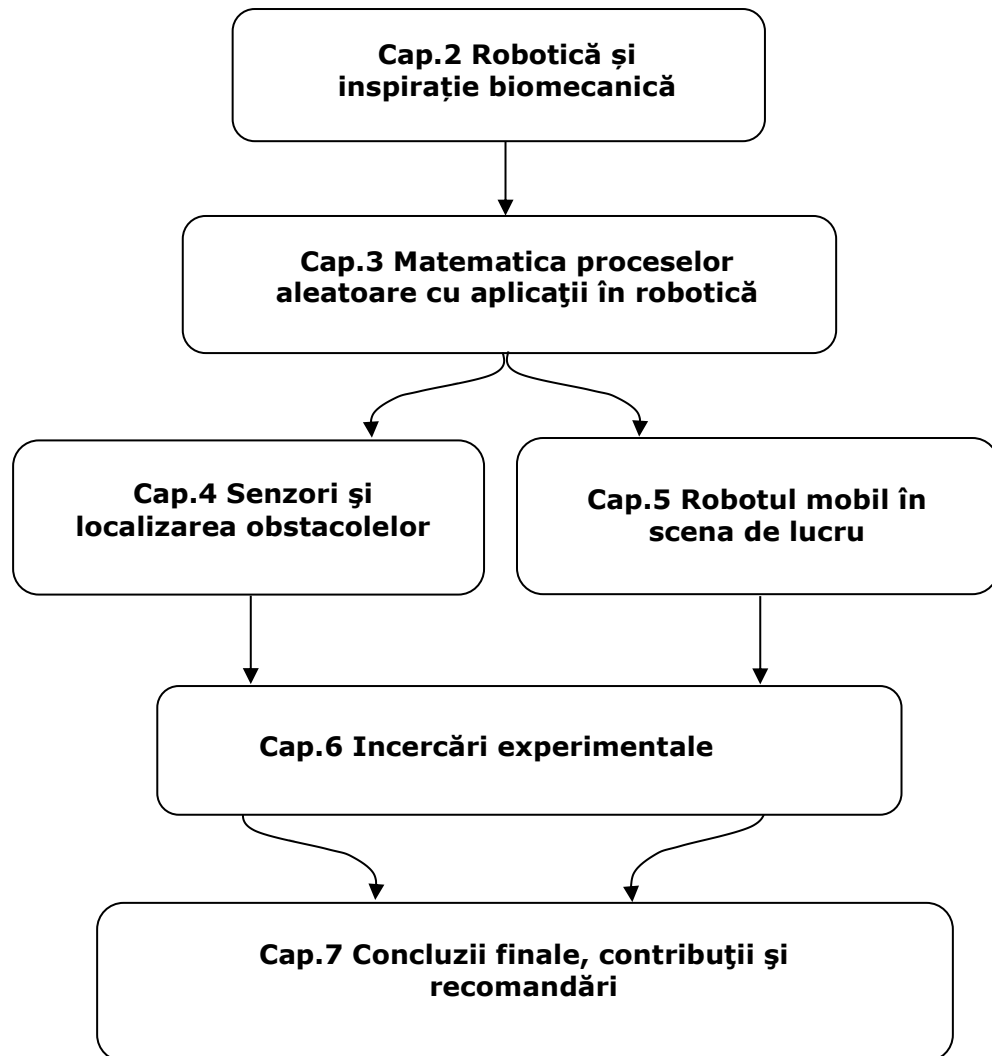


Figura 1.2. Parcurusul cercetării teoretice și experimentale

Capitolul 1- Introducere - descrie domeniul și direcțiile de cercetare în care se încadrează prezenta teză de doctorat. Este evidențiată motivația temei și obiectivul principal al tezei. Pe baza acestor considerente în cadrul capitolului este inserat parcursul activităților desfășurate pentru elaborarea tezei prin asocierea cu

obiectivele operaționale asociate. În finalul capitolului este prezentată structura tezei de doctorat pe capitole și extensia acestora. Capitolul are o extensie de 6 pagini și include 2 figuri.

Capitolul 2- Robotică și inspirație biomecanică - prezintă o sinteză referitoare la robotică mobilă ca și inspirație biomecanică. În cadrul capitolului se fac referiri la caracteristicile specifice roboticii mobile (evoluție și perspectivă, criterii de clasificare), la modele matematice pentru roboții mobili cu sustentație prin roți, la navigarea biologică și navigarea roboților mobili și concluzii. Capitolul are o extensie de 18 pagini și include 14 figuri, 2 tabele și 14 relații de calcul.

Capitolul 3- Matematica proceselor aleatorii cu aplicații în robotică - debutează prin definirea aspectelor aleatorii, prezentarea noțiunilor de incertitudine, clasificări/taxonomii. În cadrul capitolului este inserată o sinteză referitoare la informație, date, semnal și incertitudine. Urmează, ca o abordare logică, noțiuni despre teoria probabilităților și posibilistică, variabilă aleatoare, semnal aleatoriu, funcția de repartiție și densitate de probabilitate, valoare medie, abatere standard, repartiții probabilistice în robotică, repartiția erorilor aleatoare, variabile aleatoare multiple. În cadrul capitolului sunt inserate exemple de interpretare a repartițiilor probabilistice în robotică, a modului de tratare a variabilelor multiple și exemplul de calcul a unei valori estimate pe baza informației de la doi senzori diferiți. Capitolul se încheie prin concluzii. Capitolul 3 are o extensie de 32 de pagini în care sunt integrate 27 de figuri, 91 relații de calcul și 2 tabele.

Capitolul 4 – Senzori și localizarea obstacolelor – explică modul de abordare a procesului de localizare a obstacolelor pe baza senzorilor ultrasonici. Sunt trecute în revistă aspectele teoretice, surse ale incertitudinilor prin utilizarea senzorilor ultrasonici, utilizarea funcțiilor Bessel pentru simularea propagării undei. În cadrul capitolului este inserată și sinteza referitoare la senzorul în infraroșu utilizat în structura roboților mobili. O fracțiune importantă a acestei sinteze se referă la determinarea caracteristicii directe și inverse a senzorului Sharp preconizat pentru experimente ulterioare. Capitolul se încheie prin prezentarea principiului de lucru, exemple referitoare la localizarea unor obstacole prin utilizarea celor doi senzori. Capitolul 4 are o extensie de 34 de pagini și include 44 de figuri, 56 relații de calcul și 7 tabele.

Capitolul 5 – Robotul mobil în scena de lucru - include considerente teoretice și practice referitoare la navigarea unui robot mobil într-o scenă de lucru. Referirile sunt directe la două structuri de robot mobil aflate în dotarea Laboratorului de Senzori și Actuatori al Departamentului de Mecatronică din cadrul Universității Politehnica Timișoara. Sunt evidențiate problemele dinamice care apar la racordarea unor tronsoane din traiectoria robotului mobil. Sunt prezentate exemple concrete, simulări și concluzii. În finalul capitolului sunt inserate rezultate experimentale obținute prin urmărirea comportamentului unui robot într-o scenă de lucru. Capitolul 5 are o extensie de 30 pagini și include 63 relații de calcul, 48 figuri și 3 tabele.

Capitolul 6 – Incercări experimentale – are ca obiectiv operațional studiul experimental al sistemelor senzoriale ultrasonic și respectiv în infraroșu pentru localizarea unor obstacole. Sunt prezentate detalii referitoare la modul de constituire a standurilor de lucru, a matricelor structurale ale experimentelor. Rezultatele experimentale au fost prelucrate în Microsoft Office Excel și au fost calculați parametrii statistici. Fiecărui experiment i-a fost atașat calculul pentru desitatea de probabilitate și exprimarea grafică a acesteia. Rezultatele experimentale sunt însoțite de concluzii obținute din prelucrarea datelor experimentale, modele matematice ale funcției de repartiție, exemple de calcul a situării unui obstacol pe baza informațiilor de la sistemele senzoriale. O parte a

datelor experimentale au fost incluse în Anexele 6.1...6.4 asociate acestui capitol. Concluziile rezultate în urma experimentelor încheie acest capitol care are o extensie de 34 pagini și include 41 relații de calcul, 44 tabele și 37 de figuri.

Capitolul 7 – Concluzii finale, contribuții și recomandări - se referă la concluziile ce se desprind în urma activităților desfășurate, trece în revistă contribuțiile personale și recomandările pentru cercetările viitoare. Capitolul are o extensie de 3 pagini.

Bibliografia include o parte din titlurile utilizate pe parcursul elaborării tezei. Bibliografia cuprinde 151 titluri bibliografice.

Anexele includ materiale rezultate și prelucrate în perioada de elaborare a tezei. Aceste materiale au fost utilizate pentru redactarea capitolelor tezei.

2. ROBOTICĂ ȘI INSPIRAȚIE BIOMECANICĂ

2.1. Caracteristici specifice roboticii mobile

2.1.1. Evoluție și perspectivă

Primele cercetări temeinice și avansate asupra roboților mobili cu sustentație prin roți s-au realizat în SUA încă din anul 1975. Majoritatea acestor proiecte au vizat în primul rând testarea unor soluții constructive, idei de proiectare, strategii de navigație sau componente electronice și electromagnetice specifice. Pot fi citate câteva proiecte semnificative în literatura de specialitate: SHAKEY – Stanford Reserch Institute (Figura 2.1), JASON – Berkeley University, ROVER – Jet Propulsion Laboratory, ulterior în Japonia – ZAMABIKO și în Franța HILARE, VESA, MITHRA.



Figura 2.1 Robotul mobil Shakey

Perioada dintre anii 1975-1997 definește generația a doua a roboților cunoscuți prin servocontrol, PLC-uri și dedicați pentru medii cunoscute [Nearchou, 1999].

Perioada dintre anii 1990 și până în prezent, este perioada generației a treia de roboți inteligenți, dedicați mediilor nestructurate [Zhang, 2011].

Primii roboți au avut o caracteristică comună, și anume baza fixă și o structură antropomorfă asemănătoare operatorului uman. Evoluția sistemelor tehnice a dus la apariția roboților mobili, astfel că la ora actuală robotul mobil este caracterizat de posibilitatea de navigare în mediul de lucru. Robotica mobilă este într-o continuă dezvoltare și evoluție, încă de când a apărut conceptual la mijlocul secolului al XX-lea.

22 Robotică și inspirație biomecanică - 2

Roboții mobili sunt utilizați în diverse locații cu risc ridicat. Aici putem vorbi despre roboții folosiți în cosmos, pe teren accidentat – cum ar fi în silvicultură, industriile miniere, precum și în aplicații de manipulare periculoase. Pe parcursul timpului soluțiile constructive și aplicațiile roboților mobili au fost puternic diversificate în paralel cu cercetări care au vizat construcția, controlul și navigarea în mediile de lucru.

Exemplele din tabelul de mai jos ne arată faptul că domeniile de utilizare ale unui robot mobil pot fi extrem de diverse.

Tabel 2.1 Domenii de utilizare, clase de aplicații și funcții realizate de roboți mobili

Domenii de utilizare a roboților mobili	Clase de aplicații și funcții realizate
Industria prelucrătoare	<ul style="list-style-type: none">▪ Transportul componentelor și produselor finite▪ Supravegherea procesului de fabricație
Industria nucleară	<ul style="list-style-type: none">▪ Supravegherea incintelor▪ Manipularea materialelor radioactive▪ Întreținerea instalațiilor din centralele nucleare
Industria chimică	<ul style="list-style-type: none">▪ Supraveghere tehnologică▪ Manipularea substanțelor toxice
Industria militară	<ul style="list-style-type: none">▪ Supraveghere și patrulare▪ Minări și deminări de terenuri și obiective▪ Manipularea muniției
Securitate civilă	<ul style="list-style-type: none">▪ Neutralizarea activităților teroriste▪ Deminări și montarea explozivilor▪ Supravegherea depozitelor de explozibili
Industria minieră	<ul style="list-style-type: none">▪ Asistență de urgență▪ Abataje complet automate și autonome functional
Submarin	<ul style="list-style-type: none">▪ Montarea cablurilor sau conductelor▪ Prospekțiuni geologice▪ Recuperarea navelor scufundate
Lupta contra incendiilor	<ul style="list-style-type: none">▪ Localizarea sursei▪ Patrulare pentru detecția emanațiilor periculoase▪ Stingerea incendiilor
Agricultură	<ul style="list-style-type: none">▪ Tunderea gazonului▪ Operații asupra solului▪ Culegerea fructelor sau legumelor
Construcții	<ul style="list-style-type: none">▪ Realizarea autonomă a lucrărilor specifice▪ Transport de materie
Curățenie	<ul style="list-style-type: none">▪ Curățirea suprafețelor în mediul civil sau industrial
Educație și divertisment	<ul style="list-style-type: none">▪ Dezvoltarea aptitudinilor tehnice▪ Jucării inteligente
Sănătate	<ul style="list-style-type: none">▪ Supraveghere în spitale▪ Transportul medicamentelor către bolnavi
Birotică	<ul style="list-style-type: none">▪ Distribuirea corespondenței în birouri▪ Deservirea locurilor de muncă
Umanitar	<ul style="list-style-type: none">▪ Ajutor persoanelor cu handicap locomotor sau vizual▪ Companie copiilor sau persoanelor în vârstă

2.1.2. Criterii de clasificare a roboților mobili

Putem spune că sunt diverse criterii ce pot fi avute în vedere atunci când se efectuează o clasificare a roboților mobili, însă cel care reține atenția în mod deosebit este gradul de autonomie, respectiv capacitatea decizională a robotului în prezența unei informații preliminare (insuficiente sau eronate) pentru realizarea sarcinii curente.

Robotul mobil poate fi definit ca un dispozitiv mecatronic complex, care asigură un anumit grad de autonomie ce permite navigația în spații de operare naturale sau preparate aprioric, fiind capabil să execute o clasă de sarcini utile pe parcursul deplasării sale.

Din acest punct de vedere există o gamă foarte largă de configurații mecatronice ce pot fi încadrate în această clasă.

- Un vehicul cu roți este considerat robot mobil numai dacă dispune de un anumit grad de autonomie în navigație
- Roboți manipulatori convenționali, specifici aplicațiilor industriale, pot dobândi mobilitate prin instalarea lor pe platforme mobile.
- Roboți mobili special proiectați pentru anumite aplicații, al căror sistem de locomoție utilizează: șenile, structuri pășitoare, structuri șerpuitoare sau alte soluții constructive neconvenționale.

Construcția și exploatarea roboților mobili menține practic în actualitate toate problemele generale ale roboților convenționali: mecanică versatilă și fiabilă, sisteme de acționare performante, sisteme senzoriale capabile să controleze cu precizie și rapiditate o gamă foarte largă de parametrii, sisteme de conducere cu funcționare adaptivă în timp real, precizie și repetabilitate în realizarea secvențelor de mișcare, etc.

În același timp se cer rezolvate o serie de probleme noi, a căror complexitate este direct proporțională cu gradul de autonomie ce se dorește obținut: cunoașterea scenei de operare și reactualizarea sa dinamică pe parcursul navigației, determinarea unei traiectorii optime din punct de vedere al sarcinii curente și al interacțiunii cu scena de operare, localizarea permanentă a robotului în scena sa de operare, tratarea în timp real a unui volum mare de informații diverse, de natură interoceptivă și exteroceptivă, asigurarea independenței energetice pe durata funcționării, coordonarea în timp real cu celelalte sisteme conexe în scopul realizării funcției propuse, etc.

Deoarece o autonomie relativ completă și oarecum comparabilă cu cea umană rămâne încă un deziderat al roboticii, problemele enumerate anterior sunt ponderate corespunzător clasei de aplicații la care trebuie să răspundă robotul. Alegerea optimă între performanțe și cost constituie și pentru roboții mobili factorul economic primordial al promovării lor în domenii dintre cele mai diverse, cu importante beneficii materiale și / sau sociale.

Robotul mobil reprezintă o caracteristică fundamentală, întrucât durata comunicațiilor cu operatorul uman este în general prea mare în raport cu capacitatea sa de mobilitate.

Alte criterii ce pot fi reținute pentru clasificarea roboților mobili vizează soluțiile constructive adoptate, cum ar fi: realizarea motricității și a sustentației, tipul sursei energetice și al acționărilor, sistemul senzorial din dotare, structura scenei de operare, etc.

Din punct de vedere al nivelului de autonomie al unui robot mobil, se pot distinge următoarele soluții:

- Robot mobil telecomandat permanent de către un operator uman, la care operatorul comandă și controlează într-o manieră continuă toate sarcinile elementare ce urmează a fi realizate de către robot.
- Robot mobil telecomandat periodic de un operator uman, la care operatorul intervine numai pentru a asigura nivelul decizional global, robotul controlând acțiunile sale între comenzile primite de la operator.
- Robot mobil autonom, ce realizează obiectivele predefinite cu ajutorul capacității decizionale proprii (sistem de ghidare, de navigație, bază de cunoștințe dinamice, etc.) într-un mediu parțial cunoscut și structurat. Această clasă prezintă cel mai mare interes științific din punct de vedere al autonomiei și inteligenței artificiale din dotare.

Mobilitatea și autonomia în robotică sunt două noțiuni ce evoluează rapid odată cu progresul tehnic și reducerea prețului de cost al echipamentelor electronice complexe.

Pentru roboții mobili, funcția de mobilitate reprezintă în cazul general capacitatea de deplasare fără ajutor extern între două poziții, sau mai precis:

- Capacitatea de evoluție într-un mediu ostil (periculos, gen labirint, etc.) și pe diverse tipuri de soluri, inclusiv cele nepregătite aprioric (nisip, pietriș).
- Posibilitățile existente în evitarea sau depășirea obstacolelor (obstacole naturale, scări, sanțuri, plane înclinate, etc.).
- Performanțele realizate: viteze, accelerații, rază de acțiune, capacitate de transport, durata independenței energetice, etc.

Autonomia unui robot mobil trebuie asigurată din cel puțin două puncte de vedere, după cum urmează:

- Autonomia energetică. Sursa energetică, cel mai adesea un acumulator electric, este atașată. Robotul poate reîncărca acumulatorul cu ajutorul uneia sau a mai multor instalații fixe prevăzute în spațiul său de operare.
- Autonomia de decizie sau inteligența robotului mobil. Variantele industriale uzuale pot fi filoghidate, optoghidate sau cu traiectorii memorate și evoluează într-un mediu definit și aprioric cunoscut. Autonomia de decizie apare dacă robotul trebuie să rezolve evenimente neașteptate pe parcursul deplasării sale. Nivelul superior de inteligență presupune capacitatea robotului de a se orienta singur într-o scenă a cărei topografie este sumar cunoscută. Trebuie atunci modelat mediul, reactualizată permanent baza de cunoștințe în timpul deplasării și elaborate deciziile corespunzătoare. Aceste variante, mult mai complexe, constituie roboții mobili autonomi propriu-zis și reprezintă o direcție de cercetare, fără aplicații industriale directe sau imediate pe scară largă [Nițulescu, 2002].

Bazei electromecanice a unui robot mobil îi revine sarcina asigurării mobilității și motricității întregii structuri în vederea exercitării sarcinilor specifice. Soluțiile globale avute în vedere la realizarea acesteia influențează esențial performanțele finale ale robotului mobil.

Deși există o multitudine de soluții concrete pentru realizarea propulsiei unui robot mobil, calea energetică asociată fiecărei acționări este în principiu aceeași. Ansamblul Controler – Convertizor de putere – Element de execuție – Senzori constituie ceea ce denumim acționare inteligentă.

Pentru asigurarea locomoției unui robot mobil sunt posibile mai multe soluții ce pot fi grupate în două clase principale:

- *Contact direct cu solul* - clasa include cele trei soluții constructive tradiționale: cu roți, cu șenile și cu structuri antropomorfe pășitoare sau șerpuitoare.
- *Fără contact direct cu solul* - clasa include soluțiile neconvenționale: cu pernă de aer, sustentație magnetică sau navigație propriu-zisă, ca în cazul vehiculelor spațiale sau submersibile.

În imaginile de mai jos avem câteva modele de roboți cu șenile Figura 2.2 a), cu roți Figura 2.2 b) utilizați în mediul exterior, respectiv un robot utilizat în spații interioare Figura 2.2 c).



Figura 2.2 Variante de roboți mobili navigând în exterior și interior

2.2. Modele matematice pentru roboții mobili cu sustentație prin roți

2.2.1. Modelarea cinematică a structurilor fundamentale

Pentru realizarea funcției de navigație specifică oricărui robot mobil, prezintă importanță două tipuri de modele asociate:

- *Modelele matematice, cinematice și dinamice* ce țin cont nemijlocit de varianta constructivă a robotului mobil și sunt necesare pentru elaborarea strategiilor de navigație pe o traiectorie impusă.
- *Modelele geometrice*, necesare planificării traiectoriilor globale ale roboților mobili, în cadrul procesului de modelare geometrică generală a întregii scene de operare.

Tipul de modelare care ne interesează constă în stabilirea unui set de ecuații ce permit estimarea evoluției robotului mobil pe o traiectorie impusă și elaborarea unor posibile strategii de conducere. Modelarea dezvoltată este în strânsă corelație cu structura mecanică și varianta constructivă. Sunt preferate modelele simplificate, întrucât informații externe de localizare absolută și relativă sunt în general disponibile prin dotarea senzorială a robotului și a scenei sale de operare.

2.2.2. Robot mobil cu direcție de tip osie frântă

Pentru elaborarea modelului cinematic, să considerăm structura mecanică din figura 2.3, unde funcția de motricitate este asigurată de osia posterioară, iar cea de propulsie, de "osia frântă" anterioară.

Notațiile introduse în Figura 2.3 au următoarea semnificație: P - punctul caracteristic al robotului mobil, punct mijlociu al axei fixe posterioare, de coordonate (x, y) și viteza liniară v ; l_B - distanța dintre axa fixă posterioară și axa de direcție anterioară; θ - orientarea curentă a robotului mobil în raport cu axa OX a sistemului de referință global, asociat scenei de operare; α - unghiul de direcție; r - porțiunea de traiectorie descrisă de punctul caracteristic P .

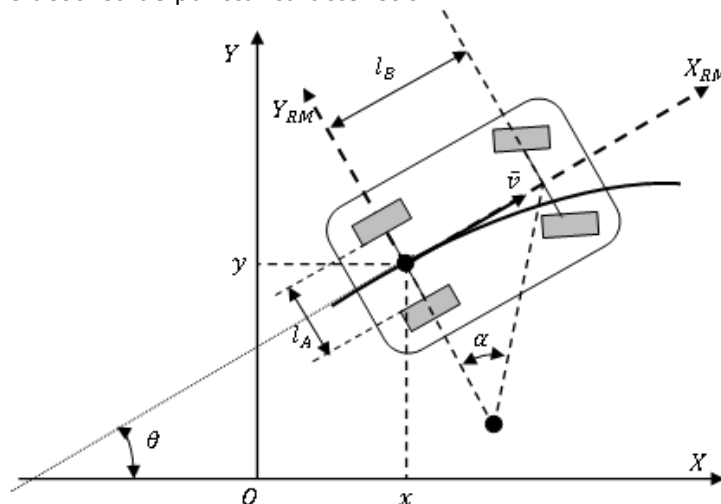


Figura 2.3 Robotul mobil cu direcție de tip osie frântă

Observăm din Figura 2.3, că robotul mobil poate fi substituit prin punctul său caracteristic P în sistemul de referință global, atașat scenei de operare. Poziția robotului în acest sistem de referință este descrisă prin două variabile de poziționare (x, y) , iar orientare sa prin variabila θ .

Cunoscând viteza liniară v și unghiul α , pot fi stabilite următoarele ecuații de mișcare:

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \quad (2.2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{l_B} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.3)$$

Prin integrarea lor, rezultă ecuațiile parametrice de mișcare ale acestui tip de robot, parametrul t reprezentând timpul scurs de la începerea mișcării:

$$\theta(t) = \theta(0) + \frac{v \cdot t}{l_B} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.4)$$

$$x(t) = x(0) + \frac{l_B}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \left[\sin \left(\theta(0) + \frac{v \cdot t}{l_B} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) - \sin \theta(0) \right] \quad (2.5)$$

$$y(t) = y(0) + \frac{l_B}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \left[\cos \left(\theta(0) + \frac{v \cdot t}{l_B} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) - \cos \theta(0) \right] \quad (2.6)$$

În ecuațiile (2.1) - (2.6) se consideră cunoscută viteza liniară v a punctului caracteristic P , întrucât la acest tip de robot, funcția de motricitate este cel mai adesea realizată cu o singură roată motoare, amplasată chiar în acest punct.

La variantele mecanice mai evolute, pentru îmbunătățirea stabilității pot fi prevăzute alte două roți libere la rotație, coaxiale (Figura 2.3) sau nu cu punctul P (așa numitele "roți castor"). Starea robotului mobil va fi reprezentată deci din punct de vedere cinematic de vectorul coordonatelor generalizate $(x, y, \theta)^T$. Fiecare coordonată generalizată are o evoluție continuă în timp, $(x(0), y(0), \theta(0))$ reprezentând valorile inițiale, asociate punctului inițial PI al traiectoriei.

Așa cum vom vedea ulterior în procesul de planificare a traiectoriei, un robot mobil este modelat uzual printr-un corp geometric, adecvat formei sale și considerat apoi liber la translație și rotație. Această supoziție nu este integral adevărată decât pentru construcțiile mecanice cu capacitate de pivotare, restul introducând *restricții cinematice*. Spre exemplu, structura cinematică a robotului mobil cu direcție de tip osie frântă din Figura 2.3 nu este capabilă să realizeze pivotarea. Aceste restricții pot fi cuantificate prin anumite relații matematice necesare pentru eliminarea anumitor parametri și reducerea corespunzătoare a spațiului configurațiilor.

O a doua categorie de restricții sunt dictate de capacitatea robotului de a satisface anumite performanțe impuse în privința vitezei și accelerației pe o anumită traiectorie, motiv pentru care mai sunt denumite și *restricții dinamice*.

Reluând cazul robotului mobil cu direcție de tip osie frântă din figura 2.3, robotul este modelat geometric printr-un dreptunghi în planul XOY , iar starea robotului este reprezentată prin vectorul variabilelor de poziție - orientare $(x, y, \theta)^T$, unde orientarea θ este o variabilă *modulo* (2π) . În timpul evoluției pe traiectorie, punctul P descrie traiectoria curbilinie Γ , ce admite ca tangentă permanentă axa mijlocie longitudinală, de lungime l_B . Există o restricție în mișcarea robotului dată de ecuația (2.7), ce a fost obținută prin divizarea relațiilor (2.1) și (2.2):

$$-\dot{x} \cdot \sin\theta + \dot{y} \cdot \cos\theta = 0 \quad (2.7)$$

Considerând că scena de operare a robotului este plană, numărul gradelor de libertate ale robotului mobil este egal cu doi. În același timp, coordonatele generalizate, reprezentate prin vectorul $(x, y, \theta)^T$, sunt în număr de trei.

Deoarece numărul gradelor de libertate ale robotului mobil este mai mic decât numărul coordonatelor generalizate, robotul mobil este supus în mișcare *restricției non-holonomice* reprezentată de ecuația (2.7). Aceasta înseamnă că robotul nu își poate schimba independent poziția și orientarea, cele două mărimi fiind cuplate prin structura sa cinematică. Din această cauză rezultă dificultăți importante în proiectarea algoritmilor de conducere meniți să asigure evoluția pe o traiectorie impusă.

Se poate stabili o legătură între spațiul configurațiilor (x, y, θ) și spațiul vitezelor $\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}$. Acesta din urmă este, la un moment de timp (Figura 2.4), un

plan perpendicular pe planul XOY și tangent traiectoriei Γ , intersecția instantanee dintre cele două fiind axa mijlocie longitudinală a robotului.

Dacă α reprezintă unghiul de viraj momentan al roților directoare anterioare, o restricție cinematică suplimentară va fi impusă de *unghiul maxim de viraj*, caracteristică constructivă a direcției de tip osie frântă, ce conduce la inegalitatea:

$$|\alpha| \leq \alpha_{max} \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.8)$$

Efectul acestei restricții este că punctul caracteristic P va putea descrie numai traiectorii curbilinii, a căror *curbură* k trebuie să satisfacă relația:

$$k = \frac{1}{\rho_{min}} = \frac{1}{l_B} \cdot \operatorname{tg}\alpha_{min} \quad (2.9)$$

unde ρ_{min} este raza minimă de viraj pe care o poate asigura sistemul de direcție al robotului mobil.

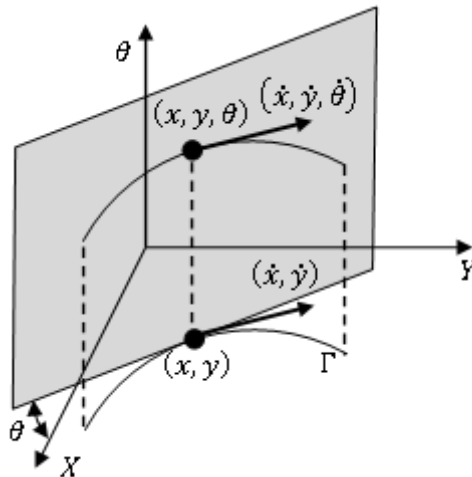


Figura 2.4 Legatura dintre spațiul configurațiilor și spațiul vitezelor

Viteza liniară v a punctului caracteristic P al robotului mobil este și ea restricționată într-un interval al valorilor admisibile $[-v_{max}, +v_{max}]$.

De asemenea, se mai pot face și următoarele observații:

- Dacă $\alpha = 0$ și $v > 0$ (respectiv $v < 0$), robotul execută o traiectorie liniară în sens direct (respectiv invers).
- Dacă $v > 0$ și $\alpha > 0$ (respectiv $\alpha < 0$), robotul execută o traiectorie curbilinie în sens pozitiv (sau trigonometric), respectiv negativ (sau orar).

Prin urmare, traiectoria executată de robotul mobil poate fi inclusă în mai multe clase, fiecare definită prin $(sgnv)$ și respectiv $(sgn\alpha)$.

Restricția (2.8) poate fi descrisă astfel:

$$\left| \dot{\theta} \right| \leq \frac{|v|}{\rho_{min}} \quad (2.10)$$

ceea ce conduce la inecuația:

$$\left(\dot{x} \right)^2 + \left(\dot{y} \right)^2 - \rho_{min}^2 \cdot \left(\dot{\theta} \right)^2 \geq 0 \quad (2.11)$$

Această inecuație limitează suplimentar spațiul vitezelor, vectorul $\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}^T$

putând fi plasat numai în interiorul celor două zone marcate în Figura 2.5. Unghiul de deschidere al fiecărei zone are valoarea indicată în figură, respectiv $\left[2 \cdot \arctg\left(\frac{1}{\rho_{min}}\right) \right]$.

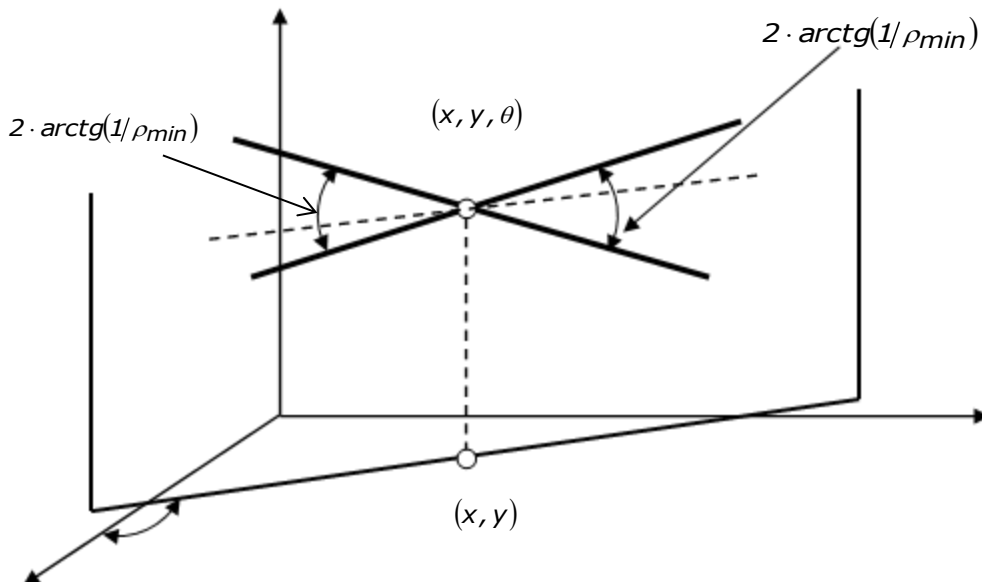


Figura 2.5 Restricții implicate în planul vitezelor

2.2.3. Robotul mobil cu roți diferențiale

Robotul mobil cu roți diferențiale dispune de două roți motrice comandate independent, care au o axă comună, orizontală și fixă în raport cu robotul. Viteza liniară (sau unghiulară) constantă a roților determină evoluția pe tronsoane drepte, iar diferența dintre viteze generează tronsoane circulare de traiectorie [Nițulescu, 2002].

Localizarea robotului va fi definită de poziția punctului caracteristic P , plasat median pe axa roților (poziționarea x, y), și unghiul făcut de perpendiculara dusă pe axa roților motrice prin punctul caracteristic cu una din axele sistemului de referință exterior (orientarea θ), așa cum indică Figura 2.6.

Viteza instantanee liniară a robotului \vec{v} este viteza punctului caracteristic P , în timp ce vitezele liniare ale celor două roți \vec{v}_S stânga și \vec{v}_D dreapta sunt permanent paralele între ele, având direcția perpendiculară pe axa mecanică ce le unește.

Starea robotului este caracterizată prin poziția și orientarea sa, precum și prin vitezele liniare ale celor două roți motrice.

Vectorul de stare va fi definit prin variabilele următoare: $(x, y, \theta, v_S, v_D)^T$.

Vectorul de intrare este constituit din accelerațiile liniare ale celor două roți motrice, a_S stânga și a_D dreapta.

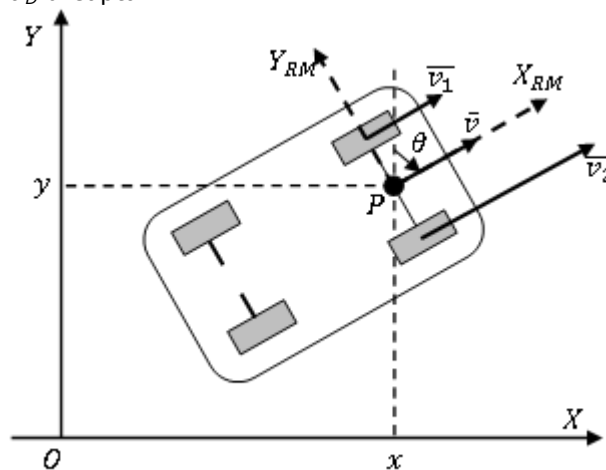


Figura 2.6 Robotul mobil cu roți diferențiale.

Dacă viteza liniară a robotului este v iar orientarea sa este θ , proiecțiile vitezei v pe axele sistemului de referință extern vor fi:

$$\dot{x} = v \sin \theta \quad (2.12)$$

$$\dot{y} = v \cos \theta \quad (2.13)$$

Întrucât viteza liniară a robotului este atașată punctului caracteristic P și are aceeași direcție cu vitezele liniare ale celor două roți motrice, relația dintre ele este următoarea:

$$v = \frac{v_S + v_D}{2} \quad (2.14)$$

Modelul matematic se poate dezvolta în vederea integrării într-o abordare dinamică care să ia în considerare și parametrii constructivi ai robotului. [Mondoc, 2010].

2.3. Navigarea biologică și navigarea roboților mobili

2.3.1. Navigarea biologică

Scopul principal al cercetătorilor din domeniul clasic al roboticii este de a dezvolta sisteme mecatronice capabile să îndeplinească anumite sarcini. În domeniul roboților de serviciu – roboților personali – cercetările urmăresc dezvoltarea unor variante diversificate de sisteme fiabile pentru servicii apropiate persoanelor. Dacă evaluarea roboților industriali se realizează prin procese de măsurare cu rezultate cantitative pe bază de parametri obiectivi, în zona roboților de serviciu performanțele sunt evaluate în baza unor criterii subiective dependente de utilizator [Ribeiro, 2005].

Modelele biologice stau la baza cercetărilor întreprinse de cercetători pentru realizarea de modele artificiale. Activitatea de cercetare – proiectare se bazează pe teorii din științele naturale și nu numai [Ribeiro, 2005].

Navigația este procesul de determinare și menținere a unei căi sau traiectorii dintr-un punct start către un punct țintă.

Oricare ar fi elementele de care animalele se folosesc în timpul navigării, oamenii au făcut încercări impresionante în ultimele decenii de a privi în interiorul procesului propriu-zis de navigație la nivel biologic. Acesta nu este doar un proces, ci un complex de procese cu strategii proprii, în funcție de grupul de animale [Ribeiro, 2005].

Orientarea este un aspect foarte important la animale. De-a lungul timpului acesta a evoluat și s-a perfecționat, practic animale fiind înzestrate nativ cu elemente care să ajute la deplasarea lor dintr-un punct în altul. Pentru orientarea corectă și navigație, animalele utilizează o varietate de indicii de referință.

Acești indici pot fi de diferite tipuri, cum ar fi obiecte vizuale, mirosuri, sau chiar câmpul geomagnetic, și poate solicita diferite simțuri pentru a percepe aceste puncte de navigație.

Importanța sau alegerea unui anumit traseu sau indiciu poate depinde de sarcina de navigație care trebuie îndeplinită, începând de la orientarea pe o rază scurtă, care ar putea fi aplicată pentru o suprafață de doar câțiva metri, sau de orientarea pe distanțe lungi, cum ar fi pasările în timpul migrației. Strategia de navigare depinde de specia de animale, de modalitatea de locomoție, de perioada de navigare (noapte sau zi) și se bazează pe o serie de elemente senzoriale [Katsura, 2004].

Păsările navighează folosind *câmpul magnetic al Pământului* (figura 2.9), *orientarea față de soare, orientarea față de stele și aproape de destinație folosesc repere cum ar fi munții și lacurile* [Rozhok, 2008].

Abilitatea păsărilor de a folosi informația este cunoscută și a fost verificată prin experimente ingenioase (cum ar fi creșterea păsărilor în medii complet demagnetizate sau în spații închise cu soare artificial care poate fi plasat în diferite zone), natura exactă și locația senzorilor nu este știută. Păsările au mici depozite de magnetit magnetic stabil în cap, însă conexiunea dintre aceste depozite și sistemul lor nervos nu a fost încă stabilită.

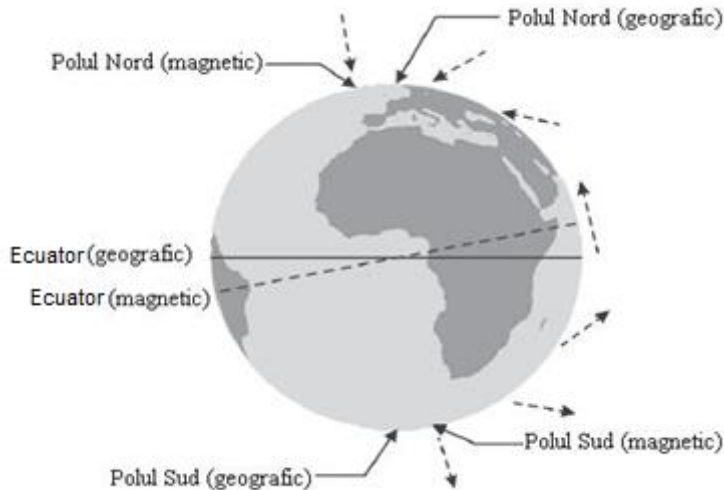


Figura 2.7 Prezentare schematică a câmpului geomagnetic

Cu toate acestea, cercetătorii din domeniu vorbesc despre existența unei busole magnetice pentru simțul direcției (și probabil al gradientilor) în câmpul magnetic al pământului și existența unei busole solare pentru a intui orientarea în funcție de soare.

Porumbeii voiajori sunt capabili să își găsească drumul spre casă de la distanțe mari, chiar dacă au fost duși în cuști închise până la locul de pornire. De vreme ce nu pot vedea drumul pe care au fost duși până la locul de unde sunt eliberați, nu pot înmagazina traiectoria în nici un fel și nici nu pot vedea reperele de pe drum.

S-a postulat că aceste păsări folosesc o *hartă de navigare* prin utilizarea gradientilor naturali din câmpul magnetic al pământului (Figura 2.7).

De fapt, aceasta înseamnă că, busola lor magnetică nu este sensibilă la polaritatea câmpului magnetic al pământului, ci la înclinația sa în funcție de vectorul gravitațional local. Acest aspect a fost demonstrat observând păsările care zboară peste Ecuator.

Porumbeii combină informația care le oferă o direcție brută de la punctul de plecare cu memoria unor repere aflate lângă casa lor [Kleeman, 2008].

Unele păsări sunt capabile să se întoarcă acasă atunci când sunt transportate la locul eliberării în cuști descoperite, astfel încât să poată vedea peisajul, însă nu și dacă sunt transportate în cuști închise.

Acest lucru sugerează faptul că sistemul lor vizual este capabil să înregistreze *informația optică în mișcare*.

Capacitatea de a naviga folosind direcția soarelui, prin busola solară, necesită ca animalul să aibă un *ceas biologic*, de vreme ce locația soarelui pe cer se schimbă în timpul zilei (Figura 2.8).

Alături de busola magnetică sau cea solară există dovada că unele păsări posedă și o busolă celestă. Experimentele pe păsări crescute sub un cer nocturn artificial, cu o rotație specifică, arată că direcția migrărilor lor poate fi deviată. Cu toate acestea, busola celestă (i.e. pentru păsările din Emisfera Nordică, capacitatea de a localiza Steaua Nordului) nu apare în gene, ci este dobândită din experiențe timpurii

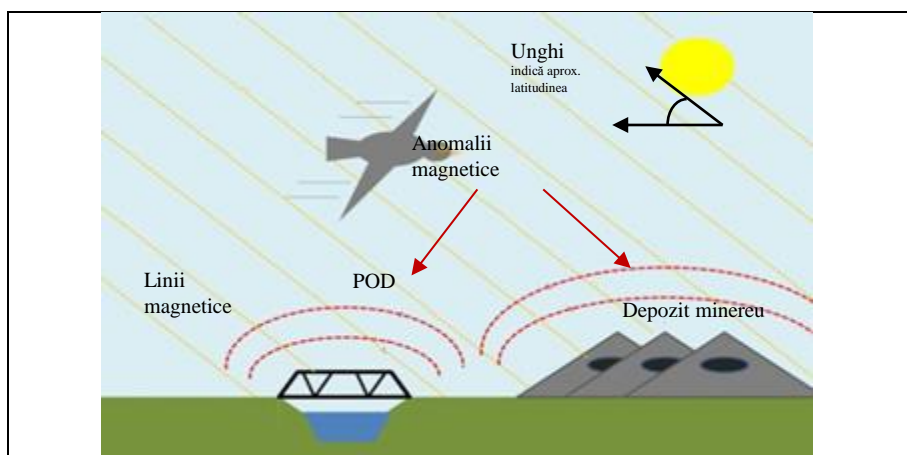


Figura 2.8 Navigarea la pasări

Și în cazul insectelor întâlnim elemente ale navigației. Un exemplu poate fi fluturile Monarh, care zboară iarna și la începutul primăverii din nordul Mexicului până în vestul Statelor Unite.

Fluturii care se întorc în anul următor sunt „copiii” sau „nepoții” celor care au migrat. Experimente recente au folosit un simulator de zbor al fluturilor, unde fluturii au fost supuși unui curent de aer laminar și încet, care i-a făcut să zboare încontinuu ore în șir. Variații în ciclul zi-noapte au fost folosite pentru a le schimba ceasurile circadiene. Aceste experimente au scos la iveală faptul că acești fluturi posedă un senzor cu timp compensat, pe care îl folosesc pentru a determina direcția de migrare [Werb, 1998].

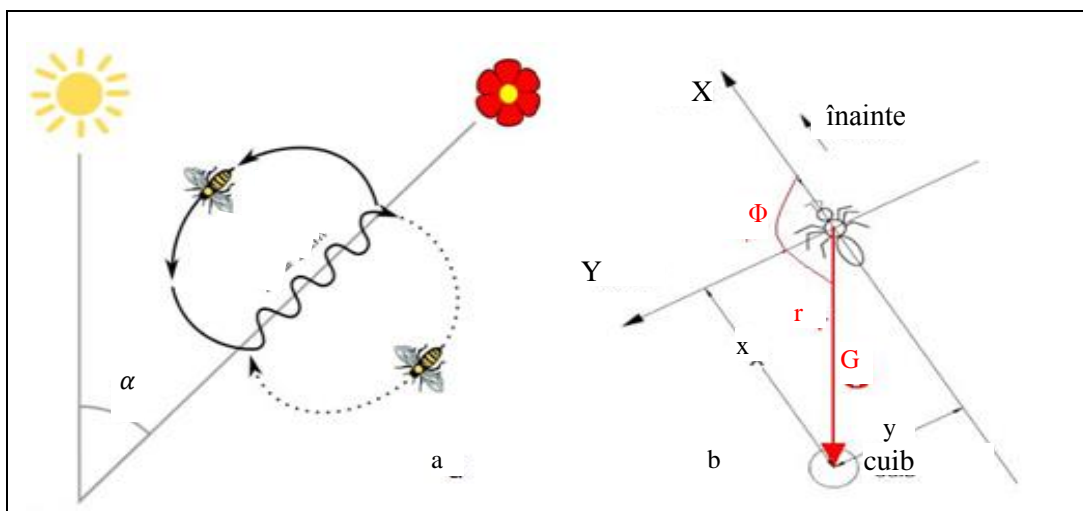


Figura 2.9 a - navigarea la albine; b - navigarea la furnici

Mai mult, rotația câmpului magnetic din jurul simulatorului nu a schimbat direcția de zbor, confirmând astfel faptul că fluturii Monarh nu folosesc o busolă magnetică pentru navigație. Utilizarea unei busole solare este de asemenea bine documentată la albine. Este știut faptul că albinele folosesc o „mişcare de dans”

pentru a indica direcția unei surse bune de hrană în raport cu soarele. Dansul este efectuat pe o suprafață verticală a stupului, aparent codat, astfel încât drept în sus înseamnă direct către soare. Albinele „dansatoare” pot indica direcția corectă în funcție de soare chiar și într-o zi în care nu e soare pe cer. Acest lucru este posibil deoarece senzorul de soare a albinelor este sensibil la raze ultraviolete și nu la lumina vizibilă. Rutele aparent de circuit sunt în realitate busole din segmente de drum aflate între repere (Figura 2.9).

În contrast cu insectele zburătoare, majoritatea speciilor de furnici folosesc feromonii pentru a marca drumul, cu o singură mare excepție. Furnica de deșert (*Cataglyphis fortis*) se deplasează cu ajutorul unei combinații de căi integrate și recunoaștere de repere. Pe măsură ce se depărtează de cuib, integrează drumul pentru a obține un vector global care indică traiectoria de la locația curentă la cuib și apoi stochează acest vector.

Furnicile care se întorceau dintr-o călătorie au fost luate înainte de a ajunge la cuib și plasate la diferite puncte de-a lungul unei rute familiare, în așa fel încât vectorii globali au fost anulați. Furnicile și-au găsit drumul spre casă prin utilizarea reperelor vizuale și angajarea vectorilor locali, pentru a obține orientarea dorită la fiecare segment de drum.

2.3.2. Navigarea roboților mobili

Navigarea roboților mobili – sisteme autonome mobile - este un subiect larg, care acoperă un spectru larg din diferite tehnologii și aplicații. Acesta se bazează pe unele tehnici foarte vechi, pe inspirații din mediul biologic precum și pe unele aspecte actuale ale științei spațiului și ingineriei.

Cerințele de navigare a unui sistem autonom mobil pot fi raportate la acuratețea cu care acesta are nevoie pentru a naviga - aceasta este rezoluția de navigare.

Aceste cerințe variază foarte mult cu aplicația. Orice sistem autonom trebuie să fie capabil să-și determine poziția sa la o rezoluție în termen de cel puțin propriile dimensiuni, pentru a putea naviga și interacționa corect cu mediul său de lucru [Seifzadeh, 2009].

Evitarea obstacolelor este una din cele mai importante probleme care se pun la realizarea unui robot mobil. Fără aceasta capacitate, mișcarea roboților ar fi restrictivă și fragilă.

Evitarea obstacolelor înseamnă **detectia** obstacolelor și **oprirea** sau **schimbarea direcției de deplasare** a roboților mobili, cu scopul de a evita coliziunile.

Termenul „**evitarea obstacolelor**” descrie un **set de tehnici software**, care permit sistemelor autonome mobile, de tipul roboților, să-și ajusteze traiectoria și viteza în funcție de mediul înconjurător. Utilizat în conjuncție cu măsurarea distanțelor și controlul mișcărilor, softul implementat oferă roboților mobili, reflexe similare ființelor vii și le permite să navigheze în mod inteligent.

Există o foarte mare diversitate de tipuri de roboți mobili și de situații în care trebuie să acționeze aceștia. În funcție de natura misiunilor pe care trebuie să le rezolve, se pot distinge mai multe niveluri de autonomie și implicit de complexitate a tehnicilor de evitare a obstacolelor. Se poate vorbi astfel despre activități în mediu structurat și respectiv activități în mediu nestructurat.

Pentru ca un robot mobil să poată naviga autonom în mediul în care operează, este esențial să se realizeze un model exact al respectivului mediu înconjurător și să dispună de un sistem senzorial, pentru a se realiza acoperirea

zonelor de interes, în diverse benzi spectrale și cu o varietate de tehnici de procesare.

Este fundamental la proiectarea unui robot mobil de cercetare, ca acesta să fie echipat cu un sistem de senzori proprii, având capacitatea de achiziție a informațiilor, pe baza cărora să-și formeze o reprezentare internă a lumii înconjurătoare, pentru a lua decizii și a planifica acțiuni.

Robotul trebuie să poată extrage informații de la senzorii săi și să le interpreteze, pentru a-și calcula următoarea mișcare. Un robot mobil, care navighează autonom sau semiautonom, trebuie să poată evita obstacolele de pe traseu.

Sistemele de senzori, integrate în mod curent pe un robot pentru a se realiza evitarea obstacolelor, sunt în principal din categoriile: radar; scanare cu laser; telemetrie cu ultrasunete; senzori vizuali (pentru stereo și/sau omniviziune) [Ippoliti, 2005].

După cum se poate remarca din figura de mai jos, cele mai numeroase aplicații își propun o navigare simplă, la un punct dat, autonomă sau teleautonomă în medii structurate.

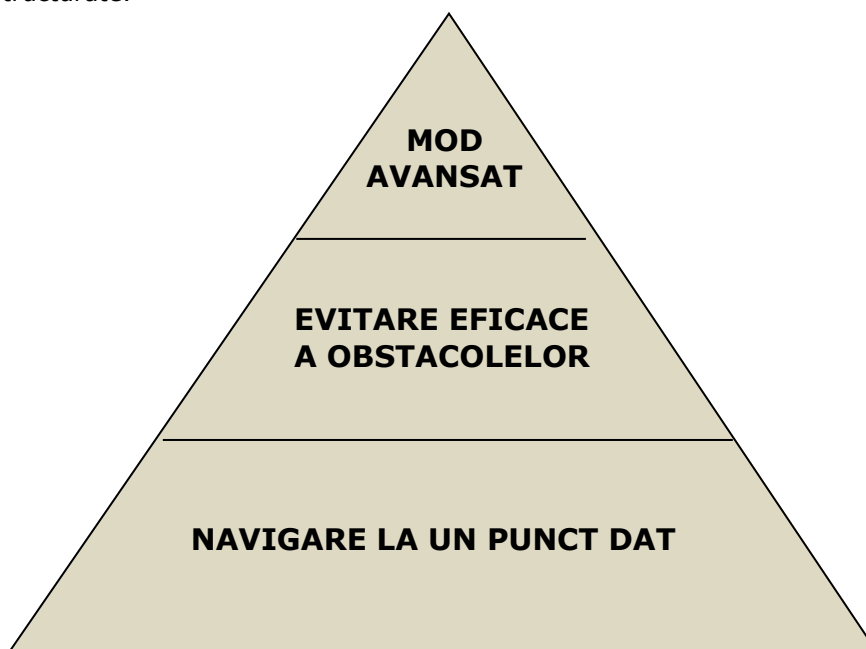


Figura 2.10 Niveluri de autonomie și evitarea obstacolelor

La un nivel superior se poate vorbi de navigare autonomă și evitarea obstacolelor în mișcare, într-un câmp reactiv apropiat.

Cele mai avansate tehnologii permit navigarea în formație a roboților (Figura 2.11 a)), redresarea automată sau urmărirea autonomă a țintelor și eventual interceptarea lor.

În vârful piramidei se pot plasa roboții de cercetare realizați pentru explorarea spațiului cosmic, de exemplu cei trimisi pe Luna sau pe alte planete (Figura 2.11b)).

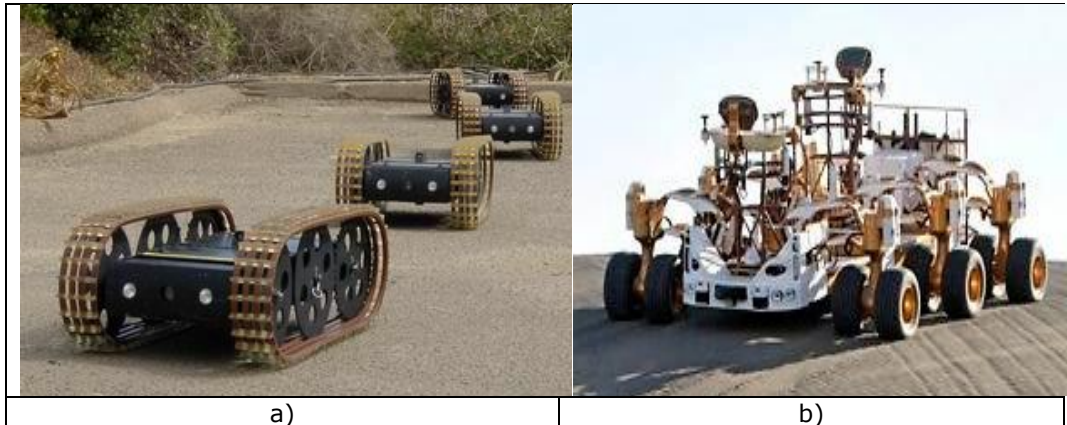


Figura 2.11 Formație de roboți (a) și robot lunar (b)

O diagramă a fluxului funcțional pentru un sistem de evitare a obstacolelor este prezentată în Figura 2.14. Datele transmise de fiecare senzor în parte, sunt procesate printr-un algoritm de detecție și sunt ponderate în funcție de performanțele senzorului, în condițiile unui set dat de condiții de lucru.

Coordonatele țintelor detectate, de la fiecare senzor în parte, sunt integrate într-o hartă locală a obstacolelor. Informațiile recepționate sunt suprapuse într-o manieră cât mai acoperitoare, pentru ca eficiența redusă a unor senzori să fie compensată de performanța celorlalți. Harta este apoi analizată pentru a se determina cel mai apropiat obstacol de pe direcția de deplasare.

Aceste informații sunt folosite pentru încetinirea vitezei robotului sau chiar oprirea lui și pentru comanda direcției de mișcare, în vederea ocolirii obstacolului.

Din punct de vedere istoric, sistemele de navigație pot fi clasificate în mare în funcție de tipurile de hărți utilizate [Fiala, 2004]; [Murty, 2003].

Hărțile metrice (de exemplu, [Moravec, 1985]; [Laumond, 1985]), permit înregistrarea într-un sistem comun obstacole sau repere utilizate pentru navigație. Hărțile topologice [Kuipers, 1991] arată o serie de locuri accesibile robotului și modalitatea pentru a trece de la o locație în puncte apropiate, sub forma unui grafic.

Hărțile metrice au avantajul de a oferi o estimare mai exactă a poziției, în timp ce hărțile topologice oferă în mod direct o segmentare a spațiului în diferite locuri poate fi interesant pentru navigare sau interacțiune cu oamenii. De asemenea, au fost dezvoltate mai multe abordări hibride.

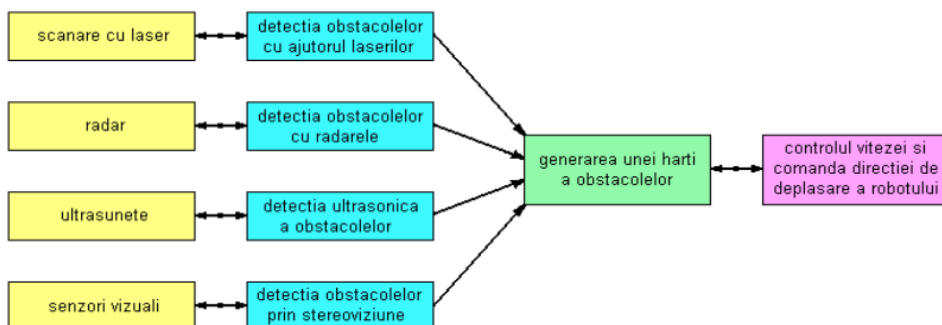


Figura 2.12 Diagrama bloc funcțională a sistemului de evitare a obstacolelor

Literatura de specialitate vorbește despre trei categorii de localizare:

- *Navigare globală* - capacitatea de a determina poziția sistemului în termeni absoluți sau hartă de referință (Figura 2.13). Soluțiile sunt oferite de tehnologii GPS (Figura 2.13a)), DGPS (Figura 2.13b)), balize radio.
- *Navigare locală* - capacitatea de a determina poziția sistemului mobil în raport cu obiectele / obstacolele (staționare sau în mișcare) din mediul înconjurător, și de a interacționa corect cu acestea pe parcursul activității. Sistemele video, balize optice, sisteme inerțiale de navigație, elemente senzoriale pentru estimarea deplasării și a traiectoriei sunt câteva din soluțiile utilizate [Borenstein, 1997], [Carmena, 2001], [Collins, 2007].

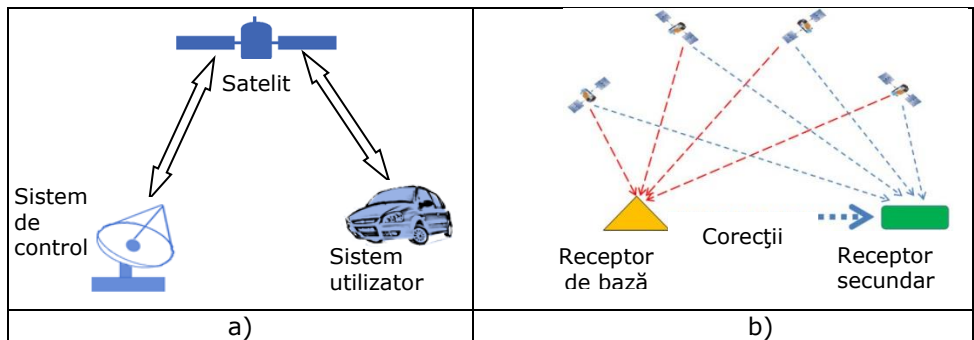


Figura 2.13 Navigare globală

- *Navigare personală* – capacitatea de a determina starea internă a sistemului pe parcursul navigației. Metoda odometriei bazată pe traductoare/senzori care descriu starea internă a sistemului autonom mobil este caracteristică acestei clase de navigare.

O reprezentare sugestivă a disponibilităților pentru cele trei categorii de navigare este prezentată în Figura 2.14.

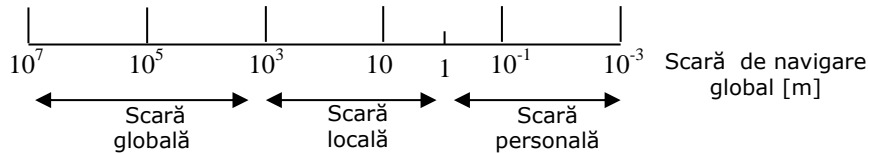


Figura 2.14 Scară de navigare

O taxonomie a tehnologiilor de localizare urmează principiile prezentate acceptate în literatura de specialitate:

- Principiul fizic care este utilizat ;
- Tipul de măsurare care este efectuat prin utilizarea fizică a principiului.

Tabel 2.2. Principii fizice de localizare

Principiu fizic	Referințe bibliografice
Forța mecanică	[Ambastha, 2005], [Borenstein, 1997],
Unde acustice	[Borenstein, 1997], [Bartsch, 2012], [Chang, 1996]
Unde electromagnetice - RF	[Dudek, 1996], [Kleeman, 2008]
Unde electromagnetice	[Bekey, 2005], [Christ, 2000], [Kleeman, 2008]
Semnale optice	[Borenstein, 1997]

Tabel 2.3 Tipul măsurării

Tipul măsurării	Referințe bibliografice
Intensitate, forța, amplitudinea	[Dudek, 1996], [Roberts, 2009], [Toledo, 2000]
Timpul de propagare	[Borenstein, 1991], [Toledo, 2000], [Roberts, 2009]
Semnal de prezență / absență	Sisteme RF
Faza	[Borenstein, 1991]
Frecvența	[Dudek, 1996], [Kleeman, 2008]
Unghiul (unui semnal de intrare)	[Borenstein, 1996]
Recunoașterea formei	[Baek, 2006], [Chang, 1996], [Terekhov, 2011]

Senzorii pot fi de foarte multe tipuri, un rol important avându-l senzorii optici. Vederea roboților este un domeniu care în ultimii ani a cunoscut un progres științific și tehnic remarcabil. Rolul sistemelor de vedere artificială este să formeze imagini, să le analizeze și să producă descrierea lor, astfel încât să se extragă aspectele esențiale ale spațiului vizualizat, utile pentru îndeplinirea misiunilor robotului.

Pentru realizarea sistemelor de vedere artificială, o sursă de inspirație permanentă au constituit-o sistemelor de vedere biologice. S-a urmărit tot timpul preluarea unor idei și soluții din domeniul viziunii biologice. Sistemele de vedere care se montează pe un robot mobil trebuie să asigure un câmp vizual cât mai mare și o calitate corespunzătoare a imaginii.

Sistemele de vedere stereo joacă un rol important, cu ajutorul lor obținându-se informații referitoare la departarea la care se află diverse obiecte din spațiul în care se deplasează robotul, informații care pot fi de mare utilitate pentru evitarea coliziunilor. Camerele video convenționale au un câmp vizual destul de limitat. Din acest motiv, în cazul roboților mobili este recomandat să se utilizeze camere video speciale, cu vedere panoramică sau omnidirecțională.

Pentru ca senzorii să aprecieze în mod corect și cu erori minime localizarea diverselor obstacole și traiectoria optimă de deplasare, sunt necesare diferite sisteme care să diminueze erorile cu care se înregistrează informația. Unul dintre ele este și Filtrul Kalman, care este o tehnică matematică utilizată la scară largă în sistemele de control și electronică aerospațială, pentru a evalua în mod corect un semnal obținut printr-o serie de măsurători afectate de perturbații. Teoretic acest filtru este un estimator pentru problema liniar pătratică.

2.4. Concluzii

Cercetarea bibliografică realizată scoate în evidență actualitatea temei de cercetare referitoare la robotica mobilă. Clasificarea roboților mobili prezentată în cadrul capitolului punctează varietatea constructivă și aplicativă a acestora.

Evoluția roboților mobili în aplicațiile scontate depinde atât de aplicația în sine cât și de scena – mediul de lucru. Pentru o simulare a robotului în mediul de lucru este strict necesară cunoașterea modelului matematic al robotului mobil.

Aspectele legate de navigarea biologică și modul de realizare fizică a acesteia în robotică vin să concretizeze importanța funcției de navigare. Referințele legate de funcția senzorială și navigare evidențiază importanța comportamentului senzorial în analiza scenei de lucru.

3. MATEMATICA PROCESELOR ALEATOARE CU APLICAȚII ÎN ROBOTICĂ

3.1. Introducere

În natură fenomenele se manifestă în mod *determinist* sau *aleatoriu* (*stochastic*).

Determinismul este propoziția filozofică potrivit căreia orice eveniment, inclusiv cogniția și acțiunea umană, este determinat în mod cauzal de un lanț neîntrerupt de evenimente anterioare. Astfel, determinismul poate fi considerat ca un principiu al științei, principiu care afirmă că aceleași cauze produc aceleași fenomene. Determinismul poate fi examinat numai cu referire la cauze fizice care își produc cu necesitate efectele.

Fenomenele deterministe sunt caracterizate printr-o evoluție după o lege determinată matematic. În natură și tehnică sunt sisteme a căror evoluție în timp este deterministă dar impredictibilă.

Termenul de aleator este utilizat pentru a defini un proces fizic sau fenomen natural de a nu fi predictibil.

Incertitudinea stochastică poate fi modelată foarte ușor cu ajutorul teoriei probabilităților bayesiene, teorie aplicabilă în acele situații în care evenimentele sunt bine precizate dar apariția lor este incertă din cauza lipsei de informație. Incertitudinile de tip aleator sunt asociate cu caracterul aleator natural al informației observate.

Aceste incertitudini nu pot fi reduse sau modificate, deoarece sunt o parte a lumii reale (a realității obiective).

Incertitudinile de tip epistemic sunt asociate cu impreciziile (inexactitățile) în predicția și estimarea realității. Aceste incertitudini pot fi reduse prin aplicarea unor modele de predicție mai bune și/sau prin experimente îmbunătățite. În cazul incertitudinii subiective, probabilitățile nu mai pot fi aplicate din cauza lipsei de informații.

Prin urmare, s-a încercat dezvoltarea altor teorii care să modeleze incertitudinea epistemică. Printre acestea se numără și teoria posibilității și teoria evidenței.

3.2. Modelarea incertitudinii

3.2.1. Introducere

Luarea deciziilor în viața obișnuită este inseparabilă de incertitudine [Shackle, 1961], [Klir, 2006].

Incertitudinea există și nu poate fi eliminată. Există diverse abordări specifice domeniului în care este abordată. Într-o definiție cu aspect de generalitate, incertitudinea – este definită *ca nesiguranță, îndoială, ezitare* [Dex].

Incertitudinea este un termen utilizat pe scară largă în inteligența artificială și inginerie. Totuși, autorii în aceste domenii de aplicare și cercetare nu sunt întotdeauna de acord cu privire la sensul de incertitudine, pe tipuri de clase/

categorii, cu privire la posibilele surse, pe sinonime, la posibile clasificări, pe reprezentări etc.

În acest sens Joussemme [Joussemme, 2003] se referă la legătura dintre conceptul de incertitudine, imperfecțiune, imprecizie, neclaritate, ambiguitate, ignoranță, etc.

3.2.2. Incertitudinea. Taxonomii, clasificări

Incetitudinea are două sensuri principale, în cele mai multe clase exprimate:

- Sensul I – incertitudinea este o stare de spirit;
- Sensul al II-lea – este o proprietate fizică a informațiilor.

Primul sens se referă la "starea de spirit" a unui agent, care nu dispune de informațiile sau cunoștințele necesare să ia o decizie, astfel că este într-o stare de incertitudine: *eu nu sunt sigur că acest obstacol există.*

Al doilea sens se referă la o proprietate fizică, reprezentând limitele sistemelor de percepție senzorială:

- distanța până la obstacolul X este incertă;
- poziția robotului (x,y) este incertă;

În teoriile de raționament incert, incertitudinea este adesea descrisă ca imperfecțiunea informațiilor, în strânsă corelare cu erorile proceselor de măsurare fără să depindă de *starea de spirit*. Totuși, o informare incertă – în sensul II - poate induce o oarecare incertitudine în sensul I de interpretare: *distanța până la obstacolul X este incertă* adică *nu este sigur că obstacolul există.*

Sociologul G. Bronner consideră incertitudinea doar ca stare de spirit depinzând de puterea "minții" de a o sesiza și de a o evita. Bronner distinge două tipuri de incertitudine:

- incertitudine materială ;
- incertitudine de țintă/scop când o parte din sistem sau subsistemele agentului sunt deteriorate sau pot fi deteriorate.

În conexiune cu acest mod de abordare domeniul roboticii mobile se regăsește în fiecare dintre cele două categorii:

- va funcționa robotul mobil ? poate să se deplaseze robotul mobil în mediul de lucru nestructurat ?
- va atinge robotul mobil punctul țintă, dacă senzorul ultrasonic nu funcționează în limitele prescrise ?

Bronner clasifică în final incertitudinea în trei categorii:

- incertitudinea nu depinde de agent și nu poate fi evitată;
- incertitudinea nu depinde de agent dar poate fi evitată;
- incertitudinea este generată de agent și poate fi evitată.

Smithson clasifică ignoranța în două categorii: o stare a ignoranței – *eroare* – și actul de a ignora – *irelevanța*.

Prima categorie este o stare (de ignoranță) care rezultă din cauze diverse: cunoștințe distorsionate sau cunoștințe incomplete.

A doua categorie este considerată ca o acțiune deliberată de a ignora ceva irelevant (neactual, subiect tabu, subiect nedecidabil) pentru procesul de rezolvare a unei probleme.

Smithson în 1989 a propus o taxonomie în ideea că incertitudinea este categoria cea mai ușor de gestionat a ignoranței - este prezentată în Figura 3.1 [Joussemme, 2003]

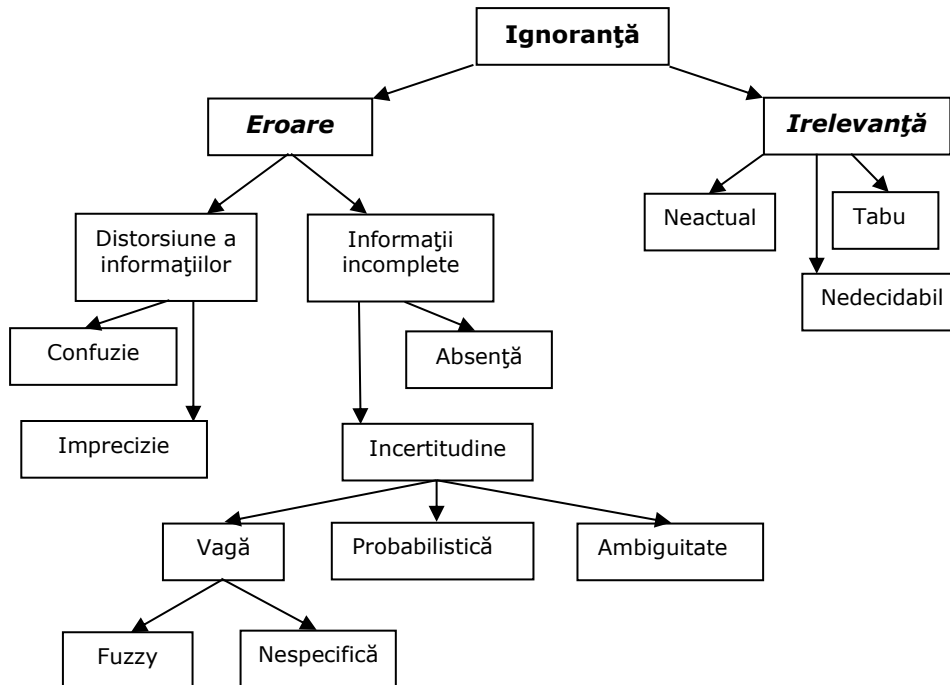


Figura 3.1. Taxonomia Smithson a ignoranței

Se poate considera că diferitele aspecte ale incertitudinii sunt amestecate și uneori și comparativ. Joussemle în [Joussemle, 2003] distingea patru elemente de interes:

- modul de definire a incertitudinii;
- interpretări epistemice ale incertitudinii (obiective vs subiective), adică modalități de a obține informații (sau măsurarea incertitudinii) despre situația dată;
- categorii ale incertitudinii;
- teorii matematice ale incertitudinii (reprezentare matematică, formalizarea, măsuri fuzzy, axiomatizare).

De asemenea trebuie avut în vedere că o categorie de incertitudine poate fi abordată matematic în diverse forme dar una dintre metode este recomandată (mulțimi fuzzy, teoria probabilităților, etc.).

Incetitudine de măsurare este definită ca un parametru asociat rezultatului unei măsurări, care caracterizează împrăștierea valorilor ce în mod rezonabil ar putea fi atribuite măsurandului.

Incetitudinea măsurării cuprinde în general mai multe componente. O parte dintre aceste componente pot fi evaluate pe baza analizei statistice desfășurate asupra unei serii de observații. În acest caz incetitudinea este de tip A.

O altă fracțiune de componente poate fi evaluată doar pe baza altor metode decât analiza statistică a unei serii de observații. În acest caz se vorbește despre incetitudinea de tip B [Ellison, 2012]. Corecție, incetitudine standard, incetitudine extinsă, ș.a. sunt elemente care încearcă să prezinte un punct de vedere comun asupra acestui aspect.

În Figura 3.2 este redată o taxonomie a interpretării epistemice a incertitudinii.

