

CONTRIBUȚII LA ANALIZA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ PRIVIND INTEGRAREA HARDWARE ÎN STRUCTURA UNUI ROBOT MOBIL

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

Fiz. Tony Stănescu

Conducător științific:	Prof.univ.dr.ing. Valer Dolga
Referenți științifici:	Prof.univ.dr.ing. Radu Bălan
	Prof.univ.dr.ing. Radu Cătălin Țarcă
	Conf.univ.dr.ing. Erwin Christian Lovasz

Ziua susținerii tezei: 13.07.2015

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica 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, 2015

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 Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

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

Cuvânt înainte

„Și m-am sârguit în inima mea să urmăresc și să cercetez și să iau aminte cu înțelepciune la tot ceea ce se petrece sub cer. Acesta este un chin cumplit pe care Dumnezeu l-a dat fiilor oamenilor ca să se chinuiască întru el.”

Ecclesiastul 1:13

Dedic această lucrare unor persoane deosebite: soției mele, Alina-Nicoleta și fiului meu Tony jr.

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Facultății de Mecanică, la Catedra de Mecatronică a Universității Politehnica Timișoara.

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

Adresez mulțumiri membrilor Departamentului de Mecatronică, din cadrul Facultății de Mecanică în special domnilor Ș.L. dr. ing. Cristian Moldovan și As. dr. ing. Cristian Pop, care m-au ajutat cu diverse sfaturi și indicații utile în vederea finalizării tezei de doctorat.

Imi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei, pentru observațiile făcute și pentru timpul acordat lucrării.

De asemenea, mulțumesc tuturor care m-au ajutat cu diverse sfaturi și indicații utile în vederea finalizării tezei de doctorat, precum și managementului proiectului: “Burse doctorale și postdoctorale pentru cercetare de excelență, numărul de identificare al contractului: POSDRU/159/1.5/S/134378”.

Nu în ultimul rând, vreau să mulțumesc părinților și socrilor pentru înțelegerea și suportul moral și financiar pe care mi l-au oferit pe întreaga perioadă a desfășurării studiilor doctorale.

Timișoara, Iulie, 2015

Tony Stănescu

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU,

Investește în oameni!

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară 1 „Educație și formare profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție 1.5. „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: Burse doctorale și postdoctorale pentru cercetare de excelență

Numărul de identificare al contractului: POSDRU/159/1.5/S/134378

Beneficiar: Universitatea Transilvania din Brașov

Partener: Universitatea Politehnica din Timișoara

Stănescu Tony

Contribuții la analiza teoretică și experimentală privind integrarea hardware în structura unui robot mobil

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 165, Editura Politehnica, 2015, 211 pagini, 154 figuri, 84 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN: 978-606-554-980-7

Cuvinte cheie: robot mobil, senzor ultrasonic, senzor în infraroșu, fenomene ondulatorii, incertitudine

Rezumat,

Teza de față își propune o serie de contribuții, atât teoretice cât și practice în analiza unui mediu nestructurat și să prezinte studiul experimental al navigării unui robot mobil în mediul respectiv. Tema abordată se bazează pe cunoștințe din domeniul teoriei mecanismelor, mecanicii, fenomenelor ondulatorii și domeniul roboticii.

Lucrarea a fost structurată într-o introducere, șapte capitole destinate obiectivului principal al tezei, un capitol de concluzii la care se adaugă bibliografia și anexele aferente. Au fost dezvoltate modelele matematice ale caracteristicilor directe și inverse pentru senzorii ultrasonici: Parallax Ping și XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 și a senzorului în infraroșu Sharp GP2Y0A02YK. S-a analizat experimental navigarea robotului mobil studiat pe o traiectorie impusă și în prezența unui obstacol.

Rezultatele cercetărilor efectuate s-au materializat prin publicarea a 7 lucrări, dintre care 4 în circuitul ISI Proc.

CUPRINS

1. Introducere	1
1.1. Mecatronică și robotică	1
1.2. Motivația abordării temei tezei de doctorat.....	4
1.3. Obiectivele tezei de doctorat.....	4
1.4. Structura tezei de doctorat	6
2. Aspecte fizice privind fenomenele undulatorii și aplicațiile lor în mecatronică	10
2.1. Noțiuni generale.....	10
2.2. Oscilații	10
2.3. Unde.....	14
2.4. Proprietăți acustice ale mediului.....	15
2.5. Fenomene optice	17
2.6. Reflexia radiației electromagnetice	19
2.7. Concluzii.....	20
3. Incertitudine și probabilistică	24
3.1. Generalități.....	24
3.2. Ignoranță, informație, date și incertitudine.....	24
3.3. Fuziunea informației	24
3.3.1. Introducere.....	24
3.3.2. Metode utilizate pentru fuziunea informației	25
3.3.3. Teoria evidenței	27
3.3.3.1. Generalități privind teoria evidenței.....	27
3.3.3.2. Aspecte matematice ale teoriei evidenței	27
3.4. Incertitudini în analiza probabilistică.....	30
3.4.1. Generalități.....	30
3.4.2. Estimarea probabilistică a unui obstacol în mediu de lucru al unui robot mobil	31
3.5. Concluzii.....	33

4. Sensori și caracteristicile lor de funcționare	35
4.1. Introducere	35
4.2. Sensori utilizați în cercetările experimentale.....	35
4.3. Caracteristica senzorului ultrasonic Parallax Ping	35
4.3.1. Standul experimental și procedura de lucru	35
4.3.2. Desfășurarea experimentelor	37
4.3.3. Concluzii	40
4.4. Caracteristica senzorului ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200	41
4.4.1. Standul experimental și procedura de lucru	41
4.4.2. Desfășurarea experimentelor	42
A. Caracteristica directă și ecuația acesteia	44
B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia	44
4.4.3. Concluzii	47
4.5. Determinarea caracteristicii senzorului infraroșu Sharp GP2Y0A02YK	48
4.5.1. Standul experimental și procedura de lucru	48
4.5.2. Desfășurarea experimentelor	49
4.5.2.1. Experimentul 1 pentru obiect de culoare albă	49
A. Caracteristica directă și ecuația acesteia	49
B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia	53
4.5.2.2. Experimentul 2 pentru obiect de culoare roșie	55
A. Caracteristica directă și ecuația acesteia	55
B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia	59
4.5.2.3. Experimentul 3 pentru obiect de culoare verde	61
A. Caracteristica directă și ecuația acesteia	61
B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia	65
4.5.3. Concluzii	67
4.6. Concluzii finale.....	67
5. Analiza spațiului de lucru pe baza senzorilor în infraroșu și cu ultrasunete.....	71
5.1. Senzorul infraroșu Sharp GP2Y0A21YK.....	71
5.1.1. Determinarea unghiului cu care este rotit un obiect dreptunghic.	71

5.1.1.1. Considerente teoretice	71
5.1.1.2. Concluzii	73
5.1.2. Determinarea distanței folosind trei senzori IR până la două obiecte cu formă dreptunghică plasate paralel.	73
5.1.2.1. Setul 1 de experimente.....	74
5.1.2.2. Setul 2 de experimente.....	74
5.1.2.3. Setul 3 de experimente.....	75
5.1.2.4. Setul 4 de experimente.....	76
5.1.2.5. Setul 5 de experimente.....	76
5.1.2.6. Setul 6 de experimente.....	77
5.1.2.7. Concluzii	78
5.1.3. Determinarea razei și a locului ocupat de un cilindru folosind un sistem senzorial în infrarosu.....	78
5.1.3.1. Experiment A.....	78
5.1.3.2. Experiment B.....	79
5.1.3.3. Concluzii	82
5.2. Senzorul ultrasonic Parallax Ping	83
5.2.1. Experiment cu baleiere cu un obiect cilindric.....	83
5.2.1.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor	83
5.2.1.2. Concluzii	85
5.2.2. Determinarea distanței până la un obiect cilindric.	85
5.2.2.1. Standul experimental și procedura de lucru.....	85
5.2.2.2. Concluzii	87
5.2.3. Obiect și senzor aflați la diferite distanțe față de suprafața caroiajului	87
5.2.3.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor	87
5.2.3.2. Concluzii	89
5.2.4. Determinarea unghiului cu care este rotit un obiect de formă dreptunghică.....	90
5.2.4.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor	90
5.2.4.2. Concluzii	92
5.2.5. Determinarea distanței maxime "stânga – dreapta" privind poziționarea unui obiect pentru a nu ieși din sfera de detectare a senzorului ultrasonic.....	93

5.2.5.1. Considerente teoretice.....	93
5.2.5.2. Concluzii	96
5.2.6. Experiment cu 2 senzori US și două obiecte plasate echidistant față de cei 2 senzori	96
5.2.6.1. Considerente teoretice	96
5.2.6.2. Concluzii	97
5.2.7. Influența temperaturii asupra detectării obstacolelor	98
5.2.7.1. Considerente generale	98
5.2.7.2. Concluzii	102
5.2.8. Modificarea vitezei presetate în sistemul de comandă	102
5.2.8.1. Considerente generale	102
5.2.8.2. Concluzii	103
5.3. Concluzii.....	103
6. Analiza teoretică și experimentală a unui robot mobil în scena de lucru	105
6.1. Generalități	105
6.2. Robotul mobil utilizat in experimente.....	105
6.2.1. Introducere	105
6.2.2. Structura robotului mobil	105
6.2.3. Analiza teoretică și experimentală a motorului de acționare integrat în modulele robotului mobil	107
6.2.3.1. Caracteristici ale motorului de current continuu utilizat	107
6.2.3.2. Determinări experimentale referitoare la funcționarea micromotorului la mers în gol	110
6.2.3.3. Determinarea parametrilor funcționali ai micromotorului de current continuu	115
6.2.3.4. Modulul de tracțiune al robotului mobil	117
6.2.3.5. Modulul de direcție al robotului mobil	123
A. Aspecte constructive și funcționale	123
B. Analiza fazei de pornire – oprire la mecanismul de direcție.....	128
6.2.3.6. Modelul matematic al geometriei roților	129
A. Introducere.....	129
B. Modelul cinematic.....	132

6.2.3.7. Simulare Matlab.....	136
6.2.4. Conducerea robotului față de un obstacol lateral	139
6.2.4.1. Generalități	139
6.2.4.2. Descriere experiment	140
6.2.4.3. Rezultate și prelucrarea datelor	141
A. Rezultate obținute	141
B. Prelucrarea statistică a rezultatelor.....	144
C. Analiza rezultatelor și concluzii.....	147
6.3. Concluzii	148
7. Concluzii finale și contribuții personale	149
7.1. Concluzii finale.....	149
7.2. Contribuții originale ale tezei	150
7.3. Diseminarea rezultatelor cercetărilor	151
7.4. Direcții viitoare de cercetare în domeniu	152
Bibliografie	153
Anexe	161
Anexa 3	161
Anexa 4.1.....	163
Anexa 4.2.....	164
Anexa 4.3.....	165
Anexa 4.4.....	166
Anexa 4.5.....	167
Anexa 4.6.....	168
Anexa 4.7.....	169
Anexa 4.8.....	171
Anexa 4.9.....	175
Anexa 5.1.....	178
Anexa 5.2.....	179
Anexa 5.3.....	180
Anexa 5.4.....	181
Anexa 5.5.....	184
Anexa 5.6.....	185
Anexa 5.7.....	186

Anexa 5.8.....	187
Anexa 5.9.....	195
Anexa 5.10.....	197
Anexa 5.11.....	201
Anexa 6.1.....	205
Anexa 6.2.....	207
Anexa 6.3.....	208
Anexa 6.4.....	210
Anexa 6.5.....	211

LISTA DE FIGURI

Figura 1.1.	Fluxul tehnologic către integrarea mecatronică.....	2
Figura 1.2.	Evoluția roboticii	3
Figura 1.3.	Parcursul cercetării teoretice și experimentale.....	5
Figura 2.1.	Clasificarea oscilațiilor din punct de vedere al formei de energie dezvoltată	10
Figura 2.2.	Clasificarea oscilațiilor din punct de vedere al conservării energiei	10
Figura 2.3.	Semnal periodic	11
Figura 2.4.	Oscilație sinusoidală	11
Figura 2.5.	Mărimi măsurabile.....	13
Figura 2.6.	Oscilația curentului în faza motorului pas cu pas.....	13
Figura 2.7.	Clasificarea undelor	14
Figura 2.8.	Clasificarea radiației electromagnetice	18
Figura 2.9.	Reflexia și refracția undelor electromagnetice.....	19
Figura 2.10.	Reflexia difuză	20
Figura 2.11.	Surse de erori în procesul de localizare a unui obstacol	20
Figura 3.1.	Variante ale ignoranței.....	22
Figura 3.2.	Forme ale inconsistenței în informații	23
Figura 3.3.	Categoriile de imperfecțiuni ale informațiilor pentru robotul mobil .	23
Figura 3.4.	Incertitudine și informații	24
Figura 3.5.	Principiul fuziunii senzoriale la nivel uman.....	26
Figura 3.6.	Schema generală a integrării multisenzoriale	26
Figura 3.7.	Schema unei arhitecturi pentru fuziunea multisenzorială	27
Figura 3.8.	Arhitectura pentru fuziunea multisenzorială	30
Figura 3.9.	Poziția relativă a robotului, senzori și obstacole	31
Figura 3.10.	Variante de situare ale obstacolului pe parcursul experimentelor .	32
Figura 3.11.	Aspecte din timpul experimentelor	32
Figura 3.12.	Densitatea de probabilitate în mod comparativ	33
Figura 4.1.	Senzorul Parallax Ping (vedere din față și verso)	35
Figura 4.2.	Sistemul de achiziție de date.....	36
Figura 4.3.	Fereastra de dialog pentru	36
Figura 4.4.	Detaliu din timpul achiziției	36
Figura 4.5.	Telemetru laser Bosch DLE 70 Professional.	36
Figura 4.6.	Imagini privind standul experimental	37

Figura 4.7.	Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință.....	38
Figura 4.8.	Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință, prin aplicarea indicelui de corecție.	39
Figura 4.9.	Caracteristica elementului senzorial	40
Figura 4.10.	XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 (imagine față – verso).....	41
Figura 4.11.	Schema electrică a standului experimental.....	41
Figura 4.12.	Ferestrele de lucru ale programului.	42
Figura 4.13.	Standul experimental și sistemul de achiziție de informații.....	43
Figura 4.14.	Tensiunea de ieșire a senzorului în funcție de distanța față de obstacol.....	43
Figura 4.15.	Aproximarea matematică a caracteristicii directe.	44
Figura 4.16.	Aproximarea matematică a caracteristicii inverse.....	45
Figura 4.17.	Reprezentarea matematică a caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 2.....	46
Figura 4.18.	Imagini cu obiectele plasate în spațiul de lucru.....	48
Figura 4.19.	Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.	49
Figura 4.20.	Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 3 pentru intervalul [25; 125]mm.	51
Figura 4.21.	Aproximarea caracteristicii printr-o polinomială de gradul 4 pentru intervalul [125; 1600]mm.	52
Figura 4.22.	Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație exponențială de gradul 2.	53
Figura 4.23.	Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 4.....	53
Figura 4.24.	Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.	55
Figura 4.25.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial intervalul [25; 100]mm.....	57
Figura 4.26.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial intervalul [125; 1600]mm.....	58
Figura 4.27.	Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație exponențială de gradul 2.	59
Figura 4.28.	Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 4.	59

Figura 4.29.	Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.	61
Figura 4.30.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial intervalul [25; 100]mm.....	63
Figura 4.31.	Aproximarea caracteristicii elementului senzorial intervalul [125;1600]mm.	64
Figura 4.32.	Aproximarea caracteristicii inverse a elementului senzorial intervalul [125 – 1600]mm printr-o ecuație exponențială.....	65
Figura 4.33.	Aproximarea caracteristicii inverse a elementului senzorial intervalul [125; 1600] printr-o ecuație polinomială.	65
Figura 5.1.	Schema electrică.....	69
Figura 5.2.	Standul experimental	69
Figura 5.3.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 10° în sens trigonometric	70
Figura 5.4.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 20° în sens trigonometric	71
Figura 5.5.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 30° în sens trigonometric	71
Figura 5.6.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 10° în sensul acelor de ceasornic	71
Figura 5.7.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 20° în sensul acelor de ceasornic	72
Figura 5.8.	Fereastra de calcul, obiect rotit cu 30° în sensul acelor de ceasornic.....	72
Figura 5.9.	Obiectele plasate în scena de lucru.	73
Figura 5.10.	Schema standului experimental pentru primul set de experimente.....	74
Figura 5.11.	Schema standului experimental pentru cel de-al treilea set de experimente.....	75
Figura 5.12.	Schema standului experimental pentru setul 5 de experimente ...	76
Figura 5.13.	Schema standului experimental pentru setul 6 de experimente ...	77
Figura 5.14.	Standul experimental	78
Figura 5.15.	Schema principiului de funcționare.....	79
Figura 5.16.	Imagini cu standul experimental	79
Figura 5.17.	Schema standului experimental	80
Figura 5.18.	Locul geometric al centrului cercului pentru fiecare caz în parte ..	82
Figura 5.19.	Mărimea unghiului sundeii acustice	83
Figura 5.20.	Imagini cu standul experimental	83

Figura 5.21.	Imagini cu standul experimental	85
Figura 5.22.	Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință.....	87
Figura 5.23.	Obiect și senzor plasați la diferite înălțimi în scena de lucru	87
Figura 5.24.	Reprezentarea erorilor în funcție de înălțime pentru distanța $d = 1500\text{mm}$	89
Figura 5.25.	Reprezentarea erorilor în funcție de înălțime pentru distanța $d = 1000\text{mm}$	89
Figura 5.26.	Sistemul sensorial plasat în scena de lucru.....	90
Figura 5.27.	Schema de principiu	90
Figura 5.28.	Standul experimental	91
Figura 5.29.	Obiect rotit 20° în sens trigonometric.....	92
Figura 5.30.	Obiect rotit 20° în sensul acelor de ceasornic.	92
Figura 5.31.	Obiect rotit 10° în sens trigonometric.....	92
Figura 5.32.	Obiect rotit 10° în sensul acelor de ceasornic.	92
Figura 5.33.	Poziționarea obiectului în standul experimental.	93
Figura 5.34.	Standul experimental	93
Figura 5.35.	Reprezentarea deplasări <i>stânga</i> – <i>dreapta</i> în funcție de distanța reală	94
Figura 5.36.	Poziționarea obiectului în standul experimental.....	95
Figura 5.37.	Aspecte privind amplasarea senzorilor ultrasonici și a obiectelor în spațiul de lucru.	96
Figura 5.38.	Standul experimental	97
Figura 5.39.	Aspecte din timpul experimentelor	98
Figura 5.40.	Schema standului și a procesului de lucru	99
Figura 5.41.	Diferența de distanță pentru $t=27^\circ\text{C}$	102
Figura 5.42.	Diferența de distanță pentru $t=24.5^\circ\text{C}$	102
Figura 5.43.	Diferența de distanță în funcție de valoarea vitezei sunetului	103
Figura 6.1.	Robotul mobil utilizat în experimentele de laborator.	106
Figura 6.2.	Schema de principiu a micromotorului electric.....	107
Figura 6.3.	Circuitul electric al motorului electric.	107
Figura 6.4.	Caracteristica mecanică a motorului naturală și caracteristici artificiale.	108
Figura 6.5.	Caracteristica mecanică a motorului de c.c.....	110

Figura 6.6.	Montajul experimental realizat pentru măsurarea turației motorului în gol.....	110
Figura 6.7.	Caracteristica tensiune – turație la mersul în gol.	111
Figura 6.8.	Dependența tensiunii electromotoare față viteza unghiulară.	112
Figura 6.9.	Semnificația componentei de frecare uscată și a componentei de frecare vâscoasă.....	114
Figura 6.10.	Determinarea rezistenței indusului.	115
Figura 6.11.	Schema electrică a motajului experimental.	115
Figura 6.12.	Transmisia reductoare.	117
Figura 6.13.	Schema sistemului de tracțiune redus la arborele micromotorului.....	118
Figura 6.14.	Standul experimental pentru măsurarea turației la roata motoare.	119
Figura 6.15.	Configurarea standului pentru studiul experimental al fazei de pornire și oprire.....	119
Figura 6.16.	Momentul frecărilor pentru funcționarea staționară.	120
Figura 6.17.	Parametrii fazei de pornire, tensiune de alimentare $U = 5V$	122
Figura 6.18.	Parametrii fazei de oprire, tensiune de alimentare $U = 5V$	122
Figura 6.19.	Poziționarea roții față de batiu.	123
Figura 6.20.	Schema principial – funcțională a sistemului de direcție.....	123
Figura 6.21.	Fragmet din mecanismul de direcție.	124
Figura 6.22.	Schema de acționare a mecanismului de direcție.	124
Figura 6.23.	Fragment din transmisie.	124
Figura 6.24.	Fragment din mecanismul de direcție.	125
Figura 6.25.	Roata modului de direcție	126
Figura 6.26.	Mișcarea de pseudotranslație a tachetului.	126
Figura 6.27.	Balansierul modului de direcție.....	126
Figura 6.28.	Schema cinematică a mecanismului paralelogram și poligonul vitezelor	127
Figura 6.29.	Viteza unghiului de pivotare a roții directoare.....	128
Figura 6.30.	Conectarea osciloscopului la modulul de direcție	128
Figura 6.31.	Parametrii fazei de pornire, roțile rotite la dreapta	129
Figura 6.32.	Parametrii fazei de pornire, roțile rotite la stânga	129
Figura 6.33.	Sistemul de direcție Ackerman.....	130
Figura 6.34.	Sistemul de coordonate atașat mediului de lucru	131

Figura 6.35.	Mișcarea punct cu punct a robotului mobil	131
Figura 6.36.	Traietoria impusă.....	131
Figura 6.37.	Urmărirea traiectoriei impusă	132
Figura 6.38.	Schema robotului mobil	133
Figura 6.39.	Schema circuitelor de comandă a robotului mobil	135
Figura 6.40.	Fragment din program	135
Figura 6.41.	Schema bloc în Simulink a micromotorului la funcționarea în gol	136
Figura 6.42.	Vitezele unghiulare ale arborelui	136
Figura 6.43.	Schema bloc în Simulink a roților motrice	137
Figura 6.44.	Viteza unghiulară a roților motrice	137
Figura 6.45.	Cale rutiera, suport pentru traiectoria unui autoturism	139
Figura 6.46.	Robot mobil echipat cu doi senzori.	140
Figura 6.47.	Schema traseului.	141
Figura 6.48.	Corelarea timpilor de mișcare.	142
Figura 6.49.	Traietoria robotului, timpul de întârziere setat la 0s.....	143
Figura 6.50.	Traietoria robotului, timpul de întârziere setat la 0,25s.	143
Figura 6.51.	Traietoria robotului, timpul de întârziere setat la 0,5s.	143
Figura 6.52.	Calculul suprafețelor.....	147

LISTA DE TABELE

Tabel 1.1.	Definiția mecatronicii	1
Tabel 1.2.	Clasificarea sistemelor mecatronice	2
Tabel 2.1.	Spectrul cromatic al luminii albe	17
Tabel 3.1.	Valori statistice	32
Tabel 4.1.	Rezultate prelucrate în urma procesului de analiză	38
Tabel 4.2.	Rezultate prelucrate prin aplicarea indicelui de corecție.	39
Tabel 4.3.	Date prelucrate furnizate de senzorul XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200	43
Tabel 4.4.	Indicii statistici referitori la caracteristica directă.	44
Tabel 4.5.	Indicii statistici referitori la caracteristica inversă.	45
Tabel 4.6.	Modul de evaluare a erorilor – cazul ecuația de gradul 1	45
Tabel 4.7.	Indicii statistici referitori la caracteristica inversă.	46
Tabel 4.8.	Modul de evaluare a erorilor – cazul ecuația de gradul 2	47
Tabel 4.9.	Rezultate finale pentru cele 3 cazuri de experimente	48
Tabel 4.10.	Modul de evaluare a erorilor – obiect de culoare albă	50
Tabel 4.11.	Indicii statistici pentru intervalul [25; 1600]mm	50
Tabel 4.12.	Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 125]mm.	51
Tabel 4.13.	Indicii statistici referitori la intervalul [25; 125]mm.	51
Tabel 4.14.	Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [125; 1600]mm.	52
Tabel 4.15.	Indicii statisticii referitori la intervalul [125; 1600]mm.	53
Tabel 4.16.	Rezultatele obținute în compararea ecuației exponențiale și ecuației polinomiale.	54
Tabel 4.17.	Comparația indicilor statistici referitori la ecuația exponențială și ecuația polinomială determinate	54
Tabel 4.18.	Calculul erorilor – obiect de culoare albă	55
Tabel 4.19.	Modul de evaluare a erorilor – obiect de culoare roșie	56
Tabel 4.20.	Indicii statistici pentru intervalul [25; 1600]mm	56
Tabel 4.21.	Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 100]mm	57
Tabel 4.22.	Indicii statistici referitori la intervalul [25; 100]mm	57
Tabel 4.23.	Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [125; 1600]mm....	58
Tabel 4.24.	Indicii statistici referitori la inervalul [125; 1600]mm	59
Tabel 4.25.	Rezultatele obținute prin ecuația exponențială de gradul 2 și ecuația polinomială de gradul 4.	60

Tabel 4.26.	Comparatia indicilor statistici – obiect de culoare roșie	60
Tabel 4.27.	Calculul erorilor – obiect de culoare roșie	61
Tabel 4.28.	Modul de evaluare a erorilor – cazul obiect de culoare verde	62
Tabel 4.29.	Indicii statistici pentru intervalul [25; 100]mm	62
Tabel 4.30.	Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [25; 100]mm	63
Tabel 4.31.	Indicii statistici pentru intervalul [25; 100]mm	63
Tabel 4.32.	Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [125; 1600]mm....	64
Tabel 4.33.	Indicii statistici pentru intervalul [125; 1600]mm	65
Tabel 4.34.	Analiza rezultatelor obținute prin ecuația exponențială de gradul 2 și ecuația polinomială de gradul 4.	66
Tabel 4.35.	Comparația indicilor statistici pentru intervalul 125; 1600]mm....	66
Tabel 4.36.	Calculul erorilor – obiect de culoare verde.....	67
Tabel 5.1.	Rezultate prelucrate	70
Tabel 5.2.	Distanța măsurată de cei trei senzori din prelucrarea datelor	70
Tabel 5.3.	Ecuațiile polinomiale pentru fiecare caz în parte	72
Tabel 5.4.	Date obținute în urma prelucrării rezultatelor	73
Tabel 5.5.	Distanțe măsurate cu laserul pentru primul set de experimente ..	74
Tabel 5.6.	Rezultate prelucrate, primul set de experimente	74
Tabel 5.7.	Distanțe măsurate cu laserul pentru al doilea set de experimente	74
Tabel 5.8.	Rezultate prelucrate, setul 2 de experimente	75
Tabel 5.9.	Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 3 de experimente	75
Tabel 5.10.	Rezultate prelucrate, setul 3 de experimente	76
Tabel 5.11.	Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 4 de experimente	76
Tabel 5.12.	Rezultate prelucrate, setul 4 de experimente	76
Tabel 5.13.	Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 5 de experimente	77
Tabel 5.14.	Rezultate prelucrate, setul 5 de experimente	77
Tabel 5.15.	Distanțele măsurate cu laserul pentru setul 6 de experimente.....	77
Tabel 5.16.	Rezultate prelucrate, setul 6 de experimente	78
Tabel 5.17.	Rezultate obținute pentru distanța $y = 300\text{mm}$	80
Tabel 5.18.	Rezultate obținute pentru distanța $y = 500\text{mm}$	80
Tabel 5.19.	Rezultate obținute pentru distanța $y = 700\text{mm}$	80
Tabel 5.20.	Rezultate obținute	81
Tabel 5.21.	Unghiuri la care obiectul este detectat	84
Tabel 5.22.	Unghiuri la care obiectul este detectat	84
Tabel 5.23.	Unghiuri la care obiectul este detectat	84

Tabel 5.24.	Rezultate prelucrate	86
Tabel 5.25.	Date prelucrate pentru $d = 1500\text{mm}$	88
Tabel 5.26.	Date prelucrate pentru $d = 1000\text{mm}$	88
Tabel 5.27.	Rezultate prelucrate	91
Tabel 5.28.	Măsura unghiurilor rezultate din prelucrarea datelor.....	92
Tabel 5.29.	Prelucrarea informațiilor preluate de senzor	94
Tabel 5.30.	Prelucrarea rezultatelor.	95
Tabel 5.31.	Rezultatele preluate	97
Tabel 5.32.	Rezultate prelucrate	101
Tabel 5.33.	Diferențe de distanțe măsurate.....	101
Tabel 5.34.	Date prelucrate.....	102
Tabel 5.35.	Diferențele de distanță pentru $t=26^{\circ}\text{C}$	103
Tabel 6.1.	Caracteristicile micromotorului de curent continuu.	109
Tabel 6.2.	Turația motorului la diferite tensiuni de alimentare.	111
Tabel 6.3.	Tensiunea electromotoare și coeficientul K_e	112
Tabel 6.4.	Valorile calculate pentru momentul motor	113
Tabel 6.5.	Numărul de dinți pentru transmisia modulului de tracțiune.	117
Tabel 6.6.	Turația și viteza unghiulară a roții motoare la diferite tensiuni de alimentare.....	119
Tabel 6.7.	Diferențele de turație și eroarea rezultate	121
Tabel 6.8.	Valorile parametrilor analizați	137
Tabel 6.9.	Rezultatele obținute în funcție de timpul de răspuns al roților de direcție.	142

1. INTRODUCERE

1.1. Mecatronică și robotică

Conceptul de mecatronică s-a introdus în Japonia în 1969. Termenul, în sine, a fost brevetat de către concernul Yaskawa Electric între anii 1971 - 1972 și protejat până în 1982, ca marcă a acestei firme. Inițial termenul se referea la completarea structurilor mecanice din construcția aparatelor electronice. 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. În prezent, mecatronica definește o știință inginerască interdisciplinară care își propune să îmbunătățească performanțele și funcționalitatea sistemelor tehnice.

Definiția formulată, în 1986, de către Comitetul Consultativ pentru Cercetare și Dezvoltare Industrială al Comunității Europene este: "Mecatronica este o îmbinare sinergetică între: ingineria mecanică de precizie, controlul electronic și gândirea sistemică în proiectarea produselor și proceselor. Este o tehnologie interdisciplinară care unește disciplinele de bază [...] și include deopotrivă domenii, care, altfel, normal, nu ar putea fi asociate", [Berian, 2011].

Câteva abordări ale definiției mecatronicii sunt enunțate în tabelul următor:

Tabel 1.1. Definiția mecatronicii

<u>Sursa</u>	<u>Definiția</u>
DEX	Mecatronică, mecatronici – s.f., Disciplină tehnică aflată la interfața dintre electronică, mecanică și informatică; din fr. mécatronique, engl. mechatronics, [***1.1.].
Wikipedia	Mecatronica este combinația sinergetică sistematică a mecanicii, electronicii și a informaticii în timp real, [***1.2.].
IEEE (Institut of Electrical and Electronics Engineers); ASME (American Society of Mechanical Engineers)	Mecatronica este integrarea sinergetică a ingineriei mecanice cu controlul electronic și cel inteligent cu calculatoare în proiectarea și fabricația produselor și proceselor, [Matieș, 1998].
Universitatea Politehnică Timișoara	Mecatronica reprezintă o modalitate flexibilă, multitehnică de integrare a ingineriei mecanice, electronice, știința calculatoarelor și informatică în scopul realizării de produse și sisteme inteligente, [***1.3.].
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca	Mecatronica este un domeniu transdisciplinar al ingineriei care se bazează pe disciplinele clasice: inginerie mecanică, inginerie electrică și știința calculatoarelor, [***1.4.].

Conform primei conferințe *IFAC (International Conference of Automatic Control)* de „Sisteme Mecatronice”, organizată între 18 și 20 septembrie 2000 la

Darmstadt, Germania, o imagine asupra complexității domeniilor din „mecatronică” este următoarea, tabelul 1.2. [Prisăcaru, 2011],[Dumitriu, 2006]:

Tabel 1.2. Clasificarea sistemelor mecatronice

Secțiunea	Domenii
A	Sisteme mecatronice ce includ vehicule mecatronice, motoare și mașini mecatronice, trenuri mecatronice și sisteme spațiale mecatronice.
B	Componente mecatronice, cu temele actuatori și dispozitive mecatronice și lagăre magnetice.
C	Roboți și mașini pășitoare, cuprinzând roboți mecatronici, sisteme robotice mobile, mașini pășitoare.
D	Proiectarea sistemelor mecatronice, având ca scop modelarea și identificarea, instrumente software, simularea în timp real.
E	Controlul automat al sistemelor mecatronice care s-a concentrat asupra metodelor de control, a controlului mișcării și vibrațiilor și a sistemelor mecatronice pentru detectarea și diagnosticarea erorilor.

Termenul “mecatronică” a fost utilizat pentru a descrie fuziunea tehnologică: *mecanică – electronică –informatică*.

Mecatronica reprezintă rezultatul firesc al evoluției în dezvoltarea tehnologică. Aceasta e reprezentată sugestiv în figura 1.1. [Berian, 2010], [***1.5.], [***1.6.].

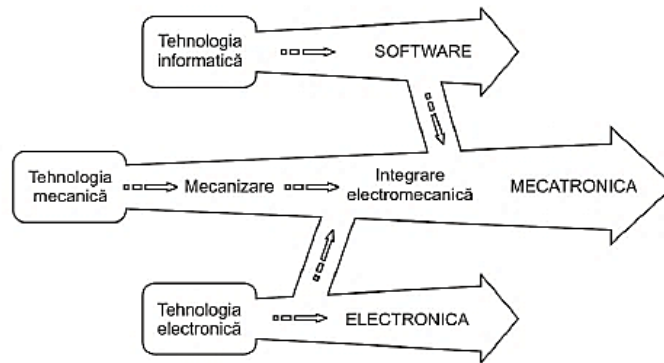


Figura 1.1. Fluxul tehnologic către integrarea mecatronică.

Robotica este știința care se ocupă cu tehnologia, design-ul și fabricarea roboților [Bîtea, 2012]. Alte definiții ale roboticii, respectiv robotului sunt prezentate în cele ce urmează:

„Robotul este un manipulator reprogramabil, multifuncțional proiectat pentru a deplasa material, 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 a extrage informație dintr-un mediu și a utiliza cunoașterea pentru a se mișca singur 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)

Termenul robot a fost utilizat pentru prima dată de Josef Čapek și Karel Čapek în lucrările lor de science fiction la începutul secolului XX. Cuvântul robot este de origine slavă și se poate traduce prin: muncă, clacă sau muncă silnică.

Bazele roboților de azi stau mult mai departe. Matematicianul grec *Archytas* a construit un porumbel propulsat cu vapori, care putea zbura singur. Acest porumbel era confecționat din lemn și umplut cu aer sub presiune, [***1.7.].

Scriitorul Isaac Asimov definește în literatura științifico-fantastică (SF) prin anii 1950 cele trei legi ale roboților și mașinilor „inteligente”, un concept revoluționar la acea vreme. Cele 3 legi sunt:

Legea 1 - Un robot nu are voie să pricinuiască vreun rău unei ființe umane, sau, prin neintervenție, să permită ca unei ființe omenești să i se facă un rău.

Legea 2 - Un robot trebuie să se supună ordinelor date de către o ființă umană, atât timp cât ele nu intră în contradicție cu Legea 1.

Legea 3 - Un robot trebuie să-și protejeze propria existență, atât timp cât acest lucru nu intră în contradicție cu Legea 1 sau Legea 2.

Ațiunea din romanele sale a condus la apariția unei legi suplimentare, intitulată *Legea 0* - Un robot nu are voie să pricinuiască vreun rău umanității sau să permită prin neintervenție ca umanitatea să fie pusă în pericol.

Ca urmare a *Legii 0*, toate celelalte legi se modifică corespunzător, *Legea 0* fiind legea supremă, [***1.8.].

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. Această evoluție în abordarea conceptuală și constructivă s-a făcut simțită și în zona aplicativă (fig.1.2.), [Mondoc, 2014], [Gorie, 2014].

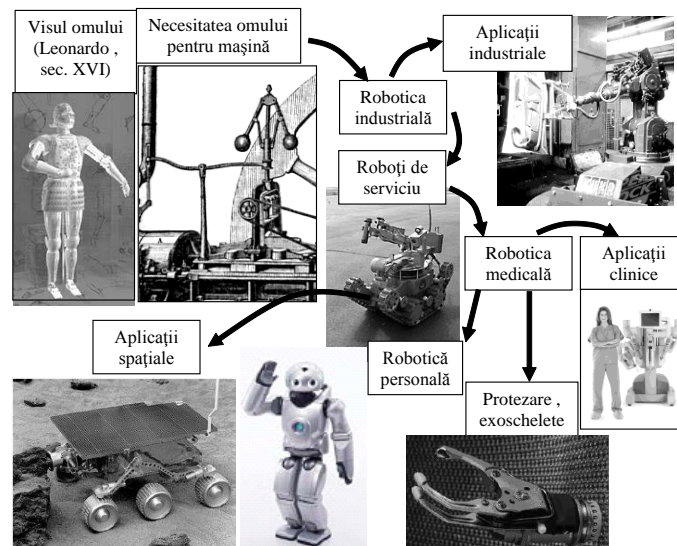


Figura 1.2. Evoluția roboticii

Robotul mobil este, în general, un dispozitiv mecatronic complex, cu un anumit grad de autonomie ce permite navigarea în scenele de operare naturale sau create aprioric. Robotul mobil trebuie să fie capabil să execute o clasă de sarcini utile pe parcursul deplasării sale.

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

Cercetările în domeniu pun accent pe crearea roboților mobili capabili să se deplaseze într-un mediu nestructurat fără intervenția operatorului uman și să realizeze anumite obiective propuse.

1.2. Motivația abordării temei tezei de doctorat

Filosofia mecatronică a marcat trecerea de la ingineria tradițională, secvențială la ingineria simultană sau concurrentă. Astfel, a apărut noțiunea de "mașină inteligentă", odată cu revoluția mecatronică. Mecatronica, prin caracterul său integrator, sinergic, transcende limitele unei singure discipline, reprezentând o „viziune globală în domeniul tehnologic” [Mătieș, 2002].

Multe aplicații cu roboți mobili au constituit subiecte de cercetare [Rozhok, 2008], [Otomanski, 2008], [Sermanet, 2009], [Mubarak, 2013]. Dezvoltarea de sisteme mecatronice mobile reprezintă o provocare pentru cercetători atunci când mediul nu este structurat. În medii nestructurate, este dificil sau periculos pentru operatorii umani să îndeplinească sarcina. Acesta este cazul în detectarea și dezarmarea câmpurilor de mine, în incinte pline cu fum sau vapori de substanțe toxice. Pe de altă parte, există medii nestructurate inaccesibile oamenilor: conducte înguste, spațiul cosmic, planete, adâncul oceanelor. Nevoia de roboți mobili care să lucreze independent în aceste medii nestructurate este evidentă.

Navigarea într-un mediu nestructurat include probleme cum ar fi evitarea obstacolelor, evitarea pericolelor, cum ar fi găuri, bolovani, sau locații periculoase. Robotul mobil trebuie să știe să ia decizii singur fără intervenția operatorului uman, în funcție de caracteristicile mediului în care operează, să aprecieze corect distanța până la obstacole. Evoluția roboticii mobile se va axa pe un caracter tot mai autonom față de operatorul uman și cu o capacitate sporită de a îndeplini sarcini cât mai precise și cu un grad de complexitate cât mai ridicat.

Analiza constructivă, teoretică și experimentală a roboților mobili reprezintă o necesitate cu o extensie deosebită.

1.3. Obiectivele tezei de doctorat

Teza de doctorat își propune să aducă contribuții în analiza unui mediu nestructurat și să prezinte studiul experimental al navigării unui robot mobil în mediul respectiv.

Obiectivul principal al tezei de doctorat este: analiza teoretică, constructivă și experimentală a unui robot mobil, autonom, destinat cercetărilor dintr-un mediu nestructurat.

Obiectivului principal i-au fost subordonate o serie de obiective operaționale sau specifice integrate într-un parcurs, conform cu schema prezentată în figura 1.3.:

- realizarea unei cercetări extinse referitoare la problema abordată;
- analiza teoretică a fenomenelor fizice ce stau la baza principiilor de funcționare a senzorilor ultrasonici și în infraroșu.

- realizarea standurilor de lucru pentru experimentarea senzorilor ultrasonici și a senzorilor în infraroșu;
- proiectarea unor experimente pentru determinarea caracteristicilor funcționale ale senzorilor utilizați;
- efectuarea experimentelor de laborator folosind senzori ultrasonici și în infraroșu;
- elaborarea unui material suport pentru analiza și sinteza robotului mobil utilizat ca și sistem mecatronic;
- modelarea și analiza experimentală a modulelor de direcție și de tracțiune ale robotului mobil;
- analiza teoretică și experimentală privind evoluția unui robot mobil într-un spațiu cu obstacole analizat.

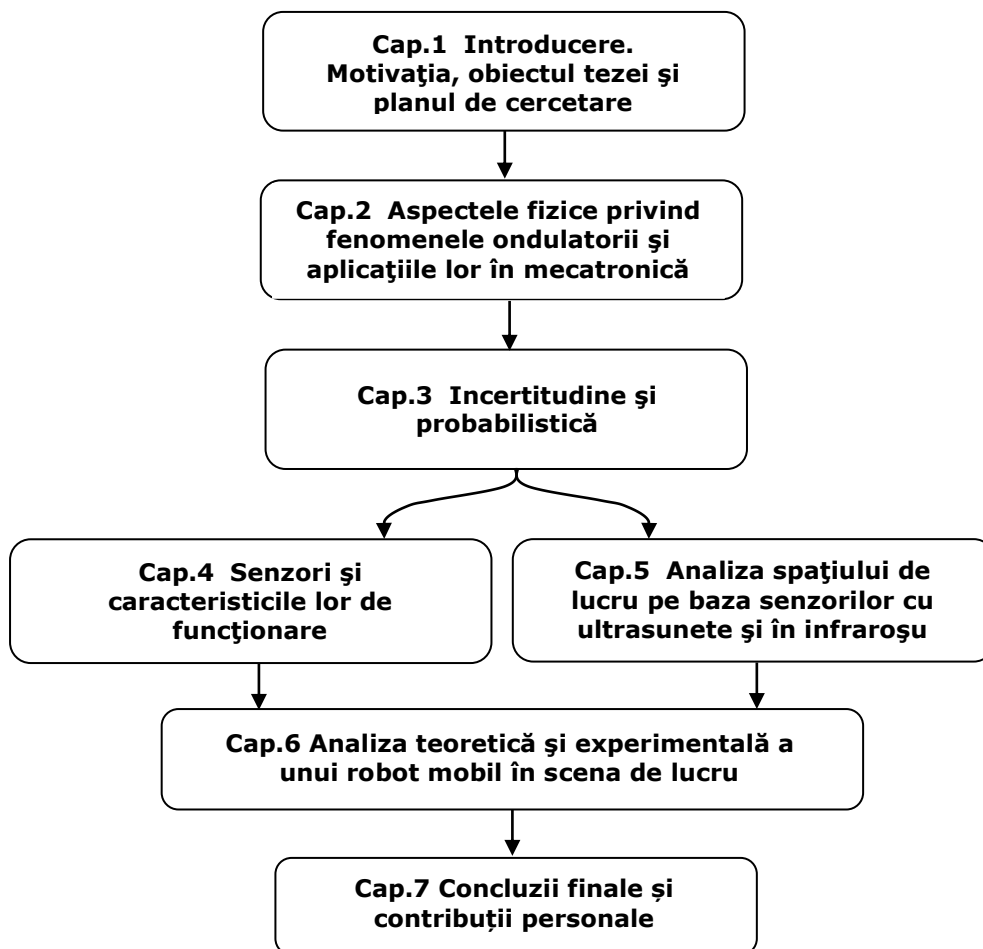


Figura 1.3. Parcurșul cercetării teoretice și experimentale

1.4. Structura tezei de doctorat

Realizarea obiectivelor menționate anterior este descrisă în următoarele capitole ale tezei de doctorat după cum urmează:

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. În finalul capitolului este prezentată structura tezei de doctorat pe capitole și extensia acestora. Capitolul are o extensie de 7 pagini și include 3 figuri și 2 tabele.

Capitolul 2 - Aspectele fizice privind fenomenele undulatorii și aplicațiile lor în mecatronică - prezintă o sinteză bibliografică referitoare la fenomenele undulatorii, unde și oscilații. Aceste fenomene fizice stau la baza funcționării senzorilor ultrasonici și în infraroșu. Capitolul are o extensie de 12 pagini și include 11 figuri, 28 relații de calcul și 1 tabel.

Capitolul 3 - Incertitudine și probabilistică - 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 aleator, funcția de repartiție și de densitate de probabilitate, valoare medie, abatere standard, repartiții probabilistice în robotică, repartiția erorilor aleatoare, variabile aleatoare multiple. Capitolul 3 are o extensie de 13 de pagini în care sunt integrate 12 figuri, 17 relații de calcul și 1 tabel.

Capitolul 4 – Senzori și caracteristicile lor de funcționare – explică modul de abordare a procesului de localizare a obstacolelor pe baza senzorilor ultrasonici și în infraroșu. În acest capitol se determină caracteristica directă și caracteristica inversă a senzorilor utilizați pentru experimentele ulterioare. O parte a datelor experimentale au fost incluse în anexele asociate acestui capitol. Capitolul 4 are o extensie de 34 de pagini și include 33 de figuri, 30 relații de calcul și 36 tabele.

Capitolul 5 – Analiza spațiului de lucru pe baza senzorilor cu ultrasunete și în infraroșu – 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. Rezultatele experimentale au fost prelucrate în Microsoft Office Excel și au fost calculați parametrii statistici. Rezultatele experimentale sunt însoțite de concluzii rezultate din prelucrarea datelor experimentale. O parte a datelor experimentale au fost incluse în anexele asociate acestui capitol. Concluziile rezultate în urma experimentelor încheie acest capitol care are o extensie de 35 pagini și include 43 figuri, 31 relații de calcul și 35 tabele.

Capitolul 6 - Analiza teoretică și experimentală a unui robot mobil în scena de lucru - include considerente teoretice și practice referitoare la navigarea unui robot mobil într-o scenă de lucru. Sunt prezentate exemple concrete, simulări și concluzii. În finalul capitolului sunt inserate rezultatele experimentale obținute prin urmărirea comportamentului unui robot într-o scenă de lucru. Capitolul are o extensie de 44 pagini și include 96 relații de calcul, 52 figuri și 9 tabele.

Capitolul 7 – Concluzii finale și contribuții personale - se referă la concluziile ce se desprind în urma activităților desfășurate, trece în revistă contribuțiile personale, diseminarea rezultatelor și recomandările pentru cercetările viitoare.

Bibliografia include o parte din titlurile utilizate pe parcursul elaborării tezei. Bibliografia cuprinde 110 titluri bibliografice.

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

2. ASPECTE FIZICE PRIVIND FENOMENELE ONDULATORII ȘI APLICAȚIILE LOR ÎN MECATRONICĂ

2.1. Noțiuni generale

Obiectivul acestui capitol constă în analiza teoretică a fenomenelor fizice ce stau la baza principiilor de funcționare a senzorilor ultrasonici și în infraroșu.

Evoluția în timp a tehnicii concretizată prin mecanizare, automatizare și robotizare a fost determinată, în principal, de posibilitatea de utilizare în mod superior a informației. În același timp, apariția microprocesorului și a memoriilor semiconductoare a permis o abordare funcțională a procesului de realizare a produselor tehnice.

Sinteza sistemelor tehnice are la bază dezvoltarea inginerescă de mașini sau sisteme tehnice de la funcții abstracte (de ex. modelul black-box) până la forme concrete și de detaliu (formă grafică – desenată). Metodele acestui nivel au la bază caracteristicile sistemului tehnic. Acest nivel presupune metode care iau în considerare transformări de materiale, energie și informație, efecte fizice, forme diverse, etc.

Caracteristica fundamentală a sistemelor fizice o reprezintă materialitatea lor. Aceasta implică mișcarea și existența obiectivă în spațiu și timp a sistemelor fizice. Studiul sistemelor și a proceselor fizice are la bază principiul cauzalității: fiecare stare din lumea obiectivă este efectul unor cauze care determină univoc starea respectivă. Sistemele fizice prezintă proprietăți mecanice, termice, electrice, magnetice, etc., care pot fi analizate prin etape succesive: observație și măsurare.

Concluziile obținute în cadrul experimentelor permit generalizări referitoare la legăturile obiective între fenomenele fizice și a relațiilor existente între mărimile fizice. Aceste legături și relații se exprimă prin propoziții, textual. Unele dintre acestea au un caracter fundamental și constituie enunțuri axiomatice: legi, principii, postulate. Alte enunțuri au un caracter derivat din primele și constituie teoreme.

O noțiune importantă, similară cu cea de sistem, o reprezintă noțiunea de model. Formularea unei teorii se poate echivala cu "construirea modelului" iar teoria ar putea defini "modelul" realității analizate. Modelul va reprezenta sub o formă utilizabilă, aspectele esențiale ale sistemului existent.

Din acest moment se pot enunța o serie de întrebări la care trebuie răspuns. Iată câteva dintre întrebările posibile:

- care sunt fenomenele fizice care pot fi considerate pentru studiul unui proces sau analiza unui mediu?
- cum se va aprecia calitatea modelului?
- cum se vor folosi în model toate cunoștințele pertinente?
- care este strategia optimă pentru a obține cunoștințele care lipsesc?
- cum se vor trata neliniaritățile?
- cum se poate exprima un sistem complex printr-unul simplu?

Conform DEX se consideră următoarele definiții [***2.1.]:

- Fenomen, fenomene, s.n. - manifestare exterioară a esenței unui lucru, unui proces etc., care este accesibilă, perceptibilă în mod nemijlocit;

• Ondulatoriu, -ie, ondulatorii, adj. - care se propagă în formă de unde sau de valuri, referitor la unde.

Este important de analizat care este suportul existent la nivelul fizicii pentru abordarea problemelor prezentate și dacă se regăsesc (și sub ce formă) aplicațiile în domeniul mecatronicii.

2.2. Oscilații

Prin *oscilație* se înțelege o variație periodică, aproape periodică sau pseudoperiodică în timp a valorilor unor mărimi care caracterizează un sistem fizic, însoțită de o transformare a energiei dintr-o formă în alta [Osaci, 2014]. Mișcarea oscilatorie reprezintă o mișcare care se execută de o parte și de alta a unei poziții de echilibru. Acest tip de mișcare apare în urma aplicării unui impuls unui sistem fizic aflat inițial în echilibru stabil, de exemplu: pendulul elastic.

Clasificarea oscilațiilor se poate face în baza unor criterii definitorii [Barvinschi, 2004]:

- a) Forma de energie dezvoltată în timpul oscilației (figura 2.1.);
- b) Modul de conservare a energiei sistemului oscilant (figura 2.2).

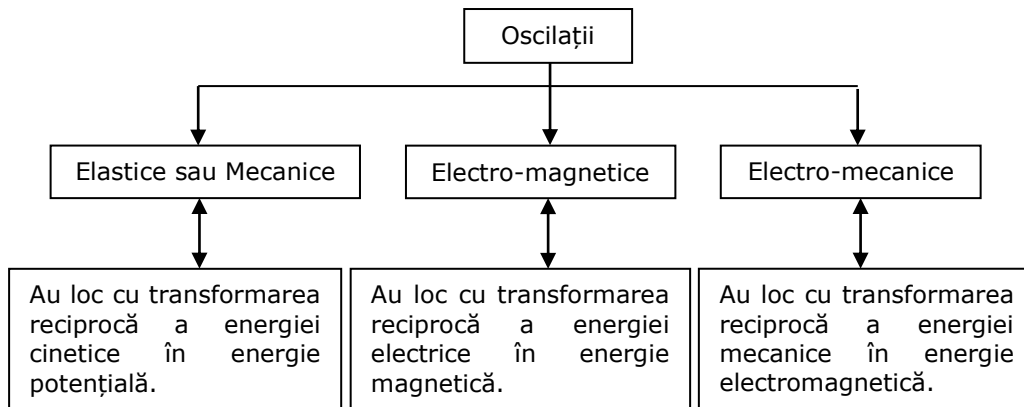


Figura 2.1. Clasificarea oscilațiilor din punct de vedere al formei de energie dezvoltată

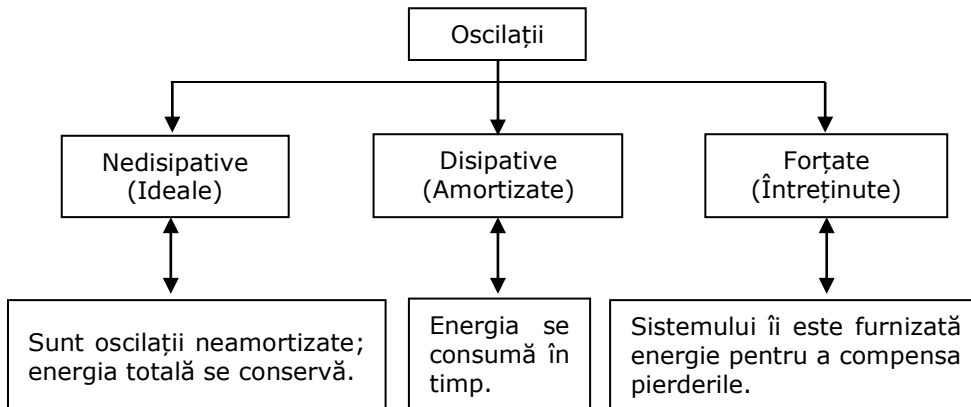


Figura 2.2. Clasificarea oscilațiilor din punct de vedere al conservării energiei

În literatura de specialitate, mișcarea oscilatorie reprezintă acea formă de mișcare în care periodic o formă de energie se transformă în altă formă de energie, proces reversibil (cazul ideal) sau numai parțial reversibil (cazul real) când intervin pierderi energetice [Rusu, 1985],[Luca, 2007],[Zaharie, 1993]. Mișcarea oscilatorie:

- se realizează simetric față de poziția de echilibru;
- are loc între două poziții limită situate de o parte și de alta a poziției de echilibru;
- este mișcarea periodică a unui sistem fizic care se efectuează de o parte și de alta a poziției de echilibru;

Fie un semnal $x(t)$ observat între momentele t_0 și t_0+T (figura 2.3.). Acest semnal se consideră periodic:

$$x(t) = x(t + T) \quad \forall t \in R \quad (2.1)$$

cu pulsația

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.2)$$

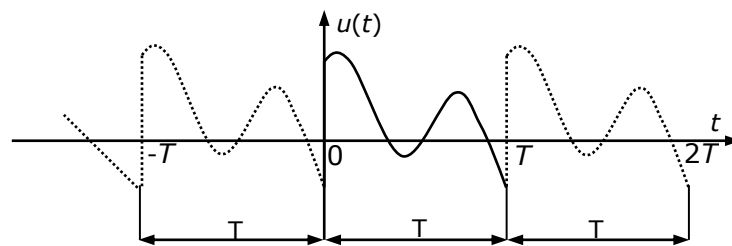


Figura 2.3. Semnal periodic

În figura 2.4. este prezentată schematic o oscilație sinusoidală cu mărimile fizice caracteristice precizate ulterior [Mihăilescu, 1958]:

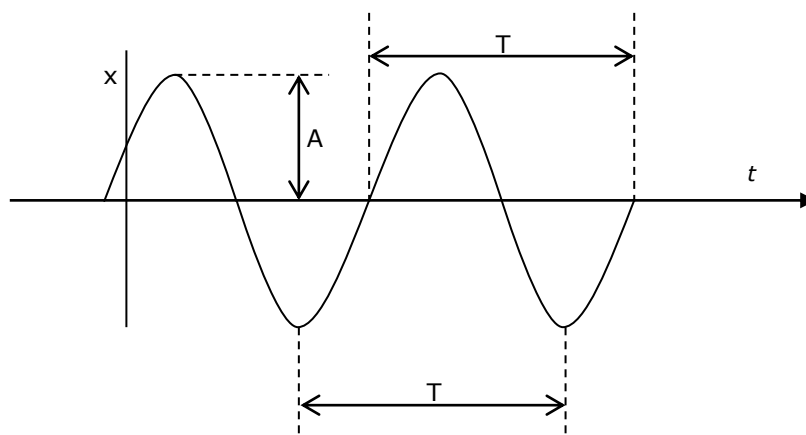


Figura 2.4. Oscilație sinusoidală

12 Aspecte fizice privind fenomenele ondulatorii și aplicațiile lor în mecatronică

Putem include în mărimile fizice caracteristice oscilațiilor:

Ciclul – totalitatea valorilor succesive pe care le ia mărimea periodică în timpul unei perioade;

Alternanța – totalitatea valorilor succesive pe care le ia mărimea periodică sau pseudoperiodică în timpul jumătății de perioadă, respectiv de pseudoperioadă;

Perioada (notată cu T) – intervalul de timp minim după care mărimea periodică ia aceeași valoare;

Frecvența (notată cu ν) – numărul de perioade în unitatea de timp:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

Elongația (notată cu x) – distanța la un moment dat a unui punct material care oscilează față de poziția de echilibru;

Amplitudinea (notată cu A) – valoarea absolută, maximă a elongației;

Pulsația (notată cu ω) – numărul de perioade în 2π unități de timp:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (2.4)$$

Oscilațiile sinusoidale sau armonice sunt oscilații în care mărimea care este funcție de timp depinde sinusoidal de timp.

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

sau

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.6)$$

unde x = elongația; ω = pulsația sau viteza unghiulară; φ = faza inițială;

$\omega t + \varphi$ = faza

Orice funcție periodică, $x(t) = x(t+T)$, poate fi scrisă ca o sumă infinită de oscilații armonice sinusoidale, fiecare cu frecvențe egale cu multipli întregi ai unei frecvențe minime, denumită frecvența fundamentală, conform relației:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (2.7)$$

Componentele care apar în sumele din relația anterioară se numesc armonici. Coeficienții a_n și b_n se determină prin integrarea pe durata unei perioade:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.8)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega t dt \quad (2.9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega t dt \quad (2.10)$$

Un semnal periodic se poate exprima astfel ca o combinație liniară de armonici ale căror frecvențe sunt multipli întregi ai fundamentalei, adică printr-o serie Fourier.

De interes pentru analiza teoretică și experimentală sunt proprietățile măsurabile ale unui sistem. Aceste mărimi respectă o clasificare după modul de variație în timp (figura 2.5.).

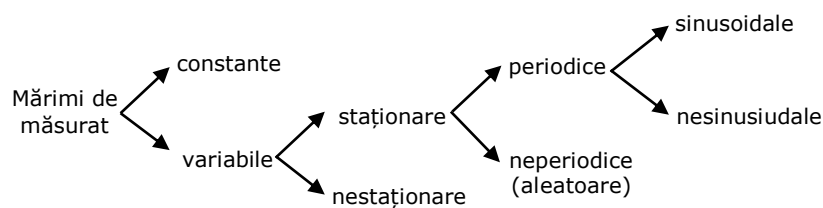


Figura 2.5. Mărimi măsurabile

Modelarea sistemelor, simularea și achiziția datelor apelează la mărimile măsurabile pe parcursul studiului teoretic și experimental.

Exemple practice întâlnite în literatura de specialitate sunt multiple. Dintre acestea mă refer la următoarele:

a) Motoarele pas cu pas se încadrează în categoria elementelor constructive mecatronice cu utilizare frecventă în sistemele mecatronice. Motoare pas cu pas hibrid combină caracteristicile de magnet permanent și motoare cu reluctanță magnetică variabilă, ceea ce le face o soluție atractivă pentru o varietate de aplicații *low-cost*. Pot să apară oscilații ale curentului de fază și în poziția rotorului între două etape consecutive de realizarea unui pas unghiular. Modelul matematic dezvoltat pentru sistemul mecatronic, simularea și analiza experimentală apelează la mărimi măsurabile corespunzătoare cu cele prezentate [Rocco, 2010]. În figura 2.6. se prezintă oscilația curentului într-o fază a motorului pas cu pas.

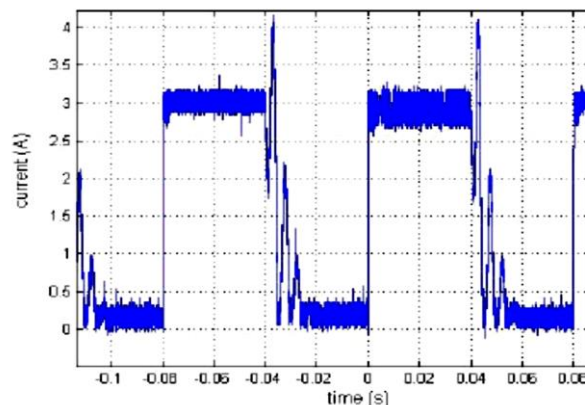


Figura 2.6. Oscilația curentului în faza motorului pas cu pas

b) Modelarea și controlul sistemelor mecatronice sunt caracterizate de procese oscilatorii și apelează, de asemenea, la mărimi măsurabile echivalente celor periodice.

Caracterul oscilant al poziției reprezintă principala problemă, în special în controlul sistemelor mecanice mobile din clasa sistemelor de transport și macarale. Cu amplitudine tot mai mare a mișcării oscilatorii, posibilitatea de coliziune cu obstacolele din mediu, se impune creșterea siguranței de funcționare. În aplicațiile robotizate, vibrațiile sistemului de ghidare sunt cauza erorilor dinamice. Ecuațiile dinamice care descriu procesele oscilatorii în cele două cauze sunt echivalente, apelează la aceleași mărimi măsurabile și abordează controlul sistemelor prin metoda algoritmilor genetici [Hubinsky, 2005].

2.3. Unde

Conceptul de undă este strâns legat de conceptul de oscilație. Unda reprezintă fenomenul de propagare din aproape în aproape, cu viteză finită, a unei perturbații produse într-un anumit punct din spațiu. În [Osaci, 2014] se disting mai multe categorii de unde, după natura perturbației, după cum reiese și din figura 2.7.

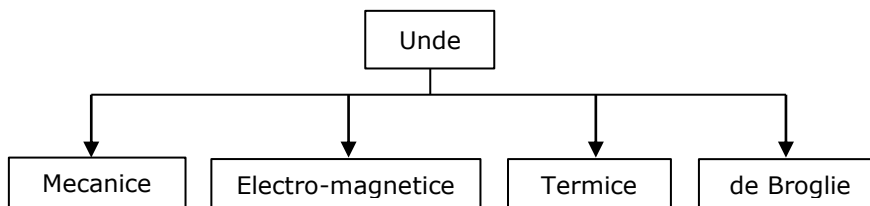


Figura 2.7. Clasificarea undelor

- Undele *mecanice* sau *elastice* sunt generate de perturbațiile mecanice ale unui sistem fizic și se propagă prin medii naturale. Undele mecanice se pot propaga prin medii solide, lichide sau gazoase, dar nu se pot propaga în vid;

- Undele *electro-magnetice* sunt generate de perturbații electromagnetice. Aceste unde au ca suport al propagării câmpul electromagnetic și se pot propaga atât prin substanță cât și în vid;

- Undele *termice* sunt generate de perturbații termice;

- Undele *de Broglie* sunt unde asociate microparticulelor a căror mișcare o descriu.

Propagarea unei unde se face cu o viteză finită, numită viteză medie. Unda nu reprezintă transport de materie ci numai transport de energie.

Viteza de propagare a unei unde este data de relația:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.11)$$

dar conform relației (2.11), rezultă:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.12)$$

unde λ = lungimea de undă; T = perioada; ν = frecvența.

Un exemplu edificator cu conexine directă la conceptul de undă și domeniul mecatronic este *spin-mecatronic*. Acest neologism se referă la un domeniu în curs de dezvoltare în cercetare în legătură cu exploatarea fenomenelor dependente de *spin* și a tehnologiilor electro-mecanice, magneto-mecanice, acustico-mecanice și opto-mecanice. Spin-mecatronică se referă la integrarea mecatronică a componentelor nano cu fizica de spin [***2.2], [Sidles, 1991], [Rugar, 2004], [de Loubens, 2007].

2.4. Proprietăți acustice ale mediului

O serie de elemente senzoriale își bazează funcționarea pe proprietăți acustice ale mediului de lucru. Din acest punct de vedere este de interes fizica fenomenelor localizate în procesul de analiză teoretică și experimentală a mărimilor măsurabile acustice. Intensitatea sunetului și presiunea acestuia, viteza de propagare, atenuarea acustică sau impedanța acustică sunt parametri de interes pentru o serie de componente constructive mecatronice [Regtien, 2012].

Undele sonore se reflectă și se refractă ca oricare alte tipuri de unde, ori de câte ori ating suprafața de separare între două medii cu densități diferite. În [Mihăilescu, 1958], viteza sunetului în gaze are formula:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (2.13)$$

unde: c - viteza sunetului; γ - coeficient care depinde de numărul de atomi conținuți de o moleculă de gaz și reprezintă raportul dintre căldura specifică la presiune constantă și căldura specifică la volum constant ale gazului, astfel:

$\gamma = 1.66$ pentru gazele monoatomice (gazele rare situate în grupa a VIII-a principală din Sistemul Periodic al Elementelor), $\gamma = 1.4$ pentru gazele diatomice (N_2 , O_2 , H_2), $\gamma = 1.32$ pentru gazele triatomice (CO_2 , CS_2); p - presiunea gazului și ρ - densitatea gazului.

