



Universitatea  
Transilvania  
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Inginerie Mecanică

M.Sc. inform. Mihai Kocsis

**Contribuții privind concepția, dezvoltarea  
și implementarea autovehiculelor  
autonome pentru transport mărfuri ușoare  
în medii pietonale**

**Contributions on design, development and  
implementation of autonomous vehicles  
for goods transportation in pedestrian  
areas**

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof.dr.ing. Gheorghe-Leonte MOGAN

BRAȘOV, 2021



D-lui(D-nei) .....

**COMPONENȚA**  
**Comisiei de doctorat**

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov  
Nr. .... din .....

PREȘEDINTE:	Prof.dr.ing. Adrian ȘOICA Universitatea Transilvania din Braşov
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof.dr.ing. Gheorghe-Leonte MOGAN Universitatea Transilvania din Braşov
REFERENȚI:	Prof.dr.ing. Raoul ZÖLLNER Universitatea din Heilbronn, Germania Prof.dr.ing. ec. Radu Cătălin ȚARCĂ Universitatea din Oradea Prof.dr.ing. Nicolae ISPAS Universitatea Transilvania din Braşov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: ....., ora .....,  
sala .....

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise  
electronic, în timp util, pe adresa: [kocsis.mihai@unitbv.ro](mailto:kocsis.mihai@unitbv.ro)

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

Vă mulțumim.

## CUPRINS

	Pg. teza	Pg. rezumat
<b>PREFAȚĂ.....</b>	15	9
<b>LISTA FIGURILOR.....</b>	17	-
<b>LISTA TABELELOR.....</b>	20	-
<b>LISTA ALGORITMILOR.....</b>	21	-
<b>LISTA ABREVIERILOR.....</b>	22	10
<b>1. INTRODUCERE.....</b>	25	11
1.1 Aspecte generale.....	25	11
1.2 Necesitatea dezvoltării temei.....	26	11
1.3 Obiectivele cercetării.....	26	11
1.4 Metodologia și etapele cercetării.....	27	12
1.5 Structura și conținutul tezei.....	28	12
<b>2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ȘI REALIZĂRILOR ÎN DOMENIUL AUTOVEHICULELOR AUTONOME DE SERVICII .....</b>	33	15
2.1 Introducere.....	33	-
2.2 Tipuri de autovehicule autonome.....	34	15
2.3 Scurt istoric.....	36	16
2.3.1 Autovehicule autonome pentru căi rutiere.....	37	-
2.3.2 Vehicule autonome pentru medii pietonale.....	39	16
2.3.3 Autovehicule autonome pentru alte medii.....	41	-
2.4 Structuri ale vehiculelor autonome de servicii.....	42	16
2.4.1 Structura generală a vehiculelor autonome.....	42	16
2.4.2 Sisteme de locomoție și propulsie.....	42	17
2.4.3 Sisteme senzoriale.....	44	17
2.4.4 Fuziunea datelor senzoriale.....	45	18
2.5 Modelarea mediilor de operare a autovehiculelor autonome.....	48	18
2.6 Planificarea sarcinilor autovehiculelor autonome de servicii.....	49	19
2.7 Localizarea autovehiculelor autonome în mediile de operare.....	51	20
2.7.1 Aspecte generale.....	51	-
2.7.2 Analiză privind utilizarea senzorilor pentru procesul de localizare....	51	-
2.7.3 Tehnici de îmbunătățire a localizării.....	53	-
2.8 Modelarea și planificarea traseelor și trajectoriilor.....	53	20
2.8.1 Definiții și descriere.....	53	20
2.8.2 Planificarea traseelor.....	55	-
2.8.2.1 Definiții și descriere.....	55	-
2.8.2.2 Algoritmi de căutare folosiți frecvent în practică.....	57	-
2.8.3 Planificarea manevrelor.....	58	-
2.8.4 Planificarea trajectoriilor.....	58	-
2.9 Strategii decizionale și de programare a vehiculelor autonom.....	61	-
2.10 Sisteme de siguranță a vehiculelor autonome.....	62	20
2.11 Concluzii și justificarea tematicii.....	63	21
<b>3. PLANIFICAREA SARCINILOR VEHICULELOR AUTONOME PENTRU SERVICII ÎN MEDII PIETONALE.....</b>	65	23
3.1 Introducere.....	65	23
3.2 Arhitectura generală a sistemului de planificare a sarcinilor.....	66	23
3.3 Structura și funcționarea sistemului de planificare a sarcinilor de livrare colete.....	67	25
3.4 Componente ale sistemului de planificare a sarcinilor de livrare colete.....	70	27
3.4.1 Subsistem auxiliar.....	70	-
3.4.2 Subsistemul de gestiune clienți/sarcini.....	70	-
3.4.3 Aplicații client.....	71	-
3.4.4 Centrul logistic de monitorizare.....	72	-
3.4.5 Subsistemul de planificare și supraveghere sarcini.....	73	27
3.5 Algoritm pentru planificarea interactivă a sarcinilor.....	74	27
3.5.1 Structura datelor și relații de calcul.....	74	27
3.5.2 Algoritm de planificare.....	76	29
3.6 Structura software a subsistemului de planificare.....	83	-

3.7 Concluzii.....	86	30
<b>4. VEHICUL AUTONOM PENTRU SERVICII ÎN MEDII PIETONALE .....</b>	<b>87</b>	<b>31</b>
4.1 Aspecte generale.....	87	31
4.2 Concept general de proiectare, dezvoltare și testare vehicule autonome prin transformare.....	88	32
4.3 Implementarea conceptului general de transformare pentru un vehicul autonom de transport în medii pietonale.....	92	35
4.3.1 Alegere și descriere vehicul clasic.....	92	35
4.3.2 Sistemul de comandă și control.....	93	36
4.3.3 Subsistemul de accelerare .....	94	-
4.3.4 Subsistemul de frânare.....	96	-
4.3.5 Subsistemul de schimbare a sensului.....	97	-
4.3.6 Subsistemul de direcție.....	98	-
4.3.7 Subsistemul de alimentare .....	100	-
4.3.8 Subsistemul senzorial.....	101	-
4.3.9 Subsistemul de siguranță .....	104	38
4.3.9.1 Aspecte generale .....	104	38
4.3.9.2 Conceptul de siguranță fermă.....	105	38
4.3.9.3 Implementarea conceptului de siguranță fermă .....	108	40
4.3.10 Pachete software implementate la nivel MCU.....	112	42
4.4 Concluzii.....	114	43
<b>5. LOCALIZAREA VEHICULELOR AUTONOME ÎN MEDII PIETONALE .....</b>	<b>115</b>	<b>44</b>
5.1 Introducere.....	115	44
5.2 Implementarea procedurilor de localizare.....	115	44
5.2.1 Date obținute prin odometrie .....	115	44
5.2.2 Cartografierea mediului de navigare și localizarea pe harta digitală.....	116	45
5.2.2.1 Cartografierea mediului de navigare .....	117	45
5.2.2.2 Localizarea pe hartă digitală 2D de tip grilă .....	119	47
5.2.2.3 Localizarea pe hartă topologică.....	120	47
5.2.3 Localizarea cu GNSS .....	126	49
5.3 Filtrul Kalman extins folosit pentru localizare.....	127	50
5.4 Concluzii.....	134	54
<b>6. PLANIFICAREA TRASEELOR ȘI A TRAIECTORIILOR.....</b>	<b>135</b>	<b>55</b>
6.1 Planificarea traseelor globale.....	135	55
6.1.1 Analiza soluțiilor existente pentru planificarea traseelor în medii pietonale.....	135	55
6.1.2 Corijarea căilor pentru planificarea traseelor.....	136	56
6.1.3 Reguli de navigare a vehiculelor autonome în medii pietonale.....	137	56
6.1.4 Modelarea și învățarea traseelor .....	137	57
6.2 Planificarea traseelor locale și a traiectoriilor.....	140	58
6.2.1 Analiză privind planificarea traiectoriilor în medii pietonale .....	140	58
6.2.2 Modulul de planificare/urmărire a traiectoriilor locale.....	142	60
6.2.3 Aspecte privind implementarea modulului de planificare/urmărire a traiectoriilor locale .....	144	61
6.3 Concluzii.....	146	63
<b>7. TESTE ȘI STUDII EXPERIMENTALE .....</b>	<b>147</b>	<b>64</b>
7.1 Descriere generală a mediului pietonal pentru experimente.....	147	64
7.2 Testarea și certificarea vehiculului în vederea experimentelor.....	149	65
7.2.1 Testarea dispozitivelor ECU, modulelor software și a subsistemului senzorial.....	149	65
7.2.2 Testarea subsistemului bumper .....	149	65
7.2.3 Teste necesare pentru obținerea autorizației de operare în medii pietonale.....	150	66
7.3 Experimente de planificare a sarcinilor.....	152	67
7.3.1 Analiza cererilor și comportamentelor clienților.....	152	67
7.3.2 Execuția sarcinilor solicitate de clienți .....	153	68
7.3.3 Eficiența și calitatea planificării sarcinilor .....	154	68
7.4 Experimente de localizare a vehiculului autonom.....	157	70

7.4.1	Descrierea mediului experimental de localizare.....	157	70
7.4.2	Localizare cu odometrie.....	159	-
7.4.2.1	Localizare cu odometrie pe traseul A .....	159	-
7.4.2.2	Localizare cu odometrie pe traseul B .....	160	-
7.4.3	Localizare cu odometrie și GNSS.....	160	-
7.4.3.1	Localizare cu odometrie și GNSS pe traseul A .....	160	-
7.4.3.2	Localizare cu odometrie și GNSS pe traseul B .....	161	-
7.4.4	Localizare cu odometrie și AMCL (LIDAR).....	162	-
7.4.4.1	Localizare cu odometrie și AMCL (LIDAR) pe traseul A .....	162	-
7.4.4.2	Localizare cu odometrie și AMCL (LIDAR) pe traseul B .....	163	-
7.4.5	Localizare cu odometrie, GNSS ȘI AMCL (LIDAR) .....	163	72
7.4.5.1	Localizare cu odometrie, GNSS ȘI AMCL (LIDAR) pe traseul A .....	163	72
7.4.5.2	Localizare cu odometrie, GNSS ȘI AMCL (LIDAR) pe traseul B .....	165	72
7.4.6	Localizare cu markeri reflectorizanți.....	166	73
7.4.7	Analiza rezultatelor experimentelor de localizare în mediul pietonal.....	167	74
7.5	Teste de planificare a traseelor și a traiectoriilor.....	169	75
7.5.1	Teste de planificare a traseelor globale .....	169	75
7.5.2	Teste de planificare a traseelor și traiectoriilor locale .....	170	76
7.5.2.1	Analiza rezultatelor obținute la navigarea în zona B1 .....	172	78
7.5.2.2	Analiza rezultatelor obținute la navigarea în zona B2 .....	173	78
7.5.2.3	Analiza rezultatelor obținute la navigarea în zona B3 .....	174	79
7.6	Teste de evaluare a performanțelor globale.....	174	79
7.7	Concluzii.....	176	80
<b>8.</b>	<b>CONCLUZII, CONTRIBUȚII PROPRII, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI NOI DIRECȚII DE CERCETARE .....</b>	<b>179</b>	<b>82</b>
8.1	Concluzii finale.....	179	82
8.2	Contribuții proprii.....	183	86
8.3	Valorificarea rezultatelor cercetării.....	184	87
8.3.1	Lucrări publicate.....	184	87
8.3.2	Participări la conferințe și expoziții .....	185	88
8.3.3	Participări la contracte de cercetare - dezvoltare.....	186	89
8.4	Direcții viitoare de cercetare.....	186	89
	<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>187</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXE.....</b>	<b>199</b>	<b>-</b>
	ANEXA 1. Funcțiile pentru planificarea sarcinilor .....	199	-
	ANEXA 2. Certificatul de omologare tehnică al vehiculului .....	214	-
	ANEXA 3. Arborele sistemelor de coordonate .....	216	-
	ANEXA 4. Subprogramul MarkerLocalization.....	217	-
	ANEXA 5. Subprogramul LokalizationEKF .....	226	-
	ANEXA 6. Aspecte privind integrarea agregatelor utilitare în vehicule autonome pietonale. Studiu de caz .....	240	-
	<b>REZUMAT.....</b>	<b>243</b>	<b>95</b>

<b>CONTENT</b>	Pg. thesis	Pg. abstract
<b>PREFACE</b> .....	15	9
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	17	-
<b>LISTA OF TABLES</b> .....	20	-
<b>LISTA OF ALGORITHMMS</b> .....	21	-
<b>LISTA OF ABBREVIATIONS</b> .....	22	10
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	25	11
1.1 General aspects.....	25	11
1.2 Motivation.....	26	11
1.3 Research objectives.....	26	11
1.4 Research steps and methodology.....	27	12
1.5 Thesis structure and content.....	28	12
<b>2. STATE OF THE ART REGARDING AUTONOMOUS VEHICLES THAT EXECUTE SERVICES</b> .....	33	15
2.1 Introduction.....	33	-
2.2 Types of autonomous vehicles.....	34	15
2.3 Brief history.....	36	16
2.3.1 Autonomous vehicles for urban roads.....	37	-
2.3.2 Autonomous vehicles for pedestrian environments.....	39	16
2.3.3 Autonomous vehicles for other environments.....	41	-
2.4 Structure of autonomous service-vehicles.....	42	16
2.4.1 General structure of autonomous vehicles.....	42	16
2.4.2 Locomotion and propulsion systems.....	42	17
2.4.3 Sensor systems.....	44	17
2.4.4 Sensor data fusion.....	45	18
2.5 Environment mapping for autonomous driving.....	48	18
2.6 Mission planning of autonomous vehicles.....	49	19
2.7 Localization of autonomous vehicles in operation environments.....	51	20
2.7.1 General aspects.....	51	-
2.7.2 Analysis regarding sensor usage in the localization process.....	51	-
2.7.3 Localization improvement tehniques.....	53	-
2.8 Modeling and planning of path and trajectories.....	53	20
2.8.1 Definition and description.....	53	20
2.8.2 Path planning.....	55	-
2.8.2.1 Definition and description.....	55	-
2.8.2.2 Search algorithms frequently used.....	57	-
2.8.3 Maneuvre planning.....	58	-
2.8.4 Trajectories planning.....	58	-
2.9 Decision making and programming strategies for autonomous vehicles...	61	-
2.10 Safety systems for autonomous driving.....	62	20
2.11 Conclusion and topic justification.....	63	21
<b>3. MISSION PLANNING OF AUTONOMOUS VEHICLES THAT EXECUTE SERVICES</b> .....	65	23
3.1 Introduction.....	65	23
3.2 General architecture of the mission planning system.....	66	23
3.3 Structure and workflow of the mission planning system.....	67	25
3.4 Components of the delivery system.....	70	27
3.4.1 Auxiliary subsystem.....	70	-
3.4.2 User and mission management subsystem.....	70	-
3.4.3 Client applications.....	71	-
3.4.4 Logistic center for monitoring.....	72	-
3.4.5 Mission planning and supervision subsystem.....	73	27
3.5 Algorithm for interactive mission planning.....	74	27
3.5.1 Data structure and computational relationships.....	74	27
3.5.2 Planning algorithm.....	76	29
3.6 Software structure of the planning subsystem.....	83	-
3.7 Conclusion.....	86	30

<b>4. AUTONOMOUS VEHICLE FOR SERVICES IN PEDESTRIAN ENVIRONMENTS</b> .....	87	31
4.1 General aspects.....	87	31
4.2 General concept of design, development and testing of autonomous vehicles by transformation.....	88	32
4.3 Implementation of the general concept of transformation for an autonomous transport vehicle in pedestrian environments.....	92	35
4.3.1 Choice and description of the classic vehicle.....	92	35
4.3.2 Command and control system.....	93	36
4.3.3 Acceleration subsystem.....	94	-
4.3.4 Braking subsystem.....	96	-
4.3.5 Driving direction subsystem.....	97	-
4.3.6 Steering subsystem.....	98	-
4.3.7 Charging subsystem.....	100	-
4.3.8 Sensor subsystem.....	101	-
4.3.9 Safety subsystem.....	104	38
4.3.9.1 General aspects.....	104	38
4.3.9.2 Safety concept.....	105	38
4.3.9.3 Implementation of the safety concept.....	108	40
4.3.10 Software packages on MCU level.....	112	42
4.4 Conclusion.....	114	43
<b>5. LOCALIZATION OF AUTONOMOUS VEHICLES IN PEDESTRIAN ENVIRONMENTS</b> .....	115	44
5.1 Introduction.....	115	44
5.2 Implementation of localization procedures.....	115	44
5.2.1 Odometry data.....	115	44
5.2.2 Mapping and localization on the digital map.....	116	45
5.2.2.1 Mapping the navigation environment.....	117	45
5.2.2.2 Localization on the 2D digital grid map.....	119	47
5.2.2.3 Localization on the topological map.....	120	47
5.2.3 GNSS Localization.....	126	49
5.3 Extended Kalman Filter for localization.....	127	50
5.4 Conclusion.....	134	54
<b>6. PATH AND TRAJECTORIES PLANNING</b> .....	135	55
6.1 Global path planning.....	135	55
6.1.1 Analysis of existing solutions for global path planning in pedestrian environments.....	135	55
6.1.2 Map adaptation for path planning.....	136	56
6.1.3 Navigation rules of autonomous vehicles in pedestrian environments.....	137	56
6.1.4 Path modeling and learning.....	137	57
6.2 Local path and trajectories planning.....	140	58
6.2.1 Analysis regarding trajectories planning in pedestrian environments.....	140	58
6.2.2 Trajectories planning module.....	142	60
6.2.3 Aspects regarding the implementation of the trajectories planning module.....	144	61
6.3 Conclusion.....	146	63
<b>7. TESTS AND EXPERIMENTAL STUDIES</b> .....	147	64
7.1 General description of the experimental pedestrian environment.....	147	64
7.2 Testing and certification of the vehicle for experiments.....	149	65
7.2.1 Testing of ECUs, software modules and sensor subsystem.....	149	65
7.2.2 Testing the bumper subsystem.....	149	65
7.2.3 Tests required to obtain a license to operate in pedestrian areas.....	150	66
7.3 Mission planning experiments.....	152	67
7.3.1 Analysis of user requests and reaction.....	152	67
7.3.2 Execution of user requests.....	153	68
7.3.3 Efficiency and quality of the mission planning.....	154	68
7.4 Localization experiments with the autonomous vehicle.....	157	70

7.4.1	Description of the experimental localization environment.....	157	70
7.4.2	Localization with odometry .....	159	-
7.4.2.1	Localization with odometry on path A.....	159	-
7.4.2.2	Localization with odometry on path B.....	160	-
7.4.3	Localization with odometry and GNSS.....	160	-
7.4.3.1	Localization with odometry and GNSS on path A .....	160	-
7.4.3.2	Localization with odometry and GNSS on path B .....	161	-
7.4.4	Localization with odometry and AMCL (LIDAR).....	162	-
7.4.4.1	Localization with odometry and AMCL (LIDAR) on path A .....	162	-
7.4.4.2	Localization with odometry and AMCL (LIDAR) on path B .....	163	-
7.4.5	Localization with odometry, GNSS and AMCL (LIDAR).....	163	72
7.4.5.1	Localization with odometry, GNSS and AMCL (LIDAR) on path A .....	163	72
7.4.5.2	Localization with odometry, GNSS and AMCL (LIDAR) on path B .....	165	72
7.4.6	Localization with reflective markers.....	166	73
7.4.7	Analysis of the localization experiments results in pedestrian environments .....	167	74
7.5	Tests regarding path and trajectories planning.....	169	75
7.5.1	Tests regarding global path planning .....	169	75
7.5.2	Tests regarding local path and trajectories planning.....	170	76
7.5.2.1	Analysis of navigating results in zone B1 .....	172	78
7.5.2.2	Analysis of navigating results in zone B2 .....	173	78
7.5.2.3	Analysis of navigating results in zone B3 .....	174	79
7.6	Global performance evaluation.....	174	79
7.7	Conclusion.....	176	80
<b>8.</b>	<b>FINAL CONCLUSION, PERSONAL CONTRIBUTIONS, RESULTS DISSEMINATION AND FUTURE WORK.....</b>	<b>179</b>	<b>82</b>
8.1	Final conclusion.....	179	82
8.2	Personal contributions.....	183	86
8.3	Dissemination of research results.....	184	87
8.3.1	Publications.....	184	87
8.3.2	Conferences and exhibition attendances .....	185	88
8.3.3	Participation in research projects .....	186	89
8.4	Future work.....	186	89
	<b>REFERENCES.....</b>	<b>187</b>	<b>90</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>199</b>	<b>-</b>
	ANNEX 1. Implementation of the mission planning functions .....	199	-
	ANNEX 2. Functional safety certificate of the vehicle .....	214	-
	ANNEX 3. Coordinate systems tree .....	216	-
	ANNEX 4. MarkerLocalization .....	217	-
	ANNEX 5. LokalizationEKF.....	226	-
	ANNEX 6. Aspects regarding integration of aggregates on autonomous vehicles. Case study .....	240	-
	<b>ABSTRACT.....</b>	<b>243</b>	<b>95</b>



# PREFATĂ

În contextul evoluției tehnologiilor de automatizare și digitalizare a vehiculelor autonome în diverse medii de operare și datorită tendințelor de reurbanizare existente vehiculele autonome pentru executarea de servicii, precum cele logistice de transport marfă, colete, persoane, dar și alte servicii precum îngrijire de vegetație, curățenie stradală, de salubritate etc. sunt considerate soluții inovative de viitor. Aproximativ o treime din traficul urban este trafic comercial. Vehiculele clasice de livrare care se opresc pe stradă în timp ce șoferul este ocupat cu livrarea, sunt deja considerate un obstacol pentru fluiditatea traficului rutier. La aceasta se adaugă emisiile și poluarea fonică a vehiculelor care sunt echipate de regulă cu un motor termic. Prin urmare utilizarea de vehicule electrice autonome mici are mare potențial de îmbunătățire a logisticii urbane. Aici cerințele logistice sunt caracterizate de o eterogenitate deosebită prin: o societate în schimbare, posibilitatea de comenzi online și disponibilitatea furnizorului de livrare la termen, individualizarea dorințelor clienților, creșterea presiunii economice asupra furnizorilor de servicii logistice, în special din cauza lipsei de spațiu și a întârzierilor legate de congestia rutieră, dar și din ce în ce mai mult de disponibilitatea limitată a personalului, precum și de presiunea pentru limitarea poluării atmosferice. Prin urmare logistica urbană este considerată a fi un domeniu deosebit de exigent al viitorului. Astfel selecția vehiculelor de livrare, proiectarea proceselor logistice, interacțiunea clienților sunt factori care duc la o gamă largă de cerințe pe care vehiculele de livrare trebuie să le îndeplinească.

Un rol important în respectarea acestor cerințe de vehicule autonome dedicate execuției sarcinilor impune, printre altele, o localizare precisă în mediile pietonale precum și o planificare a traseelor și a traiectoriilor, dependente de această localizare și care trebuie asociate sarcinilor planificate pentru a respecta timpii de execuție estimați.

Teza de doctorat se concentrează pe planificarea, monitorizarea și executarea de sarcini autonome de transport colete în medii strict pietonale. În cadrul cercetărilor efectuate, s-a pus baza unui sistem de planificare sarcini interactiv, care integrează atât clienții (beneficiarii sarcinilor solicitate), sisteme auxiliare și vehiculele autonome, concepute și dezvoltate în lucrare, prin transformare de vehicule clasice cu respectarea normelor de siguranță în vigoare. Vehiculele dezvoltate sunt capabile să se localizeze și să navigheze precis în medii pietonale, în vederea execuției sarcinilor de livrare colete. Teste experimentale pentru validarea cercetărilor au avut loc într-un mediu pietonal real (laborator real), într-un cartier nou cu aprox. 800 locuitori încadrat în cadrul târgului de horticultură la nivel federal (BUGA - BUndesGArtenschau), pe o perioadă de aprox. 6 luni în 2019. Cercetările tehnice au fost completate de cercetări de acceptanță, efectuate de o echipă de psihologi.

Mulțumesc conducătorului științific prof. dr. ing. Gheorghe-Leonte Mogan, pentru sprijinul, experiența din domeniul ingineriei împărtășită, sfaturile creative și răbdarea duse în limitele profesionalismului pe întreaga perioadă a activității mele de cercetare.

Mă adresez de asemenea cu deosebită recunoștință și mulțumiri prof. dr. ing. Raoul Zöllner, de la Universitatea din Heilbronn, mentorul care a contribuit la formarea mea profesională, cât și cea personală.

Cadrelor didactice și colegilor din catedra Autovehicule Rutiere și Transporturi a Universității Transilvania din Brașov și a membrilor comisiei de evaluare și examinare le mulțumesc pentru recomandările privind creșterea calității activității de cercetare.

Colegilor de la departamentul Automotive Systems Engineering de la Universitatea din Heilbronn le mulțumesc pentru posibilitatea de avea parteneri de discuții în ceea ce privește abordarea științifică a diferitelor tematici din cadrul proiectelor de cercetare.

Nu în ultimul rând, mulțumesc familiei mele pentru răbdarea, sprijinul moral și înțelegerea oferite până în acest moment al vieții, și celorlalte persoane dragi din viața mea.

# LISTA ABREVIERILOR

ADAS	Advanced Driver-Assistance Systems
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
ARA*	Anytime Replanning A*
BUGA	Bundesgartenschau
CAN	Controller Area Network
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
ECU	Electronic Control Unit
EKF	Extended Kalman Filter
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSLAM	Fast Simultaneous Localization and Mapping
FZV	Fahrzeug Zulassungsverordnung
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
ISO	International Organization of Standardization
KO-HAF	Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren
LAN	Local Area Network
lat	latitude
LIDAR	Light Detection and Raging
LIN	Local Interconnect Network
LM	Land Mark
lon	longitude
LTE	Long Term Evolution
MCU	Main Control Unit
$\mu$ C	Microcontroller
NCLS	National Conference of State Legislatures
PWM	Pulse Width Modulation
REST	Representational State Transfer
ROS	Robotic Operating System
RRT	Rapid Random Tree
RTK	Real Time Kinematics
Rviz	ROS Visualization
SBPL	Search Based Planning Library
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
TCP	Transfer Control Protocol
TEB	Time Elastic Band
TSP	Traveling Salesman Problem
TÜV	Technischer Überwachungsverein
USB	Universal Serial Bus
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VPN	Virtual Private Network
Vrep	Virtual robot experimentation platform

# 1. INTRODUCERE

## 1.1 ASPECTE GENERALE

Actuala teza de doctorat abordează aspecte din sfera tematicilor navigare autonomă și electromobilitate și se concentrează pe o ramură puțin exploatată a navigării vehiculelor autonome în medii de operare din *zone strict pietonale*. Aici pe lângă localizare și navigare, aceste vehicule trebuie să îndeplinească diverse *servicii de transport, utilitare etc.* Fiind vorba de zone pietonale acceptanța în rândul populației a acestor vehicule trebuie să fie una ridicată.

## 1.2 NECESITATEA DEZVOLTĂRII TEMEI

Studii în privința executării de servicii cu vehicule autonome, în zone unde participanții la trafic sunt aproape în totalitate pietoni sunt puține comparativ cu studiile vehiculelor autonome în zone urbane sau industriale. În multe orașe europene există însă zone în care accesul cu vehicule convenționale, conduse de un conducător auto, este interzis. Pentru furnizarea de servicii în aceste zone cu vehicule clasice este nevoie de aprobare specială, iar efectuarea acestora necesită timpi îndelungați, mai ales, în cazul în care zona este aglomerată. Zonele pietonale se diferențiază de cele rutiere prin faptul că nu există marcaje dedicate, reguli stricte de circulație, iar participanții nu sunt instruiți referitor la modul de operare a vehiculelor.

Pentru realizarea de servicii în medii pietonale este nevoie de implementarea unui concept unitar de dezvoltare pentru flote de vehicule autonome care să satisfacă cerințele clienților privind punctualitatea, siguranța și eficiența din punct de vedere al timpului de îndeplinire a acestora. Concepția și dezvoltarea de flote de vehicule autonome care să efectueze servicii în siguranță, presupune planificarea sarcinilor, localizarea și navigarea acestora în aceste medii și sunt aspecte care nu au fost abordate îndeajuns. Soluțiile propuse și implementate în urma studiilor realizate în cadrul acestei teze de doctorat au fost validate pentru situații funcționale reale. Aspecte detaliate privind justificarea tematicii cercetărilor dezvoltate în cadrul acestei teze de doctorat sunt prezentate în subcap. 2.11.

## 1.3 OBIECTIVELE CERCETĂRII

**Obiectivul principal** al tezei de doctorat este studiul, concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui sistem pilot bazat pe modele experimentale de vehicule autonome, care să fie capabile să se localizeze și să navigheze în medii pietonale în vederea efectuării de servicii de transport mărfuri (colete poștale, baxuri cu alimente ușoare etc.).

**Obiectivele specifice:**

- analiza bibliografică exhaustivă asupra cercetărilor teoretice și experimentale în domeniul dezvoltării autovehiculelor autonome, precum și a roboților autonomi capabili să navigheze și să îndeplinească sarcini în diverse medii;
- identificarea particularităților și a constrângerilor impuse de mediile pietonale, relevante pentru concepția unui vehicul autonom capabil să navigheze și să opereze în acestea;
- concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea a unui model experimental de vehicul autonom dedicat pentru navigarea în medii pietonale;
- concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea a unui sistem capabil să planifice sarcinile solicitate de clienți și efectuate de vehiculele autonome organizate în flote; această planificare trebuie să fie optimă atât din punct de vedere al timpului de execuție

cât și al timpului de răspuns la solicitări și să ofere alternative acceptabile de clienți în cazul în care solicitările acestora nu pot fi îndeplinite;

- concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui subsistem de mapare și localizare a vehiculului autonom dezvoltat în medii pietonale;
- concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui subsistem de planificare a traseelor și traiectoriilor necesare pentru navigare luând în considerare particularitățile și constrângerile specifice zonelor pietonale;
- implementarea algoritmilor dezvoltați în cadrul sistemului de comandă și control al vehiculului autonom;
- concepția și dezvoltarea de teste și studii experimentale care să valideze conceptele, performanțele vehiculului autonom și algoritmi implementați pentru navigarea în medii pietonale reale.

## 1.4 METODOLOGIA ȘI ETAPELE CERCETĂRII

Pornind de la obiectivele impuse precum și de la analiza critică privind realizările teoretice și experimentale în domeniul autovehiculelor autonome și roboticii mobile (v. cap. 2) s-a abordat o metodologie încadrabilă în conceptul, *Design Research* [March, 1995]. Această abordare constă într-un proces de cercetare bine structurat care bazat pe ultimele cunoștințe în domeniul de cercetare, presupune contopirea studiilor de cercetare (de concepție, dezvoltare, evaluare și validare) cu activitățile de proiectare (de modelare, simulare și construcție) în cadrul unui framework ciclic în cinci pași (Fig. 1.1) [Vaishnavi, 2007].

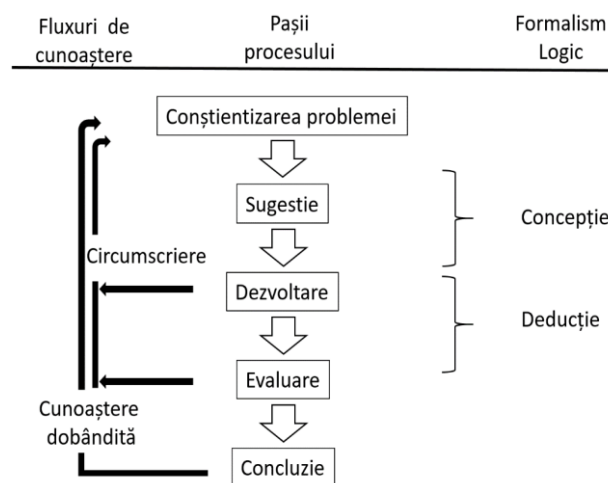


Fig. 1.1 Metodologia cercetării [Vaishnavi]

## 1.5 STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI

În capitolul 1, *Introducere*, se prezintă aspecte generale legate de cercetarea abordată în cadrul acestei teze de doctorat, necesitatea dezvoltării de vehicule autonome în vederea îndeplinirii de sarcini de transport mărfuri în medii strict pietonale, obiectivul principal și opt obiective specifice. Metodologia de cercetare aleasă facilitează progresul științific corelat cu dezvoltările tehnologice și practice din domeniul de cercetare.