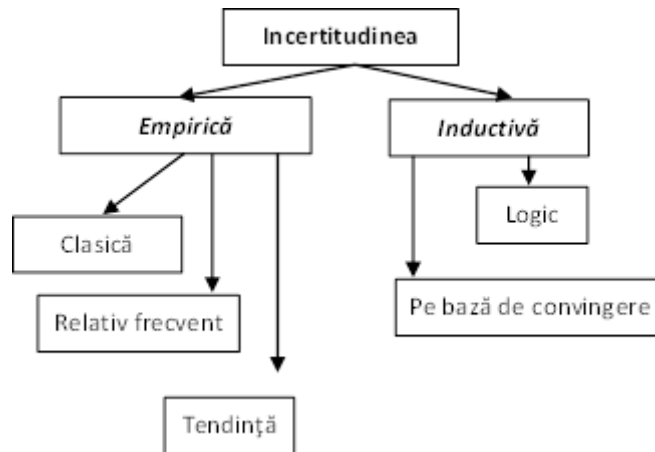


Figura 3.2. Interpretarea epistemică a incertitudinii

Gupta [Gupta, n.d.] identifică două categorii de incertitudine pe care le definește prin:

- incertitudine U-tip 1 – care se identifică cu cea de tip A în cazul anterior. Această componentă este atribuită de autor impreciziei elementelor senzoriale;
- incertitudine U-tip 2 – se identifică cu incertitudinea tip B. Autorul include ca surse de incertitudine 2: gândirea umană, raționamentul, cunoașterea și percepția proceselor sau informația cognitivă în general.

Otomanski [Otomanski, 2008] identifică o serie de surse posibile ale incertitudinii ce însoțește un proces de măsurare:

- descrierea incompletă a testului în condițiile unor cerințe insuficient descrise;
- realizarea imperfectă a procedurii test;
- cunoașterea inadecvată a efectelor mediului asupra procesului de măsurare;
- zgomot uman în citirea instrumentelor analogice;
- modificarea caracteristicilor sau a performanțelor instrumentelor de măsurare;
- aproximările și ipotezele încorporate în metoda și procedura de măsurare;
- modificări ale observațiilor datorate mediului – temperatură, umiditate, presiunea aerului – sau alte variabilități.

O sinteză a elementelor care se încadrează în cauze ale incertitudinii ar include:

- *lipsa de informații* – una din cele mai frecvente cauze. Această lipsă de informații se poate considera ca o lipsă de informații cantitative. Pe de altă parte lipsa informațiilor este privită și din punct de vedere calitativ. În acest caz decizia este luată cu un anumit risc în contextul unei anumite probabilități.
- *abundența informațiilor (complexitatea)*. În acest caz se poate pune problema sistemului de a prelucra în același timp multitudinea informațiilor. Tendința este de a clasifica informațiile și de a concentra o serie de

caracteristici în una singură și de a renunța la alte caracteristici considerate mai puțin relevante. Termenul utilizat în literatura de specialitate este de scalare (scaling). Metoda este utilizată pentru evitarea obstacolelor. Informațiile recepționate de elementul senzorial sunt distribuite pe domenii valorice și ca urmare robotul mobil execută mișcări de rotație pentru a evita obstacolele.

- *dovezi contradictorii*. Reflexia falsă este un astfel de caz. În acest caz, corectarea informațiilor se poate face prin tranziția de la "incertitudine" la starea de "certitudine".
- *ambiguitate*. Ambiguitatea se referă la informații diferite referitoare la baza stării.
- *procesul de măsurare*. Incertitudinea existentă în procesul de măsurare (datorită unei tehnologii nespecifice) se poate include în lipsa de informație.
- *convingerea*. Acest caz apare atunci când informații subiective sunt disponibile ca o certitudine.

Imperfecțiuni, fie că este vorba de imprecizie sau incertitudine, străbat scenarii din lumea reală și trebuie să fie incluse în fiecare sistem de informații, care încearcă să ofere un model complet și exact a lumii reale. Dar cu toate acestea, acest lucru este realizat cu greu de produse pentru sistemele de informații de astăzi. Un motiv major ar putea fi găsite în dificultatea de a înțelege diferitele aspecte ale impreciziei și incertitudinii.

Există imprecizie și incertitudine în lumea reală? Aceasta este o întrebare deschisă.

Oricare ar fi răspunsul, trebuie recunoscut faptul că imaginea noastră despre lume, care corespunde doar informațiilor pe care le deținem, nu ajunge la perfecțiune. Date disponibile pentru un sistem de informare sunt întotdeauna într-un fel imperfecte.

Noi folosim imperfecțiunea ca o semnificație/caracteristică de cea mai mare generalitate. Informația este perfectă atunci când este precisă și sigură. Imperfecțiunea poate fi din cauza impreciziei, inconsecvență și incertitudine, cele mai importante aspecte ale datelor imperfecte.

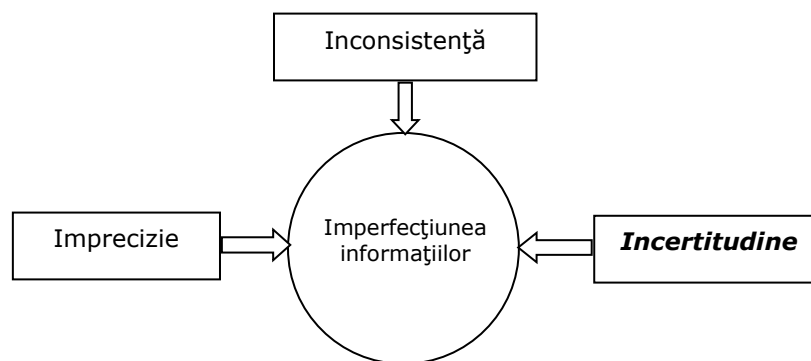


Figura 3.3. Factori ai imperfecțiunii informației

Conceptele de incertitudine și informații sunt strâns interconectate. Incertitudinea este privită ca o manifestare a unui deficit de informații, în timp ce informația este considerată ca având capacitatea de a reduce incertitudinea.

44 Matematica proceselor aleatoare cu aplicații în robotică - 3

Ori de câte ori aceste noțiuni - incertitudine și informații - pot fi confundate cu alte conotații atribuite lor, este util să se facă referire la ele ca incertitudine bazată pe informație și respectiv pe informație bazată pe incertitudine.

Pornind de la ipoteza că în centrul activității de observare stă scopul obținerii de informații, Klir [Klir, 2006] precizează semnificația legăturii incertitudine - informație (Figura 3.4):

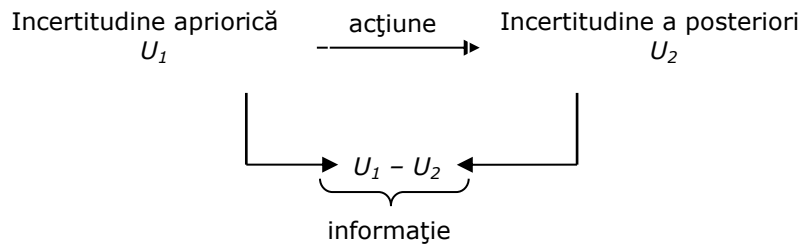


Figura 3.4. Legătură între incertitudine și informație

Pornind de la acest aspect și pe baza unor dezvoltări profunde, Klir consideră că incertitudinea se poate clasifica în două clase: vagă și ambiguă.

Trei clase ale sistemelor și problemele asociate care solicită abordare matematică distinctă sunt sugerate de Klir [Klir, 2006]

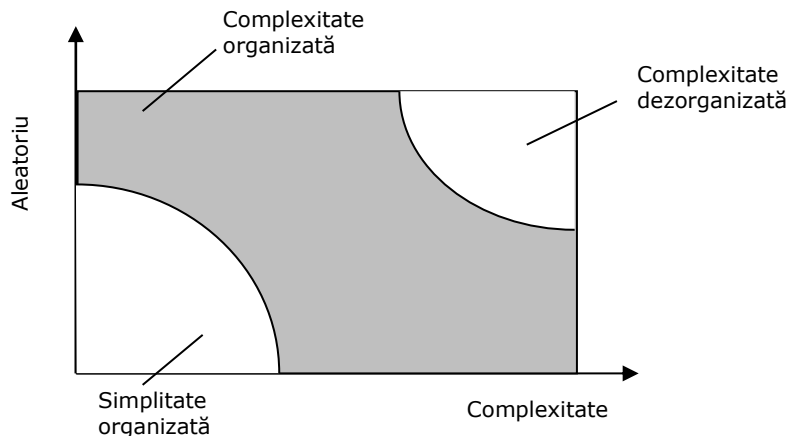


Figura 3.5. Moduri de incertitudine

Pentru a utiliza operațional o teorie a incertitudinilor, Klir [Klir, 2006] identifică probleme de rezolvat structurate pe următoarele patru nivele:

- Nivel 1- trebuie să găsim o formalizare matematică adecvată a tipului conceput de incertitudine;
- Nivelul 2- avem nevoie de a dezvolta un calcul prin care acest tip de incertitudine poate fi utilizat în mod corespunzător;
- Nivelul 3- trebuie să găsim un mod semnificativ de măsurare a cantității de incertitudine relevantă în orice situație în care este formulată;
- Nivelul 4- avem nevoie de a dezvolta aspectele metodologice ale teoriei, inclusiv procedurile de admitere a incertitudinii.

Smets [Smets, 1999] separă informația în două clase:

- *Informație numerică – cantitativă:*
 - informație numerică;
 - interval informativ;
- *informație simbolică - calitativă;*
 - informație lingvistică;
 - informație simbolică.

Conform acestei clasificări Smets [Smets, 1999] identifică metodele de modelare:

- în abordarea simbolică: *logica non monotonă*;
- în abordarea cantitativă:
 - *mulțimi fuzzy*;
 - *măsura fuzzy Sugeno*;
 - *măsurile de posibilitate și necesitate*;
 - *teoria probabilităților*

Incertitudinea stohastică – poate fi modelată foarte ușor cu ajutorul teoriei probabilităților bayesiene, teorie aplicabilă în acele situații în care evenimentele sunt bine precizate dar apariția lor este incertă din cauza lipsei de informație.

Incertitudinea epistemică (sau subiectivă) – este datorată lipsei de informații despre un sistem de evenimente. În plus, chiar dacă nu ne confruntăm cu o lipsă de informație, o situație de incertitudine poate apărea datorită semanticii vagi sau ambigue a unor concepte.

O altă abordare a incertitudinii epistemice este cea reîntâlnită în teoria evidenței lui Dempster și Shafer. Această teorie este o extindere a teoriei probabilității, în care probabilitatea nu mai este asociată doar unui singur eveniment, ci unui set de evenimente. Cu alte cuvinte, analizăm un eveniment prin intermediul subevenimentelor componente. De asemenea, după cum am mai amintit, incertitudinea este caracterizată de un interval de valori și nu doar de o anumită valoare.

Există trei funcții importante în teoria evidenței:

- funcția probabilității de bază (bpa);
- funcția de încredere (bel);
- funcția de plauzibilitate (pl).

3.2.3. Informație, date, semnal și incertitudine

Teoria informației este subramura informaticii care se ocupă cu studiul măsurării informației și a proprietăților acesteia.

Informația – este semnificația atribuită datelor cu ajutorul convențiilor utilizate pentru a le reprezenta.

Data – este un fapt, o noțiune sau instrucțiune, reprezentată sub o formă convențională, adecvată comunicării, interpretării și prelucrării manuale sau cu mijloace automate.

Sistemele tehnice actuale ridică problema obținerii unor *informații* despre *procese fizice* pentru memorare și redare, pentru comunicație sau pentru control.

Printr-o operație de măsurare, operație de evaluare calitativă a unei mărimi pe cale experimentală, se poate pune în evidență o informație dintr-un mediu investigat [Cepișcă, 2004], [Dolga, 2008].

O noțiune importantă, la care se apelează pe parcursul a tot ce înseamnă măsurare, este cea de *mărime* (*variable* în limba engleză, *grandeur* în limba franceză) [Dolga, 2008]. Putem defini prin *mărime* tot ce se poate modifica cantitativ [Cepișcă, 2004]. Mărimile fizice sunt noțiuni abstracte și numai prin

asocierea lor cu o clasă de obiecte, evenimente pot fi descrise numeric prin măsurare. O altă definiție conformă cu dicționarul limbii române face referire la mărime ca "*Proprietate comună a unor obiecte, pe baza căreia acestea pot fi ordonate într-un șir*" [***4]. O definiție apropiată cu cea anterioară se referă la mărime ca la "*... proprietate comună pentru o clasă de obiecte, evenimente, stări, fenomene, procese etc.*"

Mărimea care poate fi evaluată experimental, astfel încât să i se poată atașa o descriere simbolică (de tip numeric) se numește *mărime fizică* (sau *mărime măsurabilă*). Descrierea numerică se numește *valoarea numerică a mărimii fizice*.

Într-o structură organică a sistemului mecatronic, informația poate exista sub forma unui *semnal* (de ex. semnal electric) sau *codificată într-un obiect material* (de ex.: mostră de sânge, text scos la imprimantă etc.).

Semnalul se poate defini ca un purtător fizic de informație despre variația în timp a energiei. Parametrii informației – amplitudine, frecvență, fază, etc. – se pot obține prin prelucrarea semnalelor prin tehnici adecvate.

Achiziția de date este un proces prin care un fenomen fizic din lumea reală este transformat în semnale electrice, este convertit în semnal digital pentru procesare, analiză și stocare prin PC [Dolga, 2008]. Achiziția de date în marea majoritate a cazurilor este dedicată și controlului proceselor. Pe parcursul procesului de achiziție a informației se poate stabili o relație ideală / teoretică între informația primară *inf* și semnalul de ieșire *S* (Figura.3.6):

$$S = f(\text{inf}) \quad (3.1)$$



Figura 3.6. Informație și cantitate măsurabilă

Funcția ideală poate fi enunțată sub forma unui tabel de valori, a unui grafic, sau o funcție matematică.

Sistemul de măsurare – measurement system – constă din totalitate elementelor de măsurare și auxiliare destinate unor măsurări specificate. *Lanțul de măsurare* – measuring chain – se definește ca totalitatea de elemente ale unui sistem de măsurare care constituie traseul semnalului de măsurare de la intrare până la ieșire.

În concluzie, lanțul de măsurare trebuie să asigure prin elementele sale următoarele funcții specifice procesului de măsurare: extragerea informației privind mărimea fizică supusă operației de măsurare, transformarea în semnal electric, prelucrarea semnalului electric, transmiterea la distanță a semnalului, afișarea / înregistrarea / utilizarea. Componenta principală a acestui lanț de măsurare este elementul senzorial.

Utilizând reprezentarea din teoria sistemelor, schema funcțională a unui element senzorial se poate prezenta conform figurii 3.7 unde:

- "*y*" este mărimea de ieșire și se identifică cu semnalul de ieșire *S* din modul de definire a funcției ideale (rel.3.1);
- "*x*" este mărimea de intrare și se identifică cu informația primară *inf*;
- "*p_I*" și "*p_e*" sunt mărimi perturbatoare interne și externe.

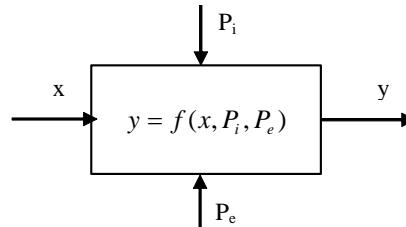


Figura 3.7. Reprezentarea sistemică a unui sensor

În orice operație de măsurare, indiferent de atenția și eforturile depuse, între valoarea adevărată X a mărimii necunoscute (informația primară) și valoarea măsurată $X_{m\grave{a}s}$ va exista o diferență din cauza unor imperfecțiuni (la toate nivelurile), a mărimilor perturbatoare, etc. (Figura 3.8).

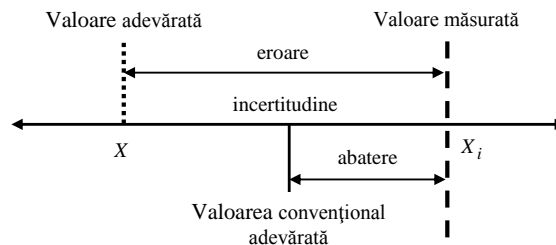


Figura 3.8. Definirea conceptului de eroare și abatere

Eroarea rezultatului măsurării este diferența dintre rezultatul măsurării (valoarea măsurată) și valoarea adevărată. Există o *incertitudine de măsurare*, definită ca intervalul $\pm u$ în care se estimează că se află, cu o anumită probabilitate, valoarea adevărată.

Incetitudinea trebuie estimată pe baza unei analize a surselor potențiale de erori din procesul analizat. În aceste cazuri, se fac măsurări repetate, în condiții riguros identice, iar erorile se calculează pe baza statisticii matematice, alegând un model probabilistic de repartiție a erorilor.

3.2.4. Noțiuni fundamentale de teoria probabilităților

Un rol esențial în fundamentarea teoriei probabilităților este cel al teoriei algebrelor Boole.

Putem spune că o algebră Boole este o *mulțime nevidă* \mathfrak{A} în care sunt definite:

- operația de reuniune - \cup ;
- operația de intersecție - \cap ;
- luarea complementarei - C ;

și care verifică axiomele: de comutativitate, de asociativitate, de absorbție, de distributivitate, de complementaritate pentru orice $A, B, C \in \mathfrak{A}$ [Mihoc, 1980].

Noțiunea fundamentală a teoriei probabilităților este aceea de eveniment. Ce este un eveniment ? Rezultatul unui experiment, adică producerea sau absența unui fenomen în experiență, în condițiile unor ipoteze și restricții impuse se numește

eveniment. Evenimentele se pot clasifica în: evenimente sigure; evenimente imposibile și evenimente aleatoare [Mihoc, 1980].

Un eveniment îl numim:

- elementar dacă se realizează ca rezultat al unei singure probe (există un singur caz favorabil); evenimentul se notează cu ω ;
- compus dacă acesta apare cu două sau mai multe rezultate ale experimentului (există mai multe cazuri favorabile).

O analogie între evenimente și mulțimi permite o scriere și în general o exprimare mai comodă ale unor idei și rezultate legate de conceptul de eveniment. Astfel, vom înțelege evenimentul sigur ca mulțimea tuturor evenimentelor elementare, adică: $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ și orice eveniment compus ca o submulțime a lui Ω . De asemenea, putem vorbi despre mulțimea tuturor părților lui Ω pe care o notăm prin $\mathcal{P}(\Omega)$, astfel că pentru un eveniment compus A putem scrie, în contextul analogiei dintre evenimente și mulțimi, că $A \subseteq \Omega$ sau $A \in \mathcal{P}(\Omega)$.

Evenimentul imposibil este evenimentul care în mod obligatoriu nu se produce la efectuarea unei probe și se notează cu \emptyset .

Elementele lui $\mathcal{P}(\Omega)$ le vom numi evenimente aleatoare sau pe scurt evenimente A, B, C [Mihoc, 1980].

Considerăm o mulțime nevidă de evenimente $K \subseteq \mathcal{P}(\Omega)$ despre care spunem că este corp dacă satisface axiomele:

- I. $\forall A \in K \rightarrow \bar{A} \in K$;
- II. $\forall A, B \in K \rightarrow A \cup B \in K$.

Cuplul (Ω, K) spunem că este câmp finit de evenimente, în cazul în care K este un corp.

Fie (Ω, K) un câmp finit de evenimente, numim probabilitate pe câmpul considerat o funcție $P: K \rightarrow R$ care satisface condițiile:

- I. $P(A) \geq 0, \forall A \in K$;
- II. $P(\Omega) = 1$;
- III. $P(A \cup B) = P(A) + P(B), \forall A, B \in K$ și $A \cap B = \emptyset$

Considerăm câmp finit de probabilitate tripletul $\{\Omega, K, P\}$ unde cuplul (Ω, K) este un câmp finit de evenimente iar $P: K \rightarrow R$ este o probabilitate pe K .

Pentru orice câmp de probabilitate au loc proprietățile:

1. $P(B - A) = P(B) - P(A \cap B)$;
2. dacă $A \subset B$, atunci $P(B - A) = P(B) - P(A)$;
3. dacă $A \subset B$, atunci $P(A) \leq P(B)$;
4. $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$;
5. $P(\emptyset) = 0$;
6. $0 \leq P(A) \leq 1$;
7. $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$.

Pe lângă proprietățile elementare anterioare mai trebuie precizate și următoarele noțiuni:

- a) *probabilități condiționate*: probabilitatea evenimentului B condiționată de probabilitatea evenimentului C :

$$P(B / A) = P_A(B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (3.1)$$

- b) *formula lui Bayes*. Dacă A_1, A_2, \dots, A_n este un sistem complet de evenimente al câmpului (Ω, K) și $X \in K$ atunci

$$P_X(A_i) = \frac{P(A_i) \cdot P(A_i)(X)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(A_i)(X)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Într-un câmp finit de evenimente, ale cărui evenimente elementare sunt egal probabile, probabilitatea unui eveniment oarecare este egală cu raportul dintre numărul m de evenimente favorabile evenimentului dat și numărul n de evenimente elementare ale câmpului:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (3.3)$$

3.2.5. Variabilă aleatoare

Noțiunea de variabilă aleatoare reprezintă una din noțiunile de bază importante din teoria probabilităților.

În studiul unui fenomen se desfășoară măsurători ale căror rezultate se exprimă prin valori numerice reale.

Să considerăm câmpul finit de probabilitate tripletul $\{\Omega, \mathbf{K}, \mathbf{P}\}$ unde cuplul (Ω, \mathbf{K}) este un câmp finit de evenimente iar $\mathbf{P}: \mathbf{K} \rightarrow \mathbf{R}$ este o probabilitate pe \mathbf{K} .

Numim variabilă aleatoare $X(\omega)$, pe mulțimea evenimentelor elementare $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ cu valori pe \mathbf{R} , o funcție definită prin:

$$X: \Omega \rightarrow \mathbf{R}, X(\omega_k) = x \quad (3.4)$$

Variabila aleatoare $X(\omega)$ atribuie un număr real, denumit valoarea variabilei aleatoare, pentru fiecare rezultat ω din spațiul S . O reprezentare intuitivă a variabilei aleatoare este prezentată în Figura 3.9.

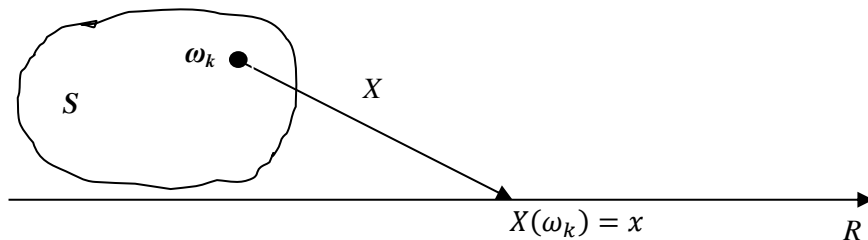


Figura 3.9. Reprezentare intuitivă a unei variabile aleatoare

Variabila aleatoare induce o măsură probabilitate pe dreapta reală după cum urmează:

$$P(X = x) = P(\omega : X(\omega) = x) \quad (3.5)$$

$$P(X \leq x) = P(\omega : X(\omega) \leq x) \quad (3.6)$$

$$P(x_1 < X \leq x_2) = P(\omega : x_1 < X(\omega) \leq x_2) \quad (3.7)$$

Putem observa ca două sau mai multe rezultate ω din spațiul S pot determina o aceeași valoare $X(\omega) = x$ dar două numere diferite de pe dreapta R nu pot fi asociate unui același rezultat din spațiul S .

Dacă valorile numerice ale unui șir de date aparțin mulțimii numerelor întregi sau raționale atunci se definește o variabilă aleatoare discretă. În cazul

apartenenței valorilor la mulțimea numerelor reale se definește o variabilă aleatoare continuă.

Considerăm un experiment în urma căruia pentru variabila X rezultă valorile $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Probabilitatea ca o valoare oarecare „ i ” să aibă valoarea x_i este $P(X = x_i) = p_i$.

Pentru toate valorile măsurate se poate construi tabloul repartiției:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix} \text{ sau } X : \begin{pmatrix} x_i \\ p_i \end{pmatrix}, 1 \leq i \leq n \quad (3.8)$$

Un vector $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ ale cărui componente ξ_k ($k = 1, 2, \dots, n$) sunt variabile aleatoare se numește variabilă aleatoare n -dimensională.

Dintre proprietățile variabilelor aleatoare amintim [Mihoc, 1980]:

- Dacă ξ este o variabilă aleatoare și c este o *constant* atunci: $\xi + c$, $c\xi$, $|\xi|$, ξ^2 , $\frac{1}{\xi}$ cu $\xi \neq 0$ sunt de asemenea variabile aleatoare;

- Dacă ξ și η sunt două variabile aleatoare atunci: $\xi + \eta$, $\xi - \eta$, $\xi\eta$, $\frac{\xi}{\eta}$ sunt de asemenea variabile aleatoare.

3.2.6. Semnal aleator

Un semnal este o descriere a modului în care un parametru este dependent de un alt parametru. Un semnal este un purtător de informație. De exemplu, cel mai des întâlnit tip de semnal în electronica analogică este o tensiune electrică care depinde de timp.

Deoarece ambii parametri pot acoperii un interval continuu de valori, acest tip de semnal îl vom numi *semnal continuu*. În contrast, trecerea acestui semnal printr-un convertor analog digital forțează cuantizarea ambilor parametri [Niculae, 2008]

Modul de reprezentare a procesului de cuantizare depinde de parametrii

CAN:

- dacă conversia se face cu un convertor pe 8 biți la o rată de 500 de eșantioane / secundă, semnalul în tensiune va putea lua doar 256 de valori posibile; timpul este definit în incremente de $\Delta t = 0.02$ [s];
- dacă conversia se realizează cu un convertor pe 12 biți la o rată de 1000 de eșantioane pe secundă, tensiunea va putea lua doar 4096 valori posibile, iar timpul este definit doar la incremente de $\Delta t = 0.001$ [s].

Semnalele formate din parametrii care sunt cuantizați în acest mod se numesc *semnale discrete* sau *semnale digitale*.

În Figura 3.10 se prezintă două semnale discrete. Acestea sunt reprezentate în această figură prin linii continue deoarece există prea multe eșantioane apropiate pentru a fi percepute ca separate.

Variabila N este larg utilizată în tehnica de prelucrare digital a semnalelor (DSP) pentru a reprezenta numărul total de eșantioane ale unui semnal.

Două notații sunt de regulă folosite pentru atribuirea numerelor de eșantion:

- indexul eșantioanelor se modifică merge de la 1 la N (de exemplu de la 1 la 512) - *one based index*;
- indexul eșantioanelor se modifică de la 0 la $N-1$ (de ex., de la 0 la 511) - *zero based index*.

Matematicienii o folosesc de regulă prima notație, în timp ce în tehnicile DSP este folosită mai mult a doua notație.

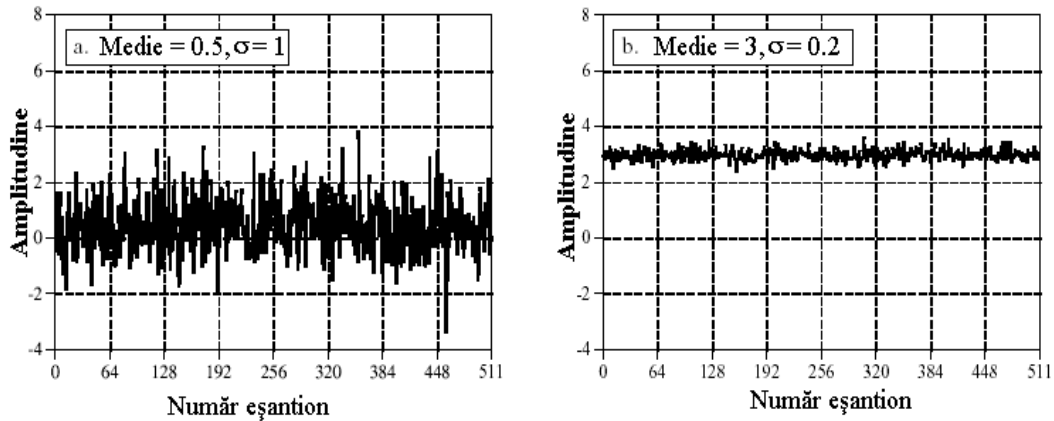


Figura 3.10. Semnale discrete [Niculae, 2008]

Din punctul de vedere al conținutului informațional, semnalele se împart în două categorii:

- Semnale deterministe: cele la care evoluția semnalului este anterior cunoscută. Ele nu aduc nici o informație, sunt folosite doar pentru testarea circuitelor și echipamentelor, în laborator sau în exploatare;
- Semnale aleatoare: poartă cu ele informație și putem estima evoluția pe baza proprietăților statistice (domeniul valorilor, frecvența cea mai mare a componentelor sale etc.). Exemple de semnale aleatoare: semnalul vocal cules de microfon, curentul absorbit de motorul electric, turația motorului, temperatura măsurată într-o încăpere, viteza vântului, etc.

Un semnal aleator este un proces care se desfășoară în timp și este guvernat de legi probabilistice. Din punct de vedere matematic, un semnal aleator este o funcție de două variabile $\xi(k, t) = \xi_k(t)$ unde k ia valori în spațiul eşantioanelor, iar t ia valori pe axa reală a timpului. Funcția $\xi(k, t) = \xi_k(t)$ face parte din mulțimea sau clasa de semnale $\xi(t)$ și se numește o „realizare particulară” a procesului.

O reprezentare intuitivă a unui semnal aleator este prezentată în Figura 3.10

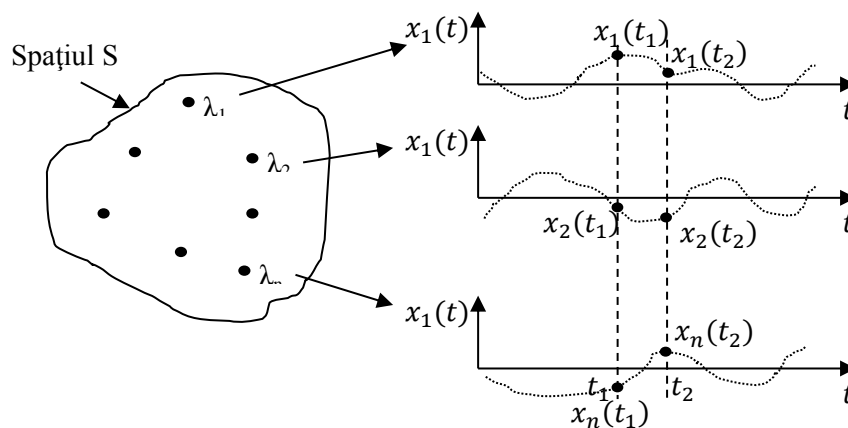


Figura 3.11. Reprezentare intuitivă a unui semnal aleator

Prin $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ sunt notate rezultatele în spațiul eşantioanelor iar prin

$x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ realizările particulare ale semnalului aleator $x(t)$. Semnalul aleator este format din mulțimea realizărilor particulare, adică:

$$x(t) = \{x_k(t)\} \quad (3.9)$$

Dacă variabila t ia valori pe axa reală, atunci semnalul $x(t)$ se va numi proces aleator sau stochastic, continuu în timp.

Dacă variabila t ia numai valori întregi, adică $t \in Z$, atunci semnalul aleator $x(t)$ se va numi proces aleator sau stochastic, discret în timp și se va nota sub forma:

$$x[n] = \{x_k[n]\}, n \in Z \quad (3.10)$$

Pentru orice valoare particulară a lui $t = t_i$ mulțimea valorilor funcțiilor $x(k, t) = x_k(t)$ definește o variabilă aleatoare notată $x(t_i)$ și respectiv $x[n_i]$. Putem astfel să scriem

$$x(t_i) = \{x_k(t_i)\} \quad (3.11)$$

și respectiv

$$x[n_i] = \{x_k[n_i]\}, n \in Z \quad (3.12)$$

Din relațiile anterioare se observă că un proces aleator este o mulțime de variabile aleatoare indexate.

Fie numărul real x_i ce aparține domeniului de valori ale variabilei aleatoare $x(t_i)$ sau $x[n_i]$ și A evenimentul pentru care $x_k(t_i) \leq x_i$ și respectiv $x_k[n_i] \leq x_i$. Dacă se notează cu n numărul realizărilor particulare favorabile evenimentului A dintr-un total N al realizărilor particulare, atunci:

$$P(A) = \frac{n}{N} \quad (3.13)$$

va reprezenta probabilitatea ca variabila aleatoare să fie mai mică sau egală cu x_i .

3.2.7. Funcția de repartiție și de densitate de probabilitate a variabilelor aleatoare

O variabilă aleatoare poate fi:

- *Discretă*, repartiția în acest exprimându-se sub forma:

$$X : \begin{pmatrix} x_i \\ f(x_i) \end{pmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

unde x_i reprezintă variantele respective iar $f(x_i)$ reprezintă probabilitățile respective $f(x_i) = P(X = x_i)$. Funcția $f(x)$ se numește funcția de probabilitate.

- *Continuă*, repartiția exprimându-se în acest caz sub forma:

$$X : \begin{pmatrix} x \\ \varphi(x) \end{pmatrix}, x \in [a, b] \quad (3.15)$$

unde $\varphi(x)$ este densitatea de probabilitate în punctul x .

O altă formă de exprimare a legii de repartiție, care caracterizează atât variabila aleatoare discretă cât și cea continuă, este funcția de repartiție. Prin definiție, funcția de repartiție a unei variabile aleatoare X este probabilitatea evenimentului ca variabila X să ia o valoare mai mică decât un x_0 dat:

$$F(x) = P(X < x_0) = \sum f(x_i) \quad (3.16)$$

$$F(x) = P(X < x_0) = \int_a^{x_0} \varphi(x) dx \quad (3.17)$$

3.3. Valoarea medie

Considerăm un sistem a cărui stare unidimensională – atașată variabilei aleatoare X - poate fi măsurată succesiv obținându-se valorile x_1, x_2, \dots, x_n . Acestea permit calculul valorii medii (pe principiile cunoscute):

$$\mu_N = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.18)$$

Pentru simplificarea scrierii se utilizează și o bară superioară pentru desemnarea mediilor aritmetice ale unor funcții de variabila aleatoare:

$$\overline{f(x)}^N = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f(x_k) \quad (3.19)$$

Dacă o nouă valoare x_{N+1} este obținută / măsurată se pune evident întrebarea: care este noua valoare medie ?

În practică, calculul mediei se poate face chiar în timpul colectării datelor (fie printr-un proces de achiziție a datelor, fie de calcul, al doilea caz fiind specific modelării).

Rata cu care sunt obținute datele poate fi mare astfel încât, în scurt timp, volumul datelor ajunge impresionant și stocarea lor devine o problemă chiar și pentru calculatoare performante din acest punct de vedere. De aceea se preferă estimarea dinamică a mediilor (*running averaging*) fără însă a se reține toate aceste valori.

Se va utiliza valoarea valoarea anterioară μ_N și se va realiza o corecție utilizând noua valoare x_{N+1} . Se poate scrie în mod simplu:

$$\begin{aligned} \mu_{N+1} &= \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^{N+1} x_i = \frac{N}{N+1} \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i + \frac{1}{N} \cdot x_{N+1} \right) = \\ &= \frac{N}{N+1} \cdot \mu_N + \frac{1}{N+1} \cdot x_{N+1} = \mu_N + K \cdot (x_{N+1} - \mu_N) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Unde $K = \frac{1}{N+1}$ poartă denumirea de coeficient de amplificare.

Noua valoare μ_{N+1} este media ponderată a valorii anterioare μ_N și noii valori x_{N+1} . Se remarcă astfel existența unei relații de recurență între două valori medii consecutive. Această relație arată că, pentru calculul mediei curente, este necesară *memorarea mediei anterioare, a numărului de eșantioane și cunoașterea ultimei valori luată de variabila aleatoare.*

3.4. Abaterea standard

Expresia $|x_k - \mu|$ evidențiază cu cât se abate – deviază – valoarea x_k față de valoarea medie. Media aritmetică a acestor abateri reprezintă, abaterea medie. În multe cazuri, parametrul important nu este abaterea de la medie, ci *puterea* acestei abateri. Spre exemplu, atunci când semnale de zgomot aleator afectează un sistem de măsurare, puterea zgomotului rezultat este suma puterilor semnalelor individuale. Prin urmare mărimi legate de amplitudinea semnalelor componente caracterizează mai slab astfel de semnale. De aceea în locul *abaterii medii* este folosită abaterea standard atunci când se dorește o informație medie legată de amplitudinea unui semnal.

Abaterrea standard (*standard deviation*) sau *eroarea pătratică medie* este:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^2} \quad (3.21)$$

Estimarea dinamică a abaterii standard beneficiază și ea de o relație de recurență:

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{k=1}^N x_k^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N x_k \right)^2 \right] \quad (3.22)$$

În expresia anterioară s-a considerat utilă folosirea lui $N-1$ în loc de N pentru valori mai mici ale acestuia și în condițiile cunoașterii doar estimative a valorii medii [Mihoc, 1980]. Această relație scoate în evidență că sunt necesare pentru calcul să fie memorate următoarele valori: suma valorilor luate de variabila aleatoare, suma pătratelor luate de variabila aleatoare, numărul de eșantioane și ultima valoare a variabilei aleatoare.

Mărimea σ_2 este cunoscută în statistică sub numele de *varianță* sau *dispersie*.

În teoria semnalelor, varianța reprezintă puterea acestor fluctuații de la valoare medie a semnalului. Folosind notațiile prescurtate ale mediilor varianța se poate scrie sub forma:

$$\sigma^2 = \overline{x^2} - (\overline{x})^2 \quad (3.23)$$

O altă mărime legată de varianță este *rădăcina mediei pătratelor* (*root-mean-square RMS*) definită prin relația:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad (3.24)$$

În anumite situații, media caracterizează rezultatul unei măsurări (în esență valoarea măsurată a unei mărimi), în timp ce abaterea standard caracterizează zgomotul și alte elemente perturbatoare ce pot afecta procesul de măsurare. În aceste situații, abaterea standard este importantă prin comparație cu media. Acest lucru se regăsește în *raportul semnal zgomot* (*signal-to-noise-ratio SNR*).

$$SNR(x) = \frac{\overline{x}}{\sigma_x} \quad (3.25)$$

Pe baza celor doi termeni anteriori, se definește și coeficientul de variație (*coefficient of variation CV*):

$$CV(x) = \frac{1}{SNR(x)} = \frac{\sigma_x}{\overline{x}} \quad (3.26)$$

Procesul anterior este un proces iterativ pentru care se poate prezenta schema logică din Figura 3.12.

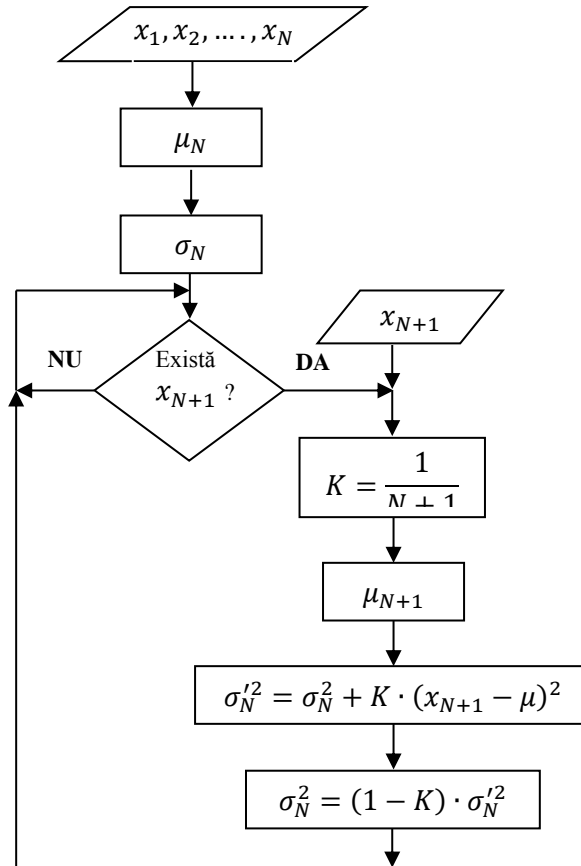


Figura 3.12.Schema logică a unu process iterative

Fiecărei valori medii i se poate asocia câte un estimator al abaterii maxime de la medie. Pornind de la aceste observații se poate defini *eroarea tipică* (*typical error TE*).

În particular, pentru semnale aleatoare, eroarea tipică TE, dintre media calculată folosind datele a N măsurători și media adevărată a procesului studiat este dată de [Breaz, 2007]:

$$TE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.27)$$

Se observă că în literatură de specialitate, specifică statisticii, se notează operatorul de mediere aplicat unei variabile aleatoare x cu $M(x)$, ceea ce ar echivala cu [Mihoc, 1980]:

$$M(x) = \bar{x} \quad (3.28)$$

Operatorul dispersie este notat prin:

$$D(x) = M\{[(x - M(x))]^2\} \quad (3.29)$$

3.5. Repartiții probabilistice și aplicații în robotica mobilă

3.5.1. Repartiții probabilistice clasice

Pentru simplificarea exprimărilor în continuare voi înlătura din exprimare textuală cuvântul probabilistic și voi înțelege prin repartiție numai repartiția probabilistică. Dintre repartițiile continue mă voi referi în continuare la modelul matematic pentru următoarele.

- Repartiția uniformă

Funcția de repartiție a cărei densitate de repartiție este

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{în rest} \end{cases} \quad (3.30)$$

se numește funcție de repartiție uniformă pe $[a,b]$. Variabila aleatoare X care are funcția de repartiție uniformă pe intervalul $[a,b]$ se numește uniformă pe $[a,b]$.

Funcția de repartiție uniformă pe $[a,b]$ este:

$$F_X(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (3.31)$$

Graficele funcțiilor $f(x)$ și $F(x)$ ale repartiției uniforme sunt date în Figura 3.13 și Figura 3.14.

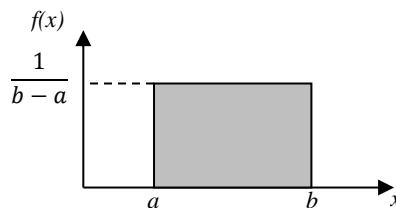


Figura 3.13. Densitatea de repartiție

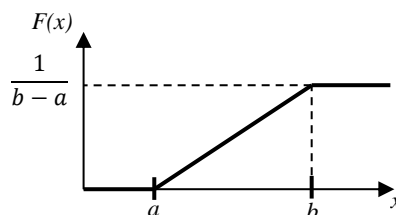


Figura 3.14. Funcția de repartiție uniformă

- Repartiția exponențială negativă

Variabila aleatoare X urmează o repartiție exponențială negativă dacă densitatea sa de repartiție este:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

pentru parametrul $\lambda > 0$.

Funcția de repartiție a variabilei aleatoare X care are o repartiție exponențială negativă este:

$$F_X(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

- Repartiție normală

O variabilă aleatoare urmează o repartiție normală de parametri μ și σ^2 dacă densitatea sa de repartiție este:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.34)$$

unde $x \in \mathbb{R}$. Vom nota prin $N(\mu, \sigma^2)$ repartiția normală cu parametrii μ și σ^2 .

Funcția de repartiție a repartiției normale $N(\mu, \sigma^2)$ este:

$$F_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\xi \quad (3.35)$$

3.5.2. Repartiții în analiza proceselor aleatoare din robotică

Considerăm modelarea procesului de măsurare ca o densitate de probabilitate condiționată $p(z_t | x_t)$.

În loc de funcția deterministă $z_t = f(x_t)$ poate fi luat în considerare în modelul elementului senzorial aspectul de incertitudine (x_t reprezintă starea robotului la momentul t ; z_t – rezultatul măsurătorii la momentul t). Se impune ca în aceste condiții să fie luate în considerare un câmp larg de incertitudini posibile în procesul de măsurare senzorială.

Multe elemente senzoriale generează mai mult de o valoare numerică pe parcursul analizei scenei de lucru:

$$z_t = \{z_t^1, z_t^2, \dots, z_t^k\} \quad (3.36)$$

Considerând fiecare informație furnizată ca independentă, vom aproxima densitatea de probabilitate ca un produs:

$$p(z_t | x_t, m) = \prod_{k=1}^K p(z_t^k | x_t, m) \quad (3.37)$$

Modelul poate include patru tipuri de aspecte aleatorii în procesul de măsurare, esențiale pentru construcția unui model de lucru:

- *Măsurare cu zgomot local pe un interval corect*

Procesul de măsurare este afectat de zgomot local considerat cu o distribuție Gauss (Figura 3.15).

În procesul de măsurare practic valoarea măsurată z_t^k este limitată pe intervalul $[0, z_{\max}]$ unde z_{\max} semnifică limita superioară a domeniului de măsurare a senzorului.

Fie un robot mobil echipat cu elementul senzorial A. Informația senzorului este afectată de zgomot iar dispersia șirului de valori este σ_A^2 (Figura 3.16). În

aplicația dată este de interes să se estimeze cea mai bună valoare \hat{d} , care redă poziția robotului mobil în raport cu obstacolul, pe baza informației obținute.

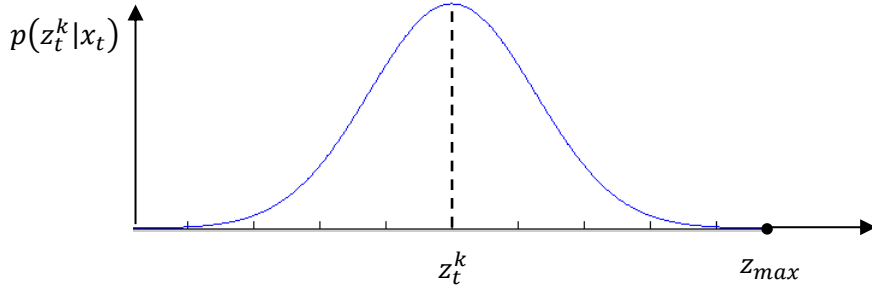


Figura 3.15. Repartiția normală în procesul de măsurare

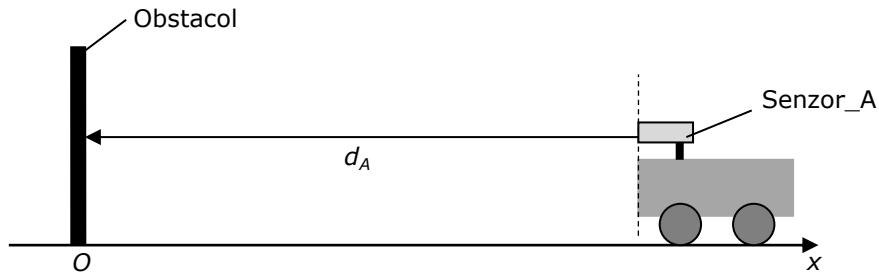


Figura 3.16. Robotul mobil în raport cu un obstacol

Modelul elementului senzorial este descris de expresia:

$$d_i = x + N(0, \sigma_i^2), \quad i = 1, 2 \quad (3.38)$$

unde $N(0, \sigma_i^2)$ reprezintă procesul de repartiție a erorilor de măsurare aleatoare.

- Prezența bruscă a unui obstacol sau dispariția altuia definește o scenă dinamică. Matematic, analiza probabilistică referitoare la prezența unui obstacol într-un spațiu definit printr-un interval $[0, z_t^k]$ este descrisă de o distribuție exponențială. Parametrul λ al acestei distribuții, este un parametru intrinsec al modelului de măsurare.

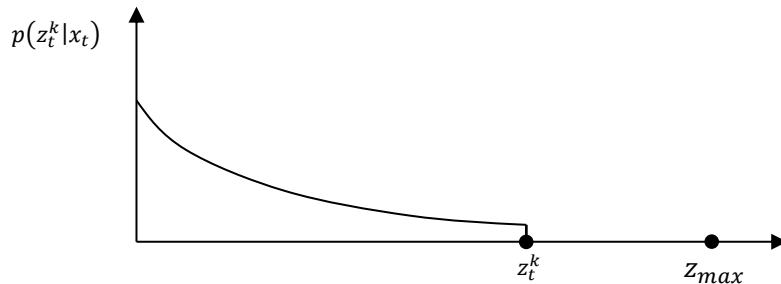


Figura 3.17. Repartiția exponențială pentru scene dinamice

- Eșecuri ale procesului de măsurare datorate scenei analizate, a principiului de lucru al elementului senzorial și a modului de exprimare a informației de ieșire al acestuia. Elementul senzorial acustic, într-o analiză a scenei, poate indica o valoare maximă ca urmare a nerecepționării semnalului ecou. În Figura 3.18 este prezentat un fragment al informației elementului senzorial acustic pe parcursul unui experiment cu un obstacol paralelipipedic deplasat lateral, respectiv rotit față de axa longitudinală a sensorului. Vom modela acest caz cu o distribuție centrată în punctul z_{max} :

$$p_{max}(z_t^k | x_t) = I(z = z_{max}) = \begin{cases} 1, & \text{dacă } z = z_{max} \\ 0, & \text{dacă } z \neq z_{max} \end{cases} \quad (3.39)$$

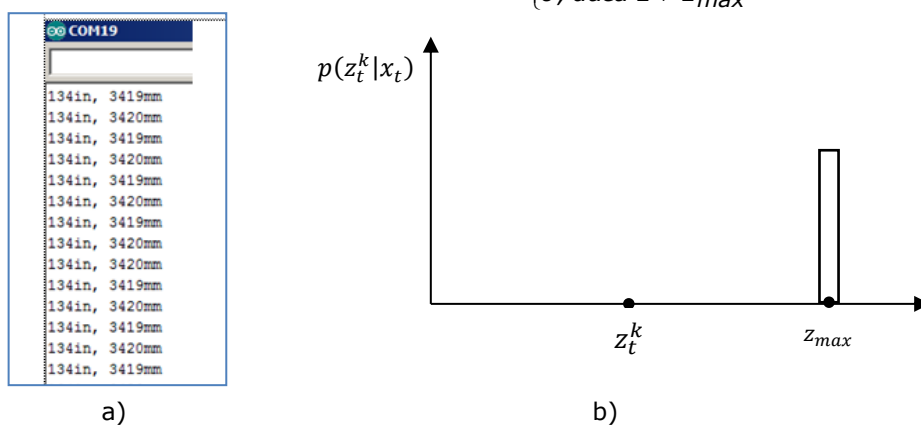


Figura 3.18.a) date înregistrate în procesul de măsurare; b) repartiția uniformă

- valori aleatorii din procesul de măsurare ca urmare a complexității scenei analizate. Reflexia multiplă, pe mai multe obstacole, a unei unde incidente și recepția finală poate fi una din formele de manifestare. Astfel de aspecte se pot modela ca o distribuție uniformă pe intervalul de lucru al elementului senzorial:

$$p_{max}(z_t^k | x_t) = \begin{cases} \frac{1}{z_{max}}, & \text{dacă } z = z_{max} \\ 0, & \text{dacă } z \neq z_{max} \end{cases} \quad (3.40)$$

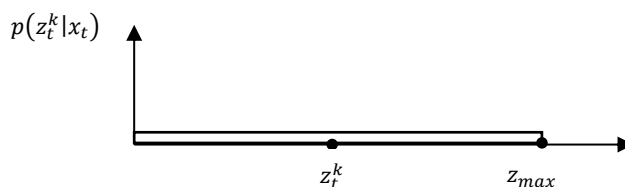


Figura 3.19. Probabilitatea de distribuție uniformă

O reprezentare tipică a prezenței aspectelor prezentate anterior este ilustrată în șirul de valori, al unui experiment pe bază de element senzorial acustic, din Figura 3.20. Șirul de valori înregistrate se referă la distanța dintre robotul mobil

și un obstacol. Cele 5 seturi de date cuprind 3 cazuri de valori aproximativ estimate și 2 seturi de date care redau valoarea maximă oferită de elementul senzorial ca stare anormală în procesul de măsurare. Cele 5 cazuri sunt însoțite de densitatea de probabilitate în conformitate cu repartițiile precizate.

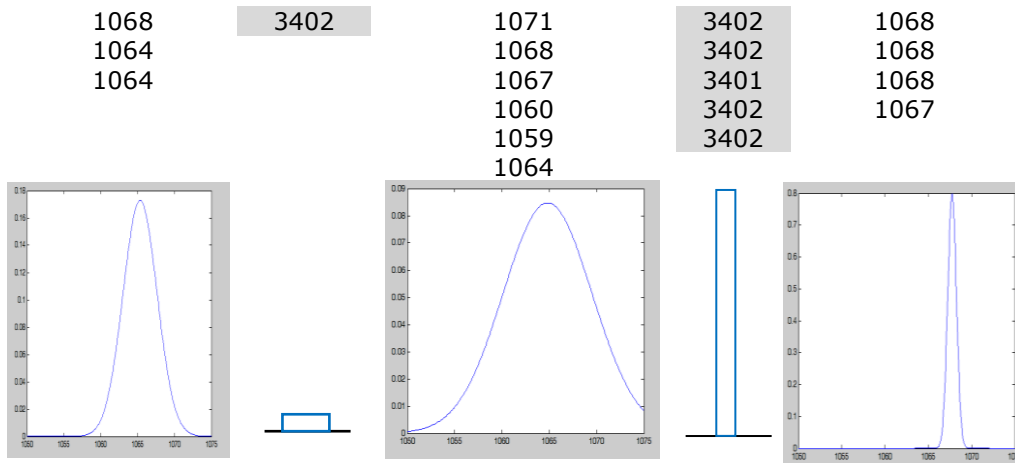


Figura 3.20.Șir de valori și densitățile de probabilitate asociate

3.6. Repartiția erorilor aleatoare

Fie x o mărime fizică pentru care determinăm prin n măsurători valorile x_1, x_2, \dots, x_n . Este cunoscut faptul că măsurătorile realizate chiar cu suficientă precizie conduc la rezultate diferite fiind afectate de erori.

Considerăm în continuare funcția $p(x)$ ca densitatea de probabilitate a unei cantități x dintr-un proces analizat. Aria de sub $p(x)$ dintre două valori x_0 și x_1 este probabilitatea P ca o probă dată de x se va încadra între valorile x_0 și x_1 iar modul de prezentare matematică va fi prin expresia densității de repartiție:

$$P(x_0 < x < x_1) = \int_{x_0}^{x_1} p(x) dx \quad (3.41)$$

Densitatea de probabilitate (§ 3.10), pentru variabila aleatoare normal distribuită $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, se exprimă prin relația:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.42)$$

unde μ și σ sunt parametrii repartiției.

Relațiile anterioare permit scrierea sub forma:

$$P(x_0 < x < x_1) = \int_{x_0}^{x_1} p(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{x_1} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (3.43)$$

Dacă ne referim la intervalul de încadrare a variabilei aleatoare apelând la parametrii repartiției $[\mu - n\sigma < x < \mu + n\sigma]$, expresia anterioară poate să fie exprimată și sub forma:

$$P(\mu - n\sigma < x < \mu + n\sigma) = \int_{\mu - n\sigma}^{\mu + n\sigma} p(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\mu - n\sigma}^{\mu + n\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

$$= \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\mu}^{\mu + n\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (3.44)$$

Introducând substituția

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \quad (3.45)$$

și implicit

$$dz = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} dx \quad (3.46)$$

relația anterioară devine:

$$P(\mu - n\sigma < x < \mu + n\sigma) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{n/\sqrt{2}} e^{-u^2} du = \operatorname{erf}\left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.47)$$

unde $\operatorname{erf}(x)$ are semnificația funcției eroare.

Se demonstrează că repartiția erorilor aleatoare este dată de parametrii $N(0, \sigma^2)$. Afirmatia este cunoscută ca și teorema lui Laplace și Gauss. Densitatea de probabilitate a unei astfel de repartiții este exprimată prin relația:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.48)$$

Pe baza relației anterioare se poate determina probabilitatea de încadrare a variabilei în intervalul $\mu - n\sigma < x < \mu + n\sigma$. Se ajunge astfel la intervalul de încredere cunoscut în statistică.

Tabel 3.1 Intervalul de încredere

$n\sigma$	$P(\mu - n\sigma < x < \mu + n\sigma)$
σ	0.6826895
2σ	0.9544997
3σ	0.9973002
4σ	0.9999366
5σ	0.9999994

Introducând substituția:

$$\eta = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.49)$$

și respectiv,

$$d\eta = \frac{1}{\sigma} dx \quad (3.50)$$

relația (3.47) devine:

$$P(x_0 < x < x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta_0}^{\eta_1} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad (3.51)$$

sau:

$$P(x_0 < x < x_1) = I\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) - I\left(\frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) \quad (3.52)$$

unde:

$$I(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\eta} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad (3.53)$$

o nouă formă de estimare a probabilității ca o variabilă aleatoare să se încadreze într-un interval dat.

Dacă variabila X este normal distribuită, variabila definită pe baza expresiei:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (3.54)$$

reprezintă variabila aleatoare normală standard.

Din relația anterioară se obține:

$$dz = \frac{1}{\sigma} dx \quad (3.55)$$

Forma normalizată a funcției distribuției normale cumulative indică probabilitatea pentru o presupusă variație a variabilei în intervalul $[0, x]$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.56)$$

Aceasta este legată de probabilitatea integrală:

$$\alpha(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.57)$$

prin

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} \alpha(x) \quad (3.58)$$

Introducând schimbarea de variabilă $u = \frac{t}{\sqrt{2}}$ și implicit $du = \frac{dt}{\sqrt{2}}$, relația (5.56)

devine:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{2}}} e^{-u^2} du = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.59)$$

Ca urmare, probabilitatea ca variabila X să aibă o variație în intervalul $[x_1, x_2]$, este dată de expresia:

$$\Phi(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_2}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_1}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (3.60)$$

Calculul funcției eroare poate urmări abordări diferite:

- o aproximare bună (cu două zecimale) este cea referitoare la intervale posibile a valorii x :

$$\Phi_1(x) \approx \begin{cases} 0.1x(4.4 - x) & \text{pentru } 0 \leq x \leq 2.2 \\ 0.49 & \text{pentru } 2.2 < x < 2.6 \\ 0.50 & \text{pentru } x \geq 2.6 \end{cases} \quad (3.61)$$

- pe baza unei serii Maclaurin, pentru valori $x \ll 1$:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{40} - \frac{x^7}{336} + \frac{x^9}{3456} + \dots \right) \quad (3.62)$$

- pe baza unei serii asimptotice, pentru valori $x \gg 1$:

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} - \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x^3} + \frac{3}{x^5} - \frac{15}{x^7} + \frac{105}{x^9} + \dots \right) \quad (3.63)$$

In literatura de specialitate este cunoscută valoarea integralei nedefinite:

$$\int e^{-cx^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{4c}} \operatorname{erf}(\sqrt{c}x) \quad (3.64)$$

unde $\operatorname{erf}(x)$ este cunoscută sub numele de funcția eroare sau funcția eroare a lui Gauss.

Abramowitz and Stegun au introdus multiple forme de aproximare pentru funcția eroare [Mihoc, 1980]. Una dintre acestea este dată prin relația:

$$\operatorname{erf}(x) \approx 1 - \frac{1}{\left(1 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4\right)^4} \quad (3.65)$$

unde: $a_1 = 0.278393$; $a_2 = 0.230389$; $a_3 = 0.000972$; $a_4 = 0.078108$

Pentru problema dată se identifică valorile: $c = 1/2$; $x = \eta$.

Pentru exemplificare și aprecierea calculului a fost considerată o variabilă aleatoare $X \sim N(0.644, 0.009604)$ și intervalul de analiză $[x_1, x_2] = [0.5, 0.7]$. In Figura 3.21 este prezentat modul de calcul în Microsoft Office Excel pe baza relației (3.65)

	A	B	C	D	E	F	G
1	xinf	0.5					
2	xsup	0.8					
3	miu	0.644					
4	sigma	0.098					
5	u1	1.591837					
6	u2	-0.44898					
7							
8	X=u1	1.591837	1.591836735		X=u2	-0.44898	-0.44898
9	X^3	4.033625	-0.672270908		X^3	-0.09051	0.015084
10	X^5	10.22098	0.25524544		X^5	-0.01824	-0.00046
11	X^7	25.8994	-0.07708154		X^7	-0.00368	1.09E-05
12	X^9	65.62763	0.018989476		X^9	-0.00074	-2.1E-07
13	1/√2pi		1.116998307				-0.43434
14	1/√2pi		0.399043442		1/√2pi		0.399043
15	erf(X)		0.445730849		erf(X)		-0.17332
16							
17							
18					P(0.6<x<0.8)		0.619

Figura 3.21. Exemplu de calcul

Mediul de lucru Matlab oferă facilități de calcul pentru determinarea probabilității ca o variabilă aleatoare să se încadreze într-un interval dat. În Figura 3.22 este prezentat fișierul normspec_1.m utilizat pentru obiectivul precizat.

64 Matematica proceselor aleatoare cu aplicații în robotică - 3

```
Editor - G:\normspec_1.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x
1 % calculul probabilitatii ca o variabila aleatoare sa se situeze intr-un
2 % interval dat
3 % mu - valoarea medie a variabilei aleatoare;
4 % sigma - deviatia standard calculata pentru valorile variabilei aleatoare
5 % specs - intervalul de incadrare a variabilei aleatoare
6 % normspecs - functia Matlab
7 - mu = 1996.35;
8 - sigma = 1.387675;
9 % Set up the upper and lower limits. These are in
10 % the two element vector 'specs'.
11 - specs = [1995, 1997];
12 - prob = normspecs(specs, mu, sigma);
Ln 12 Col 35 OVR
```

Figura 3.22. Fișierul normspec_1.m pentru determinarea probabilității ca variabila aleatoare X să se încadreze într-un interval dat

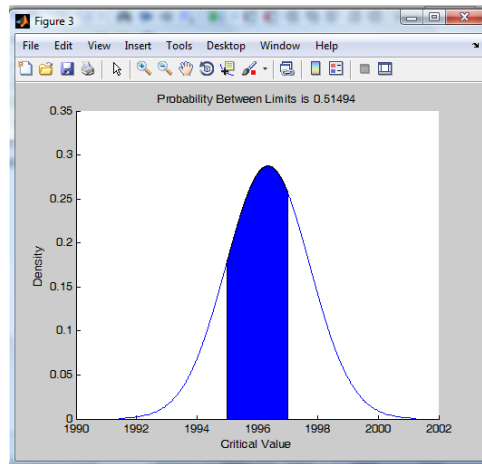


Figura 3.23. Rezultatul obținut din utilizarea fișierului normspec_1.m

Probabilitatea ca variabila aleatoare X – distanța până la obstacolul detectat să se încadreze în intervalul [1995, 1997] este de ~ 0.515 .

3.7. Variabile aleatoare multidimensionale

3.7.1. Introducere

Fie X vectorul aleator (nx1) definit prin $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]^T$. Funcția de densitate multivariabilă este definită prin:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} [\det C]^{1/2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} (x-\mu)^T C^{-1} (x-\mu)} \quad (3.66)$$

unde: T definește matricea transpusă; μ – este vectorul valorilor medii; C – este matricea covariantă.

Vectorii definiți anteriori se reprezintă sub forma:

$$\mu = E[X] = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

sau

$$C_X = \begin{bmatrix} E(X_1 - \mu_1)^2 & E(X_1 - \mu_1)(X_2 - \mu_2) & \cdots & E(X_1 - \mu_1)(X_n - \mu_n) \\ E(X_2 - \mu_2)(X_1 - \mu_1) & E(X_2 - \mu_2)^2 & \cdots & E(X_2 - \mu_2)(X_n - \mu_n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E(X_n - \mu_n)(X_1 - \mu_1) & E(X_n - \mu_n)(X_2 - \mu_2) & \cdots & E(X_n - \mu_n)^2 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

În relația anterioară expresia

$$C_{ij} = E(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j) \quad (3.70)$$

reprezintă covarianța a două variabile X_i și X_j .

3.7.2. Corelația variabilelor aleatoare

În analiza zgomotelor se dorește, spre exemplu, să se identifice gradul în care două semnale sunt afectate de aceeași sursă de zgomot. Fie două seturi de date provenind de la două variabile aleatoare X, Y .

O metodă de comparație se poate obține presupunând existența unei legături de proporționalitate între cele două seturi de date (de exemplu de forma $y \cong \alpha x$). Metoda celor mai mici pătrate (least squares method) permite estimarea acestei constante de proporționalitate prin minimalizarea sumei:

$$S = \sum_{k=1}^N (y_k - \alpha x_k)^2 \rightarrow \min \quad (3.71)$$

Se poate determina din relația anterioară valoarea coeficientului de proporționalitate:

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{k=1}^n x_k y_k \right)}{\left(\sum_{k=1}^n x_k^2 \right)} \quad (3.72)$$

Pe baza coeficientului determinat, relația (3.71) devine:

$$S = (1 - \rho^2) \sum_{k=1}^N y_k^2 \quad (3.73)$$

unde ρ poartă denumirea de coeficient de corelație și are expresia:

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^N x_k y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^N x_k^2 \sum_{k=1}^N y_k^2}} \quad (3.74)$$

Pe baza valorilor coeficientului de corelație, se poate preciza:

- valoarea acestui coeficient reprezintă o măsură a proporționalității celor două variabile
- dacă $\rho = 0$ cele două variabile sunt necorelate sau independente;
- dacă $\rho = 1$ cele două variabile sunt total corelate, adică $x_k = y_k$ pentru $k = 1, 2, \dots, N$;

Dacă variabilele aleatoare sunt independente, avem:

$$C = \begin{cases} \sigma_i^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (3.75)$$

Pe baza relației anterioare matricea C devine:

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

și ca urmare:

$$[\det C]^{1/2} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n = \prod_{i=1}^n \sigma_i \quad (3.77)$$

și

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Pe baza relațiilor determinate se poate redefini expresia (vezi relația 3.66:

$$(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.79)$$

3.7.3. Variabile aleatoare multiple în analiza procesului aleatoriu din robotica mobilă

Analiza scenei de lucru a unui robot mobil poate include localizarea robotului mobil într-un spațiu 2D sau 3D, localizarea unor obstacole în raport cu robotul mobil, etc.

Situarea robotului mobil se reprezintă prin parametrii poziției și respectiv parametrii orientării și o putem exprima prin vectorul aleator X:

- un vector bidimensional care reflectă poziția robotului în spațiu 2D;
- un vector tridimensional care reflectă poziția robotului în spațiu 3D;

- un vector tridimensional (x , y și θ) care reflectă poziția punctului caracteristic (coordonatele x , y) și respectiv orientarea (unghiul θ) robotului într-un plan orizontal;
- un vector multidimensional (3 poziții și 3 orientări) pentru un robot mobil aerian sau subacvatic.

O mișcare este o aplicație definită în funcție de timpul t , referitor la un punct inițial la momentul t_0 și un punct final la momentul t_f .

Cercetarea spațiului de lucru se realizează de către robotul mobil pe baza elementelor senzoriale.

Se pune evident întrebarea, cum se combină informațiile diferitelor surse senzoriale ținând cont de incertitudinile operației de achiziție a informației.

O traiectorie este raportul unei mișcări. Este vorba astfel despre o curbă parametrizată printr-un parametru „ s ” oarecare. Evoluția parametrului „ s ” funcție de timpul t este denumită mișcarea pe traiectorie. Problema navigării unui robot constă, într-o formă generalizată, în a găsi o mișcare în spațiul configurațiilor fără coliziuni CI.

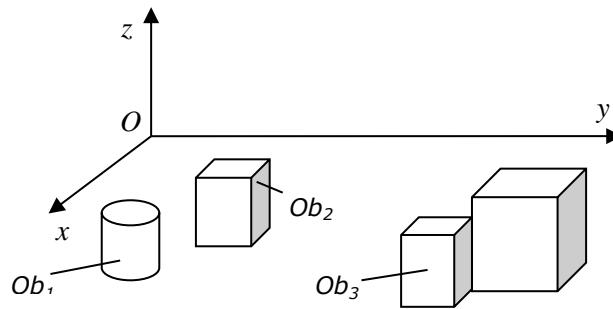


Figura 3.24. Obstacle în scena de lucru a robotului mobil

Fie un robot mobil echipat cu elemente senzoriale care oferă informații referitoare la poziția față de un obstacol.

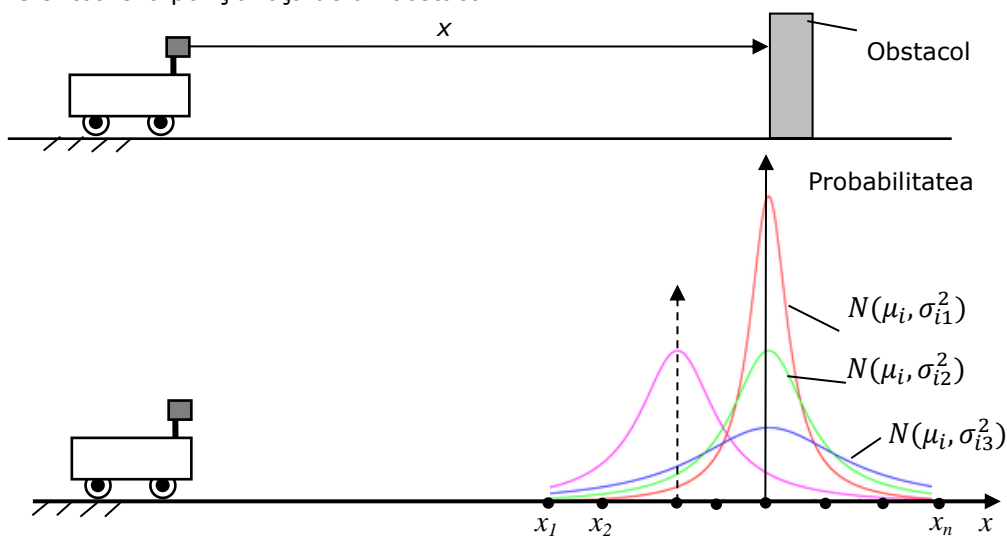


Figura 3.25. Robotul mobil în raport cu un obstacol și procesul aleator de investigare

Modelul elementului senzorial se poate defini, în ipoteza liniară și zgomot gaussian, prin relația în conformitate cu cele prezentate anterior ($i = 1, 2$):

$$z_i = x_i + N(0, \sigma_i^2) \quad (3.80)$$

Considerând achiziția informațiilor de la doi senzori diferiți dorim să realizăm fuziunea informațiilor obținute de la senzorii S_1 și S_2 (Figura 3.26)

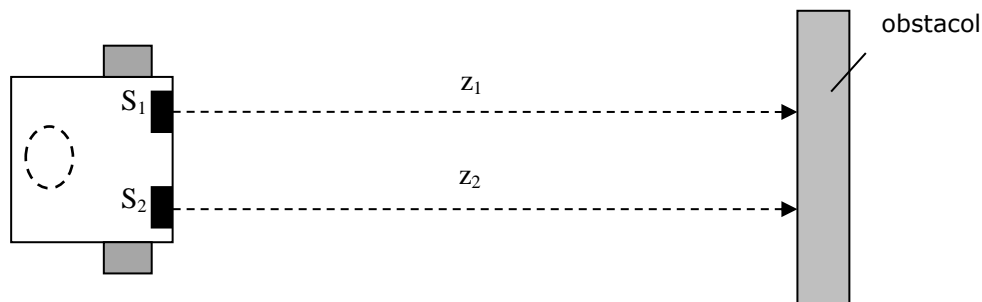


Figura 3.26. Estimarea poziției unui obstacol

Una din metodele de fuziune a informației are la bază ponderarea acesteia:

$$\hat{z} = \frac{w_1 \cdot z_1 + w_2 \cdot z_2}{w_1 + w_2} \quad (3.81)$$

unde w_i ($i = 1, 2$) sunt coeficienții de ponderare.

În cazul

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (3.82)$$

relația anterioară devine:

$$\hat{z} = w_1 \cdot z_1 + w_2 \cdot z_2 = w_1 \cdot z_1 + (1 - w_1) \cdot z_2 \quad (3.83)$$

Varianța valorii estimate este:

$$\sigma^2 = w_1^2 \cdot \sigma_1^2 + (1 - w_1)^2 \cdot \sigma_2^2 \quad (3.84)$$

Se dorește ca informația estimată să fie obținută în condițiile unei varianțe minime, pe considerentul:

$$\text{informația} \propto \frac{1}{\sigma^2} \quad (3.85)$$

Valoarea extremă a funcției se obține din ecuația:

$$\frac{d}{dw_1} (\sigma^2) = 2w_1 \cdot \sigma_1^2 - (1 - w_1) \cdot \sigma_2^2 = 0 \quad (3.86)$$

cu soluția:

$$w_{10} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (3.87)$$

Se verifică din relația (3.86) că funcția (3.84) are un minim în punctul w_{10} :

$$\frac{d^2}{dw_2^2}(\sigma^2) = 2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) > 0 \quad (3.88)$$

Pe baza valorilor determinate se poate evalua valoarea estimată:

$$\hat{z} = w_1 \cdot z_1 + (1 - w_1) \cdot z_2 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_2 \quad (3.89)$$

Considerăm informația obținută de la cei doi senzori S_1 și S_2 (senzori în infraroșu Sharp) pe parcursul unui experiment ca fiind cea prezentată în Tabelul 3.2 și probabilitatea ca valoarea estimată să se găsească în intervalul [325-335]

Tabel 3.2 Informațiile și parametrii statistici

S1	S2
$z_1 = 333.2 \text{ mV}$	$z_2 = 379.2 \text{ mV}$
$\sigma_1^2 = 3.834058$	$\sigma_2^2 = 5.974948$

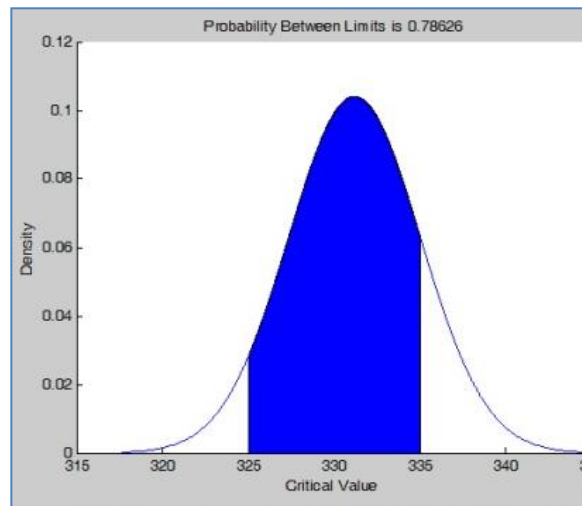


Figura 3.27. Densitatea de probabilitate

$$w_{10} = \frac{5.974948^2}{3.834058^2 + 5.974948^2} = 0.70833 \quad (3.90)$$

$$\hat{z} = w_1 \cdot z_1 + (1 - w_1) \cdot z_2 = 0.70833 \cdot 333.2 + 0.29167 \cdot 379.2 = 346.616 \text{ mV} \quad (3.91)$$

Valoarea estimată se poate integra în continuare într-un model dezvoltat de analiză a orientării obstacolului sau de evaluare calitativă a formei obiectului.

