

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie mecanică

Ing. Teodora Miruna DINCĂ (căs. Gîrbacia)

**Contribuţii privind modelarea, planificarea şi
simularea traseelor şi traiectoriilor
autovehiculelor autonome de transport intern în
medii industriale**

**Contributions regarding path and trajectory
modelling, planning and simulation for internal
transport autonomous vehicles in industrial
environment**

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător ştiinţific

Prof. univ. dr. ing. Gheorghe-Leonte MOGAN

BRAŞOV, 2019

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov

Nr. din

PREȘEDINTE:

Prof. univ. dr. ing. Nicolae ISPAS

Universitatea Transilvania din Braşov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. univ. dr. ing. Gheorghe L. MOGAN

Universitatea Transilvania din Braşov

REFERENȚI:

Prof. univ. dr. ing. Edward RAKOȘI

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Prof. univ. dr. ing. Ionel SIMION

Universitatea Politehnica din București

Prof. univ. dr. ing. Adrian ȘOICA

Universitatea Transilvania din Braşov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 20.09.2019, ora 12, sala NP 7.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa teodora.girbacia@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS (lb. română)

	Pg. teza	Pg. rezumat
LISTA FIGURILOR	9	-
LISTA TABELELOR	12	-
LISTA ABREVIERILOR	13	9
1. INTRODUCERE	15	11
1.1 Necesitatea și justificarea temei.....	15	11
1.2 Obiectivele cercetării.....	16	12
1.3 Metodologia și etapele cercetării.....	16	12
1.3 Structura și conținutul tezei de doctorat.....	18	14
2. VEHICULE AUTONOME. TRANSPORT INTERN. STADIUL ACTUAL	22	15
2.1 Aspecte generale privind autovehiculele autonome.....	22	15
2.2 Nivelurile de automatizare a autovehiculelor.....	23	-
2.3 Clasificarea autovehiculelor autonome.....	25	-
2.4 Structurile funcționale ale AaTI.....	26	15
2.5 Planificarea traseelor autovehiculelor autonome.....	28	15
2.5.1 Metode de planificare a traseelor.....	28	16
2.5.2 Algoritmi de planificare a traseelor.....	28	17
2.5.2.1 Algoritmul A*.....	28	-
2.5.2.2 Algoritmul RRT.....	30	17
2.5.2.3 Algoritmul câmpurilor potențiale.....	32	-
2.5.2.4 Alți algoritmi de planificare a traseelor.....	33	-
2.6 Metode de netezire a traseelor.....	33	17
2.6.1 Caracteristicile clotoidei.....	34	18
2.6.2 Caracteristicile curbei Bezier.....	35	-
2.6.3 Caracteristicile curbei polinomiale cubice.....	36	-
2.7 Planificarea traiectoriilor.....	36	18
2.7.1 Planificarea traiectoriilor pentru autovehicule neolonome.....	37	-
2.7.2 Planificarea traiectoriilor prin utilizarea controlerelor fuzzy.....	39	-
2.8 Transportul intern în medii industriale.....	40	19
2.8.1 Aspecte generale.....	40	19
2.8.2 Căi de transport în medii industriale.....	41	19
2.8.3 Caracteristicile mijloacelor auto de transport intern.....	42	20
2.9 Concluzii.....	43	21
3. MODELAREA TRASEELOR AaTI	44	22
3.1 Structura și clasificarea traseelor AaTI.....	44	22
3.2 Modelarea subtraseelor AaTI.....	47	24
3.2.1 Modelarea subtraseelor de tip segment de dreaptă.....	47	-
3.2.2 Modelarea subtraseelor de tip arc de cerc.....	47	-
3.2.3 Modelarea subtraseelor de tip arc de clotoidă.....	48	-
3.2.4 Modelarea subtraseelor de tip viraj.....	49	24
3.2.4.1 Modelarea subtraseelor de tip viraj cu unghi de bracare oarecare.....	49	25
3.2.4.2 Modelarea subtraseelor de tip viraj cu unghi de bracare maxim.....	49	25
3.3 Clasificarea și descrierea traseelor simple.....	51	26
3.4 Modelarea traseelor simple cu două viraj.....	54	29
3.4.1 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens fără inversarea sensului de deplasare.....	54	29

3.4.2 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu sensuri opuse și fără inversarea sensului.....	59	32
3.4.3 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens și cu inversarea sensului la plecare.....	63	33
3.4.4 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu sensuri opuse și cu inversarea sensului la plecare.....	66	35
3.4.5 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens și cu inversarea sensului la sosire.....	69	35
3.4.6 Modelarea traseelor simple cu două viraje de sensuri opuse și cu inversarea sensului la sosire.....	72	38
3.5 Modelarea traseelor complexe.....	76	39
3.6 Trasee cu sosire la punctul de plecare.....	77	40
3.6.1 Particularități ale traseelor cu sosire la punctul de plecare.....	77	40
3.6.2 Trasee simple cu sosire la punctul de plecare.....	77	40
3.6.3 Trasee complexe cu întoarcere la punctul de plecare.....	78	-
3.7 Concluzii.....	79	41
4. PLANIFICAREA TRASEELOR ȘI TRAIECTORIILOR AaTI.....	81	42
4.1 Aspecte generale.....	81	42
4.2 Planificarea traseelor AaTI.....	81	42
4.2.1 Algoritmul planificării traseelor.....	81	42
4.2.2 Planificarea globală a traseelor cu algoritmul RRT îmbunătățit.....	83	43
4.2.3 Planificarea locală a traseelor obținute cu algoritmul RRT îmbunătățit.....	87	45
4.3 Planificarea traiectoriilor AaTI.....	89	47
4.3.1 Constrângeri geometrice și cinetostatice impuse de autovehicul și de navigare.....	89	-
4.3.1.1 Constrângeri geometrice impuse de sistemul de direcție de tip Ackermann.....	89	-
4.3.1.2 Constrângeri impuse de modelele cinetostatice.....	91	-
4.3.2 Modele de planificare a traiectoriilor AaTI.....	92	47
4.3.2.1 Model general de planificare a traiectoriilor.....	92	47
4.3.2.2 Model de generare a subtraectorii de tip segment de dreaptă.....	93	47
4.3.2.3 Model de generare a subtraectorii de tip arc de cerc.....	95	49
4.3.2.4 Model de generare a subtraectorii de tip arc de clotoidă.....	95	50
4.4 Aplicație de planificare a unei traiectorii cu un viraj.....	98	-
4.5 Concluzii.....	99	52
5. SIMULAREA NAVIGĂRII AaTI ÎN MEDII VIRTUALE.....	101	53
5.1 Aspecte generale.....	101	53
5.2 Alegerea programului de simulare și testare a navigării AaTI în medii virtuale.....	101	53
5.3 Modelarea și reprezentarea traseelor virtuale.....	105	53
5.3.1 Modelarea subtraseelor virtuale de tip arc de cerc și de clotoidă utilizând curbe Bezier.....	105	53
5.3.2 Reprezentarea traseelor virtuale.....	106	54
5.4 Modelarea și testarea navigării pe subtraectorii virtuale.....	107	55
5.4.1 Modelarea subtraectoriilor virtuale.....	107	55
5.4.2 Testarea navigării autovehiculului pe subtraectorii virtuale.....	112	-
5.5 Modelarea și testarea navigării pe traiectorii complexe virtuale.....	113	56
5.6 Prelucrarea și analiza datelor obținute în urma testelor.....	118	59
5.7 Concluzii.....	123	62

6. MINIAUTOVEHICUL AUTONOM PENTRU STUDII EXPERIMENTALE	125	63
6.1 Structura hardware a miniautovehiculului autonom	125	63
6.2 Programe de comandă și control a miniautovehiculului autonom	128	64
6.2.1 Programul general de comandă și control a microcontrolerului Arduino	128	64
6.2.2 Algoritmul și programul de control și comandă a servomotoarelor	129	65
6.2.3 Funcțiile de control și comandă a servomotoarelor	131	66
6.3. Calibrarea servomotoarelor	134	67
6.4 Concluzii	135	68
7. STUDII EXPERIMENTALE CU MINIAUTOVEHICULUL AUTONOM	136	70
7.1 Planificarea experimentelor	137	70
7.2 Realizarea experimentelor și achiziția de date	138	71
7.3 Prelucrarea și analiza datelor experimentale	139	72
7.4 Concluzii	142	74
8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI NOI DIRECȚII DE CERCETARE	144	75
8.1 Concluzii finale	151	75
8.2 Contribuții originale	153	77
8.3 Valorificarea rezultatelor cercetării	154	78
8.3.1 Lucrări publicate	154	78
8.3.2 Participări la conferințe	156	80
8.3.3 Participări la contracte de cercetare și dezvoltare	156	80
8.4 Direcții viitoare de cercetare	150	80
BIBLIOGRAFIE	151	81
ANEXE	165	-
Anexa 1.	165	-
Anexa 2.	173	-
Anexa 3.	177	-
Anexa 4.	179	-
Anexa 5.	182	-
REZUMAT	191	85
CV română	193	86
CV engleză	194	87
DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE	195	-

CONTENTS

	Pg. teza	Pg. rezumat
LIST OF FIGURES	9	-
LIST OF TABLES	12	-
LIST OF ABBREVIATIONS	13	9
1. INTRODUCTION	15	11
1.1 Necessity and justification of the topic	15	11
1.2 Research objectives	16	12
1.3 Methodology and stages of research	16	12
1.3 Structure and contents of the PhD thesis	18	14
2. AUTONOMOUS VEHICLES. INTERNAL TRANSPORT. STATE OF THE ART	22	15
2.1 General aspects regarding autonomous vehicles	22	15
2.2 Automation levels of vehicles	23	-
2.3 Classification of autonomous vehicles	25	-
2.4 Functional structures of AaTI	26	15
2.5 Path planning for autonomous vehicles	28	15
2.5.1 Methods of path planning	28	16
2.5.2 Path planning algorithms	28	17
2.5.2.1 The A* algorithm	28	-
2.5.2.2 The RRT algorithm	30	17
2.5.2.3 The potential field algorithm	32	-
2.5.2.4 Other path planning algorithms	33	-
2.6 Methods of path smoothing	33	17
2.6.1 Characteristics of the clothoid curve	34	18
2.6.2 Characteristics of the Bezier curve	35	-
2.6.3 Characteristics of the cubic polynomial curve	36	-
2.7 Trajectory planning	36	18
2.7.1 Trajectory planning for nonholonomic vehicles	37	-
2.7.2 Trajectory planning using fuzzy controllers	39	-
2.8 Internal transport in industrial environments	40	19
2.8.1 General aspects	40	19
2.8.2 Transport routes in industrial environments	41	19
2.8.3 Characteristics of auto means of internal transport	42	20
2.9 Conclusions	43	21
3. MODELING THE AaTI PATHS	44	22
3.1 Structure and classification of AaTI paths	44	22
3.2 Modeling the AaTI subpaths	47	24
3.2.1 Modeling the straight segment type subpaths	47	-
3.2.2 Modeling the circle arc type subpaths	47	-
3.2.3 Modeling the clothoid arc type subpaths	48	-
3.2.4 Modeling the turn type subpaths	49	24
3.2.4.1 Modeling the turn type subpaths with any turning angle	49	25
3.2.4.2 Modeling the turn type subpaths with maximum turning angle	49	25
3.3 Classification and description of simple paths	51	26
3.4 Modeling of two-turns simple paths	54	29
3.4.1 Modeling of two-turns with the same sense simple paths without reversing the direction of movement	54	29

3.4.2 Modeling of two-turns with opposite sense simple paths without reversing the direction of movement.....	59	32
3.4.3 Modeling of two-turns with the same sense simple paths with the reversing of the direction of movement at departure.....	63	33
3.4.4 Modeling of two-turns with opposite sense simple paths with the reversing of the direction of movement at departure.....	66	35
3.4.5 Modeling of two-turns with the same sense simple paths with the reversing of the direction of movement on arrival.....	69	35
3.4.6 Modeling of two-turns with opposite sense simple paths with the reversing of the direction of movement on arrival.....	72	38
3.5 Modeling complex paths.....	76	39
3.6 Paths with arrival at the point of departure.....	77	40
3.6.1 Particularities of the paths with arrival at the point of departure.....	77	40
3.6.2 Simple paths with arrival at the point of departure.....	77	40
3.6.3 Complex paths with arrival at the point of departure.....	78	-
3.7 Conclusions.....	79	41
4. PLANNING THE PATHS AND TRAJECTORIES FOR AaTI.....	81	42
4.1 General aspects.....	81	42
4.2 Path planning for AaTI.....	81	42
4.2.1 Path planning algorithm.....	81	42
4.2.2 Global path planning with improved RRT algorithm.....	83	43
4.2.3 Local path planning with improved RRT algorithm.....	87	45
4.3 Trajectory planning for AaTI.....	89	47
4.3.1 Geometric and cinematic constraints imposed by the vehicle and the navigation.....	89	-
4.3.1.1 Geometric constraints imposed by the Ackermann steering system.....	89	-
4.3.1.2 Constraints imposed by the cinetostatic models.....	91	-
4.3.2 Trajectory planning models for AaTI.....	92	47
4.3.2.1 Trajectory planning general model.....	92	47
4.3.2.2 Model for generating straight segment type subtrajectory.....	93	47
4.3.2.3 Model for generating circle arc type subtrajectory.....	95	49
4.3.2.4 Model for generating clothoid arc type subtrajectory.....	95	50
4.4 Application for planning a one turn trajectory.....	98	-
4.5 Conclusions.....	99	52
5. SIMULATION OF AaTI NAVIGATION IN THE VIRTUAL ENVIRONMENT.....	101	53
5.1 General aspects.....	101	53
5.2 Choosing the simulation and testing program for AaTI navigation in virtual environments.....	101	53
5.3 Modeling and representing virtual paths.....	105	53
5.3.1 Modeling the circle and clothoid arc type virtual subpaths using Bezier curves.....	105	53
5.3.2 Representing the virtual paths.....	106	54
5.4 Modeling and testing the navigation on virtual subtrajectories.....	107	55
5.4.1 Modeling the virtual subtrajectories.....	107	55
5.4.2 Testing the vehicle navigation on virtual subtrajectories.....	112	-
5.5 Modeling and testing the navigation on complex virtual trajectories.....	113	56
5.6 Processing and analysis of the data obtained after performing the tests.....	118	59
5.7 Conclusions.....	123	62

6. AUTONOMOUS MINIAUTOVEHICLE FOR EXPERIMENTAL STUDIES	125	63
6.1 Hardware structure of the autonomous miniautovehicle	125	63
6.2 Command and control programs for the autonomous miniautovehicle	128	64
6.2.1 Arduino microcontroller general command and control program	128	64
6.2.2 Servomotors command and control algorithm and program	129	65
6.2.3 Servomotors command and control functions	131	66
6.3. Servomotors calibration	134	67
6.4 Conclusions	135	68
7. EXPERIMENTAL STUDIES WITH THE AUTONOMOUS MINIAUTOVEHICLE	136	70
7.1 Planning the experiments	137	70
7.2 Performing the experiments and data acquiring	138	71
7.3 Processing and analysis of the experimental data	139	72
7.4 Conclusions	142	74
8. CONCLUSIONS, ORIGINAL CONTRIBUTIONS, RESULTS CAPITALIZATION AND NEW RESEARCH DIRECTIONS	144	75
8.1 Final conclusions	151	75
8.2 Original contributions	153	77
8.3 Capitalizing the results of the research	154	78
8.3.1 Published pappers	154	78
8.3.2 Conference participations	156	80
8.3.3 Participation in research and development contracts	156	80
8.4 Future research directions	150	80
BIBLIOGRAPHY	151	81
ANNEXES	165	-
Annex 1.	165	-
Annex 2.	173	-
Annex 3.	177	-
Annex 4.	179	-
Annex 5.	182	-
SUMMARY	191	85
CV romanian	193	86
CV english	194	87
STATEMENT OF AUTHENTICITY	195	-

LISTA ABREVIERILOR

ABS	Anti-lock Braking System
ACC	Adaptive Cruise Control
AGV	Autonomous Ground Vehicles
API	Application Programming Interface
AaTI	Autovehicul autonom de Transport Intern
AUV	Autonomous underwater vehicle
BA	Brake Assistance
BOD	Brown Out Detect
CIR	Centrul Instantaneu de Rotație
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
EBD	Electronic Brakeforce Distribution
ESC	Electronic Speed Controller
FRIT	Follow and Reconnect with the Ideal Tree
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
HCT	Hough Circle Transform
HLT	Hough Line Transform
IDE	Integrated Development Environment
IP	Inversare de sens la plecare
IS	Inversare de sens la sosire
ISA	Intelligent Speed Adaptation
LazyRRT	Lazy RRT
LBTRRT	Lower Bound Tree RRT
LCA	Line Change Assistance
LIDAR	Light Imaging, Detection, and Ranging
LPA*	Lifelong Planning A*
MISO	Master In Slave Aut
MOSI	Master Out Slave In
NLP	Natural Language Processing
ODE	Object Database and Environment
OBb	Oriented Bounding Boxes
PBIL	Population-Based Learning Incremental
PF	Pornire Față
PFd	Pornire Față dreapta
PFs	Pornire Față stânga
PROMETHEUS	PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety
PROUD	Public ROad Urban Driverless-Car
pRRT	Parallel RRT
PS	Pornire Spate
PSd	Pornire Spate dreapta
PSs	Pornire Spate stânga
PWM	Pulse Width Modulation
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RGBD	Red Green Blue Depth
ROS	Robot Operating System
RRT	Rapidly-Exploring Random Tree
RV	Realitate Virtuală
SAE	Society of Automotive Engineers

SF	Sosire Față
SFd	Sosire Față dreapta
SFs	Sosire Față stânga
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Sosire Spate
SSd	Sosire Spate dreapta
SSs	Sosire Spate stânga
STL	Standard Template Library
T-RRT	Transition-based RRT
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
URDF	Unified Robot Description Format
V-REP	Virtual Robot Experimentation Platform
VSC	Vehicle Stability Control

1. INTRODUCERE

De la apariția primelor autovehicule până în prezent industria auto a cunoscut o dezvoltare continuă, iar în ultimii ani, direcțiile de cercetare s-au axat pe dezvoltarea autovehiculelor hibride, electrice și autonome.

În mediile industriale, gradul de automatizare a proceselor tehnologice este în creștere, inclusiv, în cadrul proceselor de transport intern. Pe lângă introducerea sistemelor ghidate și/sau robotizate fixe și mobile, în ultimii ani, autovehiculele autonome au început să fie utilizate și pentru transportul intern din mediile industriale. Autovehiculele autonome pot naviga atât în interiorul halelor, cât și în zonele dintre hale, putând realiza cu ușurință transportul unor piese, semifabricate și materiale între spațiile de lucru situate în zone diferite.

Luând în considerare particularitățile unui mediu industrial, în special, faptul că acesta este structurat pe hale, care la rândul lor sunt organizate în zone de lucru, navigarea autovehiculului se realizează de-a lungul unor căi de transport specifice, caracterizate de lungimi scurte și lățimi înguste. O altă caracteristică care influențează modul de navigare a autovehiculelor autonome o constituie poziția preponderent fixă a obstacolelor; obstacolele mobile sunt în acest caz rare și previzibile.

Principalele activități care pot fi realizate de autovehiculele autonome în mediile industriale constau în transportul și depozitarea materialelor prime și/sau a pieselor semifabricate necesare în procesele de fabricație. În prezent, încă mai există sisteme de transport intern rigide cu vehicule ghidate de-a lungul unui traseu fix prin urmărirea unor repere, a unei linii continue, a unei benzi magnetice sau reflexive amplasate în podea.

1.1 Necesitatea și justificarea temei

Necesitatea dezvoltării cercetărilor din cadrul acestei teze de doctorat provine din tendințele actuale de extindere a dezvoltării și implementării autovehiculelor autonome, preponderent rutiere, și la alte domenii (servicii, industriale, militare etc.) care implică specificități, atât în ce privește structura autovehiculului, cât și mediile de navigare. Căile de transport, de obicei în plan orizontal, din mediile industriale din interiorul halelor de producție, dar și din exteriorul acestora, sunt caracterizate, pe de-o parte, de lungimi scurte, curbe cu raze mici și lățimi înguste și, pe de altă parte, de viteze reduse.

Odată cu dezvoltarea, preponderent a autovehiculelor autonome rutiere cu diverse nivele de implementare, este justificată realizarea cercetărilor privind concepția și dezvoltarea de *Autovehicule autonome de Transport Intern (AaTI)*, pornind de la structurile autovehiculelor clasice (platforme deschise, stivuitoare, camioane etc.) care să realizeze funcții de transport bazat pe un sistem de conducere și control centralizat. Pentru a reduce timpul necesar transportului, traseele urmărite de autovehiculele autonome trebuie să fie optimizate și adaptate la structurile mediilor de operare.

Principalul avantaj al utilizării unui AaTI este minimizarea timpului necesar pentru transportul și depozitarea materialelor folosite în procesele industriale. Navigarea autovehiculelor autonome în medii industriale presupune identificarea apriori, prin aplicarea unor metode de planificare, a traseelor și traiectoriilor de parcurs.

Din acest motiv se impune efectuarea unor cercetări privind modelarea, planificarea și simularea traseelor și traiectoriilor optime pentru autovehiculele autonome de transport intern din punct de vedere al timpului necesar pentru parcurgerea acestora și al numărului de manevre pe care trebuie să le realizeze.

1.2 Obiectivele cercetării

Obiectivul principal al tezei de doctorat este studiul, concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui sistem de modelare, planificare și simulare a traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome de transport intern adaptabile la specificațiile mediilor industriale de producție.

Obiectivele specifice:

1. analiza cercetărilor teoretice și experimentale privind caracteristicile autovehiculelor autonome de transport, problemelor întâlnite în navigarea acestora în medii industriale precum și a soluțiilor adoptate;
2. modelarea matematică a tuturor traseelor posibile de deplasare a autovehiculelor autonome de transport intern, ținând cont de specificațiile căilor și ale autovehiculelor cu sistem de virare de tip Ackermann;
3. conceperea și dezvoltarea unei metodologii de planificare a traseelor optime care stau la baza traiectoriilor de deplasare;
4. conceperea și dezvoltarea unei metodologii de planificare a traiectoriilor pe care autovehiculul autonom trebuie să le urmeze;
5. simularea navigării autovehiculelor autonome de transport intern în medii virtuale, urmărind traiectorii de deplasare impuse și respectând gabaritele căilor de acces;
6. concepția și dezvoltarea unui miniautovehicul autonom pentru a verifica prin similitudine rezultatele teoretice obținute;
7. studii experimentale în medii reale în vederea validării rezultatelor obținute teoretic și prin simulări virtuale.

1.3 Metodologia și etapele cercetării

În urma stabilirii obiectivelor și a analizării cercetărilor teoretice și experimentale privind caracteristicile autovehiculelor autonome și a problemelor întâlnite în navigarea acestora în medii industriale, s-a conceput un sistem de modelare, planificare, programare și implementare a traiectoriilor și de navigare a unui AaTI care justifică dezvoltarea cercetărilor în cadrul acestei lucrări, evidențiind modurile de folosire a rezultatelor obținute în practică. Astfel, în fig. 1.1 se prezintă schema bloc a acestui sistem în care sunt evidențiate etapele off-line care au fost dezvoltate în cadrul acestei cercetări, cu precădere, cele privitoare la modelarea și planificarea traseelor și traiectoriilor unui AaTI.

Având în vedere că etapele de modelare, planificare și simulare a traseelor și traiectoriilor sunt costisitoare, implicând volume de calcul mărite, pentru optimizarea navigării autovehiculelor autonome pentru sarcini de transport intern, se propune ca aceste etape să se realizeze în afara procesului de navigare (off-line). Astfel, se vor putea genera trasee și traiectorii de referință care vor fi stocate într-o bază de programe și apoi vor putea fi selectate pentru a fi integrate în programe de navigare complexe pentru sarcini de transport concrete.

Pentru simularea navigării unui autovehicul autonom cu sistem de virare de tip Ackerman se va dezvolta un mediu de transport industrial virtual, utilizând simulatorul V-REP și programe de calcul a geometriei și cinematicii în Matlab. În acest fel se poate evalua precizia de urmărire a traiectoriilor planificate precum și eficiența parcurgerii acestora.

Traseele și traiectoriile obținute cu metodele de planificare dezvoltate se vor testa și în mediul real, prin navigarea unui miniautovehicul autonom experimental programat să parcurgă aceste traiectorii.

Pentru a evalua metodele de planificare a traseelor propuse, se vor determina experimental erorile de urmărire a traseelor atât în mediul virtual, cât și în cel real.

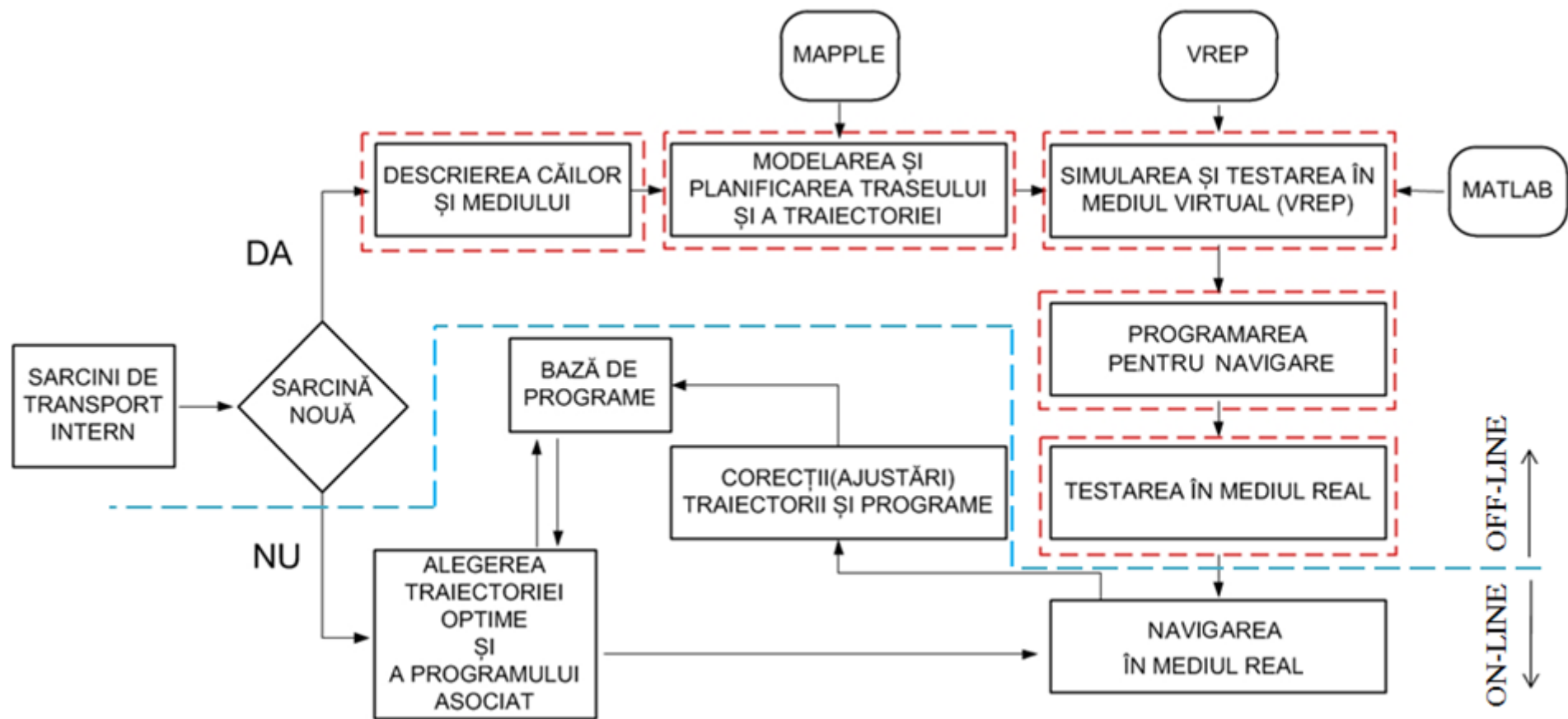


Fig. 1.1 Schema bloc a sistemului general de modelare, planificare, programare, implementare a traiectoriilor și de navigare a unui AaTI

În urma parcurgerii traiectoriilor planificate de către autovehiculul virtual sau de către miniautovehicul, vor fi achiziționate și procesate date pentru calculul erorilor de urmărire, dar și pentru determinarea timpilor realizați.

Programarea unui AaTI, în vederea navigării, presupune parcurgerea preliminară a trei etape succesive:

- a. *Modelarea și planificarea traseelor*, pentru stabilirea unei succesiuni de puncte prin aplicarea algoritmilor de planificare care formează linii netede pentru a asigura deplasarea uniformă a autovehiculului autonom.
- b. *Modelarea și planificarea traiectoriilor*, pentru obținerea legilor de mișcare ale motoarelor de propulsie și de virare, pornind de la traseele planificate și vitezele de deplasare impuse. În cadrul acestei etape se asigură deplasarea uniformă a autovehiculului prin variația continuă a vitezei, până când acesta ajunge la destinație.
- c. *Navigarea și evaluarea modului în care autovehiculul urmărește traiectoriile planificate*, implică atât simularea în mediul virtual, cât și modul în care un miniautovehicul navighează într-un mediu real.

Cercetările realizate în cadrul tezei de doctorat au atât caracter teoretic, prin dezvoltarea metodelor de modelare și planificare a traseelor și traiectoriilor, cât și caracter experimental-aplicativ, prin simularea metodelor elaborate în medii virtuale și testarea acestora în scenarii reale.

1.4 Structura și conținutul tezei de doctorat

Lucrarea de doctorat este structurată în 8 capitole și 5 anexe.

În *capitolul 1, Introducere*, sunt prezentate aspecte generale privind realizarea cercetărilor din cadrul tezei de doctorat. În primul rând se evidențiază necesitatea dezvoltării autovehiculelor autonome, în special pentru transport intern, și utilitatea acestora în medii industriale și se stabilește obiectivul principal al tezei, împreună cu obiectivele specifice.

În *capitolul 2, Autovehicule autonome. Stadiul actual*, sunt prezentate caracteristicile autovehiculelor autonome și istoricul dezvoltării acestora, precum și probleme legate de planificarea traiectoriilor și de navigare a acestora.

În *capitolul 3, Modelarea traseelor AaTI*, se determină în primul rând scenariile posibile de navigare a autovehiculelor autonome în mediul industrial și se identifică toate posibilitățile de deplasare a acestora, în special, la plecare și la sosire.

În *capitolul 4, Planificarea traseelor și traiectoriilor AaTI*, sunt prezentate etapele planificării traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome pentru navigarea în medii industriale.

În *capitolul 5, Simularea navigării AaTI în medii virtuale*, se prezintă dezvoltarea mediului industrial virtual, modelarea traseelor virtuale, simularea deplasării autovehiculului virtual de-a lungul traseelor planificate și analiza rezultatelor obținute în urma simulărilor.

În *capitolul 6, Miniautovehicul autonom pentru studii experimentale* se prezintă etapele dezvoltării unui miniautovehicul pentru verificarea experimentală în mediul real a metodelor de planificare a traseelor și traiectoriilor.

În *capitolul 7, Studii experimentale cu miniautovehiculul autonom* sunt prezentate experimentele realizate cu scopul verificării metodelor de planificare a traseelor și traiectoriilor

În *capitolul 8, Concluzii, contribuții originale, valorificarea rezultatelor și direcții viitoare de cercetare*, sunt prezentate concluziile cercetărilor efectuate, sunt evidențiate contribuțiile originale, sunt analizate rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate în medii virtuale și reale și sunt expuse direcțiile viitoare de cercetare. În plus, este prezentată lista de lucrări publicate, participarea la conferințe internaționale și contractele de cercetare în cadrul cărora autoarea a fost membră.

2. AUTOVEHICULE AUTONOME. TRANSPORT INTERN. STADIUL ACTUAL

2.1 Aspecte generale privind autovehiculele autonome

Avantajele autovehiculelor autonome rutiere, printre care se enumeră evitarea accidentelor, sporirea fiabilității, creșterea capacității de rulare, congestionarea redusă a traficului, precum și reducerea necesității de intervenție a poliției rutiere, sunt principalii promotori pentru dezvoltarea acestora [Sule, 2015].

Primii pași spre dezvoltarea autovehiculelor autonome au fost realizați odată cu revoluția digitală și cu cercetările de pionierat în domeniul inteligenței artificiale. Cu toate acestea, doar în anii 1980, au fost realizați primii pași către dezvoltarea autovehiculele capabile să navigheze fără conducător auto.

Deși s-au realizat numeroase progrese privind nivelele de automatizare [Gîrbacia, 2016; Pantea, 2017; Dumitru, 2018], încă există multe aspecte de rezolvat privind dezvoltarea autovehiculelor autonome.

2.4 Structuri funcționale ale AaTI

Arhitecturile sistemelor autovehiculelor autonome sunt diferite în funcție de scopul pentru care au fost create. Structura funcțională generală a unui autovehicul autonom de transport intern este prezentată în fig. 2.4, unde se identifică cinci sisteme principale: senzorial (de identificare), de percepție, de localizare, de planificare, de control.

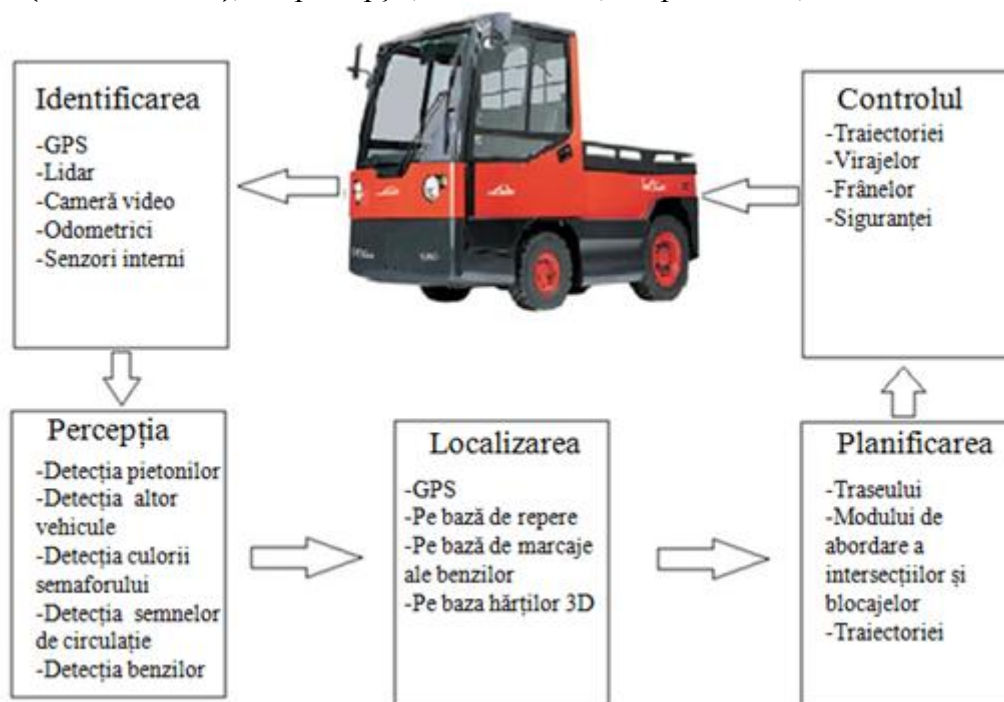


Fig.2.4 Structura funcțională generală a unui AaTI

2.5 Planificarea traseelor autovehiculelor autonome

Stabilirea traseului pe care autovehiculul trebuie să îl urmeze depinde de structura mediului în care acesta se deplasează [Au, 2012]. Un traseu este definit ca o secvență de puncte interconectate prin entități geometrice într-o reprezentare grafică bidimensională.

Planificarea traseelor presupune, în general, parcurgerea următoarelor etape:

- Selectarea unui algoritm, dintre numeroși algoritmi existenți, pentru generarea căii în funcție de cerințele propuse.
- Selectarea unei metode de netezire a traseului generat cu algoritmul ales pentru a obține un traseu ce poate fi urmărit cu mișcări uniforme de autovehiculul autonom.

2.5.1 Metode de planificare a traseelor

Metodele de planificare a traseelor autovehiculelor autonome pot fi clasificate ținând cont de mai multe tipuri de criterii (tab. 2.2).

Tab 2.2 Clasificarea metodelor de planificare a traseelor

Criteriul	Denumirea	Observații
Tipul sistemelor de propulsie-direcție	Pentru sisteme olonome	Structura olonomă are toate gradele de libertate controlabile deoarece, constrângerile de deplasare sunt integrabile. Această caracteristică permite controlul autovehicul cu ușurință, deoarece acesta se poate deplasa în orice direcție în spațiul de navigare, simplificându-se problema de planificare a traseului
	Pentru sisteme neolonome	Termenul neolonom implică faptul că există constrângeri de deplasare care nu pot fi integrate. Autovehiculele cu sisteme neolonome sunt supuse constrângerilor de deplasare și de virare interdependente
Valorile vitezelor de navigare	Pentru viteze ridicate	Evitarea obstacolelor cu respectarea limitelor vitezelor și forțelor reprezintă cazul general de deplasare cu constrângeri cinematice și dinamice simultane [Xavier,1993;LaValle,2001]
	Pentru viteze reduse	Nu există constrângeri care iau în considerare limitele vitezelor și forțelor, acestea fiind nesemnificative
Tipul descrierii mediului de navigare	Cu modelarea mediului de navigare	Pentru unii algoritmi, cum ar fi Dijkstra și A* [Shaojie, 2011], primul pas este de a modela mediul în care navighează autovehiculul, înainte de a căuta calea optimă
	Fără modelarea mediului de navigare	Pentru alți algoritmi cum ar fi cei care utilizează câmpuri potențiale [Jakob, 2012] și RRT (Rapidly exploring Random Trees) nu este necesară modelarea mediului
Perioada în care se face planificarea	Online	Planificarea traseului este realizată în timp ce autovehiculul se deplasează în mediul de navigare
	Offline	Planificarea traseului este realizată înainte ca autovehiculul să se deplaseze în mediul de navigare
Tipul algoritmului de planificare	Deterministice	Metodele deterministe folosite frecvent au la bază algoritmi programării matematice, Dijkstra și A* aplicate cu griduri și grafuri de vizibilitate. Aceste metode conduc la același rezultat pentru fiecare execuție pornind de la aceleași condiții inițiale
	Probabilistice	Pentru planificarea traseelor într-un mediu de navigare, mai ales în timp real, sunt folosite metodele Particle Swarm Optimization [Yarmohamadi, 2011], Ant Colony [Brand, 2010], Probabilistic Road Mapping, Randomly exploring Random Trees, cele care au la bază algoritmi multi-agent [Yu, 2013]

2.5.2 Algoritmi de planificare a traseelor

Algoritmii de planificare generează trasee compuse din entități geometrice (segmente de dreaptă, arce de cerc, arce de clotoidă etc.) pentru deplasare de la un punct inițial la un punct final, trecând prin punctele intermediare din spațiul de navigare predefinite [Chu, 2012]. Planificarea ideală presupune ca autovehiculul să evite impactul cu obstacolele și să deplaseze pe traseul cel mai scurt în timp minim [Lau, 2013].

2.5.2.2 Algoritmul RRT

Algoritmul RRT este considerat ca fiind cel mai eficient pentru planificarea traseelor optime ale autovehiculelor autonome. De exemplu, s-a demonstrat eficiența acestui algoritm pentru planificarea traseelor de deplasare a unui autovehicul cu menținerea benzii de circulație [Xu, 2014; Johnson, 2015; Palmieri, 2016].