În capitolul 2, *Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor în domeniul autovehiculelor autonome de servicii*, se face la început o clasificare a vehiculelor autonome în funcție de mediul de operare (rutier, pietonal, industrial, off-road, agricol) și al tipurilor de sarcini de realizat (transport, inspecție, servicii cu agregat suplimentar), este prezentat un scurt istoric, se prezintă structura generală a vehiculelor autonome, sisteme de locomoție și propulsie, tipuri de senzori: interni pentru supravegherea propriei stări și externi (LIDAR, GNSS, radar, de proximitate) pentru perceperea mediului și se face o comparație a performanțelor și capabilităților acestora. Sunt descrise tehnici de fuziune a datelor achiziționate cu sisteme senzoriale derivate ale filtrului Bayes (maximum likelihood, maximum posterior, filtre Kalman, filtre de particule), moduri de modelare a mediilor de operare, algoritmi și aplicații folosite pentru planificarea de sarcini, metode de localizare și aspecte referitoare la planificarea

traseelor și a traiectoriilor. Vehiculele autonome trebuie dezvoltate conform normei ISO26262 care prevede conform funcțiilor de siguranță ca sistemul să se afle permanent în stări sigure. În finalul capitolului se justifică tematica tezei de doctorat și se conturează obiectivele specifice.

Capitolul 3, *Planificarea sarcinilor vehiculelor autonome pentru servicii în medii pietonale*, prezintă un concept nou de planificare a sarcinilor în mod interactiv unde data, ora, destinația la care să fie executată sarcina, tipul și durata acesteia sunt specificate de client. Sunt definite criteriile de funcționare a sistemului bazate pe interactivitate continuă și răspunsuri ad-hoc la solicitări. Deoarece găsirea unei soluții algoritmice care să ofere o soluție optimă ținând cont de cerințele definite este anevoioasă, a fost dezvoltat un sistem ierarhic în care au fost prioritizate interacțiunile cu clienții care este descris în detaliu. Subsistemul de planificare are la bază algoritmul de planificare împreună cu structura datelor și relațiile de calcul folosite.

În capitolul 4, *Vehicul autonom pentru servicii în medii pietonale*, se prezintă o metodologie de proiectare și dezvoltare a unui vehicul autonom prin transformarea unui vehicul clasic existent. Transformarea este realizată astfel încât vehiculul poate naviga autonom sau poate fi condus, simultan sau separat și în regim manual de un conducător auto. De asemenea s-a dezvoltat conceptul de siguranță fermă, care presupune implementarea de dispozitive hardware și software care sunt testate reciproc redundant. În jurul vehiculului au fost definite zone de siguranță sesizate de senzori externi și în cazul în care este depistat un obstacol vehiculul, în funcție de zona de detectare, încetinește sau oprește. Pentru protejarea integrității corporale a pietonilor au fost dezvoltate două sisteme de tip bumper, folosind senzori hall încorporați într-un dispozitiv mecanic cu arcuri, respectiv cu senzori de presiune integrați într-un dispozitiv cu perne de aer. Aceste sisteme prezentate la nivel de prototip au fost integrate și testate în sistemul vehiculului autonom. Pentru certificare a fost ales și integrat un sistem de tip bumper comercial cu spumă poliedrică bazat pe senzori de tip panglică gata omologat. În finalul capitolului este descrisă implementarea software pentru MCU. Vehiculul autonom dezvoltat a obținut aprobarea de operare în medii pietonale de la asociația autorizată în acest scop, TÜV.

Capitolul 5, *Localizarea vehiculelor autonome în medii pietonale*, propune un concept de localizare adaptat pentru mediile pietonale, care are la bază un filtru de tip Kalman extins (EKF) care presupune fuziunea datelor achiziționate cu senzorii interni (viteză, accelerație, orientare și viteză unghiulară) cu datele de poziție (inclusiv abaterile) achiziționate cu GNSS, datele de poziție și orientare și abaterea acestora estimate folosind un filtru de particule de tip adaptive monte carlo (AMCL) care are ca date de intrare date LIDAR. În plus, în cadrul tezei de doctorat s-a dezvoltat o metodă nouă, bazată pe markeri reflectorizanți și o hartă topologică, de asemenea integrată în filtru. Pentru cartografierea mediului dintre metodele evaluate *hector* și *gmapping* care generează o hartă de tip grilă 2D și metoda hdl care generează o hartă 3D a fost aleasă metoda *gmapping* deoarece pentru procesul de localizare sunt necesare mai puține resurse de calcul, iar precizia este acceptabilă. Metoda de localizare bazată pe markeri reflectorizanți folosește senzorul LIDAR pentru identificarea stâlpilor cu benzi reflectorizante montați într-un mediu de navigare amenajat în campusului Universității Heilbronn. În finalul capitolului este descrisă o funcție model care rezolvă parțial cazul în care estimarea abaterii GNSS este incorectă, modificând această abatere în mod artificial. Soluția funcționează când se poate garanta, că o altă metodă de localizare (de ex. AMCL) oferă date precise.

Capitolul 6, *Planificarea traseelor și a traiectoriilor*, începe cu o analiză a soluțiilor existente pentru planificarea traseelor globale în medii pietonale și prezintă rezultate obținute cu acestea. Cerințele care trebuie îndeplinite la planificarea traseelor globale implică ca acestea să fie asociate sarcinilor de îndeplinit, să treacă numai prin zone permise și să respecte regulile de navigare impuse. De aceea s-a optat pentru modelarea (înregistrarea, învățarea) fiecărui subtraseu posibil, prin conducerea manuală a vehiculului între punctele care definesc nodurile unui graf folosit pentru planificarea sarcinilor, iar șirul de stări (poziție și orientare) ale vehiculului autonom au fost salvate într-un fișier asociat unei muchii a grafului. Avantajul acestei metode este determinat de volumul redus al calculelor la nivelul MCU-ului vehiculului

autonom, dar și la nivel de server unde folosirea unui algoritm de căutare a unui traseu pe o hartă digitală nu mai este necesar. Pentru procesul de navigare s-a adaptat pachetul software *move\_base* din ROS. Astfel, a fost implementat un modul care recepționează traseul global și trimite informații privind poziția curentă, înștiințarea de începere și terminare a execuției sarcinii, serverului de planificare unde are loc și supravegherea execuției. Pentru *planificarea traiectoriei* de navigare în medii pietonale s-a optat pentru personalizarea algoritmului Time Elastic Bands (TEB), care a fost parametrizat și adaptat pentru vehiculul autonom dezvoltat cu cinematică de tip Ackermann astfel încât să genereze doar traiectorii care pot fi parcurse de vehiculul autonom, parametrii de respectare a cinematicii având o pondere semnificativă. De asemenea s-a dorit ca vehiculul să nu se îndepărteze mai mult de 0,5 m de la traseul global pentru a nu intra în zone interzise (borduri, cu iarbă, flori etc.) care nu pot fi sesizate de sistemele senzoriale. De aceea s-a implementat o funcție care modifică în mod adaptiv ponderile criteriilor: de urmărire a traseului global respectiv de ocolire a obstacolelor dinamice. Pentru evitarea coliziunilor cu obstacole sunt activate permanent modulele subsistemului de siguranță fermă. De asemenea s-a restrâns și posibilitatea de generare de traiectorii în care acesta să fie nevoit să se deplaseze cu spatele, prin ponderea redusă aplicată acestui criteriu și prin dimensiunea hărții locale în care este generată traiectoria.

În capitolul 7, *Teste și studii experimentale*, se prezintă mai multe experimente de testare și validare atât a vehiculului autonom dezvoltat precum și a întregului sistem de planificare a sarcinilor, traseelor și traiectoriilor. Acestea au loc cu precădere într-un mediu pietonal real în cadrul târgului de horticultură denumit BUGA. Preliminar, au fost efectuate *teste pentru a valida funcționarea dispozitivelor electronice* (ECU fail test), *modulelor software* (software fail test), *subsistemul senzorial cu datele achiziționate* (senzor fail test) și a *subsistemului de siguranță de tip bumper* în cazul unor simulări de coliziuni. Pentru omologarea tehnică a vehiculului în vederea navigării și operării în medii pietonale au fost definite riscurile care pot apărea și măsurile de a aduce vehiculul într-o stare sigură conform normei de siguranță ISO26262. În continuare, *este testat și evaluat sistemul pentru planificarea sarcinilor*. Clienții interacționează cu sistemul, iar acesta livrează coletele la timp. Datorită beneficiilor aduse de interactivitatea cu sistemul, în special, prin posibilitatea clientului de a specifica data și ora livrării, acceptanța pentru livrări cu vehicule autonome în zone pietonale crește cu 15%. Pierderea care apare din punct de vedere al timpului planificat/executat de 36,39% este astfel compensată la nivel calitativ prin interactivitate. Capitolul continuă cu *testarea și evaluarea procesului de localizare* unde sunt alese două trasee din mediul pietonal adoptat care conțin toate tipurile de situații întâlnite în mediile de acest tip. Se demonstrează că o localizare fezabilă se poate obține doar prin combinarea a trei metode: odometrie, GNSS și AMCL prin fuziunea datelor folosind EKF. Metoda cu markeri reflectorizanti propusă este evaluată separat în parcare din campusul Universității din Heilbronn. Rezultatele obținute în urma *testelor de planificare a traseelor și traiectoriilor locale* sunt prezentate și analizate în trei situații: o zonă cu pietoni în care vehiculul execută o întoarcere, o zonă cu puțini pietoni de deplasare în linie dreaptă și o curbă la dreapta, de asemenea, cu puțini pietoni. În finalul capitolului sunt evaluate *performanțele globale* ale sistemului. Cele două vehicule autonome dezvoltate au parcurs aprox. 300 km în mod autonom în diferite situații meteorologice (0° - 38°), îndeplinind cu succes un număr de 572 sarcini, demonstrând astfel că atât vehiculele, cât și sistemul de planificare interactiv dezvoltat funcționează în mod fiabil pe durată îndelungată.

În capitolul 8, *Concluzii, contribuții proprii, valorificarea rezultatelor și direcții noi de cercetare*, sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile originale proprii, diseminarea rezultatelor științifice (lista de lucrări publicate, participarea la conferințe internaționale și implicarea în cadrul contractelor de cercetare), precum și direcțiile viitoare de cercetare.

## 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ȘI REALIZĂRILOR ÎN DOMENIUL AUTOVEHICULELOR AUTONOME DE SERVICII

### 2.2 TIPURI DE AUTOVEHICULE AUTONOME

Autovehiculele autonome pot opera în diferite medii îndeplinind o varietate de sarcini. În funcție de mediul de operare pentru îndeplinirea sarcinilor autonome sunt alese tipul autovehiculului, sistemele senzoriale proprioceptoare și exteroceptoare, precum și algoritmi de conducere folosiți. În Tab. 2.1 sunt descrise tipuri de vehicule autonome în funcție de mediile de operare. În aceste medii pot fi efectuate servicii de transport, de inspecție unde vehiculele sunt dotate de regulă cu senzori vision sau servicii cu o sarcină suplimentară diferită de cea de transport (de ex. de udare a florilor, de curățire a aleilor, de tundere a gazonului, de colectare a gunoaielor etc.), scop pentru care acestea sunt dotate cu agregate suplimentare specifice.

*Tab. 2.1 Tipuri de autovehicule autonome în funcție de mediile de operare*

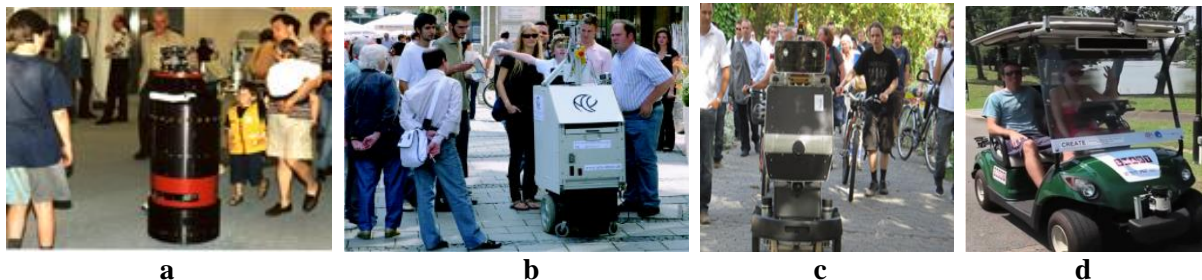
Mediul de operare/tipul	Descriere
<i>Rutier/pe rutiere</i> <i>căi</i>	Navigarea are loc pe străzi din medii urbane unde circulația este clasică, iar ruta pe care o urmează autovehiculul autonom este impusă de benzile de circulație marcate sau, chiar, nemarcate. Deplasarea se face cu respectarea regulilor de circulație de încadrare pe banda de circulație corectă, semnele de circulație, indicațiile semafoarelor și limitele de viteză stabilite de lege, care în mod normal se situează între 30km/h și 60km/h. Autovehiculele autonome au sisteme de interacțiune cu bicicliștii și cu pietonii, de regulă, la trecerile de pietoni. Harta căilor de trafic este predefinită și nu există schimbări ad hoc ale acesteia. Reprezentarea digitală a hărții este realizată în 2D sau 3D, fiecare element precum semnele de circulație, semafoarele, trecerile de pietoni și marcajele stradale sunt reprezentate cu o precizie centimetrică. Un proiect care se ocupă cu aceste tematici este Testfeld Autonomes Fahren [www06].
<i>Pietonal/pe pietonale</i> <i>căi</i>	Mediile pietonale pot fi trotuare (alei) adiacente căilor rutiere, străzi care nu sunt declarate din punct de vedere legislativ rutiere, iar accesul autovehiculelor este de regulă interzis, aleile din parcuri, parcuri, curți interioare etc. Autovehiculele sau roboții autonomi care operează pe aceste căi trebuie să se deplaseze cu viteze reduse (sub 7 km/h [www07]). Procesul de navigare pe aceste căi este îngreunat de inexistența, pe de o parte, a unor reguli de circulație stricte pentru pietoni, aceștia putându-se deplasa aleatoriu în orice direcție și, pe de altă parte, a unor marcaje și/sau indicatoare stradale care să poată fi folosite ca repere pentru localizarea acestor sisteme autonome. Dificultatea de conducere a autovehiculelor autonome în mediile pietonale este mărită și de faptul că pietonii trebuie deranjați cât mai puțin nebeneficiind, în prealabil, de instrucțiuni referitoare la modul de operare a autovehiculului. Mediile pietonale pot fi însă și interioare, cum ar fi cele din muzee, gări, aeroporturi etc.
<i>Industrial/pe căi industriale</i>	Mediile industriale sunt, de regulă, medii închise legate de căi de circulație nestandard. Regulile de circulație nu sunt general valabile, acestea fiind definite special în funcție de logistica tehnologică impusă în cadrul unității industriale. Persoanele care au acces în aceste medii sunt instruite prealabil despre modul de funcționare/operare al autovehiculelor și/sau roboților care se deplasează în mod normal cu viteze reduse, de cel mult 15 km/h. Navigarea vehiculelor/roboților autonomi în aceste medii este stabilă, cu precădere, de procesul de producție [Gîrbacia, 2019], [Anandan, 2015].
<i>Off-road/pe medii accidentate</i>	Mediile off-road sunt medii caracterizate prin lipsa drumurilor asfaltate/pavate.
<i>Agricol/agricol</i>	În medii agricole vehiculele autonome trebuie să îndeplinească sarcini tehnologice de însămânțare, stropire, plivire, recoltare etc. Pentru navigare neexistând însă marcaje care să ajute la procesul de localizare vegetația în sine stabilește repere de deplasare. Astfel, s-a dezvoltat tehnica <i>precision farming</i> [Kiel, 2016].

## 2.3 SCURT ISTORIC

### 2.3.2 VEHICULE AUTONOME PENTRU MEDII PIETONALE

Cercetările în domeniul navigării vehiculelor autonome și a prestării de servicii în medii pietonale încep încă din anii 1998/1999 când au fost dezvoltați roboții cu rolul de a opera în spații largi interioare (indoor, de ex. muzee) ca ghid pentru vizitatori (Fig. 2.1,a).

Cercetările privind vehicule pentru prestarea de servicii în zone pietonale exterioare (outdoor), în zone centrale ale orașelor au început în anul 2009, când a fost dezvoltat un robot cu scopul de a naviga cu ajutorul indicațiilor date de oameni (Fig. 2.1,b) [Bauer, 2009]. Proiectul URUS s-a ocupat, cu precădere, cu dezvoltarea de strategii de navigare a roboților pentru efectuarea de servicii de inspecție în zone pietonale outdoor [Sanfeliu, 2010], [Murtra, 2010]. În acest proiect s-a pus accent și pe comunicarea robot-infrastructură. Mai târziu, prin proiectul EUROPA [Stachniss, 2013] a fost dezvoltat vehiculul Obelix (Fig. 2.1,c) [Kümmerle, 2014] axat pe navigarea în zone pietonale fără a fi ajutat cu informații preluate din infrastructură sau prin comunicarea cu alți roboți. Acest vehicul a reușit cu mici abandonuri să navigheze autonom un traseu de circa 7 km în centrul orașului Freiburg. În ultima perioadă de timp s-a dezvoltat un proiect prin care s-au derulat cercetări pentru efectuarea de servicii de transport de persoane [Pendleton, 2016]. În cadrul proiectului au fost dezvoltate trei tipuri de vehicule autonome pentru navigarea în medii pietonale outdoor, parcuri, campusuri universitare, precum și în ale medii urbane unde se pune și accentul pe chemarea acestora la cerere. Pentru deplasare în parcuri a fost ales un cart de golf de tip Yamaha YDREX3 (Fig. 2.1,d).



**Fig. 2.1** Vehicule autonome pentru căi pietonale (selecție): **a** - Tourbot [Trahanias, 2005]; **b** - CityExplorer [Bauer, 2009]; **c** - Obelix [Kümmerle, 2014]; **d** - MIT Golf Cart [www13]

## 2.4 STRUCTURI ALE VEHICULELOR AUTONOME DE SERVICII

### 2.4.1 STRUCTURA GENERALĂ A VEHICULELOR AUTONOME

În Fig. 2.2 se prezintă o schemă cu structura generală a vehiculelor autonome. În primă fază, datele achiziționate de către *subsistemul senzorial*, de la componente integrate în infrastructură (V2I, Vehicle to infrastructure) și de la alte vehicule (V2V, Vehicle to vehicle) de către subsistemul V2X (Vehicle to everything) sunt prelucrate de subsistemul de *percepție* pentru determinarea propriei stări și a caracteristicilor mediului de operare. Deseori, în procesul de localizare sunt folosite hărți digitale. În urma analizelor de percepție în faza de *planificare* este stabilit traseul și apoi traiectoria pe care vehiculul trebuie s-o urmeze pentru execuția sarcinii. *Subsistemul de comandă și control*, conform programului elaborat pe baza traiectoriei planificate, transmite date *subsistemului de acționare* care antrenează subsistemul mecanic.



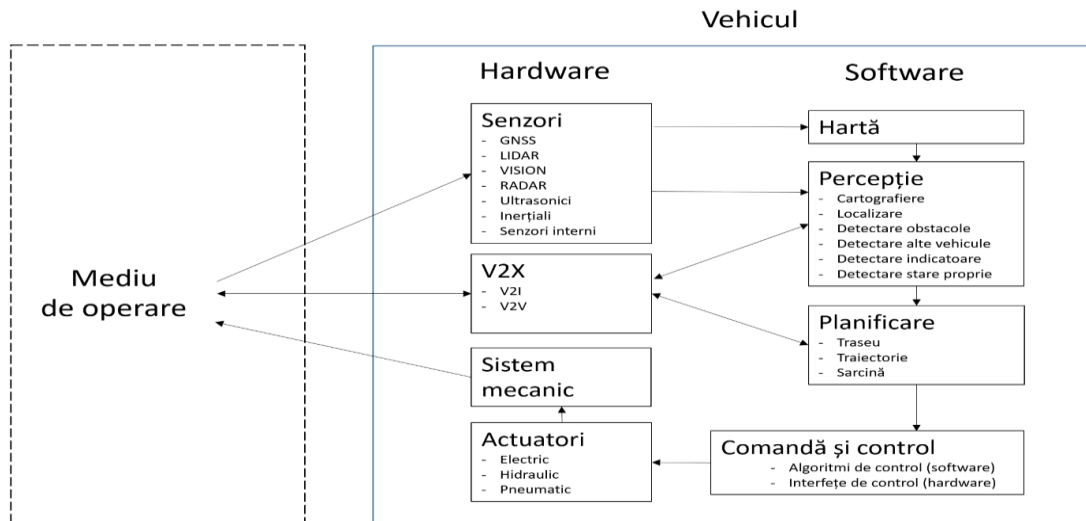


Fig. 2.2 Structura generală a vehiculelor autonome [Curiel-Ramirez, 2019], [Pendleton, 2017]

## 2.4.2 SISTEME DE LOCOMOȚIE ȘI PROPULSIE

Locomoția și propulsia unui vehicul autonom care asigură mobilitatea acestuia sunt alese în funcție de mediul în care operează și de sarcina pe care trebuie să o îndeplinească.

În funcție de tipurile sistemelor de propulsie și de locomoție pot fi cinematici olonome când vehiculul se poate deplasa în toate direcțiile sau neolonome unde există constrângeri de deplasare. Autovehiculele autonome dezvoltate prin transformarea autovehiculelor standard cu două roți motrice și celelalte două pentru orientare (virare de tip Ackermann) sunt sisteme neolonome caracterizate de imposibilitatea de deplasare de-a lungul axelor roților,  $v_a = 0$  (Fig. 2.3).

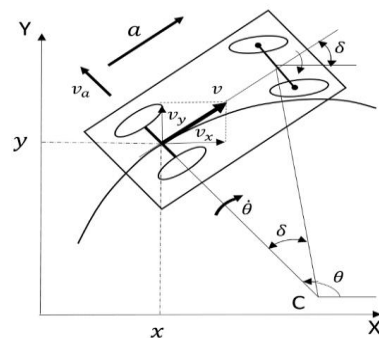


Fig. 2.3 Sistem de propulsie neolonom

## 2.4.3 SISTEME SENZORIALE

Senzorii sunt folosiți, pe de-o parte, pentru a monitoriza stările funcționale ale autovehiculului și, pe de altă parte, pentru a prelua date/semnale despre parametri care descriu mediul în care navighează.

*Senzorii interni* asigură măsurarea unor parametri de comportare a autovehiculului precum: poziții, viteze, cupluri, accelerații, temperaturi, tensiunile bateriilor etc. Datele obținute de la senzori sunt folosite de sistemul de comandă și control în procesul de decizie în vederea operării autonome. Senzorii interni pot fi cu *contact* sau *fără contact*. Cei cu contact sunt atașați direct pe elemente mecanice asociate procesului descris de parametrul măsurat; de exemplu, senzorul de măsurare a unghiului de virare este amplasat pe axa volan sau senzorii odometrici sunt montați în butucul roții. Senzorii fără contact măsoară parametrii unui proces funcțional folosind, de obicei, principiul inducției electromagnetice; de exemplu, senzorii hall.

*Senzorii externi*, esențiali pentru recunoașterea de obiecte, controlul proceselor de localizare și navigare și pentru interacțiunea cu mediul sunt utilizați și pentru funcții de asistență. Senzorii laser pot fi cu un singur strat, cu câmpul de inspecție 2D, sau cu mai multe straturi care inspectează în spațiul 3D. Senzorii de proximitate pot fi pe principiul razelor infraroșii sau al undelor ultrasonice, iar senzorii vision pot fi cu camere monoculare sau stereo.

Tab. 2.2 Funcții și caracteristici ale senzorilor externi

Funcția sau caracteristica	Tipul senzorului						
	Laser		Proximitate		Radar	Vision	
	2D	3D	IR	Ultras.		M	S
Detectare de suprafețe reflectorizante (oglină)	-	-	-	-	0	-	-
Stabilire cu precizie a vitezei	+	+	-	-	+	-	-
Detectare a distanței până la obiecte apropiate	+	+	+	+	+	-	0
Detectare a distanței până la obiecte depărtate	+	+	-	-	+	-	0
Detectare de obiecte de dimensiuni mici	+	+	0	0	+	-	-
Utilizare în medii întunecoase (noaptea)	+	+	+	+	+	-	-
Utilizare în condiții de ploaie	0	0	-	-	0	0	0
Utilizare în condiții de ceață	0	0	-	+	+	-	-
Utilizare în condiții de ninsoare/zăpadă	0	0	-	+	0	-	-
Reacție în cazuri de orbire luminoasă (ex. soare)	0	0	-	+	+	-	-
Recunoaștere de pietoni (alte obstacole mobile)	-	+	-	-	+	+	+
Recunoaștere de marcaje stradale	-	-	-	-	-	+	+
Detectare de obiecte transparente (geamuri)	-	-	-	+	-	-	-
Recunoaștere de obiecte camuflate	+	+	+	0	+	-	-
Detectare culori obiecte	-	-	+	-	-	+	+
Gabaritul	+	-	+	+	-	+	+
Prețul	0	-	+	+	-	+	0

În Tab. 2.2 se prezintă succint o comparație calitativă a performanțelor și capabilităților principalilor senzori externi integrați în autovehiculele autonome actuale. Cu (-) sunt marcate funcțiile care indică că senzorul este neadecvat, cu (0) funcțiile care arată că folosirea senzorului nu este indicat, iar cu (+) funcțiile pe care senzorul le îndeplinește cu succes. Pe lângă date primite de la senzorii externi, în cadrul proceselor de localizare și navigare se folosesc des și date preluate prin sisteme GNSS. Deoarece, pentru procesele de localizare și navigare procesarea datelor de la senzori separat este inefficientă, date de la senzori diferiți, unii chiar cu același scop, sunt procesate prin fuziune în vederea unor estimări mai precise.

#### 2.4.4 FUZIUNEA DATELOR SENZORIALE

Tehnicile de fuziune a datelor de la senzori pot fi împărțite în trei grupe: *asociere de date*, *estimarea stării și fuziune decizională* [Castanedo, 2013]. În funcție de sursele (senzorii) datelor măsurate, metodele de fuziune pot fi clasificate ca fiind *complementare*, când datele măsurate oferă informații diferite despre mediu, *redundante*, când datele de intrare măsoară aceleași caracteristici, dar provin de la senzori diferiți și *cooperative*, atunci când din mai multe date de intrare se generează informații noi [Hugh, 2016]. Pentru procesul de localizare, ca urmare a aplicării fuziunii datelor, de obicei, cu o metodă redundanță se urmărește estimarea stării curente a autovehiculului sintetizată prin valorile poziției, vitezei și unghiului de virare. Acestea sunt grupate într-un vector, iar scopul fuziunii datelor este găsirea parametrilor cât mai apropiați de valorile reale (best fit). Cele mai frecvente metode de estimare a stării sunt: *maximum likelihood*, *maximum posterior*, *filtrul Kalman* și *filtrul de particule* [Castanedo, 2013], [Buyer, 2016]. Aceste metode sunt derivate din *filtrul Bayes*, care realizează estimări recursive folosind o funcție probabilistică prin care este reprezentată incertitudinea.

### 2.5 MODELAREA MEDIILOR DE OPERARE A AUTOVEHICULELOR AUTONOME

În literatura de specialitate există mai multe modalități de descriere a mediilor de operare, dintre care cele bazate pe hărți sunt frecvente. *Hărțile de tip grilă* descriu mediul de operare prin celule discrete cărora la localizare li se asociază câte o valoare distinctă ce

reprezintă probabilitatea ca acestea să fie ocupate. În funcție de valoarea asociată, celula poate fi în trei stări: *liberă*, când nu sunt detectate coliziuni cu alte obiecte; *ocupată*, în care a fost detectată o coliziune; *necunoscută*, care nu a fost cartografiată. *Hărțile (geo)metrice* pentru reprezentare folosesc primitive geometrice (puncte, linii etc.) și liste de obiecte geometrice care îngrădesc spațiile libere. Hărțile geometrice sunt create tot prin folosirea datelor de la senzori, care sunt sintetizate, de obicei, sub forma unui nor de puncte. Astfel, sunt folosite tehnici de căutare, parțial descrise în lucrarea [Nüchter, 2004] pentru cazurile 2D, iar în [Hähnel, 2003] pentru cele 3D. Apoi, este utilizată o procedură de căutare locală pentru a genera un model de plane de complexitate redusă [Latecki, 2005]. *Hărțile topologice* reprezintă mediul de operare prin intermediul unor repere, care au poziții predefinite. Spre deosebire de celelalte două tipuri de hărți prezentate mai sus, hărțile topologice se focusează pe obiecte specifice care sunt utile în procesele de localizare și navigare și nu modelează spațiul liber. Pentru descrierea mediului pot fi folosite simultan două sau trei tipuri de hărți (hărți hibride).

În literatura de specialitate care conține foarte multe publicații referitoare la metode de mapare (generare a hărților) aceste metode sunt împărțite în două categorii: *prin prelucrare directă a datelor* de la senzori și *prin extragere de particularități geometrice* din aceste date. Metodele din cea de-a doua grupă sunt din punct de vedere computațional mai eficiente. Hărțile generate pot fi bidimensionale [Thrun, 2016], [Martin, 2002], [Eliazar, 2003], [Eustice, 2006] sau tridimensionale [Thrun, 2000], [Wu, 2016], [Sakai, 2017], [Landsiedel, 2017].

În ultima perioadă de timp este des întâlnită metoda Simultaneous Localization And Mapping (SLAM), prin care pe lângă cartografierea mediului de operare are loc și procesul de localizare. În lucrarea [Gee, 2016] este prezentată această metodă folosind senzori LIDAR, iar în [Zhang, 2015] senzori vision. O altă metodă de mapare folosită, Fast SLAM (FSLAM), are la bază un filtru de particule Rao-Blachwelliyed [Montemerlo, 2002]. De asemenea, și pentru maparea unui mediu cu multe obstacole dinamice, pentru reducerea erorilor de reprezentare, este necesar ca aceste obiecte să fie filtrate [Tanzmeister, 2014].

## 2.6 PLANIFICAREA SARCINILOR AUTOVEHICULELOR AUTONOME DE SERVICII

Planificarea sarcinilor autovehiculelor autonome care trebuie să execute la diferite destinații în intervale orare neimpuse se face, de regulă, folosind tehnica de rezolvare a problemei comisului voiajor [Gutin, 2007], [López-Ibáñez, 2013]. O variantă a acestei probleme se personalizează prin faptul că fiecare destinatar are la dispoziție un interval de timp, specificat de la început, în care sarcina poate fi executată [López-Ibáñez, 2010].

În continuare, sunt descrise selectiv aplicații cu planificare de sarcini pentru flote cu vehicule autonome. Proiectul Martha [Alami, 1998], a avut obiectivul de control a unei flote mari, cu 10 - 100 vehicule autonome, pentru sarcini de transport de containere în porturi, aeroporturi și șantiere. În lucrarea [Anandan, 2015] este prezentată o flotă de vehicule autonome care asigură servicii într-un spital. Amazon a investit în dezvoltarea unei flote de vehicule autonome care operează în depozitele de marfă [www27]. Noi concepte pentru planificarea de sarcini pentru o flotă de vehicule autonome sunt prezentate și în lucrarea [Wawerala, 2010], unde evaluarea rezultatelor se face însă în medii virtuale de simulare. Principalele companii de curierat precum DHL au efectuat, de asemenea, cercetări în domeniul livrării de colete cu vehicule autonome [\*\*\*04] și împreună cu institute de cercetare urmăresc îmbunătățirea serviciilor logistice [Sußmann, 2019]. De asemenea, și companii de tip start-up au prezentat concepte și produse în acest domeniu Starship [www28], Marble [www29], Neolix [www30]. În ceea ce privește integrarea clienților (beneficiarii serviciilor) în procesul de planificare a sarcinilor, stadiul actual oferă idei la nivel de concept care nu au fost puse în practică [Clement, 2017], [Mckee, 2017].