Dacă notăm: ρ_0 - densitatea aerului ($\rho_0 \approx 1293 \text{ g/l}$), d - densitatea gazului în raport cu aerul, α - coeficient de dilatare al gazelor, t - temperatura exprimată în grade Celsius și p_0 = presiunea normală, avem:

$$\rho = \rho_0 \cdot d \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \quad (2.14)$$

iar relația (2.13.) devine:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{1}{d} \cdot (1 + \alpha t)} \quad (2.15)$$

În urma calculelor, s-a obținut viteza sunetului în aer uscat la $t_0 = 0^\circ\text{C}$ este:

$$c_0 = 331.4 \quad [m/s] \quad (2.16)$$

iar în condiții atmosferice obișnuite:

$$c = 340 \quad [m/s] \quad (2.17)$$

Viteza de propagare a sunetului la temperatura t a unui gaz este dată de relația, [Mihăilescu, 1958]:

$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 + \alpha t} \quad [m/s] \quad (2.18)$$

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 printr-o relație de forma:

$$c = 331.5 + a \cdot t \quad [m/s] \quad (2.19)$$

unde t – este temperatura mediului [$^{\circ}C$], [Dolga, 1999], iar coeficientul a este întâlnit în valori diferite: $a = 0.6$ [Dolga, 1999] și $a = 0.606$ [Nițulescu, 2002]. Din relația anterioară se observă că influența temperaturii asupra vitezei se poate exprima și prin relațiile (2.20) și (2.21):

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = 0.6 \quad \left[\frac{m/s}{^{\circ}C} \right] \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = 0.606 \quad \left[\frac{m/s}{^{\circ}C} \right] \quad (2.21)$$

În [Dolga, 1999], calculul vitezei se bazează pe relația:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.22)$$

unde: γ – coeficient adimensional de elasticitate al mediului (pentru aer $\gamma = 1.4$);
 T – temperatura absolută a mediului,

$$T = 273 + t \quad [K] \quad (2.23)$$

R – constanta fizică a gazelor perfecte,

$$R = 287 \quad \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right] \quad (2.24)$$

Prelucrarea relației (2.22) conduce la definirea influenței temperaturii sub forma:

$$\frac{\Delta c}{\Delta T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma R}{T}} \cong 0.606 \quad \left[\frac{m/s}{^{\circ}C} \right] \quad (2.25)$$

În [Crețu, 1984], evaluarea vitezei undei se bazează pe relația:

$$c = \sqrt{\frac{\nu RT}{M}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.26)$$

unde: ν este indicele adiabatic; M este masa molară a gazului.

Ohya [Ohya, 1996] determina viteza prin relația:

$$c = 20.1 \cdot \sqrt{t + 273} \quad [m/s] \quad (2.27)$$

Cele prezentate anterior scot în evidență abordări diferite în evaluarea cantitativă a vitezei undei acustice.

2.5. Fenomene optice

Definită ca o ramură tradițională a fizicii [Gruescu, 1999], optica are o istorie bogată, marcată de descoperiri spectaculoase, căutări febrile, dar și de controverse acute. Descoperirile științifice în domeniul opticii au asigurat construcția și utilizarea instrumentelor, aparatelor și echipamentelor optice în toate domeniile de activitate: industrie, cercetare, medicină, astronomie, etc.

Optica studiază lumina, fenomene legate de producerea, propagarea, detecția și interacțiunea acesteia cu diferite medii [Oros, 2011].

Lumina sau radiația luminoasă este acea parte din spectrul de radiații electromagnetice care produce senzația de vâz asupra ochiului.

Radiația electromagnetică, deci și lumina, este caracterizată prin frecvență și lungime de undă. Lumina cu o lungime de undă bine determinată (sau frecvență) se numește monocromatică și corespunde unei anumite culori bine determinate. Lumina albă este o radiație policromatică. Prin fenomenul de dispersie, lumina albă poate fi descompusă spectral. Ordinea culorilor în funcție de lungimea de undă este prezentată în tabelul 2.1.[Gruescu, 1999].

Tabel 2.1. Spectrul cromatic al luminii albe

Culoare	Violet	Albastru	Verde	Galben	Orange	Roșu
λ [nm]	380-440	440-495	495-580	580-600	600-640	640-780

În funcție de frecvența sau lungimea de undă cu care radiația se repetă în timp, respectiv în spațiu, undele electromagnetice se pot manifesta în diverse forme. Spectrul radiațiilor electromagnetice este împărțit după criteriul lungimii de undă în câteva domenii: radiații hertziene, radiații infraroșii, radiații luminoase, radiații ultraviolete, radiații X (sau Röntgen), radiații γ (gamma).

O clasificare a radiației electromagnetice în funcție de frecvență și de lungimea de undă este prezentată în figura 2.8.

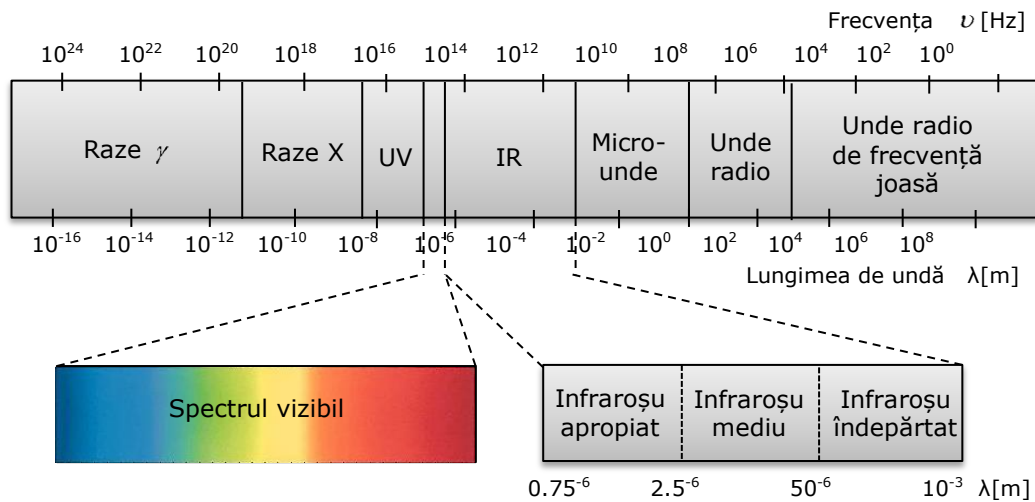


Figura 2.8. Clasificarea radiației electromagnetice

Pornind de la frecvențele joase avem:

- Undele radio, care se folosesc și pentru transmiterea semnalelor de televiziune, pentru comunicații prin satelit și telefonie mobilă. Microundele sunt folosite atât în comunicații cât și în cuptorul cu microunde, care se bazează pe absorbția relativ puternică a radiațiilor de această frecvență în apă și materii biologice. Undele milimetrice se folosesc de exemplu în astronomie. Undele terahertziene au început abia de curând să fie cercetate și folosite în aplicații practice.

- Radiația infraroșie este foarte utilă în analize fizico-chimice, în spectroscopie, stă la baza funcționării anumitor senzori, viziune pe timp de noapte. Radiația ("lumina") infraroșie este foarte utilă în aplicațiile din domeniul termoviziunii sau al detectoarelor de fum (incendiu), deoarece corpurile calde au proprietatea de a emite raze infraroșii. Ele se obțin prin oscilațiile moleculelor, atomilor și ionilor (adică mișcarea de agitație termică favorizează producerea razelor IR), iar amplitudinile lor depind de temperatura corpurilor și de tranzițiile electronilor către învelișurile interioare ale atomilor, cu nivele energetice superioare. Sunt folosite pentru transmiterea de date fără fir la distanțe mici, așa cum este cazul la aproape toate telecomenzile pentru televizoare și alte aparate electronice.

- Lumina vizibilă este cel mai îndemână exemplu de unde electromagnetice.
- Radiația ultravioletă se obține în urma tranzițiilor electronilor de pe nivele cu energii mari pe nivele cu energii mici.

- Razele X sunt folosite de multă vreme în medicină pentru vizualizarea organelor interne.

- Razele gamma se produc adesea în reacții nucleare. În Univers, exploziile supernovelor și a stelelor care și-au consumat "combustibilul" sunt o sursă de raze gamma [***2.3].

2.6. Reflexia radiației electromagnetice

Radiația electromagnetică are proprietăți de undă și particulă. Interferența, reflexia, refracția, absorbția, difracția sunt fenomene caracteristice tuturor undelor (elastice, electromagnetice și luminoase).

Experiențele arată că atunci când o undă luminoasă este incidentă pe suprafața de separare a două medii cu proprietăți optice diferite apar două unde: o undă care se reflectă de pe suprafața de separare și care se propagă înapoi în mediul din care a venit și o undă care se propagă în cel de-al doilea mediu (spunem că se refractă) [Oros, 2011]. În figura 2.9. este descrisă reflexia și refracția unei unde electromagnetice.

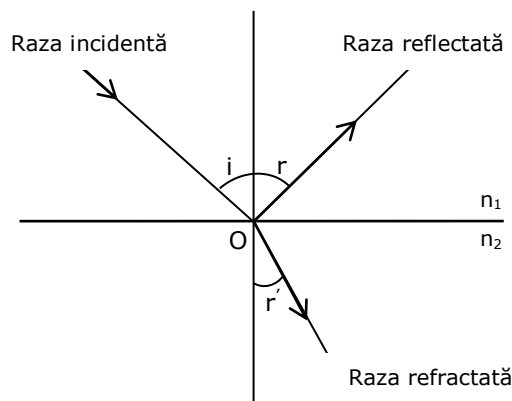


Figura 2.9. Reflexia și refracția undelor electromagnetice

Notățiile din figura 2.9. sunt următoarele: i – unghiul de incidență; r – unghiul de reflexie; r' – unghiul de refracție; O – punct de incidență; n_1 și n_2 sunt indicii de refracție ai celor două medii, n – raportul dintre viteza luminii în vid ($c = 3 \cdot 10^8$ [m/s]) și viteza luminii în mediul respectiv.

Fenomenul de reflexie respectă următoarele legi [Oros, 2011], [Gruescu, 1999]:

- Prima lege a reflexiei: Raza incidentă, raza reflectată și punctul de incidență se situează într-un plan perpendicular pe suprafața reflectantă.
- A doua lege a reflexiei exprimă legătura matematică dintre unghiul de incidență și unghiul de reflexie:

$$i = r \quad (2.28)$$

Ecuția (2.28) reprezintă cazul ideal când suprafața de reflexie corespunde cazului lucios sau oglindă (*specular reflection*). În cazul în care suprafața de reflexie prezintă o anumită rigurozitate, denivelări, reflexia fascicului incident este difuză (figura 2.10.), [Mondoc, 2014].

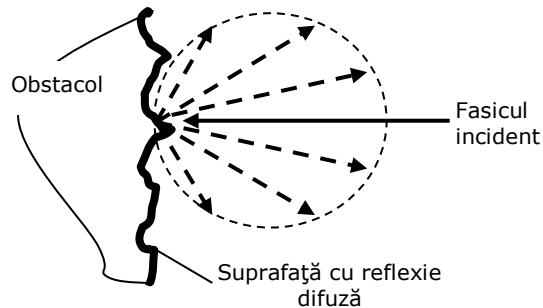


Figura 2.10. Reflexia difuză

În investigarea unui mediu de lucru pentru un robot mobil intervin fenomenele specifice amintite. De exemplu, în procesul de localizare a unui obstacol apar erori datorate, pe de o parte poziției obstacolului față de senzor, iar pe de altă parte formei obstacolului (figura 2.11 a, b).

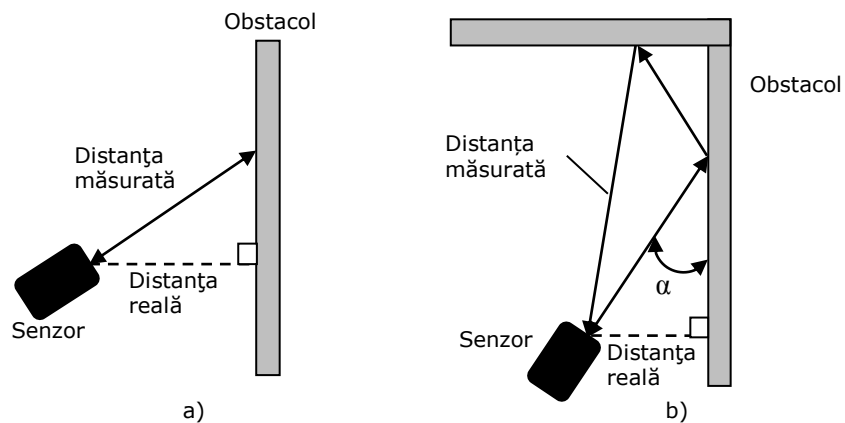


Figura 2.11. Surse de erori în procesul de localizare a unui obstacol (a – datorate poziției obstacolului, b – datorate formei obstacolului)

2.7. Concluzii

Fizica fenomenelor acustice și a radiației electromagnetice este o componentă a integrării sinergice pentru mecatronică.

Fenomele fizice analizate în prezentul capitol stau la baza funcționării senzorilor ultrasonici și în infraroșu, elemente mecatronice de bază.

Aspectele teoretice analizate permit abordarea analizei teoretice și experimentale conform planului de cercetare propus.

3. INCERTITUDINE ȘI PROBABILISTICĂ

3.1. Generalități

Numeroase exemple pot susține afirmația că realitatea de zi cu zi și, în general, cunoașterea umană este incertă. Acest lucru se datorează unui număr de variate surse de incertitudine: ambiguitate, incompletitudine, incorectitudine, imprecizie, comportamente aleatoare, etc.

În conexiune cu acest mod de abordare, domeniul roboticii mobile se regăsește în zona de acțiune a acestei abordări:

- va funcționa robotul mobil? poate să se deplaseze acesta în mediu ?
- în ce condiții va atinge robotul mobil punctul țintă?
- funcționează corect senzorul ultrasonic sau senzorul în infraroșu? funcționează în limitele prescrise?
- care este credibilitatea informațiilor obținute?
- sunt necesare mai multe surse de informații pentru a funcționa corect?

Obiectivul capitolului constă în analiza aspectelor referitoare la incertitudine, clasificări și posibilități de evaluare.

3.2. Ignoranță, informație, date și incertitudine

Ignoranța caracterizează faptul că unele aspecte ale informației lipsesc și poate lua multe forme diferite [Burrus, 2003], [Hadjali, 2004], [Zayrit, 2012], [Vannoorenberghe, 2001], (figura 3.1.):

- caracterul incomplet: unele părți ale datelor lipsesc dar toate informațiile disponibile sunt corecte și complete. Aceste probleme sunt în general rezolvate prin logica non monotonă.
- imprecizia: avem o măsură imprecisă a datelor. Există o informație, dar nu este precisă. Cu toate acestea, nu există nicio îndoială cu privire la informație, fiind sigur că valoarea impreciziei este clară. Aceasta este, în general, domeniul de aplicare al mulțimilor fuzzy.
- incertitudinea: datele ar putea fi greșite. Domeniul de aplicare este cel al teoriei probabilităților.

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].

În orice operație de măsurare, indiferent de atenția și eforturile depuse, între valoarea adevărată X a mărimii necunoscute (informația primară) și valoarea măsurată $X_{măs}$ va exista o diferență din cauza unor imperfecțiuni (la toate nivelurile), a mărimilor perturbatoare, etc. *Eroarea* rezultatului măsurării este diferența dintre

rezultatul măsurării (valoarea măsurată) și valoarea adevărată. Există o *incertitudine de măsurare*, definită ca un intervalul în care se estimează că se află, cu o anumită probabilitate, valoarea adevărată.

Incertitudinea 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. În figura 3.1. este prezentată o clasificare a formei ignoranței [Bison, 1997], [Li, 2011], [Yaonan, 2011].

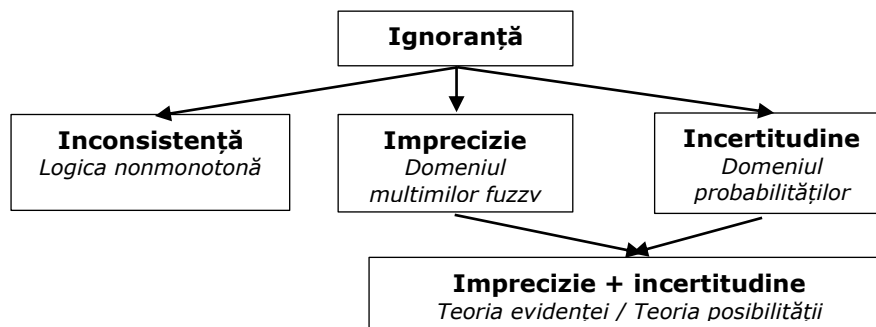


Figura 3.1. Variante ale ignoranței

Condiția principală pentru o localizare precisă a unui obstacol din mediul investigat este disponibilitatea de încredere a senzorilor. Senzorii utilizați din viața reală manifestă o serie de imperfecțiuni care au diferite cauze. Categoria elementelor senzoriale folosite în navigația robotului mobil este largă: telemetru prin sonar / senzor cu ultrasunete, cu laser și tehnologia în infraroșu, radar, senzori tactili, busole sau GPS. Senzorii cu ultrasunete au capacități reduse de lățime de bandă spațială și sunt sensibili la zgomot. Elementele senzoriale cu laser oferă parametri superiori în ceea ce privește lățimea de bandă dar sunt încă afectate de zgomot. Sistemele senzoriale vizuale se consideră pe viitor o soluție. Cu toate acestea și această variantă prezintă dezavantaje: lipsa de informații privind adâncimea spațiului, necesitatea de recunoaștere și interpretare. Totuși, în ciuda avantajelor relative și ale dezavantajelor, utilizarea sistemelor vizuale monoculare ca un senzor pentru navigare conduce la o selecție competitivă.

În general, imperfecțiunile elementelor senzoriale pot fi grupate în zgomot senzorial și *aliasing*. Zgomotul senzorial este cauzat în primul rând de variațiile parametrilor mediului: condițiile de iluminare, suprafața obstacolelor analizate, efecte de interferență. Cea de a doua imperfecțiune a elementelor senzoriale – fenomenul *aliasing* – are ca sursă eroarea de eșantionare digitală în care două frecvențe nu pot fi distinse, acest lucru având ca efect informații multiple suprapuse.

Informațiile obținute, prelucrate și integrate sunt de cele mai multe ori incomplete, inconsistente, inexacte. Algoritmii de fuziune vor trebui să gestioneze aceste caracteristici de-a lungul lanțului de prelucrare, modelare, interpretare sau decizie. Se identifică de obicei o *incertitudine* care reflectă un eșec în a specifica exact un parametru măsurabil sau a alocă un atribut specific unui obiect, generând astfel o ambiguitate în informații, *imprecizie* care se referă la incapacitatea de a descrie cu precizie înțelesul unui concept. În corespondență cu figura 3.1. se prezintă categoriile ignoranței.

În figurile 3.2., 3.3. și 3.4. este prezentată o ierarhizare a categoriilor de

imperfecțiuni pentru informații în general și, respectiv, pentru sistemul sensorial al roboților mobili în particular.

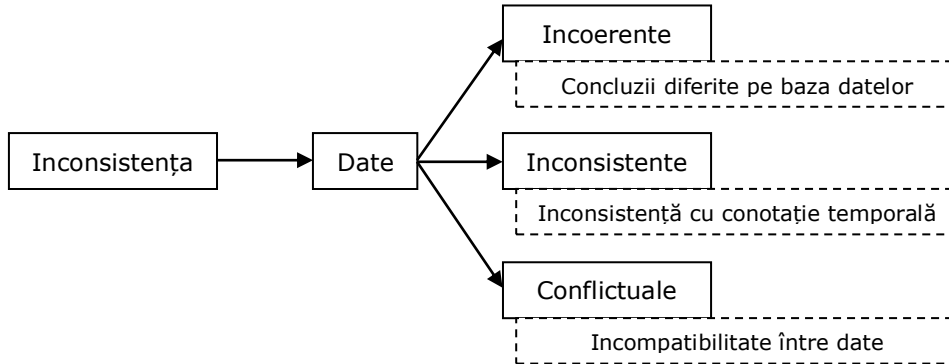


Figura 3.2. Forme ale inconsistenței în informații [Nicolăescu, 2011]

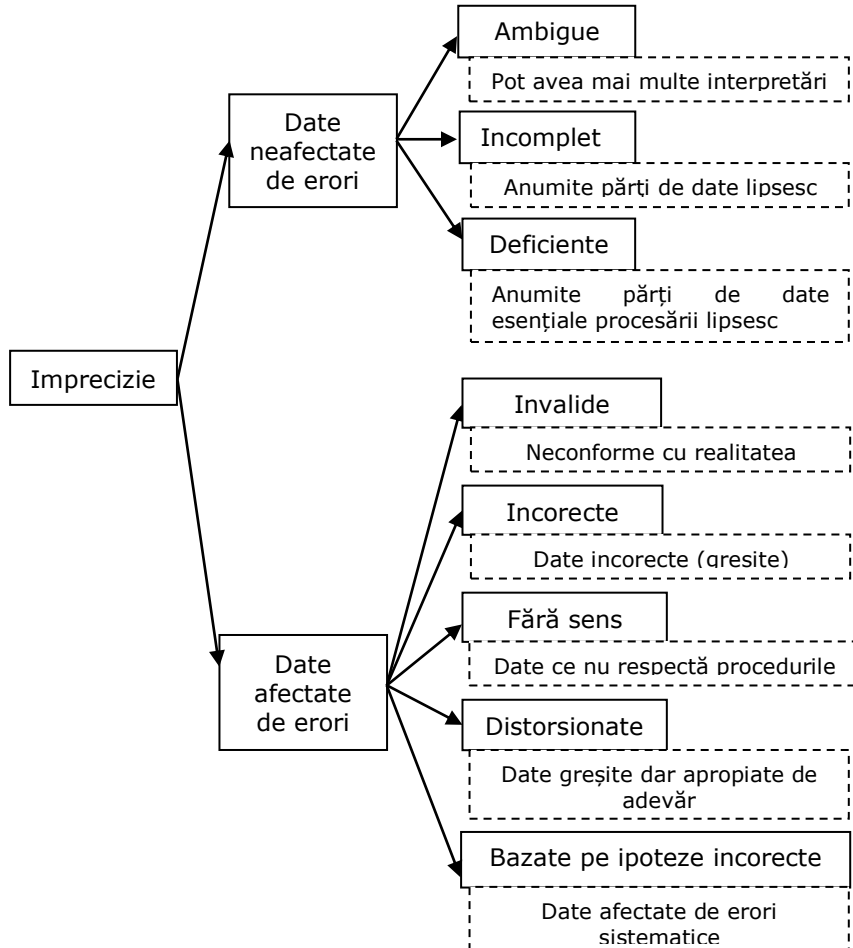


Figura 3.3. Categoriile de imperfecțiuni ale informațiilor pentru robotul mobil [Nicolăescu, 2011]

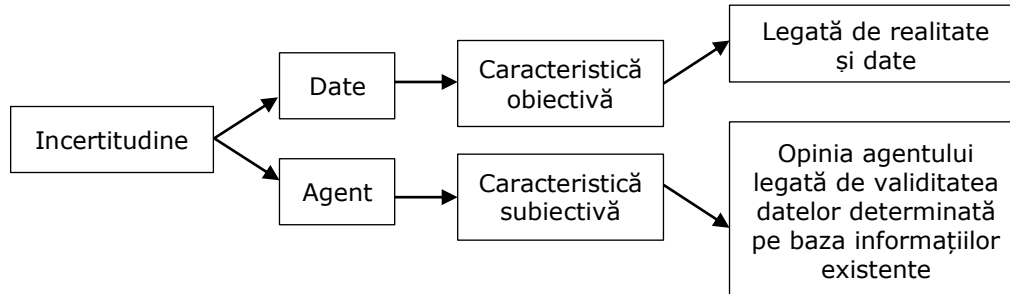


Figura 3.4. Incertitudine și informații [Nicolăescu, 2011]

În domeniul inteligenței artificiale / informaticii, termenul de agent descrie o entitate capabilă să acționeze într-un anumit mediu. Un agent nu este asociat neapărat cu atributul inteligent. Un agent inteligent este un sistem ale cărui acțiuni definesc un comportament inteligent în sensul atingerii obiectivelor.

Reținem din cele prezentate, domeniile aflate la dispoziție pentru analiza ignoranței din procesul de prelucrare a informațiilor senzoriale.

3.3. Fuziunea informației

3.3.1. Introducere

Fuziunea informației este un subiect relativ vechi. Acesta își are originea în momentul în care cercetătorii au făcut primele încercări de a imita inteligența umană.

Termenul de *fuziunea datelor* a fost introdus în SUA la nivelul anilor '70 și a cunoscut o dezvoltare puternică în anii '80 și e încă de actualitate.

Termenul *fuziunea datelor* primește abordări diferite la nivelul laboratoarelor, cercetătorilor [***3.1]:

- Fuziunea informațiilor senzorialor este o caracteristică unică care utilizează un microcontroler dedicat pentru a adăuga semnale;
- Fuziunea datelor geologice, biologice și oceanografice pentru realizarea de hărți geologice;
- Obiectivul fuziunii senzoriale este cel de procesare a datelor din mai multe surse / senzori / sisteme senzoriale cu scopul de a reduce cantitatea de incertitudine într-un proces de navigare a robotului mobil.

Se pot identifica cel puțin două idei principale de activitate aplicativă și dezvoltare:

- fuziunea informațiilor și principale concepte;
- realizarea de arhitecturi pentru aplicarea fuziunii:
 - A. după unii autori [Zayrit, 2012]:
 - arhitecturi multisenzoriale;
 - arhitecturi monosenzoriale.
 - B. după alți autori, există trei moduri fundamentale de a combina informațiile senzoriale [Smets, 1996]:
 - senzori redundanți: toți senzorii oferă aceleași categorii de informații despre mediu;

- senzori complementari: senzorii oferă informații independente (disjuncte) despre mediul investigat;
- senzori coordonați: senzorii colectează informații în mod secvențial despre mediu.
- C. Trei scheme de arhitectură a sistemului de fuziune [Smets, 1996]:
 - scheme descentralizate - nu există comunicare între nodurile senzoriale;
 - scheme centralizate - toți senzorii oferă informații la un nod central;
 - scheme distribuite - informațiile sunt oferite la o rată de comunicare dată.

Toate aceste considerații și concepte generale au fost utilizate în totalitate în domeniul medical, robotică, transport, tratarea imaginii, [Rakowsky, 2007], [Yaonan, 2011], [Noycov, 2007], [Larionova, 2011].

O posibilă formalizare a fuziunii de informare a introdus trei nivele conceptuale căreia îi corespund trei tipuri de informații [Debon, 1999]:

- fuziunea datelor - reprezintă nivelul inferior corespunzător fuziunii. În esență, este vorba despre cumulara mai multor informații primare pentru a da consistență acestora în comparație cu o singură sursă de informații;
- fuziunea deciziilor - acționează la nivelul spațiilor deciziilor. În esență, este vorba despre elaborarea de informații care pot fi considerate ca decizii;
- fuziunea modelelor - acest caz este unul în care aspecte complementare ale diferitelor abordări sunt făcute parte a elimina imperfecțiunile independente.

Utilizarea elementelor senzoriale depinde într-o proporție destul de mare de factori perturbatori din mediul în care se realizează achiziția informațiilor. Senzorii pot folosi diferite principii fizice, pot acoperi în moduri diferite spațiul informațional, pot genera date în diferite formate, la diferite rate de actualizare. În mod similar, informația achiziționată poate avea proprietăți diferite în ceea ce privește rezoluția, precizia și fiabilitate. În acest mod sistemul de prelucrare a datelor va dispune de un set eterogen de informații și va trebui să le analizeze și să ia decizii. Aceste aspecte explică în mod suplimentar fuziunea informației și necesitatea analizei aspectelor legate de incertitudinea informației folosite.

3.3.2. Metode utilizate pentru fuziunea informației

Conceptul - fuziunea informației / fuziunea datelor / fuziunea senzorială - își are data de origine la începutul anilor 1970 în domeniul militar. La începutul anilor 1980 se putea vorbi despre o serie de sisteme cu fuziune senzorială în domeniul militar. Fuziunea informației senzoriale se traduce ca și totalitatea mijloacelor și metodelor folosite pentru obținerea caracteristicilor și analiza unei informații care provine de la o multitudine de senzori.

Conceptul fuziunii informației nu este un concept nou, el regăsindu-se în acțiunea omului și a animalelor. Recepția senzorială este o formă specifică de realizare a comunicării umane și a animalelor cu lumea externă, a cărei funcționare începe chiar înainte de naștere, când devine posibilă formarea unor reflexe condiționate la agenți mecano-acustici și termici din mediul extern. Senzorialitatea are două aspecte: senzația și percepția. Senzația este primul nivel psihic de prelucrare, interpretare și utilizare a informației despre însușirile obiectelor și fenomenelor mediului extern și despre stările mediului intern. Modul de percepere a informației depinde de structura internă a fiecărui individ, de structura sa senzorială.

Este cunoscut că în natură – oamenii și animalele – rareori utilizează un singur tip de senzor. S-a demonstrat că informația de la mai mulți senzori specifici este preluată, prelucrată și utilizată în timp real. Acest lucru oferă în natură o siguranță cu multiple beneficii. Modelul anatomic se încearcă să se implementeze în robotică. În figura 3.5 se prezintă principiul fuziunii senzoriale la nivelul uman.

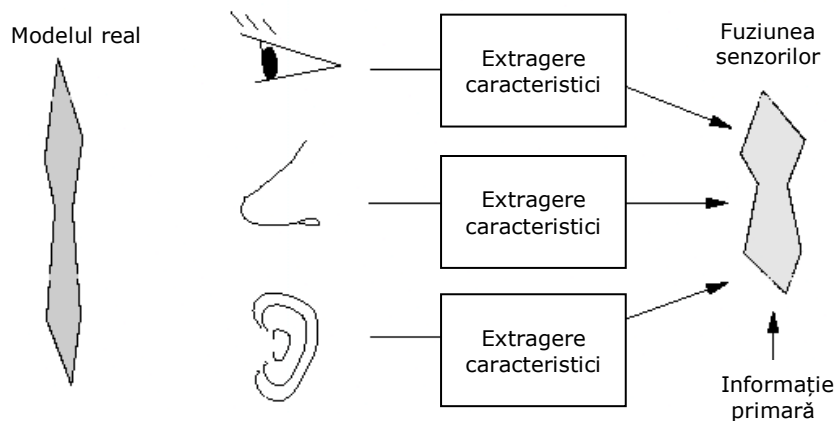


Figura 3.5. Principiul fuziunii senzoriale la nivel uman

Mai mult decât separarea nivelurilor de informații, este organizarea lanțului de prelucrare care vor caracteriza aplicația.

Conceptele de redundanță și complementaritatea informațiilor intervin în cadrul acestei structuri (F-fuziune), (figura 3.6.).

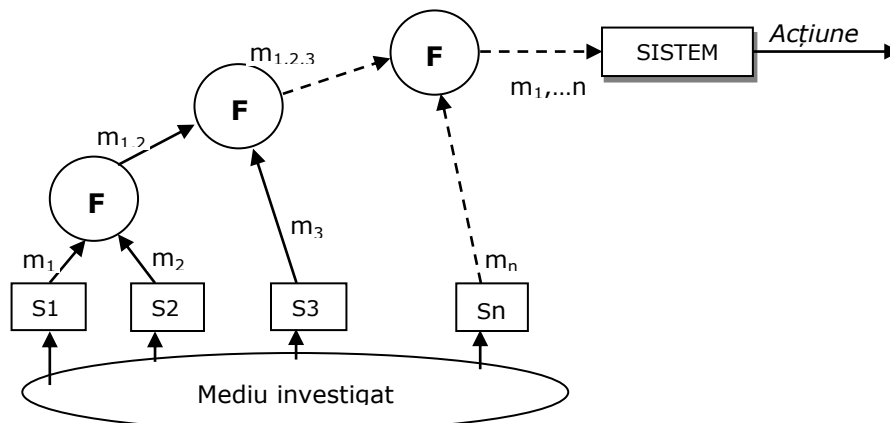


Figura 3.6. Schema generală a integrării multisenzoriale

Un model pentru fuziunea informației este *modelul încrederii transferabile* TBM (Transferable Belief Model) introdus de Smets [Smets, 1996]. Acesta prevede un formalism pentru luarea în considerare a incertitudinii și a ignoranței și este adaptat în legătură cu utilizarea de surse de informații nesigure sau care furnizează

informații parțiale. În figura 3.7. este prezentată schema unei arhitecturi pentru fuziunea multizenzorială [Zayrit, 2012], [Vannoorenberghe, 2001].

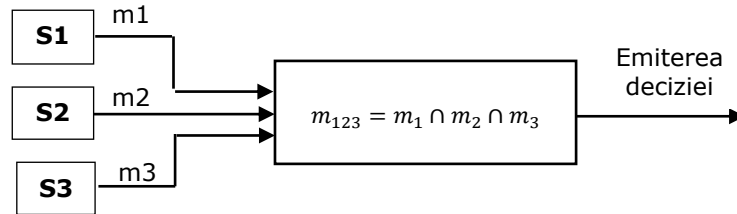


Figura 3.7. Schema unei arhitecturi pentru fuziunea multizenzorială

3.3.3. Teoria evidenței

3.3.3.1. Generalități privind teoria evidenței

Teoria funcțiilor de încredere, cunoscută și sub numele de "teoria Dempster-Shafer" sau "teoria evidenței", a fost introdusă de Dempster (1968) și Shafer (1976-1988) și mai târziu dezvoltată de Yager (1982 - 1985), Gordon & Shortliffe (1985) și alții. Prade (1985) a oferit o privire de ansamblu asupra DST & FST, precum și o posibilitate de legătură cu teoria Bayes [Guth, 1991], [Mărginean, 2005], [Li, 2011], [Burrus, 2003]. Premisa teoriei a constituit-o faptul că ignoranța unui agent față de o afirmație nu trebuie să determine împărțirea în mod egal a probabilității între valoarea de adevăr și cea de fals, așa cum se asuma în raționamentul probabilistic clasic. Metoda permite modelarea și gestionarea unor informații imprecise și incerte în același formalism, prin funcții de masă m , plauzibilitate pl și încredere bel . Modelul încrederii transferabile (*Modele de Croyance Transferable*), sau modelul convingerii transferabile (TBM), propus de Smets (1994) este un suport bazat pe definirea funcțiilor de încredere pentru reprezentarea cunoștințelor și luarea deciziilor. MCT se bazează pe două niveluri de percepție a informațiilor: *credal* (cel de combinare a evidențelor), și *picnistic* (cel de luare a deciziei). Când este necesară luarea unei decizii, trebuie construită o funcție de probabilitate pe baza funcțiilor de încredere ce descriu starea *credal* [Nicolăescu, 2011].

3.3.3.2. Aspecte matematice ale teoriei evidenței

Prin definiție, se numește cadru de discernământ al problemei de fuziune,

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} \quad (3.1)$$

unde θ_i , cu $i = 1, \dots, n$ reprezintă setul de ipoteze.

Prin definiție, se numește *setul de putere* (*power set*) $2^\Theta \cong (\Theta, U)$ mulțimea alcătuită din toate submulțimile lui Θ creată pe baza următoarelor reguli [Burrus, 2003], [Rakowsky, 2007], [Zayrit, 2012], [Mărginean, 2005]:

- $\emptyset, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n \in 2^\Theta$;
- dacă $A, B \in 2^\Theta$ atunci și $A \cup B \in 2^\Theta$
- 2^Θ nu conține nici un alt element cu excepția celor obținute pe baza primelor două reguli.

Exemplu:

Semnificația precizărilor anterioare se regăsește în următorul caz: pentru $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ se obține:

$$2^\Theta = \left\{ \begin{array}{l} \emptyset, \theta_1, \theta_1\theta_1, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_1\}, \{\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3\}, \\ \{\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_4\}, \{\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta_4\}, \{\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4\}, \{\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4\} \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

având cardinalitatea $|2^\Theta| = 16$.

Prin definiție, se numește *masă de încredere de bază* (funcția de masă), funcția $m(\cdot): 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ asociată unui corp de evidență B conform cu:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (3.3)$$

și

$$\sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \quad (3.4)$$

iar valoarea $m(A)$ este denumită *masa generalizată de încredere* a lui A. În [Cheng, 2000] numărul $m(A)$ este denumit probabilitatea de bază a lui A.

Prin definiție, A este un *element focal* al spațiului de fuziune 2^Θ dacă $m(A) > 0$.

Prin definiție, funcțiile de încredere /credibilitate și de plauzibilitate pentru $A \subseteq \Theta$ se definesc conform relațiilor:

- funcția de încredere / credibilitate:

$$bel(A) = \sum_{\substack{B \in A \\ B \in 2^\Theta}} m(B) \quad (3.5)$$

- funcția de plauzibilitate:

$$pl(A) = \sum_{\substack{B \cap A \neq \emptyset \\ B \in 2^\Theta}} m(B) \quad (3.6)$$

Funcția de plauzibilitate se poate exprima și în termeni ai probabilității de bază sub forma:

$$pl(A) = 1 - bel(\bar{A}) = \sum_{B \subset \Theta} m(B) - \sum_{B \subset \bar{A}} m(B) = \sum_{B \cap A = \emptyset} m(B) \quad (3.7)$$

Fuziunea a două sau mai multe surse independente, în scopul obținerii unor informații suplimentare, se poate realiza pe baza regulii de combinare Dempster [Cheng, 2000].

Masa de probabilitate a probelor cumulate, $m(C)$, se calculează sub forma:

$$m_1 \oplus m_2(C) = \begin{cases} 0 & \text{dacă } C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)} & \text{in rest} \end{cases} \quad (3.8)$$

Guth utilizează setul $\Omega = \{True, False\}$ din analiza standard a riscului în teoria evidenței [Guth, 1991]. Prin urmare, setul putere:

$$2^\Omega = \{\emptyset, T, F, (T, F)\} \quad (3.9)$$

conține un element (T, F) care reprezintă o observație care ar putea să fie adevărată sau falsă, dar nu ambele variante.

În literatura de specialitate, metoda FTA este utilizată pentru analiza riscului / fiabilității unui sistem. Aceasta este o metodă grafică de conectare a defectelor posibile dintr-un sistem / proces într-o schemă logică de analiză (Anexa 3.1.).

Metoda FTA lucrează cu evenimente care au atribuită *probabilitatea p de adevăr* (TRUE) sau de *fals* (FALSE), $1 - p$. Am arătat, că într-o serie de aplicații, observarea anumitor evenimente este imprecisă, astfel încât un analist nu poate spune dacă un anumit eveniment a avut loc sau nu. Folosind metoda DST de atribuire a probabilității evenimentului (T, F) , metoda FTA poate descrie cantitativ această imprecizie.

În concordanță cu cele precizate anterior și a modului de definire a masei asociate setului putere, există relația:

$$m(T) + m(F) + m(T, F) = 1 \quad (3.10)$$

unde modul de definire a maselor componente este următoarea:

$$\begin{cases} m(T) = bel(A) \\ m(F) = 1 - pl(A) \\ m(T, F) = pl(A) - bel(A) \end{cases} \quad (3.11)$$

Notând valorile oferite celor 3 posibilități $\{T, F, (T, F)\}$ pentru evenimentele A și B sub forma $\{a_1, a_2, a_3\}$ și respectiv $\{b_1, b_2, b_3\}$, Guth definește pe baza a două tabele, logica pentru două porți logice: **SAU** (OR) și respectiv **ȘI** (AND):

$$\begin{aligned} m(A \cup B) &= \{m(T), m(F), m(T, F)\} \\ &= (a_1b_1 + a_1b_2 + a_1b_3 + a_2b_1 + a_3b_1, \quad a_2b_2, \quad a_2b_3 + a_3b_2 + a_3b_3) \\ &= (a_1(b_1 + b_2 + b_3) + a_2b_1 + a_3b_1, \quad a_2b_2, \quad a_2b_3 + a_3b_2 + a_3b_3) \\ &= (a_1 + a_2b_1 + a_3b_1, \quad a_2b_2, \quad a_2b_3 + a_3b_2 + a_3b_3) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} m(A \cup B) &= \{m(T), m(F), m(T, F)\} \\ &= (a_1b_1, \quad a_1b_2 + a_2b_1 + a_2b_2 + a_2b_3 + a_3b_2, \quad a_1b_3 + a_3b_1 + a_3b_3) \\ &= (a_1b_1, \quad a_1b_2 + a_2(b_1 + b_2 + b_3) + a_3b_2, \quad a_1b_3 + a_3b_1 + a_3b_3) \\ &= (a_1b_1, \quad a_1b_2 + a_2 + a_3b_2, \quad a_1b_3 + a_3b_1 + a_3b_3) \end{aligned} \quad (3.13)$$

În acest mod, prin metoda Guth [Guth, 1991] un interval $[bel, pl]$ se poate transforma într-un model cu 3 valori. Pornind de la precizările anterioare, Cheng [Cheng, 2000] utilizează modelul creat de Guth în teoria evidenței.

Considerând evenimentele A și B cu masele $m(A) = (a_1, a_2, a_3)$ și, respectiv, $m(B) = (b_1, b_2, b_3)$, Cheng stabilește modul de compunere a valorilor în cazul celor două evenimente care definesc arborele pentru un eveniment final.

În figura 3.8. este prezentată o arhitectură pentru fuziunea informației cu utilizarea conceptului de evidență.

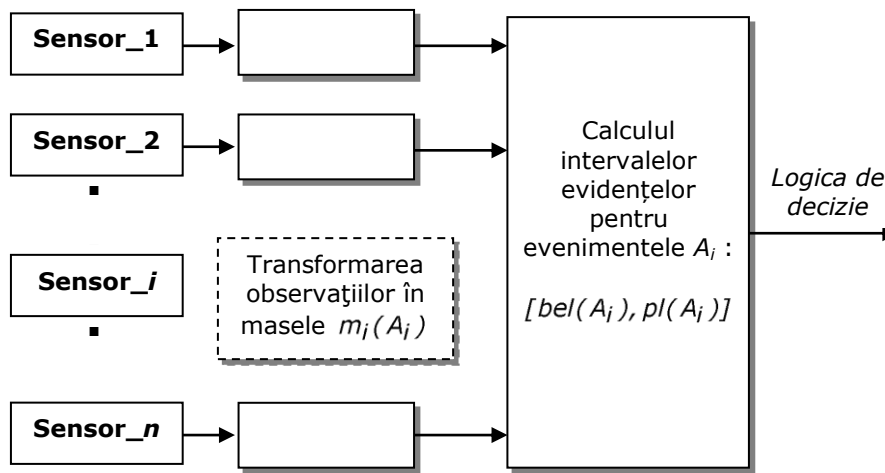


Figura 3.8. Arhitectura pentru fuziunea multisenzorială [Hall, 1997]

3.4. Incertitudini în analiza probabilistică

3.4.1. Generalități

Intregul proces de navigare a unui robot mobil, indiferent de clasa mediului în care evoluează acesta, se bazează pe obținerea de informații referitoare la starea internă a sistemului și respectiv starea externă a acestuia: obstacole, poziția acestora, mobilitatea, etc. Acest proces este caracterizat de o anumită incertitudine care influențează în final rezultatul navigării [Gutierrez, 1998], [Burlina, 1992], [Olson, 2000].

Incetitudinea 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.

După cum este menționat, în Smets [1996], fiecare model încredere constă din (cel puțin) două componente: o componentă statică și una dinamică.

În teoria Bayesiană a probabilităților, încrederea este stocată ca o *masă de probabilitate* P pentru fiecare element $\theta \in \Theta$, unde Θ conține toate elementele

posibile, astfel încât $P(\theta) \in [0,1]$ și $\sum_{\theta \in \Theta} P(\theta) = 1$. $P(\theta)$ se numește *funcția masă de probabilitate* (PMF). Aceasta corespunde componentei statice [Hallberg, 2012].

Să presupunem că probabilitatea unui eveniment A este cunoscută și apoi a survenit următorul eveniment B . Noua probabilitate pentru evenimentul A , având în vedere noile informații, se poate apoi exprimată prin:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (3.14)$$

Aceasta se numește probabilitatea condiționată și corespunde componentei dinamice [Hallberg, 2012].

Aspecte privind analiza probabilistică a proceselor aleatoare din spațiul de lucru al unui robot mobil au fost abordate de autor în lucrările [Stănescu, 2014a], [Stănescu, 2014b].

3.4.2. Estimarea probabilistică a unui obstacol în mediul de lucru al unui robot mobil

Starea robotului mobil în mediu și starea mediului de lucru sunt necunoscute. Teoria probabilității oferă un cadru de fuziune a informațiilor. Ca rezultat se obține o distribuție de probabilitate pentru stările posibile ale robotului și mediu [Stănescu, 2014b].

Pentru localizarea unui obstacol cilindric a fost imaginat un experiment în care se utilizează două sisteme senzoriale acustice (Parallax Ping). Cei doi senzori au fost plasați în mod simetric față de axa longitudinală Ox a robotului mobil (figura 3.9.). Obstacolul a fost poziționat în trei variante față de axa longitudinală Ox : centrat, tangențial în cadranul stâng și respectiv tangențial în cadranul drept (figura 3.10. și figura 3.11.), [Stănescu, 2014a].

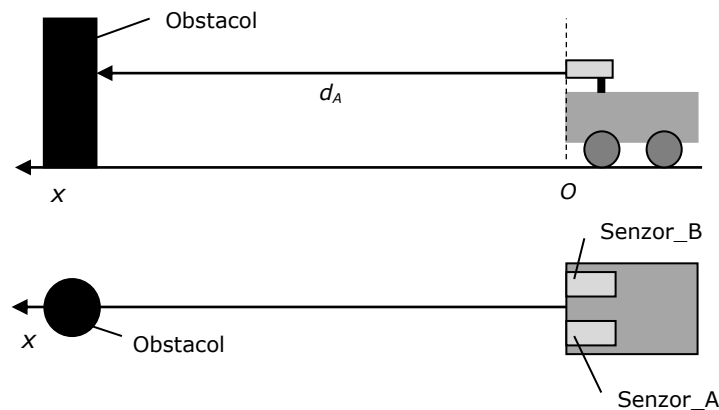


Figura 3.9. Poziția relativă a robotului, senzori și obstacole

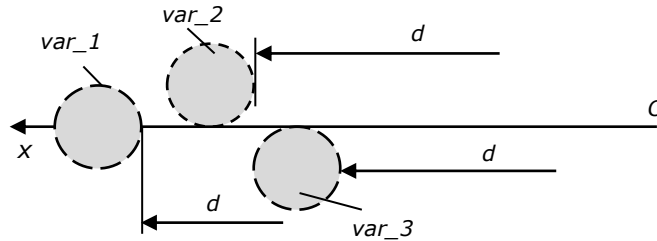


Figura 3.10. Variante de situare ale obstacolului pe parcursul experimentelor

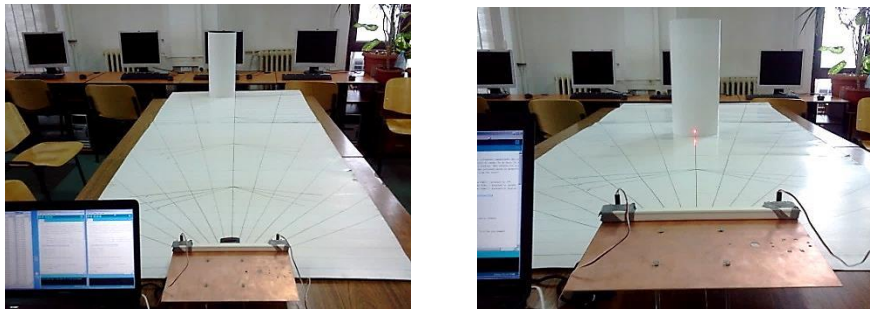


Figura 3.11. Aspecte din timpul experimentelor

Datele înregistrate au fost prelucrate statistic. Comparativ, sunt prezentate în tabelul 3.1. rezultatele prelucrate de la senzorii A și respectiv B referitor la distanța de referință admisă de 2005 mm. Această distanță a fost determinată cu ajutorul unui telemetru laser Bosch DLE 70 Professional.

Tabel 3.1. Valori statistice

	Senzorul A	Senzorul B
$d_L = 2005 \text{ mm}$	$\bar{d} = 2007.65 \text{ mm}$	$\bar{d} = 1996.35 \text{ mm}$
	$\sigma = 0.769615$	$\sigma = 1.387675$
	$\varepsilon = -0.132 \text{ [%]}$	$\varepsilon = 0.431 \text{ [%]}$

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 estimată a distanței - valoare ponderată - are expresia:

$$\hat{z} = w_1 \cdot z_1 + (1 - w_1) \cdot z_2 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot z_2 \quad (3.15)$$

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 tabelul 3.1. se determină:

$$w_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \frac{1.3876^2}{0.7696^2 + 1.3876^2} = 0.7645 \quad (3.16)$$

și în mod corespunzător:

$$\hat{z} = 0.7645 \cdot 2007.65 + 0.2355 \cdot 1996.35 = 2004.9885 \quad [mm] \quad (3.17)$$

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 3.9.) [Olson, 2000].

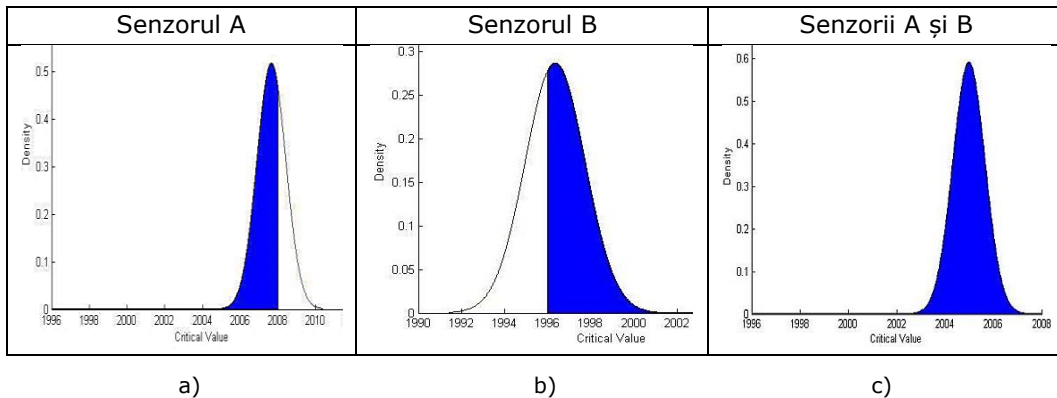


Figura 3.12. Densitatea de probabilitate în mod comparativ: a) Senzorul A, b) Senzorul B, c) Senzorii A și B.

3.5. Concluzii

Capitolul elaborat a trecut în revistă aspecte legate de faptul că în viața de zi cu zi cunoaștere umană este incertă. Robotul mobil este o copie a biomecanicii. Din acest motiv ceea ce pentru om sau un animal constituie incertitudine se va regăsi și în cazul navigării robotului mobil. Astfel, modelarea mediului, analiza aspectelor aleatoare și fuziunea informației sunt strict necesare. A fost demonstrat acest lucru printr-un exemplu edificator privind localizarea unui obstacol.

4. SENZORI ȘI CARACTERISTICILE LOR DE FUNCȚIONARE

4.1. Introducere

Obiectivul operațional al capitolului constă în determinarea caracteristicii senzorilor utilizați în experimentele din teză.

Alegerea sistemului senzorial potrivit pentru un anumit robot mobil necesită o analiză serioasă a spațiului în care robotul mobil va opera cât și a sarcinilor care trebuie îndeplinite: determinarea distanțelor, ocolirea obstacolelor, etc. Metoda de determinare a distanțelor cu ajutorul senzorilor ultrasonici și infraroșii este des folosită în navigația roboților mobili.

Trebuie luat în calcul, însă, influența anumitor factori care perturbă transmiterea undei sonore sau luminoase în funcție de tipul sensorului: temperatura mediului, reflectivitatea obstacolelor, culoarea obstacolelor, forma geometrică a acestora, zgomote din mediul ambiant, etc.

4.2. Senzori utilizați în cercetările experimentale

Pentru studiul experimental au fost utilizați trei senzori cu domenii de măsurare diferite, și anume:

- Senzorul ultrasonic Parallax Ping;
- Senzorul ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200;
- Senzorul infraroșu Sharp GP2Y0A02YK.

Caracteristicile tehnice ale celor trei senzori pot fi consultate în Anexa 4.1., Anexa 4.2., și respectiv, Anexa 4.3.

4.3. Caracteristica sensorului ultrasonic Parallax Ping

4.3.1. Standul experimental și procedura de lucru

Senzorul ultrasonic Parallax Ping pentru măsurarea distanțelor este prezentat în figura 4.1. Avantajul acestui senzor este dimensiunea sa redusă, putând fi implementat cu succes pe mai multe tipuri de roboți mobili.

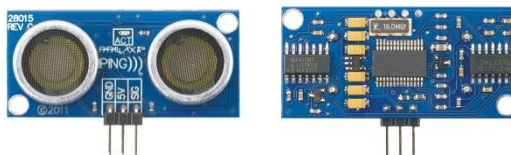


Figura 4.1. Senzorul Parallax Ping (vedere din față și verso)

Senzorul ultrasonic este programat cu ajutorul plăcii de dezvoltare Arduino Uno, cu ajutorul căreia se face și achiziția de date. Date tehnice referitoare la placa de dezvoltare Arduino Uno pot fi consultate în Anexa 4.4. Senzorul ultrasonic a fost

conectat prin intermediul plăcii de dezvoltare Arduino Uno la PC-ul utilizat la sistemul de achiziție a informației [Stănescu, 2015a], figura 4.2.

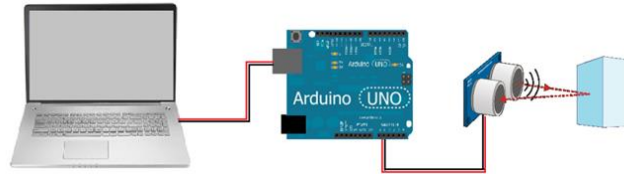


Figura 4.2. Sistemul de achiziție de date.

Pentru determinări cât mai precise ale distanțelor măsurate a fost modificată procedura de programare a senzorului, modificându-se unitatea de măsură pentru afișarea rezultatelor. Inițial, aplicația returna valorile măsurate în inch și centimetri. După modificare rezultatele sunt date în milimetri. În figura 4.3. este prezentată fereastra de lucru a programului, iar în figura 4.4. a celei de achiziție a informațiilor.

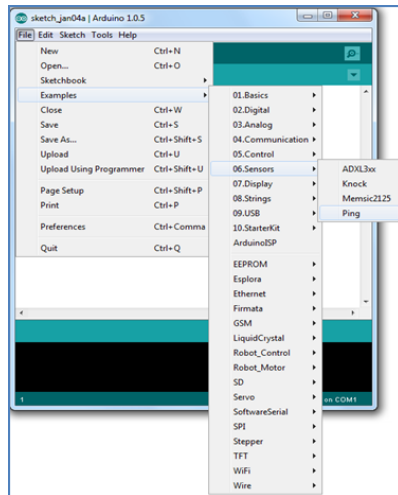


Figura 4.3. Fereastra de dialog pentru programul de achiziție de informație.

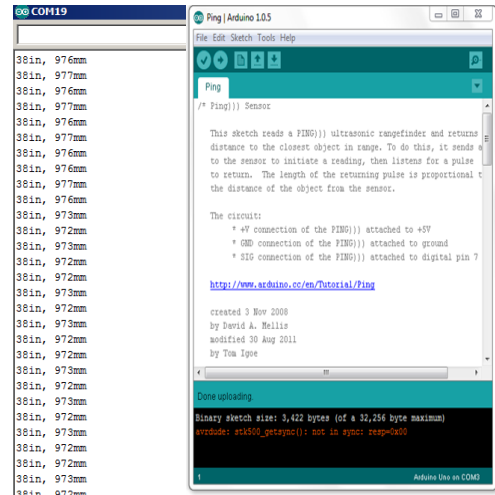


Figura 4.4. Detaliu din timpul achiziției informației.

Distanțele de referință dintre senzor și obstacole, au fost determinate în fiecare caz cu telemetru cu laser Bosch DLE 70 Professional, figura 4.5. Date tehnice referitoare la telemetrul laser Bosch DLE 70 Professional pot fi consultate în Anexa 4.5.



Figura 4.5. Telemetru laser Bosch DLE 70 Professional.

4.3.2. Desfășurarea experimentelor

Obiectivul acestor experimente a constat în determinarea caracteristicii senzorului ultrasonic. Experimentele au fost desfășurate în Laboratorul de Senzori și Traductoare din cadrul Departamentului Mecatronică al Facultății de Mecanică. În timpul efectuării experimentelor, nu au fost curenți de aer perturbatori și temperatura mediului a fost constantă, valoarea acesteia fiind $\theta = 29^\circ\text{C}$. Datele înregistrate pe parcursul multiplelor experimente desfășurate sunt prelucrate statistic. Aceste date sunt prezentate în Anexa 4.6. asociată capitolului curent.

În cadrul experimentelor s-a urmărit măsurarea distanței de la 0 la 1500 mm, din 100 în 100 mm, de la senzorul ultrasonic până la un obiect. Obiectul folosit are formă dreptunghică, cu dimensiunile $L = 287\text{ mm}$ și $l = 58\text{ mm}$, și este plasat perpendicular pe direcția senzorului, cu lungimea perpendicular pe suprafața carioajului. Pentru fiecare distanță au fost efectuate cel puțin 10 determinări. Datele obținute au fost prelucrate statistic.

Imagini privind standul experimental din timpul achiziției informației se pot vedea din figura 4.6(a,b,c).

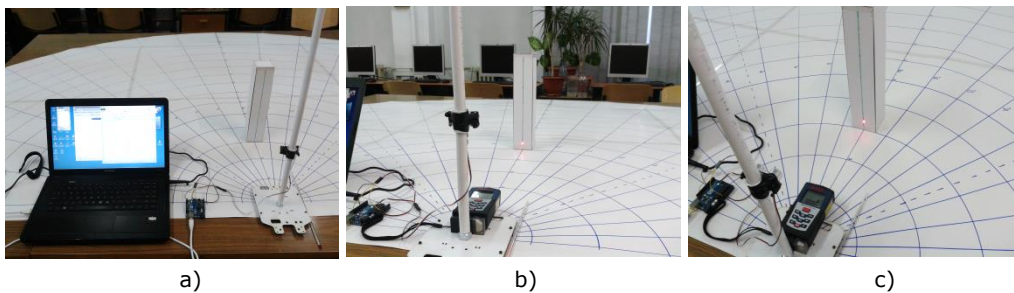


Figura 4.6. Imagini privind standul experimental (a - sistemul de achiziție a datelor; b,c - poziționarea obiectului și măsurarea distanței de referință).

În procesul de analiză a datelor provenite din măsurătorile efectuate s-au calculat:

- Eroarea de măsurare:

$$\Delta d = d - d_m \quad [mm] \quad (4.1)$$

unde d este distanța de referință măsurată cu telemetrul laser, iar d_m este distanța obținută prin măsurare cu senzorul ultrasonic.

- Eroarea relativă:

$$\varepsilon = \frac{d - d_m}{d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.2)$$

- Eroarea relativă medie:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_j}{j} \quad [\%] \quad (4.3)$$

unde i reprezintă numărul de măsurători.

Rezultatele prelucrate sunt trecute în tabelul 4.1.

Tabel 4.1. Rezultate prelucrate în urma procesului de analiză

Distanța reală	Media distanțelor măsurate	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
d	d_m	$d - d_m$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
100	99.50	0.50	0.50	1.38
200	198.90	1.10	0.55	
300	293.30	6.70	2.23	
400	391.20	8.80	2.20	
500	492.40	7.60	1.52	
600	592.00	8.00	1.33	
700	689.20	10.80	1.54	
800	788.70	11.30	1.41	
900	884.30	15.70	1.74	
1000	983.30	16.70	1.67	
1100	1084.80	15.20	1.38	
1200	1187.20	12.80	1.06	
1300	1278.00	22.00	1.69	
1400	1389.00	11.00	0.78	
1500	1482.40	17.60	1.17	

Reprezentarea grafică a erorilor în funcție de distanța de referință este ilustrată în figura 4.7.

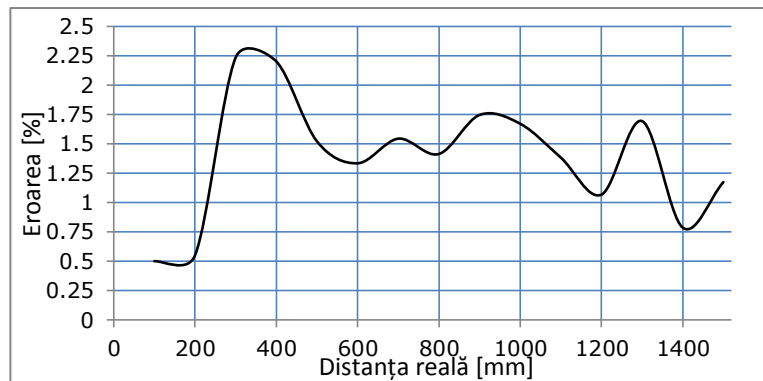


Figura 4.7. Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință.

Având în vedere faptul că temperatura mediului a fost $\theta = 29^\circ\text{C}$, etapa următoare a constat în corecția rezultatelor obținute.

Pentru temperatura $\theta = 29^\circ\text{C}$, aplicând ecuația (2.19) se obține o valoare a vitezei sunetului $c_1 = 348.9 \text{ [m/s]}$. Știind că programul de achiziție de informație are

o valoare presetată a vitezei sunetului $c_0 = 344.8 [m/s]$ se poate calcula indicele de corecție:

$$k = \frac{c_1}{c_0} \quad [-] \quad (4.4)$$

$$k = 1.01189 \quad [-] \quad (4.5)$$

Datele obținute prin aplicarea indicelui de corecție sunt prezentate în tabelul 4.2., iar reprezentarea grafică a erorilor este ilustrată în figura 4.8.

Tabel 4.2. Rezultate prelucrate prin aplicarea indicelui de corecție.

Distanța reală	Media distanțelor măsurate	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
d	d_m	$d - d_m$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
100	100.68	-0.68	-0.68	0.21
200	201.26	-1.26	-0.63	
300	296.78	3.21	1.07	
400	395.85	4.14	1.03	
500	498.25	1.74	0.34	
600	599.03	0.96	0.16	
700	697.39	2.60	0.37	
800	798.07	1.92	0.24	
900	894.81	5.18	0.57	
1000	994.99	5.00	0.50	
1100	1097.69	2.30	0.20	
1200	1201.31	-1.31	-0.10	
1300	1293.19	6.80	0.52	
1400	1405.51	-5.51	-0.39	
1500	1500.02	-0.02	-0.01	

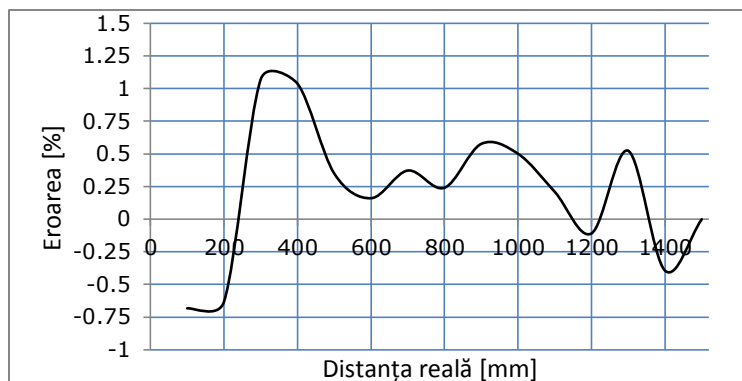


Figura 4.8. Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință, prin aplicarea indicelui de corecție.

În acest caz, erorile se încadrează în limitele utilizării elementului senzorial ultrasonic.

Reprezentarea grafică a distanței reale, măsurată cu telemetrul laser și distanța obținută cu senzorul ultrasonic este prezentată în figura 4.9.

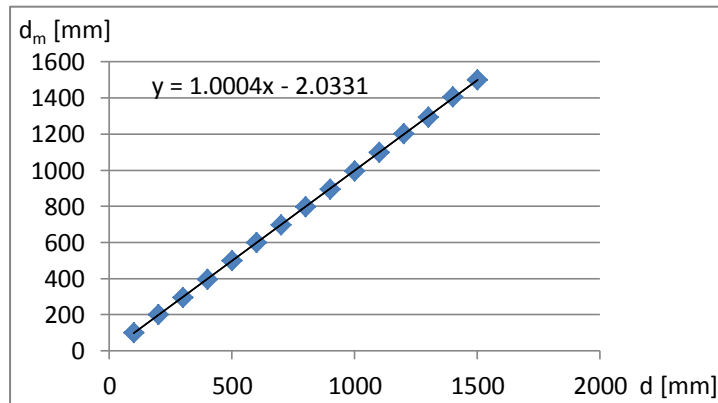


Figura 4.9. Caracteristica elementului senzorial

Aproximarea caracteristicii printr-o ecuație polinomială de gradul 1 este de forma:

$$d_m = 1.0004 \cdot d - 2.0331 \quad (4.6)$$

de unde rezultă că

$$\tan \alpha = 1.0004 \quad (4.7)$$

$$\alpha = 45.0114^\circ \quad (4.8)$$

Acest fapt conduce la afirmația că senzorul ultrasonic Parallax Ping are o caracteristică liniară.