3.8. Concluzii

Obiectivul principal al capitolului a constat în structurarea unui material referitor la aspectele aleatorii din scena de lucru al unui robot mobil și prezentarea instrumentului matematic pentru analiză probabilistică a proceselor aleatoare.

Analiza realizată a fost dezvoltată pe baza prezentării unei introduceri în legătură cu incertitudinea în general și cu cea din robotică în particular.

Pe baza acestor abordări au putut fi identificate distribuții probabilistice cu aplicații în robotică. Aceste distribuții au fost prezente pe parcursul experimentelor.

Considerațiile teoretice prezentate au fost însoțite de evidențierea resurselor matematice posibile a fi utilizate pe parcursul prelucrării ulterioare. A fost prezentat un exemplu edificator referitor la fuziunea informației a doi senzori.

4. SENZORI ȘI LOCALIZAREA OBSTACOLELOR

4.1. Introducere

Obiectivul operațional al capitolului constă în prezentarea posibilităților de analiză a unei scene de lucru pentru un robot mobil și a factorilor care îl caracterizează.

Literatura de specialitate identifică trei generații de roboți în funcție de capacitatea lor de acțiune, de decizie și de percepție [Coiffet, 1982]. Roboții din prima generație sunt specifiți unui program de lucru simplu, repetitive, în circuit deschis, fără posibilități de verificare a funcționalității. Roboții din generația a doua au în structura lor elemente senzoriale (video, laser, ultrasonic,...) și dispun de algoritmi de decizie simpli. Aceștia pot obține informații din mediul de lucru și astfel își pot corceta modul de evoluție în spațiu. Roboții inteligenți aparțin celei de a treia generație. Dezvoltând capacitățile de acțiune, de percepție și de decizie se poate acumula mai multă autonomie în spațiu de lucru. Aceste atribute aparțin roboților inteligenți.

Navigarea cu succes a unui robot mobil într-un mediu nestructurat sau într-un mediu dinamic este condiționată de implementarea elementelor senzoriale [***1], [Toledo, 2000], [Mubarak, 2013].

Cantitatea de informație obținută din mediul investigat depinde de numărul elementelor senzoriale utilizate. Un singur element senzorial nu poate oferi informații complete cu privire la mediul de lucru. Un senzor poate oferi o singură categorie de informație pe un interval limitat de timp. A fost documentată utilitatea utilizării – fuziunii – informațiilor de la mai multe elemente senzoriale [Mubarak, 2013], [Borenstein, 1996], [Jin, 2004].

În literatura de specialitate sunt discutate diverse aspecte ale problemei de integrare a senzoriilor multipli [Jin, 2004], [Nițulescu, 2002], [Otte, 2009]. Fuziunea senzorială poate fi aplicată pe nivelul de date, pe nivelul de caracteristică sau decizia de nivel [Waite, 2002], [Dolga, 1999], [Ohya, 1996].

Utilizarea elementelor senzoriale ultrasonice pentru analiza mediului de lucru poate constitui o opțiune [Kane, 2008]. În [Crowley, 1989] Crowley estimează direcția unui obstacol din mediu utilizând scanarea spațiului de lucru. Această metodă este simplă, dar este afectată de zgomot. Suplimentar metoda nu elimină problema fascicolului de semnale emise.

În [Nagashima, 1992] autorii Nagashima și Yuta au folosit un sistem senzorial compus dintr-un element emițător și două elemente receptoare dar au utilizat și aproximări în estimarea relației finale de calcul. În [Barshan, 1990] autorii Barshan și Kuc au analizat în studiile dezvoltate modelul fizic al senzorului cu ultrasunete și au propus o metodă care poate estima unghiul de înclinare între orientarea elementului senzorial și direcția normală la un obstacol plan.

Considerațiile prezentate vin ca un argument pentru necesitatea unei analize amănunțite a modelului elementului senzorial ultrasonic și a capacității acestuia în analiza caracteristicilor mediului de lucru.

Acestor trei categorii de roboți le corespund trei categorii de elemente senzoriale:

- elemente senzoriale de proximitate, logice („tout ou rien”) care redau prezența sau absența unei anumite stări;

- senzori metrologici care redau o valoare a unui parametru precis pentru o situație determinată. Această clasă include categoria traductoarelor (oferă informații despre starea internă a robotului) dar și elemente senzoriale pentru analiza mediului exterior;
- elementele senzoriale inteligente care au facilități superioare pentru autocalibrare, autocontrol, etc.

În fine, realizarea la nivelul robotului a unei percepții antropomorfe a lumii exterioare fizice înseamnă „automatizarea” interpretării semnalului de la elementul senzorial. Acest lucru necesită două categorii de cunoaștere:

- cunoașterea analizei semnalelor (analogic și digital);
- cunoașterea umană (calitativ și euristic).

În [Bencheloui, 2011] Bencheloui admite în structura robotului mobil două categorii de elemente senzoriale: elemente senzoriale telemetrice (ultrasonice, optice, cu laser) și elemente senzoriale vizuale.

Cheia utilizării cu succes a unui sensor constă în existența unui bun model pentru acesta [Dobashi, 2012]. Două scopuri pot fi enunțate în dezvoltarea modelului:

- predictiv – ce date trebuie obținute de la sensor care analizează o scenă de lucru?
- explicative – fiind cunoscute datele de la elementul senzorial, care este geometria scenei care le-a generat.

SONAR – SOund NAVigation and Ranging a avut punctul de start în problemele de localizare subacvatică. Vom utiliza și ne vom referi în continuare la un astfel de sistem denumindu-l element senzorial ultrasonic.

4.2. Principiul fizic de funcționare al elementului senzorial acustic

4.2.1. Generalități

În sens restrâns, acustica este partea de fizică în care se studiază producerea, propagarea, recepția și proprietățile sunetelor.

Sunetele sunt oscilații elastice care se datoresc vibrațiilor mecanice ale particulelor mediului. În folosirea curentă, termenul „sunet” se referă la fenomenul din aer responsabil pentru senzația de auzire la om sau animal. Propagarea oscilațiilor într-un mediu se face printr-o succesiune de comprimări și destinderi, amplitudinea unei comprimări fiind egală cu amplitudinea unei destinderi.

Oscilațiile acustice pot fi caracterizate prin:

- perioadă T [s]
- frecvență $f = 1/T$ [Hz]
- viteza sunetului c [m/s]
- lungimea de undă $\lambda = c/f$ [m]

Calitățile sunetului desemnează tipurile de efecte subiective corespunzătoare caracteristicilor cantitative ale unei incidente. Sunetul prezintă următoarele calități:

- *înălțimea* corespunzătoare **frecvenței**;
- *tăria* corespunzătoare **intensității**;
- *timbrul* corespunzător conținutului în armonici al unui sunet compus.

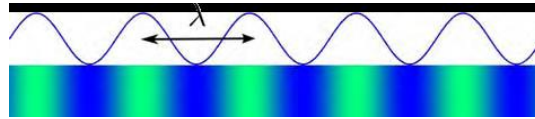


Figura 4.1 Unda sonoră

Undele elastice cu frecvențele cuprinse între 16 și 20kHz sunt cunoscute sub numele de sunete. Domeniul cu frecvențele mai mici de 16 Hz formează domeniul infrasunetelor iar domeniul cu frecvențele superioare lui 20kHz reprezintă regiunea ultrasunetelor.

Literatura de specialitate se referă la două categorii / clase de elemente senzoriale [Hendriks, 2009], [Hansen, 2009], [Waite, 2002]:

- senzorul ultrasonic pasiv – definit de un singur receptor care are rolul de a monitoriza semnalele acustice recepționate. În funcție de informația recepționată se poate identifica subiectul care a generat zgomotul respectiv.

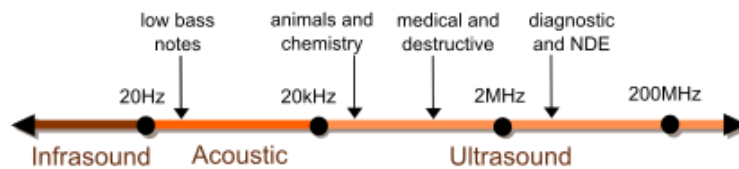


Figura 4.2 Undele elastic și domenii de frecvență

- senzorul ultrasonic activ – definit de un emitor de semnale acustice (ultrasonor) și un receptor al ecorilor rezultate în mediul investigat. Această clasă permite determinarea parametrului geometric de poziționare a unui obstacol în raport cu elementul senzorial.

4.3. Aspecte biomecanice de inspirație pentru elementul senzorial ultrasonic

Elementul senzorial biologic – sonarul biologic – este utilizat de o serie de animale. În funcție de ecoul receptat animalele se orientează, detectează obstacole, caută hrană (vânătoare). Intensitatea relativă a sunetului primit la fiecare ureche, precum și intervalul de întârziere între sosire la cele două urechi furnizează informații despre unghiul orizontal (azimut) de la care sosesc undele sonore reflectate. Pe lângă informația referitoare la localizarea obstacolului, animalul poate detecta dimensiunea și chiar caracteristici specifice acestuia (de ex. ce fel de animal este). Liliicii folosesc o varietate de tehnici ultrasonice (ecoul) pentru a detecta prada lor (Figura 4.3). Aceștia pot detecta frecvențe dincolo de 100 kHz, eventual, până la 200 kHz [Waite, 2002].

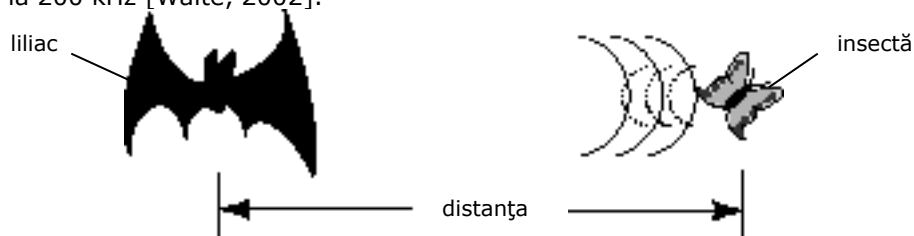


Figura 4.3 Reprezentare schematică pentru acțiunea liliicilor

Multe insecte au un auz bun bazat pe ultrasunete și cele mai multe dintre acestea sunt insecte nocturne care includ grupuri de molii, gândaci, etc. Auzind un liliac, unele insecte vor face manevre de evitare pentru a scăpa și a nu fi prinse.

Câinii cu auz normal pot sesiza și ultrasunete. Un fluier pentru câini exploatează acest lucru. Se poate emite un sunet de înaltă frecvență pentru a apela un câine. Unele dintre aceste fluieri emit sunete în gama sonora superioară percepției umane. Altă parte dintre ele emit ultrasunete la o frecvență în intervalul 18-22 kHz. Balenele cu dinți, inclusiv delfinii, pot recepționa ultrasunete. Acestea utilizează ultrasunetele în sistemul de navigație pentru a se orienta și captura prada. Delfinii bruni au limita senzitivă cea mai mare la aproximativ 160 kHz. Mai multe specii de pește se încadrează în categoria celor care utilizează biosonarul. Specia heringilor pot detecta semnale până la 4 kHz. Leighton [Leighton, 2012] realizează o paralelă referitoare la inspirația biologică cu aplicabilitate pentru construcția sonarului și radarului. Autorii prezintă o analiză critică a subiectului abordat, ipoteze aplicative și rezultate experimentale.

4.3.1. Mărimi acustice și relațiile între acestea

În condițiile în care sursa de unde S produce perturbații de forma unor mici oscilații, iar mediul este ideal, indiferent de natura fizică și de caracterul matematic al perturbației, comportarea undei este descrisă de o ecuație diferențială de forma:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

în care v este o constantă având dimensiune de viteză, a cărei valoare depinde de caracteristicile mediului și de cele ale undei.

Ecuația diferențială (4.1) admite soluții de tipul:

$$\psi = f \cdot \left[A \left(t - \frac{r}{v} \right) \right] + g \left[B \left(t + \frac{r}{v} \right) \right] \quad (4.2)$$

unde: f și g sunt două funcții arbitrare cu argumentele precizate; A și B sunt constante calculabile din condițiile inițiale; r este distanța față de sursă. Prima funcție " f " reprezintă o undă progresivă iar cea de a doua funcție " g " o undă regresivă.

În condiții reale unda se propagă în toate direcțiile. Considerând sursa S punctiformă și mediul ideal suprafața de undă reprezintă sfere concentrice cu centrul în punctul S . Unda plană este unda pentru care suprafețele echifaze pot fi considerate plane în spațiu. În fapt unda plană este o undă sferică studiată la o distanță suficient de mare de sursa S și într-un domeniu restrâns (Figura 4.4). Dacă $r_M \gg R$ suprafețele echifaze din domeniul D vor fi sfere cu centrele în S și razele cuprinse între $r_M - R$ și $r_M + R$.

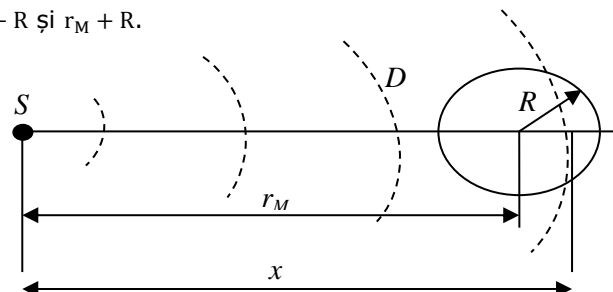


Figura 4.4 Propagarea undei sferice

Suprafața de undă sau suprafața echifază este suprafața pe care faza are aceeași valoare la un moment dat (locul geometric al punctelor din spațiu în care faza undei este aceeași la un moment dat). În cazul undei plane ea este un plan, planele echifază sunt paralele cu planul yOz și se deplasează pe axa Ox (Figura 4.5).

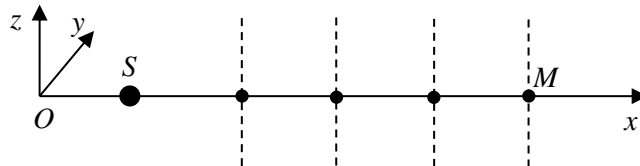


Figura 4.5 Propagarea unei unde plane

În cazul unei unde plane longitudinale, elongația unei particule a mediului elastic, aflată la distanța x de sursă variază după relația [Crețu, 1984]:

$$\psi(x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (4.3)$$

Pe baza relației anterioare se poate defini viteza instantanee a particulelor mediului elastic sub forma:

$$u = \frac{2\pi A}{T} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (4.4)$$

cu valoarea maximă

$$u_{max} = \frac{2\pi A}{T} \quad (4.5)$$

Densitatea fluxului de energie – intensitatea undei – este energia ce trece în unitatea de timp, prin unitatea de arie a suprafeței perpendicular pe direcția de propagare a undei.

Intensitatea undei poate fi scrisă sub forma [Crețu, 1984]:

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v = \frac{1}{2} Z A^2 \omega^2 \quad (4.6)$$

unde $Z = \rho v$ se numește impedanța acustică a mediului. Din relația anterioară se poate observa faptul că intensitatea undei depinde atât de proprietățile sursei de unde – prin A și f – cât și de proprietățile mediului elastic (ρ și v).

Valoarea maximă presiunii sonore instantanee se poate defini prin expresia [Crețu, 1984]:

$$p_{max} = \frac{2\pi A E}{\lambda} = 2\pi A \rho v f \quad (4.7)$$

unde E reprezintă modulul de elasticitate longitudinal al mediului considerat. În relațiile ulterioare vom utiliza o notație acceptată în literatura de referință pentru viteza sunetului $c = v$.

Viteza de propagare a undelor ultrasonore depinde puternic atât de natura mediului de propagare cât și de temperatura acestuia. Viteza sunetului în aer se exprimă prin relații de forma:

$$c = 331,5 + 0,6t^{\circ}C \quad (4.7')$$

unde t – este temperatura mediului [$^{\circ}C$] [Dolga, 1999].

Din prelucrarea relației anterioare se observă că influența temperaturii asupra vitezei se poate exprima și prin relația:

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = 0.61 \frac{m/s}{^{\circ}C} \quad (4.8)$$

- $c = \sqrt{\gamma RT} \left[\frac{m}{s} \right]$ unde: - γ - coeficient adimensional de elasticitate al mediului (pentru aer $\gamma = 1.4$); R - este constanta fizică a gazelor perfecte ($R = 287 \text{ J/kgK}$); T - temperatura absolută a mediului ($T = t^{\circ}C + 273$) [Nițulescu, 2002]. Prelucrarea relației anterioare conduce la definirea influenței temperaturii sub forma:

$$\frac{\Delta c}{\Delta T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma R}{T}} \cong 0.608 \frac{m/s}{^{\circ}C} \quad (4.9)$$

- $c = \sqrt{\frac{\nu RT}{M}} \left[\frac{m}{s} \right]$ unde - ν este indicele adiabatic; M este masa molară a gazului [Crețu, 1984];
- $c = 20.1 \cdot \sqrt{t + 273}$ - unde t este temperatura [$^{\circ}C$] [Ohya, 1996].

Valori ale vitezei undei elastice în diverse medii și influența umidității din atmosferă asupra vitezei sunetului sunt prezentate de [Crețu, 1984], [Ohya, 1996].

Între intensitatea undei și presiunea sonoră maximă se poate stabili relația de legătură:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_{max}^2}{\rho v} = \frac{1}{2} \frac{p_{max}^2}{Z} \quad (4.10)$$

Când undele elastice - în cazul de față undele acustice - se propagă printr-un mediu, ele suferă reflexii, refracții, interferențe și alte fenomene caracteristice pentru mișcarea ondulatorie. Dacă unda elastică ajunge la suprafața de separație a două medii omogene cu impedanțele acustice Z_1 și Z_2 , unda va suferi o reflexie și respectiv o refracție (Figura 4.6).

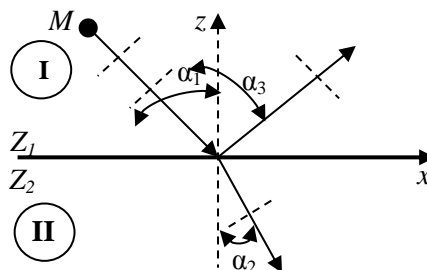


Figura 4.6 Reflexia și refracția unei unde elastice

În procesul de reflexie și respectiv de refracție se respectă relațiile dintre unghiurile făcute de raza incidentă, cea reflectată și respectiv cea refractată:

$$\alpha_1 = \alpha_3$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1} = \frac{\sin \alpha_2}{c_2} \quad (4.11)$$

unde c_1 și c_2 sunt vitezele de propagare a undelor acustice în mediile I și II. Cazul este ideal, suprafața de reflexie corespunzând cazului lucios sau oglindă (*specular*)

reflection). În cazul în care suprafața de reflexie reprezintă o anumită rugozitate, denivelări, cavități etc. reflexia fascicului incident este difuză (Figura 4.7).

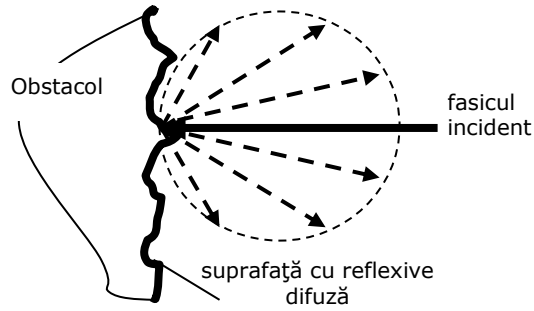


Figura 4.7 Reflexia difuză

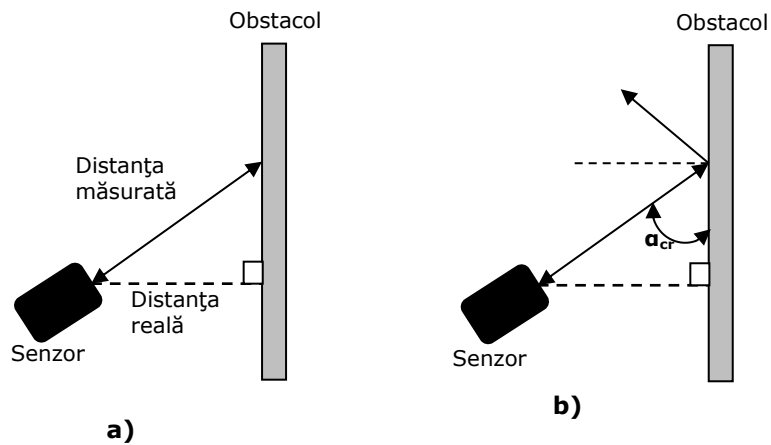


Figura 4.8 Surse de erori în procesul de localizare a obstacolului

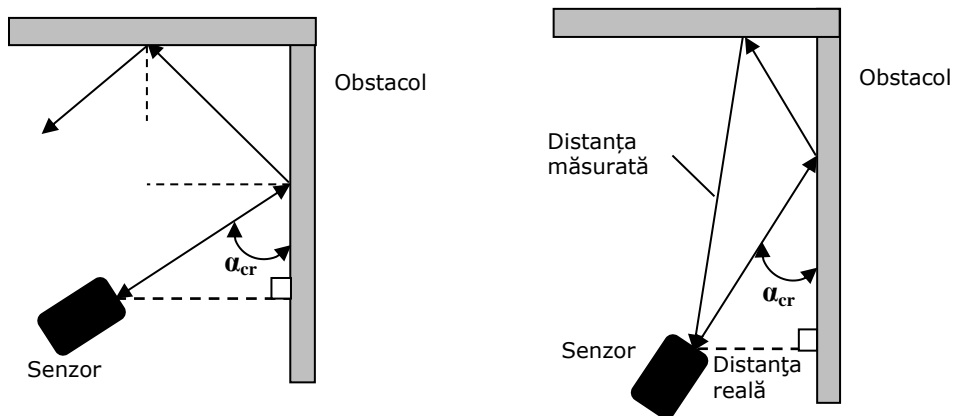


Figura 4.9 Reflexia pe obstacol în formă de colțar

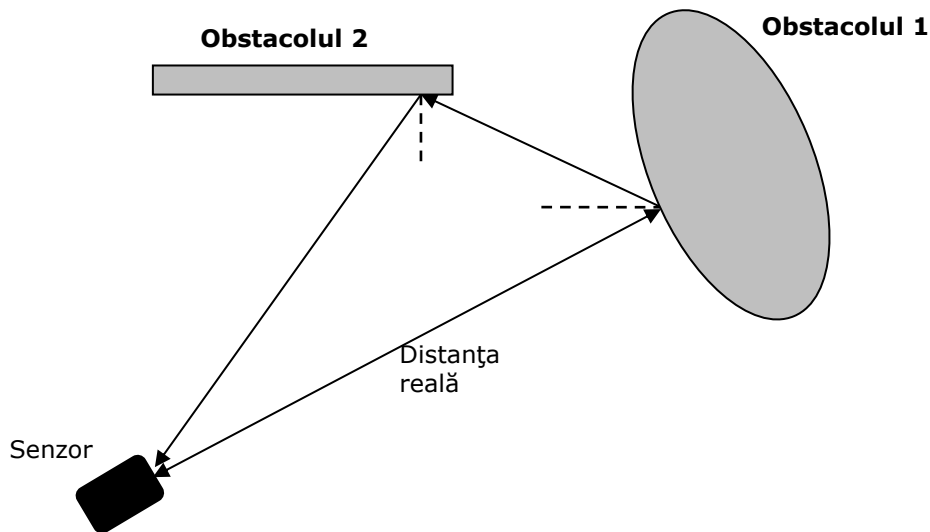


Figura 4.10 Obstacole multiple în spațiul de lucru

Utilizând considerațiile teoretice referitoare la fizica undelor elastice, se poate determina coeficientul de reflexie și respectiv coeficientul de transmisie:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (4.13)$$

Cunoscând impedanțele acustice Z_1 și Z_2 precum și intensitatea unei incidente putem calcula intensitatea unei reflectate și intensitatea unei refractate:

$$I_r = I \cdot \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (4.14)$$

$$I_t = I \cdot \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (4.15)$$

Pe durata propagării prin mediu elastic, unda acustică pierde treptat din energia inițială suferind o atenuare. Atenuarea undelor acustice se datorește următoarelor fenomene:

- împrăștierea unei părți a energiei fasciculului de unde acustice cauzată de reflexia și difuzia în mediu;
- preluarea unei fracțiuni din energie de particulele mediului elastic.

Pe baza modelului matematic care descrie propagarea unei acustice într-un mediu real, cu un coeficient de amortizare, se poate determina expresia intensității unei la o distanță x față de sursă [Crețu, 1984], [Nițulescu, 2002]:

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 c e^{-ax} = I_0 e^{-ax} \quad (4.16)$$

unde a reprezintă coeficientul de atenuare. Din relația anterioară se poate determina expresia de estimare a coeficientului de atenuare (pe baza a perechilor de parametri (x, I) pentru două cazuri) [Crețu, 1984], [Waite, 2002]:

$$\alpha = \frac{1}{x_1 - x_2} \ln \frac{I_1}{I_2} \left[\frac{dB}{m} \right] \quad (4.17)$$

Coeficientul de atenuare depinde de mediul în care se propagă unda acustică și frecvența acesteia existând diverse relații de estimare [Nițulescu, 2002], [Dolga, 1999], [Ensminger, 2009]:

- pentru lichide și gaze $a = \alpha f^2$ [Dolga, 1999];
- pentru solide $a = \alpha f$, [Dolga, 1999]

Fie două elemente senzoriale aflate la o distanță Δx unul față de celălalt, care emit semnal sub un anumit unghi θ necunoscut. În ipoteza unei distanțe suficient de mare dintre emitor și suprafețele de reflexie (obstacol) între informațiile referitoare la cele două distanțe, există relația:

$$r_2 - r_1 = \Delta x \sin \theta \quad (4.18)$$

și în mod corespunzător diferența de fază:

$$\frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta \quad (4.19)$$

pe baza căreia se poate determina unghiul de emisie θ . Determinarea diferenței de fază este ambiguă pentru un raport $2\Delta x/\lambda < 1$ [Dolga, 1999]. Creșterea distanței dintre elementele senzoriale și un număr sporit de elemente senzoriale va crește rezoluția procesului de măsurare.

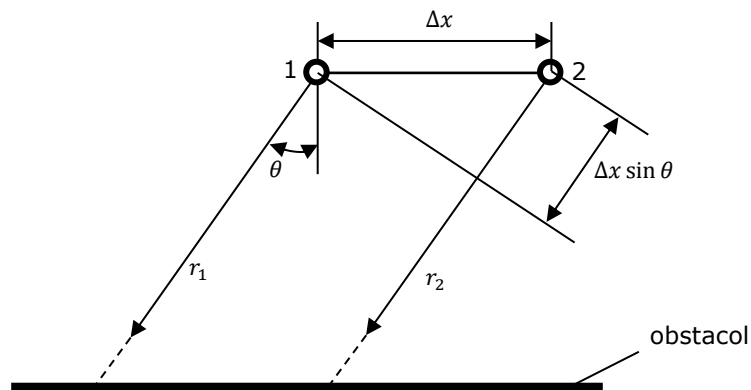


Figura 4.11 Diferența între informațiile celor doi senzori 1 și 2

Forma ideală a elementului senzorial corespunde unui fascicul de unde îngust de secțiune circulară constantă (Figura 4.12 a)). În Figura 4.12 b) se prezintă modelul cu fascicul larg iar în Figura 4.12 c) cu fascicul îngust, lob principal și lobi secundari.

Directivitatea este o măsură cantitativă referitoare la focalizarea energiei emise de sursă. Notând prin I_0 intensitatea omnidirecțională și prin I_D , relația de definiție se exprimă sub forma:

$$DI_E = 10 \log \left(\frac{I_D}{I_0} \right) [dB] \quad (4.20)$$

Având în vedere modul de definire, calculul se efectuează la o distanță $R = 1 \text{ m}$ față de sursa S. În aceste condiții relația anterioară se poate transforma sub forma:

$$DI_E = 10 \log \left(\frac{P/\pi r^2}{P/4\pi R^2} \right) = 10 \log \left(\frac{4}{r^2} \right) \quad (4.21)$$

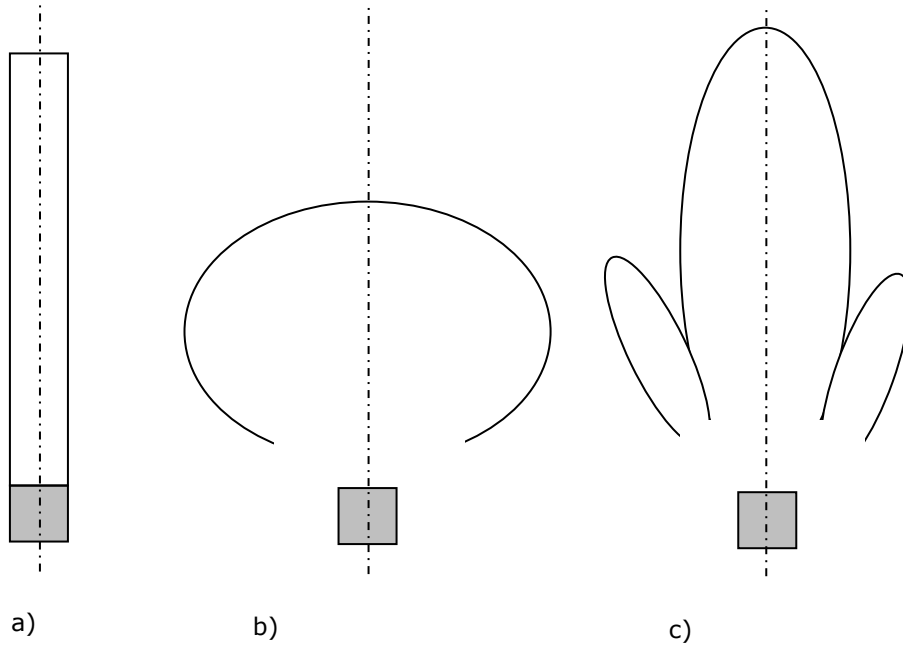


Figura 4.12 Elementul senzorial și modele de sensibilitate

Relația anterioară se poate transforma funcție de unghiul conului de focalizare:

$$DI_E = 10 \log \left(\frac{4}{\text{tg}^2(\alpha/2)} \right) \quad (4.22)$$

Avînd în vedere relațiile (4.20), (4.21), relația anterioară se poate prezenta și sub forma:

$$DI_E = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) \quad (4.23)$$

unde: D – este diametrul sursei; λ – este lungimea unei emise.

Dacă secțiunea transversală a corpului de focalizare este diferită de una circulară, indicele de directivitate suportă transformare. Pentru o secțiune eliptică relația de definiție devine:

$$DI_E = 10 \log \left(\frac{4}{\text{tg}(\alpha_1/2) \text{tg}(\alpha_2/2)} \right) \quad (4.24)$$

unde unghiurile α_1 și α_2 corespund celor două axe ale elipsei.

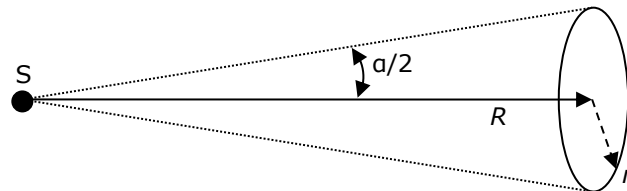


Figura 4.13 Conul de directivitate pentru o secțiune transversal eliptică

Directivitatea emisiunii pentru o sursă sonoră este cu atât mai bună cu cât raportul d/λ (d – dimensiunea sursei; λ – lungimea de undă) este mai mare. Diagrama de directivitate caracteristică pentru un sensor acustic este prezentată în figura 4.14.

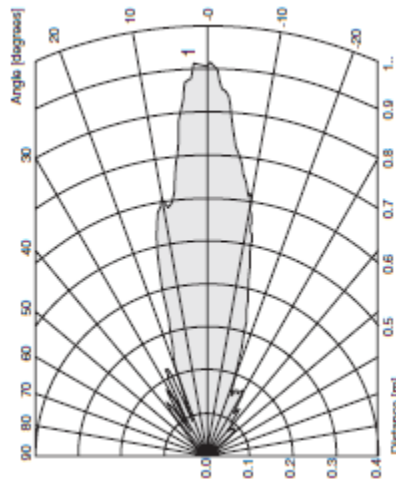


Figura 4.14 Diagrama de directivitate

În [Muralidharan, 2001] [Modi, 2002] autorii apelează la o modulație a semnalului emis de elementul senzorial în scopul îmbunătățirii percepției senzoriale.

Presiunea sonoră a fost utilizată de diferiți autori pentru a evalua sensibilitatea elementului senzorial. Kleeman și Kuc [Kleeman, 2008], pe considerendul unei scene de lucru 2D și a unui obstacol prezent, analizează sensibilitatea elementului senzorial pornind de la presiunea acustică a semnalului ecou:

$$P_E(r, \theta) = \frac{\alpha a^4 f}{r^2} \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 \quad (4.25)$$

Dudek [Dudek, 1996] utilizează rezultatele existente în bibliografia de specialitate [Kuc, 1987] în construcția modelului matematic pentru senzorul

ultrasonic. Autorii analizează comportamentul senzorului în baza presiunii acustice a semnalului ecou. O abordare similară este întâlnită în lucrarea [Kleeman, 2008] unde presiunea acustică pe un obstacol descris de parametrii (r, θ) este dată de relația:

$$P_E(r, \theta) = \frac{\alpha a^2 f}{r^2} \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right) \quad (4.26)$$

unde semnificația notațiilor este următoarea: α - este o constantă de proporționalitate ce ține cont de densitatea aerului și calitatea sursei de emisie; J_1 - este funcția Bessel de ordinul 1.

4.3.2. Funcțiile Bessel

Prin funcții Bessel se înțeleg soluțiile canonice $Z(z)$ ale ecuației diferențiale a lui Bessel - cu z real sau complex [Kane, 2008]:

$$z^2 \frac{d^2 Z}{dz^2} + z \frac{dZ}{dz} + (z^2 - \alpha^2) Z = 0 \quad (4.27)$$

pentru o valoare arbitrară α (reală sau complexă), numită ordinul funcției Bessel.

Funcțiile Bessel sunt cunoscute ca funcții cilindrice sau funcții armonice deoarece se regăsesc în soluția ecuației Laplace în coordonate cilindrice.

Aceste funcții au fost definite de Daniel Bernoulli și generalizate de Friderich Bessel. Importanța funcțiilor Bessel rezultă din faptul că soluționează multe probleme de potențial static și de propagare a undelor. Un exemplu este cel referitor la modurile de vibrații ale unei membrane circulare subțiri.

Funcțiile Bessel de speța I-a, notate $J_\alpha(z)$, sunt soluții ale ecuației diferențiale a lui Bessel, care au valoare finită în origine $z = 0$ pentru valori α întregi nenegative și valoare infinită în origine pentru valori α negative diferite de întregi. Tipul de soluție, întregă sau nu, și normalizarea funcției $J_\alpha(z)$ sunt definite de proprietățile de mai jos.

Funcția Bessel de speța I-a este definită de seria Taylor în jurul originii $= 0$:

$$J_\alpha(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m + \alpha + 1)} \left(\frac{z}{2} \right)^{2m + \alpha} \quad (4.28)$$

unde $\Gamma(z)$ este funcția Gamma a lui Euler, care reprezintă generalizarea funcției factorial pentru valori z diferite de întregi la numere reale și complexe:

$$\Gamma(z) = \int_0^z t^{z-1} e^{-t} dt \quad (4.29)$$

Funcțiile Bessel de ordin întreg sunt coeficienții dezvoltării în serie de puteri - în raport cu variabila t - a funcției [Kane, 2008]:

$$e^{\frac{z}{2} \left(t - \frac{1}{t} \right)} = \sum_{n=0}^{\infty} J_n(n) t^n \quad (4.30)$$

Graficul funcției Bessel oscilează ca cel al funcției sinus sau cosinus, diferența fiind aceea că funcția Bessel descrește proporțional cu $1/\sqrt{z}$ spre infinit, precum și faptul că rădăcinile nu sunt în general periodice, cu excepția celor asimptotice pentru valori mari ale lui z .

Pentru valori α diferite de întregi, funcțiile $J_\alpha(z)$ și $J_{-\alpha}(z)$ sunt liniar independente, reprezentând cele două soluții ale ecuației diferențiale. Pe de altă parte, pentru α de ordin întreg, este valabilă următoarea relație:

$$J_{-n}(z) = (-1)^n J_n(z) \quad (4.31)$$

Acest lucru arată că cele două soluții nu sunt liniar independente. În acest caz, a doua soluție liniar independentă este dată de funcția Bessel de speța a II-a.

Soluția generală a ecuației lui Bessel pentru $\nu = n$ întreg este

$$y = C_1 J_n(x) + C_2 Y_n(x) \quad (4.32)$$

unde C_1 și C_2 sunt constante arbitrare, J_n este funcția Bessel de speța întâi și ordin n iar Y_n este funcția Bessel de speța a doua și ordinul n (numite și funcțiile lui Neumann).

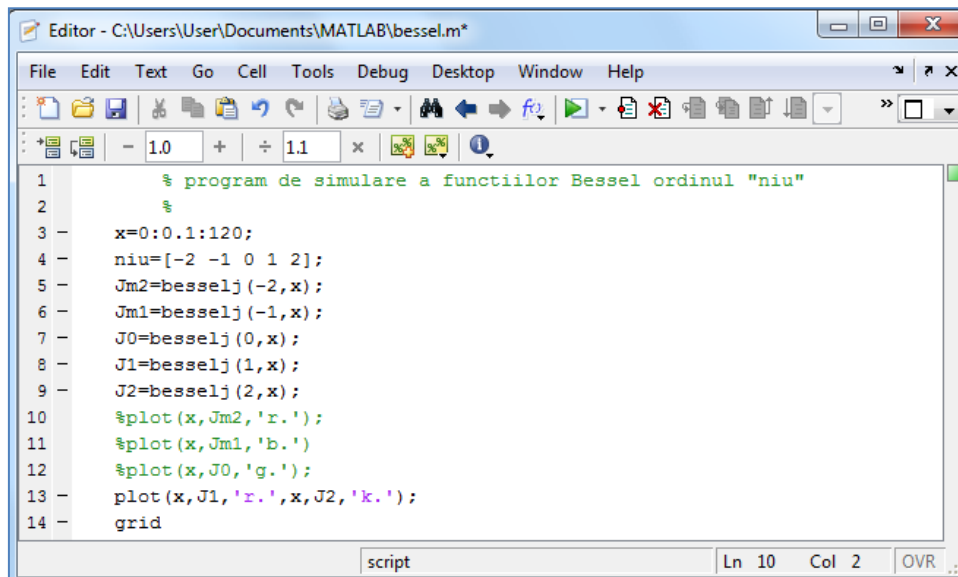
În mediul de lucru Matlab, funcția Bessel de speța întâi și ordinul (ν) real, pozitiv și argumentul x se calculează cu instrucțiunea **J=besselj(v,x) [..3]**.

Dacă \mathbf{x} și \mathbf{v} sunt vectori de dimensiunile m și respectiv n , atunci **J** va fi o matrice cu dimensiunea ($m \times n$), în care elementul din poziția (j,k) este dat de relația:

$$J(j,k) = \text{besselj}(v(j), x(k)) \quad (4.33)$$

cu $j=1,\dots,m \leq 1000$, iar $k=1,\dots,n$.

O variantă veche de apelare a funcției Bessel de speța întâi și ordinul (ν) real, pozitiv și argumentul x a fost **bessel a(v,x) [***12]**



```

Editor - C:\Users\User\Documents\MATLAB\bessel.m*
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x
1 % program de simulare a functiilor Bessel ordinul "niu"
2 %
3 x=0:0.1:120;
4 niu=[-2 -1 0 1 2];
5 Jm2=besselj(-2,x);
6 Jm1=besselj(-1,x);
7 J0=besselj(0,x);
8 J1=besselj(1,x);
9 J2=besselj(2,x);
10 %plot(x,Jm2,'r. ');
11 %plot(x,Jm1,'b. ');
12 %plot(x,J0,'g. ');
13 plot(x,J1,'r.',x,J2,'k. ');
14 grid
script Ln 10 Col 2 OVR

```

Figura 4.15 Fișier `bessel.m` pentru generarea funcției Bessel

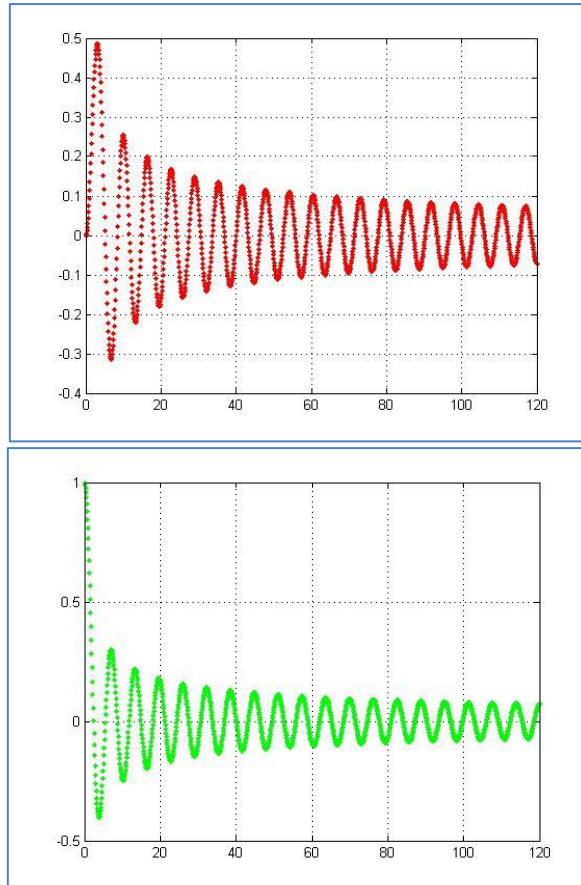


Figura 4.16 Graficele funcțiilor Bessel de speța I-a, $J_{\alpha}(z)$ și ordin $\alpha = -2, 0$

4.3.3. Concluzii

Procesul de localizare a unui obstacol este dependent de o serie de parametri:

- dimensiunea obstacolului trebuie să fie mai mare decât lungimea undei acustice emise de emițătorul sistemului senzorial (sonar);
- rugozitatea suprafeței;
- distanța până la obstacol;
- unghiul de transmitere a semnalului;
- rezoluția elementului senzorial.

4.4. Elementul senzorial în infraroșu

4.4.1. Introducere

Răspunsul în amplitudine al senzorilor în infraroșu (IR) are la bază reflexia unei raze optice pe obiectele din scena de lucru.

Procesul reflexiv depinde de caracteristicile de reflexive ale suprafeței obiectului. Răspunsul elementelor senzoriale în (IR) este utilizat pe scară largă datorită costului redus și răspunsului rapid în timp. Răspunsul în timp al acestor elemente senzoriale este superior senzorilor ultrasonic.

Everett [Everett, 1995] utilizează determinarea diferenței de fază ale semnalului recepționat în localizarea obiectelor. Rezoluție medie (50 mm) la distanțe determinate de 10 m este expresivă.

Variantele de elemente senzoriale IR sunt diverse. Sabatini [Sabatini, 1995] și Colla [Colla, 1996] utilizează un sensor în IR pentru domenii reduse (sub 250 mm) cu o rezoluție neconvingătoare. Vaz [Vaz, 1997] utilizează un sensor în IR de o precizie acceptabilă (5 mm) în sistem cu reflectoare de poziții cunoscute. Korba [Korba, 1994] utilizează mai multe elemente senzoriale IR pentru determinarea distanței fără ca rezultatele să fie convingătoare.

Benet & s.a. [Benet, 2002] aprecia că documentația referitoare la utilizarea senzorilor IR în robotica mobilă este redusă.

Mohammad [Mohammad, 2009] abordează modelul de iluminare Phong în analiza senzorilor IR pentru determinarea distanței continuând cercetările din acest domeniu.

Cercetările în domeniu urmăresc identificarea de noi variante senzoriale în (IR) care să fie integrate cu succes în construcția roboților mobili.

4.4.2. Fenomenul fizic

Energia luminoasă este o formă radiantă de energie electromagnetică. Radiația optică (semnal de intrare) este convertită într-un semnal electronic de ieșire, care poate fi utilizat (după prelucrări) în scopul dorit (Figura 4.17).

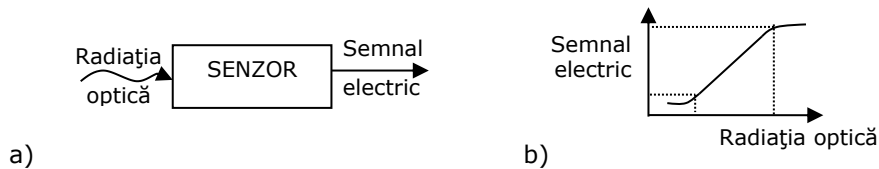


Figura 4.17 Comportamentul conversiei optoelectronice

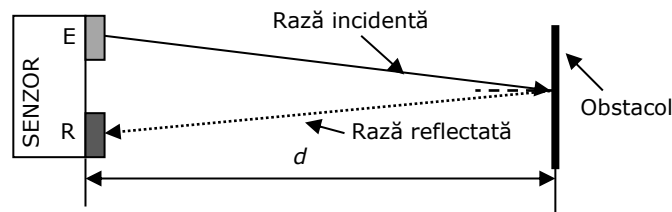


Figura 4.18 Principiul de lucru al senzorului IR

Novotny în [Novotny, 1999] analizează comportamentul elementului senzorial pe baza energiei emise și respectiv recepționate (Figura 4.18). Determinarea distanței dintre elementul senzorial și obstacol este evaluată de autori în trei etape:

- Identificarea parametrilor obstacolului;
- Identificarea orientării dintre planul elementului senzorial și planul de reflexie al obstacolului;

- Calculul distanței dintre sensor și obstacol.

Energia electromagnetică radiantă interacționează cu o suprafață definită de anumiți parametri: culoare, rugozitate (lucioasă, mată). O parte din această energie este împrăștiată (datorită stării suprafeței), o altă parte este absorbită (o suprafață neagră va absorbi mai multă energie decât o suprafață albă) iar altă parte va fi reflectată (o suprafață lucioasă va reflecta mai multă energie decât o suprafață mată). Conform acestor considerente, autorii alocă trei constante care caracterizează cele trei aspecte de comportament al energiei radiante. În final este definită ecuația Phong a procesului fizic:

$$I = C_0(\bar{\mu}_s \cdot \bar{\mu}_n) + C_1(\bar{\mu}_s \cdot \bar{\mu}_n)^n + C_2 \quad (4.34)$$

unde semnificațiile parametrilor rezultă din figura 4.19

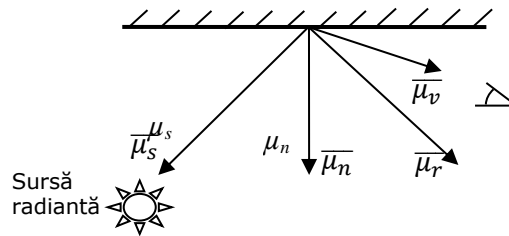


Figura 4.19 Modelul Phong [Novotny, 1999]

Conform cu notațiile din Figura 4.19 relația anterioară devine după transformări:

$$I = C_0 \cos \alpha + C_1 \cos^n(2\alpha) + C_2 \quad (4.35)$$

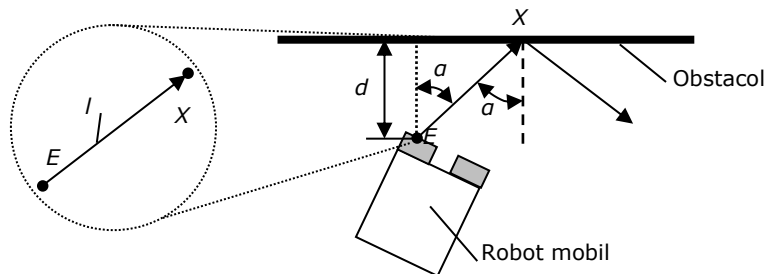


Figura 4.20 Robotul mobil în scena de lucru

Energia absorbită de fotodioda receptoare este [Novotny, 1999]:

$$E = \frac{IA}{(2l)^2} \quad (4.36)$$

unde parametru geometric l se determină conform notațiilor din figura 4.20:

$$l = \frac{d}{\cos \alpha} + r \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (4.37)$$

Pe baza relațiilor anterioare, se determină după prelucrări ($C_2=0$, $n=1$, $A=ct$):

$$E = \frac{C_0 \cos \alpha + C_1 \cos(2\alpha)}{\left\{ 2 \left[\frac{d}{\cos \alpha} + r \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \right] \right\}^2} \quad (4.38)$$

Determinările experimentale au permis identificarea constantelor C_0 și C_1 iar în final distanța d a robotului față de obstacol.

Spectrul radiației electromagnetice este prezentat în Figura 4.21.

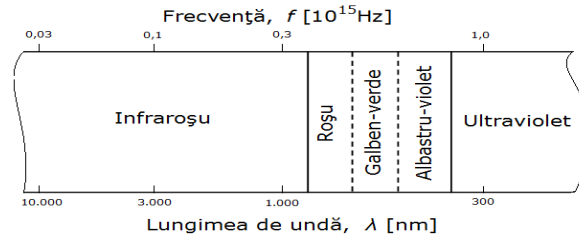


Figura 4.21 Spectrul radiației electromagnetice

Două circuite electronice pentru emisia în infraroșu și recepția semnalului reflectat pe obstacol sunt prezentate în Figura 4.22 [***6].

Varianta din Figura 4.22 b include și componentă de amplificare bazată pe un circuit amplificator. Valorile pentru componentele circuitului sunt: $R_1 = 150 \Omega$; $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 4.7 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$; OA = amplificator operațional LM358; $V_{cc} = 5 \text{ V}$ [***13].

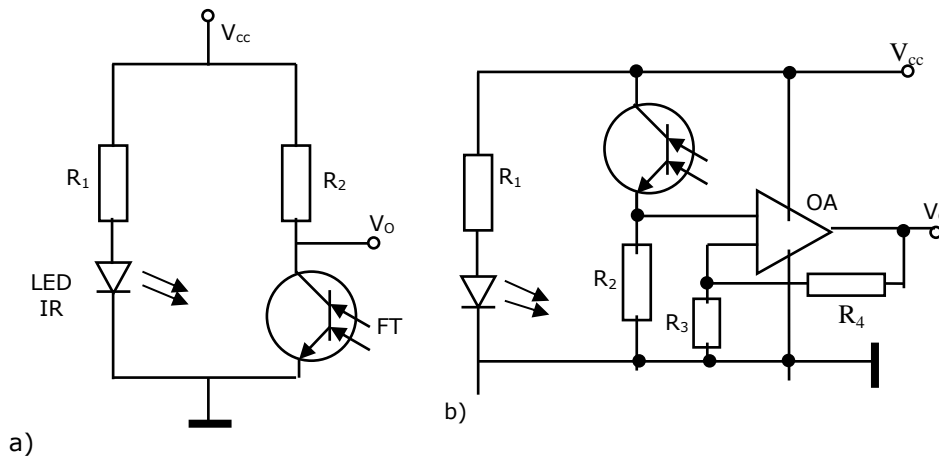


Figura 4.22 Circuite emitor / detector în infraroșu

Un circuit asemănător se utilizează și în lucrarea [Benet, 2002]. Dioda IR are un unghi de emisie ($\pm 10^\circ$) și o intensitate radiantă ridicată ($80 \text{ mW}/\text{sr}$, 100 mA). Fotoreceptorul are o sensibilitate spectrală bună ($50 \mu\text{A}/\text{mW}/\text{cm}^2$, 900 nm) și un lob sensibil de ($\pm 20^\circ$).

Sistemul senzorial IR integrează și componente optice (lentile, filtre) astfel încât sensibilitatea acestuia să crească.

4.4.3. Senzorul Sharp

4.4.3.1. Introducere

O variantă constructivă a senzorului IR existentă în cadrul laboratorului de Senzori și Actuatore este senzorul Sharp GP2Y0A21YK (Figura 4.23)[***14].



Figura 4.23 Senzorul Sharp GP2Y0A21YK

S-a apelat astfel la această variantă pentru analiza detectării obstacolelor și pentru integrarea unor astfel de elemente senzoriale în structura unui robot mobil.

4.4.3.2. Considerații teoretice referitoare la aproximarea unei funcții

În modelarea fenomenelor adesea apare situația de a apela la funcții necunoscute care să aproximeze ca expresie matematică o funcție.

Se recurge la această aproximare în două cazuri:

- când nu se cunoaște expresia analitică a lui f , dar se cunosc valorile sale într-un număr finit de puncte;
- când expresia analitică a lui f este destul de complicată și cu ajutorul acesteia calculele sunt destul de dificile.

Utilizarea practică a datelor obținute în urma măsurărilor – date experimentale - necesită evaluarea aproximativă a funcției definite tabelar (valori caracterizate de un anumit grad de precizie).

Tabel 4.1 Corelarea valorilor la aproximarea unei funcții

x	x_1	x_2	x_n
$f(x)$	$f(x_1)$	$f(x_2)$	$f(x_n)$

Fie $[a, b] \in \mathbb{R}$ intervalul de aproximare în care sunt cunoscute valorile funcției și $x_i \in [a, b]$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n \in \mathbb{N}$, punctele în care este cunoscută funcția cu care operăm (funcția de aproximat).

Acest lucru înseamnă găsirea unei funcții de aproximare F , cu o formă analitică simplă, ușor de utilizat într-un algoritm de calcul, care să aproximeze funcția f în intervalul $[a, b]$.

Adesea se urmărește obținerea răspunsului la una dintre întrebările: "care este cea mai bună predicție pentru ...?", "cine este cel mai bun predictor pentru ...?".

Deteminarea unei funcții de aproximare, $g(x)$, nu se poate face decât dacă se impune un criteriu de aproximare. Criteriile de aproximare se împart, în principiu, în două categorii:

1. Funcția de aproximare **trebuie** să treacă prin punctele cunoscute:

$$g(x_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, n \quad (4.39)$$

În această situație g este o *funcție de interpolare*, iar operația de determinare a ei se numește **interpolare**. La condiția de bază, adică funcția de mai sus, se pot adăuga și alte condiții cu privire la continuitatea, derivabilitatea sau altor caracteristici ale funcției în anumite puncte din intervalul analizat. Se observă că la interpolare se presupune că nodurile de interpolare (x_i, y_i) sunt cunoscute exact, nefiind afectate de erori.

2. Funcția de aproximare **nu trebuie** să treacă prin punctele cunoscute, dar să „aproximeze cât mai bine” valorile cunoscute, situație tipică aproximării datelor experimentale inerent afectate de erori. În acest caz se pot folosi următoarele criterii:

- **Minimizarea abaterii maxime** a funcției de aproximare față de cea originală:

$$\max_{x \in [a, b]} |f(x) - g(x)| = \text{minim} \quad (4.40)$$

Putem observa că dacă funcția original este cunoscută în punctele, (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, ecuația de mai sus devine:

$$\max_{i=1, 2, \dots, n} |y_i - g(x_i)| = \text{minim} \quad (4.41)$$

Metoda de aproximare corespunzătoare acestui criteriu este cunoscută sub numele de **aproximarea mini-max**.

- **Minimizarea sumei pătratelor abaterilor funcției de aproximare** față de cea original. În forma generală această sumă se exprimă printr-o integrală a cărei valoare trebuie minimizată:

$$S = \int_a^b [f(x) - g(x)]^2 dx = \text{minim} \quad (4.42)$$

Din punct de vedere geometric condiția de mai sus înseamnă că suma ariilor delimitate de graficele funcțiilor f și g trebuie să fie minimă. Cum funcția originală este cunoscută prin valorile discrete în anumite puncte, (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, ecuația de mai sus devine:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 = \text{minim} \quad (4.43)$$

Metoda de aproximare corespunzătoare acestui criteriu este cunoscută sub numele de **metoda celor mai mici pătrate**.

În practică, metodele din această a doua categorie se numesc *metode de aproximare*, spre deosebire de interpolare, chiar dacă aceasta din urmă este tot o metodă de aproximare.

Dacă analizăm comparativ cele două metode de aproximare se observă că dacă metoda de *mini-max* se focalizează asupra erorii maxime introdusă prin aproximare, metoda *celor mai mici pătrate* se focalizează asupra sumei erorilor, indiferent de semnul lor, pe tot domeniul de aproximare. Ridicarea la pătrat a fiecărei erori are rolul de a evita compensarea erorilor pozitive cu cele negative.

Literatura de specialitate prezintă pe larg metodele de aproximare și de evaluare a acestei aproximări. Se impun câteva precizări. Astfel, pentru un set de

date $(x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n)$ care fac obiectul unei metode de aproximare, literatura de specialitate se referă la:

- *estimație* (ajustare) a modelului realizat - orice soluție a sistemului matematic utilizat în aplicație;
- erorile de ajustare – diferența dintre valoarea ajustată \hat{y}_i pentru o realizare a valorii x_i . Se obține astfel, eroarea de ajustare:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Erorile de ajustare sunt cunoscute și sub denumirea de reziduuri.

- Se alege drept indicator sintetic de precizie a ajustării raportul R^2 – *coeficientul de determinare*. Exprimat procentual acest coeficient arată cât din variația variabilei dependente este explicată de ecuația estimată. Pentru o bună ajustare a ecuației de regresie la datele experimentale, trebuie ca acest raport să fie apropiat de 1. Există și este soluția *ajustării coeficientului de determinare*.

Evaluarea aproximării prin prisma criteriilor menționate este exprimată în mediile de lucru automatizat prin:

- *R Square – coeficientul de determinare* (este egal cu pătratul coeficientului de corelație multiplă). Poate fi gândit, exprimat procentual, drept proporția din variația variabilei dependente Y explicată de variația variabilelor independente X;
- *Adjusted R Square* - valoarea corectată a coeficientului de determinare. Este introdusă pentru a contracara (parțial)efectul creșterii mecanice a lui R^2 o dată cu numărul variabilelor independente.
- *df* – numărul gradelor de libertate al statisticii; este numărul de observații mai puțin unu;
- *MSE (mean squared error)* – eroarea pătrată medie. Eroarea medie pătratică a unui estimator X pentru un parametru p este valoarea așteptată a pătratului diferenței dintre valoarea estimatorului și parametru:

$$MSE = E[(X - p)^2] \quad (4.44)$$

- *SSE (error sum of squares)* – pătratul sumei erorilor de predicție:

$$SSE = \sum_1^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (4.45)$$

- *RMSE (root mean square error)* – eroarea rădăcinii medie pătrată. Dacă \hat{y}_i este un estimator al parametrului y , atunci $RMSE(y)$ este rădăcina pătrată a erorii medii pătratice a estimatorului:

$$RMSE(X) = \sqrt{MSE(X)} = \sqrt{E(X - p)^2} \quad (4.46)$$

O altă metodă de aproximarea unei caracteristici este cea bazată pe regresia polinomială.

Pentru ca o aproximare oarecare să fie considerată "cea mai bună", suma pătratelor distanțelor de la fiecare punct, la curba aproximată, trebuie să fie minimă. În aceste condiții, este posibil ca nici un punct al setului de date să nu se găsească pe curba aproximată, ceea ce separă net, aproximarea de interpolare, la care unele puncte sunt situate pe curbă.

La baza majorității metodelor de aproximare stă metoda celor mai mici

pătrate, care consideră că cea mai bună aproximare este aceea pentru care suma pătratelor erorilor este minimă.

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n (x_{i,d} - x_{i,c})^2 = \min \quad (4.47)$$

unde $x_{i,d}$, sunt valorile date (cunoscute), iar $x_{i,c}$ sunt valorile calculate.

Regresia polinomială este o aproximare a unui set de date printr-un polinom de forma:

$$p(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^{n-i} = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n \quad (4.48)$$

Dacă setul de date are n elemente, toate datele se află pe curba de "aproximare". Pentru un grad al polinomului mai mic decât numărul de date, aproximarea este cu atât mai bună, cu cât gradul polinomului este mai apropiat de numărul de date. Utilizarea unui polinom de aproximare, cu grad mai mare decât setul de date, poate conduce la erori de aproximare considerabile.

Pentru determinarea celei mai bune aproximări a unui set de date (x,y) , cu un polinom de ordin n , în mediul Matlab se utilizează funcția **polyfit** și se apelează cu una dintre sintaxele [***12]:

- $p = \text{polyfit}(x,y,n)$ găsește coeficienții polinomului $p(x)$, de grad n , care se potrivește cu datele de intrare $p(x(i))$, în punctul $y(i)$, iar rezultatul p , este un vector linie, de lungime $n+1$, conținând coeficienții polinomului în ordine descrescătoare,

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1} \quad (4.49)$$

- $[p,S] = \text{polyfit}(x,y,n)$ restituie coeficienții p și o structură S , pentru a se folosi cu funcția **polyval**, în scopul obținerii erorii estimate care, dacă erorile din datele de intrare y sunt independente de constanta variabilei, produce erori ce conțin 50% din cele prezise;
- $[p,S,mu] = \text{polyfit}(x,y,n)$ găsește coeficienții polinomului în $\hat{x} = \frac{x-\mu_1}{\mu_2}$, unde $\mu_1 = \text{mean}(x)$ și $\mu_2 = \text{std}(x)$, mu este un vector cu două elemente $[\mu_1, \mu_2]$, iar aceste transformări de cercetare și gradare îmbunătățesc proprietățile numerice, atât ale polinomului cât și ale algoritmului de ajustare.

4.4.3.3. Determinarea caracteristicii elementului senzorial

Pentru aproximarea setului de date obținute experimental am apelat pentru început la mediul Matlab [***12]. În acest scop am utilizat funcția *polyfit* în cadrul programului *polifit_1.m* (figura 4.24). Am admis aproximarea pe baza unui polinom de gradul $n = 9$. Rularea programului oferă tabelul cu coeficienții polinomului de aproximare (Tabel 4.2). Trebuie remarcat faptul că valorile coeficienților oferite într-un format cu 4 zecimale, diferă substanțial de forma extinsă a coeficienților. Forma coeficienților în format cu 4 zecimale este prezentată în Tabel 4.2bis.


```

1 % utilizarea functiei polifit pentru aproximarea unui set de date
2 % experimentale (x, U);
3 % n reprezinta gradul polinomului de aproximare
4 format longE
5 x=[0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 150.00 299.40 500.80 700.80 900.40 1100.00 1299.40 1500.50];
6 U=[0.00 952.7 1563.50 1749.20 2105.00 2606.70 1954.9 1194.20 861.70 650.00 506.60 387.40 249.70];
7 n=9;
8 p=polyfit(x,U,n)
    
```

Figura 4.24 Fișierul polifit_1_1 pentru aproximarea caracteristicii senzorului Sharp

Tabel 4.2 Coeficienții polinomului de aproximare

P_1	-5.711012082170597E-023	P_6	1.204905477247573E-007
P_2	3.872254812090011E-019	P_7	2.764658925955619E-004
P_3	-1.066248769737882E-015	P_8	-1.753326362864885E-001
P_4	1.488146718787044E-012	P_9	3.616457444497093E+001
P_5	-1.009294897651855E-009	P_{10}	5.759877805626825E+001

Tabel 4.2 bis Format redus de reprezentare a coeficienților

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
-0	0	-0	0	-0	0	0.0003	-0.1753	36.1646	57.5988

În faza a doua am apelat și la funcția *polyval* care a permis evaluarea numerică a polinomului de aproximare pentru un set de valori ale mărimii de intrare și eroarea de reprezentare obținută (*polyfit_3.m*)(Figura 4.25). În Figura 4.26 este prezentată curba de aproximare polinomială iar în Tabel 4.3 modul de evaluare a erorilor.

```

1 % evaluarea aproximarii unui set de date printr-un polinom de gradul n;
2 % (x,U) reprezinta setul de date;
3 % n reprezinta gradul polinomului de aproximare;
4
5 x=[0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 150.00 299.40 500.80 700.80 900.40 1100.00 1299.40 1500.50];
6 U=[0.00 952.7 1563.50 1749.20 2105.00 2606.70 1954.9 1194.20 861.70 650.00 506.60 387.40 249.70];
7 n=9;
8 [p,S]=polyfit(x,U,n)
9 f=polyval(p,x)
10 plot(x,f)
11 table=[x U f U-f]
12
    
```

Figura 4.25 Fișierul polifit_3_1 pentru aproximarea caracteristicii elementului senzorial

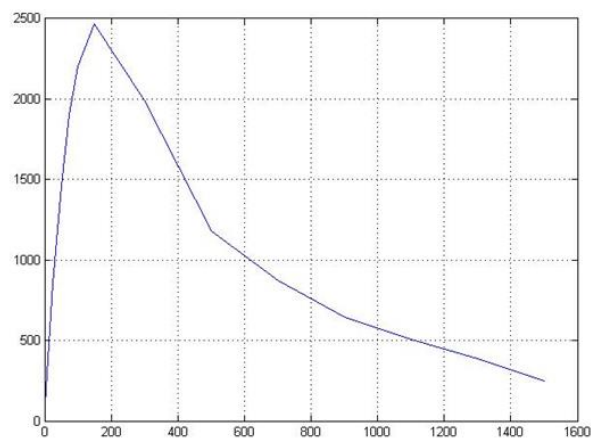
Tabel 4.3 Evaluare erori

X	Y	f	Y-f
0	0	0.0576	-0.0576
0.0250	0.9527	0.8565	0.0962
0.0500	1.5635	1.4625	0.1010
0.0750	1.7492	1.9020	-0.1528
0.1000	2.1050	2.2005	-0.0955
0.1500	2.6067	2.4700	0.1367
0.2994	1.9549	1.9942	-0.0393
0.5008	1.1942	1.1765	0.0177
0.7008	0.8617	0.8712	-0.0095
0.9004	0.6500	0.6458	0.0042
1.1000	0.5066	0.5079	-0.0013
1.2994	0.3874	0.3871	0.0003
1.5005	0.2497	0.2497	-0.0000

Structura *S* conține câmpurile *R*, *df* și *normr* referitoare la calculul efectuat conform cu precizările anterioare (Tabel 4.4)

Tabel 4.4 Structura calculului de aproximare

<i>R</i>	10 x 10 double
<i>df</i>	3
<i>normr</i>	275.5191

**Figura 4.26** Caracteristica elementului senzorial SHARP

Pentru aproximarea matematică a setului de date obținut, am apelat la mediul de lucru *Matlab/Cftool*.

În Figura 4.27 este prezentată caseta de lucru pentru aproximarea matematică pe baza unei funcții exponențiale cu 2 termeni, de forma:

$$U = a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot e^{d \cdot x} \quad (4.50)$$

94 Senzori și localizarea obstacolelor - 4

În urma prelucrărilor și conform casetei text se obține expresia matematică care aproximează caracteristica experimental:

$$U = 3790 \cdot e^{-0,002034 \cdot x} - 3819 \cdot e^{-0,01696 \cdot x} \quad (4.51)$$

În caseta text din Figura 4.27 sunt prezentate și valorile indicilor statistici de caracterizare a soluției obținute.

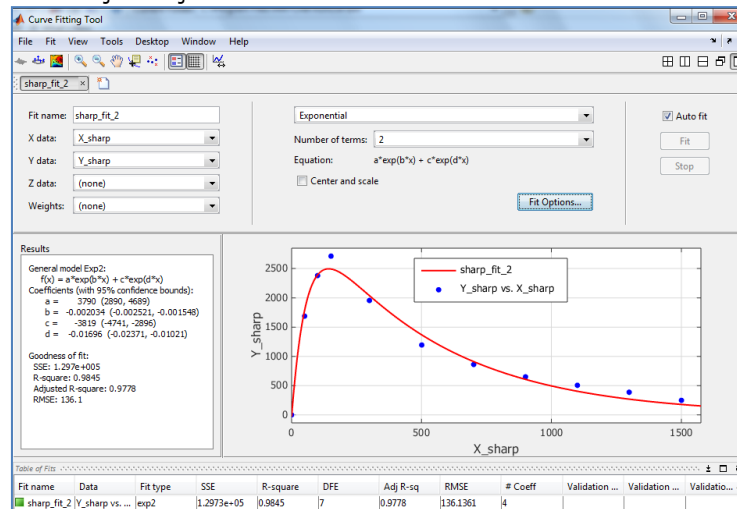


Figura 4.27 Aproximarea caracteristicii printr-o funcție exponențială

În continuarea analizei efectuate am considerat domeniul de măsurare al elementului senzorial ca o reuniune de două intervale separate $[0, 500] \cup [500, 1500]$. În această ipoteză am reluat aproximarea apelând din nou la mediul *Matlab/Cftool*.

În Figura 4.28 este prezentată aproximarea caracteristicii pe baza unei funcții exponențiale cu doi termeni.

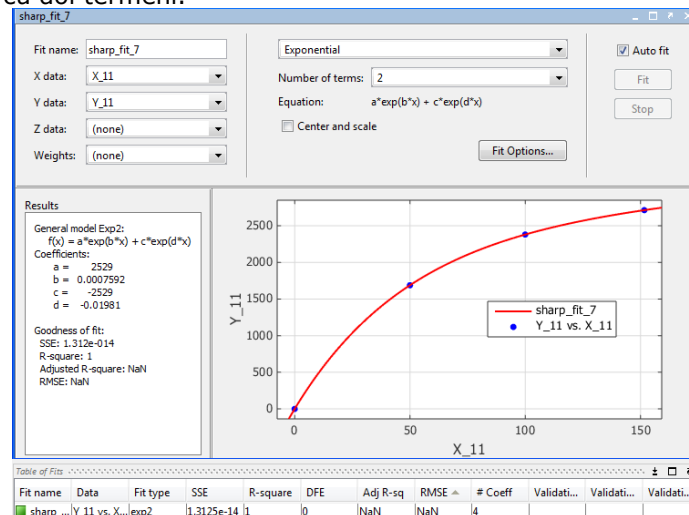


Figura 4.28 Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul $[0, 150]$ mm

Ecuția caracteristicii are expresia:

$$U = 2529 \cdot e^{-0,0007592 \cdot x} - 2529 \cdot e^{-0,01981 \cdot x} \text{ [mV]} \quad (4.52)$$

Rezultatul obținut pentru cel de-al doilea interval este prezentat în figura 4.29.

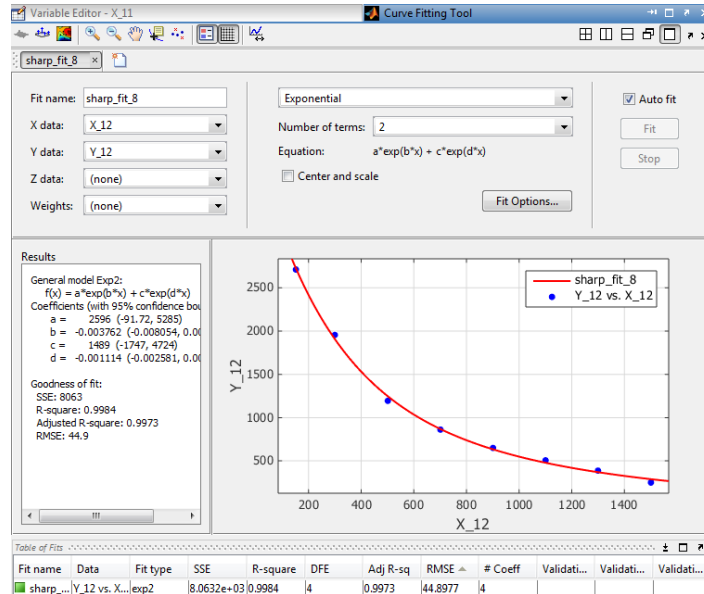


Figura 4.29 Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul [150, 1500] mm

Ecuția caracteristicii elementului senzorial este descrisă de expresia:

$$U = 2596 \cdot e^{-0,003762 \cdot x} + 1489 \cdot e^{-0,001114 \cdot x} \text{ [mV]} \quad (4.53)$$

Rezultate ale aproximării polinomiale și prin interpolare sunt prezentate în Anexa 4.1.