Acest algoritm este proiectat pentru căutarea eficientă a spațiilor neconvexe și este conceput să lucreze iterativ, astfel încât, să reducă distanța dintre un punct ales aleator și arborele deja creat (fig. 2.6). Algoritmul poate fi considerat ca o tehnică pentru generarea traiectoriilor de tip buclă-deschisă [Devaurs, 2011; Jacobs, 2013].

Algoritmul RRT, utilizat cu scopul planificării traseelor autovehiculelor autonome, de-a lungul timpului, a fost îmbunătățit obținându-se noi variante care prezintă avantaje suplimentare [Bry, 2011; Salzman, 2016]: *RRT Connect*, *RRT**, *Lower Bound Tree RRT*, *Transition-based RRT*, *Parallel RRT*, *Lazy RRT*.

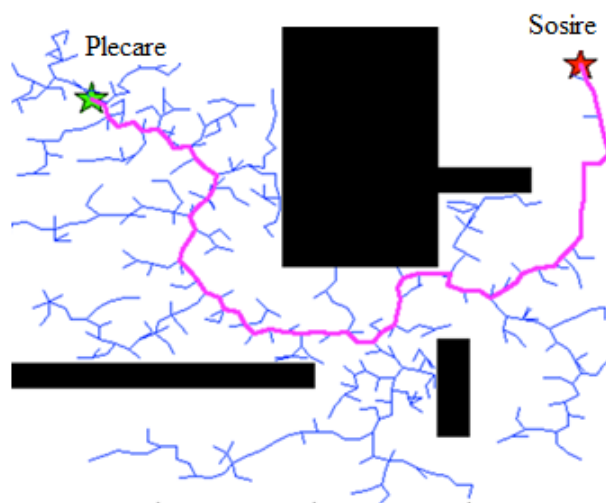


Fig. 2.6 Algoritmului RRT cu 500 de iterații

2.6 Metode de netezire a traseelor

Cei mai mulți algoritmi de planificare generează trasee sub formă de polilinie, care deși este continuă, are variații bruște de direcție (discontinuități ale derivatelor), care nu pot fi urmărite cu ușurință de autovehicul (mai ales, de cel cu sistem direcție Ackerman), deoarece acesta ar trebui să se oprească, în punctele cu discontinuitate a direcției, pentru a vira și apoi să pornească să continue deplasarea. Pentru realizarea de mișcări continue (fără opriri/porniri) se impune modificarea traseului obținut în urma planificării prin introducerea, în zonele cu discontinuități de direcție, a unor linii curbe care asigură deplasarea continuă a autovehiculului cu mișcări de propulsie și virare simultan [Fraichard, 200; Sabelhaus, 2013]. Acest proces, în continuare, numit de netezire presupune transformarea unui traseu, prin integrarea unor linii curbe de virare în zonele cu discontinuități de direcție [Egerstedt, 2009; Villagra, 2012; Jun, 2015].

Printre curbele de virare, cel mai des folosite pentru netezire, sunt:

- *Curbele Euler* sunt cunoscute și sub denumirea de clotoide sau spirale Cornu. Cea mai importantă caracteristică a acestora este proprietatea conform căreia curbura variază liniar cu lungimea arcului condiție ce permite autovehiculului să se deplaseze de-a lungul traseului cu viteză constantă și cu mișcare de virare [Shan, 2015]. Cu toate că

necesită o putere mare de calcul pentru generare, clotoida este din ce în ce mai des folosită pentru determinarea traseelor autovehiculelor autonome și pentru generarea hărților digitale ale drumurilor [Labakhua, 2008].

- *Curbele Bezier* sunt curbe parametrice folosite în modelarea curbilor continue și derivabile în grafica pe calculator [Liang, 2012]. Cu aceste curbe se pot genera traiectorii netede în medii cu multe obstacole [Gómez-Bravo, 2008; Pan, 2011; Rivera, 2014].
- *Curbele polinomiale cubice* sunt utilizate preponderent pentru aproximarea clotoidelor, fiind folosite la scară largă pentru modelarea traseelor benzilor rutiere și în aplicații bazate pe pilot automat pentru avertizarea coliziunilor sau părăsirea benzilor de rulare [Brezak, 2014; Funke, 2016; Yang, 2008; Liang, 2005].

2.6.1 Caracteristicile curbilor de tip clotoidă

În cazul general, curbura clotoidei crește/descrește liniar, iar funcția asociată acesteia este definită de relația [Henrie, 2007],

$$F(s) = C_0 + \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{i(\varphi_0 - \frac{\rho_0}{2a})} \left[FC\left(\frac{\rho_0 + as}{\sqrt{\pi a}}\right) - FC\left(\frac{\rho_0}{\sqrt{\pi a}}\right) \right] + i \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{i(\varphi_0 - \frac{\rho_0}{2a})} \left[FS\left(\frac{\rho_0 + as}{\sqrt{\pi a}}\right) - FS\left(\frac{\rho_0}{\sqrt{\pi a}}\right) \right] \quad (2.1)$$

în care: C_0 reprezintă punctul de pornire al curbei; a – constantă de netezire, exprimată prin derivata curburii ($a > 0$); φ_0 - unghiul orientării clotoidei în punctul de pornire, ρ_0 - curbura clotoidei în punctul de pornire, FC și FS - integralele Fresnel pentru cosinus și, respectiv, sinus.

Parametrii principali ai clotoidei, raza R_i și lungimea L_i (fig. 2.8), respectă relația,

$$R_i L_i = A^2, \quad (2.2)$$

unde, constanta A reprezintă planeitatea sau parametru omotetic al clotoidei.

Coordonatele și orientarea tangentei în punctul curent i se determină cu relațiile,

$$x_i = R\sqrt{\pi 2\alpha} FC\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right), \quad (2.3)$$

$$y_i = R\sqrt{\pi 2\alpha} FS\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}}\right). \quad (2.4)$$

$$\alpha_i = \frac{L_i}{2 R_i} \quad (2.5)$$

Cu toate că pentru generarea curbilor de tip clotoidă este necesară o putere mare de calcul, acestea sunt din ce în ce mai des folosite pentru modelarea traiectoriilor autovehiculelor autonome [Meidenbauer, 2007; Baran, 2010; Brezak, 2011, Dripke, 2014] și pentru generarea hărților digitale ale căilor de rulare [Jiménez, 2009].

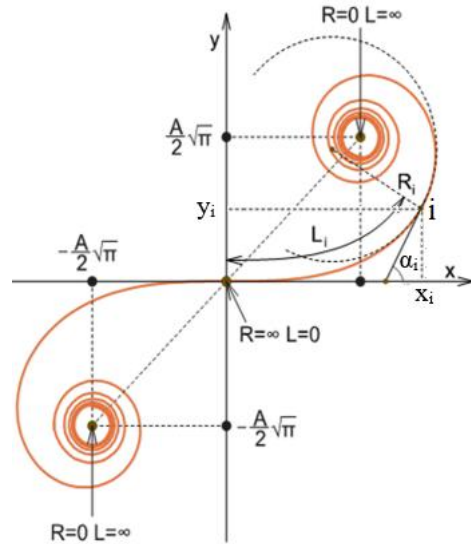


Fig. 2.8 Parametrii clotoidei [***f]

2.7 Planificarea traiectoriilor

Planificarea traiectoriei unui autovehicul autonom, pornind de la un traseu dat, în

principal, presupune determinarea mulțimii punctelor urmărite (de obicei, cele ale traseului) corelat cu legile de mișcare ale celor două motoare (de propulsie și de virare) impunându-se vitezele de deplasare în diferitele zone (în linie dreaptă, în curbe) [Lefebvre, 2004; Spanogianopoulos, 2016]. Abilitatea de a genera traiectorii care să respecte constrângeri predefinite este o etapă esențială pentru a asigura efectuarea unei mișcări continue și uniforme, în special, la vitezele mari de deplasare, necesare în majoritatea aplicațiilor actuale [Suzuki, 2006; Katrakazas, 2015].

Algoritmii de planificare a traiectoriei are ca date de intrare traseul generat, cu unul dintre algoritmii prezentați anterior, și constrângerile cinematice și dinamice ale autovehiculului, iar rezultatul îl reprezintă traiectoria exprimată ca secvențe de valori ale poziției, vitezei și accelerației în timp [Wang, 2007; Gasparetto, 2012; Kala, 2013].

Opțiunile privind modul de deplasare al autovehiculului pot fi limitate de modelul dinamic al acestuia și de unghiul maxim de bracare a roților [Vilca, 2016]. Principiul de bază al obținerii unor poziții, viteze și accelerații relativ optime în timpul deplasării constă în rezolvarea modelelor de cinematică inversă, ținând cont și de limitările induse de construcția autovehiculului [Kelly, 2003]. Urmărirea de către autovehiculul autonom a traseelor planificate se face prin intermediul sistemului de control și comandă care poate avea și funcții suplimentare, precum cea de control lateral [Souissi, 2013; Saska, 2016; Ni, 2014].

2.8 Transportul intern în medii industriale

2.8.1 Aspecte generale

Transportul interior presupune distribuirea materialelor, deplasarea pieselor, semifabricatelor, produselor finite etc., colectarea deșeurilor în interiorul unității de producție care, spre deosebire de transportul exterior, se realizează la distanțe mult reduse. Transportul interior între secții sau în interiorul secțiilor, luând în considerare instalațiile și mijloacele de transport poate fi operațional, cu sisteme locale (conveioare, benzi, etc.) sau uzinal, cu mijloace de transport cu propulsie externă sau proprie (auto).

Transportul operațional, bazat pe instalații rigide (conveioare, benzi transportoare, macarale etc.), se realizează, cu precădere, în cadrul secțiilor, atelierelor, între locuri de muncă diferite, specificate conform procesului tehnologic, pentru alimentarea cu semifabricate, asigurarea manipulărilor tehnologice etc.

Pentru transportul uzinal, între depozite și secțiile primare și între secții, deoarece sarcina de transport are volume mari de materiale, se folosesc utilaje de transport universale, de mare capacitate: motostivuitoare, autocamioane, electromacarale portal, tractoare cu remorcă etc.

Transportul intern auto (cu electrocare cu platformă, electrotractoare, motocare electrostivuitoare etc.) prezintă avantajele mobilității și flexibilității mărite în raport cu alte forme (robocare ghidate, conveiere, benzi transportoare etc.) și adaptabilitate rapidă la diverse tipuri de carosabil (cai de rulare neamenajate, șantiere etc.).

2.8.2 Căi de transport în medii industriale

Planul mediului industrial de producție presupune aranjarea mașinilor și echipamentelor pentru a permite fluxuri scurte de materiale, semifabricate, produse etc. în vederea obținerii celui mai mic timp pentru procesarea, manipularea și transportul acestora, de la primirea materiei prime până la transportul produsului finit la depozitul final [Mallick, 2005].

Căile de transport între secții reprezintă zona de acces ale mijloacelor de transport dintre halele industriale. Acestea permit accesul la zonele de depozitare, zonele în care sunt amplasate transformatoare electrice și alte utilități. Mediul industrial interunități are în

componentă căi de deplasare pentru autovehicule de transport diferite de cele rutiere, prin marcaje de semnalizare mai puține și prin varietatea zonelor cu obstacole fixe.

Pentru planificarea transportului intern auto între secții este necesară cunoașterea, în prealabil, a unei hărți în care să fie evidențiate intrările și ieșirile din halele industriale.

Căile de transport în interiorul secțiilor sunt căi de acces înguste cu lungimi reduse prin intermediul cărora sunt conectate mai multe zone tehnologice (fig. 2.16).

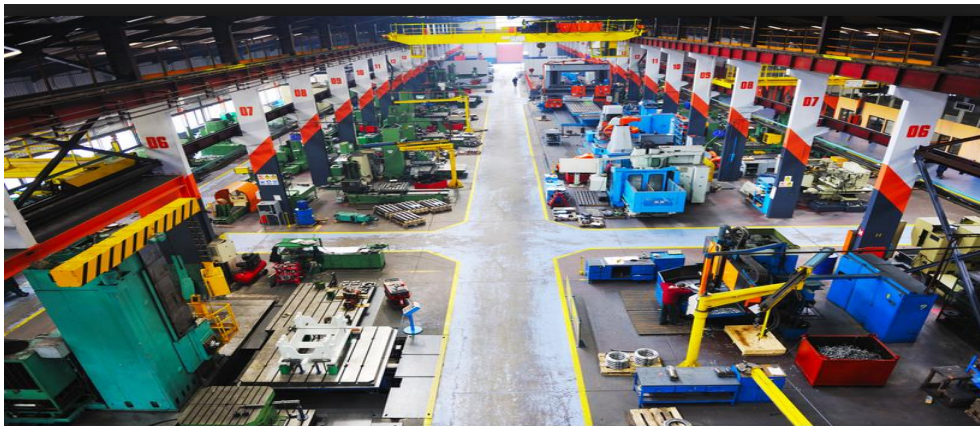


Fig.2.16 Căi de transport in interiorul unei secții [***b]

Adesea între unitățile tehnologice se află locații de depozitare sau preluare a materialelor care pot fi accesate de mijloacele de transport. Căile de transport sunt semnalizate și separate de zonele de acces pentru muncitori pentru asigurarea siguranței personalului, materialelor și utilajelor.

2.8.3 Caracteristicile mijloacelor auto de transport intern

Autovehiculele automatizate ghidate pe căi fixe sunt utilizate preponderent în cazul producției de serie, pentru transportul materialelor în mediile industriale. Pentru deplasarea de la un punct la altul se impune identificarea unor repere semnalizate poziționate pe carosabil și/sau în jurul acestuia. Navigarea după un traseu fix este realizată prin urmărirea unei linii continue de-a lungul podelei sau a unor repere fixe care definesc traseul prin puncte de interes [Lecking, 2006]. Altă tehnică de navigare după un traseu fix presupune urmărirea unor benzi magnetice sau reflexive amplasate pe podea prin intermediul unui senzor pentru detecția traseului.

Navigarea autovehiculelor utilizate pentru transport se poate face și în mod autonom după un traseu programat offline, ca urmare a unui proces de planificare anterioară, sau online în timpul deplasării. În cazul navigării după un traseu planificat cu metoda SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) autovehiculul autonom dispune de o hartă a mediului și de o tehnică de localizare continuă.

Autovehiculele autonome de transport intern utilizate în medii industriale, în general, se deplasează cu viteze reduse. De ex., pentru un stivuator care transportă marfă în medii industriale, viteza maximă de deplasare în spațiile dintre secții este stabilită la 20 km/h, iar în spații închise (interiorul secției) este stabilită la 10 km/h (fig. 2.17).

Indiferent de modul de navigare, autovehiculele autonome de transport intern în medii industriale *nu sunt supuse constrângerilor definite de*



Fig.2.17 Stivuator autonom [Martínez-Barberá,2010]

regulile de circulație în mediile rutiere. Cu toate acestea, autovehiculul autonom trebuie să respecte marcajele și bordurile și să evite coliziunile cu obstacolele fixe sau mobile [Cirillo,2014].

2.9 Concluzii

În acest capitol este prezentat istoricul dezvoltării autovehiculelor autonome și caracteristicile acestora, precum și problemele care apar la planificarea și urmărirea acestora.

Din analiza principalilor algoritmi de planificare a traseelor pentru autovehicule autonome se concluzionează că pentru transportul intern în mediile industriale, *algoritmul RRT reprezintă soluția optimă* datorită caracteristicii acestuia de a căuta eficient și în spațiile neconvexe, pentru a genera toate traseele posibile dintre care este selectat cel mai scurt. Algoritmul RRT lucrează incremental pentru reducerea distanței dintre un punct ales aleator și arborele deja creat la care este atașat. Acesta a fost adaptat pentru navigarea AaTI de-a lungul căilor de acces din mediile industriale.

Majoritatea algoritmilor de planificare generează trasee sub formă de polilinie, care deși este continuă, are variații bruște de direcție care nu pot fi urmărite cu ușurință de autovehicul deoarece acesta ar trebui să se oprească pentru a vira și apoi să pornească și să continue deplasarea. Pentru netezirea traseelor au fost studiate caracteristicile unor curbe auxiliare. În urma analizării acestora, a fost selectat arcul de clotoidă pentru a asigura deplasarea continuă a autovehiculului și în cazurile traseelor cu treceri de la linie dreaptă la arc de cerc și invers.

Luând în considerare particularitățile mediilor industriale de producție, în special faptul că acestea sunt structurate pe unități de producție, care la rândul lor sunt structurate în zone de lucru, navigarea autovehiculului se realizează de-a lungul unor căi de acces atipice. Autovehiculul autonom care navighează după un traseu programat presupune mai multă flexibilitate față de autovehiculele automate ghidate, ale căror trasee sunt fixe.

Majoritatea autovehiculelor, utilizate până în prezent pentru transport intern în medii industriale, se deplasează prin urmărirea unui traseu marcat de-a lungul podelei sau a unor repere fixe instalate în spații adiacente pentru urmărirea unei benzi magnetice sau reflexive amplasată pe podea necesită utilizarea unui senzor pentru detecția traseului. Utilizarea acestor tipuri de autovehicule devine dezavantajoasă în cazul căilor de transport deoarece presupune refacerea fizică a traseelor fixe.

Planificarea traiectoriei unui *autovehicul neolonom cu sistem de virare de tip Ackermann* într-un mediu industrial presupune, pe lângă aplicarea unui algoritm de planificare și a unei metode de netezire a traseului, stabilirea legilor vitezelor și a timpilor necesari pentru ca autovehiculul să se deplaseze continuu pe subtrasee elementare pentru a ajunge la punctul de sosire.

În concluzie, analizând sinteza cercetărilor efectuate până în prezent privind navigarea autovehiculelor autonome, se evidențiază tendința de dezvoltare a acestora pentru a fi integrate și în alte tipuri de medii, inclusiv cele industriale. Astfel se impune adaptarea și optimizarea metodelor de planificare a traseelor și traiectoriilor pentru a obține deplasări continue și eficiente a autovehiculului autonom.

3. MODELAREA TRASEELOR AaTI

Mediile industriale de transport intern, caracterizate de căi de acces, de obicei plane, cu lungimi scurte și lățimi înguste, sunt compuse din alei de circulație (în interiorul secțiilor sau între acestea), intersecții, spații de alimentare, spații de staționare etc. Mediile industriale de transport intern cuprind obstacole fixe care constau în zone de lucru, roboți industriali ficși, spații de depozitare, linii de prelucrare etc. sau obstacole mobile cum ar fi alte autovehicule de transport intern sau pietoni. Navigarea în aceste medii nu este supusă regulilor de circulație rutieră, de obicei, se face după norme interne specifice.

Pentru descrierea traseelor autovehiculelor autonome de transport intern este necesar să se analizeze toate scenariile posibile de navigare în mediul industrial, în care se vor localiza toate obstacolele fixe și se vor identifica toate posibilitățile de deplasare.

3.1 Structura și clasificarea traseelor AaTI

Traseele autovehiculelor autonome în mediile industriale de transport reprezintă o succesiune de puncte interconectate ale căror poziții depind de structura mediului de navigare, dar și de caracteristicile autovehiculului. Un traseu începe din punctul de pornire și se sfârșește în punctul de sosire, luând în considerare și orientările (direcțiile) autovehiculului în aceste puncte.

Pentru a obține deplasarea continuă a unui autovehicul de la poziția de plecare la cea de sosire, pe parcursul traseului virarea trebuie să se facă fără opriri, cu tranziții line (fără salturi) între perioadele de deplasare fără virare când autovehiculul se deplasează în linie dreaptă sau arc de cerc. În fig. 3.1, a,b se prezintă caracteristicile unui traseu compus din trei segmente de dreaptă și două arce de cerc cu razele $r_{1,2}$, respectiv, curburile virajelor $\rho_{1,2}$. Din cauza restricțiilor de neolonomie ale autovehiculului cu sistem de virare de tip Ackermann, acesta nu poate urmări cu mișcare continuă acest traseu deoarece mișcările de virare ar trebui să se facă în salturi (brusc), caz imposibil. Astfel, la trecerea de la deplasarea în linie dreaptă (cu unghiul de bracare a roților $\alpha = 0$), la deplasarea pe arcele de cerc (cu unghiul de bracare $\alpha_{1,2} > 0$, fig. 3.1,b) și invers ar trebui ca autovehiculul să se oprească să vireze pe loc și apoi să continue deplasarea, situație de neacceptat în practică.

Pentru a obține o mișcare de deplasare continuă a autovehiculului se impune introducerea în componența traseului a unor linii curbe cu rază variabilă (clotoide, Bezier, spirale cubice, polinomiale etc.), frecvent utilizate fiind arcele de clotoidă, pentru realizarea tranziției de la linii drepte la arce de cerc și invers. Pe parcursul arcelor de clotoidă de intrare în viraje, unghiul de bracare crește continuu de la zero la valoarea α_1 ($0 < \alpha < \alpha_1$), pentru primul viraj, și de la zero la valoarea α_2 ($0 < \alpha < \alpha_2$), pentru cel de-al doilea viraj, urmând ca în cazul arcelor de clotoidă de ieșire din viraje acest unghi să scadă la zero. Astfel, curbura acestor arce variază liniar (fig. 3.1,c) de la valoarea nulă la valoarea ρ_1 ($0 < \rho < \rho_1$) și, respectiv, de la zero la valoarea ρ_2 ($0 < \rho < \rho_2$).

Pentru a determina traseul optim (cel mai scurt și cu numărul minim de manevre) de deplasare a unui autovehicul autonom, este necesar mai întâi să se analizeze toate traseele posibile dintre punctul de pornire P până în punctul de sosire S, neluând în considerare obstacolele. Numărul minim de trasee posibile variază în funcție de direcția de virare, sensul la plecare/sosire precum și de manevrele (opriri, viraje, inversări de sens) efectuate pe parcursul traseului intermediar. Traseele de deplasare ale unui autovehicul se pot descrie ca o succesiune de subtrasee, entități distincte, care pot fi modelate individual.

Astfel, traseele (tab. 3.1), în general, sunt compuse din subtrasee de plecare, subtrasee de sosire și intermediare (fig. 3.2). Subtraseele pot fi monolinie (segment de dreaptă, arc de cerc sau arc de clotoidă), din două linii - semiviraje de intrare (arc de clotoidă și arc de cerc) sau de

ieșire (arc de cerc și arc de clotoidă) - și din trei linii - viraje (arc de clotoidă, arc de cerc și arc de clotoidă).

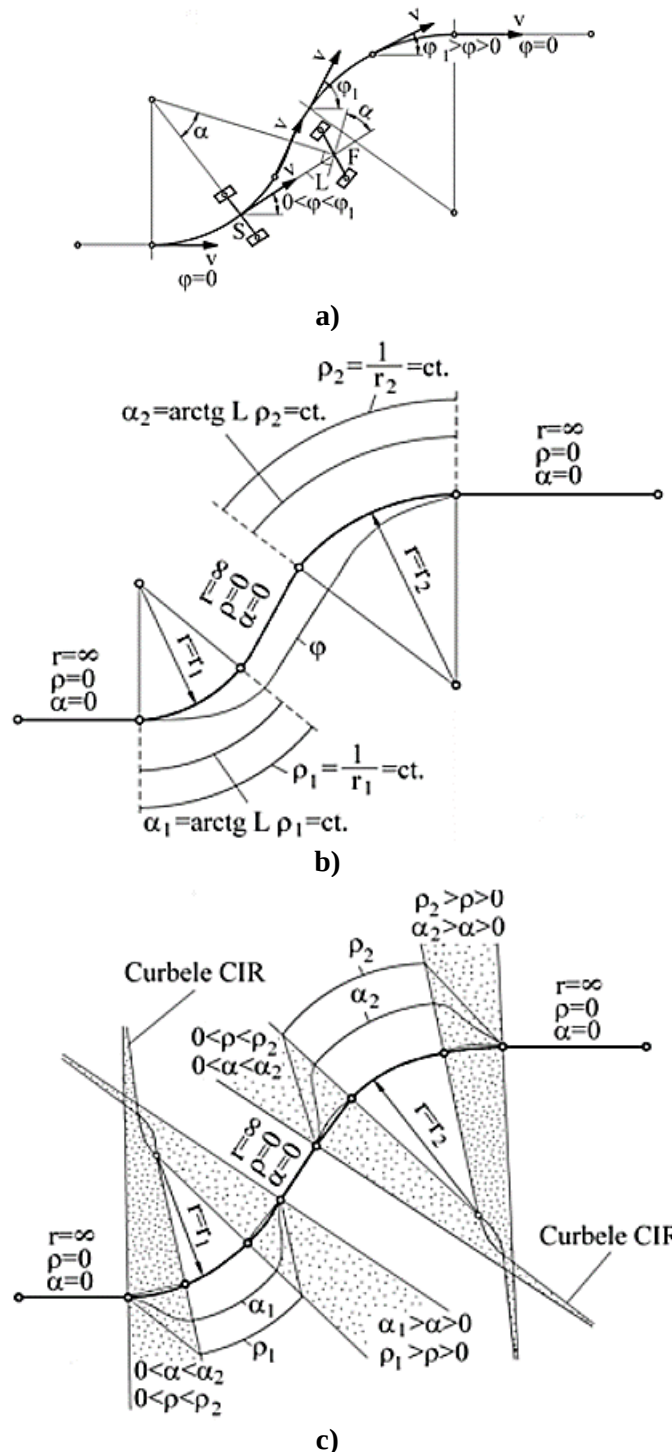


Fig. 3.1 Modele geometrice de trasee cu revenire la direcția de plecare: **a** – cu arce de cerc și segmente de dreaptă; **b, c** – cu arce de cerc, arce de clotoidă și segmente de dreaptă

Astfel, un viraj însumează două semiviraje, unul de intrare (unghiul de bracare crește) și celălalt de ieșire (unghiul de bracare scade), fiind compus din două arce de clotoidă. Subtraseele de intrare și de ieșire, de regulă, sunt viraje cu viteze la pornire, respectiv sosire, zero. Subtraseele intermediare, conțin viraje care se produc la viteze de deplasare mai mari ca zero.

În plus, subtraseele intermediare, în anumite situații, mai ales, în cazurile spațiilor înguste, pot conține și puncte de inversare a sensului de deplasare care se produc cu oprirea

autovehiculului (fig. 3.2). Inversarea sensului de deplasare (oprirea și pornirea spre sensul opus cu fața sau cu spatele) se face când unghiul de bracare este nul. La planificarea traseelor se va urmări evitarea pe cât posibil a inversării sensului de deplasare, acest proces conducând la creșterea numărului de manevre, dar și a lungimii traseului.

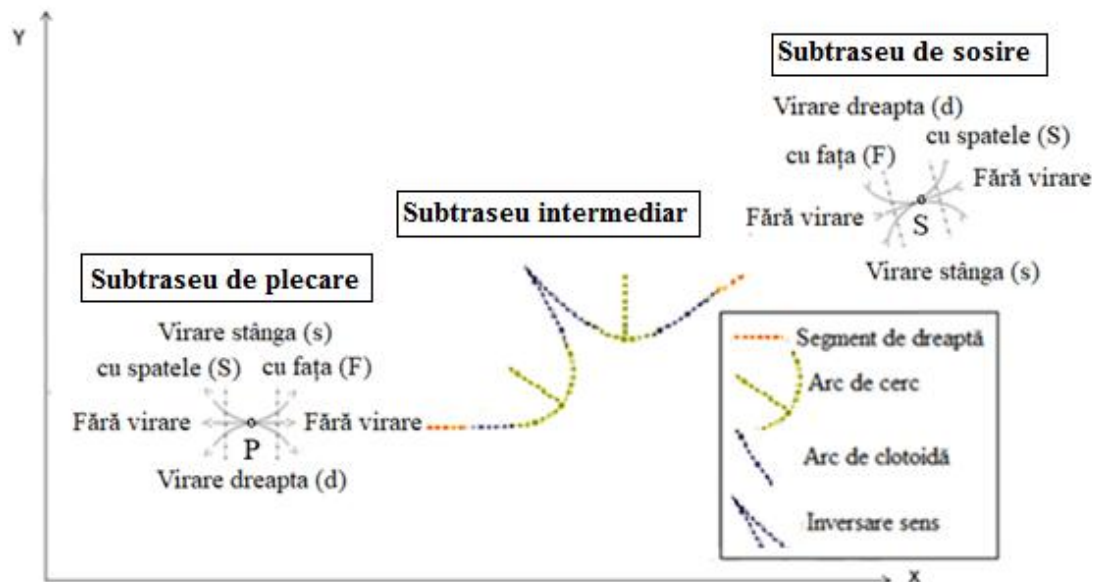


Fig. 3.2 Structura generală a traseelor

La planificarea traseelor se va urmări evitarea pe cât posibil a inversării sensului de deplasare, acest proces conducând la creșterea numărului de manevre, dar și a lungimii traseului.

Tab 3.1 Structura și clasificarea traseelor

Tipul	Denumire	Observații
Subtraseu	Segment de dreaptă	Sunt căi, întâlnite rar în practică ca trasee complete, fiind folosite în componența celorlalte tipuri de trasee
	Arc de cerc	
	Arc de clotoidă	
	Semiviraj (arc de clotoidă + arc de cerc)	Semivirajele fac trecerea de la un unghi de bracare la altul și sunt de intrare când unghiul de bracare crește, respectiv, de ieșire când acesta scade
	Viraj (arc de clotoidă + arc de cerc + arc de clotoidă)	Acest subtraseu este definit ca structură elementară pentru schimbarea direcției de deplasare; la unghiuri de virare mici arcul de cerc poate lipsi
Traseu simplu	Cu două viraje (la plecare și la sosire)	Subtraseul intermediar este un segment de dreaptă
Traseu complex	Cu mai multe viraje	Subtraseul intermediar conține unul sau mai multe viraje

3.2 Modelarea subtraseelor AaTI

3.2.4 Modelarea subtraseelor de tip viraj

3.2.4.1 Modelarea subtraseelor de tip viraj cu unghi de bracare oarecare

Subtraseele de tip viraj au în componență arcul de clotoidă de intrare, $1_i - 2_i$, arcul de cerc, $2_i - 2_e$ și arcul de clotoidă de ieșire, $2_e - 1_e$, care sunt parcurse succesiv (fig. 3.5). Pentru modelarea în vederea determinării coordonatelor punctelor subtraseului, sunt necesare valorile parametrilor arcelor de clotoidă de intrare și de ieșire din viraj, precum și ale parametrilor arcului de cerc.

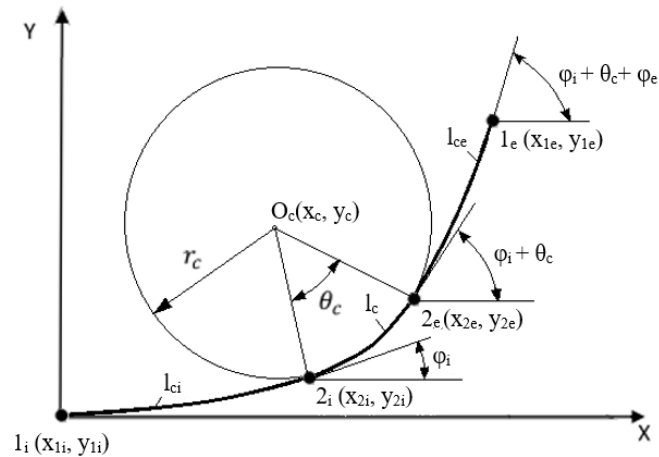


Fig. 3.5 Modelul subtraseului de tip viraj

3.2.4.2 Modelarea subtraseelor de tip viraj cu unghi de bracare maxim

Având în vedere că traseele de transport intern sunt caracterizate de spații înguste de deplasare, în multe situații se impune virarea cu unghiul maxim de bracare a roților. În fig. 3.6 se prezintă un traseu care leagă două subtrasee de tip segment cu un subtraseu de virare care schimbă direcția autovehiculului între plecare și sosire cu unghiul α . Subtraseul de virare conține două arce de clotoidă (de intrare/ieșire) identice care presupun bracarea roților la unghiul maxim și, în consecință, un arc de cerc cu raza minimă.

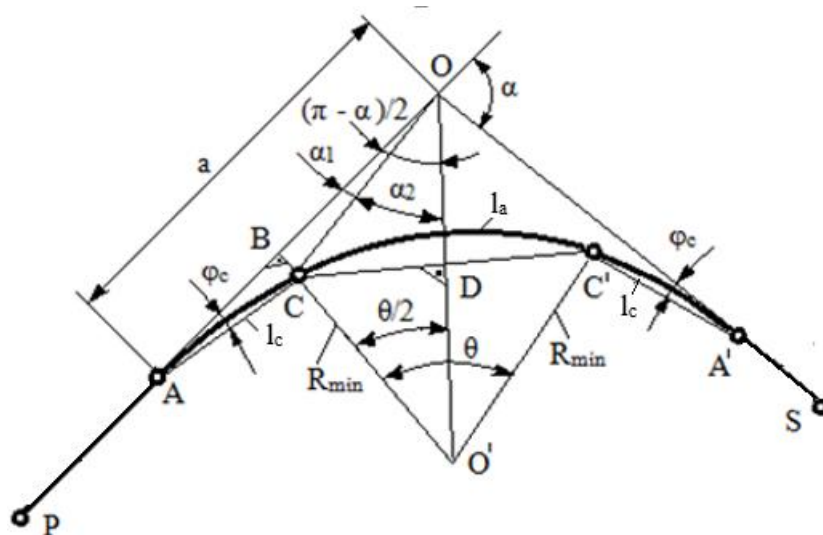


Fig. 3.6 Modelul subtraseului de virare cu unghi de bracare maxim

Parametrii care descriu subtraseul de virare cu unghi de bracare maxim: ϕ_c reprezintă unghiul arcului de clotoidă; l_c - lungimea arcului de clotoidă, θ - unghiul arcului de cerc, $R_{\min}$ - raza minimă a arcului de cerc; l_a - lungimea arcului de cerc, a - lungimea segmentului de dreaptă determinat de tangentele comune la clotoide în punctele de intrare/ieșire în viraj (fig. 3.6). Pentru a determina unghiul arcului de cerc, în cazul în care unghiul clotoidei ϕ_c este dependent de unghiul de bracare maxim, se utilizează relațiile:

$$BC = l_c \sin \phi_c, \quad (3.8)$$

$$BO = a - l_c \cos \varphi_c, \quad (3.9)$$

$$OC = \sqrt{(l_c \sin \varphi_c)^2 + (a - l_c \cos \varphi_c)^2}, \quad (3.10)$$

$$\alpha_1 = \arctg \frac{l_c \sin \varphi_c}{a - l_c \cos \varphi_c}, \quad (3.11)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi - \alpha}{2} - \alpha_1 = \frac{\pi - \alpha}{2} - \arctg \frac{l_c \sin \varphi_c}{a - l_c \cos \varphi_c}, \quad (3.12)$$

$$CD = R_{\min} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (3.13)$$

$$CD = OC \sin \alpha_2, \quad (3.14)$$

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{OC \sin \alpha_2}{R_{\min}}, \quad (3.15)$$

$$\theta = 2 \arcsin \frac{\sqrt{(l_c \sin \varphi_c)^2 + (a - l_c \cos \varphi_c)^2} \sin \left(\frac{\pi - \alpha}{2} - \arctg \frac{l_c \sin \varphi_c}{a - l_c \cos \varphi_c} \right)}{R_{\min}}. \quad (3.16)$$

După stabilirea valorii unghiului arcului de cerc, toate variabilele care definesc traseul fiind cunoscute, se pot determina toate valorile parametrilor subtraseului de virare, inclusiv lungimea acestuia, care are valoarea minimă $l_{\min} = 2l_c + l_a$.

3.3 Clasificarea și descrierea traseelor simple

În tab. 3.2 se prezintă traseele simple cu un viraj diferențiate în funcție de poziția virajului (criteriul A), la plecare - înainte de segmentul de dreaptă - sau la sosire după acesta și în funcție de posibilitatea de inversare a sensului de deplasare (criteriul B). Configurațiile acestor trasee sunt vizualizate în tab. 3.3 unde, pentru simplificare, s-au considerat viraje la 90° .

În acest caz, pentru descrierea simbolică a traseelor posibile, sunt utilizate combinații ale următoarelor coduri: PFs – plecare cu fața spre stânga, PFd – plecare cu fața spre dreapta, PSs – plecare cu spatele spre stânga, PSd – plecare cu spatele spre dreapta, SFs – sosire cu fața din stânga, SFd – sosire cu fața din dreapta, SSs – sosire cu spatele din stânga, SSd – sosire cu spatele din dreapta, PF sau PS - plecare cu fața sau, respectiv, plecare cu spatele (cu roțile nebracate), I – inversarea sensului de deplasare.

În tab. 3.4, 3.5 și 3.6 se prezintă traseele simple posibile (cu două viraje), cu plecare din punctul P și sosire în punctul S, ținând cont de sensurile posibile la plecare și la sosire, criteriul A, și de inversare a sensului de deplasare, criteriul B.

Pentru descrierea traseelor cu două viraje se folosesc, în plus, codurile: IP – inversare de sens la plecare (după virajul de plecare) și IS – inversare de sens la sosire (înainte de virajul de sosire).

Tab 3.2 Clasificarea traseelor simple cu un viraj

Criteriul A	Criteriul B	Cazuri posibile (tab. 3.3)
Cu viraj la plecare	Fără inversarea sensului de deplasare	PFs-SF, PFd-SF, PSs-SS, PSd-SS
	Cu inversarea sensului de deplasare	PFs-I-SS, PFd-I-SS, PSs-I-SF, PSd-I-SF
Cu viraj la sosire		PF-SFs, PF-SFd, PS-SSs, PS-SSd

Tab. 3.3 Schemele traseelor simple cu un viraj

<i>Trasee simple cu viraj la plecare fără inversarea sensului</i>			
PFs-SF	PFd-SF	PSs-SS	PSd-SS
<i>Trasee simple cu viraj la plecare cu inversarea sensului</i>			
PFs-I-SS	PFd-I-SS	PSs-I-SF	PSd-I-SF
<i>Trasee simple cu viraj la sosire</i>			
PF-SFs	PF-SFd	PS-SSs	PS-SSd

Tab 3.4 Clasificarea traseelor simple cu două viraje

Criteriul A	Criteriul B	Cazuri posibile
Virajele au același sens (stânga sau dreapta, tab. 3.3)	Fără inversarea sensului de deplasare	PFs-SFs, PFd-SFd, PSs-SSs, PSd-SSd
	Cu inversarea sensului de deplasare la plecare	PFs-IP-SSs, PFd-IP-SSd, PSs-IP-SFs, PSd-IP-SSs
	Cu inversarea sensului de deplasare la sosire	PFs-IS-SSs, PFd-IS-SSd, PSs-IS-SFs, PSd-IS-Sdd
Virajele au sensuri opuse (stânga/dreapta sau dreapta/stânga, tab. 3.4)	Fără inversarea sensului de deplasare	PFs-SFd, PFd-SFs, PSd-SSs, PSs-SSd
	Cu inversarea sensului de deplasare la plecare	PFs-IP-SSd, PFd-IP-SSs, PSs-IP-SFd, PSd-IP-SFs
	Cu inversarea sensului de deplasare la sosire	PFs-IS-SSd, PFd-IS-SSs, PSs-IS-SFd, PSd-IS-SFs

Cazurile posibile legate de traseele simple cu un viraj (tab. 3.2) vor fi tratate ca fiind cazuri particulare ale traseelor simple cu două viraje prin introducerea, ca date de intrare, a valorilor mult mărite (care tind la infinit) ale razelor și nule ale unghiurilor arcelor de clotoidă și de cerc ale unui viraj.

În plus, cazurile particulare ale traseelor simple cu două viraje, unde unul din viraje lipsește (sau arcele de cerc au raze infinite și degenerază în linie dreaptă) devin trasee simple cu un viraj (tab. 3.2, 3.3).