## 2.7 LOCALIZAREA AUTOVEHICULELOR AUTONOME ÎN MEDIILE DE OPERARE

Pentru procesul de localizare în timpul navigării odometria vehiculului autonom folosind senzorii interni este indispensabilă. Din cauza erorilor acumulate în timp și a poziției inițiale necunoscute trebuie combinată cu alte metode de localizare. Procesul de *localizare locală* se poate face folosind o hartă digitală pe care sunt căutate datele de la senzorii externi. Prezența prin compararea funcțiilor și caracteristicilor principale în Tab. 2.2. În acest caz pot apărea probleme (erori), mai ales, când hărțile au porțiuni identice. Pentru acest tip de localizare se folosește, de regulă, metoda *scan matching*, unde datele senzoriale curente sunt comparate cu datele oferite de harta digitală. Estimarea se poate face prin metode probabilistice [Rohde, 2016], [Hoang, 2013]. Localizarea poate fi realizată și prin folosirea de *markeri (land marks)* amplasați în mediu de operare astfel încât să poată fi detectați de senzorii externi. Cunoscând poziția acestora determinarea poziției vehiculului se face prin tehnici de triangulare sau trilaterare [Kim, 2017]. În multe aplicații se folosește pentru procesul de localizare și GNSS [Liu, 2019], [Duchon, 2014]. Acesta asigură *localizarea globală* oferind o poziție absolută a cărei precizie este dependentă de acuratețea semnalului. Pentru a îmbunătăți localizarea globală sunt folosite metode probabilistice derivate ale filtrului Bayes. Actual, acestea sunt deja integrate în hardware-ul sistemelor GNSS [www31]. Metodele bazate pe învățare necesită date reprezentative care pentru medii pietonale nu sunt existente [Kröger, 2017].

## 2.8 MODELAREA ȘI PLANIFICAREA TRASEELOR ȘI TRAICTORIILOR

Stadiul actual al modelării și planificării traseelor și a traiectoriilor este vast descris în literatură [Eskandarian, 2012]. Pornind de la spațiul de configurare și spațiul stărilor, planificarea este un proces computațional complex în urma căruia se determină spațiul acțiunilor, care de obicei are loc în două etape: *Planificarea traseului* determină punctele care trebuie atinse de vehiculul autonom pentru a ajunge la destinație. Pentru planificarea traseului se utilizează hartă digitală a mediului de operare unde sunt evidențiate și căile de deplasare a vehiculului autonom. *Planificarea traiectoriei* are la bază traseul, ține cont de modelul cinematic al vehiculului și de caracteristicile actuatorilor. Algoritmul de găsim a traiectoriei operează numai într-un spațiu restrâns de stări definit de la început prin intermediul unei zone din jurul vehiculului (bounding box). Un *planificator (planer)* transformă datele asociate traiectoriei (traseului) în comenzi de mișcare la nivel de execuție [LaValle, 2006]. Evaluarea calității soluției găsite de planificator se poate face prin măsurarea distanței parcursă între configurația de start și de destinație, prin timpul necesar parcurgerii sau prin intermediul altor parametri dependenți de sarcina de realizat (de ex. confort) [LaValle, 2006], [Paden, 2016].

Exemple de algoritmi pentru planificarea traseului sunt: Rapid Random Tree (RRT) cu varianta RRT-2, [Dolgov, 2010], A\* cu varianta ARA\* [Siegwart, 2011] sau de tip lattice [Werling, 2012]. Pentru planificarea traiectoriei sunt folosiți algoritmi probabilistici: Probabilistic Roadmap (PRM) [Kavraki, 1996] sau Rapid Random Tree [Oktay, 2013] pentru optimizare, metoda câmpurilor potențiale care au problema minime locale [Jia, 2010] sau algoritmul TEB bazat pe benzi elastice [Rösmann, 2015].

## 2.10 SISTEME DE SIGURANȚĂ A VEHICULELOR AUTONOME

Concepte legate de sistemele de siguranță ale vehiculelor autonome au apărut înainte ca acestea să fie capabile să navigheze de la un punct la altul în medii urbane. În 1998 compania

Volkswagen prezintă o primă abordare la nivel organizatoric și software a acestei teme [Binfet-Kull, 1998] și o primă formă a unui standard de siguranță. Mai târziu, la introducerea sistemelor de asistență avansate (ADAS) în practică, conceptele de siguranță au fost cele care au stat la baza dezvoltării acestora ca produse de serie [Horwick, 2010] în care se evidențiază că parametrii sistemului sunt monitorizați continuu, iar în cazul în care sistemul nu rulează la parametri normali, există o rutină care să aducă sistemul într-o stare sigură.

În anul 2011 a apărut standardul ISO26262 pentru siguranță funcțională a sistemelor electrice și electronice aparținând vehiculelor rutiere [\*\*\*05]. Standardul prevede reglementări pentru întregul proces de dezvoltare, începând cu conceptul, continuând cu proiectarea, producția, perioadele de operare și de servizare și terminând cu cea de scoatere din uz. *Funcțiile de siguranță* trebuie să asigure că sistemul se află mereu într-o stare sigură (safe state). Sistemul se află într-o stare sigură după [\*\*\*05], atunci când nu există niciun risc (unreasonable risk). Acest risc este determinat în funcție de probabilitatea apariției unui accident și de severitatea accidentării în cazul producerii acestuia. Pentru ca un vehicul autonom să poată opera în spațiul public este nevoie de un conducător auto care să poată interveni în caz de urgență [www35]. Începând cu anul 2016 tot mai multe state au introdus în legislația rutieră paragrafe care reglementează permisiunea utilizării vehiculelor autonome în spațiul urban, încurajând astfel dezvoltarea de prototipuri în cadrul de proiecte pilot, cu respectarea normelor de siguranță: NCSL [www35], Connected Automated Driving [www36], KO-HAF [www37].

În lucrarea [Reschka, 2016] se prezintă o analiză referitoare la concepte de siguranță, folosite în producția de serie și experimentală de vehicule autonome, în diferite scenarii de folosire a acestora (valet parking, pilot interstate, service on demand). Concluzia acestei lucrări este, din cauza situațiilor multiple care pot apărea și în care sistemul trebuie să perceapă mediul înconjurător, nici un sistem nu este 100% sigur. În proiectele de cercetare, conform convenției de la Viena, este mereu nevoie, pentru siguranță, de un conducător auto pentru supraveghere.

## 2.11 CONCLUZII ȘI JUSTIFICAREA TEMATICII

După analiza stadiului actual se poate vedea, că domeniul navigării vehiculelor autonome în medii strict pietonale pentru efectuarea de servicii este exploatat puțin comparativ cele care navighează în alte medii. Încă nu sunt cunoscute cazuri concrete de autovehicule autonome dedicate pentru servicii în medii pietonale. Totuși, pentru acest scop, există unele platforme modificate, majoritatea fiind pentru roboți de dimensiuni mici și cu sistem oinom. Astfel, este nevoie de un concept arhitectural unitar care să permită dezvoltarea de vehicule autonome utilitare pentru servicii prin transformarea unui vehicul existent. *Un obiectiv al lucrării presupune studii privind concepția, dezvoltarea și validarea de vehicule autonome care sunt integrate în sisteme dedicate de servicii în legătură cu mediile pietonale.* Deoarece, validarea conceptului trebuie făcută în siguranță vehiculul autonom în primă instanță este supravegheat de un conducător auto care în cazuri de avarie (inclusiv, în fazele de testare în medii pietonale reale) să poată prelua în orice moment controlul vehiculului autonom.

Pentru ca vehiculele autonome să opereze autonom în zone pietonale acestea trebuie să fie omologate. Deci, este nevoie *de concepția, dezvoltarea și implementarea unui sistem de siguranță* care să fie aliniat la normele existente, sintetic prezentate în ISO 26262. În acest scop, trebuie avut în vedere că persoanele care vor interacționa cu autovehiculul autonom nu sunt instruite, asemenea celor din medii industriale, referitor la modul de funcționare a acestuia.

Operarea vehiculelor autonome, pe lungă durată, în mediile pietonale necesită acceptanța acestora, dar și a beneficiarilor de servicii. Criteriile de acceptanță trebuie luate în considerare atât la concepția vehiculului, cât și la modul de îndeplinire a sarcinilor impuse de către solicitanții de servicii. Astfel, se impune *concepția, dezvoltarea, implementarea și validarea unui sistem de planificare a sarcinilor* care să răspundă prompt la solicitările clienților. Aceștia trebuie să poată urmări în permanență statusul solicitării, iar sistemul trebuie

să se asigure că serviciile sunt îndeplinite fără întârziere și să înștiințeze utilizatorii, just in time, despre eventuale schimbări neașteptate. Tehnologiile din domeniul logisticii prezentate în subcap. 2.6 nu pot fi utilizate direct pentru planificarea sarcinilor pentru servicii în zone pietonale datorită necesității luării în considerare a interacțiunii permanente cu solicitanții serviciilor. De asemenea, descrierea acestei planificări în proiecte cu flote de vehicule autonome este abordată în literatura de specialitate foarte vag.

Îndeplinirea sarcinilor de realizat depinde de o localizare precisă a vehiculului autonom în mediul de operare. De aceea este nevoie de alegere și poziționare optimă a senzorilor folosiți pentru acest proces. Alegerea sistemelor senzoriale depinde de sarcinile pe care autovehiculul trebuie să le îndeplinească și de mediile în care acesta operează. O funcționare robustă cere fuziunea datelor de la senzori (de la minim două tipuri), mai ales, când măsurătorile se fac folosind principii fizice diferite. Și în cazul vehiculelor autonome utilitare care navighează în medii pietonale pentru localizare se impun tehnici de fuziune a datelor combinate cu tehnici de localizare. Din subcap. 2.4.4 reiese că alegerea metodei de fuziune se face în funcție de aplicație: pentru procese gausiene cel mai indicat este filtrul Kalman; pentru modele care pot fi reprezentate ca un graf de stări, iar unde probabilitatea de tranzitare între aceste stări poate fi învățată, se poate folosi un lanț Markov; pentru funcții de densitate non gausiene este recomandat filtrul de particule. Pe de altă parte, o înzestrare a vehiculului autonom cu un număr mare de senzori, hărți digitale și calculatoare performante duce la localizări și navigări precise, dar din punct de vedere economic nu poate fi acceptată această variantă și trebuie făcute compromisuri performanță-preț care să conducă la soluții optime. Astfel, un obiectiv al cercetărilor din cadrul acestei teze presupune *concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui sistem de localizare optimă atât din punct de vedere al preciziei, cât și al costurilor hard și soft, și care să funcționeze robust în mediile pietonale*. Localizarea trebuie să funcționeze și dacă vehiculul este înconjurat de pietoni, în acest caz, o precizie de câțiva centimetri fiind ideală, iar în realitate preciziile de sub 0,5 m sunt acceptabile.

Planificarea traseelor vehiculelor autonome în medii pietonale are similarități cu planificarea traseelor în medii urbane sau industriale. Pentru cazurile traseelor concrete asociate unor servicii trebuie analizat care din algoritmi generali sunt adecvați și asigură performanțe maxime. Astfel se impun *studii și simulări pentru găsirea traseului optim în mediul pietonal*.

Planificarea traiectoriei vehiculelor autonome (neolome) în medii pietonale aglomerate este o problemă care trebuie aprofundată prin studii teoretice și experimentale. În zonele pietonale, de obicei, nu există reguli de circulație, care să restrângă acțiunile pe care un vehicul autonom le poate executa. De aici rezultă că situațiile cu care sistemul se va confrunta sunt ca număr mai mare decât cele din mediile urbane unde vehiculele respectă diferite reguli, preponderent, bazate pe semne de circulație. În mediile libere pietonale, aceștia, de obicei, nu sunt constrânși privind modurile de deplasare și trebuie să respecte reguli de circulație minimale (mult mai puține decât în cazul circulației în mediile rutiere). Deoarece aceștia se pot deplasa mai repede decât vehiculul autonom, în mod aleator, iar de aceea traiectoria pe care acesta trebuie să o urmeze trebuie modificată foarte des. Astfel, și în acest caz se impun *studii de analiza și sinteza unor algoritmi în vederea determinării unei traiectorii optime care, în acest caz, se fac, cu precădere, online (în timp real)*.

Referitor la strategia de implementare și programare ale vehiculelor autonome, tehnologiile bazate pe învățare avansată încă nu sunt în stadiul în care să poată fi folosite în practică. Nu există îndeajuns date reprezentative și nici metricile nu sunt cunoscute, de aceea învățarea întregului proces de navigare autonomă încă nu este posibilă. Ce este posibil este învățarea bazată pe cunoaștere ce presupune folosirea de subprobleme (modele) curente (cum ar fi detectarea pietonilor sau a altor vehicule sau precizarea unei acțiuni a acestora) care să fie luate în considerare ca intrări pentru noi acțiuni. Astfel, sistemele au capacitatea de auto-îmbunătățire. Acolo unde aceste modele lipsesc și unde nu există destule date reprezentative se folosesc metode clasice.

### 3. PLANIFICAREA SARCINILOR VEHICULELOR AUTONOME PENTRU SERVICII ÎN MEDII PIETONALE

#### 3.1 INTRODUCERE

Vehiculele autonome care operează în medii pietonale sunt dedicate cu precădere, pentru servicii specifice acestor medii care se pot materializa prin următoarele sarcini: livrare colete, transport persoane, stropire vegetație, tuns iarbă, curățenie zone pietonale, dezzăpezire, îngrijirea vegetației, intervenții de salubritate etc. Având în vedere că aceste sarcini, care de obicei, sunt programate în funcție de necesități în mod aleatoriu se impune concepția, proiectarea unui sistem logistic de planificare care să asigure folosirea optimă a vehiculelor autonome. Deoarece, acest sistem trebuie să poată interacționa permanent cu utilizatorii pentru a răspunde imediat la cerințele acestora, se impune asigurarea unei *planificări interactive* [Kocsis, 2020], luând în considerare permanent și acceptanța clienților (beneficiarii de servicii). Pentru a crește această acceptanță clienții trebuie să poată specifica ușor parametrii de execuție a sarcinii, să primească răspunsuri imediate la solicitări și să fie permanent informați despre stadiile de realizare a sarcinilor preluate. Datorită adaptării ad-hoc al planului, conform cererilor clienților, o planificare de tipul comis voiajorului (v. subcap. 2.6), nu este aplicabilă. Pentru a integra această interacțiune este nevoie de un concept nou.

Criteriile impuse sistemului interactiv pentru planificarea sarcinilor vehiculelor autonome sunt:

- prelucrarea cererilor după principiul *primul venit, primul servit* cu generarea de *răspunsuri imediate*;
- în cazul în care solicitarea nu poate fi îndeplinită, sistemul oferă clienților *variante alternative* disponibile pentru o perioadă scurtă de timp, în care clientul poate alege una dintre acestea sau să le respingă și să efectueze o nouă cerere;
- *optimizarea traseului* raportat la distanța parcursă sau la timpul necesar realizării sarcinii. În cazul în care optimizarea se face în funcție de timp, este necesară o istorie a traseelor efectuate precum și o clasificare în funcție de parametrii privind condițiile de vreme (sezon) și de perioada temporală (ziua și oră);
- *prioritizarea cererilor* asigură execuția unei cereri între două cereri existente;
- *interacțiune permanentă* între clienți și vehicule; beneficiarul poate urmări neîntrerupt vehiculul autonom și interacționa cu acesta; pentru sarcini cum sunt cele de livrare colete este indicat ca beneficiarul să poată ridica coletul și în cazul în care vehiculul se află în proximitatea acestuia.

Găsirea unei soluții algoritmice optime respectând toate criteriile stabilite este deseori anevoioasă deoarece efectele acestora sunt deseori contradictorii. Astfel, se impune conceperea unui sistem ierarhic prin care interacțiunea cu utilizatorii să fie prioritară în fața criteriilor privind timpul de realizare a sarcini și drumul optim de parcurs.

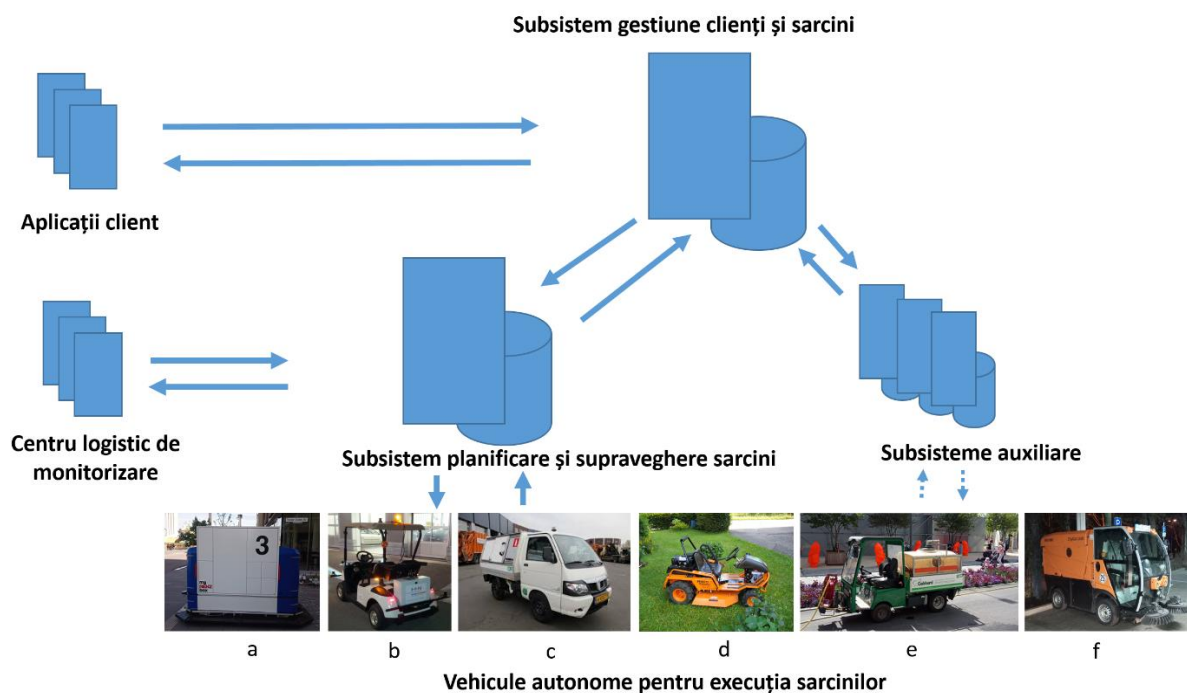
#### 3.2 ARHITECTURA GENERALĂ A SISTEMULUI DE PLANIFICARE A SARCINILOR

Pentru a putea îndeplini criteriile definite mai sus este nevoie de un sistem structurat logic care să permită interacțiunea între beneficiarii serviciilor și vehiculele autonome organizate în flote. În Fig. 3.1 se prezintă arhitectura unui sistem de planificare conceput,

dezvoltat și implementat în această teză, care permite această interacțiune. Acesta are caracter de generalitate putând fi utilizat pentru o gamă largă de sarcini cu diverse vehicule autonome organizate în flote.

Clienții (beneficiarii), pentru a solicita execuția și urmărirea unei sarcini, au la dispoziție un modul *Aplicații client* cu interfețe grafice care pot rula pe diverse dispozitive (smartphone, tabletă, calculator). La solicitarea primei sarcini, prin intermediul interfeței grafice sunt înregistrați în *subsistemul de gestiune clienți și sarcini*, unde datele acestora sunt stocate într-o bază de date. De asemenea, informațiile despre sarcinile cerute sunt stocate în aceeași bază de date. Subsistemul de gestiune clienți și sarcini, trimite cererea împreună cu lista de vehicule care pot efectua sarcina la *subsistemul de planificare și supraveghere sarcini*. Funcțiile acestui subsistem sunt: *preluarea cererii*, *planificarea sarcinii* pentru un vehicul autonom, *răspunsul* după planificare către client, *supravegherea vehiculelor autonome* privind îndeplinirea sarcinilor și *informarea clienților despre starea acestora*. Pentru comunicarea între cele două subsisteme se poate folosi un broker de mesaje, care să salveze cererile în cazul în care subsistemul de planificare nu este activ. Funcționarea subsistemului de planificare și supraveghere sarcini este monitorizat de un operator din *Centru logistic de monitorizare*, care are posibilitatea să intervină prin intermediul unei interfețe grafice în procesul de planificare și execuție a sarcinilor; de exemplu în caz de avarie, accidente etc. Astfel, acesta poate corela și monitoriza etapele de planificare, vizualiza orarul fiecărui vehicul, solicita modificări, ale sarcinilor planificate și în derulare etc. Subsistemul de gestiune clienți și sarcini comunica prin modulul *subsisteme auxiliare* cu sisteme externe care pot fi: servere de la unitatea administrativă a zonei pietonale, servere bancare etc.

Din punct de vedere a cererii execuției unei sarcini sunt posibile două variante. Prima, clientul face cererea la nivelul vehiculului autonom care informează beneficiarul despre sarcina de realizat și acesta decide condițiile de execuție, care sunt transmise subsistemului de gestiune clienți și sarcini. A doua, clientul (beneficiarul) face cererea prin intermediul modulului aplicații clienți, instalat pe dispozitiv mobil (telefon sau calculator), alegând sarcina dintr-o listă pusă la dispoziție de interfața grafică. În cazul în care se impune plata execuției sarcinii se face conexiunea cu serverul bancar.



**Fig. 3.1** Arhitectura sistemului de planificare interactivă a sarcinilor cu diverse vehicule pentru: **a** – livrare colete; **b** – transport persoane; **c** – colectare gunoi; **d** – tuns iarbă; **e** – stropire vegetație; **f** – curățenie stradă



### 3.3 STRUCTURA ȘI FUNCȚIONAREA SISTEMULUI DE PLANIFICARE A SARCINILOR DE LIVRARE COLETE

Arhitectura generală (Fig. 3.1) a fost implementată pentru sarcini de livrare colete într-un mediu pietonal local. În acest mediu accesul vehiculelor rutiere, inclusiv al celor de curierat, este interzis și se impune folosirea de vehicule autonome care ca urmare a solicitărilor clienților preiau coletele de la stația de depozitare și apoi le livrează conform cerințelor stabilite interactiv. În Fig. 3.2 se prezintă structura comunicațiilor sistemului de planificare dezvoltat.

Componenta principală a sistemului este subsistemul de *planificare/supraveghere sarcini* care rulează pe un server și are o bază de date proprie în care este reprezentat programul (orarul) de sarcini al *vehiculelor autonome*. Comunicarea cu acestea și cu *centrul logistic de monitorizare* este realizată printr-un protocol securizat de tip TCP. Subsistemul comunică cu *subsistemul de gestiune clienți/sarcini* folosind brokerul de mesaje ActiveMQ [Bish, 2013] pentru a recepționa solicitările în formă de mesaje JAVA (Java Message) și prin apeluri REST (Representational State Transfer) pentru a răspunde la solicitări. REST este un standard modern de dezvoltare pentru aplicații în rețea care comunică pe baza unui protocol de tip server client de regulă HTTP [Balachandar, 2017]. Comunicarea între subsisteme are loc într-o rețea privată (VPN), iar separarea *subsistemului de planificare/supraveghere sarcini* de *subsistemul gestiune clienți/sarcini* este realizată din motive de securitate cibernetică, cel din urmă fiind singurul subsistem care poate comunica în afara acestei rețele. Astfel este îngreunat un atac cibernetic asupra vehiculelor autonome. Subsistemul de gestiune clienți/sarcini reține într-o bază de date informații despre clienți și sarcinile derulate, transmite solicitările efectuate de clienți (beneficiari) subsistemului de planificare/supraveghere sarcini și îi informează despre stadiul de planificare și execuție a sarcinilor. Solicitățile sunt efectuate folosind o *aplicație web (progressive web app [Ater, 2017])* care poate rula pe orice dispozitiv cu un browser instalat. Comunicarea cu clienții are loc prin notificări PUSH sau e-mail, iar solicitările efectuate de clienți și răspunsul la acestea se transmit prin apeluri REST. O altă aplicație web permite *vizualizarea vehiculelor* pe harta mediului de operare. Subsistemul gestiune clienți/sarcini comunică cu un *subsistem auxiliar* pus la dispoziție de firma RENZ [www38] care administrează boxele de pe vehicule folosite pentru livrare.

După ce un colet este depozitat într-o cutie poștală a boxei, sistemul auxiliar informează prin intermediul subsistemului gestiune clienți/sarcini destinatarul, care poate solicita livrarea.

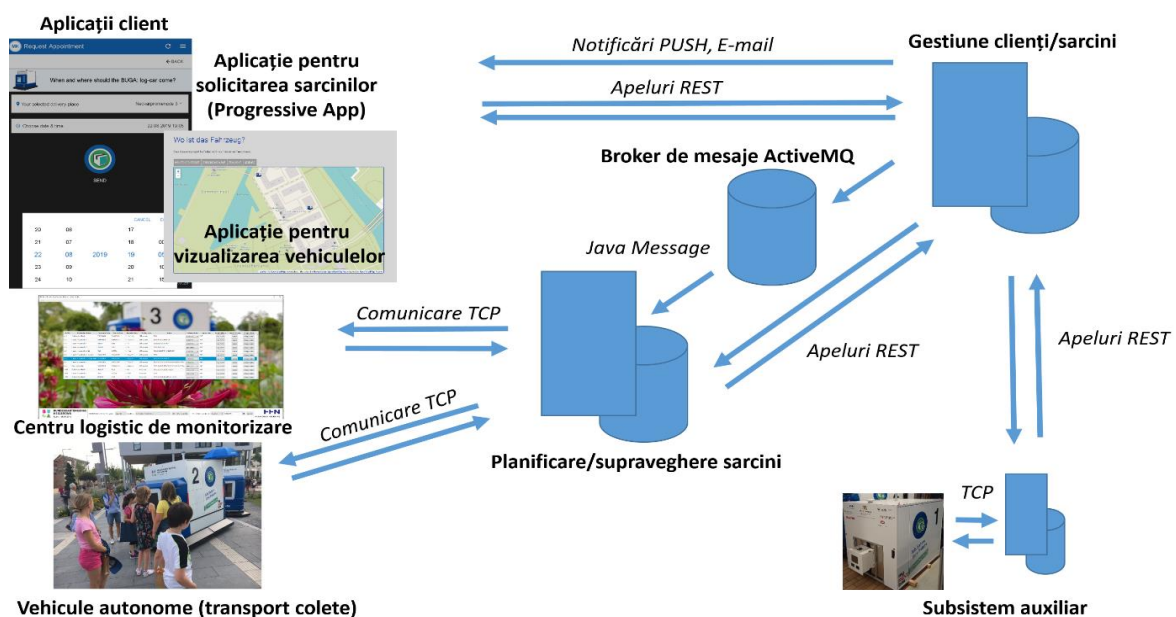


Fig. 3.2 Structura comunicațiilor sistemului de planificare a sarcinilor de livrare colete

De asemenea beneficiarul poate solicita vehiculul folosind aplicația client pentru solicitare a sarcinilor la o destinație, unde introduce el un colet pentru alt client.

În Fig. 3.3 se prezintă schema funcțională a sistemului de planificare a sarcinilor de livrare colete evidențiind acțiunile din cadrul proceselor de preluare și execuție a sarcinilor. Clientul solicită sarcina folosind aplicația client, specificând *data*, *ora* și *locația* unde să fie executată sarcina și după caz *durata de executare*, iar aceasta este trimisă subsistemului de gestiune clienți/sarcini unde este actualizată baza de date. În cazul în care nu există costuri pentru efectuarea sarcinii, solicitarea este redirectionată către subsistemul de planificare și monitorizare sarcini. Aici dacă cererea este validă și nouă se încearcă planificarea unui vehicul pentru executarea acesteia. În cazul în care planificarea reușește este actualizat orarul și baza de date a subsistemului, iar clientul primește o confirmare. În caz negativ subsistemul de planificare găsește trei alternative de executare a sarcinii pe care le trimite clientului și le salvează provizoriu în baza de date. Prima alternativă este, cea mai rapidă oră posibilă după ora solicitată de client, iar celelalte două depind de perioadele de operare ale vehiculelor. Clientul poate opta pentru una din alternative și retrimite informația subsistemului de planificare sarcini sau respinge alternativele și efectua o nouă solicitare. Prin acest mod de interacțiune se

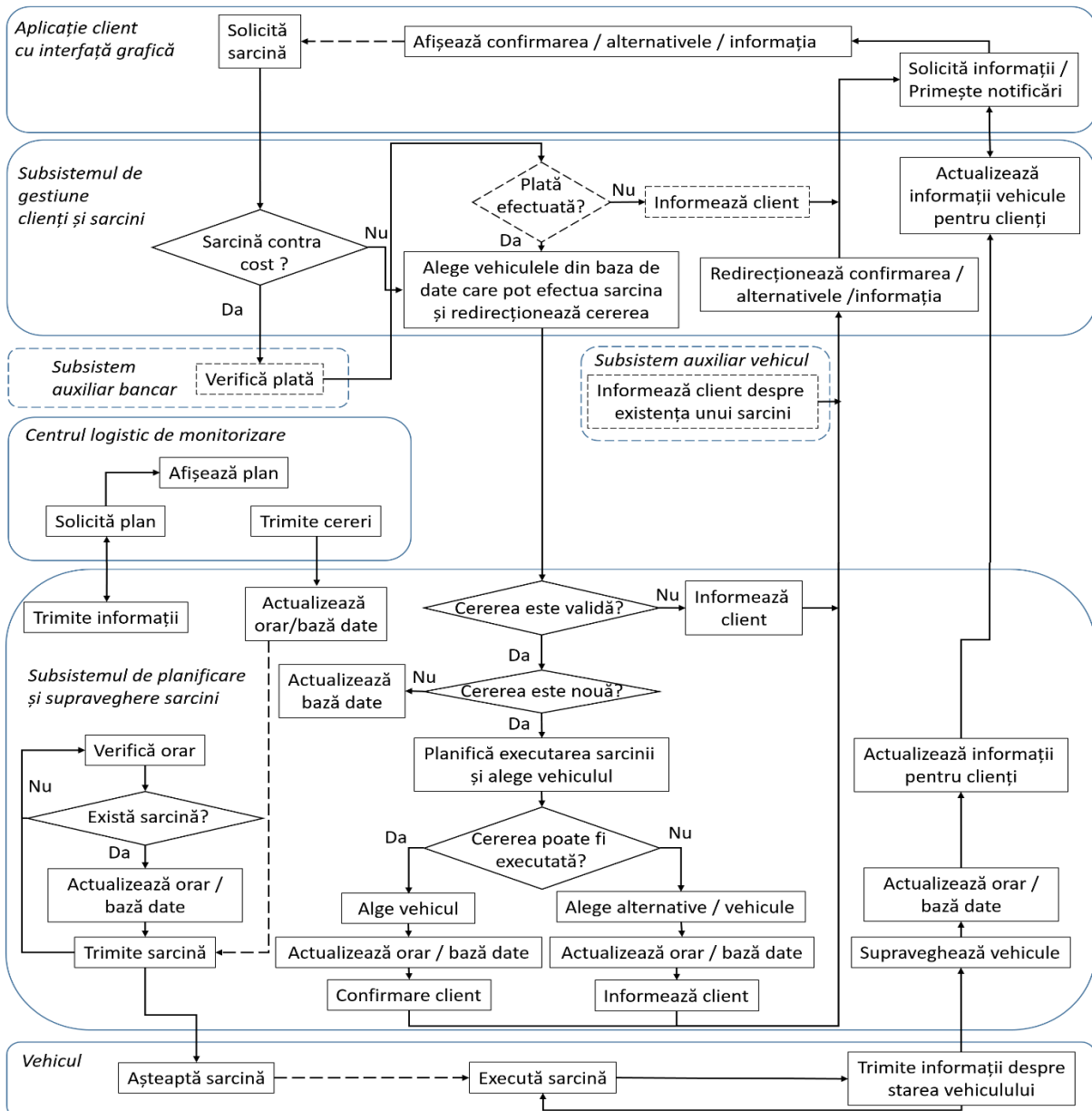


Fig. 3.3 Schema funcțională a sistemului de planificare

urmărește sporirea acceptanței în rândul beneficiarilor acestui sistem. Informația este trimisă subsistemului de planificare unde sunt actualizate orarul și baza de date, pentru cazul în care clientul a optat pentru una din alternative sau este reinițializat procesul de planificare, după ștergerea celor trei sarcini planificate provizoriu din orar și baza de date. În cazul în care clientul nu răspunde într-un interval definit de timp (un minut) cele trei sarcini planificate provizoriu sunt șterse. Sarcinile planificate pot fi stornate de către client sau de către sistem în cazul în care din motive tehnice acestea nu pot fi duse la îndeplinire. Subsistemul de planificare supervizează procesul care urmărește programul vehiculelor autonome și trimite acestora comenzile pentru executarea sarcinii la momentul planificat. Vehiculele trimit într-un ciclu de timp definit informații despre starea în care se află. Astfel este posibilă urmărirea execuției sarcinii și informarea clienților despre stadiul în care se află solicitarea. Pentru sarcina de livrare colete aceștia pot vizualiza permanent locația vehiculului pe hartă, primesc o notificare în caz de întârziere sau stornare a livrării și o notificare în momentul când vehiculul se află la locația solicitată și clientul trebuie să intervină, prin ridicarea coletului. Întregul proces de planificare și executare a sarcinilor este supravegheat de la centrul logistic de monitorizare cu operator uman. Acesta poate vizualiza programul de lucru al fiecărui vehicul autonom, reprioritizează sarcinile și intervine prin trimiterea de comenzi cu o prioritate mai mare vehiculului.