Rezultatele obținute permit și o analiză referitoare la cel mai bun rezultat care să fie admis ca atare. În Tabel 4.5 se prezintă o comparație a indicilor statistici referitoare la aproximarea caracteristicii pe intervalul [150 mm1500 mm]. Se observă că aproximarea polinomială are indici statistici superiori aproximării exponențiale.

Tabel 4.5 Indicii statistici

	Aproximare prin funcție:		
	exponențială - 2 termeni	exponențială - 1 termen	polinomială - gradul 3
SSE	8063	5.212e+004	5074
R-square	0.9984	0.9899	0.999
Adjusted R-square	0.9973	0.9882	0.9983
RMSE	44.9	93.21	35.62

În aplicațiile practice este necesară și funcția inversă a senzorului ultrasonic

descrișă sub forma $x = x(U)$ [mm].

Determinarea funcției inversă este condiționată de îndeplinirea unor criterii de existență [***15]

Având în vedere cele specificate anterior referitor la inversarea unei funcții, am considerat intervalul de lucru al senzorului ca o reuniune de intervale [0.....2500] mV. Am apelat din nou la mediul de lucru *Matlab/Cftool*. Rezultatul aproximării caracteristicii este prezentat în figura 4.30 Funcția care descrie caracteristica elementului sensorial are expresia:

$$x = 1589 \cdot e^{-0,001786 \cdot U} + 567 \cdot e^{-0,0004792 \cdot U} \text{ [mm]} \quad (4.54)$$

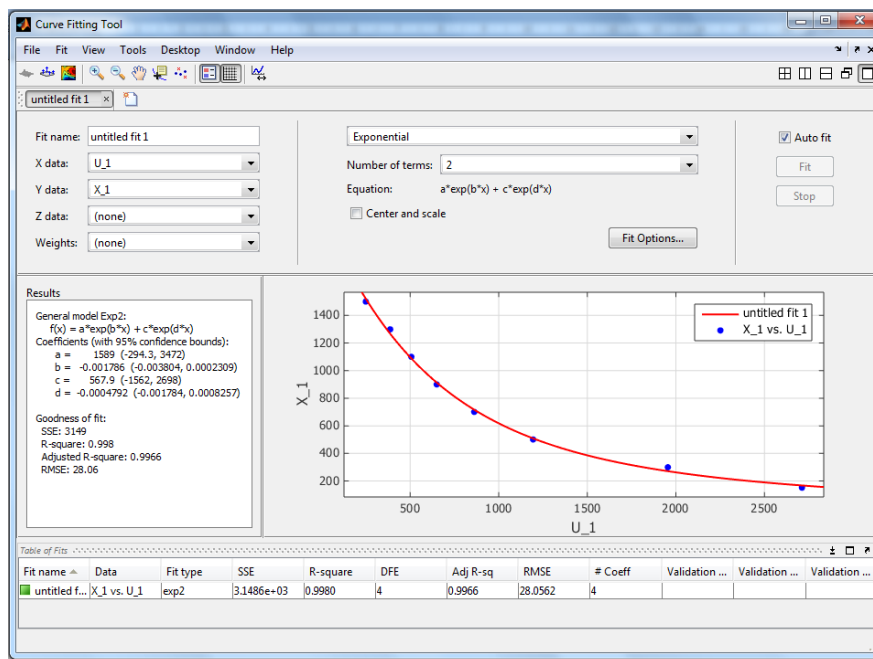


Figura 4.30 Aproximarea caracteristicii $x = x(U)$ printr-o funcție exponențială

În tabelul 4.5 se prezintă în acest o comparație a indicilor statistici referitoare la aproximarea caracteristicii anterioare. Se observă că aproximarea polinomială are indici statistici superiori aproximării exponențiale.

Tabel 4.6 Indicii statistici

	Aproximare prin funcție:		
	exponențială - 2 termeni	exponențială - 1 termen	polinomială - gradul 3
SSE	3149	1.543e+004	1204
R-square	0.998	0.9904	0.9993
Adjusted R-square	0.9966	0.9888	0.9987
RMSE	28.06	50.71	17.35

Aproximarea caracteristicii pentru intervalul [0 ...150 mm] a condus la rezultate nesatisfăcătoare.

Posibilitatea de aproximare pe baza unor funcții clasice a condus la rezultatele din Tabel 4.6 și Figura 4.31.

Tabel 4.7 Indicii statistici

	Aproximare prin funcție:	
	exponențială – 1 termen	polinomială – gradul 2
SSE	1444	1046
R-square	0.8867	0.9179
Adjusted R-square	0.8301	0.7536
RMSE	26.87	32.35

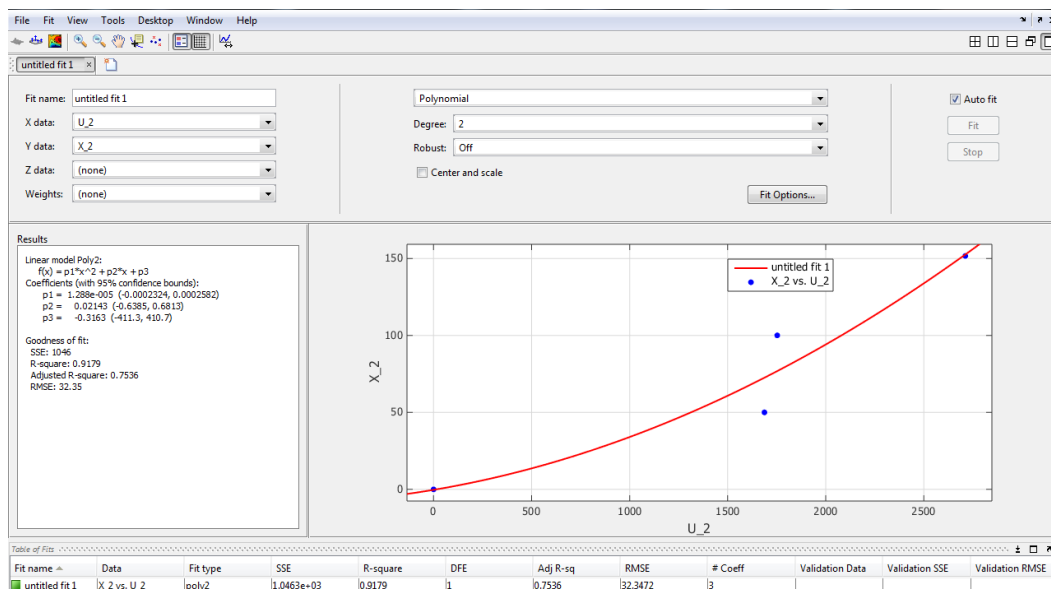


Figura 4.31 Aproximarea caracteristicii $x = x(U)$ printr-o funcție de gradul 2

Expresia matematică a funcției de aproximare este:

$$x = 1,288 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 + 0,02143 \cdot U - 0,3163 [\text{mm}] \quad (4.55)$$

4.4.4. Concluzii

Procesul de localizare a unui obstacol cu ajutorul unui senzor IR este dependent de o serie de parametri:

- Starea suprafeței obstacolelor și parametrii reflexivi;
- Caracteristica elementului senzorial este neliniară, cu o valoare maximă pentru semnalul de ieșire la o distanță d_0 dintre obstacol și senzor.

4.5. Localizarea obstacolelor pe baza informației elementelor senzoriale acustice

4.5.1. Introducere

Senzorii ultrasonici (US) sunt utilizați pe scară largă pentru a măsura distanțe. Aceștia au furnizat o sursă sigură pentru detectarea obstacolelor. Datorită principiului fizic de lucru, altul decât viziunea, ei sunt utili în condiții de iluminare slabă și obiecte transparente. Cu toate acestea, unii autori [Zouaghi, 2011] consideră că senzorii ultrasonici au limitări datorate unor parametrii constructivi (unghiul de directivitate), sensibilitate redusă la suprafețe lucioase [Dobashi, 2012] și eficacitate redusă de a detecta obiecte într-o zonă redusă (sub 0.5 m) [Toledo, 2000]

Precizia elementelor senzoriale acustice au în general precizie mai mică de 1 cm și domenii de lucru până la 6 m [Carpint, 2003]. Metoda cea mai utilizată de lucru este cea a timpului de zbor (TOF).

Lui [Lui, 2009] abordează problema localizării unui obstacol pe baza unor surse acustice pasive multiple. Autorii apelează la metoda timpilor diferiți de sosire (TDOA – time difference of arrival) pentru localizarea obstacolului.

Una dintre direcțiile de lucru prezente în literatură de specialitate este cea referitoare la variante constructive și funcționale ale elementelor senzoriale utilizate în percepția senzorială a informațiilor din scena de lucru a robotului mobil. Elementul senzorial acustic bazat pe efectul Doppler este abordat într-o serie de lucrări [Ribeiro, 2004], [Dobashi, 2012].

Construcția hărților destinate navigării roboților mobili apelează la metode diverse de lucru. Rețelele neuronale și elementele senzoriale acustice pentru maparea scenei de lucru sunt prezente în literatură [Mubarak, 2013], [Patil, 2012]. Sinteze de referință referitoare la procesul de mapare sunt prezente în cercetările diverșilor autori [Chang, 1996], [Clerentin, 2000], [Harmanec, 1999]. Sunt abordate în mod suplimentar și aspecte de corecție probabilistică [Bison, 1997], [Meger, 2009], metode empirice de mapare cu utilizarea probabilității [Bishop, 2010], fuziunea senzorială [Iagnemma, nd] sau analiza cantitativă de localizare și mapare probabilistică [Klir, 1999].

Teoria probabilităților în tratarea problemei de localizare în scena de lucru [Müller, 2009], [Patil, 2012], [Petrehus, 2005], în abordarea problemei coliziunilor [Bessièrè, nd], a strategiei de navigare [Carmena, 2001] sau fundamentarea teoretică a planificării mișcărilor [Bishop, 2010] vine ca o confirmare a celor precizate anterior privind modul de abordare în tratarea incertitudinilor pentru robotica mobilă.

4.5.2. Principiul de lucru

Cercetarea spațiului de lucru se realizează de către robotul mobil pe baza elementelor senzoriale. În mediul de lucru al robotului mobil (RM) – structurat sau nestructurat – există diverse obstacole (Figura 4.32) care trebuie localizate. În acest mediu se poate identifica scena de cercetare a robotului definită de disponibilitatea sistemului senzorial al RM de a obține informația dorită (Figura 4.33).

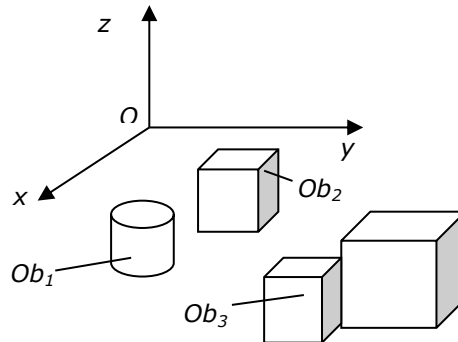


Figura 4.32 Obstacole în mediul de lucru al RM

Față de un sistem general de coordonate xOy , robotul mobil având atașat propriul sistem de coordonate, trebuie să execute o mișcare, cu ocolirea obstacolelor, pe o traiectorie dată. Forma obstacolelor este diferită. Este de dorit ca informația obținută să permită evaluarea distanței față de un obstacol și în corelație cu alte informații să poată fi identificată forma obstacolului.

Apelând la o abordare sistemică, am reprezentat în Figura 4.34 principiul de lucru. Primul element reprezintă un element senzorial care convertește un semnal de intrare $U(t)$ în unde acustice emise spre mediul investigat – mediul de lucru al robotului mobil. În acest mediu, undele acustice suportă reflexii, refracții, difracție specifice interacțiunilor cu obstacolele prezente în mediu. Blocul - element senzorial receptor – recepționează undele acustice reflectate din mediu și furnizează un semnal de ieșire care este o măsură a timpului de propagare a undelor acustice.

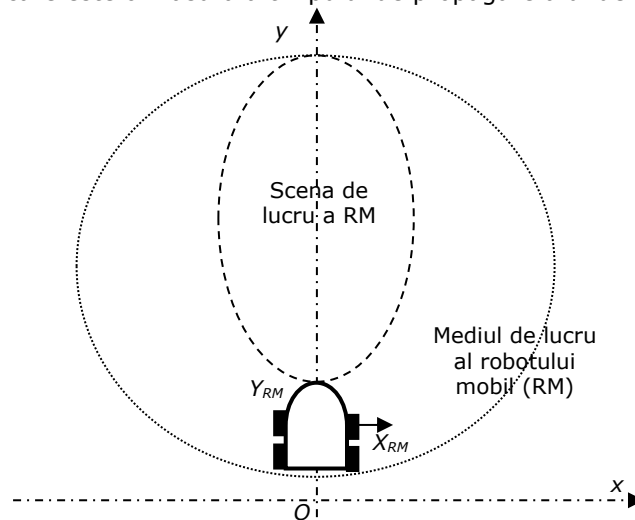


Figura 4.33 RM, mediul de lucru și scena de lucru

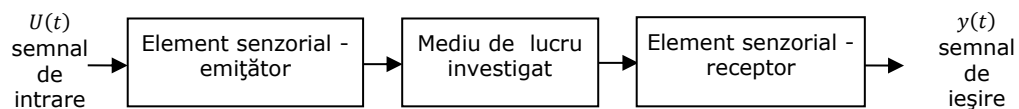


Figura 4.34 Schema bloc principală a sistemului acustic de localizare

Senzorul ultrasonic se poate realiza în variantele prezentate în Figura 4.35. În Figura 4.35 a) emitorul (E) este separat constructiv de receptorul (R). În cazul din Figura 4.35 b) cele două componente funcționale sunt integrate în aceeași structură.

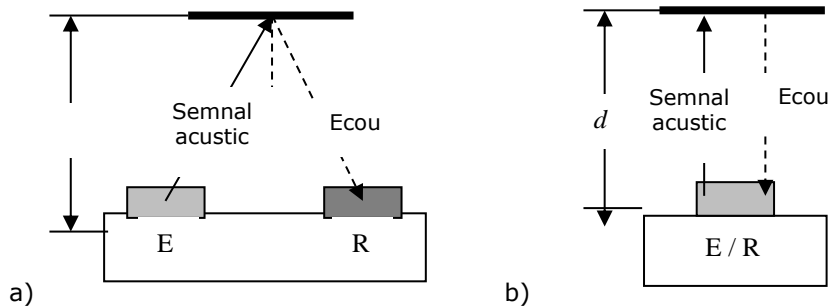


Figura 4.35 Variante constructive ale senzorului ultrasonic

Elementul senzorial emitor transmite un pachet scurt de impulsuri (durată 2..5 μ s). După terminarea emisiei este generat un semnal scurt care definește originea duratei de „zbor” a semnalului sonor. Se așteaptă recepționarea semnalului ecou. Terminarea semnalului ecou va echivala cu confirmarea existenței obstacolului iar timpul scurs până în acel moment va fi timpul t_0 de „zbor” al undei. Pe baza acestui timp se calculează distanța parcursă de unda sonoră:

$$d = \frac{c \cdot t_0}{2} \quad (4.56)$$

Distanța dintre senzor și obstacol se identifică cu această distanță calculată. Procesul de măsurare este afectat de o serie de efecte perturbatoare iar procesul de detecție a obstacolului se încadrează într-un proces aleatoriu.

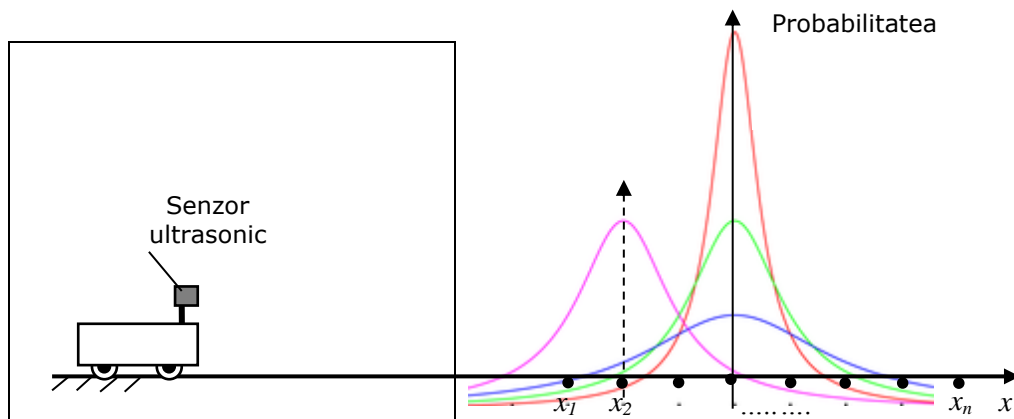


Figura 4.36 Caracterul aleatoriu al detecției obstacolelor

O variantă constructivă de senzor cu ultrasunete aflat în cadrul Laboratorului de Senzori și Actuatori este cel al firmei Parallax, senzorul PING [***2]. Senzorul se utilizează împreună cu placa de dezvoltare BASIC Stamp sau cu alte variante compatibile (de ex. Arduino). O altă variantă de senzor ultrasonic disponibilă în cadrul laboratorului este prezentată în Figura 4.37 și Figura 4.38.



Figura 4.37 Senzorul cu ultrasunete PING, de la Parallax



Figura 4.38 Senzorul cu ultrasunete MAX

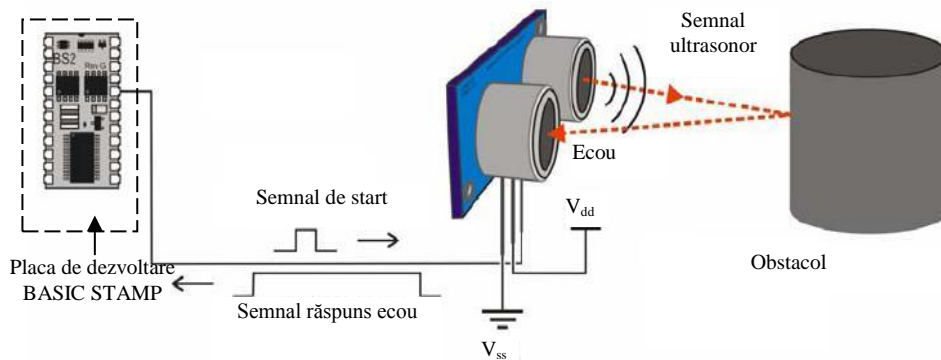


Figura 4.39 Schema principală de lucru a sistemului senzorial

Elementul senzorial emitor emite un pachet scurt de impulsuri (durată 2..5 μ s). După terminarea emisie este generat un semnal scurt care definește originea duratei de „zbor” a semnalului sonor. Se așteaptă recepționarea semnalului ecou (750 μ s). Terminarea semnalului ecou va echivala cu confirmarea existenței obstacolului iar timpul scurs până în acel moment va fi timpul t_0 de „zbor” al undei (Figura 4.40).

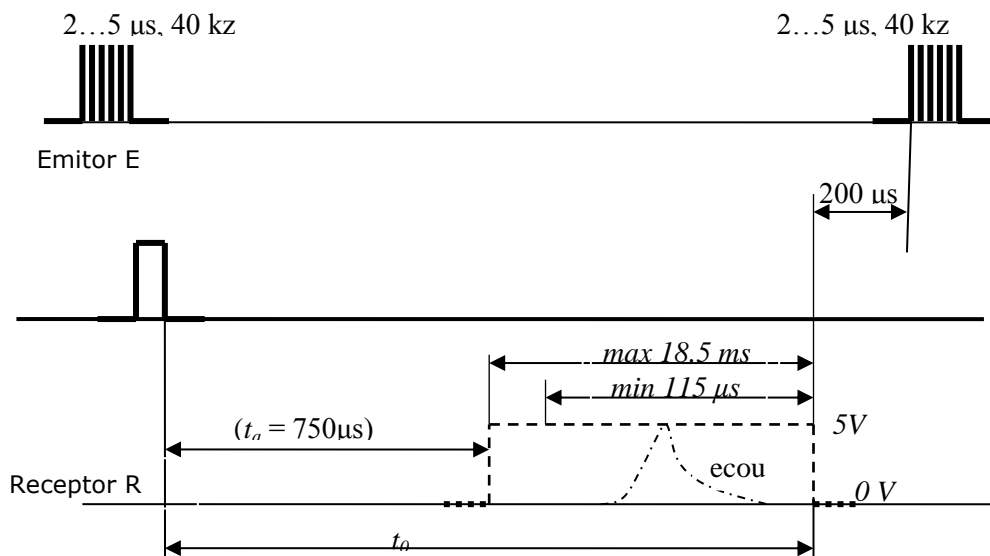


Figura 4.40 Corelarea timpilor de emisie, recepție și de „zbor”

102 Senzori și localizarea obstacolelor - 4

Placa de dezvoltare este conectabilă la un PC pe portul USB. În Figura 4.41 este prezentată fereastra de lucru a programului și în Figura 4.12 a celei de achiziție a informațiilor.

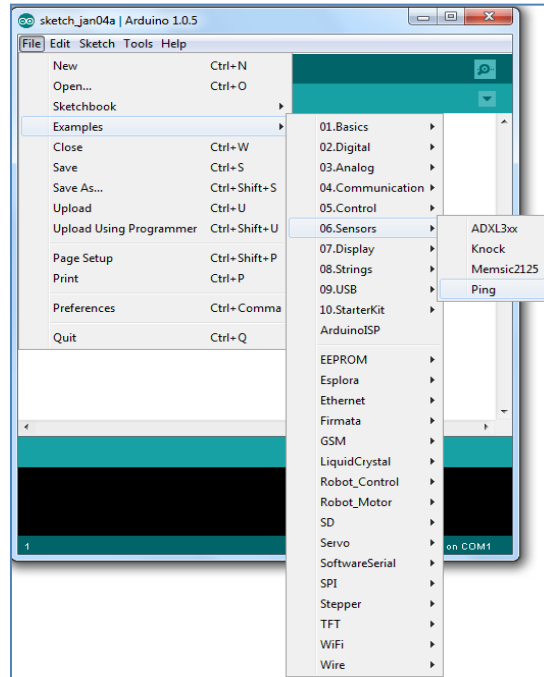


Figura 4.41 Fereastra de dialog pentru programul de achiziție a informației

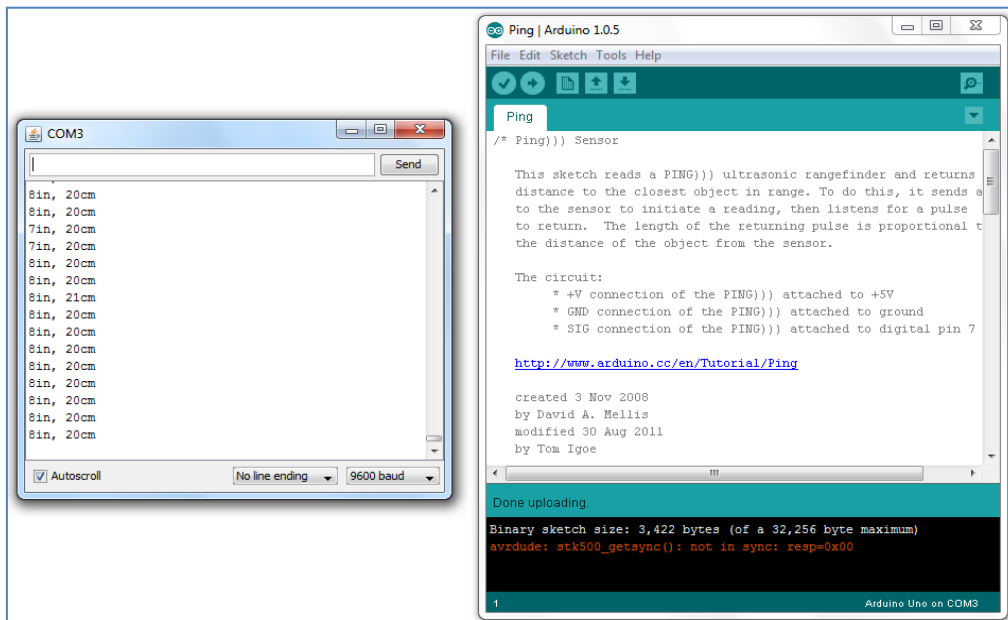


Figura 4.42 Detaliu din timpul achiziției informației

4.5.3. Concluzii

Procesul de localizare a unui obstacol cu ajutorul unui senzor ultrasonic se bazează pe un principiu de funcționare simplu și ușor de implementat în jurul plăcii de dezvoltare arduino.

Comportamentul elementului senzorial este afectat atât de forma obstacolului cât și de suprafața și parametrii reflexivi ai acesteia.

Caracteristica elementului senzorial este dependentă de temperatura mediului de lucru.

4.6. Localizarea obstacolelor pe baza informației senzorilor în infraroșu

4.6.1. Introducere

Procedeele acustice, optice și radio-electrice pentru măsurarea distanței sunt cunoscute sub numele de telemetrie. Există tehnici diferite de măsurare a distanței – măsurarea timpului de zbor, triangulație – și variante diferite de realizare a elementului senzorial (telemetru).

Senzorii în infraroșu (IR) sunt constituiți într-un ansamblu emitor – receptor. Aceste sisteme senzoriale sunt utilizate atât ca elemente senzoriale de proximitate cât și pentru măsurarea distanței dintre robotul mobil și un obstacol.

4.6.2. Principiul de lucru

Senzorul Sharp este un model de sistem senzorial din categoria telemetrelor. Emitorul este constituit pe baza unei diode în infraroșu (LED IR) iar receptorul (R) dintr-o matrice de fotodiode (Figura 4.43).

O rază de lumină este emisă de fotodiodă (LED IR). Această rază respectă toate caracteristicile cunoscute referitoare la deplasarea în mediu și interacțiunea cu un obstacol. O eventuală reflexie a razei face posibilă recepția acesteia de către matricea de fotodiode. Semnalul obținut este o măsură a distanței dintre sistemul senzorial și obstacol.

Există sisteme senzoriale cu ieșire atât analogică cât și digitală.

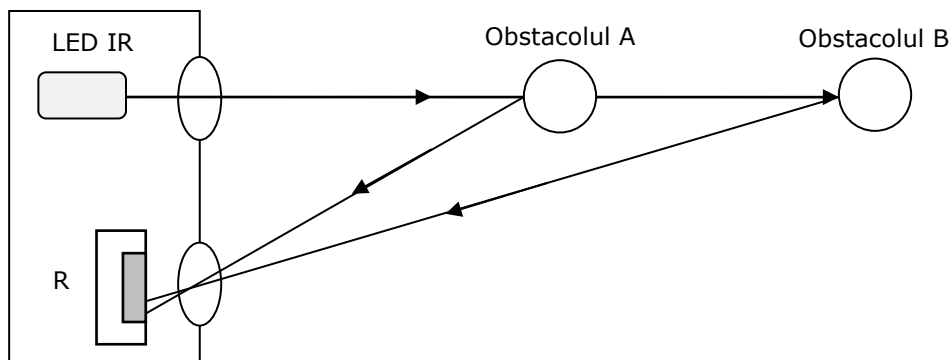


Figura 4.43 Principiul de determinare a distanței față de un obstacol

Conectarea senzorului Sharp și o placă de dezvoltare Arduino este prezentată în Figura 4.44. Sunt vizibili pinii de alimentare ai senzorului și pinul de pentru ieșirea analogică.

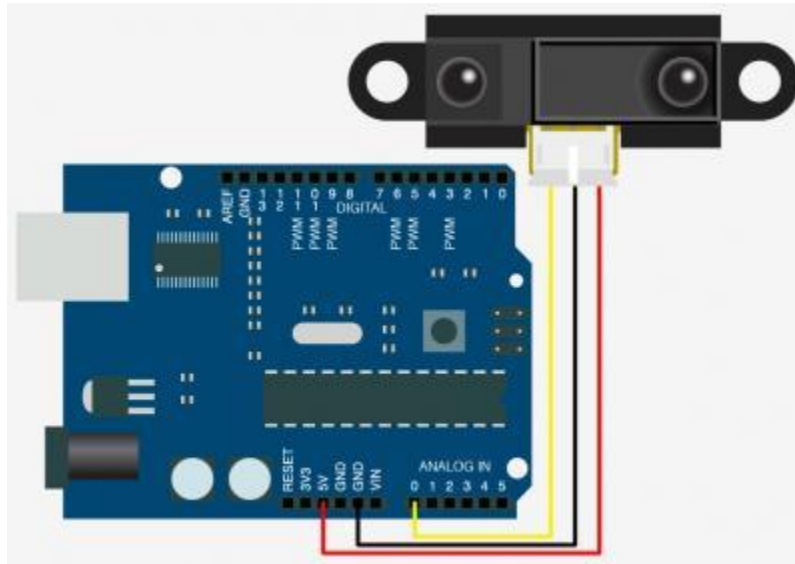


Figura 4.44 Conectarea senzorului Sharp cu placa Arduino

În urma determinării experimentale a caracteristicii elementului senzorial, se poate realiza integrarea acestuia în sistemul de localizare a unui obstacol sau de determinarea a distanței.

4.6.3. Concluzii

Literatura de specialitate face referiri atât la avantajele utilizării unui astfel de element senzorial în structura unui robot mobil cât și limitele utilizării acestuia. Cercetările experimentale vor demonstra capacitatea unui astfel de element senzorial.

4.7. Concluzii finale

Obiectivul principal al capitolului a constat în prezentarea teoretică a aspectelor referitoare la elementele senzoriale pentru localizarea obstacolelor și pentru determinarea distanței dintre senzor și obstacol. Cu aceste prezentări au fost evidențiate și aspecte care încadrează această analiză într-un proces aleatoriu.

Cercetările experimentale vor permite enunțarea avantajelor și dezavantajelor integrării unor astfel de sisteme senzoriale în structura unui robot mobil.

5. ROBOTUL MOBIL ÎN SCENA DE LUCRU

5.1. Introducere

Analiza traiectoriilor pentru un punct caracteristic este o problemă avută în vedere de diverși cercetători din domeniul roboticii și nu numai. Compararea traiectoriilor se realizează în general calitativ și rămâne o sarcină dificilă. O traiectorie este un amestec complex de date spațiale și temporale și, prin urmare, este dificil de a găsi o singură valoare pentru a reprezenta diferențele dintre traiectorii. Din acest motiv este recomandabilă găsirea unei metode cu suport matematic care să poată caracteriza o anumită traiectorie.

Este important de prezentat un parcurs referitor la acest subiect, avantajele și dezavantajele metodelor folosite.

Obiectivul principal al acestui capitol este prezentarea unui material de sinteză referitor la abordarea matematică a traiectoriei unui robot mobil și exemple edificatoare de simulare.

5.2. Conceptul de traiectorie

5.2.1. Generalități

Locul geometric al pozițiilor succesive pe care le ocupă punctual în mișcare se numește traiectorie [Vâlcovici, 1968].

O analiză pe un număr larg de aplicații - traiectorii a unor modele fizice, analiza gesturilor, analiza traficului, supraveghere video, activitatea de etichetare, traiectoriile de grupare (*clustering trajectory*), detectarea unei regiuni semantice, animale și societăți mixte animale-roboti, robotică - a fost abordată de Roduit [Roduit, 2009].

Traietoriile asupra cărora facem referire (ca obiectiv al acestui capitol) sunt specifice unui sistem ghidat extern într-un mediu de lucru: un autoturism pe o șosea, un robot mobil autonom (folosind un sistem senzorial și de navigație prin GPS). În aceste cazuri, diferența dintre traiectorii este delimitată de elementul extern. De exemplu, traiectoria unui autoturism pe o șosea este delimitată de dimensiunea rutieră. Un exemplu edificator este prezentat în Figura 5.1 șoseaua se identifică cu suportul fizic al traiectoriei unui autoturism.



Figura 5.1. Cale rutieră, suport pentru traiectoria unui autoturism

Pentru compararea traiectoriilor se pot utiliza [Roduit, 2009]:

- aria dintre două traiectorii;

Dacă $f(t)$ și $g(t)$ sunt două funcții care definesc o traiectorie atunci aria dintre aceste traiectorii este:

$$A = \int_{t_0}^{t_1} |f(x) - g(x)| dt \quad (5.1)$$

- distribuția punctelor de pe traiectorie. Pentru această analiză se apelează la metodele statistice: testul t – Student; testul U - Mann-Whitney; testul F; testul Kolmogorov-Smirnov.
- poziția punctelor eșantion. Scopul este de a avea același număr de puncte pentru toate traiectoriile pentru a compara seturile lor ordonate și stabilite pe baza unor pași echidistanți.

Un caz aparte îl reprezintă traiectoriile fără un cadru comun (common frame). Traiectorii fără cadru comun sunt cele mai neobișnuite dar specifice mediilor nestructurate. În acest caz particular, robotul mobil nu are nici o cale prestabilită (de exemplu, planul) pentru a trece de la o locație la alta, dar trebuie să reacționeze la mediul înconjurător. Acest tip de mișcare corespunde unui robot mobil pentru evitarea obstacolelor. Sunt avute în vedere strategii de căutare aleatorie. În acest caz metodele prezentate anterior nu pot fi utilizate.

Un mers aleatoriu este o formalizare matematică a unei traiectorii care constă în luarea de decizii aleatorii succesive. Acest model a unui proces aleatoriu a fost utilizat pentru a reprezenta mișcarea unei molecule într-un lichid, calea de deplasare a unui animal sau insectă. Un mers aleator se presupune a fi proces Markov: poziția următoare depinde doar de poziția curentă.

Un număr remarcabil de abordări se referă la controlul unui sistem autonom mobil pe o traiectorie memorată [Crețu, 1984], [Nițulescu, 2002], [Dolga, 1999], [Kouichi, 2002].

Într-un mediu de lucru nestructurat problema definirii traiectoriei punctului caracteristic are la bază ocolirea obstacolelor. Formele arhitecturale ale obstacolelor sunt diverse și în mod corespunzător se impun și variante corespunzătoare pentru traiectoria sistemului mobil. Pentru atingerea unor indici de performanță în evoluția robotului mobil, se impune ca traiectoria punctului caracteristic să îndeplinească un criteriu de optimabilitate [Sprunk, 2013].

Racordarea geometrică este o problemă cunoscută și simplu rezolvată în geometrie. Problema trebuie abordată cu atenție în momentul în care se dorește ca succesiunea acestor tronsoane să definească o traiectorie a unui punct caracteristic.

5.2.2. Robotul mobil, obstacole și traiectoria

Dependent de sarcina specifică pe care trebuie să o îndeplinească robotul mobil, traiectoria de mișcare se descrie în mai multe moduri: linie dreaptă, succesiune de linii drepte, curbă oarecare în spațiu etc. Modul de descriere matematică a traiectoriei se bazează pe funcții algebrice de timp sau spațiu, urmărirea unei mișcări exterioare pentru puncte care se deplasează în spațiu după legi de mișcare cunoscute.

Planificatorul de traiectorii globale oferă soluții finale de tip poligonal pentru traiectorii, respectiv o succesiune de tronsoane liniare concatenate, fiecare cu o

anumită lungime, poziție și orientare, elemente ce sunt precizate în raport cu sistemul de referință global atașat spațiului de lucru [Nițulescu, 2002].

Din punct de vedere structural, traiectoriile globale de tip poligonal pot fi încadrate în două categorii [Nițulescu, 2002]:

- Traiectorii închise (ciclice) – situația finală a robotului mobil coincide cu situația inițială (Figura 5.2, Figura 5.3); este o traiectorie specifică în general mediilor structurate.

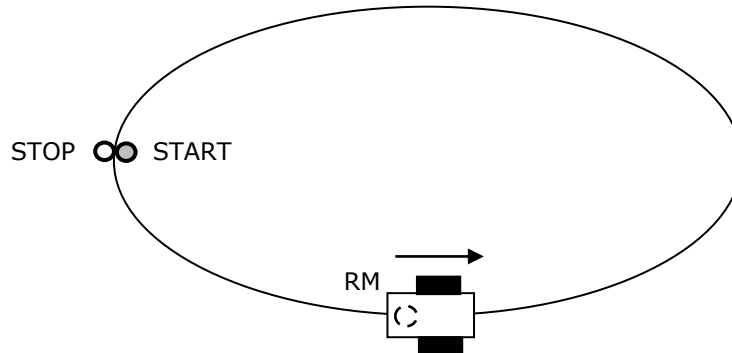


Figura 5.2. Traiectorie închisă în formă de elipsă

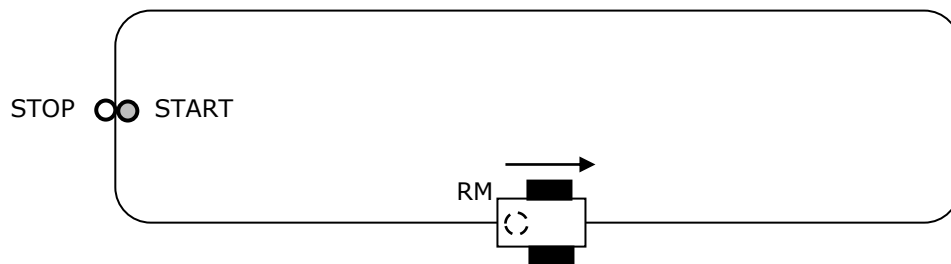


Figura 5.3. Traiectorie închisă în formă dreptunghiulară

- Traiectorii poligonale deschise – situația finală nu coincide cu situația inițială (figura 5.4); este o traiectorie care caracterizează mediile nestructurate.

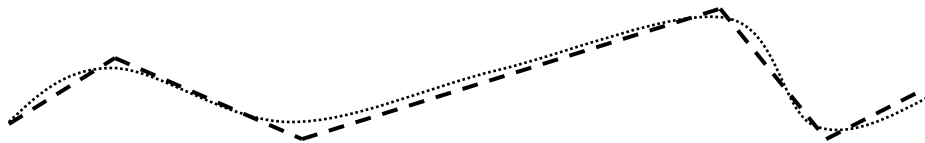


Figura 5.4. Traiectorie poligonală deschisă

Robotul mobil nu poate realiza o traiectorie compusă din segmentele de dreaptă decât cu o mare aproximare în zona de proximitate a două tronsoane.

Robotul mobil (RM), pentru ocolirea obstacolului, trebuie să urmărească o traiectorie compusă din segmentele 1, 2, 3 (Figura 5.5). Două câte două, tronsoanele trebuie să se racordeze geometric în corespondență cu scopul de lucru al robotului mobil.

Într-un sens restrâns, Pruna [Pruna, 2006] definește noțiunea de *a racorda două figuri geometrice* – două cercuri, un cerc și o dreaptă, ș.a. – prin construcția

unui cerc tangent acestora și reținerea unei porțiuni din cerc cuprinsă între cele două puncte de tangență.

Modul de racordare este ilustrat în Figura 5.6. Punctele A și B constituie punctele de racordare dintre tronsonul (1, 2) și respectiv (2, 3).

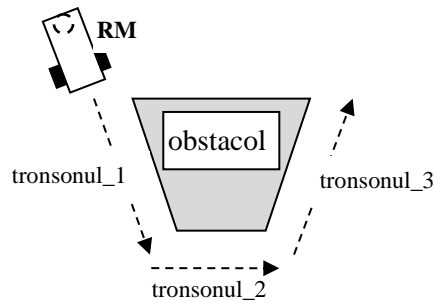


Figura 5.5. Traiectorie compusă din segmente de dreaptă

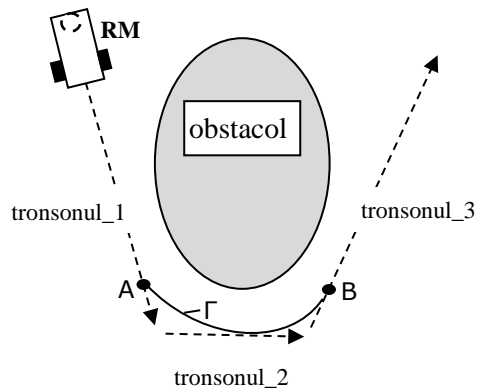


Figura 5.6. Racordarea tronsoanelor 1,2,3

RM se poate afla în situația în care trebuie să "aleagă" una din traiectoriile posibile pentru ocolirea unui obstacol și apoi prin planificatorul traiectoriei să asigure racordările geometrice care se impun (Figura 5.7)

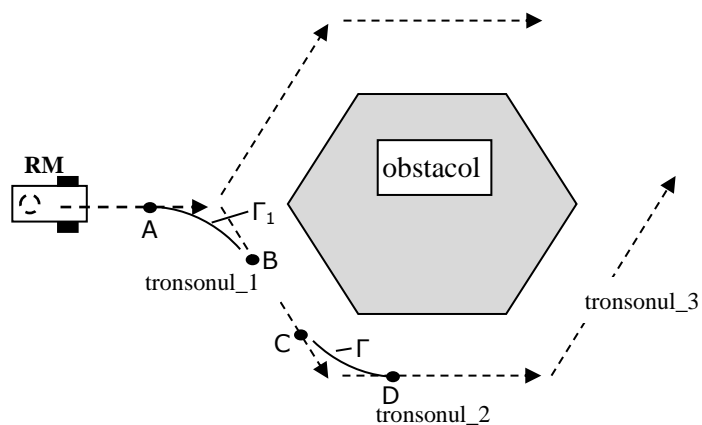


Figura 5.7. Traiectorii și modul de racordare geometrică

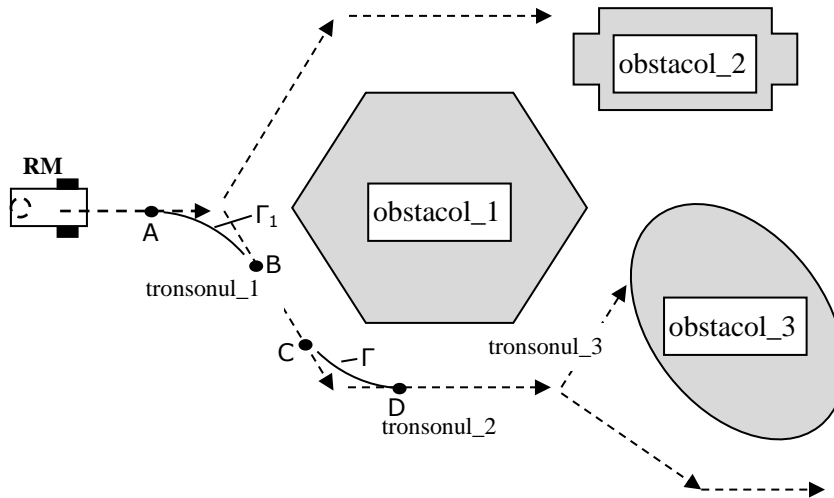


Figura 5.8. Traiectoriile posibile și racordarea geometrică

În Figura 5.9 este prezentată o clasificare a racordărilor geometrice cu aplicabilitate în domeniul roboticii.

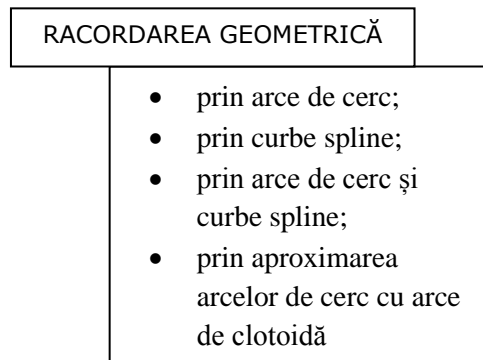


Figura 5.9. Racordări geometrice

Într-un sens mai larg figura geometrică, care se integrează prin tangență la cele două figuri geometrice inițiale, se definește matematic printr-o expresie și o serie de condiții suplimentare.

Legile de mișcare de ordinul zero, unu și doi pentru mișcarea punctului caracteristic, descriu evoluția în timp a parametrilor cinematici spațiu, viteză și accelerație a acestuia. În acest mod robotul mobil va descrie o anumită traiectorie. Succesiunea parametrilor cinematici din cuplurile cinematice motrice este impusă de funcția de comandă - setul de informații transmise de la sistemul de comandă la sistemele de acționare astfel ca punctul caracteristic să descrie traiectoria dorită - în conformitate cu operația humanoidă de efectuat.

Legile de mișcare se pot constitui cu diverse restricții impuse de sarcina de executat impusă RM:

- o limitare a accelerației și decelerației unghiulare:

$$|a| < a_0 \quad (5.2)$$

- constrângerile în accelerație și viteză

$$|a| < a_0 \quad (5.3)$$

$$|v| < v_0 \quad (5.4)$$

- limitări ale supraaccelerației, accelerației și vitezei:

$$|a| < a_0 \quad (5.5)$$

$$|v| < v_0 \quad (5.6)$$

$$\left| \frac{d^2v}{dt^2} \right| < \alpha \quad (5.7)$$

În relațiile anterioare notațiile a și v (sau forme echivalente acestora) se referă în sens generalizat la accelerație și respectiv viteză.

Conform cu abordările din literatura de specialitate [Kovacs, 2001], [Maniu 2011] se poate vorbi despre o cinematică și dinamică directă și o cinematică și dinamică inversă [Kovacs, 2001], [Maniu 2011].

5.2.3. Situaarea robotului mobil în scena de lucru

În sistemul de coordonate $O_0X_0Y_0Z_0$ atașat sistemului autonom mobil se definește punctul de referință P – punct caracteristic - care descrie poziția robotului în sistemul general de coordonate OXYZ. Pozițiile successive ale punctului P descriu traiectoria robotului mobil.

Funcția de mobilitate a robotului poate consta în deplasarea acestuia din punctul START în punctul STOP pe una din traiectoriile $(\Gamma_i)(i=1,2,3)$ în prezența unor obstacole. Performanța de situaare a sistemului autonom mobil constă în capacitatea acestuia de a se poziționa și de a se orienta (la un moment de timp t dat) în conformitate cu programarea realizată a acestuia.

Performanța de situaare a sistemului autonom mobil la un moment de timp dat se exprimă prin matricea de situaare exprimată în raport cu sistemul general de coordonate OXYZ:

$$[T_t] = \begin{bmatrix} n_{xt} & o_{xt} & a_{xt} & p_{xt} \\ n_{yt} & o_{yt} & a_{yt} & p_{yt} \\ n_{zt} & o_{zt} & a_{zt} & p_{zt} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

unde: elementele (n_x, n_y, n_z) , (o_x, o_y, o_z) , (a_x, a_y, a_z) ale matricei reprezintă coeficienții unghiulari ai versorilor axelor sistemului de coordonate al sistemului autonom mobil în raport cu sistemul de referință global; (p_x, p_y, p_z) reprezintă coordonatele punctului caracteristic P în cadrul sistemului de referință global.

Eroarea de situaare a sistemului autonom mobil este exprimată prin intermediul matricei de eroare de situaare definite în raport cu situaarea prescrisă prin program și cea realizată:

$$[\Delta T] = [T_t] - [T_0] = \begin{bmatrix} \Delta n_{xt} & \Delta o_{xt} & \Delta a_{xt} & \Delta p_{xt} \\ \Delta n_{yt} & \Delta o_{yt} & \Delta a_{yt} & \Delta p_{yt} \\ \Delta n_{zt} & \Delta o_{zt} & \Delta a_{zt} & \Delta p_{zt} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Atingerea performanțelor impuse necesită ca poziția finală a sistemului autonom mobil (RM) să fie cea a unui punct P în interiorul unui cerc de rază limită R.

În același timp orientarea SAM, definită de dreapta caracteristică (Δ), trebuie să fie în interiorul spațiului unghiular admis (Figura.5.10).

Analiza performanțelor depinde de varianta constructivă a robotului mobil. Literatura de specialitate abordează în general mișcarea robotului mobil într-un mediu nestructurat în planul orizontal [Mamoru ,2007], [Otte, 2009], [Rozhok, 2008] sau în medii greu accesibile.

Coordonatele (x_p, y_p) (cazul particular al mișcării în planul orizontal) ale punctului P se pot determina dependent de structura motrică a sistemului.

Considerăm un RM cu două roți motrice și o roată castor (Figura 5.11). Coordoatele (x_p, y_p) ale punctului caracteristic P, se pot determina din deplasările liniare ale centrelor celor două roți conform cu considerentele anterioare.

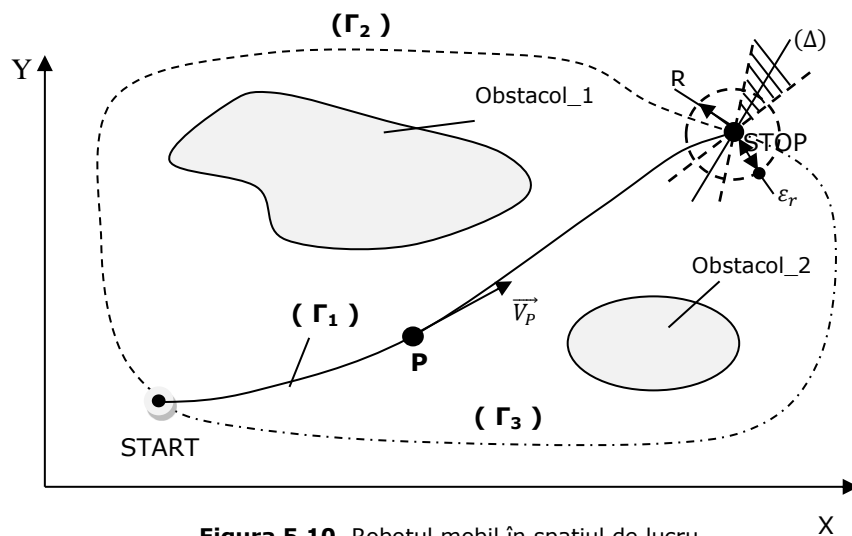


Figura 5.10. Robotul mobil în spațiul de lucru

Robotul mobil se găsește în spațiul de evoluție, de la punctul de **START** la punctul **STOP**, în ceea ce am definit incertitudinea agentului robot asupra mediului de lucru nestructurat și respectiv incertitudinea agentului robot în procesul de navigare datorită componentelor sale interne. Și într-un caz cât și în al doilea acțiunea robotului mobil poate fi abordată prin prisma fenomenului aleatoriu.

Pentru robotul mobil în acțiunea sa, pot fi enunțate (conform cu abordarea probabilistică a fenomenului aleatoriu) o serie de evenimente:

- *Evenimentul A* – atingerea punctului țintă. Evenimentului A îi corespund cazurile favorabile definite de traiectoriile 1, 2, 3;
- *Evenimentul B* - detectarea obstacolelor în spațiul de lucru;
- *Evenimentul C* – atingerea parametrilor de situație definiți prin precizia de poziționare și respectiv precizia de orientare.

O analiză a evenimentelor enunțate scoate în evidență rolul esențial al traiectoriei și necesitatea descrierii acestora pe baza unui suport matematic adecvat.

5.2.4. Modelul matematic al robotului cu roți diferențiale

Sistemul autonom mobil, conform denumirilor consacrate are o structură cu 2 roți diferențiale motrice și o roată de tip Castor. Cele două roți motrice sunt comandate independent, au o axă comună, orizontală și fixă în raportul cu șasiul

112 Robotul mobil în scena de lucru - 5

sistemului. Se poate considera astfel că sistemul este alcătuit dintr-un solid (S) (echivalent șasiului) sprijinit pe un plan orizontal OXY prin intermediul a două roți (1, 2) egale, de raze R_1 și R_2 , cu centrele în punctele A_1 și A_2 și a unei roți de tip Castor (3).

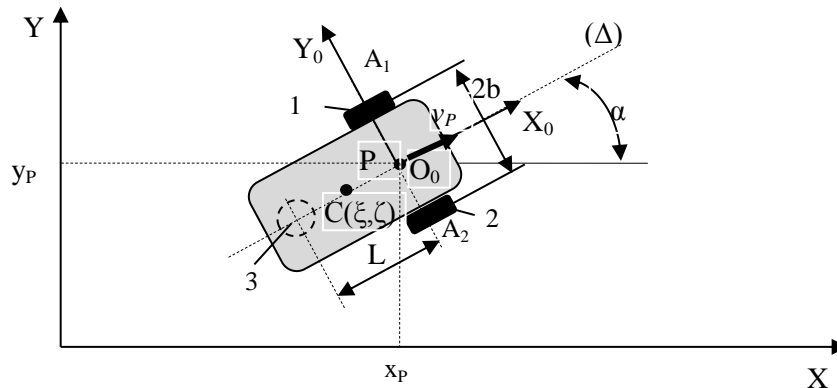


Figura 5.11. Robotul mobil cu roți diferențiale

Studiul mișcării de rostogolire plană a roților (1, 2) poate fi echivalat într-o primă aproximare cu mișcarea unui disc circular de rază R rezemat pe un plan fix [Vâlcovici, 1968]. În mecanica clasică se arată că mișcarea roții unui vehicul este caracterizată de viteza \bar{v}_A a centrului roții și de rotația roții cu viteza unghiulară ω . Centrul instantaneu de rotație se găsește în punctul I, pe verticala ce trece prin O și la distanța $OI = v_A/\omega$ [Vâlcovici, 1968]

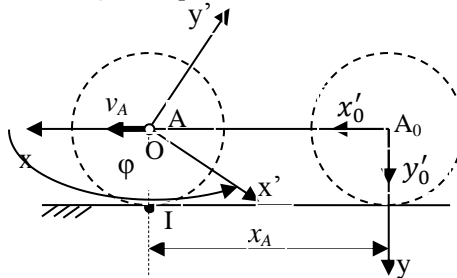


Figura 5.12. Mișcarea de rostogolire a roții pe un plan

În reperul cartezian admis se poate considera punctul $M_0(x_0, y_0)$ și $\bar{a}(u, v)$ un vector nenul. Există o singură dreaptă (Δ) care are direcția lui \bar{a} și care trece prin M_0 (Figura 5.13).

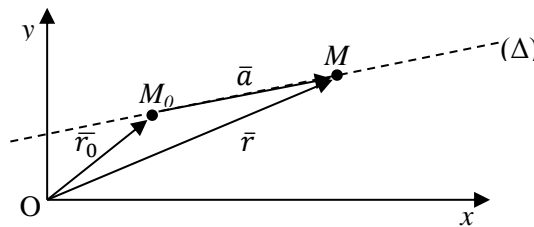


Figura 5.13. Dreapta (Δ) în spațiul cartezian

Ecuatia

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + t\bar{a} \tag{5.10}$$

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + t\bar{a}$$

se numește ecuația vectorială a dreptei (Δ) iar t este un parametru. Ecuația vectorială anterioară este echivalentă cu două relații scalare:

$$\begin{cases} x = x_0 + ut \\ y = y_0 + vt \end{cases} \tag{5.11}$$

care se numesc ecuațiile parametrice ale dreptei (Δ). Vectorul $\bar{a}(u,v)$ se numește vector director.

Punctul $M_0(x_0, y_0)$ se identifică în planul de mișcare a robotului cu punctul de START iar vectorul $\bar{a}(u,v)$ descrie orientarea drepte caracteristice pe tronsonul liniar de mișcare $\overline{M_0M}$.

În Figura 5.14 se prezintă cazul în care suporturile vitezelor celor două puncte A1 și A2 sunt paralele și egale. În această situație centrul instantaneu de rotație [Perju, 1985] se află la infinit regăsindu-se mișcarea liniară de translație a sistemului autonom mobil. În acest caz centrul instantaneu de rotație se găsește la intersecția dintre axa de rotație a celor două roți și dreapta care unește vârfurile vectorilor viteză.

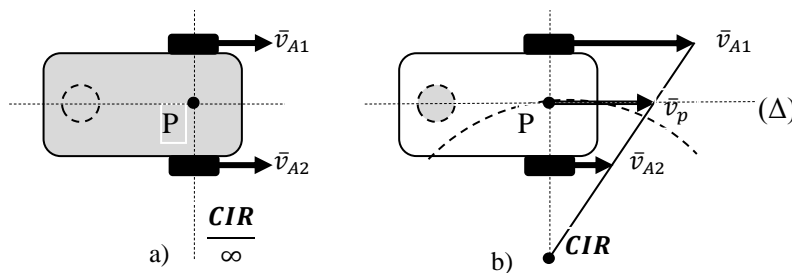


Figura 5.14. Centrul instantaneu de rotație

Viteza liniară a sistemului este definită în acest caz de viteza punctului P și are valoarea scalară:

$$v_p = \frac{v_{A1} + v_{A2}}{2} \tag{5.12}$$

iar vectorul viteză va fi tangent traiectoriei descrise (Figura 5.15). Dreapta caracteristică (Δ) va face astfel un unghi α cu axa Ox a sistemului de referință fix.

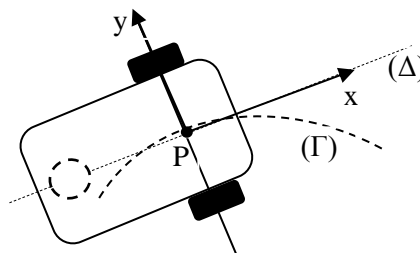


Figura 5.15. RM pe traiectoria (Γ)

Pe baza considerentelor anterioare se poate concluziona că există cinci parametri care descriu configurația sistemului autonom mobil în raport cu sistemul fix:

114 Robotul mobil în scena de lucru - 5

- coordonatele x_p, y_p ale punctului P ;
 - rotațiile unghiulare ale celor două roți motoare φ_1 și φ_2 ;
- unghiul α al axei longitudinale cu axa Ox .

Sistemul de ecuații cinematice care descriu această configurație este:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1 \quad (5.13)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2 \quad (5.14)$$

$$\dot{x} = v_p \cdot \cos \alpha \quad (5.15)$$

$$\dot{y} = v_p \cdot \sin \alpha \quad (5.16)$$

$$\frac{dy_p}{dx_p} = \tan \alpha \quad (5.17)$$

Poziția centrului instantaneu de rotație (CIR) este dat de raza de mișcare a punctului P :

$$\rho = \frac{v_{A_1} + v_{A_2}}{v_{A_1} - v_{A_2}} \cdot b \quad (5.18)$$

Modelul matematic descris de ecuațiile (rel 5.13 – 5.18) permite simularea cinematicii directe pentru sistemul analizat. Mărimile de intrare sunt vitezele unghiulare ale celor două roți motoare, iar mărimile de ieșire sunt coordonatele punctului de referință P , viteza acestuia și unghiul de rotire a sistemului mobil în raport cu cel fix [Mondoc, 2012].

Modelul matematic prezentat anterior permite după transformări simularea cinematicii inverse a robotului mobil: considerând ca și mărimi de intrare legea de mișcare pentru viteza liniară a sistemului (reprezentat prin punctul P) și traiectoria dorită descrisă matematic printr-o funcție $y_p = y_p(x_p)$ se urmărește determinarea valorilor pentru vitezele unghiulare ale celor două roți motoare care să asigure parcurgerea traiectoriei date.

Traectoria punctului caracteristic se poate descrie în mod explicit printr-o ecuație de forma:

$$y_p = y_p(x_p) \quad (5.19)$$

sau printr-o reprezentare parametrică

$$x_p = \varphi(t); \quad y_p = \psi(t); \quad t_1 < t < t_2 \quad (5.20)$$

Pentru o traiectorie circulară a punctului caracteristic P , lungimea arcului parcurs de acesta în raport cu sistemul de referință fix se poate scrie sub forma diferențială (Figura 5.16):

$$ds_p = \rho \cdot d\theta \quad (5.21)$$

sau sub formă unor creșteri finite:

$$\Delta s_p = \rho \cdot \Delta\theta \quad (5.22)$$

În același mod se pot determina lungimile arcelor de cerc parcurse de axele celor două roți motoare:

$$\Delta s_s = (\rho - b) \cdot \Delta\theta \quad (5.23)$$

$$\Delta s_d = (\rho + b) \cdot \Delta\theta \quad (5.24)$$

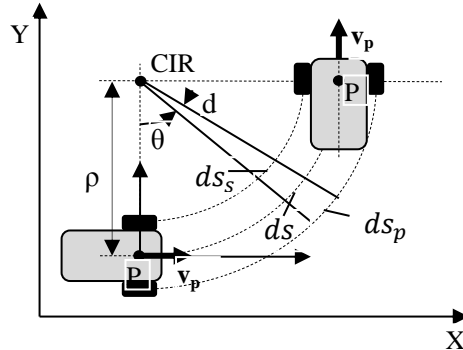


Figura 5.16. Traiectorie circulară a robotului mobil

5.2.5. Racordarea unor tronsoane prin arce de cerc

Conform celor specificate anterior, robotul mobil (RM) va realiza o traiectorie echivalentă unei drepte dacă vitezele liniare ale celor două roți motoare sunt egale (V) și se va deplasa pe o traiectorie circulară dacă vitezele sunt diferite (V_1 și respectiv V_2) (Figura 5.17). În punctul A intrarea pe traiectoria circulară necesită o variație de tip treaptă a vitezei pe baza unei accelerații de valori ridicate. Sistemul de acționare este solicitat iar robotul este supus unui șoc (Figura 5.18).

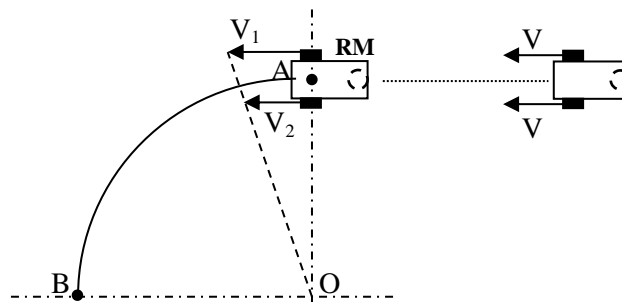


Figura 5.17. RM pe o traiectorie circulară

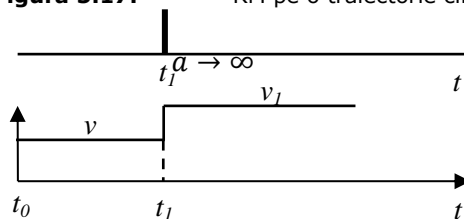


Figura 5.18. Viteza v_1 și accelerația la intrarea pe traiectoria circulară

În Figura 5.19 este prezentată schema de simulare în mediul Matlab/Simulink pentru o traiectorie circulară a punctului caracteristic al RM. Valorile celor două viteze periferice pe durata mișcării sunt prezentate în figura 5.20 iar traiectoriile realizate sunt prezentate în Figura 5.21.

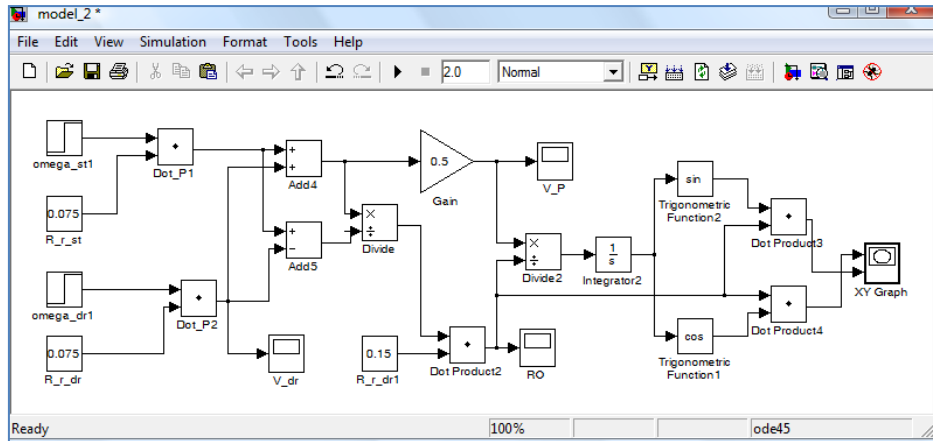


Figura 5.19. Simularea mișcării pe o traiectorie circulară

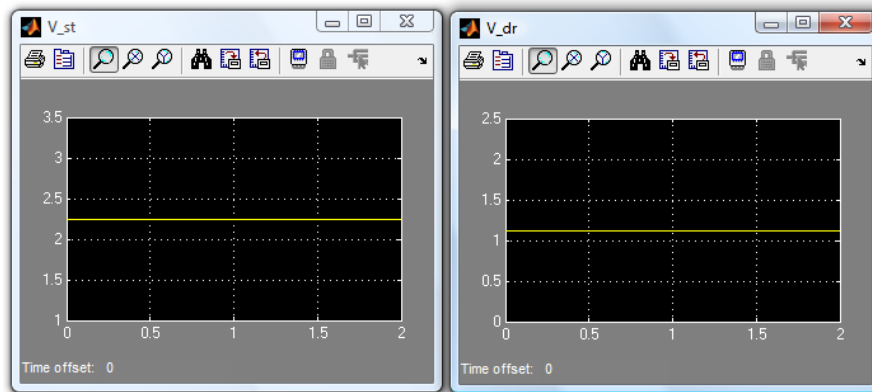


Figura 5.20. Vitezele periferice ale celor două roți motrice

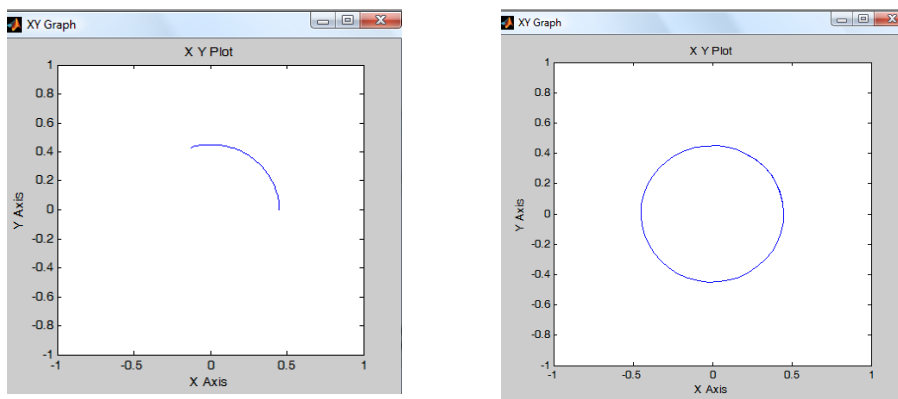


Figura 5.21. Traiectoriile circulare descrise de punctul caracteristic

A racorda două figuri geometrice (două cercuri, un cerc și o dreaptă, s.a.) înseamnă a construi un cerc tangent acestora și a reține porțiunea din cerc cuprinsă între cele două puncte de tangență (Figura 5.22):

- punctul O se numește centru de racordare. Acest punct se poate identifica cu centrul unui obstacol din scena de lucru. Diametrul D al acestui obstacol este posibil a fi estimat prin intermediul elementelor senzoriale;
- raza R se numește rază de racordare. Acest parametru ar necesita luarea în considerare a dimensiunii obstacolului și a unui spațiu de siguranță pentru deplasarea robotului:

$$R = \frac{D}{2} + \delta \quad (5.25)$$

- A și B se numesc punctele de tangență;
- arcul de cerc cuprins între punctele A și B poartă denumirea de arc de racordare. Cercul (C_1) cu centrul în punctul O_1 și de rază R_1 și un al doilea cerc (C_2) cu centrul în punctul O_2 și de rază R_2 se identifică de asemenea cu obstacole care pot fi tratate geometric în mod asemănător cu cele specificate anterior

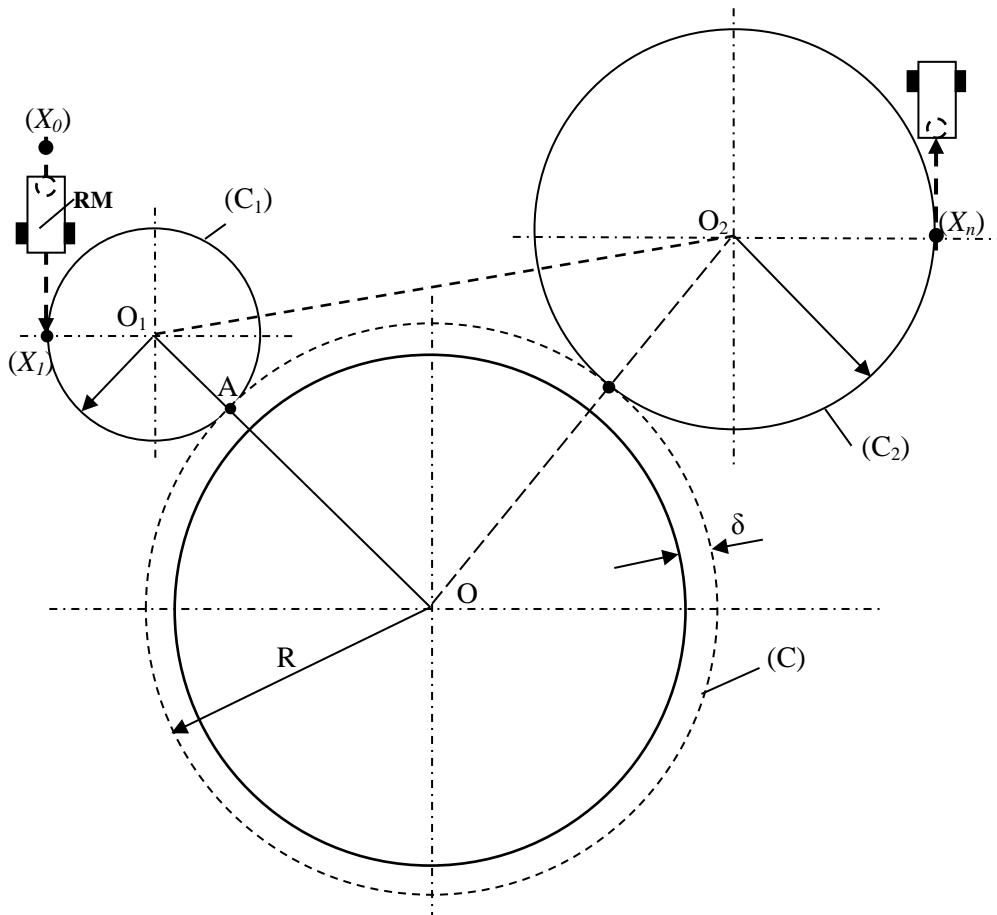


Figura 5.22. Racordarea unui cerc (C) cu cercurile (C_1) și (C_2)

Se consideră dispunerea figurilor geometrice din figura 5.22 în forma simplificată adecvată calculului. Se consideră sistemul de coordonate global $O_0x_0y_0$ în care sunt definite obstacolele cilindrice cu centrele în $O_1(0, y_{O_1})$ și $O_2(x_{O_2}, 0)$.

Pentru rezolvarea problemei de racordare se impune determinarea centrului de racordare O.

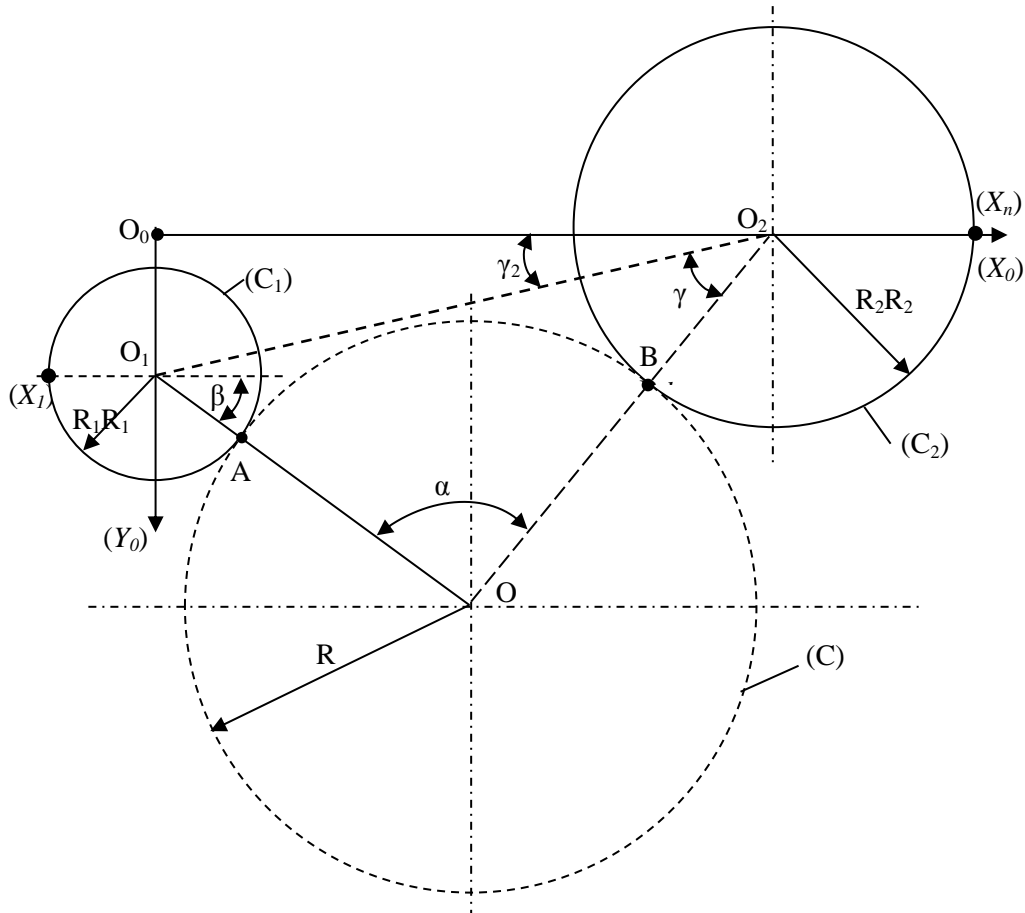


Figura 5.23. Puncte de tangență, arcul de racordare

În conformitate cu Figura 5.23 se pot determina:

- din $\triangle O_0O_1O_2$

$$\overline{O_1O_2}^2 = x_{O_2}^2 + y_{O_1}^2 \quad (5.26)$$

- din $\triangle O_1OO_2$ prin aplicarea teoremei cosinului obținem:

$$\overline{O_1O_2}^2 = \overline{O_1O}^2 + \overline{OO_2}^2 - 2\overline{O_1O} \cdot \overline{OO_2} \cos \angle O_1OO_2 \quad (5.27)$$

Având în vedere faptul că

$$\overline{O_1O} = R_1 + R \quad (5.28)$$

$$\overline{O_2O} = R_2 + R \quad (5.29)$$

Pe baza relațiilor (5.26...5.29) se determină:

$$\cos \alpha = \frac{(R + R_1)^2 + (R + R_2)^2 - x_{O_2}^2 - y_{O_1}^2}{2(R + R_1)(R + R_2)} \quad (5.30)$$

În $\Delta O_1 O O_2$ se pot scrie și relațiile:

$$\overline{OO_2}^2 = \overline{O_1O}^2 + \overline{O_1O_2}^2 - 2\overline{O_1O} \cdot \overline{O_1O_2} \cos \beta \quad (5.31)$$

$$\overline{OO_1}^2 = \overline{OO_2}^2 + \overline{O_1O_2}^2 - 2\overline{OO_2} \cdot \overline{O_1O_2} \cos \delta \quad (5.32)$$

Prin prelucrarea relațiilor (5.30), (5.31) (5.32), se vor obține relațiile

$$\cos \beta = \frac{(R_1 + R)^2 + x_{O_2}^2 + y_{O_1}^2 - (R_2 + R)^2}{2(R_1 + R)\sqrt{x_{O_2}^2 + y_{O_1}^2}} \quad (5.33)$$

$$\cos \delta = \frac{(R + R_2)^2 + x_{O_2}^2 + y_{O_1}^2 - (R + R_1)^2}{2(R + R_2)\sqrt{x_{O_2}^2 + y_{O_1}^2}} \quad (5.34)$$

Din relațiile (5.30), (5.31) și (5.32) se pot determina valorile unghiurilor α, β, δ .