Tab. 3.5 Scheme traseelor simple cu două viraje cu același sens

Fără inversarea sensului			
PFs-SFs	PFd-SFd	PSs-SSs	PSd-SSd
Cu inversarea sensului la plecare			
PFs-IP-SSs	PFd-IP-SSd	PSs-IP-SFs	PSd-IP-SSs
Cu inversarea sensului la sosire			
PFs-IS-SSs	PFd-IS-SSd	PSs-IS-SFs	PSd-IS-SFd

Tab. 3.6 Trasee cu două viraje cu sensuri opuse

Fără inversarea sensului			
PFs-SFd	PFd-SFs	PSd-SSs	PSd-SSd
Cu inversarea sensului la plecare			
PFs-IP-SSd	PFd-IP-SSs	PSs-IP-SFd	PSd-IP-SFs
Cu inversarea sensului la sosire			
PFs-IS-SSd	PFd-IS-SSs	PSs-IS-SFd	PSd-IS-SFs

3.4 Modelarea traseelor simple cu două viraj

3.4.1 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens fără inversarea sensului de deplasare

Aceste trasee au în componență două viraje, unul la plecare și celălalt la sosire, ambele orientate în aceeași sens, spre stânga sau spre dreapta, care pot fi parcurse de autovehicul cu fața sau cu spatele, fără opriri pentru inversarea sensului de deplasare.

Pentru generarea modelului matematic al acestui traseu, raportat la un sistem de coordonate global (XY) care are originea în punctul de plecare P(0,0), se stabilesc valorile parametrilor de intrare: coordonatele punctului de sosire S, x_s și y_s ; unghiurile de orientare ale autovehiculului (dintre direcțiile la plecare/sosire și axa X a sistemului de coordonate global) la plecare $\varphi_p = 0$ și, respectiv, la sosire φ_s ; unghiurile și razele arcelor de clotoidă din virajul de la plecare, φ_{clp} și r_p , și de la cel de sosire, φ_{cls} și, respectiv, r_s .

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune parcurgerea următoarelor etape:

- a) Determinarea coordonatelor punctului final al clotoidei de intrare în virajul de plecare, $1p$, și centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, C_p (identic cu centrul arcului de cerc și al clotoidei și de ieșire), în raport cu sistemul de coordonate local, cu relațiile (v. rel 3.6 și 3.7):

$$x_{cli} = r_p \sqrt{2\pi\varphi_{clp}} FC\left(\frac{2\varphi_{clp}}{\pi}\right), \quad (3.18)$$

$$y_{cli} = r_p \sqrt{2\pi\varphi_{clp}} FC\left(\frac{2\varphi_{clp}}{\pi}\right) \quad (3.19)$$

$$x_{cpi} = x_{cli} - r_p \cos \varphi_{clp}, \quad (3.20)$$

$$y_{cpi} = y_{cli} + r_p \cos \varphi_{clp}. \quad (3.21)$$

- b) Determinarea coordonatelor punctului final al clotoidei de ieșire din virajul de sosire, $1s$, și centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare în punctul, C_s (identic cu centrul arcului de cerc și al clotoidei și de ieșire), în raport cu sistemul de coordonate local, cu relațiile (v. rel. 3.6 și 3.7):

$$x_{cle} = r_s \sqrt{2\pi\varphi_{cls}} FC\left(\frac{2\varphi_{cls}}{\pi}\right), \quad (3.22)$$

$$y_{cle} = r_s \sqrt{2\pi\varphi_{cls}} FC\left(\frac{2\varphi_{cls}}{\pi}\right) \quad (3.23)$$

$$x_{cpe} = x_{cle} - r_s \cos \varphi_{cls}, \quad (3.24)$$

$$y_{cpe} = y_{cle} + r_s \cos \varphi_{cls}. \quad (3.25)$$

- c) Determinarea coordonatelor punctului final al clotoidei de intrare în virajul de plecare, $1p$, și centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, C_p , prin rotirea cu unghiul φ_{clp} a sistemului de coordonate local în raport cu sistemul de coordonate global (XY), cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cli} \\ y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cpi} \\ y_{cpi} \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

- d) Determinarea coordonatelor punctului final al clotoidei de ieșire din virajul de sosire, 1s, și ale centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, Cs, prin translația în punctul S (x_s, y_s) și rotirea cu unghiul $\varphi_s - \varphi_{cls}$ a sistemului de coordonate local în raport cu sistemul de coordonate global (XY), cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s - \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s - \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s - \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s - \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cle} \\ -y_{cle} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cs} \\ y_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s - \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s - \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s - \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s - \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cpe} \\ -y_{cpe} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

- e) Determinarea distanței dintre centrele arcelor de cerc ale virajelor și a unghiului de orientare al segmentului de dreaptă 3p3s (congruent cu unghiul de orientare al liniei centrelor $C_p C_s$),

$$d_c = \sqrt{(y_{cs} - y_{cp})^2 + (x_{cs} - x_{cp})^2} \quad (3.30)$$

$$\varphi_{dc} = \arctg \frac{y_{cs} - y_{cp}}{x_{cs} - x_{cp}}. \quad (3.31)$$

- f) Determinarea valorilor unghiurilor arcelor de cerc ale virajelor de plecare și, respectiv, de sosire, pentru care se impune, $\theta_{p,s} \geq 0$. În caz contrar, acest traseu nu poate fi realizat și se impune adoptarea altui tip de traseu (v. tab. 3.2). În cazul când o valoare sau amândouă ale unghiurilor, $\theta_{p,s}$, sunt nule, virajele nu au în componentă arc de cerc.

$$\theta_p = \frac{\varphi_{dc}}{2} - \varphi_{clp}, \quad (3.32)$$

$$\theta_s = \frac{\varphi_s - \varphi_{dc}}{2} - \varphi_{cls}, \quad (3.33)$$

- g) Determinarea coordonatelor punctelor arcelor de cerc de ieșire/intrare, 2p și, respectiv 2s, în raport cu sistemele de coordonate locale, cu relațiile (v. rel. 3.3 și 3.4):

$$x_{ce} = r_p \sin 2\theta_p, \quad (3.34)$$

$$y_{ce} = r_p (1 - \cos 2\theta_p) \quad (3.35)$$

$$x_{ci} = r_s \sin 2\theta_s, \quad (3.36)$$

$$y_{ci} = r_s (1 - \cos 2\theta_s). \quad (3.37)$$

- h) Determinarea coordonatelor punctelor arcelor de cerc de ieșire/intrare, 2p și, respectiv 2s, în raport cu sistemul de coordonate global prin translație în punctul 1p, respectiv, 1s și prin rotirea cu unghiul $\varphi_{clp} + 2\theta_p$, respectiv, $\varphi_{cls} - 2\theta_s$, cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & -\sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \\ \sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ce} \\ y_{ce} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{cls} - 2\theta_s) & -\sin(\varphi_{cls} - 2\theta_s) \\ \sin(\varphi_{cls} - 2\theta_s) & \cos(\varphi_{cls} - 2\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ -y_{ci} \end{bmatrix}. \quad (3.39)$$

- i) Determinarea coordonatelor punctelor arcelor de clotoidă de ieșire/intrare, 3p și, respectiv 3s, în raport cu sistemul de coordonate global prin translație în punctul 2p, respectiv, 2s și prin rotirea cu unghiul $2(\varphi_{clp} + \theta_p)$, respectiv, $\varphi_s - 2(\varphi_{cls} + \theta_s)$, cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{3p} \\ y_{3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & -\sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \\ \sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cli} \\ y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} x_{3s} \\ y_{3s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s - 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & -\sin(\varphi_s - 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \\ \sin(\varphi_s - 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & \cos(\varphi_s - 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cle} \\ -y_{cle} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

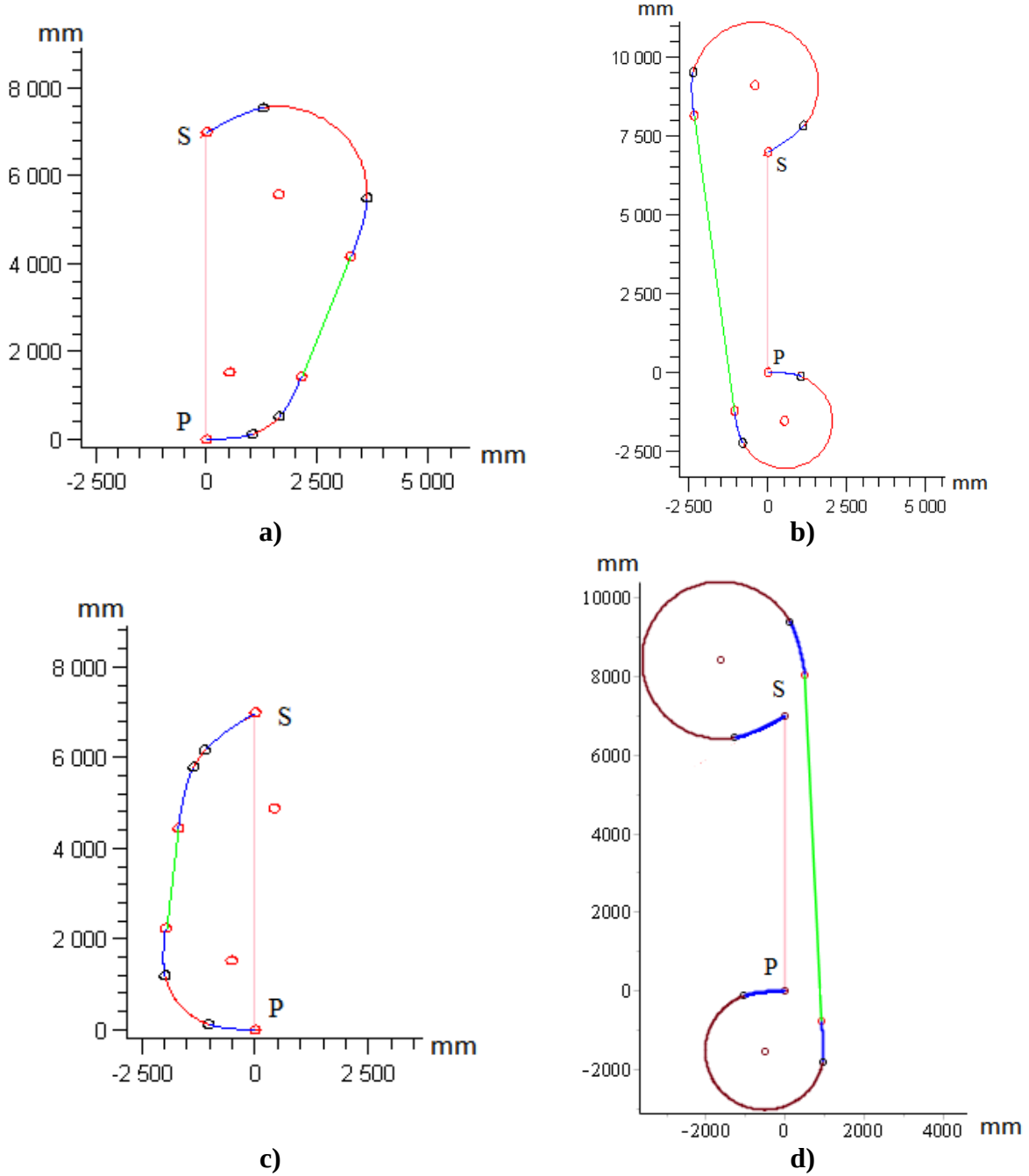


Fig. 3.9 Trasee simple cu viraje de același sens fără inversarea sensului: **a** - PFs-SFs, **b** - PFd-SFd, **c** - PSs-SSs, **d** - PSd-SSd

j) Determinarea lungimii subtraseului segment de dreaptă (3p3s),

$$l_d = \sqrt{(y_{3s} - y_{3p})^2 + (x_{3s} - x_{3p})^2}. \quad (3.42)$$

k) Determinarea lungimilor arcelor de clotoidă din virajele de plecare și de sosire,

$$l_{clp} = 2 r_p \varphi_{clp} \quad (3.43)$$

$$l_{cls} = 2 r_s \varphi_{cls} \quad (3.44)$$

l) Determinarea lungimilor arcelor de cerc din virajele de plecare și de sosire,

$$l_{cp} = 2 r_p \theta_p \quad (3.45)$$

$$l_{cs} = 2 r_s \theta_s \quad (3.46)$$

m) Determinarea lungimii totale a traseului,

$$L = 2 l_{clp} + l_{cp} + l_d + l_{cs} + 2 l_{cls}. \quad (3.47)$$

Acest algoritm a fost programat în MAPLE și a rezultat subprogramul *TS2VSafl* (Traseu Simplu cu 2 Viraje cu Sensurile aceleași și fără Inversare).

În fig. 3.9 se prezintă cele patru variante posibile: *PFs-SFs*, plecare cu fața spre stânga și sosire cu fața din stânga; *PFd-SFd*, plecare cu fața spre dreapta și sosire cu fața din dreapta; *PSs-SSs*, plecare cu spatele spre stânga și sosire cu spatele din stânga; *PSd-SSd*, plecare cu spatele spre dreapta și sosire cu spatele din dreapta.

Aceste trasee au fost obținute ca urmare a rulării subprogramului *TS2VaSfl* cu următoarele date de intrare: $\varphi_p = 0^\circ$, $x_s = 0$ m, $y_s = 7$ m, $\varphi_s = 30^\circ$, $\varphi_{clp} = 20^\circ$, $r_p = 1,5$ mm; $\varphi_{cls} = 20^\circ$, $r_s = 1,5$ m.

3.4.2 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu sensuri opuse și fără inversarea sensului de deplasare

În cazul traseelor cu două viraje de sensuri opuse fără inversarea sensului, autovehiculul se deplasează în același sens cu fața sau cu spatele, cu plecare spre stânga/dreapta și sosire din dreapta/stânga.

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune modificarea următoarelor etape:

d) Determinarea coordonatelor punctului 1s și ale centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare Cs cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cle} \\ -y_{cle} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cs} \\ y_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cpe} \\ -y_{cpe} \end{bmatrix}. \quad (3.49)$$

f) Determinarea valorii unghiului arcului de cerc de plecare θ_p :

$$\tan(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) = \frac{y_{cp} + \frac{d_c}{2} \sin \varphi_{dc}}{\frac{d_c}{2} \cos \varphi_{dc} - y_{cp} \tan(\varphi_{clp} + \theta_p)}, \quad (3.50)$$

Determinarea unghiului arcului de cerc de sosire cu relația,

$$\theta_s = \varphi_{clp} + \theta_p - \varphi_s/2 - \varphi_{cls}. \quad (3.51)$$

h) Determinarea coordonatelor punctelor 2s:

$$\begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{cls} + 2\theta_s) & -\sin(\varphi_{cls} + 2\theta_s) \\ \sin(\varphi_{cls} + 2\theta_s) & \cos(\varphi_{cls} + 2\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ci} \\ -y_{ci} \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

i) Determinarea coordonatelor punctelor 3s:

$$\begin{bmatrix} x_{3s} \\ y_{3s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & -\sin(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \\ \sin(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & \cos(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cle} \\ -y_{cle} \end{bmatrix}. \quad (3.53)$$

Acest algoritm a fost programat în MAPLE și a rezultat subprogramul *TS2VSoFI* (Traseu Simplu cu 2 Viraje cu Sensurile opuse și fără Inversare). În fig. 3.11 se prezintă cele patru variante posibile: *PFs-SFd*, plecare cu fața spre stânga și sosire cu fața din dreapta; *PFd-SFs*, plecare cu fața spre dreapta și sosire cu fața din stânga; *PSs-SSd*, plecare cu spatele spre stânga și sosire cu spatele din dreapta; *PSd-SSs*, plecare cu spatele spre dreapta și sosire cu spatele din stânga.

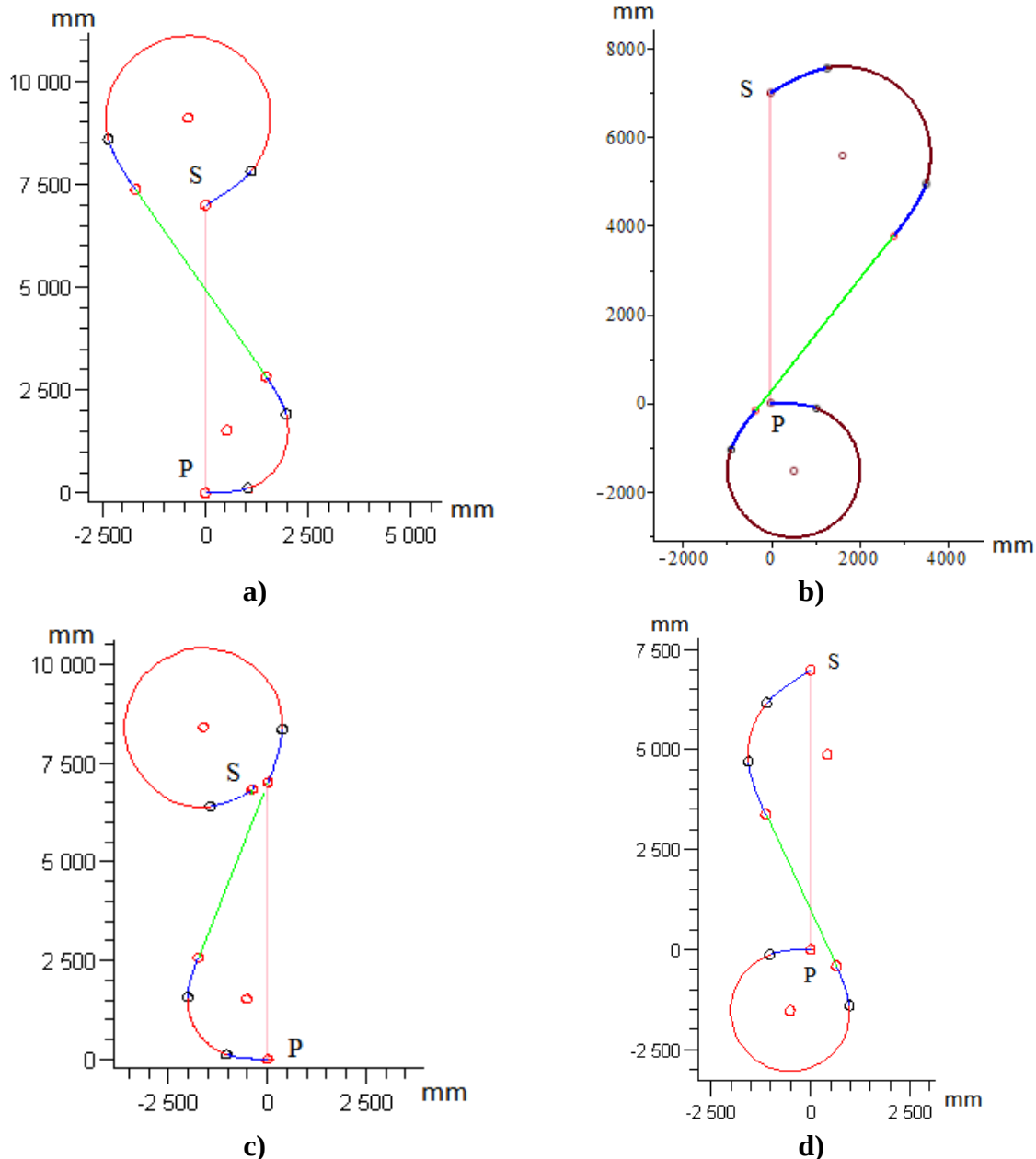


Fig. 3.11 Trasee simple cu două viraje cu sensuri opuse și fără inversarea sensului de deplasare:
a - *PFs-SFd*, **b** - *PFd-SFs*, **c** - *PSs-SSd*, **d** - *PSd-SSs*

3.4.3 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens și cu inversarea sensului la plecare

În cazul traseelor cu două viraje cu același sens și cu inversarea sensului la plecare, autovehiculul se deplasează în același sens cu fața sau cu spatele, cu plecare spre stânga/dreapta, după virajul de plecare se oprește, pleacă în sens opus și sosește din dreapta/stânga.

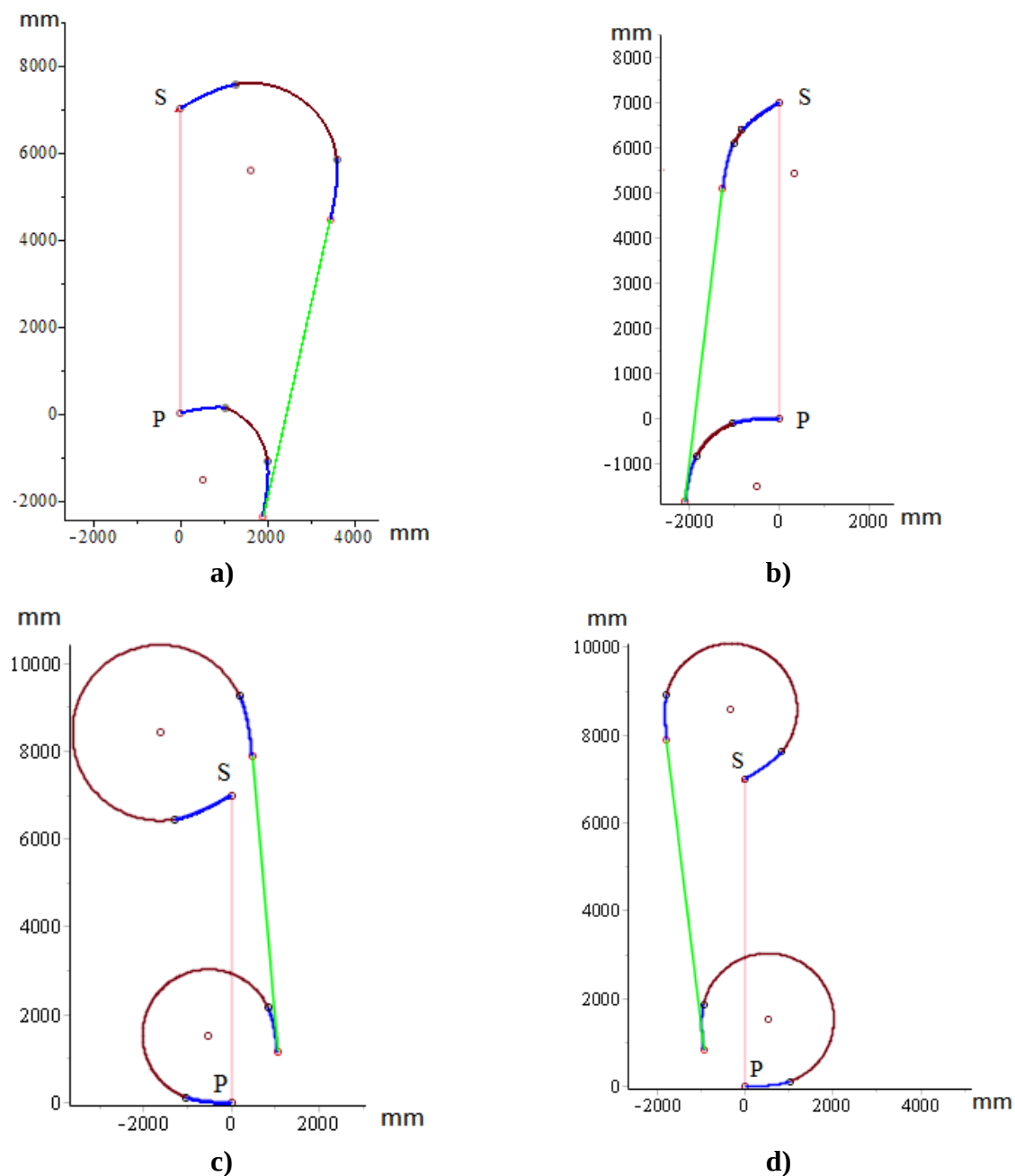


Fig. 3.13 Trasee generale cu menținerea orientării virajelor și inversarea sensului de deplasare la plecare: **a** - PFd-SSd; **b** - PSd-SFd; **c** - PSs-IP-SFs; **d** - PFs-IP-SSs

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune modificarea următoarelor etape:

- c) Determinarea coordonatelor punctului $1p$ și centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, Cp , cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cli} \\ -y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cpi} \\ -y_{cpi} \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

- f) Determinarea valorilor unghiurilor arcelor de cerc ale virajelor de plecare cu relația,

$$\theta_p = \frac{\pi - \varphi_{dc}}{2} - \varphi_{clp}, \quad (3.56)$$

h) Determinarea coordonatelor punctelor 2p:

$$\begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & -\sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \\ \sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ce} \\ -y_{ce} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

i) Determinarea coordonatelor punctelor 3p:

$$\begin{bmatrix} x_{3p} \\ y_{3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & -\sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \\ \sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cli} \\ -y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

În fig. 3.13 se prezintă cele patru variante posibile: *PFd-IP-SSd*, plecare cu fața spre dreapta, inversare sens la plecare și sosire cu spatele din dreapta; *PSd-IP-SFd*, plecare cu spatele spre dreapta, inversare sens la plecare și sosire cu fața din dreapta; *PSs-IP-SFs*, plecare cu spatele spre stânga, inversare sens la plecare și sosire cu spatele din stânga; *PFs-IP-SSs*, plecare cu fața spre stânga, inversare sens la plecare și sosire cu spatele din stânga.

3.4.4 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu sensuri opuse și cu inversarea sensului la plecare

Aceste trasee au în componență două viraje, unul la plecare și celălalt la sosire, orientate în sensuri opuse, spre stânga/dreapta la plecare și din dreapta/stânga la sosire, care pot fi parcurse de autovehicul cu fața sau cu spatele cu o oprire pentru inversarea sensului de deplasare după virajul de plecare.

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune modificarea următoarelor etape:

f) Determinarea valorii unghiului arcului de cerc de plecare θ_p :

$$\tan(2(\varphi_{clp} + \theta_p) - \pi) = \frac{\frac{d_c}{2} \sin \varphi_{dc} - y_{cp}}{-\frac{d_c}{2} \cos \varphi_{dc} + y_{cp} \tan(\varphi_{clp} + \theta_p)}, \quad (3.59)$$

Determinarea unghiului arcului de cerc de sosire din relația,

$$\theta_s = (\pi - \varphi_s)/2 - \varphi_{clp} - \theta_p - \varphi_{cls}. \quad (3.60)$$

Acest algoritm a fost programat în MAPLE și a rezultat subprogramul *TS2VScIP* (Traseu Simplu cu 2 Viraje cu Sensurile contrare și cu Inversare la Plecare).

În fig. 3.15 se prezintă cele patru variante posibile: *PFd-IP-SSs*, plecare cu fața spre dreapta, inversare sens la plecare și sosire cu spatele din stânga; *PSs-IP-SFd*, plecare cu spatele spre stânga, inversare sens la plecare și sosire cu fața din dreapta; *PFs-IP-SSd*, plecare cu fața spre stânga, inversare sens la plecare și sosire cu spatele din dreapta; *PSd-IP-SFs*, plecare cu spatele spre dreapta, inversare sens la plecare și sosire cu fața din stânga.

3.4.5 Modelarea traseelor simple cu două viraje cu același sens și cu inversarea sensului la sosire

Aceste trasee au în componență două viraje, unul la plecare și celălalt la sosire, orientate în același sens, spre stânga/dreapta la plecare și din stânga/dreapta la sosire, care pot fi parcurse de autovehicul cu fața sau cu spatele cu o oprire pentru inversarea sensului de deplasare înainte de virajul de sosire.

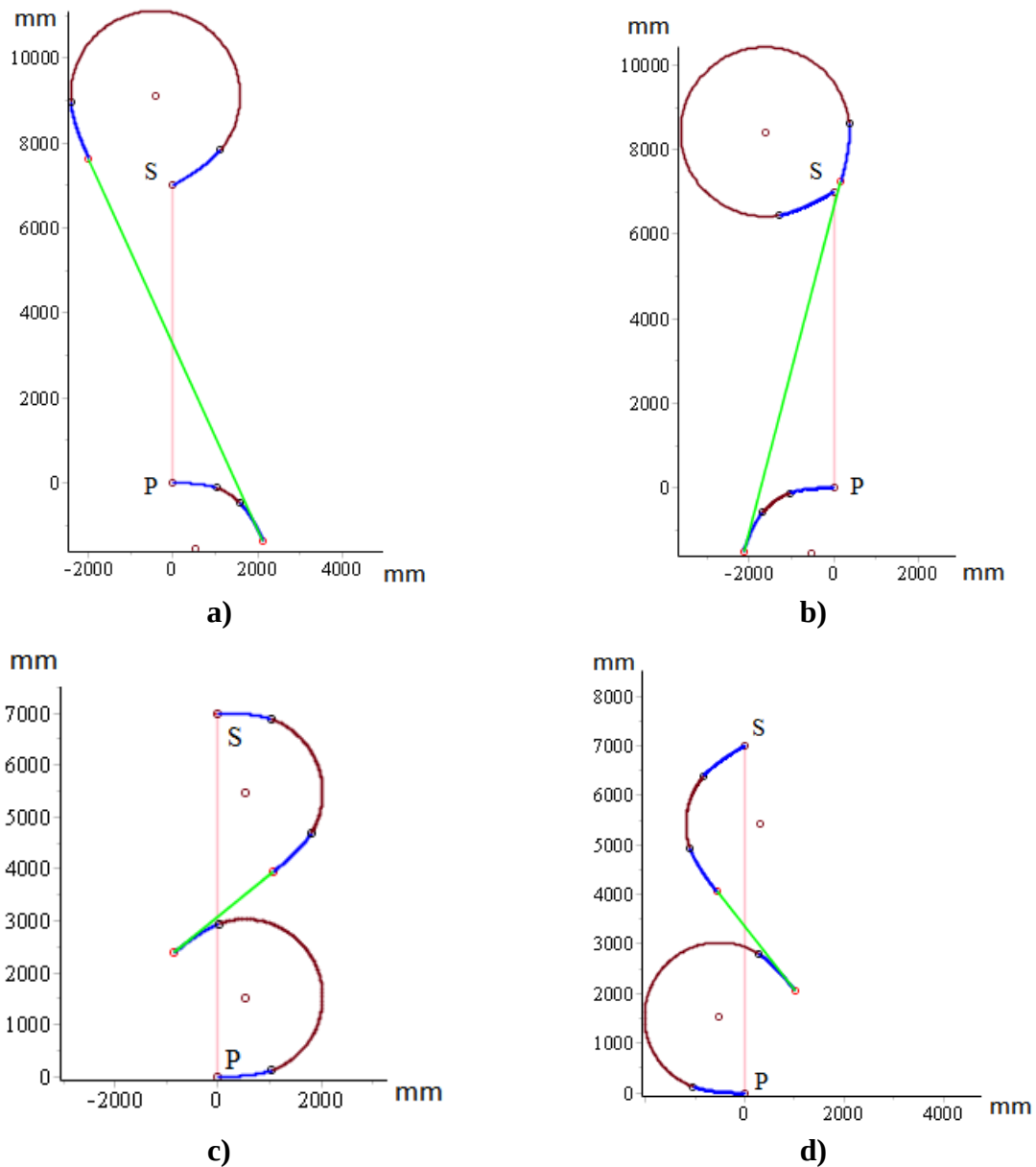


Fig. 3.15 Trasee simple cu două viraje cu senzuri opuse și cu inversarea sensului de deplasare la plecare **a** - PFd-IP-SSs **b** - PSs-IP-SFd; **c** - PFs-IP-SSd; **d** - PSd-IP-SFs

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune modificarea următoarelor etape:

- c) Determinarea coordonatelor punctului 1p și centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, Cp:

$$\begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cli} \\ y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{clp} & -\sin \varphi_{clp} \\ \sin \varphi_{clp} & \cos \varphi_{clp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cpi} \\ y_{cpi} \end{bmatrix}. \quad (3.62)$$

- d) Determinarea coordonatelor punctului 1s, și ale centrului instantaneu de rotație al clotoidei de intrare, Cs:

$$\begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cle} \\ y_{cle} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$\begin{bmatrix} x_{cs} \\ y_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) & -\sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) \\ \sin(\varphi_s + \varphi_{cls}) & \cos(\varphi_s + \varphi_{cls}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cpe} \\ y_{cpe} \end{bmatrix}. \quad (3.64)$$

- f) Determinarea valorilor unghiurilor arcelor de cerc ale virajelor de plecare și, respectiv, de sosire, cu rel. (3.32) și, respectiv,

$$\theta_s = \frac{\pi - \varphi_{dc} - \varphi_s}{2} - \varphi_{cls}, \quad (3.65)$$

- h) Determinarea coordonatelor punctelor 2p și 2s:

$$\begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & -\sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \\ \sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ce} \\ y_{ce} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$\begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1s} \\ y_{1s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + \varphi_{cls} + 2\theta_s) & -\sin(\varphi_s + \varphi_{cls} + 2\theta_s) \\ \sin(\varphi_s + \varphi_{cls} + 2\theta_s) & \cos(\varphi_s + \varphi_{cls} + 2\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix}. \quad (3.67)$$

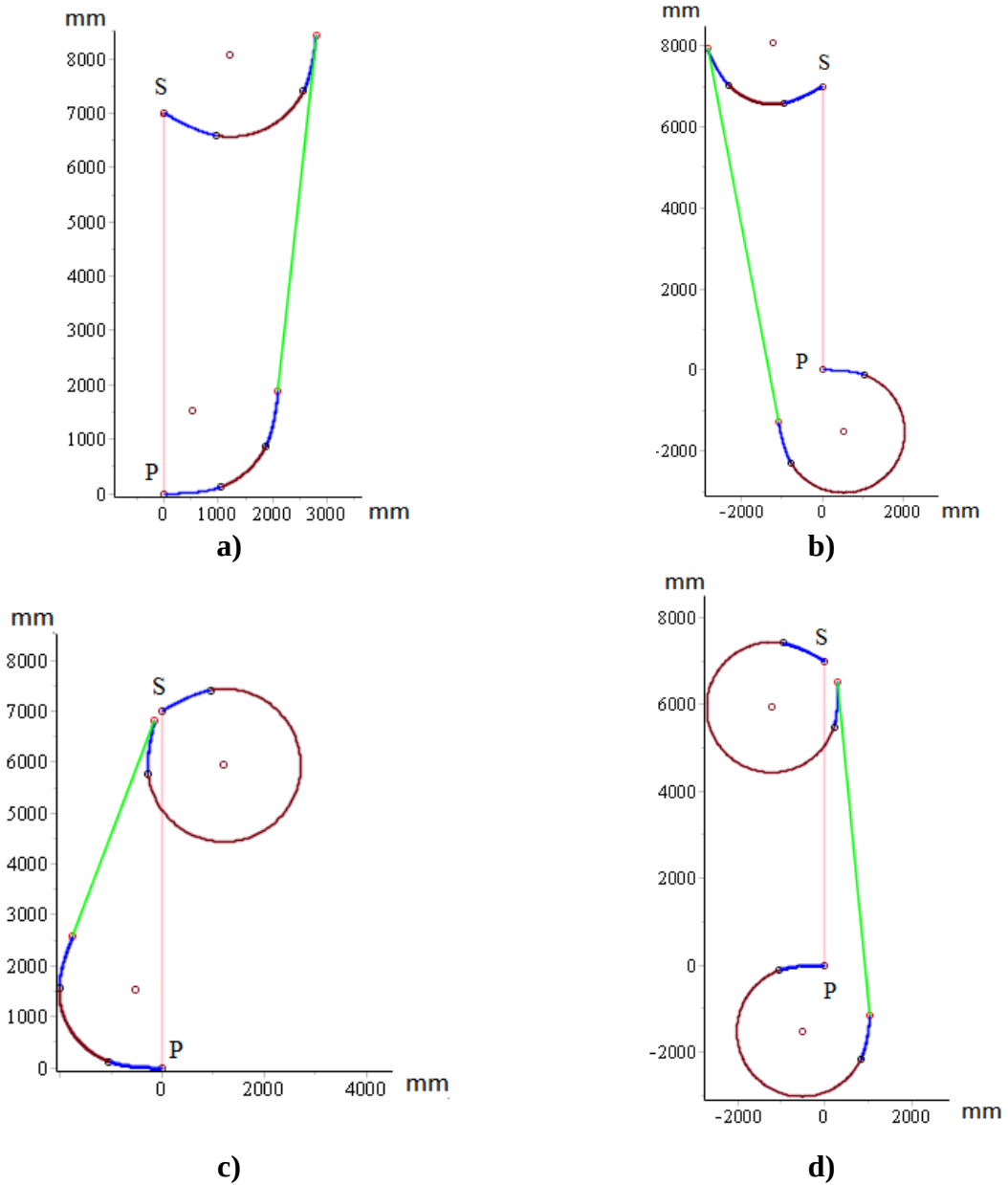


Fig. 3.17 Trasee simple cu două viraje cu sensuri cu același sens și cu inversarea sensului de deplasare la sosire **a** - PFS-IS-SSs **b** - PFd-IS-SSd; **c** - PSS-IS-SFs; **d** - PSd-IS-SFd

- i) Determinarea coordonatelor punctelor 3p și 3s:

$$\begin{bmatrix} x_{3p} \\ y_{3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & -\sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \\ \sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cli} \\ y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

$$\begin{bmatrix} x_{3s} \\ y_{3s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & -\sin(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \\ \sin(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) & \cos(\varphi_s + 2(\varphi_{cls} + \theta_s)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cle} \\ y_{cle} \end{bmatrix}. \quad (3.69)$$

Acest algoritm a fost programat în MAPLE și a rezultat subprogramul *TS2VSaIS* (Traseu Simplu cu 2 Viraje cu Sensurile aceleași și cu Inversare la Sosire). În fig. 3.17 se prezintă cele patru variante: *PFs-IS-SSs*, plecare cu fața spre stânga, inversare sens la sosire și sosire cu spatele din stânga; *PFd-IS-SSd*, plecare cu fața spre dreapta, inversare sens la sosire și sosire cu spatele din dreapta; *PSs-IS-SFs*, plecare cu spatele spre stânga, inversare sens la sosire și sosire cu fața din stânga; *PSd-IS-SFd*, plecare cu spatele spre dreapta, inversare sens la sosire și sosire cu fața din dreapta.

3.4.6 Modelarea traseelor simple cu două viraje de sensuri opuse și cu inversarea sensului la sosire

Aceste trasee au în componență două viraje, unul la plecare și celălalt la sosire, orientate în sensuri opuse, spre stânga/dreapta la plecare și din dreapta/stânga la sosire, care pot fi parcurse de autovehicul cu fața sau cu spatele cu o oprire pentru inversarea sensului de deplasare înainte de virajul de sosire.