4.3.3. Concluzii

În urma înregistrărilor, prelucrării și interpretării datelor obținute se poate concluziona:

- Senzorul ultrasonic Parallax Ping prezintă o bună precizie pentru obiecte aflate perpendicular pe axa de direcție;
- Erorile determinate în urma măsurătorilor sunt în limitele admise, ceea ce recomandă utilizarea senzorului ultrasonic Parallax Ping la orientarea roboților mobili sau a vehiculelor autonome;
- Aplicând indicele de corecție pentru temperatura măsurată, erorile determinate se diminuează semnificativ. Se recomandă utilizarea unui senzor de temperatură pentru furnizarea informației necesare corecției;

Caracteristica senzorului fiind liniară se poate realiza o implementare ușoară a senzorului în structura unui robot mobil.

4.4. Caracteristica senzorului ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200

4.4.1. Standul experimental și procedura de lucru

Al doilea senzor utilizat în prezenta lucrare este senzorul ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200, (figura 4.10.).

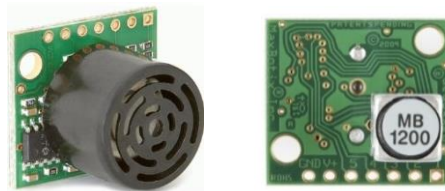


Figura 4.10. XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 (imagine față – verso).

Senzorul ultrasonic a fost conectat la dispozitivul de dezvoltare NI USB-6221 cu ajutorul căruia se face achiziția de date. Date tehnice referitoare la dispozitivul NI USB-6221 pot fi consultate în Anexa 4.7.

În figura 4.11. este prezentată schema electrică a standului experimental folosit în achiziția de informații. În timpul experimentelor a fost utilizat software-ul Labview.

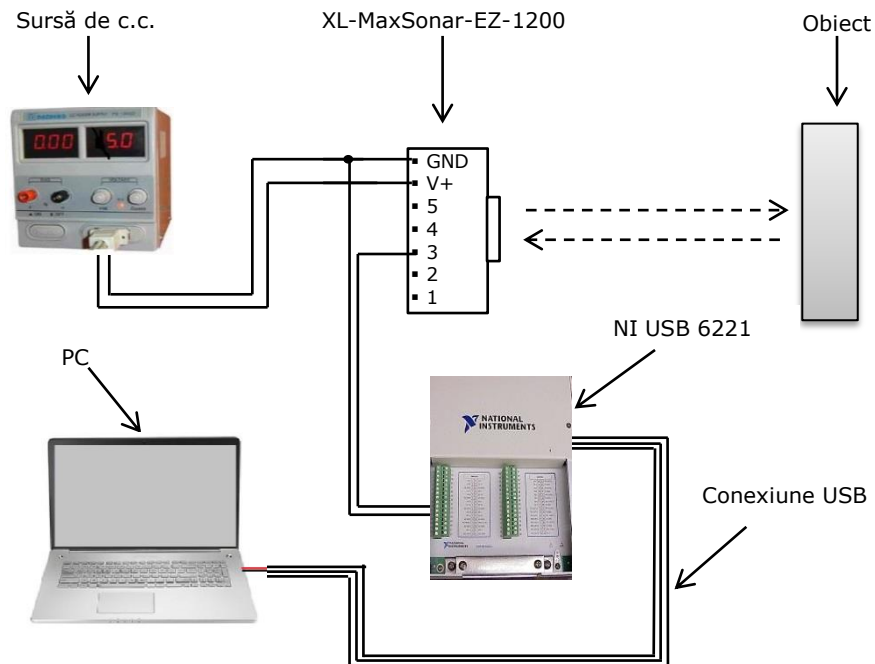


Figura 4.11. Schema electrică a standului experimental.

Procedura de lucru a constat în plasarea unui obiect dreptunghic cu dimensiunile $L = 300\text{mm}$ și $l = 200\text{mm}$ la diferite distanțe față de senzorul

ultrasonic, perpendicular pe axa acestuia. Distanța *Senzor – Obiect* a fost măsurată cu telemetrul cu laser și a fost considerată distanța de referință sau distanța reală.

4.4.2. Desfășurarea experimentelor

Pe parcursul desfășurării experimentelor au putut fi culese o serie de date referitoare la fiecare distanță în parte.

În figura 4.12 (a,b,c,d,e,f,g) sunt prezentate ferestrele de lucru ale programului cu detalii din timpul achiziției de informații.

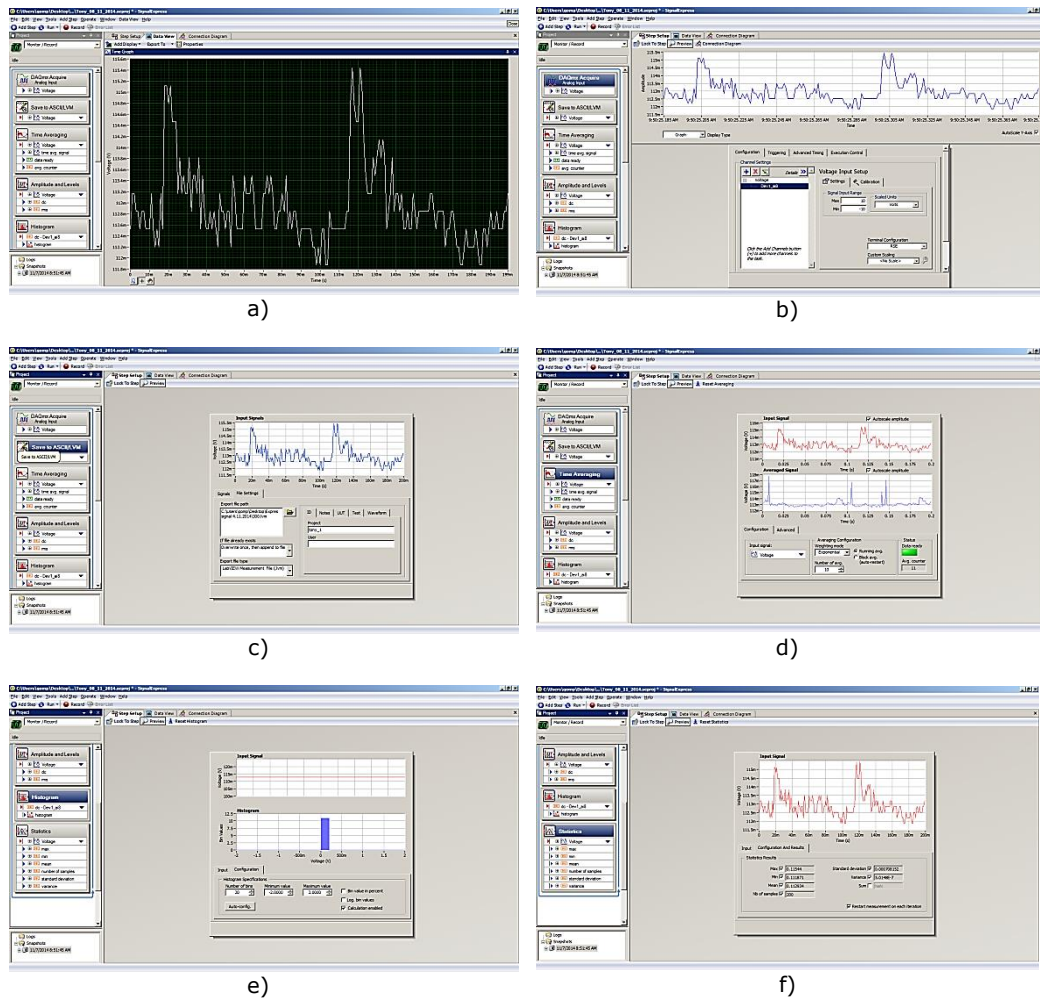


Figura 4.12. Ferestrele de lucru ale programului.

Aceste date, precum: valoarea minimă, valoarea maximă, valoarea medie a tensiunii, deviația standard pot fi consultate în Anexa 4.8.

O imagine cu standul experimental și sistemul de achiziție de informații se regăsește în figura 4.13.

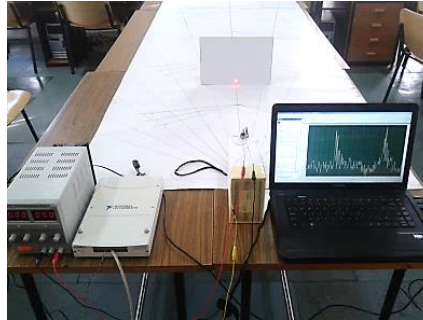


Figura 4.13. Standul experimental și sistemul de achiziție de informații.

În urma achiziției datelor și prelucrării statistice a acestora, tabelul 4.3., s-a obținut graficul din figura 4.14. care reprezintă tensiunea de ieșire a senzorului în funcție de distanța de referință.

Tabel 4.3. Date prelucrate furnizate de senzorul XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200

Nr. crt	d [mm]	U [mV]	Nr. crt	d [mm]	U [mV]	Nr. crt	d [mm]	U [mV]
1.	100	113	9.	900	430	17.	1550	664
2.	200	112	10.	1000	480	18.	1600	669
3.	300	142	11.	1100	529	19.	1650	664
4.	400	191	12.	1200	575	20.	1700	669
5.	500	240	13.	1300	627	21.	1900	667
6.	600	284	14.	1400	664	22.	2100	669
7.	700	328	15.	1450	664	23.	2300	669
8.	800	382	16.	1500	665			

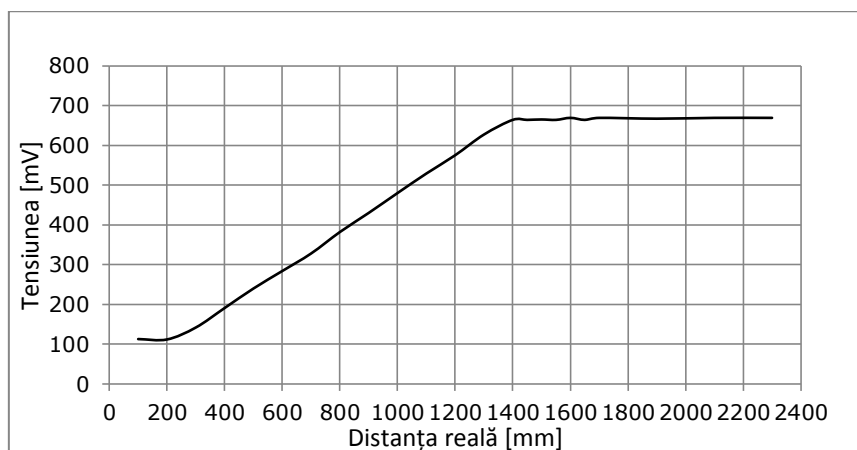


Figura 4.14. Tensiunea de ieșire a senzorului în funcție de distanța față de obstacol

A. Caracteristica directă și ecuația acesteia

Graficul a fost împărțit în trei segmente: [0; 200]mm, [200; 1400]mm și [1400; 2300]mm. Pentru intervalele [0; 200]mm și [1400; 2300]mm caracteristica prezintă zonă de insensibilitate și, respectiv, saturație. Din acest motiv, se recomandă neutilizarea acestor intervale de lucru.

Pentru a calcula caracteristica directă și caracteristica inversă a senzorului ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 pe intervalul [200; 1400]mm s-a apelat la softul Matlab.

În figura 4.15. este prezentată caseta de lucru pentru aproximarea matematică a caracteristicii directe printr-o funcție polinomială de gradul 1 de forma:

$$f(x) = p_1 \cdot x + p_2 \quad (4.9)$$

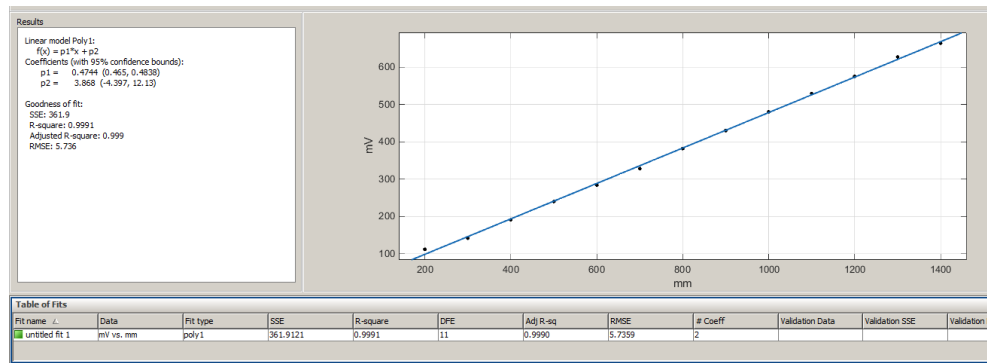


Figura 4.15. Aproximarea matematică a caracteristicii directe.

$$U = 0.4744 \cdot x + 3.868 \quad [mV] \quad (4.10)$$

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii directe sunt prezentați în tabelul 4.4.

Tabel 4.4. Indicii statistici referitori la caracteristica directă.

SSE	361.9121
R – square	0.9991
Adjusted R – square	0.9990
RMSE	5.7359

Notatiile din tabel au semnificațiile: *SSE* - sum of squared errors of prediction, *R_square* - coefficient of determination and *RMSE* - root-mean-square error [Karen, 2012], [Kirckhner, 2001].

B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia

În figura 4.16. este prezentată aproximarea caracteristicii inverse printr-o funcție polinomială de gradul I a elementului senzorial pe intervalul [200; 1400]mm.

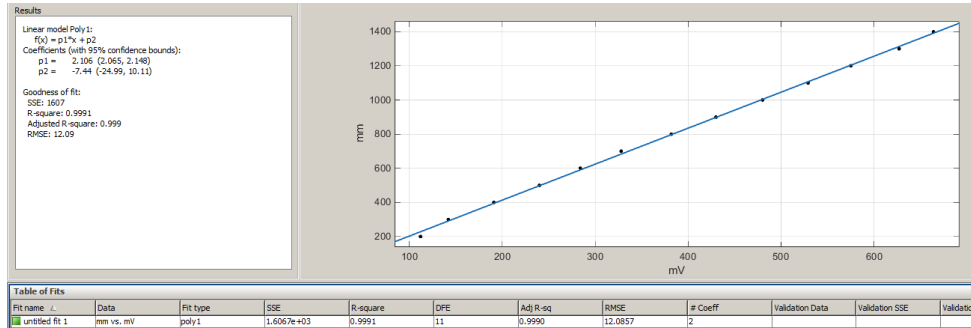


Figura 4.16. Aproximarea matematică a caracteristicii inverse.

Ecuția matematică polinomială de gradul 1 a caracteristicii inverse pe intervalul [200; 1400]mm este:

$$x = 2.106 \cdot U - 7.44 \quad [mm] \quad (4.11)$$

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii inverse sunt prezentați în tabelul 4.5.

Tabel 4.5. Indicii statistici referitori la caracteristica inversă.

SSE	$1.6067 \cdot 10^3$
R – square	0.9991
Adjusted R – square	0.9990
RMSE	12.0857

În tabelul 4.6. este prezentat modul de evaluare al erorilor atunci când se aplică ecuația polinomială de gradul 1 a caracteristicii inverse a senzorului XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200.

Tabel 4.6. Modul de evaluare a erorilor – cazul ecuația de gradul 1

Tensiunea de ieșire a senzorului	Distanța reală	Distanța calculată	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
U	d_0	d	$d_0 - d$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mV]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
112	200	228.43	-28.43	-14.21	0.52
142	300	291.61	8.38	2.79	
191	400	394.80	5.19	1.29	
240	500	498.00	2.00	0.40	
284	600	590.66	9.33	1.55	
328	700	683.32	16.67	2.38	
382	800	797.05	2.94	0.36	
430	900	898.14	1.86	0.21	
480	1000	1003.44	-3.44	-0.34	
529	1100	1106.63	-6.63	-0.60	
575	1200	1203.51	-3.51	-0.29	
627	1300	1313.02	-13.02	-1.01	
664	1400	1390.94	9.05	0.64	

Rezultate mult mai bune s-au obținut prin aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 2, de forma:

$$f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3 \quad (4.12)$$

În figura 4.17. este reprezentată aproximarea matematică.

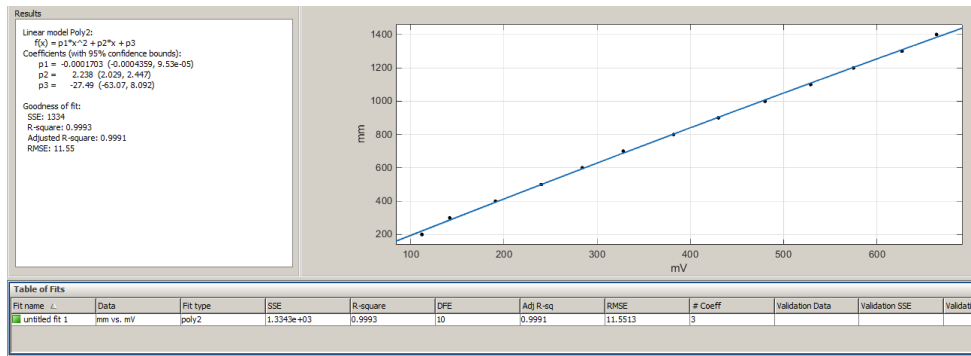


Figura 4.17. Reprezentarea matematică a caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 2.

Ecuația matematică polinomială de gradul 2 a caracteristicii inverse pe intervalul [200; 1400]mm este:

$$x = -0.0001703 \cdot U^2 + 2.238 \cdot U - 27.49 \quad [mm] \quad (4.13)$$

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii inverse prin ecuația polinomială de gradul 2 sunt prezentați în tabelul 4.7.

Tabel 4.7. Indicii statistici referitori la caracteristica inversă.

SSE	1334
R – square	0.9993
Adjusted R – square	0.9991
RMSE	11.55

În tabelul 4.8. este prezentat modul de evaluare a erorilor atunci când se aplică ecuația polinomială de gradul 2 a caracteristicii inverse a senzorului XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200. Semnificația parametrilor utilizați este cea din cazul anterior. Prelucrarea datelor scoate în evidență o eroare relativă inferioară cazului anterior. Comparativ, utilizarea unei ecuații de gradul 2 în modelul matematic este mai complexă.

Tabel 4.8. Modul de evaluare a erorilor – cazul ecuația de gradul 2

Tensiunea de ieșire a senzorului	Distanța reală	Distanța calculată	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
U	d_0	d	$d_0 - d$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mV]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
112	200	221.02	-21.02	-10.51	-0.301
142	300	286.87	13.12	4.37	
191	400	393.75	6.24	1.56	
240	500	499.82	0.17	0.03	
284	600	594.36	5.63	0.93	
328	700	688.25	11.74	1.67	
382	800	802.57	-2.57	-0.32	
430	900	903.36	-3.36	-0.37	
480	1000	1007.51	-7.51	-0.75	
529	1100	1108.75	-8.75	-0.79	
575	1200	1203.05	-3.05	-0.25	
627	1300	1308.78	-8.78	-0.67	
664	1400	1383.45	16.54	1.18	

4.4.3. Concluzii

În urma înregistrărilor, prelucrării și interpretării datelor obținute se poate concluziona:

- În intervalele [0; 200]mm și [1400; 2300]mm senzorul ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 nu poate fi utilizat în navigația roboților mobili.
- În intervalul [200; 1400]mm senzorul prezintă o caracteristică liniară.
- Caracteristica inversă poate fi aproximată printr-o ecuație polinomială de gradul 1, ușor de implementat în sistemul de comandă al unui robot mobil, iar erorile de determinare sunt în limitele admise.
- La integrarea unui astfel de senzor în componența unui robot mobil trebuie să se țină cont de cele trei intervale ale domeniului de măsurare.
- Modelul matematic de evaluare a probabilității aspectelor aleatoare poate fi o problemă de lucru în viitor.

4.5. Determinarea caracteristicii senzorului în infraroșu Sharp GP2Y0A02YK

4.5.1. Standul experimental și procedura de lucru

Experimentale au vizat determinarea distanței dintre senzorul IR și obiecte de culorile: alb, roșu și verde [Stănescu, 2015g]. Obiectele au fost plasate la diferite distanțe față de senzor. Distanța de referință a fost determinată, în prealabil, cu telemetrul cu laser Bosch DLE 70 Professional. Imagini cu obiectele plasate în scena de lucru pot fi vizualizate în figura 4.18(a,b,c).

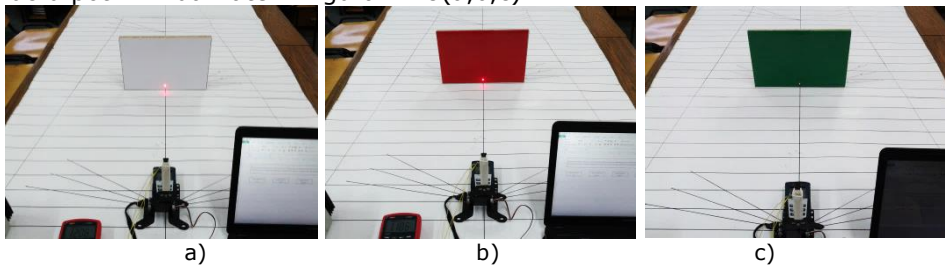


Figura 4.18. Imagini cu obiectele plasate în spațiul de lucru (a – obiect alb, b – obiect roșu, c – obiect verde).

Informațiile achiziționate pentru cele 3 cazuri pe parcursul experimentelor sunt prezentate în Anexa 4.9. Acestea au fost prelucrate statistic, iar rezultatele finale sunt evidențiate în tabelul 4.9.

Tabel 4.9. Rezultate finale pentru cele 3 cazuri de experimente

x [mm]	U_1 [mV]	U_2 [mV]	U_3 [mV]
25	1464.4	1455.3	1455.5
50	1701.5	1990.6	1940.4
75	1888.5	2296.6	2198.3
100	2486.2	2472.0	2458.8
125	2553.2	2405.0	2422.2
150	2472.6	2316.0	2312.6
200	2248.3	1977.2	2097.3
300	1711.7	1547.8	1637.3
400	1330.7	1440.4	1320.2
500	1123.3	1206.2	1195.4
600	983.9	1010.3	946.0
700	905.4	954.2	894.9
800	837.6	834.2	846.2
900	787.3	806.2	823.8
1000	741.4	757.4	771.0
1100	702.1	710.7	711.1
1200	671.4	679.7	686.1
1300	645.6	690.7	661.8
1400	615.9	690.5	630.1
1500	590.1	690.4	617.7
1600	565.6	693.4	608.5

unde:

- x – distanța de referință măsurată cu telemetrul cu laser;
- $U1$ – media tensiunilor de ieșire în cazul obiectului de culoare albă;
- $U2$ – media tensiunilor de ieșire în cazul obiectului de culoare roșie;
- $U3$ – media tensiunilor de ieșire în cazul obiectului de culoare verde.

4.5.2. Desfășurarea experimentelor

În cele ce urmează se prezintă ecuațiile caracteristicii directe și a caracteristicii inverse a senzorialului infraroșu Sharp GP2Y0A02YK pentru fiecare culoare în parte, respectiv: alb, roșu și verde.

4.5.2.1. Experimentul 1 pentru obiect de culoare albă

A. Caracteristica directă și ecuația acesteia

Din analiza caracteristicii elementului senzorial se constată o neliniaritate și două intervale remarcabile $[0; 125]$ mm și, respectiv, $[125; 1600]$. Din acest motiv aspectele matematice vor fi abordate atât global cât și eșalonat.

Pentru a afla ecuația caracteristicii directe, am apelat la mediul de programare Matlab. În figura 4.19. este prezentată caseta de lucru pentru aproximarea matematică pe baza unei funcții polinomiale de gradul 8, de forma:

$$f(x) = p_1 \cdot x^8 + p_2 \cdot x^7 + p_3 \cdot x^6 + p_4 \cdot x^5 + p_5 \cdot x^4 + p_6 \cdot x^3 + p_7 \cdot x^2 + p_8 \cdot x + p_9 \quad (4.14)$$

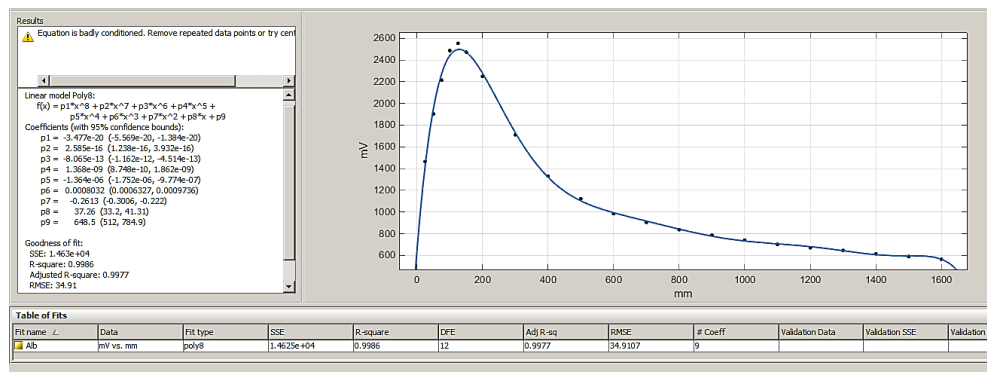


Figura 4.19. Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.

Ecuația caracteristicii elementului senzorial este descrisă de expresia:

$$U = -3.477 \cdot 10^{-20} \cdot x^8 + 2.585 \cdot 10^{-16} \cdot x^7 - 8.056 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 + 1.368 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 1.364 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0.0008032 \cdot x^3 - 0.2613 \cdot x^2 + 37.26 \cdot x + 648.5 [mV] \quad (4.15)$$

În tabelul 4.10. este prezentat modul de evaluare a erorilor din procesul de aproximare a caracteristicii:

Tabel 4.10. Modul de evaluare a erorilor – obiect de culoare albă

x [mm]	U [mV]	f [mV]	U-f [mV]
25	1464.4	1428.718	35.68215
50	1902.8	1950.54	-47.7401
75	2213.7	2271.986	-58.2859
100	2486.2	2441.199	45.001
125	2553.2	2497.722	55.47763
150	2472.6	2473.654	-1.05372
200	2248.3	2281.064	-32.7638
300	1711.7	1738.054	-26.3542
400	1330.7	1336.536	-5.83553
500	1123.3	1135.648	-12.3484
600	983.9	1053.259	-69.3591
700	905.4	1014.707	-109.307
800	837.6	993.5452	-155.945
900	787.3	997.4573	-210.157
1000	741.4	1038.5	-297.1
1100	702.1	1112.821	-410.721
1200	671.4	1200.965	-529.565
1300	645.6	1285.874	-640.274
1400	615.9	1371.66	-755.76
1500	590.1	1472.211	-882.111
1600	565.6	1524.685	-959.085

Notațiile din tabel au semnificațiile:

x – distanța de referință măsurată cu telemetrul laser;

U – media tensiunilor de ieșire a senzorului;

f – tensiunea calculată cu ecuația corespunzătoare caracteristicii.

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii sunt prezentați în tabelul 4.11.

Tabel 4.11. Indicii statistici pentru intervalul [25; 1600]mm

SSE	$1.463 \cdot 10^4$
R – square	0.9986
Adjusted R – square	0.9977
RMSE	34.91

Pentru a diminua erorile, graficul obținut a fost împărțit în două intervale: [25; 125]mm și [125; 1600]mm.

Ecuația caracteristicii pentru intervalul [25; 125]mm este o ecuație polinomială de gradul 3 descrisă de expresia:

$$f(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (4.16)$$

În figura 4.20. este prezentată aproximarea caracteristicii directe prin funcția polinomială de gradul 3 a elementului senzorial pe intervalul [25; 125]mm.

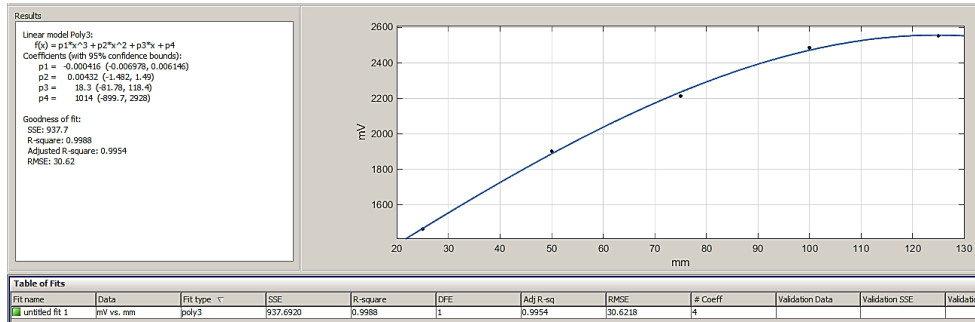


Figura 4.20. Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 3 pentru intervalul [25; 125]mm.

Ecuția caracteristicii pentru intervalul [25; 125]mm este:

$$U = -0.000416 \cdot x^3 - 0.00432 \cdot x^2 + 18.3 \cdot x + 1014 \quad [mV] \quad (4.17)$$

În tabelul 4.12. este prezentat modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 125]mm pentru obiectul alb.

Tabel 4.12. Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 125]mm.

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
25	1464.4	1462.3	2.1
50	1902.8	1866.2	36.6
75	2213.7	2186.7	27
100	2486.2	2384.8	101.4
125	2553.2	2421.5	131.7

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [25; 125]mm sunt prezentați în tabelul 4.13.

Tabel 4.13. Indicii statistici referitori la intervalul [25; 125]mm.

SSE	937.7
R - square	0.9988
Adjusted R - square	0.9954
RMSE	30.62

În figura 4.21. este prezentată aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 4 a elementului senzorial pe intervalul [125; 1600]mm.

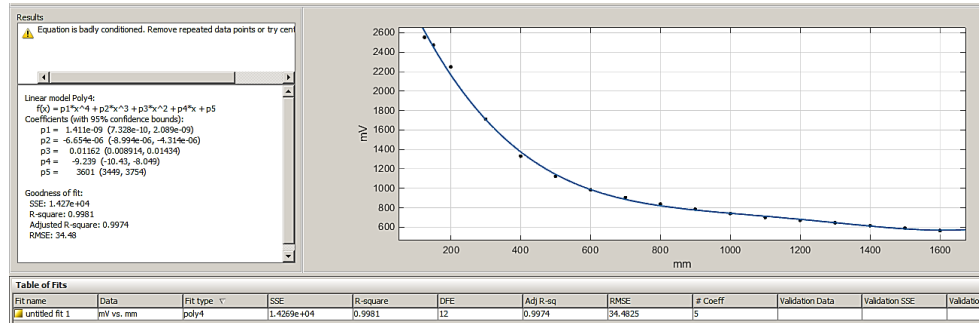


Figura 4.21. Aproximarea caracteristicii printr-o polinomială de gradul 4 pentru intervalul [125; 1600]mm.

Ecuția caracteristicii pentru intervalul [125; 1600]mm este:

$$U = 1.411 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 6.654 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0.01162 \cdot x^2 - 9.239 \cdot x + 3601 \text{ [mV]} \quad (4.18)$$

În tabelul 4.14. este prezentat modul de evaluare al erorilor pe intervalul [125; 1600]mm pentru obiectul alb.

Tabel 4.14. Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [125; 1600]mm.

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
125	2553.20	2615.03	-61.83
150	2472.60	2454.85	17.74
200	2248.30	2167.02	81.27
300	1711.70	1706.87	4.82
400	1330.70	1374.86	-44.16
500	1123.30	1142.93	-19.63
600	983.90	986.40	-2.50
700	905.40	883.95	21.44
800	837.60	817.69	19.90
900	787.30	773.09	14.20
1000	741.40	739.00	2.40
1100	702.10	707.67	-5.57
1200	671.40	674.73	-3.33
1300	645.60	639.21	6.38
1400	615.90	603.52	12.37
1500	590.10	573.43	16.66
1600	565.60	558.14	7.45

Erorile absolute ale caracteristicii approximate sunt în intervalul admis pentru astfel de aplicații.

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [125; 1600]mm sunt prezentați în tabelul 4.15.

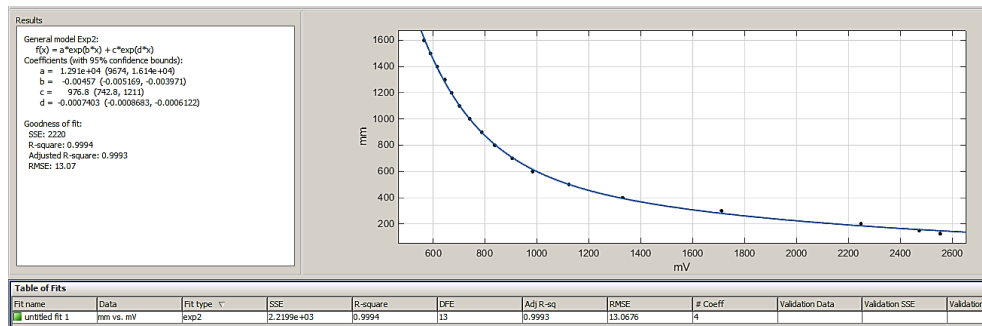
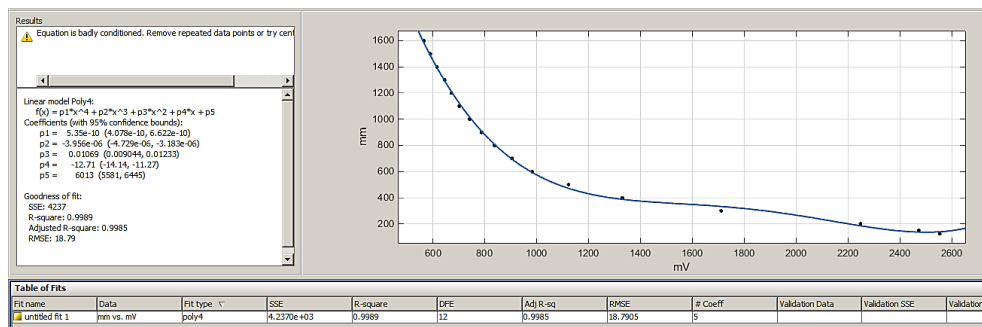
Tabel 4.15. Indicii statisticii referitori la intervalul [125; 1600]mm.

SSE	$1.427 \cdot 10^4$
R – square	0.9981
Adjusted R – square	0.9974
RMSE	34.48

B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia

Caracteristica inversă a elementului senzorial a fost reprezentată numai pe intervalul [125; 1600]mm. S-au efectuat două aproximări: printr-o ecuație exponențială de gradul 2 și printr-o ecuație polinomială de gradul 4.

În figura 4.22. este prezentată aproximația caracteristicii inverse prin exponențiala de gradul 2, iar în figura 4.23. prin polinomiala de gradul 4.

**Figura 4.22.** Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație exponențială de gradul 2.**Figura 4.23.** Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 4.

Expresia ecuației exponențiale este:

$$y = 1.291 \cdot 10^4 \cdot e^{-0.00457 \cdot U} + 976.8 \cdot e^{-0.0007403 \cdot U} \quad [mm] \quad (4.19)$$

iar a ecuației polinomiale este:

$$y = 5.35 \cdot 10^{-10} \cdot U^4 - 3.956 \cdot 10^{-6} \cdot U^3 + 0.01069 \cdot U^2 - 12.71 \cdot U + 6013 [mm] \quad (4.20)$$

Rezultatele obținute, tabelul 4.16., permit și o analiză referitoare la cel mai bun rezultat, unde $f1$ este ecuația exponențială iar $f2$ este ecuația polinomială.

Tabel 4.16. Rezultatele obținute în compararea ecuației exponențiale și ecuației polinomiale.

x [mV]	y [mm]	f1 [mm]	y - f1 [mm]	f2 [mm]	y - f2 [mm]
2553.2	125	147.65	-22.65	139.84	-14.84
2472.6	150	156.77	-6.77	137.15	12.84
2248.3	200	185.35	14.64	184.30	15.69
1711.7	300	280.26	19.73	330.87	-30.87
1330.7	400	394.23	5.76	385.06	14.93
1123.3	500	501.37	-1.37	469.16	30.84
983.9	600	615.42	-15.42	589.56	10.43
905.4	700	705.74	-5.74	691.85	8.14
837.6	800	806.30	-6.30	805.56	-5.56
787.3	900	898.82	1.17	907.53	-7.53
741.4	1000	1000.17	-0.17	1015.28	-15.28
702.1	1100	1102.60	-2.60	1119.73	-19.72
671.4	1200	1194.53	5.46	1209.74	-9.74
645.6	1300	1281.11	18.88	1291.44	8.55
615.9	1400	1392.77	7.23	1392.71	7.28
590.1	1500	1501.52	-1.52	1487.26	12.74
565.6	1600	1616.19	-16.19	1582.95	17.04

În tabelul 4.17. se prezintă o comparație a indicilor statistici referitoare la aproximarea caracteristicii pe intervalul [125; 1600]mm unde se poate vedea că ecuația exponențială de gradul 2 are indici statistici superiori ecuației polinomiale de gradul 4.

Tabel 4.17. Comparația indicilor statistici referitori la ecuația exponențială și ecuația polinomială determinate

	Exponențiala gradul 2	Polinomiala gradul 4
SSE	2220	4237
R - square	0.9994	0.9989
Adjusted R - square	0.9993	0.9985
RMSE	13.07	18.79

In tabelul 4.18. sunt prezentate erorile de măsurare la utilizarea elementului senzorial pentru caracteristica inversă atât pentru ecuația exponențială de gradul 2 cât și pentru ecuația polinomială de gradul 4.

Tabel 4.18. Calculul erorilor – obiect de culoare albă

d_0 [mm]	d [mm] (exp. 2)	d [mm] (poli. 4)	ε [%] (exp. 2)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (exp. 2)	ε [%] (poli. 4)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (poli. 4.)
125	147.657	139.848	-18.126	-0.621	-11.878	0.263
150	156.778	137.153	-4.519		8.564	
200	185.354	184.306	7.322		7.846	
300	280.265	330.876	6.578		-10.292	
400	394.234	385.064	1.441		3.734	
500	501.378	469.160	-0.275		6.168	
600	615.422	589.568	-2.570		1.738	
700	705.745	691.851	-0.820		1.164	
800	806.304	805.561	-0.788		-0.695	
900	898.827	907.537	0.130		-0.837	
1000	1000.172	1015.284	-0.017		-1.528	
1100	1102.600	1119.730	-0.236		-1.793	
1200	1194.535	1209.742	0.455		-0.812	
1300	1281.116	1291.447	1.452		0.658	
1400	1392.770	1392.717	0.516		0.520	
1500	1501.520	1487.259	-0.101		0.849	
1600	1616.195	1582.954	-1.012	1.065		

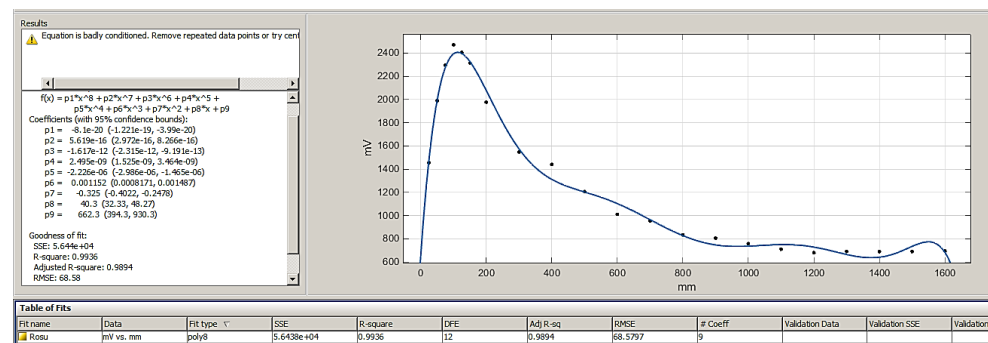
unde d_0 reprezintă distanța reală măsurată cu laserul, iar d este distanța calculată cu cele două ecuații ale caracteristicii inverse a elementului senzorial.

În concluzie, erorile relative sunt scăzute în ambele cazuri.

4.5.2.2. Experimentul 2 pentru obiect de culoare roșie

A. Caracteristica directă și ecuația acesteia

Rezultatele achiziționate permit ridicarea caracteristicii și aproximarea acesteia prin utilizarea mediului Matlab. În figura 4.24. este prezentată caseta de lucru pentru aproximarea matematică pe baza unei funcții polinomiale de gradul 8:

**Figura 4.24.** Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.

Ecuția caracteristicii elementului senzorial este descrisă de expresia:

$$U = -8.1 \cdot 10^{-20} \cdot x^8 + 5.619 \cdot 10^{-16} \cdot x^7 - 1.617 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 + 2.495 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 2.226 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0.001152 \cdot x^3 - 0.325 \cdot x^2 + 40.3 \cdot x + 662.3 \text{ [mV]} \quad (4.21)$$

În tabelul 4.19. este prezentat modul de evaluare a erorilor:

Tabel 4.19. Modul de evaluare a erorilor – obiect de culoare roșie

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
25	1455.3	1483.829	-28.529
50	1990.6	1995.642	-5.042
75	2296.6	2277.883	18.716
100	2472.0	2395.088	76.911
125	2405.0	2398.454	6.546
150	2316.0	2327.872	-11.872
200	1977.2	2078.597	-101.397
300	1547.8	1577.330	-29.530
400	1440.4	1317.801	122.599
500	1206.2	1213.863	-7.662
600	1010.3	1122.263	-111.963
700	954.2	997.309	-43.109
800	834.2	880.878	-46.678
900	806.2	831.337	-25.137
1000	757.4	862.300	-104.900
1100	710.7	929.458	-218.758
1200	679.7	971.090	-291.390
1300	690.7	975.183	-284.483
1400	690.5	1013.442	-322.942
1500	690.4	1149.800	-459.400
1600	693.4	1098.391	-404.991

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii sunt prezentați în tabelul 4.20.

Tabel 4.20. Indicii statistici pentru intervalul [25; 1600]mm

SSE	$5.644 \cdot 10^4$
R – square	0.9936
Adjusted R – square	0.9896
RMSE	68.58

Graficul a fost împărțit în două părți [25; 100]mm și [125; 1600]mm și s-a determinat ecuația caracteristicii directe pentru fiecare dintre ele.

În figura 4.25. este prezentată aproximarea caracteristicii directe prin funcția polinomială de gradul 3 pe intervalul [25; 100]mm.

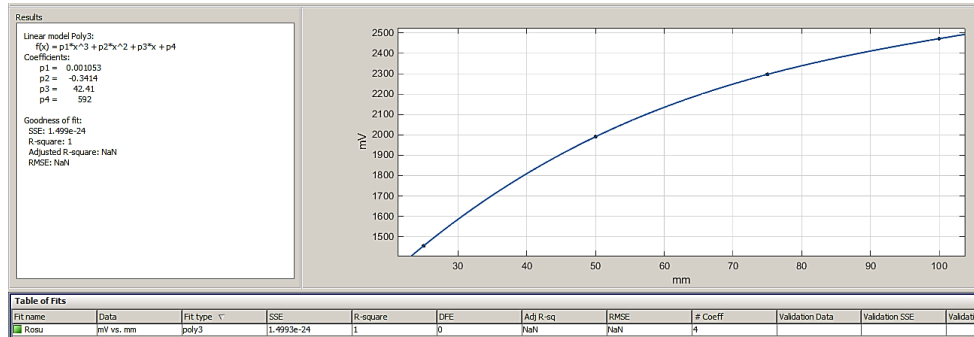


Figura 4.25. Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul [25; 100]mm

Expresia matematică care aproximează caracteristica pe intervalul [25; 100]mm este:

$$U = 0.001053 \cdot x^3 - 0.3414 \cdot x^2 + 42.41 \cdot x + 592 \quad [mV] \quad (4.22)$$

În tabelul 4.21. este prezentat modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 100]mm pentru obiectul de culoare roșie.

Tabel 4.21. Modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 100]mm

x [mm]	y [mV]	f [mV]	y-f [mV]
25	1455.3	1455.328	-0.02813
50	1990.6	1990.625	-0.025
75	2296.6	2296.609	-0.00937
100	2472	2472	0

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [25; 100]mm sunt prezentați în tabelul 4.22.

Tabel 4.22. Indicii statistici referitori la intervalul [25; 100]mm

SSE	$1.499 \cdot 10^{-24}$
R – square	1
Adjusted R – square	NaN
RMSE	NaN

În figura 4.26. este prezentată aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 4 a elementului senzorial pe intervalul [125; 1600]mm.

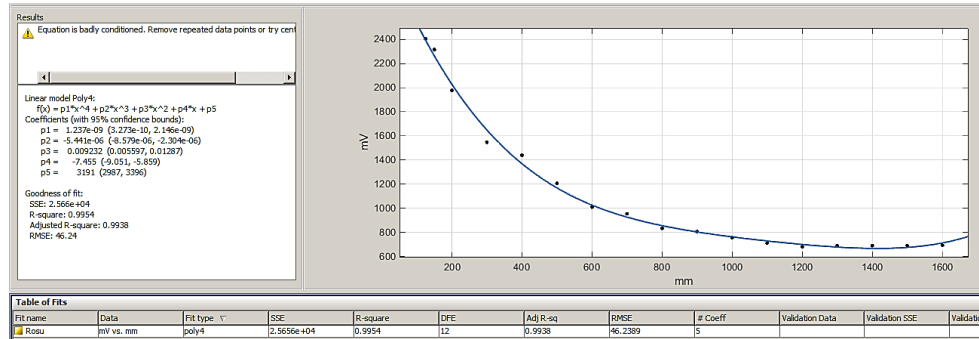


Figura 4.26. Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul [125; 1600]mm

Ecuția caracteristicii pentru intervalul [125; 1600]mm este:

$$U = 1.237 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 5.441 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0.009232 \cdot x^2 - 7.455 \cdot x + 3191 \quad [mV] \quad (4.23)$$

În tabelul 4.23. este prezentat modul de evaluare a erorilor pe intervalul [125; 1600]mm pentru obiectul de culoare roșie.

Tabel 4.23. Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [125; 1600]mm

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
125	2405.0	2393.050	11.950
150	2316.0	2262.733	53.267
200	1977.2	2027.731	-50.531
300	1547.8	1648.493	-100.693
400	1440.4	1369.563	70.836
500	1206.2	1168.688	37.512
600	1010.3	1026.579	-16.280
700	954.2	926.921	27.279
800	834.2	856.363	-22.163
900	806.2	804.526	1.673
1000	757.4	764.000	-6.600
1100	710.7	730.340	-19.641
1200	679.7	702.075	-22.375
1300	690.7	680.698	10.001
1400	690.5	670.675	19.825
1500	690.4	679.437	10.962
1600	693.4	717.387	-23.987

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [125; 1600]mm sunt prezentați în tabelul 4.24.

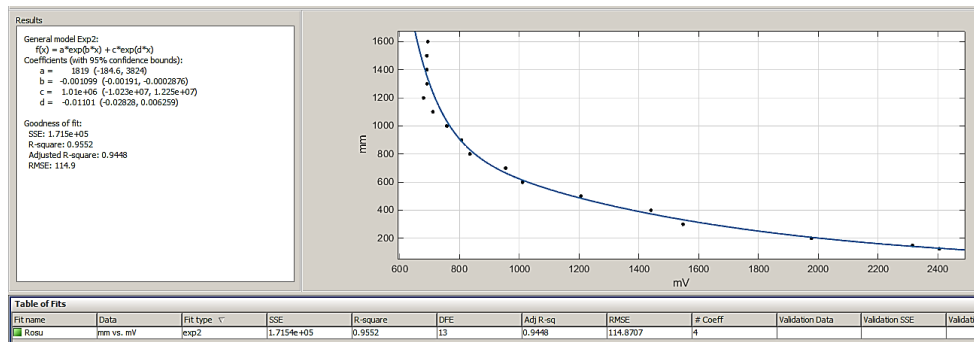
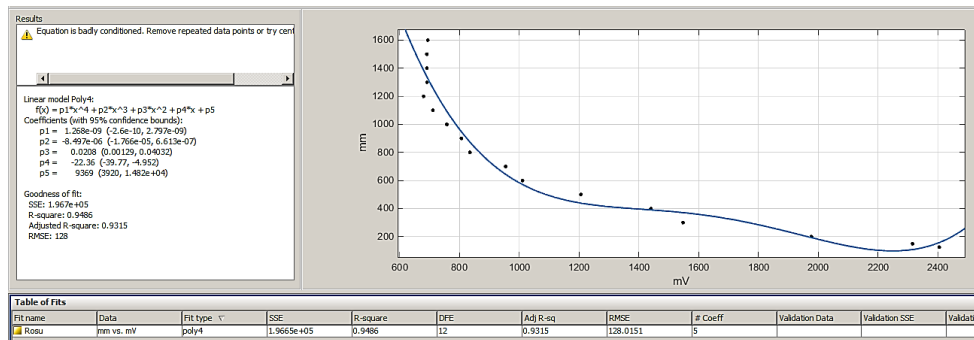
Tabel 4.24. Indicii statistici referitori la intervalul [125; 1600]mm

SSE	$2.566 \cdot 10^4$
R – square	0.9954
Adjusted R – square	0.9938
RMSE	46.24

B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia

Ecuația caracteristicii inverse a elementului senzorial a fost calculată numai pe intervalul [125; 1600]mm. S-au efectuat două aproximări: printr-o ecuație exponențială de gradul 2 și printr-o ecuație polinomială de gradul 4.

În figura 4.26. este prezentată aproximația caracteristicii inverse printr-o exponențială de gradul 2, iar în figura 4.28. printr-o polinomială de gradul 4.

**Figure 4.27.** Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație exponențială de gradul 2.**Figure 4.28.** Aproximarea caracteristicii inverse printr-o ecuație polinomială de gradul 4.

Expresia ecuației exponențiale este:

$$f_1 = 1.819 \cdot e^{-0.001099 \cdot U} + 1.01 \cdot 10^6 \cdot e^{-0.01101 \cdot U} \quad [mm] \quad (4.24)$$

iar a ecuației polinomiale este:

$$f_2 = 1.268 \cdot 10^{-9} \cdot U^4 - 8.497 \cdot 10^{-6} \cdot U^3 + 0.0208 \cdot U^2 - 22.36 \cdot U + 9369 \quad [mm] \quad (4.25)$$

Rezultatele obținute permit și o analiză referitoare la cel mai bun rezultat, unde f_1 este ecuația exponențială iar f_2 este ecuația polinomială. Rezultatele acestei analize sunt prezentate în tabelul 4.25.

Tabel 4.25. Rezultatele obținute prin ecuația exponențială de gradul 2 și ecuația polinomială de gradul 4.

x [mV]	y [mm]	f1 [mm]	y - f1 [mm]	f2 [mm]	y - f2 [mm]
2553.2	125	109.955	15.044	331.938	-206.938
2472.6	150	120.139	29.860	194.957	-44.957
2248.3	200	153.724	46.275	70.377	129.622
1711.7	300	277.246	22.753	309.061	-9.061
1330.7	400	421.846	-21.846	400.411	-0.411
1123.3	500	533.586	-33.586	472.849	27.151
983.9	600	636.857	-36.857	599.752	0.247
905.4	700	719.827	-19.827	720.639	-20.639
837.6	800	824.359	-24.359	863.953	-63.953
787.3	900	939.399	-39.399	998.295	-98.295
741.4	1000	1093.233	-93.232	1144.862	-144.862
702.1	1100	1284.653	-184.653	1290.624	-190.624
671.4	1200	1491.975	-291.975	1418.699	-218.699
645.6	1300	1721.405	-421.405	1536.669	-236.669
615.9	1400	2070.844	-670.844	1684.892	-284.892
590.1	1500	2474.042	-974.042	1825.058	-325.058
565.6	1600	2971.574	-1371.57	1968.514	-368.514

Din analiza rezultatelor se poate observa o aproximare mai bună cu funcția f_1 în zona distanțelor [125; 1100]mm și o aproximare mai bună cu funcția f_2 în intervalul [1200; 1600]mm.

În tabelul 4.26. se prezintă o comparație a indicilor statistici referitoare la aproximarea caracteristicii pe intervalul [125; 1600]mm. Se observă că și în acest caz ecuația exponențială are indici statistici superiori ecuației polinomiale.

Tabel 4.26. Comparatia indicilor statistici - obiect de culoare roșie

	Exponențiala gradul 2	Polinomiala gradul 4
SSE	$1.715 \cdot 10^5$	$1.967 \cdot 10^5$
R - square	0.9552	0.9486
Adjusted R - square	0.9448	0.9315
RMSE	114.9	128

În tabelul 4.27. sunt prezentate erorile de măsurare în procesul de lucru cu elementul senzorial pentru caracteristica inversă, atât pentru ecuația exponențială de gradul 2 cât și pentru ecuația polinomială de gradul 4.

Tabel 4.27. Calculul erorilor – obiect de culoare roșie

d_0 [mm]	d [mm] (exp. 2)	d [mm] (poli. 4)	ε [%] (exp. 2)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (exp. 2)	ε [%] (poli. 4)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (poli. 4.)
125	109.955	331.938	12.035	-14.549	-165.550	-16.678
150	120.140	194.958	19.906		-29.972	
200	153.724	70.3775	23.137		64.811	
300	277.247	309.061	7.584		-3.020	
400	421.847	400.411	-5.461		-0.103	
500	533.587	472.849	-6.717		5.430	
600	636.858	599.752	-6.143		0.041	
700	719.827	720.639	-2.832		-2.948	
800	824.359	863.953	-3.045		-7.994	
900	939.400	998.296	-4.377		-10.922	
1000	1093.230	1144.860	-9.323		-14.486	
1100	1284.650	1290.620	-16.787		-17.329	
1200	1491.980	1418.700	-24.331		-18.225	
1300	1721.400	1536.670	-32.416		-18.205	
1400	2070.840	1684.890	-47.917		-20.349	
1500	2474.040	1825.060	-64.936		-21.671	
1600	2971.570	1968.510	-85.723	-23.032		

Se constată erori relative apropiate dar mai mari comparativ cu erorile din Experimentul 1, (tabel 4.18.).

4.5.2.3. Experimentul 3 pentru obiect de culoare verde

A. Caracteristica directă și ecuația acesteia

În figura 4.29. este prezentată caseta de lucru pentru aproximarea matematică pe baza unei funcții polinomiale de gradul 8:

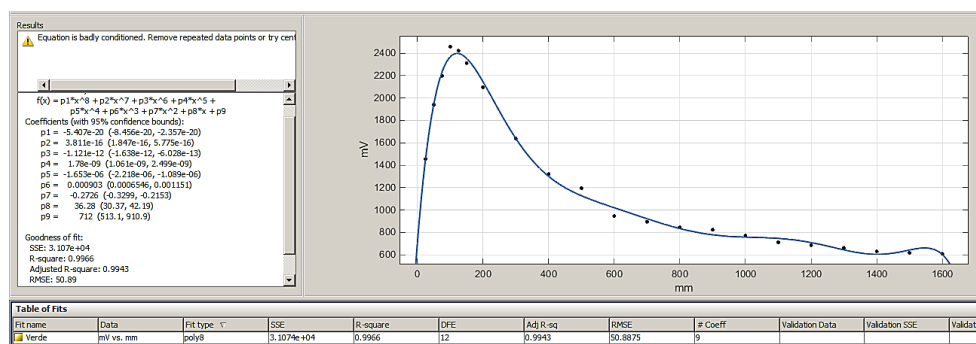


Figura 4.29. Aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 8.

Ecuția caracteristicii elementului senzorial este descrisă de expresia:

$$U = -5.407 \cdot 10^{-20} \cdot x^8 + 3.811 \cdot 10^{-16} \cdot x^7 - 1.121 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 + 1.78 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 1.653 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0.000903 \cdot x^3 - 0.2726 \cdot x^2 + 36.28 \cdot x + 712 \quad [mV] \quad (4.26)$$

In tabelul 4.28. este prezentat modul de evaluare a erorilor:

Tabel 4.28. Modul de evaluare a erorilor – cazul obiect de culoare verde

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
25	1455.5	1462.106	-6.605
50	1940.4	1947.583	-7.182
75	2198.3	2232.306	-34.006
100	2458.8	2368.417	90.383
125	2422.2	2397.956	24.244
150	2312.6	2354.331	-41.731
200	2097.3	2145.796	-48.495
300	1637.3	1641.690	-4.390
400	1320.2	1307.743	12.457
500	1195.4	1140.008	55.392
600	946.0	1034.817	-88.816
700	894.9	925.9668	-31.066
800	846.2	797.198	49.002
900	823.8	642.125	181.674
1000	771.0	422.000	349.000
1100	711.1	49.858	661.241
1200	686.1	-592.164	1278.264
1300	661.8	-1617.41	2279.207
1400	630.1	-3117.96	3748.061
1500	617.7	-5225.30	5843.005
1600	608.5	-8328.72	8937.225

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii sunt prezentați în tabelul 4.29.

Tabel 4.29. Indicii statistici pentru intervalul [25; 100]mm

SSE	$3.107 \cdot 10^4$
R – square	0.9966
Adjusted R – square	0.9843
RMSE	50.89

Analog ca la experimentele cu obiectele de culoare albă și roșie, graficul a fost împărțit în două părți [25; 100]mm și [125; 1600]mm și s-a calculat caracteristica directă pentru fiecare dintre ele.

In figura 4.30. este prezentată aproximarea caracteristicii directe prin funcția polinomială de gradul 3 a elementului senzorial pe intervalul [25; 100]mm.

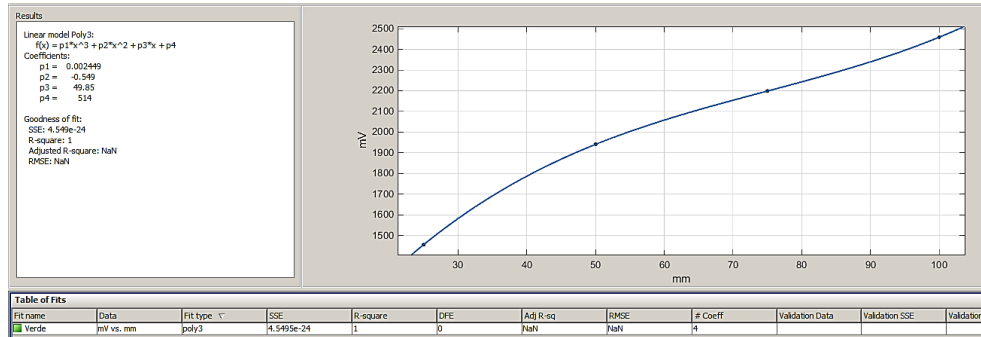


Figura 4.30. Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul [25; 100]mm.

Expresia matematică care aproximează caracteristica directă pe intervalul menționat este:

$$U = 0.002449 \cdot x^3 - 0.549 \cdot x^2 + 49.85 \cdot x + 514 \quad [mV] \quad (4.27)$$

În tabelul 4.30. este prezentat modul de evaluare a erorilor pe intervalul [25; 100]mm pentru obiectul alb.

Tabel 4.30. Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [25; 100]mm

x [mm]	y [mV]	f [mV]	y-f [mV]
25	1455.5	1455.39	0.10938
50	1940.4	1940.13	0.275
75	2198.3	2197.8	0.50313
100	2458.8	2458	0.8

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [25; 100]mm sunt prezentați în tabelul 4.31.

Tabel 4.31. Indicii statistici pentru intervalul [25; 100]mm

SSE	$4.549 \cdot 10^{-24}$
R - square	1
Adjusted R - square	NaN
RMSE	NaN

În figura 4.31. este prezentată aproximarea caracteristicii printr-o funcție polinomială de gradul 4 a elementului senzorial pe intervalul [125; 1600]mm.

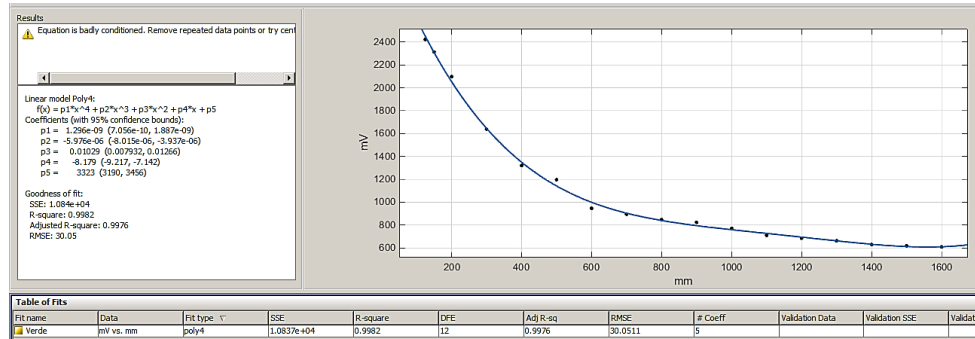


Figura 4.31. Aproximarea caracteristicii elementului senzorial – intervalul [125;1600]mm.

Ecuția caracteristicii pentru intervalul [125; 1600] este:

$$U = 1.296 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 5.976 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0.01029 \cdot x^2 - 8.179 \cdot x + 3323 \text{ [mV]} \quad (4.28)$$

În tabelul 4.32. este prezentat modul de evaluare a erorilor pe intervalul [125; 1600]mm pentru obiectul verde.

Tabel 4.32. Modul de evaluare a erorilor pentru intervalul [125; 1600]mm

x [mm]	y [mV]	U [mV]	y-U [mV]
125	2422.2	2450.051	-27.851
150	2312.6	2308.162	4.438
200	2097.3	2053.066	44.234
300	1637.3	1644.546	-7.245
400	1320.2	1348.514	-28.313
500	1195.4	1140.000	55.400
600	946.0	997.145	-51.145
700	894.9	901.201	-6.301
800	846.2	836.529	9.670
900	823.8	790.601	33.198
1000	771.0	754.000	17.000
1100	711.1	720.417	-9.317
1200	686.1	686.657	-0.557
1300	661.8	652.633	9.166
1400	630.1	621.369	8.730
1500	617.7	599.000	18.700
1600	608.5	594.769	13.730

Indicii statistici referitori la aproximarea caracteristicii pentru intervalul [125; 1600]mm sunt prezentați în tabelul 4.33.

Tabel 4.33. Indicii statistici pentru intervalul [125; 1600]mm

SSE	$1.084 \cdot 10^4$
R – square	0.9982
Adjusted R – square	0.9976
RMSE	30.05

B. Caracteristica inversă și ecuația acesteia

Caracteristica inversă a elementului senzorial a fost calculată numai pe intervalul [125; 1600]mm. S-au efectuat două aproximări: printr-o ecuație exponențială de gradul 2 și printr-o ecuație polinomială de gradul 4.

În figura 4.32. este prezentată aproximația caracteristicii inverse printr-o exponențială de gradul 2, iar în figura 4.33. printr-o polinomială de gradul 4.

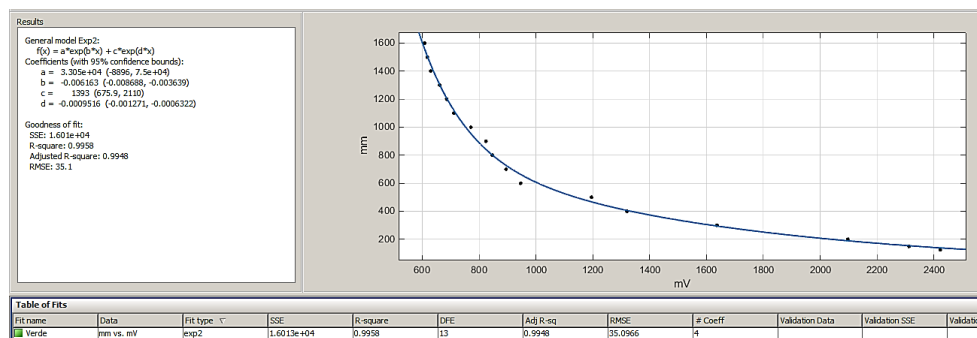


Figura 4.32. Aproximarea caracteristicii inverse a elementului senzorial – intervalul [125 – 1600]mm printr-o ecuație exponențială

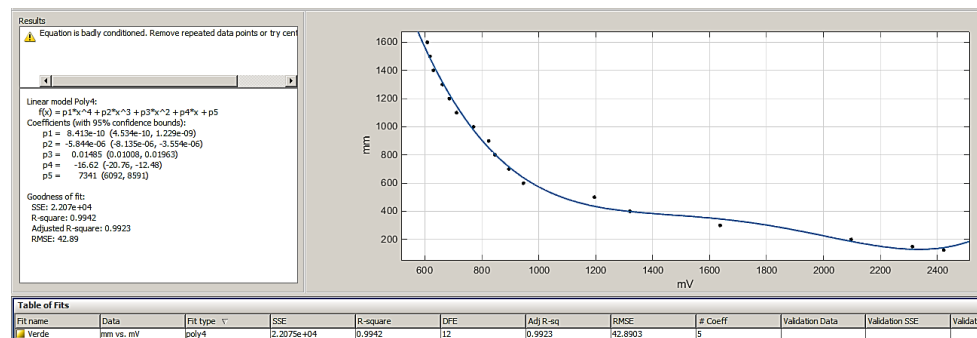


Figura 4.33. Aproximarea caracteristicii inverse a elementului senzorial – intervalul [125; 1600] printr-o ecuație polinomială.