Definim dreapta (Δ_1) (prin punctul O_1 și coeficient unghiular m_1) și dreapta (Δ_2) (prin punctul O_2 și coeficient unghiular m_2)

$$\Delta_1 : y - y_{O_1} = m_1 x \quad (5.35)$$

$$\Delta_2 : y = m_2(x - x_{O_2}) \quad (5.36)$$

unde m_1 și m_2 coeficienții unghiulari ai celor două drepte sunt:

$$m_2 = \operatorname{tg}(\gamma_2 + \delta) \quad (5.37)$$

unde

$$\delta_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{O_0 O_1}{O_0 O_2}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{O_1}}{x_{O_2}}\right) \quad (5.38)$$

$$m_1 = \operatorname{tg}(\beta - \gamma_2) \quad (5.39)$$

Coordonatele centrului de racordare O se determină din intersecția dreptelor Δ_1 și Δ_2

$$O = \Delta_1 \cap \Delta_2 \quad (5.40)$$

sau:

$$\begin{cases} y_O - y_{O_1} = m_1 x_O \\ y_O = m_2(x_O - x_{O_2}) \end{cases} \quad (5.41)$$

de unde se determină coordonatele:

$$\begin{cases} x_O = \frac{y_{O_1} + m_2 x_{O_2}}{m_2 - m_1} \\ y_O = \frac{m_2(y_{O_1} + m_1 x_{O_2})}{m_2 - m_1} \end{cases} \quad (5.42)$$

Pe baza parametrilor geometrici calculați anterior, se pot determina coordonatele punctelor de tangență:

$$\begin{cases} x_B = R_2 \cos(\gamma + \gamma_2) \\ y_B = R_2 \sin(\gamma + \gamma_2) \end{cases} \quad (5.43)$$

$$\begin{cases} x_A = R_2 \cos(\beta - \gamma_2) \\ y_A = R_1 \sin(\beta - \gamma_2) + y_{O_1} \end{cases} \quad (5.44)$$

Componentele arcului de mișcare a robotului mobil $\widehat{X_1 X_n}$ se determină astfel:

- lungimea arcului $\widehat{x_1 A}$:

$$L_{x_1 A} = R_1 [\pi - (\beta - \gamma_2)] = R_1 (\pi + \gamma_2 - \beta) \quad (5.45)$$

- lungimea arcului \widehat{AB} :

$$L_{AB} = R\alpha \quad (5.46)$$

- lungimea arcului $\widehat{B X_n}$:

$$L_{B X_n} = R_2 (\pi - \delta - \delta_2) \quad (5.47)$$

Pe baza relațiilor anterioare se poate calcula lungimea segmentului din traiectoria rezultată prin racordare:

$$L_{traectorie} = L_{x_1 A} + L_{B X_n} + L_{AB} \quad (5.48)$$

Poziția centrului instantaneu de rotație a fost definită prin relația:

$$\rho = \frac{v_{A1} + v_{A2}}{v_{A1} - v_{A2}} \cdot b = K \cdot b \quad (5.49)$$

unde: coeficientul adimensional K este determinat de parametrii cinematici ai roților motoare; b – este un parametru constructiv al robotului.

Coeficientul K include influența modificărilor de viteză asupra motoarelor de acționare. Expresia acestui coeficient se poate da sub forma:

$$K_1(x) = \frac{v_{A1} + v_{A2}}{v_{A1} - v_{A2}} = \frac{1 + \frac{v_{A2}}{v_{A1}}}{1 - \frac{v_{A2}}{v_{A1}}} = \frac{1 + x}{1 - x} \quad (5.50)$$

unde $x = \frac{v_{A2}}{v_{A1}}$ este raportul vitezelor liniare pentru roțile motrice.

Efectele variației de viteză la racordarea tronsoanelor traiectoriei se regăsesc și în forța centrigugă ce acționează asupra robotului mobil.

Având în vedere expresia forței centrifuge:

$$F_C = \frac{m v_p^2}{\rho} = m \cdot \left(\frac{v_{A1} + v_{A2}}{2} \right)^2 \cdot \frac{v_{A1} - v_{A2}}{v_{A1} + v_{A2}} \cdot \frac{1}{b} = \frac{v_{A1}^2}{4b} \cdot (1 - x^2) \quad (5.51)$$

unde x are semnificația prezentată anterior. Din relația anterioară se poate defini un al doilea coeficient adimensional care influențiază parcursul dinamic al robotului mobil pe o traiectorie dată:

$$K_2(x) = 1 - x^2 \quad (5.52)$$

Reprezentarea grafică a celor două funcții prezentate anterior este vizibilă în Figura 5.24. Rezultatul permite alegerea zonei de lucru astfel încât influențele negative, precizate anterior, să fie reduse.

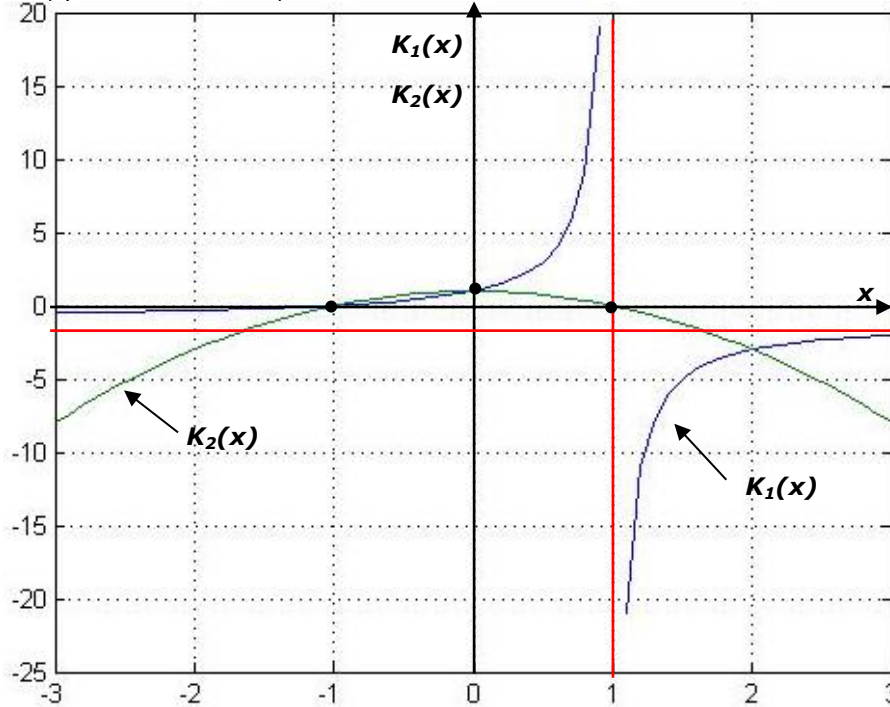


Figura 5.24. Modul de variație a factorilor K_1 și K_2

5.2.6. Racordarea a două tronsoane liniare

Fie dreptele (Δ_1) și (Δ_2) care descriu tronsoanele care trebuie racordate din traiectoria unui robot mobil:

$$\begin{cases} (\Delta_1) & y = m_1x + n_1 \\ (\Delta_2) & y = m_2x + n_2 \end{cases} \quad (5.53)$$

unde notațiile au semnificațiile clasice. Considerăm racordarea celor două drepte printr-o curbă (Γ) descrisă printr-o funcție polinomială de gradul al II-lea.

$$(\Gamma) \quad y = ax^2 + bx + c \quad (5.54)$$

Exprimarea matematică a curbei de racordare presupune determinarea constantelor a , b , c . Fie punctul A, punctul de inițiere a racordării tronsoanelor (Δ_1) - (Γ) și punctul B cel de inițiere a racordării (Γ) - (Δ_2) . Reducerea efectelor dinamice asupra robotului mobil impun ca în punctele A și B să existe o tangentă comună a tronsoanelor. Din considerentele anterioare se pot scrie ecuațiile:

$$y_A = ax_A^2 + bx_A + c \quad (5.55)$$

$$m_1 = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_A} = 2ax_A + b \quad (5.56)$$

$$m_2 = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_B} = 2ax_B + b \quad (5.57)$$

sau sub forma matriceală:

$$\begin{bmatrix} y_A \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A^2 & x_A & 1 \\ 2x_A & 1 & 0 \\ 2x_B & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

sau:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A^2 & x_A & 1 \\ 2x_A & 1 & 0 \\ 2x_B & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y_A \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = [A]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y_A \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

Se obțin după transformări:

$$a = \frac{m_1 - m_2}{2(x_A - x_B)} \quad (5.60)$$

$$b = \frac{x_A m_2 - x_B m_1}{x_A - x_B} \quad (5.61)$$

$$c = y_A - \frac{m_1 - m_2}{2(x_A - x_B)} \cdot x_A^2 - \frac{x_A m_2 - x_B m_1}{x_A - x_B} \cdot x_A \quad (5.62)$$

Pentru fiecare pereche de puncte (A, B) care descriu punctele de racordare se poate obține o altă curbă (Γ).

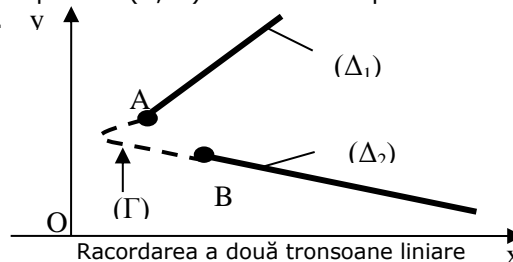


Figura 5.25.

Racordarea a două tronsoane liniare

5.3. Roboți mobili în etapa de teste de laborator

5.3.1. Introducere

Robotul mobil, indiferent de forma constructivă, constituie o variantă artificială a unui sistem biologic.

Sistemul biologic a reușit realizarea unui echilibru între nivelul funcțional și cel organic. În Figura 5.26 este prezentată schița simplificată a unui sistem biologic

– dotat cu subsistem locomotor, un subsistem de coordonare, sistem senzorial tactil și optic – care se deplasează cu ușurință într-un mediu nestructurat.

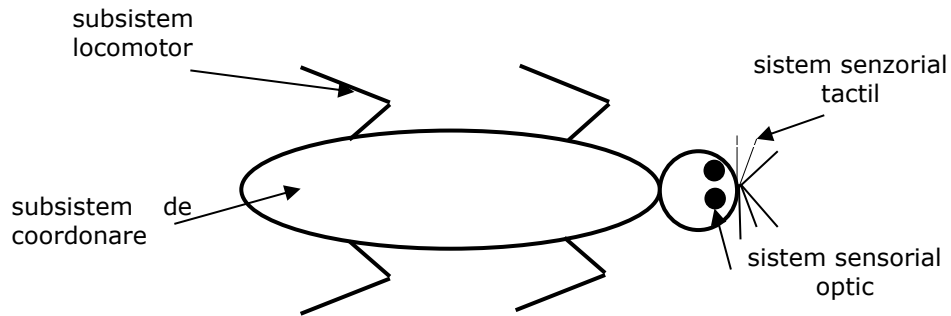


Figura 5.26. Sistem biologic

Pentru un robot mobil navigarea într-un mediu nestructurat necesită o analiză atentă de laborator care să scoată în evidență capabilitatea sa ca sistem și modul de a reacționa la factorii perturbatori [Mondoc, 2010].

5.3.2. Robot mobil utilizat pentru studiu

În cadrul Departamentului de Mecatronică - Laboratorul de Senzori și Actuatore - din Universitatea Politehnică din Timișoara a fost dezvoltat un robot mobil destinat pentru aplicații practice în medii nestructurate [Bîtea, 2012]. S-a apelat pentru studiul teoretic și practic la acest robot prezentat în Figura 5.27.

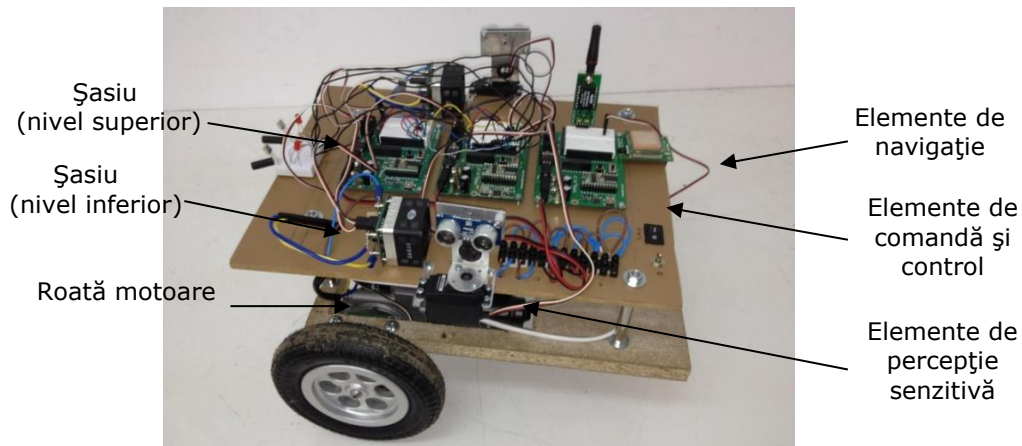


Figura 5.27. Robotul mobil utilizat pentru teste de laborator

Pentru problema analizată s-a considerat sistemul autonom mobil bazat pe o structură cu 2 roți diferențiale și o roată castor. Cele două roți motrice sunt comandate independent, au o axă comună, orizontală și fixă în raportul cu șasiul sistemului. Se poate considera astfel că sistemul este alcătuit dintr-un solid (S) conform cu notațiile și figura 5.28.

Comportamentul dinamic al robotului mobil este descris pe baza ecuațiilor dinamice ale sistemului (considerat ca și rigid mobil) și ecuațiile subsistemelor de acționare ale celor două roți motrice [Bîtea, 2012], [Mondoc, 2012] [Mondoc, 2013].

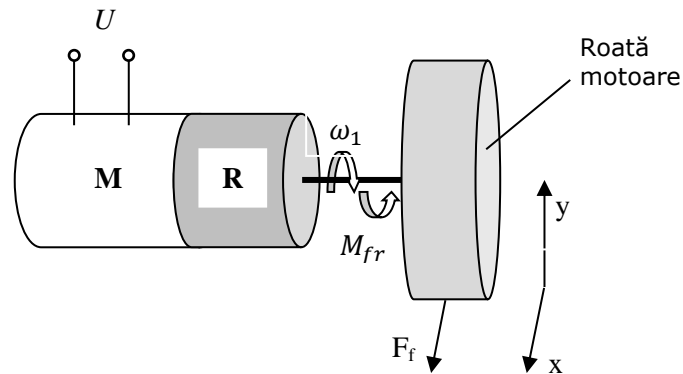


Figura 5.28. Sistemul de acționare a roții motrice

În scopul simulării comportamentului sistemului de acționare al unei roți motrice am optat pentru modelul matematic al subsistemului actuator – roată motrice – sol. Funcția de transfer a sistemului analizat are expresia [Mondoc, 2012]:

$$\Omega(s) = \frac{19 \cdot 10^3}{0,848 \cdot s^2 + 17,188 \cdot s + 361} \cdot U(s) + \frac{0,154 \cdot s + 25,4}{0,1 \cdot s^2 + 0,0172 \cdot s + 0,361} M_r(s) \quad (5.63)$$

Utilizând mediul Matlab/Simulink am putut realiza simularea funcționării sistemului. În ipoteza unui efect perturbator nul, schema bloc de lucru este prezentată în figura 5.29 iar rezultatul simulării pentru o mărime de intrare de tip treaptă ($U = 12 \text{ V}$) este prezentat în figura 5.30. Se remarcă o stabilizare rapidă a mărimii de ieșire a sistemului care este viteza unghiulară a roții.

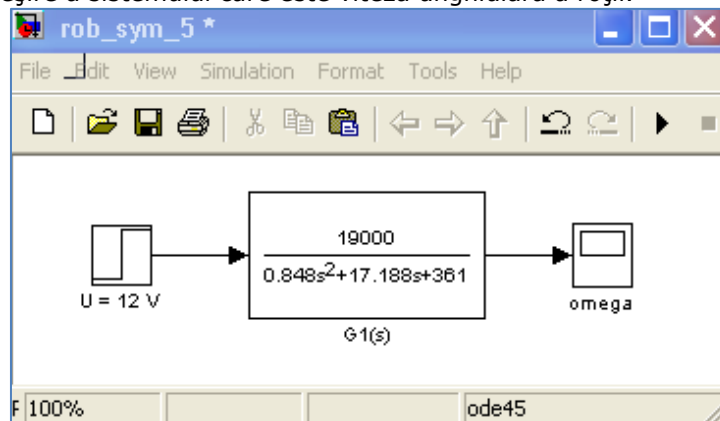


Figura 5.29. Schema bloc pentru simulare

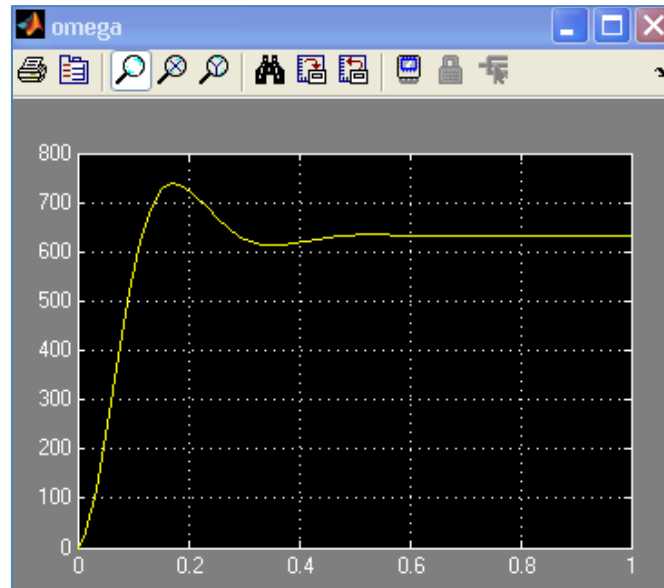


Figura 5.30. Răspunsul sistemului la semnal treaptă

Existența unui moment rezistent perturbator la nivelul roții motoare implică modificări substanțiale ale comportamentului subsistemului analizat. În Figura 5.31 este prezentată schema bloc de lucru iar în Figurile 5.32 și 5.34, rezultatele sistemului pentru două cazuri: un moment perturbator de tip treaptă unitară ($M_r = 1$ Nm) și respectiv un moment sinusoidal (amplitudinea $M_r = 1$ Nm și frecvența $f = 1$ Hz).

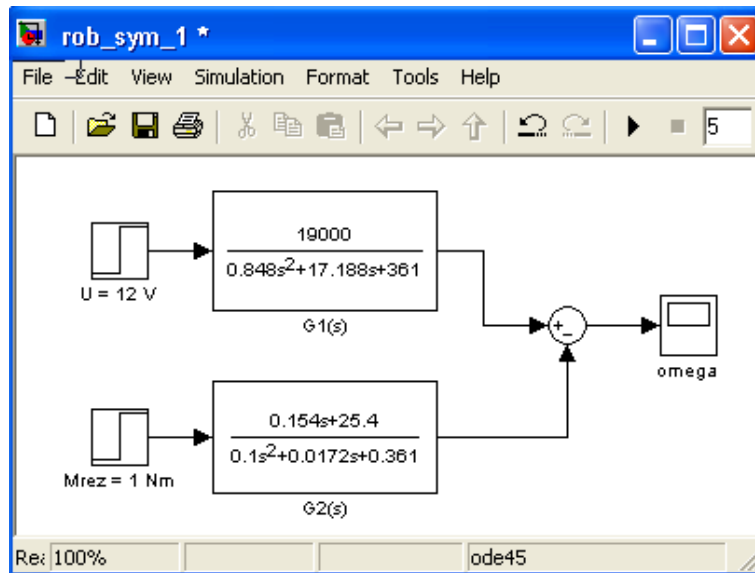


Figura 5.31. Schema bloc de simulare

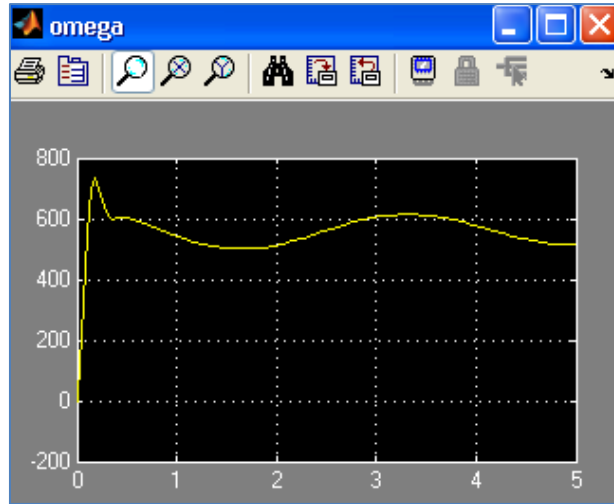


Figura 5.32. Răspunsul sistemului la semnal treaptă

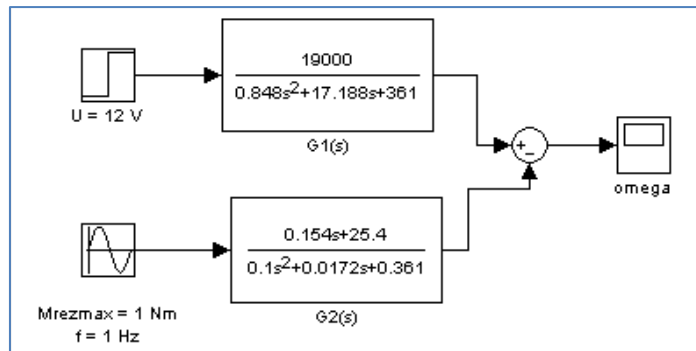


Figura 5.33. Schema bloc de simulare

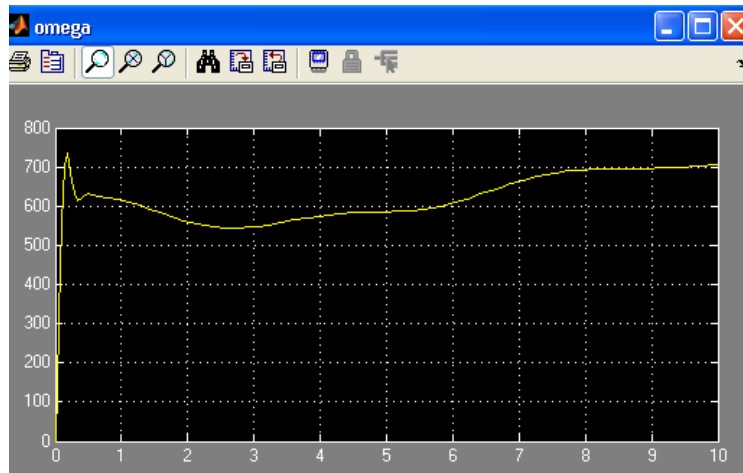


Figura 5.34. Răspunsul sistemului la semnal perturbator

5.3.3. Navigarea robotului mobil în raport cu un obstacol plan

În cadrul experimentelor efectuate a fost utilizat robotul mobil prezentat anterior. În structura acestuia au fost integrați doi senzori ultrasonici (Figura 5.35).

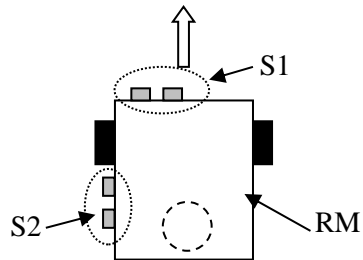


Figura 5.35. Robotul mobil echipat cu cei doi senzori

Senzorul S1 oferă informație despre prezența unui obstacol pe direcția de deplasare a robotului mobil. Informația prelucrată de sistemul de comandă conduce la oprirea robotului la o distanță prescrisă de eventualul obstacol.

Senzorul S2 oferă informația despre distanța dintre senzor și un obstacol plan. Programul implementat în componenta de conducere a robotului mobil urmărește păstrarea unei distanțe constante (prescrisă) față de obstacol. Robotul a fost programat astfel încât să se deplaseze de-a lungul unui perete la o distanță de 500 mm față de acesta. Lungimea traseului a fost de 2100 mm.

Pe șasiul inferior al robotului a fost fixat un element de inscripționare a traiectoriei realizate de robot pe un suport din hârtie. În Figurile 5.36 și 5.37 sunt prezentate detalii cu robotul mobil și suportul de inscripționare a traiectoriei.

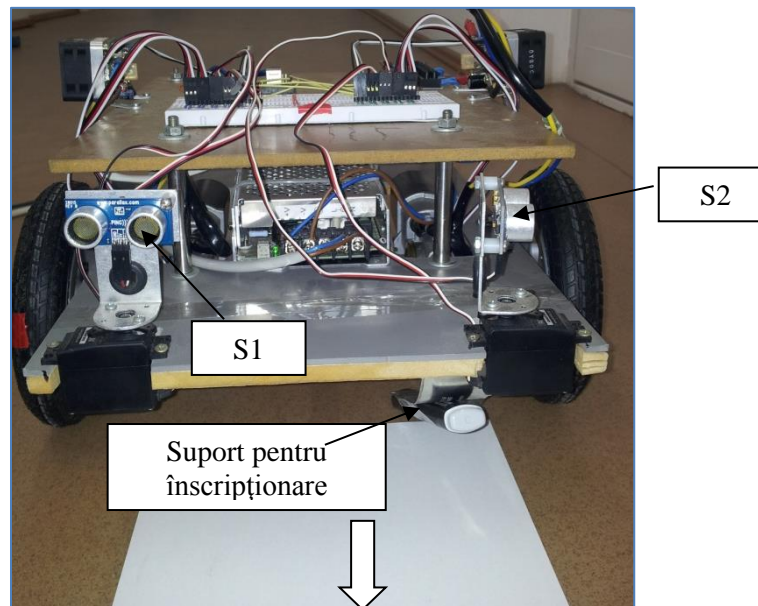


Figura 5.36. Detaliu al robotului

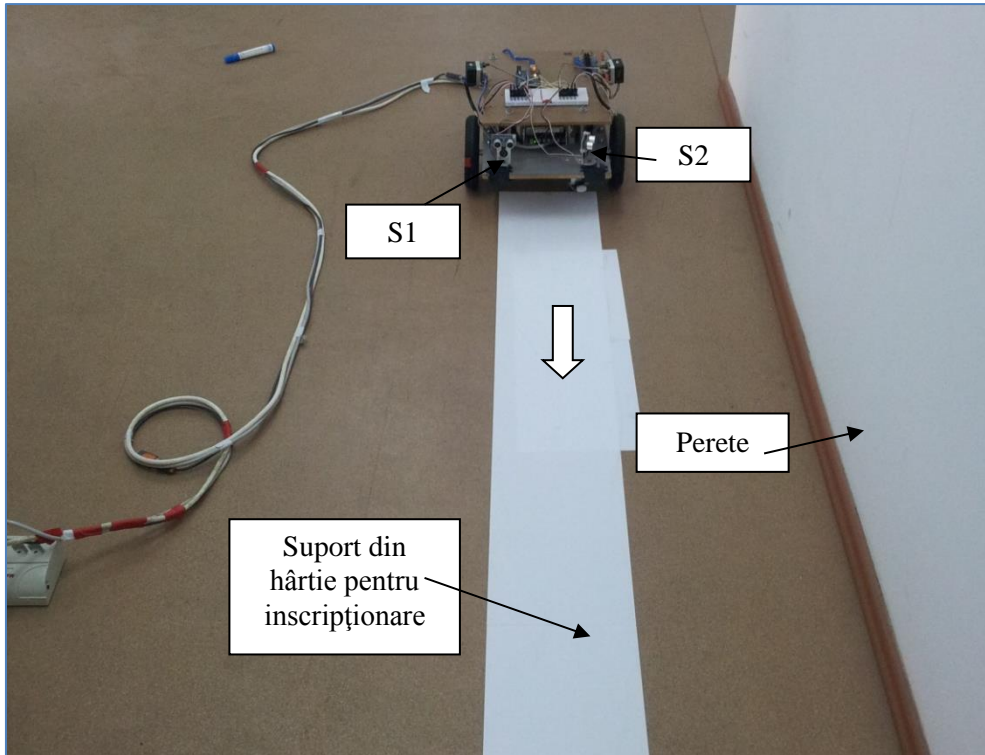


Figura 5.37. Robotul mobil și traseul de lucru

Traseul înscripționat a fost divizat în tronșoane de 200 mm astfel încât înregistrarea și prelucrarea datelor să fie simplă. În Figura 5.38 este prezentat un fragment (Delta Y1 – Delta Y2) din traiectoria parcursă de robotul mobil corespunzătoare unui tronșon (Delta Y1 – Delta Y3).

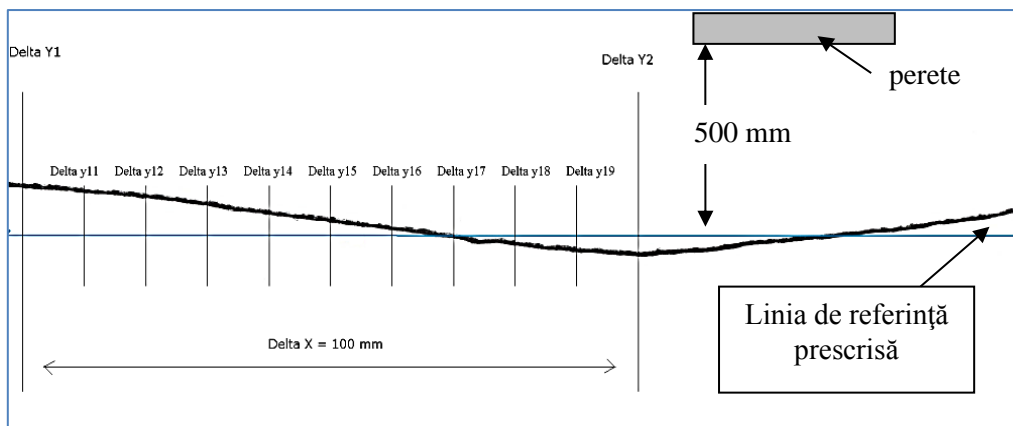


Figura 5.38. Fragment din traiectoria robotului mobil

Din datele înscrispionate și apoi prelucrate se prezintă în Tabel 5.1 și 5.2 valorile abaterilor față de linia de referință impusă prin program.

Tabel 5.1 Valorile abaterilor față de linia de referință

ΔY	$\Delta Y1$	$\Delta Y2$	$\Delta Y3$	$\Delta Y4$	$\Delta Y5$	$\Delta Y6$	$\Delta Y7$	$\Delta Y8$	$\Delta Y9$	$\Delta Y10$	$\Delta Y11$
Δ (mm)	7.68	-2.78	5.15	7.34	9.96	17.23	3.97	-3.38	12.33	14.27	0.93

Tabel 5.2 Valorile abaterilor față de linia de referință

ΔY	$\Delta Y12$	$\Delta Y13$	$\Delta Y14$	$\Delta Y15$	$\Delta Y16$	$\Delta Y17$	$\Delta Y18$	$\Delta Y19$	$\Delta Y20$	$\Delta Y21$
Δ (mm)	5.66	8.95	-6.42	-6.5	10.05	11.91	-1.18	-3.3	3.3	-2.36

Pe baza rezultatelor obținute se poate dezvolta modelul probabilistic al sistemului senzorial – sistem de acționare în vederea conducerii robotului mobil pe baza unui regulator fuzzy.

5.3.4. Aspecte aleatorii în evoluția unui robot mobil

În urma încercărilor experimentale efectuate pentru determinarea caracteristicii elementului senzorial acustic au rezultat o serie de concluzii care au condus la ideea unui nou set de încercări. În cadrul acestui set se va urmări comportamentul sistemului autonom mobil la o traiectorie dată în raport cu prezența unui obstacol în spațiul de evoluție al robotului.

În Figura 5.39 este prezentat robotul mobil utilizat pentru testele de laborator: în poziție de lucru (a) și în detaliu (b)

Robotul mobil este compus din următoarele subsisteme (Figura 5.39):

- Sistemul de locomoție alcătuit din: 2 roți motoare plasate în partea din spate a structurii, motorul de acționare cu transmisia intercalată și cuplată la cele 2 roți, mecanismul Ackerman pentru direcție, motorul de antrenare, 2 roți față conctate la mecanismul de direcție;
- Sistemul de comandă al robotului dezvoltat în jurul plăcii ARDUINO UNO și interfețele aferente;
- Sistemul de alimentare compus din 6 baterii de 1.5V tip AA;
- Sistemul senzorial parallax PING.

Robotul mobil a fost programat să se deplaseze în linie dreaptă spre un obstacol aflat la distanța D. Obstacolul are forma unui paralelipiped dreptunghic cu dimensiunile: L = 260 mm, B = 135 mm, h = 185 mm. În cadrul programului au fost incluse următoarele specificații:

- Semnalizarea optică (LED) a momentului de START și a perioadei de alimentare cu tensiune a motorului de antrenare;
- Determinarea distanței dintre robot și obstacol cu ajutorul elementului senzorial acustic;
- Compararea distanței determinate cu distanța limită admisă pentru înaintarea robotului.
- În momentul neîndeplinirii condiției specificate, programul de lucru sistează alimentarea cu tensiune a motorului ceea ce ar însemna stabilirea condițiilor de oprire a robotului. Momentul de timp este semnalizat prin stingerea LED-

lui integrat în structura sistemului.

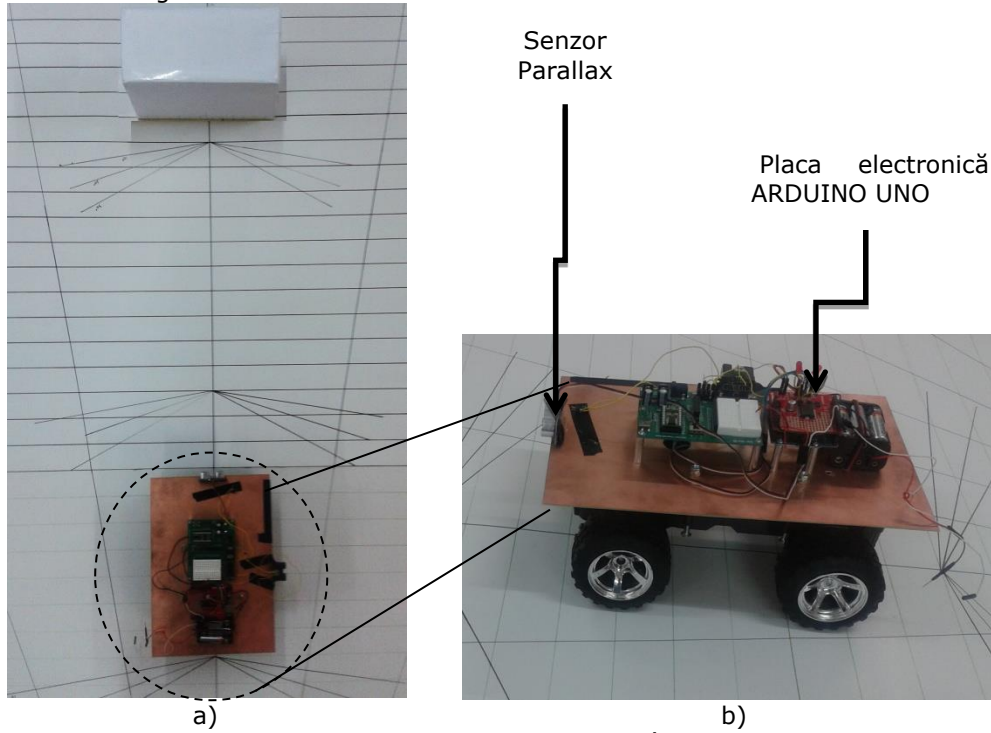


Figura 5.39. Robotul mobil în laborator

Schema de lucru și parametrii geometrici analizați sunt prezentați în Figura 5.40.

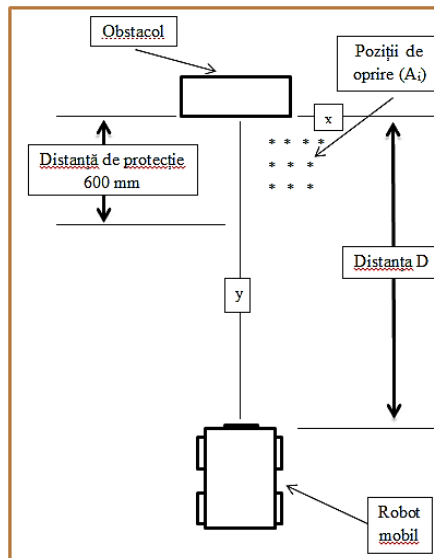


Figura 5.40. Schema de lucru și parametri geometrici

În urma experimentelor se pot consemna următoarele:

- Pe parcursul încercărilor a fost sesizat răspunsul prompt al robotului în

momentul în care acesta a depășit valoarea distanței minime de protecție prescrisă prin program;

- A fost sesizată o inerție accentuată a robotului, ceea ce a determinat parcurgerea unei distanțe suplimentare după momentul întreruperii alimentării motorului de antrenare;

- Este necesară o corelare a vitezei de deplasare cu condițiile de limitare reale. Rezultatele testelor sunt prezentate în Tabel 5.3 iar traiectoria realizată de robotul mobil este prezentată în Figura 5.41. Coordonatele (x,y) sunt asociate punctelor A_i din Figura 5.41.

Tabel 5.3 Rezultate și valorile prelucrate

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
x [mm]	7	35	24	22	27	10	25	16	0	9	17.5
y [mm]	148	175	197	208	215	221	270	280	215	221	215

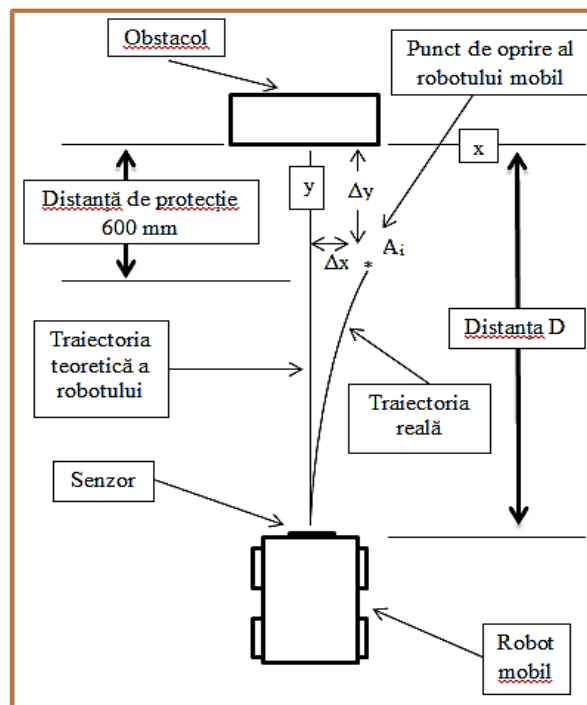


Figura 5.41. Schema de lucru și traiectoria reală

În cadrul experimentului a fost urmărit și comportamentul robotului în raport cu obstacole de înălțimi diferite. Au fost utilizate obstacole paralelipipedice (Figura 5.42) și cilindrice (Figura 5.43 și Figura 5.44).

S-a observat faptul că, dacă obiectul are o înălțime mai mică de 16 mm, acesta nu mai este detectat de către sistemul senzorial.

În cazul obstacolelor de dimensiunii reduse, Figura 5.43, (ex. cilindrul de înălțime $h = 20$ mm și diametru $D = 73$ mm), sistemul senzorial a sesizat obstacolul, sistemul de comandă a semnalizat această stare și a comandat prompt

132 Robotul mobil în scena de lucru - 5

oprirea motorului. Datorită inerției, robotul s-a deplasat în sensul de mișcare, astfel încât obstacolul a ajuns într-un punct mort pentru elementul senzorial. Acest lucru a determinat realimentarea cu tensiune a motorului și deplasarea în continuare a robotului. Se impune ca problema inerției să fie rezolvată pe cale hardware. Obstacolul cilindric a fost sesizat și la poziționarea decalată față de direcția de mișcare, Figura 5.44.

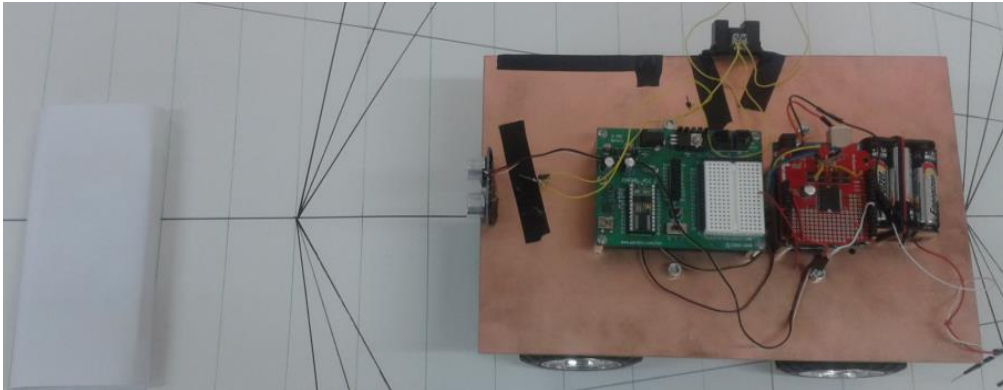


Figura 5.42.Obstacol de formă paralelipedică situat pe axa de mișcare a robotului



Figura 5.43.Obstacol cilindric centrat pe axa de mișcare a robotului

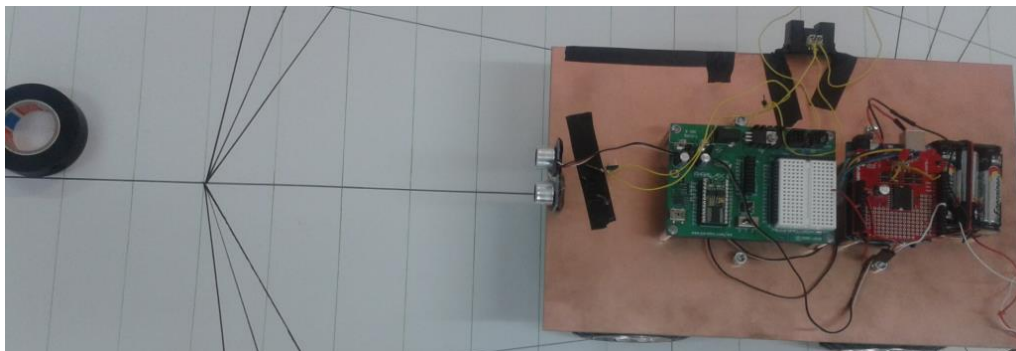


Figura 5.44.Obstacol cilindric poziționat tangential pe axa de mișcare a robotului

Un nou set de încercări a vizat corelarea răspunsului de la sistemului de comandă al robotului mobil pentru poziții diferite ale unui obstacol paralelipedic (L

= 260 mm, $l = 135$ mm, $h = 185$) în raport cu sistemul senzorial Parallax PING integrat în structura robotului. Considerațiile anterioare privind componenta robotului și programul de lucru sunt cele specificate în experimentul anterior cu observația că robotul rămâne în stare imobilă. Schema de lucru este prezentată în Figura 5.45 și Figura 5.46. S-au realizat măsurători în care s-a urmărit detectarea unui obiect la diferite distanțe față de senzor, de o parte și de alta a axei principale (Figura 5.47 și Figura 5.48).

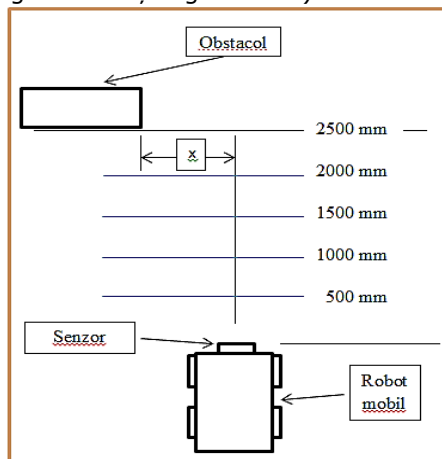


Figura 5.45.Schema de lucru

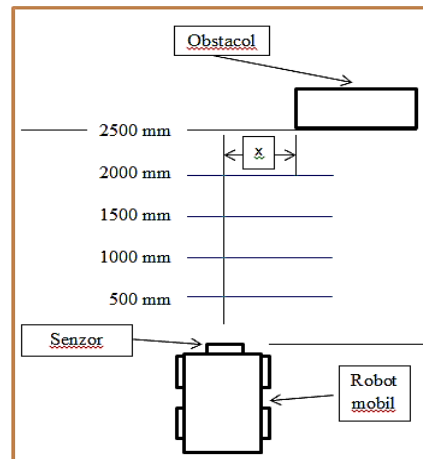


Figura 5.46.Schema de lucru

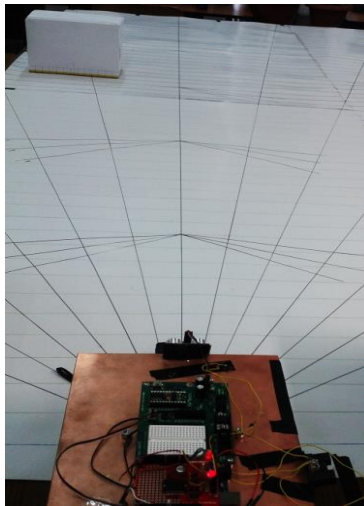


Figura 5.47.Obstacolul sesizat și semnalizat

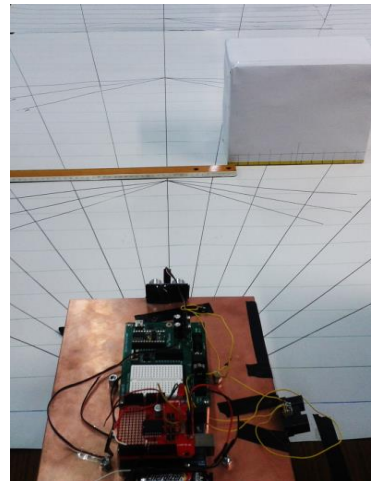


Figura 5.48.Obstacolul localizat

Experimentele realizate au confirmat pe de o parte corectitudinea experimentelor realizate separate pe senzorul ultrasonic iar pe de altă parte o corelare bună între sistemul de comandă, semnalizare și senzorul ultrasonic.

5.4. Concluzii

Considerentele teoretice și experimentale prezentate permit să se enunțe următoarele:

- evoluția robotului mobil în scena de lucru este dependentă de o serie de factori. Traectoria robotului mobil și modul de racordare a tronsoanelor influențează comportamentul dinamic;
- erorile sistemelor de acționare și incertitudinea cunoașterii parametrilor de contact cu solul influențează decisiv comportamentul robotului mobil;
- un model matematic complet trebuie să ia în considerare și aspectul aleatoriu al traiectoriei posibile de realizat.

6. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE

6.1. Introducere

Obiectivul operațional al capitolului se referă la studiul experimental al sistemelor senzoriale ultrasonice și respectiv în infraroșu pentru localizarea unor obstacole.

Cercetarea experimentală urmărește atât determinarea comportamentului elementelor senzoriale pentru localizarea obstacolelor cât și posibilitatea utilizării acestora pentru determinarea distanței până la obstacol.

6.2. Utilizarea elementului senzorial ultrasonic în localizarea obstacolelor

6.2.1. Introducere

Desfășurarea activității experimentale a avut loc în cadrul laboratorului de Senzori și Actuatore. S-a avut la dispoziție două elemente senzoriale diferite: senzorul Ping al firmei Parallax [***4] și senzorul XL-MAXSonar-EZ/Ae al firmei MaxBotix Inc. [***3].

6.2.2. Standul experimental și considerente teoretice referitoare la scopul urmărit

Partea procesului experimental vizând comportamentul sistemului senzorial ultrasonic a fost realizată în baza unei structuri prezentate în figura 6.1.a) și b). Senzorul ultrasonic Ping a fost integrat în structura unui robot mobil (RM). Poziționarea RM și a obstacolelor a fost realizată pe o planșă prevăzută cu un caroiaj adecvat scopului.



a)



b)

Figura 6.1 Aspecte privind standul experimental realizat și instrument de măsurare

Senzorul ultrasonic este conectat la placa de dezvoltare Arduino și PC-ul utilizat pe care este instalat software-ul de achiziție a informației. Obstacole de formă spațială paralelipipedică și cilindrică au fost poziționate pe suportul grafic de referință în raport cu sistemul senzorial.

Experimentul a fost desfășurat într-o incintă închisă fără curenți de aer perturbatori cea a Laboratorului de Senzori și Actuatore. Pe parcursul desfășurării experimentelor am urmărit temperatura mediului ambiant cu ajutorul unui termometru de sticlă cu uz didactic cu măsurare a temperaturii pe o scară de la 0°C - 150°C. Temperatura înregistrată pe parcursul unei încercări a fost de 20°C. În acest caz, se poate estima viteza undei sonore pe baza relațiilor:

$$c = 331,3 + 0,606t^{0C} \quad (6.1)$$

se estimează $c=343,42$ [m/s]

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{t + 273} \quad (6.2)$$

se estimează $c=344,05$ [m/s]

Se observă valoare apropiată de estimare pentru cele două relații de calcul considerate. Considerăm o valoare medie a valorilor anterioare pentru experimentul desfășurat $c=343,735$ [m/s]. Aproximarea rezultată din mediere corespunde pentru relație de calcul la o valoare:

$$\Delta c_1 = 0,315[m/s] \quad (6.3)$$

corespunzătoare unei variații a temperaturii de:

$$\Delta t = \frac{\Delta c_1}{0,61} = \frac{0,315}{0,606} = 0,52 [^{\circ}C] \quad (6.4)$$

În [***4] se consideră pentru senzorul PING utilizat următoarele valori de referință:

- lungimea de undă 8.56 mm la o temperatură a mediului de 20 °C;
- unghiul de deschidere a conului de directivitate;

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1,62}{ka}\right) = \arcsin\left(\frac{1,62\lambda}{2\pi ka}\right) = \arcsin\left(\frac{1,62\lambda}{2\pi a}\right) = \arcsin\left(\frac{0,258\lambda}{a}\right) = 7,93^{\circ} \quad (6.5)$$

Unghiul caracteristicii de directivitate pentru elementul senzorial inclus în experiment a fost determinat pe baza relației [Bencheloui, 2011]:

$$\theta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{1,61\lambda}{a}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{1,61 \cdot 8,65}{13}\right) = 47,91^{\circ} \quad (6.6)$$

unde:

- λ - este lungimea de undă a semnalului sonor:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{346,26855}{40 \cdot 10^3} = 8,65 \cdot 10^{-3} [m] \quad (6.7)$$

- a - diametrul elementului senzorial: 13 mm pentru modelul utilizat.

Utilizând relația (6.5) se obține:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{0,258\lambda}{a}\right) = 9,9^{\circ} \quad (6.8)$$

Pentru desfășurarea experimentului se consideră configurația geometrică din figura 6.2. Notăm: E - elementul senzorial emitor; R - elementul senzorial receptor; $D = 13 \text{ mm}$ - diametrul elementului senzorial; $D_1 = 25.4 \text{ mm}$ - distanța dintre axele celor două elemente senzoriale; Ob - obstacol în experiment; d - distanța parcursă de unda sonoră de la emitor la obstacol; d_0 - distanța de la punctul de emiterie a undei și obiect; d_L - distanța de la originea sistemului de axe la centrul obstacolului.

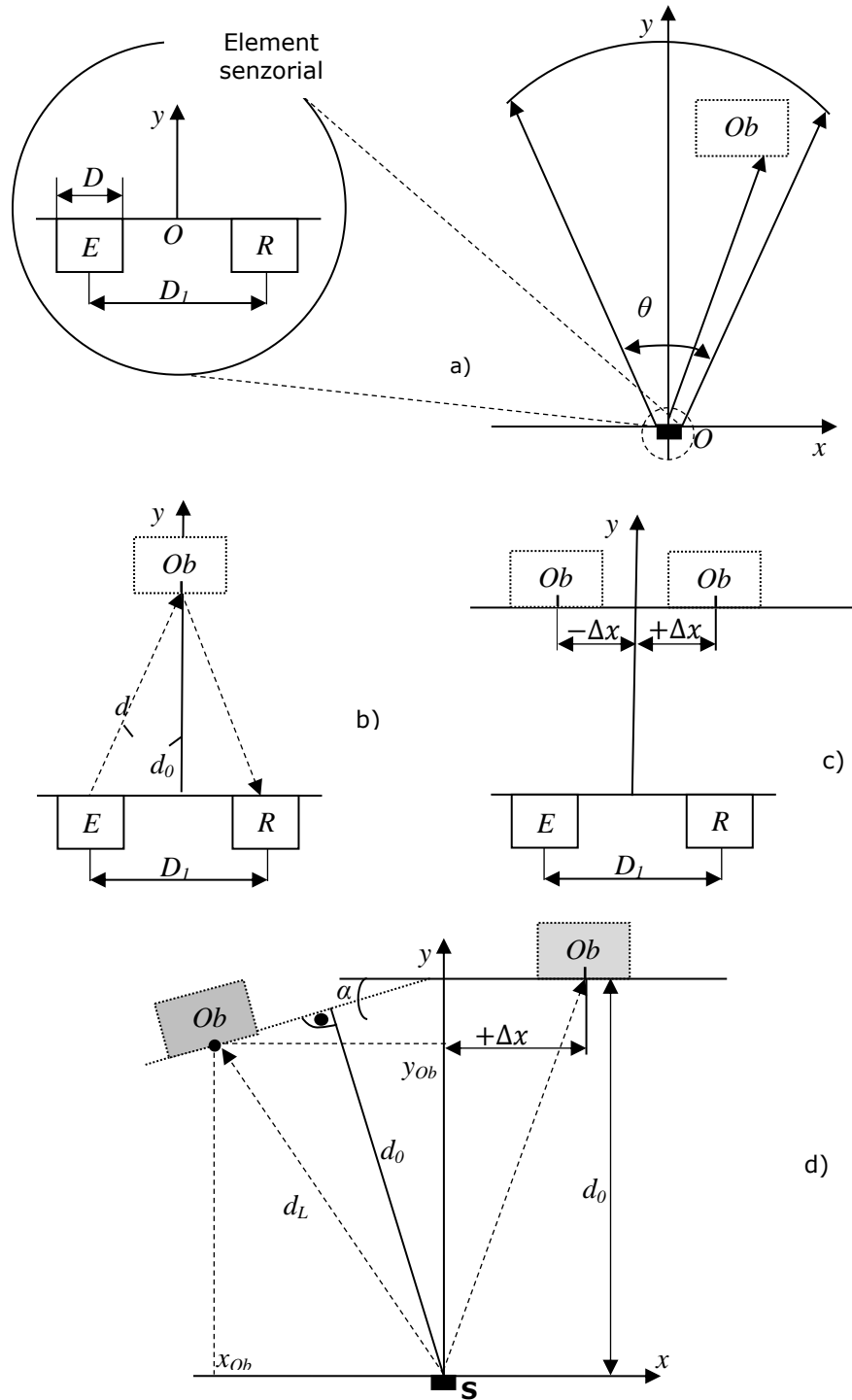


Figura 6.2 Configurația geometrică senzor - obstacol

138 Încercări experimentale - 6

Experimentul a fost efectuat în mai multe faze. Fiecare dintre acestea au urmărit determinarea distanței parcurse de unda sonoră până la contactul cu obstacolul, reflexia și apoi recepția ecoului de către elementul receptor R. În acest sens au fost utilizate:

- un obstacol de tip paralelipipedic (260 mm x 135 mm x 190 mm);
- obstacol de tip cilindric ($\phi = 155$ mm, $h = 335$ mm).

poziționate în spațiul analizat conform cu figurile 6.2 a, b, c, d.

Principiul de lucru al sistemului senzorial a fost prezentat în Figura 4.18 din capitolul 4. Elementul senzorial emitor emite un pachet scurt de impulsuri (durată 2...5 μ s). După terminarea emisiei este generat un semnal scurt care definește originea duratei de „zbor” a semnalului sonor. Se așteaptă recepționarea semnalului ecou (750 μ s). Terminarea semnalului ecou va echivala cu confirmarea existenței obstacolului iar timpul scurs până în acel moment va fi timpul t_0 de „zbor” al undei. Pe baza acestui timp se calculează distanța parcursă de unda sonoră:

$$d = \frac{c \cdot t_0}{2} \quad (6.9)$$

Un al doilea set de măsurători a fost realizat la o temperatură de 24 °C în laborator astfel că viteza undei sonore se poate admite ca fiind o medie a valorilor:

$$c = 331,3 + 0,606t^{0C} \quad (6.10)$$

se estimează $c = 345,844$ [m/s]

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{t + 273} \quad (6.11)$$

se estimează $c = 346,4$ [m/s]

Se determină astfel valoarea $c = 346,122$ [m/s]

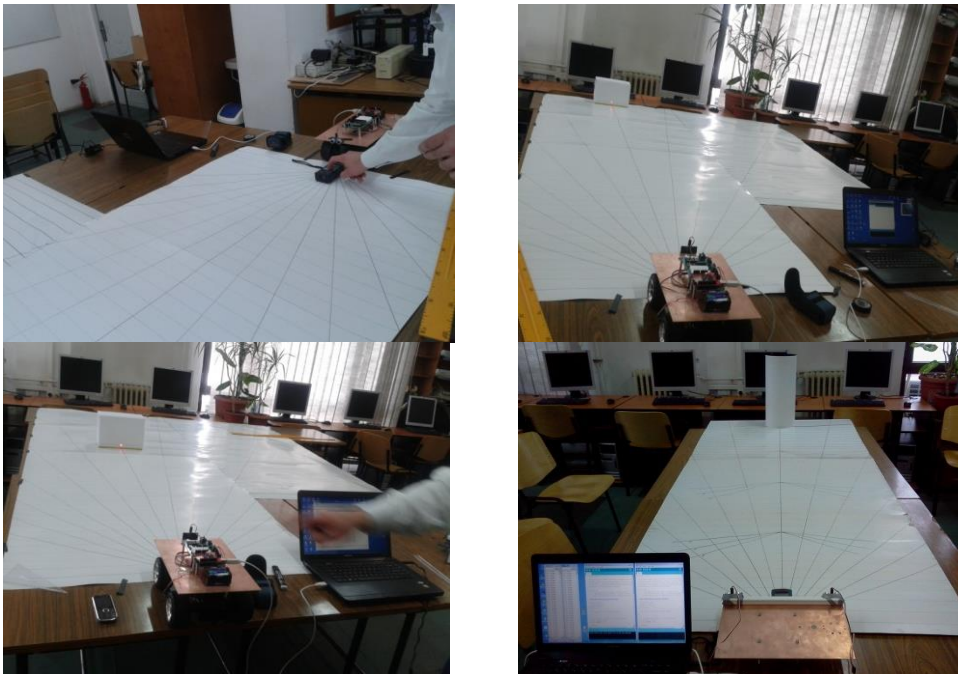


Figura 6.3 Aspecte din timpul măsurătorilor

6.2.3. Influența temperaturii asupra localizării unui obiect

Experimentul a urmărit achiziția informației de la sistemul senzorial, referitoare la prezența unui obstacol în zona cercetată, prelucrarea acesteia și interpretarea rezultatelor.

Un obstacol paralelipipedic cu dimensiunile 260mm x 135mm x 190mm a fost poziționat central pe axa Oy cu lungimea paralelă cu abscisa.

Utilizând telemetrul cu laser a fost măsurată distanța dintre suprafața sensibilă a sistemului senzorial și punct median al obstacolului. A fost obținută valoarea $d_L = 2595$ mm.

Rezultatele furnizate de sistemul senzorial sunt prezentate în Tabel 6.1 și respectiv Tabel 6.2.

În cadrul primului experiment viteza estimată prin calcul a fost 343.4 [m/s]. iar în cel de-al doilea experiment viteza a fost 345.5 [m/s].

Tabel 6.1 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2610	11	2610	21	2607	31	2610
2	2610	12	2610	22	2607	32	2608
3	2611	13	2612	23	2611	33	2607
4	2610	14	2610	24	2605	34	2607
5	2610	15	2607	25	2607	35	2610
6	2610	16	2608	26	2608	36	2610
7	2610	17	2610	27	2607	37	2610
8	2610	18	2607	28	2610	38	2610
9	2610	19	2607	29	2611	39	
10	2611	20	2608	30	2610	40	

Tabel 6.2 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2608	11	2608	21	2608	31	2608
2	2608	12	2608	22	2608	32	2608
3	2609	13	2609	23	2609	33	2609
4	2608	14	2608	24	2608	34	2608
5	2609	15	2609	25	2609	35	2609
6	2608	16	2608	26	2608	36	2608
7	2608	17	2608	27	2608	37	2608
8	2609	18	2609	28	2609	38	2609
9	2608	19	2608	29	2608	39	2608
10	2609	20	2609	30	2609	40	2609

Prelucrarea statistică a rezultatelor din Tabel 6.1 și Tabel 6.2 a condus la parametrii repartiției și respectiv ponderile și probabilitățile din Figura 6.4 / Tabel 6.4 și respectiv Figura 6.5 / Tabel 6.5.

Tabel 6.3 Valoarea medie și deviația standard

	Exp_1	Exp_2
Valoarea medie	$\bar{d} = 2609.1$ mm	$\bar{d} = 2608.4$ mm
Deviația standard	$\sigma = 1.6405$	$\sigma = 0.496$

140 Încercări experimentale - 6

Fie o variabilă aleatoare $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ specifică unui proces aleatoriu X de repartiție normală cu parametri: valoarea medie μ și dispersia σ^2 (cap.3) și funcția de densitate de probabilitate:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.12)$$

Pentru variabila aleatoare specifică primului experiment, $X \sim N(2609.1, 2.69124)$ funcția de densitate de probabilitate are expresia:

$$f_{2609}(x) = 0,243245 \cdot e^{-0,185788 \cdot (x-2609,1)^2} \quad (6.13)$$

Tabel 6.4 Ponderile și frecvența relativă

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
2605	1	0.026
2607	9	0.237
2608	4	0.105
2610	19	0.500
2611	4	0.105
2612	1	0.026

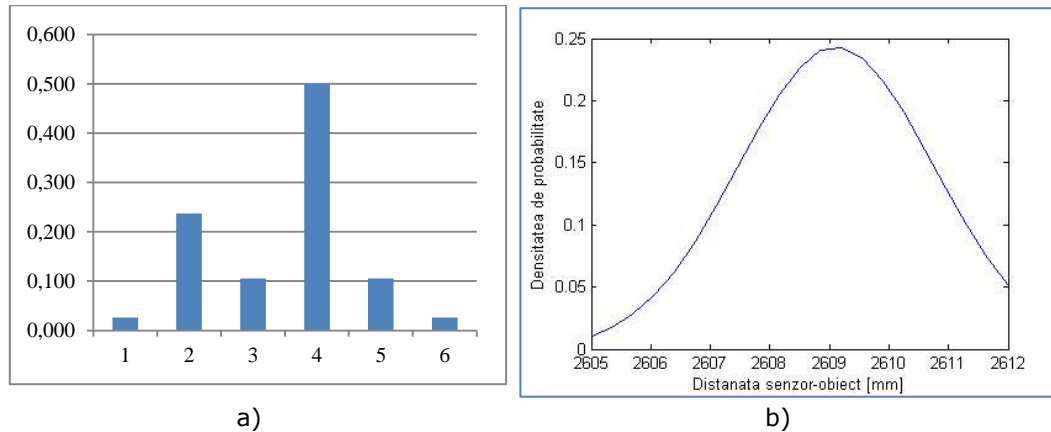


Figura 6.4 Ponderi și densitatea de probabilitate

Tabel 6.5 Ponderile și frecvența relativă

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
2608	24	0.6
2609	16	0.4

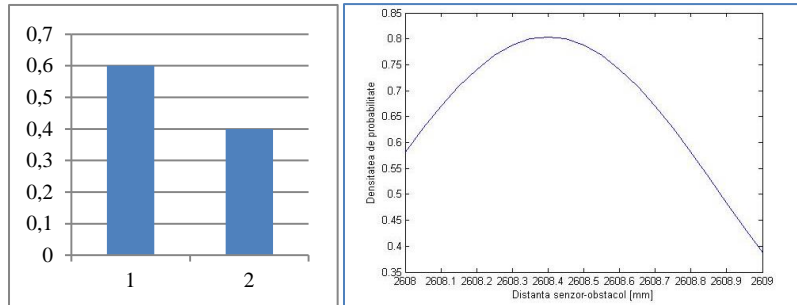
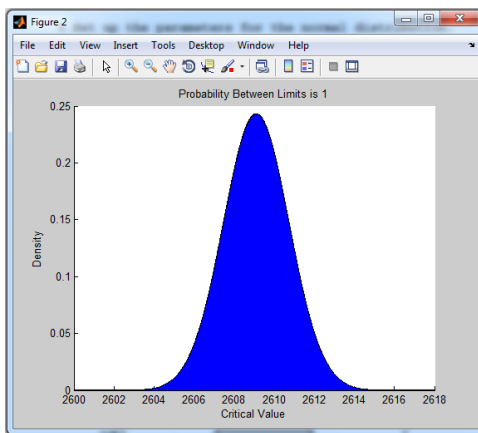
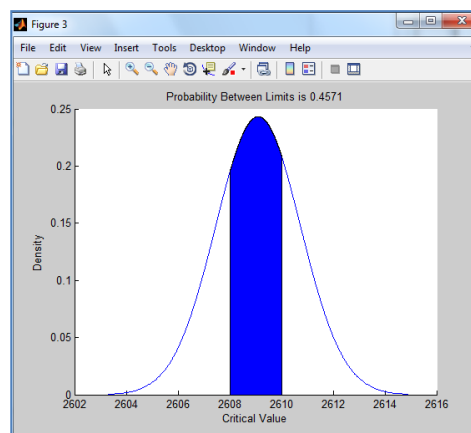


Figura 6.5 Ponderi și densitatea de probabilitate

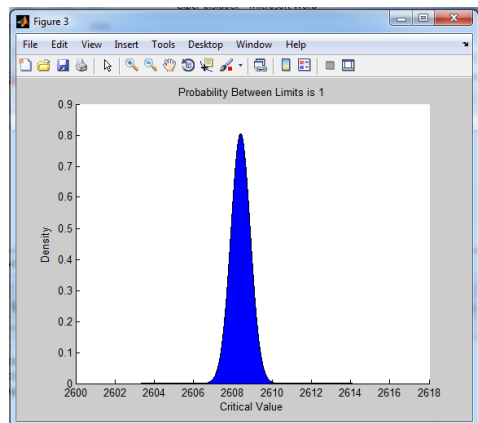


a)

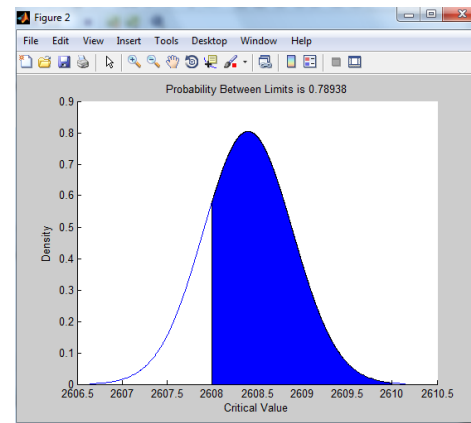


b)

Figura 6.6 Densitate de probabilitate .



a)



b)

Figura 6.7 Densitate de probabilitate

Experimentul desfășurat permite consemnarea următoarelor concluzii:

- în mediul închis – laborator - în care a fost desfășurat experimentul, determinarea distanței a fost influențată nesemnificativ de variația temperaturii mediului ambiant;

142 Încercări experimentale - 6

- există diferență între distanța de referință – telemetru laser - și cea determinată prin senzorul ultrasonic:

$$\varepsilon_d = \frac{d_L - \hat{d}}{d_L} = \frac{2609,1 - 2595}{2609,1} \cdot 100 = 0,54\% \quad (6.14)$$

- se impun experimente suplimentare care să identifice comportamentul senzorului ultrasonic;
- se impune ca integrarea sistemului senzorial să aibe în considerare parametrii calitativi impuși de scena de lucru a robotului mobil.

6.2.4. Comportamentul senzorului ultrasonic în localizarea unui obiect în scena de lucru

Următorul set de experimente a fost realizat prin poziționarea simetrică a obstacolului, conform cu Figura 6.2, față de axa longitudinală Oy.

Utilizând telemetrul cu laser a fost măsurată distanța în raport cu axa mediană a obstacolului obținându-se o valoare identică cu cea din experimentul anterior $d_L = 2596$ mm. În Tabel 6.6 sunt prezentate cantitativ valorile de poziționare axială (Ox) a obstacolului.

Tabel 6.6 Valori de poziționare axială a obstacolului

	$-\Delta x$ [mm]	$+\Delta x$ [mm]
$d_L = 2596$ mm	50	50
$d_L = 2598$ mm	130	130
$d_L = 2600$ mm	170	-
$d_L = 2603$ mm	220	-
$d_L = 2606$ mm	240	-
$d_L = 2607$ mm	260	-

Urmând aceeași procedură, ca în cazul anterior, am determinat parametrii statistici și am analizat categoriile repartițiilor probablistice. În cazul primelor două exemple, repartițiile s-au încadrat în categoria celor normale iar ponderile și densitatea de probabilitate reflectă acest lucru.

Valorile primului set de rezultate sunt prezentate în Tabel 6.7 (Exp_1 : + 50 mm) și respectiv în Tabel 6.8 (Exp_1 : - 50 mm).

Tabel 6.7 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2616	11	2612	21	2616	31	2617
2	2616	12	2616	22	2617	32	2617
3	2616	13	2616	23	2617	33	2616
4	2616	14	2616	24	2617	34	2617
5	2617	15	2616	25	2617	35	2612
6	2616	16	2616	26	2617	36	2616
7	2617	17	2616	27	2617	37	2616
8	2611	18	2617	28	2616	38	2617
9	2616	19	2616	29	2616	39	2620
10	2611	20	2612	30	2613	40	

Tabel 6.8 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

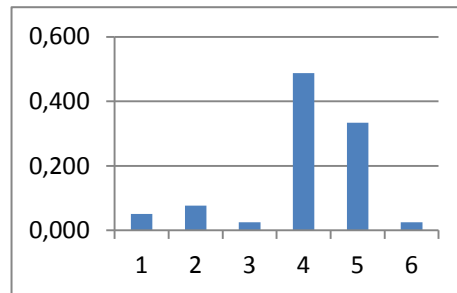
1	2598	11	2600	21	2598	31	2599
2	2598	12	2599	22	2599	32	2598
3	2600	13	2602	23	2598	33	2600
4	2599	14	2599	24	2599	34	2599
5	2599	15	2599	25	2598	35	2600
6	2599	16	2599	26	2598	36	2599
7	2599	17	2598	27	2599	37	2599
8	2599	18	2599	28	2599	38	2599
9	2599	19	2599	29	2599	39	2599
10	2598	20	2598	30	2600	40	

În Tabel 6.9 sunt prezentate valorile parametrilor statistici pentru valorile aferente tabelor 6.7 și 6.8

Tabel 6.9 Valoarea medie și deviația standard

	Exp_1	Exp_2
Valoarea medie	$\bar{d} = 2615.795 \text{ mm}$	$\bar{d} = 2598.949 \text{ mm}$
Deviația standard	$\sigma = 1.880362$	$\sigma = 0.793019$

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
2611	2	0.051
2612	3	0.077
2613	1	0.026
2616	19	0.487
2617	13	0.333
2620	1	0.025



a)

Figura 6.8 Valori ai parametrilor statistici

b)

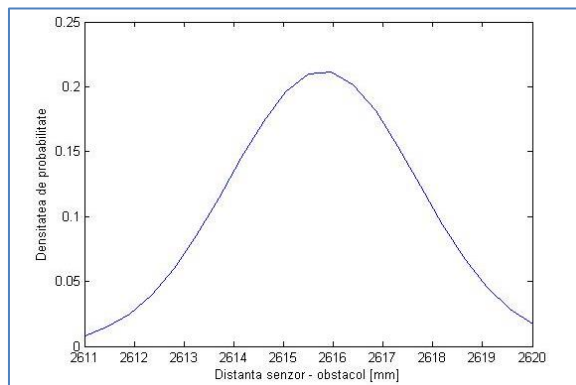


Figura 6.9 Densitatea de probabilitate

144 Încercări experimentale - 6

Rezultatele pentru restul experimentelor desfășurate sunt prezentate în Anexa 6.1. Din prelucrarea realizată se pot consemna comparativ valorile prezentate în tabelele 6.10 și 6.11 și respectiv Figura 6.10.