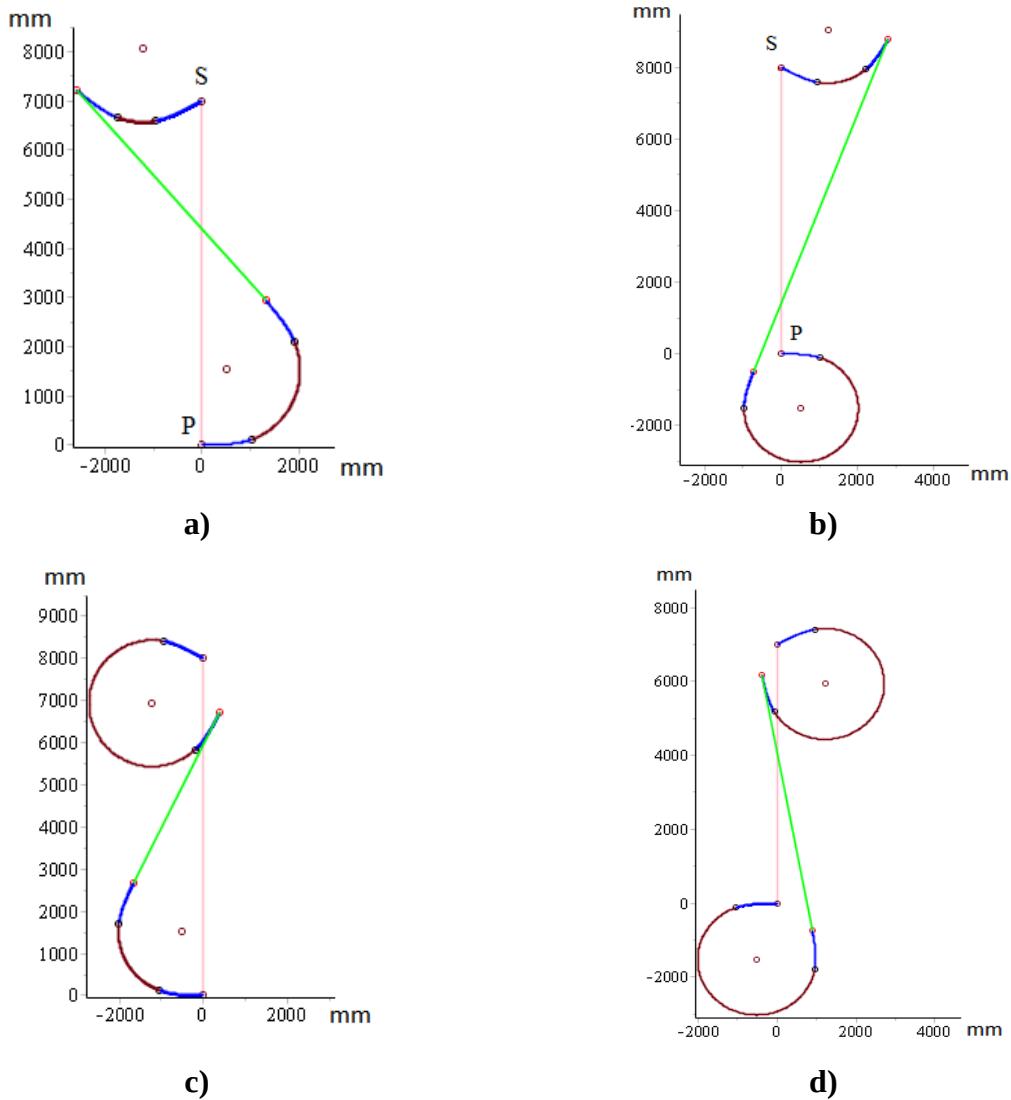


Fig. 3.19 Traseele generale cu schimbarea direcției virajelor cu inversarea sensului de deplasare la sosire: **a** - *PFs-IS-SSd*, **b** - *PFd-IS-SSs*; **c** - *PSs-IS-SFd*, **d** - *PSd-IS-SFs*

Algoritmul de modelare matematică a acestor trasee presupune modificarea următoarelor etape:

f) Determinarea valorii unghiului arcului de cerc de plecare θ_p :

$$\tan(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) = \frac{\frac{d_c}{2} \sin(\pi - \varphi_{dc}) - y_{cp}}{\frac{d_c}{2} \cos(\pi - \varphi_{dc}) - y_{cp} \tan(\varphi_{clp} + \theta_p)}, \quad (3.70)$$

Determinarea unghiului arcului de cerc de sosire din relația,

$$\theta_s = (\pi - \varphi_s)/2 - \varphi_{clp} - \theta_p - \varphi_{cls}. \quad (3.71)$$

h) Determinarea coordonatelor punctelor 2p:

$$\begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & -\sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \\ \sin(\varphi_{clp} + 2\theta_p) & \cos(\varphi_{clp} + 2\theta_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ce} \\ -y_{ce} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

i) Determinarea coordonatelor punctelor 3p:

$$\begin{bmatrix} x_{3p} \\ y_{3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & -\sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \\ \sin(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) & \cos(2(\varphi_{clp} + \theta_p)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{cli} \\ -y_{cli} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Acest algoritm a fost programat în MAPLE și a rezultat subprogramul *TS2VSoIS* (Traseu Simplu cu 2 Viraje cu Sensurile opuse și cu Inversare la Sosire). În fig. 3.19 se prezintă cele patru variante: *PFs-IS-SSd*, plecare cu fața spre stânga, inversare sens la sosire și sosire cu spatele din dreapta; *PFd-IS-SSs*, plecare cu fața spre dreapta, inversare sens la sosire și sosire cu spatele din stânga; *PSs-IS-SFd*, plecare cu spatele spre stânga, inversare sens la sosire și sosire cu fața din dreapta; *PSd-IS-SFs*, plecare cu spatele spre dreapta, inversare sens la sosire și sosire cu fața din stânga.

3.5 Modelarea traseelor complexe

Traseele complexe pot fi dezvoltate, pornind de la un traseu simplu cu unul sau două viraje prin introducerea unui traseu intermediar format din alte subtrasee elementare și/sau de trasee simple. Trasee complexe cu trei viraje se obțin prin adăugarea unui traseu elementar de tip viraj la trasee simple cu două viraje. Punctul și unghiul de sosire al unui traseu component devin punctul și unghiul de pornire al traseului care îl succede. Pentru atingerea unor puncte de sosire limită din componența unui traseu complex unul, două sau chiar toate virajele pot fi fără subtraseul arc de cerc.

În fig. 3.20 se prezintă unui traseu complex cu trei viraje *PFd-IP-PSs-SSd*, primul viraj (*PFd*) fiind format doar din arcele de clotoidă de intrare și de ieșire, fără a avea în componență un arc de cerc. După acest viraj s-a introdus inversarea sensului de deplasare urmat de un viraj cu plecare cu spatele spre stânga (*PSs*). Datele acestui traseu au fost obținute ca urmare a rulării subprogramului de modelare cu următoarele date de intrare: $\varphi_p = 0^\circ$, $x_s = 0$ m, $y_s = 7$ m, $\varphi_s = 30^\circ$, $\varphi_{clp} = 20^\circ$, $r_p = 1,5$ mm; $\varphi_{cls} = 20^\circ$, $r_s = 1,5$ m.

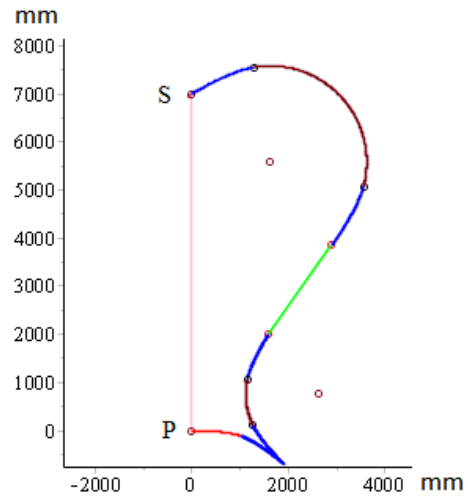


Fig. 3.20 Traseu complex cu trei viraje cu o inversare a sensului de deplasare

3.6 Trasee cu sosire la punctul de plecare

3.6.1 Particularități ale traseelor cu sosire la punctul de plecare

În cazul căilor de transport intern din mediile industriale sunt frecvente situațiile de navigare în spații reduse (cu dimensiuni de mai mici de 10 lungimi ale autovehiculului) care implică dezvoltarea de trasee cu numeroase manevre de virare și de inversare a sensului de deplasare. Virajele se realizează cu unghiuri de brachare a roților la valori maxime (permise de structura constructivă a autovehiculului) situație ce conduce la raze de virare minime (v. subcap. 3.2.4.2).

3.6.2 Trasee simple cu sosire la punctul de plecare

Din analiza traseelor simple, considerând restricțiile suplimentare impuse prin sosirea la punctul de plecare, s-au identificat doar patru variante de trasee posibile. În fig. 3.21 se prezintă traseele cu revenire la punctul de plecare care au fost obținute ca urmare a rulării subprogramelor Maple cu următoarele date de intrare: $\varphi_p = 0^\circ$, $x_S = x_P = 0$ m, $y_S = y_P = 0$ m, $\varphi_S = 70^\circ$, $\varphi_{clp} = 30^\circ$, $r_p = 1,5$ mm; $\varphi_{cls} = 30^\circ$, $r_s = 1,5$ m.

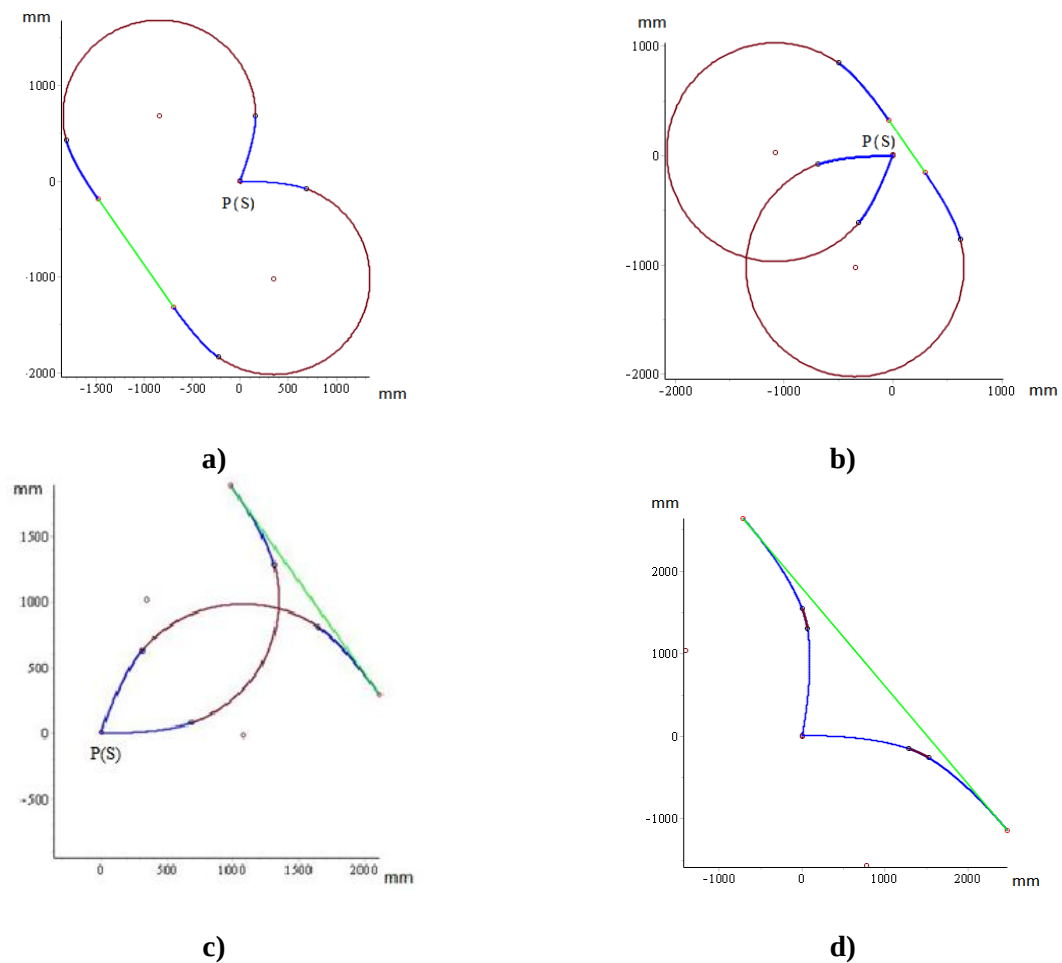


Fig. 3.21 Trasee simple cu întoarcere la punctul de pornire: **a** - PFd-SFs; **b** - PSd-SSd; **c** - PFs-IP-IS-SFd, **d** - PSs-IP-IS-SSd

3.7 Concluzii

În acest capitol se prezintă definirea și clasificarea exhaustivă a traseelor posibile precum și, pentru fiecare caz identificat, modelul matematic și programul de calcul și simulare grafică asociat. Pentru obținerea unei deplasări continue a autovehiculului de la poziția de plecare la cea de sosire, pe parcursul traseului virajele trebuie să se facă fără opriri, cu tranziții line la trecerea de la deplasarea în linie dreaptă la arc de cerc. Această proprietate este asigurată prin introducerea în componența virajului liniilor de tip arc de clotoidă.

Traseele de deplasare ale unui autovehicul se pot reprezenta ca o succesiune de subtrasee care pot fi modelate individual. Traseele sunt, în general, compuse din subtrasee de plecare, subtrasee de sosire și intermediare. Subtraseele pot fi monolinie (segment de dreaptă, arc de cerc sau arc de clotoidă), din două linii - semiviraje de intrare (arc de clotoidă și arc de cerc) sau de ieșire (arc de cerc și arc de clotoidă) - și din trei linii – viraje complete (arc de clotoidă, arc de cerc și arc de clotoidă). Planificarea și modelarea traseelor presupune concepția componenței subtraseelor și succesiunii acestora și, respectiv, descrierea matematică pentru a se obține coordonatele și orientarea autovehiculului în toate punctele. Astfel, au fost modelate matematic subtraseele de tip viraj cu unghi de bracare oarecare și cu unghi de bracare maxim, specifice traseelor de transport intern caracterizate de spații disponibile de deplasare înguste.

Plecând de la faptul că traseele simple reprezintă entități care pot fi folosite, mai ales, în spațiile de transport intern fără obstacole, au fost modelate matematic toate posibilitățile de trasee simple cu două viraje, ținând cont de sensurile posibile la plecare și la sosire și de posibilitatea inversării sensului de deplasare pe parcurs. Având în vedere că virajele și inversările de sens au loc numai la plecare și sosire, subtraseele intermediare vor fi segmente de dreaptă. Aceste trasee sunt clasificate în șase categorii: trasee simple cu două viraje fără inversarea sensului de deplasare cu același sens sau cu sensuri opuse ale virajelor, trasee simple cu două viraje cu inversarea sensului de deplasare la plecare cu același sens sau cu sensuri opuse ale virajelor și trasee simple cu două viraje cu inversarea sensului de deplasare la sosire cu același sens sau cu sensuri opuse ale virajelor.

Modelarea traseelor complexe implică mai mult de două viraje și pot fi compuse din mai multe trasee elementare cu un viraj, din mai multe trasee simple cu două viraje sau o combinație dintre trasee cu unul și cu două viraje. Modelul matematic al traseelor complexe se obține prin combinarea modelelor matematice ale traseelor și subtraseelor componente. Punctul și unghiul de sosire al unui traseu component devin punctul și unghiul de plecare al traseului următor.

Având în vedere specificitățile căilor de transport intern, au fost modelate matematic trasee în situații limită, ce implică faptul că punctul de plecare coincide cu cel de sosire. Aceste trasee sunt specifice căilor de transport intern din mediile industriale în spații reduse care implică numeroase manevre de virare și de inversare a sensului de deplasare și, de obicei, viraje cu unghiuri de bracare a roților la valori maxime.

4. PLANIFICAREA TRASEELOR ȘI TRAIECTORIILOR AaTI

4.1 Aspecte generale

În principal, traseele care pot deveni traiectorii de urmărit de AaTI cu direcție Ackermann trebuie să fie *netede*, cu continuitatea curburii (derivata de ordinul doi continuă) în orice punct, și *naturale*, să conducă la stări de rulare sigure diferite de cele care ar putea apărea în cazul comportării nenaturale umane (de ex. modificări bruște de direcție, uneori, generate și de existența unor condiții neobișnuite (ploaie, zăpadă, gheață, vânt etc.).

În vederea programării navigării vehiculelor de tip AaTI, se impune descrierea și planificarea (locală și/sau globală) a traseelor/traiectoriilor, precizând aspecte care sunt tratate în subcapitolele următoare.

4.2 Planificarea traseelor AaTI

4.2.1 Algoritmul planificării traseelor

Planificarea traseelor autovehiculelor autonome în medii industriale presupune determinarea unei secvențe de subtrasee interconectate între punctul de pornire și cel de sosire al autovehiculului.

Prima etapă, presupune descrierea căilor de navigare și a obstacolelor fixe care, spre deosebire de cele rutiere au forme geometrice și dimensiuni diverse, dependente de specificul sistemului de producție (fig. 4.2). Căile de transport intern din mediile industriale sunt spații special amenajate (artere, alveole, stații de alimentare, intersecții, curți etc.) ce cuprind un număr limitat de obstacole fixe și/sau mobile care au configurații geometrice diversificate. Pe lângă diverse spații de circulație și de staționare/parcare se evidențiază și marcaje și repere senzoriale specifice care contribuie la conducerea AaTI în vederea îndeplinirii sarcinilor impuse.

A doua etapă presupune stabilirea scenariului de transport în care se vor menționa punctele de plecare și de sosire precum și a celor intermediare dependent direct de procesele de producție. De exemplu, pentru studiul de față scenariul de transport conține următoarele trasee (fig. 4.3): plecare cu fața din punctul P, deplasare și sosire cu fața urmată de oprire în punctul I1 (traseul I); plecare cu spatele din B și sosire, de asemenea, cu spatele în I1 (întoarcere la punctul de plecare, traseul II); plecare cu fața din B și sosire cu fața în punctul I2 (traseul III);

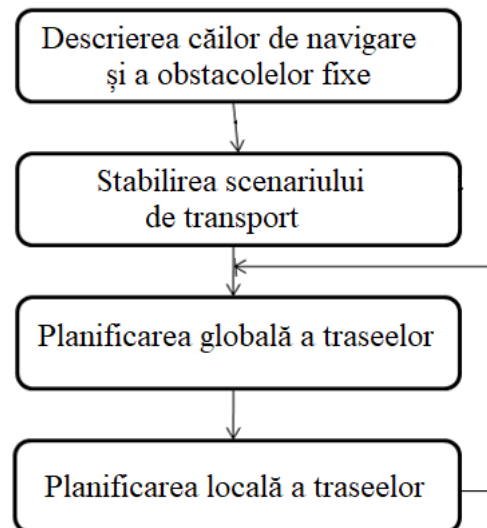


Fig. 4.2 Etapele planificării traseelor AaTI

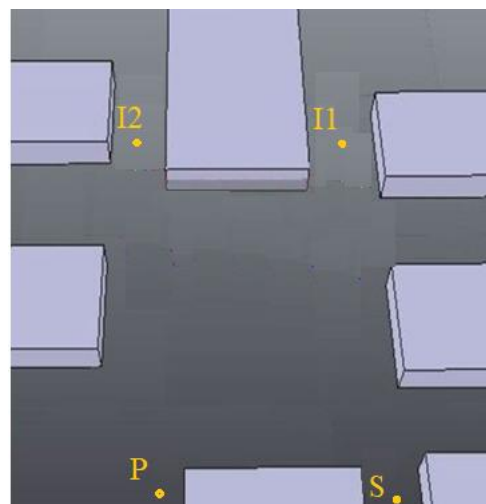


Fig. 4.3 Spațiul de navigare în interiorul unei curți și punctele impuse ale traseului

plecare cu spatele din I2 și sosire cu fața în S (traseul IV).

În etapa a treia se realizează planificarea la nivel global a traseului respectând scenariul de transport propus prin identificarea zonelor de acces. Datele de intrare pentru această etapă sunt stabilite în primele două etape. Datele de intrare pentru algoritmul de planificare globală reprezintă perimetrul spațiului în care se dezvoltă arborele de căutare al traseelor, zonele care trebuie evitate (obstacolele), coordonatele punctelor impuse ale traseelor scenariului.

În cadrul etapei a patra, se realizează, pornind de la cvasitraseul global obținut la etapa anterioară, planificarea locală a traseelor care are ca scop principal concepția traseelor de plecare/sosire și intermediare având la bază subtraseele descrise și modelate în cap. 3. Astfel, pentru fiecare secvență a scenariului de transport se va genera succesiunea de subtrasee.

4.2.2 Planificarea globală a traseelor cu algoritmul RRT îmbunătățit

Algoritmul RRT de planificare a traseului este utilizat pentru determinarea traseului celui mai scurt, ocolind obstacolele localizate în mediul de transport intern. Acest algoritm presupune dezvoltarea unui arbore de căutare aleatoriu a traseelor posibile și, deci, implică timpi de căutare mari. Cu cât numărul de iterații al algoritmului este mai mare, cu atât dezvoltarea arborelui de căutare este mai amplă și traseul generat este mai scurt. Pentru a evita extinderea căutărilor, mai ales în cazurile mediilor de navigare extinse, se pot introduce restricții suplimentare pentru reducerea ramurilor arborelui de căutare.

Cu cât numărul de iterații al algoritmului este mai mare, cu atât dezvoltarea arborelui de căutare este mai amplă și traseul generat este mai scurt. Pentru a evita extinderea căutărilor, mai ales în cazurile mediilor de navigare extinse, se pot introduce restricții suplimentare pentru reducerea ramurilor arborelui de căutare.

Astfel, pentru a reduce timpul de rulare al algoritmului RRT, a fost dezvoltată și implementată o modificare care îmbunătățește algoritmul ținând cont de distanțele maximă și minimă (D_{max} , D_{min}) dintre traseul generat și obstacolele fixe (fig. 4.4).

În plus, această modificare conduce și la avantajul numărului micșorat de trasee posibile din care se alege cel mai scurt [Gîrbacia, 2015]. Astfel, în cazul în care numărul obstacolelor fixe din mediul de navigare este mare, traseele posibile vor fi generate în proximitate la distanțe impuse, fapt ce asigură neatingerea obstacolelor de către colțurile autovehiculului precum și reducerea numărului de manevre pe care trebuie să le efectueze acesta.

Teoretic distanța minimă dintre traseu și obstacole trebuie să fie cel puțin jumătate din lățimea autovehiculului, la deplasarea paralel cu obstacolul. Pentru ca traseul generat să asigure evitarea coliziunilor cu obstacolele fixe, mai ales la efectuarea virajelor cu raze reduse, și în cazul necunoașterii punctului autovehiculului asociat traiectoriei de deplasare, se poate adopta distanța minimă dintre traseu, cel puțin egală cu diagonala autovehiculului.

Dacă nu se menționează distanța maximă dintre traseu și obstacole, algoritmul de planificare va căuta toate traseele posibile din spațiul disponibil. Prin considerarea acestui parametru, zona de identificare a traseului va fi redusă. Astfel, complexitatea calculelor necesare pentru realizarea arborelui de căutare a traseelor va fi, de asemenea, redusă.

Ca urmare a aplicării algoritmului RRT îmbunătățit pentru planificarea scenariului de transport, descris mai sus, se identifică patru arbori de căutare (cu ramuri marcate cu roșu și albastru) și trasee asociate (marcate cu galben) cu lungimile minime (fig. 4.6): traseul I, plecare cu fața din punctul P1 și sosire cu fața în S1; traseul II, plecare cu spatele din punctul P2 (identic cu S1) și întoarcere cu spatele în punctul de pornire S2(P2), cu orientarea opusă (la 180° față de plecare); traseul III, plecare cu fața din punctul P3 (identic cu S2) și sosire în punctul S3; traseul IV, pornire cu fața din punctul P4 (identic cu S3) și sosire în punctul final S4.

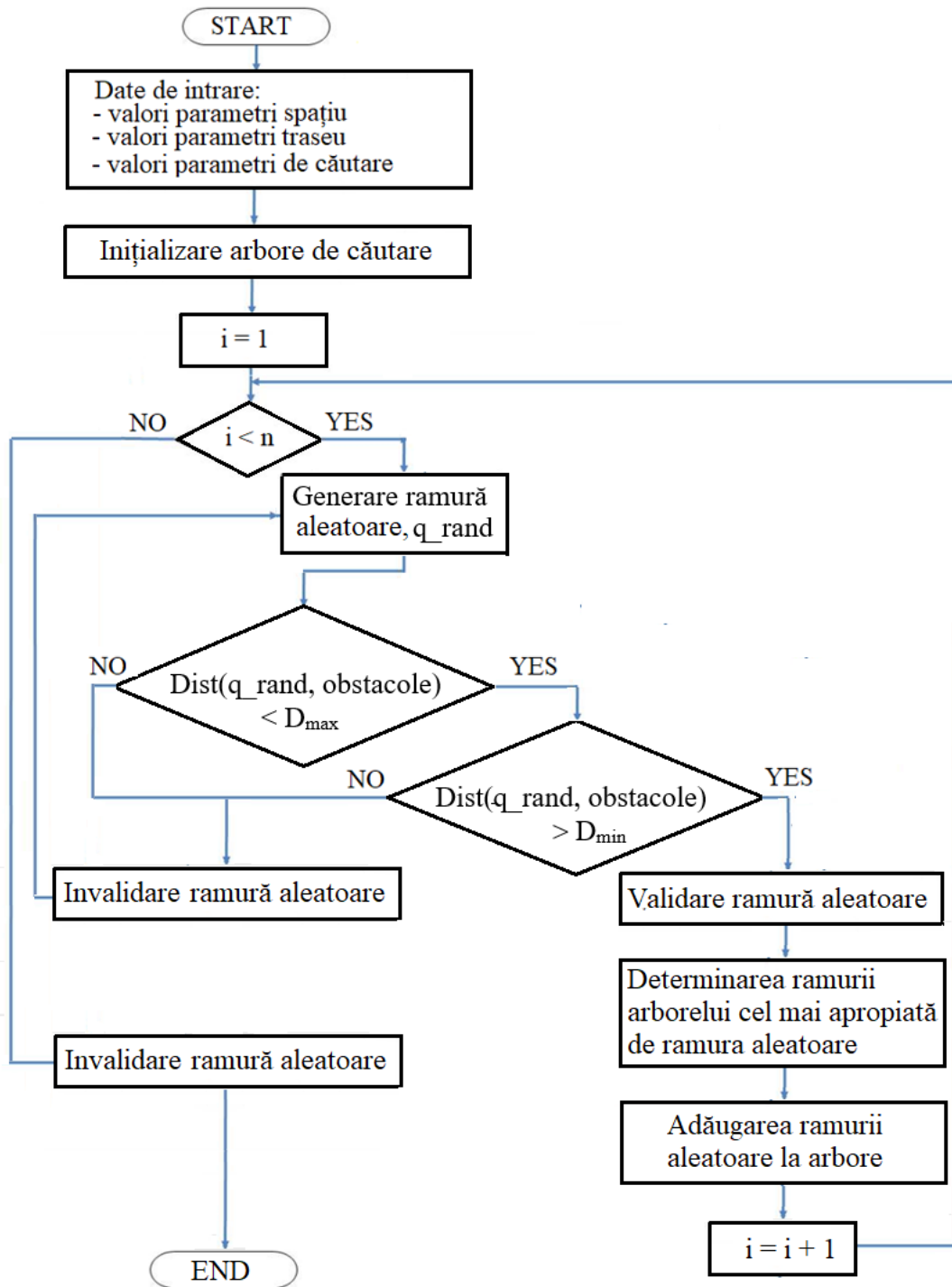


Fig. 4.4 Schema logică a algoritmului RRT îmbunătățit

Datele obținute, după aplicarea algoritmului RRT îmbunătățit reprezintă un set de puncte interconectate care definesc traseul planificat global. Aceste trasee nu pot fi transformate în traiectorii care pot fi urmărite cu acuratețe de autovehicul, deoarece liniile curbe asociate au discontinuități ale curburii și deci pot apărea schimbări bruște ale unghiului de virare, ceea ce ar duce la o mișcare neuniformă a autovehiculului. Deci, se impune ca aceste linii să fie ajustate și netezite prin utilizarea subtraseelor și traseelor dezvoltate în cap. 3.

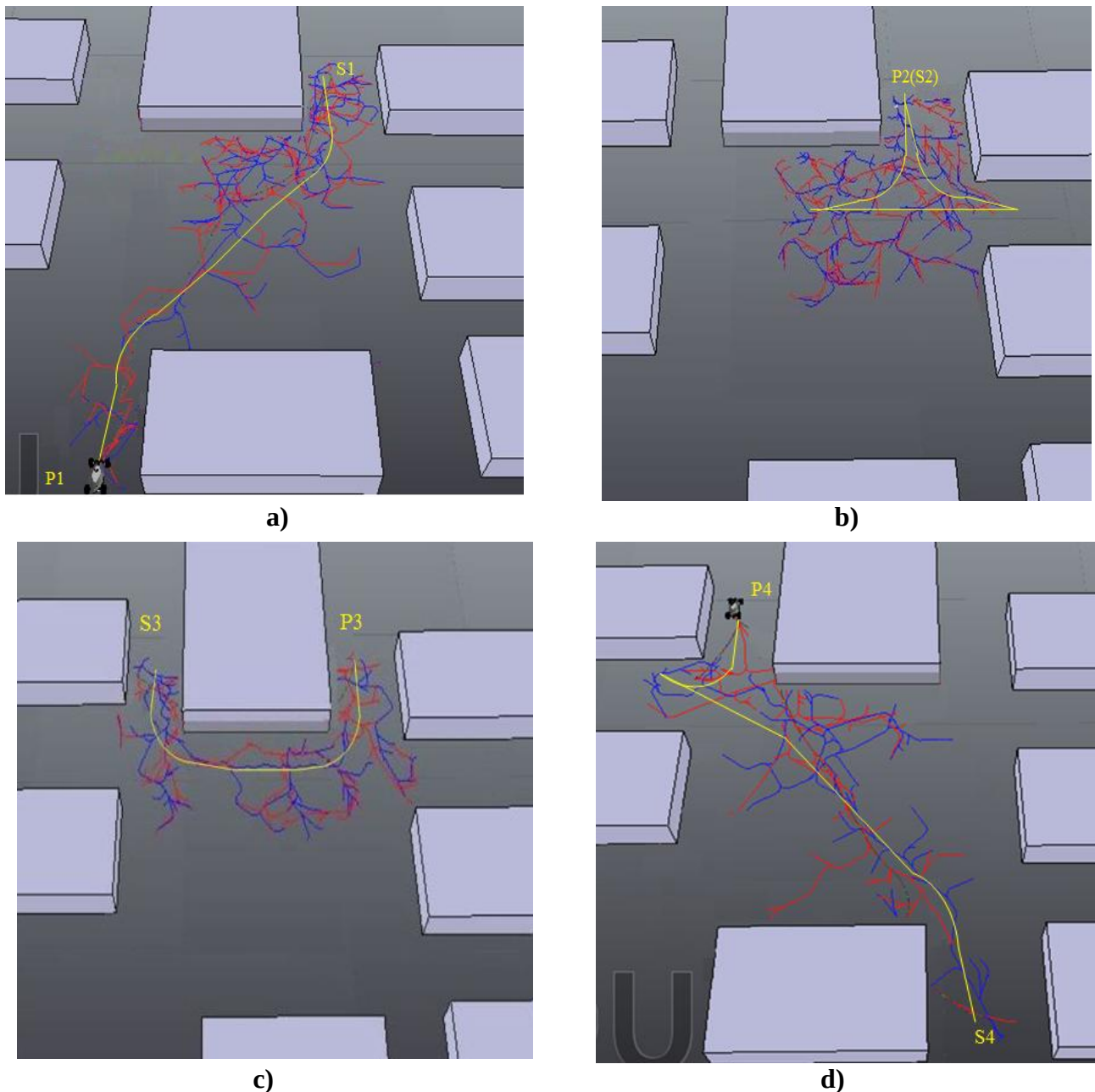


Fig.4.6 Arbori de căutare și traseele generate cu algoritmului RRT: **a** – traseul I; **b** – traseul II; **c** – traseul III; **d** - traseul IV

4.2.3 Planificarea locală a traseelor obținute cu algoritmul RRT îmbunătățit

Setul de puncte al traseului generat de algoritmul RRT îmbunătățit este procesat prin aplicarea transformatei Hough, pentru a identifica punctele care definesc segmente de dreaptă, folosind metoda HLT (Hough Line Transform), și arce de cerc cu metoda HCT (Hough Circle Transform) [Duda, 2001]. Ca urmare, s-a conceput algoritmul din fig. 4.7 care a fost implementat în programul cu care se pot determina punctele de capăt ale segmentelor de dreaptă și ale arcelor de cerc, precum și centrele cercurilor din care fac parte acestea.

Fiecare dintre punctele componente ale traseelor care au fost identificate ca fiind componente ale unor segmente dreaptă au fost adăugate în lista de clasificare, *Seg*, iar punctele care au fost identificate ca fiind componente ale unor arce de cerc au fost adăugate în lista de clasificare, *Cerc*. La formarea traseelor, dacă două puncte consecutive aparțin unei

alte liste de clasificare, este necesar să se realizeze tranziția de netezire (continuitate a curbării) de la segment de dreaptă la arc de cerc sau invers prin introducerea unui subtraseu de tip arc de clotoidă. Astfel, punctele identificate care reprezintă capetele segmentelor de dreaptă sau arcelor de cerc devin punctele inițiale/finale ale arcelor de clotoidă și apoi se determină unghiul arcului de cerc, conform algoritmului din fig. 4.7.

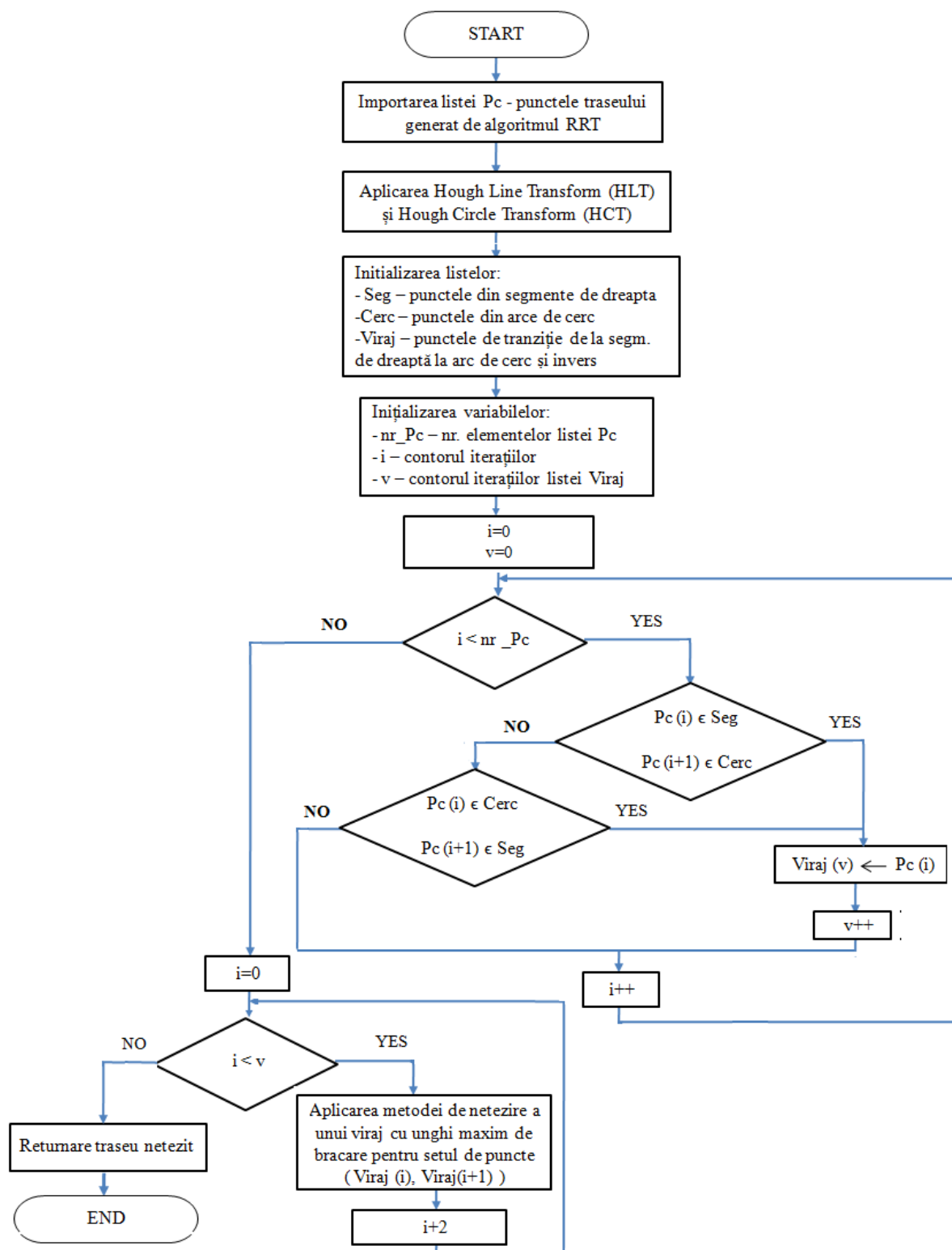


Fig. 4.7 Schema logică a algoritmului de ajustare și netezire a traseelor planificate global

În urma aplicării metodei de netezire, primul traseu devine un traseu simplu cu doua viraje fără inversarea sensului de deplasare în care primul viraj este orientat spre dreapta și cel

de-al doilea orientat spre stânga. Cel de-al doilea traseu presupune întoarcerea la punctul de pornire cu schimbarea orientării cu 180 grade și este un traseu simplu cu două viraje pe parcursul cărora se inversează sensul deplasării. Cel de-al treilea este un traseu simplu cu menținerea orientării celor două viraje spre dreapta și fără inversarea sensului de deplasare. Deoarece ultimul traseu presupune schimbarea orientării autovehiculului cu 180 grade la sosire, acesta este un traseu simplu cu două viraje cu inversarea sensului de deplasare la plecare în care primul viraj este orientat spre stânga și cel de-al doilea orientat spre dreapta (fig. 4.9).

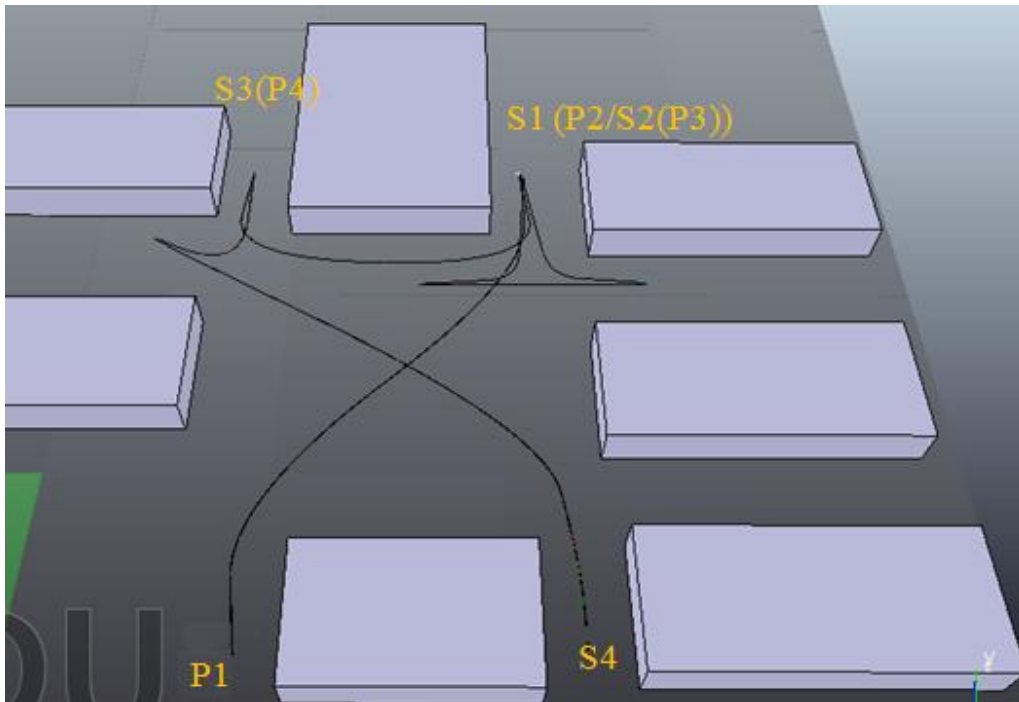


Fig. 4.9 Configurațiile traseelor obținute în urma procesului de planificare locală

4.3 Planificarea traiectoriilor AaTI

Pentru planificarea traiectoriei unui autovehicul autonom, pornind de la un traseu planificat anterior, se impune determinarea vitezelor (de propulsie și de virare) impuse de scenariul de navigare precum și de restricțiile legate de autovehicul [Miah,2017].