Expresia ecuației exponențiale este:

$$x = 3.305 \cdot e^{-0.006163 \cdot U} + 1393 \cdot e^{-0.0009516 \cdot U} \quad [mm] \quad (4.29)$$

iar a ecuației polinomiale este:

$$x = 8.413 \cdot 10^{-10} \cdot U^4 - 5.844 \cdot 10^{-6} \cdot U^3 + 0.01485 \cdot U^2 - 16.62 \cdot U + 7341 \quad [\text{mm}] \quad (4.30)$$

Rezultatele obținute, tabelul 4.34., permit și o analiză referitoare la cel mai bun rezultat, unde f1 este ecuația exponențială iar f2 este ecuația polinomială.

Tabel 4.34. Analiza rezultatelor obținute prin ecuația exponențială de gradul 2 și ecuația polinomială de gradul 4.

x [mV]	y [mm]	f1 [mm]	y - f1 [mm]	f2 [mm]	y - f2 [mm]
2553.2	125	138.980	-13.98	119.150	19.8294
2472.6	150	154.267	-4.2667	109.390	44.8771
2248.3	200	189.398	10.6023	168.987	20.4104
1711.7	300	294.660	5.34007	333.722	-39.062
1330.7	400	406.267	-6.2673	390.334	15.9338
1123.3	500	467.478	32.5215	429.001	38.4771
983.9	600	663.315	-63.315	634.283	29.0314
905.4	700	727.466	-27.466	711.636	15.8304
837.6	800	802.226	-2.2262	800.900	1.32591
787.3	900	842.225	57.7746	847.615	-5.3893
741.4	1000	954.292	45.7085	973.324	-19.032
702.1	1100	1120.99	-20.988	1145.36	-24.376
671.4	1200	1206.82	-6.8193	1227.39	-20.573
645.6	1300	1301.61	-1.6054	1313.35	-11.743
615.9	1400	1445.05	-45.055	1435.22	9.83752
590.1	1500	1508.16	-8.157	1486.03	22.1316
565.6	1600	1557.80	42.2019	1524.90	32.8972

În tabelul 4.35. se prezintă o comparație a indicilor statistici referitoare la aproximarea caracteristicii pe intervalul [125; 1600]mm.

Tabel 4.35. Comparația indicilor statistici pentru intervalul 125; 1600]mm

	Exponentiala gradul 2	Polinomiala gradul 4
SSE	$1.601 \cdot 10^4$	$2.207 \cdot 10^4$
R - square	0.9958	0.9942
Adjusted R - square	0.9948	0.9923
RMSE	35.1	42.89

În tabelul 4.36. sunt prezentate erorile de măsurare ale elementului senzorial pentru caracteristica inversă, atât pentru ecuația exponențială de gradul 2, cât și pentru ecuația polinomială de gradul 4.

Tabel 4.36. Calculul erorilor – obiect de culoare verde

d_0 [mm]	d [mm] (exp. 2)	d [mm] (poli. 4)	ε [%] (exp. 2)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (exp. 2)	ε [%] (poli. 4)	$\bar{\varepsilon}$ [%] (poli. 4.)
125	138.980	119.150	-11.184	-0.558	4.6797	2.900
150	154.267	109.390	-2.8445		27.0730	
200	189.398	168.987	5.3011		15.5060	
300	294.660	333.722	1.7800		-11.2410	
400	406.267	390.334	-1.5668		2.4166	
500	467.478	429.001	6.5043		14.1997	
600	663.315	634.283	-10.552		-5.7139	
700	727.466	711.636	-3.9237		-1.6622	
800	802.226	800.900	-0.2783		-0.1125	
900	842.225	847.615	6.4194		5.8206	
1000	954.292	973.324	4.5708		2.6676	
1100	1120.990	1145.36	-1.908		-4.1240	
1200	1206.820	1227.39	-0.5683		-2.2827	
1300	1301.610	1313.35	-0.1235		-1.0268	
1400	1445.050	1435.22	-3.2182		-2.5155	
1500	1508.160	1486.03	-0.5438		0.9316	
1600	1557.800	1524.90	2.6376	4.6937		

Se constată erori relative reduse. Prin comparație cu celelalte experimente, în acest caz erorile sunt intermediare.

4.5.3. Concluzii

Experimentele desfășurate permit menționarea următoarelor concluzii:

- Elementele senzoriale în infraroșu sunt utilizabile cu succes în localizarea unor obstacole dintr-o scenă de lucru;
- Semnalele maxime ale elementului senzorial diferă în funcție de culoarea obiectului detectat. La distanța $d_0 = 125mm$ se obține valoarea maximă: $U_1 = 2553mV$ pentru obiect alb. La distanța $d_0 = 100mm$ se obține valoarea maximă $U_2 = 2472mV$ pentru obiect roșu și, respectiv, $U_3 = 2458.8mV$ pentru obiect verde;
- Erorile relative în procesul de aproximare a caracteristicii inverse recomandă forma de aproximare exponențială.

4.6. Concluzii finale

- La integrarea celor trei tipuri de senzori în sistemul de comandă al unui robot mobil trebuie să se țină cont de parametrii funcționali și de caracteristicile senzorilor.

- Senzorul ultrasonic Parallax Ping are o caracteristică liniară ce permite integrarea ușoară a acestuia. Fiind un senzor ultrasonic, distanța măsurată de acesta nu este influențată de culoarea obiectelor din mediu de lucru sau de lumină, dar

este ușor influențată de temperatură.

- La integrarea senzorului ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 trebuie să se țină cont de cele trei domenii ale caracteristicii. Implementarea acestui senzor în sistemul de comandă al unui robot mobil e o variantă posibilă. În experimentele ce vor fi prezentate în capitolul următor, vom folosi senzorul Parallax Ping datorită facilităților multiple.

- Integrarea senzorului infraroșu Sharp GP2Y0A02YK poate fi efectuată cu succes dacă se dorește determinarea distanțelor în intervalul [125; 1600]mm. Avantajul acestui tip de senzor este faptul că distanța măsurată nu este influențată de temperatura mediului. Un dezavantaj îl reprezintă culoarea obiectelor. Din această cauză dacă se dorește o determinare precisă a distanțelor obiectelor este recomandat integrarea și a unui senzor de culoare și fuziunea informațiilor.

- Prin determinarea ecuațiilor caracteristice și a concluziilor enunțate se consideră atins obiectivul acestui capitol. Caracteristicile elementelor senzoriale vor fi utilizate în capitolul următor conform planului de cercetare.

5. ANALIZA SPAȚIULUI DE LUCRU PE BAZA SENZORILOR ÎN INFRAROȘU ȘI CU ULTRASUNETE

Obiectivul prezentului capitol constă în verificarea experimentală a considerentelor teoretice privind utilizarea senzorilor Sharp GP2Y0A21YK și Parallax Ping în localizarea obiectelor în spațiul de lucru.

5.1. Senzorul infraroșu Sharp GP2Y0A21YK

5.1.1. Determinarea unghiului cu care este rotit un obiect dreptunghic.

5.1.1.1. Considerente teoretice

Experimentul a urmărit determinarea distanței până la 3 senzori IR. Obiectul cu dimensiunile $L = 700\text{mm}$ și $l = 250\text{mm}$ a fost plasat la o distanță de 500mm față de senzorul din mijloc [Stănescu, 2015e]. Obiectul a fost rotit cu 10, 20 și 30 grade în sens trigonometric și în sensul acelor de ceasornic. Senzorii au fost puși în linie dreaptă, distanța dintre senzorii externi și cel din mijloc este de 220mm. Pentru realizarea acestui experiment a fost dezvoltată schema electrică din figura 5.1.

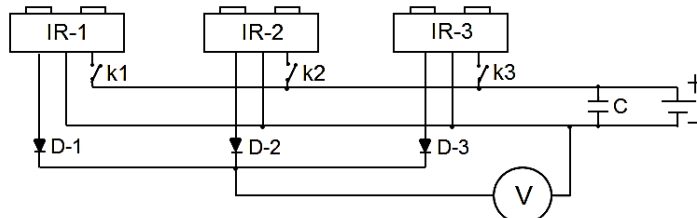


Figura 5.1. Schema electrică

Imagini cu standul experimental și obiectul plasat în scena de lucru pot fi văzute în figura 5.2.

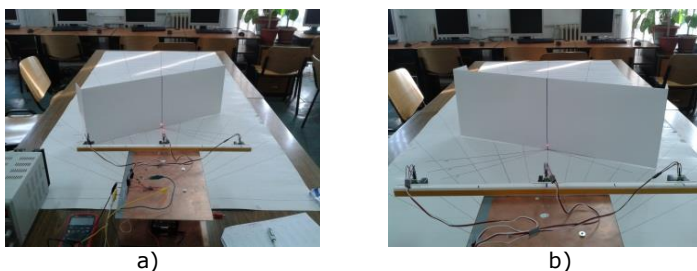


Figura 5.2. Standul experimental (a – obiect rotit la stânga; b – obiect rotit la dreapta)

Rezultatele în detaliu obținute se găsesc în Anexa 5.1. În tabelul 5.1. sunt trecute datele privind prelucrarea acestora.

Tabel 5.1. Rezultate prelucrate

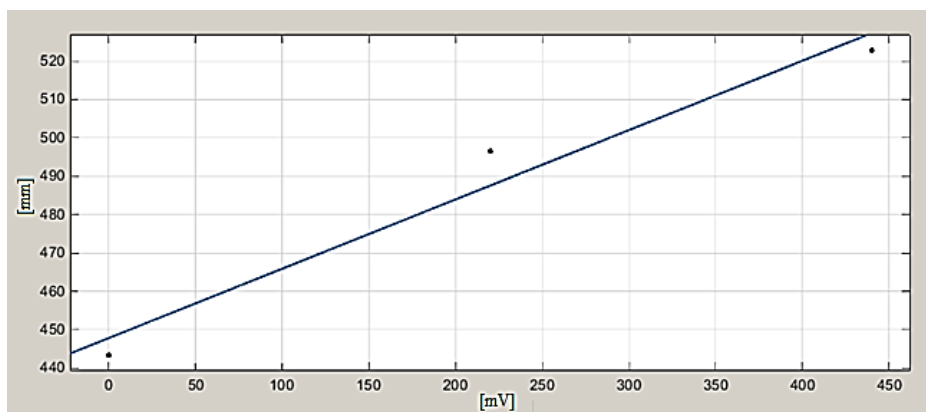
Unghiul	Obiect rotit în sens trigonometric			Obiect rotit în sensul acelor de ceasornic		
	Senzor stânga	Senzor mijloc	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor mijloc	Senzor dreapta
α [°]	U[mV]	U[mV]	U[mV]	U[mV]	U[mV]	U[mV]
10	1222.9	1130.7	1092.3	1085.7	1123.2	1224.6
20	1327.7	1134.7	1054.6	1028.7	1129.6	1307.8
30	1474.4	1139.2	1024.2	982	1116.6	1417.1

Valorile din tabelul 5.1. sunt prelucrate cu ecuația exponențială de gradul 2 (4.19.) din cap.4, corespunzătoare caracteristicii inverse a senzorului Sharp GP2Y0A02YK și sunt prezentate în tabelul 5.2.

Tabel 5.2. Distanța măsurată de cei trei senzori din prelucrarea datelor

Unghi	Obiect rotit în sens trigonometric			Obiect rotit în sensul acelor de ceasornic		
	Senzor stânga	Senzor mijloc	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor mijloc	Senzor dreapta
α [°]	U[mm]	U[mm]	U[mm]	U[mm]	U[mm]	U[mm]
10	443.31	496.52	522.83	527.65	501.44	442.44
20	395.45	493.94	551.64	573.39	497.23	403.72
30	343.22	491.06	577.35	617.34	505.85	362.01

Rezultatele prezentate în tabelul 5.2. au fost introduse în Matlab/Cftool pentru a obține ecuația polinomială de gradul 1 pentru fiecare caz în parte, figurile 5.3., 5.4., 5.5., 5.6., 5.7. și 5.8.

**Figura 5.3.** Fereastra de calcul, obiect rotit cu 10° în sens trigonometric

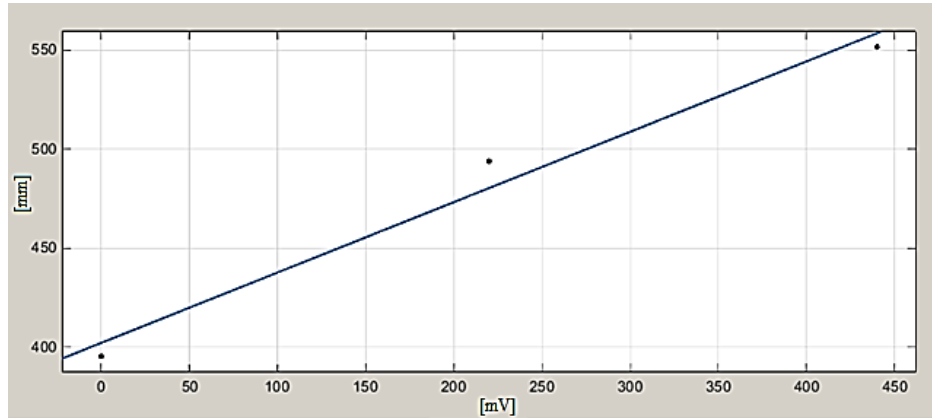


Figura 5.4. Fereastra de calcul, obiect rotit cu 20° în sens trigonometric

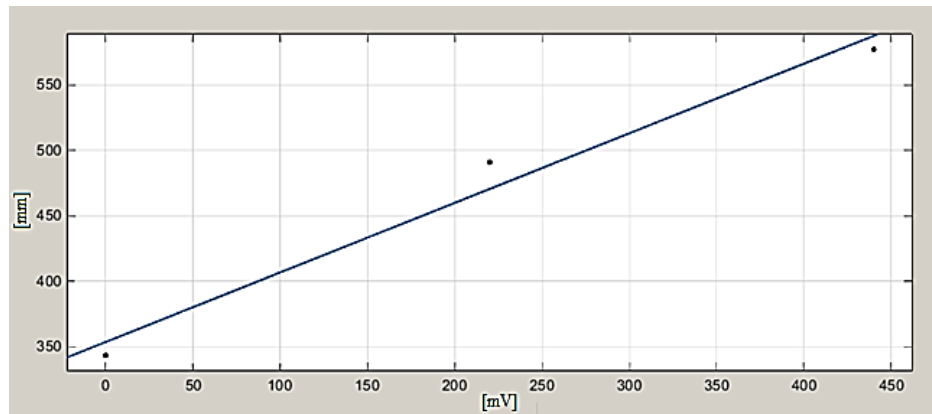


Figura 5.5. Fereastra de calcul, obiect rotit cu 30° în sens trigonometric

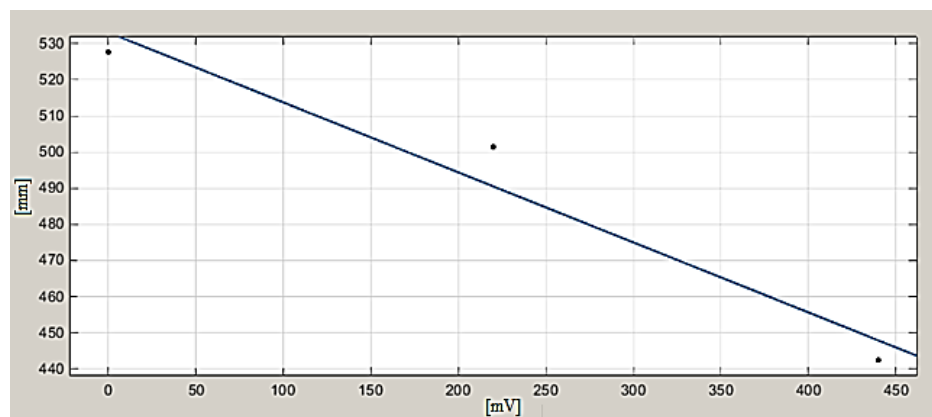


Figura 5.6. Fereastra de calcul, obiect rotit cu 10° în sensul acelor de ceasornic

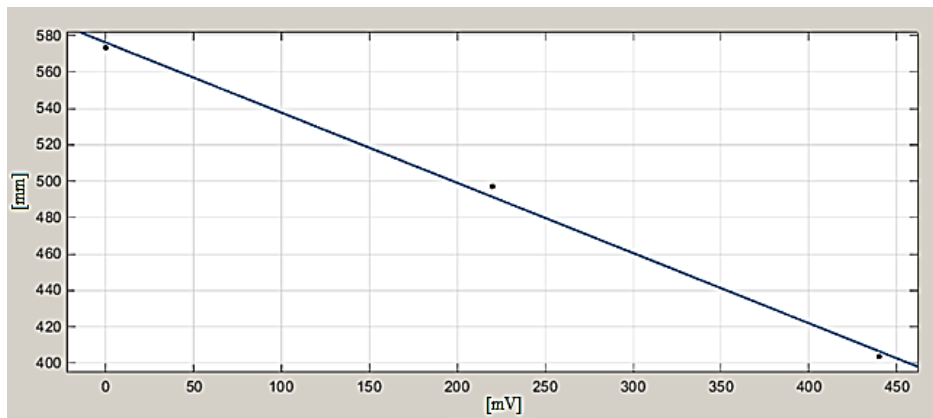


Figura 5.7. Fereastra de calcul, obiect rotit cu 20° în sensul acelor de ceasornic

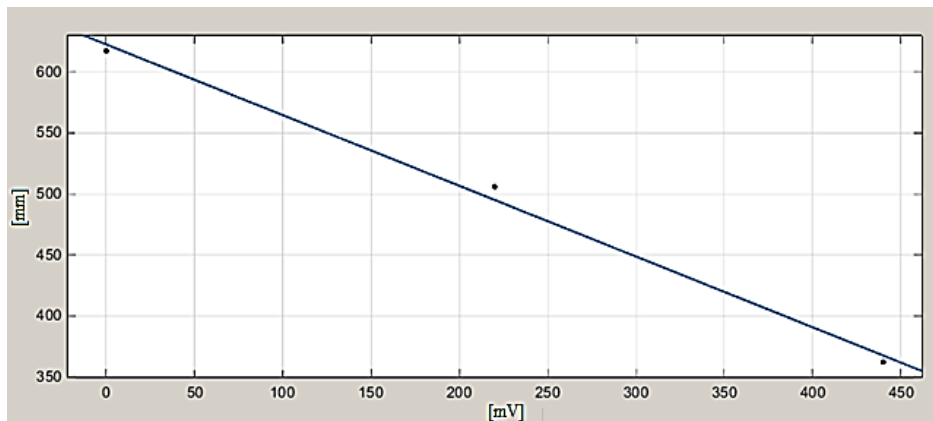


Figura 5.8. Fereastra de calcul, obiect rotit cu 30° în sensul acelor de ceasornic

Ecuțiile polinomiale de ordinul 1 obținute prin integrarea datelor în mediul de lucru Matlab sunt evidențiate în tabelul 5.3.

Tabel 5.3. Ecuțiile polinomiale pentru fiecare caz în parte

	Unghi [$^\circ$]	Ecuția matematică
Obiect rotit în sens trigonometric	10	$y = 0.1807 \cdot x + 447.8$ (5.1)
	20	$y = 0.355 \cdot x + 402.3$ (5.2)
	30	$y = 0.5321 \cdot x + 353.5$ (5.3)
Obiect rotit în sensul acelor de ceasornic	10	$y = -0.1936 \cdot x + 533.1$ (5.4)
	20	$y = -0.3856 \cdot x + 576.3$ (5.5)
	30	$y = -0.5803 \cdot x + 622.7$ (5.6)

Considerăm că obiectul este la 0° atunci când se află paralel cu axa ce unește cei trei senzori. Notarea unghiului de rotire a fost considerată pozitivă

indiferent dacă obiectul este rotit în sens trigonometric sau în sensul acelor de ceasornic cu specificarea sensului de rotire. Prelucrarea matematică a datelor obținute a condus la rezultatele prezentate în tabelul 5.4.

Tabel 5.4. Date obținute în urma prelucrării rezultatelor

Unghi	Obiect rotit în sens trigonometric		Obiect rotit în sensul acelor de ceasornic	
	$\tan \alpha'$	α'	$\tan \alpha'$	α'
10	0.1807	10.248	0.1936	10.962
20	0.355	19.554	0.3856	21.097
30	0.5321	28.031	0.5803	30.141

5.1.1.2. Concluzii

- Unghiul cu care a fost rotit obiectul în cazul experimentelor efectuate a putut fi determinat cu ajutorul senzorilor și a caracteristicii inverse.
- Diferența dintre unghiul cu care a fost rotit obiectul și unghiul determinat experimental cu senzorii IR este foarte mică.
- Determinarea unghiurilor de rotație a obiectelor prin metoda prezentată în această lucrare poate fi implementată cu succes în sistemul de comandă al unui robot mobil.

5.1.2. Determinarea distanței folosind trei senzori IR până la două obiecte cu formă dreptunghică plasate paralel.

Scopul acestei aplicații a fost determinarea distanței de la trei senzori IR Sharp plasați în linie la diferite distanțe unul față de altul până la două obiecte de formă dreptunghică. Obiectele au dimensiunile $L = 300mm$ și $l = 200mm$. Obiectele sunt paralele între ele și plasate la diferite distanțe față de senzori, figura 5.9.

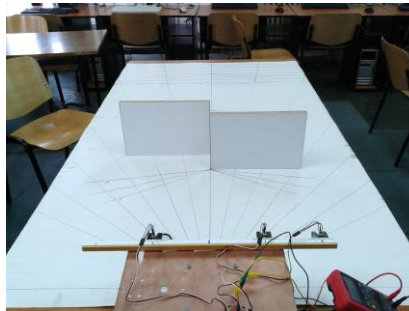


Figura 5.9. Obiectele plasate în scena de lucru.

S-au efectuat mai multe seturi de experimente; distanțele dintre senzori, dintre obiecte și dintre senzori și obiecte fiind evidențiate în fiecare caz în parte. Pentru o mai bună interpretare a datelor s-a folosit sistemul de axe XOY, distanțele aflate la stânga originii fiind notate cu semnul minus. Datele preluate de cei trei senzori pot fi consultate în Anexa 5.2.

5.1.2.1. Setul 1 de experimente

Pentru primul set de experimente senzorii și obiectele au fost plasați conform figurii 5.10.

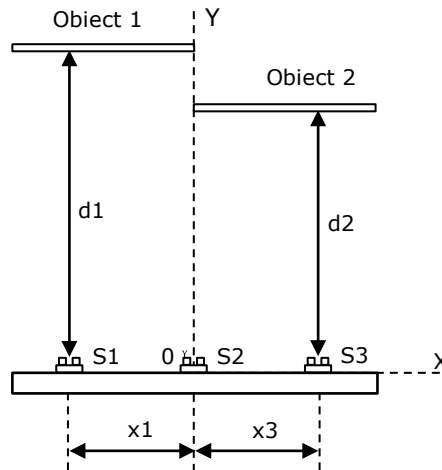


Figura 5.10. Schema standului experimental pentru primul set de experimente

Pentru acest set de experimente notațiile din figura 5.10. au următoarele valori, tabelul 5.5.

Tabel 5.5. Distanțe măsurate cu laserul pentru primul set de experimente

d1[mm]	d2[mm]	x1[mm]	x2[mm]
600	500	-110	110

Informațiile obținute de la fiecare senzor în parte au fost prelucrate și s-a putut obține distanța în milimetri folosind ecuația exponențială de gradul 2 a caracteristicii inverse (4.19.), tabelul 5.6.

Tabel 5.6. Rezultate prelucrate, primul set de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	1014.5	1019	1132.2
Distanță [mm]	586.07	581.99	495.55

5.1.2.2. Setul 2 de experimente

Pentru al doilea set de experimente s-a folosit tot standul experimental utilizat și în setul precedent de experimente, figura 5.10., diferența a constat în modificarea distanțelor senzori – obiecte, d1 și d2, conform tabelului 5.7.

Tabel 5.7. Distanțe măsurate cu laserul pentru al doilea set de experimente

d1[mm]	d2[mm]	x1[mm]	x2[mm]
800	700	-110	110

Și în acest caz, informațiile obținute de la fiecare senzor în parte au fost prelucrate și s-a putut obține distanța în milimetri folosind ecuația exponențială de gradul 2 a caracteristicii inverse (4.19.), tabelul 5.8.

Tabel 5.8. Rezultate prelucrate, setul 2 de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	843.3	834.3	907.3
Distanță [mm]	796.86	811.85	703.26

5.1.2.3. Setul 3 de experimente

Pentru al treilea set de experimente s-a folosit standul experimental prezentat schematic în figura 5.11.

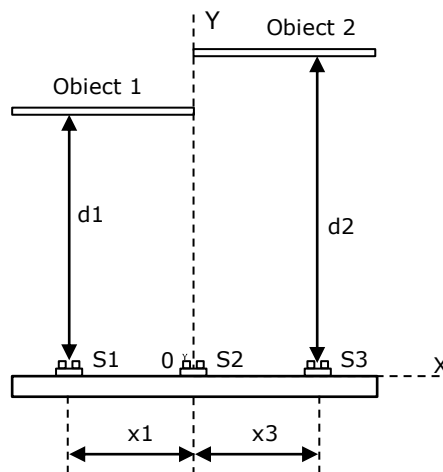


Figura 5.11. Schema standului experimental pentru cel de-al treilea set de experimente.

Pentru al treilea set de experimente, notațiile din figura 5.11. au următoarele valori, tabelul 5.9.

Tabel 5.9. Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 3 de experimente

d1[mm]	d2[mm]	x1[mm]	x2[mm]
500	600	-110	110

Prelucrarea datelor obținute de la senzori, folosind și ecuația exponențială (4.19) sunt evidențiate în tabelul 5.10.

Tabel 5.10. Rezultate prelucrate, setul 3 de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	1129.1	1139	990.3
Distanță [mm]	497.56	491.19	609.04

5.1.2.4. Setul 4 de experimente

Pentru efectuarea acestui set de experimente s-a utilizat standul experimental folosit și în setul al treilea, modificându-se distanțele d_1 și d_2 conform tabelului 5.11.

Tabel 5.11. Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 4 de experimente

d_1 [mm]	d_2 [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]
500	600	-110	110

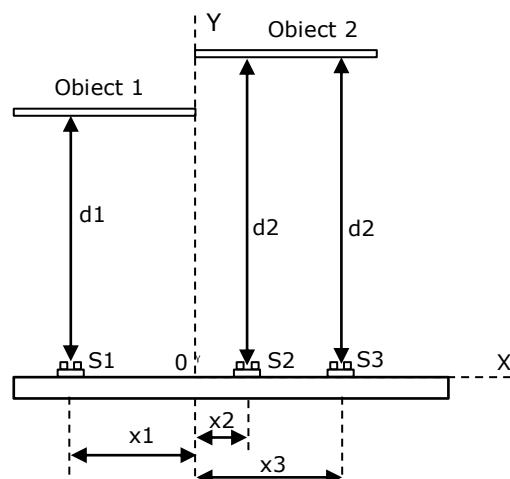
Prelucrarea datelor furnizate de senzori, media tensiunilor precum și determinarea distanțelor cu ecuația (4.19), sunt prezentate în tabelul 5.12.

Tabel 5.12. Rezultate prelucrate, setul 4 de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	906.4	900.6	836.7
Distanță [mm]	704.43	712.09	807.81

5.1.2.5. Setul 5 de experimente

Spre deosebire de primele patru seturi de experimente, în acest caz senzorul din mijloc nu se mai află în originea sistemului de coordonate XOY. Standul experimental este prezentat schematic în figura 5.12., iar distanțele măsurate cu laserul au următoarele valori, tabelul 5.13.

**Figura 5.12.** Schema standului experimental pentru setul 5 de experimente

Tabel 5.13. Distanțe măsurate cu laserul pentru setul 5 de experimente

d1[mm]	d2[mm]	x1[mm]	x2[mm]	x3[mm]
500	600	-110	110	220

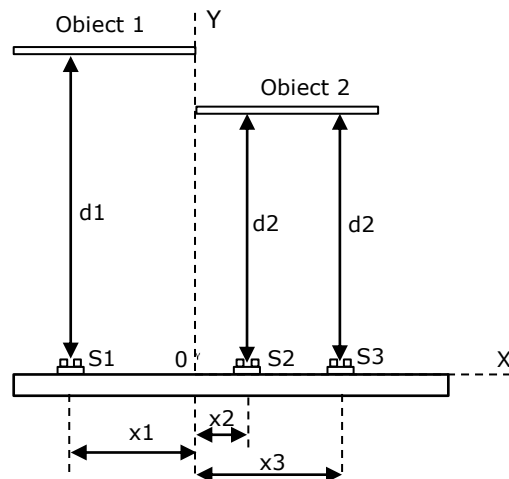
Prelucrarea datelor furnizate de senzori, media tensiunilor precum și determinarea distanțelor cu ecuația (4.19.) sunt prezentate în tabelul 5.14.

Tabel 5.14. Rezultate prelucrate, setul 5 de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	1132.9	966.6	988.3
Distanță [mm]	495.09	633.34	611.02

5.1.2.6. Setul 6 de experimente

Pentru efectuarea setului 6 de experimente, s-a creat standul experimental din figura 5.13.

**Figura 5.13.** Schema standului experimental pentru setul 6 de experimente

Distanțele preluate cu laserul sunt evidențiate în tabelul 5.15.

Tabel 5.15. Distanțele măsurate cu laserul pentru setul 6 de experimente

d1[mm]	d2[mm]	x1[mm]	x2[mm]	x3[mm]
600	500	-110	110	220

Prelucrarea informațiilor furnizate de senzori, media tensiunilor de ieșire ale senzorilor precum și distanța obținută prin ecuația (4.19.) sunt prezentate în tabelul 5.16.

Tabel 5.16. Rezultate prelucrate, setul 6 de experimente

Senzor	S1	S2	S3
Tensiune [mV]	992.5	1111.2	1119.2
Distanță [mm]	606.88	509.53	504.11

5.1.2.7. Concluzii

- ✓ Referitor la primele 4 seturi de experimente se pot afirma următoarele:
 - Dacă obiectul din stânga este mai aproape de senzori decât obiectul din dreapta, atunci senzorul din mijloc detectează obiectul din stânga.
 - Dacă obiectul din stânga este mai departe de senzori decât obiectul din dreapta, atunci senzorul din mijloc detectează tot obiectul din stânga.
- ✓ Referitor la experimentele din setul 5 și setul 6 se poate trage concluzia că senzorul din mijloc detectează obiectul care se afla în dreptul său. Există o oarecare influență a celui de-al doilea obiect, acesta reflectând o parte a radiației infraroșii către senzorul din mijloc, fapt ce conduce la detectarea unei distanțe mai mari decât este detectată de senzorul din dreapta.

5.1.3. Determinarea razei și a locului ocupat de un cilindru folosind un sistem senzorial în infraroșu.

5.1.3.1. Experiment A

Prin acest experiment s-a propus să se determine raza unui cilindru și a locului pe care îl ocupă acesta în spațiul de lucru folosind senzori Sharp GP2Y0A21YK.

Inițial s-au folosit trei senzori IR plasați în linie. În fața celor trei senzori a fost plasat un cilindru, figura 5.14.

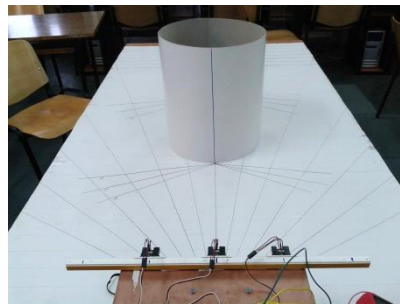


Figura 5.14. Standul experimental

Distanța dintre senzorii exteriori a fost luată de așa natură încât să fie mai mică decât diametrul cilindrului ($D = 310\text{mm}$), pentru ca unda luminoasă emisă de un senzor să se reflecte de pe suprafața cilindrului înapoi către senzorul respectiv. Teoretic, cunoscând cele trei puncte determinate de către cei trei senzori se poate calcula raza și determina poziția cilindrului în standul experimental. Rezultatele au condus la erori grosolane. Acestea au putut fi explicate în felul următor: Senzorul IR are un *Emițător* și un *Receptor* între care există o distanță. Linia care unește

Emițătorul cu *Receptorul* este paralelă cu planul standului experimental. Un senzor plasat la aceeași distanță stânga sau dreapta față de poziția centrală ofera informații diferite tocmai prin faptul că unghiul de reflexie este diferit în cele două cazuri, figura 5.15. De asemenea, există diferențe mici de măsurare și de la un senzor la altul, de același tip, folosit în aceleași condiții.

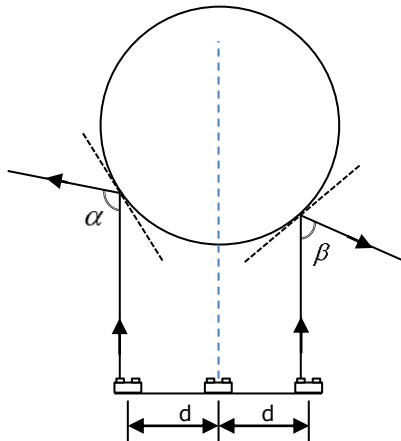


Figura 5.15. Schema principiului de funcționare

Pentru eliminarea acestor neajunsuri s-a creat un nou stand experimental, iar setul de experimente este prezentat în *Experiment B*.

5.1.3.2. Experiment B

În acest set de experimente s-a folosit un singur senzor, plasat în originea sistemului de coordonate. Senzorul a fost rotit în planul OZ cu 90° . Senzorul a fost atașat pe o șină astfel încât să poată fi deplasat pe axa OX la stânga sau la dreapta cu o anumită distanță. Imagini cu standul experimental pot fi văzute în figura 5.16.(a,b,c).

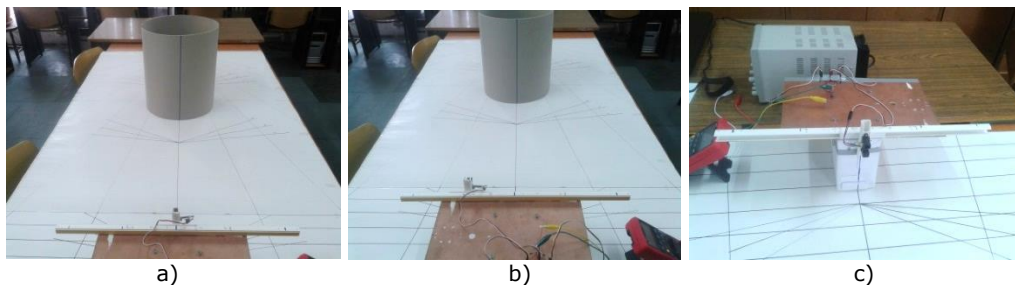


Figura 5.16. Imagini cu standul experimental (a –senzor plasat în mijloc; b – senzor plasat în stânga; c – imagine cu senzorul rotit 90° în axa OZ)

Cilindrul a fost plasat la distanțele 300mm , 500mm și, respectiv, 700mm față de senzor atunci când acesta se află în poziția de mijloc. Pentru fiecare distanță a cilindrului față de senzor s-au efectuat trei seturi de experimente: când senzorul este la mijlocul șinei, când este deplasat 100mm în stânga față de poziția de mijloc

și când este deplasat 100mm în dreapta față de poziția de mijloc. Informațiile preluate de către senzor pot fi consultate în Anexa 5.3. Schematic, principiul de lucru și standul experimental este prezentat în figura 5.17.

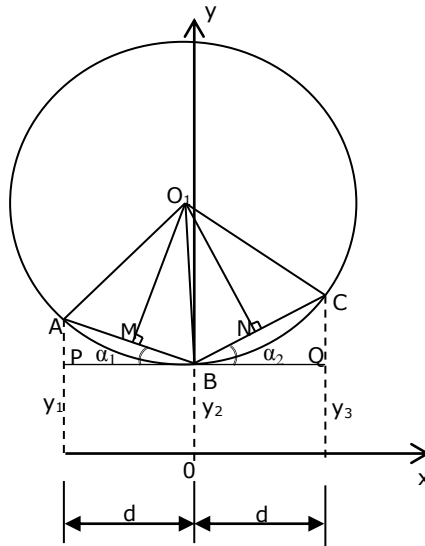


Figura 5.17. Schema standului experimental

Datele prelucrate, media tensiunilor de ieșire ale senzorului precum și distanța calculată cu ecuația exponențială (4.19.) se găsesc în tabelele 5.17., 5.18. și 5.19.

Tabel 5.17. Rezultate obținute pentru distanța $y = 300\text{mm}$.

y=300 [mm]	x [mm]	-100	0	100
	Tensiune [mV]	1553.7	1712.4	1571.4
	Distanță [mm]	319.87	280.10	315.02

Tabel 5.18. Rezultate obținute pentru distanța $y = 500\text{mm}$.

y=500 [mm]	x [mm]	-100	0	100
	Tensiune [mV]	1083.6	1121.5	1059.5
	Distanță [mm]	529.20	502.57	547.71

Tabel 5.19. Rezultate obținute pentru distanța $y = 700\text{mm}$.

y=700 [mm]	x [mm]	-100	0	100
	Tensiune [mV]	862.4	909.2	884.2
	Distanță [mm]	766.64	700.79	734.61

Coordonatele centrului cercului se calculează astfel:

- Două drepte se formează din două perechi de puncte. Prima (a) trece prin punctele A și B. Dreapta (b) trece prin următoarele două puncte, B și C.
- Ecuațiile celor două drepte sunt:

$$y_a = m_a(x - x_1) + y_1 \quad (5.7)$$

$$y_b = m_b(x - x_2) + y_2 \quad (5.8)$$

unde m este panta dreptei:

$$m_a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.9)$$

$$m_b = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \quad (5.10)$$

- Centrul cercului este intersecția dintre mediatoarele segmentelor AB și BC .
- Perpendiculara pe o dreaptă de pantă m are o pantă $-1/m$, astfel că ecuațiile mediatoarelor segmentelor AB și BC sunt:

$$y'_a = -\frac{1}{m_a} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (5.11)$$

$$y'_b = -\frac{1}{m_b} \left(x - \frac{x_2 + x_3}{2} \right) + \frac{y_2 + y_3}{2} \quad (5.12)$$

- Cele două drepte se intersectează în centrul cercului $O_1(x_c, y_c)$.

$$x_c = \frac{m_a m_b (y_1 - y_3) + m_b (x_1 + x_2) - m_b (x_2 + x_3)}{2(m_b - m_a)} \quad (5.13)$$

$$y_c = -\frac{1}{m_a} \left(x_c - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (5.14)$$

Cunoscând coordonatele centrului $O_1(x_c, y_c)$, raza cercului se calculează cu ecuația:

$$R = \sqrt{(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2} \quad (5.15)$$

După efectuarea calculului, s-au obținut următoarele valori, pentru fiecare caz în parte, prezentate în tabelul 5.20.

Tabel 5.20. Rezultate obținute

Distanța de referință Y [mm]	Coordonatele centrului cercului, $O_1(x_c, y_c)$		Raza cercului
	x_c [mm]	y_c [mm]	R [mm]
300	2.79	432.73	152.66
500	-11.34	661.04	158.87
700	12.49	828.61	128.43

Comparativ, în figura 5.18. sunt prezentate pozițiile centrelor fiecărui cerc (O_1) în parte față de axa OY și față de poziția centrului cercului real (O). Cercul real este reprezentat cu linie hașurată, iar cu linie continuă sunt reprezentate circumferințele cercurilor obținute în urma determinărilor. De asemenea, se observă și lungimea fiecărei raze determinate în parte comparativ cu raza reală, $R = 155\text{mm}$.

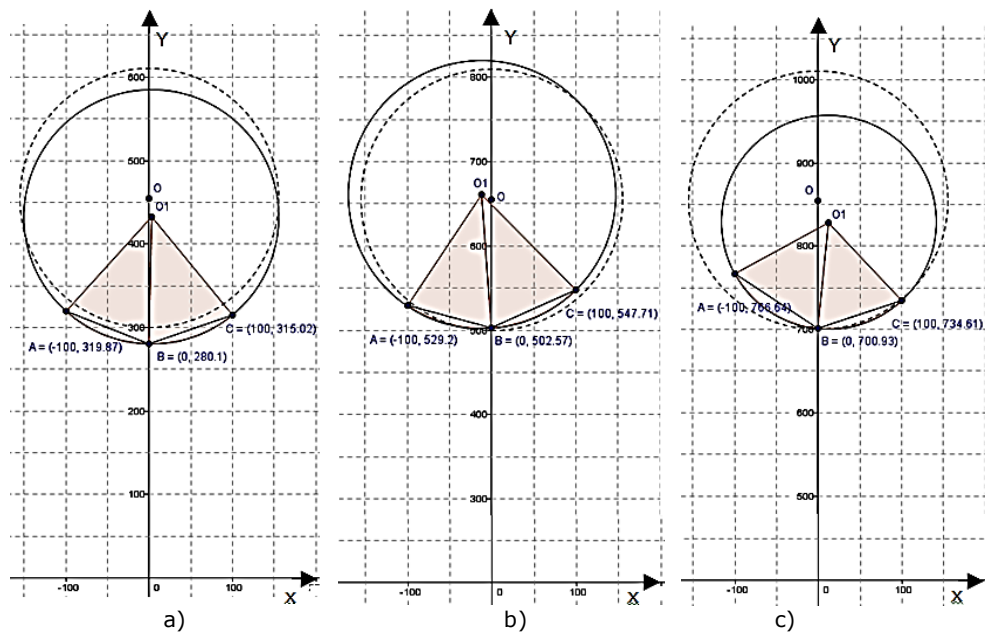


Figura 5.18. Locul geometric al centrului cercului pentru fiecare caz in parte ((a) $y = 300\text{mm}$; b) $y = 500\text{mm}$; c) $y = 700\text{mm}$)

5.1.3.3. Concluzii

În cadrul *Experimentului A* nu s-a putut determina centrul cercului și nici raza datorită unghiului de reflexie diferit al undei senzorilor exteriori.

În cadrul *Experimentului B*, în toate cele trei cazuri s-a determinat centrul cercului și raza. Rezultatele obținute la distanța $y = 300\text{mm}$ și $Y = 500\text{mm}$ confirmă faptul că raza cercului determinată este comparabilă cu raza reală ($R = 155\text{mm}$). La distanța $y = 700\text{mm}$, raza obținută a fost mai mică decât raza reală.

În experimentele efectuate s-au determinat doar trei puncte A, B, C în sistemul de axe XOY. Acest fapt conduce la concluzia că obiectul detectat poate fi un cilindru sau poate fi un corp având forma unui colțar. Ca o direcție de cercetare viitoare, se recomandă determinarea mai multor puncte pe segmente de dreaptă AB și BC, scopul fiind acela de a determina dacă AB și BC sunt arce de cerc sau segmente de dreaptă.

5.2. Senzorul ultrasonic Parallax Ping

5.2.1. Experiment cu baleiere cu un obiect cilindric

5.2.1.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor

Acest set de experimente a urmărit determinarea unghiului α sub care este emisă unda acustică a senzorului ultrasonic. Senzorul ultrasonic a fost montat pe un servomotor astfel încât să baleieze într-un arc de cerc de 180° din 5 în 5 grade. Schematic, acest lucru este prezentat în figura 5.19.

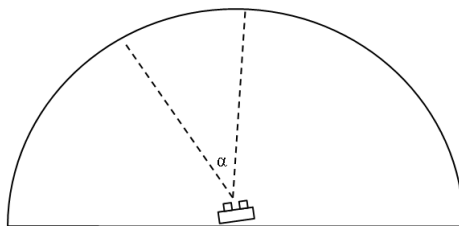


Figura 5.19. Mărimea unghiului sondei acustice

Pe standul experimental a fost plasat un obiect cilindric cu înălțimea $h = 610\text{mm}$ și diametrul $D = 80\text{mm}$ la o distanță $d = 1000\text{mm}$ față de senzor. Obiectul a fost poziționat la un unghi β de 45° , 90° și, respectiv, 135° față de axa OX, în vârful unghiului fiind senzorul ultrasonic, figura 5.20 (a,b,c).

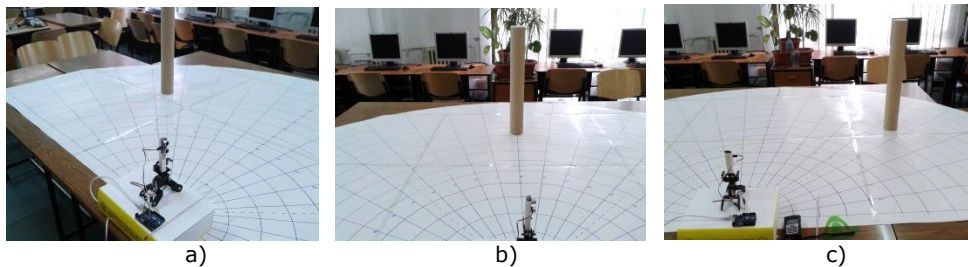


Figura 5.20. Imagini cu standul experimental (a – obiect plasat la $\beta = 45^\circ$; b – obiect plasat la $\beta = 90^\circ$; c – obiect plasat la 135°).

S-au efectuat 10 seturi de măsurători pentru fiecare unghi β în parte, rezultatele sunt trecute în Anexa 5.4.

În tabele 5.21., 5.22. și 5.23. sunt prezentate rezultatele când senzorul ultrasonic a detectat obiectul în funcție de poziționarea acestuia și de unghiul de rotație al servomotorului.

Tabel 5.21. Unghiuri la care obiectul este detectat

Unghiul de rotație servomotor	Obiect poziționat la $\beta = 45^\circ$									
	Unghiul la care obiectul a fost detectat pentru fiecare experiment în parte									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
35°	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
40°	X	X	x	X	x	X	x	X	X	x
45°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x
50°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
55°	X	X	X	X	X	X	X	X	x	X
60°	x	x	X	x	X	x	X	x	x	X
65°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x

Tabel 5.22. Unghiuri la care obiectul este detectat

Unghiul de rotație servomotor	Obiect poziționat la $\beta = 90^\circ$									
	Unghiul la care obiectul a fost detectat pentru fiecare experiment în parte									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
80°	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
85°	X	X	x	X	x	X	x	X	X	x
90°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x
95°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
100°	X	X	X	X	X	X	X	X	x	X
105°	x	x	X	x	X	x	X	x	x	X
110°	-	-	x	-	x	x	x	x	x	x

Tabel 5.23. Unghiuri la care obiectul este detectat

Unghiul de rotație servomotor	Obiect poziționat la $\beta = 135^\circ$									
	Unghiul la care obiectul a fost detectat pentru fiecare experiment în parte									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
120°	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
125°	X	X	x	X	x	X	x	X	X	x
130°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x
135°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
140°	X	X	X	X	X	X	X	X	x	X
145°	x	x	X	x	X	x	X	x	x	X
150°	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Pentru obiectul poziționat la $\beta = 45^\circ$, unghiul sub care este emisă unda acustică este:

$$\alpha = \frac{9 \cdot 25^{\circ} + 1 \cdot 30^{\circ}}{10} = 25.5^{\circ} \quad (5.16)$$

Pentru obiectul poziționat la $\beta = 90^{\circ}$, unghiul sub care este emisă unda acustică este:

$$\alpha = \frac{3 \cdot 25^{\circ} + 7 \cdot 30^{\circ}}{10} = 28.5^{\circ} \quad (5.17)$$

Pentru obiectul poziționat la $\beta = 135^{\circ}$, unghiul sub care este emisă unda acustică este:

$$\alpha = \frac{10 \cdot 30^{\circ}}{10} = 30^{\circ} \quad (5.18)$$

5.2.1.2. Concluzii

Unghiul sub care este emisă unda acustică nu are o valoare fixă. În cele trei seturi de experimente efectuate s-a constatat că unghiul ia valori între 25.5° și 30° .

5.2.2. Determinarea distanței până la un obiect cilindric.

5.2.2.1. Standul experimental și procedura de lucru

În cadrul acestui experiment s-a determinat distanța până la un obiect de formă cilindrică folosind senzorul ultrasonic Parallax Ping [Stănescu, 2015d]. Obiectul cilindric cu înălțimea $h = 610\text{mm}$ și diametrul $D = 80\text{mm}$ a fost plasat în scena de lucru la diferite distanțe. Distanța reală a fost măsurată, în prealabil, cu telemetrul cu laser. Rezultatele obținute pot fi consultate în Anexa 5.5. Imagini cu obiectul cilindric plasat în spațiul de lucru pot fi văzute în figura 5.21.

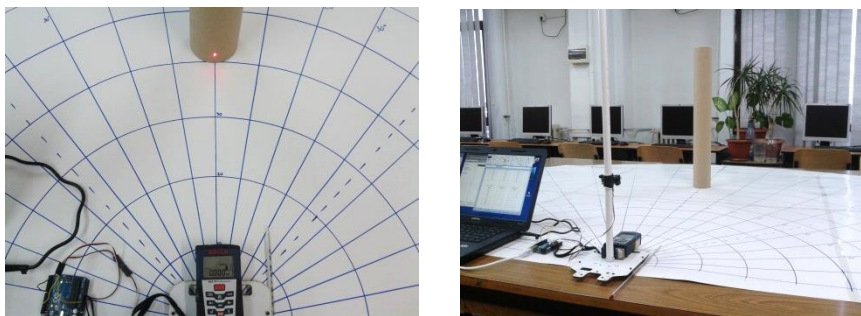


Figura 5.21. Imagini cu standul experimental

În procesul de analiză a datelor provenite din măsurătorile efectuate s-au calculat:

- Eroarea de măsurare:

$$\Delta d = d - d_m \quad [mm] \quad (5.19)$$

unde d este distanța de referință măsurată cu telemetrul laser, iar d_m este distanța obținută prin măsurare cu senzorul ultrasonic.

- Eroarea relativă:

$$\varepsilon = \frac{d - d_m}{d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.20)$$

- Eroarea relativă medie:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_i}{i} \quad [\%] \quad (5.21)$$

unde i reprezintă numărul de măsuratori.

Rezultatele prelucrate sunt trecute în tabelul 5.24.

Tabel 5.24. Rezultate prelucrate

Distanța reală	Media distanțelor măsurate	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
d	d_m	$d - d_m$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
100	99.4	0.6	0.60	-0.115
200	198.9	1.1	0.55	
300	301.2	-1.2	-0.40	
400	402.6	-2.6	-0.65	
500	501.0	-1.0	-0.20	
600	602.9	-2.9	-0.48	
700	702.0	-2	-0.28	
800	803.6	-3.6	-0.45	
900	902.9	-2.9	-0.32	
1000	1001.4	-1.4	-0.14	
1100	1101.0	-1.0	-0.09	
1200	1202.3	-2.3	-0.19	
1300	1296.9	3.1	0.23	
1400	1400.0	0	0	
1500	1498.5	1.5	0.10	

Reprezentarea grafică a erorilor în funcție de distanța de referință este ilustrată în figura 5.22.

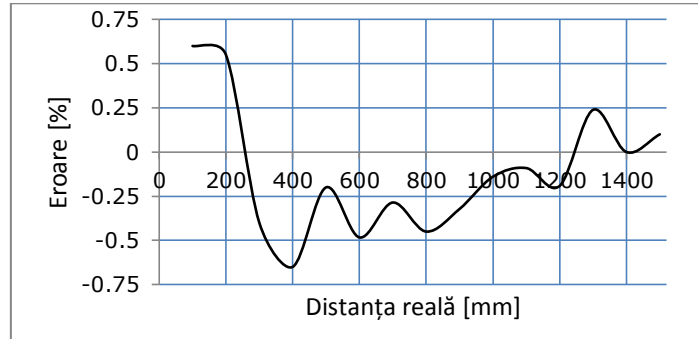


Figura 5.22. Reprezentarea erorilor în funcție de distanța de referință

5.2.2.2. Concluzii

În urma prelucrării rezultatelor se observă că senzorul Parallax Ping prezintă o precizie bună pentru obiectul cilindric situat perpendicular pe axa de direcție.

5.2.3. Obiect și senzor aflați la diferite distanțe față de suprafața caroiajului

5.2.3.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor

Experimentul a vizat măsurarea distanței cu senzorul ultrasonic până la un obiect de formă dreptunghică cu dimensiunile 287 x 58 [mm], plasat paralel cu suprafața caroiajului.

S-au realizat două seturi de experimente:

- În primul caz, distanța dintre senzor și obiect a fost $d = 1500\text{mm}$;
- În cazul al doilea, distanța dintre senzor și obiect a fost $d = 1000\text{mm}$.

În ambele cazuri, atât senzorul cât și obiectul au fost poziționate la o înălțime de 100mm, 200mm, ... , respectiv 900mm față de suprafața caroiajului. În figura 5.23. sunt prezentate imagini din timpul experimentelor.

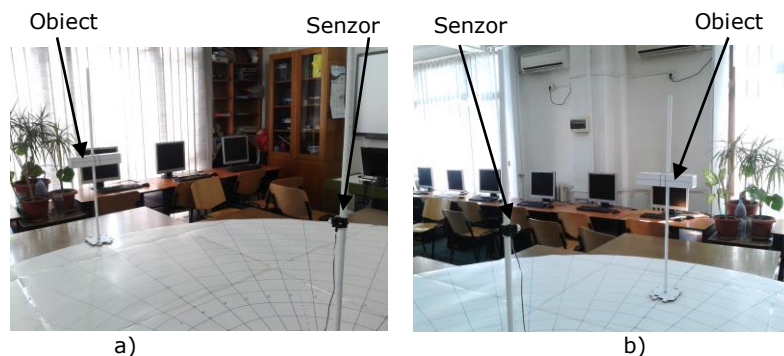


Figura 5.23. (a, b), Obiect și senzor plasați la diferite înălțimi în scena de lucru

Informațiile preluate de la senzorul ultrasonic pot fi consultate în Anexa 5.6. În tabelul 5.25. se găsesc datele prelucrate pentru distanța *senzor – obiect* $d = 1500\text{mm}$, iar tabelul 5.26. se găsesc datele prelucrate pentru distanța *senzor – obiect* $d = 1000\text{mm}$.

Tabel 5.25. Date prelucrate pentru $d = 1500\text{mm}$

Distanța reală $d = 1500\text{mm}$				
Inălțimea	Media distanțelor măsurate	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
h	dm	$d - dm$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
100	1491.8	8.2	0.54	0.70
200	1491.6	8.4	0.56	
300	1491.5	8.5	0.56	
400	1487.6	12.4	0.83	
500	1485.6	14.4	0.96	
600	1483.4	16.6	1.11	
700	1492.5	7.5	0.50	
800	1492.5	7.5	0.50	
900	1488.7	11.3	0.75	

Tabel 5.26. Date prelucrate pentru $d = 1000\text{mm}$

Distanța reală $d = 1000\text{mm}$				
Inălțimea	Media distanțelor măsurate	Eroarea de măsurare	Eroarea relativă	Eroarea relativă medie
h	d_m	$d - d_m$	ε	$\bar{\varepsilon}$
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
100	994.3	5.7	0.57	0.87
200	990.4	9.6	0.96	
300	993.2	6.8	0.68	
400	993.3	6.7	0.67	
500	992.2	7.8	0.78	
600	990.2	9.8	0.98	
700	989.1	10.9	1.10	
800	991.3	8.7	0.87	
900	988.4	11.6	1.17	

Reprezentarea grafică a erorilor relative în funcție de înălțimea sistemului *senzor – obiect* este prezentată în figurile 5.24. și 5.25.

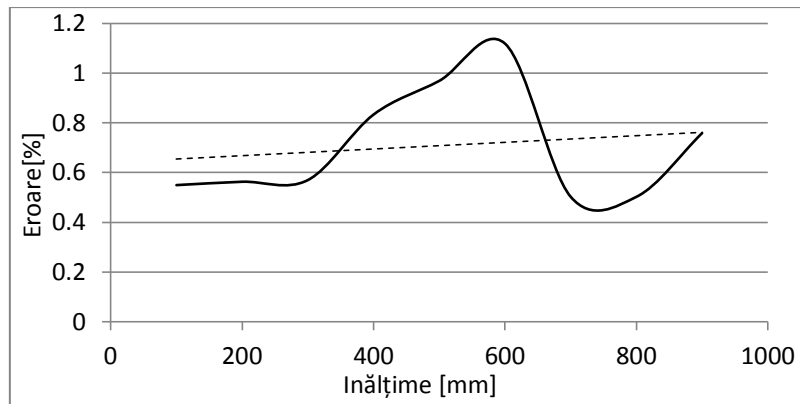


Figura 5.24. Reprezentarea erorilor în funcție de înălțime pentru distanța $d = 1500\text{mm}$

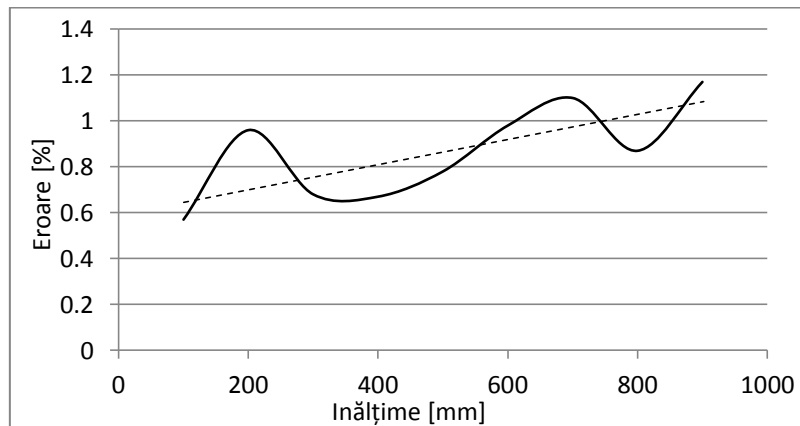


Figura 5.25. Reprezentarea erorilor în funcție de înălțime pentru distanța $d = 1000\text{mm}$

5.2.3.2. Concluzii

În urma experimentelor se poate afirma faptul că distanța determinată cu senzorul US nu este influențată semnificativ de înălțimea la care se află sistemul *senzor - obiect*. Numai în cel de-al doilea caz, când distanța $d = 1000\text{mm}$, se observă o ușoară creștere nesemnificativă a erorilor, o dată cu creșterea înălțimii. În altă ordine de idei, senzorul Parallax Ping poate fi montat pe un robot mobil, în funcție de modelul constructiv, oriunde la o înălțime cuprinsă în intervalul $[100, 900]\text{mm}$ față de sol fără să fie influențați parametrii funcționali ai senzorului ultrasonic.

5.2.4. Determinarea unghiului cu care este rotit un obiect de formă dreptunghică.

5.2.4.1. Standul experimental și efectuarea experimentelor

Experimentele au vizat determinarea unghiului cu care este rotit un obiect dreptunghic. Experimentele au constatat în determinarea distanței de la un sistem senzorial format din 2 senzori ultrasonici plasați la o distanță de 310 mm unul față de celălalt (figura 5.26.) și un obiect dreptunghic având $L = 710 \text{ mm}$ și $l = 250 \text{ mm}$.

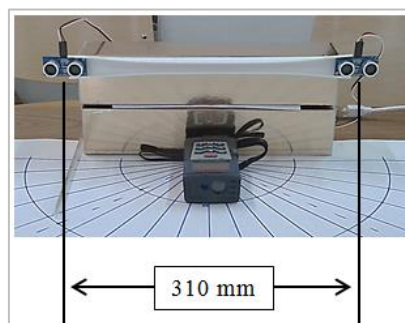


Figura 5.26. Sistemul senzorial plasat în scena de lucru

Obiectul este situat la 1200 mm față de sistemul senzorial. Obiectul a fost rotit cu 30, 20, și, respectiv, 10 grade în sens trigonometric și, respectiv, în sensul acelor de ceasornic. Schema de principiu este prezentată în figura 5.27. iar în figura 5.28. este prezentat standul experimental.

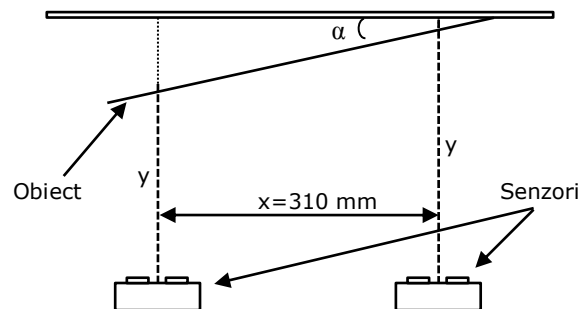


Figura 5.27. Schema de principiu

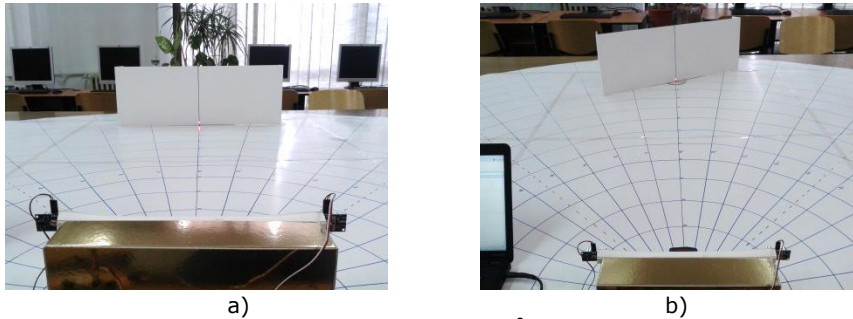


Figura 5.28. Standul experimental (a – obiect la 0° ; b – obiect rotit în sens trigonometric)

Informațiile preluate de către cei doi senzori pot fi consultate în Anexa 5.7., iar rezultatele prelucrate, media acestora, sunt prezentate în tabelul 5.27.

Tabel 5.27. Rezultate prelucrate

Unghiul de rotire	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]
0°	1181.2	1186.3
30° în sens trigonometric	Error	Error
30° în sensul acelor de ceasornic	Error	Error
20° în sens trigonometric	1122.1	1173.6
20° în sensul acelor de ceasornic	1174.2	1118.6
10° în sens trigonometric	1149.3	1198.3
10° în sensul acelor de ceasornic	1193.5	1152.9

Pentru a determina unghiul cu care este rotit obiectul, datele prezentate în tabelul 5.27. au fost introduse în mediul Excel. Graficul și ecuația dreptei pentru fiecare caz în parte sunt prezentate în figurile 5.29., 5.30., 5.31. și 5.32., unde axa OX reprezintă distanța dintre cei doi senzori: unul fiind poziționat în origine, iar celălalt la $x = 300\text{mm}$ față de origine. Axa OY reprezintă distanța senzor – obiect.

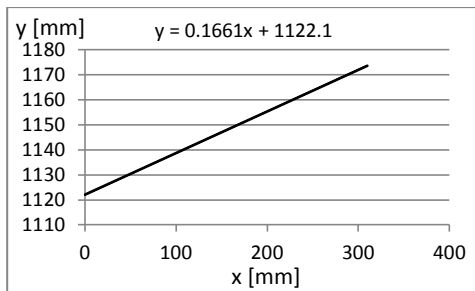


Figura 5.29. Obiect rotit 20° în sens trigonometric.

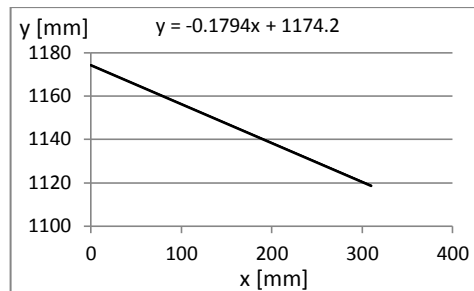


Figura 5.30. Obiect rotit 20° în sensul acelor de ceasornic.

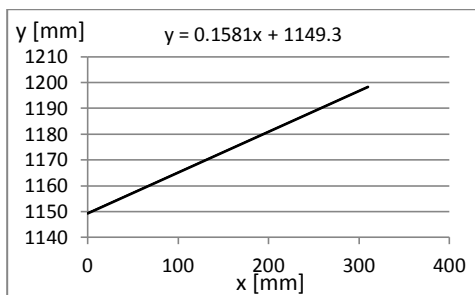


Figura 5.31. Obiect rotit 10° în sens trigonometric.

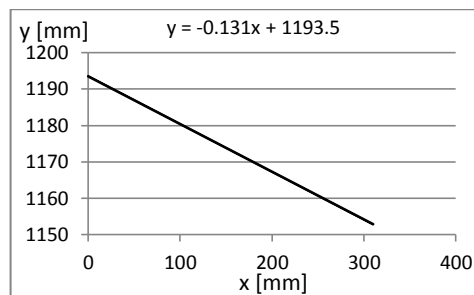


Figura 5.32. Obiect rotit 10° în sensul acelor de ceasornic.

Informații privind măsura unghiului care a rezultat din prelucrarea datelor, pentru fiecare caz în parte, sunt evidențiate în tabelul 5.28.

Tabel 5.28. Măsura unghiurilor rezultate din prelucrarea datelor

	Unghiul cu care a fost rotit obiectul [°]	tg α	α [°]
In sens trigonometric	20	0.1661	9.43
	10	0.1581	8.98
In sensul acelor de ceasornic	20	0.1794	10.17
	10	0.131	7.46

5.2.4.2. Concluzii

Atunci când obiectul a fost rotit cu 30°, sistemul senzorial nu l-a detectat. Când obiectul a fost rotit cu 20° și, respectiv, 10°, sistemul senzorial a detectat obiectul dar nu s-au putut obține informații referitoare la unghiul cu care a fost rotit. Prin comparație cu sistemul senzorial în IR folosit în experimentul din subcapitolul 5.1.1. unde am determinat unghiul de rotație, putem afirma că nu se poate folosi sistemul senzorial ultrasonic pentru a determina unghiul de rotație al unui obiect dreptunghic.