Tabel 6.10 Valoarea medie și deviația standard

	Δx [mm]	Valoarea medie	Deviația standard
$d_L = 2596$ mm	+ 50	$\bar{d} = 2615.795$ mm	$\sigma = 1.880362$
$d_L = 2598$ mm	+ 130	$\bar{d} = 2604.2564$ mm	$\sigma = 1.250641$

Tabel 6.11 Valoarea medie și deviația standard

	$-\Delta x$ [mm]	Valoarea medie	Deviația standard
$d_L = 2596$ mm	- 50	$\bar{d} = 2598.949$ mm	$\sigma = 0.793019$
$d_L = 2598$ mm	- 130	$\bar{d} = 2615.436$ mm	$\sigma = 1.353259$
$d_L = 2600$ mm	- 170	$\bar{d} = 2605.436$ mm	$\sigma = 0.680359$
$d_L = 2603$ mm	- 220	$\bar{d} = 2618.316$ mm	$\sigma = 1.016227$
$d_L = 2607$ mm	- 260	$\bar{d} = 2625.974$ mm	$\sigma = 3.34479$

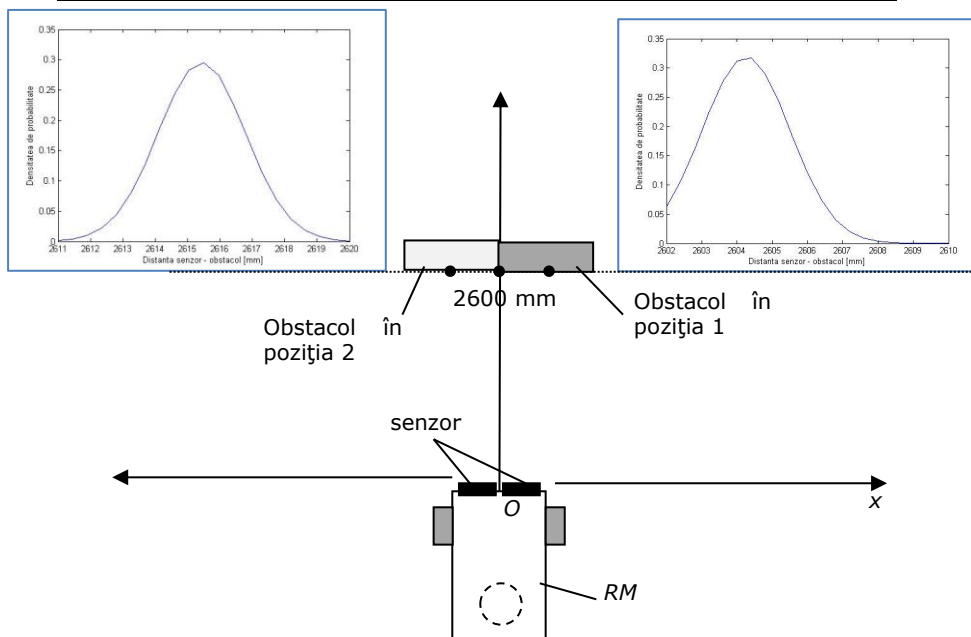


Figura 6.10 Comparații pentru densitatea de probabilitate

Experimentul desfășurat permite consemnarea următoarelor concluzii:

- Se păstrează diferențe între distanța de referință – telemetru laser - și cea determinată pe baza senzorului ultrasonic;
- Se păstrează un comportament asimetric al elementului senzorial în raport cu un obstacol deplasat în zona axei pozitive;
- Aceste abateri ating valori maxime o dată cu apropierea obstacolului de limita zonei sensibile a senzorului. Pentru deplasarea maximă analizată ($d_L =$

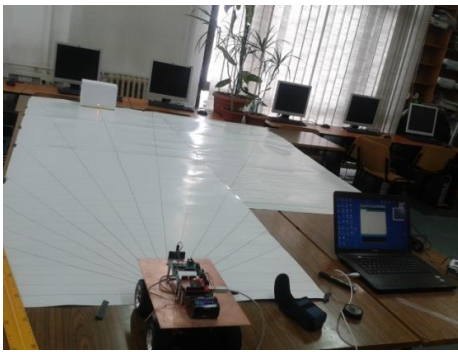
2607 mm) eroarea este

$$\varepsilon_d = \frac{d_L - \hat{d}}{d_L} = \frac{2607 - 2595,974}{2607} \cdot 100 = 0,728\% \quad (6.15)$$

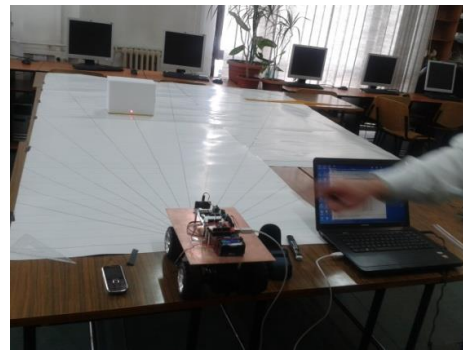
- Utilizarea unor senzori multipli și fuziunea informației poate deveni utilă pentru reducerea erorilor de localizare a obstacolului;
- Sistemul senzorial are un comportament instabil specific unei distribuții probabilistice specifice eșecurilor de măsurare și interpretare a informației. Acest aspect a fost înregistrat cu pregnanță la un obstacol deplasat cu 240 mm față de axa longitudinală;
- Se constată o zonă activă apreciabilă a senzorului ultrasonic pentru distanța de lucru maximală.

6.2.5. Localizarea unui obstacol în scena de lucru și influența poziției asupra procesului

Cercetarea experimentală a vizat analiza aspectelor aleatorii din procesul de localizare a unui obstacol poziționat pe axa mediană a sistemului de măsurare și la distanțe diferite pe axa OY. Aspecte de pe parcursul experimentelor sunt prezentate în Figura 6.11



a)



b)

Figura 6.11 Aspecte de pe racursul masurărilor

Rezultatele experimentale obținute pe parcursul activității sunt prezentate în Anexa 6.2.

Tabloul structural al experimentelor și parametrii statistici rezultați din prelucrarea datelor, sunt prezentate în Tabel 6.12.

Tabel 6.12 Tablou structural și parametrii statistici

	Valoare medie	Deviația standard	Eroare [%]
$d_L = 2000 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1997.100 \text{ mm}$	$\sigma = 0.590523$	0.145 %
$d_L = 1500 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1489.050 \text{ mm}$	$\sigma = 1.986493$	0.73 %
$d_L = 1000 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1004.925 \text{ mm}$	$\sigma = 1.913347$	0.4925 %
$d_L = 500 \text{ mm}$	$\bar{d} = 493.325 \text{ mm}$	$\sigma = 0.474342$	1.335 %

Calculul erorii de localizare a fost realizat în ipoteza distanței de referință – măsurată cu telemetrul cu laser – și a relației de calcul:

$$\varepsilon_d = \frac{d_L - \hat{d}}{d_L} = \frac{2000 - 1997,1}{2000} \cdot 100 = 0,145\% \quad (6.16)$$

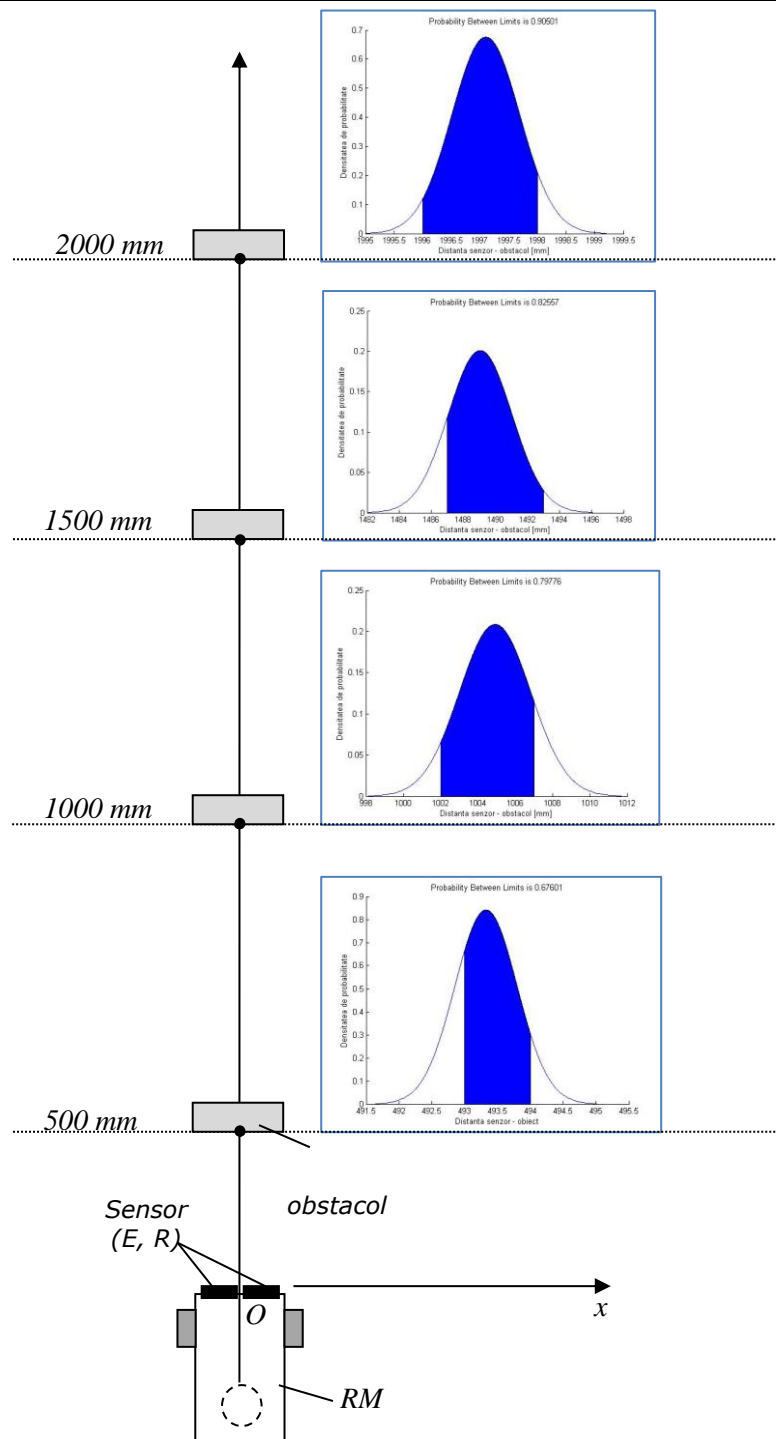


Figura 6.12 Densitatea de probabilitate în diverse puncte din scena de lucru

Experimentul desfășurat permite consemnarea următoarelor concluzii:

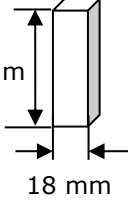
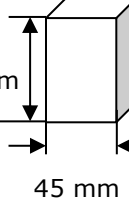
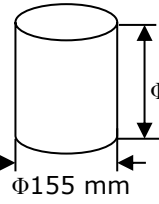
- Se păstrează diferențe între distanța de referință – telemetru laser - și cea determinată pe baza senzorului ultrasonic;
- Erorile de localizare sunt în limite conforme cu parametrii de calitate ai senzorului ultrasonic utilizat.

6.3. Localizarea unor obstacole de forme geometrice diferite

O categorie aparte de încercări a vizat comportamentul sistemului senzorial ultrasonic Parallax pentru localizarea unor obstacole de dimensiuni și forme diferite. A fost utilizat un singur sistem senzorial (Emitor – Receptor) într-o dispunere conform cu Figura 6.13. Categoriile de obstacole avute în vedere pe parcursul experimentelor sunt prezentate în Tabel 6.13.

Poziționarea obiectului în raport cu elemental senzorial a fost conformă cu Figura 6.13.

Tabel 6.13 Tipuri de obstacole

Distanța d_0 [mm]	Obstacolele utilizate		
	O_1	O_2	O_3
2500			
2000			
1500			
1000			
500			

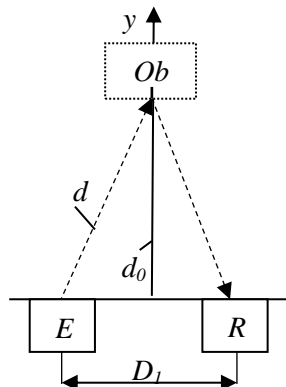


Figura 6.13 Poziționarea obstacolelor în raport cu senzorul ultrasonic

Tabel 6.14 Matricea de lucru

	O_1	O_2	O_3
d_{01}	Exp_11	Exp_12	Exp_13
d_{02}	Exp_21	Exp_22	Exp_23
d_{03}	Exp_31	Exp_32	Exp_33
d_{04}	Exp_41	Exp_42	Exp_43
d_{05}	Exp_51	Exp_52	Exp_53

Experimentele au fost realizate conform cu matricea de lucru prezentată în tabelul 6.14. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor au fost prelucrate în mediul Microsoft Office Excel și sunt prezentate în Anexa 6.3.

Primul set de măsurări Exp_11 pentru un obstacol de grosime $B = 18$ mm, $H = 245$ mm, poziționat la distanța 2500 mm, a condus la concluzia că senzorul ultrasonic nu poate oferi informație certă referitoare la prezența obstacolului. O

148 Încercări experimentale - 6

situație asemănătoare a fost întâlnită în cadrul experimentului Exp_13. Aceste experimente au confirmat faptul că obstacolele de dimensiuni mici și forme cilindrice crează un proces dificil de detecție. Experimentul Exp_12 a furnizat informația din Figura 6.14 asemănătoare cu cele prezentate anterior pentru localizarea obstacolelor paralelipipedice (§ 6.2.3).

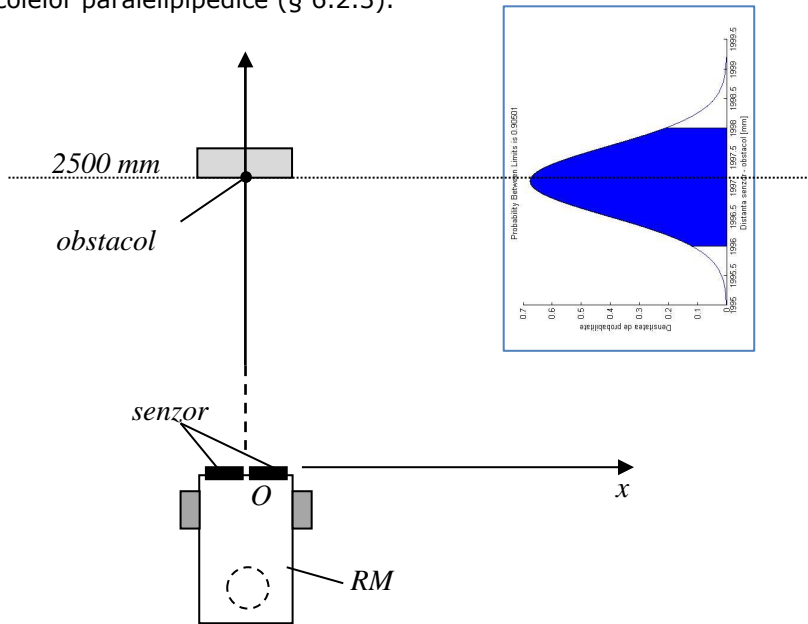


Figura 6.14 Densitatea de probabilitate din Exp_12

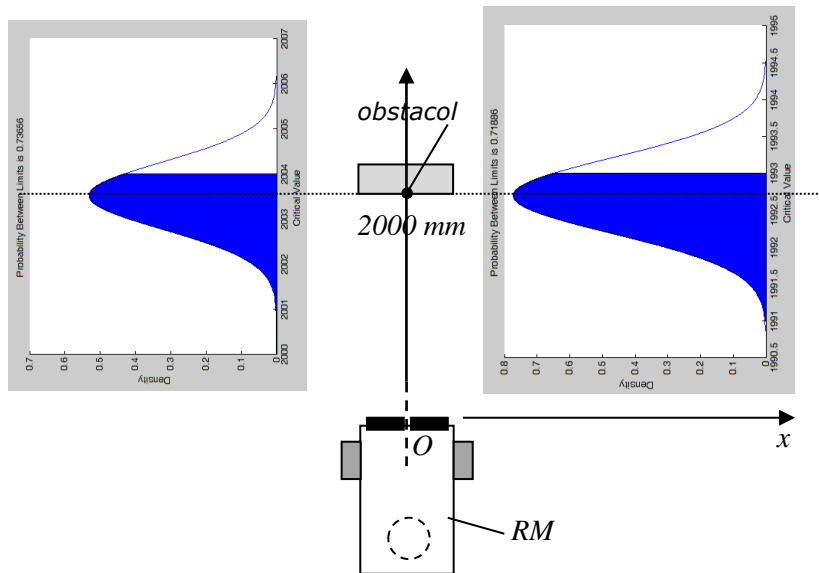


Figura 6.15 Densitatea de probabilitate din Exp_22

Experimentele Exp_31 ..Exp_33 au scos în evidență din nou localizarea deficitară a obstacolelor O_1 și O_3. În Tabel 6.15 sunt prezentați comparativ

parametrii statistici pentru fiecare caz în parte. Referindu-ne la distanța măsurată cu telemetrul cu laser și pe care o considerăm de referință eroarea relativă este indiscutabil superioară în cele două cazuri față de *Exp_32*.

$$\varepsilon = \frac{d_0 - \bar{d}}{d_0} \cdot 100[\%] \quad (6.17)$$

Tabel 6.15 Comparații între parametrii statistici

$d_0 = 1500 \text{ mm}$		
<i>Exp_31</i>	<i>Exp_32</i>	<i>Exp_33</i>
$\bar{d} = 1505.2 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1500.475 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1504.55 \text{ mm}$
$\sigma = 1.897367$	$\sigma = 0.554122$	$\sigma = 0.875595$
-0.346 %	- 0.031 %	- 0.303 %

Rezultatele experimentele *Exp_41 ..Exp_43* și respectiv *Exp_51 .Exp_53* s-au făcut remarcate prin abaterile semnificate ale distanței senzor – obstacol pentru obstacolul *O_1* și respectiv *O_2*. Distanța de referință măsurată cu ajutorul telemetrului cu laser a fost $d_0 = 1000 \text{ mm}$ și respectiv $d_0 = 500 \text{ mm}$. În tabelele 6.16 și 6.17 sunt prezentate comparativ rezultatele obținute.

Tabel 6.16 Comparații între parametrii statistici

$d_0 = 1000 \text{ mm}$		
<i>Exp_41</i>	<i>Exp_42</i>	<i>Exp_43</i>
$\bar{d} = 1030.225 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1002.475 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1016.15 \text{ mm}$
$\sigma = 4.251621$	$\sigma = 1.739253$	$\sigma = 0.80224$
-3.0225 %	- 0.2475 %	- 1.615 %

Tabel 6.17 Comparații între parametrii statistici

$d_0 = 500 \text{ mm}$		
<i>Exp_51</i>	<i>Exp_52</i>	<i>Exp_53</i>
$\bar{d} = 520.05 \text{ mm}$	$\bar{d} = 499.125 \text{ mm}$	$\bar{d} = 508.15 \text{ mm}$
$\sigma = 0.220721$	$\sigma = 0.334932$	$\sigma = 0.36162$
- 4.01 %	0.175 %	- 1.63 %

Analiza datelor prezentate în tabelele 6.15, 6.16, 6.17 permite și aprecierea performanțelor mai scăzute ale sistemului senzorial acustic pentru estimarea precisă a distanței la care se află un obstacol filiform sau cilindric.

6.4. Localizarea unui obstacol cilindric

Rezultatele obținute în experimentele de localizare a unui obstacol cilindric au sugerat necesitatea unor încercări în care se utilizează două sisteme senzoriale acustice. În acest scop a fost imaginat un set nou de experimente în care două sisteme senzoriale acustice (Parallax) au fost integrate în structura unui robot mobil.

Cei doi senzori au fost plasați în mod simetric față de axa longitudinală Ox a robotului mobil (Figura 6.16). Obstacolul a fost poziționat în trei variante față de axa longitudinală Ox : centrat, tangențial în cadranul stâng și respectiv tangențial în cadranul drept (Figura 6.17).

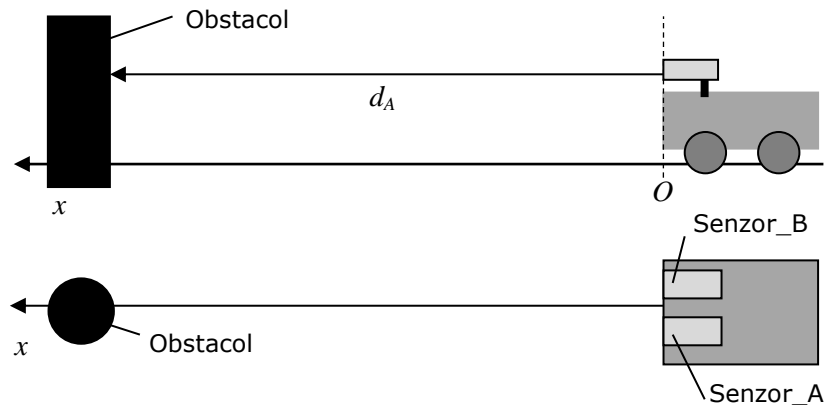


Figura 6.16 Poziția relativă robot, senzori și obstacol

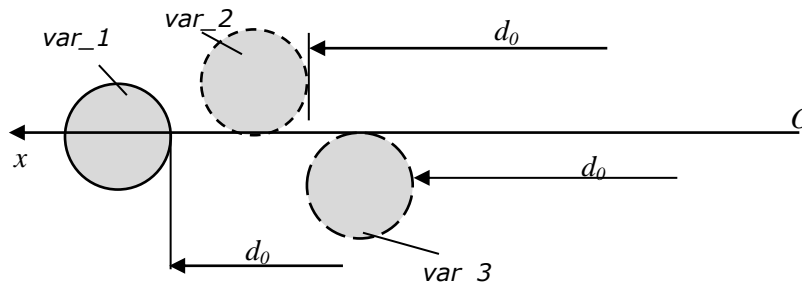


Figura 6.17 Variante de situare ale obstacolului pe parcursul experimentelor

În Tabel 6.18 este prezentată matricea explicativă a variantelor experimentale realizate.

Tabel 6.18 Matricea explicativă a variantelor experimentale

		<i>var_1</i>	<i>var_2</i>	<i>var_3</i>
d_{01}	2000 mm	Exp_11	Exp_12	Exp_13
d_{02}	1500 mm	Exp_21	Exp_22	Exp_23
d_{03}	1000 mm	Exp_31	Exp_32	Exp_33
d_{04}	500 mm	Exp_41	Exp_42	Exp_43

În Figura 6.18 sunt prezentate aspecte din timpul experimentelor realizate.

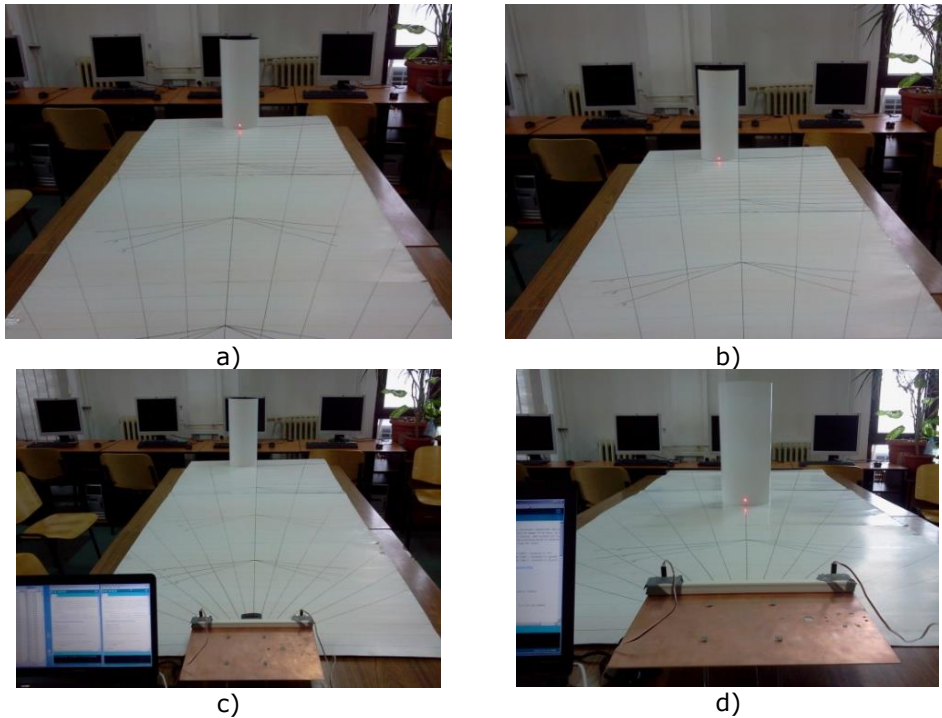


Figura 6.18 Aspecte din timpul experimentelor

Datele înregistrate și prelucrate statistic, densitatea de probabilitate, ponderile intervalelor măsurate sunt prezentate în Anexa 6.4. Comparativ sunt prezentate în Tabel 6.19 rezultatele prelucrate de la senzorii A și respectiv B la distanța de referință admisă de 2005 mm.

Tabel 6.19 Comparații între parametrii statistici

	Senzorul A	Senzorul B
$d_L = 2000 \text{ mm}$	$\bar{d} = 2007.65 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1996.35 \text{ mm}$
	$\sigma = 0.769615$	$\sigma = 1.387675$
	$\varepsilon = -0.132 \text{ [%]}$	$\varepsilon = 0.431 \text{ [%]}$

Rezultatele obținute permit estimarea distanței, conform cu prezentarea din capitolul 3.

Modelele celor doi senzori sunt independente, sunt diferite și oferă informația despre poziția z. Cele două modele pot fi prezentate pe baza parametrilor statistici:

- Senzorul A - $\mathcal{N}(z_1, \sigma_1)$;
- Senzorul B - $\mathcal{N}(z_2, \sigma_2)$;

Valoarea estimate a distanței – valoare ponderată – are expresia:

$$\hat{z} = w_1 \cdot z_1 + (1 - w_1) \cdot z_2 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot z_2 \quad (6.18)$$

unde z_1 și z_2 sunt informațiile celor doi senzori iar σ_1 și σ_2 sunt parametrii statistici calculați.

Pe baza valorilor din Tabel 6.19 se determină:

$$w_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \frac{1,3876^2}{0,7696^2 + 1,3876^2} = \frac{1,925}{2,517} = 0,7645 \quad (6.19)$$

$$w_2 = 1 - w_1 = 0,2355 \quad (6.20)$$

și în mod corespunzător:

$$\hat{z} = 0,7645 \cdot 2007,65 + 0,2355 \cdot 1996,35 = 2004,9885 \text{ mm} \quad (6.21)$$

valoare care păstrează o abatere față de valoarea de referință.

Comparativ este prezentată și densitatea de probabilitate pentru informațiile celor doi senzori în raport cu cea obținută pentru valoarea distanței estimate.

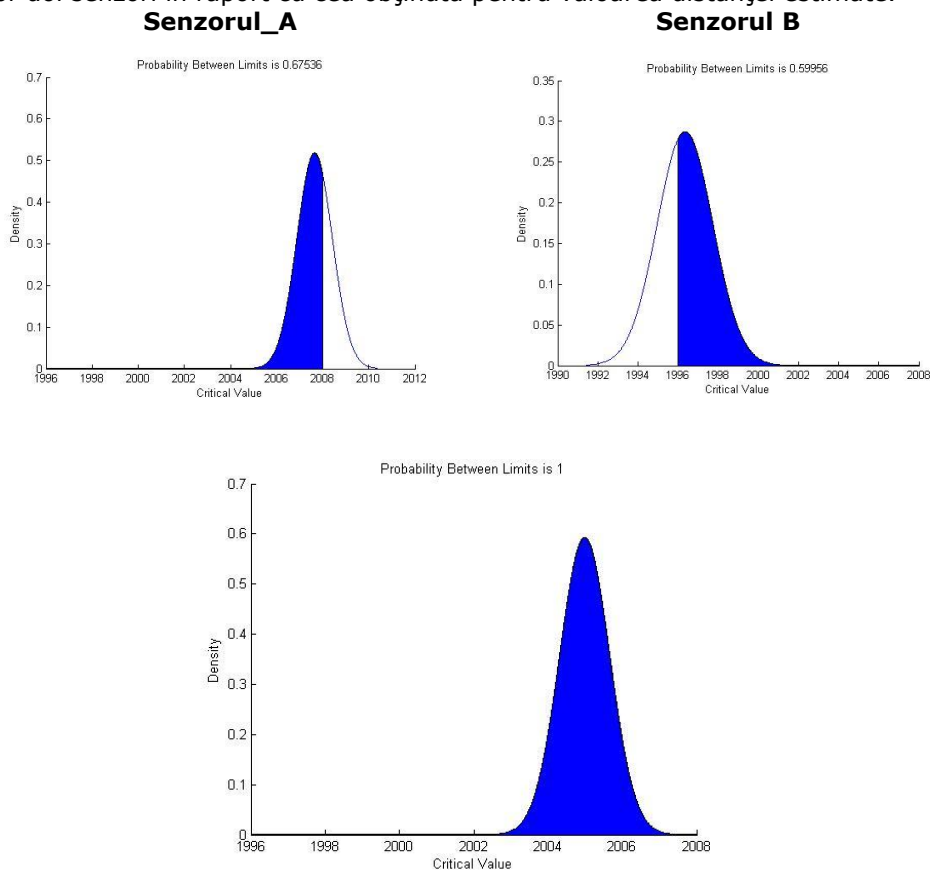


Figura 6.19 Densitatea de probabilitate în mod comparativ

Rezultatul experimentului desfășurat poate fi asociat cu un proces aleatoriu și variabila aleatoare multiplă $X(X_1, X_2)$.

Dacă variabilele aleatoare X_1 și X_2 sunt independente, $X_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ și $X_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$, atunci modelul sensorial poate fi definit sub forma:

$$X_1 + X_2 \sim N\left(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2\right) \quad (6.22)$$

iar densitatea de probabilitate va fi:

$$f_X(x_1 + x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1\sigma_2}} \cdot e^{-0.5 \left[\left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right]} \quad (6.23)$$

sau

$$f_X(x_1 + x_2) = 0.374 \cdot e^{-0.5 \left[1.688(x_1 - 2007.65)^2 + 0.52(x_2 - 1996.35)^2 \right]} \quad (6.24)$$

Utilizând facilitățile Matlab (funcția *mvnpdf*) se poate reprezenta funcția densitate de probabilitate. Fișierul (*mv_prob_pdf.m*) utilizat este prezentat în Figura 6.20 Iar funcția densitate de probabilitate, pentru cele două variabile, este prezentată în Figura 6.21.

```
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 1.0 + ÷ 1.1 x
1 % reprezentarea functiei densitate de probabilitate pentru variabile multiple
2 % mu - valoarea medie a variabilelor
3 % SIGMA - deviatia standard a variabilelor
4 - mu = [1996.35 2007.65]; SIGMA = [1.387675 0; 0 .769615];
5 - [X1,X2] = meshgrid(linspace(1990,2010,30)',linspace(1990,2010,30)');
6 - X = [X1(:) X2(:)];
7 - p = mvnpdf(X,mu,SIGMA);
8 - surf(X1,X2,reshape(p,30,30));
mv_prob_dens.m x mv_prob_pdf.m*
```

Figura 6.20 Fișier - funcția densitate de probabilitate

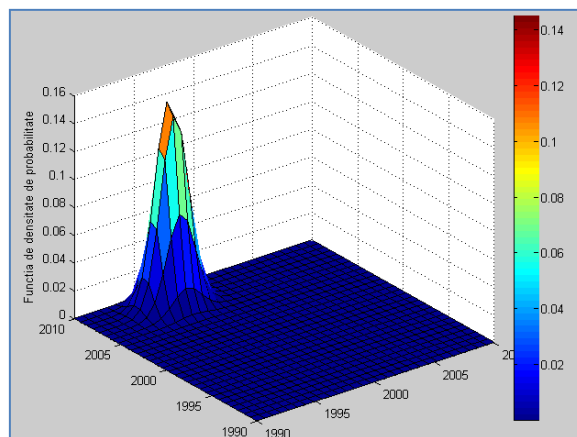


Figura 6.21 Densitatea de probabilitate pentru variabila aleatoare multidimensională

Rezultate asemănătoare au fost obținute și pentru obstacolul poziționat la distanța de 2000 mm, pe axa mediană a sistemului. Densitatea de probabilitate pentru informațiile celor doi senzori și pentru variabila aleatoare multidimensională sunt prezentate în Figura 6.22 a), b), c).

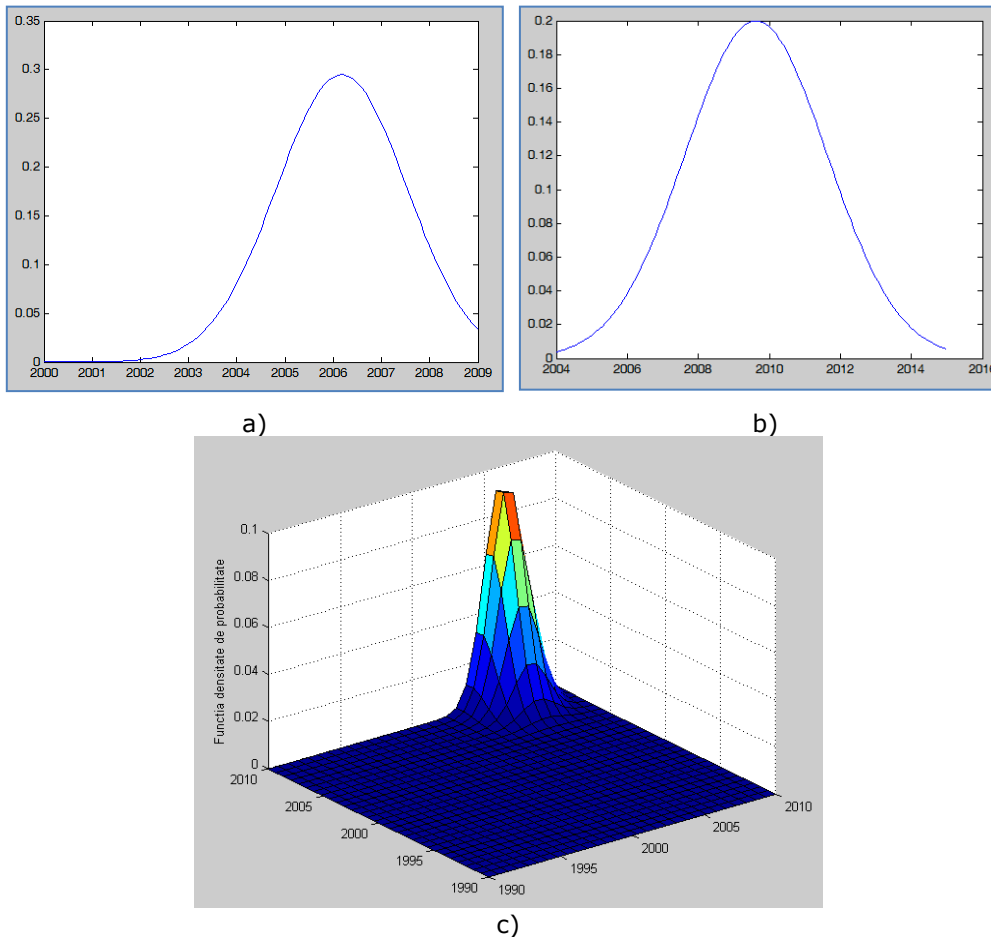


Figura 6.22 Densitățile de probabilitate: informație - senzorul A (a); informație-senzorul B (b); variabila aleatoare multidimensional (c)

Experimentul desfășurat permite consemnarea următoarelor concluzii:

- se păstrează diferențe între distanța de referință – telemetru laser - și cea determinată pe baza senzorului ultrasonic. Sursa diferențelor constă în eroarea de poziționare a telemetrului laser.
- se păstrează un comportament asimetric al elementului senzorial în raport cu un obstacol deplasat în zona axei pozitive. Acest comportament poate avea ca sursă erori în asamblarea sistemelor senzoriale în structura robotului mobil;
- aceste abateri ating valori maxime o dată cu apropierea obstacolului de limita zone sensibile a senzorului.
- Fuziunea informației prin utilizarea unor senzori multipli, cu principia funcționale diferite, poate fi benefică.

6.4.1. Localizarea unor obstacole cu suprafețe plane

Setul de experimente a urmărit achiziția informațiilor de la senzorul ultrasonic în cadrul procesului de localizare a unor obstacole cu suprafață plană de reflexie situată la un unghi α față de axa Ox (Figura 6.23), prelucrarea acestor informații și consemnarea concluziilor. Reprezentarea simplificată a scenei de lucru este evidențiată în Figura 6.24.

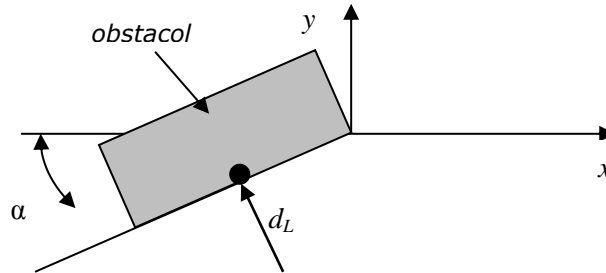


Figura 6.23 Obstacol poziționat cu α grade față de axa Ox

- Experimentele pentru distanța de referință, $d_L = 2476$ și 2477 mm, au fost realizate pentru unghiurile $\pm \alpha = 10^0$; 20^0 ; 30^0 și obstacolul deplasat față de poziția mediană cu 130 mm. Doar la orientarea de $\pm \alpha = 10^0$ repartiția datelor s-a încadrat în repartiție normală. La orientările obstacolului $\pm \alpha = 20^0$; 30^0 rezultatele au condus la concluzia unor repartiții pe care le-am încadrat în eșecuri ale procesului de măsurare.

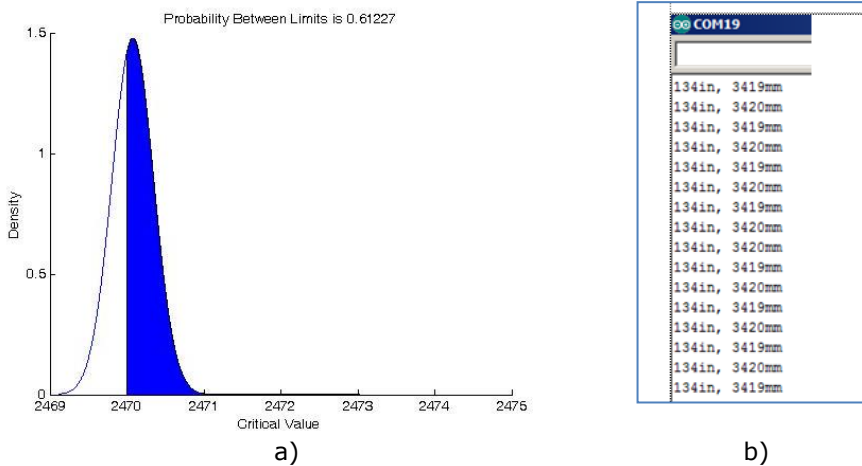


Figura 6.24 .Repartiție normală a) și respectiv eșec de măsurare b)

Pentru unghiul de rotație $\alpha = -10^0$ valoarea medie a datelor înregistrate $\hat{y} = 2470.77$ mm se apropie de valoarea de referință (2476 mm). Pentru $\alpha = 10^0$ există o abatere semnificativă între cele două valori: $\hat{y} = 2503.85$ mm față de 2477 mm. Valoarea obținută se află în același timp la limita existenței fizice a obstacolului. Această observație se adaugă celor anterioare care semnalau comportament asimetric al senzorului. Pentru activități de precizie s-ar impune ridicarea caracteristicii de directivitate înainte de integrarea elementului senzorial.

- Următoarele măsurători sunt reprezentate prin rezultatele prelucrate din tabelele 6.20, ...6.23

Tabel 6.20 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -10^0$	$\bar{y} = 1969,675 \text{ mm}$	$\sigma = 2.313699$	$\sim 1995 \dots 2000 \text{ mm}$
$d_L = 1979 \text{ mm}$			

Tabel 6.21 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -20^0$	$\bar{y} = 1935,125 \text{ mm}$	$\sigma = 0.757442$	$\sim 1911 \dots 2000 \text{ mm}$
$d_L = 1957 \text{ mm}$			

Tabel 6.22 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -30^0$	$\bar{y} = 1916.1 \text{ mm}$	$\sigma = 2.9159$	$\sim 1870 \dots 2000 \text{ mm}$
$d_L = 1937 \text{ mm}$			

Tabel 6.23 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 10^0$	$\bar{y} = 1974.45 \text{ mm}$	$\sigma = 1.175607$	$\sim 1995 \dots 2000 \text{ mm}$
$d_L = 1978 \text{ mm}$			

Calculul geometric, realizat pe baza dimensiunilor obstacolului și a poziționării unghiulare, indică următoarele intervale pentru care există obiect. Eroarea de poziționare a manuală a obstacolului în raport cu valoarea de referință măsurată este în intervalul [1.15 mm ...1.97mm].

Pentru unghiul de rotație $\alpha = 20^0; 30^0$ informațiile obținute s-au încadrat în categoria eșecurilor de măsurare.

- Măsurătorile desfășurate pe cercul de rază 1500 mm au fost finalizate prin rezultatele din tabelele 6.24 și 6.25

Tabel 6.24 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -10^0$	$\bar{y} = 1476.9 \text{ mm}$	$\sigma = 0.744208$	$\sim 1454 \dots 1500 \text{ mm}$
$d_L = 1482 \text{ mm}$			

Tabel 6.25 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 10^0$	$\bar{y} = 1476.325 \text{ mm}$	$\sigma = 1.071484$	$\sim 1454 \dots 1500 \text{ mm}$
$d_L = 1482 \text{ mm}$			

Din analiza datelor prelucrate se pot constata rezultate asemănătoare pentru cele două situații ale obiectului. Pentru celelalte cazuri informațiile obținute s-au încadrat în categoria eșecurilor de măsurare.

- Rezultate asemănătoare au fost obținute și pentru experimentele realizate pe raza de 1000 mm. Datele prelucrate sunt prezentate în tabelele 6.26, ... 6.29. Eșecuri de măsurare au fost înregistrate doar la unghiuri de $\alpha = 30^0$

Tabel 6.26 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -10^0$	$\bar{y} = 977,425 \text{ mm}$	$\sigma = 1.692934$	$\sim 954 \dots 1000 \text{ mm}$
$d_L = 985 \text{ mm}$			

Tabel 6.27 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -20^{\circ}$	$\bar{y} = 961,675 \text{ mm}$	$\sigma = 2.72112$	$\sim 911 \dots 1000 \text{ mm}$
$d_L = 1979 \text{ mm}$			

Tabel 6.28 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 10^{\circ}$	$\bar{y} = 983.45 \text{ mm}$	$\sigma = 1.796721$	$\sim 954 \dots 1000 \text{ mm}$
$d_L = 1979 \text{ mm}$			

Tabel 6.29 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 20^{\circ}$	$\bar{y} = 967.05 \text{ mm}$	$\sigma = 1.44914$	$\sim \sim 911 \dots 1000 \text{ mm}$
$d_L = 1979 \text{ mm}$			

- Ultimele experimente au fost realizate pe raza de 500 mm. Datele prelucrate sunt prezentate în tabelele 6.30, ... 6.34. Se poate constata un comportament asemănător cazurilor anterioare. Eșecuri de măsurare au fost înregistrate doar la unghiul de $\alpha = -30^{\circ}$.

Tabel 6.30 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -10^{\circ}$	$\bar{y} = 486,225 \text{ mm}$	$\sigma = 0.4229$	$\sim 455 \dots 500 \text{ mm}$
$d_L = 477 \text{ mm}$			

Tabel 6.31 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = -20^{\circ}$	$\bar{y} = 461.425 \text{ mm}$	$\sigma = 0.5$	$\sim 411 \dots 500 \text{ mm}$
$d_L = 455 \text{ mm}$			

Tabel 6.32 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 10^{\circ}$	$\bar{y} = 479,25 \text{ mm}$	$\sigma = 0.493548$	$\sim 455 \dots 500 \text{ mm}$
$d_L = 477 \text{ mm}$			

Tabel 6.33 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 20^{\circ}$	$\bar{y} = 464.425 \text{ mm}$	$\sigma = 1.012739$	$\sim 411 \dots 500 \text{ mm}$
$d_L = 455 \text{ mm}$			

Tabel 6.34 Valoarea medie și deviația standard

	Valoarea medie	Deviația standard	\exists_{OB}
$\alpha = 30^{\circ}$	$\bar{y} = 441.475 \text{ mm}$	$\sigma = 0.505736$	$\sim 370 \dots 500 \text{ mm}$
$d_L = 435 \text{ mm}$			

Experimentele realizate au confirmat existența efectului specular și astfel incertitudine de localizare a unui punct dintr-un obstacol.

Extinderea experimentelor prin scanarea scenei de lucru poate deveni benefică pentru obținerea unor informații cu utilizarea senzorilor ultrasonici.

6.4.2. Localizarea unor obstacole prismatice cu ajutorul senzorilor ultrasonici

6.4.2.1. Introducere

Suprafețele prismatice – colțare – introduc dificultăți în localizare. Aceste colțare pot avea atât dimensiuni diferite cât și orientări diferite:

- colțar de dimensiuni comparabile distanței dintre senzori și cu muchia orientată spre senzori; Exemple clasice (scene interioare) pentru acest caz îl reprezintă colțarul mobilier, aparate casnice etc.
 - colțar de dimensiuni superioare distanței dintre senzori și cu partea unghiulară orientată spre senzori; Exemplu clasic pentru acest caz îl reprezintă modul de îmbinare al pereților unei camere;
- Experimentele au fost orientate spre ambele cazuri precizate anterior.

6.4.2.2. Localizarea unui colțar în scena de lucru a robotului

Setul de experimente a urmărit achiziția informațiilor de la senzorii ultrasonici în cadrul procesului de localizare a obstacolului colțar de dimensiuni reduse: 300mmx210mm. În prima parte a experimentelor colțarul este situat cu muchia orientată spre suprafața sensibilă a senzorilor ultrasonici. Pe parcursul experimentelor colțarul a fost orientat cu fețele plane la unghiuri diferite față de suprafața sensibilă a senzorilor.

În Figura 6.25 este prezentat ansamblul componentelor care au fost incluse în cadrul experimentului. Nu este vizibil în cadrul imaginii sistemul de calcul care a asigurat achiziția informațiilor pe parcursul desfășurării experimentelor.

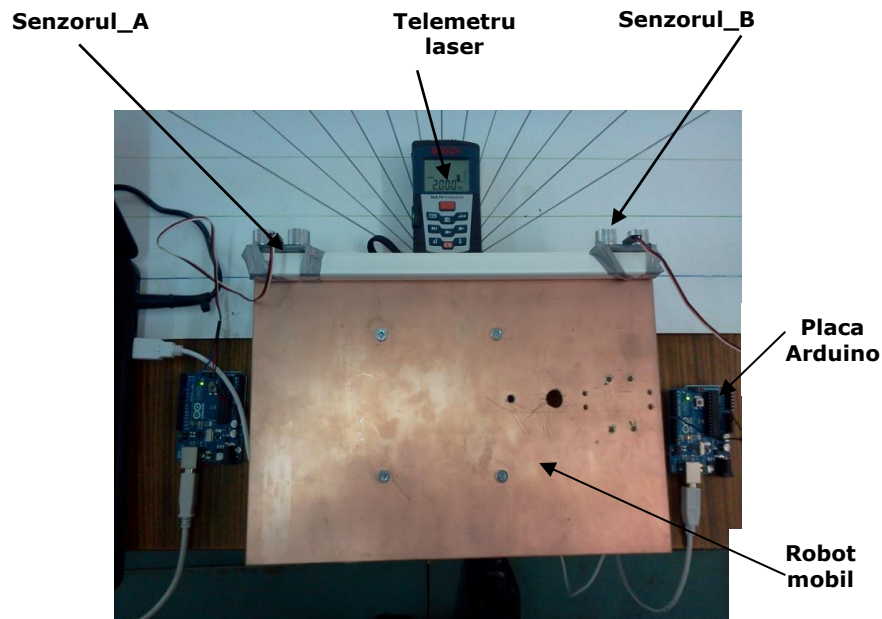


Figura 6.25 Vedere de sus a ansamblului experimental (fără obstacol)

În Figura 6.26 sunt prezentate aspecte din timpul experimentelor: a), b), c), d) - obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări în raport cu sistemele senzoriale.

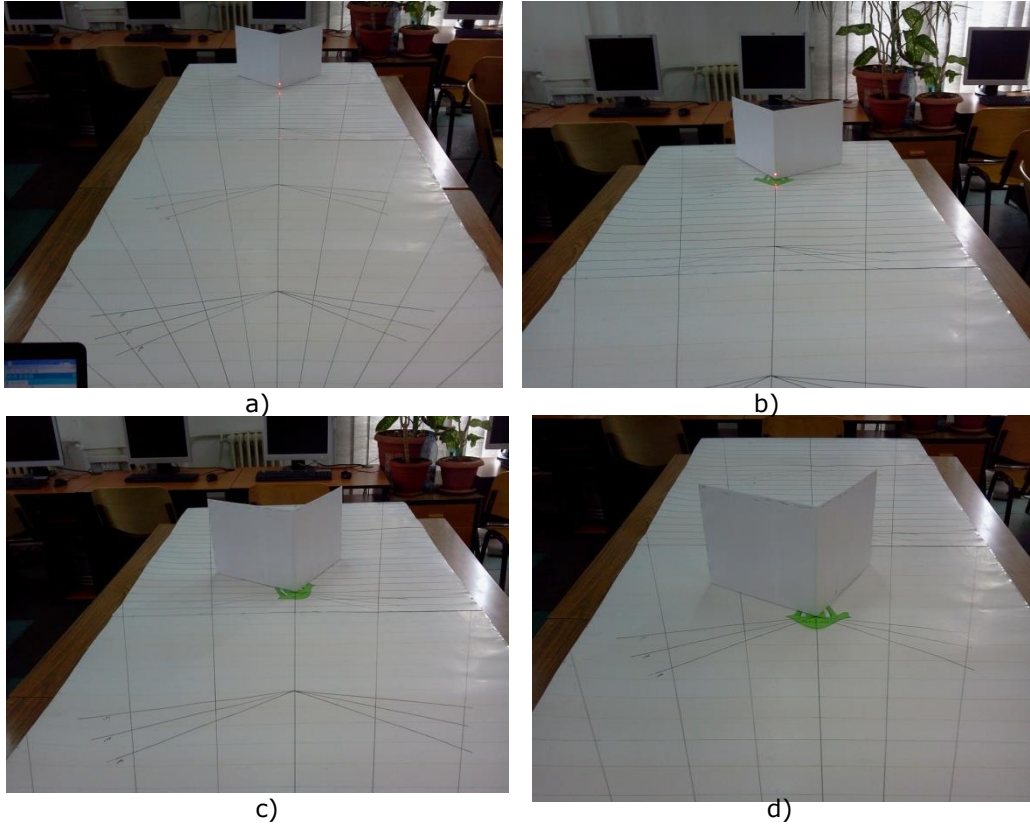


Figura 6.26 Obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări

Schița explicativă a standului experimental este prezentată în Figura 6.27

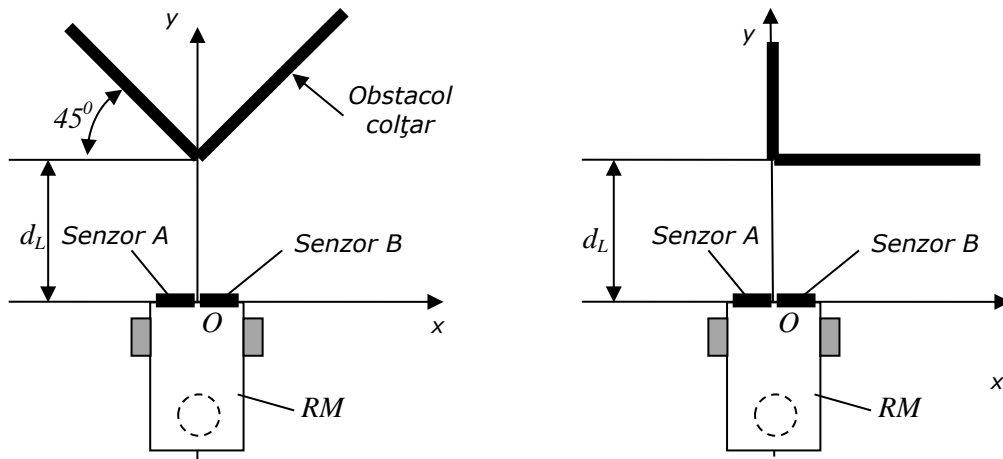


Figura 6.27 Schița standului experimental pentru localizarea colțarului

Experimentele realizate pentru poziția externă a muchiei a condus la situația consemnată ca și eșecuri de măsurare pentru intervalul, 1000-2000 mm și unghiul 45° , de poziționare a obstacolului. La unghiuri reduse $10^\circ - 20^\circ$ experimentul s-a

redus la localizarea unei suprafețe plane analizată în cadrul § 6.4.1. Poziționarea colțarului conform cu Figura 6.26 b) sau simetric în oglindă față de axa Oy a permis obținerea unor informații caracterizate de repartiție normală.

Pentru o distanță de referință de 500 mm și un unghi de -20° , informațiile celor doi senzori sunt conforme cu o repartiție normală. Pentru un unghi de 20° , senzorul A a oferit informație caracterizată de repartiție normală cât și eșecuri de măsurare. Experimentele au confirmat analiza realizată în cadrul § 6.4.1 și confirmă în mod suplimentar necesitatea unor senzori multipli.

În Figura 6.28 sunt prezentate aspecte din timpul experimentelor: a), b), c), d) - obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări în raport cu sistemele senzoriale.

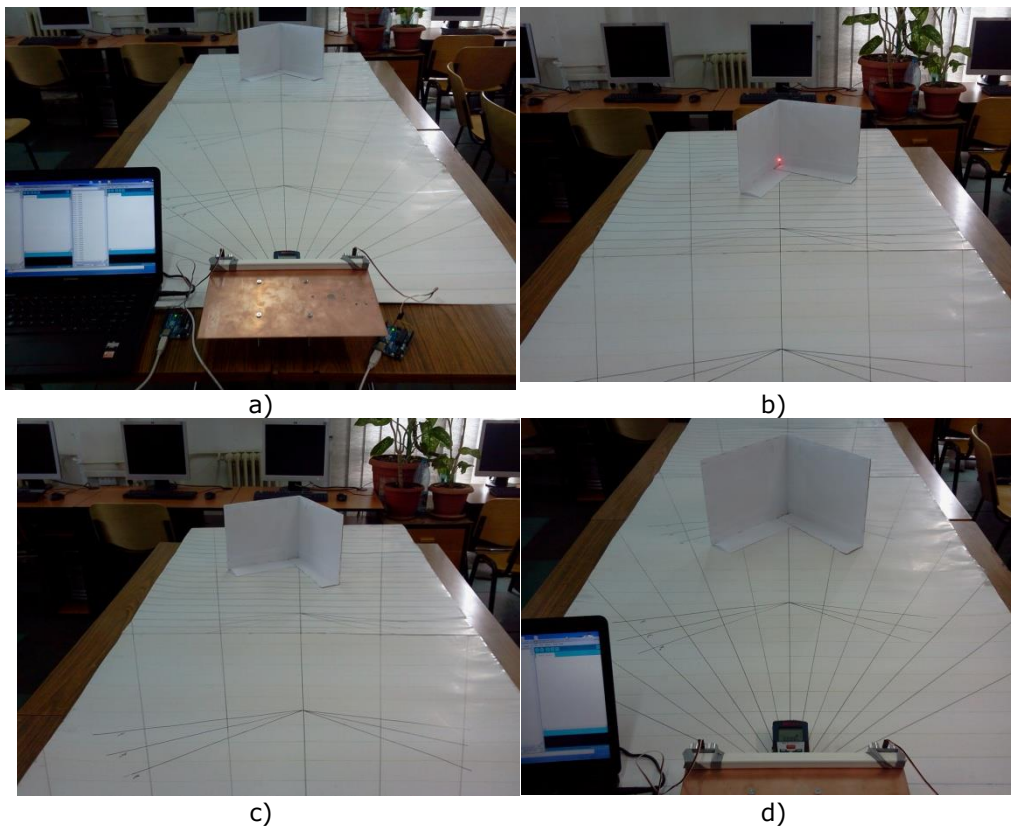


Figura 6.28 Obiectul colțar situat la diferite distanțe și orientări

Experimentele desfășurate conform cu prezentările din Figura 6.28 a), b), c), d) au permis obținerea unor date în limita datelor de referință. Pe tot intervalul 500 – 2000 mm informațiile au corespuns repartiției normale cu condiția unui unghi de rotație inferior valorii de $\pm 20^\circ$.

Informațiile obținute nu permit însă stabilirea concluziei de integrare a obstacolului în categoria colțar. Este necesară o analiză pe baza unei variabile aleatoare multiple.

6.4.2.3. Colțar de dimensiuni mari în procesul de localizare

Modelul fizic pentru colțarul utilizat în experiment a avut latura de 800 mm și înălțimea de 250 mm.

Aspecte din timpul experimentelor sunt prezentate în Figura 6.29. Concluziile experimentelor realizate sunt asemănătoare cu cele prezentate în cazul anterior. Dimensiunea colțarului nu modifică comportamentul senzorilor ultrasonici, distanțele măsurate încadrându-se în intervalul valorii de referință.

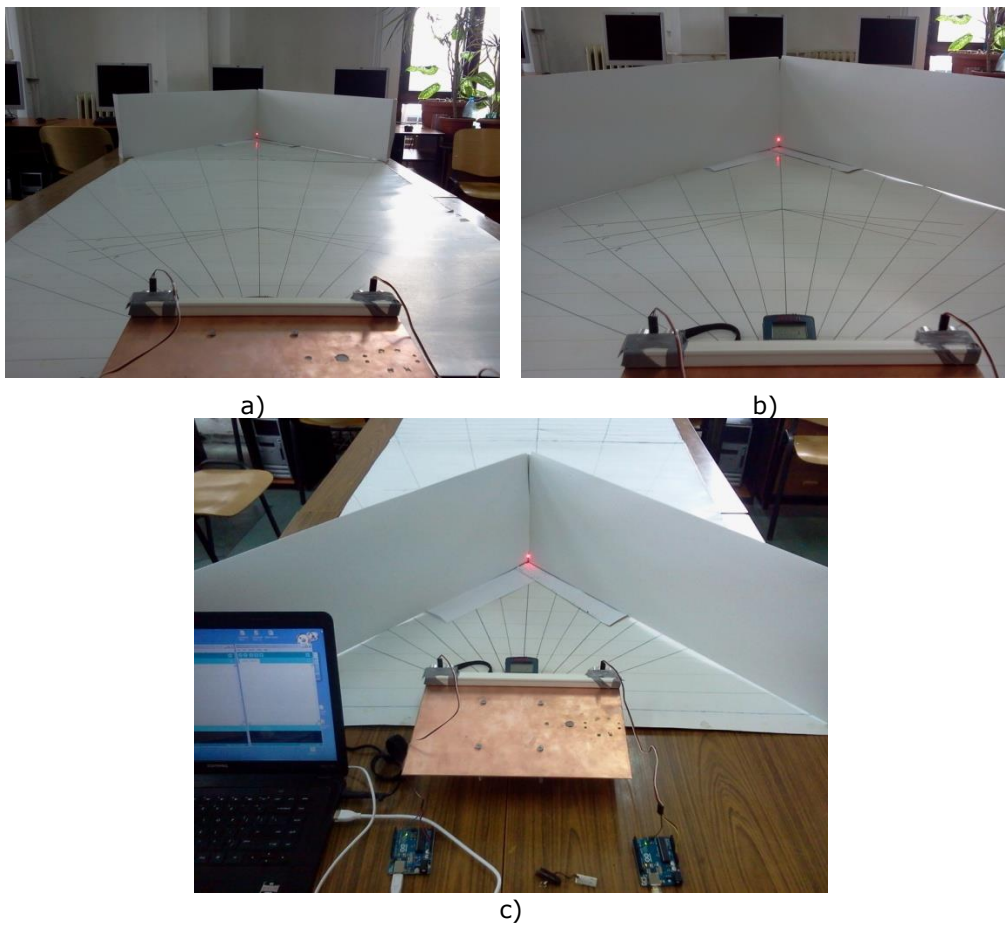


Figura 6.29 Obiectul colțar situat la diferite distanțe

6.5. Localizarea unui obstacol pe baza senzorilor în infraroșu

6.5.1. Introducere

- Programul experimental a urmărit două obiective operaționale:
 - Posibilitatea determinării existenței unui obstacol pe baza informațiilor de la senzorii IR;

- Posibilitatea determinării poziției / orientării obstacolului în raport cu un sistem de axe general atașat sistemului senzorial utilizat.
Sistemul senzorial este construit în jurul senzorilor SHARP GP2Y0A02YK0F pentru care a fost ridicată caracteristica funcțională.

6.5.2. Standul experimental

Schema structurală realizată pentru programul experimental este prezentată în Figura 6.30. Cele 3 elemente senzoriale sunt dispuse în mod linear. În Figura 6.31 este prezentat un detaliu din standul realizat.

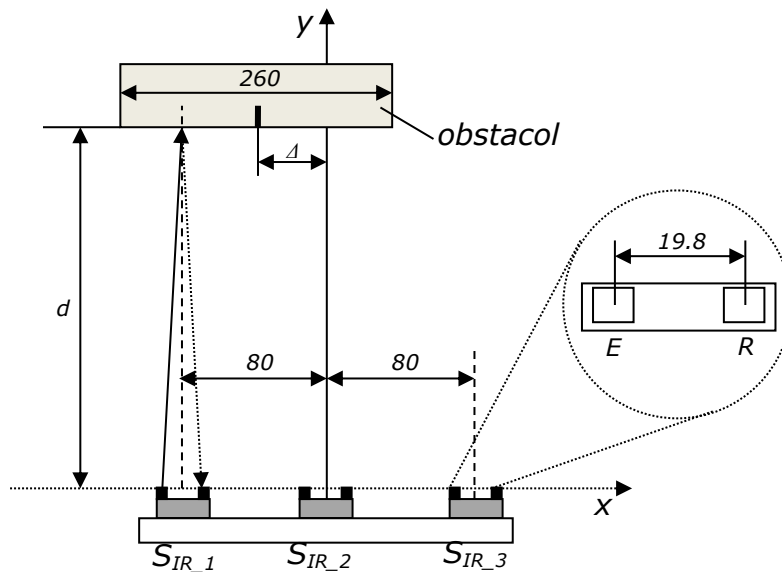


Figura 6.30 Schema structurală a standului din programul experimental

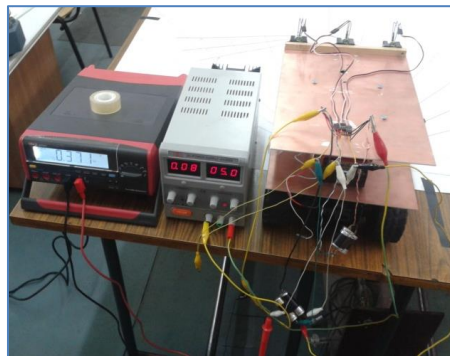


Figura 6.31 Detalii din realizarea standului

Considerăm ecuația caracteristicii inverse a senzorului IR descrisă prin expresia:

$$d_x = -116 \cdot U^3 + 371,2 \cdot U^2 - 512,4 \cdot U + 569,1 \quad [mm] \quad (6.25)$$

unde $U[mV]$ este semnalul analogic al elementului senzorial.

O altă formă de aproximare a caracteristicii este dată de expresia:

$$d_x = 1505 \cdot e^{-0,001836 \cdot U} + 652,4 \cdot e^{-0,000545} \text{ [mm]} \quad (6.26)$$

unde U [mV] este semnalul analogic al elementului senzorial.

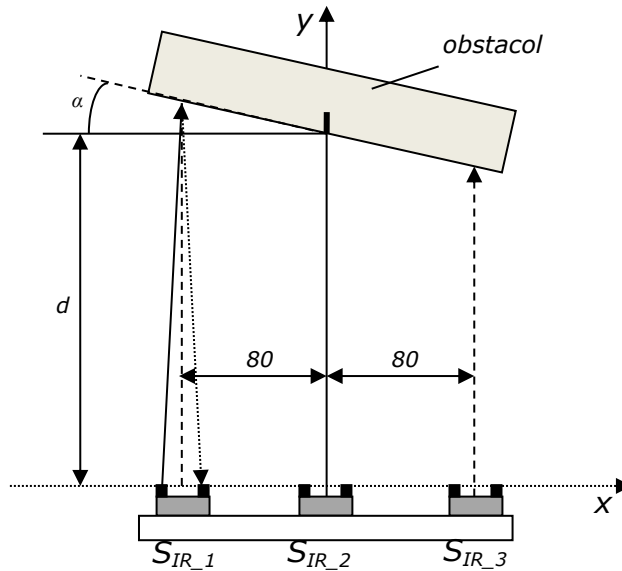


Figura 6.32 . Schema structurală a standului din programul experimental

Pentru un obstacol paralelipipedic poziționat centrat față de sistemul de axe la distanța de $Y_0 = 1500 \text{ mm}$ și rotit cu un unghi $\alpha = 30^\circ$ în sensul acelor de ceasornic au fost determinate distanțele măsurate de cei trei senzori (Tabel 6.35).

Tabel 6.35 Informațiile celor trei senzori

$d_x - S_{IR_1}$ [mm]	$d_x - S_{IR_2}$ [mm]	$d_x - S_{IR_3}$ [mm]
1482.662	1650.709	1312.258

Ecuția dreptei care aproximează poziția unei drepte din planul obstacolului (Figura 6.33) este descrisă de ecuația:

$$Y = -1,065 \cdot X + 1482 \quad (6.27)$$

Tabel 6.36 Valorile coeficienților statistici

SSE	4.276E + 004
R_square	0.2535
Adjusted R-square	-0.493
RMSE	206.8

Coeficienții dreptei au fost calculați în condițiile unui coeficient de încredere de 95 %. Se constată că eroarea de poziționare a obstacolului este:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{1500 - 1482}{1500} = \frac{18}{1500} = 0,012 \quad (6.28)$$

iar eroarea de orientare:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{30^0 - 46,8266^0}{30^0} = \frac{-16,8266^0}{30^0} = -0,56 \quad (6.29)$$

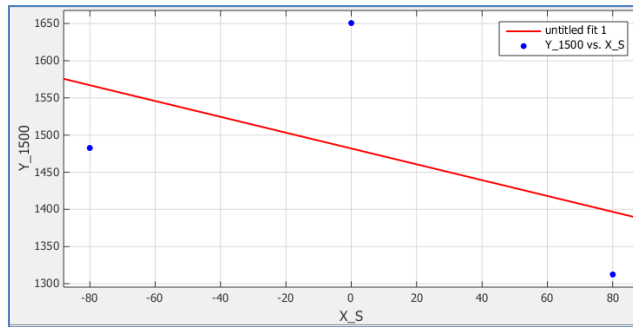


Figura 6.33 Ecuația dreptei de aproximare a situației obstacolului

Pentru un obstacol paralelipipedic poziționat centrat față de sistemul de axe la distanța de $Y_0 = 1000 \text{ mm}$ și rotit cu un unghi $\alpha = 30^0$ în sensul acelor de ceasornic au fost determinate distanțele măsurate de cei trei senzori (Tabel 6.37).

Tabel 6.37 Informațiile celor trei senzori

$d_x - S_{IR_1}$ [mm]	$d_x - S_{IR_2}$ [mm]	$d_x - S_{IR_3}$ [mm]
1133.944	1063.436	968.9623

Ecuația dreptei care aproximează poziția unei drepte din planul obstacolului (Figura 6.34) este descrisă de ecuația:

$$Y = -1,031 \cdot X + 1055 \quad (6.30)$$

Tabel 6.38 Valorile coeficienților statistici

SSE	95.73
R_square	0.993
Adjusted R-square	0.986
RMSE	9.784

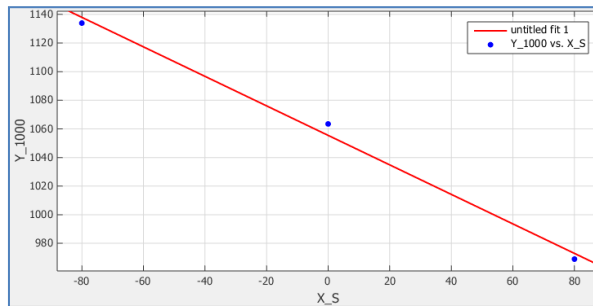


Figura 6.34 Ecuația dreptei de aproximare a situației obstacolului

Coeficienții dreptei au fost calculați în condițiile unui coeficient de încredere de 95 %.

Se constată că eroarea de poziționare a obstacolului este:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{1000 - 1055}{1000} = \frac{-55}{1000} = -0,055 \quad (6.31)$$

iar eroarea de orientare:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{30^0 - 46,8266^0}{30^0} = \frac{-16,8266^0}{30^0} = -0,52992 \quad (6.32)$$

Pentru un obstacol paralelipedic poziționat centrat față de sistemul de axe la distanța de $Y_0 = 500 \text{ mm}$ și rotit cu un unghi $\alpha = 30^0$ în sensul acelor de ceasornic au fost determinate distanțele măsurate de cei trei senzori (tabelul 6.39).

Tabel 6.39 Informațiile celor trei senzori

$d_x - S_{IR_1}$ [mm]	$d_x - S_{IR_2}$ [mm]	$d_x - S_{IR_3}$ [mm]
601.6333	519.9445	474.4043

Ecuția dreptei care aproximează poziția unei drepte din planul obstacolului (Figura 6.35) este descrisă de ecuația:

$$Y = -0,7952 \cdot X + 532 \quad (6.33)$$

Tabel 6.40 Valorile coeficienților statistici

SSE	217.8
R_square	0.9738
Adjusted R-square	0.9476
RMSE	14.76

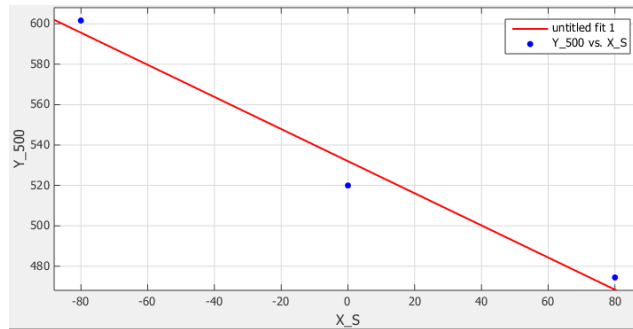


Figura 6.35 Ecuția dreptei de aproximare a situației obstacolului

Coefficienții dreptei au fost calculați în condițiile unui coeficient de încredere de 95 %.

Se constată că eroarea de poziționare a obstacolului este:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{500 - 532}{500} = \frac{-32}{500} = -0,064 \quad (6.34)$$

iar eroarea de orientare:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{30^0 - 38,5112^0}{30^0} = \frac{-8,5112^0}{30^0} = -0,28371 \quad (6.35)$$

Pentru un obstacol paralelipedic poziționat centrat față de sistemul de axe la distanța de $Y_0 = 1000 \text{ mm}$ și rotit cu un unghi $\alpha = 30^0$ în sens invers al acelor de ceasornic, au fost determinate distanțele măsurate de cei trei senzori (Tabel 6.41).