4.3.2 Modele de planificare a traiectoriilor AaTI

4.3.2.1 Model general de planificare a traiectoriilor

Traietoriile sunt caracterizate de variațiile vitezelor (de propulsie și de direcție) și de timpii necesari pentru parcurgerea traseului. Pentru descrierea unei traiectorii se impune cunoașterea vitezelor v_k și ω_k la parcurgerea distanțelor, l_k , în intervale de timp Δt_k .

Pentru a obține o traiectorie optimă trebuie minimizat timpul necesar parcurgerii acesteia în condițiile inexistenței discontinuității parametrilor cinematici (viteza de propulsie și cea unghiulară) [Gîrbacia, 2015].

4.3.2.2 Model de generare a subtraectorii de tip segment de dreaptă

Subtraectoria asociată subtraseului segment de dreaptă, ca entitate distinctă sau integrată în trasee simple sau complexe, se poate întâlni în trei variante:

- I. Traectorie distinctă cu plecare de pe loc (mișcare accelerată), deplasare cu viteză constantă, v_{seg} , și oprire cu mișcare decelerată (fig. 4.13,a).
- II. Subtraietorie de plecare cu plecare de pe loc (mișcare accelerată) și deplasare cu viteză constantă, v_{seg} (apoi se va continua mișcarea într-o altă subtraietorie) (fig. 4.13,b).
- III. Subtraietorie de sosire cu deplasare cu viteză constantă, v_{seg} (după ieșirea dintr-un viraj) și oprire cu mișcare decelerată (fig. 4.13,c).

Pentru inversarea sensului de deplasare, autovehiculul se va opri în punctul final al segmentului de dreaptă și va porni în sens contrar de-a lungul unei alte componente a traiectoriei.

Datele de intrare pentru calculul parametrilor subtraietoriei de parcurgere a segmentului de dreaptă sunt: l_{seg} – lungimea subtraseului, v_{seg} – viteza la mișcare uniformă, a – accelerația la plecare, a_d – decelerația la oprire.

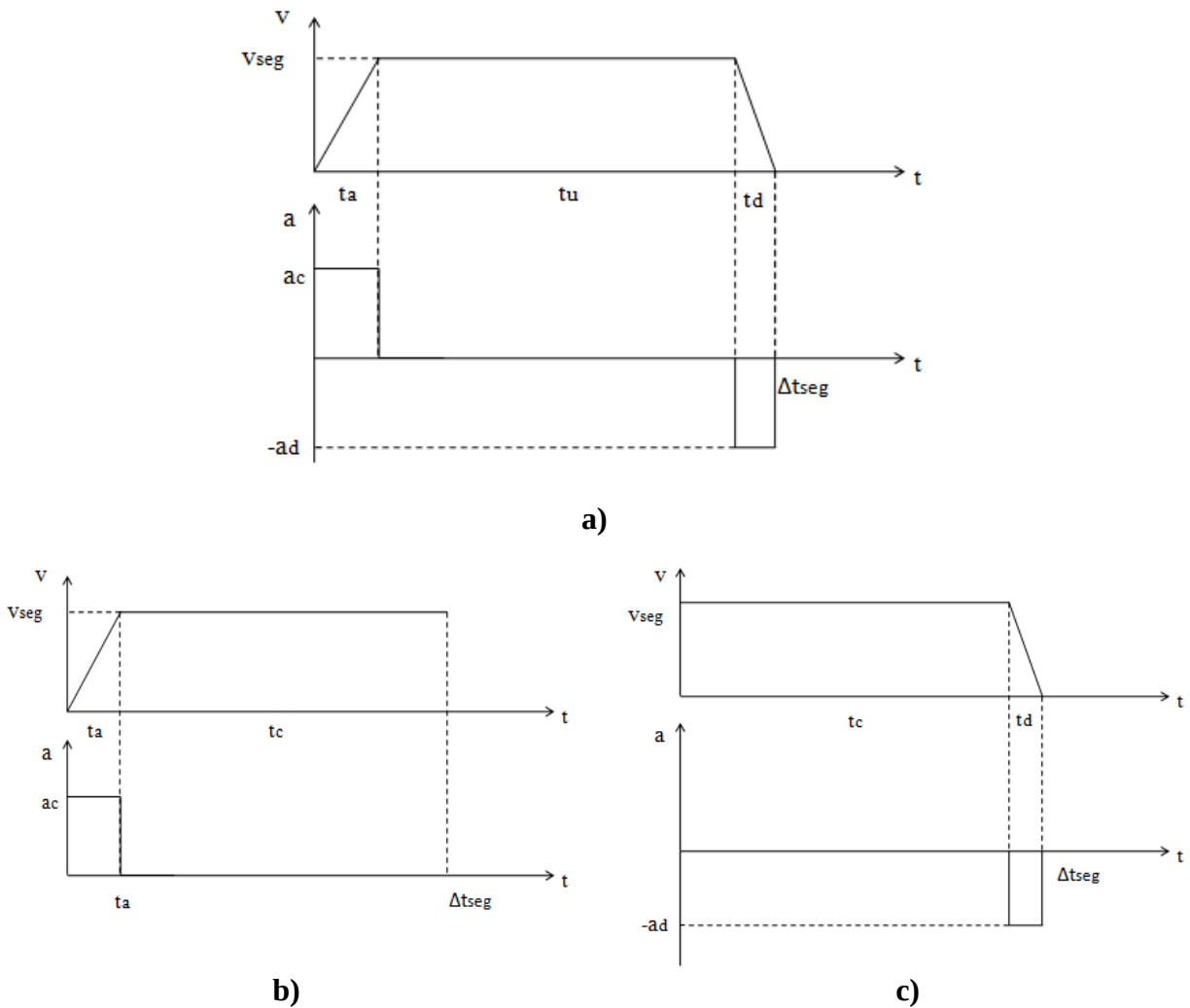


Fig. 4.13 Legile vitezelor de mișcare pe segment de dreaptă: **a** - pentru cazul I; **b** - pentru cazul II; **c** - pentru cazul III

Având în vedere că, în acest caz, se însumează mișcările uniform variate (accelerată și decelerată) cu mișcarea uniformă, se pot scrie relațiile:

$$S_{a,d} = \frac{v_{seg}^2}{2a_{a,d}}, \quad (4.22)$$

$$S_u = l_{seg} - S_a - S_d, \quad (4.23)$$

$$t_{a,d} = \frac{v_{seg}}{a_{a,d}}, \quad (4.24)$$

$$t_u = \frac{S_u}{v_{seg}}, \quad (4.25)$$

unde, $S_{a,d,u}$ reprezintă spațiile parcurse cu mișcare accelerată, decelerată, respectiv uniformă; $t_{a,d,u}$ – perioadele de timp de accelerare, de frânare, respectiv de mișcare uniformă.

Ținând cont de relațiile de mai sus, se poate determina timpul necesar parcurgerii subtraseului de tip segment de dreaptă:

$$\Delta t_{seg} = \frac{l_{seg}}{v_{seg}} + \frac{v_{seg}}{2a_c} + \frac{v_{seg}}{2a_d}, \quad (4.26)$$

pentru cazul I (fig. 4.13,a),

$$\Delta t_{seg} = \frac{l_{seg}}{v_{seg}} + \frac{v_{seg}}{2a_c}, \quad (4.27)$$

pentru cazul II (fig. 4.13,b),

$$\Delta t_{seg} = \frac{l_{seg}}{v_{seg}} + \frac{v_{seg}}{2a_d} \quad (4.28)$$

pentru cazul III (fig. 4.13,c).

Valorile vitezei de deplasare și accelerațiilor se stabilesc în funcție de caracteristicile căilor de rulare, tipul materialelor transportate și caracteristicile tehnice ale autovehiculului.

4.3.2.3 Model de generare a subtraieectorii de tip arc de cerc

Subtraseul de tip arc de cerc este, de obicei, parte componentă a virajelor sau ca subtraseu la începutul sau sfârșitul deplasării când autovehiculul pleacă, respectiv sosește cu roțile de direcție braccate. Având în vedere că în cazul AaTI, se impune că va pleca și opri cu roțile nebraccate, se va considera că subtraseul de tip arc de cerc intră în componența virajelor și va fi parcurs cu viteză constantă, v_{ac} (fig. 4.14).

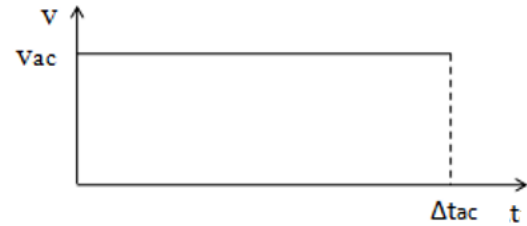


Fig. 4.14 Legea de mișcare pe arc de cerc

Viteza de deplasare a autovehiculului la parcurgerea unui subtraseu de tip arc de cerc este mai mică decât viteza maximă corespunzătoare deplasării pe un segment de dreaptă (v. subcap. 4.4.1.2). Pentru a se realiza o mișcare uniformă (fără patinare laterală și răsturnare), valorile vitezei, v_{ac} , trebuie să fie mai mici decât viteza maximă, v_{max} , din relația (4.8).

Timpul necesar de deplasare, cunoscând lungimea arcului de cerc, l_{ac} , se determină cu relația,

$$\Delta t_{sac} = \frac{l_{ac}}{v_{ac}}. \quad (4.29)$$

4.3.2.4 Model de generare a subtraietorii de tip arc de clotoidă

Subtraietoria asociată subtraseului arc de clotoidă, ca entitate integrată în trasee simple sau complexe, se poate întâlni în patru variante distincte:

- I. Plecarea de pe loc cu virare, urmată de deplasare pe arc de cerc (fig. 4.15,a).
- II. Continuarea deplasării după parcurgerea subtraseului arc de cerc până la înscrierea pe subtraseul segment de dreaptă (fig. 4.15,a).
- III. Oprere cu virare după parcurgerea subtraseului arc de cerc (fig. 4.15,b),
- IV. Continuarea deplasării după parcurgerea subtraseului segment de dreaptă până la înscrierea pe subtraseul arc de cerc (fig. 4.15 b).

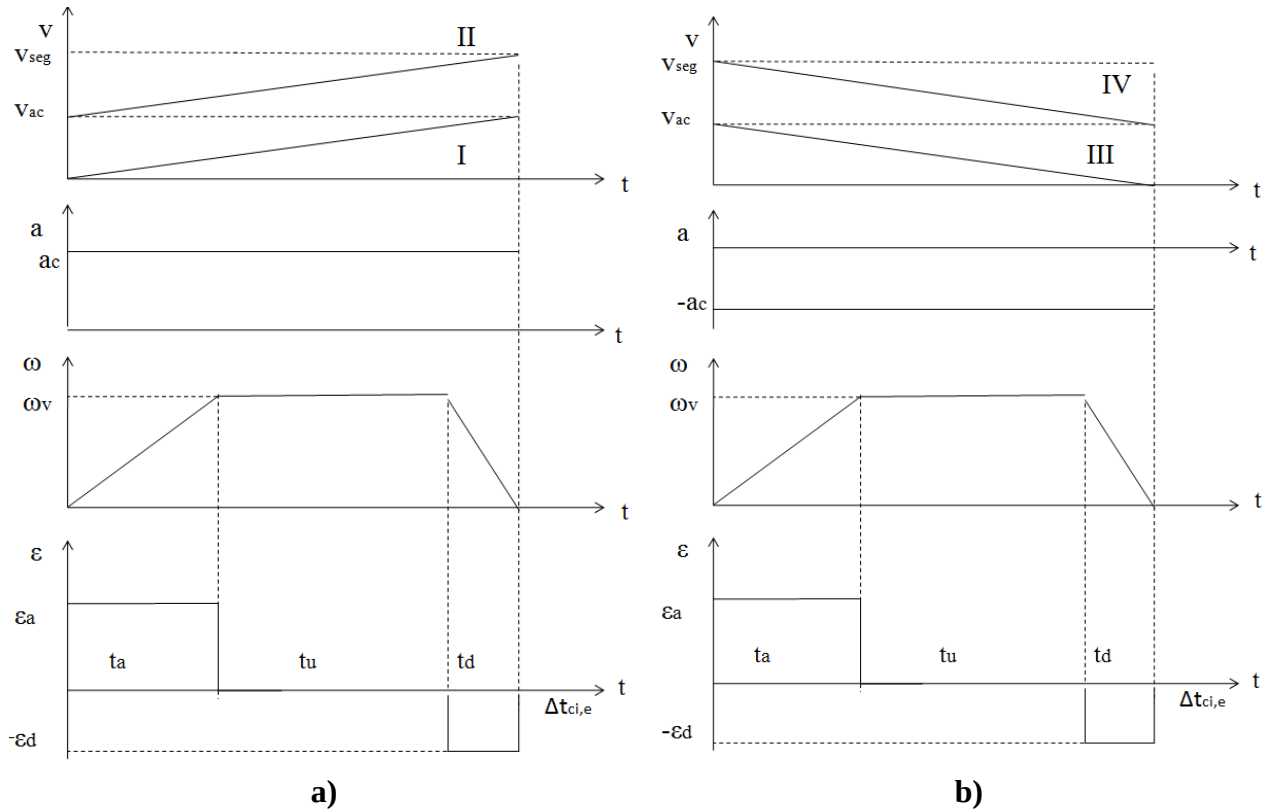


Fig. 4.15 Legile vitezelor de deplasare pe arc de clotoidă **a** - cu accelerare, **b** - cu decelerare

Subtraietoriile I și IV se asociază subtraseelor de intrare în viraj, iar subtraietoriile II și III se asociază subtraseelor de ieșire din viraj.

Datele de intrare pentru calculul parametrilor traiectoriei de parcurgere a arcului de clotoidă de intrare sau de ieșire din viraj sunt: $l_{ci,e}$ reprezintă lungimea subtraseului arc de clotoidă, $\alpha_{ci,e}$ – unghiul de virare, v_{seg} – viteza de deplasare pe subtraietoria asociată subtraseului segment de dreaptă, v_{ac} – viteza de deplasare pe subtraietoria asociată subtraseului arc de cerc, a_c – accelerația la plecare și la creșterea vitezei de deplasare, a_d – decelerația la oprire și la scăderea vitezei de deplasare, ϵ_a – accelerația unghiulară la începerea virării, ϵ_d – decelerația unghiulară la finalizarea virării.

Având în vedere că în acest caz mișcarea de virare (accelerată, uniformă și decelerată) se suprapune cu mișcarea de deplasare (considerată accelerată), se pot scrie relațiile:

$$l_{ci,e} = \frac{v_{ac}^2}{2a_{c,d}}, \quad (4.30)$$

$$\Delta t_{ci,e} = \frac{v_{ac}}{a_{c,d}}, \quad (4.31)$$

pentru cazurile I și III,

$$l_{ci,e} = \frac{v_{seg}^2 - v_{ac}^2}{2a_{c,d}}, \quad (4.32)$$

$$\Delta t_{ci,e} = \frac{v_{seg} - v_{ac}}{a_{a,d}}, \quad (4.33)$$

pentru cazurile II și IV, și

$$\alpha_{a,d} = \frac{\omega_v^2}{2\varepsilon_{a,d}}, \quad (4.34)$$

$$\alpha_u = \alpha_{i,e} - \alpha_a - \alpha_d, \quad (4.35)$$

$$t_{a,d} = \frac{\omega_v}{\varepsilon_{a,d}}, \quad (4.36)$$

$$t_u = \frac{\alpha_u}{\omega_v} \quad (4.37)$$

unde, $\alpha_{a,d,u}$ reprezintă unghiurile de virare cu mișcare de rotație accelerată, decelerată, respectiv uniformă; $t_{a,d,u}$ – perioada de timp de virare accelerată, decelerată, respectiv uniformă.

Deoarece mișcările de propulsie și de virare sunt simultane, se impune corelarea acestora privind timpul de mișcare necesar, $\Delta t_{ci,e}$. Astfel, se pot evidenția următoarele situații:

- a) Dacă $t_a + t_d < \Delta t_{ci,e}$ și ținând cont de relațiile (4.36), (4.37), se obține:

$$\frac{\omega_v}{\varepsilon_a} + \frac{\omega_v}{\varepsilon_d} < \frac{v_{ac}}{a_{c,d}}, \quad (4.38)$$

pentru cazurile I și III, sau

$$\frac{\omega_v}{\varepsilon_a} + \frac{\omega_v}{\varepsilon_d} < \frac{v_{seg} - v_{ac}}{a_{c,d}}, \quad (4.39)$$

pentru cazurile II și IV. În această situație virarea se face cu cele trei tipuri de mișcare (accelerată, uniformă și decelerată).

- b) Dacă $t_a + t_d = \Delta t_{ci,e}$, atunci virarea se face numai prin mișcare accelerată și decelerată (fig. 4.16).
c) Dacă $t_a + t_d > \Delta t_{ci,e}$, atunci virarea cu parametrii impuși nu se poate realiza și din relația (4.34) sau (4.35) se determină valoarea vitezei unghiulare de virare,

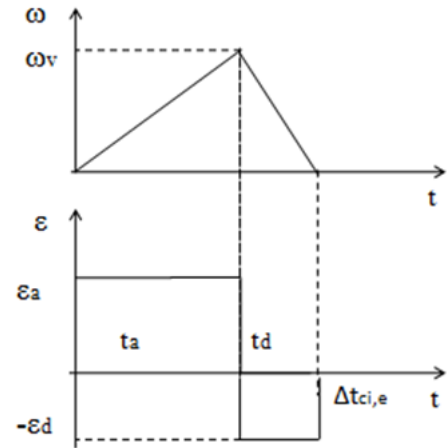


Fig. 4.16 Legile mișcării de virare uniform variată

$$\omega_{vrec} = \frac{v_{ac}(\varepsilon_a + \varepsilon_d)}{a_{c,d}}, \quad (4.36)$$

sau, respectiv,

$$\omega_{vrec} = \frac{(v_{seg} - v_{ac})(\varepsilon_a + \varepsilon_d)}{a_{c,d}} \quad (4.39)$$

4.5 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate etapele planificării traseelor de transport intern în mediile industriale și a traiectoriilor pe care trebuie să le efectueze autovehiculul autonom pentru a parcurge traseele planificate.

Planificarea traseelor autovehiculelor autonome presupune determinarea off-line a unei secvențe de puncte interconectate între punctul de plecare și cel de sosire. Prima etapă a metodei de planificare a traseului presupune descrierea căilor de navigare și a obstacolelor fixe care, spre deosebire de cele rutiere au forme geometrice și dimensiuni diverse, dependente de specificul sistemului de producție. În etapa a doua s-a stabilit scenariul de transport în care se vor menționa punctele de plecare și de sosire precum și a celor intermediare.

În a treia etapă se elaborează algoritmul de planificare la nivel global a traseului respectând scenariul de transport propus. Această etapă presupune personalizarea și aplicarea algoritmului RRT pentru determinarea traseului celui mai scurt, ocolind obstacolele localizate în mediul de transport intern. Pentru a reduce timpul de rulare a algoritmului RRT, a fost dezvoltată și implementată o modificare care îmbunătățește algoritmul RRT, ținând cont de distanțele maxime și minime impuse dintre traseul generat și obstacolele considerate

Etapa a patra presupune planificarea locală a traseelor care are ca scop principal generarea traseelor de plecare/sosire și intermediare având la bază subtraseele descrise și modelate în cap. 3. Pentru obținerea unui traseu neted, setul de puncte generat de algoritmul RRT îmbunătățit este procesat prin aplicarea transformatei Hough, pentru a identifica punctele care definesc segmente de dreaptă, folosind metoda HLT (Hough Line Transform), și arce de cerc cu metoda HCT (Hough Circle Transform).

Pentru planificarea traiectoriilor se stabilesc în primul rând, modelele cinematice și dinamice ale autovehiculului autonom. Pentru realizarea sarcinilor de transport intern în medii industriale, autovehiculul autonom utilizat este neolonom și are sistem de virare de tip Ackermann. Din modelele cinematice și dinamice se determină constrângerile cinematice care vor fi folosite la planificarea traiectoriilor autovehiculului autonom, pentru îndeplinirea sarcinilor de transport, și se stabilesc limitele de viteză și de accelerație.

Pentru a planificarea traiectoriei optime, traiectoria inițială este descompusă în subtraiectorii corespunzătoare deplasării autovehiculului de-a lungul subtraseelor. Variațiile vitezei și a unghiului de virare la efectuarea traiectoriei, având în vedere că timpii de virare sunt reduși, se impune să fie liniare. Astfel, s-au stabilit valorile parametrilor caracteristici ai fiecărei subtraiectorii și s-a determinat modul de calcul al vitezei de deplasare de-a lungul acestora precum și a timpilor de parcurgere.

Etapele care trebuie parcurse pentru planificarea traiectoriei cu un viraj constau în stabilirea traiectoriilor elementare componente și determinarea variațiilor vitezelor pentru parcurgerea fiecărei subtraiectorii. Pentru a obține deplasarea continuă a autovehiculului cu sistem de virare de tip Ackermann, s-au realizat corelațiile în timp ale motoarelor de propulsie și de virare și s-a determinat timpul de parcurgere de la plecare la sosire.

5. SIMULAREA NAVIGĂRII AaTI ÎN MEDII VIRTUALE

5.1 Aspecte generale

Datorită evoluțiilor din domeniul prelucrării informației care au la bază dezvoltarea computerelor și graficii computerizate, în ultima perioadă de timp, au fost realizate noi tehnologii care permit dezvoltarea, simularea și testarea virtuală a sistemelor. Printre acestea se numără și tehnologiile de Realitate Virtuală (RV) care implică folosirea pachetelor software pentru a se genera, edita și controla mediile virtuale 3D [Gîrbacia, 2014]. O particularitate importată a RV este interactivitatea, deoarece mediile virtuale 3D nu sunt statice, ele se actualizează în timp real în funcție de datele primite de la utilizatori.

5.2 Alegerea programului de simulare și testare a navigării AaTI în medii virtuale

Recent au fost dezvoltate numeroase biblioteci software care pot fi aplicate și pentru simularea modului de îndeplinire a diverselor sarcini de transport cu autovehicule autonome. Pentru simularea parcurgerii unei traiectorii prestabilite de către un AaTI în medii industriale a fost aleasă biblioteca software **V-REP** (Virtual Robot Experimentation Platform) deoarece oferă numeroase facilități pentru a crea medii virtuale corespunzătoare unor scenarii de navigare complexe și permite implementarea unor noi algoritmi utilizând tehnici de programare de tip plug-in [Rohmer, 2013].

V-REP este un simulator care poate fi personalizat prin crearea unui program extern utilizând o interfață de programare a aplicațiilor (API). Funcționarea API se realizează bazat pe aplicații client dezvoltate cu limbaje de programare diferite (de ex. pentru controlul autovehiculului s-a dezvoltat o aplicație în Matlab) și aplicații server implementate prin plugin V-REP care este încărcat în mod implicit.

Mediul virtual pentru studiul navigării autovehiculelor virtuale, utilizând biblioteca V-REP, este dezvoltat pe o suprafață virtuală plană de formă, pătrat cu latura de 25 m, reprezentată ca un obiect parametric de tip *Floor*. În centrul acestei suprafețe se află originea sistemului de coordonate. Pentru generarea mediului industrial, culoarea implicită a acesteia a fost modificată pentru a se evidenția zonele dintre elementele componente ale mediului, iar în colțul stânga jos a fost reprezentat un spațiu verde (fig. 5.6). Pe suprafața virtuală au fost postate obiecte de formă paralelipipedică care reprezintă obstacolele virtuale fixe (hale de producție, magazine, depozite etc). Toate obiectele virtuale care reprezintă obstacole fixe au fost grupate într-o colecție, pentru care s-au stabilit următoarele proprietăți: de măsurare, detecție, coliziune cu alte entități virtuale mobile (de ex., autovehicul virtual) și de rigiditate.

În plus, pe suprafața virtuală au fost adăugate patru repere care reprezintă punctul de plecare (P), două puncte intermediare (I1 și I2) și punctul de sosire (S) al autovehiculului virtual (v. fig. 4.3). Aceste repere, sunt reprezentate ca obiecte virtuale punctiforme cu proprietăți de măsurare și de detecție.

5.3 Modelarea și reprezentarea traseelor virtuale

5.3.1 Modelarea subtraseelor virtuale de tip arc de cerc și de clotoidă utilizând curbe Bezier

Pentru descrierea arcelor de cerc și de clotoidă se folosesc curbele Bezier polinomiale de

gradul doi (quadractice) care presupun cunoașterea coordonatelor punctelor de control $P_0(x_0, y_0)$, $P_1(x_1, y_1)$ și (x_2, y_2) (fig 5.4). Coordonatele punctelor curbei Bezier se determină în funcție de parametrul, $u \in (0, 1)$, cu relațiile [Montés, 2008] (v. subcap. 2.6.2):

$$x(u) = (1-u)^2 x_0 + 2u(1-u) x_1 + u^2 x_2, \quad (5.1)$$

$$y(u) = (1-u)^2 y_0 + 2u(1-u) y_1 + u^2 y_2, \quad (5.2)$$

în care, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $x_1 = r \tan(\theta/2)$, $y_1 = 0$, $x_2 = r \sin\theta$, $y_2 = r(1-\cos\theta)$ reprezintă coordonatele punctelor de control ale unui arc de cerc cu raza r și unghiul θ și $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $x_1 = x_{i,e} - y_{i,e}/\tan\alpha_{i,e}$, $y_1 = 0$, $x_2 = x_{i,e}$, $y_2 = y_{i,e}$ - coordonatele punctelor de control ale unei clotoide de intrare/ieșire cu coordonatele punctului final/de început, $(x_{i,e}, y_{i,e})$, și unghiul de orientare, $\alpha_{i,e}$.

Cunoscând coordonatele parametrizate $x(u)$ și $y(u)$, se pot determina lungimea curbei și unghiului de orientare cu relațiile:

$$l = \int_0^1 \sqrt{x(u)^2 + y(u)^2} du, \quad (5.3)$$

$$\alpha(u) = \arctg \left(\frac{dy(u)}{du} / \frac{dx(u)}{du} \right). \quad (5.4)$$

Unghiul de orientare în punctul final/de început (P_2), se obține din rel. (5.4), pentru $u = 1$.

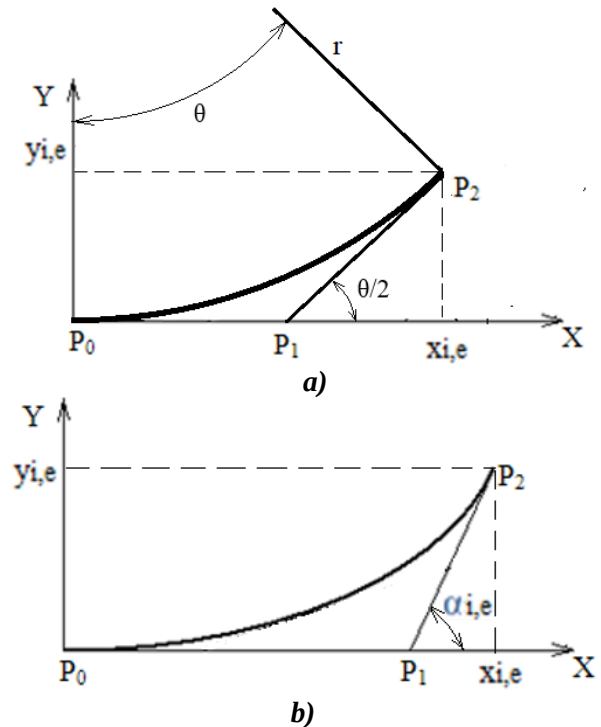


Fig. 5.4 Modelarea, folosind curbe Bezier, a subtraseelor virtuale de tip arc: **a** – de cerc; **b** – de clotoidă

5.3.2 Reprezentarea traseelor virtuale

Pentru reprezentarea traseelor prin generarea de obiecte personalizate în mediul virtual se impune importarea datelor dintr-un fișier cu extensia .csv, editarea și generarea, pornind de la marginile unei forme tridimensionale activată. Reprezentarea unui traseu virtual presupune utilizarea unui obiect de tip *path*.

Modelarea traseelor virtuale complexe într-un mediu virtual se realizează parcurgând următoarele etape:

- Preluarea setului de puncte din care este format traseul netezit, obținut în urma aplicării metodei de planificare locală cu algoritmul RRT îmbunătățit (subcap 4.2.3), și salvarea acestuia într-un fișier cu extensia .csv. În cadrul acestui fișier sunt stocate coordonatele punctelor semnificative: de plecare, de început al clotoidei de intrare în viraj, de sfârșit al clotoidei de intrare în viraj care coincide cu cel de început al arcului de cerc, asociat centrului arcului de cerc, de sfârșit al arcului de cerc, de început al clotoidei de ieșire din viraj, de sfârșit al clotoidei de ieșire din viraj și de sosire.
- Definirea subtraseelor, ca obiecte virtuale de tip *path*, folosind datele din fișierul .csv în care sunt stocate coordonatele punctelor componente.
- Definirea caracteristicilor de vizualizare a componentelor subtraseelor virtuale în mediul virtual: culori, forme și grosimi de linii etc.

În fig. 5.6 se prezintă traseul virtual complex asociat traseului descris în subcap. 4.2.1 în care se evidențiază și autovehiculul virtual situat în punctul de plecare. Traseul virtual

complex este compus din patru trasee virtuale (v. subcap 4.2.1, fig. 4.3): I, plecare cu fața și sosire cu fața; II, plecare cu spatele și sosire cu spatele (întoarcere la punctul de plecare); III, plecare cu fața și sosire cu fața; IV, plecare cu spatele și sosire cu fața.

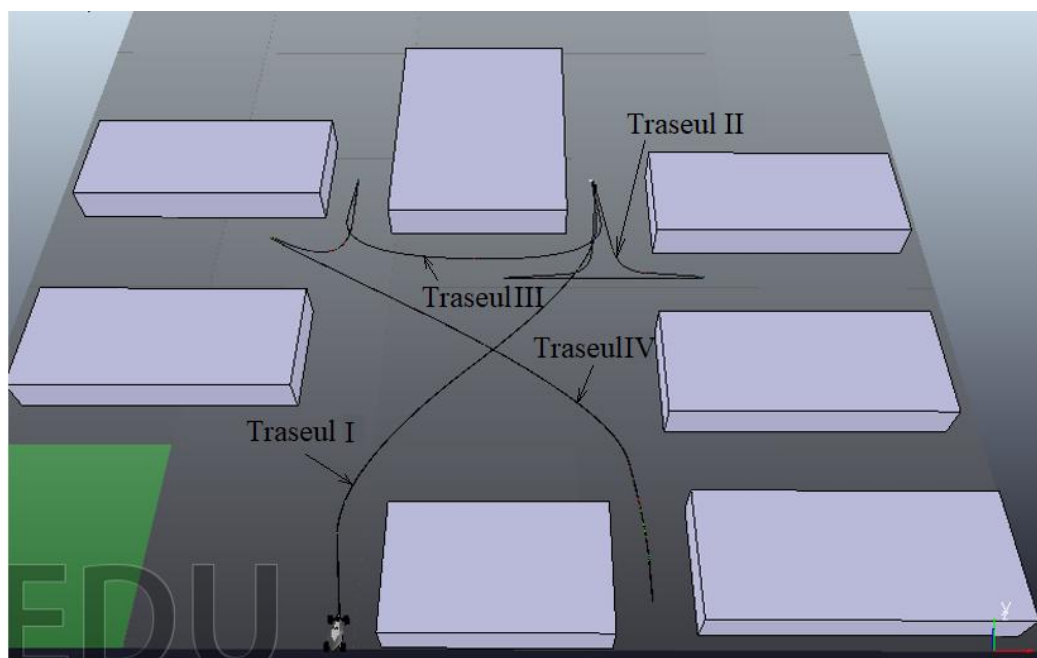


Fig. 5.6 Traseul virtual complex asociat traseului complex descris în subcap. 4.2.1

5.4 Modelarea și testarea navigării pe subtraietorii virtuale

5.4.1 Modelarea subtraietoriilor virtuale

Pentru conducerea autovehiculului virtual autonom în vederea urmăririi cât mai fidel a traiectoriilor planificate se realizează prin intermediul unei aplicații externe al cărei algoritm poate fi programat în limbajul MATLAB sau C/C ++ [Spica, 2014].

Pentru planificarea și urmărirea traiectoriilor virtuale, în cadrul acestei lucrări, a fost dezvoltată o aplicație (subprogram) software în limbajul MATLAB care permite transmiterea de date către mediul virtual dezvoltat în simulatorul V-REP. Această aplicație are la bază datele generate la planificarea subtraietoriilor componente ale traseului virtual de urmărit.

Parametrii de intrare pentru acest subprogram sunt identici cu cei generați la planificarea traseului: coordonatele punctelor semnificative, unghiurile de orientare în punctele semnificative, lungimile subtraseelor componente (segmente de dreaptă, arce de clotoidă și de cerc), viteza liniară maximă a autovehiculului pe parcursul subtraseelor de tip segment de dreaptă și viteza unghiulară maximă de virare. Parametrii de control variază în timp în funcție de tipul subtraseului care este parcurs de autovehiculul virtual, conform legilor de mișcare prezentate în subcap. 4.4.2.

După realizarea conexiunii se stabilesc limitele parametrilor asociați autovehiculului virtual: unghiul maxim de virare (45°), viteza maximă de deplasare de-a lungul unui segment de dreaptă (0,5 m/s), viteza maximă de deplasare de-a lungul unui arc de cerc (0,25 m/s) și viteza unghiulară maximă de virare ($15^\circ/\text{s}$). Se stabilește starea inițială a autovehiculului virtual pentru care se setează viteza de propulsie și unghiul de virare nule înainte de plecare.

Pentru fiecare tip de subtraietorie a fost creată o funcție în Matlab care utilizează ca parametrii de intrare timpul necesar de parcurgere a acesteia. În cadrul funcțiilor dezvoltate, care au ca parametru de intrare perioada de timp necesară parcurgerii subtraietoriei, se creează o structură ciclică și la fiecare pas de execuție se transmit vitezele de propulsie și de

virare pentru controlul autovehiculului virtual, prin intermediul clientului API. Perioada de timp necesară parcurgerii subtraectoriei, care reprezintă parametrul de intrare al funcției de comandă, se calculează ținând cont de lungimea subtraseului parcurs, viteza corespunzătoare tipului subtraseului și valoarea accelerării sau decelerării în situațiile specifice prezentate în subcap. 4.4.2.

Pentru deplasarea de-a lungul unui segment de dreaptă s-a creat funcția *Deplasare_seg*, care are ca parametru inițial timpul necesar, t_{seg_p} , parcurgerii acestuia cu viteza v_{seg} . Funcția, *Deplasare_clot_jn*, pentru deplasarea de-a lungul unui arc de clotoidă de intrare în viraj, cu parametrul inițial timpul necesar parcurgerii acesteia, t_{clot_in1} . În cadrul acestei funcții unghiul de virare crește până la valoarea maximă și viteza de propulsie scade până la valoarea stabilită de planificare (0,25 m/s) pentru deplasarea pe arcul de cerc. Pentru deplasarea de-a lungul unui arc de clotoidă de ieșire din viraj s-a creat funcția *Deplasare_clot_ie* care este asemănătoare cu funcția, *Deplasare_clot_in*, cu deosebirea că unghiul de virare scade până la valoarea nulă și viteza de propulsie crește până la valoarea corespunzătoare parcurgerii segmentului de dreaptă. Funcția, *Deplasare_cerc*, care are ca parametru inițial timpul necesar parcurgerii arcului de cerc, t_{cerc} . În cadrul acestei funcții unghiul de virare și viteza de propulsie rămân constante conform valorilor planificate.

5.5 Modelarea și testarea navigării pe traiectorii complexe virtuale

Simularea deplasării autovehiculului virtual pe traiectorii complexe se realizează prin schimbul de date și comenzi între aplicațiile dezvoltate în V-REP și cele dezvoltate în Matlab prin intermediul clientului API. Aplicația dezvoltată în Matlab transmite comenzi către simulatorul V-REP pentru a genera deplasarea autovehiculului virtual prin precizarea unghiului de virare și a vitezei de propulsie la fiecare pas al simulării.

Pentru a vizualiza traiectoriile virtuale complexe, în simulatorul V-REP se va utiliza un obiect de tip *graph* cu ajutorul căruia este înregistrată poziția autovehiculului față de sistemul de axe al scenei virtuale pe tot parcursul simulării [Gîrbacia, 2018].

După finalizarea simulării, datele înregistrate în mediul virtual sunt exportate sub forma unui fișier de tip .csv. Pentru a se vizualiza în mediul virtual diferența dintre traseul impus și traiectoria autovehiculului virtual, datele înregistrate de obiectul *graph* sunt salvate de simulatorului V-REP sub forma unui obiect de tip *path*. Pentru a se observa cu ușurință diferențele dintre traiectoria virtuală obținută și traseul virtual (marcat cu negru), aceasta va fi reprezentată cu galben (v. fig. 5.18).

Pentru evidențierea deplasării autovehiculului virtual, simulatorul V-REP generează grafice de urmărire a variabilelor de-a lungul parcurgerii fiecăruia din cele patru trasee virtuale, în care se prezintă variațiile în timp ale vitezelor de propulsie (marcate cu vernil) și de virare (marcate cu roz). Variația vitezelor la parcurgerea traseului virtual I este prezentată în fig. 5.14.

De-a lungul arcului de clotoidă de ieșire din viraj, viteza crește din nou la valoarea maximă în timp ce viteza de virare va avea aceeași valoare ca la intrare dar sensul va fi opus. După cel de-al doilea viraj, autovehiculul ajunge la primul punct intermediar și viteza de propulsie scade până la valoarea zero. Timpul de parcurgere al acestui traseu, cu lungimea de 15,6 m, este de 21,5 s. În fig. 5.18,a este trasată cu galben traiectoria realizată de autovehicul virtual pentru urmărirea traseului virtual I, unde se evidențiază deviații ale traiectoriei obținute (marcată cu galben) care sunt lizibile, în special, de-a lungul celui de-al doilea viraj.

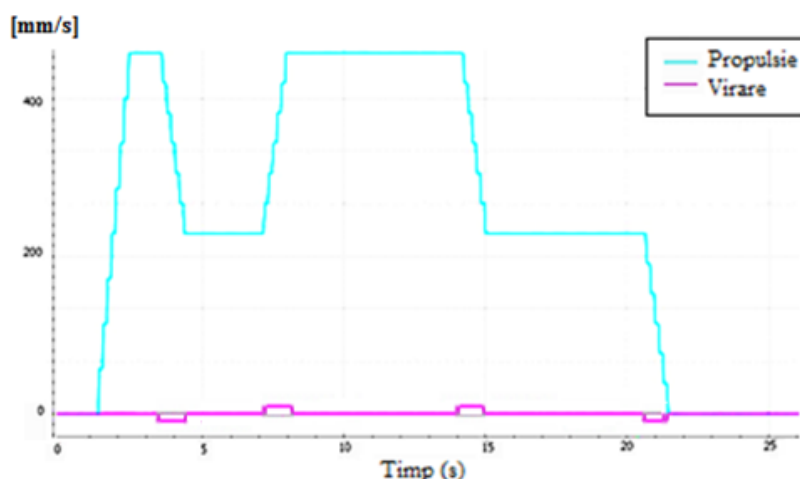


Fig. 5.14 Vitezele de propulsie și de virare la parcurgerea traseului virtual I

Traseul II presupune întoarcerea la punct fix pentru a schimba orientarea autovehiculului. Pentru aceasta, pleacă de-a lungul unui segment de dreaptă cu spatele (fig. 5.15), viteza maximă de deplasare cu spatele (0,4 m/s), având valoarea absolută mai mică decât viteza maximă de deplasare cu fața. Timpul necesar parcurgerii acestui traseu, cu lungimea de 16,8 m, este de 31 s. Traectoria efectuată de autovehiculul virtual pentru parcurgerea traseului virtual II este marcată cu galben în fig. 5.18,b. Și în acest caz se evidențiază deviații de la traseul virtual, mai ales, în perioadele de virare.