5.2.5. Determinarea distanței maxime "stânga - dreapta" privind poziționarea unui obiect pentru a nu ieși din sfera de detectare a senzorului ultrasonic

5.2.5.1. Considerente teoretice

Prin acest experiment s-a determinat distanța "x" stânga - dreapta față de poziția centrală până când obiectul este detectat de senzor, figura 5.33.

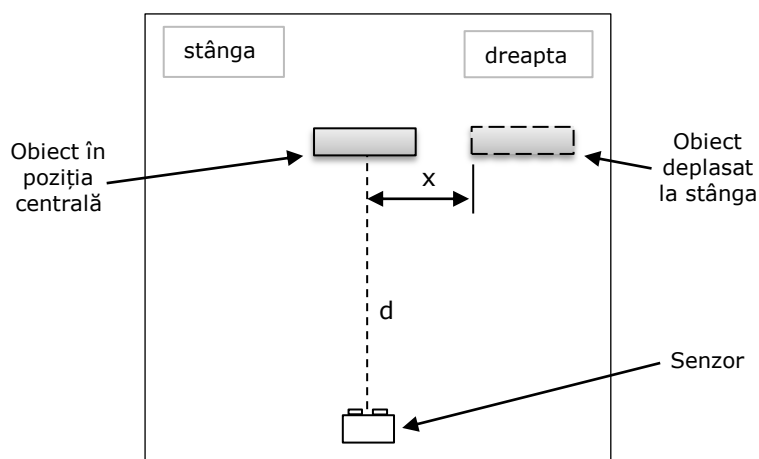


Figura 5.33. Poziționarea obiectului în standul experimental.

Imagini referitoare la standul experimental pot fi vazute în figura 5.34 (a,b,c).

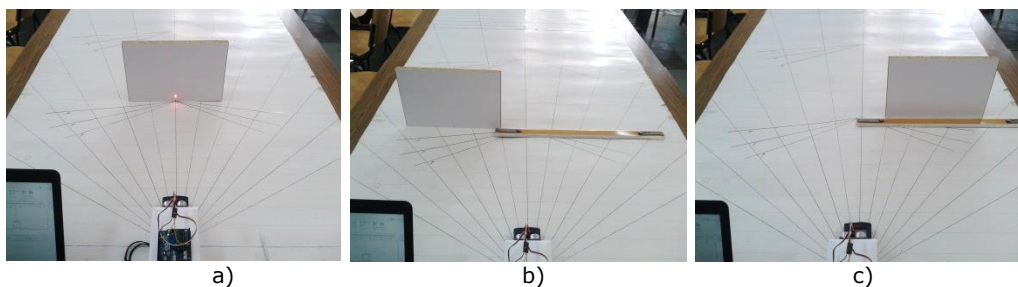


Figura 5.34. Standul experimental

(a – obiect centrat, b – obiect deplasat la stânga, c – obiect deplasat la dreapta).

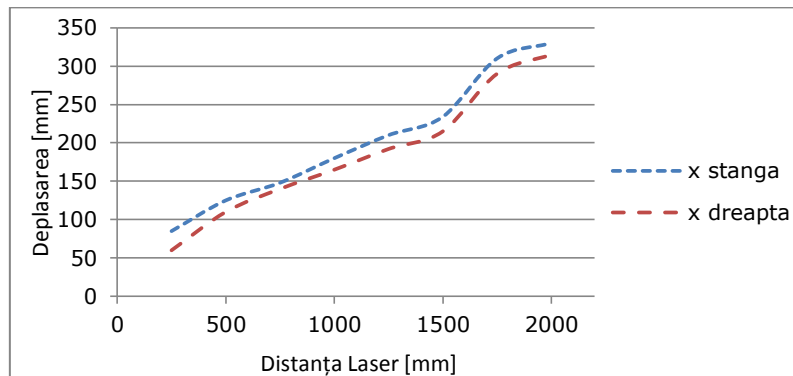
Procedura de lucru a fost următoarea: Obiectul cu dimensiunile $L=300\text{mm}$ și $l=200\text{mm}$ a fost, inițial, poziționat centrat și a fost măsurată distanța *senzor - obiect* cu telemetrul cu laser. Următoarea etapă a constat în deplasarea obiectului la stânga sau la dreapta până la limita de detectare a acestuia de către senzor. Atenție: deplasarea obiectului cu $2 - 3\text{ mm}$ mai mult conduce, automat, la ieșirea acestuia din sfera de influență a senzorului ultrasonic. Datele obținute de la senzor în timpul experimentelor pot fi consultate în Anexa 5.8.

Prelucrarea informațiilor preluate a condus la următoarele date prezentate în tabelul 5.29.

Tabel 5.29. Prelucrarea informațiilor preluate de senzor

Distanța de referință (laser) d [mm]	Distanța măsurată de senzor, obiect centrat d' [mm]	Distanța măsurată de senzor, obiect deplasat la stânga d_1 [mm]	Distanța măsurată de senzor, obiect deplasat la dreapta d_2 [mm]	Deplasarea obiectului la stânga x_1 [mm]	Deplasarea obiectului la dreapta x_2 [mm]
250	237.90	292.22	290.75	85	60
500	490.48	548.84	540.88	125	110
750	737.77	787.32	796.67	148	140
1000	987.39	1041.06	1039.17	180	165
1250	1234.96	1290.97	1284.2	210	192
1500	1481.54	1592.21	1585.94	234	215
1750	1727.63	1844	1802.83	310	290

Reprezentarea grafică a deplasării *stânga* - *dreapta* a obiectului în funcție de distanța măsurată cu laserul este prezentată în figura 5.35.

**Figura 5.35.** Reprezentarea deplasării *stânga* - *dreapta* în funcție de distanța reală

În continuare, s-a determinat distanța teoretică x' și unghiul α (figura 5.36.) cunoscând d = distanța laser și \bar{d} este distanța măsurată de senzorul Parallax Ping. Atenție: Distanța până la obiectul centrat luată în calcul a fost cea determinată cu laserul.

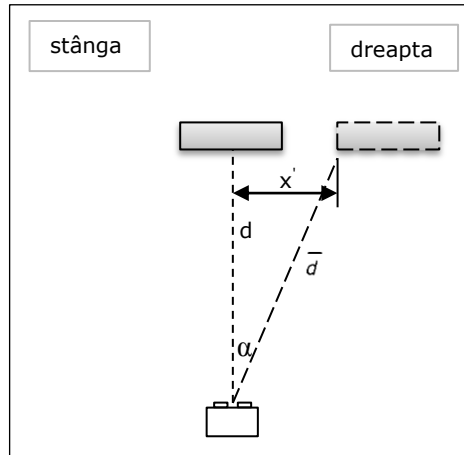


Figura 5.36. Poziționarea obiectului în standul experimental

Conform figurii precedente avem:

$$x' = \sqrt{\bar{d}^2 - d^2} \quad (5.22)$$

$$\cos \alpha = \frac{d}{\bar{d}} \quad (5.23)$$

Prelucrarea datelor experimentale a condus la următoarele rezultate, prezentate în tabelul 5.30.

Tabel 5.30. Prelucrarea rezultatelor.

Laser [mm]	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
\bar{d} (stânga) [mm]	292.2	548.8	787.3	1041.1	1290.9	1592.2	1844	2085.9
x (stânga) [mm]	85	125	148	180	210	234	310	330
x' (stânga) [mm]	151.3	226.3	239.5	289.5	322.6	534.0	581.2	592.5
α (stânga) [grade]	31.20	24.3	17.7	16.1	14.4	19.6	18.3	16.5
\bar{d} (dreapta) [mm]	290.7	540.8	796.6	1039.1	1284.2	1585.9	1802.8	2061.0
x (dreapta) [mm]	60	110	140	165	192	215	290	315
x' (dreapta) [mm]	148.4	206.2	268.6	282.6	294.3	514.9	433.2	498.0
α (dreapta) [grade]	30.7	22.4	19.7	15.7	13.2	18.9	13.9	13.9

5.2.5.2. Concluzii

În urma acestui set de experimente s-a putut determina până la ce distanță *stânga - dreapta* față de senzor se poate afla un obiect dreptunghic astfel încât acesta să fie detectat.

x' , distanța obținută în urma prelucrării datelor furnizate de senzor este mai mare decât distanța x cu care a fost deplasat obiectul la stânga sau la dreapta. O explicație plauzibilă constă în faptul că unda acustică nu este reflectată doar de muchia obiectului dreptunghic (până unde s-a măsurat deplasarea) ci și de o porțiune considerabilă a suprafeței dreptunghiului.

5.2.6. Experiment cu 2 senzori US și două obiecte plasate echidistant față de cei 2 senzori

5.2.6.1. Considerente teoretice

Experimentul a vizat măsurarea distanței folosind 2 senzori ultrasonici și două obiecte plasate în fața senzorilor. Distanța dintre senzori este $310mm$, la fel ca și distanța dintre obiecte. Această distanță a fost măsurată de la mijlocul primului senzor până la mijlocul celui de-al doilea senzor, respectiv, de la mijlocul primului obiect până la mijlocul celui de-al doilea obiect, figura 5.37.

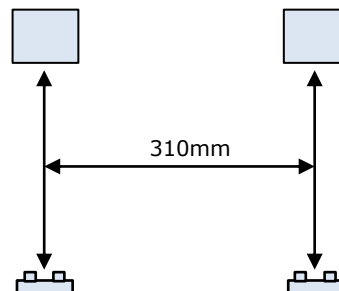


Figura 5.37. Aspecte privind amplasarea senzorilor ultrasonici și a obiectelor în spațiul de lucru.

Obiectele au formă dreptunghiulară cu $L = 287mm$ și $l = 58mm$. Distanța *senzori - obiecte* a fost măsurată astfel: de la senzorul din stânga la obiectul din stânga și de la senzorul din dreapta la obiectul din dreapta. Un alt set de experimente a fost cu un singur obiect plasat în dreptul unuia dintre cei doi senzori, măsurându-se distanța de la senzorul respectiv până la obiect. Experimentele au urmărit influența obiectului plasat în partea stângă asupra senzorului din dreapta și invers. Obiectele, respectiv obiectul, au fost plasate la diferite distanțe față de sistemul senzorial. În figura 5.38. sunt prezentate aspecte cu standul experimental.

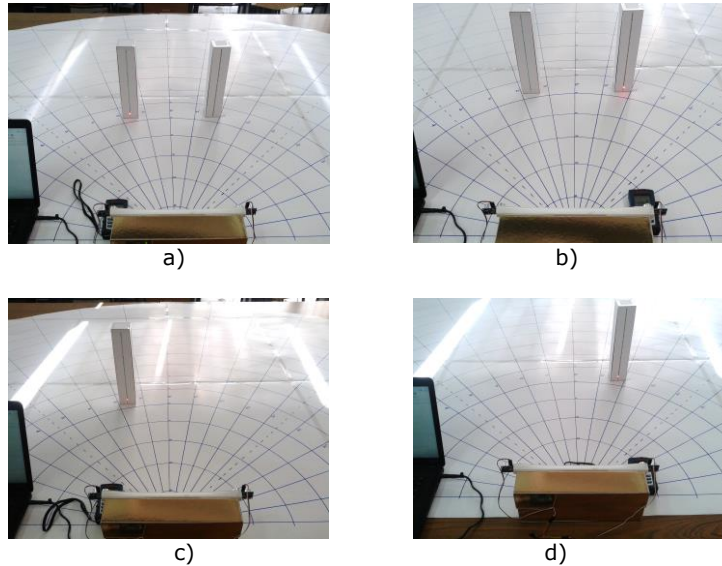


Figura 5.38. Standul experimental

(a – măsurarea distanței *senzor stânga – obiect stânga*,
 b – măsurarea distanței *senzor dreapta – obiect dreapta*,
 c – obiect plasat în dreptul senzorului din stânga,
 d – obiect plasat în dreptul senzorului din dreapta).

Datele furnizate de cei doi senzori pot fi consultate în Anexa 5.9. În tabelul 5.31. sunt prezentate rezultatele preluate.

Tabel 5.31. Rezultatele preluate

Distanța laser [mm]	2 obiecte		1 obiect stânga		1 obiect dreapta	
	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]
1500	1481.4	1488.3	1482.7	Error	Error	1487.9
1200	1177.4	1178.6	1177.2	Error	Error	1182.5
1000	982	980.4	984.2	Error	Error	979.4
500	490.4	490.9	491.1	Error	Error	492.6

5.2.6.2. Concluzii

În urma experimentelor se constată că obiectul plasat în dreptul unui senzor nu este detectat și de celălalt senzor.

5.2.7. Influența temperaturii asupra detectării obstacolelor

5.2.7.1. Considerente generale

Este cunoscut faptul că viteza sunetului este influențată de anumiți parametri ai mediului printre care și temperatura. Despre acest aspect s-a vorbit în Capitolul 2. Prin setul de experimente ce urmează să fie abordate, mi-am propus să evidențiez cum este influențată detectarea unui obstacol de către temperatura mediului și cum se pot corecta erorile de măsurare. Experimentele au urmărit achiziția informației de la sistemul senzorial, referitoare la prezența unui obstacol în zona cercetată, prelucrarea acesteia și interpretarea rezultatelor ținând cont de temperatura mediului ambiant [Stănescu, 2014c].

Obstacolul folosit a fost de formă dreptunghică cu $L = 300mm$ și $l = 200mm$ și a fost poziționat central pe axa Oy cu lungimea paralelă cu abscisa. În incinta unde s-au desfășurat experimentele nu au fost curenți de aer perturbatori iar temperatura a fost constantă. Temperatura a fost măsurată cu un termometru de uz didactic. Imagini cu aspecte din timpul efectuării experimentelor sunt prezentate în figura 5.39.

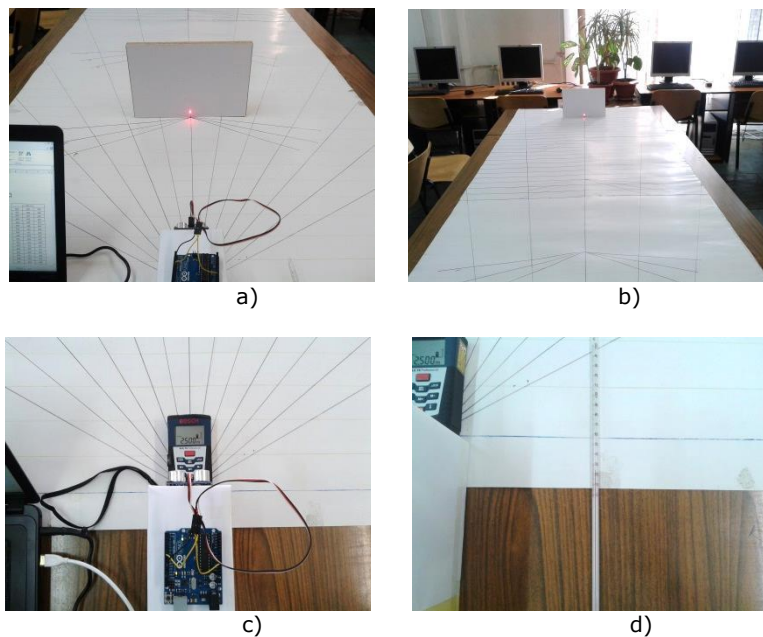


Figura 5.39. Aspecte din timpul experimentelor
 (a, b – obiect plasat în scena de lucru și măsurarea distanței, c – telemetru laser pentru măsurarea distanței de referință, d – termometru de uz didactic pentru măsurarea temperaturii mediului)

S-au efectuat două seturi de măsuratori: când temperatura mediului a fost $t=27^{\circ}C$ și când temperatura mediului a fost $t=24.5^{\circ}C$. Informațiile preluate de către senzor pot fi consultate în Anexa 5.10.

Schema standului experimental și a procesului de lucru este descrisă în figura 5.40., unde se pot vedea și liniile de program Arduino folosit în preluarea informațiilor.

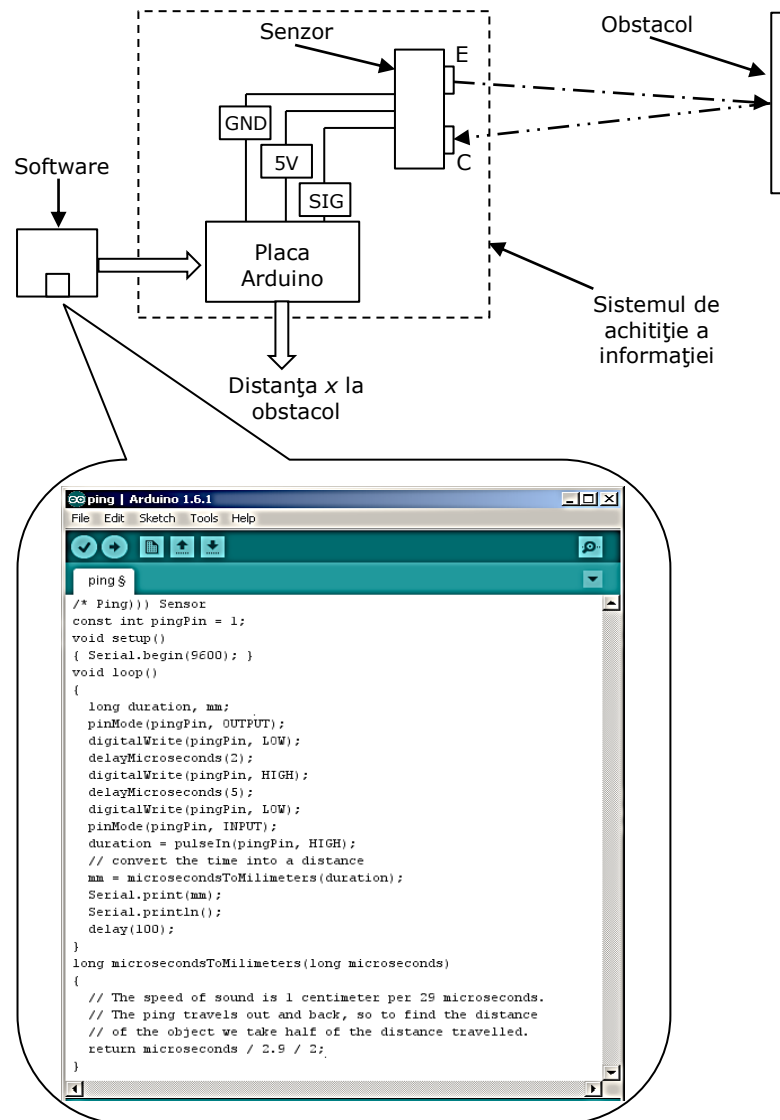


Figura 5.40. Schema standului și a procesului de lucru

Sistemul senzorial măsoară timpul parcurs de unda acustică dintre senzor și obstacol pentru a putea calcula distanța. Programul de lucru are o valoare presetată a vitezei sunetului, așa cum se poate observa și din figura precedentă, și anume 1centimetru per 29 microsecunde, și anume:

$$c_0 = \frac{10^{-2}}{29 \cdot 10^{-6}} = 344.8 \quad [m/s] \quad (5.24)$$

Plecând de la relația:

$$c = 331.5 + 0.6 \cdot t \quad [m/s] \quad (5.25)$$

s-a putut afla temperatura pentru care este setată valoarea vitezei sunetului pentru unda acustică a sistemului senzorial, și anume:

$$t = 22.17^{\circ}C \quad (5.26)$$

Pentru temperaturile la care s-au efectuat experimentele vitezele sunetului sunt:

$$c_{27} = 347.7 \quad [m/s] \quad (5.27)$$

și, respectiv:

$$c_{24.5} = 346.2 \quad [m/s] \quad (5.28)$$

Indicele de corecție în funcție de temperatura mediului se calculează cu relația:

$$k = \frac{c}{c_0} \quad [-] \quad (5.29)$$

unde: c = viteza sunetului la temperatura mediului respectiv;

c_0 = viteza sunetului presetată a programului de lucru.

Indicii de corecție astfel determinați au următoarele valori pentru temperatura de $27^{\circ}C$ și, respectiv, $24.5^{\circ}C$:

$$k_{27} = \frac{347.7}{344.8} = 1.0084 \quad [-] \quad (5.30)$$

$$k_{24.5} = \frac{346.2}{344.8} = 1.004 \quad [-] \quad (5.31)$$

Corecția distanței măsurată de senzorul ultrasonic s-a făcut înmulțind datele achiziționate de acesta la viteza presetată a acestuia cu indicele de corecție pentru temperatura la care s-au efectuat experimentele.

În tabelul 5.32. sunt prezentate datele experimentale prelucrate pentru cele două temperaturi, unde se poate vedea corelarea dintre distanța de referință măsurată cu telemetru laser, datele obținute cu sistemul senzorial ultrasonic și datele corectate cu ajutorul indicilor de corecție.

Tabel 5.32. Rezultate prelucrate

Distanța de referință x [mm]	2500	2000	1500	1000	500
Distanța măsurată de senzor la 27°C x_{27} [mm]	2461.75	1963.14	1475.89	981.48	488.40
Corecția distanței pentru 27°C x'_{27} [mm]	2482.42	1979.63	1488.28	989.72	492.50
Distanța măsurată de senzor la 24.5°C $x_{24.5}$ [mm]	2486.82	1978.72	1484.19	993.47	493.17
Corecția distanței pentru 24.5°C $x'_{24.5}$ [mm]	2496.76	1986.63	1490.12	997.44	495.14

Diferențele dintre distanța reală măsurată cu telemetrul laser și distanțele măsurate cu senzorul, respectiv, distanțele corelate cu indicii de corecție sunt prezentate în tabelul 5.33., unde:

x = distanța laser;

x_{27} = distanța măsurată de senzor la temperatura $t = 27^{\circ}\text{C}$;

x'_{27} = distanța corectată cu indicele de corecție corespunzător temperaturii $t = 27^{\circ}\text{C}$;

$x_{24.5}$ = distanța măsurată de senzor la temperatura $t = 24.5^{\circ}\text{C}$;

$x'_{24.5}$ = distanța corectată cu indicele de corecție corespunzător temperaturii $t = 24.5^{\circ}\text{C}$.

Tabel 5.33. Diferențe de distanțe măsurate

x [mm]	2500	2000	1500	1000	500
$x - x_{27}$ [mm]	38.25	36.86	24.11	18.52	11.6
$x - x'_{27}$ [mm]	17.58	20.37	11.72	10.28	7.5
$x - x_{24.5}$ [mm]	13.18	21.28	15.81	6.53	6.83
$x - x'_{24.5}$ [mm]	3.24	13.37	9.88	2.56	4.86

În figurile 5.41. și 5.42. sunt prezentate diferențele între distanța de referință măsurată cu telemetrul laser și distanțele măsurate cu senzorul ultrasonic precum și corecțiile acestora, pentru cele două temperaturi. Cu linia continuă este reprezentată diferența dintre distanța de referință și distanța determinată de senzor, iar cu linia discontinuă este reprezentată aceeași diferență de distanță după ce se aplică indicele de corecție.

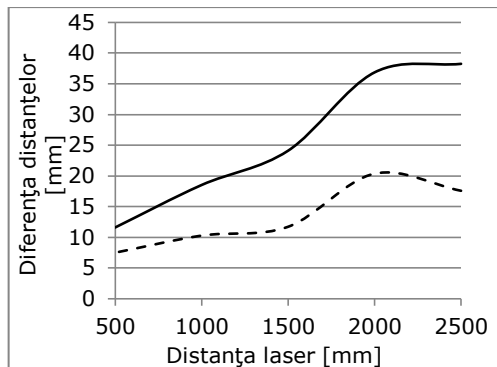


Figura 5.41. Diferența de distanță pentru $t=27^{\circ}\text{C}$

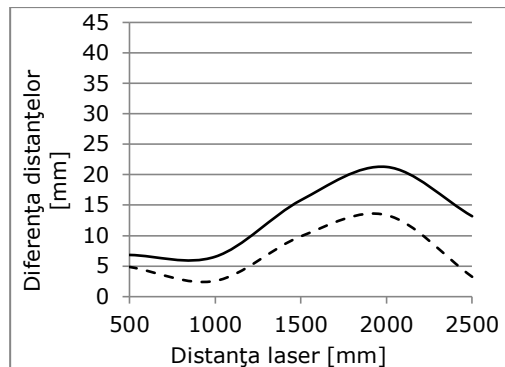


Figura 5.42. Diferența de distanță pentru $t=24.5^{\circ}\text{C}$

5.2.7.2. Concluzii

Pentru ambele seturi de experimente efectuate la cele două temperaturi s-a observat că distanța determinată cu ajutorul senzorului ultrasonic a fost întotdeauna mai mică decât distanța reală, cea determinată cu telemetrul laser. După aplicarea indicelui de corecție, valoarea distanței s-a apropiat mai mult de valoarea reală.

Integrarea unui senzor ultrasonic în structura unui robot mobil necesită și implementarea unei corecții a distanțelor măsurate în sistemul de comandă al robotului în funcție de temperatura mediului ambiant dacă se dorește o determinare cât mai precisă a distanțelor determinate.

5.2.8. Modificarea vitezei presetate în sistemul de comandă

5.2.8.1. Considerente generale

În cadrul acestui set de experimente s-a modificat în programul de lucru viteza sunetului cunoscând temperatura mediului. Standul experimental este cel folosit și la experimentele anterioare cu temperatura.

Pe tot parcursul experimentelor temperatura mediului ambiant a fost $t = 26^{\circ}\text{C}$. Într-o primă etapă, valoarea vitezei sunetului din programul de lucru nu a fost modificată ($c_0 = 344.8 \text{ m/s}$). Informațiile achiziționate astfel au fost comparate cu cele achiziționate când valoarea vitezei sunetului în programul de lucru a fost modificată corespunzător temperaturii $t = 26^{\circ}\text{C}$ și anume $c_1 = 347.1 \text{ m/s}$. Informațiile preluate de sistemul senzorial în cele două cazuri pot fi consultate în Anexa 5.11. Prelucrarea acestora este evidențiată în tabelul 5.34.

Tabel 5.34. Date prelucrate

Distanța de referință [mm]	2500	2000	1500	1000	500
Distanța măsurată de senzor la $c_0 = 344.8 \text{ m/s}$ [mm]	2463.49	1964.4	1474.67	982.4	489.8
Distanța măsurată de senzor la $c_1 = 347.1 \text{ m/s}$ [mm]	2481.79	1977.6	1483.94	989.27	493.36

Diferențele dintre distanța reală și cele măsurate de senzorul ultrasonic pentru cele două cazuri sunt prezentate în tabelul 5.35.

Tabel 5.35. Diferențele de distanță pentru $t=26^{\circ}\text{C}$.

Distanța de referință [mm]	2500	2000	1500	1000	500
Diferența de distanță pentru $c_0 = 344.8\text{m/s}$ [mm]	36.51	35.6	25.33	17.6	10.2
Diferența de distanță pentru $c_1 = 347.1\text{m/s}$ [mm]	18.21	22.4	16.06	10.73	6.64

În figura 5.43. sunt prezentate grafic diferențele între rezultatele celor două seturi de experimente. Linia continuă reprezintă diferența dintre distanța de referință și distanța măsurată cu senzorul pentru valoarea vitezei sunetului presetată $c_0 = 344.8\text{ m/s}$. Linia discontinuă reprezintă diferența dintre distanța de referință și distanța măsurată de senzor atunci când valoarea vitezei sunetului a fost modificată la $c_1 = 347.1\text{ m/s}$ corespunzătoare temperaturii mediului $t = 26^{\circ}\text{C}$.

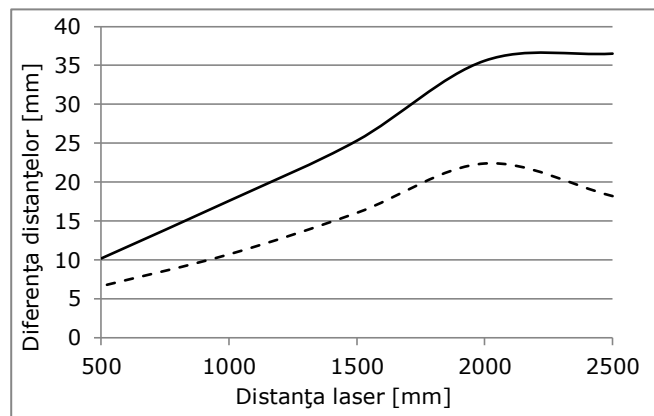


Figura 5.43. Diferența de distanță în funcție de valoarea vitezei sunetului

5.2.8.2. Concluzii

Se observă că dacă se modifică în programul de lucru valoarea vitezei sunetului în funcție de temperatura mediului, rezultate obținute tind să se apropie de valoarea reală a distanței măsurate.

5.3. Concluzii finale

În urma experimentelor se pot concluziona următoarele:

- Capitolul elaborat constituie un material aplicativ pentru modelele matematice constituite în capitolul anterior;
- Experimentele desfășurate au confirmat ipotezele teoretice admise. Se deschide, în plus, posibilitatea unei analize multisenzoriale;
- Rezultatele obținute în interpretarea lor conduc la considerentul că obiectivul capitolului a fost atins.

6. ANALIZA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A UNUI ROBOT MOBIL ÎN SCENA DE LUCRU

6.1. Generalități

ROBÓTICA (engl., fr.) s.f. – este un domeniu pluridisciplinar al științei și tehnicii care studiază proiectarea și tehnica construirii sistemelor mecanice, informatice sau mixte și a roboților, în scopul înlocuirii totale sau parțiale a omului în procesele tehnologice, în acțiunea asupra mediului înconjurător, etc [***2.1.]. Multe aspecte ale roboticii implică inteligența artificială: roboții pot fi echipați cu senzori echivalenți cu organele de simț ale omului, pentru vedere, pipăit, perceperea temperaturii. Unii roboți au capacitatea de a lua decizii simple, iar în prezent cercetările în domeniu sunt orientate spre obținerea de roboți cu un grad de autocontrol care să le permită mobilitatea și luarea de decizii într-un mediu necontrolat direct de către oameni.

6.2. Robotul mobil utilizat în experimente

6.2.1. Introducere

Obiectivul principal al acestui capitol constă în analiza teoretică și experimentală privind evoluția unui robot mobil într-un spațiu cu obstacole. Acest obiectiv este structurat operațional prin:

- a) identificarea elementelor componente ale sistemului prin prisma filozofiei mecatronice;
- b) identificarea parametrilor funcționali ai motorului integrat în subsistemul motric al robotului mobil;
- c) simularea funcționării subsistemului motric și compararea rezultatelor obținute cu cele experimentale;
- d) identificarea parametrilor funcționali ai subsistemului de direcție și analiza teoretică a funcționării acestuia;
- e) prezentarea modului de integrare a subsistemului senzorial în structura robotului și modul de conlucrare cu subsistemul de comandă al robotului;
- f) analiza experimentală a comportării robotului mobil în spațiu cu obstacol și compararea rezultatelor cu cele teoretice obținute în urma simulării în mediul Matlab / Simulink.

6.2.2. Structura robotului mobil

Robotul mobil este considerat ca fiind o structură formată din două sisteme: sistemul mecanic și sistemul de conducere. Pentru buna funcționare a robotului mobil, cele două sisteme trebuie să îndeplinească patru funcții [Bîtea, 2012]:

- a) Funcția de locomoție;
- b) Funcția de navigație;
- c) Funcția de percepție senzorială;
- d) Funcția de comunicare.

Funcția de locomoție este pusă în evidență de către sistemul locomotor al robotului mobil. Sistemul locomotor intră în contact direct cu mediul de lucru și este interconectat cu sistemul de comandă și control. Pentru robotul analizat, sistemul locomotor este unul cu roți, roata reprezentând cel mai popular mecanism de locomoție în domeniul roboticii mobile, având o pondere relativ ridicată a mobilității.

Funcția de navigație este esențială pentru robotul mobil. Această funcție este asigurată de sistemul de navigație cu care este echipat robotul mobil. În literatura de specialitate, funcția de navigație este definită ca funcția ce monitorizează și controlează locomoția unui sistem ce se deplasează dintr-un loc în altul [Dongheui, 2006]. Această funcție este strâns legată de funcția de locomoție. Pe baza datelor obținute de către sistemul de comandă și control, prin intermediul funcției de navigație, se realizează traiectoria pe care trebuie să se deplaseze robotul mobil. Funcția de navigație se referă la un proces de determinare și menținere a unei traiectorii către o destinație propusă [Bekey, 2005].

Funcția de percepție senzorială este funcția responsabilă cu obținerea datelor referitoare la mediul de lucru precum și a datelor interne despre sistemul robotizat [Dillman, 2007]. Acest lucru se realizează cu ajutorul unor dispozitive care asigură interacțiunea robot – mediu. În concept mecatronic, senzorii și traductoarele reprezintă dispozitive esențiale pentru funcția de percepție. Această funcție poate fi considerată ca și o funcție de măsurare; ea asigură măsurarea unor mărimi fizice din mediul de lucru sau din interiorul sistemului robot și convertirea acestora în semnal electric.

Funcția de comunicare reprezintă capacitatea de a transmite și a recepționa un mesaj. Roboții mobili trebuie să fie capabili să comunice, fie cu alți roboți, fie cu operatorul uman care îl controlează, pentru a transmite diferite informații referitoare la starea, poziția sau gradul de îndeplinire al unor sarcini. Sistemele de comunicații pot fi cu fir sau fără fir. În acest ultim caz, se folosesc tehnologii de transmisie a informației cum ar fi: unde radio, bluetooth, infraroșu, etc.

Robotul mobil utilizat în experimente este prezentat în figura 6.1.

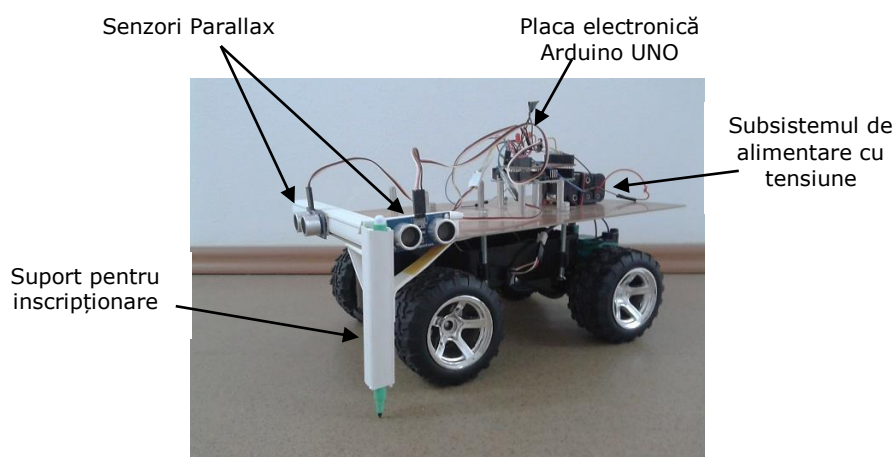


Figura 6.1. Robotul mobil utilizat în experimentele de laborator.

În conformitate cu cele prezentate anterior, pentru robotul mobil au fost identificate următoarele subsisteme:

- Subsistemul de locomoție alcătuit din: 2 roți motoare plasate în partea din spate a structurii, micromotorul de acționare cu transmisia intercalată și cuplată la cele 2 roți, mecanismul pentru direcție, micromotorul de antrenare a acestuia, 2 roți conectate la mecanismul de direcție plasate în partea din față;
- Subsistemul de comandă al robotului dezvoltat în jurul plăcii ARDUINO UNO și interfețele aferente [***6.1.];
- Subsistemul de alimentare general compus din 6 baterii de 1.5V tip AA;
- Subsistemul senzorial Parallax Ping [***6.2.];
- Suport pentru inscripționare.

6.2.3. Analiza teoretică și experimentală a motorului de acționare integrat în modulele robotului mobil

6.2.3.1. Caracteristici ale motorului de curent continuu utilizat

Robotul mobil utilizat în experimente este dotat cu două micromotoare identice: unul pentru tracțiune ce acționează roțile din spate ale robotului și unul pentru direcție ce acționează roțile din față.

Cele două micromotoare integrate în structura robotului mobil sunt motoare de curent continuu cu perii colectoare, rotor cilindric și excitație prin magnet permanent, figura 6.2.

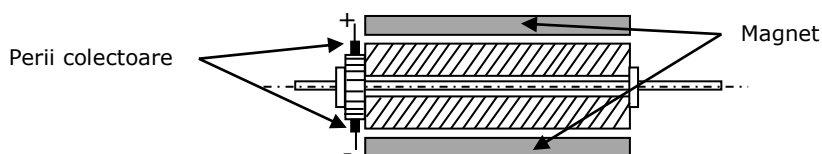


Figura 6.2. Schema de principiu a micromotorului electric.

Circuitul electric al micromotorului este prezentat în figura 6.3.

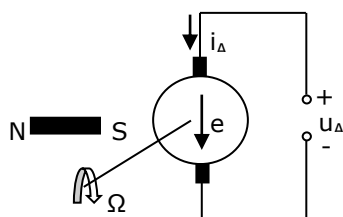


Figura 6.3. Circuitul electric al motorului electric.

Modelul matematic al micromotorului electric ia în considerare următoarele ipoteze:

- Circuitul magnetic al micromotorului este remanent și histereză;
- Reacția indusului este neglijată, și astfel, se admite că fluxul de excitație pentru motor este $\Phi = \text{constant}$;
- Căderea de tensiune la perii micromotorului este constantă, de valori reduse și se neglijează;

• Elementele sistemului de acționare se consideră rigide și se neglijează eventualele elasticități.

Modelul matematic al sistemului este descris de sistemul de ecuații:

- ecuația circuitului electric corespunzător micromotorului de c.c.:

$$u = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + e = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + K_e \cdot \Omega_R \quad (6.1)$$

unde:

- R_A – rezistența indusului;
- L_A – inductivitatea indusului;
- Ω_r – viteza unghiulară a rotorului;
- K_e – coeficientul t.e.m.

- ecuația de mișcare a rotorului:

$$J_r \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = m_m - \sum m_{ij} = K_m \cdot i_i - m_r - K_{fv} \cdot \Omega_r \quad (6.2)$$

unde: J_r – momentul de inerție al sistemului mecanic mobil redus la arborele rotorului; m_m – momentul motor; $m_m = K_m \cdot i_i$; K_m – constanta electrică a motorului; m_r – momentul rezistent redus la arborele motorului; K_{fv} – coeficientul frecărilor vâscoase.

Pentru regim de funcționare stabilizat, ecuația (6.1) se poate scrie sub forma [Maniu, 2003]:

$$U_A = R_A \cdot I_A + K_e \cdot \Omega \quad (6.3)$$

care după transformări devine:

$$\Omega = \frac{U_A}{K_e} - \frac{R_A}{K_e} \cdot I_A = \frac{U_A}{K_e} - \frac{R_A}{K_e^2} \cdot m_m \quad (6.4)$$

Ecuația anterioară corespunde pentru caracteristica statică motoare naturală a micromotorului (fig. 6.4.):

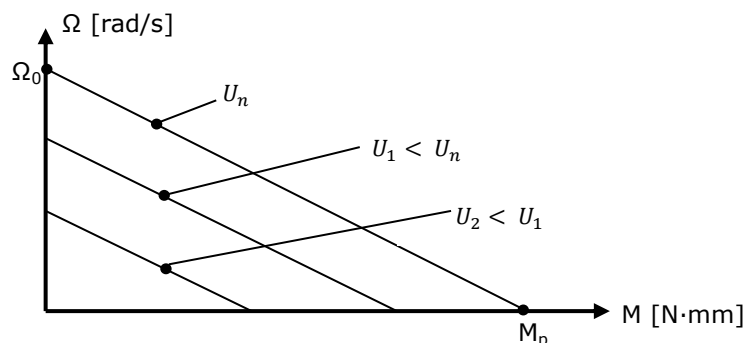


Figura 6.4. Caracteristica mecanică motoare naturală și caracteristici artificiale.

De remarcat pentru caracteristică sunt valorile care definesc viteza unghiulară de mers în gol Ω_0 și cuplul de pornire M_p :

$$\Omega_0 = \frac{U_{An}}{K_e} \quad (6.5)$$

$$M_p = \frac{K_e \cdot U_{An}}{R_A} \quad (6.6)$$

unde indicele "n" semnifică valoarea nominală. Caracteristicile mecanice motoare sunt drepte paralele.

Date tehnice privind caracteristicile micromotorului electric, conform <http://www.adafruit.com/product/711> sunt prezentate în tabelul 6.1.

Tabel 6.1. Caracteristicile micromotorului de curent continuu.

Temperatura de operare	-10°C ~ +60°C	
Tensiunea de operare	6V c.c.	
Curent, mers în gol	Max. 70mA	
Rotație, mers în gol	Min. 7300 rot/min	764.07 rad/s
	9100 rot/min	952.46 rad/s
	Max. 10900 rot/min	1140.87 rad/s
Curent, în sarcină	Max. 250mA	
Rotație, în sarcină	4500 ± 1500 rot/min	
Cuplu de pornire	2N·mm	
Tensiune de pornire	2V	
Curent motor blocat	Max. 500mA	
Dimensiuni motor	27.5mm x 20mm x 15mm	
Dimensiune ax rotor	Lungime = 8mm; Diametru = 2mm	
Masa	17.5g	

Din analiza parametrilor tabelului 6.1 se observă că acesta nu include toate valorile necesare construirii modelului matematic. În plus, unele valori sunt precizate prin intervale posibile. Astfel, viteza unghiulară este precizată prin valorile minim și maxim. Corespunzător acestor valori este prezentat intervalul admis pentru caracteristica mecanică motoare naturală corespunzătoare tensiunii nominale a micromotorului $U_n = 6V$. Pe baza valorilor și semnificațiilor din tabelul 6.1. se prezintă caracteristica mecanică a motorului de curent continuu în figura 6.5.

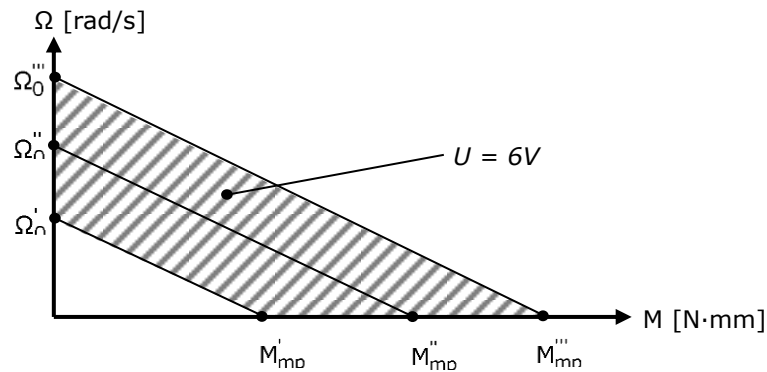


Figura 6.5. Caracteristica mecanică a motorului de c.c.
(Porțiunea hașurată corespunde tensiunii de alimentare $U = 6V$)

6.2.3.2. Determinări experimentale referitoare la funcționarea micromotorului la mers în gol

Modelul matematic al motorului de c.c. este prezent în bibliografia de specialitate [Ganesh, 2012], [Javier, 2010], [Zaccarian, 2012], [Tolgay, 2003], [Virgala, 2013], [Wei, 2012]. În general datele tehnice ale micromotoarelor nu prezintă în totalitate parametrii specifici motoarelor de curent continuu ce sunt necesari pentru simularea sistemului.

În documentația pentru micromotorul utilizat nu sunt oferite informații pentru coeficientul K_e , coeficientul frecărilor vâscoase și constanta de timp mecanică [***6.4.]. În aceste condiții este strict necesară identificarea parametrilor pe cale experimentală.

Analiza funcționării micromotorului la mers în gol, a cuprins și partea experimentală pentru determinarea turației micromotorului la diferite tensiuni U_A de alimentare. În acest scop, a fost realizat montajul experimental din figura 6.6. Motorul a fost conectat la o sursă de curent continuu, iar turația motorului a fost măsurată cu tahometrul digital DT2234A.

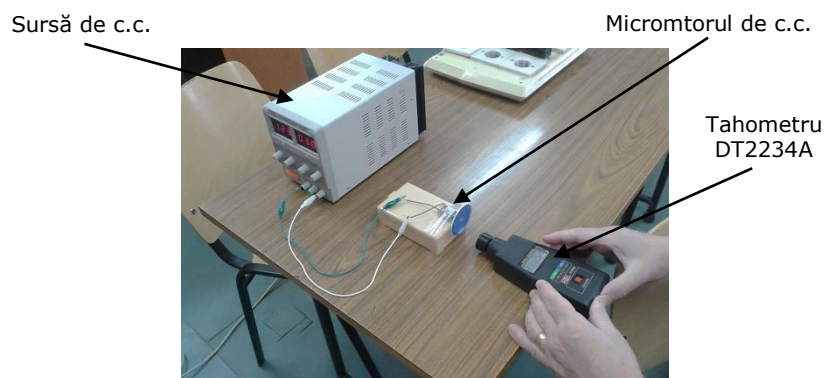


Figura 6.6. Montajul experimental realizat pentru măsurarea turației motorului în gol.

În timpul experimentelor a fost determinată și intensitatea curentului electric prin motor. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabel 6.2. Turația motorului la diferite tensiuni de alimentare.

U [V]	2	2.4	2.8	3	3.4	4	5	6
I [A]	0.033	0.035	0.036	0.037	0.039	0.041	0.044	0.049
Ω_0 [rad/s]	338.54	411.86	486.10	530.32	595.16	741.80	908.48	1115.01

În corespondență cu ecuația (6.5) și regimul de mers în gol, dependența $\Omega_0 = \Omega_0(U)$ reprezintă, teoretic, o dreaptă ce trece prin originea sistemului de axe iar coeficientul unghiular este definit de inversul valorii lui k_e . Dependența experimentală este prezentată în figura 6.7. Din analiza grafică obținută se poate consemna faptul că dependența poate fi descrisă prin ecuația unei drepte. Pe baza valorilor anterioare, prezentate în tabelul 6.2., se pot determina caracteristicile teoretice:

- a) Pe baza primei valori și a valorii finale:

$$\Omega_0 = 194.1165 \cdot U - 49.689 \quad [\text{rad/s}] \quad (6.7)$$

- b) Dreapta de cea mai bună aproximare:

$$\Omega_0 = 194.41 \cdot U - 54.102 \quad [\text{rad/s}] \quad (6.8)$$

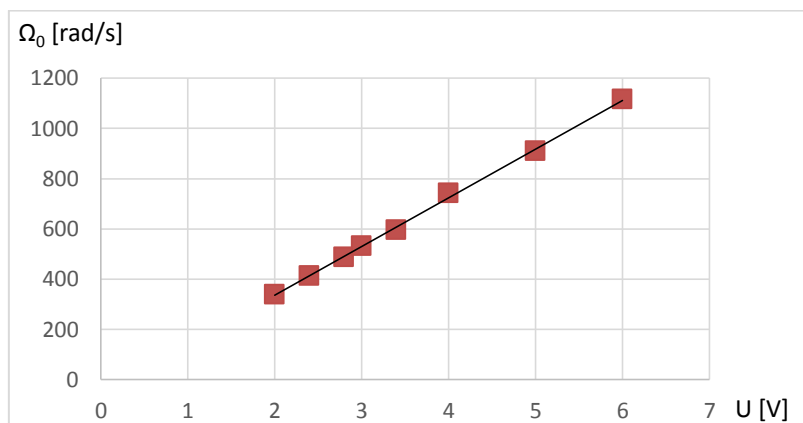


Figura 6.7. Caracteristica tensiune – turație la mersul în gol.

Determinările experimentale anterioare (ecuația dreptei 6.8) permit estimarea coeficientului K_e :

$$K_e = \frac{1}{194.41} = 0.00514 \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \right] \quad (6.9)$$

Pentru funcționare stabilizată a m.c.c a fost precizată relația (6.3) care poate fi rescrisă pentru determinarea tensiunii electromotoare, E:

$$E = U - I \cdot R = K_e \cdot \Omega \quad [V] \quad (6.10)$$

Valorile calculate ale tensiunii E și ale coeficientului Ke sunt prezentate în tabelul 6.3.

Tabel 6.3. Tensiunea electromotoare și coeficientul Ke

U [V]	2	2.4	2.8	3	3.4	4	5	6
I [A]	0.033	0.035	0.036	0.037	0.039	0.041	0.044	0.049
Ω_0 [rad/s]	338.54	411.86	486.09	530.32	595.16	741.80	908.48	1115.01
E [V]	1.5413	1.9135	2.2996	2.4857	2.8579	3.4301	4.3884	5.3189
$K_e \left[\frac{mV}{rad/s} \right]$	4.55	4.64	4.73	4.68	4.80	4.62	4.83	4.77

Pe baza acestor valori se poate reprezenta dependența $E = E(\Omega)$, figura 6.8.

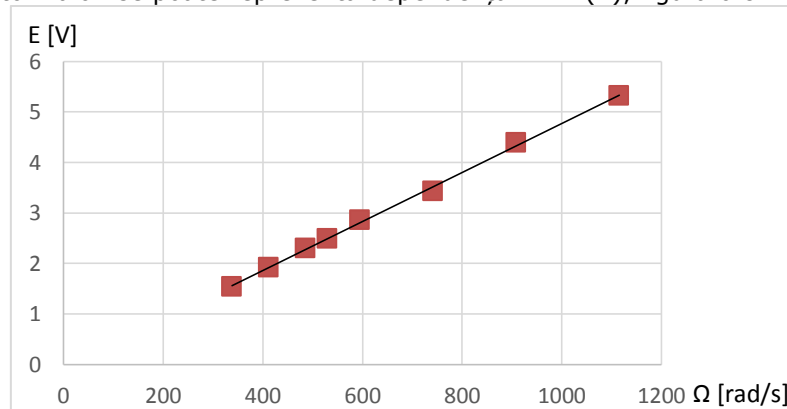


Figura 6.8. Dependența tensiunii electromotoare față viteza unghiulară.

Utilizând valorile achiziționate (tabelul 6.3.) și mediul de lucru Excel se poate determina dreapta de cea mai bună aproximare:

$$E = 0.0049 \cdot \Omega - 0.0865 \quad [V] \quad (6.11)$$

Dreapta trasată pe baza valorilor punctului inițial și respectiv final este:

$$E = 0.004865 \cdot \Omega - 0.106 \quad [V] \quad (6.12)$$

Din cele două relații (6.11.) și (6.12) se observă două valori apropiate ale coeficientului K_e . Am admis, în continuare, coeficientul:

$$K_e = 4.865 \cdot 10^{-3} \quad [V \cdot s / rad] \quad (6.13)$$

În 6.2.3.1 a fost precizată ecuația de mișcare pentru micromotorul de c.c. (ec. 6.2). Pentru mersul în gol ecuația se poate rescrie sub forma:

$$J_r \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = M_m - \sum M_{rj} = K_M \cdot i_j - M_{fr,s} - K_{fv} \cdot \Omega_r \quad (6.14)$$

unde: J_r - momentul de inerție al sistemului mecanic mobil redus la arborele rotorului; M_m - momentul motor; $M_m = K_m \cdot i_j$; K_m - constanta electrică a motorului; $M_{fr,s}$ - momentul frecărilor statice; K_{fv} - coeficientul frecărilor vâscoase.

La funcționarea în regim stabilizat ecuația anterioară devine:

$$0 = \sum K_M \cdot i_j - M_{fr,s} - K_{fv} \cdot \Omega_r \quad (6.15)$$

sau

$$M_m = \sum M_{fr} = K_{fv} \cdot \Omega + M_{fr,s} \quad (6.16)$$

Determinările experimentale prezentate anterior permit estimarea frecărilor statice și respectiv a celor vâscoase pentru micromotorul de c.c. utilizat în construcția robotului mobil.

În literatura de specialitate se abordează problematica procesului de frecare în general și, respectiv, în cazul micromotoarelor de c.c. [Ganesh, 2012], [Javier, 2010], [Zaccarian, 2012], [Virgala, 2013].

În tabelul 6.4. sunt prezentate valorile calculate pentru momentul motor.

Tabel 6.4. Valorile calculate pentru momentul motor

I [A]	0.033	0.035	0.036	0.037	0.039	0.041	0.044	0.049
Ω [rad/s]	338.54	411.86	486.10	530.32	595.16	741.80	908.48	1115.01
M_m [N·mm]	0.161	0.17	0.175	0.18	0.19	0.199	0.214	0.238

Pe baza valorilor din tabelul 6.4. se poate realiza dependența grafică $M_{fr} = M_{fr}(\Omega)$. În cadrul figurii 6.9. este ilustrată semnificația componentei de frecare uscată și a componentei de frecare vâscoasă.

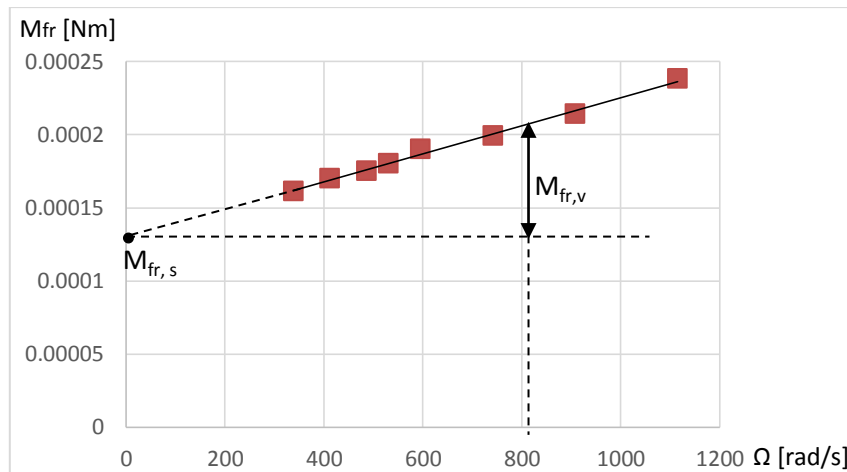


Figura 6.9. Semnificația componentei de frecare uscată și a componentei de frecare vâscoasă.

Pe baza valorilor calculate se poate determina (mediul Excel) ecuația dependenței $M_{fr} = M_{fr}(\Omega)$:

- Dreapta de cea mai bună aproximare:

$$M_{fr} = 10^{-7} \cdot \Omega + 0.0001 \quad [N \cdot m] \quad (6.17)$$

- Dreapta trasată pe baza valorilor punctului inițial și respectiv final:

$$M_{fr} = 10^{-7} \cdot \Omega + 0.127 \cdot 10^{-3} \quad [N \cdot m] \quad (6.18)$$

Din ecuația anterioară în concordanță cu relația (6.16) se pot separa cele două componente ale frecărilor:

$$M_{fr,s} = 0.127 \cdot 10^{-3} \quad [N \cdot m] \quad (6.19)$$

$$M_{fr,v} = 10^{-7} \cdot \Omega \quad [N \cdot m] \quad (6.20)$$

și să se determine coeficientul frecărilor vâscoase:

$$K_{fr,v} = 10^{-7} \quad [N \cdot m / rad \cdot s] \quad (6.21)$$

Rezultatele experimentale vor fi comparate cu cele obținute prin simulare.

6.2.3.3. Determinarea parametrilor funcionali ai micromotorului de curent continuu

Se urmărește determinarea rezistenței indusului, inductivitatea indusului și constanta de timp. Acești parametri nu sunt precizați de constructor în fișa motorului.

Prin măsurări directe a fost determinată rezistența indusului (figura 6.10.)

$$R = 13,9 \Omega \quad (6.22)$$

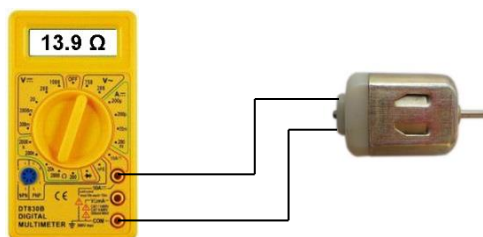


Figura 6.10. Determinarea rezistenței indusului.

Pentru determinarea inductivității și a constantei de timp a fost realizată schema electrică din figura 6.11.

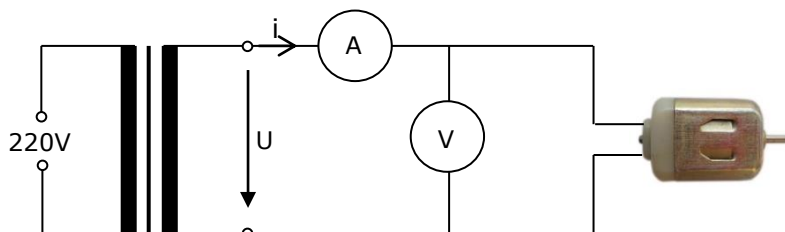


Figura 6.11. Schema electrică a motajului experimental.

Motorul electric a fost conectat la o sursă de curent alternativ și s-au determinat valorile:

$$U = 6.14V \quad (6.23)$$

$$I = 0.31A \quad (6.24)$$

Impedanța circuitului motorului, în acest caz, este:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{6.14}{0.31} = 19.8 \Omega \quad (6.25)$$

Având în vedere relația de definiție a impedanței pentru modelul micromotorului de curent continuu:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2} \quad (6.26)$$

și cunoscând frecvența curentului alternativ:

$$f = 50 \text{ Hz} \quad (6.27)$$

se obține valoarea inductivității:

$$2\pi f \cdot L = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (6.28)$$

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{19.8^2 - 13.9^2}}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} \quad (6.29)$$

$$L = 0.045 \text{ H} \quad (6.30)$$

Pe baza valorilor obținute în (6.22.) și (6.30.) și a relației de definiție se determină constanta de timp:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.045}{13.9} = 3.237 \text{ ms} \quad (6.31)$$

Parametrii determinați vor fi utilizați în construcția modelului matematic necesar simulării.

6.2.3.4. Modulul de tracțiune al robotului mobil

Micromotorul de c.c. este cuplat cu roata motoare prin intermediul unei transmisii reductoare, figura 6.10. Roata motoare nu este în contact cu solul. Sarcina este reprezentată de transmisia intercalată și momentele de inerție ale roților. Prin experiment s-a urmărit determinarea turației roții de tracțiune a robotului, atunci când motorul este conectat la diferite tensiuni.

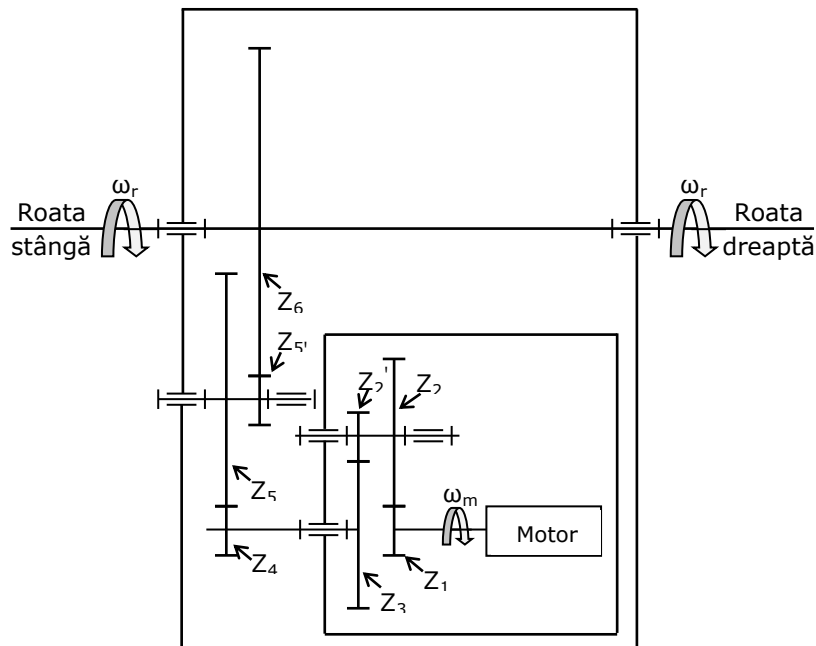


Figura 6.12. Transmisia reductoare.

Pentru modelul fizic analizat, roțile dințate ale transmisiei au numerele de dinți precizate în tabelul 6.5.

Tabel 6.5. Numărul de dinți pentru transmisia modulului de tracțiune.

Z_1	Z_2	Z_2'	Z_3	Z_4	Z_5	Z_5'	Z_6
9	25	10	28	10	47	12	65

Raportul de transmitere pentru transmisia integrată în cadrul sistemului de tracțiune se calculează pe baza relațiilor de calcul (6.32) și (6.33) și ale valorilor din tabelul (6.5.)

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_r} \quad (6.32)$$

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_3}{Z_2'} \cdot \frac{Z_5}{Z_4} \cdot \frac{Z_6}{Z_5'} \quad (6.33)$$

Se determină raportul de transmitere pentru modulul integrat:

$$i = \frac{25}{9} \cdot \frac{28}{10} \cdot \frac{47}{10} \cdot \frac{65}{12} = 198 \quad (6.34)$$

Pentru analiza funcționării sistemului de tracțiune, se aplică metoda reducerii sistemului la arborele micromotorului de acționare [Maniu, 2003], (figura 6.13.).

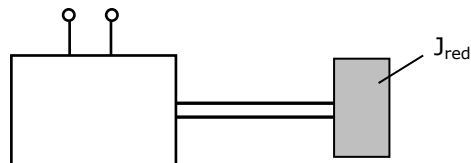


Figura 6.13. Schema sistemului de tracțiune redus la arborele micromotorului.

Modelul matematic al sistemului se compune din ecuațiile:

- Ecuația circuitului electric al micromotului de c.c. – ecuația (6.1);
- Ecuația de mișcare:

$$J_{r,t} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = m_m - m_{fr,s} - m_{f,v} \quad (6.35)$$

unde:

- $J_{r,t} = J_r + J_{red} = J_r + \frac{2 \cdot J_{ro}}{i^2}$ - reprezintă momentul de inerție total redus la arborele motorului; J_{ro} - este momentul de inerție al roții motoare. Se neglijează momentele de inerție ale roților dințate.
- m_m - reprezintă momentul motor.
- $m_{fr,s} = m_{r_fr,s} + \frac{m_{ro_fr,s}}{n \cdot i}$ - reprezintă momentul redus al frecărilor statice; η - reprezintă randamentul transmisiei intercalate; i - este raportul de transmitere; $m_{r_fr,s}$ - reprezintă momentul frecărilor statice la nivelul micromotorului; $m_{ro_fr,s}$ - reprezintă momentul frecărilor statice la nivelul roților motoare.
- $m_{f,v} = m_{r_f,v} + \frac{m_{ro_f,v}}{n \cdot i}$ - reprezintă momentul redus al frecărilor vâscoase; $m_{r_f,v}$ - reprezintă momentul frecărilor vâscoase la nivelul micromotorului; $m_{ro_f,v}$ - reprezintă momentul frecărilor vâscoase la nivelul roților motoare.

O imagine cu standul experimental utilizat pentru analiza sistemului de tracțiune este prezentată în figura 6.14. Imaginea cuprinde faza măsurării vitezei unghiulare a roții motrice. Standul include și aparate de măsură a parametrilor electrici ai sistemului de tracțiune.

Modulul de tracțiune, în integritatea sa, a fost poziționat suspendat (fără contact cu solul. Achiziția de informații a inclus și fazele proceselor de pornire -

oprire ale modului. În acest scop a fost utilizat un osciloscopul Fluke PM 3380A, conform schemei din figura 6.15.

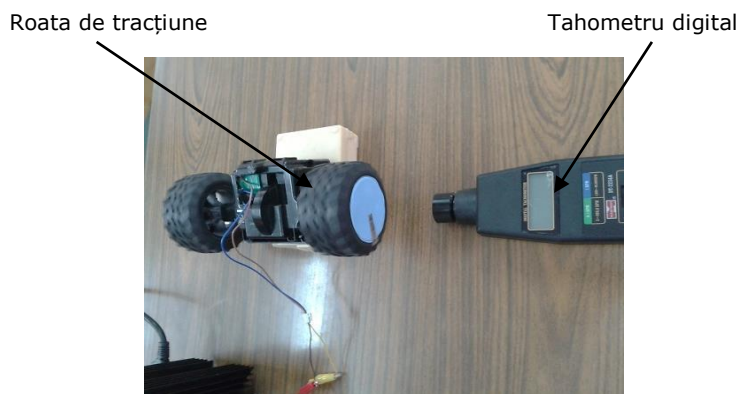


Figura 6.14. Standul experimental pentru măsurarea turației la roata motoare.

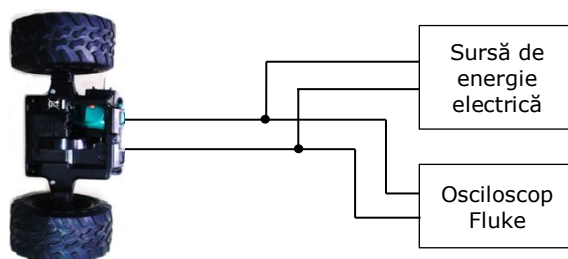


Figura 6.15. Configurarea standului pentru studiul experimental al fazei de pornire și oprire.

Informațiile referitoare la tensiunea de alimentare, valoarea curentului la funcționare staționară, turația și viteza unghiulară a roților motoare sunt prezentate în tabelul 6.6. Valorile momentului motor pentru funcționarea staționară au fost calculate conform relației (6.16). În figura 6.16. este prezentat momentul frecărilor pentru funcționarea staționară.