### 3.4 COMPONENTE ALE SISTEMULUI DE PLANIFICARE A SARCINILOR DE LIVRARE COLETE

#### 3.4.5 SUBSISTEMUL DE PLANIFICARE ȘI SUPRAVEGHERE SARCINI

Pentru implementarea pachetelor software pe subsistemul de planificare și supraveghere s-a folosit limbajul JAVA, iar baza de date în care sunt salvate sarcinile pe care vehiculul trebuie să le execute este una proprie bazată pe fișiere. Subsistemul comunică printr-un protocol securizat TCP cu vehiculele care trebuie să execute sarcinile. Aici s-a ales acest protocol în detrimentul apelurilor REST deoarece este posibilă transmiterea de informații mai voluminoase (cum ar fi date senzoriale vision) în scop de logare sau urmărire a vehiculului autonom. Pentru a comunica cu serverul de planificare vehiculele autonome sunt dotate cu carduri LTE. Un proces implementat pe subsistem verifică periodic orarul vehiculelor și trimite comenzile pentru sarcinile pe care acestea trebuie să le execute, iar un alt proces supraveghează execuția acestor sarcini și trimite informațiile clienților prin subsistemul de gestiune clienți.

Vehiculul autonom, în momentul în care primește sarcina, trimite o confirmare, începe execuția acesteia și trimite o informare în momentul în care execuția este încheiată. De asemenea, la fiecare interval de 5 s vehiculele trimit poziția la care se află. Astfel, la nivel de server este posibilă estimarea timpului de sosire la destinație și informarea clientului în caz de întârziere și de sosire la destinație. Statusul solicitării se schimbă în DRIVING în momentul în care vehiculul pleacă către destinație, în DELAYED când se estimează că vehiculul va întârzia mai mult de o perioadă de timp și în WAITING în momentul în care vehiculul este la destinație. Sistemul așteaptă cererile clienților și răspunde de planificarea sarcinilor pentru vehiculele autonome folosind un pachet software dezvoltat, bazat pe algoritmul prezentat în continuare.

### 3.5 ALGORITM PENTRU PLANIFICAREA INTERACTIVĂ A SARCINILOR

#### 3.5.1 STRUCTURA DATELOR ȘI RELAȚII DE CALCUL

Pentru planificarea sarcinilor unui vehicul autonom se stabilește un program de lucru

inițial alcătuit din secvențe zilnice în care acestea se pot executa [Kocsis, 2017a]. Vehiculul autonom în timpul unei zile are un program configurat în perioade de operare (de ex. 9-14 și 15:15-19) pentru executarea sarcinilor și de alimentare (14-15:15 și 19-9).

Pentru a îndeplini o sarcină vehiculul autonom trebuie să se deplaseze la locul de destinație unde aceasta trebuie să o execute, urmărind un traseu/traiectorie, de asemenea, planificate (v. cap. 6). Aici sarcina poate fi executată în mod static, vehiculul stă pe loc în timpul execuției, sau dinamic vehiculul se deplasează în timpul execuției. O sarcină este modelată în subsistemul de planificare într-o clasă cu atributele: *ID*, ora de plecare  $t_{plecare}(s)$ , ora de sosire la destinație  $t_{sosire}(s)$ , ora la care este solicitată începerea execuției  $t_{solicitat}(s)$ , timpul de executare a sarcinii  $timpExecutareSarcină(s)$ , *statusul*, descrierea traseului pe care vehiculul trebuie să îl urmeze pentru a ajunge la destinație  $noduriTraseu(s)$  și *ora de valabilitate*  $t_{valabilitate}(s)$ . Ora de valabilitate este completată atunci când sarcina este salvată provizoriu în baza de date, deoarece sistemul respinge cererea clientului, oferă alternative și așteaptă confirmarea acestora.

Pentru planificarea sarcinilor este folosit un graf care sintetizează în mod abstract toate traseele posibile în mediul de operare. Acest graf, notat cu  $G = (N, A)$ , unde  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  cu  $n$ , numărul de noduri și  $A = N \times N$ , reprezintă mulțimea muchiilor (conexiunilor) dintre noduri (Fig. 3.4). Un traseu este o listă ordonată de muchii care fac legătura între două noduri. Un nod este definit: de un identificator (N0, N1, N2.....Nn), poziția absolută compusă din latitudine și longitudine și un nume, care poate fi adresa la care este situat nodul. Fiecărei muchii,  $a_{i,j} \in A$ , unde  $i$  și  $j$  reprezintă ID-urile nodurilor,  $i$  se asociază un cost  $c(a_{i,j})$  care reprezintă timpul necesar vehiculului pentru parcurgerea muchiei. Acest cost depinde de condițiile de trafic înregistrate în perioada parcurgerii muchiei și este actualizat după parcurgerea acesteia. În grafurile traseelor posibile se identifică pe lângă nodul N0, asociat stației de alimentare, și nodurile care pot fi atinse de vehicul.

Fiecare vehicul are la inițializare pentru fiecare perioadă de operare două sarcini predefinite care presupun deplasările în nodul de așteptare și înapoi în nodul asociat stației de alimentare, timpurile de execuție a acestora fiind de zero secunde. Primul traseu, marcat cu albastru în Fig. 3.4 este între nodul N0 și un nodul de staționare (așteptare) N1, unde vehiculul va staționa până la primirea unei comenzi de execuție a unei sarcini. Al doilea traseu, marcat cu verde, se parcurge la finalul perioadei de lucru, în cazul în care nu a apărut o altă sarcină de realizat, și presupune deplasarea spre parcare din stația de alimentare.

Timpul de plecare pentru execuția primei sarcini predefinite  $t_{plecare}(s_0)$  este ora la care vehiculul pornește din nodul N0 și începe deplasarea spre nodul N1. Timpul de parcurgere al traseului pentru sarcina 0 ( $s_0$ ) este dat de suma timpurilor de parcurgere a fiecărei muchii,  $c_{i,j}$ ,

$$timpParcurgereEstimat(s_0) = \sum(c_{i,j})(s_0). \quad (3.1)$$

Timpul de sosire în nodul final,

$$t_{sosire}(s_0) = t_{plecare}(s_0) + timpParcurgereEstimat(s_0), \quad (3.2)$$

nu este neapărat același cu timpul solicitat de client. Pentru a preveni eventuale întârzieri, date

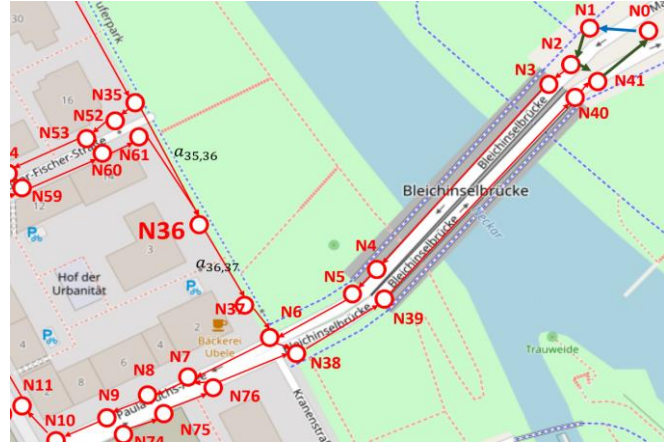


Fig. 3.4 Graful traseelor posibile pentru planificarea sarcinilor, marcat în harta de operare din mediul pietonal

de condițiile de trafic de pe traseu, vehiculele sunt programate să ajungă mai devreme,

$$t_{solicitat}(s_0) = t_{sosire}(s_0) + timpSosireDevreme(s_0), \quad (3.3)$$

timpul de sosire mai devreme fiind specificat într-un fișier de configurare.

Timpul de lucru,  $timpExecutareSarcină(s_0)$ , este timpul necesar execuției sarcinii la destinație; pentru prima sarcină predefinită se consideră, de obicei, 0. Pentru a doua sarcină predefinită în care vehiculul parcurge traseul de retragere, ora solicitată  $t_{solicitat}(s_1)$  este 14:00. Timpul de executare a acestei sarcinii la destinație  $timpExecutareSarcină(s_1)$  este 0.

Timpul estimat pentru parcurgerea traseului asociat sarcinii  $s_1$ ,  $timpParcurgereEstimat(s_1)$  este calculat cu relația (3. 2). Orele de sosire și de plecare pentru sarcina  $s_1$  sunt calculate prin relațiile:

$$t_{sosire}(s_1) = t_{solicitat}(s_1) - timpSosireDevreme(s_1), \quad (3.4)$$

$$t_{plecare}(s_1) = t_{sosire}(s_1) - timpParcurgereEstimat(s_1). \quad (3.5)$$

La recepționarea solicitării clientului este rulat algoritmul de planificare. Solicitarea primită conține data și ora la care este solicitată sarcina  $t_{solicitat}(s)$ , ID-ul nodului de livrare  $N_k$ , după caz timpul necesar pentru executarea acesteia, statusul (PENDING) și o listă cu ID-urile vehiculelor autonome care pot executa sarcina solicitată. Pentru o sarcină de livrare a unui colet care se află în boxa vehiculului, această listă va conține un singur ID, cel al vehiculului în care se află coletul. Solicitarea, în plus, mai are un câmp de tip text, unde subsistemul de planificare introduce mesajul care va fi trimis clientului în urma planificării și un câmp cu ID-ul de referință al unei sarcini anterioare (dacă există). Valoarea acestui ID este zero dacă solicitarea este nouă.

### 3.5.2 ALGORITMUL DE PLANIFICARE

Acest algoritm caută vehiculul autonom care poate executa sarcina specificată în solicitare și verifică dacă este posibilă execuția acesteia între sarcinile existente (de ex. între  $s_k$  și  $s_{k+1}$ ) în ziua și la ora solicitată. Sunt create două obiecte care descriu sarcinile,  $s'_k$  și  $s'_{k+1}$ , pentru care sunt determinate traseele între ultimul nod care trebuie parcurs pentru sarcina  $s_k$  și nodul destinație cu ID-ul  $N_k$ , traseul dintre nodul  $N_k$  și ultimul nod (destinație) al traseului sarcinii  $s_{k+1}$ , precum și timpii de parcurgere estimați, folosind căutarea în graf Dijkstra [Goyal, 2014] și relația (3. 1). Astfel sunt calculați parametrii sarcinii  $s'_k$  cu  $t_{solicitat}(s'_k)$ , ora solicitată de client, iar timpul de executare a sarcinii,  $timpExecutareSarcină(s'_k)$  este pentru sarcinile de livrare, timpul de așteptare pentru ridicarea coletului. Ora de sosire  $t_{sosire}(s'_k)$  și de plecare  $t_{plecare}(s'_k)$  sunt calculate cu relațiile (3. 4) și (3. 5).

În cazul în care ora de plecare nu este în trecut și după terminarea sarcinii  $s_k$ :

$$t_{plecare}(s'_k) \text{ isAfter } oră \text{ actuală \&\&} \\ t_{plecare}(s'_k) \text{ isAfter } t_{solicitat}(s_k) + timpExecutareSarcină(s_k), \quad (3.6)$$

sarcina  $s'_{k+1}$  cu noul traseu și timpul de parcurgere estimat, preia de la sarcina existentă  $s_{k+1}$  ceilalți parametri și este calculat noul timp de plecare  $t_{plecare}(s'_{k+1})$  folosind relația (3. 5).

Pentru a putea înlocui sarcina  $s_{k+1}$  cu sarcinile  $s'_k$  și  $s'_{k+1}$ , ora de plecare către nodul destinație al sarcinii  $s'_{k+1}$ , trebuie să fie după terminarea execuției sarcinii  $s'_k$ ,

$$t_{plecare}(s'_{k+1}) \text{ isAfter } t_{solicitat}(s'_k) + timpExecutareSarcină(s'_k), \quad (3.7)$$

Dacă condițiile sunt îndeplinite,  $s'_k$  primește statusul ACCEPTED și ID-ul sarcinii solicitate.

Algoritmul descris mai sus (v. Anexa 1) ia în considerare două situații de livrare

posibile: monoclient și multiclient cu livrare pentru mai mulți clienți la aceeași adresă, unde timpul de sosire mai devreme este luat în considerare doar pentru prima sarcină.

În cazul în care sarcina nu poate fi executată la ora dorită, se caută în perioade de operare, de asemenea, impuse de client (de ex. dimineața până la 9, după ora 13, între 10 și 12) cea mai apropiată oră de după ora de livrare solicitată, menționată în prima perioadă de operare. Pentru a găsi această oră, se stabilește ora de plecare, ținând cont de orele de livrare ( $t_{solicitat}(s_k)$ ) și de execuție ( $timpExecutareSarcină(s_k)$ ), a unei sarcini programate anterior,

$$t_{plecare}(s'_k) = t_{solicitat}(s_k) + timpExecutareSarcină(s_k), \quad (3.8)$$

Algoritmul rulează până sunt găsite trei posibilități de executare a sarcinii în perioade diferite de operare, și le salvează provizoriu în orarul vehiculului autonom și în baza de date cu statusul PENDING. Cele trei posibilități determinate pentru  $t_{solicitat}(s'_k)$  precum și zilele în care sunt programate sunt trimise clientului. Mesajul include o oră de valabilitate și dacă clientul nu confirmă în termenul impus, cele trei posibilități sunt șterse. Pentru cazul multiclient, când destinația sarcinii  $s'_k$  este aceeași cu destinația sarcinii  $s_{k+1}$  și ora găsită  $t_{solicitat}(s'_k)$  este într-un interval impus specificat (de ex. o jumătate de oră) față de  $t_{solicitat}(s_{k+1})$  sarcinile de livrare vor fi executate simultan. Astfel sarcina  $s'_k$  preia inițial toate atributele de la sarcina  $s_{k+1}$ , cu excepția traseului și a timpului de plecare și este introdusă în urma acesteia în lista de sarcini. Traseul sarcinii  $s'_k$  este compus dintr-un singur nod, ora de plecare este aceeași cu cea de sosire, este schimbat ID-ul, statusul solicitării este setat pe valoarea PENDING, iar ora de valabilitate este setată la un minut după ora actuală. Pentru sarcinile care pot fi executate de mai multe vehicule autonome, algoritmul de planificare este aplicat pentru toate vehiculele înscrise în lista asociată și este ales vehiculul autonom care realizează cel mai scurt timp de parcurgere.

### 3.7 CONCLUZII

În acest capitolul se propune un sistem inovativ de planificare a sarcinilor care are loc în mod interactiv, acesta fiind realizat automat după cererea clientului. Sistemul răspunde prompt la solicitările clienților, planificarea este realizată dinamic, este folosit principiul *primul sosit primul servit*, dar se ține cont și de *traseul optim* al vehiculului autonom. Astfel, o solicitare primită mai târziu poate fi executată înaintea unei solicitări existente, dacă din punct de vedere al timpului de execuție acest lucru este posibil. Deoarece, acest tip de planificare nu poate fi rezolvat cu soluțiile existente (de ex. bazate pe tehnica comisului voiajor și derivatele acesteia), s-a conceput, dezvoltat, implementat și testat un sistem ierarhic de *planificare interactivă* a sarcinilor.

Avantajul major al acestui tip de planificare este răspunsul prompt al sistemului la cererile clienților bazat pe faptul că, pe de-o parte, timpul și locul de execuție a sarcinii sunt specificate de beneficiar și, pe de altă parte, execuția sarcinii se face automat cu abateri reduse de la termenele planificate. În cazul sarcinilor de livrare (de ex. colete poștale), sunt evitate livrările la domiciliul clientului în care acesta nu este disponibil pentru a le recepționa. În plus, se poate menționa ca avantaj și costul redus, consecință a adoptării de trasee optimizate care pot asigura livrări parcurgând distanțe minime respectând constrângerile impuse. Aceste aspecte sunt de importanță majoră pentru o acceptanță mărită în rândul clienților, dar au și avantaje din punct de vedere economic [Zöllner, 2021].

Sistemul poate fi extins și pentru cazurile în care din vari motive, mai ales, legate de clienți, destinatarul coletului nu este acasă pentru o perioadă mai lungă de timp. În acest caz, pentru a preveni ca pachetul să blocheze un spațiu în boxa vehiculului autonom, clientul specifică printr-o notificare că nu este disponibil, iar sistemul va bloca încărcarea coletului destinat acestuia, până când va fi disponibil.



## 4. VEHICUL AUTONOM PENTRU SERVICII ÎN MEDII PIETONALE

### 4.1 ASPECTE GENERALE

Structura unui vehicul autonom care operează în medii pietonale depinde în mare măsură de serviciul pe care acesta trebuie să îl îndeplinească. Pentru servicii în medii pietonale există deja unele autovehicule utilitare clasice, cu conducător auto. Având în vedere tendința actuală de dezvoltare de autovehicule autonome care pentru siguranță mențin, încă, și conducătorul auto, acestea se pot obține prin transformarea și completarea autovehiculelor clasice pentru a deveni cu un nivel de autonomie cât mai ridicat. Pe de altă parte, se impune conceperea și dezvoltarea unor structuri de autovehicule cu autonomie totală (fără conducător auto) care în viitor să devină standarde în domeniu.

În acest capitol se prezintă o metodologie de proiectare și dezvoltare a unui autovehicul autonom prin transformarea unui autovehicul clasic existent [Kocsis, 2016a]. Avantajul principal al acestui proces este legat de faptul că se pornește de la structuri de bază (șasiu, transmisii, sistem de direcție etc.) care și-au demonstrat funcționalitatea și fiabilitatea în practică. În acest caz se impune ca construcția modificată și completată să fie reomologată. Dacă autovehiculul existent este deja omologat din punct de vedere tehnic, după procesul de transformare și completare este nevoie doar de omologarea părților modificate sau adăugate.

Criteriile care sunt luate în considerare la alegerea autovehiculului inițial depind de sarcinile de realizat și de mediul de operare. Astfel pentru mediile pietonale criteriile generale sunt: gabarit adecvat căilor pe care va naviga, caracteristici tehnice cerute de sarcina de realizat, posibilități de transformare pentru a deveni autonom, emisii de noxe cât mai reduse; poluare fonică redusă; acceptanță cât mai mare în rândul populației. Pentru a îndeplini aceste criterii vehiculele electrice sunt net superioare celor cu motoare cu ardere internă (termice), respectând criteriile de poluare dar, mai ales, asigurând adaptabilitate și compatibilitate la completarea cu sisteme senzoriale, de comandă și control și de comunicații.

Deoarece, introducerea vehiculelor autonome în medii pietonale este încă la început, actual, acceptanța de către populație este dificil de evaluat. Acest criteriu va putea fi evaluat prin teste de interacțiune a vehiculelor autonome cu pietonii ca parteneri de circulație. În această lucrare s-a insistat, cu precădere, pe sarcini de transport mărfuri de gabarite reduse (de ex. colete poștale ușoare) care se extinde și cu alte sarcini, care pentru a fi efectuate este nevoie de atașarea la vehiculul autonom a unui agregat suplimentar (de curățire, udare, tuns iarbă etc.)

La proiectarea vehiculelor autonome utilitare pe lângă rezolvarea problemelor de navigare autonomă se impune și conducerea automată a agregatului suplimentar care, deseori, are o unitate de acționare proprie cu motoare electrice sau termice. În cazul acționării agregatelor suplimentare cu motoare electrice având în vedere consumul energetic mărit, autonomia de deplasare se reduce. Astfel, pentru antrenarea acestora, pe de-o parte, agregatele suplimentare pot folosi motoare termice sau, pe de altă parte, se poate implementa o soluție de acționare hibridă care, în plus, poate asigura și încărcarea bateriilor de alimentare ale motoarelor de navigare [Kocsis, 2015].

Pentru a putea evalua, preliminar, soluțiile propuse este necesar ca la proiectare să se utilizeze un mediu de simulare în care să se studieze comportarea subsistemelor (actuatoare, agregate suplimentare, senzori etc.) precum și întregul ansamblu. Acesta facilitează optimizări și reduce timpul și costul de proiectare. În mediul de simulare se pot modela toate procesele pentru executarea sarcinii principale, de navigare în mediul de operare, precum și a celor suplimentare de intervenție în acest mediu [Kocsis, 2016].

În cazul vehiculelor autonome, sistemul de comandă și control compus, din una sau mai multe unități computaționale, preia funcțional locul conducătorului auto, acesta asigurând supervizarea funcționării și intervenția în cazuri de avarie. Astfel, în funcție de sarcinile de realizat în mediul de operare, vehiculul autonom trebuie să conțină actuatoare (de ex. pentru direcție sau frânare), senzori externi și interni care să ofere informații despre mediu și, respectiv starea vehiculului (de ex. viteza de deplasare sau unghiul de virare) și un sistem de comandă și control, care bazat pe pachete software dedicate să coordoneze toate subsistemele componente.

Pentru alegerea și transformarea unui vehicul existent într-un vehicul autonom s-a elaborat o metodologie de proiectare prin care, pe lângă, satisfacerea cerințelor funcționale impuse, în plus, s-a urmărit, dezvoltarea de arhitecturi modulare, prin implementarea subsistemelor de tip open source, care asigură, pe de-o parte, interschimbabilitate mărită și pe de altă parte, costuri reduse.

## 4.2 CONCEPT GENERAL DE PROIECTARE, DEZVOLTARE ȘI TESTARE VEHICULE AUTONOME PRIN TRANSFORMARE

Pentru ca un vehicul clasic, cu conducător auto, să poată deveni autonom, de obicei, se impune concepția și dezvoltarea unor subsisteme care asigură comanda și controlul propulsiei și virării, precum și de percepție a mediului de operare. Astfel, este nevoie de un proces de transformare/dezvoltare *top-down* care pornind de la platforma inițială a vehiculului asigură etapele de modificare și/sau completare a acestora în vederea îndeplinirii funcțiilor de navigare autonomă. În Fig. 4.1 se prezintă algoritmul general de transformare care urmează să fie aplicat și evaluat prin intermediul cercetărilor din cadrul acestei teze de doctorat.

Structura hardware existentă modificată și completată cu alte componente (actuatoare, senzori, unități de control electronice etc.) se organizează pe subsisteme funcționale pentru a putea controla vehiculul prin intermediul unei unități centrale de comandă și control. Astfel, s-au identificat următoarele subsisteme: de accelerare, de frânare, de schimbare a sensului de deplasare, de direcție, senzorial, mecanic, de alimentare și de siguranță (Fig. 4.2). Funcționalitatea subsistemelor este coordonată de câte o unitate de control și comandă proprie care la nivel de sistem global sunt corelate de o unitate de comandă și control centrală (MCU). În algoritmul din Fig. 4.1 se evidențiază faze de testare individuală a fiecărui subsistem urmate de o fază de testare în cadrul sistemului vehiculului autonom. De asemenea, pentru fiecare subsistem se are în vedere alimentarea cu energie prin intermediul unui subsistem de alimentare cu unități de încărcare, stocare și management energetic evolute.

Prima etapă presupune dezvoltarea subsistemului de accelerare pornind de la tipul motorului de propulsie (termic, electric sau hibrid). În cadrul cercetărilor din această lucrare s-a detaliat acest subsistem pentru cazul unui motor de propulsie electric. În cadrul celei de-a doua etape se configurează subsistemul de frânare care poate fi electric sau hidraulic. În cazul unei frâne electrice, de obicei, frânarea se realizează prin intermediul unui dispozitiv cu discuri de fricțiune care acționează ca urmare a anulării tensiunii de alimentare. Dacă frâna este hidraulică se poate integra un dispozitiv acționat cu un motor electric, care să acționeze controlat frâna. A treia etapă, deoarece majoritatea vehiculelor electrice nu au o cutie de viteze, pentru schimbarea sensului se impune dezvoltarea unui dispozitiv de comutare care, de asemenea, comunică cu MCU. Cea de a patra etapă implică concepția și dezvoltarea unui subsistem de direcție (virare) controlat care interacționează cu subsistemul de direcție al vehiculului acționat de conducătorul auto. De obicei, acest subsistem este acționat de un motor electric cu propria electronică de putere montat pe coloana volanului. În cazul în care vehiculul dispune de servodirecție cu motor electric se poate analiza posibilitatea de a folosi acest motor pentru controlul direcției. După testarea individuală a celor patru subsisteme create, se verifică funcționarea principală integrată în vehicul. În cadrul următoarei etape, a cincea, se impune alegerea și integrarea senzorilor



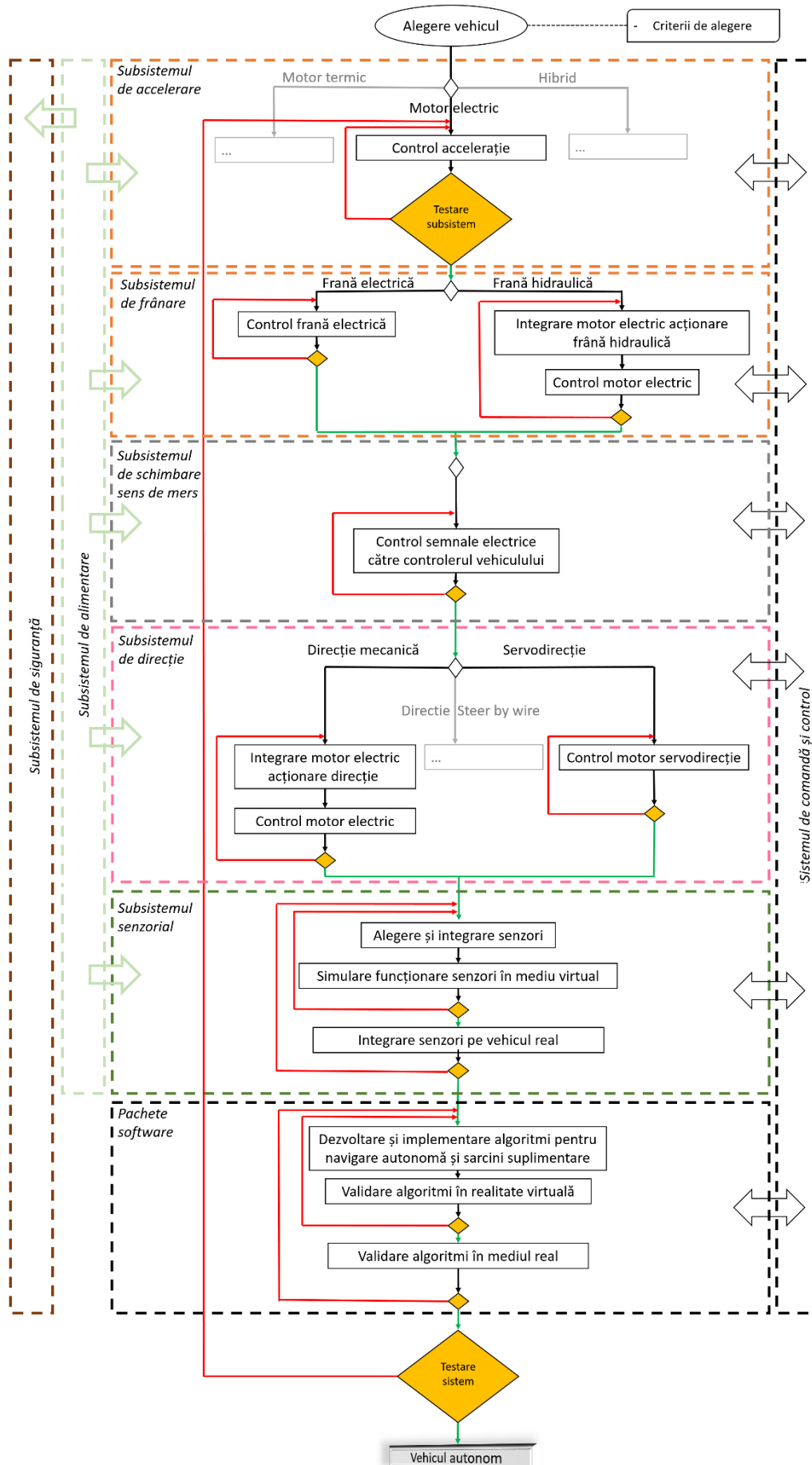


Fig. 4.1 Algoritm general de transformare a vehiculelor clasice în vehicule autonome

interni, pentru evaluarea stărilor vehiculului și externi, pentru recunoașterea mediului înconjurător. Pentru micșorarea timpului de transformare a vehiculului și alegerea eficientă se aplică procedee de simulare prin care se pot verifica și stabili atât tipul senzorilor ceruți de scenariile de navigare/operare, poziționarea optimă a acestora pe vehicul, precum și modurile achiziției de date. Etapele cinci și șase au caracter global și au ca scop dezvoltarea unui subsistem de alimentare a motoarelor de acționare și a dispozitivelor electrice/electronice și, respectiv, a unui sistem de siguranță pentru protecția persoanelor, a mediului și a structurilor hardware proprii. Ultima etapă, a șaptea, presupune dezvoltarea de programe și subprograme care implementate în unitățile de comandă și control locale (ECU – Electronic Control Units) și MCU asigură funcțiile de navigare autonomă și de prestare a serviciului cerut. Și în cadrul acestei etape, se impun simulări în realitate virtuală care, în principal, reduc timpul și costurile procesului de dezvoltare și testare, nefiind nevoie de numeroase teste în medii reale. După validarea subsistemelor și a parametrilor de funcționare a acestora în medii virtuale și reale se va face testarea și validarea acestora în medii reale, în diverse situații de navigare/operare a vehiculului autonom.

Toate subsistemele de acționare și de stare (cu senzori) ale vehiculului autonom sunt controlate, de obicei prin bucle închise (closed loops) la nivelul MCU prin intermediul subunităților ECU (Fig. 4.2). Servomotoarele electrice sunt controlate și comandate de unități cu microcontroler ( $\mu C$ ) prin intermediul unor dispozitive cu electronică de putere. Aceasta asigură frecvențe reduse de procesare a datelor, de până la 1 kHz.