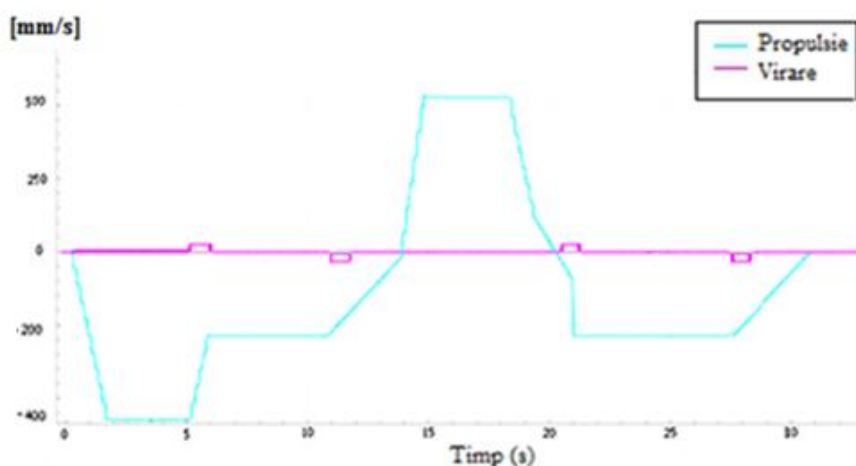


Fig. 5.15 Vitezele de propulsie și de virare la parcurgerea traseului virtual II

Variațiile vitezelor rezultate la parcurgerea traseului virtual III (fig. 5.16) sunt similare celor din traseu I. Timpul necesar parcurgerii traseului cu lungimea de 12.1 m, este de 17 s.

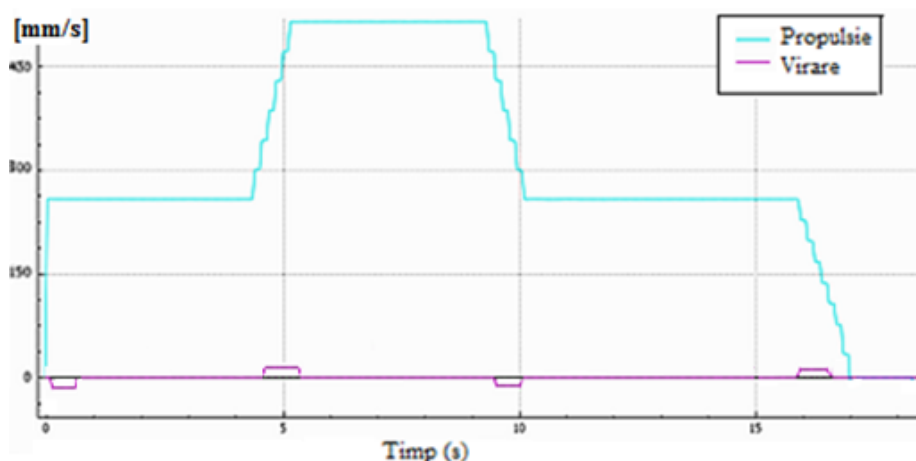


Fig. 5.16 Vitezele de propulsie și de virare la parcurgerea traseului virtual III

În fig. 5.18,c se observa traiectoria efectuată de autovehiculul virtual în timpul parcurgerii traseului III. Și în acest caz traiectoria autovehiculului virtual înregistrează deviații față de traseul virtual, mai ales, în timpul efectuării celui de-al doilea viraj.

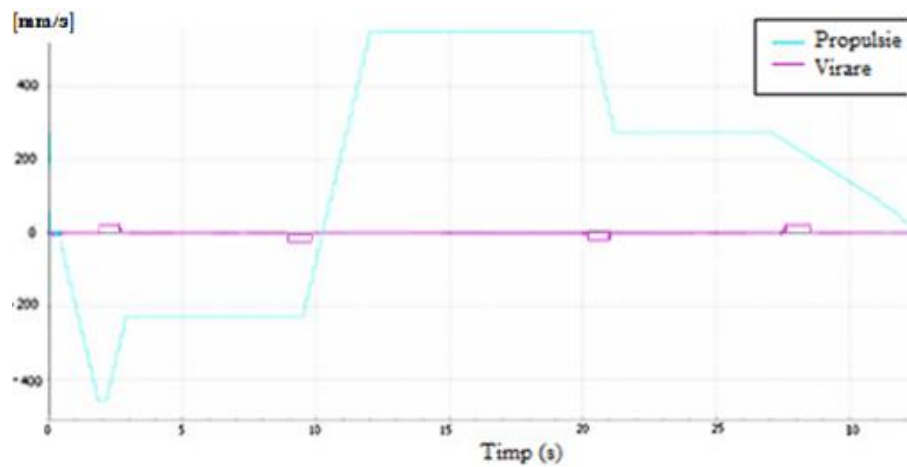


Fig. 5.17 Vitezele de propulsie și de virare când autovehiculul urmărește traseul virtual IV

Parcursarea traseului IV presupune schimbarea direcției de deplasare a autovehiculului de-a lungul primului viraj. Acesta pornește de-a lungul unui segment de dreaptă cu spatele și după ce realizează primul viraj spre stânga se oprește (fig. 5.17).

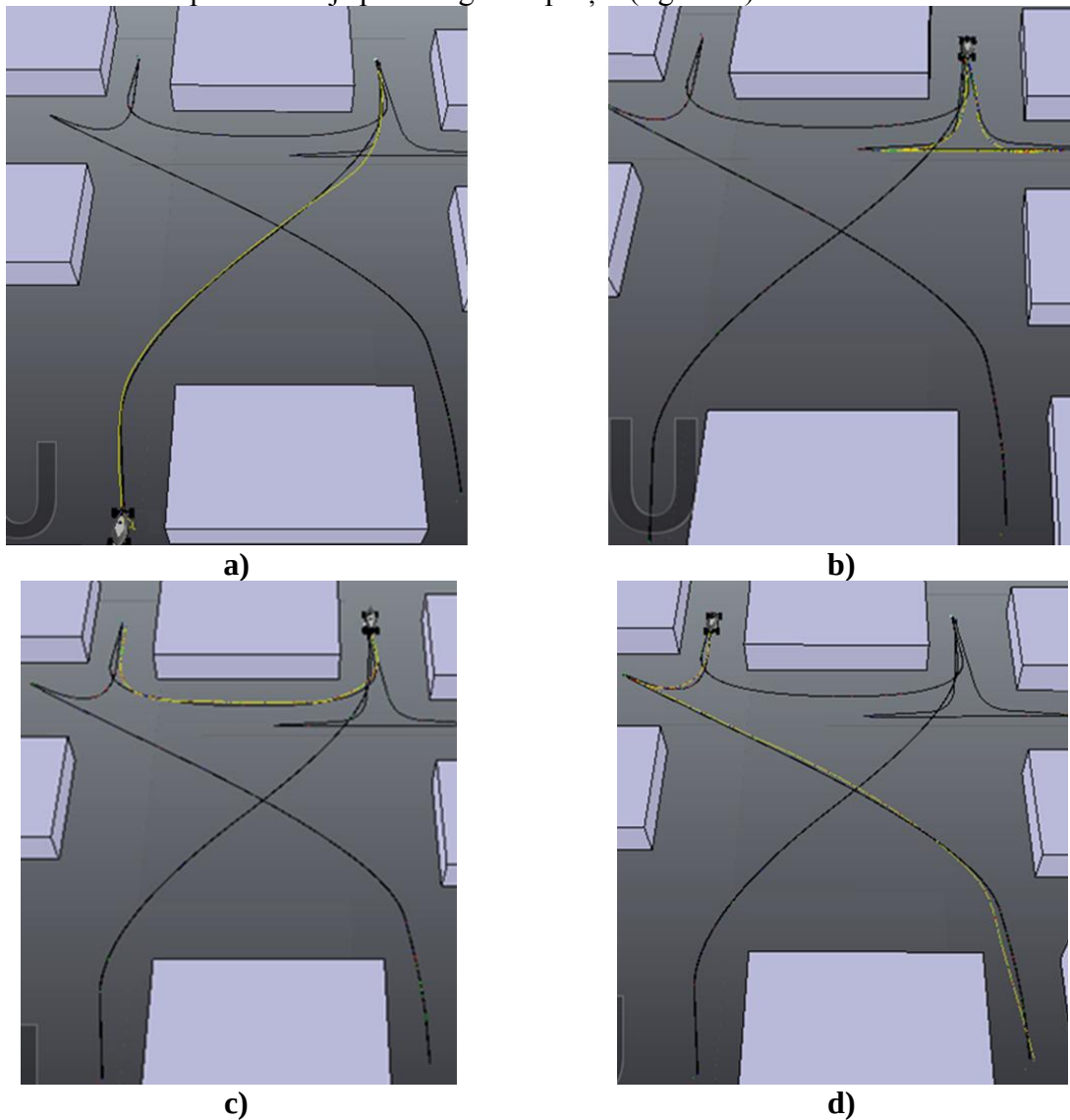


Fig. 5.18 Traiectoriile virtuale rezultate la parcurgerea traseelor virtuale: **a** - I, **b** - II, **c** - III, **d** - IV

Autovehiculul virtual repornește deplasându-se cu fața de-a lungul unui segment de dreaptă la capătul căruia efectuează cel de-al doilea viraj spre dreapta și parcurge un segment de dreaptă până la destinație. Timpul necesar parcurgerii traseului cu lungimea de 20,8 m este de 33 s. În fig. 5.18,d se vizualizează traiectoria virtuală rezultată (marcată cu galben), unde, de asemenea, se observă deviații ale acesteia față de traseul virtual, cu precădere, în zonele celor două viraje.

5.6 Prelucrarea și analiza datelor obținute în urma testelor

Ca urmare, a rulării programului în Matlab se transmit comenzile pentru deplasarea autovehiculului virtual pe traiectoriile virtuale. Din această cauză la parcurgerea acestor traiectorii se evidențiază, pe de-o parte, abateri față de la traseele reprezentate în mediul virtual, în special, la efectuarea virajelor și, pe de altă parte, abateri de atingere a țintei de poziționare a autovehiculului virtual față de punctul de sosire al traseului.

Principala cauză a producerii abaterilor traiectoriilor virtuale rezultate față de traseele virtuale este determinată de diferența dintre traseele planificate cu modele analitice și de cele modelate cu metode aproximative. Astfel, pe de-o parte, subtraseele virtuale arce de cerc și de clotoidă sunt modelate utilizând funcții Bezier polinomiale de gradul doi (v. subcap. 5.4.1) și, pe de altă parte, traiectoriile virtuale, programate în Matlab, au la bază modelele de planificare a subtraiectoriilor arce de cerc și de clotoidă, prezentate în subcap 4.4.2.

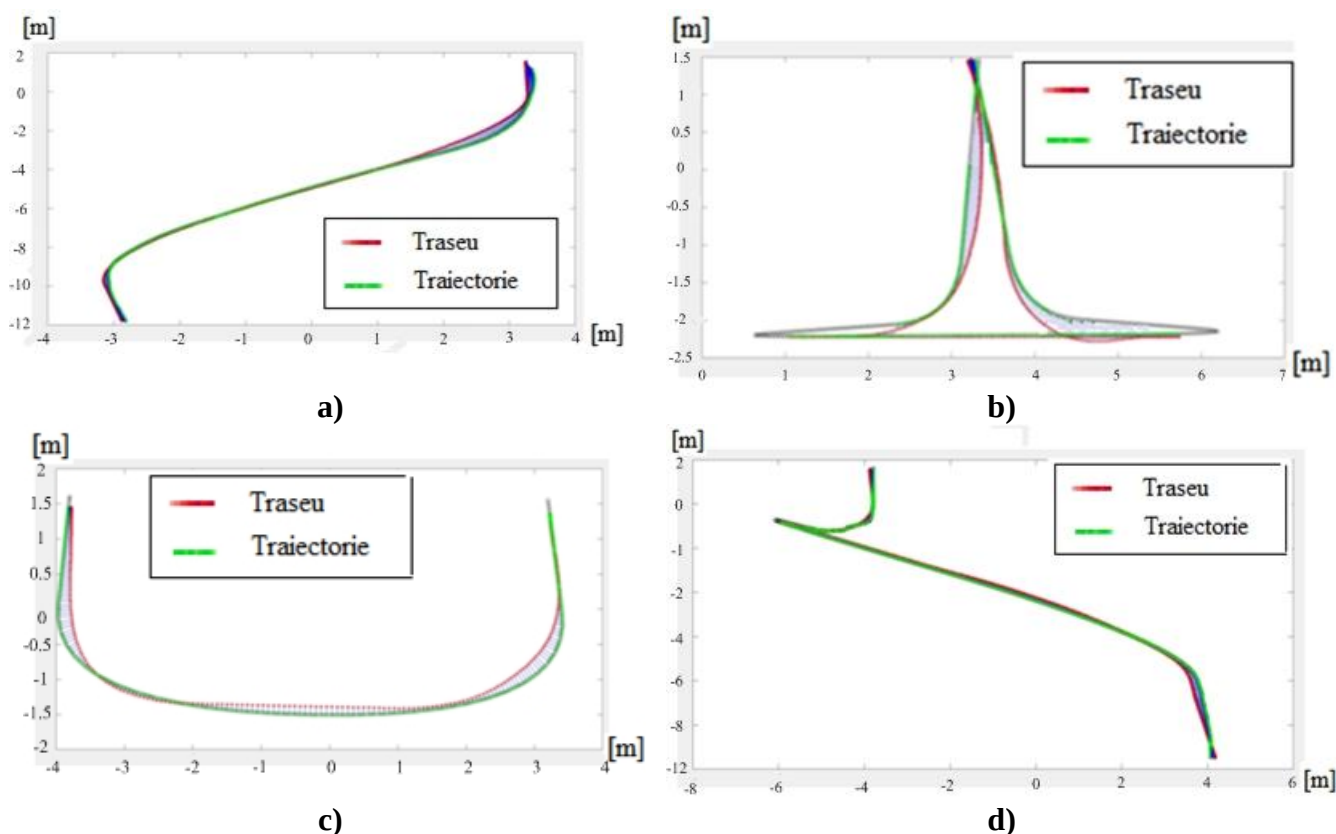


Fig. 5.21 Diferențele dintre traiectoriile și traseele virtuale: **a** - I, **b** - II, **c** - III, **d** - IV

Pentru a analiza diferențelor dintre traseele virtuale impuse și rezultatul obținut, traiectoriile virtuale, s-au calculat și analizat erorile (abaterile) acestora. Pentru realizarea analizelor s-au salvat, pe de-o parte, datele specifice traseelor virtuale (modelate cu aproximații), ca elemente ale scenei virtuale, și, pe de altă parte, datele obținute în urma navigării autovehiculului virtual, sub formă de fișiere de tip .csv. Pentru calcularea erorilor (abaterilor), a fost dezvoltată o subrutină în limbajul de programare Matlab, care importă

informațiile din fișierele de tip .csv în care sunt stocate traseele virtuale modelate, având la bază traseele planificate anterior, și traiectoriile virtuale efectuate de autovehicul.

Pentru preluarea datelor pentru calculul abaterilor s-a setat pasul de simulare, la un interval de timp, 0,05 s. Coordonate înregistrate la fiecare pas de execuție, stau la baza calculării distanțelor dintre punctele traiectoriilor și traseelor virtuale (abaterea de urmărire).

În fig. 5.21 se prezintă traseele (marcate cu roz) și traiectoriile (marcate cu verde) pentru cele patru trasee simulate. În aceste figuri se observă că abaterile de urmărire a traseului cresc când autovehiculul realizează viraje, iar abaterile cele mai mari sunt înregistrate când autovehiculul efectuează viraje deplasându-se cu spatele.

Pentru traseul I abaterile cresc până la valoarea 0,1656 m în momentul parcurgerii celui de-al doilea viraj ceea ce determină apariția unei erori de poziționare la sosire în valoare de 0,1643 m (fig. 5.22,a). În cazul traseului II abaterile cresc până la valoarea de 0,2253 m la parcurgerea primului viraj și la valoarea de 0,2218 m la parcurgerea celui de-al doilea, deoarece autovehiculul se deplasează cu spatele, ceea ce conduce la apariția erorii de poziționare la sosire de 0,0712 m (fig. 5.22,b). Pentru traseul III abaterea crește în perioadele în care autovehiculul parcurge virajele, înregistrându-se valoarea erorii de 0,1889 m pentru primul viraj și 0,1948 m pentru cel de-al doilea. Acest fapt conduce la o eroare de poziționare la punctul sosire în valoare de 0,0438 m (fig. 5.22,c).

La parcurgerea ultimului traseu (IV), abaterile cresc semnificativ în momentul parcurgerii primului viraj până la valoarea 0,1196 m, deoarece autovehiculul se deplasează cu spatele, iar abaterea cumulată la parcurgerea celui de-al doilea viraj, ajunge la valoarea 0,216 m. Din această cauză se înregistrează la sosire o abatere de poziționare la sosire în valoare de 0,0845 m (fig. 5.22,d).

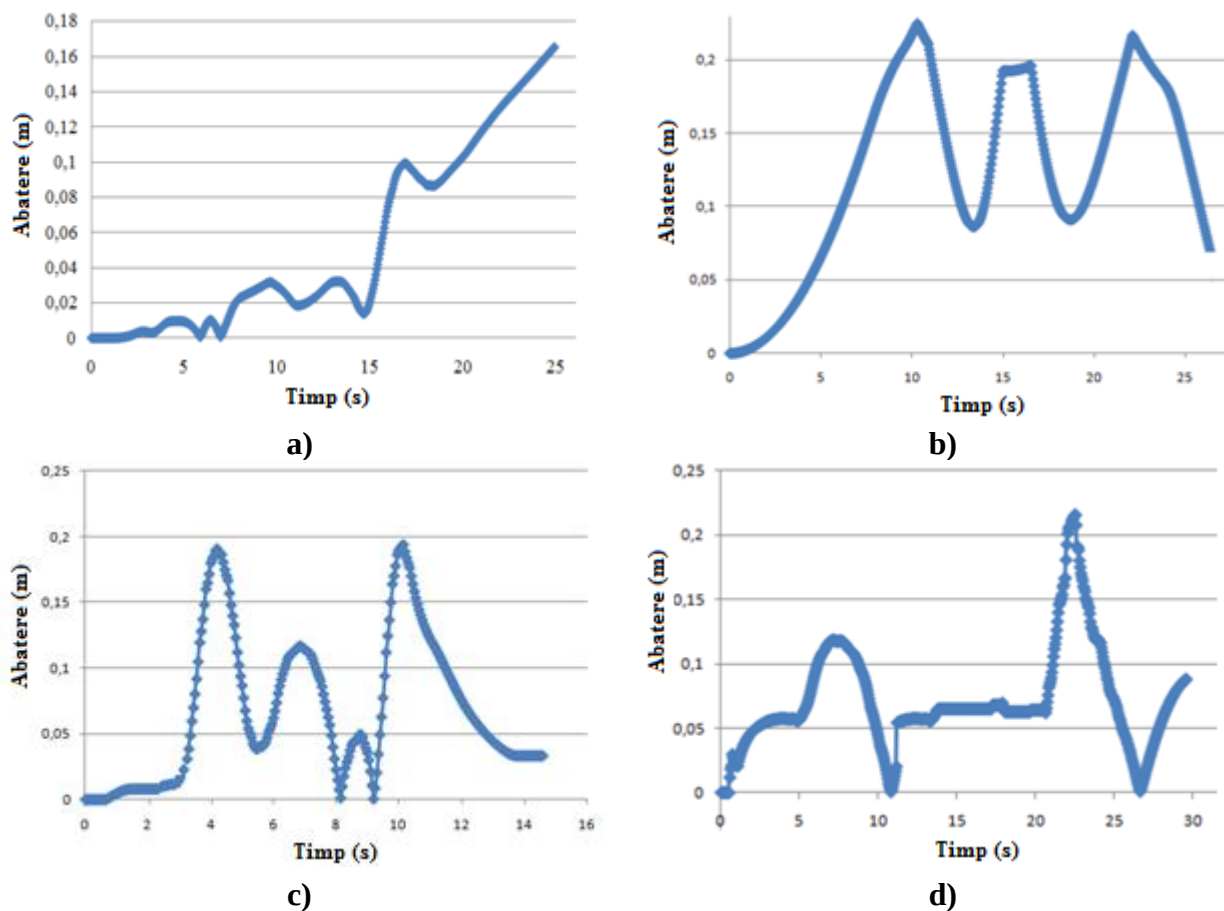


Fig. 5.22 Variațiile valorilor abaterilor traiectorii-trasee virtuale: **a** - I, **b** - II, **c** - III, **d** - IV

În tabelul 5.2 sunt prezentate valorile abaterilor maxime, minime, medii, exprimate în metri, pentru fiecare din cele patru trasee. Eroarea medie reprezintă media erorilor înregistrate la parcurgerea fiecărui traseu. Cea mai mare valoare a abaterii maxime, 0,2253 m, se înregistrează când autovehiculul parcurge cel de-al doilea viraj al traseului II. Acest traseu presupune efectuarea celor două viraje prin deplasarea cu spatele a autovehiculului virtual.

Valoarea maximă a erorilor medii se obține pentru parcurgerea traseului II. Cele mai mici valori ale erorilor de urmărire se înregistrează pentru parcurgerea traseului I.

Tab. 5.2 Abaterile maxime, minime, medii de urmărire a celor patru trasee

	Abatere maximă [m]	Abatere minimă [m]	Abatere medie [m]
Traseul I	0,1656	0	0,0522
Traseul II	0,2253	0	0,1206
Traseul III	0,1948	0	0,0753
Traseul IV	0,216	0	0,1084

Pentru compararea cu acuratețe mărită a abaterilor traiectorii-trasee virtuale s-a realizat prelucrarea statistică a datelor folosind Microsoft-Excel. În fig. 5.24 se evidențiază grafic distribuțiile *box plot* ale abaterilor traiectorii-trasee virtuale I, II, III și IV. Pentru reprezentarea acestui tip de distribuții, datele obținute în urma simulărilor, după ce au fost sortate crescător au fost sintetizate în patru grupuri (Q1, Q2, Q3, Q4), fiecare cuprinzând 25% din volumul datelor, numite grupuri cvartale (fig. 5.24).

Din analiza reprezentărilor abaterilor traiectorii-trasee se evidențiază că după parcurgerea traseului I, 25% din abateri sunt mai mici de 0,0092 m, 50% din abateri mai mici de 0,0276 m, 75% din abateri mai mici de 0,0959 m și 25% din abateri sunt cuprinse între 0,0959 m și 0,1656 m, care reprezintă valoarea maximă înregistrată pentru acest traseu. Pentru parcurgerea traseului II, 25% din abateri sunt mai mici de 0,0763 m, 50% din abateri mai mici de 0,123 m, 75% din abateri mai mici de 0,1837 m și 25% din abateri sunt cuprinse între 0,1837 m și 0,2253 m, care reprezintă valoarea maximă înregistrată pentru acest traseu. Pentru parcurgerea traseului III, 25% din abateri sunt mai mici de 0,0176 m, 50% din abateri mai mici de 0,0431 m, 75% din abateri sunt mai mici de 0,1618 m și 25% din abateri sunt cuprinse între 0,1618 m și 0,1948 m care reprezintă valoarea maximă înregistrată pentru acest traseu. În final, după parcurgerea traseului IV, 25% din abateri sunt mai mici de 0,0634 m, 50% din abateri mai mici de 0,1201 m, 75% din abateri sunt mai mici de 0,1473 m și 25% din abateri sunt cuprinse între 0,1473 m și 0,216 m, care reprezintă valoarea maximă înregistrată pentru acest traseu.

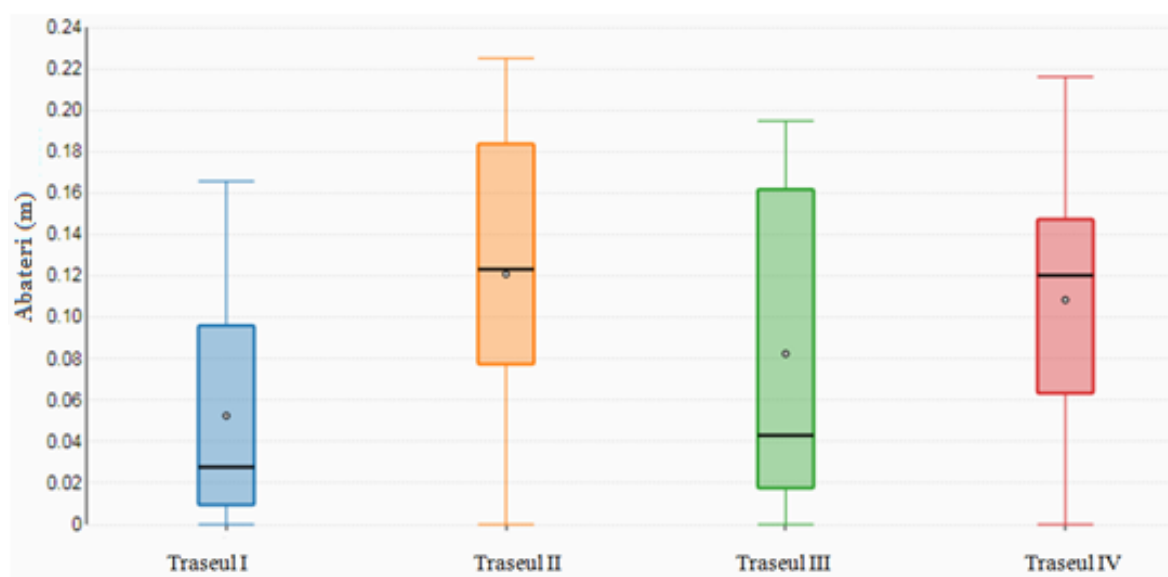


Fig. 5.24 Compararea abaterilor traiectorii-trasee virtuale

5.7 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate etapele dezvoltării mediului industrial virtual, modelării traseelor virtuale, simulării deplasării autovehiculului virtual conform datelor traiectoriilor planificate și analiza rezultatelor obținute.

În urma analizei avantajelor și dezavantajelor bibliotecilor software actuale prin intermediul cărora se poate simula navigarea unui autovehicul autonom în medii virtuale, a fost ales simulatorul V-REP. Acesta poate fi personalizat și adaptat astfel încât să permită adăugarea de funcții specifice pentru urmărirea traseelor virtuale de un autovehicul autonom virtual. Mediul de transport intern virtual constă într-o suprafață plană pătrată în care sunt poziționate obstacole fixe, punctele de plecare și de sosire pentru traseele virtuale și un autovehicul virtual cu sistem de virare de tip Ackermann.

Modelarea traseelor virtuale s-a realizat prin aproximarea cu funcții Bezier a arcelor de cerc și de clotoidă pentru obținerea datelor de reprezentare în mediul virtual.

Traietoriile virtuale s-au realizat prin dezvoltarea unei aplicații software în limbajul de programare Matlab care are scopul de a transmite parametrii de control pentru deplasarea autovehiculului virtual care urmărește traseelor virtuale. Pentru comunicarea informațiilor dintre aplicația dezvoltată pentru controlul modului de deplasare al autovehiculului virtual și scena simulatorului V-REP s-a utilizat un client API.

În cadrul simulatorului V-REP se poate vizualiza diferența dintre traseul virtual și traiectoria virtuală parcursă de autovehicul, prin importarea datelor salvate în timpul deplasării autovehiculului virtual. În cadrul simulatorului virtual se creează grafice pentru vizualizarea variațiilor vitezelor de propulsie și de virare ale autovehiculului în timpul navigării.

Pentru vizualizarea diferențelor dintre traseele virtuale și modul în care autovehiculul le urmărește, s-a dezvoltat o subrutină în mediul de programare Matlab care evidențiază abaterile de urmărire a traseelor modelate.

Principala cauză a producerii abaterilor traiectoriilor virtuale rezultate față de traseele virtuale este determinată de diferența dintre traseele planificate cu modele analitice și de cele modelate în mediul virtual unde subtraseele arce de cerc și de clotoidă sunt approximate, utilizând funcții Bezier polinomiale de gradul doi. Traietoriile planificate pentru deplasarea autovehiculului virtual, programate în Matlab au la bază modelele cinematice de planificare a subtraietoriilor.

Din analiza abaterilor de urmărire a traseelor planificate se poate observa că autovehiculul virtual deviază de la traseele impuse, în special, în momentul efectuării virajelor, iar valoarea abaterii atinge valori maxime când acesta efectuează viraje la deplasarea cu spatele. Valoarea maximă a abaterilor, de 0,2253 m, se obține pentru parcurgerea celui de-al doilea traseu deoarece ambele viraje sunt efectuate la deplasare cu spatele. Cele mai mici valori ale abaterilor traiectorie-traseu se înregistrează pentru parcurgerea primului traseu pentru care ambele viraje sunt parcurse la deplasare cu față, abaterea maximă fiind de 0,1656 m.

6. MINIAUTOVEHICUL AUTONOM PENTRU STUDII EXPERIMENTALE

Deoarece testarea și verificarea modelelor și algoritmilor propuși, pe traiectorii și cu autovehicule reale (scara 1:1) ar fi fost anevoioase dar și costisitoare, s-a optat ca acestea să se efectueze folosind un miniautovehicul autonom la scara 1:10 față de unul real. Miniautovehiculul a fost programat să navigheze pe traiectorii, de asemenea, reduse cu aceeași scară. Principalul avantaj al acestei soluții rezidă din faptul că dezvoltarea miniautovehiculului autonom presupune costuri mult mai mici prin modificarea unei structuri existente decât în cazul folosirii unui autovehicul la scara 1:1. Rezultatele experimentelor de navigare cu miniautovehiculul autonom pe traiectorii corespunzătoare (redușe la aceeași scară) pot fi folosite pentru evaluarea prin similitudine a caracteristicilor navigării pe traiectorii planificate anterior.

6.1 Structura hardware a miniautovehiculului autonom

Miniautovehiculul autonom dezvoltat are la bază platforma Traxxas Rustler VXL care reprezintă un model auto de entertainment (scara 1:10 în raport cu media autoturismelor reale) ghidat radio, capabil să se deplaseze cu viteze mari, cu acționare electrică. Componentele principale ale platformei Traxxas Rustler VXL auto sunt: șasiu monococă din material compozit, transmisie cu diferențial planetar, suspensii MacPherson, motoare de curent continuu fără perii pentru propulsie și direcție, controler ESC (Electronic Speed Controller) pentru acționarea prin comandă radio, receptor radio pentru preluarea comenzilor transmise printr-un joystick, acumulator LiPo de 12 V etc.

În vederea dezvoltării miniautovehiculului autonom pentru studiile experimentale din cadrul acestei lucrări, s-au conceput, dezvoltat și realizat următoarele modificări și completări (fig. 6.2):

- eliminarea receptorului radio și joystick-ului de conducere;
- schimbarea motoarelor de curent continuu originale cu servomotoare care pot fi controlate;
- schimbarea roților cu unele care pot asigura condiții de rulare mai apropiate de cele care apar la transportul intern din mediile industriale;
- adăugarea unui microcontroler Arduino Mega 2560 prin intermediul căruia sunt controlate mișcările de propulsie și de virare;
- adăugarea unui modul dual driver L298N pentru controlul acționării motoarelor, bazat pe semnale PWM (Puls Width Modulation);
- adăugarea unui cititor de carduri SD cu un card SD pentru citirea/scrierea și stocarea datelor.

Deoarece miniautovehiculul de tip Traxxas Rustler VXL era dotat cu un motor de propulsie construit pentru atingerea de viteze mult mărite la variații bruște ale curentului de alimentare (aproximativ 112 km/h), acestea au fost înlocuite cu un servomotor electric fără perii care permite mișcări de deplasare cu viteze mai mici (maxim 40 km/h) și poate fi controlat și comandat electronic. În acest fel controlul motoarelor de propulsie și de virare nu mai este realizat prin intermediul unui semnal radio transmis de operator prin manevrarea unei joystick, ci printr-un semnal PWM transmis de microcontroler.

Microcontrolerul Arduino Mega 2560 este alimentat prin portul USB de la acumulatorul LiPo de 12 V cu care este dotată platforma auto Traxxas Rustler VXL, utilizând un regulator de tensiune de 5 V, LM 7805, cu un radiator de răcire.

Modulul dual driver L298N, alimentat de la acumulatorul LiPo de 12 V, asigură alimentarea și comanda motorului de propulsie la o tensiune cuprinsă între 5 și 35V.

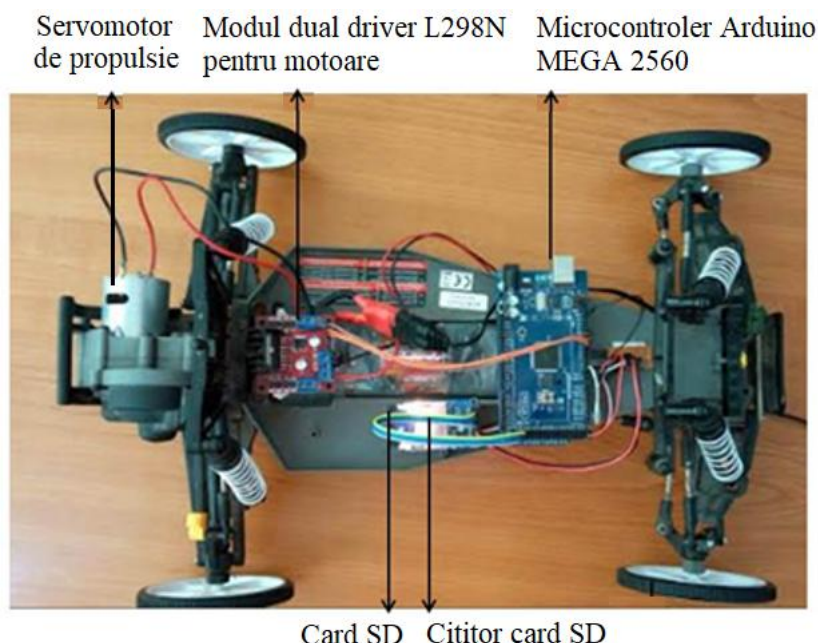


Fig. 6.2 Structura hardware a miniautovehiculului dezvoltat

Servomotorul folosit pentru virarea miniautovehiculului este alimentat la acumulator prin intermediul regulatorului de tensiune LM7805. Menținerea tensiunii de alimentare la un nivel constant este foarte importantă pentru controlul unghiului de virare la frecvență de 12 kHz; în momentul în care tensiunea de alimentare scade sub pragul minim, se vor produce abateri de la traiectoria programată.

Deoarece, memoria internă de 8 KB a microcontrolerului Arduino Mega 2560 nu poate fi folosită pentru stocarea fișierului de tip text în care sunt salvate caracteristicile traiectoriei de deplasare s-a introdus un cititor de carduri SD conectat la microcontroler.

Pe cardul SD se vor stoca comenzile de efectuare a traiectoriei pentru ca miniautovehiculul să poată urmări o traiectorie predefinită. Seturile de comenzi citite de către microcontroler, sunt procesate și transformate în seturi de semnale PWM care stau la baza alimentării motoarelor miniautovehiculului.

6.2 Programe de control și comandă a miniautovehiculului autonom

Pentru a comanda și controla motoarele miniautovehiculului, prin intermediul microcontrolerului Arduino, compatibil cu numeroase componente hardware externe, se impune concepția de algoritmi și subprograme, dezvoltate în medii de programare diverse (IDE Arduino, MicroC etc.), care pot fi încărcate și executate pentru a oferi utilizatorului posibilitatea de a realiza teste și experimente de deplasare pe traiectorii impuse.

6.2.1 Programul general de comandă și control a microcontrolerului Arduino

Microcontrolerele Arduino sunt programate prin utilizarea unei interfețe de tip IDE (Integrated Development Environment) bazată pe limbajul de programare Processing care oferă posibilitatea dezvoltării de funcții specifice, în limbajul de programare C++, ce pot fi apelate pentru a controla deplasările miniautovehiculului pe traiectorii. În programul dezvoltat pentru comanda și controlul motoarelor miniautovehiculului autonom s-au definit și generat

funcții specifice pentru deplasarea miniautovehiculului de-a lungul diverselor traiectorii programate [Giurgiu, 2016].

6.2.2 Algoritmul și programul de control și comandă a servomotoarelor

Algoritmul de control și comandă a servomotoarelor conține cele șase etape evidențiate în fig. 6.6. Înainte de a stabili variabilele globale, trebuie incluse în program bibliotecile cu funcțiile necesare pentru execuția operațiilor care trebuie să le efectueze microcontrolerul. Pentru controlul miniautovehiculului sunt folosite trei biblioteci: Servo.h, SPI.h și SD.h (fig. 6.5).

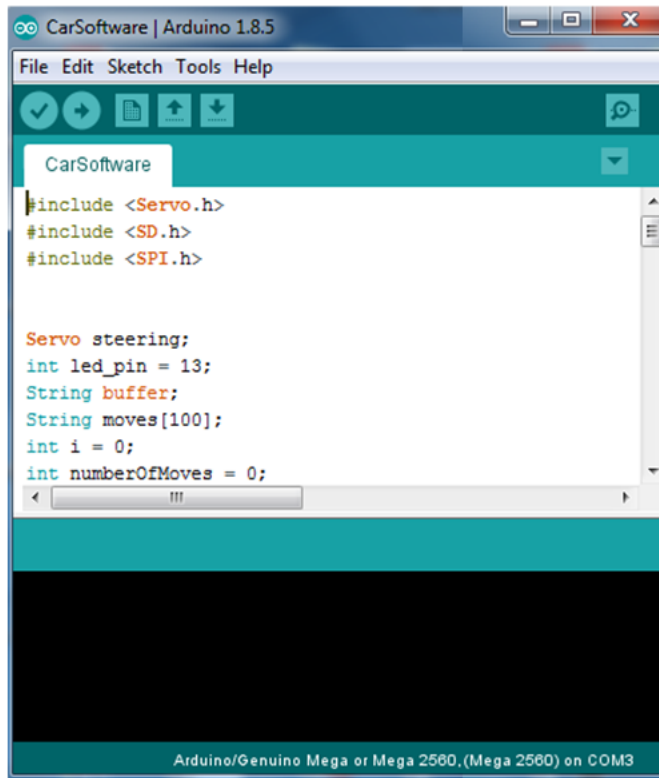


Fig. 6.5 Interfața programului IDE Arduino

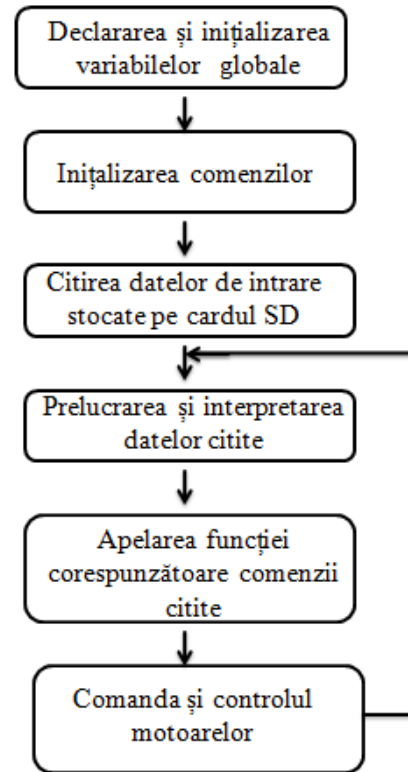


Fig.6.6 Schemă logică a algoritmului pentru controlul deplasării pe traiectorie

În prima etapă a programului dezvoltat s-au declarat și inițializat variabilelor globale: Minimum_angle, Maximum_angle, Max_speed Timepart, Calibrated_angle, care sunt numerice și de tip string. Parametrul Timepart reprezintă timpul de execuție a unei comenzi transmise motoarelor și îi este atribuită valoarea inițială de 100 milisecunde. Acesta este folosit pentru setarea timpului necesar de parcurgere a fiecărei subtraiectorii componente a traiectoriei planificate. Parametrul Calibrated_angle reprezintă unghiul de virare pe care vehiculul trebuie să îl aibă la pornire, căruia îi este atribuit nivelul semnalului PWM pentru un unghi de virare nul, 1450 μ s (v subcap. 6.4). Valorile semnalelor PWM pentru care unghiul de virare este de 30°, pentru virare la stânga, minimă (1100 μ s), și pentru virare la dreapta, maximă (1835 μ s), se atribuie parametrilor Minimum_angle, respectiv, Maximum_angle. Variabila de tip string este folosită pentru stocarea unui șir de caractere utilizat pentru citirea comenzilor de deplasare din fișierului stocat în cardul SD.