Tabel 6.6. Turația și viteza unghiulară a roții motoare la diferite tensiuni de alimentare.

U[V]	2	2.4	2.8	3	3.4	4	5	6
I[A]	0.218	0.225	0.232	0.235	0.242	0.250	0.262	0.270
M_m [N·mm]	1.06	1.09	1.13	1.14	1.18	1.22	1.27	1.31
n [Rot/min]	11.025	14.825	20.275	22.45	28.933	37.091	49.4	61.075
Ω [rad/s]	1.154	1.552	2.122	2.350	3.028	3.882	5.170	6.390

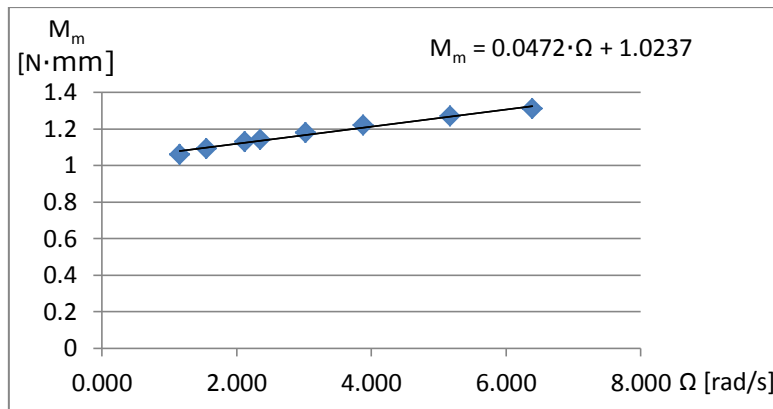


Figura 6.16. Momentul frecărilor pentru funcționarea staționară.

Pentru funcționarea în regim staționar (conform considerentelor din §6.2.3.2.) a fost determinată expresia momentului de frecare total redus la arborele rotorului:

$$M_{f,t} = M_{fr,s} + M_{f,v} = M_{fr,s} + K_V \cdot \Omega \quad [N \cdot mm] \quad (6.36)$$

sub forma:

$$M_{f,t} = 1.0237 + 0.0472 \cdot \Omega \quad [N \cdot mm] \quad (6.37)$$

Expresia anterioară (6.37), în corelare cu precizările referitoare la parametrii analizați în §6.2.3.2., permite estimarea următoarelor valori: Momentul frecărilor statice la nivelul roții motoare, redus la arborele micromotorului are valoarea:

$$M_{fr,s} = 1.0237 \quad [N \cdot mm] \quad (6.38)$$

Coeficientul de frecare vâscoasă redus este:

$$K_V = 0.0472 \quad \left[\frac{N \cdot mm}{rad / s} \right] \quad (6.39)$$

Intre rezultatele experimentale prezentate în tabelul 6.6. și figura 6.16. și, respectiv, rezultatele obținute pe cale teoretică folosind ecuațiile (6.7.) și (6.8.), există diferențe, în special semnificative la tensiuni mici de alimentare (tabelul 6.7.).

Tabel 6.7. Diferențele de turație și eroarea rezultată folosind ecuația (6.34).

Tensiunea	Turația motorului (Ec. 6.9.)	Turația roții motoare n_m/i	Turația reală a roții motoare	Eroarea
U[V]	n_m [rot/min]	[rot/min]	n[rot/min]	ε [%]
2	3234.5	16.33	11.025	32.51
2.4	3935.0	19.87	14.825	25.40
2.8	4644.25	23.45	20.275	13.56
3	5066.75	25.58	22.450	12.26
3.4	5686.25	28.71	28.933	-0.74
4	7087.25	35.79	37.091	-3.62
5	8679,75	43.83	49.400	-12.68
6	10653.0	53.80	61.075	-13.51

Momentul de inerție total redus la arborele motorului a fost calculat și are valoarea:

$$J_{r,t} = 0.75 \cdot 10^{-7} + \frac{2 \cdot 367.5 \cdot 10^{-7}}{198^2} \approx 0.77 \cdot 10^{-7} \quad [Kg \cdot m^2] \quad (6.40)$$

Considerentele anterioare, referitoare la momentul de frecare redus la arborele motorului și modul de calcul al momentului motor, permit estimarea valorilor pentru variantele analizate. Pentru varianta de alimentare a micromotorului de c.c. la tensiunea de $U=5 V$, se estimează următoarele valori:

- durata procesului tranzitoriu – pornire / oprire: $t_p = t_o = 168$ ms (figura 6.17., figura 6.18.); Variantele de alimentare la tensiunile de 4V și 6V pot fi consultate în Anexa 6.1.
- accelerațiile (egale în modul) pe cele două faze la nivelul roții motoare:

$$\varepsilon = \frac{\Omega}{t_p} = \frac{4.588}{0.168} = 27.31 \quad \left[\frac{N \cdot mm}{rad / s} \right] \quad (6.41)$$

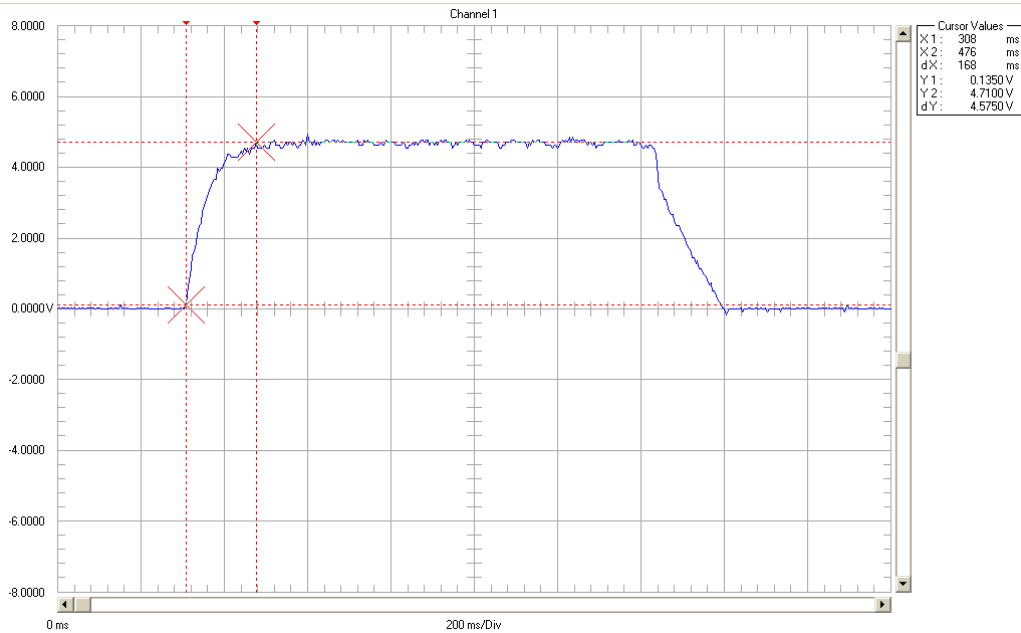


Figura 6.17. Parametrii fazei de pornire, tensiune de alimentare $U = 5V$.

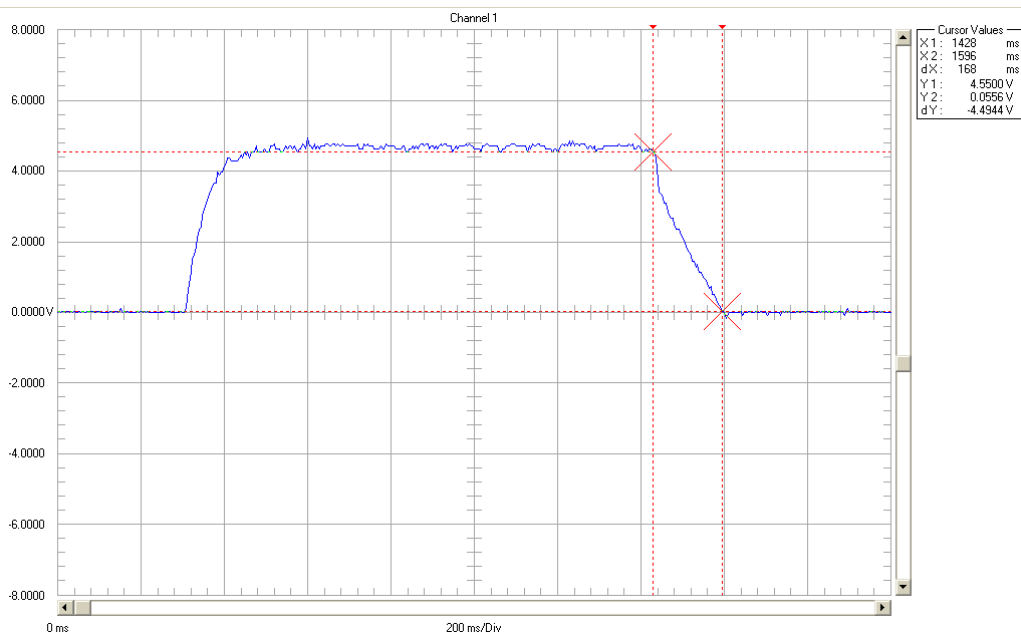


Figura 6.18. Parametrii fazei de oprire, tensiune de alimentare $U = 5V$.

Din tabelul 6.7. se observă diferențe semnificative între turația calculată a roții motoare și turația măsurată. Influențele frecării și inerției introduse în sistemul de acționare sunt semnificative la viteze mici ale roților motoare. Se impune o modelare și o simulare a funcționării pentru validarea modelului analizat.

6.2.3.5. Modulul de direcție al robotului mobil

Modulul de direcție al robotului mobil îndeplinește subfuncția de asigurarea orientării în spațiul de lucru participând la îndeplinirea funcției de navigație. În literatura de specialitate sunt analizate o serie de variante constructive pentru astfel de sisteme. În anexa 6.3. sunt evidențiate variante ale mecanismului de direcție Ackerman [Yi, 2009], [***6.5], [***6.6].

A. Aspecte constructive și funcționale

Poziționarea unei roții de direcție și elemente componente ale sistemului de direcție (elementele 1, 2 și cuplele cinematice A, C) sunt prezentate în figurile 6.19. În figura 6.20. este prezentat schematic mecanismul de direcție.

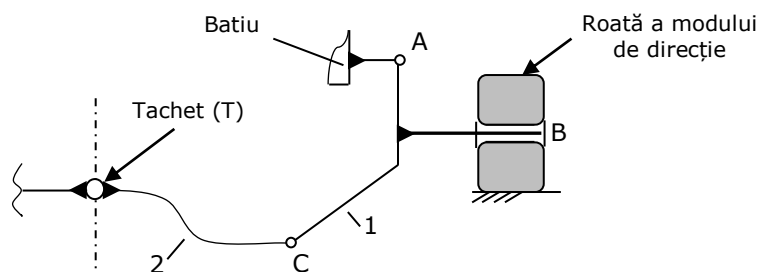


Figura 6.19. Poziționarea roții față de batiu.

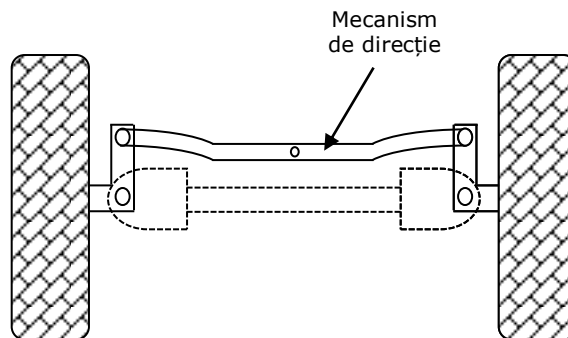


Figura 6.20. Schema principală - funcțională a sistemului de direcție.

Un fragment din mecanismul de direcție (camă - tchet) este prezentat în figura 6.21.

În figura 6.22. se remarcă prezența tchetului aflat în contact cu cama identificată prin sectorul dințat 6. Semnificația notațiilor este următoarea: 4, 5, 5' - roți dințate; 6 - sector dințat.

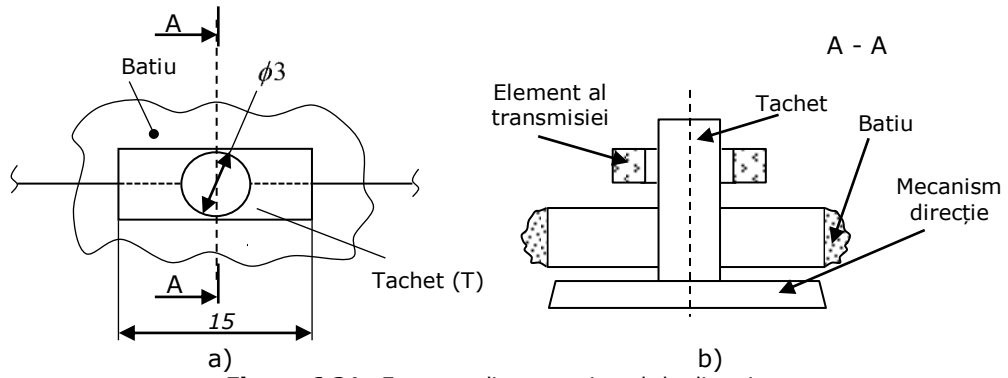


Figura 6.21. Fragmet din mecanismul de direcție.

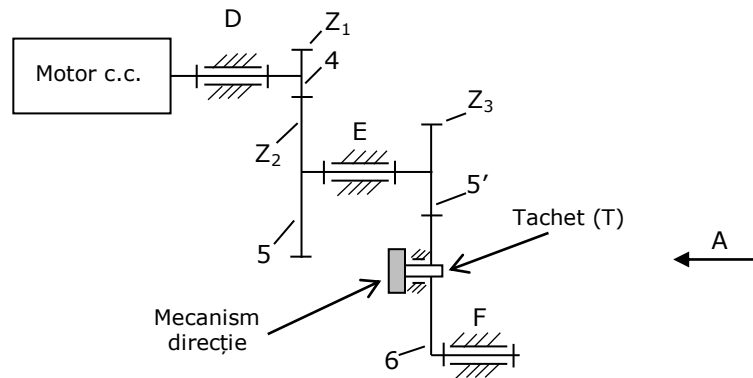


Figura 6.22. Schema de acționare a mecanismului de direcție.

Vederea din A a unui fragmet din transmisie este prezentată în figura 6.23. Este scos în evidență contactul "camă - tachet" și modul de realizare tehnologică a acestuia.

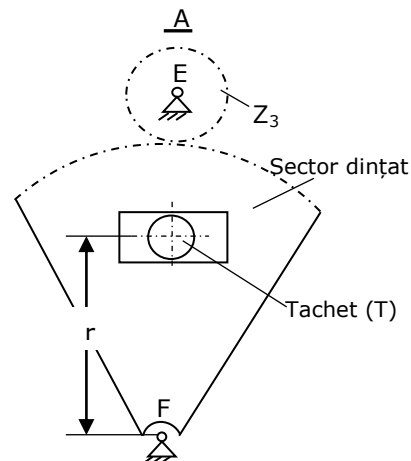


Figura 6.23. Fragment din transmisie.

Pentru schema cinematică prezentată se poate determina raportul de transmitere (semnificația notațiilor este cea clasică [Lovasz, 2013], [Perju, 2006]):

ω_m – viteza unghiulară a micromotorului;
 ω_{sd} – viteza unghiulară a sectorului dințat.

$$i_{46} = \frac{\omega_m}{\omega_{sd}} = \frac{Z_5}{Z_4} \cdot \frac{d_6}{d_{5'}} = \frac{35}{10} \cdot \frac{50}{12} = 14.58 \quad (6.42)$$

Viteza liniară a tachelului v_T , în mișcarea de definiere a direcției de mișcare, este dată de relația (semnificația notațiilor este precizată în figura 6.24.):

$$\begin{cases} v_T = \omega_{sd} \cdot r \\ \omega_{sd} = \frac{\omega_m}{i_{46}} \end{cases} \quad (6.43)$$

sau

$$v_T = \omega_m \cdot \frac{r}{i_{46}} \quad (6.44)$$

Se pot calcula (varianta – alimentare 6V) și parametrii precizați anterior:

$$\omega_{sd} = \frac{1115}{14.58} = 76.5 \quad [\text{rad} / \text{s}] \quad (6.45)$$

$$v_T = 76.5 \cdot 15 = 1147.12 \quad [\text{mm} / \text{s}] \quad (6.46)$$

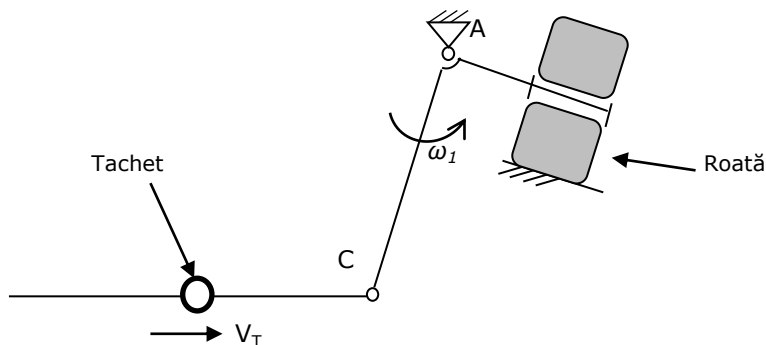


Figura 6.24. Fragment din mecanismul de direcție.

În figura 6.25. este prezentată o imagine a roții modulului de direcție.

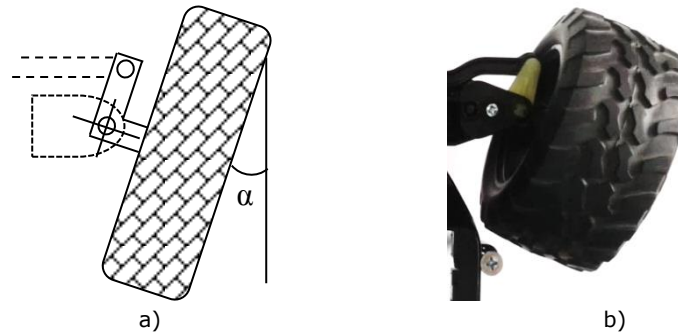


Figura 6.25. Roata modulului de direcție (a – schematic, b – fotografie)

Mișcarea de pseudotranslație a tachelului are loc între pozițiile extreme precizate în figura 6.26.

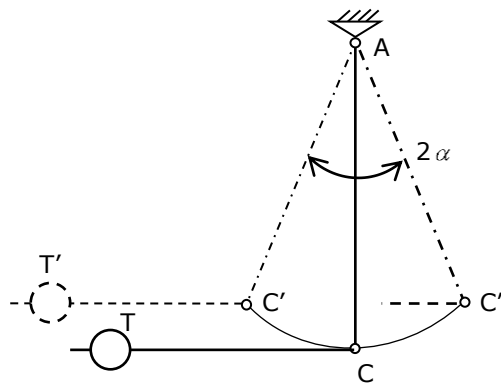


Figura 6.26. Mișcarea de pseudotranslație a tachelului.

Conform cu notațiile și dimensiunile prezentate în figurile 6.21., 6.23 și 6.26. se poate determina unghiul de oscilație a balansierului AC, figura 6.27.

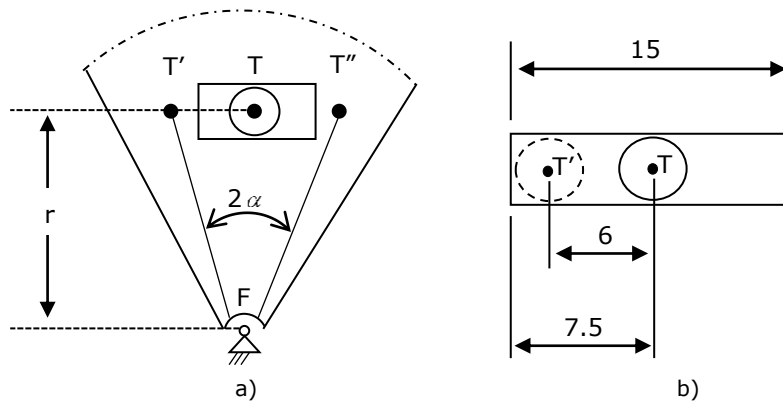


Figura 6.27. Balansierul modulului de direcție

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{T'T}{TF} = \frac{6}{r} = \frac{6}{15} = 0.4 \quad (6.47)$$

$$\alpha_0 = \operatorname{atan}(0.4) \quad (6.48)$$

$$\alpha_0 = 21.8^\circ \quad (6.49)$$

În conformitate cu teoria mecanismelor, se poate calcula viteza unghiulară de virare efectivă a roților directoare. În figura 6.28a, se prezintă fragmentul din mecanismul paralelogram de direcție, iar în figura 6.28b. poligonul vitezelor. Se aplică metoda algebrei vectoriale grafice pentru simplitate și rapiditatea evaluării parametrului.

Viteza de pivotare (pentru varianta de alimentare a micromotorului la tensiunea de 6V) este prezentată în figura 6.29. Semnificația notațiilor din figura 6.28b. este următoarea: p – polul vitezelor; segmentul \overline{pa} - viteza bielei la scara k_v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{mm}$]; segmentul \overline{pb} - viteza balansierului la scara k_v .

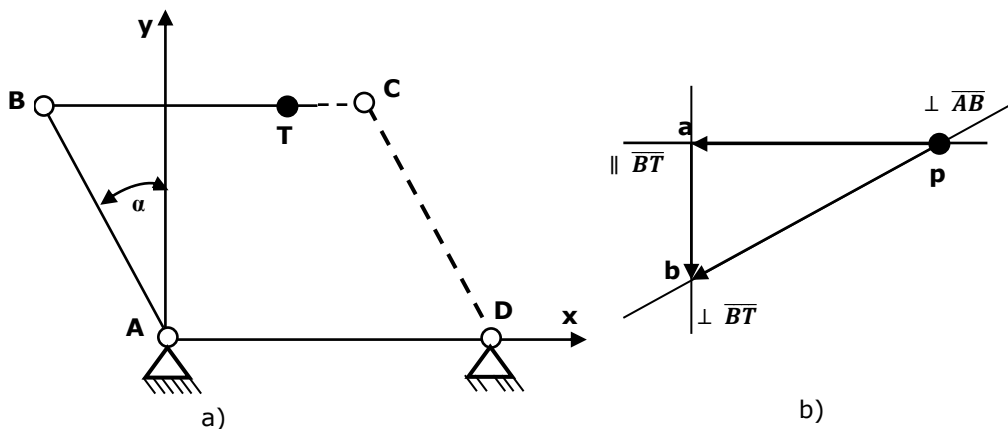


Figura 6.28. Schema cinematică a mecanismului paralelogram și poligonul vitezelor

Viteza liniară v_B se poate astfel calcula:

$$v_B = \overline{pb} \cdot k_v = \overline{pb} \cdot \frac{v_T}{pa} = \frac{v_T}{\cos \alpha} \quad (6.50)$$

Viteza unghiulară de virare a roților directoare va fi în acest caz:

$$\omega_d = \frac{v_B}{l_{AB}} \quad [\text{rad} / \text{s}] \quad (6.51)$$

unde $l_{AB} = 16\text{mm}$.

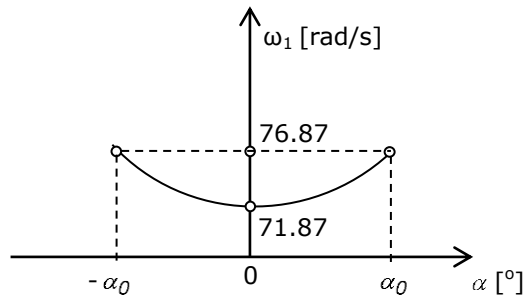


Figura 6.29. Viteza unghiului de pivotare a roții directoare.

B. Analiza fazei de pornire – oprire la mecanismul de direcție

Modulul de direcție are integrat un micromotor de c.c. identic cu cel al modulului de tracțiune. Sunt valabile considerațiile referitoare la parametri de funcționare ai micromotorului și pentru acest caz. Modulul de direcție a fost conectat la o sursă de curent continuu cu tensiunea $U = 6V$. În cadrul standului experimental a fost inclus osciloscopul Fluke PM 3380A, conform schemei următoare, figura 6.30. În prima etapă a analizei a fost urmărit comportamentul micromotorului în fazele de pornire – oprire.

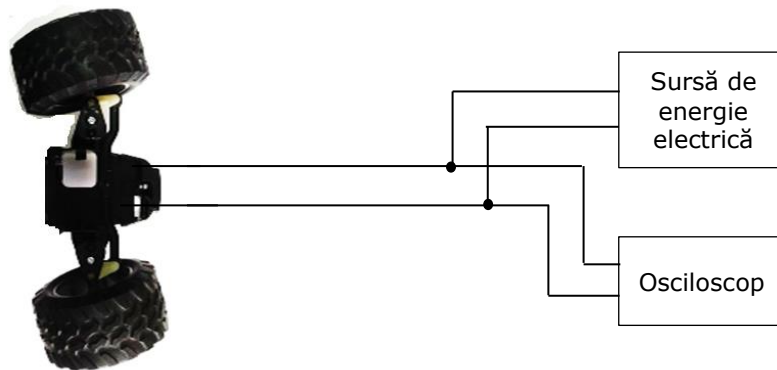
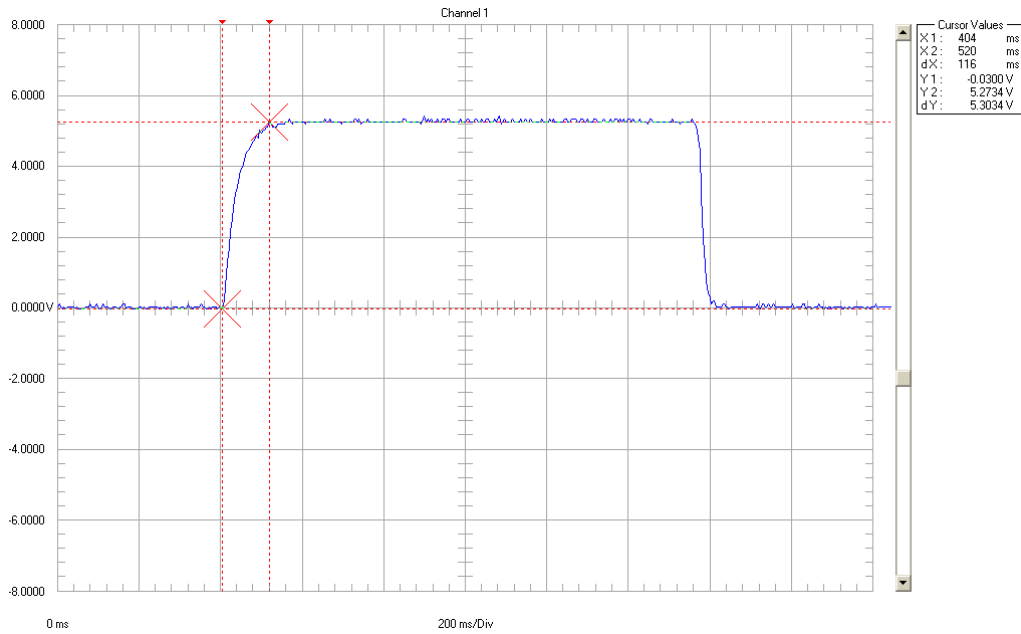
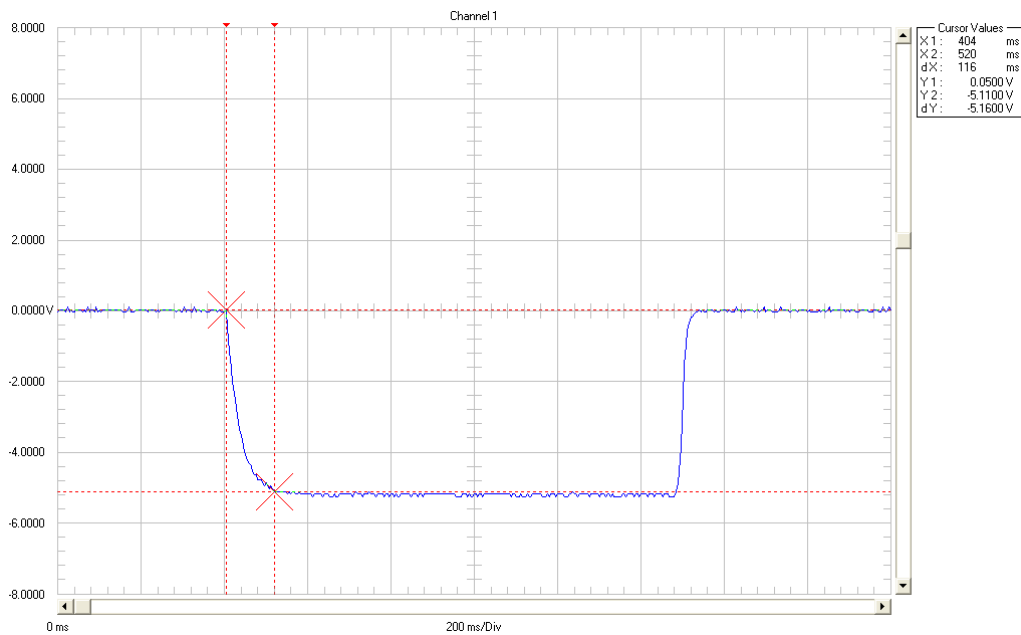


Figura 6.30. Conectarea osciloscopului la modulul de direcție

Informațiile preluate de către osciloscop sunt prezentate în figurile 6.31., 6.32. În imaginile achiziționate se remarcă parametrii electrici și temporali ai fazelor analizate. Aceste valori permit o analiză calitativă a procesului. Parametrii fazelor de oprire pot fi consultați în Anexa 6.2.

**Figura 6.31.** Parametrii fazei de pornire, roțile rotite la dreapta**Figura 6.32.** Parametrii fazei de pornire, roțile rotite la stânga

6.2.3.6. Modelul matematic al geometriei roților

A. Introducere

Asigurarea funcției de navigare este posibilă prin multiple soluții prezente în bibliografia de specialitate [Richard, 1994], [Kelly, 2013], [de Luca, 1998], [Tzafestas, 2014], [Nițulescu, 2002].

Un criteriu de clasificare a roboților mobili este cel referitor la modul de materializare a sistemului de locomoție. După acest criteriu, una din clasele de roboți mobili este cea caracterizată de roboții ce dispun de un sistem mecanic mobil bazat pe roți. Roțile pot fi roți convenționale / clasice sau speciale [Richard, 1994], [Tzafestas, 2014], [Kelly, 2013]. Robotul utilizat pentru studiu este un robot cu roți convenționale.

Un alt criteriu de clasificare a roboților mobili este cel de acționare a roților în vederea asigurării funcției motrice și navigare. Roboții mobili cu direcție Ackerman constituie una dintre clasele taxonomiei construite [Richard, 1994], [Tzafestas, 2014].

Subsistemul de direcție - cu osie frântă - reprezintă o variantă asemănătoare direcției automobilelor. Roțile directoare sunt de regulă dispuse în partea frontală (pentru sensul de mers) și posedă fiecare câte o axă proprie de pivotare A și B. Pentru a nu apărea patinări ale roților în viraje, roțile directoare trebuie să descrie curbe cu centrul instantaneu de rotație CIR (figura 6.33.).

Sistemul de asigurare a direcției cu "osie frântă" asigură separarea funcției motrice și a celei de direcție cu avantaje în conducerea robotului. Printre dezavantaje se pot menționa: soluție mecanică relativ complexă și unghiuri de viraj limitate [Tzafestas, 2014], [Kelly, 2013], [de Luca, 1998].

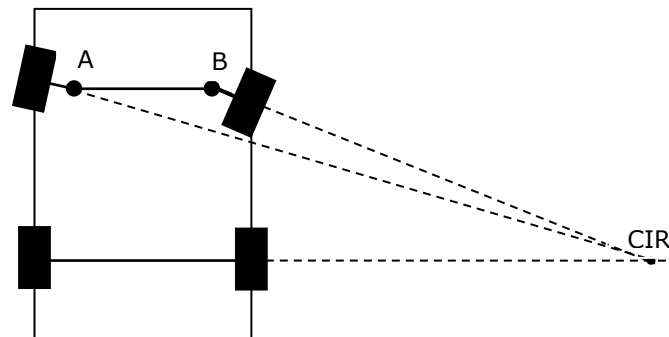


Figura 6.33. Sistemul de direcție Ackerman

Varianta mecanismului (și a metodei) Ackerman este una din cele mai cunoscute [***6.5], [***6.6]. Aspecte constructive ale mecanismului sunt prezentate în Anexa 6.3. Yi ș.a în [Yi, 2009] analizează aspectele neliniare (în special alunecarea lateral) asupra modelului matematic și asupra estimării mișcării robotului mobil.

Robotul mobil analizat dispune de un sistem de direcție prezentat ca structură și parametri în § 6.2.3.5. Denumirea clasei în literatura de specialitate este de *car-like mobile robot*. Robotul mobil are roțile motrice ca roți-spate iar cele de direcție sunt roțile-față (frontale). Robotul mobil are atașat sistemul de coordonate

$Oxyz$ iar mediul de lucru în care acesta evoluează are atașat sistemul de coordonate $O_0x_0y_0z_0$, figura 6.34.

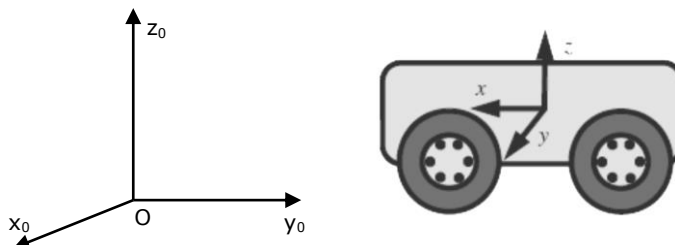


Figura 6.34. Sistemul de coordonate atașat mediului de lucru

Cinematica robotului mobil tratează configurația acestuia în spațiul de lucru, relațiile dintre parametrii geometrici și constrângerile impuse în traiectoriile lor.

Ecuțiile cinematice depind de structura geometrică a robotului. Studiul cinematicii este o etapă fundamental necesară studiului dinamicii, analizei stabilității și controlabilității robotului.

Literatura de specialitate clasifică posibilele mișcări ale robotului mobil în variantele următoare:

- Mișcare punct cu punct – robotul pornește dintr-un punct START la o configurație dată urmând să ajungă în punctul ȚINTĂ cu o configurație dorită (figura 6.35.).

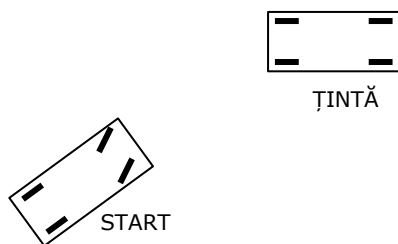


Figura 6.35. Mișcarea punct cu punct a robotului mobil

- Traiectorie impusă – robotul mobil trebuie să parcurgă o traiectorie impusă între cele două puncte specificate în cadrul unui sistem de referință (figura 6.36.).

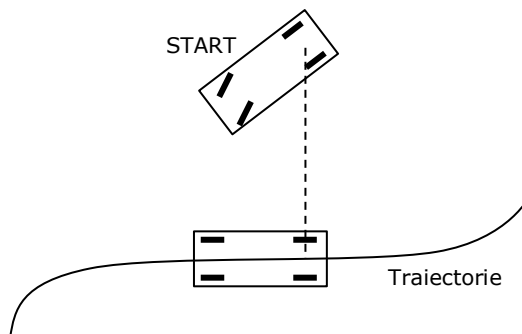


Figura 6.36. Traiectoria impusă

- Urmărirea unei traiectorii impuse – robotul mobil trebuie să urmărească o traiectorie impusă între a două puncte de referință în cadrul sistemului de referință (figura 6.37.).

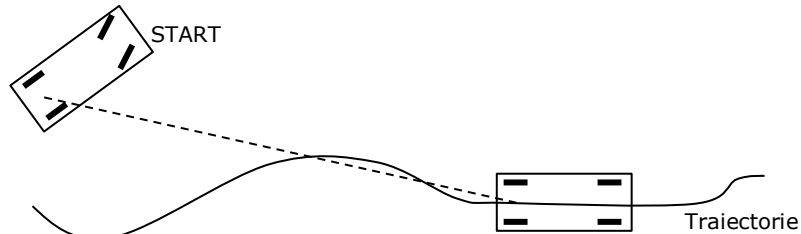


Figura 6.37. Urmărirea traiectoriei impusă

B. Modelul cinematic

Navigarea sistemului mobil este abordată în literatura de specialitate din multiple puncte de vedere. Privit ca un sistem mecanic mobil, robotul este analizat din punctul de vedere al constrângerilor mecanice [Richard, 1994], [Kelly, 2013], [Vâlcovici, 1968], [de Luca, 1998]. În [Vâlcovici, 1968] se definesc legăturile bilaterale prin ecuații de forma:

$$f(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) = 0 \quad (6.52)$$

O legătură definită printr-o ecuație de forma anterioară în care apar derivatele coordonatelor se numește neolonomă [Vâlcovici, 1968]. O constrângere a unui sistem mecanic restricționează mișcarea sistemului pentru limitarea setului de traiectorii pe care sistemul le poate urma [de Luca, 1998].

Din punct de vedere al controlului, mișcarea de navigație este descrisă prin sistemul neliniar de ecuații care descriu modelul cinematic al robotului:

$$\dot{q} = G(q) \cdot v \quad (6.53)$$

unde: q - este un vector $n \times 1$ al coordonatelor generalizate ale robotului mobil;

v - este vectorul de intrare al vitezelor (în sens generalizat);

G - este matricea de stare a robotului.

Robotul mobil este prezentat schematic în figura 6.38. Perechea de roți frontale intră în componența sistemului de direcție iar perechea din spate sunt componente ale sistemului de tracțiune. Starea robotului mobil în raport cu sistemul general de coordonate este descrisă prin vectorul:

$$q = [x_P \ y_P \ \theta \ \alpha]^T \quad (6.54)$$

unde notațiile au următoarele semnificații:

x_P, y_P - sunt coordonatele carteziene ale punctului caracteristic P;

θ - unghiul de orientare al robotului mobil în raport cu axa OX ;

α - unghiul de virare al robotului (unghiul de direcție).

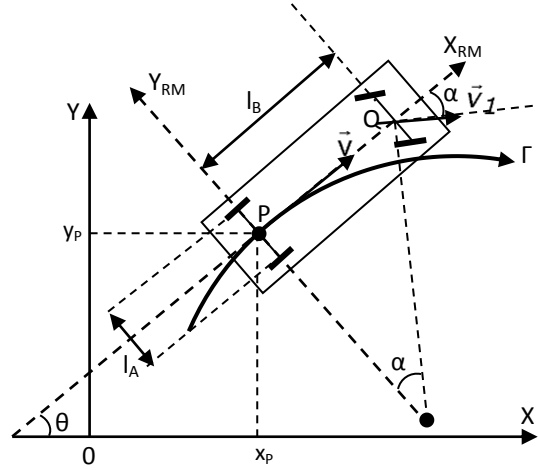


Figura 6.38. Schema robotului mobil

Pe baza cordonatelor generalizate și a principiilor mecanice clasice există relațiile de definiție ale cinematicii robotului mobil:

$$\dot{x}_P = v_{Px} = v \cdot \cos \theta \quad (6.55)$$

$$\dot{y}_P = v_{Py} = v \cdot \sin \theta \quad (6.56)$$

și relația de constrângere nonholonomică referitoare la perechea de roți motrice-spate:

$$-\dot{x}_P \sin \theta + \dot{y}_P \cos \theta = 0 \quad (6.57)$$

sistemul descris este supus și la a doua constrângere nonholonomică corespunzătoare perechii de roți frontale:

$$-\dot{x}_Q \sin(\theta + \alpha) + \dot{y}_Q \cos(\theta + \alpha) = 0 \quad (6.58)$$

unde x_Q și y_Q sunt coordonatele punctului median Q (figura 6.38.).

Aceste constrângeri semnifică faptul că robotul nu își poate schimba independent poziția și orientarea, cele două mărimi fiind cuplate prin structura sa cinematică. În timpul evoluției pe traiectorie, punctul P descrie traiectoria curbilinie Γ , ce admite ca tangentă permanentă axa mijlocie longitudinală, de lungime l_B . Din această cauză rezultă dificultăți importante în proiectarea algoritmilor de conducere meniți să asigure evoluția pe o traiectorie impusă [Richard, 1994], [Kelly, 2013], [Vâlcovici, 1968].

Între cordonatele carteziane ale punctelor mediane P și Q (figura 6.38.) există relațiile:

$$x_Q = x_P + l_B \cos \theta \quad (6.59)$$

$$y_Q = y_P + l_b \sin\theta \quad (6.60)$$

Utilizând relațiile anterioare (6.55), (6.56) și cea de a doua relație de constrângere obținem după transformări:

$$-\dot{x}_P \sin(\theta + \alpha) + \dot{y}_P \cos(\theta + \alpha) + l_b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (6.61)$$

Cele două relații de constrângere se pot rescrie sub forma matriceală:

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (6.62)$$

unde

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ -\sin(\theta + \alpha) & \cos(\theta + \alpha) & l_b \cos \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

și

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{y}_P \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (6.64)$$

Ecuțiile modelului cinematic pentru varianta robotului mobil cu roți motrice pe partea spate iar roți directoare pe partea frontală pot fi scrise în conformitate cu notațiile din figura 6.38.

$$\dot{x}_P = v_{Px} = v \cdot \cos\theta \quad (6.65)$$

$$\dot{y}_P = v_{Py} = v \cdot \sin\theta \quad (6.66)$$

$$\dot{\theta} = \omega_{CIR} = \frac{1}{l_b} \cdot v_1 \cdot \sin\alpha = \frac{1}{l_b} \cdot v \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (6.67)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_d \quad (6.68)$$

sau

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{y}_P \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\alpha \\ \sin\theta \cos\alpha \\ \operatorname{tg}\alpha / l_b \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \omega_d \quad (6.69)$$

Modelele matematice dezvoltate în §6.2.3.4., §6.2.3.5. și modelul cinematic al robotului se pot integra în sistemul de comandă al robotului mobil. (figura 6.39.).

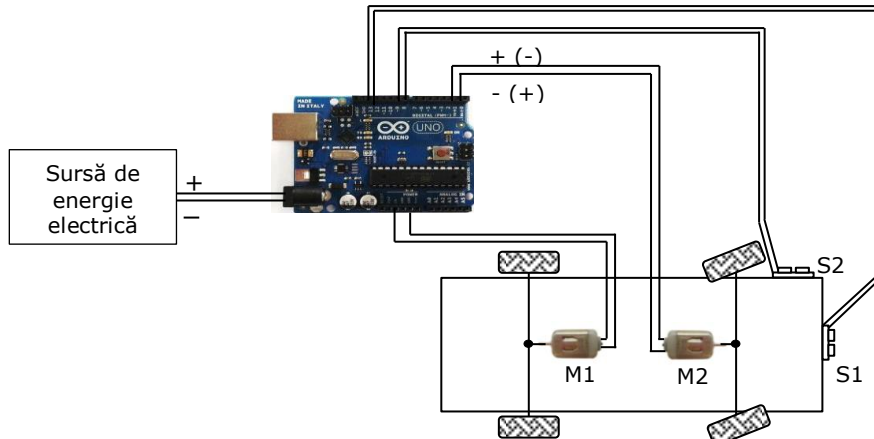


Figura 6.39. Schema circuitelor de comandă a robotului mobil

Un fragment din programul integrat în sistemul de comandă este prezentat în figura 6.40. (Anexa 6.4.).

```

if (cm<30) {
  //digitalWrite(dir_a, LOW);
  //analogWrite(pwm_a, 200);
  digitalWrite(dir_b, HIGH);
  analogWrite(pwm_b, 250);
  //delay(500);
}
else {
  digitalWrite(dir_b, LOW);
  analogWrite(pwm_b,250);
}
//delay(500);
}

```

Figura 6.40. Fragment din program

6.2.3.7. Simulare Matlab

Ecuțiile micromotorului de c.c. descrise în 6.2.3.1. și valorile parametrilor determinate în 6.2.3.2. și 6.2.3.3. stau la baza modelului dezvoltat în mediul Matlab/Simulink. Este cazul funcționării în gol a micromotorului, figura 6.41.

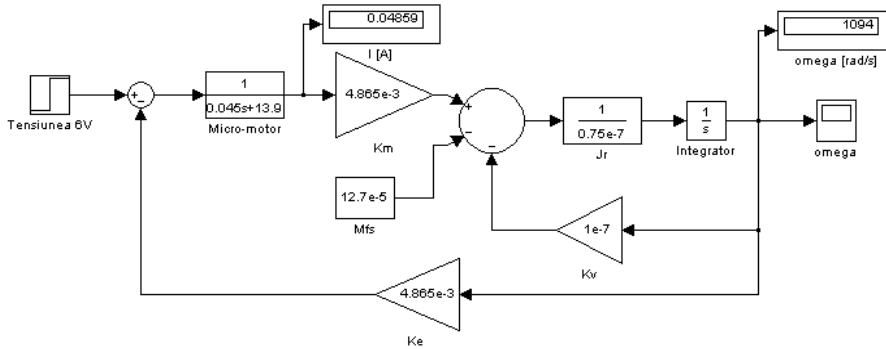


Figura 6.41. Schema bloc în Simulink a micromotorului la funcționarea în gol

Rezultatele simulării funcționării micromotorului la tensiunea de alimentare de 6V sunt apropiate valoric de cele obținute în experiment. Este vorba despre valoarea curentului micromotorului, pe de o parte, și valoarea vitezei unghiulare pe de altă parte.

$$\varepsilon_i = \frac{0.049 - 0.04928}{0.049} \cdot 100 = 0.57 \quad [\%] \quad (6.70)$$

$$\varepsilon_\Omega = \frac{\Omega_m - \Omega_S}{\Omega_m} \cdot 100 = \frac{1115.01 - 1094}{1115.01} \cdot 100 = 1.88 \quad [\%] \quad (6.71)$$

Acest lucru confirmă valabilitatea considerațiilor teoretice și a calculelor referitoare la determinarea parametrilor micromotorului. În figura 6.42. se prezintă graficul vitezei unghiulare a rotorului. Valoarea vitezei la regim stabilizat este sesizabilă în figura anterioară (figura 6.41.).

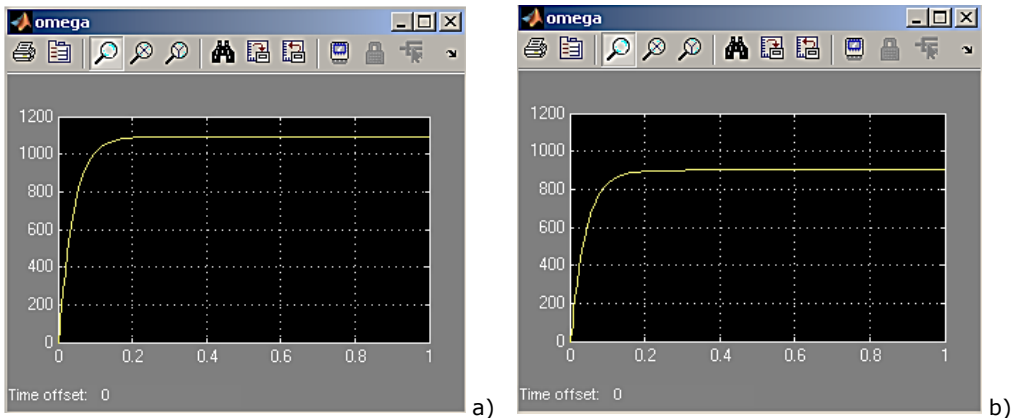


Figura 6.42. Vitezele unghiulare ale arborelui (a – pentru tensiunea de 6V; b – pentru tensiunea de 5V)

Valorile pentru parametri analizați sunt trecute sunt trecute în tabelul 6.8.

Tabel 6.8. Valorile parametrilor analizați

U [V]	2	2.4	2.8	3	3.4	4	5	6
I [mA]	32.62	34.21	35.8	36.6	38.19	40.58	44.56	49.28
Ω [rad/s]	317.9	395.5	473.2	512	589.7	706.2	900.3	1094

Diferențele între valorile măsurate și cele simulate conduc la necesitatea aplicării și a altor metode pentru identificarea parametrilor micromotorului.

În figura 6.43. este prezentată schema bloc pentru cazul sistemului de acționare a roților motrice. Modelul este dezvoltat pe baza relațiilor (6.32. – 6.40.).

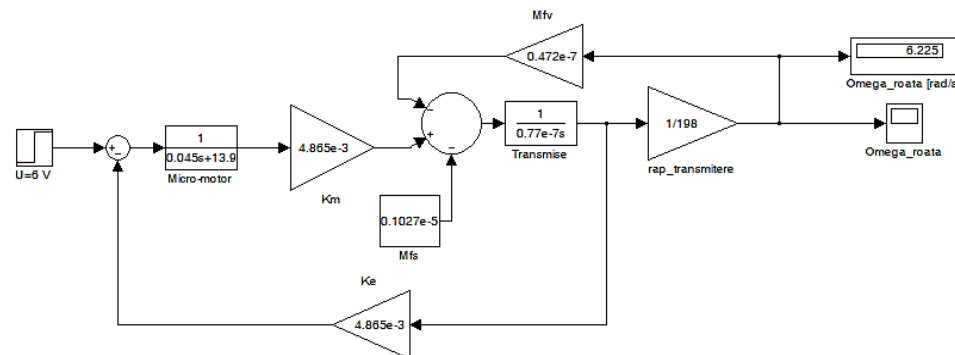


Figura 6.43. Schema bloc în Simulink a roților motrice

Un caz de simulare pentru tensiunea $U=6V$ de alimentare a micromotorului este arătat în figura 6.44.

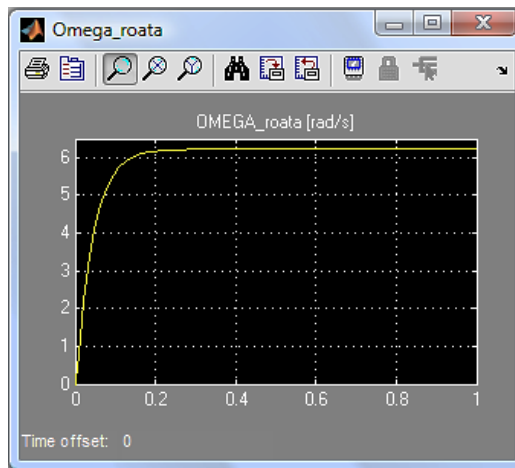


Figura 6.44. Viteza unghiulară a roților motrice

Din compararea valorilor măsurate și a valorilor simulate se pot enunța concluzii asemănătoare cu cele precizate anterior.

Compararea celor două viteze unghiulare a condus la următoarea ecuație:

$$\varepsilon_{\Omega} = \frac{\Omega_m - \Omega_S}{\Omega_m} = \frac{6.39 - 6.225}{6.39} \cdot 100 = 2.58 \quad [\%] \quad (6.72)$$

unde: Ω_m =viteza unghiulară măsurată [rad/s];

Ω_S =viteza unghiulară simulată [rad/s].

Acest lucru confirmă valabilitatea considerațiilor teoretice și experimentale realizate.

6.2.4. Conducerea robotului față de un obstacol lateral

6.2.4.1. Generalități

Locul geometric al punctelor succesive pe care le ocupă punctul în mișcare se numește traiectorie [Vâlcovici, 1968].

O analiză pe un număr larg de aplicații – traiectorii ale unor modele fizice, analiza gesturilor, analiza traficului, supraveghere video, activitatea de etichetare, traiectoriile de grupare (*clustering trajectory*), animale și societăți mixte animale – roboți, robotică – a fost abordată de Roduit [Roduit, 2009].

Traietoriile asupra cărora facem referire (parte de analiză a 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 sensorial sau sistem de navigație prin GPS). În aceste cazuri, diferența dintre traiectorii este delimitată de factorul extern.

Considerăm un mediu de evoluție al unui robot mobil. Acest mediu poate fi descompus într-o serie de obiecte, operatori, copaci, etc.

Există multe surse de erori aleatoare în integrarea robotului mobil într-un astfel de mediu de lucru. Aceste erori au ca sursă: lățimea finită a roților, abateri geometrice ale componentei constructive pentru contactul cu solul, contact variabil cu solul și, astfel, alunecarea roților, dinamica mediului, etc.

De exemplu, traiectoria unui autoturism pe o șosea este delimitată de dimensiunea rutieră, de categoria acesteia. Un exemplu edificator este prezentat în figura 6.45., șoseaua se identifică cu suportul fizic al traiectoriei unui autoturism.



Figura 6.45. Cale rutiera, suport pentru traiectoria unui autoturism [***6.3.].

Pentru compararea traiectoriilor se pot utiliza [Roduit, 2009]:

- aria dintre două traiectorii. Dacă $f(x)$ și $g(x)$ sunt două funcții care definesc o traiectorie, atunci aria dintre aceste traiectorii este:

$$A = \int_{t_0}^{t_1} |f(x) - g(x)| dt \quad (6.73)$$

- 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*). Traiectoriile fără cadru comun sunt cele mai obișnuite 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 și de analiză a procesului de navigare realizat.

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 aleatoare succesive.

Un număr remarcabil de abordări se referă la controlul unui sistem autonom pe o traiectorie memorată [Crețu, 1994], [Nițulescu, 2002], [Dolga, 1999], [Kouichi, 2002].

Într-un mediu de lucru nestructurat, problema definirii punctului caracteristic are la bază ocolirea obstacolelor. Formele arhitecturale ale obstacolelor sunt diverse și impun și variante corespunzătoare pentru traiectoria sistemului mobil. Pentru atingerea unor indicii de performanță în evoluția robotului mobil, se impune ca traiectoria punctului caracteristic să îndeplinească un criteriu de optimabilitate [Sprunk, 2012], [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.

6.2.4.2. Descriere experiment

În cadrul experimentelor efectuate a fost utilizat robotul mobil prezentat anterior. În structura acestuia au fost integrați doi senzori ultrasonici S1 și S2, figura 6.46. Aceștia au fost analizați în experimentele din capitolele precedente.

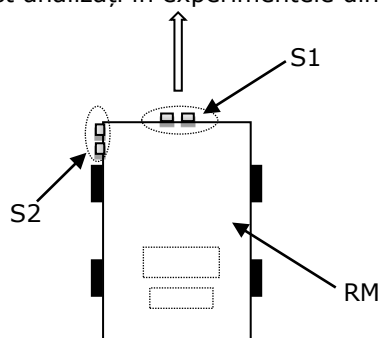


Figura 6.46. Robot mobil echipat cu doi senzori.

Senzorul S1 oferă informații 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 un eventual obstacol.

Senzorul S2 oferă informația despre distanța dintre senzor și un eventual obstacol lateral față de robotul mobil. Programul implementat în componenta de conducere a robotului mobil urmărește traiectorii drepte la o distanță constantă față de o suprafață de referință. Robotul a fost programat astfel încât să se deplaseze de-a lungul unui perete (suprafața de referință), la o distanță de 300mm față de acesta. Lungimea traseului a fost de 2000mm. Traseul a fost confecționat din coli de hartie A4 pentru a putea fi inscripționat cu traiectoria robotului mobil. Un obstacol cu lungimea de 300mm a fost poziționat la o distanță de 60mm față de perete, deci la o distanță de 240mm față de traiectoria liniară impusă. Prezența unui obstacol lateral este sesizată de elementul senzorial, astfel încât prin programul integrat traiectoria se va modifica în zona obstacolului [Stănescu, 2015f]. Schematic, imaginea traseului și a traiectoriei rezultate sunt descrise în figura 6.47. În anexa 6.5. sunt prezentate imagini cu traseul și robotul mobil în scena de lucru.

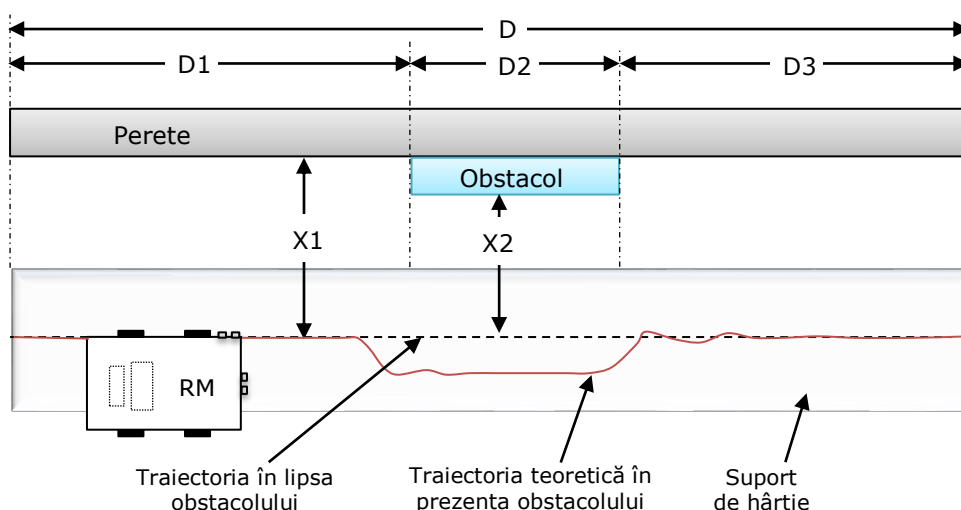


Figura 6.47. Schema traseului.

Notațiile din figura precedentă au următoarele valori: $D = 2000\text{mm}$; $D1 = 900\text{mm}$; $D2 = 300\text{mm}$; $D3 = 800\text{mm}$; $X1 = 300\text{mm}$; $X2 = 240\text{mm}$.

6.2.4.3. Rezultate și prelucrarea datelor

A. Rezultate obținute

În dreptul senzorului S2, robotului i-a fost atașat un element de inscripționare cu ajutorul căruia a fost trasată traiectoria. S-au efectuat 3 experimente, modificând programul referitor la timpul de răspuns al roților de direcție. Astfel, au fost considerate trei valori de întârziere:

- Delay 0;
- Delay 250 ms;
- Delay 500 ms.

Corelarea timpilor de mișcare pentru situația descrisă este prezentată în figura 6.48.

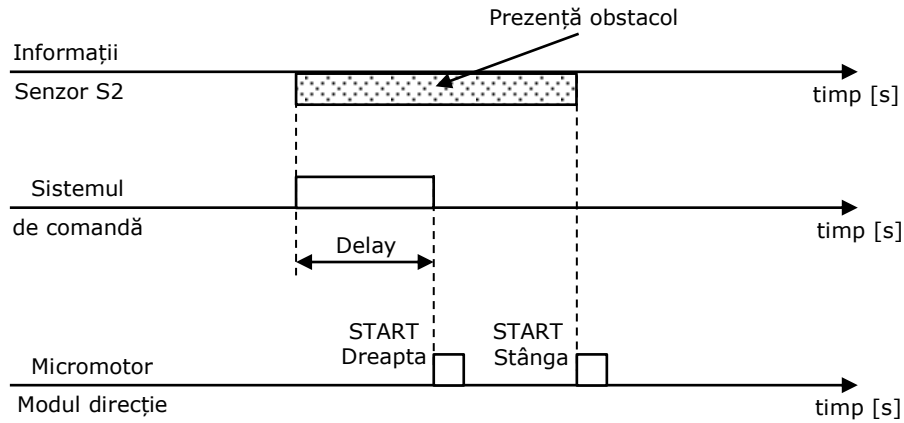


Figura 6.48. Corelarea timpilor de mișcare.

La fiecare 100mm a lungimii traseului a fost măsurată deviația robotului față de aceasta. Pentru o mai bună exemplificare asupra datelor, deviația mai mică de 300mm față de perete a fost notată cu semnul (+), iar deviația mai mare de 300mm a fost considerată negativă. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.9.

Tabel 6.9. Rezultatele obținute în funcție de timpul de răspuns al roților de direcție.

Delay = 0		Delay = 0.250s		Delay = 0.500s	
D [m]	ΔX [cm]	D [m]	ΔX [cm]	D [m]	ΔX [cm]
0	0	0	0	0	0
0.1	-0.8	0.1	-1	0.1	-0.9
0.2	-0.8	0.2	-0.7	0.2	0
0.3	-0.8	0.3	-1	0.3	-1.7
0.4	-0.5	0.4	-0.7	0.4	-0.6
0.5	-0.7	0.5	-0.7	0.5	-0.3
0.6	-0.4	0.6	-1.6	0.6	-1.8
0.7	-0.6	0.7	0	0.7	0.8
0.8	-0.7	0.8	0.6	0.8	0.5
0.9	-1.4	0.9	-1.8	0.9	-2.2
1	-3.2	1	-5	1	-5.5
1.1	-5.5	1.1	-6.4	1.1	-9
1.2	-6.4	1.2	-5.4	1.2	-8.2
1.3	-6.8	1.3	-6.1	1.3	-6.3
1.4	-6.5	1.4	-5.6	1.4	-3.5
1.5	-6.3	1.5	-5.1	1.5	0.3
1.6	-5.7	1.6	-4.2	1.6	1.2
1.7	-4.8	1.7	-3.1	1.7	-0.2
1.8	-3.8	1.8	-1.6	1.8	-0.3
1.9	-2.5	1.9	0.3	1.9	-1.5
2	-1.1	2	0.2	2	-1.2

Reprezentările grafice ale traiectoriilor robotului mobil în cele trei cazuri experimentate sunt prezentate în figurile 6.49., 6.50. și 6.51. Traiectoria Γ realizată de robot a fost reprezentată în conformitate cu valorile prelucrate.

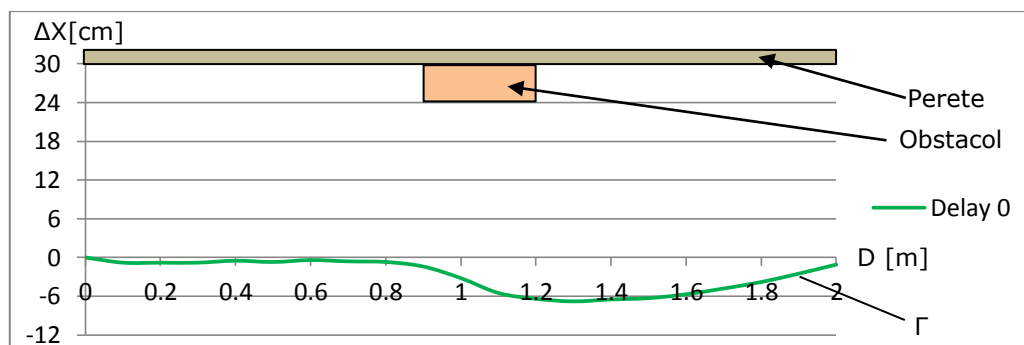


Figura 6.49. Traiectoria robotului, timpul de întârziere setat la 0s.

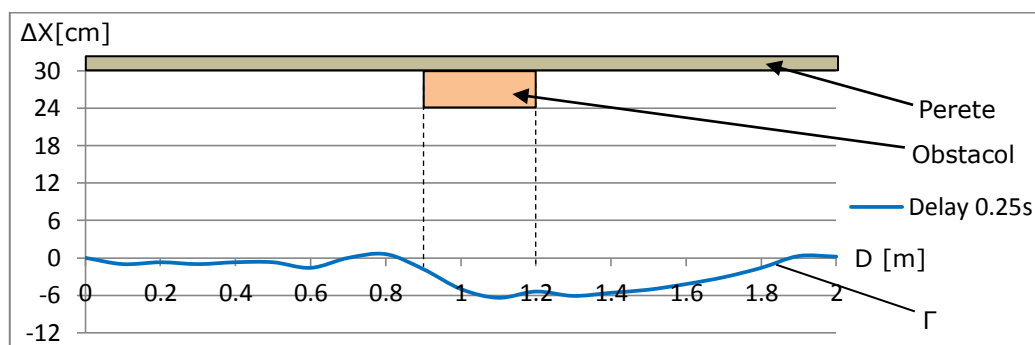


Figura 6.50. Traiectoria robotului, timpul de întârziere setat la 0,25s.

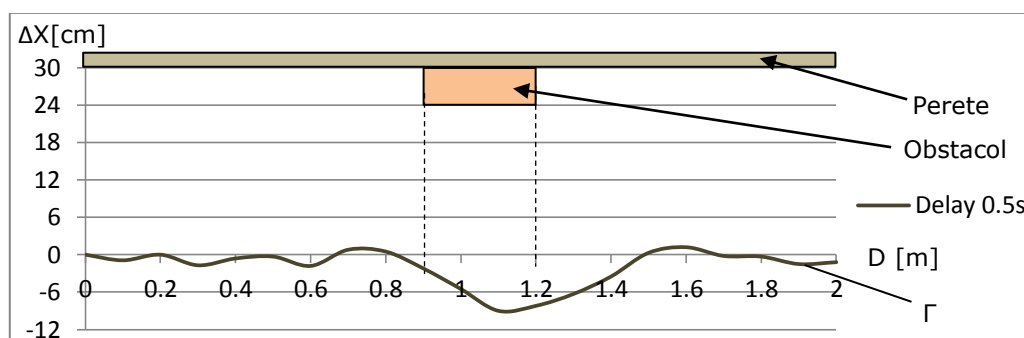


Figura 6.51. Traiectoria robotului, timpul de întârziere setat la 0,5s.