De asemenea, și senzori interni, uneori și cei externi, sunt controlați local prin bucle închise cu subunități proprii (ECU) conectate la MCU. În acest caz, frecvențele de procesare au valori 50 – 100 Hz. Sistemul de comandă și control are la bază o buclă globală care integrează toate subsistemele vehiculului. Aici sunt procesate toate informațiile de la senzori despre stările vehiculului și mediului de operare, precum și datele despre modele cinematice și dinamice ale sistemului mecanic. Frecvența de procesare este de până la 10 Hz.

Arhitectura software se suprapune pe arhitectura hardware (Fig. 4.2), iar programul principal pentru controlul vehiculului autonom rulează la nivelul sistemului de comandă și control apelând subprograme care rulează la nivelul subsistemelor. Acest program trebuie să ia decizii de navigare precum și de îndeplinire a sarcinilor suplimentare.

Comunicarea cu subsistemele senzoriale are loc folosind protocole de tip: LAN, USB, RS232 sau CAN. Următorul nivel software este implementat pe microcontrolerile unităților de comandă și control ale subsistemelor asigurând subfuncții funcționale parțiale, cum ar fi de ex.

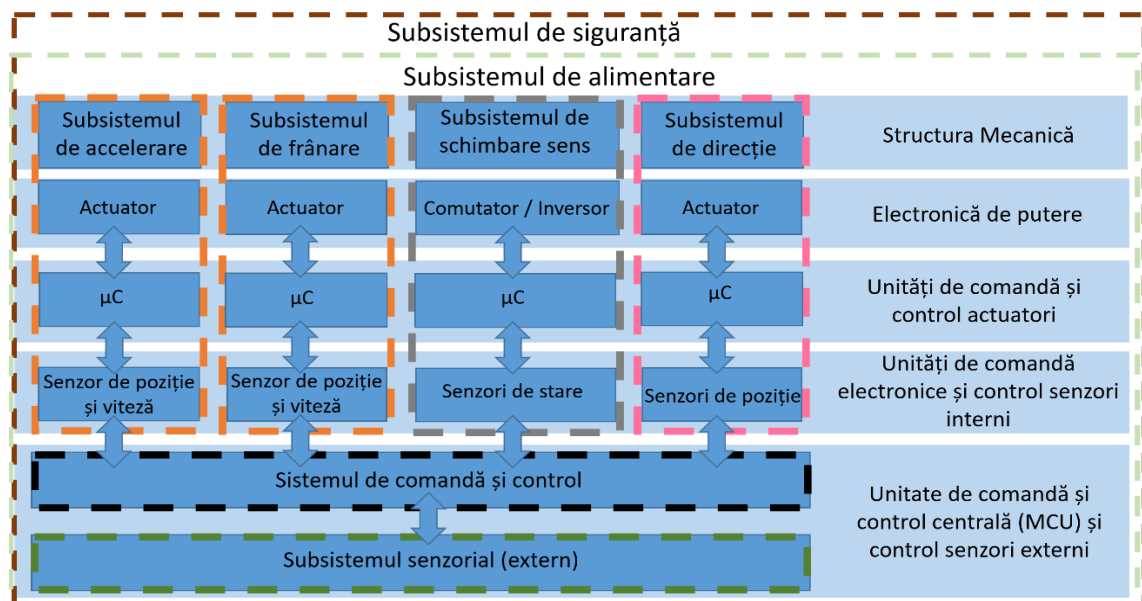


Fig. 4.2 Structura funcțională a vehiculului autonom pentru servicii

poziționarea sau schimbarea stării de mișcare a vehiculului. Comunicarea între microcontrolere, senzori și cu sistemul de comandă și control central se face prin sisteme tip bus (CAN, LIN, FlexRay). La acest nivel sunt implementate și subprogramele de calcul a parametrilor cinematici și dinamici. Totodată aici rulează și subprograme de determinare în timp real a valorilor limită ale unor parametri dependenți de starea vehiculului (de ex.: viteza maximă de deplasare și/sau de virare). La nivel software inferior se încadrează subprogramele de execuție (de ex., pentru dispozitivele cu electronică de putere) implementate pe microcontrolere ( $\mu C$ ); acestea rulează cu valori ale parametrilor de intrare de la unitățile de comandă și control superioare și valori ale parametrilor de stare, măsurate de senzori. Comanda electronicii de putere se face prin semnale (de ex. PWM) de la o unitate de comandă locală.

Pentru dezvoltări și simulări în medii reale și virtuale, există pe piață o diversitate de pachete de software capabile să controleze subsisteme ale unui robot/vehicul autonom prin intermediul unui calculator: Robotic Operating System (ROS) [Quigley, 2009] și Virtual robot experimentation platform (Vrep) [Rohmer, 2013]. Din punct de vedere al arhitecturii software, ROS este cel mai potrivit pentru dezvoltarea de programe în fază de prototip.

## 4.3 IMPLEMENTAREA COMCEPTULUI GENERAL DE TRANSFORMARE PENTRU UN VEHICUL AUTONOM DE TRANSPORT ÎN MEDII PIETONALE

### 4.3.1 ALEGERE ȘI DESCRIERE VEHICUL CLASIC

Alegerea unui vehicul adecvat cerințelor enumerate mai sus (v. subcap. 4.1) începe cu o analiză detaliată a vehiculelor electrice existente pe piață. Un alt aspect care trebuie luat în considerare este legat de posibilitatea obținerii de aprobări ca vehiculul autonom să poată opera după transformare în zone pietonale. Vehiculele ușoare, în Germania, sunt scutite de înmatriculare conform legislației standard de omologare, FZV [Unger, 2020]. Pentru operare în zone pietonale, conform FZV, acestea au nevoie doar de o marcă de asigurare și o omologare tehnică. Conform FZV un vehicul electric cu patru roți intră în categoria vehiculelor ușoare dacă are o greutate de sub 350 kg (fără baterii) și un motor a cărui putere să nu depășească 4 kW. În plus, conform legii de circulație viteza maximă cu care un vehicul se poate deplasa în zone pietonale este de 6 km/h, iar conform legii de poluare fonică în zone rezidențiale zgomotul generat de vehicule nu are voie să depășească, în timpul nopții, 50 dB [www39].

Respectând aceste cerințe, s-a ales, pentru transformare în vehicul autonom, cartul electric de golf de tip EZGO RXV [www40] (Fig. 4.3). Acest vehicul operează, cu precădere, în zonele terenurilor de golf, fiind folosit pentru a transporta persoane și/sau bagaje și în medii dens populate, cum ar fi aeroporturi sau gări. De asemenea, în diferite țări asiatice, acest vehicul este des întâlnit pentru transportul de persoane în medii urbane. Se pleacă astfel de la premisa, că folosirea acestui vehicul transformat în vehicul autonom în medii pietonale nu va întâmpina respingere din partea opiniei publice, odată ce a fost acceptat ca vehicul în varianta clasic.

Greutatea vehiculului este de 290 kg fără baterii. Pentru respectarea restricțiilor legale de omologare este posibilă transformarea acestuia prin adăugarea de componente care să nu depășească 60 kg. Cartul permite o încărcare de maxim 360 kg. Motorul de propulsie de curent alternativ dezvoltă o putere de 3,3 kW și este alimentat la o tensiune de 48 V de 4 baterii de 12 V conectate în serie. Controlerul vehiculului permite limitarea vitezei la 6 km/h. Acesta este deja omologat tehnic și, astfel, nu este nevoie de o omologare care să garanteze limitarea vitezei maxime în zone pietonale. Cartul are lungimea de 240 cm și lățimea de 119 cm.

Arhitectura hardware a vehiculului ales și modul de conectare a componentelor sistemului sunt prezentate în Fig. 4.3, unde se evidențiază componentele principale.

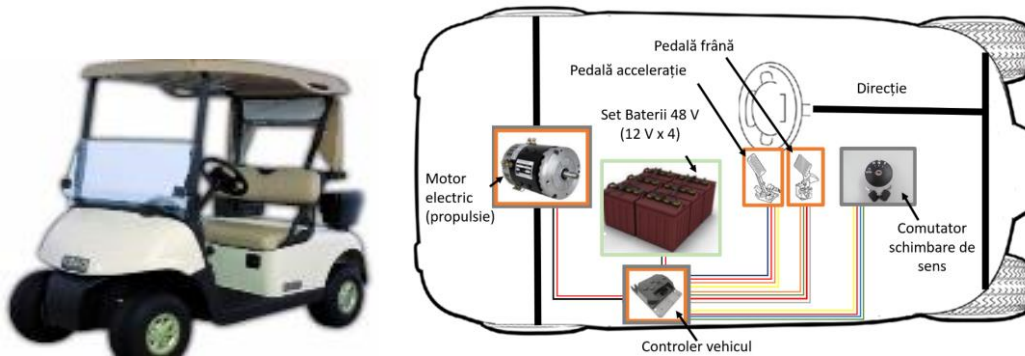


Fig. 4.3 Cart electric de tip EZGO RXV cu arhitectura inițială

Subsistemele de accelerare și de frânare sunt supervizate de controlerul vehiculului. Pe pedala de accelerație este montat un potențiomtru și un comutator. De fiecare dată când conducătorul auto apasă pedala de accelerație, comutatorul va închide un circuit prin care se transmite la controlerul vehiculului semnalul de comanda pentru alimentarea motorului de propulsie cu curent electric a cărei tensiune are valoarea dată de potențiomtru. Puterea motorului transmisă la roțile motoare este dependentă de valoarea tensiunii de alimentare. Motorul de propulsie are integrat un ambreiaj, normal cuplat, și o frână cu discuri de fricțiune, normal decuplată, ambele comandate electromagnetic. Comanda pentru frânare funcționează pe același principiu ca accelerarea, doar că preliminar se acționează un comutator care în poziția deschis facilitează transmiterea acesteia către controler. Schimbarea sensului de mers se face printr-un contactor aflat în bordul vehiculului, acționat folosind cheia de contact, și care transmite un semnal electric către controler. Direcția vehiculului este mecanică, volanul fiind conectat prin arborele volan la mecanismul de direcție pentru virarea roților.

În vederea transformării cartului electric de tip EZGO RXV pentru a deveni vehicul autonom care navighează în medii pietonale se parcurge algoritmul prezentat în subcap. 4.2. Pentru asigurarea unei siguranțe mărite acesta poate fi asistat permanent de un conducător auto care poate prelua controlul în orice moment. De aceea, controlul și comanda vehiculului autonom trebuie să se poată face atât în mod automat cât și manual. Astfel, în această configurație este posibil ca doar anumite subsisteme sau componente să fie controlate în regim automat, iar celelalte doar manual.

### 4.3.2 SISTEMUL DE COMANDĂ ȘI CONTROL

În Fig. 4.4 se prezintă structura sistemului de comandă și control dezvoltat unde se evidențiază subsistemele: de accelerare și frânare (marcate cu portocaliu), de schimbare a sensului de mers (marcat cu gri), de direcție (marcat cu roz), senzorial extern (marcat cu verde) și unitatea centrală, MCU a sistemului de comandă și control (marcată cu negru) care este un calculator embedded de tip Car-PC Adlink MX-E5401. MCU are un procesor i7-4700EQ, o memorie de 12 GB RAM, 6 porturi USB, 4 interfețe Ethernet, 8 intrări digitale și WiFi. Memoria discului hard (HDD) a fost extinsă cu un disc SSD (Scan Disc Extrem Pro) cu capacitatea de 480 GB. Viteza de scriere și citire fiind de 520 MB/s, respectiv 550 MB/s. Pe lângă sistemul de operare, Ubuntu 16.04, pe MCU rulează middlewareul Robotic Operating System (ROS) versiunea Kinetic. La nivel inferior MCU au fost integrate pentru fiecare subsistem unități de comandă electronice (ECU) dedicate și senzori interni care comunică între ele și cu unitatea centrală printr-o magistrală CAN. Comunicarea între unitatea centrală și senzorii externi se face prin Ethernet sau prin USB, în funcție de interfețele acestora. Astfel, s-a facilitat transmiterea unui flux mai mare de date de la senzori.

Pedalele de accelerație și de frână ale vehiculului acționează câte un comutator conectat la un micorcontroler (ECU de transformare și transfer semnale) care controlează electronica



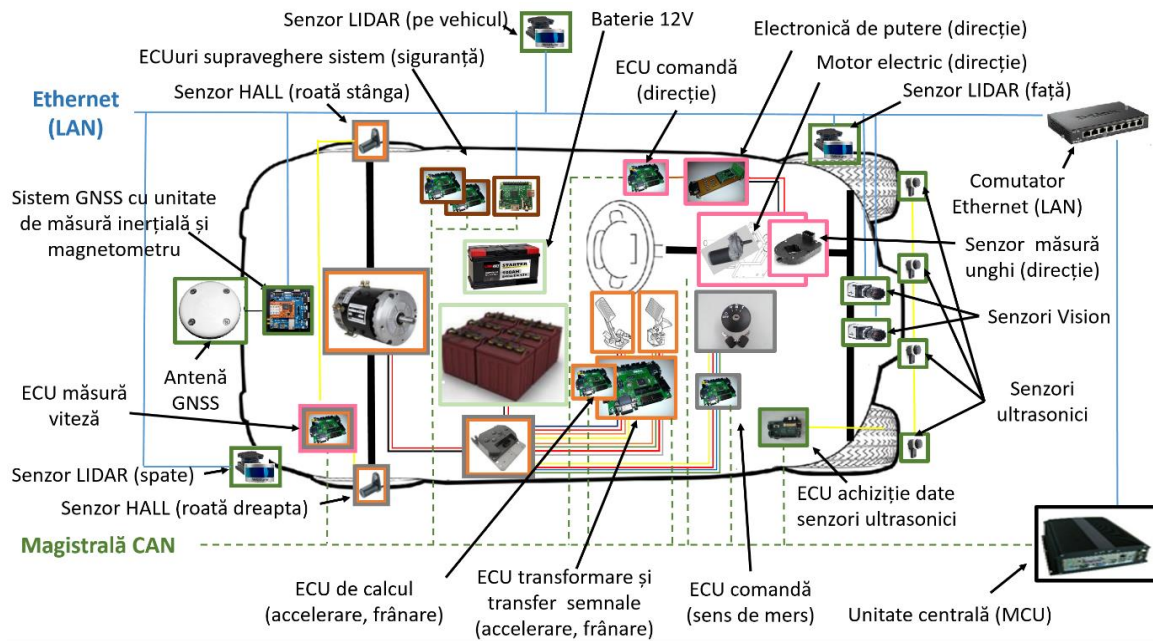


Fig. 4.4 Arhitectura sistemului de comandă și control a vehiculului autonom

de putere pentru motorul care asigură propulsia montat la nivelul axelor roților din spate. Calculul valorilor acestor semnale este realizat de un microcontroler separat (ECU de calcul). Pentru măsurarea vitezei de deplasare se folosesc doi senzori hall amplasați în roți.

În funcție de poziția contactorului din bordul vehiculului, controlerul stabilește sensul de rotire a motorului prin intermediul unei subunități ECU comandă (sens de mers).

Subsistemul de direcție mecanic a fost extins cu un motor electric cu reductor cu roți dințate, montat la nivelul axei de direcție și acționat de un dispozitiv cu electronică de putere plasat aproape de motor datorită compatibilității electromagnetice. Comanda electronicii de putere se face prin semnal PWM de la subunitatea de comandă a direcției (ECU comandă direcție). Componente electronice din panoul de control sunt alimentate de la bateria de 12 V.

Pentru detectarea de obstacole din mediul de navigare se folosesc două scanere laser amplasate în față și în spatele vehiculului. În plus, sunt amplasați în partea din față a vehiculului și patru senzori ultrasonici, folosiți în mod redundant cu scannerile laser la detectarea de obstacole. Pentru localizare și navigare este folosit un scanner laser, un sistem GNSS cu unitate de măsurare inerțială și un magnetometru. Componentele subsistemului senzorial extern sunt alimentate, de asemenea, de la bateria de 12 V a vehiculului. Funcționarea sistemelor este supravegheată în mod redundant de microcontrolere dedicate (ECU-uri supraveghere sistem).

Actuatoarele de forță sunt alimentate de la bateria de 48 V. Între electronica de putere a motorului pentru direcție și baterie s-a folosit un transformator de 48/12 V. Celelalte

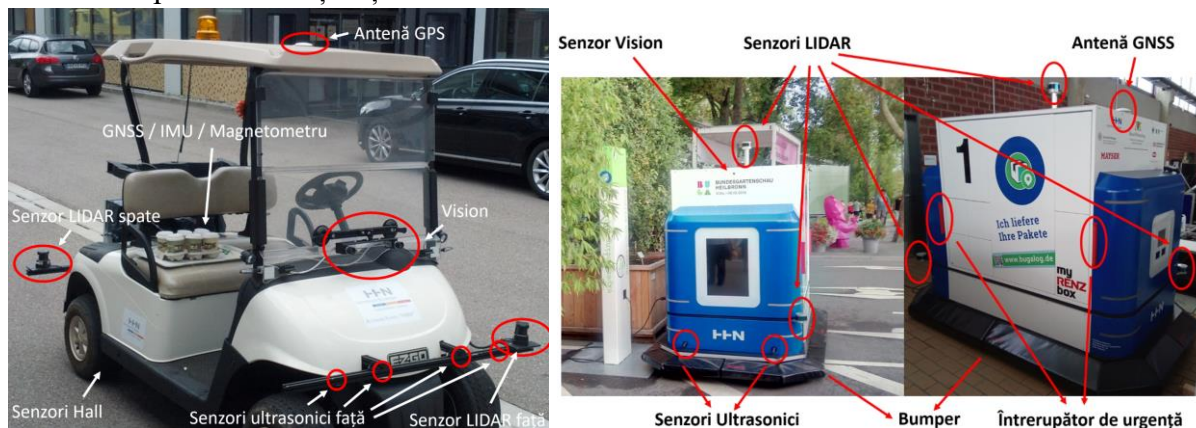


Fig. 4.5 Poziționarea senzorilor pe vehiculele autonome dezvoltate

componente electronice și senzorii sunt alimentați de la o baterie separată de 12 V pentru a evita interferențele electromagnetice.

În Fig. 4.5 se prezintă poziționarea senzorilor pe vehiculul autonom dezvoltat pentru servicii de livrare mărfuri ușoare (de ex. colete poștale). În plus, se observă, că pe caroserie s-au montat, în poziții accesibile, întrerupătoare de urgență.

### 4.3.9 SUBSISTEMUL DE SIGURANȚĂ

#### 4.3.9.1 ASPECTE GENERALE

Deși tehnologiile din domeniul vehiculelor autonome au ajuns la un nivel pe care mulți dezvoltatori îl consideră apt pentru producția în serie, nu există încă un concept de siguranță cuprinzător care să poată fi luat ca referință pentru autovehicule autonome rutiere în zone urbane. Singurul mod de asigurare a siguranței cvasitotale este conducătorul auto de siguranță (safety driver) care are rolul de a prelua controlul vehiculului în situații critice.

Studiile realizate în cadrul acestei teze de doctorat care se axează pe vehicule autonome ce operează în zone pietonale unde accesul vehiculelor rutiere este restricționat, la fel ca la dezvoltarea vehiculelor autonome pentru alte medii, au luat în considerare și aspecte de siguranță funcțională, definirea situațiilor periculoase și evitarea acestora. În acest caz, navigarea în medii pietonale, deoarece obstacolele mobile (mai ales pietoni, copii, animale de companie) se află la distanțe foarte mici de vehicul este dificil pentru sistem să prezică repede și cu precizie comportamentul acestora și, mai ales, să reacționeze în mod corespunzător. În cazul unei mișcări bruște a unui pieton sistemul trebuie să reacționeze în timp util. În zonele aglomerate chiar și recunoașterea și deosebirea obstacolelor fixe și mobile între ele este dificilă, uneori imposibilă. Totuși se evidențiază ca avantaj faptul că în mediile pietonale vehiculele autonome navighează cu viteze reduse, iar în cazul unei opriri de urgență, distanța de frânare este scurtă.

Asigurarea siguranței de operare a vehiculelor autonome care navighează în zonele pietonale se face diferit decât în cazul vehiculelor autonome care operează în medii rutiere. Cerințele generale precum evitarea coliziunilor cu alți participanți la trafic și retragerea în siguranță în cazul unei defecțiuni a vehiculului rămân neschimbate. De asemenea, și cerințele de dezvoltare luând în calcul analiza modurilor de defectare și efectele acestora (FMEA - Failure Mode and Effects Analysis) nu se modifică. Dificultatea de predicție a comportării participanților la trafic, este compensată de distanța mică de frânare, datorită vitezei de operare redusă. În plus, în cazul în care apare o situație operațională critică, vehiculul se poate opri pentru a intra într-o stare sigură, fapt ce în cazul vehiculelor din medii rutiere, frânarea bruscă și oprirea de urgență sunt nesigure și pot periclita siguranța celorlalți participanți la trafic. În zonele pietonale, vehiculul nu reprezintă o amenințare imediată pentru ceilalți parteneri după oprirea de urgență. Apar pericole, dacă se oprește în zonele, în care blochează căile de urgență, de ex. cele de acces în caz de incendiu. În astfel de cazuri, vehiculul trebuie să recunoască că se află într-o zonă de staționare interzisă și, dacă este posibil, să navigheze cu o viteză foarte mică în afara acestei zone.

#### 4.3.9.2 CONCEPTUL DE SIGURANȚĂ FERMĂ

În urma analizei cerințelor de siguranță a fost dezvoltat pentru vehicule autonome care navighează în medii pietonale conceptul de siguranță, prezentat în Fig. 4.6 [Kocsis, 2017]. Componentele cu funcție de siguranță sunt marcate cu roșu. Acest concept presupune integrarea, pe de-o parte, a unor componente dispozitive de siguranță conectate la sistemul de comandă și control și, pe de altă parte, implementarea unor module software cu funcții de siguranță dedicate. Pentru măsurarea parametrilor curenți ai vehiculului, cum ar fi viteza și

unghiul de virare sunt integrați diverși senzori în servosistemele de acționare sau elementele mecanice ale acestora (14). Unii senzori au și unitate de pre-procesare care interpretează datele brute și realizează unele calcule. MCU monitorizează permanent starea curentă a servosistemelor de acționare pentru a putea lua decizii eficiente și precise în vederea controlului acestora și din punct de vedere al siguranței. ECU-urile intermediare verifică dacă acțiunea dorită a declanșat comportamentul așteptat al vehiculului (15). În caz contrar vehiculul trebuie adus într-o stare sigură sau oprit prin întreruperea alimentării (13). În servomotoarele de acționare prin intermediul electronicii de putere (13) sunt amplasați senzori interni care măsoară parametrii acestora și transmit valorile măsurate la ECU-urile asociate, constituind o buclă dintre nivelul de sistem MCU și nivelul reactiv din procesul de execuție. Pe ECU-uri rulează o componentă software de siguranță care verifică plauzibilitatea valorilor măsurate/calculate.

Pentru funcționarea corectă a ECU-urilor în cazul în care este detectată o defecțiune trebuie luată o decizie la nivelul MCU pentru a aduce vehiculul într-o stare sigură. Astfel, ECU-urile pentru alimentarea dispozitivelor asociate pedalelor de accelerație/frână, pentru controlul electronicii de putere a motorului de propulsie, pentru diferite calcule de poziție primesc parametrii setați de MCU pe magistrala de comunicație (10) și, pe de altă parte, de la senzorii care măsoară starea servomotoarelor (15). Pe fiecare ECU, o componentă software de siguranță verifică dacă valorile efective corespund valorilor acceptabile. În cazul în care un ECU detectează o diferență între valorile setate și cele măsurate, este informat MCU prin intermediul magistralei de comunicație (11). Acesta ia măsurile de rigoare în caz de pericol, și sistemele sunt aduse într-o stare corespunzătoare din punct de vedere al siguranței.

ECU-urile și pachetele software dedicate cu monitorizarea funcționării componentelor sistemului numite watchdog-uri au și sarcina de a monitoriza stările surselor de alimentare. Astfel, verifică tensiunea bateriei (8) și urmăresc mesajele de pe magistrale (6). Dacă tensiunea bateriei scade sub o valoare predefinită, componenta watchdog informează MCU care trebuie să replanifice acțiunile. Dacă ciclul definit de trimitere a mesajelor unei componente nu este respectat, componenta watchdog va reporni (dacă este posibil) acea componentă (9) și va informa MCU (7). În funcție de nivelul de pericol al stării identificate, poate declanșa direct oprirea de urgență a vehiculului prin inițierea unei frâne bruște și decuplarea alimentării servomotoarelor (17). Deoarece și componenta watchdog se poate defecta, se recomandă utilizarea a două astfel de structuri de monitorizare care să funcționeze în mod redundant.

Pentru asigurarea unei siguranțe ferme, o parte din senzorii externi (LIDAR și ultrasonici) sunt folosiți în mod redundant pentru verificarea dacă o componentă senzorială funcționează corect, bazat pe semnalele primite de la o structură electronică separată care compară datele senzoriale. Componentele de detecție a coliziunilor colectează datele de la senzorii folosiți într-un mod redundant (2) și după ce le procesează dacă se evidențiază o coliziune, MCU este informat (3) și acesta ia măsurile necesare în funcție de caz. O subcomponentă a controlerului *modulul de decizie* determină următoarea acțiune și trimite datele calculate fiecărei componente a sistemului (5). În plus, aceasta monitorizează starea de

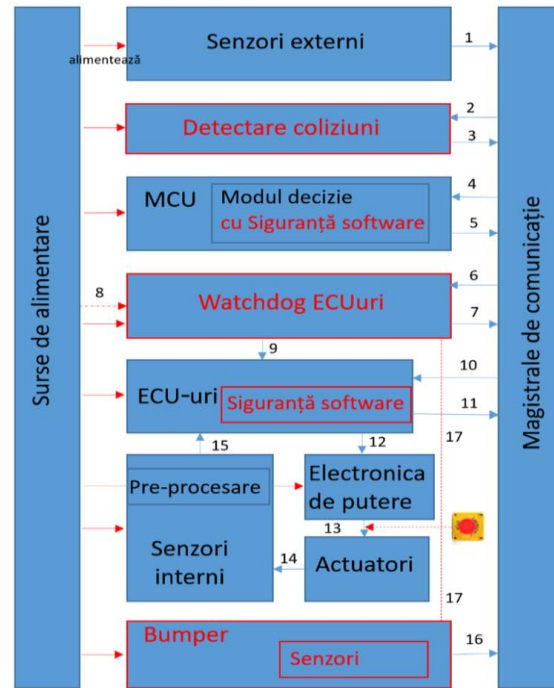
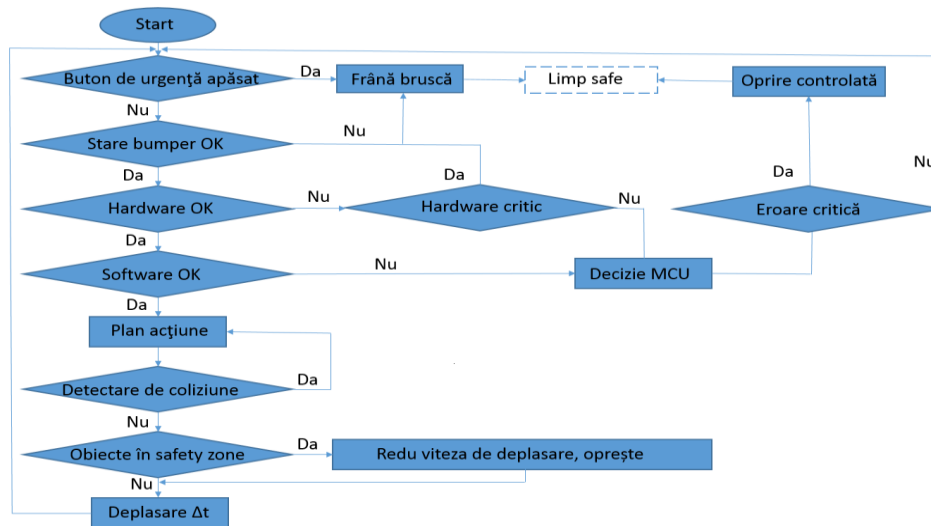


Fig. 4.6 Conceptul de siguranță fermă pentru autovehicule autonome care navighează în medii pietonale



**Fig. 4.7** Schema logică a algoritmului de verificare și decizie pentru asigurarea siguranței ferme

siguranță a sistemului și dacă se detectează o defecțiune a sistemului, MCU-ul are rolul de a reduce vehiculul într-o stare sigură.

Dispozitivele bumper sunt ultimele componente active ale lanțului de siguranță. Dacă toate celelalte componente nu reușesc să identifice o coliziune cu un obstacol, dispozitivul bumper trebuie să inițieze comanda de oprire a vehiculului prin frânare bruscă (17). Acest dispozitiv are în componență unul sau mai mulți contactori/întrerupători care sunt acționați mecanic în timpul coliziunii cu obstacolul întâlnit. Imediat după coliziune consecința a întreruperii/conectării circuitului asociat unui contactor/întrerupător, se inițiază manevra de frânare bruscă. Totodată se transmite un semnal către MCU și sistemul va intra în stare avarie (16). Sistemul iese din această stare, dacă contactorii/întrerupătorii revin în starea normală. Vehiculul nu poate porni dacă componenta watchdog detectează o stare anormală.

În Fig. 4.7 se prezintă schema logică a algoritmului cu verificările și deciziile principale ale sistemului de siguranță în timpul procesului de navigare. Verificările prezentate în această schemă sunt executate în paralel. Ele sunt efectuate separat de ECU-urile dedicate, iar dacă starea de funcționare a componentelor este corespunzătoare sunt executate comenzile de navigare, la fiecare 100 ms. Pentru asigurarea siguranței ferme se definesc trei de zone de securitate în jurul vehiculului. În cazul sesizării unei coliziuni în aceste zone este redusă viteza, respectiv inițiată comanda de oprire a vehiculului.

#### 4.3.9.3 IMPLEMENTAREA CONCEPTULUI DE SIGURANȚĂ FERMĂ

În Fig. 4.8 se prezintă schema structurală funcțională a subsistemului de siguranță implementat respectând principiile sintetizate de conceptul de siguranță fermă. Componentele comunică între ele prin magistralele: CAN (toate unitățile electronice de control, senzorul de măsurare al unghiului volanului și unitatea centrală), Ethernet (senzorii laser, sistemul GNSS, senzorii vision, ECU de analiză a datelor senzoriale redundant și MCU). Senzorii ultrasonici și senzorii hall pentru măsurarea vitezei transmit semnale analogice la ECU-urile asociate. Unitățile watchdog funcționează în mod redundant și monitorizează ciclul de trimitere al tuturor mesajelor pe magistrala CAN. În plus, acestea monitorizează tensiunea și curentul bateriilor subsistemului de alimentare. Aceste unități pot declanșa în caz de urgență oprirea vehiculului prin comanda unui releu care întrerupe curentul de alimentare a servomotoarelor. Această întrerupere se poate face și manual prin apăsarea unui buton de urgență sau de comanda primită de la un dispozitiv bumper în cazul în care are loc o coliziune. Dacă mesajele transmise pe magistrala CAN nu respectă ciclurile predefinite, watchdog-ul efectuează o resetare a subsistemului care-l emite. În cazul în care și după resetare apar erori, watchdog-ul ia măsuri



suplimentare, în funcție de funcția ECU-lui. Dacă un ECU vital, de ex. cel care controlează electronica de putere a unui servomotor, nu reușește să genereze semnalele corespunzătoare sarcinii de realizat, watchdog-ul decuplează alimentarea acestuia prin electronica de putere, ceea ce, implicit conduce la frânarea bruscă a vehiculului. Watchdog-urile monitorizează toate semnalele transmise la MCU și de la acesta către ECU-uri. Un watchdog are sarcina de a monitoriza tensiunea și curentul bateriei de 12 V. Astfel, dacă tensiunea de alimentare scade sub 11 V, în urma unui semnal primit de la watchdog, MCU întrerupe sarcina de realizat și vehiculul revine la baza alimentare. În cazul în care tensiunea bateriei scade sub 10,5 V, vehiculul este oprit și este solicitată intervenția unui operator uman. În cazul setului de baterii de 48 V, dacă tensiunea de alimentare scade sub 45 V vehiculul va fi oprit. Chiar dacă unii senzori de recunoaștere a obiectelor sunt redundanți, poate apărea o interpretare incorectă a datelor, mai ales, la distanțe foarte mici între obstacol și vehicul, și pentru a asigura siguranța fermă, în jurul acestuia la nivelul axelor roților s-au conceput și dezvoltat un sistem de dispozitive bumper.