Inițializarea stării miniautovehiculului se realizează la începutul funcției de configurare a programului și cuprinde: inițierea comunicării seriale, inițializarea servomotorului căruia îi este atribuit pinul 2 al microcontrolerului, inițializarea motorului de propulsie, setarea valorii nule a unghiului de virare la pornire.

Deoarece traiectoria pe care trebuie să o parcurgă miniautovehiculul este compusă din subtraectorii (segment de dreaptă, arc de clotoidă și de cerc), controlul modului de deplasare al miniautovehiculului va depinde de caracteristicile acestora. Pentru fiecare tip de subtraectorie sunt stabiliți parametrii de deplasare: timpul necesar parcurgerii acesteia, viteza de deplasare și unghiul de virare. De exemplu, pentru ca miniautovehiculul să parcurgă o subtraectorie de tip segment de dreaptă cu lungimea de 3,5 metri, parametrii de deplasare sunt: un semnal PWM cu valoarea de 255 μ s pentru controlul motorului de propulsie care asigură deplasarea miniautovehiculului cu viteza de 0,5 m/s și un semnal PWM cu valoarea 1450 μ s pentru controlul motorului de virare care asigură deplasarea cu unghiul de virare nul, iar timpul de parcurgere este de 7 s.

Comenzile de deplasare cu parametrii traiectoriei pe care miniautovehiculul trebuie să o parcurgă sunt salvați în fișierul text numit "PATHDATA.txt" care este stocat pe cardul SD. Comenzile de deplasare sunt citite din fișierul text și sunt salvate în variabila de tip string ca un șir de caractere. Pentru a semnaliza eventualele erori ce pot să apară în timpul inițializării cardului sau a citirii acestuia, un LED roșu situat pe microcontrolerul Arduino luminează intermitent până când erorile apărute sunt soluționate. Parametrul buffer memorează caracterele salvate în fișierul text până la apariția caracterului "/" care este folosit pentru delimitarea comenzilor.

Numele comenzilor (funcțiilor), stocate în fișierul text, sunt concepute legat de secvențele pe care le execută (accelerare, decelerare, virare etc.) pentru deplasarea pe traiectoriei: accF, accB, decF, decB, slowF, slowB, contB, contF, turnL10F, turnL10B, turnR10F, turnR10B, turnL15F, turnR15F, turnL15B, turnR15B, turnL30F, turnR30F, turnL30B, turnR30B. Fiecărei comenzi îi este asociată o funcție creată pentru a descrie deplasarea miniautovehiculului de-a lungul fiecărui secvențe de executat. Pentru decodificarea fiecărei comenzi se ia în considerare faptul că ultimul caracter din numele comenzii precizează sensul de deplasare al miniautovehiculului, F reprezintă deplasare cu fața (forward) și B - deplasare cu spatele (backward). De asemenea, prima parte a comenzii reprezintă tipul de deplasare: *acc* - accelerare, *dec* - decelerare, *slow* - diminuarea vitezei de deplasare, *cont* - menținerea vitezei de deplasare stabilită la comanda anterioară, *turn* - realizarea unui viraj, iar următorul caracter indică direcția de executare a virajului, L - la stânga (left) și R - la dreapta (right). În cadrul comenzii de realizare a virajului se precizează și unghiul de virare. În urma decodificării comenzilor, este apelată o funcție modulară pentru comanda și controlul motoarelor de propulsie și de virare.

6.2.3 Funcțiile de control și comandă a servomotoarelor

Pentru decodificarea comenzilor a fost generată funcția ComandaDeplasare (String comanda, int & viteza, int & unghi), în care: comanda reprezintă șirul de caractere stocat în parametrul buffer, viteza - viteza de deplasare stabilită la comanda procesată anterior, unghi - unghiul de virare.

Pentru decodificarea primei comenzi, la pornirea miniautovehiculului, viteza acestuia și unghiul de virare sunt nule. În cadrul acestei funcții este verificat dacă șirul de caractere stocat în parametrul buffer corespunde uneia dintre denumirile comenzilor folosite pentru deplasarea miniautovehiculului. Dacă șirul de caractere este identic cu denumirea unei comenzi, se apelează funcția specifică creată pentru controlul motoarelor.

Comanda *accF*, apelează funcția *Accelerare_Inainte()* în cadrul căreia viteza miniautovehiculului crește progresiv de la valoarea nulă până ajunge la viteza maximă în intervalul de timp predefinit. La rândul ei, această funcție apelează funcția *Deplasare_Inainte()* creată pentru deplasarea cu fața, care are ca parametrii intervalul de timp în care se produce deplasarea și valoarea PWM pentru comanda motorului de propulsie. Această funcție returnează ultima valoare a vitezei de deplasare care este preluată la apelarea următoarei funcții de comandă, pentru a realiza deplasarea uniformă a miniautovehiculului.

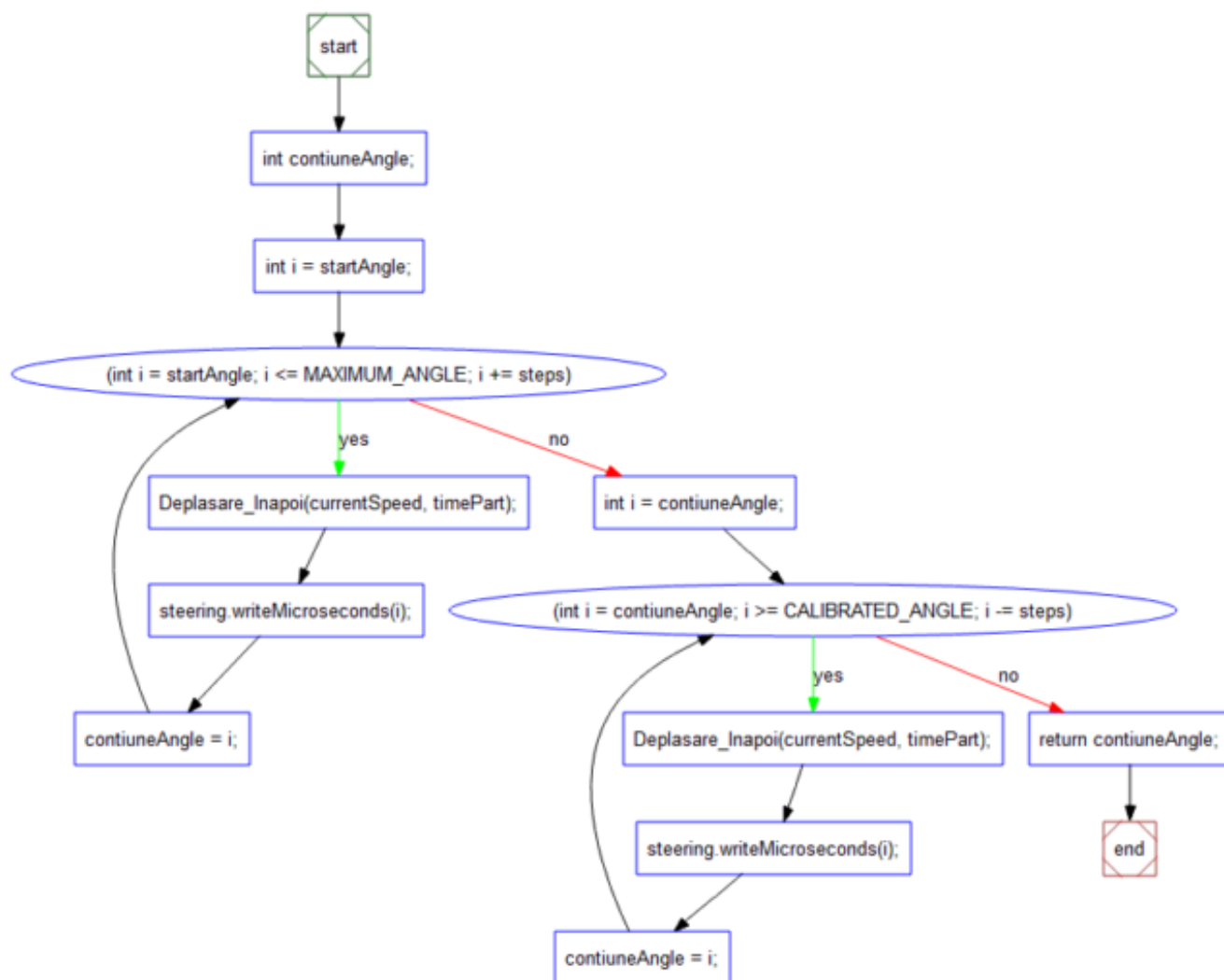


Fig.6.8 Funcția (comanda) de deplasare la ieșirea din virajele la dreapta parcurse cu spatele

Pentru deplasarea cu spatele a fost dezvoltată funcția *Deplasare_Inapoi()* asemănătoare cu cea prezentată anterior, singura diferență constând în inversarea nivelelor de tensiune transmise prin pinii 7 și 8 ai microcontrolerului către dispozitivul L298N.

Funcțiile (comenzile) de virare sunt mai complexe deoarece presupun comanda simultană a ambelor motoare. Deoarece microcontrolerul Atmega 2560 nu poate efectua două comenzi în același timp, soluția adoptată presupune apelarea alternativă a funcției de propulsie și a celei de virare după fiecare pas de execuție până la terminarea tuturor pașilor.

Funcțiile de virare cuprind trei faze corespunzătoare subtrajectoriilor componente ale virajului. În prima fază ambele motoare sunt acționate, iar unghiul de virare crește de la valoarea nulă (roți nebracate) la cea stabilită prin comanda citită de la cardul SD. În următoarea fază, unghiul de virare și viteza de deplasare rămân constante, miniautovehiculul parcurgând arcul de cerc. În ultima parte a funcției de comandă unghiul de virare scade până la valoarea nulă, parcurgând arcul de clotoidă de ieșire din viraj (fig. 6.8).

6.3. Calibrarea servomotoarelor

Pentru calibrarea servomotorului de virare au fost realizate teste care au presupus antrenarea acestui servomotor cu viteza constantă cu diverse unghiuri de virare spre stânga/dreapta și, apoi, măsurarea unghiurilor obținute. În fig. 6.9 se prezintă duratele semnalelor PWM dependente de unghiurile de virare. Astfel, se evidențiază dependența

liniară simetrică a duratelor semnalelor PWM de unghiurile de virare. Valoarea de referință a duratei PWM de 1450 μs corespunde unghiului de virare nul. Dacă semnalele PWM pentru comanda motorului de virare au duratele 1835 μs și 1100 μs , unghiurile de bracare au aceeași valoarea, 30°, pentru virarea spre dreapta, respectiv spre stânga

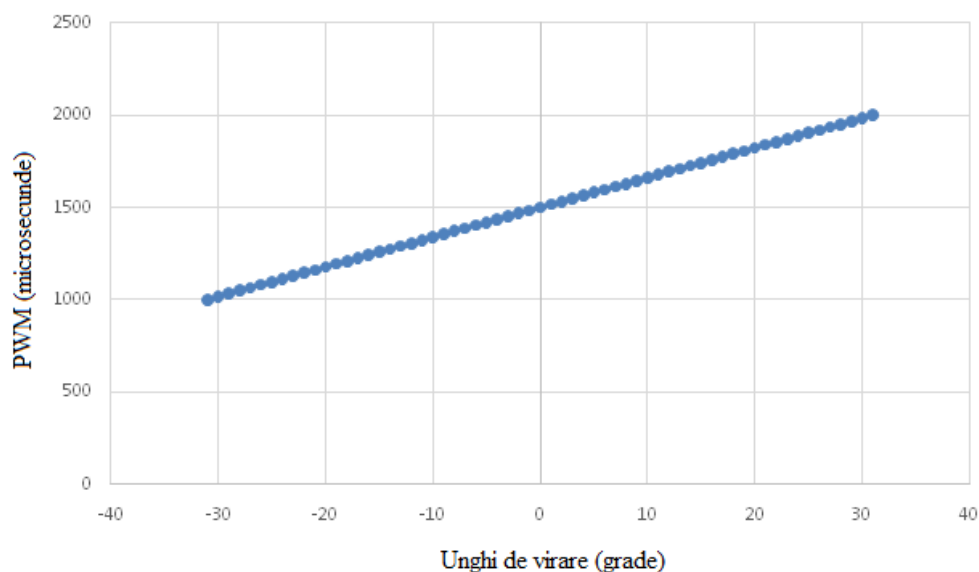


Fig.6.9 Caracteristica de calibrare a servomotorului de virare

Pentru calibrarea motorului de propulsie se realizează corelarea semnalului de comandă PWM reprezentat în microsecunde cu viteza de deplasare a miniautovehiculului. Controlerul emite un semnal de comandă pentru o perioadă de timp cunoscută, de 2 s, pe parcursul căruia miniautovehiculul accelerează, se deplasează cu viteza constantă și frânează. Pe parcursul calibrării motorului de propulsie, miniautovehiculului se deplasează de-a lungul unui segment de dreaptă, cu setarea semnalului de comandă a servomotorului de virare la cea de referință (1450 μs), asigurând astfel deplasarea miniautovehiculului cu unghiul de virare nul.

Pentru a stabili valoarea vitezei de propulsie, se măsoară distanțele parcurse de miniautovehiculului și apoi se calculează viteza medie pe întreaga perioadă de timp. Miniautovehiculul la accelerare atinge viteza de 0,25m/s în 0,3 s. Decelerația se poate face cu întârziere sau instantaneu, prin blocarea motoarelor. Valorile semnalului PWM pentru calibrarea servomotorului de propulsie sunt prezentate în tab. 6.2

Tab. 6.2 Valorile de calibrare a servomotorului de propulsie

Valoarea semnalului PWM (μs)	Timp (s)	Distanța (m)	Viteza de propulsie (m/s)
127	2	0,5	0,25
255	2	1	0,5
382	2	1,5	0,75
510	2	2	1

Viteza de propulsie pentru parcurgerea unui subtraseu segment de dreaptă a fost setată la valoarea de 0,5 m/s, corespunzător valorii semnalului PWM, 255 μs , iar viteza de deplasare în viraj la valoarea de 0,25 m/s, cu valoarea semnalului PWM, 127 μs .

6.4 Concluzii

În acest capitol este prezentată dezvoltarea unui miniautovehicul autonom la scara 1:10 față de autovehiculele reale pentru testarea modelelor și algoritmilor propuși pentru urmărirea traseelor planificate. Pentru a realiza miniautovehiculul autonom experimental, a fost

modificată platforma auto controlată radio Traxxas Rustler VXL. Receptorul radio și joystick-ul de conducere al platformei auto au fost eliminate și pentru controlul mișcărilor de propulsie și de virare a fost adăugat microcontrolerul Arduino Mega 2560. Celelalte modificări hardware au fost: schimbarea motoarelor de curent continuu originale cu servomotoare electrice fără perii, schimbarea roților, adăugarea unui driver de motoare dual L298N care transmite semnalele PWM motoarelor, adăugarea unui cititor de carduri SD.

Pentru controlul deplasării miniautovehiculului a fost dezvoltat un program în mediul de programare IDE Arduino care este încărcat și executat de microcontroler. Scopul acestuia este de a citi setul de comenzi de parcurgere a traiectoriilor planificate și apoi de a apela funcțiile dezvoltate pentru comanda și controlul motoarelor de propulsie și de virare. Setul de comenzi de parcurgere a traiectoriei este salvat în cardul SD sub forma unui fișier text. Acestea sunt citite de microcontroler, interpretate și executate. La recunoașterea unei comenzi este apelată o funcție specifică pentru controlul motoarelor de propulsie și de virare pentru ca miniautovehiculul să parcurgă subtrajectoriile din cadrul comenzii. Acest proces se repetă până la terminarea tuturor comenzilor și în acest fel miniautovehiculul se deplasează conform traiectoriei planificate.

Funcțiile de comandă a deplasării miniautovehiculului presupun transformarea instrucțiunilor de parcurgere a subtrajectoriilor în semnale PWM transmise celor două motoare. Pentru a stabili valorile semnalului PWM pentru funcțiile de comandă, au fost realizate teste de calibrare pentru motoarele de propulsie și de virare. Funcțiile de deplasare de-a lungul unui segment de dreaptă presupun comanda motorului de propulsie și menținerea constantă (zero) a unghiului de virare. Funcțiile de virare sunt mai complexe deoarece presupun comanda simultană a ambelor motoare și presupune apelarea alternativă a funcției de propulsie și a celei de virare după fiecare pas de execuție.

7. STUDII EXPERIMENTALE CU MINIAUTOVEHICULUL AUTONOM

7.1 Planificarea experimentelor

Mediul de navigare al miniautovehiculului (fig.7.1) este o suprafață plană interioară pe care s-au marcat cele patru trasee studiate la planificare (cap. 4) și la simularea virtuală (cap. 5).

Studiile experimentale constau în parcurgerea celor patru trasee de către miniautovehicul cu scopul de a evalua acuratețea de urmărire a acestora. Precum traseele din mediul virtual, și cele din mediul real sunt definite de coordonatele punctelor de plecare, de sosire și intermediare care delimitează subtraseele componente (segmente de dreaptă, arce de cerc și de clotoidă).

Traseele sunt marcate prin unirea punctelor limită ale traseelor virtuale cu benzi de culoare albă respectând parametrii din modelele geometrice. Pentru poziționarea (marcarea) punctelor reprezentative în mediul real s-a folosit ruleta. Astfel, traseele au fost marcate cu o marjă de eroare de 2 cm față de traseele din mediul virtual.

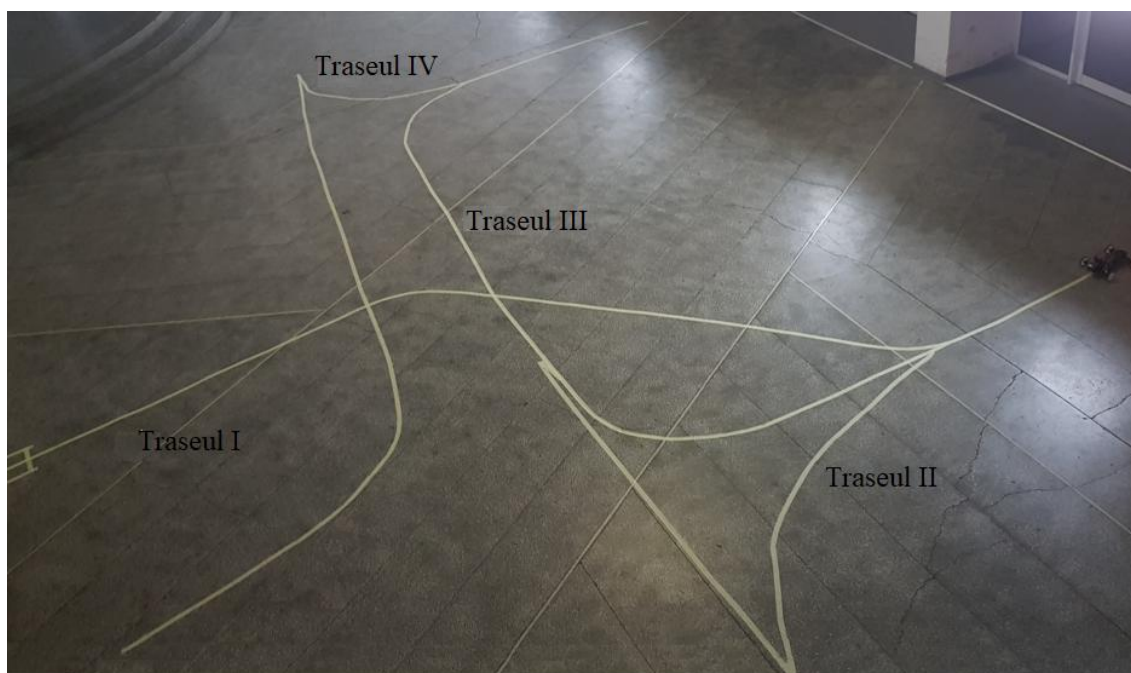


Fig. 7.1 Mediul de navigare al miniautovehiculului autonom

Poziția și orientarea la plecare a miniautovehiculului pentru parcurgerea primului traseu este marcată cu repere fixe (fig. 7.2,a).

Deoarece motoarele miniautovehiculului sunt alimentate de un acumulator electric pe durata experimentelor, apare procesul de descărcare în timp a acestuia și deci de pierdere a capacității de urmărire a traseelor. Astfel, s-au făcut teste preliminare și s-a evidențiat că după parcurgerea de 15 ori a unui traseu cu două viraje, tensiunea bateriei scade și erorile de urmărire sunt inacceptabile. Luând în considerare acest fapt, experimentele au fost realizate pentru nivele de încărcare ale acumulatorului de minim 75% pentru ca erorile de urmărire a traseelor cauzate gradului de încărcare redus al acumulatorului să fie acceptabile.

Pentru navigarea miniautovehiculului autonom pe traiectoriile planificate, sunt utilizate funcțiile dezvoltate pentru deplasarea acestuia în cap 6.3, prin care se setează viteza maximă de deplasare pe segmente de dreaptă la valoarea de 0,5 m/s, cu valoarea semnalului PWM de

255 μ s, și viteza maximă de deplasare în viraje la valoarea, 0,25 m/s, cu valoarea semnalului PWM, 127 μ s.

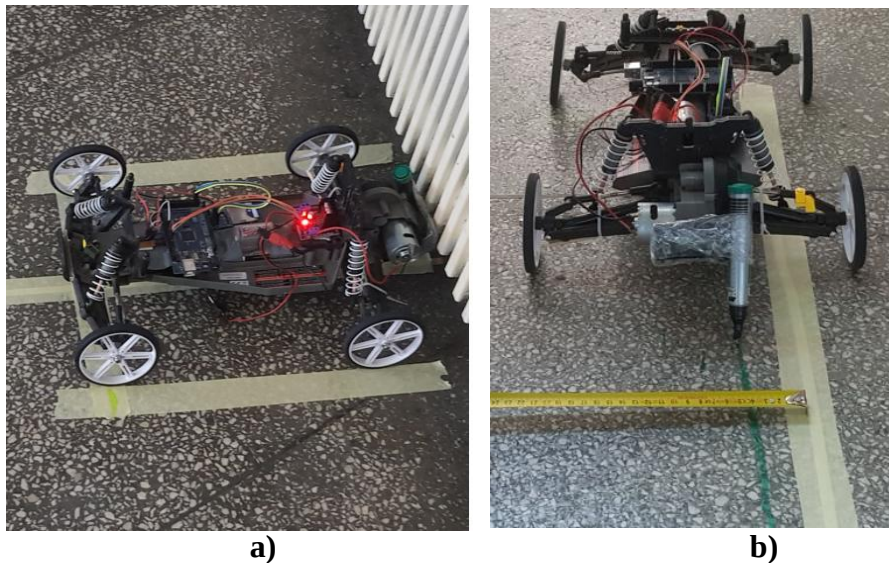


Fig.7.2 Poziția miniautovehiculului autonom: **a** - la plecare, **b** – pe parcurs

7.2 Realizarea experimentelor și achiziția de date

Realizarea experimentelor a constat în parcurgerea celor patru trasee planificate (I, II, III, și IV) pentru a determina acuratețea de urmărire a acestora. Etapa inițială constă în poziționarea miniautovehiculului la plecare cu fața și după parcurgerea traseului I, acesta ajunge în primul punct intermediar cu fața. Apoi, acesta parcurge traseul II, plecând cu spatele și, după efectuarea celui de-al doilea viraj, ajunge în punctul de sosire, identic cu cel de plecare, dar orientat în sens opus față de orientarea pe care a avut-o la plecare. Pentru a parcurge traseul III, miniautovehiculul urmărește un traseu simplu cu două viraje orientate spre dreapta. Urmărirea traseului IV constă în plecarea miniautovehiculului cu spatele, inversarea sensului după parcurgerea virajului la plecare, și sosirea cu fața.

Cele patru trasee au fost parcurse, pe de-o parte, individual, deoarece subprogramele de control încărcate pe cardul SD pot fi apelate pentru urmărirea fiecărui traseu planificat sau, pe de altă parte, succesiv prin intermediul unui subprogram de control care conține concatenarea tuturor comenzilor de parcurgere a celor patru trasee. În acest fel, s-au făcut teste, atât secvențial, pe diverse trasee ale traseului complex, cât și, global prin urmărirea succesivă a celor patru trasee. După parcurgerea fiecărui traseu s-au măsurat abaterile de urmărire a traseelor și de poziționare la punctul de sosire. Astfel, se achiziționează cinci seturi de date, patru pentru urmărirea individuală a celor patru trasee și unul pentru urmărirea succesivă a tuturor traseelor, care astfel formează un traseu complex.

Pentru măsurarea abaterilor a fost amplasat un marker pe puntea spate a miniautovehiculului (fig. 7.2,b) și astfel s-au trasat traiectoriile obținute cu verde. Valorile abaterilor de urmărire a traseelor au fost măsurate cu ruleta. Deoarece markerul nu a fost plasat pe centrul punții spate a miniautovehiculului, abaterea măsurată este compensată cu 2 cm pentru ca abaterea să reprezinte distanță dintre mijlocul punții spate a miniautovehiculului (traiectoria marcată cu verde) și traseul marcat cu alb pe suprafața de rulare.

La parcurgerea fiecărui traseu au fost măsurate câte 75 de abateri (erori) de urmărire a traseului și la parcurgerea traseului complex au fost măsurate 160 de abateri, câte 40 pentru fiecare traseu component.

Primul traseu a fost parcurs de miniautovehicul în 13 s, al doilea în 32 s, al treilea în 18 s și ultimul în 25 s. Traseul complex a fost parcurs în 91 s, miniautovehiculul făcând câte o staționare de 1 s în fiecare punct intermediar.

7.3 Prelucrarea și analiza datelor experimentale

Pentru a evalua modul în care miniautovehiculul urmărește traseele planificate și marcate pe suprafața de navigare, s-au prelucrat abaterile de urmărire pentru cazurile în care acesta parcurge separat și succesiv cele patru trasee și, respectiv, traseul complex.

Printre cauzele principale ale apariției abaterilor de urmărire a traseelor parcurse de miniautovehicul se evidențiază: erorile de trasare a traseelor, erorile de calibrare, erorile de trasare a traiectoriilor, erorile de măsurare a abaterilor, descărcarea acumulatorului etc.

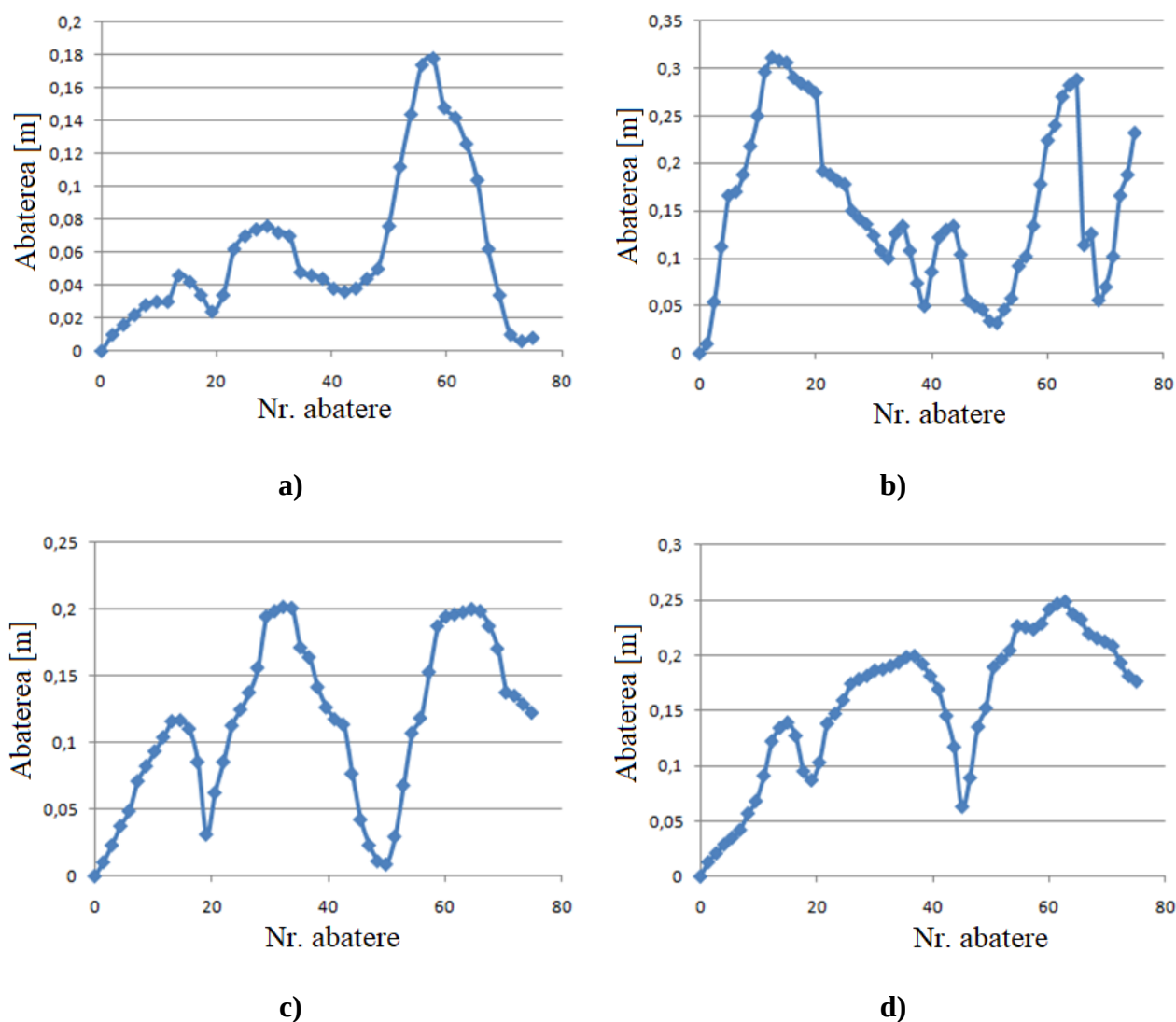


Fig.7.5 Variațiile abaterilor de urmărire pentru traseele: **a** - I, **b** - II, **c** - III, **d** - IV

La parcurgerea traseelor I, II, III și IV abaterile cresc la valorile maxime de 0,178 m, 0,311 m, 0,201 m, și respectiv, 0,248 m, iar în urma parcurgerii celui de-al doilea viraj abaterile de poziționare la sosire au valorile de 0,008 m, 0,232 m, 0,1224 m, și respectiv, 0,176 m (fig. 7.5 a,b,c,d). În urma analizei variațiilor abaterilor pentru fiecare dintre cele patru trasee se observă că cele mai mici valori s-au obținut la parcurgerea traseului I și cele mai mari la parcurgerea traseului II pentru care valoarea abaterii maxime, 0,311 m. Acest traseu presupune efectuarea celor două viraje prin deplasarea cu spatele a miniautovehiculului.

În fig. 7.6 se prezintă variația abaterilor de urmărire la parcurgerea traseului complex, unde se evidențiază abaterea maximă, 0,438 m, și abaterea la sosire cu valoarea de 0,3978 m.

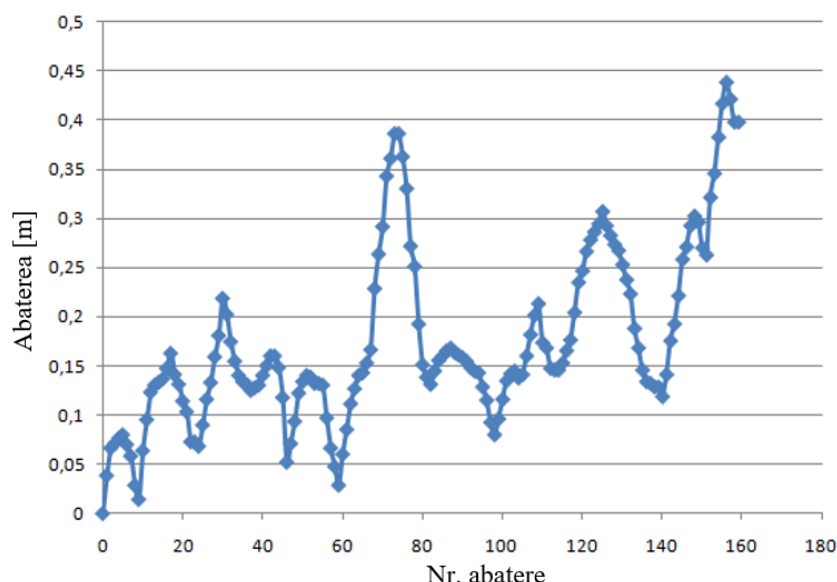


Fig.7.6 Variația abaterii de urmărire a traseului complex

La parcurgerea traseului complex, în afara traseului I, se înregistrează cele mai mari valori ale abaterilor de urmărire în comparație cu cele obținute la parcurgerea individuală a traseelor II, III și IV. Se poate observa că și abaterea la sosire este mai mare deoarece abaterile care apar la parcurgerea traseelor componente se cumulează.

În tabelul 7.1 sunt prezentate valorile abaterilor maxime, minime, medii pentru fiecare din cele patru trasee și pentru traseul complex. Abaterea de urmărire maximă/minimă reprezintă maximum/minimul abaterilor de urmărire pentru un traseu parcurs individual sau pentru traseul complex. Abaterea medie reprezintă media abaterilor de urmărire a traseului.

Tab 7.1 Abaterile maxime, minime și medii de urmărire a celor patru trasee și a traseului complex

	Abaterea maximă [m]	Abaterea minimă [m]	Abaterea medie [m]
Traseul I	0,178	0	0,0587
Traseul II	0,311	0	0,152
Traseul III	0,201	0	0,112
Traseul IV	0,248	0	0,1512
Traseul complex	0,438	0	0,1743

Valoarea maximă a abaterilor medii se obține pentru parcurgerea traseului complex și comparând doar cele patru trasee, aceasta are valoarea, de 0,152 m pentru traseul II. Cele mai mici valori ale abaterilor de urmărire se înregistrează la parcurgerea traseului I.

Și în cazul acestor studii experimentale, pentru compararea cu acuratețe mărită a abaterilor traiectorii-trasee s-a realizat prelucrarea statistică a datelor folosind pachetul Microsoft-Excel. În fig. 7.8 se evidențiază grafic distribuțiile *box plot* ale abaterilor traiectorii-trasee.

Pentru parcurgerea traseului I, 25% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,03 m, 50% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,044 m, 75% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,074 m și 25% din abaterile de urmărire sunt cuprinse între 0,074 m și 0,178 m. Ca urmare a parcurgerii traseului II, 25% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,092 m, 50% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,134 m, 75% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,218 m și 25% din abaterile de urmărire sunt cuprinse între 0,218 m și 0,311 m.

La parcurgerea traseului III, 25% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,068 m, 50% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,116 m, 75% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,164 m și 25% din abaterile de urmărire sunt cuprinse între 0,164 m și 0,201 m.

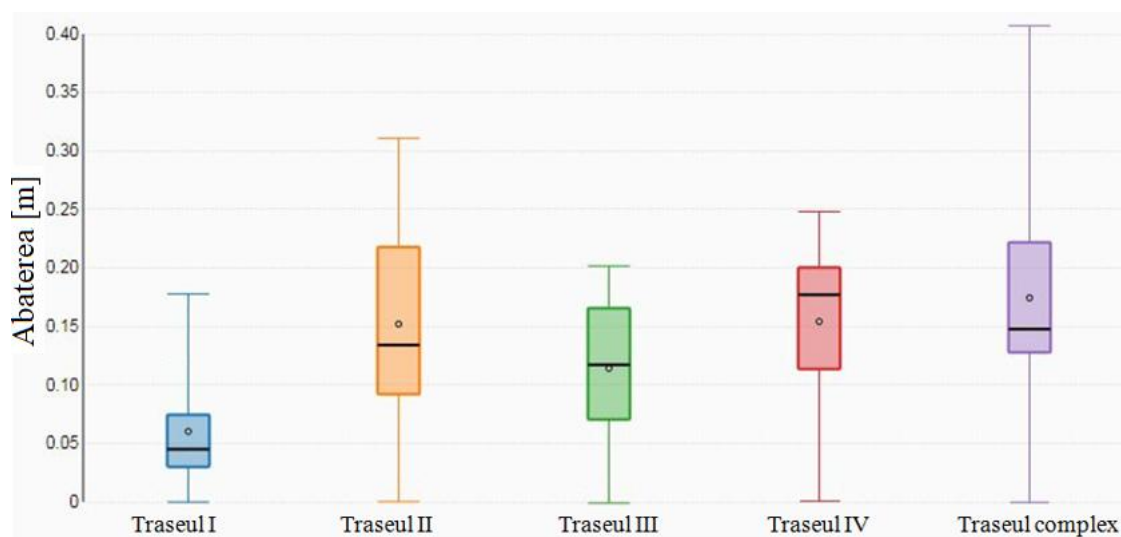


Fig. 7.8 Abateri de urmărire traiectorii-trasee

Pentru parcurgerea traseului IV, 25% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,113 m, 50% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,177 m, 75% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,203 m și 25% din abaterile de urmărire sunt cuprinse între 0,203 m și 0,248 m.

În cazul parcurgerii traseului complex, 25% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,127 m, 50% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,147 m, 75% din abaterile de urmărire sunt mai mici de 0,221 m și 25% din abaterile de urmărire sunt cuprinse între 0,221 m și 0,438 m care reprezintă valoarea maximă înregistrată.

7.5 Concluzii

În acest capitol sunt prezentate studiile experimentale care constau în parcurgerea individuală și succesivă a celor patru trasee planificate de către miniautovehicul cu scopul de a evalua acuratețea de urmărire a acestora.

Mediul de navigare al miniautovehiculului este o suprafață plană interioară pe care s-au marcat cele patru trasee definite de coordonatele punctelor de plecare, de sosire și intermediare care delimitează subtraseele componente, preluate de la traseele virtuale. Marcarea acestora se realizează prin unirea punctelor limită cu benzi de culoare albă și presupune o marjă de eroare de maxim 2 cm față de traseele din mediul virtual.

Prima etapă în derularea experimentelor a constat în parcurgerea individuală a celor patru trasee planificate (I, II, III, și IV) pentru a determina acuratețea de urmărire a acestora. Cea de-a doua etapa a constat în parcurgerea succesivă a celor patru trasee care formează în acest fel un traseu complex.

Pentru a evalua modul în care miniautovehiculul urmărește traseele, s-au măsurat abaterile de urmărire care reprezintă distanțele dintre mijlocul punții spate a miniautovehiculului și traseul marcat la navigare. Printre cauzele principale ale apariției abaterilor de urmărire a traseelor se enumeră: erorile de marcare a traseelor de parcurs, erorile de calibrare, erorile de trasare a traiectoriilor efectuate, erorile de măsurare a abaterilor, jocurile din transmisii, descărcarea acumulatorului etc.