Din analiza reprezentărilor se remarcă:

- Abateri ale traiectoriei, Γ , față de cea teoretică chiar în lipsa obstacolului. Acestea au ca și cauză stări ale zonei de contact ale mediului cu roțile robotului, imprecizii în construcția mecanismului de direcție, starea de uzură

- a roților robotului;
- Traiectoriile în toate cele trei variante experimentate sunt diferite prin porțiunile distincte care compun traiectoria Γ . Se remarcă:
 - a) în prima variantă traiectoria conține doar două intervale $[0; 0.8]m$ și respectiv $[0.8; 2]m$ corespunzătoare neidentificării obstacolului și, respectiv, identificării obstacolului.
 - b) În al doilea caz, traiectoria Γ conține trei intervale $[0; 0.8]m$, $[0.8; 1.8]m$ și $[1.8; 2]m$. Se remarcă prezența celui de al treilea interval corespunzător revenirii robotului la traiectoria impusă.
 - c) În al treilea caz, traiectoria Γ conține trei intervale $[0; 0.8]m$, $[0.8; 1.5]m$ și $[1.5; 2]m$. Cel de al doilea interval este de lungime mai scurtă, ceea ce denotă faptul că robotul revine mai rapid la traiectoria impusă. Se remarcă prezența celui de al treilea interval corespunzător reîntegrării robotului pe traiectoria impusă.
 - d) Pe toate cele trei traiectorii realizate în cadrul intervalului al doilea se constată prezența unei abateri maxime față de traiectoria impusă: $6.8cm$ în primul caz, $6.4cm$ în al doilea și $9cm$ în cel de al treilea caz.
 - e) Se poate realiza o optimizare a parametrilor de lucru pe baza lungimii traiectoriei realizate în funcție de Delay-ul impus.

B. Prelucrarea statistică a rezultatelor

Analiza funcțională a robotului pentru variantele anterioare impune luarea în considerare a aspectului aleatoriu a procesului de navigare.

Evoluția robotului în scena de lucru este afectată de erori de situație raportate la un sistem de coordonate atașat spațiului de evoluție. Din punct de vedere statistic, pentru variabila aleatoare x , valoarea medie și varianța caracterizează aspectul aleatoriu.

Fie x_i un set de n observații ale variabilei aleatorii. Se pot defini, astfel, valoarea medie [Breaz, 2007]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (6.74)$$

și, respectiv, varianța [Mihoc, 1982]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n-1} \quad (6.75)$$

Variabila aleatoare se identifică cu abaterea traiectoriei reale de la traiectoria impusă. Setul de observații utilizabile în ecuațiile (6.74) și (6.75) au fost prezentate în tabelul 6.9.

Pe baza rezultatelor din tabelul 6.9., parametrii statistici în baza relațiilor 6.74 și 6.75, pentru porțiunea de traseu ce corespunde lipsei obstacolului, au fost calculați pe intervalul [0.1; 0.8]m. Excepție a făcut cazul Delay = 0.5s pentru care intervalul calculat a fost [0.1; 0.8]U[1.5; 2].

a) pentru cazul Delay = 0s.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^8 X_i}{8} = -0.662 \quad [cm] \quad (6.76)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (X_i - (-0.662))^2}{7} = 0.022 \quad (6.77)$$

b) pentru cazul Delay = 0.25s.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^8 X_i}{8} = -0.637 \quad [cm] \quad (6.78)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (X_i - (-0.637))^2}{7} = 0.448 \quad (6.79)$$

c) pentru cazul Delay = 0.5s.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^8 X_i}{8} = -0.413 \quad [cm] \quad (6.80)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{14} (X_i - (-0.413))^2}{13} = 0.870 \quad (6.81)$$

Pentru porțiunea de traseu ce corespunde traiectoriei prezenței obstacolului, parametrii statistici au fost calculați astfel:

a) Pentru cazul Delay = 0s, s-a luat în calcul intervalul [0.8; 2]m:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} X_i}{13} = -4.207 \quad [cm] \quad (6.82)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{13} (X_i - (-4.207))^2}{12} = 4.945 \quad (6.83)$$

b) Pentru cazul Delay = 0.25s, s-a luat în calcul intervalul [0.8; 1.8]m:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{11} X_i}{11} = -3.972 \quad [cm] \quad (6.84)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{11} (X_i - (-3.972))^2}{10} = 4.950 \quad (6.85)$$

c) Pentru cazul Delay = 0.5s, s-a luat în calcul intervalul [0.8; 1.5]m:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^8 X_i}{8} = -4.237 \quad [cm] \quad (6.86)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (X_i - (-4.237))^2}{7} = 13.136 \quad (6.87)$$

Se pot consemna observațiile:

- Valori apropiate ale abaterilor de la traiectorie în lipsa identificării obstacolului. Cu toate acestea în prima variantă abaterea de la traiectorie este aproximativ constantă pe toata lungimea intervalului. Se poate concluziona că algoritmul admis pentru conducerea robotului în această porțiune este corespunzător.
- Valorile abaterilor medii pentru porțiunea de traiectorie cu prezența obstacol scot în evidență valori apropiate. Abaterea cea mai mică este corespunzătoare variantei b) cu Delay-ul 0.25s.
- Este necesară o analiză suplimentară a traiectoriei rezultată în prezența obstacolului și luarea în considerare a optimizării parametrilor cinematici pentru abateri minime.

C. Analiza rezultatelor și concluzii

Pentru compararea traiectoriilor realizate de robotul mobil s-a folosit criteriul descris de raportul dintre suprafețele rezultate din traiectoria robotului. Suprafața datorată traiectoriei robotului corespunde suprafeței dintre traiectoria teoretică și cea reală.

Suprafața corespunzătoare obstacolului este:

$$A_{00} = 180 \quad [cm^2] \quad (6.88)$$

Pentru realizarea acestui lucru, fiecare suprafață descrisă de traiectoria robotului mobil a fost împărțită în mai multe părți și s-a calculat, cu aproximație, aria fiecărei părți în parte după care s-au însumat, figura 6.52.

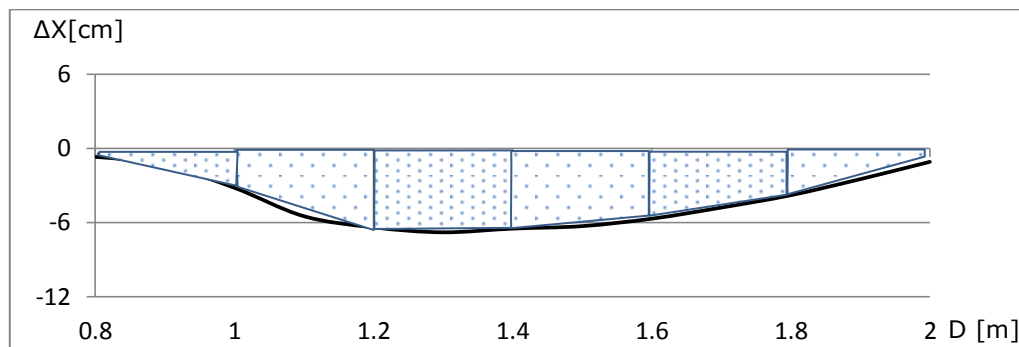


Figura 6.52. Calculul suprafețelor.

Pentru cazul Delay = 0, aria descrisă de robotul mobil a fost calculată pe intervalul [0.8; 2]m al lungimii traseului:

$$A_0 = 538 \quad [cm^2] \quad (6.89)$$

și, respectiv:

$$\Gamma_{d=0} = \frac{A_0}{A_{00}} = 2.99 \quad (6.90)$$

Pentru cazul Delay = 0.25s, aria descrisă de robotul mobil a fost calculată pe intervalul [0.8; 1.8]m al lungimii traseului:

$$A_{0.25} = 432 \quad [cm^2] \quad (6.91)$$

și, respectiv:

$$\Gamma_{d=0.25} = \frac{A_{0.25}}{A_{00}} = 2.4 \quad (6.92)$$

Pentru cazul Delay = 0.5s, aria descrisă de robotul mobil a fost calculată pe intervalul [0.8; 1.5]m al lungimii traseului:

$$A_{0.5} = 343 \quad [cm^2] \quad (6.93)$$

și, respectiv:

$$\Gamma_{d=0.5} = \frac{A_{0.5}}{A_{00}} = 1.905 \quad (6.94)$$

Se pot consemna următoarele observații:

- Aria încadrată între traiectoria reală și cea impusă diferă în cele trei variante de lucru. Ierarhizarea variantelor, în ordine crescătoare a ariei, este: v1, v2 și v3;
- Și în acest caz este sesizabilă influența Delay-ului introdus. Acest criteriu al ariei trebuie corelat cu observațiile anterioare privind lungimea traiectoriei reale și abaterea maximă realizată.

6.3. Concluzii

Analiza experimentală desfășurată și observațiile enunțate anterior permit consemnarea unor concluzii finale:

- Compararea multicriterială a variantelor și alegerea variantei optime poate face obiectul unei abordări ulterioare;
- Au fost confirmate considerațiile teoretice admise și posibilitatea optimizării traiectoriei;
- S-a demonstrat posibilitatea reală și credibilă a utilizării senzorilor ultrasonici în navigarea roboților mobili

7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

7.1. Concluzii finale

Dezvoltarea accelerată a tehnicii a condus la realizarea diferitelor tipuri de roboți mobili în variante constructive și funcționale diverse cu scopul de a fi implementați cât mai bine în diferite domenii de activitate: medicină, agricultură, etc.

Obiectivul tezei de doctorat și programul de cercetare elaborat au avut în vedere aceste aspecte.

Am desfășurat activitatea prevăzută în planul de cercetare în cadrul Laboratorului de Senzori și Actuatoare al Departamentului de Mecatronică. Conform acestui program propus, aspectele teoretice și experimentale au fost structurate în două direcții de analiză. O direcție a vizat elementele senzoriale cu utilitate în construcția roboților mobili având ca scop obținerea de informații din mediul de lucru. A doua direcție a vizat dezvoltarea unei structuri pentru un robot mobil și analiza teoretică și experimentală a acesteia.

Din analiza stadiului actual de integrare a elementelor senzoriale a rezultat o utilitate actuală a senzorilor ultrasonici și în infraroșu pentru a detecta obstacole în mediul de lucru.

În cadrul primei direcții de cercetare și în scopul unei analize extinse am ales pentru experiment două elemente senzoriale cu ultrasunete Parallax Ping și XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 și un element senzorial în infraroșu Sharp GP2Y0A02YK.

Pentru evaluarea credibilă a mărimii de referință – distanța dintre un senzor și un obstacol – am utilizat un telemetru cu laser Bosch DLE 70 Professional.

Achiziția informațiilor a avut suport hardware și software adecvat. Am apelat la componente Arduino și componente National Instruments. Prelucrarea informațiilor achiziționate a fost realizată în medii de lucru adecvate problemelor analizate: Matlab, Excel, LabView.

Experimentele au fost dezvoltate în standuri experimentale organizate, scopului urmărit prin programul de cercetare. Obstacolele au avut forme geometrice diferite - plane sau cilindrice -, culori diferite și poziționate în spațiul de lucru în mod diferit.

În urma analizei teoretice și experimentale efectuate se pot menționa următoarele:

- senzorii ultrasonici și în infraroșu pot fi folosiți cu succes în integrare sistemului de comandă al unui robot mobil ce ar urma să evolueze într-un mediu nestructurat și cu vizibilitate redusă datorită caracteristicilor acestor senzori;
- senzorii ultrasonici sunt influențați de temperatura mediului. Aplicând indicii de corecție, erorile se reduc semnificativ;
- semnalele maxime ale elementului senzorial în infraroșu Sharp GP2Y0A02YK diferă în funcție de culoarea obiectului detectat.

Abordarea celei de-a doua direcții de cercetare a debutat printr-un studiu bibliografic accentuat. Dintre variantele disponibile am ales o variantă de lucru cu sistem motric pe puntea spate și sistem de direcție pe roțile față. Sistemul de comandă a fost dezvoltat în jurul plăcii Arduino Uno. Am integrat în structura robotului doi senzori ultrasonici din seria constructivă analizată. Un senzor oferă informația referitoare la poziția robotului față de un obstacol lateral iar cel de-al doilea informația referitoare la prezența unui obstacol pe traiectoria curentă a robotului.

Considerentele teoretice referitoare la modelul teoretic au fost confirmate de analiza experimentală.

Desfășurarea experimentelor – în mai multe variante de studiu – au permis prelucrarea datelor obținute, compararea acestora și enunțarea unui criteriu de alegere optimală a celei mai bune variante de navigare. Varianta cu abaterile cele mai mici a fost cea în care în programul de lucru al robotului mobil s-a prevăzut un timp de întârziere de 0.25 secunde între momentul detectării obstacolului lateral și momentul de reacție a sistemului de direcție.

Pe baza precizărilor făcute și a concluziilor enunțate se poate considera că obiectivul tezei de doctorat - Analiza teoretică, constructivă și experimentală a unui robot mobil, autonom, destinat cercetărilor dintr-un mediu nestructurat - a fost atins și activitatea de cercetare desfășurată conține contribuții originale.

7.2. Contribuții originale ale tezei

În raport cu obiectivul principal al tezei și pe baza conținutului teoretic și cel experimental din cadrul volumului tezei elaborate, pot fi evidențiate următoarele contribuții personale:

A. Contribuții la cercetarea fundamentală

- Analiza literaturii de specialitate referitoare la filozofia mecatronică;
- Sinteza programului de cercetare în conformitate cu obiectivul principal al tezei și enunțarea obiectivelor operaționale;
- Filozofia mecatronicii, a fizicii fenomenelor acustice și a radiației electromagnetice ca și componentă a integrării sinergice;
- Analiza conceptelor de ignoranță, incertitudine și probabilitate a fenomenelor aleatorii și modul de corelare cu localizarea multisenzorială a unui obstacol;
- Dezvoltarea modelelor matematice ale caracteristicilor directe și inverse pentru senzorii ultrasonici: Parallax Ping și XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 și a senzorului în infraroșu Sharp GP2Y0A02YK;
- Sistematizarea aspectelor de funcționare ale senzorilor ultrasonici și în infraroșu și analiza comparativă între rezultatele teoretice și cele obținute experimental;
- Analiza teoretică a robotului mobil ca structură, identificarea parametrilor necesari modelului matematic al sistemelor de acționare și direcție; simularea funcționării sistemelor acționare și direcție, compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale și enunțarea concluziilor;
- Enunțarea unor criterii privind compararea traiectoriei realizate de un robot mobil în prezența unui obstacol;

- Dezvoltarea proiectului experimental, enunțarea concluziilor și diseminarea rezultatelor cercetării.

B. Contribuții la cercetarea aplicativă

- Realizarea suportului material pentru cercetarea experimentală inițială și integrarea acestuia într-un sistem de achiziție de date;
- Desfășurarea unor activități experimentale vizând comportamentul elementelor senzoriale – ultrasonice și în infraroșu – în procesul aleatoriu de localizare a unui obstacol:
 - diferite distanțe *senzor-obiect*,
 - obstacole de formă geometrică diferită,
 - obstacole cu aceeași formă geometrică, dar de culori diferite,
 - temperaturi de lucru diferite în mediul analizat;
- Desfășurarea unor activități experimentale vizând estimarea unor parametri de situație – poziție și orientare – pentru obstacole din spațiul de lucru al unui robot mobil;
- Desfășurarea unei activități experimentale și de identificare a parametrilor componentelor integrate într-un robot mobil;
- Analiza experimentală a navigării robotului mobil studiat pe o traiectorie impusă și în prezența unui obstacol.

7.3. Diseminarea rezultatelor cercetărilor

Rezultatele cercetărilor efectuate în vederea elaborării tezei de doctorat au fost valorificate prin publicarea unui număr de 7 lucrări ca prim autor la manifestări naționale, internaționale și în reviste de specialitate, astfel:

A. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-Wos (ISI) Proceedings

1. Stanescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., *Random issues in workspace analysis for a mobile robot*, ISI Proc. 2014, 10th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2014 Congress, Norvegia, Narvik, ISBN: 978-0-7354-1276-7, vol. 1637, Pag. 1254, 2014, 15-18 Iulie 2014.

2. Stanescu T., Sandru L. A., Dolga V., *Studies Regarding Detection of Obstacles with Different Geometric Shape Using Parallax Ping Sensor*, IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2015, 21 - 23 Mai 2015, Timișoara.

3. Stanescu T., Savu D., Dolga V., *Rotation Angle Determination of a Rectangular Object Using an Infrared Sensorial System*, The 24th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2015, 27- 29 Mai 2015, București.

4. Stanescu T., Moldovan C., Dolga V., Pop C., *Object's colour influence on the reflective infrared sensor parameters*, 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, IFToMM 2015, Taipei, Taiwan, 25-30 October, 2015. (acceptată spre publicare)

B. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

5. Stanescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., *Probabilistic aspects in mobile robots navigation*, 6th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical engineering and New High-Tech Products Development, Mecahitech 2014, 4 - 5 Septembrie, București, lucrare aparută în revista Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, ISSN 1584-5982, Editura Cefin, București, România, Nr.45, Pag. 125-130.

6. Stanescu T., Moldovan C., Dolga V., *Effects of the environment temperature on the characteristic of parallax ping ultrasonic sensor*, Robotica & Management, Vol 10, nr. 2, Decembrie 2014.

7. Stanescu T., Enache B., Savu D., Sandru L., Dolga V., *Theoretical and Experimental Analysis of Steering Mechanism of a Mobile Robot*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 5, Issue 4, New Delhy, India, April 2015 (ISSN 2250 – 2459 (Online)) pag. 597 – 600.

7.4. Direcții viitoare de cercetare în domeniu

În urma desfășurării activității de cercetare, a rezultatelor obținute și a analizei calitative și cantitative desfășurate, consider că sunt actuale și de viitor următoarele direcții de cercetare:

- Cercetări privind implementarea unui sensor de temperatură alături de senzorul ultrasonic în sistemul de comandă al robotului mobil;
- Cercetări privind implementarea unui senzor de culoare alături de senzorul infraroșu utilizat în experimente cu scopul de a diminua erorile de determinare;
- Cercetări privind capabilitatea integrării și a altor categorii de senzori pentru localizarea obstacolelor, fuziunea informației și construcția hărții mediului nestructurat;
- Cercetări privind modelarea configurației senzorilor;
- Cercetări privind aplicații ale roboților mobili în diferite domenii de activitate.

BIBLIOGRAFIE

1. [Auer, 2010] Auer E., Luther W., Rebner G., Limbourg P., *A Verified MATLAB Toolbox for the Dempster-Shafer Theory*, Proceedings of the Workshop on the Theory of Belief Functions, Brest, April 2010.
2. [Barvinschi, 2004] Barvinschi F., *Fizică Generală*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2004, ISBN 973-638-164-1.
3. [Berian, 2010] Berian, S., *Cercetari privind caracterul transdisciplinar al mecatronicii*, Teza de doctorat, Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, 2010.
4. [Berian, 2011] Berian, S., *Transdisciplinaritate și mecatronică*, Editura Curtea Veche, București, 2011.
5. [Bekey, 2005] Bekey, G.A., "Autonomous Robots", MIT Press, ISBN-10: 0-262-02578-7, Massachusetts, 2005.
6. [Bison, 1997] Bison P., Chemello G., Sossai C., Trainito G., *A Possibilistic Approach to Sensor Fusion in Mobile Robotics*, Ladse b- C NR, Italia, 1997.
7. [Bîtea, 2012] Bîtea A., *Analiza și sinteza teoretică și experimentală a unui sistem mecatronic autonom mobil*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, Facultatea de Mecanică, 2012.
8. [Breaz, 2007] Breaz N., Crăciun M., Gașpar P., Miroiu M., Paraschiv-Munteanu I. *Modelarea Matematică prin Matlab*, 2007.
9. [Burlina, 1992] Burlina P. and colab, *Probabilistic navigation methods for uncertain and dynamic environments*, Computer Vision Laboratory, Univ. Maryland, 00201564.pdf, p.312-315, 1992.
10. [Burrus, 2003] Burrus N., Lesage D., *Theory of Evidence (DRAFT)*, Technical Report no0307 - 07/07/03, Laboratoire de Recherche et Développement de l'Épita, France.
11. [Cepisca, 2004] Cepisca C., Andrei H., Stancu I., Dogaru V., Argatu F., *Analiza perturbațiilor electromagnetice de bandă largă la lămpile cu vapori de sodium*, 4th Internațional Symposium "Advanced Topics in Electrical Engineering" ATEE 2004, November 25-26, 2004, Bucharest, pp.215-222.
12. [Cheng, 2000] Cheng Y-L., *Uncertainties in Fault Tree Analysis*, 3-1-3.pdf, Department of Information Management, Hsuan Chuang College, 48, Hsuan-Chuang Rd., HsinChu, Taiwan, R.O.C., 2000.
13. [Cretu, 1984] Crețu T., *Fizica generala*, vol.1, Editura Tehnică, București, 1984.

14. [Debon, 1999] Debon R., Solaiman B., Cauvin J.M., Roux C., *Fusion de l'information : fusion de données et de modèles appliqués à la segmentation d'images écho-endoscopiques*, Dix-septième colloque GRETSI, Vannes, p.1065-1068, 13-17 septembre 1999.
15. [Dolga, 1999] Dolga V., *Senzori și traductoare*, Editura Eurobit, Timișoara, 1999.
16. [Dolga, 2007] Dolga V., *Proiectarea sistemelor mecatronice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2007, ISBN 978-973-625-573-1.
17. [Dolga, 2008] Dolga V., *Sisteme de achiziții de date, interfețe și instrumentație virtuală*, Editura Politehnica, Timișoara, 2008.
18. [Dumitriu, 2006] Dumitriu A., *Mecatronică*, Vol.1, Editura Universității „Transilvania”, Brașov, 2006.
19. [Dongheui, 2006] Dongheui, Lee, Woojin Chung, "Discrete-Status-Based Localization for Indoor Service Robots", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.53, No.5, 2006.
20. [Dillman, 2007] Dillman, R., Albiez, J., Gassmann, B., Kerscher, T., Zollner, M., "Biologically Inspired Walking Machines: Design, Control and Perception", Phil. Trans.R. Soc., A 2007 365, 133-151, 2007.
21. [Dubois, 2011] Dubois D., Prade H., *Possibility Theory and its Applications: Where Do we Stand?*, IRIT-CNRS, Universite Paul Sabatier, 31062 Toulouse Cedex 09, France, 2011.
22. [Ganesh, 2012] Ganesh C., Abhi B., Anand V. P., Aravind S., Nandhini R., and Patnaik S. K., *DC Position Control System – Determination of Parameters and Significance on System Dynamics*, ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, Vol. 03, No. 01, Feb 2012.
23. [Gorie, 2014] Gorie N., *Contribuții la studiul unui sistem mecatronic pentru recuperarea persoanelor cu dizabilități*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2014.
24. [Gruescu, 1999] Gruescu C., Pommersheim A., *Optica tehnica*, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, 1999, ISBN 973-9400-45-0.
25. [Guth, 1991] Guth M. A. S., *A Probabilistic Foundation for Vagueness & Imprecision in Fault-Tree Analysis* - Ieee Transactions On Reliability, Vol. 40, No. 5 , 1991, December.
26. [Gutierrez, 1998] Gutierrez-Osuna R. and colab., *Modeling of ultrasonic range sensors for localization of autonomous mobile robots*, IEEE Trans. On Ind. Electronics, vol.45, no.4, august 1998, p.654 – 662.
27. [Hall, 1997] Hall D. L., Llinas J., *An Introduction to Multisensor Data Fusion*, Proc. of the IEEE, vol. 85, no. 1, January 1997, p.6-23.

28. [Hallberg, 2012] Hallberg R., *Target classification based on kinematics*, Institutionen för systemteknik Department of Electrical Engineering, Linköping, 2012.
29. [Handjali, 2004] Hadjali A., *A Possibility Theory-Based Approach to the Handling of Uncertain Relations between Temporal Points*, Proceedings of the 11th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME'04), 2004.
30. [Hubinsky, 2005] Hubinsky P., Jurisica L., Vranka B., *Genetic algorithm based method of elimination of residual oscillation in mechatronic systems*, Kibernetika –v. 41, (2005), number 5, pages 623 – 636.
31. [Javier, 2010] Javier R. Movellan, DC motors, 2010, dc.pdf, <http://mplab.ucsd.edu/tutorials/dc.pdf>.
32. [Karen, 2012] Karen G.-B., *Assessing the Fit of Regression Models*, Cornell Statistical Consulting Unit, <https://www.cscu.cornell.edu/news/statnews/stnews68.pdf>.
33. [Kelly, 2013] Kelly A., *Mobile Robotics. Mathematics, Models and Methods*, Cambridge University Press, 2013, ISBN 978-1-107-03115-9.
34. [Kirckhner, 2001] Kirckhner J., *Data Analysis Toolkit #10: Simple linear regression*, 2001, http://seismo.berkeley.edu/~kirckhner/eps_120/Toolkits/Toolkit_10.pdf
35. [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>.
36. [Larionova, 2011] Larionova S., A.T. de Almeida, Marques L., *Sensor fusion for automated landmine detection on a mobile robot*, Woodhead Publishing Limited, 2011.
37. [Li, 2011] Li X., Dezert J., Smarandache F., Huang X., *Evidence supporting measure of similarity for reducing the complexity in information fusion*, Information Sciences 181 (2011) 1818–1835.
38. [Lovasz, 2013] Lovasz, E. C., Rădulescu, C., *Robotică avansată*, Ed. Politehnica, Timișoara, 2013.
39. [de Loubens] de Loubens G. et al., *Magnetic resonance studies of the fundamental spin-wave modes in individual submicron Cu/NiFe/Cu perpendicularly magnetized disks*. Phys. Rev. Lett., 98 (12), 127601 (2007).

40. [de Luca, 1998] de Luca A., Oriolo G., Samson C., *Feedback Control of a Nonholonomic Car-Like Robot*, chap.4.pdf, Springer, ISBN 3-540-76219-1, 1998.
41. [Luca, 2007] Luca D., Stan C., *Oscilații și unde*, Curs, Universitatea Alexandru Ioan Cuza, Iași, 2007.
42. [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.
43. [Maniu, 2003] Maniu I., Dolga V., *Sisteme de acționare*, Editura Politehnica, Timisoara, 2003.
44. [Mărginean, 2005] Mărginean N., *On the Handling of Uncertainty*, Revista Informatica Economică, nr. 4 (36)/2005, p.102 – 107.
45. [Mătieș, 1998] Mătieș V., *Mecatronică*, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1998.
46. [Mătieș, 2002] Mătieș, V., Mândru, D., Mirescu, S.C., Bălan, R., Tătar, O., Rusu, C., *Tehnologie și educație mecatronică*, Editura Economică Preuniversitaria, București, 2002.
47. [Mihăilescu, 1958] Mihăilescu N., Bălan V., Bunescu P., *Memorator matematic și tehnic*, editura Tehnica, Bucuresti, 1958.
48. [Mihoc, 1982] Mihoc Ghe., *Modele de analiză statistică*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982.
49. [Mondoc, 2014] Mondoc A., *Analiza teoretică și experimentală a aspectelor aleatorii din scena de lucru a unui robot mobil*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din Timișoara, 2014.
50. [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.
51. [Nicolăescu, 2011] Nicolăescu N. S., *Contribuții privind monitorizarea securității rețelelor de calculatoare*, Teză de doctorat, București, 2011.
52. [Nițulescu, 2002] Nițulescu M., *Sisteme robotice cu capacitate de navigație*, Editura Universitară Craiova, 2002.
53. [Noykov, 2007] Noykov Sv., Ch. Roumenin Ch., *Occupancy grids building by sonar and mobile robot*, Robotics and Autonomous Systems 55 (2007) 162–175.
54. [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.

55. [Olson, 2000] Olson C.F., *Probabilistic self-localization for mobile robots*, IEEE Trans. On Robotics and Automation, vol. 16, no.1, February 2000, p.54-65
56. [Oros, 2011] Oros C.D., Dinu S., *Optica geometrica si electromagnetica*, Editura Valahia University Press, Targoviste, 2011, ISBN 978-606-603-006-9.
57. [Osaci, 2014] Osaci M., Jitianu S., *Fizica Generala*, Editura Politehnica, Timisoara, 2014, ISBN 978-606-554-811-4.
58. [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.
59. [Perju, 2006] Perju D., *Măsurări mecanice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2006.
60. [Prisăcaru, 2011] Prisăcaru G., Bercea M., Grănescu M., Ciupe V., *Mecatronica aplicata*, Editura Academiei Oamenilor de Stiinta din Romania, Bucuresti, 2011, ISBN 9786068371436.
61. [Rakowsky, 2007] Rakowsky U., *Fundamentals of the Dempster-Shafer theory and its applications to system safety and reliability modelling*, RTA # 3-4, 2007, December, p.173-185.
62. [Regtien, 2012] Regtien P., *Sensors for Mechatronics*, Elsevier, 2012, ISBN: 978-0-12-391497-2
63. [Rocco, 2010] Rocco P., Grusso G., Magnani G., *Mechatronic model of oscillations in hybrid stepper motors*, 2010 IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, July 6-9, 2010
64. [Roduit, 2009] Roduit P., *Trajectory Analysis using Point Distribution Models: Algorithms, Performance Evaluation, and Experimental Validation using Mobile Robots*, Phd Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
65. [Rozhok, 2008] Rozhok A., *Orientation and Navigation in Vertebrates*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-78718-1, 2008.
66. [Richard, 1994] Richard M. Murray, Zexiang Li, S. Shankara Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press 1994, ISBN 0-8943-7981-4-1993.
67. [Rugar, 2004] Rugar D. et al., *Single spin detection by magnetic resonance force microscopy*. Nature, 430, 329 (2004).
68. [Rusu, 1985] Rusu O., *Propagarea undelor elastice*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1985.
69. [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).



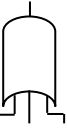
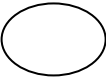

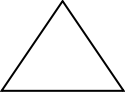
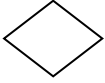
70. [Sidles, 1991] Sidles A., *Noninductive detection of single-proton magnetic resonance*. Appl. Phys. Lett., 58(24):2854 (1991).
71. [Smets, 1996] Smets P., *Imperfect Information: Imprecision and Uncertainty*, In Uncertainty Management in Information Systems, pp 225-254, 1996.
72. [Sprunk, 2013] Sprunk C., Tipaldi G. D., Cherubini A., Burgard W., *Lidar-based Teach-and-Repeat of Mobile Robot Trajectories*, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) November 3-7, 2013. Tokyo, Japan.
73. [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>.
74. [Stănescu, 2014a] Stanescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., *Probabilistic aspects in mobile robots navigation*, 6th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical engineering and New High-Tech Products Development, Mecahitech 2014, 4 - 5 Septembrie, București, *lucrare aparută în revista Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, ISSN 1584-5982, Editura Cefin, București, România, Nr.45, Pag. 125-130.
75. [Stănescu, 2014b] Stanescu, T., Mondoc, A, Dolga, V., *Random issues in workspace analysis for a mobile robot*, ISI Proc. 2014, 10th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2014 Congress, Norvegia, Narvik, ISBN: 978-0-7354-1276-7, vol. 1637, Pag. 1254, 2014, 15-18 Iulie 2014.
76. [Stănescu, 2014c] Stanescu T., Moldovan C., Dolga V., *Effects of the environment temperature on the characteristic of parallax ping ultrasonic sensor*, Robotica & Management, Vol 10, nr. 2, Decembrie 2014.
77. [Stănescu, 2015d] Stanescu T., Sandru L. A., Dolga V., *Studies Regarding Detection of Obstacles with Different Geometric Shape Using Parallax Ping Sensor*, IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2015, 21 - 23 Mai 2015, Timisoara.
78. [Stănescu, 2015e] Stanescu T., Savu D., Dolga V., *Rotation Angle Determination of a Rectangular Object Using an Infrared Sensorial System*, The 24th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2015, 27- 29 Mai 2015, București.
79. [Stănescu, 2015f] Stanescu T., Enache B., Savu D., Sandru L., Dolga V., *Theoretical and Experimental Analysis of Steering Mechanism of a Mobile Robot*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 5, Issue 4, New Delhy, India, April 2015 (ISSN 2250 - 2459 (Online)) pag. 597 - 600.

-
80. [Stănescu, 2015g] Stănescu T., Moldovan C., Dolga V., Pop C., *Object's colour influence on the Reflective Infrared Sensor Parameters*, 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, IFToMM 2015, Taipei, Taiwan, 25-30 October, 2015.
 81. [Tătar, 2007] Tătar O., Mândru D., Breaz V. – *Miniature robot with applications in biomedical engineering*, Annals of the Oradea Univ., Fasc. of Manag. And Tech. Eng., 2007, Pag.1057 - 1062
 82. [Tolgay, 2003] Tolgay K., Ilyas E., *Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments*, Energy Conversion and Management, 2003.
 83. [Tzafestas, 2014] Tzafestas S. G., *Introduction to Mobile Robot Control*, Elsevier, 2014.
 84. [Vannoorenberghe, 2001] Vannoorenberghe P., *Un état de l'art sur les fonctions de croyance appliquées au traitement de l'information*, Perception, Systèmes, Information, FRE 2645 CNRS Université de Rouen, UFR des Sciences Place Emile Blondel, 76821 Mont Saint-Aignan Cedex, article03_02_01.pdf
 85. [Vâlcovici, 1968] Vâlcovici V., Bălan F., Voinea R., *Mecanică teoretică*, Ed. Tehnică, Bucuresti, 1968.
 86. [Virgala, 2013] Virgala I., Kelemen M., *Experimental Friction Identification of a DC Motor*, International Journal of Mechanics and Applications 2013, 3(1): 26-30.
 87. [Yaonan, 2011] Yaonan W., Yimi Y., Xiaofang Y., Yi Z., Yuanli Z., Feng Y., Lei T., *Autonomous mobile robot navigation system designed in dynamic environment based on transferable belief model*, Measurement, Volume 44, Issue 8, October 2011, Pages 1389-1405.
 88. [Yi, 2009] Yi J., Zhang J., Song D., Jayasuriya S., Liu J., - *Kinematic modeling and analysis of skid-steered mobile robots with applications to low-cost inertial-measurement-unit-based motion estimation*, IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 5, october 2009, p.1087.
 89. [Wei, 2012] Wei W., *DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses*, in Modelling and Simulation in Engineering, Volume 2012, Article ID 189757, 5 pages.
 90. [Zaccarian, 2012] Zaccarian, L., DC motors: dynamic model and control techniques, In: Lecture Notes., Roma, Italy, 2012.
<http://control.disp.uniroma2.it/zack/LabRob/DCmotors.pdf>.
 91. [Zaharie, 1993] Zaharie I., *Mecanica analitică*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1993.

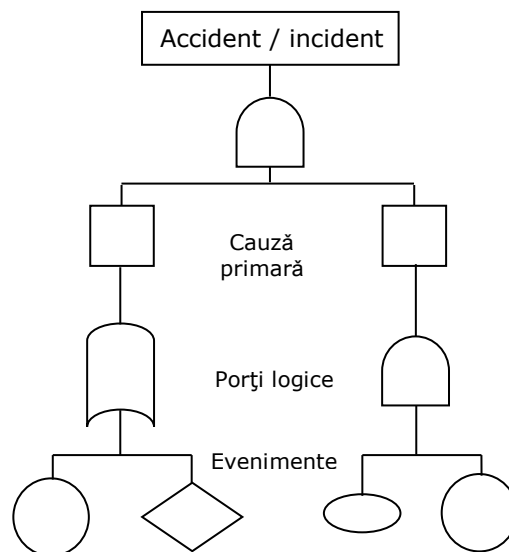
92. [Zayrit, 2012] Zayrit K., *Fusion de données imparfaites dans un système d'information agro-environnemental*. Une approche basée croyance, 2012_D2_2-KarimaZayrit.pdf
93. [***1.1.] <http://www.dex.ro/mecatronica>, accesat la 16. 03. 2013.
94. [***1.2.] <http://ro.wikipedia.org/wiki/Mecatronica>, accesat la 16. 03. 2013.
95. [***1.3.] <http://mctr.mec.upt.ro/>, accesat la 16. 03. 2013.
96. [***1.4.] <http://mdm.utcluj.ro/mecatronica.html>, accesat la 16. 03. 2013.
97. [***1.5.] *Metode și tehnici de inovare și creativitate*, curs în programul POSDRU, FlexFORM (Program de Formare Profesională Flexibilă pe Platforme Mecatronice), Timișoara, 2012.
98. [***1.6.] <http://mdm.utcluj.ro/Revista/capa.htm>
99. [***1.7.] <http://ro.wikipedia.org/wiki/Robot>.
100. [***1.8.] http://ro.wikipedia.org/wiki/Cele_trei_legi_ale_roboticii.
101. [***2.1.] www.dexonline.ro
102. [***2.2.] <http://www.oxspin.org/Spinmechatronics.htm>
103. [***2.3.] <http://www.afahc.ro/ro/facultate/cursuri/ccg/CristiManagementu%20spetului%20electromagnetic/C03%20-%20Propagarea%20undelor.pdf>
104. [***3.1.] <http://www.linguee.fr/francais-anglais/traduction/fusion+de+donn%C3%A9es.html>
105. [***6.1.] <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, accesat la data 20.02.2014.
106. [***6.2.] <https://www.parallax.com/>, accesat la data 20.02.2014.
107. [***6.3.] <http://www.imperatortravel.ro/2014/04/mic-ghid-de-vizitare-oman.html>, accesat 29.06.2015
108. [***6.4.] <http://www.adafruit.com/product/711>, accesat octombrie 2014.
109. [***6.5.] Steering Ackermann, www.racing-car-technology.com.au/SteeringAckerman4.doc, accesat la data 25.05.2015.
110. [***6.6] Ackermann Steering Principle, http://www.rctek.com/technical/handling/ackerman_steering_principle.html, accesat la data de 25.05.2015.

Anexa 3.

Metoda FTA are la bază o metodă grafică de conectare a defectelor posibile dintr-un sistem / proces într-o schemă logică de analiză. S-a dezvoltat inițial pentru analiza sistemelor electrice, fiind apoi abordată pentru siguranța sistemelor în general [Dolga, 2007].

	"Poarta" AND Semnalul de ieșire este prezent numai dacă toate semnalele de intrare sunt prezente simultan		Simbolul circular reprezintă evenimentul de bază
	"Poarta" SAU Semnalul de ieșire va fi prezent dacă unul sau mai multe semnale de intrare sunt prezente		Simbolul elipsă reprezintă o situație specială defintă de existența unui evinemenț sigur.
	Simbolul rectangular este principalul bloc pentru graful analitic		Simbolul triunghi semnifică transferul ramificației spre o altă locație
	Simbolul romb identifică un eveniment terminal nedevelopat. Acest lucru se datorează lipsei de informație sau semnificație.		

Un exemplu principal de arbore al evenimentelor, cu utilizarea simbolurilor anterioare, este prezentat în figura următoare:



Analiza cantitativă a evenimentelor se bazează pe algebra booleană generalizată pentru arborele sistemului analizat.

- Poarta "**ȘI**". Două evenimente (B) și (C) sunt intrări pentru evenimentul (A) prin intermediul porții "și":

$$p(A) = p(B) \cdot p(C)$$

Dacă trei evenimente (B, C, D) sunt intrări pentru evenimentul (A) probabilitatea acestuia va fi:

$$p(A) = p(B) \cdot p(C) \cdot p(D)$$

- Poarta "**SAU**". Două evenimente (B și C) sunt intrări pentru evenimentul (A) printr-o poartă "SAU":

$$p(A) = p(B) + p(C) - p(B) \cdot p(C)$$

Dacă trei evenimente (B, C și D) sunt intrări pentru evenimentul (A) prin intermediul porții "SAU", vom avea:

$$p(A) = p(B) + p(C) + p(D) - [p(B) \cdot p(C) + p(B) \cdot p(D) + p(C) \cdot p(D)] - p(B) \cdot p(C) \cdot p(D)$$

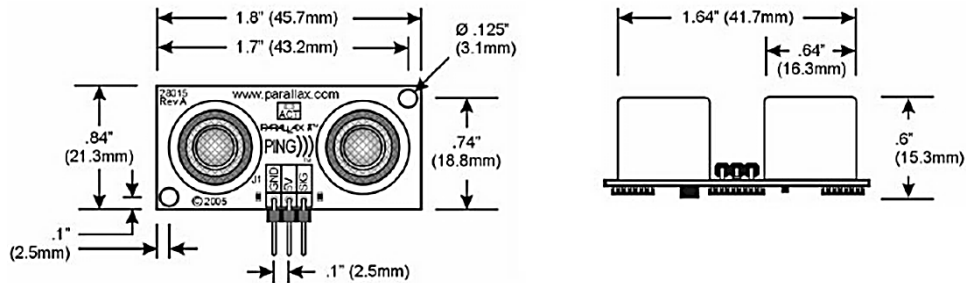
Procedura metodei FTA respectă următoarea etapizare:

- Identifică evenimentul de prim rang pentru a fi analizat;
- Identifică evenimentele sau seria de elemente care contribuie în mod direct la evenimentul de rang superior;
- Continuă aceste etape până la nivelul de bază;
- Realizează schema logică pe baza simbolurilor grafice utilizate și implementează modelul în cadrul soft-lui avut la dispoziție;
- Consideră situații alternative și propune soluții.

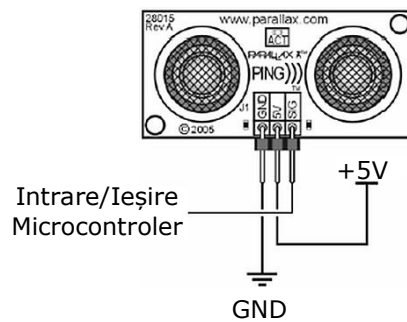
Anexa 4.1.

Caracteristicile senzorului ultrasonic Parallax Ping conform documentatiei www.parallax.com

A. Caracteristici dimensionale



B. Caracteristici de conectivitate electrică a senzorului

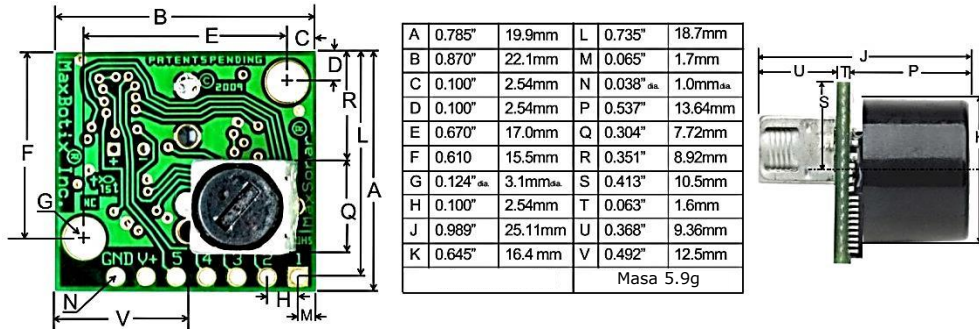
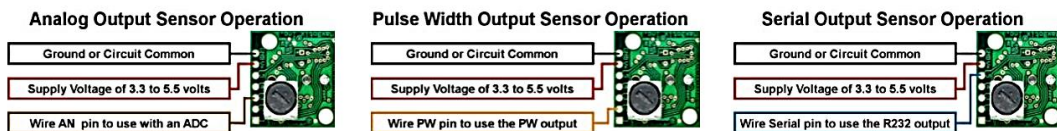


C. Caracteristici funcționale

Tensiune de alimentare	5V cc
Curent absorbit	30 mA tipic; 35 mA maxim
Domeniu de masurare	între 2 cm și 3 m
Impulsul de declansare a măsurării	2 μ s minim; 5 μ s tipic
Semnalul receptat ca ecou	între 115 μ s și 18.5 ms
Frecvența de baleiere	40 KHz pentru 200 μ s

Anexa 4.2.

Carcateristicile senzoru ultrasonic XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200 conform documentatiei <http://www.maxbotix.com/>

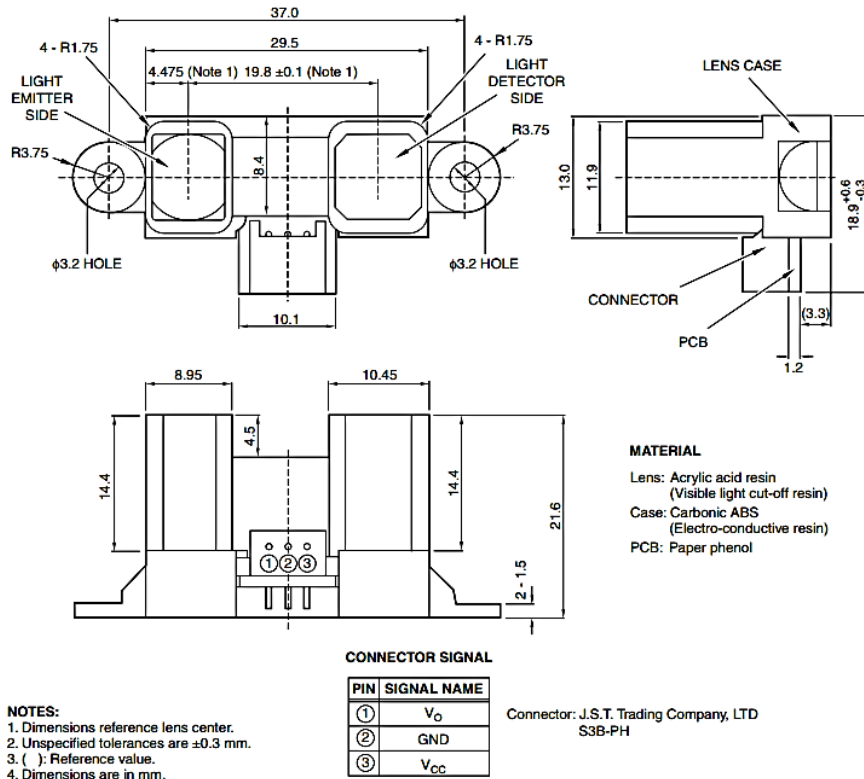
A. Caracteristici dimensionale**B. Caracteristici de conectivitate electrică a senzoru****C. Caracteristici funcționale**

- Tensiunea de alimentare cuprinsă între 3.3V și 5.5V
- Frecvența de baleiere: 42 KHz
- Poate fi conectat în toate cele trei moduri simultan

Anexa 4.3.

Caracteristicile senzoruului infraroșu Sharp GP2Y0A02YK conform documentației <http://www.sharpsme.com>

A. Caracteristici dimensionale și de conectivitate electrică



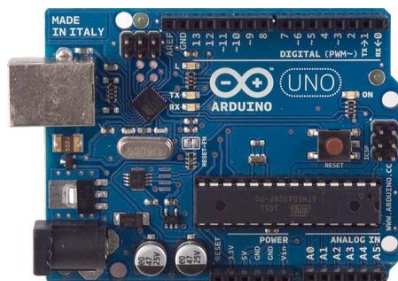
GP2Y0A02YK-S

B. Caracteristici funcționale

Tensiune de alimentare	între 4.5V și 5.5V cc
Curent absorbit	30 mA
Domeniu de măsurare	între 10 cm și 80 cm
Tipul ieșirii	Voltaj analogic
Temperatura de funcționare	între -10°C și 60°C
Masa	3.5g

Anexa 4.4.

Caracteristici tehnice ale plăcii de dezvoltare Arduino Uno conform documentatiei www.arduino.cc



Microcontroler	ATmega 328
Tensiune de operare	5V
Tensiune de intrare (recomandat)	7 - 12V
Tensiune de intrare (limită)	6 -20V
Pini I/O digitali	14
Pini analogici de intrare	6
Curent DC pe I/O pin	40mA
Curent DC pentru 3.3V pin	50mA
Memorie flash	32 KB
SRAM	2 KB
Lungime x latime	68.6mm x 53.4mm
Masa	25g

Anexa 4.5.

Caracteristicile telemetrului laser Bosch DLE 70 Professional conform documentatiei www.bosch-professional.com



Domeniu de măsurare	0.05 – 70 m
Precizie la măsurare	± 1.5 mm
Distanța minimă indicată	1 mm
Clasa laser	2
Tip laser	635 nm, <1mW
Clasa protecție praf, apă	IP 54
Alimentare	Baterii 4 x 1.5 V (AAA) Acumulatori 4 x 1.5 (AAA)
Durata de viață baterii, aprox. (mai puțin pentru acumulatori)	30 000 măsuratori individuale 5 000 măsuratori continue
Oprire automată după aprox.	20 s (raza laser) 5 min (aparat)
Adaptator stativ	1/4"
Dimensiuni	59 x 100 x 32 mm
Masa	cca. 180 g

Anexa 4.6.

Determinarea caracteristicii senzorului ultrasonic Parallax Ping

<i>Distanța reală [mm]</i>	<i>Distanța măsurată de senzorul Parallax Ping [mm]</i>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
100	100	101	99	99	99	100	100	99	99	99	99.5
200	199	199	199	199	199	199	198	199	199	199	198.9
300	293	293	294	293	293	294	293	293	294	293	293.3
400	391	391	392	392	392	390	390	391	392	391	391.2
500	494	492	492	492	492	492	492	493	492	493	492.4
600	592	592	592	592	592	592	592	592	592	592	592
700	689	689	689	690	689	689	689	690	689	689	689.2
800	789	789	789	788	788	788	789	789	789	789	788.7
900	884	884	884	884	884	888	883	884	884	884	884.3
1000	983	984	983	983	983	984	983	983	983	984	983.3
1100	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1083	1085	1085	1084.8
1200	1187	1187	1187	1187	1187	1187	1187	1188	1187	1188	1187.2
1300	1278	1278	1278	1278	1278	1278	1278	1278	1278	1278	1278
1400	1389	1389	1389	1389	1389	1389	1389	1389	1389	1389	1389
1500	1482	1482	1482	1483	1483	1483	1483	1482	1482	1482	1482.4

Anexa 4.7.

Caracteristici tehnice ale dispozitivului NI USB-6221 conform www.ni.com



Technical Sales
(866) 531-6285
orders@ni.com

Requirements and Compatibility | Ordering Information | Detailed Specifications | Pinouts/Front Panel Connections
For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:36.0

M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs



- Up to 80 analog inputs at 16 bits, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at up to 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers

- Digital triggering supported; power supply included
- NI-PCIA 2 and NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- NI signal streaming for 4 high-speed data streams on USB
- NI-DAQmx driver software and LabVIEW SignalExpress LE included

Detailed Specifications

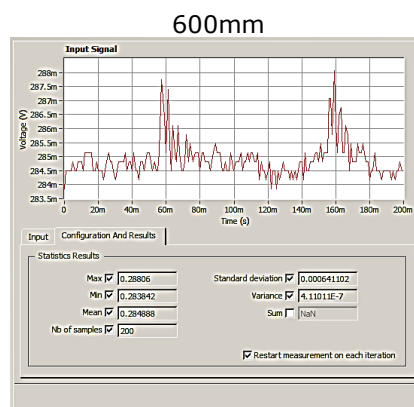
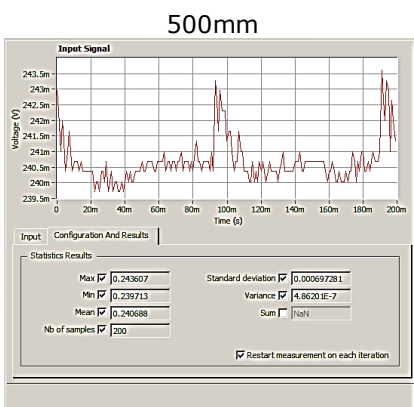
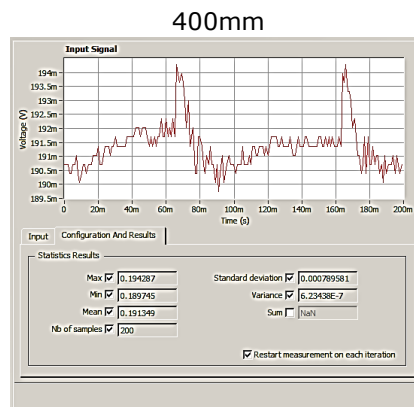
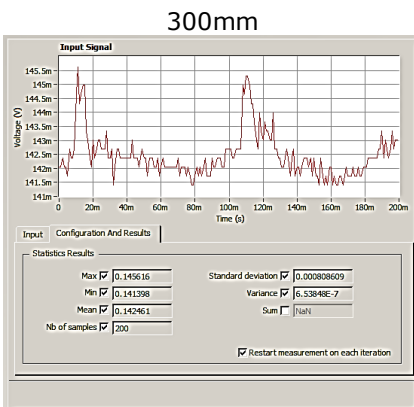
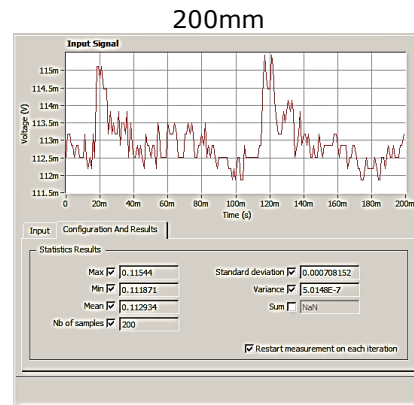
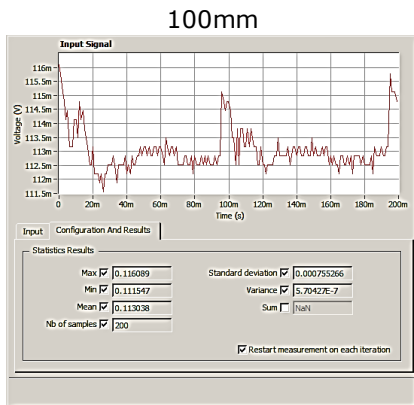
Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the *M Series User Manual* for more information about NI 622x devices.

Analog Input	
Number of channels	
NI 6220/6221	8 differential or 16 single ended
NI 6224/6229	16 differential or 32 single ended
NI 6225	40 differential or 80 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the <i>AI Absolute Accuracy Table</i>
Sampling rate	
Maximum	250 kS/s single channel, 250 kS/s multi-channel (aggregate)
Minimum	No minimum
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC
Input range	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	±11 V of AI GND
CMRR (DC to 50 Hz)	92 dB
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω

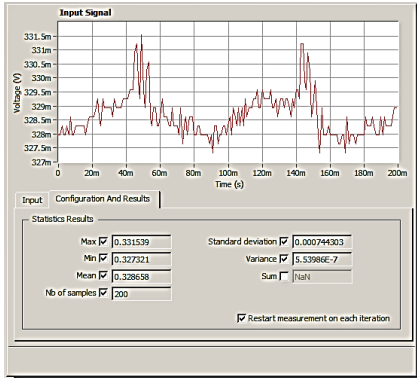
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	± 100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB ¹
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	
PCI/PCI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
Overvoltage protection (AI <0..79>, AI SENSE, AI SENSE 2)	
Device on	± 25 V for up to two AI pins
Device off	± 15 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	± 20 mA max/AI pin
¹ For USB-6225 devices, channel AI <0..15> crosstalk to channel AI <64..79> is -71 dB; applies to channels with 64-channel separation, for example, AI (x) and AI (x + 64).	
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
± 90 ppm of step (± 6 LSB)	4 μ s convert interval
± 30 ppm of step (± 2 LSB)	5 μ s convert interval
± 15 ppm of step (± 1 LSB)	7 μ s convert interval
NI 6221/6225	2
NI 6229	4
DAC resolution	16 bits
DNL	± 1 LSB
Monotonicity	16 bit guaranteed
Maximum update rate	
1 channel	833 kS/s
2 channels	740 kS/s per channel
3 channels	666 kS/s per channel
4 channels	625 kS/s per channel
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Output range	± 10 V
Output coupling	DC
Output impedance	0.2 Ω
Output current drive	± 5 mA
Overdrive protection	± 25 V
Overdrive current	10 mA
Power-on state	± 20 mV ²
Power-on glitch	400 mV for 200 ms
Output FIFO size	8,191 samples shared among channels used
Data transfers	
PCI/PCI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
AO waveform modes:	
<ul style="list-style-type: none"> • Non-periodic waveform • Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO • Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update 	
Settling time, full scale step 15 ppm (1 LSB)	6 μ s
Slew rate	15 V/ μ s
Glitch energy	
Magnitude	100 mV

Anexa 4.8.

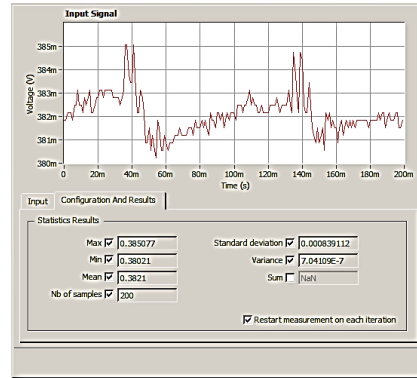
Datele experimentale preluate cu senzorul XL-MaxSonar-EZ/AE MB1200



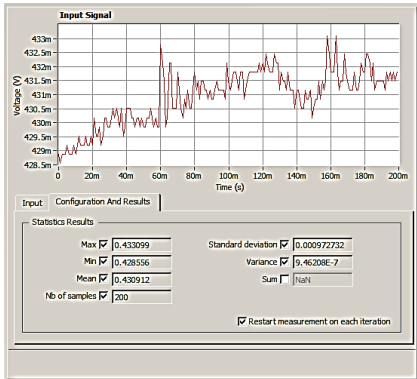
700mm



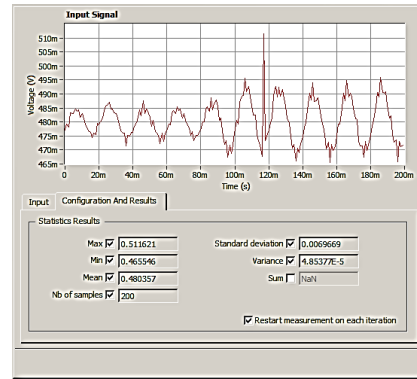
800mm



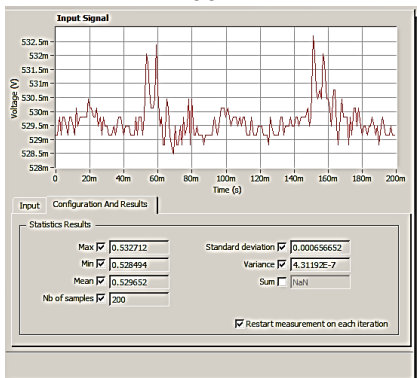
900mm



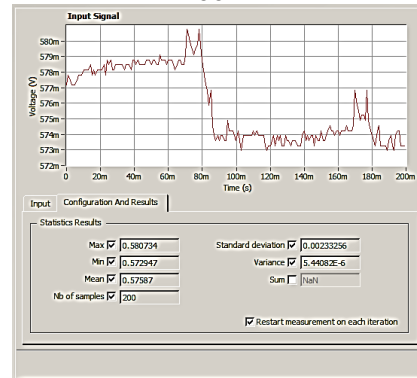
1000mm



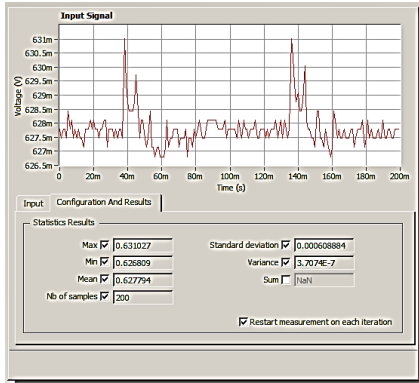
1100mm



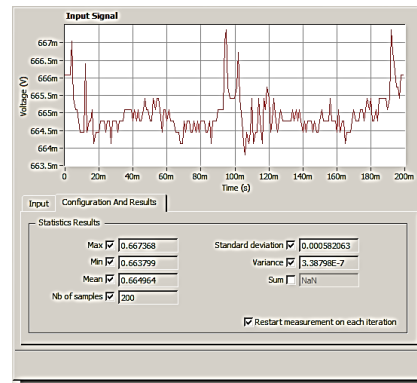
1200mm



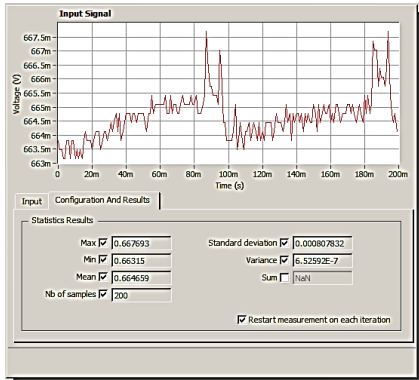
1300mm



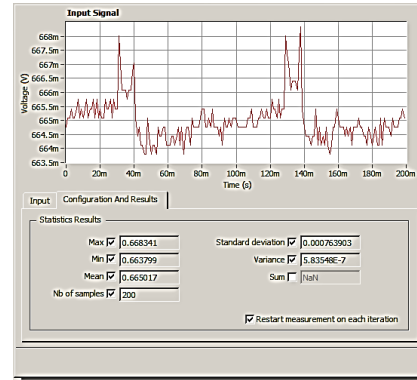
1400mm



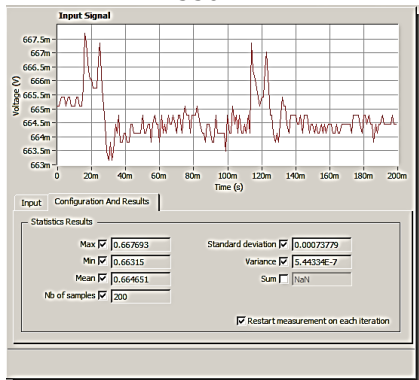
1450mm



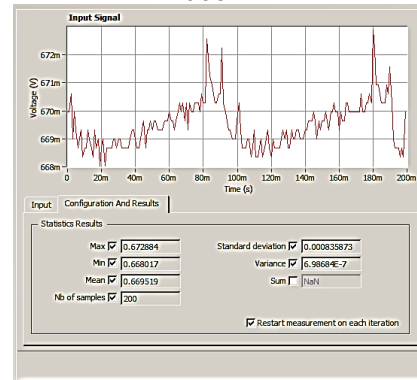
1500mm



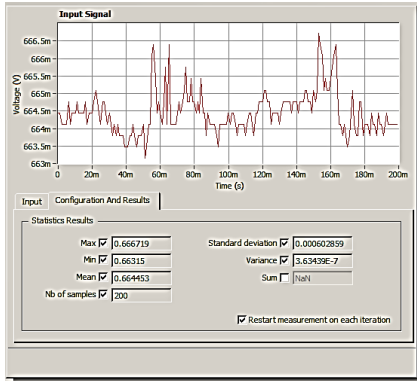
1550mm



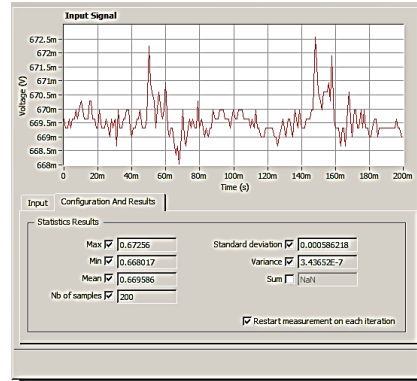
1600mm



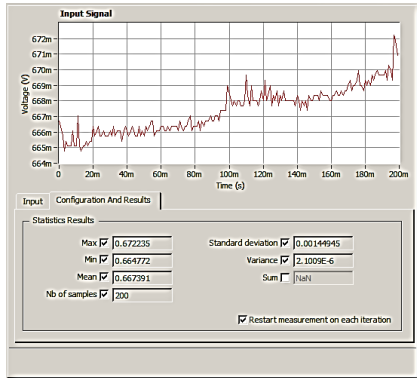
1650mm



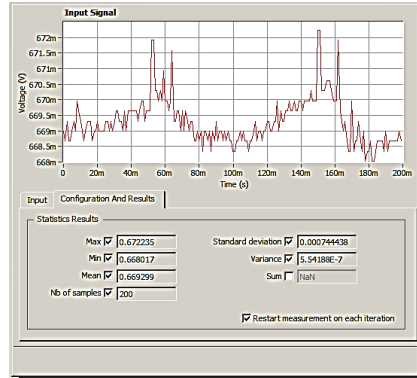
1700mm



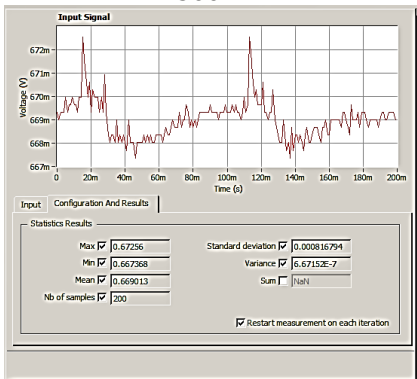
1900mm



2100mm



2300mm



Anexa 4.9.