Primul concept este cu elemente elastice metalice la care se poate atașa o carcasă exterioră pentru a nu permite intervenția pietonilor în zona activă. Acestea pot fi montate pe fiecare parte a vehiculului. Fiecare dispozitiv conține o placă electronică cu doi senzori hall conectați la un ECU de comandă și control (ECU bumper) în două moduri diferite. Primul mod implică un circuit digital de 5 V care conectează direct câte un senzor hall (Hall 2) din fiecare bumper (Fig. 4.9). La declanșarea unuia dintre acești senzori tranzistorul  $T_3$  va conduce și va bloca tranzistorul  $T_2$ . Astfel linia digital IN va fi conectată la GND (0 V, semnal logic 0) prin intermediul unui rezistor pull-down care nu este figurat. Al doilea mod, independent de primul, furnizează la ieșirea analog IN în absența declanșării unuia dintre senzori (Hall 1) o tensiune analogică de 0 V datorită rezistorului  $R_y$  care trebuie plasat cât mai aproape de intrarea analogică de măsură a microcontrolerului. Declanșarea unuia dintre senzori (Hall 1) duce la saturarea tranzistorului și prin divizorul de tensiune format cu  $R_x$  și  $R_y$  determină o tensiune

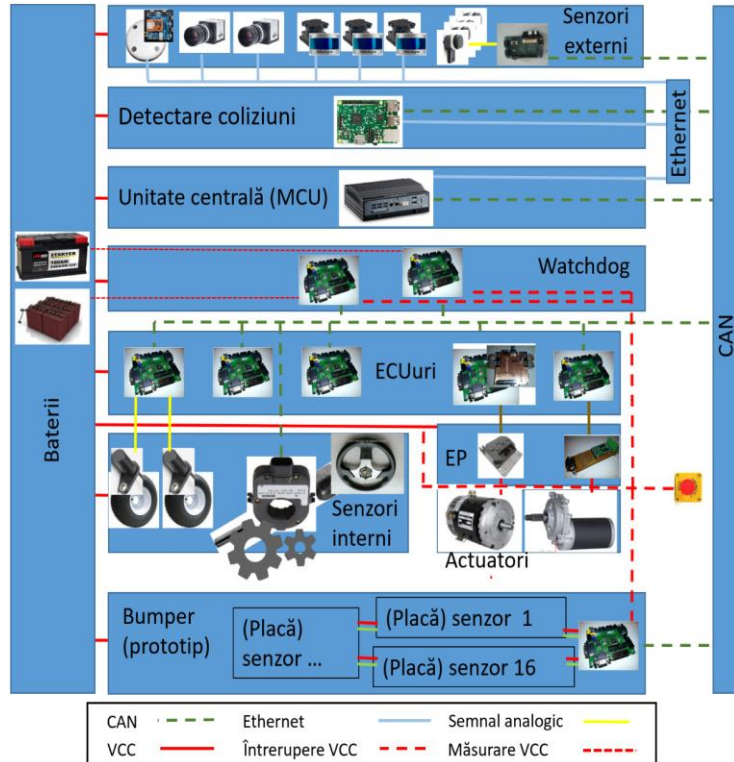


Fig. 4.8 Structura funcțională a subsistemului de siguranță

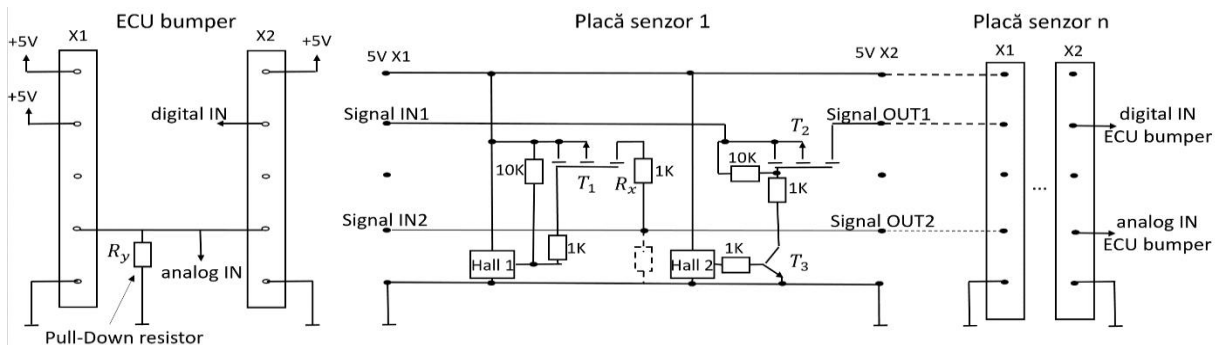


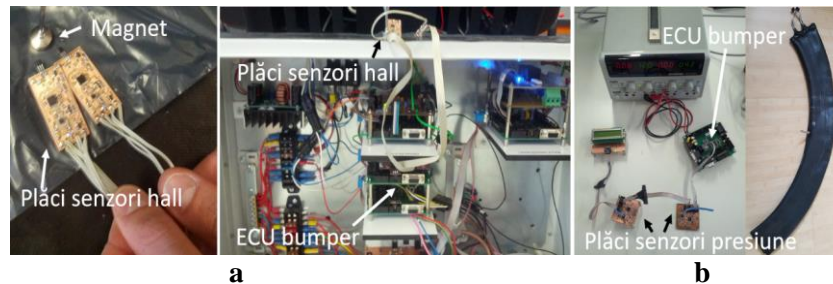
Fig. 4.9 Circuitul electric pentru conectarea senzorilor hall la ECU-ul supervisor

analogică la ieșirea analog IN. Prin alegerea potrivită a rezistorului  $R_y$  și a rezistorilor  $R_x$  se poate determina cu exactitate locul coliziunii. Circuitul electric asociat prezentat în Fig. 4.9, a fost testat din punct de vedere a funcționalității componentelor dar și ca un întreg (Fig. 4.10,a).

Al doilea concept presupune dezvoltarea unui sistem cu patru dispozitive bumper folosind elemente elastice de tip pernă de aer. Presiunile din fiecare pernă de aer se măsoară cu senzori de presiune amplasați în interiorul acestora sau în exterior conectați prin intermediul unui furtun. În cazul unei coliziuni în zona pernei de aer presiunea în aceasta se modifică, iar ECU asociat sistemului informează MCU care întrerupe alimentarea motorului de propulsie și totodată declanșează frâna bruscă. Pentru a valida conceptul s-au folosit ca perne de aer camere de bicicletă. Presiunea din acestea poate fi modificată și astfel se poate stabili forța de coliziune care să declanșeze oprirea vehiculului. În Fig. 4.10,b se prezintă circuitele electrice de conectare a senzorilor atașați pernei de aer la ECU superior. Și în acest caz s-au efectuat teste funcționale la nivel de componente și de subsistem.

Deși, din punct de vedere funcțional cele două variante s-au dovedit viabile la nivel de prototip realizarea practică omologabilă a celor două tipuri de dispozitive bumper este greoaie, în special, din punct de vedere mecanic. Acest lucru a constituit un impediment pentru omologarea vehiculului. De aceea, pentru a se putea continua dezvoltarea vehiculului autonom mai rapid s-a folosit un

sistem din dispozitive bumper din spumă poliedrică cu senzori de tip panglică și doi senzori ultrasonici de la firma Mayser. Partea electronică este similară cu cea prezentată anterior, în locul senzorilor hall fiind folosiți senzori de tip panglică.



**Fig. 4.10** Conexiunile senzorilor sistemului bumper: **a** – cu senzori hall; **b** - cu senzori de presiune aer

#### 4.3.10 PACHETE SOFTWARE IMPLEMENTATE LA NIVEL MCU

Modulele software care rulează pe MCU sunt integrate conform structurii prezentată în Fig. 4.11. Vehiculul autonom poate fi condus și manual ca urmare a selectării modului de operare prin intermediul unui gamepad de tip Logitech 710.

Ca urmare a comenzilor de la gamepad sunt trimise informații componentei *base\_controller*, care comunică prin magistrala CAN cu ECU-urile folosite pentru comanda vehiculului. În cazul în care modul de operare setat este manual, după ce se calculează viteza de deplasare și unghiul de rotație a volanului sunt transmise, împreună cu sensul de deplasare, prin magistrala CAN la ECU-urile responsabile cu controlul subsistemelor de accelerare, frânare, direcție și de schimbare a sensului de mers. Componenta *base\_controller* primește, de asemenea, informații de la componenta responsabilă cu navigarea autonomă a vehiculului (*move\_base*). În cazul în care modul de navigare setat este autonom sunt folosite datele recepționate de la această componentă și trimise pe magistrala CAN. Componenta *base\_controller* este, de asemenea responsabilă cu recepționarea datelor de pe magistrală, transformarea lor în mesaje ROS și transmiterea acestor mesaje în continuare. Datele măsurate de senzorii interni precum viteza vehiculului și unghiul de virare ajung la modulul de localizare (*kalman\_localization*). În situații de urgență informațiile despre starea de siguranță în care se află vehiculul sunt trimise modulului *safety\_module*. Modulul de localizare primește pe lângă informațiile despre starea vehiculului și informații de la senzorii externi, LIDAR-ul de pe vehicul și sistemul GNSS cu IMU și magnetometru. Pentru achiziția acestor date sunt folosite componentele *pointcloud\_to\_laserscan* [www42] și *swiftnav\_piksi* [www43] puse la dispoziție

de middlewareul ROS. Conversia datelor din sistemul de coordonate geodezic planetar în sistem de coordonate cartezian este realizată de modulul soft *piksi\_transmitter*. Poziția și orientarea vehiculului, calculate de modulul *kalman\_localization* împreună cu harta digitală (v. subcap. 5.2.2.1), informații senzoriale LIDAR și traseul (v. subcap 6.1.4) sunt transmise mai departe modulului *move\_base*, responsabil cu navigarea vehiculului (v. subcap. 6.2.2). Norul de puncte 3D de la senzorii LIDAR este transformat într-un scan 2D folosind pachetul soft *pointcloud\_to\_laserscan*. Datele de la senzorul vision sunt achiziționate pentru logare folosind pachetul soft *ueye* [www44]. Modulul de navigare (*move\_base*) trimite prin modulul soft *base\_controller* comenzile de deplasare rezultate din planificarea traiectoriei.

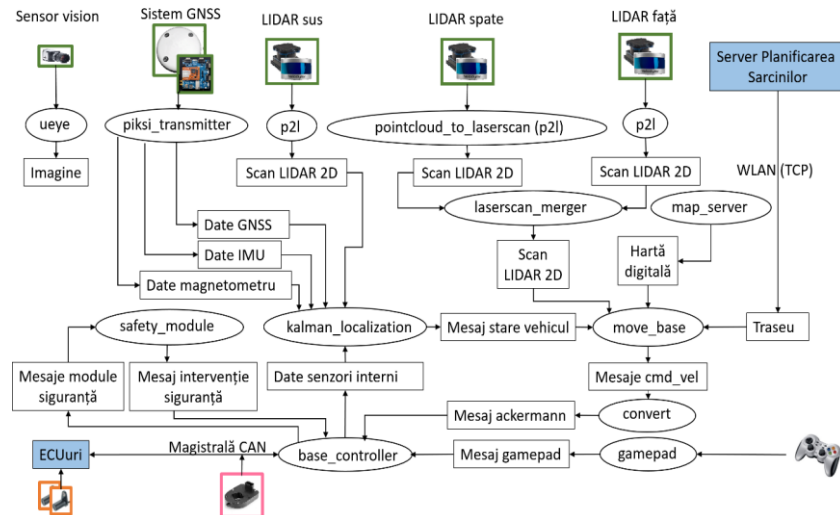


Fig. 4.11 Arhitectura modulelor software implementate în MCU

## 4.4 CONCLUZII

În acest capitol se prezintă o metodologie generală de transformare a unui vehicul existent într-un vehicul autonom. Metodologia este aplicată pentru transformarea unui vehicul de tip cart de golf, într-un vehicul autonom pentru servicii de transport în medii pietonale. Acest vehicul a fost ales după un studiu de acceptanță din partea locuitorilor din zone pietonale. Deoarece, conform legislației germane este considerat vehicul ușor nu este nevoie de certificare (înmatriculare) pentru navigare, ceea ce a ușurat pașii necesari pentru omologare în vederea operării în aceste medii. Algoritmul general de transformare presupune etape concrete de modificare pentru subsistemele de accelerare, de frânare, de schimbare a sensului de mers, de direcție, de alimentare și senzorial. Metoda de transformare propusă este generală fiind aplicabilă pentru dezvoltarea de vehicule autonome cu pedale și volan, care pot fi conduse și manual de un conducător auto de siguranță.

Pe lângă aspectele funcționale ale subsistemelor vehiculului s-a pus accent și pe sistemul de siguranță. A fost elaborat conceptul de siguranță fermă care a fost implementată în conformitate cu normele de siguranță ISO26262. Subsistemul de siguranță conceput conține două dispozitive watchdog care supraveghează pe magistralele de comunicație ciclurile de trimitere a mesajelor între componente, tensiunea și curentul în baterii și intervin fie prin resetarea componentelor ECU, care nu respectă ciclurile de trimitere a datelor, fie prin oprirea vehiculului în cazul în care informațiile necesare (de ex. mesajele de la ECU-ul de comandă a sistemului de frânare) nu sunt trimise corespunzător. Pe lângă dispozitivele watchdog, fiecare structură software are o componentă de siguranță unde este verificată plauzibilitatea datelor recepționate/calculate. De asemenea, au fost elaborate în fază de prototip două sisteme de tip bumper care au la bază detectarea coliziunii folosind senzori hall într-un câmp magnetic și senzori de presiune în perne de aer. Vehiculul autonom dezvoltat a fost omologat tehnic, și din punct de vedere al siguranței de navigare/operare în medii pietonale asociația autorizată TÜV. În final, sunt prezentate pachetele software implementate pe MCU care au la bază middleware-ul ROS. Vehiculul poate fi operat autonom sau condus manual prin intermediul unui gamepad.

## 5. LOCALIZAREA VEHICULELOR AUTONOME ÎN MEDII PIETONALE

### 5.1 INTRODUCERE

Pentru ca un vehicul autonom să execute servicii în siguranță, acuratețea și robustețea localizărilor sunt esențiale. Din concluziile stadiului actual (v. subcap. 2.11) reies condițiile impuse pentru a se obține localizări performante. O primă condiție este legată de acuratețea datelor obținute prin odometrie folosind informații de la senzorii interni. Măsurătorile realizate cu acești senzori, deseori, au erori, care acumulate în timp duc la o localizare imprecisă. Pentru diminuarea sau chiar eliminarea acestui neajuns, în practică, se realizează una sau chiar două localizări suplimentare folosind senzorii externi. Aceștia au nevoie de descrierea mediului de navigare bazat pe hărți digitale (v. subcap. 2.5). Datele senzoriale achiziționate sunt căutate în harta digitală, iar poziția este găsită atunci când există o potrivire (match) între acestea. Există două metodologii privind procesul de localizare: decuplat de procesul de cartografiere și cuplat cu acesta (SLAM). Prima metodologie unde localizarea se face folosind o hartă existentă este mai eficientă decât cea de-a doua unde harta este creată simultan cu localizarea. Senzori externi care pot fi folosiți pentru localizare sunt descriși în subcap. 2.4.3. Localizările folosind harta digitală conțin și date legate de obstacole statice (clădiri, statui, stâlpi de iluminat, semafoare etc.) uneori chiar și de marcaje stradale. În zonele pietonale obstacolele statice sunt mascate de obstacolele mobile (pietoni) aflați în jurul vehiculului, afectând precizia localizării. Astfel, este nevoie de o poziționare adecvată a senzorilor externi în corelație cu tipurile de obstacole și de marcaje întâlnite la navigare. Chiar și în acest caz deoarece, apar situații când hărțile indică date identice pentru zone diferite sau datele senzoriale sunt identice pentru poziții diferite de pe hartă, localizarea devine ambiguă. Pentru evitarea acestor situații se poate face, în plus, și o localizare globală utilizând GNSS care indică poziția în coordonate ale sistemului geodezic planetar. Prin corelarea poziției globale cu poziția de pe harta digitală, spațiul de căutare a datelor senzoriale în harta digitală poate fi micșorat considerabil și, se reduce ambiguitatea. Deci, pentru estimarea localizării, se impune o fuziune a tuturor datelor achiziționate. În acest capitol se detaliază tehnica de fuziune a datelor obținute folosind un filtru Kalman extins.

### 5.2 IMPLEMENTAREA PROCEDURILOR DE LOCALIZARE

#### 5.2.1 DATE OBȚINUTE PRIN ODOMETRIE

Pentru definirea datelor obținute prin odometrie s-a folosit modelul cinematic simplificat de tip Ackermann bidimensional (v. subcap. 2.5). Procesul de estimare a stării curente a vehiculului, folosind filtrul Kalman și date de la senzorii interni (v. subcap. 4.3.2), presupune determinarea următorilor parametri (v. Fig. 2.3): viteza de deplasare,  $v$ , folosind date de la senzorii hall montați în roțile din spate ale vehiculului; unghiul de orientare a vehiculului  $\theta$ , are la bază datele de la magnetometru parte a GNSS; unghiul de virare (direcției)  $\delta$ , calculat folosind datele de la senzorul pentru măsurarea unghiului volanului; viteza unghiulară și accelerația,  $\dot{\theta}$ , respectiv,  $a$ , sunt determinate cu date de la senzorii IMU, parte a GNSS.



## 5.2.2 CARTOGRAFIEREA MEDIULUI DE NAVIGARE ȘI LOCALIZAREA PE HARTA DIGITALĂ

Localizarea pe harta digitală este realizată folosind senzorul LIDAR 3D de tip Velodyne Puck, montat deasupra vehiculului la o distanță de 2,5 m de calea de rulare (Fig. 5.1). Cu acest senzor este efectuată și cartografierea. Datele provenite de la acest senzor sunt sintetizate ca un nor de puncte, unde fiecare punct este descris prin valorile coordonatelor 3D în raport cu sistemul de coordonate cartezian asociat senzorului. În primă fază sunt filtrate doar punctele cu o înălțime pozitivă, cele care au cota sub 2,5 m nu sunt luate în considerare.

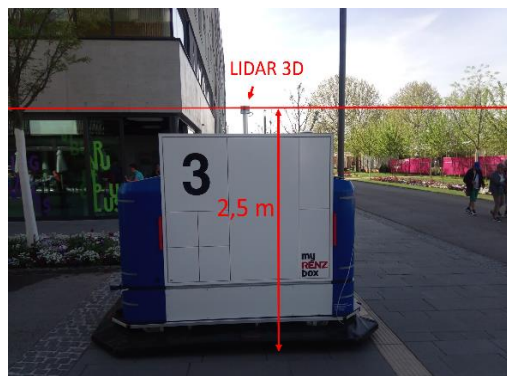


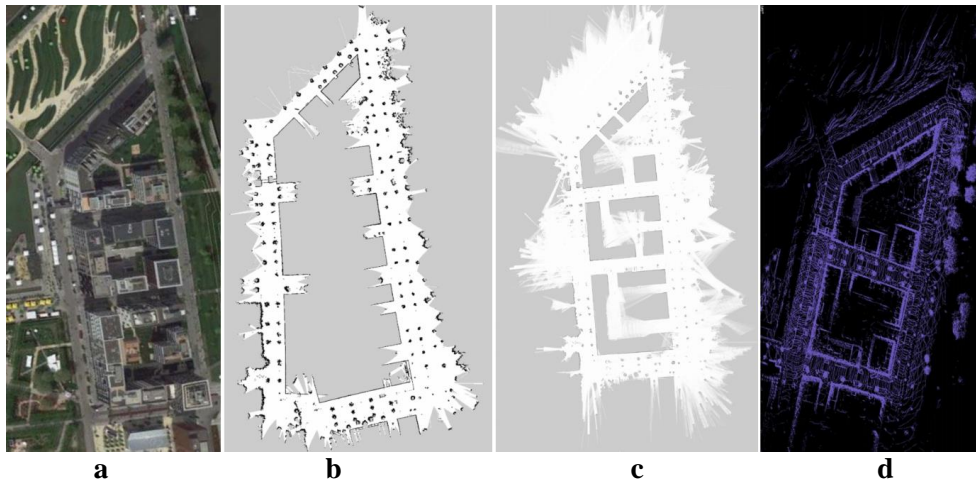
Fig. 5.1 Poziționarea senzorului LIDAR 3D pe vehiculul autonom

Localizarea are loc față de un sistem de coordonate, denumit *map*, cu punctul zero definit în locația stației de bază. Vehiculul are un sistem de coordonate propriu, denumit *base\_link*, poziționat în mijlocul axei roților din spate. Deoarece, localizarea și navigarea sunt determinate în 2D s-a definit un sistem de coordonate la nivelul căii de rulare, denumit *base\_footprint*. De aceste sisteme de coordonate sunt legate și sistemele de coordonate ale fiecărui senzor folosit în procesul de localizare și navigare (*velodyne\_top*, *velodyne\_front*, *velodyne\_back*, *gps\_frame*, *imu\_frame*) sunt definite în raport cu sistemele coordonate ale vehiculului și căii de rulare. Între sistemul de coordonate fix *map* și sistemul de coordonate mobil al vehiculului (*base\_footprint*), există sistemul de coordonate asociat punctului de plecare inițial odometriei, numit *odom*. Sistemul de coordonate *odom* este necesar în procesul de cartografiere, deoarece majoritatea pachetelor soft de cartografiere folosesc această structură pentru a putea determina, în cazul în care datele de la senzorii externi nu sunt disponibile, parametrii odometriei vehiculului. Această tehnică este denumită în literatura de specialitate *death reckoning*. Pentru a determina pozițiile obstacolelor dinamice în procesul de navigare se folosește sistemul de coordonate, *costmap\_link*. Sistemele de coordonate *front\_footprint* și *back\_footprint* sunt folosite la calculul zonelor de siguranță. Pentru transformările datelor dintr-un sistem de coordonate în altul s-au folosit funcții ale pachetului software tf [www45].

### 5.2.2.1 CARTOGRAFIEREA MEDIULUI DE NAVIGARE

Pentru descrierea mediului de navigare s-au generat două tipuri de reprezentări: harta 2D, de tip grilă și harta 3D, de tip point cloud (nor de puncte). În vederea generării acestor hărți precum și a comparării performanțelor obținute, s-au folosit trei metode existente (Fig. 5.2).

Prima metodă, are la bază algoritmul cunoscut sub numele *hector mapping* [Kohlbrecher, 2011] implementat în ROS [www46]. Pentru cartografiere și localizare aceasta folosește doar date achiziționate de la senzori LIDAR, fără a ține cont de cele proprii vehiculului obținute prin odometrie. Generarea hărților 2D de tip grilă se face succesiv punct cu punct (*patching process*) prin adăugarea punctelor, pe măsură ce datele sunt achiziționate de la senzori. Deoarece, estimarea traseului parcurs de vehicul nu este precisă, lipsind și informații odometrice, apar erori mari, iar harta obținută nu poate fi utilizată (Fig. 5.2,b). În general, cu cât aria care trebuie cartografiată este mai mare cu atât erorile de cartografiere cresc. Acest tip de cartografiere este recomandat pentru vehicule fără senzori interni (date odometrice) și se pretează mai bine pentru spații interioare. În medii de navigare exterioare largi, unde vehiculul autonom circulă cu viteze variabile și trebuie să vireze des, acest algoritm nu este indicat. În exemplul din Fig. 5.2,a se evidențiază mediul de cartografiat, reprezentat în Google Maps, care are o suprafață de circa 3 ha.



**Fig. 5.2** Hărți obținute prin cartografiere: **a** – vizualizare în Google Maps; **b** – cu metoda hector (fără odometrie); **c** – cu metoda gmapping; **d** – cu metoda hdl

A doua metodă bazată pe algoritmul de cartografiere *gmapping* [Grisetti, 2007], de asemenea, implementat în ROS [www47], generează hărți 2D de tip grilă care descriu mediul mai precis. Această metodă folosește pentru cartografiere pe lângă datele de la senzorii LIDAR și datele determinate prin odometrie. Astfel, erorile care pot apărea în procesul de generare a hărții sunt reduse considerabil, iar harta devine mai precisă (Fig. 5.2,c). Rezoluția folosită pentru cartografiere este 5 cm.

În cazul celei de a treia metode, având la bază algoritmul *hdl* [Koide, 2019] și folosind implementarea din [www48] s-au generat hărți 3D descrise prin nor de puncte (Fig. 5.2,d).

Dintre cele trei tipuri hărți obținute, din punct de vedere al preciziei, cele generate cu metodele *gmapping* și *hdl* sunt acceptabile pentru navigarea în medii pietonale. Chiar dacă rezoluția hărților 3D este mai mare, localizarea în spațiul 2D necesită mai puține resurse de memorie și calcul. Deoarece, localizarea 3D rulează greoi pe controlerul principal (MCU) al vehiculului autonom dezvoltat și afectează negativ execuția celorlalte procese (de achiziție date de la senzori, de navigare etc.), în cazul cercetărilor din această lucrare s-au folosit hărți 2D, iar pentru cartografiere a fost aleasă metoda *gmapping*.

Deoarece, în unele zone (de ex. parcuri, parcări exterioare) ale mediilor pietonale nu există obstacole fixe (clădiri, stâlpi, garduri etc.) sau numărul acestora este redus generarea unei hărți digitale este anevoios de realizat, singurele repere fixe fiind, eventual, copaci sau stâlpi de iluminat. În aceste cazuri se pot monta markeri (land marks) care se deosebesc de restul obstacolelor fiind recunoscuți (detectați) de sistemul senzorial pot sta la baza generării de hărți topologice. În practică, se întâlnesc pentru recunoaștere markeri reflectorizanți, iar pentru detectarea acestora senzori LIDAR care generează date pentru determinarea coordonatelor punctului de intersecție a razelor, distanța și valoarea intensității razei luminoase reflectată; în cazul benzilor reflectorizante aceasta este de circa 10 ori mai mare decât pentru alte obstacole. Astfel, pentru recunoașterea acestor benzi, la limită, poate fi suficientă o singură rază laser. Poziționarea markerilor trebuie făcută în așa fel încât în procesul de localizare acestea să nu poată fi confundate între ele.

Astfel în parcare campusului universității din Heilbronn a fost amenajată o zonă specifică unui mediu pietonal, unde s-au făcut experimente de navigare cu vehiculului autonom dezvoltat. Mediul pietonal dezvoltat conține 23 de markeri cu benzi reflectorizante amplasate pe stâlpi.



**Fig. 5.3** Mediu de navigare cu markeri reflectorizanți

### 5.2.2.2 LOCALIZAREA PE HARTĂ DIGITALĂ 2D DE TIP GRILĂ

Localizarea pe harta digitală are la bază algoritmul, cunoscut în literatură de specialitate sub numele de Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL), care folosește un filtru de particule (v. subcap. 2.4.4). Fiecărei particule  $i$  se asociază starea vehiculului (poziția și orientarea) și ponderea dată de probabilitatea ca acesta să se afle în această stare. Astfel, pe o hartă 2D, o particulă este descrisă cu mulțimea  $\{\{x, y, \theta\}, p\}$ , în care  $x, y$  reprezintă coordonatele carteziene,  $\theta$  – unghiul de orientare și  $p$  – valoarea ponderii,  $p \geq 0$ ;  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ , ( $N$ , numărul de particule).

Procesul de localizare se efectuează în două etape: estimarea mișcării vehiculului și evaluarea datelor senzoriale. În prima etapă, pentru estimarea stării vehiculului după comanda de mișcare  $u$ , sunt generate probabilistic un număr de  $N$  particule în funcție de valoarea ponderii  $p$  din setul de particule din pasul anterior ( $t-1$ ),  $P(\{\{x, y, \theta\}, p\}_t | \{\{x, y, \theta\}, p\}_{t-1}, u)$ . Valoarea ponderii  $p$  în pasul inițial precum și la fiecare reeșantionare, este  $1/N$  deoarece fiecare particulă are aceeași pondere. În etapa a doua sunt folosite datele de la senzori pentru a recalcula valoarea ponderii,  $p \leftarrow \alpha P(z | \{\{x, y, \theta\}, p\}_t)$ , unde  $z$  reprezintă setul de valori măsurate de senzori, iar  $\alpha$  - factorul de normalizare la  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ . În cazul de față setul de valori se grupează într-o matrice cu valorile distanțelor măsurate prin scanarea 2D efectuată cu senzorul LIDAR.

Algoritmul AMCL, implementat și în ROS [www49], a fost utilizat pentru localizarea pe hărțile digitale 2D având la bază următoarele date de intrare: poziția inițială obținută de la sistemul GNSS, harta 2D creată anterior, scanările laser provenite de la senzorul LIDAR (poziționat deasupra vehiculului) și informații referitoare la arborele sistemelor de coordonate (v. Anexa 3). Algoritmul generează poziția estimată ( $x_{AMCL}$ ,  $y_{AMCL}$  și  $\theta_{AMCL}$ ) și matricea de covarianță ( $abatere_{AMCL}$ ) care conține abaterea cu care s-a efectuat estimarea. Valorile obținute prin scanarea laser sunt determinate în funcție de proiecțiile celor opt straturi superioare ale senzorului LIDAR, marcate cu portocaliu în Fig. 5.4. Astfel, sunt alese razele laser pentru care punctul de intersecție cu obstacolul are înălțimea mai mare decât 2,5 m, față de calea de rulare. Pentru selectarea punctelor necesare și transformarea datelor asociate norului de puncte într-un set de date 2D este folosită librăria *pointcloud\_to\_laserscan* [www42]. Numărul minim de particule generate este 200, iar cel maxim 5000. La început este generat un set de particule inițial în jurul poziției calculate a vehiculului după care este estimată următoarea poziție. Generarea norului de particule este realizată de fiecare dată când distanța estimată a filtrului de particule este mai mare cu 3 m decât cea estimată prin fuziunea datelor de măsurare de la senzori.

În condițiile în care localizarea pe harta digitală nu este posibilă din cauza lipsei de obstacole și când sistemul GNSS nu oferă poziții concrete, filtrul de particule rămâne în procesul de inițializare și, deci pentru a obține localizări se impune instalarea de markeri în mediul de navigare.