După analiza abaterilor de urmărire a traseelor parcurse de miniautovehicul se constată că în cazul traseului complex, se înregistrează cele mai mari valori pentru abaterea, având abaterea medie de 0,1743 m. Dacă se compară doar abaterile măsurate la parcurgerea individuală a celor patru trasee, cele mai mari valori ale abaterilor se înregistrează pentru traseul II când cele două viraje componente sunt parcurse cu spatele. Abaterea maximă măsurată la parcurgerea acestui traseu este de 0,311 m și abaterea medie are valoarea de 0,152 m.

8. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

8.1 Concluzii finale

Principala problemă abordată în cadrul tezei de doctorat constă în modelarea, planificarea, dezvoltarea și implementarea traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome în medii industriale de transport intern, ținând cont de constrângerile specifice mediilor industriale. Autovehiculele autonome pentru navigarea în medii industriale de producție sunt concepute pentru executarea unor sarcini repetitive care constau în transportul local al materialelor și/sau semifabricatelor necesare în procesele de fabricație.

Obiectivul specific de analizare a cercetărilor teoretice, aplicative și experimentale privind autovehicule autonome a fost realizat prin studiul celor mai recente surse bibliografice din domeniu. Pentru a evidenția flexibilitatea și viabilitatea autovehiculelor autonome, a fost realizată o clasificare a acestora în funcție de caracteristicile mediului de navigare, punându-se accent pe cele ale mediilor industriale. De asemenea, au fost analizați și comparați principalii algoritmi de generare a traseelor pentru autovehicule autonome, dintre care este selectat algoritmul RRT datorită caracteristicii acestuia de a căuta eficient în spațiile neconvexe pentru a genera toate traseele posibile. Traseele planificate au discontinuitate de direcție și la navigare implică variații bruște ale unghiului de virare, ceea ce presupune că autovehiculul efectuează numeroase manevre de oprire, schimbare de direcție și repornire. Pentru obținerea unui traseu neted au fost studiate caracteristicile unor curbe auxiliare. În urma analizării acestora, a fost selectată curba de tip clotoidă pentru netezirea traseelor astfel încât să permită trecerea continuă de la linie dreaptă la arc de cerc și invers.

În vederea îndeplinirii obiectivelor de modelare și planificare a traseelor autovehiculelor autonome de transport intern s-au determinat toate scenariile posibile în care autovehiculul poate pleca dintr-un punct cu o orientare inițială și ajunge într-un punct de sosire, de asemenea, cu o orientare impusă. Pentru modelarea traseelor s-au stabilit caracteristicile subtraseelor din care acesta este compus: subtraseul de tip segment de dreaptă, subtraseul de tip arc de cerc și subtraseul de tip arc de clotoidă, necesar pentru realizarea tranziției de la traseul de tip segment de dreaptă la cel de tip arc de cerc și invers.

Pentru studiul structurat de la simplu la complex pentru început s-au elaborat modelele matematice pentru traseele elementare cu un viraj cu unghi de bracare oarecare și cu unghi de bracare maxim. În continuare, s-au elaborat modelele matematice pentru traseele simple cu două viraje, grupate în șase variante, ținând cont de posibilitățile de plecare/sosire cu fața sau cu spatele, de sensurile virajelor spre dreapta sau spre stânga și de inversare a sensului de deplasare la plecare sau la sosire.

Pentru modelarea traseelor complexe au fost folosite combinații ale traseelor elementare și simple. Din toate traseele posibile, cunoscând lungimile, este selectat cel mai scurt și care implică un număr minim de manevre. Deoarece în cazul căilor de transport din mediile industriale sunt caracterizate de lungimi și lățimi reduse, au fost clasificate, modelate și simulate toate variantele posibile de trasee particulare care implică întoarcerea autovehiculului la punctul de pornire.

Planificarea traseelor s-a realizat prin parcurgerea următoarelor etape: generarea traseelor prin aplicarea algoritmului RRT pentru care s-au stabilit distanțele minime și maxime față de obstacolele fixe din mediu; modelarea traseului obținut de algoritmul RRT, folosind subtrasee segment de dreaptă și arc de cerc, urmat de netezirea traseului generat prin

introducerea subtraseelor de tip arc de clotoidă. Pentru exemplificare generală, *s-a conceput un scenariu complex cu patru trasee cu câte două viraje, care să reprezinte toate tipurile de trasee elementare și simple pentru care au fost dezvoltate modele matematice.*

Pentru *planificarea traiectoriilor autovehiculelor autonome* în medii industriale au fost analizate problemele legate de constrângerile de navigare ale unui autovehicul neolonomic cu sistem de virare de tip Ackermann. Planificarea traiectoriei presupune descompunerea acesteia în subtraectorii asociate parcurgerii subtraseelor. Astfel, s-au stabilit caracteristicile fiecărui tip de subtraectorie și s-au determinat legile vitezelor de deplasare de-a lungul acestora și a timpilor necesari. În plus, s-au definit etapele care trebuie parcurse pentru planificarea traiectoriei cu un viraj prin stabilirea subtraectoriilor componente, precum și a variației vitezei de-a lungul parcurgerii traseului pentru corelația comenzilor motoarelor electrice de propulsie și de virare.

În urma analizei avantajelor și dezavantajelor bibliotecilor software actuale, a fost ales simulatorul V-REP pentru simularea navigării autovehiculului autonom de transport intern în medii virtuale. În mediul industrial virtual au fost poziționate obstacole fixe și au fost stabilite punctele de plecare și de sosire. Traseele virtuale modelate sunt parcurse de un autovehicul virtual cu sistem de virare de tip Ackermann. În urma programării deplasării autovehiculului virtual, acesta parcurge traiectorii în mediul virtual cu abateri față de traseele virtuale modelate cu aproximări Bezier. S-a dezvoltat o aplicație software în limbajul de programare Matlab care are scopul de a controla modul în care autovehiculul virtual se deplasează în mediul virtual. Pentru comunicarea informațiilor dintre aplicația dezvoltată și scena virtuală a simulatorului V-REP a fost utilizat un client API. Simulatorul V-REP permite vizualizarea traseului modelat și a traiectoriei efectuate de autovehiculul virtual. Datele care descriu navigarea autovehiculului virtual sunt salvate în timpul simulării în vederea prelucrării ulterioare.

O aplicație dezvoltată în mediul de programare Matlab îi permite utilizatorului să vizualizeze diferențele dintre traseele virtuale și traiectoriile obținute și, în plus, să calculeze abaterile dintre acestea. Din analiza abaterilor de urmărire a traseelor virtuale, se observă că autovehiculul virtual deviază, în special în viraje, iar abaterile ating valori maxime când se efectuează viraje prin deplasarea cu spatele. Principala cauză a producerii abaterilor traiectoriilor virtuale rezultate față de traseele virtuale este determinată de diferența dintre traseele planificate cu modele analitice și de cele modelate în mediul virtual unde subtraseele arce de cerc și de clotoidă sunt approximate, utilizând funcții Bezier polinomiale de gradul doi.

Pentru efectuarea studiilor experimentale privind navigarea în medii reale, a fost dezvoltat un miniautovehicul prin modificarea platformei auto Traxxas Rustler VXL. Receptorul radio al platformei auto a fost eliminat din structura acesteia și s-a introdus un microcontroler Arduino Mega2560, astfel încât miniautovehiculul să fie controlat și comandat. Celelalte componente hardware adăugate sunt: un driver de motoare dual L298N care transmite semnalul PWM motorului de propulsie, un cititor de carduri SD și un card SD.

Pentru controlul deplasării miniautovehiculului a fost dezvoltat un program în mediul de programare IDE Arduino care este încărcat și executat de microcontroler. Scopul principal al acestuia este să citească setul de comenzi de parcurgere a traiectoriei planificate de pe cardul SD. Setul de comenzi, salvate într-un fișier text, este interpretat și apoi executat. La recunoașterea unei comenzi este apelată o funcție specifică pentru controlul motoarelor de propulsie și de virare. Acest proces se repetă până la terminarea tuturor comenzilor care asigură parcurgerea traseului până la sosire.

Crearea mediului de navigare a miniautovehiculului a constat în marcarea traseelor pe care acesta trebuie să le parcurgă. Derularea experimentelor a constat în parcurgerea celor patru trasee, similar cu simulările din mediul virtual, pentru a evalua precizia cu care miniautovehiculul le urmărește. Astfel, s-au măsurat abaterile de urmărire pentru cazurile în care miniautovehiculul parcurge pe rând, cele patru trasee și apoi s-au măsurat abaterile parcurgerii traseului complex, compus din cele patru trasee. Performanța de urmărire a

traseelor depinde de: erorile de marcarea a traseelor de parcurs, erorile de calibrare, erorile de trasare a traiectoriilor efectuate, erorile de măsurare a abaterilor, jocurile din transmisii, descărcarea acumulatorului.

S-a constatat că la parcurgerea traseului complex s-a înregistrat valoarea maximă a abaterii de urmărire, deoarece miniautovehiculul acumulează abaterile de urmărire după parcurgerea traseelor anterioare. Comparând abaterile de urmărire a celor patru trasee, valorile maxime sunt înregistrate pentru parcurgerea traseului II, pentru care ambele viraje sunt realizate prin deplasare cu spatele.

Ca o concluzie generală a cercetărilor cuprinse în prezenta teză de doctorat, în urma simulărilor, testelor și experimentelor efectuate privind aplicarea metodelor dezvoltate de planificare a traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome de transport intern în medii industriale, se evidențiază că rezultatele obținute sunt valide și aceste metode pot fi folosite în practică pentru navigarea AaTI. În acest fel se poate afirma ca obiectivul principal al tezei de doctorat de dezvoltare, implementare și testare unui sistem de planificare a traseelor și traiectoriilor unui autovehicul autonom de transport intern în medii industriale a fost îndeplinit.

8.2 Contribuții originale

Teză de doctorat are un caracter teoretico-experimental inovativ și aduce numeroase contribuții originale în ceea ce privește conceperea, implementarea și testarea metodelor de modelare și planificare a traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome în medii industriale de transport intern. Prin efectuarea cercetărilor cu scopul de a îndeplini obiectivele tezei și ca urmare a analizei rezultatelor obținute, s-au realizat următoarele contribuții proprii:

1. Analiza critică a cercetărilor teoretice și experimentale privind tipurile autovehiculelor autonome, posibilitățile de planificare a traseelor și traiectoriilor, precum și a implementării practice actuale.
2. Concepția și elaborarea modelelor matematice pentru traseele elementare cu un viraj pentru care unghiul de virare poate avea valori oarecare și maxime.
3. Concepția unui program cadru pentru dezvoltarea modelelor matematice și simularea traseelor simple cu două viraje care stau la baza traseelor complexe de transport intern din mediile industriale.
4. Concepția și elaborarea modelelor matematice, a algoritmilor de calcul și simulare grafică a traseelor simple cu două viraje în șase variante determinat de toate posibilitățile de plecare/sosire cu fața sau cu spatele, cu viraje cu aceleași sensuri sau cu sensuri opuse și cu inversare sau fără inversare la plecare/sosire.
5. Dezvoltarea și simularea modelelor traseelor complexe care pot fi compuse din unul sau mai multe trasee elementare cu un viraj și/sau trasee simple cu două viraje.
6. Simularea și analiza cazurilor particulare ale traseelor cu întoarcere la punctul de pornire, specifice căilor de transport intern.
7. Dezvoltarea unei metode de planificare a traseelor AaTI care presupune definirea dimensiunilor mediului industrial și a colecției de obstacole fixe, stabilirea coordonatelor punctelor de plecare și de sosire și a orientărilor autovehiculului corespunzătoare acestora, aplicarea algoritmului RRT pentru determinarea traseului celui mai scurt, modelarea cu subtrasee segment de dreaptă și arc de cerc și netezirea traseului generat prin utilizarea subtraseelor de tip arc de clotoidă.
8. Concepția și dezvoltarea unei metode de planificare a traiectoriilor AaTI prin descompunerea în traiectorii elementare asociate deplasării continue a autovehiculului de-a lungul subtraseelor.
9. Crearea unui mediu de transport intern virtual pentru simularea navigării autovehiculului autonom și testarea eficienței metodelor de planificare a traseelor și traiectoriilor pentru un autovehicul virtual cu sistem de virare de tip Ackermann.

10. Concepția și dezvoltarea unui algoritm și program de control al autovehiculului virtual pentru urmărirea traseelor virtuale.
11. Evaluarea preciziei de urmărire a traseelor în medii virtuale de către un autovehicul virtual prin dezvoltarea unui subprogram de analizare a diferențelor dintre traseul virtual modelat și traiectoria efectuată de autovehiculul virtual.
12. Concepția și dezvoltarea unui miniautovehicul cu sistem de virare de tip Ackermann pentru testarea eficienței metodelor de planificare a traseelor și traiectoriilor în medii industriale de transport intern.
13. Dezvoltarea unui program de comandă și control al miniautovehiculului prin corelarea controlului motorului de propulsie și a celui de virare pentru urmărirea traseelor planificate din medii industriale.

8.3 Valorificarea rezultatelor cercetării

8.3.1 Lucrări publicate

În perioada de realizare a cercetărilor din cadrul tezei de doctorat, s-au elaborat și publicat 21 lucrări științifice, dintre care 7 prim autor și 14 coautor, publicate în jurnale și buletine ale conferințelor de specialitate:

Lucrări publicate în domeniul tezei de doctorat

1. **Gîrbacia T.**, Mogan G., *Velocity Variation Analysis of an Autonomous Vehicle in Narrow Environment*, in: New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science, vol. 57. Springer, Cham, pag. 301-308, 2018, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-79111-1_30 (indexată BDI SCOPUS).
2. **Gîrbacia T.**, Mogan G., *An Improvement of the Rapidly-Exploring Random Tree Method for Path Planning of a Car-Like Robot in Virtual Environment*, in: Applied Mechanics and Materials, vol. 772, pag. 471-476, 2015, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.772.471> (indexată BDI Scientific.net).
3. **Gîrbacia T.**, Margarit A., Mădălin S., Mogan G., *Path and trajectory planning for vehicles with navigation assistants*, in: Applied Mechanics and Materials, vol. 811, pag. 300-304, 2015, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.811.300> (indexată BDI Scientific.net).
4. **Gîrbacia T.**, Gîrbacia F., Mogan G., *Virtual Planning of Robot Trajectories for Spray Painting Applications*, in: Applied Mechanics and Materials, vol. 658, pag. 632-637, 2014, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.658.632> (indexată BDI SCOPUS, Scientific.net).
5. **Gîrbacia T.** *Comparative Study on Autonomous Robot Trajectory Determination in an Unknown Indoor Environment*, in: Applied Mechanics and Materials, Vol. 555, pp. 327-333, 2014 (indexată BDI SCOPUS).
6. Dumitru A. I., **Gîrbacia T.**, Boboc R. G., Postelnicu C., Mogan G., *Effects of smartphone based advanced driver assistance system on distracted driving behavior: A simulator study*, Computers in Human Behavior, vol. 83, pag. 1-7, 2018 (indexată Web of Science, Scopus, factor de impact 3.536).
7. Giurgiu E., **Gîrbacia T.**, Mogan G. L., *Programming an autonomous mini-vehicle in narrow environments*, in: International Congress of Automotive and Transport Engineering, CONAT 2016, Springer, Cham, pag. 729-736, 2017, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_80 (indexată Web of Science și BDI Scopus).

8. Pantea A., Gîrbacia F., **Gîrbacia T.**, *Development of an Advanced Driver Assistance System Using RGB-D Camera*, in: International Congress of Automotive and Transport Engineering, CONAT 2016, Springer, Cham, pag. 746-751, 2017, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_82 (indexată Web of Science și BDI SCOPUS).
9. Gîrbacia F., Dumitru A., Postelnicu C., Duguleana M., **Gîrbacia, T.**, Butila E., Beraru A., Mogan G., *Effects of ADAS notifications on driver's visual attention under simulator driving conditions*, abstract publicat în Perception, vol. 45, pag. 307-308, 2016 (indexată Web of Science, factor de impact 1.371).

Lucrări publicate în domenii conexe

1. **Gîrbacia T.**, Gîrbacia F., Butnariu S., Gherman B., Vaida C., PÎSLĂ D., *Development of a Virtual Reality Application for Planning of Robotic Prostate Transperineal Biopsy*, in: Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences, vol. 9, 2016.
2. **Gîrbacia T.**, Gîrbacia F., Duguleana M., Butilă E., *Augmented reality system for training robotic prostate biopsy needle guidance*, in: The 10th International Conference on Virtual Learning, pag. 254-258, 2015.
3. Gîrbacia F., **Gîrbacia T.**, Butnariu S., *Design review of CAD models using a NUI LEAP motion sensor*, in: Journal of Industrial Design & Engineering Graphics, vol. 10, 2015.
4. Gîrbacia F., Butnariu S., Voinea D., Tzolea B., **Gîrbacia T.**, Pîsla D., *A Virtual Reality System for Pre-Planning of Robotic-Assisted Prostate Biopsy*, in: Applied Mechanics and Materials, vol. 772, 585, 2015
5. Butnariu S., **Gîrbacia T.**, *An analysis on the prostate deformation during brachytherapy needle insertion*, in: Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences, vol. 9, 2016.
6. Butnariu S., **Gîrbacia T.**, Gîrbacia F., *An analysis on tissue deformation during robotic biopsy needle insertion*, in: E-Health and Bioengineering Conference (EHB), pag. 213-216, 2017.
7. Gîrbacia F., Voinea D., **Gîrbacia T.**, *Vibrotactile Patterns for Smartphone Based ADAS Warnings*, in: International Congress of Automotive and Transport Engineering, Springer, Cham, pag. 122-127, 2018.
8. Gîrbacia F., **Gîrbacia T.**, *Tehnologii de interfațare naturală aplicate în proiectarea asistată de calculator*, in: Conferința Națională de Interacțiune Om Calculator - RoCHI, pag. 25-28, 2014.
9. Gherman B., **Gîrbacia T.**, Cocorean D., Vaida C., Butnariu S., Plitea N., Talaba D., Pîsla D., *Virtual planning of needle guidance for a parallel robot used in brachytherapy*, in: New Trends in Medical and Service Robots, pag. 109-120, 2016.
10. Gîrbacia F., Pîslă D., Butnariu S., Gherman B., **Gîrbacia T.**, Plitea N., *An Evolutionary Computational Algorithm for Trajectory Planning of an Innovative Parallel Robot for Brachytherapy*, in: New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics, pag. 427-435, 2017.
11. Pîslă D., Gherman B., Gîrbacia F., Vaida C., Butnariu S., **Gîrbacia T.**, Plitea N., *Optimal planning of needle insertion for robotic-assisted prostate biopsy*, in: Advances in Robot Design and Intelligent Control, pag. 339-346, 2016.
12. Gîrbacia F., Boboc R., Gherman B., **Gîrbacia T.**, Pîsla D., *Planning of needle insertion for robotic-assisted prostate biopsy in augmented reality using RGB-D camera*, in: International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, pag. 515-522, 2016.

8.3.2 Participări la conferințe

În timpul realizării cercetărilor științifice din cadrul tezei de doctorat autoarea a participat, pentru prezentarea lucrărilor științifice elaborate, la următoarele conferințe:

1. The International Conference on Advanced Concepts on Mechanical Engineering (ACME 2014), Iunie 09 - 10, 2016, Iasi, Romania;
2. European Conference on Visual Perception (ECVP 2016), Barcelona, Spania, 28 Octombrie-01 Septembrie, 2016;
3. The International Congress of Automotive and Transport Engineering (CONAT 2016), Brașov, România, Octombrie 26-29, 2016.

8.3.3 Participări la contracte de cercetare și dezvoltare

În perioada elaborării tezei de doctorat autoarea a participat ca membru în cadrul următoarelor contracte de cercetare:

1. POSDRU/159/1.5/S/137070 – ATTRACTING - Creșterea atractivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetători în științe ingineresti;
2. H2020 –TWINN- eHeritage - Expanding the Research and Innovation Capacity in Cultural Heritage Virtual Reality Application, 2015-2018;
3. PN-II-PT-PCCA-2013-4-2023, Navieyes - Asistent inteligent de navigare auto pentru dispozitive mobile bazat pe urmărirea privirii, 2014-2017.
4. PN-II-PT-PCCA-2013-4-1596, Spine - Sistem de diagnosticare și terapie a afecțiunilor coloanei vertebrale,, 2014-2017;
5. PN-II-PT-PCCA-2013-4-0647 ROBOCORE - Robotic assisted prostate biopsy, a high accuracy innovative method, 2014-2017.

8.4 Direcții de cercetare viitoare

Ca urmare a cercetărilor efectuate, analizei rezultatele obținute și diseminării acestora, s-au evidențiat clar limitele teoretico-experimentale ale problematicilor de modelare și planificare a traseelor AaTI. Astfel studiile elaborate în cadrul acestei teze de doctorat pot fi continuate în următoarele direcții:

- Studii de planificare a traseelor și traiectoriilor AaTI, utilizând tehnici de implementare a algoritmilor paraleli și tehnici de programare CUDA (Compute Unified Device Architecture). Avantajul principal al algoritmizării și programării bazate pe GPU (Graphics Processing Unit) este reprezentat de faptul ca informațiile nu se mai procesează succesiv, ci se pot procesa în paralel, timpul fiind mult redus. Folosind această tehnică, este posibilă realizarea planificării traiectoriilor on-line, pe măsură ce autovehiculul autonom se deplasează în mediile industriale.
- Studii privind utilizarea rețelelor neuronale pentru ca autovehiculul autonom să fie capabil să interpreteze situația în care se află și să fie capabil să ia decizii în funcție de aceasta. În acest fel, autovehiculul autonom este capabil să identifice natura obstacolelor din mediu, să identifice poziția obstacolelor mobile și să ajusteze traiectoria în funcție de modificările din mediul de navigare. În funcție de situația identificată, autovehiculul autonom va fi capabil să aleagă, din baza de date a traiectoriilor planificate, traiectoria optimă pe care trebuie să o efectueze.

BIBLIOGRAFIE

1. [Baran,2010] Baran, I., Lehtinen, J., Popović, J., "Sketching clothoid splines using shortest paths", Computer Graphics Forum, Vol. 29, No. 2, pag. 655-664 Blackwell Publishing Ltd., 2010.
2. [Brand, 2010] Brand, M., Masuda, M., Wehner, N., X.-H. Yu, "Ant colony optimization algorithm for robot path planning", International Conference on Computer Design and Applications (ICCD), vol. 3, pag. 436–440, 2010.
3. [Brezak, 2011] Brezak, M., Petrović, I. "Path smoothing using clothoids for differential drive mobile robots." IFAC Proceedings Volumes, vol. 44, nr.1, pag. 1133-1138, 2011.
4. [Brezak, 2014]. Brezak, M., Petrovic, I. "Real-time approximation of clothoids with bounded error for path planning applications", IEEE Transactions on Robotics, vol. 30(2), pag.507-515, 2014.
5. [Bry,2011] Bry, A., Roy, N. "Rapidly-exploring random belief trees for motion planning under uncertainty." IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pag. 723-730, 2011.
6. [Cirillo, 2014] Cirillo, M., Pecora, F., Andreasson, H., Uras, T., Koenig, S. "Integrated Motion Planning and Coordination for Industrial Vehicles". In ICAPS.
7. [Chu, 2012] K. Chu, M. Lee, M. Sunwoo, "Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13, 4, pag.1599-1616, 2012.
8. [Devaurs,2011] Devaurs, D., Siméon, T., Cortés, J. "Parallelizing RRT on distributed-memory architectures." IEEE International Conference on Robotics and automation, pag. 2261-2266, 2011.
9. [Dripke ,2014] Dripke, C., Groh, F., Keinert, M., Verl, A.: "A New Approach to Interpolation of Tool Path Trajectories with Piecewise Defined Clothoids". Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, pag. 249-254,2014
10. [Dumitru, 2018] Dumitru A. I., **Gîrbacia T.**, Boboc R. G., Postelnicu C., Mogan G., "Effects of smartphone based advanced driver assistance system on distracted driving behavior: A simulator study", Computers in Human Behavior, vol. 83, pag. 1-7, 2018
11. [Egerstedt,2009] Egerstedt, M., Martin, C. "Control theoretic splines: optimal control, statistics, and path planning." Princeton University Press, 2009.
12. [Fraichard,2001] Fraichard, T., Ahuactzin, J. M. "Smooth path planning for cars." IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pag. 3722-3727, 2001.
13. [Funke,2016] J. Funke, J. C. Gerdes : "Simple Clothoid Lane Change Trajectories for Automated Vehicles Incorporating Friction Constraints", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 138, 2, pp.1-9.
14. [Gasparetto,2012] Gasparetto, A., Boscariol, P., Lanzutti, A., Vidoni, R "Trajectory planning in robotics". Mathematics in Computer Science, 6(3), pag. 269-279, 2012.

15. [Girbacia,2014] **Girbacia, T. M.** "Comparative Study on Autonomous Robot Trajectory Determination in an Unknown Indoor Environment". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 555, pag. 327-333, 2014.
16. [Girbacia,2014] **Gîrbacia T.**, Girbacia F., Mogan G., "Virtual Planning of Robot Trajectories for Spray Painting Applications", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 658, pag. 632-637, 2014.
17. [Girbacia,2015] **Gîrbacia, T.**, Mogan, G. "An Improvement of the Rapidly-Exploring Random Tree Method for Path Planning of a Car-Like Robot in Virtual Environment". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 772, pag. 471-476, 2015.
18. [Girbacia,2015] **Gîrbacia, T.**, Margarit, A., Mădălin, S., Mogan, G. "Path and trajectory planning for vehicles with navigation assistants". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 811, pag. 300-304, 2015.
19. [Girbacia,2018] **Girbacia, T. M.**, Mogan, G. L. "Velocity Variation Analysis of an Autonomous Vehicle in Narrow Environment". *New Advances in Mechanism and Machine Science*, pag. 301-308, 2018.
20. [Girbacia,2016] Girbacia F., Dumitru A., Postelnicu C., Duguleana M., **Gîrbacia, T.**, Butila E., Beraru A., Mogan G., "Effects of ADAS notifications on driver's visual attention under simulator driving conditions", abstract publicat în *Perception*, vol. 45, pag. 307-308, 2016
21. [Giurgiu,2016] Giurgiu E., **Girbacia T.**, Mogan G.: "Programming an Autonomous Mini-Vehicle in Narrow Environments", *International Congress of Automotive and Transport Engineering (CONAT)*, Springer, Cham, pag. 729-736, 2016.
22. [Gómez-Bravo,2008] Gómez-Bravo, F., et al. "Continuous curvature path generation based on β -spline curves for parking manoeuvres." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56(4), pag. 360-372, 2008.
23. [Henrie, 2007] Henrie, J., & Wilde, D.: Planning continuous curvature paths using constructive polylines. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, vol. 4, nr. 12, pag. 1143-1157, 2007.
24. [Jakob, 2012] Jakob E. et al. "Camera-based navigation of a low-cost quadcopter", *Intelligent Robots and Systems*, pag. 2815-2821, 2012.
25. [Jacobs,2013] Jacobs, S. A., Stradford, N., Rodriguez, C., Thomas, S., Amato, N. M. "A scalable distributed RRT for motion planning." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pag. 5088-5095, 2013.
26. [Jiménez, 2009] Jiménez, F., et al. "Measurement uncertainty determination and curve-fitting algorithms for development of accurate digital maps for advanced driver assistance systems." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 17(3), pag. 225-239, 2009.
27. [Johnson,2015] Johnson, E. N., Mooney, J. G. "Longitudinal Motion Planning for Slung-Loads Using Simplified Models and Rapidly-Exploring Random Trees." *Georgia Institute of Technology*, 2015.
28. [Kala,2013] Kala, R., Warwick K. Kala, "Motion planning of autonomous vehicles in a non-autonomous vehicle environment without speed lanes." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26(5-6), pag. 1588-1601, 2013.
29. [Katrakazas,2015] Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W. H., Deka, L. "Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-

- of-the-art and future research directions." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 60, pag. 416-442, 2015.
30. [Labakhua,2008] Labakhua, L., Nunes, U., Rodrigues, R., Leite, F. S. "Smooth trajectory planning for fully automated passengers vehicles: Spline and clothoid based methods and its simulation." *Springer Berlin Heidelberg in Informatics in Control Automation and Robotics*, pag. 169-182, 2008.
31. [Lau,2013] Lau, G., Liu H. H. T. "Real-Time Path Planning Algorithm for Autonomous Border Patrol: Design, Simulation, and Experimentation." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013.
32. [Lecking, 2006] Lecking, D., Wulf, O., & Wagner, B.: "Variable pallet pick-up for automatic guided vehicles in industrial environments". *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pag. 1169-1174, 2006.
33. [Lefebvre,2004] Lefebvre, O., Lamiriaux, F., Pradalier, C., Fraichard, T. "Obstacles avoidance for car-like robots integration and experimentation on two robots". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 5, pag. 4277-4282, 2004.
34. [Liang,2005] Liang, T.C., et al. "Practical and flexible path planning for car-like mobile robot using maximal-curvature cubic spiral." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 52(4), pag. 312-335, 2005.
35. [Liang, 2012] Z. Liang, G. Zheng, J. Li, "Automatic parking path optimization based on bezier curve fitting", *IEEE Conference on Automation and Logistics*, pp. 583-587.
36. [Meidenbauer,2007] Meidenbauer, K. R. "An investigation of the clothoid steering model for autonomous vehicles" *Doctoral dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
37. [Miah.2017] Miah, M., Farkas, P., Gueaieb, W., Chaoui, H., Hossain, M. A. "Linear time-varying feedback law for vehicles with ackermann steering", 2017.
38. [Montés,2008] Montés, N., Herraiez, A., Armesto, L., Tornero, J. "Real-time clothoid approximation by Rational Bezier curves". *IEEE International Conference Robotics and Automation*, pag. 2246-2251, 2008.
39. [Ni, 2014] Ni J. at al. , "An improved VFF approach for robot path planning in unknown and dynamic environments", *Mathematical Problems in Engineering* (2014), 1-10.
40. [Palmieri,2016] Palmieri, L., Koenig, S., Arras, K. O. "RRT-based nonholonomic motion planning using any-angle path biasing." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pag. 2775-2781, 2016.
41. [Pantea,2011] Pantea A., Gîrbacia F., **Gîrbacia T.**, "Development of an Advanced Driver Assistance System Using RGB-D Camera", *International Congress of Automotive and Transport Engineering, CONAT 2016*, Springer, Cham, pag. 746-751, 2017,
42. [Rivera,2014] Rivera, N., L. Illanes and J.A. Baier, "Real-Time Pathfinding in Unknown Terrain via Reconnection with an Ideal Tree ", *Advances in Artificial Intelligence*, pag. 69-80, 2014.
43. [Rohmer, 2013] Rohmer, E., Singh, S.P., Freese, M. "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework ", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pag. 1321-1326, 2013.

44. [Sabelhaus, 2013] Sabelhaus, D., et al. "Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres." *Biosystems Engineering*, vol. 116(4), pag. 399-409, 2013.
45. [Salzman, 2016] Salzman, O., Halperin, D. "Asymptotically near-optimal RRT for fast, high-quality motion planning." *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, nr. 3, pag. 473-483, 2016.
46. [Saska, 2016] Saska, M., Spurný, V., Vonásek, V. "Predictive control and stabilization of nonholonomic formations with integrated spline-path planning." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pag. 379-397, 2016.
47. [Shaojie, 2011] Shaojie, S. et al. Autonomous multi-floor indoor navigation with a computationally constrained MAV., *Robotics and automation (ICRA)*, (2011), 20-25.
48. [Shan, 2015] Shan, Y., Chen, C., Yang, W., Li, B. "Improved path tracking approach for unmanned vehicles based on clothoid curve". In *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pag. 493-498, 2015.
49. [Souissi, 2013] Souissi, O., Benatitallah, R., Duvivier, D., Artiba, A., Belanger, N., Feyzeau, P. "Path planning: A 2013 survey." *Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, pag. 1-8, 2013.
50. [Spanogianopoulos, 2016] Spanogianopoulos, S., Sirlantzis, K. "Car-Like Mobile Robot Navigation: A Survey". Springer Berlin Heidelberg In *Intelligent Computing Systems*, pag. 299-327, 2016.
51. [Sule, 2015] Sule, S., Gupta, K., Desai, V. "Autonomous cars: the future of roadways." *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, vol. 2, nr. 6, pag. 203-206, 2015.
52. [Suzuki, 2006] Suzuki, Y., Kagami, S., Kuffner, J. J. "Path planning with steering sets for car-like robots and finding an effective set." *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pag. 1221-1226, 2006.
53. [Vilca, 2016] Vilca, J. M., Adouane, L., Mezouar, Y. "Optimal Multi-Criteria Waypoint Selection for Autonomous Vehicle Navigation in Structured Environment". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 82, nr.2, pag. 301-324, 2016.
54. [Villagra, 2012] Villagra J., et al. "Smooth path and speed planning for an automated public transport vehicle." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no.2, pag. 252-265, 2012.
55. [Wang, 2007] Wang, H., Chen, Y., Soueres, P. "An efficient geometric algorithm to compute time-optimal trajectories for a car-like robot". *IEEE Conference on Decision and Control*, pag. 5383-5388, 2007.
56. [Xu, 2014] Xu M., Lee J., Bahn S.K., Kang B.Y. "Path planning for robot using Population-Based Incremental Learning", *IEEE 4th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, pag. 474-479, 2014.
57. [Yarmohamadi, 2011] Yarmohamadi M., Javadi, H. H. S., Erfani, H. "Improvement of robot path planning using particle swarm optimization in dynamic environments with mobile obstacles and target," *Advanced Studies in Biology*, vol. 3, pag. 43-53, 2011.
58. [Yu. 2013] Yu J., LaValle, S. M. "Multi-agent path planning and network flow", *Algorithmic Foundations of Robotics X*, pag. 157-173, 2013.
59. [***f] <https://pwayblog.com/2016/07/03/the-clothoid/>

REZUMAT

Studiile abordate în cadrul acestei teze de doctorat se referă, cu precădere la modelarea și planificarea traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome de transport intern în medii industriale. Pentru planificarea traseelor AaTI se propune utilizarea algoritmului RRT îmbunătățit datorită caracteristicii acestuia de a căuta eficient spațiile neconvexe pentru a genera toate traseele posibile. Pentru ca autovehiculul autonom să se deplaseze uniform de-a lungul traseului generat, acesta este modelat cu subtrasee de tip segment de dreaptă și arc de cerc și apoi netezit prin utilizarea curbelor de tip arc de clotoidă cu scopul de a obține deplasări continue de-a lungul virajelor componente. De asemenea, au fost concepute și elaborate modelele matematice ale traseelor simple cu două viraje în șase variante determinate de toate posibilitățile de plecare/sosire cu fața sau cu spatele, cu viraje cu aceleași sensuri sau cu sensuri opuse și cu inversare sau fără inversare la plecare/sosire. Planificarea traiectoriei este realizată prin stabilirea legilor vitezelor de-a lungul parcurgerii traseului prin corelația motoarelor de propulsie și de virare. Evaluarea modului în care autovehiculul autonom urmărește traseul planificat a fost realizată prin realizarea simulării în mediul virtual și prin realizarea experimentelor în mediul real în urma dezvoltării unui miniautovehicul autonom. Planificarea traiectoriilor în mediul virtual s-a realizat prin dezvoltarea unei aplicații software în limbajul de programare Matlab care are scopul de a controla modul în care autovehiculul virtual se deplasează pe traiectorii impuse. Pentru controlul deplasării miniautovehiculului autonom a fost dezvoltat un program în mediul de programare IDE Arduino care citește, interpretează și execută comenzi de urmărire a traseului. Din analiza rezultatelor experimentelor efectuate, s-a putut observa că traseele planificate utilizând algoritmii dezvoltați în această lucrare au fost urmărite cu abateri reduse.

ABSTRACT

The studies approached in this PhD thesis refer, especially to the modeling and planning of the paths and trajectories for autonomous vehicles for internal transport in industrial environments. For the path planning, the author proposes to use of RRT algorithm because of its features to efficiently search for non-convex spaces to generate all the possible paths from which the shortest one is selected. In order for the autonomous vehicle to uniformly move along the generated path, the path is smoothed by using a clothoid auxiliary curve in order to obtain a linear variation of the curvature of the component turns. Mathematical models were also created for simple paths with two turns: paths without motion direction reversal and with changing or maintaining the veering direction of the two turns and paths with reversing the motion direction at the departure or arrival. Planning the trajectory is accomplished by determining the speed variation along the path by correlating the propulsion and steering engines. The assessment on the way the autonomous vehicle follows the planned path was achieved by realizing simulations in the V-REP virtual environment and by performing experiments in a real environment after developing a minivehicle. Trajectory planning in the virtual industrial environment has been achieved by developing an application in the Matlab programming language that aims to control how the virtual vehicle moves along four planned paths. In order to control the movement of the minivehicle, a program was developed in the IDE Arduino that reads and interprets a set of commands saved on an SD card. From the analysis of the experimental results, it could be noticed that the paths planned using the algorithms developed in this paper were followed by an autonomous vehicles for internal transport without intersecting the obstacles in the environment.

Curriculum Vitae



Nume: DINCĂ (CĂS. GÎRBACIA) TEODORA-MIRUNA

Data și locul nașterii:

Naționalitate: Română

Adresă: B-dul Eroilor nr. 29, Brașov, România

E-mail: teodora.girbacia@unitbv.ro

Studii:

- Octombrie, 2013 – prezent, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, Departamentul de Autovehicule și Transport rutier, *Titlul tezei de doctorat – Contribuții privind modelarea, planificarea și simularea traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome de transport intern în medii industriale.*
- Octombrie, 2011 – Iunie, 2013, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Catedra de Automatică și Tehnologia Informației: *Master în Informatică Virtuală.*
- Octombrie, 2007 – Iunie, 2011, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată.

Experiență profesională:

- Iulie -August 2009, Stagiul de practică, IQest Romania, Brașov.
- Aprilie 2014 -Iunie 2015, Bursă doctorală în cadrul proiectului POSDRU/159/1.5/S/137070

Cunoștințe în domeniul științelor ingineresti și al calculatoarelor:

- Limbaje de programare: C, C++, Java, QT, HTML
- Proiectare și simulare: Matlab – Simulink, MAPLE
- Programe editare: Office

Publicații: 21 articole

- 2 lucrare în Jurnal ISI cu factor de impact
- 8 lucrări în proceedings ISI și IEEE
- 11 lucrări indexate BDI
- Participare la conferințe internaționale în Spania și Romania

Limbi străine:

- Engleză – avansat
- Franceză – mediu

Curriculum Vitae



Name: DINCĂ (CĂS. GÎRBACIA) TEODORA-MIRUNA

Date and birth place:

Nationality: Romanian

Adress: B-dul Eroilor nr. 29, Braşov, Romania

E-mail: teodora.girbacia@unitbv.ro

Studies:

- October 2013 - present, Transilvania University of Brasov, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Vehicles and transport, Phd thesis name - *Contributions regarding path and trajectory modelling, planning and simulation for internal transport autonomous vehicles in industrial environment.*
- October 2011 - June, 2013, Transilvania University of Brasov, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Automation and information technology: Master in Virtual Informatics.
- October 2007 - June, 2011, Transilvania University of Brasov, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Automatics and Applied informatics.

Professional experience:

- July-August 2009, Internship, IQuest Romania, Braşov.
- April 2014-June 2015, Doctoral scholarship in POSDRU/159/1.5/S/137070

Engineering and computer science skills:

- Programming Languages: C, C + +, Java, QT, HTML
- Design and Simulation: Matlab - Simulink, MAPLE
- Editing Software: Office

Publications: 21 articles

- 2 papers in an ISI journal with impact factor
- 8 papers in IEEE/ISI Proceedings
- 11 papers in BDI publications
- Participation at international conferences in Spain and Romania

Languages:

- English – advanced
- French – medium