Informații achiziționate cu senzorul IR Sharp GP2Y0A02YK

Distanța reală [mm]	Informații achiziționate de senzorul IR Sharp GP2Y0A02YK [mV] folosind obiectul alb										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
25	1465	1463	1463	1463	1473	1467	1462	1463	1463	1462	1464.4
50	1905	1903	1902	1903	1903	1902	1902	1903	1902	1903	1902.8
75	2215	2213	2213	2212	2214	2215	2216	2213	2213	2213	2213.7
100	2488	2487	2487	2487	2486	2486	2485	2486	2485	2485	2486.2
125	2555	2550	2553	2553	2553	2553	2554	2553	2555	2553	2553.2
150	2472	2473	2473	2472	2472	2473	2474	2472	2472	2473	2472.6
200	2248	2248	2248	2249	2248	2249	2248	2248	2249	2248	2248.3
300	1711	1712	1709	1710	1712	1710	1715	1712	1713	1713	1711.7
400	1330	1330	1330	1330	1329	1330	1338	1330	1330	1330	1330.7
500	1123	1121	1122	1122	1123	1129	1124	1122	1124	1123	1123.3
600	985	984	985	984	985	984	982	984	982	984	983.9
700	906	904	905	905	905	905	906	906	906	906	905.4
800	837	837	837	837	839	838	838	837	837	839	837.6
900	788	788	788	787	787	788	787	787	787	786	787.3
1000	741	741	742	741	742	741	742	741	742	741	741.4
1100	702	703	702	701	702	702	702	702	702	703	702.1
1200	672	670	671	670	674	673	671	671	671	671	671.4
1300	645	646	645	646	646	646	645	645	646	646	645.6
1400	617	616	617	617	617	616	612	614	617	616	615.9
1500	590	590	590	591	590	590	590	590	590	590	590.1
1600	568	566	565	568	564	565	566	563	566	565	565.6

Distanța reală [mm]	Informații achiziționate de senzorul IR Sharp GP2Y0A02YK [mV] folosind obiectul roșu										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
25	1455	1455	1455	1455	1456	1456	1456	1455	1455	1455	1455.3
50	1990	1991	1990	1990	1991	1991	1991	1990	1991	1991	1990.6
75	2298	2295	2295	2294	2295	2297	2298	2298	2298	2298	2296.6
100	2472	2472	2472	2472	2472	2472	2472	2472	2472	2472	2472
125	2399	2406	2406	2406	2403	2406	2406	2406	2406	2406	2405
150	2316	2316	2316	2316	2316	2316	2316	2316	2316	2316	2316
200	1973	1973	1973	1978	1975	1981	1982	1983	1978	1976	1977.2
300	1548	1548	1548	1548	1547	1547	1548	1548	1548	1548	1547.8
400	1440	1440	1440	1441	1441	1440	1441	1441	1440	1440	1440.4
500	1206	1206	1207	1207	1206	1204	1206	1207	1206	1207	1206.2
600	1008	1009	1009	1008	1008	1010	1009	1008	1018	1016	1010.3
700	945	949	949	957	957	957	956	956	956	960	954.2
800	834	834	835	835	833	833	834	834	835	835	834.2
900	800	802	803	808	807	808	808	809	808	809	806.2
1000	756	758	756	758	756	758	758	758	759	757	757.4
1100	710	712	711	712	710	710	710	711	711	710	710.7
1200	676	681	680	680	680	680	680	679	681	680	679.7
1300	689	690	690	691	691	692	691	691	691	691	690.7
1400	688	693	690	691	690	691	689	690	692	691	690.5
1500	688	693	690	691	690	690	691	689	690	692	690.4
1600	694	694	694	691	692	694	694	692	695	694	693.4

Distanța reală [mm]	Informații achiziționate de senzorul IR Sharp GP2Y0A02YK [mV] folosind obiectul verde										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
25	1455	1455	1455	1455	1456	1456	1455	1456	1456	1456	1455.5
50	1940	1940	1941	1941	1941	1939	1939	1941	1941	1941	1940.4
75	2198	2198	2198	2198	2200	2199	2198	2198	2198	2198	2198.3
100	2465	2459	2458	2458	2458	2458	2458	2458	2458	2458	2458.8
125	2422	2422	2423	2422	2422	2423	2422	2422	2422	2422	2422.2
150	2316	2318	2314	2314	2314	2310	2310	2310	2310	2310	2312.6
200	2096	2098	2099	2098	2099	2098	2099	2095	2095	2096	2097.3
300	1637	1636	1636	1638	1638	1639	1637	1637	1638	1637	1637.3
400	1320	1320	1320	1320	1321	1321	1320	1320	1320	1320	1320.2
500	1197	1199	1194	1199	1194	1194	1194	1194	1194	1195	1195.4
600	946	944	945	948	947	945	948	946	945	946	946
700	896	896	896	895	895	895	894	894	894	894	894.9
800	846	845	845	846	847	847	847	846	846	847	846.2
900	824	823	824	824	825	825	824	823	823	823	823.8
1000	770	771	771	772	774	771	770	770	771	770	771
1100	710	712	712	710	710	712	713	712	710	710	711.1
1200	686	685	685	686	686	686	689	686	686	686	686.1
1300	661	662	662	663	663	661	660	661	663	662	661.8
1400	629	630	630	632	632	630	629	629	630	630	630.1
1500	618	615	615	619	619	618	617	619	619	618	617.7
1600	608	609	610	610	607	608	608	609	608	608	608.5

Anexa 5.1.Determinarea unghiului cu care este rotit un obiect dreptunghic

Obiect rotit în sens trigonometric								
10°			20°			30°		
Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]	Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]	Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]
1223	1130	1090	1327	1135	1050	1475	1139	1028
1224	1132	1092	1328	1136	1054	1475	1139	1026
1222	1130	1094	1328	1136	1056	1474	1140	1025
1226	1131	1092	1327	1137	1052	1475	1138	1024
1221	1131	1090	1328	1136	1055	1474	1138	1023
1222	1131	1096	1328	1135	1056	1475	1140	1022
1223	1130	1092	1327	1134	1058	1474	1138	1025
1223	1130	1092	1328	1133	1054	1474	1139	1022
1224	1131	1092	1328	1132	1055	1474	1141	1024
1221	1131	1093	1328	1133	1056	1474	1140	1023
1222.9	1130.7	1092.3	1327.7	1134.7	1054.6	1474.4	1139.2	1024.2

Obiect rotit în sensul acelor de ceasornic								
10°			20°			30°		
Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]	Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]	Senzor stânga [mV]	Senzor mijloc [mV]	Senzor dreapta [mV]
1085	1126	1225	1030	1130	1310	980	1118	1410
1086	1122	1226	1028	1131	1306	988	1117	1420
1087	1123	1225	1030	1130	1308	980	1115	1415
1082	1124	1224	1029	1131	1307	981	1116	1417
1085	1124	1224	1028	1130	1308	982	1116	1418
1085	1122	1225	1028	1129	1308	982	1114	1420
1086	1122	1224	1029	1130	1308	985	1118	1418
1086	1124	1224	1029	1128	1307	980	1120	1418
1088	1123	1225	1028	1128	1308	980	1117	1418
1087	1122	1224	1028	1129	1308	982	1115	1417
1085.7	1123.2	1224.6	1028.7	1129.6	1307.8	982	1116.6	1417.1

Anexa 5.2.Experimente cu obiecte plasate paralel

Experimente	Set 1			Set 2			Set 3		
Senzor	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Informații preluate de senzori [mV]	1012	1018	1135	844	833	904	1128	1140	990
	1018	1020	1131	845	834	905	1128	1135	991
	1017	1020	1131	845	833	907	1129	1140	990
	1014	1018	1132	844	832	910	1130	1139	991
	1017	1020	1135	843	834	909	1129	1138	989
	1018	1018	1131	842	835	908	1130	1140	990
	1014	1020	1132	841	837	907	1130	1139	991
	1013	1018	1132	844	836	908	1129	1140	990
	1010	1020	1131	843	835	908	1128	1139	991
1012	1018	1132	842	834	907	1130	1140	990	
Media [mV]	1015	1019	1132	843.3	834.3	907	1129	1139	990
Experimente	Set 4			Set 5			Set 6		
Senzor	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Informații preluate de senzori [mV]	906	900	835	1134	965	988	990	1110	1117
	905	898	836	1130	965	989	992	1112	1119
	906	900	836	1132	967	988	992	1111	1120
	905	900	837	1136	968	989	992	1112	1121
	906	901	838	1132	967	988	996	1111	1119
	907	901	837	1133	966	987	992	1112	1118
	908	902	837	1133	966	990	993	1112	1118
	908	902	838	1133	967	988	992	1111	1119
	907	902	836	1132	967	988	994	1110	1120
906	900	837	1134	968	988	992	1111	1121	
Media [mV]	906	900.6	837	1133	966.6	988	992.5	1111	1119

Anexa 5.3.

Experimente cu cilindru

Experiment	d = 300mm			d = 500mm			d = 700mm		
Locul senzorului pe axa OX [mm]	-100	0	100	-100	0	100	-100	0	100
Informații preluate de senzor [mV]	1553	1712	1572	1084	1121	1061	863	909	884
	1554	1713	1571	1083	1122	1060	863	910	884
	1554	1712	1571	1084	1121	1061	862	909	883
	1554	1712	1571	1084	1122	1059	864	910	884
	1554	1712	1572	1083	1121	1059	861	908	886
	1553	1713	1571	1084	1122	1058	862	909	885
	1554	1713	1571	1084	1122	1059	863	909	885
	1554	1712	1571	1083	1121	1059	861	910	884
	1553	1712	1572	1084	1121	1059	863	909	883
	1554	1713	1572	1083	1122	1060	862	909	884
Media [mV]	1553.7	1712.4	1571.4	1083.6	1121.5	1059.5	862.4	909.2	884.2

Anexa 5.4.

Experimente cu baleiere

Unghiul de rotație al servomotorului	$\beta = 45^\circ$									
	Distanța detectată de senzor									
	Numărul experimentului									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0°	3463	3462	3462	3462	3462	3462	3462	3462	3462	3462
5°	3463	3463	3463	3462	3463	3463	3463	3463	3463	3463
10°	3463	3462	3462	3463	3463	3464	3463	3463	3463	3463
15°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
20°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
25°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3470	3470	3470	3470
30°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3467	3469	3469
35°	1020	1024	1024	1025	1019	1024	1022	1020	1033	1017
40°	1016	1016	1016	1011	1016	1017	1021	1017	1012	1017
45°	1016	1012	1012	1016	1016	1013	1016	1007	1016	1013
50°	1007	1016	1016	1016	1011	1011	1011	1011	1016	1009
55°	1016	1016	1016	1011	1016	1014	1013	1017	1014	1017
60°	1022	1016	1016	1022	1021	1021	1022	1016	1021	1015
65°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	1034
70°	3469	3469	3469	3469	3470	3471	3471	3470	3470	3469
75°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3470	3469	3469	3469
80°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
85°	3469	3469	3469	3469	3470	3471	3470	3470	3470	3469
90°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
95°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
100°	3469	3469	3469	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3469
105°	3469	3469	3469	3469	3469	3467	3469	3469	3469	3469
110°	3469	3467	3467	3466	3469	3468	3469	3469	3469	3469
115°	3469	3469	3469	3467	3470	3469	3469	3467	3469	3469
120°	3471	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
125°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3470	3470	3470	3470
130°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
135°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
140°	3469	3469	3469	3470	3471	3470	3469	3470	3469	3469
145°	3471	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
150°	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3470	3470
155°	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
160°	3469	3469	3469	3467	3469	3469	3469	3469	3469	3469
165°	3469	3469	3469	3469	3471	3470	3470	3470	3470	3469
170°	3471	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469	3469
175°	3469	3467	3467	3469	3469	3469	3469	3464	3469	3470
180°	3469	3469	3469	3470	3470	3469	3469	3469	3469	3469

Unghiul de rotație al servomotorului	$\beta = 90^\circ$									
	Distanța detectată de senzor									
	Numărul experimentului									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0°	3462	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463
5°	3462	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463
10°	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463
15°	3469	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470	3471	3471
20°	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
25°	3469	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
30°	3469	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470	3471	3471
35°	3469	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
40°	3469	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
45°	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3471	3471
50°	3469	3471	3470	3470	3470	3468	3470	3470	3470	3470
55°	3469	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
60°	3469	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3471	3470
65°	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3470
70°	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
75°	3470	3470	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3471	3470
80°	1009	1006	1012	1016	1013	1012	1012	1007	1006	1007
85°	1009	1008	1007	1011	1002	1006	1009	1007	1007	1008
90°	1007	1007	1003	1003	1007	1007	1006	1008	1008	1007
95°	1005	1002	1007	1007	1007	1007	1007	1003	1002	1002
100°	1011	1007	1012	1011	1003	1003	1003	1008	1011	1007
105°	1016	1012	1011	1010	1012	1012	1012	1014	1013	1013
110°	3470	3470	1025	3470	1022	1030	1033	1020	1023	1028
115°	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
120°	3467	3470	3470	3470	3470	3470	3468	3470	3470	3470
125°	3469	3470	3470	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470
130°	3469	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
135°	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
140°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
145°	3470	3470	3470	3471	3470	3470	3470	3471	3471	3470
150°	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470
155°	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
160°	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
165°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
170°	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3471	3471	3470
175°	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3470
180°	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471

Unghiul de rotație al servomotorului	$\beta = 135^\circ$									
	Distanța detectată de senzor									
	Numărul experimentului									
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0°	3464	3464	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3463	3464
5°	3464	3463	3463	3464	3463	3463	3463	3463	3463	3463
10°	3464	3463	3463	3463	3464	3464	3464	3464	3463	3463
15°	3470	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470	3470	3471
20°	3470	3470	3470	3470	3468	3470	3470	3470	3471	3470
25°	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3471	3470	3470
30°	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3471
35°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470
40°	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470
45°	3470	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
50°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470
55°	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470
60°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
65°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
70°	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3470	3470	3470	3470
75°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471
80°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3469	3470	3470
85°	3470	3470	3470	3470	3468	3471	3470	3470	3470	3470
90°	3470	3470	3470	3470	3468	3470	3470	3470	3471	3471
95°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470	3470
100°	3470	3470	3470	3470	3471	3470	3470	3470	3470	3470
105°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470
110°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470	3470	3470
115°	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470
120°	1021	1020	1020	1015	1020	1024	1015	1021	1020	1015
125°	1012	1007	1012	1016	1007	1012	1012	1011	1011	1015
130°	1006	1012	1006	1011	1011	1006	1011	1012	1007	1012
135°	1011	1011	1011	1006	1011	1011	1009	1012	1011	1009
140°	1011	1007	1011	1012	1007	1011	1011	1009	1011	1011
145°	1007	1012	1006	1012	1012	1009	1009	1012	1010	1010
150°	1021	1021	1020	1018	1021	1020	1020	1018	1021	1021
155°	3470	3471	3471	3471	3468	3470	3470	3470	3470	3470
160°	3471	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3470	3470
165°	3470	3470	3470	3470	3471	3471	3471	3470	3470	3470
170°	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3471	3471
175°	3470	3470	3468	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470
180°	3470	3470	3470	3465	3470	3470	3470	3470	3470	3470

Anexa 5.5.Distanța senzor Parallax Ping - cilindru

Distanța laser [mm]	Distanța măsurată de senzorul Parallax Ping [mm]										Media [mm]
100	99	100	100	99	99	99	100	100	99	99	99.4
200	199	199	199	199	199	199	199	198	199	199	198.9
300	301	301	302	301	301	302	301	301	301	301	301.2
400	403	403	403	403	402	402	402	402	403	403	402.6
500	501	500	501	501	501	501	502	501	501	501	501
600	604	604	604	604	602	602	603	602	602	602	602.9
700	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702
800	801	805	800	801	805	805	805	804	805	805	803.6
900	903	903	903	903	903	903	903	903	902	903	902.9
1000	1001	1001	1002	1001	1002	1001	1001	1002	1001	1002	1001.4
1100	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101
1200	1202	1201	1201	1201	1201	1201	1201	1205	1205	1205	1202.3
1300	1297	1297	1297	1297	1297	1297	1297	1297	1296	1297	1296.9
1400	1401	1401	1401	1401	1401	1396	1396	1401	1401	1401	1400
1500	1499	1498	1498	1498	1499	1499	1498	1498	1499	1499	1498.5

Anexa 5.6.**Experimente cu înălțimea**

Înălțimea <i>h</i> [mm]	Distanța măsurată de senzorul Parallax Ping [mm] când obiectul s-a aflat la $d = 1500\text{mm}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
100	1492	1494	1492	1492	1491	1492	1492	1490	1491	1492	1491.8
200	1492	1492	1491	1491	1492	1492	1491	1492	1491	1492	1491.6
300	1491	1492	1491	1492	1492	1491	1491	1492	1491	1492	1491.5
400	1488	1487	1488	1487	1488	1488	1487	1488	1487	1488	1487.6
500	1486	1486	1485	1486	1485	1486	1486	1485	1485	1486	1485.6
600	1483	1483	1483	1484	1484	1483	1484	1484	1483	1483	1483.4
700	1492	1493	1492	1493	1493	1492	1493	1492	1493	1492	1492.5
800	1493	1492	1493	1492	1492	1493	1493	1492	1493	1492	1492.5
900	1488	1490	1488	1489	1489	1488	1488	1489	1488	1490	1488.7
Înălțimea <i>h</i> [mm]	Distanța măsurată de senzorul Parallax Ping [mm] când obiectul s-a aflat la $d = 1000\text{mm}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
100	994	994	995	994	994	995	994	994	994	995	994.3
200	990	990	991	990	991	990	990	991	990	991	990.4
300	993	994	993	994	993	993	993	993	993	993	993.2
400	993	993	994	993	993	994	994	993	993	993	993.3
500	992	992	993	992	992	992	993	992	992	992	992.2
600	990	991	990	990	990	990	991	990	990	990	990.2
700	988	989	989	990	989	989	989	988	990	990	989.1
800	991	993	991	991	991	991	991	991	991	992	991.3
900	989	988	989	988	988	989	988	988	989	988	988.4

Anexa 5.7.Rotirea obiectului

	0°		30° în sens trigonometric		30° în sensul acelor de ceasornic		20° în sens trigonometric	
	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]
Date preluate de senzori	1182	1185	3475	3422	3474	3421	1118	1174
	1181	1191	3475	3422	3473	3421	1127	1170
	1180	1184	3475	3423	3475	3421	1122	1175
	1180	1185	3476	3423	3475	3422	1123	1174
	1182	1184	3475	3423	3475	3422	1122	1176
	1182	1187	3475	3423	3475	3422	1119	1172
	1181	1191	3475	3423	3475	3422	1123	1174
	1177	1188	3475	3423	3475	3422	1121	1170
	1184	1186	3475	3422	3475	3422	1123	1176
1183	1182	3475	3422	3475	3421	1123	1175	
Media [mm]	1181.2	1186.3	Error	Error	Error	Error	1122.1	1173.6

	20° în sensul acelor de ceasornic		10° în sens trigonometric		10° în sensul acelor de ceasornic	
	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]	Senzor stânga [mm]	Senzor dreapta [mm]
Date preluate de senzori	1176	1117	1152	1200	1189	1155
	1176	1119	1153	1199	1192	1150
	1172	1114	1147	1199	1193	1154
	1171	1119	1145	1197	1195	1154
	1174	1119	1152	1194	1193	1155
	1176	1118	1149	1201	1194	1152
	1174	1117	1150	1200	1196	1152
	1177	1120	1147	1196	1194	1154
	1172	1120	1146	1199	1194	1150
	1174	1123	1152	1198	1195	1153
	Media [mm]	1174.2	1118.6	1149.3	1198.3	1193.5

Anexa 5.8.**Deplasare stânga - dreapta**

		Distanța măsurată cu laserul d = 250mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stânga x= 85mm			Obiect deplasat la dreapta x= 60mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]	238	237	238	295	291	290	290	289	290	
	238	237	238	295	291	290	289	289	291	
	238	237	238	290	292	292	289	290	290	
	238	237	238	291	291	295	290	290	290	
	238	237	238	295	290	290	289	289	291	
	238	237	238	295	291	292	293	289	291	
	238	238	238	295	292	291	290	295	290	
	238	238	238	290	291	295	293	293	289	
	238	238	238	290	291	296	293	293	290	
	238	238	238	290	292	291	295	290	290	
	238	238	238	291	291	291	293	289	290	
	238	238	238	290	290	291	289	289	291	
	238	238	238	290	292	292	290	290	290	
	238	238	238	291	291	291	290	289	290	
	238	238	238	290	291	290	289	289	291	
	238	238	238	290	292	292	289	290	290	
	238	238	238	291	295	295	290	289	289	
	238	238	238	295	294	290	289	293	295	
	238	238	238	290	292	296	289	290	289	
	238	238	238	295	295	295	290	289	294	
	238	238	238	290	291	295	289	289	291	
	238	238	238	290	296	292	289	289	294	
	238	238	238	291	295	290	290	295	294	
	238	238	238	290	295	291	290	293	294	
	238	238	238	290	296	292	289	293	294	
	238	238	238	291	295	290	290	290	294	
	238	238	238	291	290	291	289	293	294	
	238	238	238	294	292	292	289	289	291	
238	238	238	295	290	291	289	295	289		
238	238	238	294	291	290	290	293	290		
238	238	238	290	292	296	289	289	291		
238	238	237	295	291	295	293	295	290		
238	238	237	291	291	295	290	293	290		
238	238	237	295	295	296	289	293	291		
238	238	237	291	296	295	289	295	290		
Media [mm]	238	237.8286	237.8857	291.9143	292.3143	292.4571	290.0857	291.0857	291.0857	
		237.9048			292.2286		290.7524			

		Distanța măsurată cu laserul d = 500mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stânga x= 125mm			Obiect deplasat la dreapta x= 110mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]	490	490	490	552	551	552	540	541	541	
	490	491	490	547	551	547	541	541	541	
	490	491	491	552	551	547	541	541	541	
	490	490	490	551	547	547	541	541	540	
	490	490	492	552	547	547	540	541	541	
	491	491	490	552	550	546	541	541	541	
	490	490	492	547	551	547	541	541	541	
	492	490	490	547	552	551	541	541	540	
	491	492	492	551	551	550	540	541	541	
	490	491	490	547	551	547	541	541	541	
	490	492	490	547	550	547	541	541	541	
	490	490	490	547	551	547	541	541	540	
	490	492	490	547	551	546	541	541	541	
	490	490	491	547	551	547	541	541	541	
	490	490	491	547	551	547	541	541	541	
	491	490	492	547	550	551	541	541	541	
	491	490	490	547	551	551	541	541	541	
	490	490	492	546	551	550	541	541	541	
	492	490	490	547	551	550	541	541	541	
	490	491	490	547	551	551	541	541	541	
	490	490	490	547	550	551	541	540	541	
	490	492	490	551	551	551	541	541	541	
	491	490	490	547	551	546	541	541	541	
	490	492	490	547	551	551	541	541	541	
	491	490	490	547	551	552	541	540	541	
	490	491	490	542	550	552	541	541	541	
	490	490	491	542	551	552	541	541	541	
	491	490	490	542	551	550	540	541	541	
490	490	491	547	551	551	541	541	541		
492	490	490	547	547	552	541	541	541		
491	491	490	546	547	551	541	541	540		
490	490	490	547	547	547	540	541	541		
490	492	490	547	547	551	541	541	541		
490	491	490	547	547	551	541	541	541		
490	492	490	546	541	551	541	541	540		
Media [mm]	490.4	490.6286	490.4286	547.4	549.8	549.3429	540.8571	540.9429	540.8571	
		490.4857			548.8476			540.8857		

		Distanța măsurată cu laserul d = 750mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stanga x= 148mm			Obiect deplasat la dreapta x= 140mm		
Informatii preluate de senzorul ultrasonice [mm]		738	738	738	790	787	787	794	796	797
		738	738	738	790	787	787	800	796	800
		736	737	738	786	787	786	801	796	795
		738	737	737	789	783	786	795	797	796
		738	738	737	785	786	786	796	797	793
		738	738	738	785	786	786	795	796	796
		738	738	738	785	786	787	796	796	796
		738	738	738	796	787	787	796	796	795
		738	738	738	786	791	787	796	801	800
		737	737	738	786	791	790	801	796	796
		737	737	738	786	787	790	800	796	796
		738	738	737	789	786	790	795	796	797
		738	738	738	789	786	786	796	796	800
		738	738	738	789	786	786	796	797	800
		738	738	738	786	787	787	797	797	796
		738	738	738	786	787	787	795	795	801
		737	738	738	786	787	786	795	795	796
		737	737	738	789	787	790	795	796	795
		738	738	737	789	786	790	796	792	806
		738	738	738	789	786	790	801	796	801
		738	738	738	789	786	791	800	796	797
		738	738	738	786	787	791	795	795	796
		738	738	738	786	791	787	795	795	796
		737	738	738	786	791	786	796	792	796
		737	737	738	785	791	786	797	792	797
		738	738	737	785	791	786	800	796	797
		738	738	738	789	790	787	800	795	795
		738	738	738	785	790	787	795	795	795
	738	738	738	786	787	787	796	800	796	
	738	738	738	786	787	787	796	797	801	
	738	738	738	786	787	786	795	796	796	
	737	737	738	786	786	786	795	796	800	
	738	738	737	785	786	786	795	796	800	
	738	738	736	785	786	790	796	796	796	
	738	738	738	785	786	791	797	796	801	
Media [mm]	737.7429	737.8	737.7714	787.0286	787.3714	787.5714	796.6857	795.8857	797.4571	
		737.7714			787.3238			796.6762		

		Distanța măsurată cu laserul d = 1000mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stânga x= 180mm			Obiect deplasat la dreapta x= 165mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]	987	987	987	1040	1041	1041	1039	1040	1040	
	988	988	988	1040	1041	1037	1039	1039	1035	
	987	987	987	1040	1041	1041	1039	1039	1039	
	987	987	987	1040	1041	1041	1035	1039	1040	
	988	988	987	1040	1042	1041	1040	1039	1039	
	988	988	988	1040	1041	1041	1039	1039	1039	
	987	987	987	1040	1041	1041	1035	1040	1039	
	987	987	987	1040	1041	1041	1040	1036	1039	
	988	988	988	1040	1041	1041	1040	1040	1040	
	987	987	987	1040	1041	1042	1040	1036	1040	
	987	987	987	1041	1041	1041	1039	1039	1039	
	988	988	987	1040	1041	1041	1039	1039	1040	
	988	988	988	1040	1041	1041	1041	1039	1039	
	987	987	987	1045	1041	1041	1039	1039	1039	
	987	987	987	1040	1041	1046	1040	1040	1039	
	988	988	988	1040	1042	1041	1039	1039	1041	
	987	987	988	1040	1041	1041	1040	1036	1040	
	987	987	987	1040	1050	1041	1039	1039	1040	
	988	987	987	1040	1041	1040	1039	1040	1039	
	988	988	988	1040	1045	1041	1039	1039	1040	
	987	987	987	1040	1041	1040	1039	1040	1039	
	987	987	987	1041	1040	1046	1039	1040	1039	
	988	988	988	1040	1041	1041	1040	1039	1040	
	987	987	988	1040	1041	1042	1039	1039	1041	
	987	987	987	1040	1041	1041	1039	1040	1040	
	988	987	987	1040	1041	1041	1039	1039	1039	
	988	988	988	1040	1041	1041	1040	1041	1039	
	987	987	987	1040	1041	1040	1039	1039	1039	
987	987	987	1040	1041	1041	1039	1039	1039		
988	988	988	1040	1042	1041	1039	1039	1039		
987	988	988	1040	1041	1046	1039	1040	1040		
987	987	987	1040	1041	1041	1040	1039	1040		
988	987	987	1040	1041	1046	1039	1039	1039		
988	988	988	1040	1041	1046	1039	1039	1039		
987	987	987	1040	1041	1041	1038	1041	1039		
Media [mm]	987.4286	987.3714	987.3714	1040.2	1041.429	1041.571	1039.057	1039.114	1039.343	
		987.3905			1041.067			1039.171		

		Distanța măsurată cu laserul d = 1250mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stanga x= 210mm			Obiect deplasat la dreapta x= 192mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]	1235	1235	1235	1294	1290	1290	1288	1283	1283	
	1235	1235	1235	1294	1290	1290	1283	1283	1282	
	1235	1234	1235	1290	1290	1291	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1293	1290	1291	1287	1283	1283	
	1235	1235	1234	1284	1290	1295	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1290	1291	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1284	1291	1295	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1287	1291	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1287	1289	1283	1283	1287	
	1235	1235	1235	1285	1295	1294	1287	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1291	1294	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1295	1290	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1283	1295	1294	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1285	1295	1295	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1295	1291	1295	1287	1283	1283	
	1235	1235	1235	1290	1291	1291	1283	1283	1283	
	1235	1235	1235	1295	1290	1291	1284	1283	1283	
	1235	1235	1235	1286	1295	1291	1288	1283	1284	
	1235	1235	1235	1291	1290	1291	1284	1283	1294	
	1235	1235	1235	1291	1290	1291	1284	1284	1288	
	1235	1235	1235	1286	1294	1287	1284	1284	1288	
	1235	1235	1235	1286	1295	1291	1284	1284	1283	
	1235	1235	1235	1287	1295	1291	1284	1284	1284	
	1235	1235	1235	1286	1295	1294	1284	1284	1284	
	1235	1235	1235	1290	1291	1294	1284	1284	1284	
	1235	1235	1235	1295	1291	1294	1284	1284	1288	
1235	1235	1235	1294	1287	1293	1284	1284	1284		
1235	1235	1235	1294	1287	1295	1288	1284	1288		
1235	1235	1235	1294	1287	1291	1284	1284	1284		
1235	1234	1235	1294	1291	1295	1288	1284	1284		
1235	1235	1235	1290	1291	1291	1284	1284	1284		
1235	1235	1234	1295	1291	1290	1288	1284	1284		
1235	1235	1235	1295	1290	1291	1288	1284	1284		
1235	1235	1235	1295	1290	1291	1288	1284	1284		
1235	1235	1235	1295	1290	1295	1288	1284	1284		
Media [mm]	1235	1234.943	1234.943	1289.743	1291.086	1292.086	1284.829	1283.457	1284.314	
		1234.962			1290.971		1284.2			

		Distanța măsurată cu laserul d = 1500mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stânga x= 234mm			Obiect deplasat la dreapta x= 215mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]		1482	1481	1482	1594	1595	1595	1536	1541	1540
		1482	1482	1482	1594	1595	1595	1536	1545	1541
		1481	1482	1482	1549	1591	1595	1540	3416	1537
		1481	1482	1482	1594	1591	1594	1536	2555	1540
		1481	1481	1481	1594	1590	1595	1536	1549	1540
		1482	1481	1481	1594	1595	1599	1540	1549	1540
		1482	1481	1481	1593	1595	1595	1541	1540	1541
		1482	1482	1482	1594	1595	1595	1540	1545	1541
		1482	1482	1481	1594	1595	1594	1542	1540	1537
		1481	1482	1482	1594	1595	1595	1540	1540	1537
		1481	1482	1482	1594	1595	1595	1541	1540	1541
		1481	1481	1481	1597	1595	1595	1541	1541	1542
		1482	1481	1481	1594	1592	1595	1542	2522	1541
		1482	1481	1481	1594	1595	1595	1545	1549	1538
		1482	1482	1482	1599	1559	1595	1537	1540	1541
		1482	1482	1482	1594	1595	1595	1540	2549	1538
		1481	1482	1482	1597	1591	1595	1542	1541	1537
		1481	1482	1482	1599	1595	1595	1540	1541	1538
		1481	1481	1481	1599	1591	1595	1537	1541	1541
		1482	1481	1481	1594	1591	1595	1540	1540	1536
		1482	1481	1481	1598	1592	1595	1536	1540	1537
		1482	1482	1482	1593	1595	1595	1541	1540	1541
		1482	1482	1482	1598	1594	1595	1536	1540	1541
		1481	1482	1482	1594	1595	1595	1536	1540	1541
		1481	1482	1481	1598	1595	1595	1536	1536	1541
		1481	1481	1481	1598	1595	1595	1540	1536	1541
		1482	1481	1481	1597	1595	1595	1540	1536	1537
		1482	1481	1481	1548	1594	1595	1540	1536	1541
	1482	1482	1482	1598	1592	1595	1541	1536	1541	
	1482	1482	1482	1548	1595	1595	1536	1537	1547	
	1481	1482	1482	1552	1595	1595	1536	1536	1541	
	1481	1482	1481	1548	1592	1595	1537	1537	1537	
	1481	1481	1481	1594	1595	1594	1536	1536	1538	
	1482	1481	1481	1594	1595	1595	1537	1537	1536	
	1482	1481	1482	1594	1595	1595	1536	1532	1542	
Media [mm]	1481.571	1481.543	1481.514	1588.771	1592.857	1595.029	1538.743	1679.4	1539.686	
		1481.543			1592.219			1585.943		

		Distanța măsurată cu laserul d = 1750mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stanga x = 310mm			Obiect deplasat la dreapta x = 290mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]	1728	1727	1729	1843	1843	1847	1805	1793	1810	
	1728	1727	1728	1836	1847	1847	1805	1794	1806	
	1728	1727	1728	1847	1847	1839	1792	1802	1802	
	1729	1727	1728	1846	1837	1838	1805	1802	1802	
	1728	1727	1728	1847	1846	1846	1801	1798	1802	
	1729	1727	1728	1844	1847	1848	1805	1806	1794	
	1728	1727	1728	1839	1839	1840	1805	1802	1797	
	1728	1728	1728	1843	1852	1851	1806	1815	1798	
	1728	1727	1728	1843	1850	1851	1806	1810	1802	
	1728	1727	1728	1850	1843	1844	1806	1806	1799	
	1728	1727	1728	1843	1852	1844	1806	1805	1799	
	1728	1727	1729	1847	1852	1843	1802	1805	1801	
	1728	1727	1727	1850	1846	1847	1802	1798	1797	
	1728	1727	1728	1850	1847	1847	1802	1798	1792	
	1729	1727	1728	1855	1848	1844	1802	1810	1801	
	1728	1727	1728	1847	1840	1840	1802	1810	1801	
	1728	1728	1728	1854	1839	1843	1802	1802	1809	
	1728	1727	1728	1854	1839	1839	1810	1802	1801	
	1727	1728	1728	1855	1839	1838	1802	1799	1805	
	1727	1727	1728	1855	1840	1840	1802	1802	1805	
	1727	1727	1729	1854	1840	1840	1802	1797	1801	
	1727	1727	1728	1842	1840	1842	1802	1802	1809	
	1727	1727	1729	1847	1847	1843	1806	1802	1805	
	1728	1727	1728	1839	1839	1843	1805	1810	1805	
	1727	1727	1728	1837	1848	1847	1806	1802	1805	
	1728	1727	1728	1842	1844	1840	1806	1806	1805	
	1727	1727	1728	1836	1839	1839	1802	1806	1805	
1727	1728	1728	1838	1839	1839	1806	1806	1794		
1727	1727	1728	1855	1847	1839	1807	1810	1792		
1727	1727	1728	1851	1840	1847	1802	1806	1802		
1727	1727	1728	1849	1836	1840	1802	1806	1802		
1727	1727	1729	1843	1842	1839	1806	1810	1794		
1727	1727	1728	1842	1839	1843	1795	1793	1806		
1727	1727	1728	1843	1839	1839	1794	1806	1806		
1728	1727	1728	1838	1848	1840	1794	1810	1810		
Media [mm]	1727.686	1727.114	1728.114	1845.829	1843.429	1842.743	1802.943	1803.743	1801.829	
		1727.638			1844			1802.838		

		Distanța măsurată cu laserul d = 2000mm								
		Obiect centrat			Obiect deplasat la stânga x = 330mm			Obiect deplasat la dreapta x = 325mm		
Informații preluate de senzorul ultrasonice [mm]		1980	1980	1981	2090	2091	2090	2062	2063	2068
		1977	1977	1977	2085	2083	2090	2062	2066	2068
		1977	1977	1981	2095	2099	2099	2051	2070	2059
		1980	1976	1981	2095	2078	2095	2057	2079	2058
		1977	1977	1981	2091	2086	2086	2058	2070	2054
		1977	1976	1981	2095	2078	2082	2057	2058	2063
		1980	1976	1981	2090	2079	2082	2057	2066	2068
		1977	1977	1981	2099	2064	2086	2058	2070	2069
		1977	1977	1981	2095	2078	2087	2066	2070	2068
		1977	1977	1981	2092	2074	2082	2059	2066	2060
		1977	1977	1981	2101	2082	2081	2057	2063	2068
		1976	1977	1981	2091	2082	2078	2058	2062	2068
		1976	1980	1980	2083	2082	2081	2057	2063	2071
		1976	1980	1981	2092	2077	2081	2057	2066	2068
		1976	1980	1981	2091	2082	2078	2052	2058	2058
		1977	1979	1981	2091	2081	2085	2057	2062	2054
		1977	1979	1981	2083	2082	2081	2058	2061	2058
		1977	1979	1981	2091	2090	2085	2050	2061	2068
		1977	1979	1980	2101	2090	2081	2058	2057	2068
		1977	1979	1977	2090	2090	2078	2062	2050	2062
		1975	1979	1977	2082	2086	2078	2062	2062	2059
		1976	1979	1977	2083	2090	2081	2058	2063	2058
		1975	1979	1977	2082	2086	2078	2059	2058	2063
		1975	1979	1977	2084	2083	2086	2063	2059	2058
		1976	1979	1977	2086	2086	2079	2049	2063	2058
		1975	1979	1977	2090	2090	2085	2050	2066	2062
		1975	1979	1976	2091	2090	2073	2057	2070	2068
	1976	1979	1976	2095	2099	2081	2062	2057	2058	
	1977	1979	1976	2091	2096	2078	2057	2053	2062	
	1977	1980	1976	2091	2099	2085	2057	2057	2059	
	1977	1979	1976	2086	2080	2085	2067	2059	2062	
	1977	1979	1976	2079	2090	2086	2066	2050	2059	
	1976	1979	1976	2078	2086	2068	2063	2057	2059	
	1977	1979	1975	2088	2083	2091	2066	2049	2062	
	1977	1979	1976	2083	2086	2094	2067	2066	2062	
Media [mm]		1976.743	1978.429	1978.714	2089.429	2085.086	2083.314	2058.743	2062	2062.486
			1977.962			2085.943		2061.076		

Anexa 5.9.

2 senzori ultrasonici și unul sau două obiecte

Distanța laser 1500mm					
2 obiecte		1 obiect stânga		1 obiect dreapta	
Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta
1479	1490	1484	3422	3148	1493
1478	1488	1484	1553	3148	1483
1482	1495	1483	3422	3148	1492
1478	1492	1484	3422	3148	1483
1481	1491	1482	1562	3148	1491
1484	1484	1479	3422	3148	1486
1484	1486	1483	3422	3148	1495
1482	1482	1484	1558	3148	1482
1484	1487	1480	3422	3148	1491
1482	1488	1484	3422	3148	1483
1481.4	1488.3	1482.7	Error	Error	1487.9

Distanța laser 1200mm					
2 obiecte		1 obiect stânga		1 obiect dreapta	
Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta
1173	1181	1176	3423	3140	1178
1173	1182	1178	3423	3140	1180
1178	1176	1173	3423	3140	1181
1180	1181	1179	3423	3140	1187
1183	1176	1174	3423	3140	1181
1174	1181	1178	3423	3140	1177
1175	1176	1176	3423	3140	1186
1179	1177	1180	3423	3140	1183
1180	1181	1180	3423	3140	1186
1179	1175	1178	3423	3140	1186
1177.4	1178.6	1177.2	Error	Error	1182.5

Distanța laser 1000mm						
2 obiecte		1 obiect stanga		1 obiect dreapta		
Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	
983	984	984	3422	3150	980	
986	978	982	3422	3150	979	
977	980	981	3422	3150	978	
986	980	987	3422	3150	977	
981	981	983	3422	3150	981	
982	980	985	3422	3150	979	
977	981	988	3422	3150	981	
981	980	983	3422	3150	980	
986	980	988	3422	3150	980	
981	980	981	3422	3150	979	
982	980.4	984.2	Error	Error	979.4	

Distanța laser 500mm						
2 obiecte		1 obiect stânga		1 obiect dreapta		
Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	Senzor stânga	Senzor dreapta	
491	492	491	3422	3145	493	
491	486	492	3422	3145	490	
492	491	492	3422	3145	492	
491	492	490	3422	3145	490	
486	491	491	3422	3145	495	
491	491	492	3422	3145	493	
491	490	492	3422	3145	491	
492	492	489	3422	3145	495	
491	492	491	3422	3145	495	
488	492	491	3422	3145	492	
490.4	490.9	491.1	Error	Error	492.6	

Anexa 5.10.Influenta temperaturii

d = 2500 mm. T = 27°C		
X [mm]	X [mm]	X [mm]
2461	2462	2462
2461	2461	2462
2461	2462	2462
2464	2462	2462
2461	2462	2462
2464	2461	2462
2461	2461	2462
2461	2462	2462
2461	2462	2461
2461	2462	2462
2462	2462	2462
2461	2462	2462
2461	2461	2461
2464	2462	2462
2464	2462	2465
2461	2462	2462
2461	2461	2462
2461	2462	2462
2461	2462	2461
2462	2461	2462
2461	2462	2462
2461	2462	2462
2461	2461	2462
2461	2462	2462
2461	2462	2462
2462	2462	2462
2460	2461	2462
2461	2462	2462
2462	2462	2461
2461	2465	2462
2461	2462	2462
2462	2460	2464
2461	2462	2462
2461	2461	2462
Media = 2461.755		

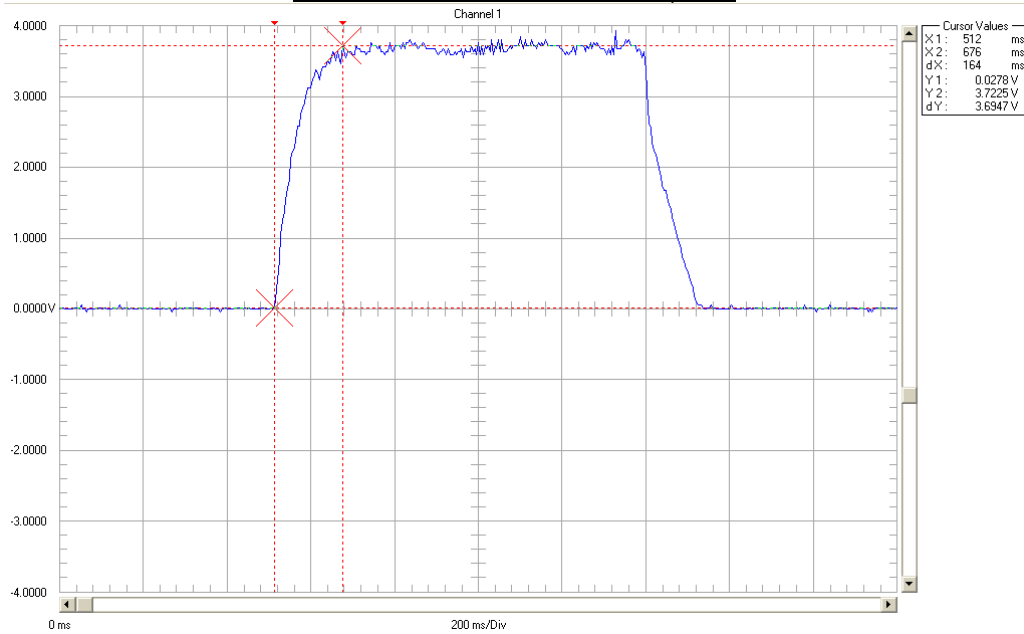
d = 2000 mm. T = 27°C		
X [mm]	X [mm]	X [mm]
1966	1962	1962
1963	1962	1962
1962	1963	1963
1962	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1962
1963	1962	1962
1963	1963	1963
1962	1963	1963
1963	1963	1963
1966	1963	1963
1966	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1966	1962	1962
1966	1962	1962
1966	1963	1963
1962	1963	1963
1963	1963	1963
1966	1963	1963
1966	1963	1963
1963	1963	1963
1966	1963	1963
1966	1962	1962
1966	1962	1962
1963	1963	1963
1963	1963	1963
1965	1963	1963
1962	1963	1963
Media = 1963.147		

d = 1500 mm. T = 27°C		
X [mm]	X [mm]	X [mm]
1477	1475	1475
1477	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1476	1475
1476	1476	1474
1477	1476	1474
1477	1476	1474
1477	1477	1474
1477	1477	1475
1477	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1476	1475
1476	1476	1474
1477	1476	1474
1477	1477	1474
1477	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1476	1475
1476	1476	1475
1477	1476	1475
1477	1477	1474
1477	1477	1474
1477	1477	1474
1476	1477	1475
1476	1477	1475
1476	1476	1475
1476	1476	1475
1477	1476	1475
1477	1477	1474
1477	1477	1474
1477	1477	1474
Media = 1475.892		

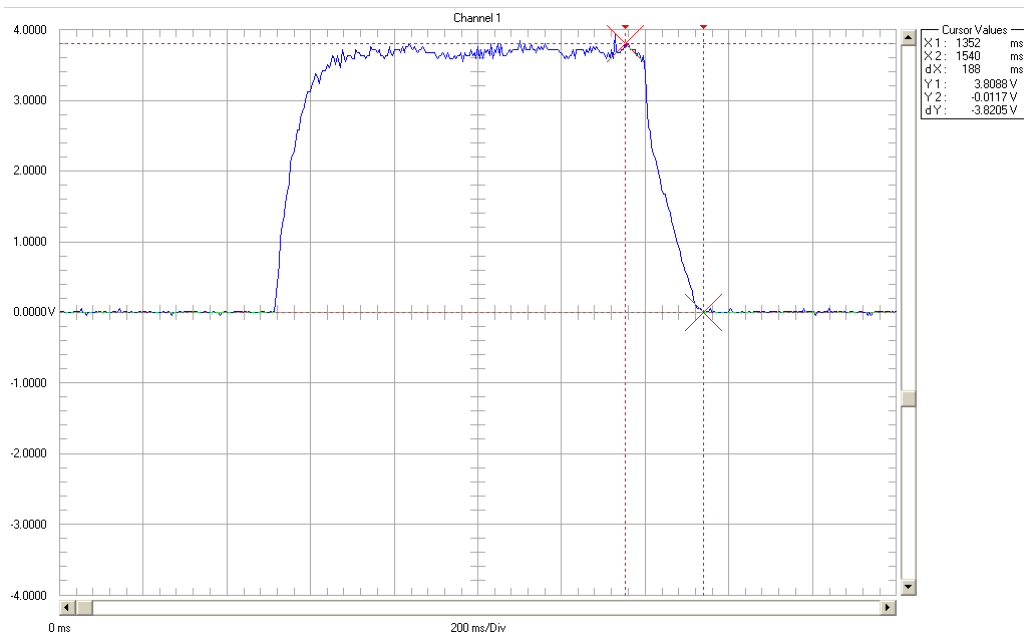
d = 1000 mm. c ₀ = 344.8 m/s		
X [mm]	X [mm]	X [mm]
982	982	982
982	983	983
982	983	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	983	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	982	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	982	983
982	982	982
982	983	983
983	982	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	982	982
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	982	982
982	982	982
982	983	983
983	983	983
Media = 982,4		

d = 500 mm. c ₀ = 344.8 m/s		
X [mm]	X [mm]	X [mm]
490	490	490
489	490	491
489	490	490
489	490	491
491	490	490
489	490	492
491	490	491
489	491	490
489	490	490
489	491	490
489	490	490
489	489	490
489	489	491
489	489	490
489	489	491
491	489	490
489	489	491
491	489	490
489	491	490
489	491	490
489	489	490
489	491	490
490	489	490
489	489	490
489	489	491
491	489	490
489	489	491
491	489	490
489	491	490
490	490	490
489	491	490
489	490	490
489	489	490
489	489	490
Media = 489,8		

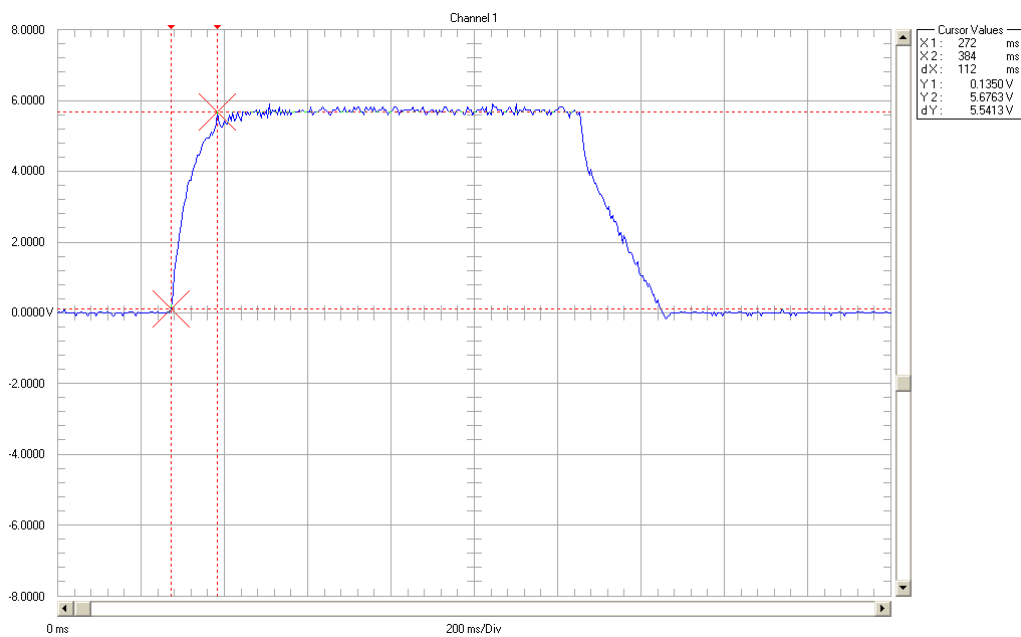
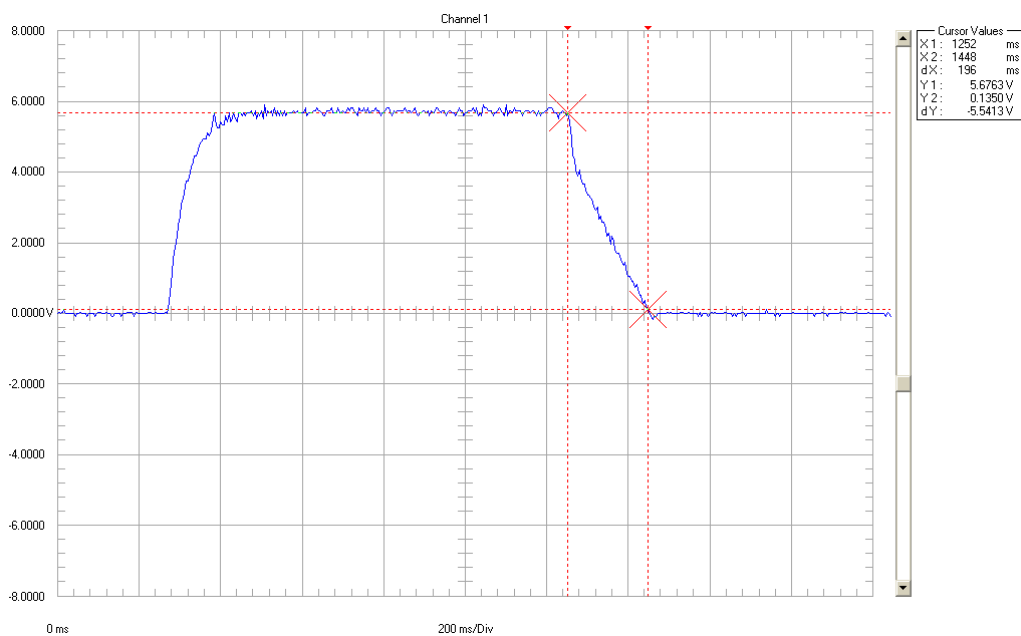
Anexa 6.1.
Parametrii fazei de pornire-oprire pentru modulul de tractiune.
Variantele de alimentare la 4V și 6V.



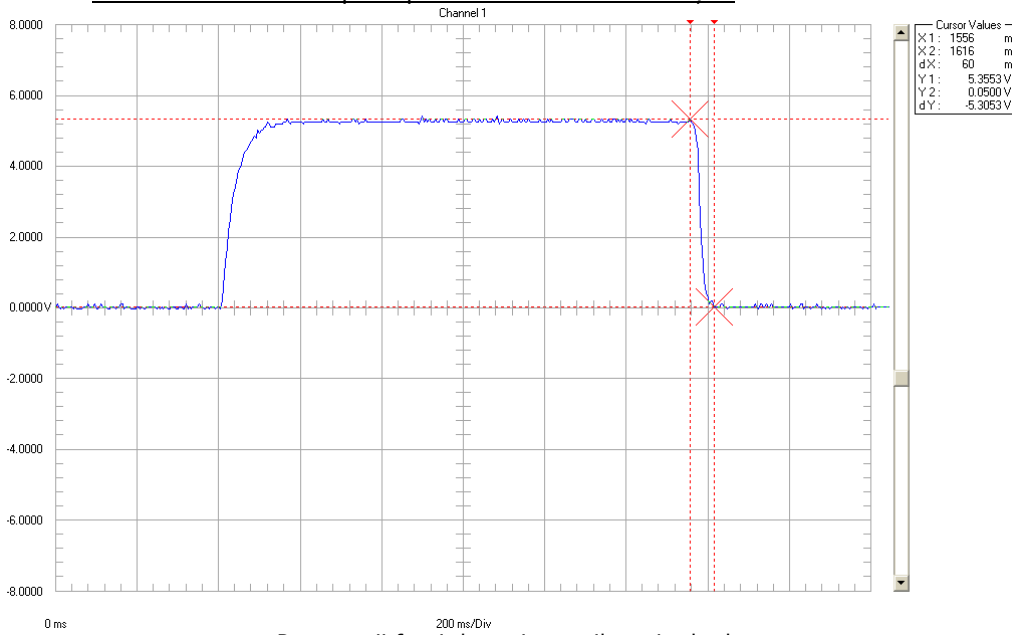
Parametrii fazei de pornire, tensiune de alimentare $U = 4V$.



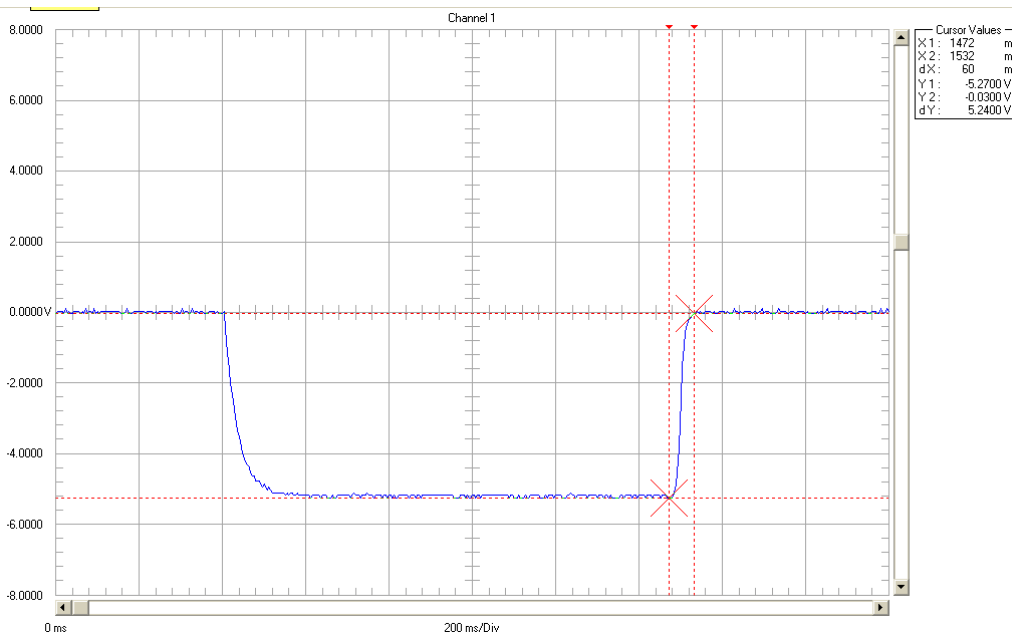
Parametrii fazei de oprire, tensiune de alimentare $U = 4V$.

Parametrii fazei de pornire, tensiune de alimentare $U = 6V$.Parametrii fazei de oprire, tensiune de alimentare $U = 6V$.

Anexa 6.2.
Parametrii fazei de oprire pentru modulul de direcție.

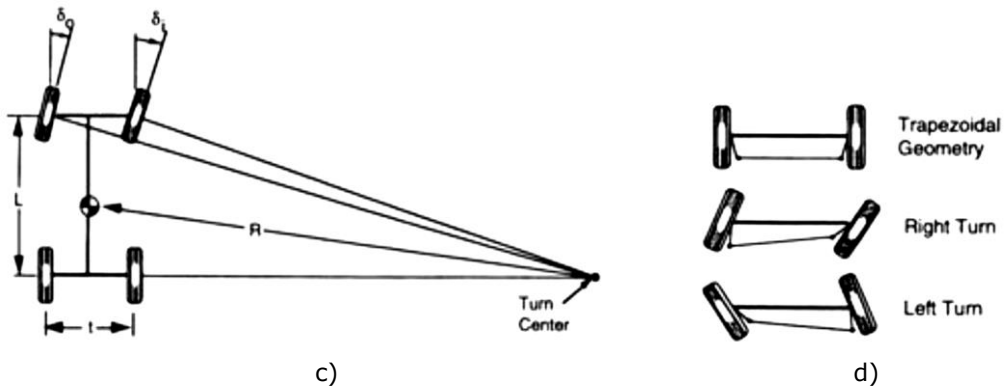
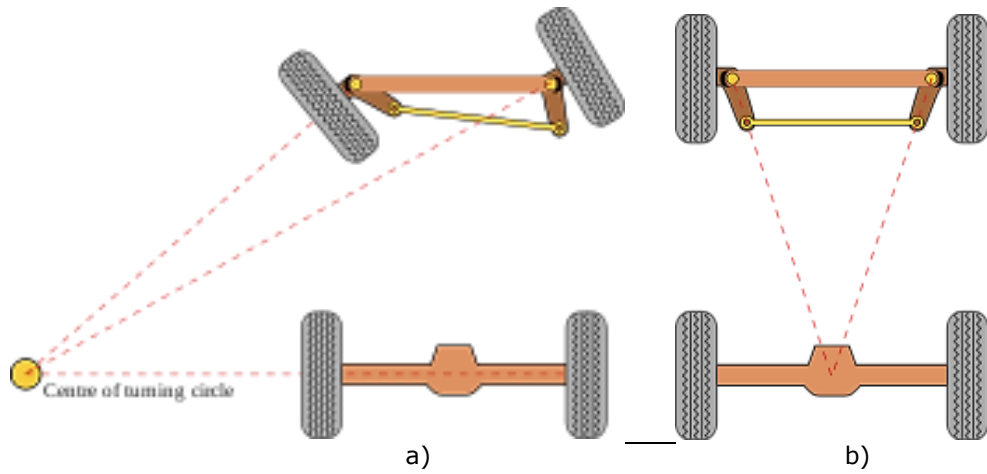


Parametrii fazei de oprire, roțile rotite la dreapta.

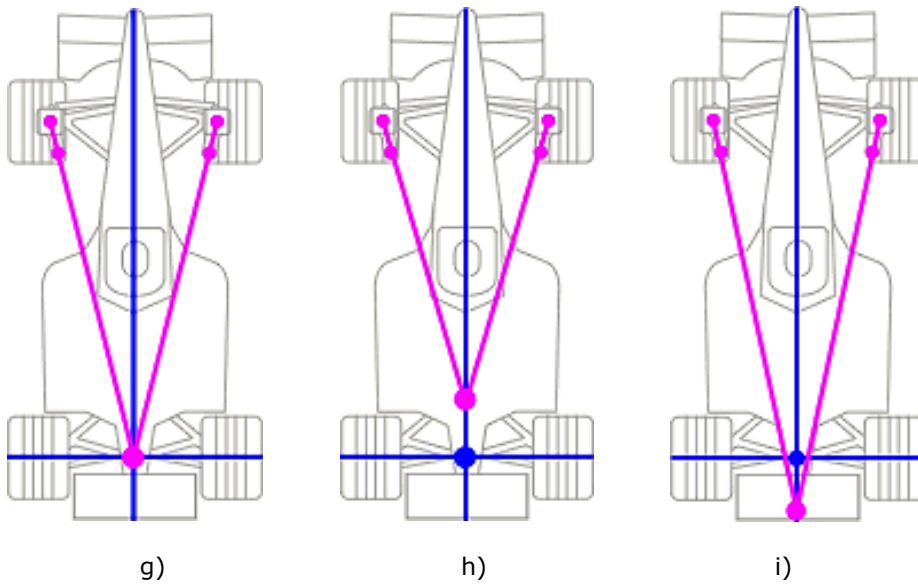
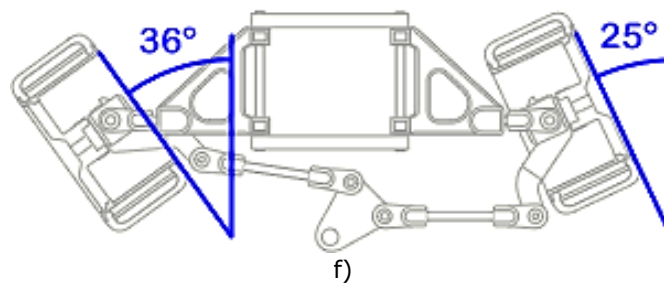
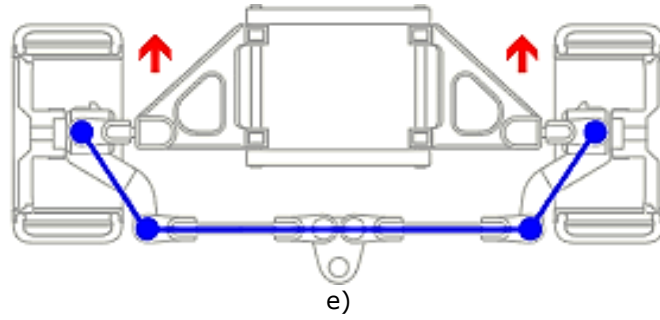


Parametrii fazei de oprire, roțile rotite la stânga.

Anexa 6.3.
Mecanismul Ackerman.



a,b,c,d – Mecanismul Ackerman și centrul instantaneu de rotație [***6.5]



e,f,g,h,I – Mecanismul Ackerman și condiții de asigurarea unghiului de pivotare

Anexa 6.4. Programul integrat în sistemul de comandă

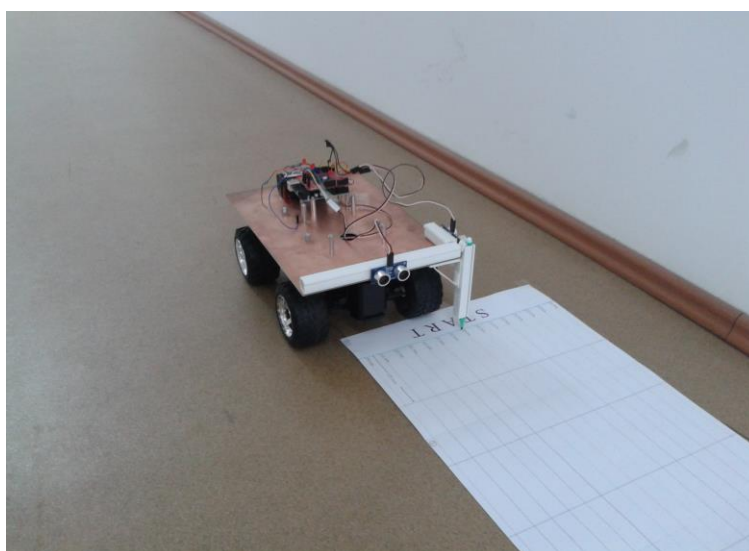
```

/* Ping))) Sensor
const int pingPin = 7;
int pwm_a = 3; //PWM control for motor outputs 1 and 2 is on digital pin 3
int pwm_b = 11; //PWM control for motor outputs 3 and 4 is on digital pin 11
int dir_a = 12; //dir control for motor outputs 1 and 2 is on digital pin 12
int dir_b = 13; //dir control for motor outputs 3 and 4 is on digital pin 13
void setup() {
  // initialize serial communication:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pwm_a, OUTPUT); //Set control pins to be outputs
  pinMode(pwm_b, OUTPUT);
  pinMode(dir_a, OUTPUT);
  pinMode(dir_b, OUTPUT);
}
void loop()
{
  long duration, cm, sw;
  pinMode(pingPin, OUTPUT);
  digitalWrite(pingPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(pingPin, HIGH);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(pingPin, LOW);
  pinMode(pingPin, INPUT);
  duration = pulseIn(pingPin, HIGH);
  cm = microsecondsToCentimeters(duration);
  Serial.print(cm);
  Serial.print("cm");
  Serial.println();
  {
    digitalWrite(dir_a, HIGH);
    analogWrite(pwm_a, 150);
  }
  if (cm<30) {
    //digitalWrite(dir_a, LOW);
    //analogWrite(pwm_a, 200);
    digitalWrite(dir_b, HIGH);
    analogWrite(pwm_b, 250);
    //delay(500);
  }
  else {
    digitalWrite(dir_b, LOW);
    analogWrite(pwm_b,250);
  }
  //delay(500);
}
long microsecondsToCentimeters(long microseconds)
{
  // The speed of sound is 340 m/s or 29 microseconds per centimeter.
  // The ping travels out and back, so to find the distance of the
  // object we take half of the distance travelled.
  return microseconds / 29 / 2;
}

```

Anexa 6.5. Scena de lucru și robotul mobil

Traseul



Robotul mobil în scena de lucru