Tabel 6.41 Informațiile celor trei senzori

$d_x - S_{IR_1}$ [mm]	$d_x - S_{IR_2}$ [mm]	$d_x - S_{IR_3}$ [mm]
926.3707	982.2246	979.3481

Ecuția dreptei care aproximează poziția unei drepte din planul obstacolului (Figura 6.36) este descrisă de ecuația:

$$Y = -0,3303 \cdot X + 962,6 \quad (6.36)$$

Tabel 6.42 Valorile coeficienților statistici

SSE	577.3
R_square	0.7076
Adjusted R-square	0.4151
RMSE	24.03

Comparativ se prezintă ecuațiile dreptei pentru aceeași poziție a obstacolului dar orientare în oglindă (Figura 6.36).

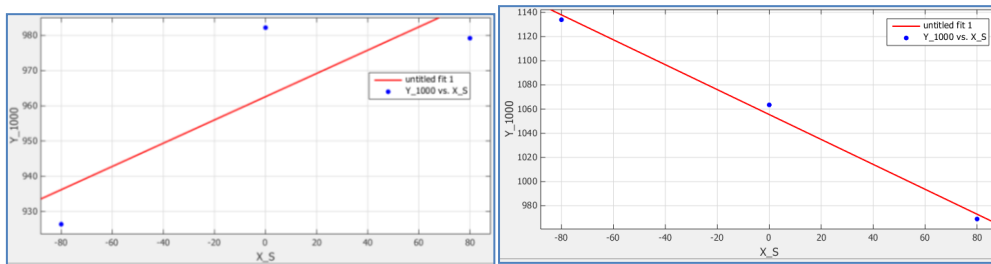


Figura 6.36 Ecuția dreptei de aproximare a situației obstacolului

Coeficienții dreptei au fost calculați în condițiile unui coeficient de încredere de 95 %. Se constată că eroarea de poziționare a obstacolului este:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{1000 - 962,6}{1000} = \frac{37,4}{1000} = 0,0374 \quad (6.37)$$

iar eroarea de orientare:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{30^0 - 18,28766^0}{30^0} = \frac{11,71234^0}{30^0} = 0,39 \quad (6.38)$$

Pentru un obstacol paralelipipedic poziționat centrat față de sistemul de axe la distanța de $Y_0 = 500 \text{ mm}$ și rotit cu un unghi $\alpha = 30^0$ în sens invers al acelor de ceasornic, au fost determinate distanțele măsurate de cei trei senzori (Tabel 6.43).

Tabel 6.43 Informațiile celor trei senzori

$d_x - S_{IR_1}$ [mm]	$d_x - S_{IR_2}$ [mm]	$d_x - S_{IR_3}$ [mm]
441.7946	489.4282	550.8208

Ecuția dreptei care aproximează poziția unei drepte din planul obstacolului (Figura 6.37) este descrisă de ecuația:

$$Y = 0,6814 \cdot X + 494 \quad (6.39)$$

Tabel 6.44 Valorile coeficienților statistici

SSE	31.55
R_square	0.9947
Adjusted R-square	0.9894
RMSE	5.617

Comparativ se prezintă ecuațiile dreptei pentru aceeași poziție a obstacolului dar orientare în oglindă (Figura 6.37).

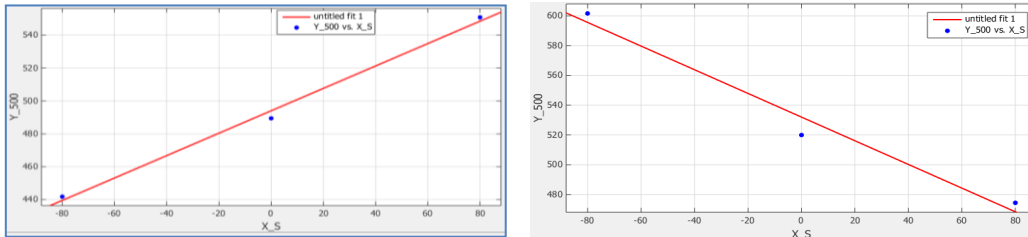


Figura 6.37 Ecuația dreptei de aproximare a situației obstacolului

Coeficienții dreptei au fost calculați în condițiile unui coeficient de încredere de 95 %. Se constată că eroarea de poziționare a obstacolului este:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{500 - 494}{500} = \frac{6}{500} = 0,012 \quad (6.40)$$

iar eroarea de orientare:

$$\varepsilon_{OY} = \frac{30^0 - 34,2879^0}{30^0} = \frac{-4,2879^0}{30^0} = -0,143 \quad (6.41)$$

6.5.3. Concluzii

Experimentele realizate cu ajutorul senzorilor în infraroșu au confirmat utilitatea acestora pentru aplicații robotizate.

În urma acestor experimente se poate afirma:

- senzorii IR permit, prin utilizarea multiplă, localizarea unui obstacol atât prin determinarea poziției cât și a orientării;
- pe parcursul experimentelor senzori din aceeași gamă constructivă au prezentat funcționalitate diferită, fiind necesară ridicarea caracteristicilor în mod separat pentru fiecare caz în parte;
- volumul de calcul pentru modelul matematic este extins;
- a fost necesară determinarea caracteristicii directe și inverse a elementului senzorial.

6.6. Concluzii finale

Se poate concluziona că există două categorii de incertitudini ale elementului senzorial:

- incertitudinea stohastică: explicabilă prin faptul că toate valorile măsurate (mărimile de ieșire ale elementului senzorial) sunt afectate de zgomot, sunt influențate de mediu sau de recepție;
- incertitudinea sistematică: explicabilă de structura fizică a elementului senzorial și condițiile de operare din mediu. Aceste condiții pot da naștere unor interpretări eronate și neuniforme ale datelor.

Experimentele realizate au permis evidențierea posibilităților de utilizare a senzorilor ultrasonici și în infraroșu în medii de lucru interne, de laborator. S-a

168 Încercări experimentale - 6

demonstrat necesitatea utilizării mai multor categorii de elemente senzoriale și fuziunea informației.

Experimentele au scos în evidență și necesitatea calibrării elementelor senzoriale înainte de integrarea în structura robotului mobil.

7. Concluzii generale și contribuții personale

7.1. Concluzii finale

Evoluția în timp a roboților mobili a condus atât la variante funcționale și constructive cât și la abordări diverse privind evoluția robotului într-un mediu structurat sau nestructurat.

Luarea deciziilor în viața obișnuită este inseparabilă de *incertitudine*. [Shackle, 1961]. Incertitudinea există și nu poate fi eliminată.

Într-o definiție cu aspect de generalitate, incertitudinea – este definită ca *nesiguranță, îndoială, ezitare* [Dex].

În același timp se poate afirma că incertitudinea este un termen utilizat pe scară largă în inginerie și inteligența artificială. Totuși, autorii în aceste domenii de aplicare și cercetare nu sunt întotdeauna de acord cu privire la sensul de incertitudine, pe tipuri de clase / categorii, cu privire la posibilele surse, pe sinonime, la posibile clasificări, pe reprezentări etc. În acest sens Joussetme în [Joussetme, 2003] se referă la legătura dintre conceptul de incertitudine, imperfecțiune, imprecizie, neclaritate, ambiguitate, ignoranță, etc.

Otomanski [Otomanski, 2008] identifică o serie de surse posibile ale incertitudinii ce însoțesc un proces de măsurare:

- descrierea incompletă a testului în condițiile unor cerințe insuficient descrise;
- realizarea imperfectă a procedurii test;
- cunoașterea inadecvată a efectelor mediului asupra procesului de măsurare;
- zgomot uman în citirea instrumentelor analogice;
- modificarea caracteristicilor sau a performanțelor instrumentelor de măsurare;
- aproximările și ipotezele încorporate în metoda și procedura de măsurare;
- modificări ale observațiilor datorate mediului – temperatură, umiditate, presiunea aerului – sau alte variabilități.

În conexiune cu acest mod de abordare, în domeniul roboticii mobile se pun adesea cel puțin două întrebări:

- va funcționa robotul mobil ? poate să se deplaseze robotul mobil în mediul de lucru nestructurat ?
- va atinge robotul mobil punctul țintă, dacă senzorii integrați nu funcționează în limitele prescrise ?

Navigarea sigură este o condiție elementară, absolut necesară, pentru ca un vehicul autonom / robot mobil să opereze în medii necunoscute. Un robot mobil care se deplasează în condiții de siguranță într-un mediu trebuie să beneficieze de capacități esențiale, cum ar fi percepția mediului, o localizare sigură și păstrarea / memorarea corectă a spațiului de lucru [Victorino, 2002].

Navigarea sigură a unui robot mobil este condiționată de estimarea cu precizie a situației robotului în spațiul de lucru. În general, obținerea informației precise despre poziția / orientarea unui robot mobil nu este posibilă doar pe baza unei singure surse de informație.

Utilizarea doar a informațiilor de la elementele senzoriale interne – odometria – nu este suficient. Un aspect de interes îl prezintă utilizarea informațiilor

din mediu obținute cu ajutorul elementelor senzoriale acustice, optice. Fuziunea informației este regăsită în aplicații pentru agricultură și minerit.

Abordarea probabilistică, a problemei de localizare a unui robot mobil, este predominantă. Metodele probabilistice Bayesian sunt multiple și propuse într-o serie de lucrări la fel ca și metodele de filtrare Kalman pentru aplicații de estimare a poziției robotului în condițiile unui mediu caracterizat de incertitudine.

O metodologie probabilistică este esențial să ia în considerare incertitudinea referitoare la cinematica robotului mobil dar în același timp și informația și comportamentul elementelor senzoriale din structura robotului mobil.

Robotul mobil interacționează cu mediul său prin acțiuni reciproce (robotul asupra mediului, mediul asupra robotului). Aceste acțiuni solicită foarte mult sistemul locomotor, deoarece acesta este permanent în contact cu mediul, creându-i robotului probleme (erori de deplasare, erori de estimare a distanței, lipsa capacității de adaptare la mediul de lucru).

Una dintre cele mai importante aspecte în domeniul senzorial este comportamentul acestora în procesul de localizare a obiectelor din mediul de lucru al robotului mobil, astfel încât acesta să poată îndeplini sarcinile primite în condiții de siguranță și eficiență maxime. Modelul probabilistic al procesului aleatoriu de localizare a obstacolelor este de interes în analiza scenelor de lucru a roboților mobili.

În urma studiului se observă că mediul de lucru al robotului este foarte variat, de la cel acvatic, până la cel spațial. În același timp se observă la nivel educațional că se acordă o atenție sporită roboților mobili.

Aspectele abordate au condus la subiectul prezentei teze pentru care a fost enunțat obiectivul principal: *analiza teoretică și experimentală a aspectelor aleatorii din scena de lucru a unui robot mobil*.

Acestui obiectiv i s-a asociat un plan de lucru și obiectivele operaționale corespunzătoare. Obiectivele operaționale s-au concretizat prin capitolele tezei, anexele și bibliografia asociată. Construcția planului operațional a luat în considerare filozofia mecatronică de corelare a componentei de analiză teoretică cu cea de analiză experimentală.

7.2. Contribuții originale ale tezei

În raport cu obiectivul principal al tezei și pe baza conținutului teoretic și a celui experimental din cadrul volumului tezei elaborate pot fi evidențiate următoarele contribuții personale.

7.2.1. Contribuții la cercetarea fundamentală

- Analiza de principiu a robotului mobil ca structură și activitate, enunțarea obiectivului principal al tezei și al planului de activități;
- Sistematizarea și prezentarea problematicei roboticii mobile în cadrul unui material coerent și finalizat prin concluzii directe de cercetare;
- Prezentarea unei analize detaliate a aspectelor aleatorii, prezentarea noțiunilor de incertitudine, clasificări / taxonomii și modul de corelare cu activitățile robotului mobil;
- Concretizarea repartiției probabilistice cu exemple edificatoare pentru procese aleatoare în robotică;

- Exemplificarea metodei de estimare a informației de la doi senzori;
- Sistematizarea aspectelor funcționale ale senzorilor ultrasonici și în infraroșu și identificarea aspectelor aleatorii din cadrul proceselor de măsurare;
- Dezvoltarea modelului matematic al caracteristicii directe și inverse a unui senzor în infraroșu Sharp;
- Conceptul extins al traiectoriei unui robot mobil și modul de racordare a tronsoanelor acesteia;
- Dezvoltarea proiectului experimental.

7.2.2. Contribuții la cercetarea aplicativă

- Realizarea suportului material pentru cercetarea experimentală și integrarea acestuia într-un sistem de achiziție a datelor;
- Desfășurarea unei activități experimentale vizând comportamentul elementelor senzoriale: senzorilor ultrasonici și a senzorilor în infraroșu în procesul aleatoriu de localizare a unui obstacol;
- Analiza probabilistică a proceselor aleatoare din procesul de măsurare și interpretarea rezultatelor obținute;
- Analiza probabilistică a proceselor aleatoare la deplasarea unui robot mobil într-o scenă de lucru;
- Dezvoltarea și implementarea unor programe aplicative pentru prelucrarea datelor experimentale.

7.3. Diseminarea rezultatelor cercetării

Rezultatele cercetărilor dezvoltate în vederea elaborării tezei de doctorat au fost valorificate (sau sunt în curs de valorificare) prin elaborarea și co-elaborarea a 7 lucrări științifice: 5 lucrări în volumele unor conferințe și reviste, dintre care 4 ca prim autor. Dintre acestea 3 lucrări sunt indexate ISI (două publicate și una în curs de publicare).

- Articole indexate ISI Proc.:

1. *Mondoc, A., Dolga, V., Gorie, N., „Methods in the analysis of mobile robots behavior in unstructured environment”, ISI Proc.2012 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2012, Viena, Austria, ISBN: 978-0-7354-1105-0, vol.1493, 10-14 Iulie, Pag. 661-665, 2012.*

2. *Gorie, N., Dolga, V., Mondoc, A., „Mathematical models in simulation process in rehabilitation of persons with disabilities”, ISI Proc.2012 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2012, Viena, Austria, ISBN: 978-0-7354-1105-0, vol.1493, 10-14 Iulie, Pag. 424-431, 2012.*

3. *Stănescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., „Random issues in workspace analysis for a mobile robot”, ICNPAA 2014 Congress, Narvik 2014, Norway (trimis spre publicare).*

- Articole indexate în alte baze de date:

1 *Stănescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., „Probabilistic aspects in mobile robots navigation”, Mecahitech'14, Bucuresti , 04-05.09,2014 (în curs de publicare, indexare SCOPUS).*

2. *Mondoc, A., “Aspects of mathematical analysis and estimate trajectories of mobile” – SCIENTIFIC BULLETIN of the „POLITEHNICA”, University of Timișoara,*

Romania, Transactions on MECHANICS Tomul 55(69), Fascicola 2, 2010,ISSN 1224-6077 (Revistă CNCSIS categoria "B+").

- Alte articole comunicate și publicate la workshop-uri de specialitate (format electronic):

1. *Mondoc, A.*, "Mathematical Analysis and Estimation Issues in Mobile Robots Trajectories", Workshop-ul nr. 2 Interdisciplinaritatea și Managementul cercetării în studiile doctorale, Universitatea din Oradea, România, iunie 2012, pp.4.

2. *Mondoc, A.* "Probabilistic and Possibilistic Modeling for the Trajectory Analysis Mobile Robots", Workshop-ul nr. 3 Interdisciplinaritatea și Managementul cercetării, Universitatea din Pitești, România, Mai, 2013, pp. 3

7.4. Direcții viitoare de cercetare în domeniu

Rezultatele obținute în cadrul acestei teze deschid noi direcții de cercetare referitoare la analiza scenelor de lucru pentru un robot mobil. Se pot menționa:

- Extinderea cercetărilor privind capabilitatea de conlucrare a mai multor categorii de senzori pentru localizarea unui obstacol și fuziunea informației;
- Dezvoltarea unui model probabilistic al sistemului mecatronic robot mobil prin evaluarea proceselor aleatoare interne ale sistemului și a celor externe;
- Analiza aspectelor aleatorii pe baza teoriei posibile.

8. Bibliografie

A

[Ambastha, 2005] Ambastha M., Busquets D., De Mántaras R. L., Sierra C. – *Evolving a Multiagent System for Landmark-Based Robot Navigation*, International Journal Of Intelligent Systems, Vol. 20, Pag.523–539 (2005).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/int.20079/pdf>

B

[Baek, 2006] Baek S.M., Tachibana D., Arai F., Fukuda T., Matsuno T. – *The Task Selection Mechanism for Interactive Robots: Application to the Intelligent Life Supporting System*, International Journal Of Intelligent Systems, Vol. 21, Pag.973–1004 (2006). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/int.20172/pdf>

[Barshan, 1990] Barshan B., Kuc R. – *Differentiating sonar reflections from corners and planes employing an intelligent sensor*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 07/1990.

[Bartsch, 2012] Bartsch S., Birnschein T., Römmermann M, Jens Hilljegerdes J., Kühn D. Kirchner F. – *Development of the Six-Legged Walking and Climbing Robot SpaceClimber*, Journal of Field Robotics 29(3), Pag.506–532 (2012).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.21418/pdf>

[Bekey, 2005] Bekey G.A. – *Autonomous Robots*, MIT Press, ISBN-10: 0-262-02578-7, Massachusetts, 2005

[Belter, 2011] Belter D., Skrzypczyński P. – *Rough Terrain Mapping and Classification for Foothold Selection in a Walking Robot*, Journal of Field Robotics 28(4), Pag.497–528 (2011).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20397/pdf>

[Bencheloui, 2011] Bencheloui M. – *Reconstruction Incrémentale de Cartes d'Environnement en Robotique Mobile*, Université de Batna, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique, 2011

[Bessière, nd] Bessière P., Dedieu E., Mazer E. – *Representing Robot/Environment Interactions Using Probabilities: the "Beam in the Bin" Experiment*, CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) IMAG/LIFIA (Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle) Grenoble, FRANCE.
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/05/95/90/PDF/Bessiere94b.pdf>

[Bison, 1997] Bison P., Chemello G., Sossai C., Trainito G. – *Possibilistic Approach to Sensor Fusion in Mobile Robotics*, IEEE, Advanced Mobile Robots, 1997. Proceedings., Second EUROMICRO workshop on.
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=633579>

[Bishop, 2010] Bishop A N., Jensfelt P. – *Global Robot Localization with Random Finite Set Statistics*. <http://ftp.isif.org/fusion/proceedings/fusion2010/pdfs/th2.3.3-0110-final.pdf>

[Bona, 2010] Bona B. – *Probabilistic Fundamentals in Robotics*, , Dipartimento di Automatica e Informatica, Politecnico di Torino, 2010
http://www.ladispe.polito.it/robotica/PhDcourse/2010/PhD_course_2010-03-Basics.pdf

[Borenstein, 1991] Borenstein J., Koren Y. – *The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance For Mobile Robots*, IEEE Journal of Robotics and Automation Vol 7, No 3, June 1991, Pag.278-288.

174 Bibliografie

- [Borenstein, 1996] Borenstein J., Feng L. – *Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol 12, No 6, December 1996, Pag.869-880. <http://www-personal.umich.edu/~johannb/Papers/paper58.pdf>
- [Borenstein, 1996] Borenstein J., s.a. – *Sensors and methods for mobile robot positioning*, Univ. Michigan, 1996, <http://www.iau.dtu.dk/ancona/385partwhereami.pdf>
- [Borenstein, 1997] Borenstein J., Everett H. R., Feng L., Wehe D. – *Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques*, Journal of Robotic Systems 14(4), Pag.231-249 (1997). <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/34938/2ftp.pdf?sequence=1>
- [Breaz, 2007] Breaz N., Crăciun M., Gașpar P., Miroiu M., Paraschiv-Munteanu I. – *Modelarea Matematică prin Matlab*, 2007, [http://thor.info.uaic.ro/~fliacob/An2/2012-2013/Resurse/Relative%20la%20Matlab/Modelare matematica prin Matlab Nicoleta%20Breaz%20si%20altii .pdf](http://thor.info.uaic.ro/~fliacob/An2/2012-2013/Resurse/Relative%20la%20Matlab/Modelare%20matematica%20prin%20Matlab%20Nicoleta%20Breaz%20si%20altii.pdf)
- [Burlina, 1992] Burlina P., DeMenthon D., Davis L. S. – *Probabilistic Navigation Methods for Uncertain and Dynamic Environments*, Pattern Recognition, 1992. Vol.I. Conference A: Computer Vision and Applications, Proceedings., 11th IAPR International Conference on, Pag.312-315. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=201564&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D201564>
- C**
- [Cadena, 2010] Cadena, C. & Neira, J. – *SLAM in $o(\log n)$ with the Combined Kalman-Information Filter*, Robotics and Autonomous Systems 58 (2010) Pag.1207-1219. [http://www.google.ro/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCDMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F234787781%2FSLAM in O%28logn%29 with the Combined Kalman-Information Filter%2Ffile%2F5046351ae21f172f74.pdf&ei=IIrOUqGHGIWxywOL9IKQCQ&usq=AFOjCNGRMGRw3SSA7TXgn5CiUXJ8wYcqLw&bvm=bv.59026428.d.bGQ](http://www.google.ro/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCDMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F234787781%2FSLAM%20in%20O%28logn%29%20with%20the%20Combined%20Kalman-Information%20Filter%2Ffile%2F5046351ae21f172f74.pdf&ei=IIrOUqGHGIWxywOL9IKQCQ&usq=AFOjCNGRMGRw3SSA7TXgn5CiUXJ8wYcqLw&bvm=bv.59026428.d.bGQ)
- [Carmena, 2001] Carmena J., Hallam J. – *Exploiting the physics towards Doppler-based navigation with a bat-inspired mobile robot*, Informatics Research Report EDI-INF-RR-0059, University of Edinburgh, July 2001. <http://www.inf.ed.ac.uk/publications/online/0059.pdf>
- [Carmena, 2001] Carmena J., Hallam J. – *A Doppler-based motion controller for an echolocating mobile robot*, Informatics Research Report EDI-INF-RR-0059, University of Edinburgh, April 2001. <http://www.inf.ed.ac.uk/publications/online/0060.pdf>
- [Carpint, 2003] Carpint S., Pilonetto G. – *Robot Motion Planning Using Adaptive Random Walks*, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, Pag. 3809-3814.
- [Cepișcă, 2004] Cepișcă C. – *Semnale analogice în măsurări*, Editura Electra, București, ISBN 973-7728-07-6, 2004.
- [Chang, 1996] Chang C.C., Song K.T. – *Ultrasonic Sensor Data integration and its Application to Environment Perception*, Journal of Robotic Systems 13(10), Pag.663-677 (1996), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291097-4563%28199610%2913:10%3C663::AID-ROB3%3E3.0.CO;2-T/pdf>
- [Chen, 1999] Chen C.H., Kumar V., Luo Y.C. – *Motion Planning of Walking Robots in Environments with Uncertainty*, Journal of Robotic Systems 16(10), Pag.527-545

- (1999), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291097-4563%28199910%2916:10%3C527::AID-ROB1%3E3.0.CO;2-Q/pdf>
- [Clarentin, 2000] Clarentin A., Delahoche L., Brassart E. – *Cooperation between two omnidirectional perception systems for mobile robot localization*, Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on (Volume:2), Pag.1499-1504.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=893232&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpl%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D893232
- [Collins, 2007] Collins T., Collins J.J., Ryan C. – *Occupancy grid mapping: an empirical evaluation*, Medit. Conf. on Control and Autom., July 2007, Athens.
<http://advantech.gr/med07/papers/T30-032-986.pdf>
- [Crețu, 1984] Crețu T. – *Fizica general*, vol.1, Editura Tehnică, București, 1984
- [Crowley, 1989] Crowley J.L. – *World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging*, IEEE Conference on Robotics and Automation, ICRA 89, Scottsdale Az., Vol 3, pp 1574-1579, May 1989.
<http://venus.inrialpes.fr/jlc/papers/ICRA89-LocalModel.pdf>
- D**
- [Dezert, 1993] Dezert J., Bar-Shalom Y.– *Joint Probabilistic Data Association for Autonomous Navigation*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 29, No. 4 October, Pag. 1275-1286.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=259531&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpl%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D259531
- [Díaz del Río, 2001] Díaz del Río F., G. Jiménez, J. L. Sevillano, S. Vicente, A. Civit Balcells – *A Path Following Control for Unicycle Robots*, Journal of Robotic Systems 18(7), Pag.325-342 (2001).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.1027/pdf>
- [Dobashi, 2012] Dobashi H., Tajima T., Abe T., Nambo H., Kimura H. – *Improvement of Abnormality Detection System for Bathers Using Ultrasonic Sensors*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 179, No. 3, (2012).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eej.21133/pdf>
- [Dolga, 1999] Dolga V. – *Senzori și traductoare*, Ed. Eurobit, Timișoara, 1999
- [Dolga, 2007] Dolga V. – *Proiectarea Sistemelor Mecatronice*, Editura Politehnica, Timișoara, ISBN 978-973-625-573-1, 2007.
- [Dolga, 2008] Dolga V. – *Sisteme de achiziții de date, interfețe și instrumentație virtuală*, Editura Politehnica, Timișoara, ISBN 978-973-625-583-0, 2008.
- [Di Paola, 2009] Di Paola D., Naso D., Turchiano B., Cicirelli G., Distanto A. – *Matrix-Based Discrete Event Control for Surveillance Mobile Robotics*, J Intell Robot Syst (2009) 56: Pag.513–541
http://download.springer.com/static/pdf/105/art%253A10.1007%252Fs10846-009-9326-x.pdf?auth66=1393416798_db80626c3939ff596924c9283bbbccce2&ext=.pdf
- [Dudek, 1996] Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkens D. – *Reflection on modelling a sonar range sensor*, Mc Gill Research Centre for Intelligent Machines, McGill University, Canada, 1996, http://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/integrated2/dudek_snr_mdl.pdf
- E**
- [Ensminger, 2009] Ensminger D., Stulen F.B. – *Ultrasonics : Data, Equations, and Their Practical Uses*, ISBN-13: 978-0-8247-5830-1 (Hardcover), (2009).
http://www.google.ro/books?hl=ro&lr=&id=u2XIPFCbVPqC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Ensminger+D.,++Stulen+F.B.+%E2%80%93+Ultrasonics+:+Data,+Equations,+and+Their+Practical+Uses&ots=yqZ-2qMn0T&sig=B0oL3zUxcdwu5n4-f2joEeusyP0&redir_esc=y#v=onepage&q=Ensminger%20D.%2C%20%20Stulen%2

176 Bibliografie

[OF.B.%20%E2%80%93%20Ultrasonics%20%3A%20Data%2C%20Equations%2C%20and%20Their%20Practical%20Uses&f=false](#)

[Ellison, 2012] Ellison S, s.a. – *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*, Third Edition,

http://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf

F

[Fiala, 2004] Fiala M., Basu A. – *Robot navigation using panoramic tracking*, Pattern Recognition 37 (2004), Pag.2195 – 2215. www.elsevier.com/locate/patcog

[Fonseca, 2001] Fonseca J., Martins J.S., Couto C. – *An Experimental Model For Sonar Sensors*, Dept. of Industrial Electronics, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2001.

http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1690/1/ITM_01.pdf

[Fujimori, 2000] Fujimori A., Teramoto M., Nikiforuk P.N., Gupta M. M. – *Cooperative Collision Avoidance between Multiple Mobile Robots*, Journal of Robotic Systems 17(7), Pag. 347-363 (2000) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1097-4563%28200007%2917:7%3C347::AID-ROB1%3E3.0.CO;2-A/pdf>

G

[Gorie, 2012] Gorie N., Dolga V., Mondoc A., -. Mathematical models in simulation process in rehabilitation of persons with disabilities, ISI Proc.2012 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2012, Viena, Austria, ISBN: 978-0-7354-1105-0, vol.1493, 10-14 Iulie, Pag. 424-431, 2012

[Gupta, n.d.]Gupta M. – *Cognition, perception and uncertainty*, Pag.176-180, 36_25.pdf http://www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/licitic/busefal/Papers/36.zip/36_25.pdf

H

[Hansen, 2009] Hansen E. – *Introduction to sonar*, Course material to INF_GEO 4310, University of Oslo, 2009.http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF-GEO4310/h12/undervisningsmateriale/sonar_introduction_2012_compressed.pdf

[Harmanec, 1999] Harmanec D. – *Measures of uncertainty and information. The Documentation Section on the website of the Society for Imprecise Probability Theory and Applications (SIPTA):* (1999) <http://www.sipta.org>

[Harris, 1997] Harris K.D., Recce M. – *Neural model of a grid-based map for robot sonar*, IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation - Cira 1997, Proceedings, Pag.34 – 39 <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.56.5639&rep=rep1&type=pdf>

[Heath, 2003] Heath S. – *Embedded Systems Design*, EDN series for design engineers, 2003

[Hendriks, 2009] Hendriks L. A. – *Image Processing Techniques for Sector Scan Sonar*, Master thesis, Department of Electrical Engineering, University of Stellenbosch, South Africa, <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/2487>

[Holland, 2004] Holland, J. – *Designing Mobile Autonomous Robots*, Elsevier, ISBN: 0-7506-7683-3, Oxford, 2004

[Howard, 2008] Howard T.M., Green C. J., Kelly A., Ferguson D. – *State Space Sampling of Feasible Motions for High-Performance Mobile Robot Navigation in Complex Environments*, Journal of Field Robotics 25(6-7), Pag.325-345 (2008). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20244/pdf>

[Hu, 1991] Hu H., Brady M., Probert P. – *Coping With Uncertainty in Control and Planning for a Mobile Robot*, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, Nov. 3-5, Osaka, Japan. IEEE Cat. No. 91TH0375-6, (1991) Pag.1025-1030.

I

[Iagnemma, nd] Iagnemma K., Dubowsky S. – *Mobile Robot Rough-Terrain Control (Rtc) For Planetary Exploration*,

http://robots.mit.edu/publications/papers/2000_09_Iag_Dub.pdf

[Iagnemma, 2009] Iagnemma K, s.a. – *Mobile robot rough-terrain control for planetary exploration*, 2000_09_Iag_Dub.pdf

[Inanc, 2012] Inanc T., Dinha H. – *Low-Cost Autonomous Mobile Robotics Experiment: Control, Vision, Sonar, and Handy Board*, Computer Applications in Engineering Education Volume 20, Issue 2, Pag.203–213, June 2012., <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cae.20386/pdf>

[Ippoliti, 2005] Ippoliti G., L. Jetto, Longhi S. – *Localization of Mobile Robots: Development and Comparative Evaluation of Algorithms Based on Odometric and Inertial Sensors*, Journal of Robotic Systems, Vol. 22, Issue 12, Pag. 725–735, (2005). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20095/pdf>

J

[Jin, 2004] Jin T.S., Lee J.M. – *A New Space and Time Sensor Fusion Method for Mobile Robot Navigation*, Journal of Robotic Systems 21(7), Pag.389–400 (2004).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20021/pdf>

[Jousselme, 2003] Jousselme A.J., Maupin P., Bosse E. – *Uncertainty in a Situation Analysis Perspective*, 2003

<http://isif.org/fusion/proceedings/fusion03CD/regular/r186.pdf>

K

[Kaess, 2009] Kaess M., Dellaert F. – *Covariance recovery from a square root information matrix for data association*, Robotics and Autonomous Systems 57 (2009) Pag.1198-1210. <http://people.csail.mit.edu/kaess/pub/Kaess09ras.pdf>

[Kane, 2008] Kane S.A. – *Ultrasound Imaging Physics*, Physics Department, 370 Lancaster Avenue, Haverford College, Updated 2008

<http://docs.google.com/gview?url=http://www.haverford.edu/physics/Amador/documents/211-8UltrasoundImaging.doc&chrome=true>

[Kleeman, 2008] Kleeman L, Kuc R. – *Sonar Sensing*, Springer Handbook of Robotics, 2008, Pag. 491-519.

http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-540-30301-5_22

[Kramer, 2012] Kramer J., Kandel A. – *On Accurate Localization and Uncertain Sensors*, International Journal Of Intelligent Systems, Vol. 27, Pag.429–456 (2012).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/int.21530/pdf>

[Krantz, 1996] Krantz D., Gini M. – *Non-Uniform Dead-Reckoning Position Estimate Updates*, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota - April 1996, Pag. 2061-2066.

[Klir, 1999] Klir G., J. – *Uncertainty and Information Measures for Imprecise Probabilities: An Overvie*, International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications, 29 June - July 2, 1999, Ghent, Belgium.

[Klir, 2006] Klir J.G., *Uncertainty and information. Foundations of generalized information theory*, John Wiley&Sons, New Jersey, 2006,

http://books.google.ro/books?id=G8ZkeSfnLGwC&pg=PA468&lpg=PA468&dq=Klir+J.G.,+Uncertainty+and+information.+Foundations+of+generalized+information+theory&source=bl&ots=Xy-wgBfota&sig=O6AdKZIDzmg8ueKLS_b82G-ECgs&hl=ro&sa=X&ei=HkoLU9P8MumAywOZx4G4CA&ved=0CDsQ6AEwAQ#v=onepage&q=Klir%20J.G.%2C%20Uncertainty%20and%20information.%20Foundations%20of%20generalized%20information%20theory&f=false

[Kolski, 2007] Kolski, S. – *Mobile Robots. Perception & Navigation*, Advanced Robotic Systems International, ISBN 3-86611-283-1, Croatia, 2007

178 Bibliografie

- [Kouichi, 2002] Kouichi I., Kouichiro S., Yi W., Jing-Wen T., Kenji K., Takashi I., Yasutomo F. – *A New Method for Attenuation Coefficient Measurement in the Liver Comparison With the Spectral Shift Central Frequency Method*, J Ultrasound Med 21:783–788, 2002, <http://www.jultrasoundmed.org/content/21/7/783.full>
- [Kovacs, 2001] Kovacs F. V. – *Structural and Kinematical Modelling of Mechanical Systems of Mobile Robots using the concept "Pairs of Reference Systems"(PRS)*, The 2 nd National Workshop on Mobile Robots – WMRC – 2001, Craiova, Romania, October 18-19, 2001, pp. 38 – 44, ISBN: 973-8043-39-5
- [Kuc, 1999] Kuc R., Siegel M.W. – *Physically-based simulation model for acoustic sensor robot navigation*, IEEE Trans
- [Kuipers,1991] Kuipers B. and ByunY.T. – *A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations*, Journal of Robotics and Autonomous Systems 8: 47–63.
<ftp://ftp.cs.utexas.edu/pub/qsim/papers/Kuipers+Byun-jras-91.pdf>
- L**
- [Lamon, 2008] Lamon P. – *3D-Position Tracking and Control for All-Terrain Robots*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 43, 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg
http://www.google.ro/books?hl=ro&lr=&id=EOAI7I5ic6YC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Lamon+P.+%E2%80%93+3D-Position+Tracking+and+Control+for+All-Terrain+Robots&ots=adHtMtC_oJ&sig=z5IYPku2tTJ5lwwKqdsTRyg73HQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Lamon%20P.%20%E2%80%93%203D-Position%20Tracking%20and%20Control%20for%20All-Terrain%20Robots&f=false
- [Laumond, 1985] Laumond J.P. – *Enumeration of articulation pairs of a planar graph*. Information Processing Letters, Vol. 21, N. 4, pp.173-179, Octobre 1985
- [Leighton, 2012] Leighton T.G., Balleri A. – *Biologically-inspired radar and sonar systems*, IET Radar Sonar Navig., 2012, Vol. 6, Iss. 6, Pag. 507–509, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6232402>
- [Larin, 2005] – Larin V. B. – *Motion Planning For A Wheeled Robot (Kinematic Approximation)*, International Applied Mechanics, Vol. 41, No. 2, Pag.187-196, (2005). <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10778-005-0076-6#page-1>
- [Lin, 1997] Lin H.Y. – *Autonomous mobile robot*, National Chung Cheng University http://vision.ee.ccu.edu.tw/CourseData/97_MR/chap5.pdf
- [Lui, 2009] Lui K.W.K., So H.C. – *A study of two-dimensional sensor placement using time-difference-of-arrival measurements*, Digital Signal Processing 19 (2009), Pag.650–659.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.153.2956&rep=rep1&type=pdf>
- M**
- [Martinelli,2002] Martinelli A. – *The odometry error of a mobile robot with a synchronous drive systems*, IEEE Transactions On Robotics And Automation, Vol. 18, No. 3, June 2002, Pag.399 – 405,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01019477>
- [Minami, 2007] Minami M., Ikeda T., Takeuchi M. – *Dynamical Model Of Mobile Robot Including Slipping Of Carrying Objects*, International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 3 ,Number 2 ,April 2007.
<http://www.ijicic.org/06-023-1.pdf>
- [Mamoru ,2007] Mamoru, M., s.a. – *Dynamical model of mobile robot including slipping of carrying objects*, Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, v. 3, no.2, april 2007, p.353-369

- [Mirats Tur, 2005] Mirats Tur J.M., Gordillo J.L., Borja C.A. – *A Closed-Form Expression for the Uncertainty in Odometry Position Estimate of an Autonomous Vehicle*, IEEE Transactions On Robotics, Vol. 21, No. 5, October 2005, Pag.1017 – 1022. http://digital.csic.es/bitstream/10261/12834/1/Closed-form_expression.pdf
- [Mărginean, 2005] Mărginean N.- *On the Handling of Uncertainty*, Revista Informatica Economică, nr. 4 (36)/2005, Pag. 102-107, (2005). <http://revistaie.ase.ro/content/36/marginean.pdf>
- [McFarland, 1993] McFarland D, Bösser T. – *Intelligent Behavior in Animals and Robots*, ISBN 0-262-13293-1, (1993)
- [Meger, 2009] Meger D., Marinakis D., Rekleitis I., Dudek G. – *Inferring a Probability Distribution Function for the Pose of a Sensor Network using a Mobile Robot*, IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe, Japan, May 12-17, 2009, Pag. 756-762. http://www.cs.ubc.ca/labs/lci/curious_george/pubs/icra09.pdf
- [Mihoc, 1980] Mihoc G., Micu N.- *Teoria probabilităților si statistică matematică*, E. D.P., Bucuresti, 1980
- [Modi, 2002] Modi S. – *Comparison of three obstacle avoidance methods for an autonomous guided vehicle*, Master of science, University of Cincinnati , 2002. http://milkyway.mie.uc.edu/robotics/papers/theses/theses2002/sachinthesis_ver2.pdf
- [Mondoc, 2010] Mondoc A. – *Aspects of mathematical analysis and estimate trajectories of mobile*, SCIENTIFIC BULLETIN of the „POLITEHNICA”, University of Timișoara, Romania, Transactions on MECHANICS Tomul 55(69), Fascicola 2, 2010,ISSN 1224-6077
- [Mondoc, 2012] Mondoc A. – *Mathematical Analysis and Estimation Issues in Mobile Robots Trajectories*, Workshop-ul nr. 2 Interdisciplinaritatea și Managementul cercetării în studiile doctorale, Universitatea din Oradea, România, iunie 2012, pp.4
- [Mondoc, 2012] Mondoc A., Dolga V., Gorie N. – *Methods in the analysis of mobile robots behavior in unstructured environment*, ISI Proc.2012 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2012, Viena, Austria, ISBN: 978-0-7354-1105-0, vol.1493, 10-14 Iulie, Pag. 661-665, 2012
- [Mondoc, 2013] Mondoc A. – *Probabilistic and Possibilistic Modeling for the Trajectory Analysis Mobile Robots*, Workshop-ul nr. 3 Interdisciplinaritatea și Managementul cercetării, Universitatea din Pitești, România, Mai, 2013, pp. 3
- [Moravec, 1985] Moravec P., Elfes A.E.- *High Resolution Maps from Wide Angle Sonar*, proceedings of the 1985 ASME conference on Computers in Engineering, Boston, August, 1985
- [Mubarak, 2013] Mubarak M. N. – *Outdoor obstacle detection using ultrasonic sensors for an autonomous vehicle safe operations*, Master of Science, Tampere University of Technology, 2013 <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21422/Mubarak.pdf?sequence=3>
- [Muralidharan, 2001] Muralidharan A. – *Sonar Based Navigation: Follow the Leader for Bearcat III*, Master of Science, University of Cincinnati, 2001. https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/ucin998320900/inline
- [Murty, 2003] Murty V. – *Obstacle avoidance in unstructured environment for the bearcat*, Master of science, University of Cincinnati, 2003 http://www.min.uc.edu/robotics/papers/theses/theses2003/SagarThesis_2003.pdf
- [Müller, 2009] Müller J., Rottmann A., Reindl L. M., Burgard W. – *A Probabilistic Sonar Sensor Model for Robust Localization of a Small-size Blimp in Indoor*

Environments using a Particle Filter, IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe, Japan, May 12-17, 2009, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5152283>

N

[Nagashima, 1992] Nagashima Y., Yuta S. – *Ultrasonic Sensing For A Mobile Robot To Recognize An Environment - Measuring The Normal Direction Of Walls*, Intelligent Robot Laboratory Inst. of Information Science and Electronics, University of Tsukuba, Japan, Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on, Volume: 2,

http://www.researchgate.net/publication/3690734_Ultrasonic_Sensing_For_A_Mobile_Robot_To_Recognize_An_Environment_-_Measuring_The_Normal_Direction_Of_Walls

[Nam, 1996] Nam Y. S., Lee B. H., Kim M. S. – *View-Time Based Moving Obstacle Avoidance using Stochastic Prediction of Obstacle Motion*, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota - April 1996, Pag.1081-1086.

[Nițulescu, 2002] Nițulescu M. – *Sisteme robotice cu capacitate de navigație*, Editura Universitară Craiova, 2002

O

[Ohya, 1996] Ohya .A, Takayuki Ohno T, Yuta S – *Obstacle Detectability of Ultrasonic Ranging System and Sonar Map Understanding*, Intelligent Robot Laboratory Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba Tsukuba 305, JAPAN, Robotics and Autonomous Systems 01/1996.

<http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/~ohya/pdf/RAS1996-ONO.pdf>

[Ojeda, 2002] Ojeda L., Borenstein J. – *FLEXnav: Fuzzy Logic Expert Rule-based Position Estimation for Mobile Robots on Rugged Terrain*, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC, USA, 10 - 17 May 2002, Pag. 317-322

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.101.8333&rep=rep1&type=pdf>

[Otomanski, 2008] Otomanski P., Szlachta A. –*The evaluation of expanded uncertainty of measurement results in divert measurements using the LabView environment*, *Measurement Science Review*, v. 8, no.6, p.147, 2008

[Otte, 2009] Otte M. W., Richardson S.G., Mulligan J., Grudic G. – *Path Planning in Image Space for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environments*, *Journal of Field Robotics* 26(2), Pag.212-240 (2009).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20274/pdf>

[Okada, 2011] Okada Y., Nagatani K. and Yoshida K., Tadokoro S., Yoshida T., Koyanagi E. – *Shared Autonomy System for Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning*, *Journal of Field Robotics* 28(6), Pag.875-893 (2011),

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20416/pdf>

P

[Patil, 2012] Patil S., Van den Berg J., Alterovitz R.– *Estimating Probability of Collision for Safe Motion Planning under Gaussian Motion and Sensing Uncertainty*, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18, Pag.3238-3244.

http://robotics.cs.unc.edu/publications/Patil2012_ICRA.pdf

[Petrehus, 2005] Petrehus V., Popescu S.A. – *Probabilitati si Statistica*, Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti, 2005.

<http://civile.utcb.ro/cmat/cursrt/psvp.pdf>

[Perju, 1985] Perju D. – *Asupra sintezei mecanismelor cu element flexibil*, in Proceedings of SYROM`85, Vol.I-2, Bucuresti, 1985

[Pruna, 2006] Pruna L., Slonovschi A., Antonescu I. – *Geometrie descriptiva*, Editura Societatii Academice "Matei-Teiu Botez", Iasi, 2006, (ISBN (10) 973-7962-95-8; ISBN (13) 978-973-7962-95-9)

R

[Rajagopalan, 1997] Rajagopalan R., Barakat N. – *Velocity Control of Wheeled Mobile Robots Using Computed Torque Control and Its Performance for a Differentially Driven Robot*, Journal of Robotic Systems 14(4), Pag.325–340 (1997).
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291097-4563%28199704%2914:4%3C325::AID-ROB%3E3.0.CO;2-S/pdf>

[Ribeiro, 2004] Ribeiro M. I., – *Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties*, Institute for Systems and Robotics - Instituto Superior T´ecnico Lisboa, Portugal 2004.

[Ribeiro, 2004] Ribeiro M. I. – *Gaussian Probability Density Functions: Properties and Error Characterization*, February, 2004.

[Ribeiro, 2005] Ribeiro M. I. – *Obstacle Avoidance*, 2005.

[Ross, 2010] Ross S. – *A First Course In Probability*, University of Southern California, ISBN-10: 0-13-603313-X

http://ins.sjtu.edu.cn/people/lqyan/Teaching/TeachingPDF/Ross_8th_ed_English.pdf

[Rozhok, 2008] Rozhok, A. – *Orientation and Navigation in Vertebrates*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-78718-1, 2008

[Roberts, 2009] Roberts R., Pippin C., Balch T. – *Learning Outdoor Mobile Robot Behaviors by Example*, Journal of Field Robotics 26(2), Pag.176–195 (2009),
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20278/pdf>

S

[Seifzadeh, 2009] Seifzadeh S., Wu D., Wang Y., 2009 – *Cost-effective Active Localization Technique for Mobile Robots*, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 19 -23, 2009, Guilin, China, Pag.539-543.

[Sermanet, 2009] Sermanet P., Hadsell R., Scoffier M., Grimes M., Ben J., Erkan A. – *A Multirange Architecture for Collision-Free Off-Road Robot Navigation*, Journal of Field Robotics 26(1), Pag. 52–87 (2009).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20270/pdf>

[Sharma, 2012] Sharma S., Kulczycki E.A., Elfes A. – *Trajectory Generation and Path Planning for Autonomous Aerobots*,

<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40295/1/06-2962.pdf>

[Sharma, 1993] Sharma R., Mount D. M., Aloimonos Y. – *Probabilistic Analysis of Some Navigation Strategies in a Dynamic Environment*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol 23. No 5. September / October, 1993, Pag. 1465-1474.

[Smets, 1999] Smets P. – *Imperfect information: Imprecision – uncertainty*, IRIDIA, Univ. Libre de Bruxells, July 27, 1999.

http://sites.poli.usp.br/d/pmr5406/Download/papers/Imperfect_Data.pdf

[Song, 1999] Song K.T., Chang C.C. – *Navigation Integration of a Mobile Robot in Dynamic Environments*, Journal of Robotic Systems 16(7), Pag.387 404, (1999).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291097-4563%28199907%2916:7%3C387::AID-ROB%3E3.0.CO;2-1/pdf>

[Song, 2004] Song J.B., Byun K.S. – *Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels*, Journal of Robotic Systems 21(4), Pag.193–208 (2004).

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20009/pdf>

[Sossai, 2001] Sossai C., Bison P., Chemello G. – *Fusion of Symbolic Knowledge and Uncertain Information in Robotics*, International Journal Of Intelligent Systems, Vol. 16, Pag.1299–1320 (2001). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/int.1061/pdf>

[Sprunk, 2012] Sprunk C., Lau B., Burgard W. – *Improved Non-linear Spline Fitting for Teaching Trajectories to Mobile Robots*, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18, Pag. 2068 - 2073, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6224920>

[Suquet, n.d.] Suquet C. – *Probabilités géométriques*, U.F.R. de Mathématiques Pures et Appliquées Université des Sciences et Technologies de Lille. <http://math.univ-lille1.fr/~suquet>

T

[Taheri-Kalani, 2013] Taheri-Kalani J. and Khosrowjerdi M. J. – *Adaptive trajectory tracking control of wheeled mobile robots with disturbance observer*, International Journal Of Adaptive Control And Signal Processing Int. J. Adapt. Control Signal Process. (2013). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acs.2382/pdf>

[Tatar, 2007] Tatar O., Mandru D., Breaz V. – *Miniature robot with applications in biomedical engineering*, Annals of the Oradea Univ., Fasc. of Manag. And Tech. Eng., v. VI, 2007, Pag.1057 - 1062

[Terekhov, 2011] Terekhov A. V., Mouret J-B, Grand C. – *Stochastic optimization of a chain sliding mode controller for the mobile robot maneuvering*, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 25-30, 2011. San Francisco, CA, USA., Pag.4360-4365.

<http://www.isir.upmc.fr/files/2011ACTI2119.pdf>

[Thrun, 1999-2000] Thrun S., Burgard W., Fox D., – *Probabilistic Robotics*, 1999-2000. <http://www.probablistic-robotics.org>

[Thrun, 2000] Thrun S., 2000 – *Probabilistic Algorithms in Robotics*, April 2000 CMU-CS-00-126 School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213.

[Thrun, 2001] Thrun S., Fox D., Burgard W., Dellaert F., 2001 – *Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots*, Artificial Intelligence, Summer 2001. <http://robots.stanford.edu/papers/thrun.robust-mcl.pdf>

[Toledo, 2000] Toledo F.J., Luis J.D., Tom L.M., Zamora M.A., Martinez H. – *Map building with ultrasonic sensors of indoor environments using neural networks*, Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on (Volume:2). http://www.ieeeexplore.net/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=885967&searchWitin%3DSearch_Index_Terms%3A.QT.Sonar+navigation.QT.%26rowsPerPage%3D50

V

[Vacareanu, 2011] Vacareanu R. – *Siguranta structurilor la actiuni seismice si climatice. Note de curs pentru anul I – Master, 2011*, Facultatea de Constructii Civile, Industriale si Agricole. Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti.

[Vâlcovici, 1968] Vâlcovici V., Bălan F., Voinea R. – *Mecanică teoretică*, Ed. Tehnică, Buc., 1968

[Vertan, 1999] Vertan C., Gavăt I., Stoian R. – *Variabile si Procese Aleatoare: Principii, si aplicatii*, 23 mai 1999.

http://www.miv.ro/books/CVertan_VPA.pdf

[Vidal, 2002] Vidal R., Shakernia O., Kim H. J., Hyunchul Shim D., Sastry S. – *Probabilistic Pursuit-Evasion Games: Theory, Implementation and Experimental Evaluation*, IEEE Transactions On Robotics And Automation, Vol. 18, No. 5, 2002, Pag.662-669.

X

[Xuguang, 2010] Xuguang Z, Honghai L, Xiaoli L. – *Target tracking for mobile robot platforms via object matching and background anti-matching*, Robotics and Autonomous Systems 58, 2010, Pag.1197–1206.

<http://www.google.ro/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fzenithlib.googlecode.com%2Fsvn%2Ftrunk%2Fpapers%2Ftracking%2F2010->

[Target_tracking_for_mobile_robot_platforms_via_object_matching_and_background_anti-matching.pdf&ei=jgPOUpKwIcifyQO7uYDoAq&usq=AFQjCNG8x3mo1zEZ6aIHG8HFB2pS1vqqgw&bvm=bv.59026428,d.bGQ](http://www.google.ro/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fzenithlib.googlecode.com%2Fsvn%2Ftrunk%2Fpapers%2Ftracking%2F2010-Target_tracking_for_mobile_robot_platforms_via_object_matching_and_background_anti-matching.pdf&ei=jgPOUpKwIcifyQO7uYDoAq&usq=AFQjCNG8x3mo1zEZ6aIHG8HFB2pS1vqqgw&bvm=bv.59026428,d.bGQ)

Y

[Yang, 2011] Yang Y., s.a., *Control Laws Design and simulation validation of Autonomous mobile robot off-round trajectory tracking, Applications of MATLAB in Science and Engineering*, ISBN 978-953-307-708-6, Pag 353 – 370

<http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/18571>

Z

[Zhang, 2011] Zhang J., Zeng Y., Liu H., Hu Y., Zhang J. – *MBHP: a Memory-Based Method on Robot Planning under Uncertainties*, Proceedings of the 2011 IEEE, International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011, Phuket, Thailand

[Zhang, 2012] Zhang F., Stähle H., Gaschler A., Buckl C., Knoll A. – *Single Camera Visual Odometry Based on Random Finite Set Statistics*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal, Pag.559 – 566.

<http://www6.in.tum.de/Main/Publications/Zhang2012b.pdf>

[Zouaghi, 2011] Zouaghi L., Alexopoulos A., Wagner A., Badreddin E. – *Probabilistic Online-Generated Monitoring Models for Mobile Robot Navigation using Modified Petri net*, The 15th International Conference on Advanced Robotics Tallinn University of Technology Tallinn, Estonia, June 20-23, 2011, Pag.594-599

W

[Waite, 2002] Waite A.D. – *Sonar for Practising Engineers*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002

[Werb, 1998] Werb Z., and Yan Y.B. – *Cell biology: A cellular striptease act. Science* 282(5392): 1279-1280, 1998.

[Wongwirat, 2011] Wongwirat O., Anuntachai A. – *Searching Energy-Efficient Route for Mobile Robot with Ant Algorithm*, 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems Oct. 26-29, 2011 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, Pag.1071-1075. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-33503-7_20#page-1

[***1] ***, <http://ro.wikipedia.org/wiki/Robotic%C4%83>

[***2]***, Ultrasonic Sensor, Application Manual, Murata Manufacturing Co., Ltd., ultrasonic-sensors.pdf,

<http://www.symmetron.ru/suppliers/murata/files/pdf/murata/ultrasonic-sensors.pdf>

[***3] *** http://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors/People_Sensors.htm

[***4] *** <http://www.parallax.com/product/28015>

[***6]***, Mărime – definiții,

<http://www.webdex.ro/online/dictionar/m%C4%83rime>

[***12] ***<http://www.math.mtu.edu/~msgocken/intro/intro.html>

[***13] *** Global Positioning System Overview,

<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>

184 Bibliografie

[***14]

***http://www.robofun.ro/senzori/infrarosu/senzor_sharp_%20GP2Y0A21YK

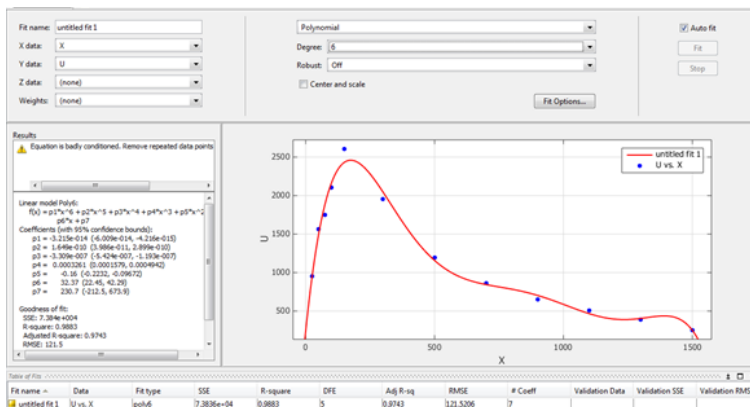
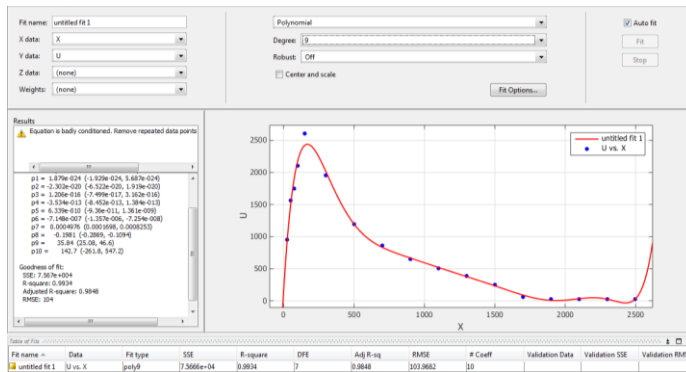
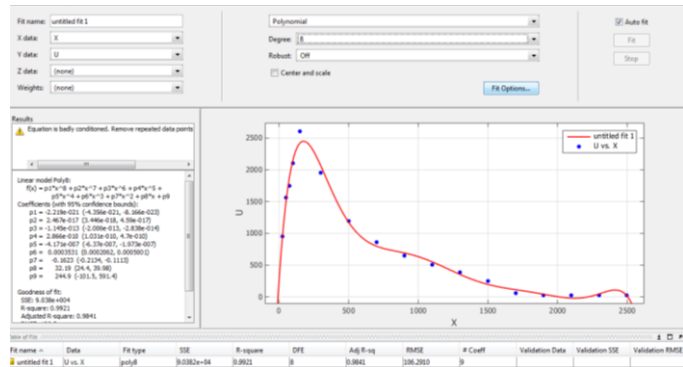
[***15] ***http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_function

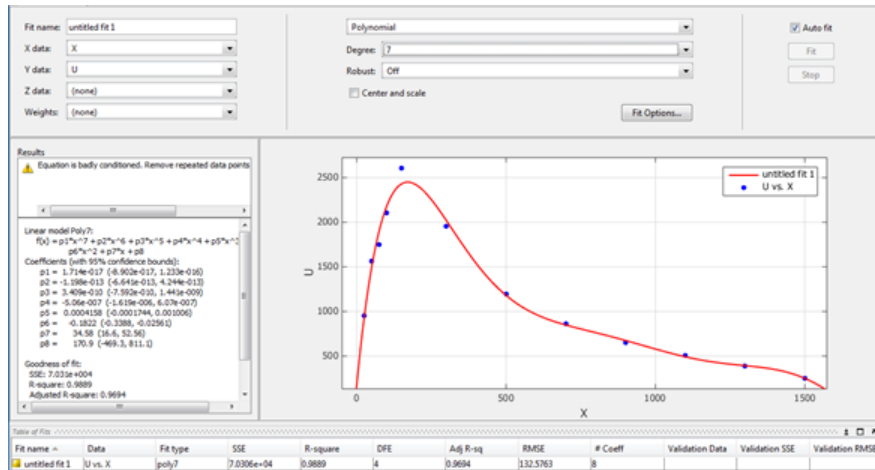
[***16] ***, Planul Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare 2007 - 2013,
<http://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/ROST/PN2ro.pdf>

ANEXE

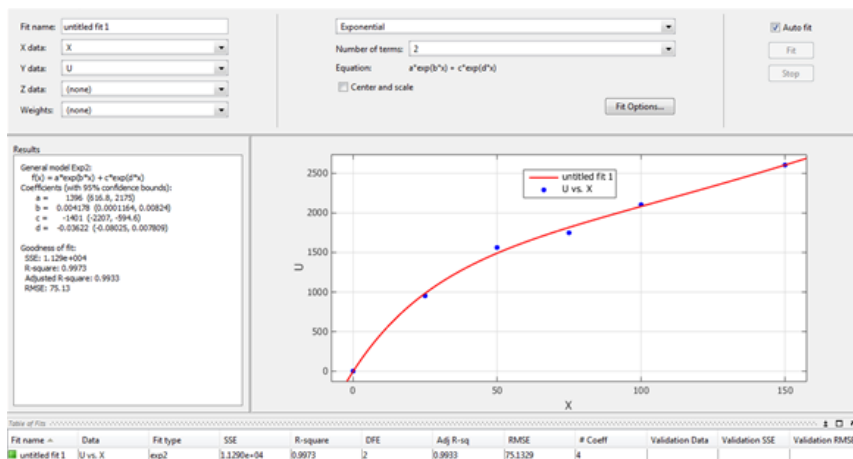
Anexa 4.1

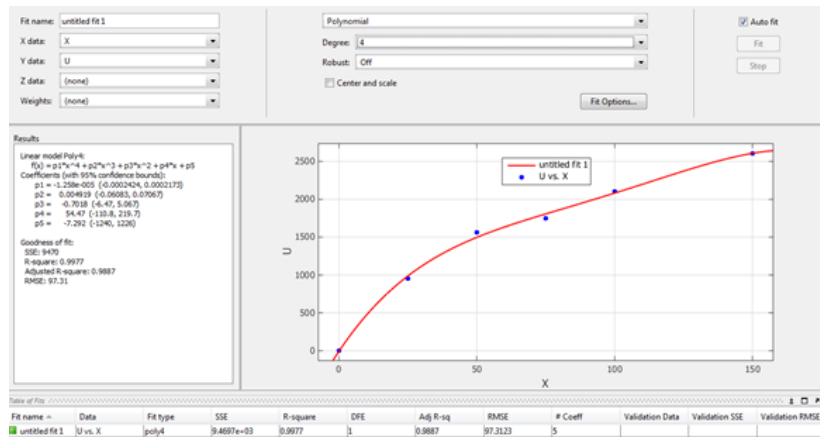
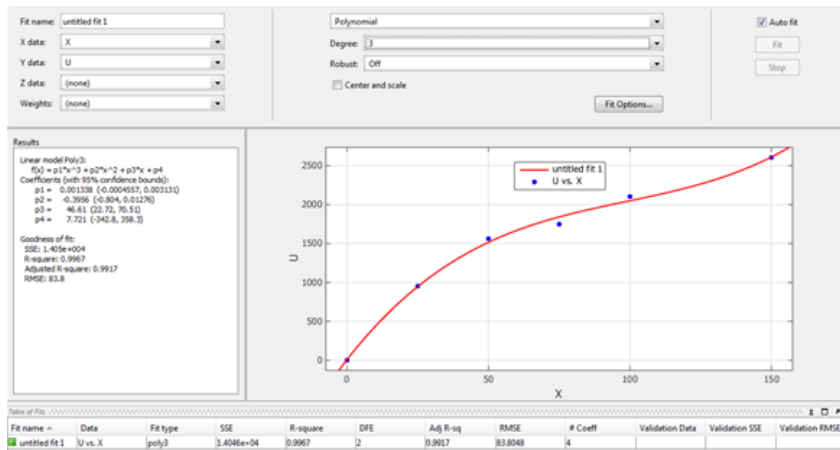
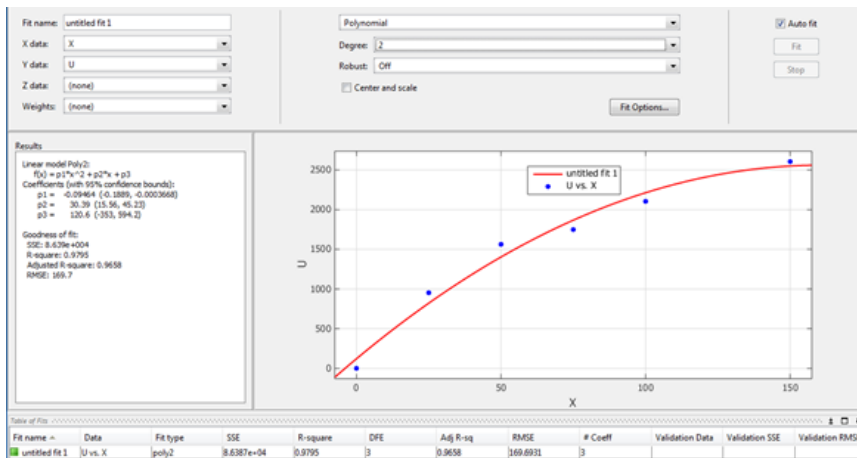
Caracteristica directă a senzorului în IR



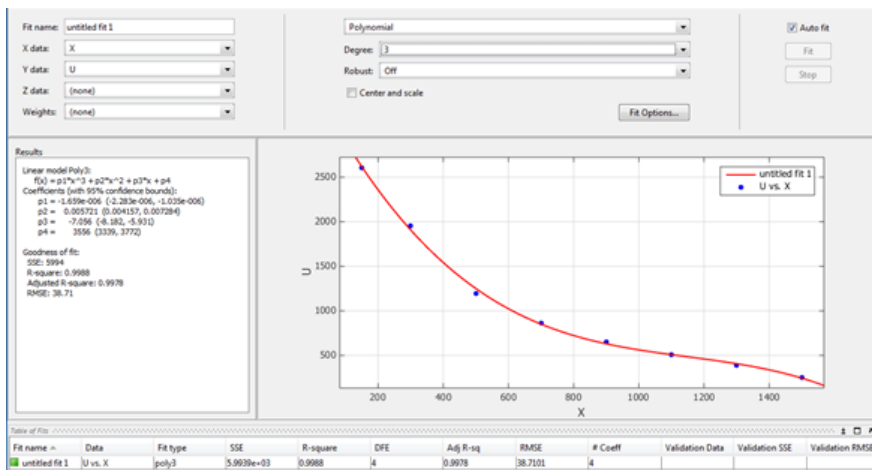
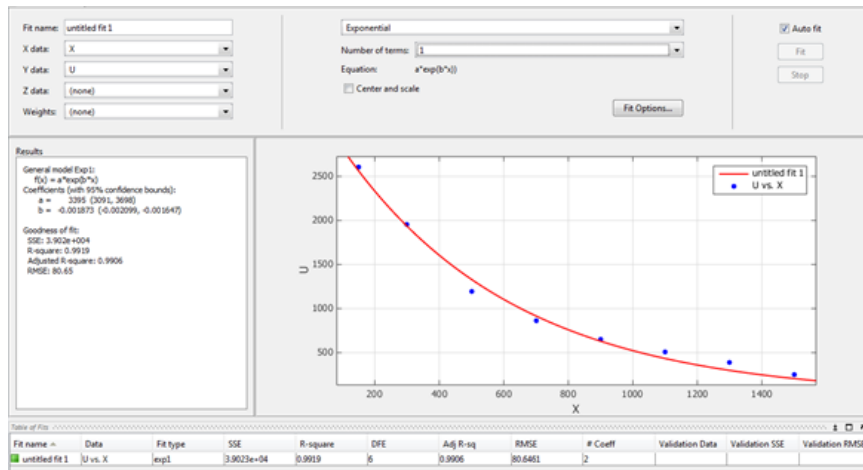
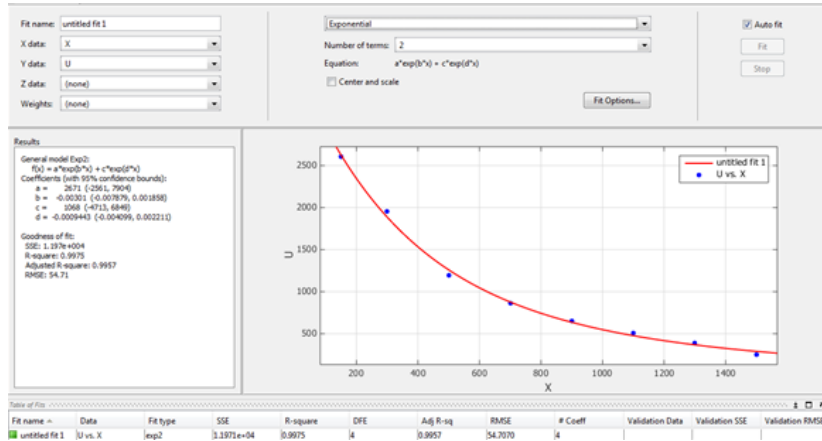


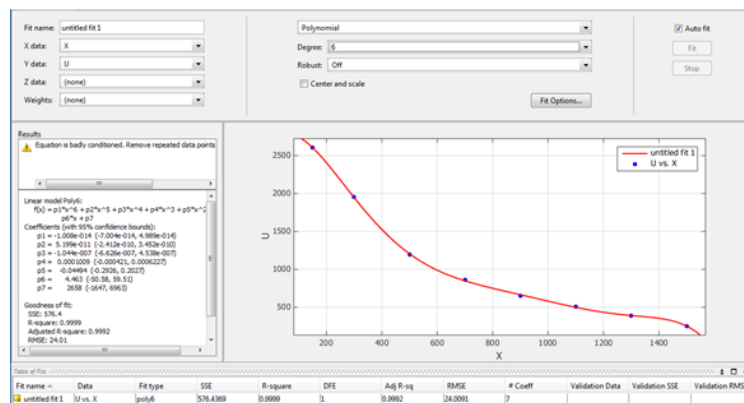
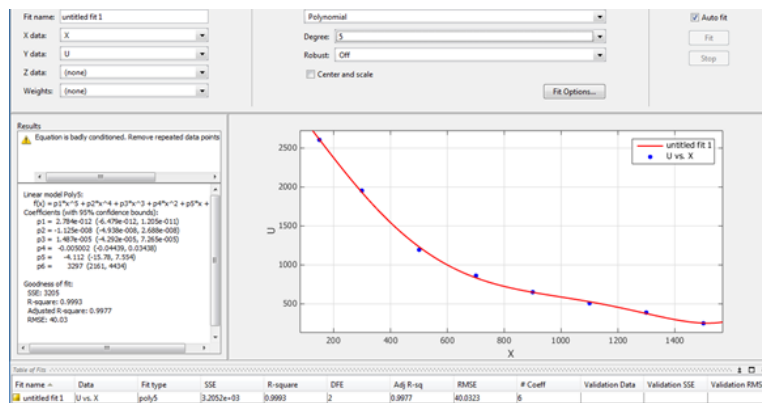
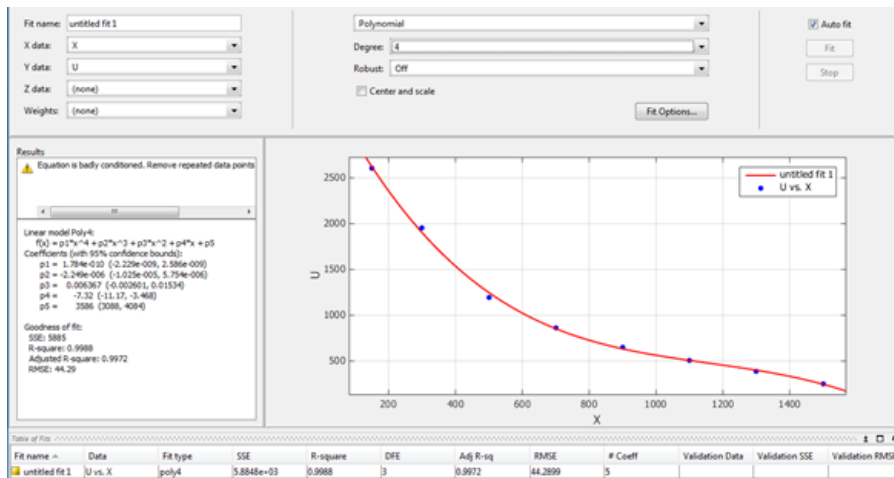
Aproximarea ramurii **a** din caracteristica directă (6 puncte)

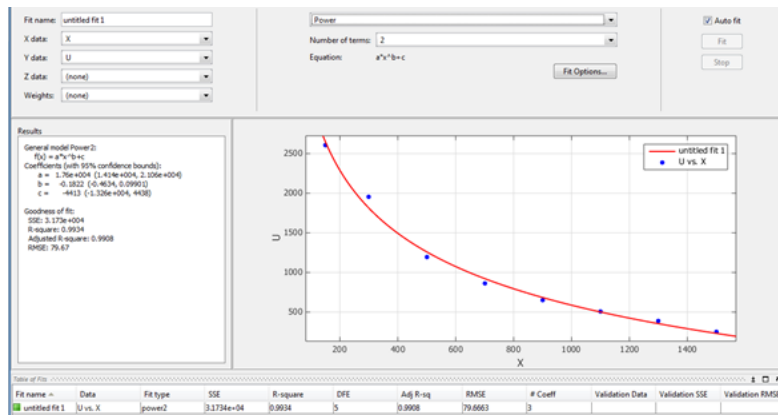
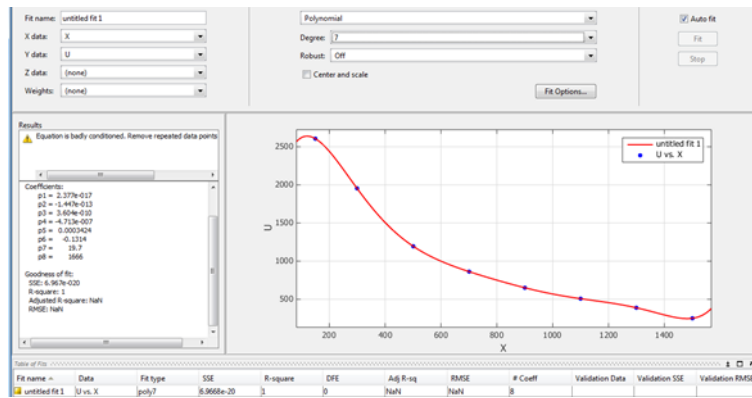




Aproximarea ramurii **b** din caracteristica directă (8 puncte)







Anexa 6.1

Rezultate din experimentele de localizare a unui obstacol paralelipedic

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (- 50 mm)

Tabel 6.1.1 Valori statistice

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
2598	10	0.256
2599	23	0.590
2600	5	0.128
2602	1	0.026

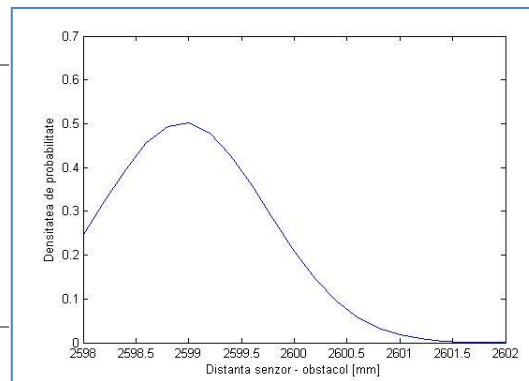
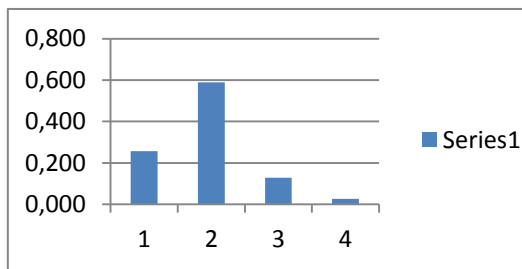


Figura 6.1.1 Reprezentarea ponderilor prin histogramă

Figura 6.1.2 Densitate de probabilitate

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (+130 mm)

- $d_L = 2598$ mm
- Valoarea medie: $\bar{d} = 2604.2564$ mm
- Deviația standard: $\sigma = 1.250641$

Tabel 6.1.2 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2604	11	2604	21	2605	31	2604
2	2607	12	2604	22	2604	32	2604
3	2604	13	2604	23	2604	33	2610
4	2604	14	2604	24	2605	34	2604
5	2604	15	2604	25	2604	35	2604
6	2604	16	2604	26	2602	36	2605
7	2603	17	2604	27	2605	37	2604
8	2604	18	2605	28	2604	38	2604
9	2604	19	2604	29	2602	39	2605
10	2604	20	2603	30	2605	40	2603

Tabel 6.1.3 Valori statistice

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
------------------------	-----------------	------------------------------------

2602	2	0.051
2603	2	0.051
2604	26	0.667
2605	7	0.179
2607	1	0.026
2610	1	0.026

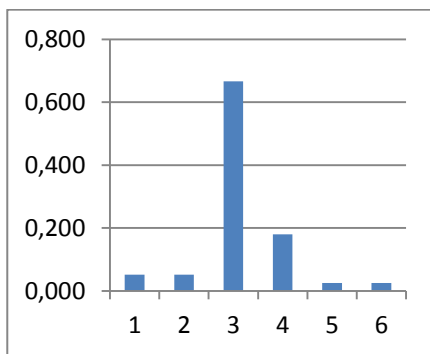


Figura 6.1.3 Reprezentarea ponderilor prin histogramă

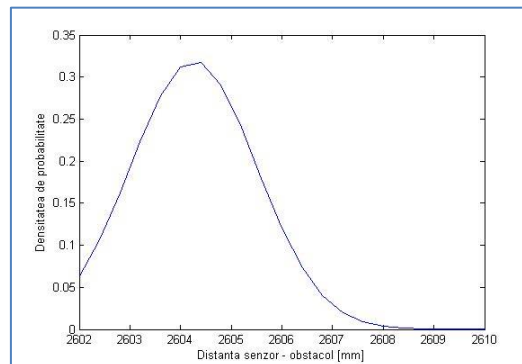


Figura 6.1.4 Densitate de probabilitate

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (- 130 mm)

- Valoarea medie: $\bar{d} = 2615.436 \text{ mm}$
- Deviația standard: $\sigma = 1.353259$

Tabel 6.1.4 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2615	11	2616	21	2615	31	2615
2	2615	12	2615	22	2616	32	2615
3	2615	13	2611	23	2615	33	2615
4	2615	14	2616	24	2615	34	2616
5	2615	15	2615	25	2615	35	2616
6	2620	16	2615	26	2615	36	2616
7	2616	17	2615	27	2620	37	2616
8	2615	18	2616	28	2615	38	2615
9	2615	19	2616	29	2616	39	2615
10	2615	20	2615	30	2615	40	2615

Tabel 6.1.5 Valori statistice

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
2611	1	0.026
2615	25	0.641
2616	11	0.282

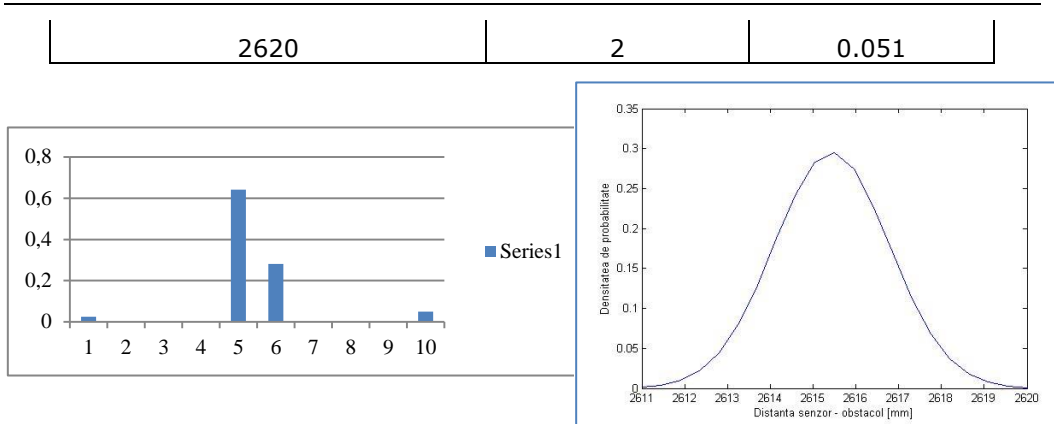


Figura 6.1.5 Reprezentarea ponderilor prin histogramă

Figura 6.1.6 Densitate de probabilitate

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (- 170 mm)

- $d_L = 2600$ mm
- Valoarea medie $\bar{d} = 2605.436$ mm
- Dispersia $\sigma = 0.680359$

Tabel 6.1.6 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2605	11	2605	21	2605	31	2605
2	2605	12	2607	22	2607	32	2605
3	2607	13	2605	23	2605	33	2606
4	2605	14	2605	24	2605	34	2605
5	2605	15	2606	25	2606	35	2605
6	2606	16	2605	26	2605	36	2606
7	2605	17	2605	27	2605	37	2605
8	2605	18	2607	28	2607	38	2605
9	2606	19	2605	29	2605	39	2606
10	2605	20	2605	30	2605	40	2605

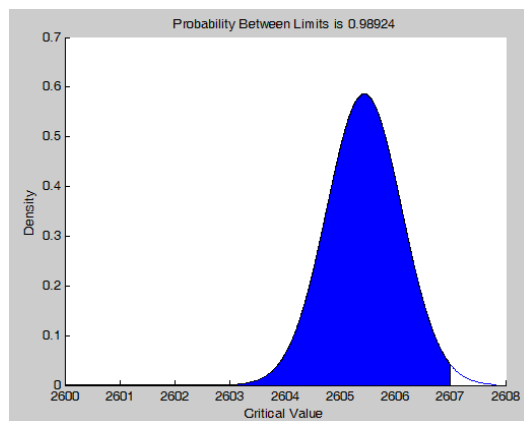


Figura 6.1.7 Densitate de probabilitate

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (- 220 mm)

- Valoare de referință – telemetru laser $d_L = 2603$ mm
- Valoarea medie $\bar{d} = 2618.316$ mm
- Dispersia $\sigma = 1.016227$

Tabel 6.1.7 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2618	11	2618	21	2618	31	2619
2	2618	12	2618	22	2618	32	2618
3	2618	13	2614	23	2620	33	2618
4	2620	14	2618	24	2618	34	2618
5	2618	15	2620	25	2618	35	2620
6	2618	16	2618	26	2618	36	2618
7	2618	17	2619	27	2619	37	2618
8	2619	18	2618	28	2618	38	2619
9	2619	19	2620	29	2618	39	2619
10	2618	20	2618	30	2618	40	2618

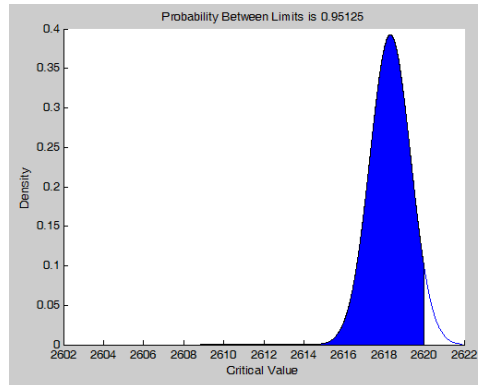


Figura 6.1.8 Densitate de probabilitate

Obstacol poziționat asimetric față de axa longitudinală (- 260 mm)

- Valoare de referință – telemetru laser $d_L = 2607$ mm
- Valoarea medie $\bar{d} = 2625.974$ mm
- Dispersia $\sigma = 3.344179$

Tabel 6.1.8 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2620	11	2626	21	2629	31	2626
2	2629	12	2624	22	2629	32	2629
3	2629	13	2629	23	2625	33	2626
4	2625	14	2626	24	2620	34	2629
5	2629	15	2625	25	2629	35	2625
6	2616	16	2626	26	2629	36	2624
7	2625	17	2629	27	2629	37	2624
8	2629	18	2629	28	2625	38	2624
9	2625	19	2629	29	2624	39	2617
10	2626	20	2629	30	2625	40	

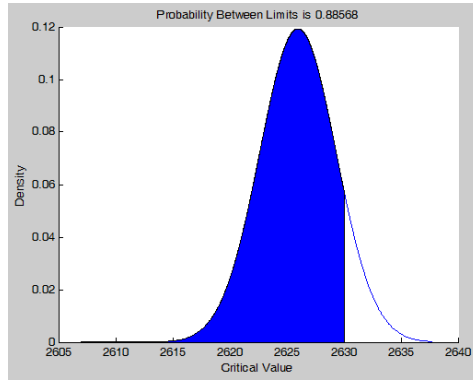


Figura 6.1.9 Densitate de probabilitate

Anexa 6.2

Prelucrarea datelor experimentale referitoare la localizarea unui obstacol pe baza senzorului ultrasonic Parallax

Experimentele au fost realizate în conformitate cu aspectele prezentate în capitolul 6

Obstacol paralelipipedic centrat la distanța de 2000 mm.