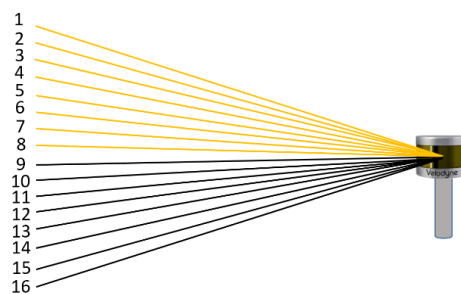


Fig. 5.4 Straturile de proiecție ale senzorului LIDAR 3D

### 5.2.2.3 LOCALIZAREA PE HARTĂ TOPOLOGICĂ

Localizările pe hărțile topologice au la bază informații de la markerii poziționați în mediul de navigare (v. subcap. 5.2.2.1). Fiecare marker al hărții (Fig. 5.5), este descris de poziția globală, cunoscută în urma determinării prin măsurare a latitudinii (lat) și longitudinii (lon), de poziția locală, prin coordonatele  $x$  și  $y$  calculate în raport cu sistemul de coordonate cartezian cu originea în punctul în care este se află stația de bază și de o distanță  $r$  a cărei

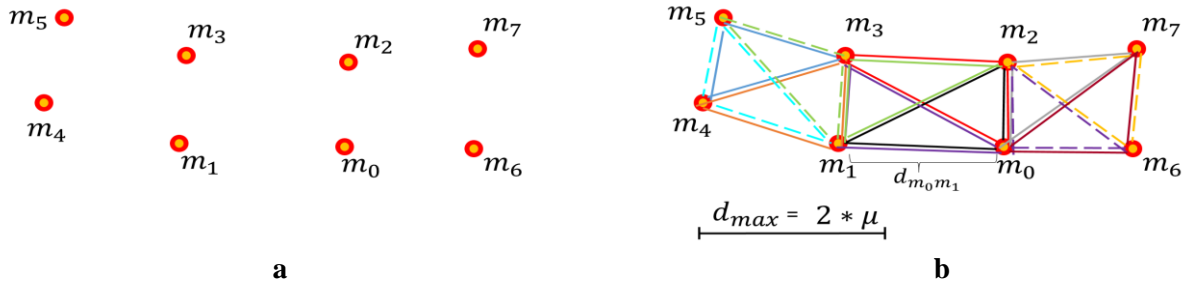


Fig. 5.5 Harta topologică: a – poziționarea markerilor; b – triunghiuri posibile formate cu markeri

valoare, inițial este zero. Această variabilă reprezintă distanța măsurată de senzorul LIDAR până la punctul de intersecție a razei laser cu markerul.

Mulțimile,  $m_i = \{lat, lon, x, y, r\}$ , asociate celor  $n$  măsurători ( $i = 0..n$ ) sunt integrate în vectorul,  $M = \{m_0, m_1, \dots, m_n\}$ . În pasul de inițializare se formează toate triunghiurile posibile unice  $tri = \{m_0, m_1, m_2, d_{m_0m_1}, d_{m_1m_2}, d_{m_2m_0}\}$ , unde,  $d_{m_0m_1}$ ,  $d_{m_1m_2}$ ,  $d_{m_2m_0}$  sunt distanțele dintre markeri (Fig. 5.5,b) și fiecare distanță este mai mică decât  $d_{max}$  dublul maximului distanței de sesizare a senzorului LIDAR( $\mu$ ) folosit. Markerii montați în mediul de navigare formează triunghiuri ale căror coordonate în raport cu sistemul hărții respectă restricțiile:

$$y_{m_0} < y_{m_1}, y_{m_0} < y_{m_2}, x_{m_1} < x_{m_2}, \quad (5.1)$$

Datele despre aceste triunghiuri integrate în vectorul  $tri_{global} = \{tri_0, tri_1, \dots, tri_n\}$ , reprezintă harta topologică. La rulare markerii amplasați în mediul de operare sunt sesizați cu senzorul LIDAR, punctele cu o intensitate mai mare decât un prag predefinit fiind filtrate, iar pentru fiecare grup de puncte situate la o distanță mai mică de un threshold predifinit unul de celălalt, este calculată poziția centrului de greutate care este folosită pentru a instanția un marker.

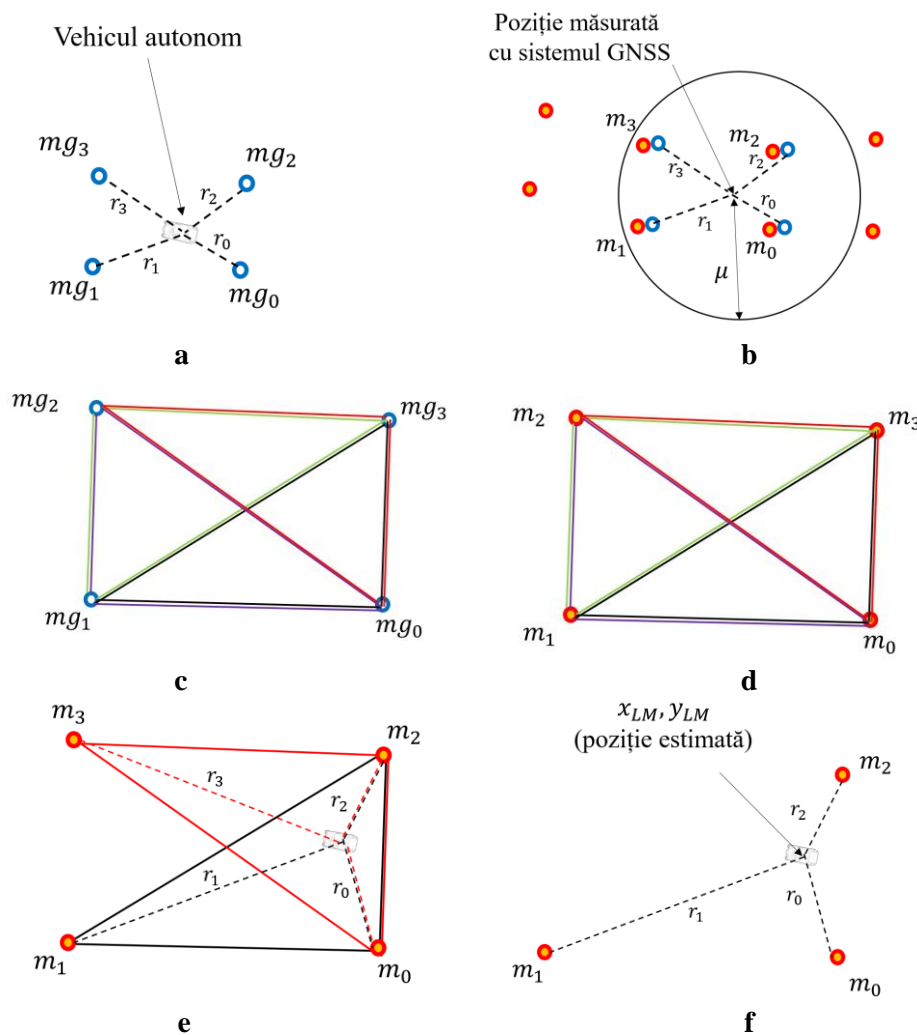
Toți markerii sesizați (Fig. 5.6,a) sunt sintetizați într-un vector nou  $MG = \{mg_0, mg_1, \dots, mg_n\}$ . Coordonatele  $x$ ,  $y$  ale markerilor din vectorul  $MG$  sunt transformate din sistemul de coordonate al senzorului LIDAR, folosind poziția GNSS ca origine, în sistemul de coordonate al hărții, iar  $r$  este distanța măsurată. Cu markerii sintetizați în vectorul  $MG$  se formează triunghiurile posibile, respectând condiția (5.1), care sunt sintetizate în vectorul  $tri_{măsură}$  (Fig. 5.6,c). Din vectorul  $tri_{global}$  sunt selectate triunghiurile unde toți markerii cu coordonatele  $x$  și  $y$  se află la o distanță mai mică decât distanța  $\mu$  de poziția GNSS (Fig. 5.6,b, d). Sunt comparate lungimile laturilor acestor triunghiuri cu triunghiurile din vectorul  $tri_{măsură}$  folosind o marjă de eroare predefinită.

Pentru estimarea poziției vehiculului autonom, din perechile de triunghiuri găsite sunt adoptate pozițiile markerilor triunghiurilor alese din  $tri_{global}$  și distanțele  $r$  ale markerilor din triunghiurile asociate din  $tri_{măsură}$ , iar conform metodei trilaterăției [Surhone, 2013] se calculează, coordonatele estimate,  $x_{LM}$  și  $y_{LM}$  (Fig. 5.6,f). Dacă poziția calculată se află în interiorul triunghiului (Fig. 5.6,e) aceasta este luată în considerare, în continuare. În cazul în care sunt găsite mai multe triunghiuri este calculată media aritmetică a pozițiilor acestora. Deci, este important ca markerii să fie amplasați în așa fel încât să nu existe posibilitatea de formare a două triunghiuri identice în poziții diferite. Unghiul de rotație estimat la pasul  $t$  se calculează în raport cu datele de la pasul  $t-1$ , cu relația,

$$\theta_{LM_t} = atan((y_{LM_t} - y_{LM_{t-1}}) / (x_{LM_t} - x_{LM_{t-1}})). \quad (5.2)$$

În cazul în care nu este găsit nici un triunghi, poziția returnată este zero și nu este luată în considerare, în continuare, în filtrul Kalman (v. subcap. 5.3). Definițiile și relațiile de mai sus sunt luate în considerare în algoritmul dezvoltat care are ca date de intrare asociate norului de puncte de la senzorul LIDAR reprezentate în sistemul de coordonate al senzorului *velodyne\_top*





**Fig. 5.6** Geometria pozițiilor markerilor: **a** – sesizați de LIDAR; **b** – aleși din harta topologică; **c** – triunghiuri posibile între markeri sesizați; **d** – triunghiuri posibile între markeri aleși din harta topologică; **e** – triunghiuri și parametri folosiți pentru estimarea poziției; **f** – parametrii folosiți pentru trilaterare

și poziția GNSS în sistemul de coordonate al hărții (*map*). Acest algoritm a fost implementat în C++ în subprogramul *MarkerLocalization* (v. Anexa 4).

Pentru a stabili eroarea cu care are loc localizarea ( $abatere_{LM}$ ) bazată pe markeri reflectorizanți au fost efectuate mai multe măsurători.

### 5.2.3 LOCALIZAREA CU GNSS

Pentru o localizare globală a fost ales sistemul RTK-GNSS prezentat în subcap. 4.3.2. Acest sistem are în zonele fără inferențe o acuratețe de până la 2 cm. De obicei, zonele pietonale sunt cu interferențe, de o parte și de cealaltă a traseului pot fi obstacole fixe (de ex. clădiri), din cauza cărora semnalele sunt bruiate, iar acuratețea localizării este diminuată. De asemenea, și în condiții meteo defavorabile precizia localizării este redusă. Cu sistemul folosit, în cadrul testelor efectuate, s-au înregistrat în cazuri extreme și abateri de până la 6 m.

Sistemul GNSS folosit oferă pe lângă poziția globală și abaterea cu care această poziție este estimată. Această abatere depinde de numărul de sateliți receptați poate fi determinată cu metoda *fixed* sau *floating*. În varianta *fixed*, conform fișei tehnice a sistemului, abaterea localizării este de max 1 cm. Pentru a furniza valoarea acestei abateri este nevoie și de o stație de bază (DGNS), care să nu fie poziționată la o distanță mai mare de 10 km de vehiculul

autonom. În testele efectuate distanța între vehiculul autonom și stație de bază nu au depășit 3,5 km. În cazul variantei *floating*, abaterea, conform fișei tehnice poate fi între 10 cm și 45 cm, dar în realitate este mai mare. Astfel, această variantă nu asigură precizia necesară pentru localizarea vehiculelor autonome pentru navigarea în medii pietonale. Deoarece poziția estimată de sistem poate avea o inexactitate de până la 6 m chiar dacă metoda este de tip *fixed*, apare dezavantajul denumit în literatură *lying GPS* [Olivares-Mendez, 2013], unde datele măsurătorilor senzoriale sunt cu erori semnificative. De aceea, se impune folosirea sistemului de localizare global împreună cu alt sistem de localizare și, deci, fuziunea datelor de la senzori asociați acestor sisteme.

### 5.3 FILTRUL KALMAN EXTINS FOLOSIT PENTRU LOCALIZARE

Deoarece pentru localizare se folosesc datele de la mai mulți senzori cu abateri diferite se impune fuziunea acestor date. În cadrul acestei lucrări, pentru fuziunea datelor, și estimarea valorilor parametrilor de stare (poziția, orientarea, viteza etc.) s-a personalizat filtrul Kalman, prezentat succint în subcap. 2.4.4. Deoarece modelele folosite nu sunt liniare, varianta extinsă, care face o liniarizare de gradul unu de tip Taylor [Hazewinkel, 2002], s-a dovedit mai eficientă.

Pentru determinarea parametrilor prin odometrie, sunt folosite datele specificate în subcap. 5.2.1. În cazul sistemelor de măsură inerțiale, inclusiv a celor cu magnetometru, pot apărea diverse abateri ale valorilor măsurate determinate de: construcția micro-mecatronică care induce un offset variabil; valoarea returnată de senzor este astfel suma dintre valoarea reală măsurată și valoarea acestui offset; imposibilitatea determinării poziției exacte a acestor senzori în sistemul de coordonate al vehiculului autonom; de fiecare dată când sistemul senzorial este pornit încărcătura vehiculului și denivelările căii de rulare sunt diferite și afectează semnalele de la senzori asociate unghiurilor de orientare; fluctuațiile de temperatură induc abateri ale valorii măsurate.

Folosind filtrul Kalman offseturile necunoscute ale vitezei unghiulare, accelerației și unghiului de orientare, notate  $\dot{\theta}_{OFFSET}$ ,  $a_{OFFSET}$  și  $\theta_{OFFSET}$  pot fi estimate. În Fig. 5.7 se prezintă schemă bloc în care se identifică modul de generare a parametrilor de intrare/ieșire în filtrul Kalman extins. Pentru localizarea pe harta digitală (AMCL) sistemul primește ca parametri de

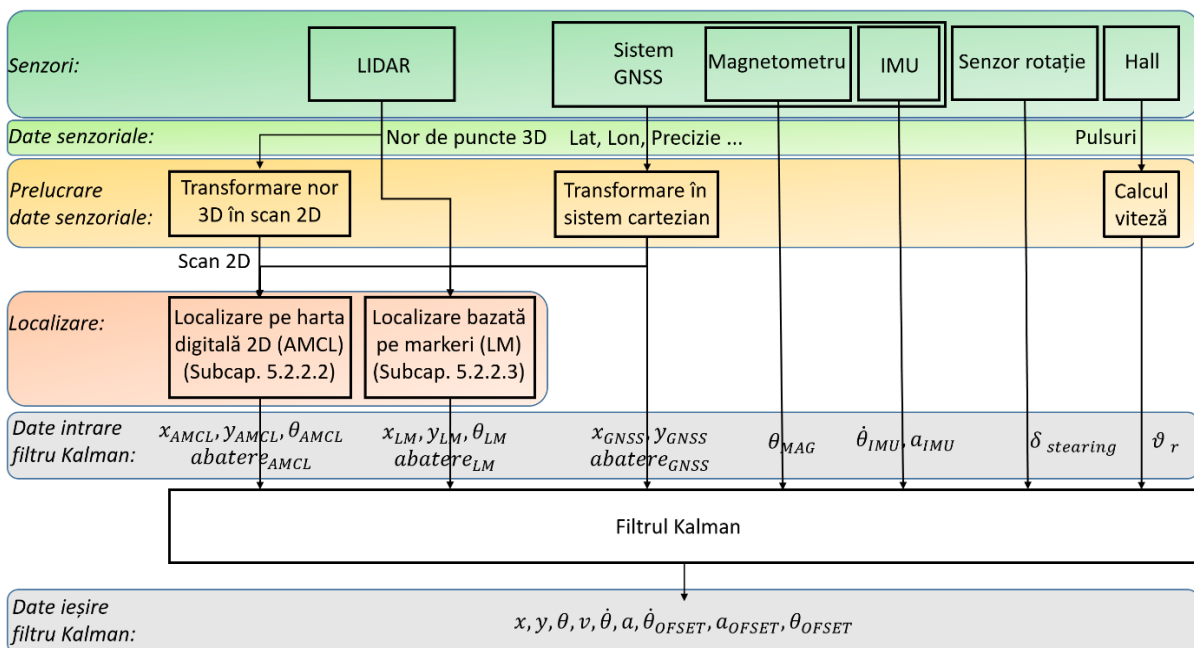


Fig. 5.7 Parametrii de intrare/ieșire în filtrul Kalman extins

intrare date de la senzorul LIDAR în formă de scan 2D, transformate din norul de puncte 3D, și de poziție de la sistemul GNSS. Localizarea generează ca output poziția 2D ( $x_{AMCL}$ ,  $y_{AMCL}$ ) și orientarea ( $\theta_{AMCL}$ ) vehiculului în sistemul de coordonate cartezian al hărții și o matrice de covarianță folosită pentru calculul abaterii de estimare ( $abatere_{AMCL}$ ).

Localizarea pe harta topologică (cu markeri), în cazul în care aceasta există, generează următorii parametri:  $x_{LM}$ ,  $y_{LM}$  și  $\theta_{LM}$ , care reprezintă poziția și orientarea vehiculului rezultată împreună cu abaterea estimată ( $abatere_{LM}$ ), al căror calcul este prezentat în subcap. 5.2.2.3.

Poziția globală din sistemul geodezic al GNSS este transformată într-o poziție locală ( $x_{GNSS}$ ,  $y_{GNSS}$ ) în sistemul de coordonate cartezian al hărții cu originea în punctul în care se află stația de bază. Pe lângă acești parametri sistemul generează, în plus, o estimare a erorii cu care este efectuată măsurătoarea,  $abatere_{GNSS}$ .

În sinteză filtrul generează vectorul de stare  $\vec{x}$  (5. 3), unde  $x$  și  $y$  reprezintă coordonatele poziției,  $\theta$  – unghiul de orientare a vehiculului,  $v$  - viteza de deplasare,  $\dot{\theta}$  - viteza unghiulară,  $a$  - accelerația,  $\dot{\theta}_{OFFSET}$  - offsetul vitezei unghiulare,  $a_{OFFSET}$  - offsetul accelerației de deplasare și  $\theta_{OFFSET}$  - offsetul unghiului de orientare. Parametrii de intrare au ca indice numele senzorului cu care sunt achiziționate datele de măsurare sau numele metodei prin care sunt determinate și sunt sintetizați în vectorul  $\vec{y}$  (5. 4).

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \\ v \\ \dot{\theta} \\ a \\ \dot{\theta}_{OFFSET} \\ a_{OFFSET} \\ \theta_{OFFSET} \end{pmatrix}, \quad (5. 3)$$

$$\vec{y} = \begin{pmatrix} x_{GNSS} \\ y_{GNSS} \\ \theta_{MAG} \\ v_r \\ \dot{\theta}_{IMU} \\ a_{IMU} \\ \delta_{steering} \\ x_{AMCL} \\ y_{AMCL} \\ \theta_{AMCL} \\ x_{LM} \\ y_{LM} \\ \theta_{LM} \end{pmatrix}. \quad (5. 4)$$

Pentru actualizarea parametrilor vectorului de stare la momentul  $t$  sunt folosite relațiile:

$$x_t = x_{t-1} + v_{t-1} * \cos(\theta_{t-1}) * dt + 0,5 * a_{t-1} * \cos(\theta_{t-1}) * dt^2, \quad (5. 5)$$

$$y_t = y_{t-1} + v_{t-1} * \sin(\theta_{t-1}) * dt + 0,5 * a_{t-1} * \sin(\theta_{t-1}) * dt^2, \quad (5. 6)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \dot{\theta}_{t-1} * dt, \quad (5. 7)$$

$$v_t = v_{t-1} + a_{t-1} * dt, \quad (5. 8)$$

$$\dot{\theta}_t = \dot{\theta}_{t-1}, \quad (5. 9)$$

$$a_t = a_{t-1}, \quad (5. 10)$$

$$\dot{\theta}_{OFFSET_t} = \dot{\theta}_{OFFSET_{t-1}}, \quad (5. 11)$$

$$a_{OFFSET_t} = a_{OFFSET_{t-1}}, \quad (5. 12)$$

$$\theta_{OFFSET_t} = \theta_{OFFSET_{t-1}}, \quad (5. 13)$$

Folosind derivatele parțiale ale ecuațiilor de stare se obține matricea Jacobian,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -v * \sin(\theta) * dt - 0.5 * a * \sin(\theta) * dt^2 & \cos(\theta) * dt & 0 & 0.5 * \cos(\theta) * dt^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & v * \cos(\theta) * dt + 0.5 * a * \cos(\theta) * dt^2 & \sin(\theta) * dt & 0 & 0.5 * \sin(\theta) * dt^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & dt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & dt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Valorile obținute cu relațiile de mai sus nu iau în considerare incertitudinile care pot afecta fiecare parametru. Astfel, pentru fiecare relație (5.5) - (5.13) trebuie adunată o valoare care ia în considerare incertitudinile. Pentru calculul acestor valori se utilizează relațiile din Tab. 5.1. Pentru ca programul asociat algoritmului EKF să ruleze mai stabil din punct de vedere numeric s-au introdus și parametri de offset (ultimele trei linii din Tab. 5.1).

**Tab. 5.1** Relațiile de calcul ale valorilor incertitudinilor parametrilor vectorului de stare

Parametrul	Relația de calcul	Relație incertitudine
$x$	$x_t = x_{t-1} + v_{t-1} * \cos(\theta_{t-1}) * dt + 0,5 * a_{t-1} * \cos(\theta_{t-1}) * dt^2$	$\frac{1}{6} * \dot{a}_{t-1} * dt^3 * \cos(\theta_{t-1})$
$y$	$y_t = y_{t-1} + v_{t-1} * \sin(\theta_{t-1}) * dt + 0,5 * a_{t-1} * \sin(\theta_{t-1}) * dt^2$	$\frac{1}{6} * \dot{a}_{t-1} * dt^3 * \sin(\theta_{t-1})$
$\theta$	$\theta_t = \theta_{t-1} + \dot{\theta}_{t-1} * dt$	$dt^2 * \ddot{\theta}_{t-1} / 2$
$v$	$v_t = v_{t-1} + a_{t-1} * dt$	$\frac{1}{2} * \dot{a}_{t-1} * dt^2$
$\dot{\theta}$	$\dot{\theta}_t = \dot{\theta}_{t-1}$	$\ddot{\theta}_{t-1} * dt$
$a$	$a_t = a_{t-1}$	$\dot{a}_{t-1} * dt$
$\theta_{OFSET}$	$\dot{\theta}_{OFSET} = \dot{\theta}_{OFSET_{t-1}}$	$\ddot{\theta}_{OFSET} * dt$
$a_{OFSET}$	$\dot{a}_{OFSET} = \dot{a}_{OFSET_{t-1}}$	$\dot{a}_{OFSET} * dt$
$\theta_{OFSET}$	$\theta_{OFSET} = \theta_{OFSET_{t-1}}$	$\dot{\theta}_{OFSET} * dt$

Vectorul de stare la pasul  $t$  se determină cu relația  $\vec{x}_t = A * \vec{x}_{t-1}$ .

Pentru cazul impus cu accelerația maximă  $a_m = 0,5 \text{ m/s}^2$  și viteza unghiulară maximă,  $\omega_m = 0,3 \text{ rad/s}$  se poate determina, pentru intervalul  $dt = 0,02 \text{ s}$ , valoarea șocului ( $a_m/2dt^2$ ),  $625 \text{ m/s}^3$  și, respectiv, accelerația unghiulară ( $\omega_m/2dt$ ),  $4,5 \text{ rad/s}^2$ . Pentru offseturi au fost alese valori foarte apropiate de zero. Matricea incertitudinilor se calculează cu relația [Marchthaler, 2017],  $R^* = G_d * R * G_d^T$  în care,

$$G_d = \begin{pmatrix} 1/6 * dt^3 * \cos(\theta_{t-1}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/6 * dt^3 * \sin(\theta_{t-1}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 * dt^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 * dt^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 & 0 & 0 \\ dt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 0 & dt \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-3} \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

(5.16)

Prin actualizarea vectorului de stare  $\vec{x}$ , folosind ecuațiile (5. 5) - (5. 13), se obține vectorul de stare prezis  $\vec{x}_t^-$ . Matricea de covarianță actualizată (prezisă) se determină folosind matricea Jacobian  $A_t$ , de covarianță, la timpul  $t - 1$ , și matricea incertitudinilor  $R^*$ , cu relația

$$P_t^- = A_t P_{t-1} A_t^T + R^* \tag{5. 17}$$

în care, pentru primul pas s-a considerat  $P_0$ , matricea de identitate în care în locul valorilor  $P_0(0,0)$  și  $P_0(1,1)$  s-a introdus valoarea distanței maxime dintre stația de bază și vehiculul autonom. Chiar dacă eroarea este inițial mare, aceasta este corectată rapid de filtru. În ultimul pas de predicție vectorul de stare și matricea de covarianță precedentă sunt actualizate cu valorile calculate.

Pasul de corecție ia în considerare valorile parametrilor vectorului de stare  $\vec{x}$ , măsurate de senzori, prin funcția de actualizare  $h(\vec{x}_t^-)$ , iar prin derivare parțială rezultă matricea Jacobian  $H_t$ .

$$h(\vec{x}_t^-) = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t + \theta_{OFFSET,t} \\ v_t \\ \dot{\theta}_t + \dot{\theta}_{OFFSET,t} \\ a_t + a_{OFFSET,t} \\ \arctan \frac{L \cdot \dot{\theta}_t}{v_t} \\ x_t \\ y_t \\ \theta_t \\ x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{pmatrix} \quad H_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{L \cdot \dot{\theta}_t}{v_t^2 + (L \cdot \dot{\theta}_t)^2} & \frac{L \cdot v_t}{v_t^2 + (L \cdot \dot{\theta}_t)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{5. 18}$$

$$\tag{5. 19}$$

Pentru stabilirea incertitudinilor datelor de la senzori se definește matricea Q, cu valorile incertitudinilor (varianțelor) maxime de măsurare pe diagonala principală, preluate din fișa tehnică a senzorului sau determinate statistic în urma măsurărilor, sunt sintetizate în Tab. 5.2.

Valorile incertitudinilor pentru senzorii GNSS și localizarea AMCL sunt modificate dinamic în funcție de precizia semnalului estimată de GNSS ( $abatere_{GNSS}$ ) și de precizia estimării poziției din matricea de covarianță returnată de algoritmul AMCL ( $abatere_{AMCL}$ ).

**Tab. 5.2** Valorile varianței maxime pentru fiecare mărime măsurată

Mărime varianță maximă	Valoare varianța maximă
$\sigma_{x_{GNSS}}^2$	$1 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{y_{GNSS}}^2$	$1 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{\theta_{MAG}}^2$	$5 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{v_r}^2$	$1 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{\dot{\theta}_{IMU}}^2$	$5 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_{a_{IMU}}^2$	$5 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_{\delta_{steering}}^2$	$1 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_{x_{AMCL}}^2$	$5 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{y_{AMCL}}^2$	$5 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{\theta_{AMCL}}^2$	$1 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_{x_{LM}}^2$	$2 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_{y_{LM}}^2$	$2 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_{\theta_{LM}}^2$	$3 \cdot 10^{-2}$

Deoarece, în practică s-a constatat că valorile preciziei estimate ale sistemului GNSS nu sunt mereu corecte, chiar dacă sistemul consideră că estimarea este făcută cu o exactitate de 1 cm și localizarea GNSS are erori de până la 6 m, s-a implementat o funcție model care conține o corecție a preciziei de localizare cu GNSS care filtrează punctele estimate, folosind tehnica mahalanobis [De Maesschalck, 2000], ce corespund unei distanțe

mai mari decât cea anterioară cu un threshold predefinit. Totuși această corecție nu rezolvă în totalitate problema; există situații când eroarea se propagă în timp fără să existe diferențe mari între pozițiile obținute consecutiv.

În cazul în care distanța dintre poziția estimată de sistemul GNSS și sistemul AMCL este mai mare decât un threshold predefinit și abaterea estimată de AMCL este mică, atunci abaterea estimată a sistemului GNSS se mărește prin înmulțirea cu factor de corecție supraunitar care se determină prin încercări. Această corecție se aplică numai în cazul în care descrierea mediului extern prin harta digitală 2D este suficient de precisă pentru aplicarea algoritmului AMCL. Pentru testele efectuate s-a considerat, threshold-ul pentru distanța mahalnobis, 100 cm iar cel pentru verificarea distanței obținute cu cele două sisteme, 80 cm. Valorile incertitudinilor generate de GNSS se modifică adaptiv până se ajunge la valoarea erorii estimate de 5 m. Astfel, valorile măsurate cu GNSS au o pondere mai mică în filtrul Kalman. Definițiile și relațiile de mai sus sunt implementate în subprogramul *LocalizationEKF* (v. Anexa 5).

## 5.4 CONCLUZII

În acest capitol se prezintă mai multe metode de localizare adaptate pentru integrarea în algoritmi de navigare, folosind date de la trei grupe de senzori: interni pentru estimarea stării vehiculului autonom cu date obținute prin odometrie, LIDAR pentru poziția și orientarea estimată folosind un filtru de particule AMCL pe o hartă digitală 2D, precum și pentru poziția și orientarea estimată folosind markeri reflectorizanți care formează o hartă topologică și GNSS pentru estimarea poziției globale. Metodele de localizare, AMCL, LM și GNSS oferă pe lângă poziția și orientarea estimată și eroarea (incertitudinea) acestei estimări. Folosind aceste date a fost personalizată o metodă de localizare bazată pe un filtru Kalman extins (EKF), care permite fuzionarea stărilor estimate ale vehiculului autonom prin fiecare metodă în funcție de incertitudinile estimărilor acestora. În plus, este posibilă excluderea explicită a datelor din EKF dacă achizițiile de date de la senzorii asociați nu sunt fiabile sau nu există. Starea vehiculului estimată împreună cu incertitudinea acestei estimări reflectă permanent rezultatul cel mai apropiat de realitate. În special în medii pietonale, incertitudinile metodelor de localizare (de ex. AMCL, GNSS) sunt diferite și există posibilitatea excluderii din EKF a uneia din aceste metode de localizare, iar estimarea stării vehiculului autonom va fi corectă.

Pentru cazurile în care abaterea provenită de la GNSS este eronată a fost implementată o funcție model care corectează erorile folosind informații de la metoda AMCL.

Pentru situația în care harta digitală 2D pentru localizarea locală nu conține suficiente repere fixe s-a conceput și dezvoltat o metodă nouă de localizare bazată pe markeri reflectorizanți a căror poziție în mediul de operare este măsurată/cunoscută în prealabil. Fiecare grup de trei markeri învecinați, amplasați la o distanță predefinită, dependentă de distanța de sesizare a sensorului, formează un triunghi, reprezentat în harta topologică. În timpul procesului de navigare markerii sunt detectați cu ajutorul unui senzor LIDAR care returnează pe lângă distanța măsurată și intensitatea luminii reflectate. Astfel, se formează triunghiuri care sunt căutate în harta topologică, folosind ca parametru de căutare lungimile laturilor. Markerii reflectorizanți trebuie amplasați în mediul de operare astfel încât să formeze triunghiuri cu laturile diferite, condiție impusă de metoda trilaterăției. Pentru a optimiza estimarea este folosită poziția GNSS la căutarea triunghiurilor în harta topologică. Astfel, doar triunghiurile a căror puncte (markeri) se află în apropiere de poziția GNSS sunt luate în considerare. Totodată, apare avantajul posibilității de folosire de triunghiuri identice, dacă acestea nu sunt considerate în procesul de căutare din același pas de calcul. Metoda oferă pe lângă poziția estimată și abaterea acestei estimări.

## 6. PLANIFICAREA TRASEELOR ȘI A TRAIECTORIILOR

### 6.1 PLANIFICAREA TRASEELOR GLOBALE

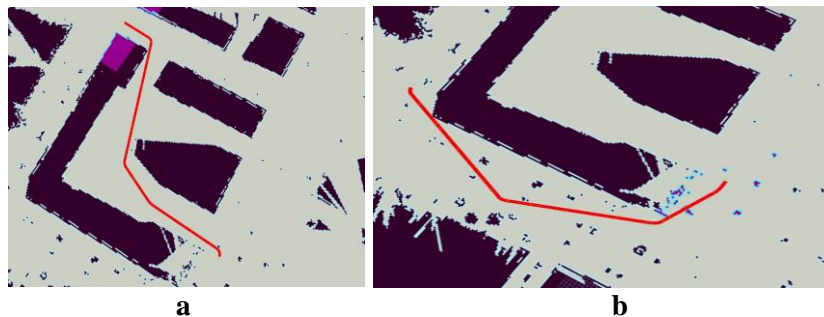
Un traseu se caracterizează printr-o mulțime de puncte pe care vehiculul autonom trebuie să le atingă sau cvasi atingă de la punctul de start la cel final. Pentru executarea de sarcini în medii pietonale traseele trebuie să îndeplinească următoarele cerințe: să ia în calcul restricțiile cinematice și dinamice ale vehiculului autonom, pentru a facilita planificarea traiectoriei; să treacă numai prin zone permise cu respectarea regulilor de circulație existente, să nu treacă prin zone cu vegetație protejată (flori, iarbă etc.), să poată fi calculate offline, să consume resurse de calcul și memorie reduse. Traseele, de obicei, ca o sumă de entități geometrice (linii drepte, arce de cerc, linii curbe de virare) pot fi *globale*, generate, în unele situații, offline pe harta întregului mediu de operare și *locale* generate online luând în considerare procesele de ocolire a obstacolelor aflate în raza de detectare a senzorilor externi amplasați pe vehiculul autonom.