Rezultatele furnizate de sistemul senzorial sunt prezentate în tabelul 6.2.1. Prelucrarea statistică a datelor a condus la următoarele valori pentru parametrii repartiției:

- Valoarea medie: $\bar{d} = 1997.1$ mm
- Deviația standard: $\sigma = 0.590523$

și respectiv ponderile și probabilitățile din figura 6.2.1 și tabelul 6.2.2

Tabel 6.2.1 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1997	11	1997	21	1997	31	1997
2	1997	12	1996	22	1996	32	1996
3	1998	13	1997	23	1998	33	1997
4	1997	14	1998	24	1997	34	1997
5	1997	15	1998	25	1997	35	1997
6	1997	16	1997	26	1997	36	1997
7	1997	17	1996	27	1997	37	1996
8	1997	18	1997	28	1998	38	1997
9	1997	19	1998	29	1998	39	1997
10	1997	20	1998	30	1998	40	1997

Tabel 6.2.2 Valorile parametrilor statistici

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
1996	5	0.125
1997	26	0.650
1998	9	0.225

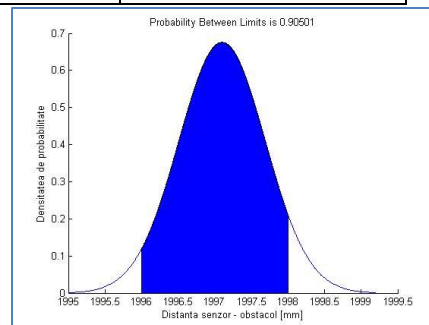
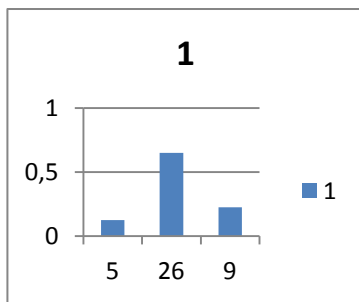


Figura 6.2.1 Densitatea de probabilitate

Obstacol paralelipipedic centrat la distanța de 1500 mm.

Rezultatele furnizate de sistemul senzorial sunt prezentate în tabelul 6.2.3. Prelucrarea statistică a datelor a condus la următoarele valori ale parametrilor repartiției:

- Valoarea medie: $\bar{d} = 1489.05$ mm
- Deviația standard: $\sigma = 1.986493$

și respectiv ponderile și probabilitățile din figura 6.2.2 și tabelul 6.2.3

Tabel 6.2.3 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1488	11	1489	21	1488	31	1487
2	1488	12	1488	22	1488	32	1488
3	1492	13	1492	23	1489	33	1488
4	1491	14	1488	24	1488	34	1487
5	1493	15	1488	25	1492	35	1492
6	1489	16	1488	26	1489	36	1488
7	1492	17	1488	27	1488	37	1488
8	1493	18	1488	28	1487	38	1487
9	1493	19	1487	29	1488	39	1488
10	1488	20	1488	30	1493	40	1488

Tabel 6.2.4 Valori ai parametrilor statistici

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
1487	5	0.125
1488	21	0.525
1489	4	0.100
1491	1	0.025
1492	5	0.125
1493	4	0.100

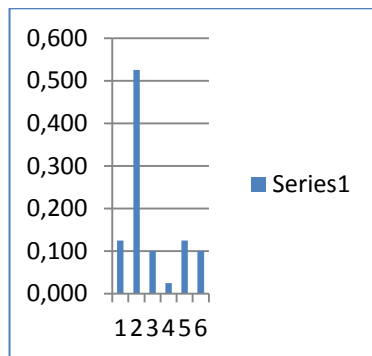


Figura 6.2.2 Ponderea de probabilitate

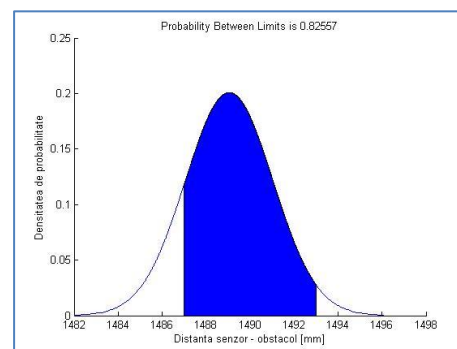


Figura 6.2.3 Densitatea de probabilitate

Obstacol paralelipipedic centrat la distanța de 1000 mm.

Rezultatele furnizate de sistemul senzorial sunt prezentate în tabelul 6.2.5. Prelucrarea statistică a datelor a condus la următoarele valori ale parametrilor repartiției:

- Valoarea medie: $\bar{d} = 1004.925 \text{ mm}$
- Deviația standard: $\sigma = 1.913347$

și respectiv ponderile și probabilitățile din figura 6.2.4 și tabelul 6.2.6.

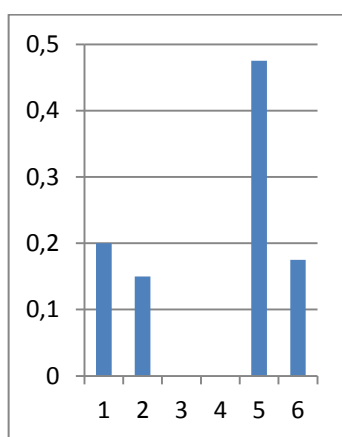
Tabel 6.2.5 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1006	11	1006	21	1006	31	1003
2	1006	12	1006	22	1002	32	1002
3	1006	13	1006	23	1002	33	1003
4	1006	14	1007	24	1002	34	1006
5	1007	15	1006	25	1003	35	1006
6	1006	16	1007	26	1002	36	1006

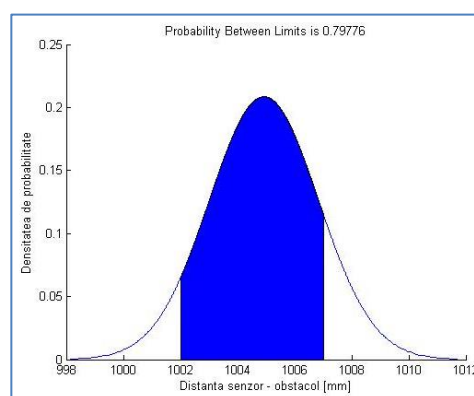
7	1007	17	1006	27	1003	37	1006
8	1006	18	1007	28	1002	38	1007
9	1007	19	1006	29	1003	39	1002
10	1006	20	1006	30	1002	40	1003

Tabel 6.2.6 Valori ai parametrilor statistici

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
1002	8	0.200
1003	6	0.150
1004	0	0
1005	0	0
1006	19	0.475
1007	7	0.175



(a)



(b)

Figura 6.2.4 Ponderile (a) și densitatea de probabilitate (b)

Obstacol paralelipedic centrat la distanța de 500 mm

Rezultatele furnizate de sistemul respectiv sunt prezentate în tabelul 6.2.7. Prelucrarea respectiv a datelor a condus la următoarele valori ale parametrilor repartiției:

- Valoarea medie: $\bar{d} = 493.325 \text{ mm}$
- Deviația standard: $\sigma = 0.474342$

și respectiv ponderile și probabilitățile din figura 6.2.5 și tabelul 6.2.8

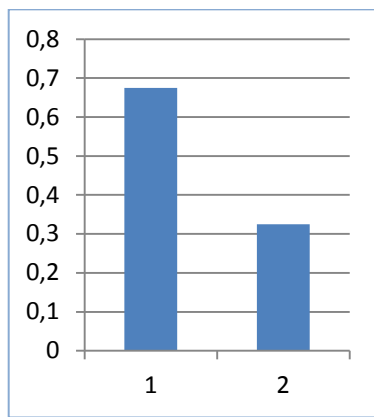
Tabel 6.2.7 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	493	11	493	21	494	31	493
2	493	12	494	22	493	32	493
3	494	13	493	23	493	33	494
4	493	14	493	24	494	34	493
5	493	15	494	25	493	35	493
6	494	16	493	26	493	36	494

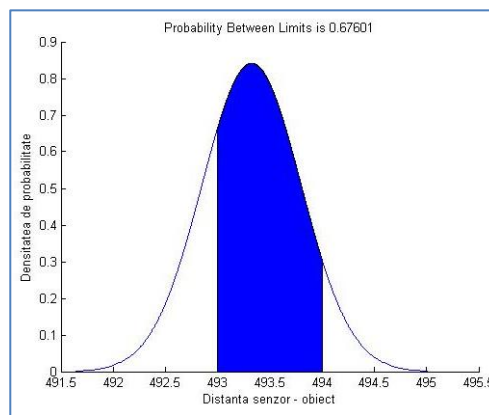
7	493	17	493	27	494	37	493
8	493	18	494	28	493	38	493
9	494	19	493	29	493	39	494
10	493	20	493	30	494	40	493

Tabel 6.2.8 Valori ai parametrilor statistici

Distanța măsurată [mm]	Frecvența n_i	Frecvența relativă $\frac{n_i}{n}$
493	27	0.675
494	13	0.325



a)



b)

Figura 6.2.5 Ponderile (a) și densitatea de probabilitate (b)

Anexa 6.3

Rezultatele experimentale referitoare la localizarea unor obstacole de dimensiuni diferite și în situații diferite în scena de lucru

Cazul 1 – distanța de referință 2500 mm

- Primul set de măsurători pentru un obstacol de grosime $B = 18 \text{ mm}$, $H = 245 \text{ mm}$, poziționat la distanța 2500 mm, a condus la concluzia că senzorul ultrasonic nu poate sesiza prezența obstacolului.
- Cazul al doilea luat în considerare, pentru aceeași distanță de referință d_0 , a permis determinarea valorilor prezentate în tabelul 6.3.1

Tabel 6.3.1 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2503	11	2499	21	2500	31	2504
2	2499	12	2499	22	2500	32	2504
3	2500	13	2499	23	2500	33	2504
4	2500	14	2504	24	2504	34	2504
5	2500	15	2504	25	2500	35	2500
6	2500	16	2500	26	2504	36	2504
7	2504	17	2504	27	2504	37	2499
8	2500	18	2504	28	2503	38	2499
9	2500	19	2500	29	2499	39	2500
10	2500	20	2503	30	2499	40	

Parametrii statistici au fost determinați apelând la facilitățile Microsoft Excel.

Valorile acestor parametri sunt:

- valoarea medie $\bar{d} = 2501.359 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 2.121161$

Apelând la facilitățile Matlab s-a determinat densitatea de probabilitate.

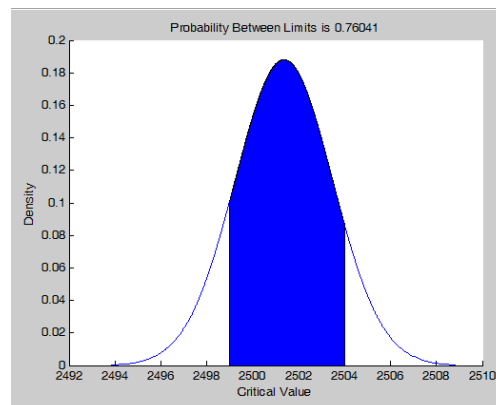


Figura 6.3.1 Densitatea de probabilitate

- Al treilea caz corespunzător obstacolului cilindric s-a soldat cu același rezultat – lipsa informațiilor referitoare la prezența obstacolului.

Cazul 2 – distanța de referință 2000 mm

Obstacol 18 mm

Tabel 6.3.2 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2003	11	2003	21	2004	31	2000
2	2004	12	2004	22	2003	32	2003

3	2004	13	2004	23	2004	33	2004
4	2003	14	2004	24	2004	34	2004
5	2003	15	2003	25	2003	35	2003
6	2004	16	2004	26	2004	36	2003
7	2004	17	2004	27	2004	37	2004
8	2003	18	2003	28	2003	38	2004
9	2004	19	2004	29	2003	39	2003
10	2004	20	2004	30	2004	40	2004

- valoarea medie $\bar{d} = 2003.525 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.750641$

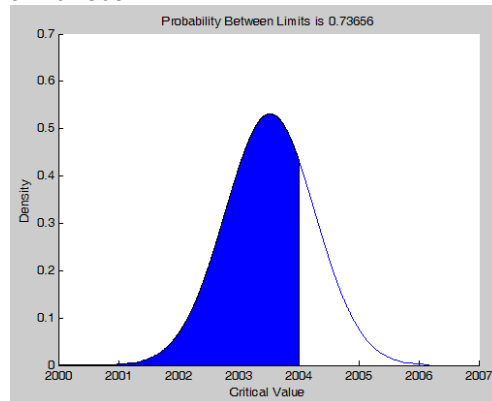


Figura 6.3.2 Densitatea de probabilitate

Obstacol 45 mm

Tabel 6.3.3 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1992	11	1993	21	1993	31	1993
2	1993	12	1993	22	1993	32	1992
3	1993	13	1993	23	1992	33	1993
4	1993	14	1992	24	1993	34	1993
5	1993	15	1992	25	1993	35	1993
6	1991	16	1993	26	1993	36	1992
7	1993	17	1993	27	1993	37	1992
8	1993	18	1993	28	1992	38	1993
9	1993	19	1992	29	1993	39	1993
10	1992	20	1993	30	1993	40	1993

- valoarea medie $\bar{d} = 1992.7 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.5164$

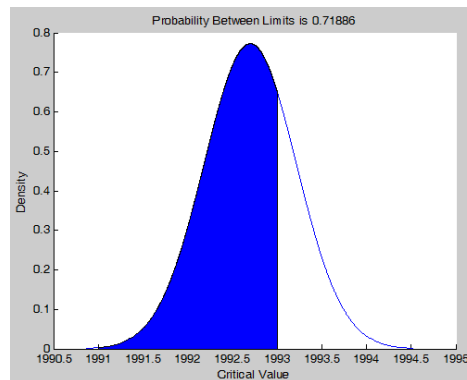
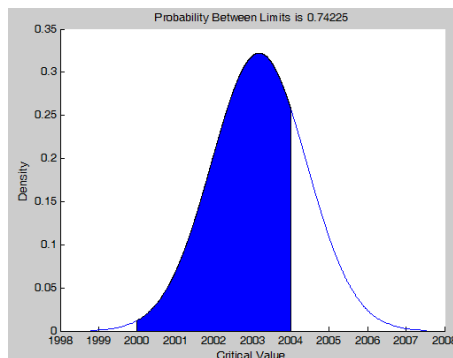


Figura 6.3.3 Densitatea de probabilitate

Obstacol cilindric**Tabel 6.3.4** Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	2000	11	2001	21	2004	31	2004
2	2001	12	1999	22	2003	32	2003
3	2004	13	2004	23	2004	33	2003
4	2004	14	2004	24	2004	34	2004
5	2003	15	2003	25	2003	35	2004
6	2002	16	2004	26	2003	36	2003
7	2004	17	2004	27	2004	37	2004
8	2001	18	2004	28	2004	38	2004
9	2002	19	2003	29	2003	39	2003
10	2004	20	2004	30	2004	40	2004

**Figura 6.3.4** Densitatea de probabilitate

- valoarea medie $\bar{d} = 2003.175 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 1.23802$

Cazul 3 – distanța de referință 1500 mm

Obstacol 18 mm**Tabel 6.3.5** Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1504	11	1504	21	1505	31	1504
2	1510	12	1504	22	1504	32	1505
3	1504	13	1505	23	1505	33	1504
4	1505	14	1504	24	1504	34	1505
5	1509	15	1505	25	1504	35	1504

6	1510	16	1504	26	1505	36	1505
7	1504	17	1505	27	1504	37	1504
8	1505	18	1509	28	1505	38	1504
9	1504	19	1505	29	1509	39	1505
10	1505	20	1504	30	1510	40	1504

- valoarea medie $\bar{d} = 1505.2 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 1.897367$

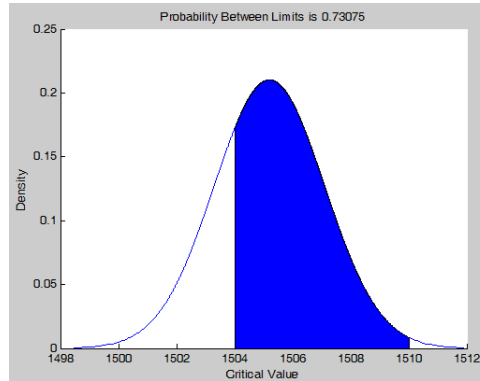


Figura 6.3.5 Densitatea de probabilitate

Obstacol 45 mm

Tabel 6.3.6 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1500	11	1501	21	1500	31	1502
2	1501	12	1500	22	1501	32	1501
3	1500	13	1501	23	1500	33	1500
4	1501	14	1500	24	1500	34	1501
5	1500	15	1500	25	1501	35	1500
6	1500	16	1501	26	1500	36	1501
7	1501	17	1500	27	1501	37	1500
8	1500	18	1501	28	1500	38	1501
9	1501	19	1500	29	1501	39	1500
10	1500	20	1501	30	1500	40	1500

- valoarea medie $\bar{d} = 1500.475 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.554122$

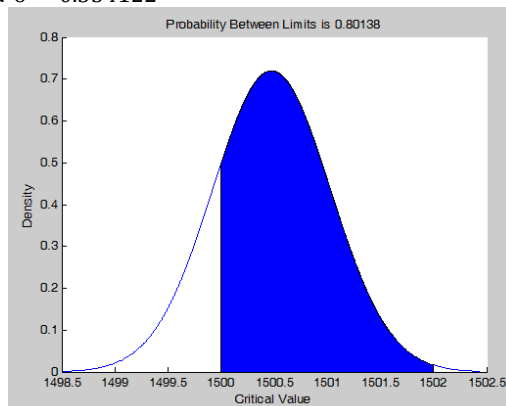
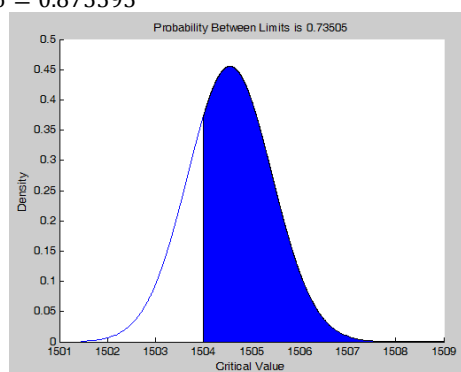


Figura 6.3.6 Densitatea de probabilitate

Obstacol cilindric**Tabel 6.3.7** Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1504	11	1505	21	1504	31	1504
2	1505	12	1504	22	1505	32	1505
3	1504	13	1505	23	1504	33	1504
4	1505	14	1504	24	1505	34	1504
5	1504	15	1505	25	1504	35	1505
6	1505	16	1504	26	1504	36	1504
7	1504	17	1505	27	1504	37	1505
8	1505	18	1504	28	1505	38	1504
9	1504	19	1505	29	1509	39	1505
10	1504	20	1504	30	1505	40	1504

- valoarea medie $\bar{d} = 1504.55 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.875595$

**Figura 6.3.7** Densitatea de probabilitate

Cazul 4– distanța de referință 1000 mm

Obstacol 18 mm**Tabel 6.3.8** Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1035	11	1035	21	1034	31	1027
2	1035	12	1035	22	1030	32	1025
3	1035	13	1034	23	1031	33	1025
4	1035	14	1035	24	1030	34	1025
5	1034	15	1034	25	1025	35	1027
6	1034	16	1030	26	1025	36	1025
7	1035	17	1030	27	1026	37	1025
8	1035	18	1030	28	1026	38	1025
9	1035	19	1031	29	1025	39	1027
10	1035	20	1034	30	1025	40	1025

- valoarea medie $\bar{d} = 1030.225 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 4.251621$

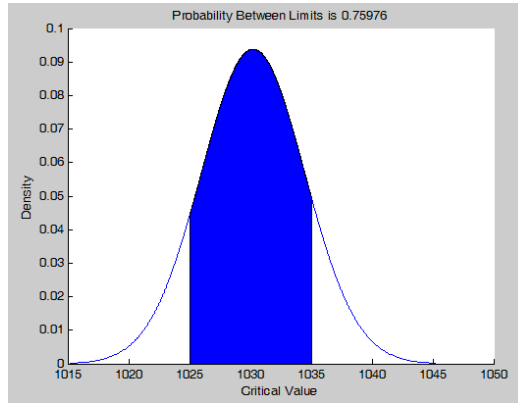


Figura 6.3.8 Densitatea de probabilitate

Obstacol 45 mm

Tabel 6.3.9 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1000	11	1004	21	1004	31	1004
2	1000	12	1004	22	1004	32	1004
3	1000	13	1000	23	1001	33	1004
4	1000	14	1004	24	1003	34	1004
5	1001	15	1003	25	1001	35	1004
6	1000	16	1004	26	1000	36	1004
7	1001	17	1004	27	1004	37	1004
8	1000	18	1004	28	1003	38	1000
9	1001	19	1004	29	1003	39	1004
10	1000	20	1003	30	1004	40	1003

- valoarea medie $\bar{d} = 1002.475 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 1.739253$

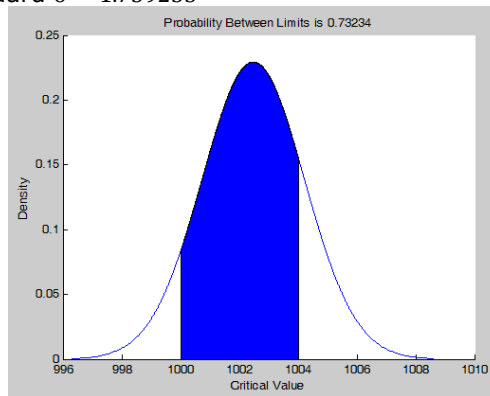


Figura 6.3.9 Densitatea de probabilitate

Obstacol cilindric

Tabel 6.3.10 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	1016	11	1016	21	1016	31	1016
2	1016	12	1016	22	1016	32	1017
3	1017	13	1017	23	1017	33	1016
4	1016	14	1016	24	1016	34	1016
5	1016	15	1016	25	1016	35	1016

6	1016	16	1017	26	1017	36	1016
7	1016	17	1016	27	1016	37	1016
8	1016	18	1016	28	1012	38	1016
9	1016	19	1017	29	1017	39	1017
10	1017	20	1016	30	1016	40	1016

- valoarea medie $\bar{d} = 1016.15 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.80224$

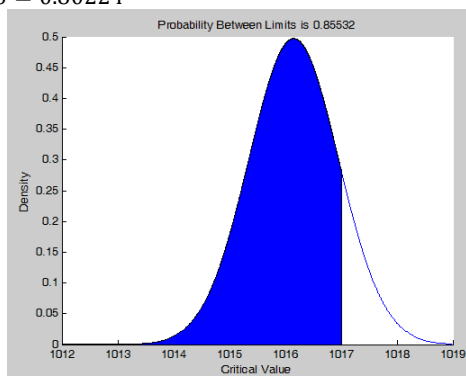


Figura 6.3.10 Densitatea de probabilitate

Cazul 5 – distanța de referință 500 mm

Obstacol 18 mm

Tabel 6.3.11 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	520	11	520	21	520	31	520
2	520	12	520	22	520	32	520
3	520	13	520	23	520	33	520
4	520	14	520	24	520	34	520
5	520	15	520	25	520	35	520
6	520	16	520	26	520	36	520
7	520	17	520	27	520	37	520
8	520	18	520	28	520	38	520
9	520	19	520	29	520	39	521
10	520	20	520	30	520	40	521

- valoarea medie $\bar{d} = 520.05 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.220721$

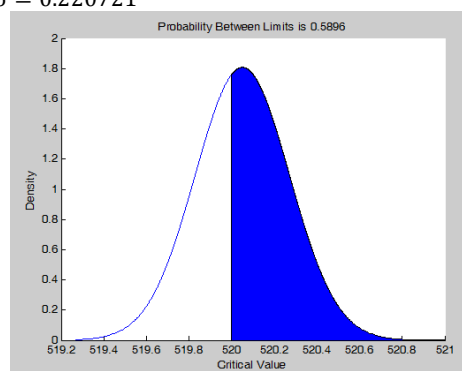


Figura 6.3.11 Densitatea de probabilitate

Obstacol 45 mm

Tabel 6.3.12 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	499	11	499	21	500	31	499
2	499	12	499	22	499	32	499
3	499	13	499	23	499	33	499
4	499	14	500	24	499	34	499
5	499	15	499	25	499	35	500
6	499	16	499	26	499	36	499
7	500	17	499	27	499	37	499
8	499	18	499	28	500	38	499
9	499	19	499	29	499	39	499
10	499	20	499	30	499	40	499

- valoarea medie $\bar{d} = 499.125 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.334932$

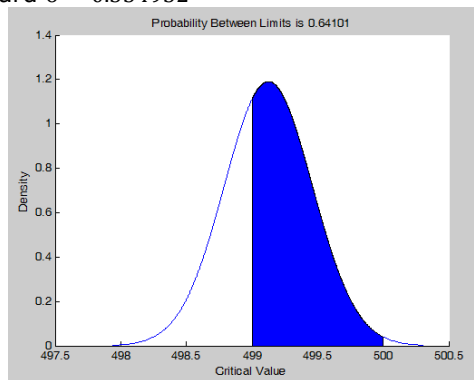


Figura 6.3.12 Densitatea de probabilitate

Obstacol cilindric

Tabel 6.3.13 Rezultate furnizate de sistemul senzorial

1	508	11	508	21	508	31	508
2	508	12	508	22	508	32	508
3	508	13	508	23	508	33	509
4	509	14	508	24	508	34	508
5	508	15	508	25	509	35	508
6	508	16	508	26	508	36	508
7	508	17	508	27	508	37	509
8	509	18	508	28	508	38	508
9	508	19	508	29	509	39	508
10	508	20	508	30	508	40	508

- valoarea medie $\bar{d} = 508.15 \text{ mm}$
- deviația standard $\sigma = 0.36162$

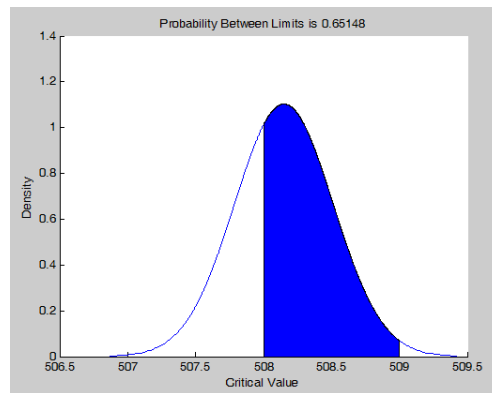


Figura 6.3.13 Densitatea de probabilitate

Anexa 6.4

**Prelucrarea datelor experimentale referitoare la localizarea
unui obstacol cilindric pe baza a doi senzori ultrasonici
Parallax**

Exp_11- centrat, distanța $d_0 = 2005$ mm

Tabelul 6.4.1 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

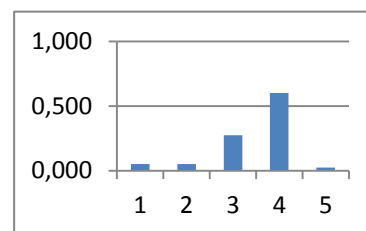
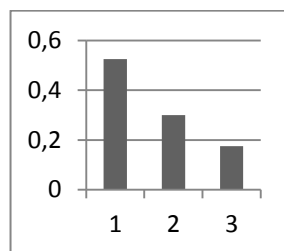
1	2007	11	2008	21	2007	31	2007
2	2008	12	2007	22	2007	32	2008
3	2007	13	2007	23	2007	33	2007
4	2007	14	2007	24	2007	34	2009
5	2008	15	2009	25	2008	35	2008
6	2007	16	2008	26	2009	36	2007
7	2009	17	2008	27	2008	37	2009
8	2007	18	2007	28	2009	38	2008
9	2008	19	2007	29	2007	39	2007
10	2009	20	2007	30	2007	40	2008

Tabelul 6.4.2 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1996	11	1997	21	1997	31	1997
2	1997	12	1995	22	1997	32	1996
3	1997	13	1997	23	1997	33	1996
4	1996	14	1997	24	1996	34	1998
5	1996	15	1997	25	1997	35	1997
6	1997	16	1997	26	1991	36	1997
7	1997	17	1996	27	1997	37	1996
8	1996	18	1997	28	1996	38	1995
9	1997	19	1997	29	1996	39	1997
10	1997	20	1991	30	1997	40	1997

Tabel 6.4.3 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 2007.65$ mm	$\bar{d} = 1996.35$ mm
$\sigma = 0.769615$	$\sigma = 1.387675$
$\varepsilon = \frac{2005 - 2007.65}{2005} \cdot 100 = -0.132[\%]$	$\varepsilon = 0.431[\%]$



2007	21	0,525
2008	12	0,300
2009	7	0,175

1991	2	0,050
1995	2	0,050
1996	11	0,275
1997	24	0,600
1998	1	0,025

Figura 6.4.1 Valori ai parametrilor statistici

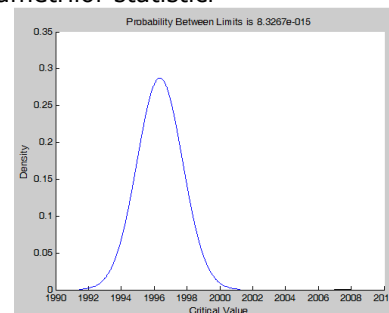
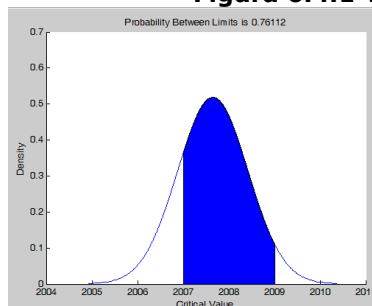


Figura 6.4.2 Densitatea de probabilitate în mod comparativ

Exp_12 - distanța $d_0 = 2005 \text{ mm}$

Tabel 6.4.4 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	2004	11	2009	21	2009	31	2009
2	2009	12	2004	22	2006	32	2008
3	2006	13	2006	23	2005	33	2004
4	2004	14	2004	24	2004	34	2009
5	2009	15	2004	25	2005	35	2008
6	2003	16	2006	26	2004	36	2006
7	2009	17	2003	27	2009	37	2006
8	2006	18	2006	28	2006	38	2008
9	2005	19	2006	29	2006	39	2009
10	2006	20	2005	30	2008	40	2004

Tabel 6.4.5 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	2006	11	2011	21	2006	31	2010
2	2011	12	2011	22	2010	32	2010
3	2011	13	2010	23	2004	33	2011
4	2010	14	2010	24	2006	34	2010
5	2011	15	2011	25	2011	35	2010
6	2010	16	2010	26	2010	36	2010
7	2011	17	2011	27	2006	37	2004
8	2010	18	2011	28	2011	38	2010
9	2011	19	2010	29	2011	39	2011
10	2010	20	2011	30	2006	40	2007

Tabel 6.4.6 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 2006.175 \text{ mm}$	$\bar{d} = 2009.625 \text{ mm}$
$\sigma = 1.353259$	$\sigma = 1.99599$
$\varepsilon = \frac{2005 - 2007.65}{2005} \cdot 100 = -0.132[\%]$	$\varepsilon = 0.431[\%]$

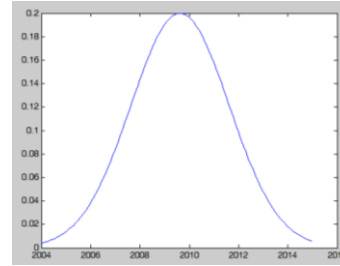
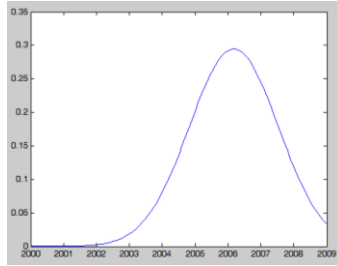
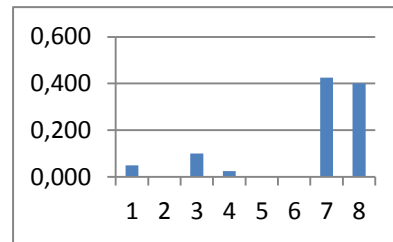
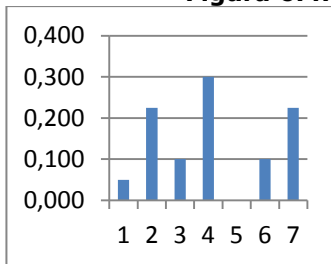


Figura 6.4.3 Densitatea de probabilitate



2003	2	0,050
2004	9	0,225
2005	4	0,100
2006	12	0,300
2007	0	0,000
2008	4	0,100
2009	9	0,225

2004	2	0,050
2005	0	0,000
2006	4	0,100
2007	1	0,025
2008	0	0,000
2009	0	0,000
2010	17	0,425
2011	16	0,400

Figura 6.4.4 Frecvențe ale rezultatelor măsurătorilor

Exp_13 - distanța $d_0 = 2005 \text{ mm}$

Tabel 6.4.7 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	2020	11	2020	21	2020	31	2017
2	2021	12	2021	22	2021	32	2020
3	2020	13	2020	23	2020	33	2021
4	2021	14	2021	24	2020	34	2020
5	2020	15	2014	25	2021	35	2015
6	2021	16	2021	26	2017	36	2020
7	2020	17	2020	27	2021	37	2021
8	2021	18	2016	28	2020	38	2020
9	2020	19	2020	29	2021	39	2021
10	2021	20	2021	30	2018	40	2020

Tabel 6.4.8 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1995	11	1995	21	1995	31	1995
2	1996	12	1995	22	1995	32	1996
3	1996	13	1996	23	1996	33	1996
4	1995	14	1996	24	1996	34	1995
5	1995	15	1996	25	1996	35	1995
6	1996	16	1995	26	1995	36	1996
7	1996	17	1995	27	1995	37	1996
8	1995	18	1995	28	1996	38	1996
9	1996	19	1996	29	1996	39	1995
10	1996	20	1996	30	1995	40	1995

Tabel 6.4.9 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 2019.825 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1995.525 \text{ mm}$
$\sigma = 1.708013$	$\sigma = 0.505736$
$\varepsilon = \frac{2005 - 2007.65}{2005} \cdot 100 = -0.132[\%]$	$\varepsilon = 0.431[\%]$

Exp_21 - distanța $d_0 = 1500 \text{ mm}$

Tabel 6.4.10 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	1508	11	1511	21	1511	31	1510
2	1509	12	1510	22	1510	32	1510
3	1508	13	1511	23	1510	33	1510
4	1508	14	1510	24	1510	34	1508
5	1508	15	1510	25	1510	35	1513
6	1508	16	1510	26	1511	36	1508
7	1508	17	1510	27	1510	37	1509
8	1508	18	1511	28	1511	38	1510
9	1508	19	1510	29	1510	39	1511
10	1510	20	1511	30	1511	40	1510

Tabel 6.4.11 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1502	11	1499	21	1502	31	1503
2	1503	12	1502	22	1502	32	1502
3	1502	13	1503	23	1502	33	1503
4	1503	14	1502	24	1502	34	1502
5	1502	15	1502	25	1503	35	1500
6	1502	16	1502	26	1502	36	1502
7	1503	17	1502	27	1500	37	1503
8	1502	18	1502	28	1502	38	1502
9	1503	19	1503	29	1503	39	1503
10	1502	20	1502	30	1502	40	1502

Tabel 6.4.12 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1509.75 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1502.125 \text{ mm}$
$\sigma = 1.214232$	$\sigma = 0.852974$
$\varepsilon = \frac{1500 - 1509.75}{1500} \cdot 100 = -0.65[\%]$	$\varepsilon = -0.1416[\%]$

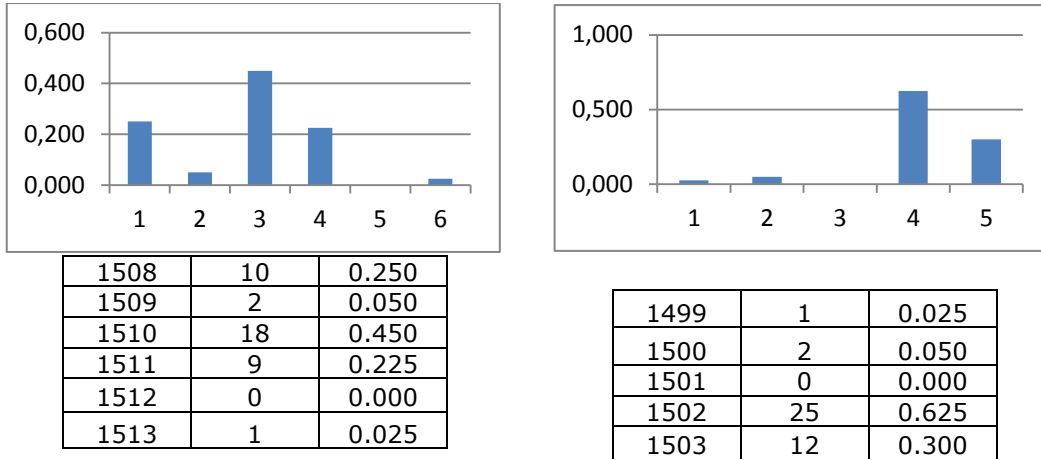


Figura 6.4.5 Valori ai parametrilor statistici

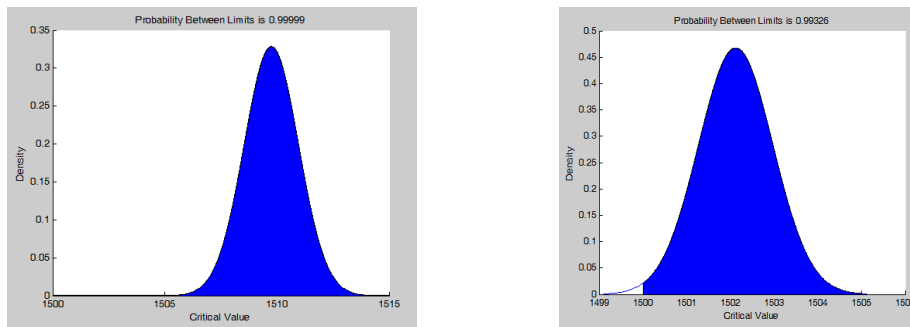


Figura 6.4.6 Densitatea de probabilitate

Exp_22 - distanța d0 = 1506 mm

Tabel 6.4.13 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	1510	11	1510	21	1510	31	1511
2	1511	12	1511	22	1511	32	1510
3	1510	13	1510	23	1510	33	1511
4	1510	14	1510	24	1510	34	1510
5	1510	15	1510	25	1511	35	1511
6	1510	16	1510	26	1510	36	1510
7	1510	17	1510	27	1510	37	1510
8	1511	18	1510	28	1511	38	1511
9	1510	19	1510	29	1510	39	1511
10	1511	20	1510	30	1510	40	1510

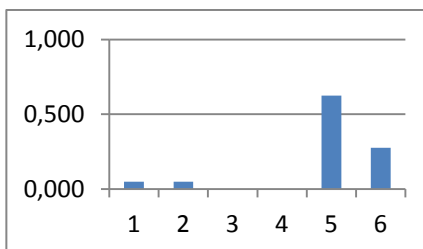
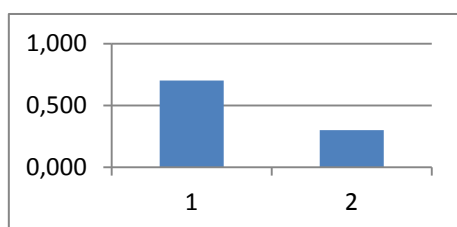
Tabel 6.4.14 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1521	11	1522	21	1521	31	1521
2	1521	12	1521	22	1522	32	1521
3	1521	13	1521	23	1521	33	1522
4	1521	14	1518	24	1521	34	1521

5	1521	15	1521	25	1521	35	1522
6	1522	16	1521	26	1522	36	1517
7	1521	17	1521	27	1521	37	1521
8	1522	18	1522	28	1522	38	1518
9	1521	19	1522	29	1521	39	1517
10	1521	20	1521	30	1521	40	1522

Tabel 6.4.15 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1510.3 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1520.925 \text{ mm}$
$\sigma = 0.464095$	$\sigma = 1.248332$
$\varepsilon = \frac{1506 - 1510.3}{1506} \cdot 100 = -0.2855[\%]$	$\varepsilon = -0.991[\%]$



1510	28	0.700
1511	12	0.300

1517	2	0.050
1518	2	0.050
1519	0	0.000
1520	0	0.000
1521	25	0.625
1522	11	0.275

Figura 6.4.7. Distanțe și ponderi

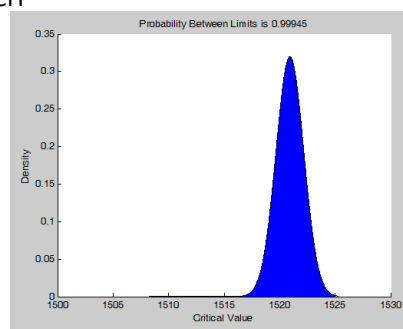
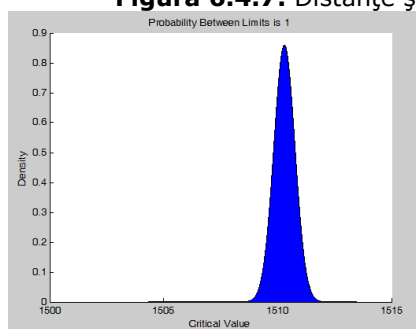


Figura 6.4.8 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și senzorul B

Exp_23 - distanța $d_0 = 1506 \text{ mm}$

Tabel 6.4.16 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	1533	11	1534	21	1536	31	1533
2	1533	12	1536	22	1536	32	1534
3	1534	13	1533	23	1534	33	1533

4	1533	14	1534	24	1533	34	1536
5	1533	15	1536	25	1533	35	1538
6	1534	16	1536	26	1534	36	1538
7	1533	17	1536	27	1533	37	1536
8	1533	18	1533	28	1536	38	1533
9	1533	19	1536	29	1537	39	1534
10	1533	20	1533	30	1533	40	1536

Tabel 6.4.17 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1510	11	1510	21	1506	31	1511
2	1511	12	1510	22	1505	32	1505
3	1505	13	1511	23	1505	33	1510
4	1511	14	1510	24	1505	34	1506
5	1510	15	1506	25	1504	35	1510
6	1511	16	1505	26	1505	36	1510
7	1510	17	1506	27	1504	37	1511
8	1510	18	1510	28	1505	38	1503
9	1510	19	1503	29	1510	39	1506
10	1510	20	1504	30	1510	40	1510

Tabel 6.4.18 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1534.375 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1507.85 \text{ mm}$
$\sigma = 1.580125$	$\sigma = 2.806129$
$\varepsilon = \frac{1506 - 1534.375}{1506} \cdot 100 = -1.884[\%]$	$\varepsilon = -0.1228[\%]$

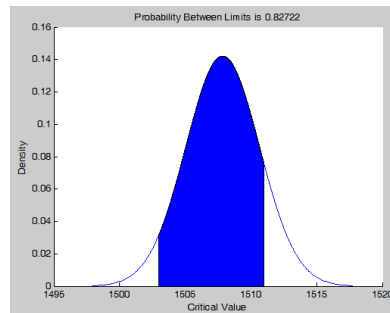
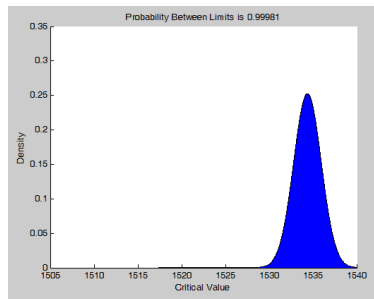
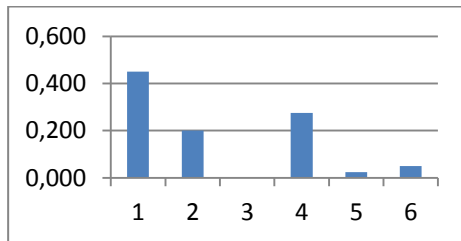
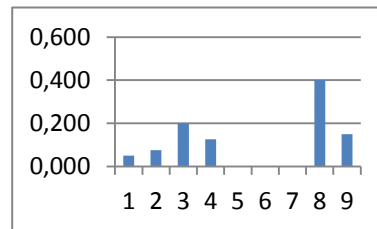


Figura 6.4.10 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B



1533	18	0.450
1534	8	0.200
1535	0	0.000



1503	2	0.050
1504	3	0.075
1505	8	0.200

1536	11	0.275
1537	1	0.025
1538	2	0.050

1506	5	0.125
1507	0	0.000
1508	0	0.000
1509	0	0.000
1510	16	0.400
1511	6	0.150

Figura 6.4.9 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

Exp_31 - distanța $d_0 = 1002 \text{ mm}$

Tabel 6.4.19 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

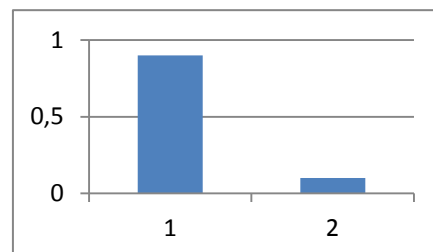
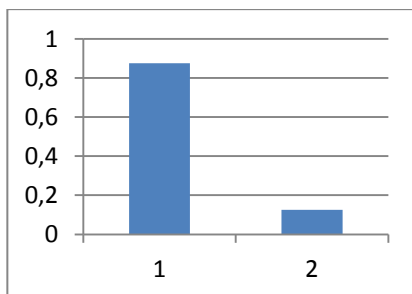
1	1012	11	1012	21	1012	31	1012
2	1012	12	1012	22	1012	32	1012
3	1013	13	1012	23	1012	33	1012
4	1012	14	1012	24	1012	34	1012
5	1012	15	1012	25	1012	35	1012
6	1012	16	1012	26	1012	36	1013
7	1013	17	1012	27	1012	37	1012
8	1012	18	1013	28	1012	38	1012
9	1012	19	1012	29	1013	39	1012
10	1012	20	1012	30	1012	40	1012

Tabel 6.4.20 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1010	11	1011	21	1010	31	1010
2	1010	12	1010	22	1010	32	1010
3	1011	13	1010	23	1010	33	1010
4	1010	14	1010	24	1010	34	1010
5	1010	15	1010	25	1010	35	1010
6	1011	16	1010	26	1010	36	1010
7	1010	17	1010	27	1010	37	1010
8	1010	18	1010	28	1010	38	1010
9	1010	19	1010	29	1010	39	1011
10	1010	20	1010	30	1010	40	1010

Tabel 6.4.21 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1012.125 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1010.1 \text{ mm}$
$\sigma = 0.334932$	$\sigma = 0.3038229$
$\varepsilon = \frac{1002 - 1012.125}{1002} \cdot 100 = -1.01[\%]$	$\varepsilon = -0.808[\%]$



1012	35	0.875
1013	5	0.125

1010	36	0.9
1011	4	0.1

Figura 6.4.11 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

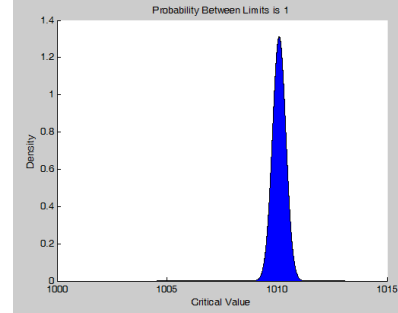
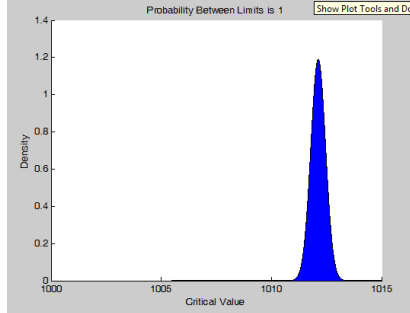


Figura 6.4.12 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

Exp_32 - distanța $d_0 = 1006$ mm

Tabel 6.4.22 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	1004	11	1004	21	1004	31	1006
2	1004	12	1004	22	1004	32	1004
3	1006	13	1006	23	1006	33	1004
4	1004	14	1004	24	1004	34	1004
5	1004	15	1004	25	1004	35	1006
6	1006	16	1004	26	1004	36	1004
7	1004	17	1004	27	1004	37	1004
8	1004	18	1004	28	1006	38	1004
9	1004	19	1004	29	1004	39	1006
10	1004	20	1006	30	1004	40	1004

Tabel 6.4.23 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1026	11	1026	21	1026	31	1027
2	1026	12	1026	22	1026	32	1026
3	1026	13	1026	23	1026	33	1026
4	1026	14	1026	24	1026	34	1026
5	1027	15	1026	25	1026	35	1027
6	1026	16	1026	26	1026	36	1026
7	1026	17	1026	27	1027	37	1026
8	1026	18	1026	28	1026	38	1026
9	1026	19	1026	29	1026	39	1026
10	1026	20	1026	30	1026	40	1026

Tabel 6.4.24 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1004.45$ mm	$\bar{d} = 1026.1$ mm
$\sigma = 0.845804$	$\sigma = 0.303822$
$\varepsilon = \frac{1006 - 1004.45}{1006} \cdot 100 = 0.154[\%]$	$\varepsilon = -1.998[\%]$

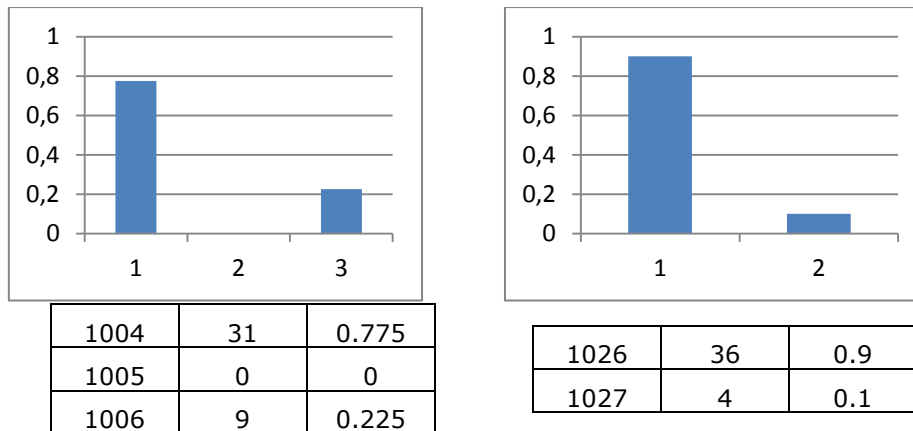


Figura 6.4.13 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

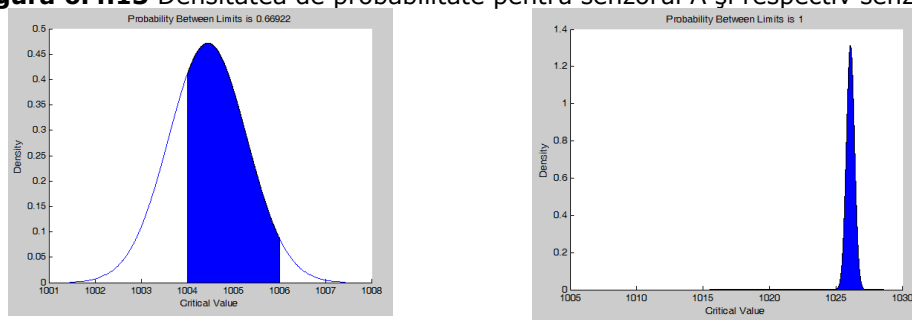


Figura 6.4.14 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

Exp_33 - distanța $d_0 = 1006 \text{ mm}$

Tabel 6.4.25 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	1040	11	1040	21	1040	31	1040
2	1040	12	1040	22	1040	32	1040
3	1040	13	1040	23	1040	33	1040
4	1040	14	1040	24	1040	34	1040
5	1040	15	1040	25	1040	35	1040
6	1040	16	1040	26	1040	36	1040
7	1040	17	1040	27	1040	37	1041
8	1040	18	1040	28	1040	38	1040
9	1040	19	1040	29	1040	39	1040
10	1040	20	1040	30	1040	40	1040

Tabel 6.4.26 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	1010	11	1010	21	1010	31	1010
2	1010	12	1010	22	1010	32	1010
3	1010	13	1011	23	1010	33	1010
4	1010	14	1010	24	1010	34	1010
5	1010	15	1010	25	1010	35	1010
6	1010	16	1010	26	1010	36	1010
7	1010	17	1010	27	1010	37	1010
8	1010	18	1010	28	1010	38	1010

9	1010	19	1010	29	1010	39	1011
10	1010	20	1010	30	1010	40	1010

Tabel 6.4.27 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 1040.025 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1010.05 \text{ mm}$
$\sigma = 0.158114$	$\sigma = 0.220721$
$\varepsilon = \frac{1006 - 1040.025}{1006} \cdot 100 = -3.38[\%]$	$\varepsilon = -0.40[\%]$

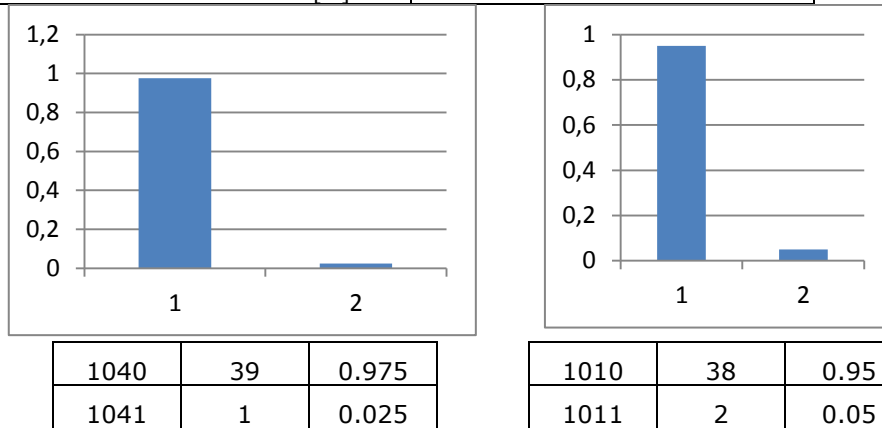


Figura 6.4.15 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

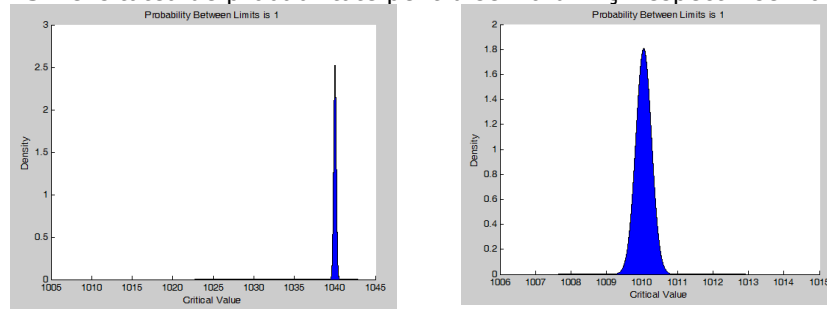


Figura 6.4.16 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

Exp_41 - distanța $d_0 = 501 \text{ mm}$

Tabel 6.4.28 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	526	11	526	21	526	31	526
2	526	12	526	22	526	32	526
3	526	13	526	23	526	33	526
4	526	14	526	24	526	34	526
5	526	15	526	25	526	35	526
6	526	16	526	26	526	36	526
7	526	17	526	27	526	37	526
8	526	18	526	28	526	38	526
9	526	19	526	29	526	39	526
10	526	20	526	30	526	40	526

Tabel 6.4.29 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	518	11	518	21	518	31	518
2	518	12	518	22	518	32	518
3	518	13	518	23	518	33	518
4	518	14	518	24	518	34	518
5	518	15	518	25	518	35	519
6	518	16	518	26	518	36	518
7	518	17	518	27	518	37	518
8	518	18	518	28	518	38	518
9	518	19	518	29	518	39	518
10	518	20	518	30	518	40	518

Tabel 6.4.30 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 526 \text{ mm}$	$\bar{d} = 518.025 \text{ mm}$
$\sigma = 0$	$\sigma = 0.158114$
$\varepsilon = \frac{501 - 526}{501} \cdot 100 = -4.99[\%]$	$\varepsilon = -3.98[\%]$

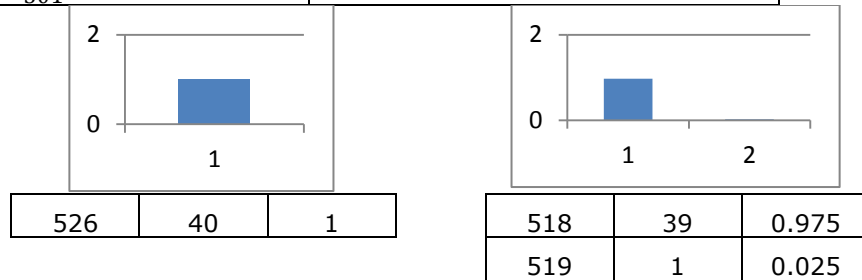


Figura 6.4.17 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul

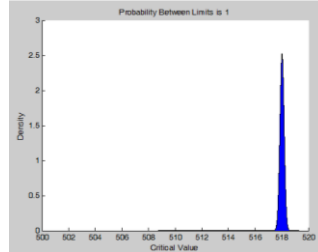


Figura 6.4.18 Densitatea de probabilitate – senzorul B
Exp_42- distanța $d_0 = 512 \text{ mm}$

Tabel 6.4.31 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

1	516	11	516	21	516	31	516
2	516	12	516	22	516	32	516
3	516	13	516	23	516	33	516
4	516	14	516	24	516	34	516
5	516	15	516	25	516	35	516
6	516	16	517	26	516	36	516
7	516	17	516	27	517	37	516
8	516	18	516	28	516	38	516
9	516	19	516	29	516	39	516
10	516	20	516	30	516	40	516

Tabel 6.4.32 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

1	563	11	564	21	564	31	563
2	563	12	564	22	564	32	563
3	563	13	564	23	564	33	564
4	564	14	564	24	564	34	564
5	564	15	563	25	564	35	564
6	564	16	563	26	564	36	564
7	564	17	563	27	564	37	564
8	564	18	563	28	564	38	564
9	564	19	564	29	564	39	568
10	564	20	564	30	563	40	568

Tabel 6.4.33 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 516.075 \text{ mm}$	$\bar{d} = 563.95 \text{ mm}$
$\sigma = 0.266747$	$\sigma = 1.036513$
$\varepsilon = \frac{512 - 516.075}{512} \cdot 100 = -0.795 \text{ [%]}$	$\varepsilon = -10.14 \text{ [%]}$

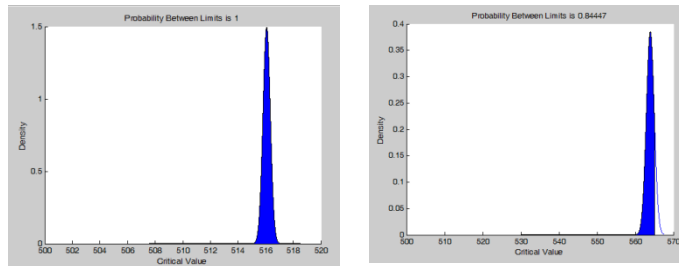
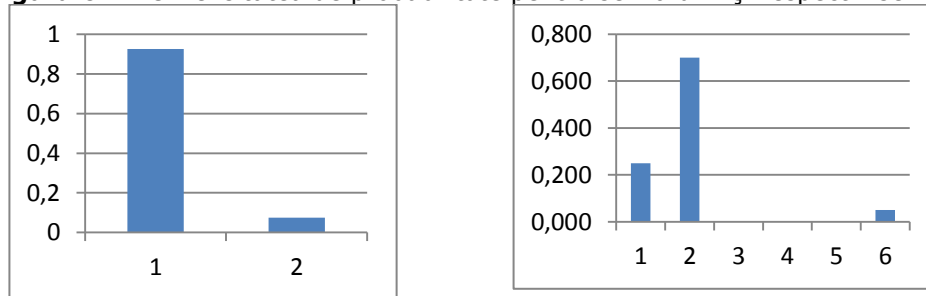


Figura 6.4.20 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B



516	37	0.925
517	3	0.075

563	10	0.250
564	28	0.700
565	0	0.000
566	0	0.000
567	0	0.000
568	2	0.050

Figura 6.4.19 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul B

Exp_43 - distanța $d_0 = 512 \text{ mm}$

Tabel 6.4.34 Rezultate furnizate de sistemul senzorial A

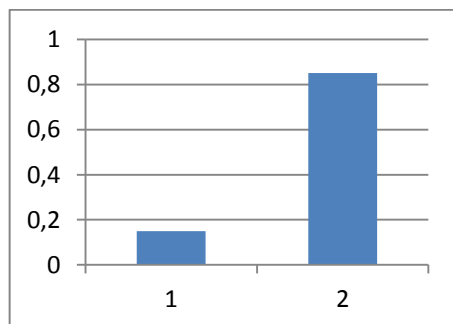
1	559	11	559	21	559	31	558
2	558	12	559	22	559	32	558
3	558	13	559	23	559	33	559
4	559	14	559	24	559	34	559
5	559	15	559	25	559	35	559
6	559	16	559	26	559	36	559
7	559	17	558	27	559	37	559
8	559	18	558	28	559	38	559
9	559	19	559	29	559	39	559
10	559	20	559	30	559	40	559

Tabel 6.4.35 Rezultate furnizate de sistemul senzorial B

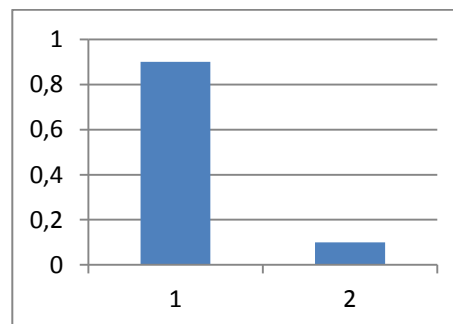
1	499	11	499	21	499	31	499
2	499	12	499	22	499	32	500
3	499	13	499	23	499	33	499
4	499	14	499	24	499	34	499
5	499	15	499	25	500	35	499
6	500	16	500	26	499	36	499
7	499	17	499	27	499	37	499
8	499	18	499	28	499	38	499
9	499	19	499	29	499	39	499
10	499	20	499	30	499	40	499

Tabel 6.4.36 Comparații între parametrii statistici

Senzorul A	Senzorul B
$\bar{d} = 558.85 \text{ mm}$	$\bar{d} = 499.1 \text{ mm}$
$\sigma = 0.36162$	$\sigma = 0.303822$
$\varepsilon = \frac{512 - 558.85}{512} \cdot 100 = -9.12 \text{ [%]}$	$\varepsilon = 0.175 \text{ [%]}$



558	6	0.15
559	34	0.85



499	36	0.9
500	4	0.1

Figura 6.4.21 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și respectiv senzorul

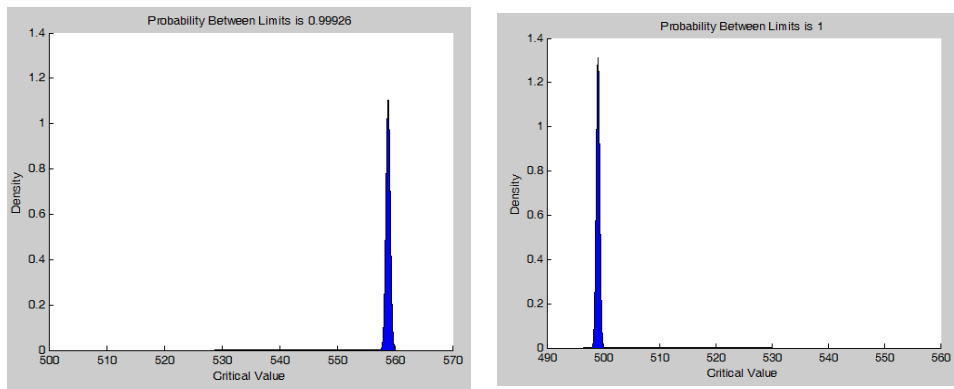


Figura 6.4.22 Densitatea de probabilitate pentru senzorul A și senzorul B