#### 6.1.1 ANALIZA SOLUȚIILOR EXISTENTE PENTRU PLANIFICAREA TRASEELOR ÎN MEDII PIETONALE

Soluțiile existente pe piață rezolvă doar parțial cerințele descrise mai sus. Middleware-ul ROS pune la dispoziție diverși algoritmi care cunoscând restricțiile cinematice și dinamice ale vehiculului autonom pot crea un traseu între două puncte pe o hartă digitală dată. Algoritmul *rrt* este implementat în ROS în pachetul *ros\_exploration* [www50], algoritmul *dijkstra* și  $A^*$  în pachetul *global\_planner* [www51], iar algoritmi de tip lattice în pachetul *sbpl\_lattice\_planner* [www52]. Acești algoritmi au fost testați, iar rezultatele cele mai bune au fost obținute cu algoritmul de tip lattice. Acesta ia în considerare parametrii cinematici ai vehiculului care sunt specificați într-un fișier de configurare și generează un traseu pe o hartă dată care conține obstacole și zone libere în care este calculat traseul.

În Fig. 6.1 se prezintă rezultatele planificării a două trasee, folosind *algoritmul de planificare sbpl\_lattice*. În primul caz (Fig. 6.1,a) traseul planificat a fost generat prin aleile interioare dintre blocuri existente, iar în al doilea caz (Fig. 6.1,b) prin aleile din parcuri unde sunt straturi de flori sau alte plante, zone verzi, unde accesul vehiculelor clasice este interzis. Hărțile digitale 2D de tip grilă folosite au fost generate prin cartografiere folosind metoda gmapping (v. subcap. 5.2.2.1).

În concluzie, algoritmi implementați în programe existente pe piață nu pot fi aplicați direct pe hărțile digitale generate în urma procesului de cartografiere și este nevoie de corijarea căilor de deplasare de pe hartă astfel ca traseul să nu treacă prin zone interzise.



**Fig. 6.1** Trasee planificate folosind algoritmul *sbpl\_lattice* prin zone interzise (exemple): **a** – curți interioare; **b** – spații verzi



### 6.1.2 CORIJAREA CĂILOR PENTRU PLANIFICAREA TRASEELOR

Pentru a evita ca traseele să treacă prin zonele adiacente căilor de deplasare (de ex. straturi cu flori, gazon cu iarbă) se impune marcarea pe harta digitală a limitelor acestor zone. Această modelare poate fi realizată automat, prin folosirea de algoritmi care recunosc aceste zone folosind date senzoriale sau manual. În cadrul cercetărilor din această teză de doctorat s-a optat pentru modelarea manuală. Astfel, au fost marcate pe hartă cu linii drepte limitele căilor de deplasare care la planificarea traseului indică evitarea trecerii prin zone nepermise.

În Fig. 6.2 se evidențiază, pornind de la hărțile mediilor de navigare din Fig. 6.1, căile de deplasare corectate, marcate cu linii albastre, precum și traseele generate cu același algoritm (*sbpl\_lattice*). Astfel, se observă că traseele obținute sunt mult îmbunătățite încadrându-se cu mai mare acuratețe în zonele disponibile ale căilor de deplasare.

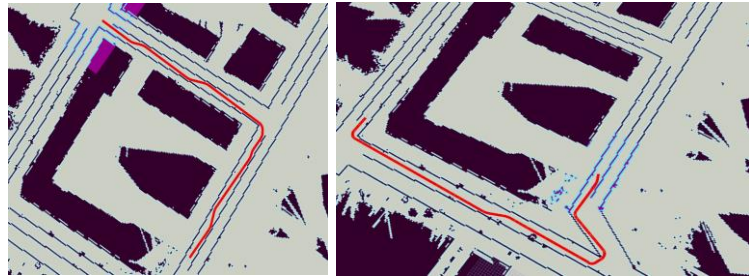


Fig. 6.2 Trasee generate folosind hărțile din Fig. 6.1 corijate

### 6.1.3 REGULI DE NAVIGARE A VEHICULELOR AUTONOME ÎN MEDII PIETONALE

Circulația în mediile pietonale nu se face cu reguli stricte, iar traseele planificate pot conduce la navigarea vehiculelor autonome cu manevre atipice (diferite de cele în mediile rutiere). Astfel, aceste vehicule pot efectua întoarceri/viraje din mai multe mișcări, mersul cu spatele pe distanțe lungi, parcări la punct fix etc. Pornind de la aceste considerente se impune ca și pentru navigarea în zone pietonale stabilirea unor reguli de circulație specifice. Deoarece încă nu există un cod cu reguli de navigare a vehiculelor autonome în mediile pietonale pentru studiile din cadrul acestei lucrări s-au considerat câteva recomandări, de ex. deplasarea vehiculelor autonome pe căile pietonale (alei, trotuare) se face doar pe partea dreaptă; întoarcerea se poate face în intersecții sau în locuri indicate prin markeri; viteza de deplasare maximă, 6 km/h etc.

Algoritmii de generare a traseelor, de regulă, nu iau în considerare regulile de circulație în mediile pietonale precum și cele impuse de specificitatea sarcinii de îndeplinit. În Fig. 6.3 se observă că prin aplicarea algoritmului de planificare a traseelor se poate alege cel mai scurt traseu fără respectarea regulilor de navigare impuse sau un traseu mai lung, generat cu respectarea acestor reguli. În funcție și de sarcina de îndeplinit unele culoare trebuie blocate, astfel încât intrarea din sens opus sensului de mers permis să nu fie posibilă. Pentru a realiza aceste blocări harta de planificare trebuie corectată corespunzător, ceea ce necesită resurse de calcul mărite și complică implementarea execuției sarcinii. Pentru evitarea acestor dezavantaje o alternativă este învățarea de către sistem a tuturor subtraseelor posibile, iar la rulare sistemul să aleagă traseul adecvat compus din subtraseele învățate.

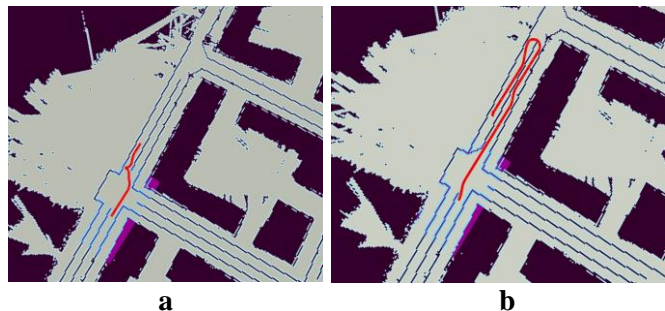


Fig. 6.3 Trasee posibile între două puncte: **a** - generat nerespectând regulile de navigare predefinite; **b** - generat cu respectarea regulilor de navigare



## 6.1.4 MODELAREA ȘI ÎNVĂȚAREA TRASEELOR

Pentru cercetările teoretice și experimentale din cadrul acestei lucrări toate subtraseele posibile nu au suferit modificări, iar recomandările de navigare au fost impuse și nu s-au schimbat. De aceea, s-a optat pentru înregistrarea tuturor subtraseelor posibile prin conducerea manuală a vehiculului.

La înregistrarea unui subtraseu s-au memorat coordonatele GNSS asociate unor puncte (noduri) de referință (Fig. 6.4). Subtraseele formate prin unirea acestor noduri au stat la baza

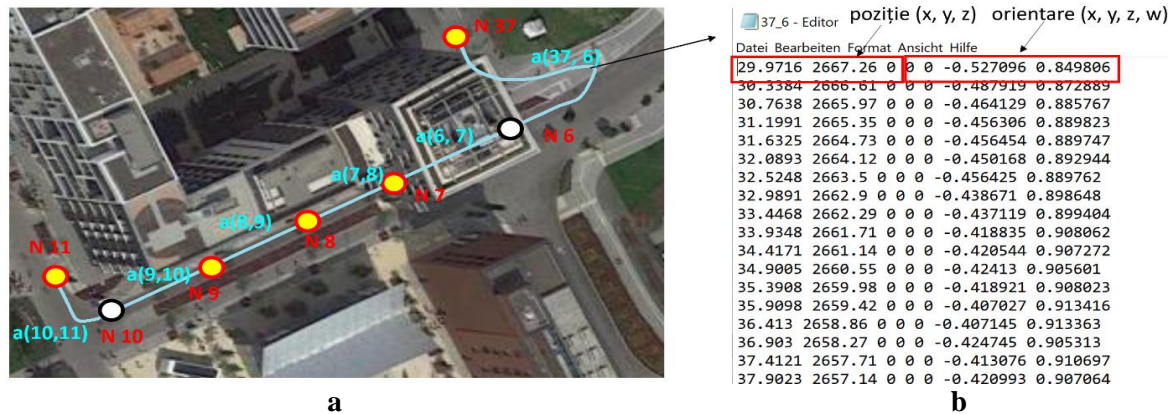


Fig. 6.4 Traseu între nodurile cu ID-urile 37 și 11: **a** - suprapus peste harta mediului; **b** - șirul datelor asociate stărilor vehiculului autonom din primul subtraseu

formării grafului folosit la planificarea sarcinilor (v. subcap. 3.5.1). Între aceste noduri au fost înregistrate stări intermediare (pozițiile și orientările) ale vehiculului autonom în sistemul de coordonate al hărții. Șirul stărilor între două noduri reprezintă un subtraseu. Datele fiecărui subtraseu sunt salvate într-un fișier, a cărui nume este specificat în fișierul de configurare a grafului. Fiecare sarcină planificată implică o descriere a traseului (rutei) care trebuie parcurs prin șirul de noduri al grafului de planificare (v. subcap. 3.5.1). La rularea programului de planificare a sarcinilor, procesul de urmărire a orarului citește pentru fiecare muchie (mărginită de două noduri succesive) fișierul care descrie subtraseul asociat acesteia.

În Fig. 6.4,a se prezintă un traseu compus din șase subtrasee și conținutul fișierului (Fig. 6.4,b) care descrie primul subtraseu asociat muchiei  $a_{37,6}$  între nodul cu ID-ul 37 și nodul cu ID-ul 6. Poziția vehiculului este descrisă prin coordonatele  $x$  și  $y$ , valoarea pentru coordonata  $z$  fiind în cazul de față mereu zero (mediul de navigare este în plan, 2D) și pentru orientare se folosește quaternionul cu valori diferite de zero pentru componentele  $z$  și  $w$ . Nodurile reprezentate cu galben în Fig. 6.4 pot fi locuri de destinație pentru executarea de sarcini (de ex. livrarea unui colet), iar cele reprezentate cu alb/negru (de ex. cele cu ID-urile 6 și 10) sunt

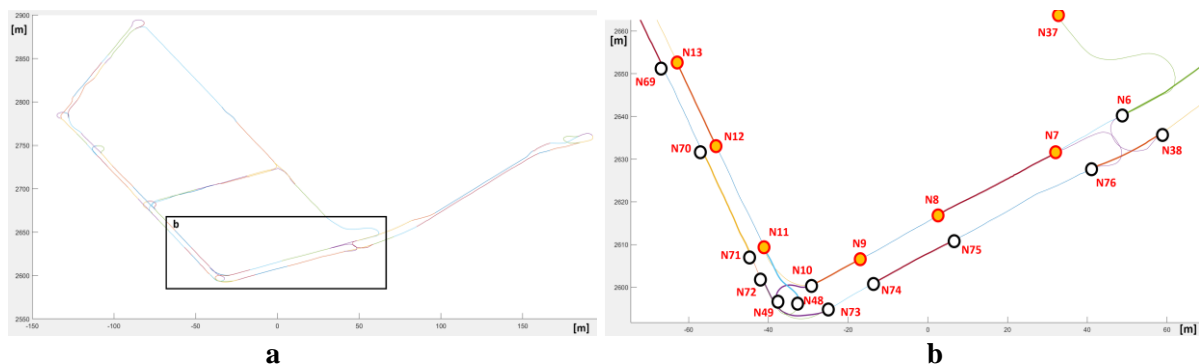


Fig. 6.5 Modelarea subtraseelor în mediul de operare: **a** - toate subtraseele existente; **b** - detaliu cu subtrasee împreună cu noduri de livrare și stradale

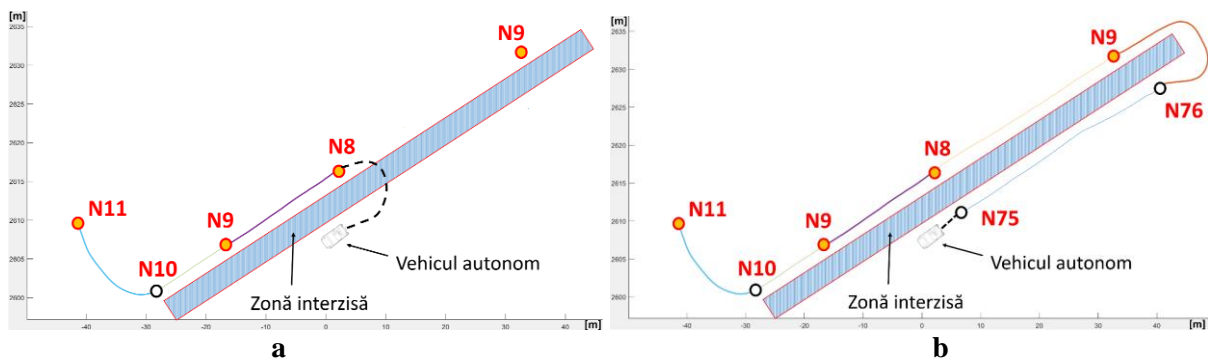
folosite, de regulă, în situații în care există bifurcații de subtrasee (noduri stradale).

În Fig. 6.5,a sunt vizualizate toate subtraseele înregistrate în mediul de operare precum și un detaliu (Fig. 6.5,b) în care se observă multiple posibilități de conectare în vederea planificării traseelor asociate sarcinilor de realizat. Traseele posibile pentru planificarea unei sarcini pot fi generate folosind subtraseele existente prin căutări efectuate în graful predefinit.

Modelarea a fost realizată astfel încât vis a vis de fiecare nod de livrare să existe un nod stradal. Înainte de trimiterea traseului, în vederea planificării traiectoriei pentru efectuarea sarcinii, în cadrul sistemului de comandă și control al vehiculului autonom este verificat dacă vehiculul se află la poziția planificată. În caz contrar este regenerat traseul folosind nodul cel mai apropiat de vehicul.

La înregistrarea subtraseelor în vederea introducerii de noduri stradale se va avea în vedere evitarea întoarcerilor neregulate sau imposibil de efectuat precum și respectarea regulilor de navigare definite.

În Fig. 6.6 se prezintă un studiu de caz prin care se exemplifică rolul nodurilor stradale. Vehiculul (Fig. 6.6,a), poziționat vis a vis de un nod de plecare (N8), conform regulilor de navigare, pentru deplasarea acestuia în nodul cel mai apropiat (N8) va parcurge o traiectorie locală (marcată cu linie întreruptă) care presupune traversarea zonei interzise, fapt imposibil. Pentru eliminarea acestei situații se vor introduce nodurile stradale N75 și N76 (Fig. 6.6,b) și astfel, traseul planificat va porni din nodul N75 și va ocoli zona interzisă.



**Fig. 6.6** Studiu de caz de generare a unui traseu: **a** – fără noduri stradale; **b** – cu noduri stradale (N75, N76)

## 6.2 PLANIFICAREA TRASEELOR LOCALE ȘI A TRAIECTORIILOR

### 6.2.1 ANALIZĂ PRIVIND PLANIFICAREA TRAIECTORIILOR ÎN MEDII PIETONALE

Modulul de planificare și urmărire a traiectoriei (Fig. 6.7) ca parte componentă a procesului de navigare a vehiculului autonom este coordonat de sistemul de comandă și control prin care primește date despre traseul planificat și inițiază localizările. Există două modalități de implementare a acestui modul. Prima presupune, în funcție de traseul planificat ce se constituie ca ghid al vehiculului autonom, *generează în fiecare pas de calcul o subtraiectorie* pe care vehiculul trebuie să o urmărească până la următorul pas. Parametrii de ieșire precum viteza de deplasare și viteza unghiulară de virare sunt folosite pentru navigare. A doua modalitate presupune *generarea unei traiectorii pentru traseul întreg* și transmiterea acesteia sistemului de comandă și control care va coordona navigarea până la finalizarea sarcinii de realizat. În acest caz nu există posibilitatea ca traiectoria să se schimbe pe parcurs, ceea ce constituie un dezavantaj major pentru cazul navigării în medii pietonale, unde din cauza

multitudinii obstacolelor, mai ales, mobile se impun dese modificări ale traiectoriei pe parcurs. Astfel, pentru studiile din cadrul acestei teze de doctorat s-a adoptat prima modalitate. A doua modalitate este adecvată cu precădere navigării în medii în care apar rar obstacole dinamice (de ex. medii industriale fără operatori umani).

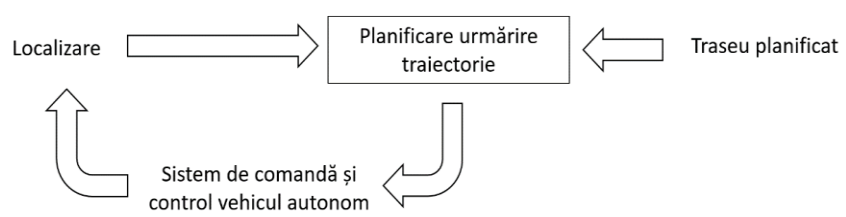


Fig. 6.7 Schema bloc a procesului de navigare

Navigarea în medii pietonale impune modificarea frecvent a traiectoriei de deplasare în funcție de obstacolele mobile care trebuie să fie ocolite. Succesul acestei etape este dependent de precizia localizării. În cazul în care parametrii de stare ai vehiculului returnați de subsistemul de localizare sunt cu abateri mari, comenzile generate pentru deplasarea vehiculului preiau aceste abateri și rezultă traiectorii imprecise.

Pentru generarea traiectoriei de deplasare pas cu pas s-a plecat de la algoritmul TEB care a fost personalizat, implementat și testat pentru conducerea vehiculului autonom dezvoltat. Deplasarea pe o traiectorie a acestui vehicul cu cinematică de tip Ackermann implică combinarea mișcărilor motorului de propulsie cu cele ale motorului de direcție consecință a comenzilor generate de sistemul de comandă și control bazat pe o traiectorie locală planificată online care în cadrul acestei lucrări se va genera cu algoritmul TEB adaptat la specificitatea mediului și vehiculului autonom.

Pentru generarea parametrilor asociați traiectoriei locale s-a conceput și dezvoltat un modul de planificare/urmărire traiectorie (Fig. 6.7) care are ca intrări, pe de-o parte, traseul planificat și, pe de altă parte, date de la subsistemul de localizare vehicul/obstacole. Procesul de planificare a traiectoriei locale este evolutiv (Fig. 6.8) pornind de la o traiectorie inițială la timpul  $t_0$ , dependent de parametrii de stare ai vehiculului și obstacolelor se vor genera/urmări traiectorii locale la pasul  $t_1$  apoi, după o replanificare, la pasul  $t_2$  ș.a.m.d.

Planificarea traseului și a traiectoriei locale se efectuează folosind o hartă locală cu dimensiunea definită, de regulă, în zona de acoperire a senzorilor externi. Această dimensiune se impune să ia în considerare și parametri cinematici/dinamici de deplasare a vehiculului autonom și obstacolelor. În cazul în care această dimensiune nu este adecvată, există riscul ca planificarea să dureze prea mult, să nu fie găsită o traiectorie locală sau să apară problema indusă de minime locale.

Descrierea comportării obstacolelor care pot fi luate în considerare la planificarea locală este, de asemenea, un aspect important. În cazul navigării în mediile pietonale obstacole pot fi pietoni care, de regulă, vor face loc atunci când vehiculul se apropie. De aceea nu este adecvat ca planificarea să îi ia în considerare din primul moment în care aceștia apar câmpul senzorilor. În caz contrar, traiectoriile generate pot conduce la manevre oscilante (de ex. stânga/dreapta). Astfel, pentru zone pietonale este de multe ori de dorit ca algoritmul să nu ia în

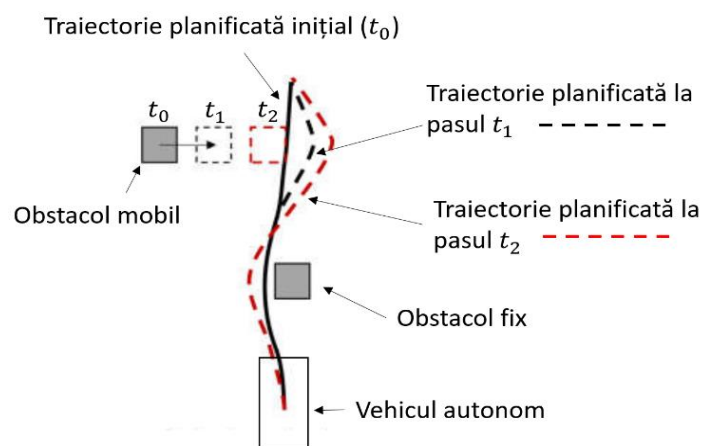


Fig. 6.8 Schema de principiu a planificării traiectoriilor locale

considerare pietonii, deoarece modulele de siguranță vor împiedica coliziunea cu aceștia. Această procedură duce la un comportament previzibil al vehiculului care se deplasează cu respectarea regulilor de navigare.

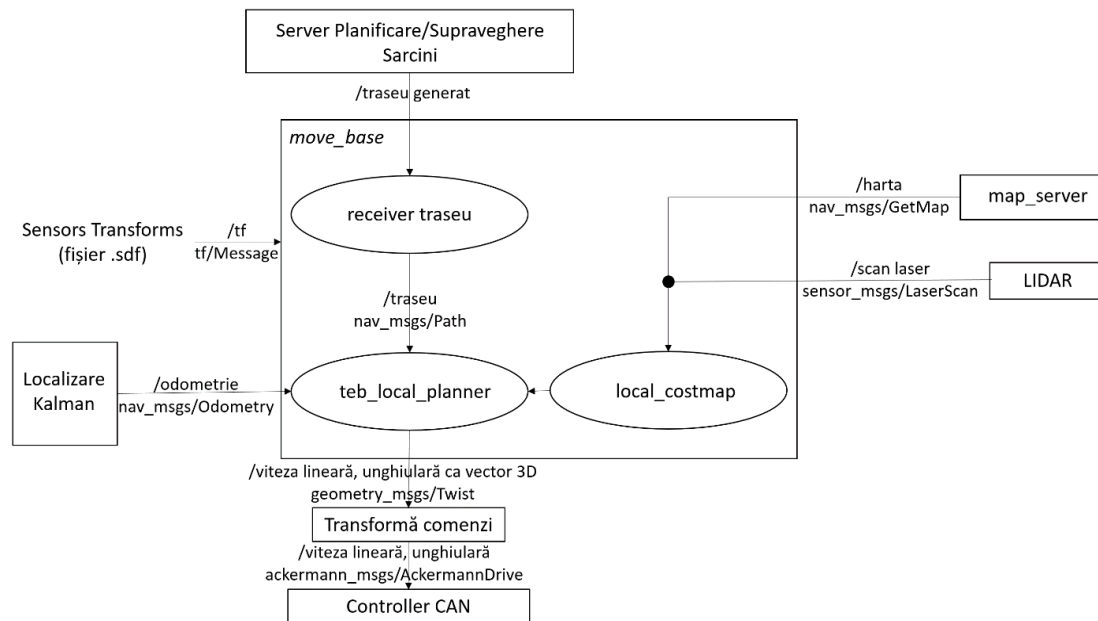
Un alt aspect care trebuie avut în vedere, la navigarea vehiculelor autonome, este legat de posibilitatea de deplasare a vehiculului înapoi la fel ca în cazul deplasării înainte. Acesta este posibil ținând cont că subsistemele senzorial și de siguranță ale vehiculului autonom dezvoltat acoperă întreg conturul acestuia. În cazul în care în fața vehiculului se află multe obstacole, și găsirea unei traiectorii este anevoioasă, există opțiunea de planificare a traiectoriei pentru deplasarea înapoi. Această deplasare cu spatele este greu de anticipat pentru pietoni, iar în cazul în care nu este semnalizată corespunzător poate conduce și la accidente. La vehicule rutiere semnalizarea are loc folosind luminile marșarier care sunt vizibile doar din spatele vehiculului sau prin semnale acustice care cauzează poluare fonică și pot duce la diminuarea acceptanței pentru astfel de vehicule în rândul pietonilor. Această posibilitate poate fi considerată în cazurile care implică manevre de parcare/staționare.

Traectoria optimă este obținută în mod eficient prin rezolvarea unei probleme de optimizare cu funcții scop (cost) multicriteriale (de ex. timpul minim de calcul, distanța de deplasare minimă). Fiecărui criteriu  $i$  se atribuie o pondere care este luată în considerare atunci când criteriile urmărite sunt conflictuale. Algoritmul de rezolvare găsește un subset de traiectorii admisibile, cu topologii distincte, dintre care se adoptă cea optimă, utilizând conceptul de clase de omologie/omotopie.

## 6.2.2 MODULUL DE PLANIFICARE/URMĂRIRE A TRAIECTORIILOR LOCALE

Pentru planificarea traiectoriilor a fost folosit pachetul software *move\_base* din ROS [www53], și are la bază algoritmul TEB [Rösmann, 2017]. Acest pachet are o interfață specifică navigării roboților mobili autonomi care se poate adapta și vehiculelor autonome. Acesta are ca parametri de intrare: harta digitală, poziția curentă a vehiculului pe aceasta, poziția destinație, date achiziționate de la sistemele senzoriale (LIDAR), precum și informații despre dependențele dintre sistemele de coordonate carteziane a componentelor aflate pe vehicul (senzori). Parametrii de ieșire sunt: vitezele liniară și unghiulară sintetizate în vectori 3D. Componentele principale ale pachetului *move\_base* sunt: modul de planificare a traseului global (*global\_planner*) și modul de planificare a traseului local și traiectoriei (*local\_planner*). Pe lângă aceștia pachetul mai conține și funcții specifice pentru achiziția datelor senzoriale, folosite, pentru modificarea hărților digitale. Astfel, pe harta digitală în jurul obstacolelor apar case (grid occupancy) în care sunt specificate valori care indică posibilitatea ca punctele asociate să nu fie atinse la navigare (valori mici indică că nu pot fi atinse). Hărțile digitale completate cu valori ale parametrului cost sunt folosite pentru planificarea traseului global (*global\_costmap*) și a traiectoriei locale (*local\_costmap*), care ia în calcul și obstacolele dinamice. În cazul în care vehiculul autonom ajunge într-o situație din care nu mai poate găsi o traiectorie locală se activează funcția de redresare (*recovery\_behaviors*) care încearcă să deblocheze situația, de exemplu, prin modificarea valorilor parametrilor de cost. În funcție de traiectoria pe care vehiculul trebuie să o urmeze sunt generate vitezele liniară și unghiulară care sunt transmise la componenta care comunică cu ECU-urile de acționare a motoarelor vehiculului (*base\_controller*).

Respectând interfața dată, pachetul software *move\_base* a fost modificat/adaptat pentru navigarea vehiculului autonom dezvoltat (Fig. 6.9). Datele obținute folosind odometria vehiculului sunt calculate conform modelului din în subcap. 5.3. Harta digitală se generează cu metoda din în subcap.5.2.2.1, iar traseul global este generat, pe serverul principal pe care rulează și subsistemul de planificare a sarcinilor (v. subcap. 6.1.4). De aceea în pachetul *move\_base* a fost implementată o funcție nouă (*receiver traseu*) care așteaptă continuu un traseu



**Fig. 6.9** Schema bloc a pachetului software *move\_base* adaptată pentru navigarea vehiculului autonom

global de la server și pe care îl transmite modulului de calcul a traseului și traiectoriei locale. În momentul în care un traseu este recepționat de la serverul principal, care apoi va fi înștiințat de vehiculul autonom de începerea executării sarcinii, este pornit procesul de navigare. În plus, pentru transmiterea poziției vehiculului către serverul principal la fiecare 5 s, s-a implementat un *thread* (*proces paralel*). De asemenea după ce vehiculul parcurge traiectoriile planificate și ajunge la destinație serverul este informat cu un mesaj separat. Deoarece, traseul global este planificat pe server, componentele *global\_planner* și *global\_costmap*, nu sunt utilizate. Pentru planificarea traseului local și a traiectoriei folosind algoritmul TEB a fost utilizat pachetul software *teb\_local\_planner* [www54] care, de asemenea, a fost modificat/adaptat pentru vehicule autonome cu cinematică de tip Ackermann [www55]. Vitezele liniară și unghiulară în formă 3D care stau la baza calculării comenzilor de mișcare folosind *teb\_local\_planner* sunt transformate apoi într-un mesaj de tip ackermann. Acest mesaj conține viteza de deplasare [m/s], accelerația în [m/s<sup>2</sup>], șocul (accelerația de ordinul trei) [m/s<sup>3</sup>] unghiul de rotație [rad] și viteza unghiulară a vehiculului [rad/s]. Apoi sunt transmise date către componentele conectate la magistrala CAN, răspunzătoare de comanda motoarelor.

### 6.2.3 ASPECTE PRIVIND IMPLEMENTAREA MODULULUI DE PLANIFICARE/URMĂRIRE A TRAIECTORIILOR LOCALE

Modulul de planificare/urmărire bazat pe algoritmul TEB generează valorile parametrilor de configurare/optimizare asociați vehiculului autonom care sunt determinați conform ponderilor criteriilor considerate. La implementarea acestui modul s-au evidențiat situații în care rezultatul optimizării, din punct de vedere matematic, nu a generat o traiectorie locală fezabilă, mai ales, în cazurile când apar parametri care conduc la criterii de cost contradictorii (de ex. viteza maximă permisă este mare și distanța minimă între vehicul și obstacol este foarte mică). Pentru a se evita aceste situații algoritmul TEB a fost parametrizat astfel încât criteriile de optimizare să nu devină contradictorii și totodată să respecte regulile navigației în medii pietonale precum și predictibilitatea mișcărilor vehiculului autonom.

Pentru navigarea vehiculului autonom cu cinematică de tip Ackermann se determină cu modulul de planificare/urmărire parametrii sintetizați în următoarele grupe: *cinematica vehiculului*, *toleranța poziției și orientării la destinație*, *procesarea datelor despre obstacole*,



*configurațiile traseelor și traiectoriilor locale și parametrii pentru optimizare.*

Parametrii cinematici ai vehicul care trebuie specificați sunt: accelerațiile liniară și unghiulară maxime, vitezele liniară și unghiulară maxime de deplasare înainte/înapoi, raza minimă a traseelor de virare, date despre geometria vehiculului (ampatament, lățime, lungime etc.). Parametrii geometrici sunt specificați cu o precizie de centimetrii. Pentru fiecare din acești parametri, pe lângă valorile definite, s-a stabilit și o pondere care specifică influența acestora în procesul de generare a traiectoriei. Aceste ponderi au fost specificate cu valori mari pentru ca algoritmul să genereze numai traiectorii locale fezabile.

Toleranța poziției și orientării la destinație specifică distanța și, respectiv, unghiul de orientare maxime dintre starea curentă a vehiculului și cea finală în punctul de destinație.

Pentru prelucrarea datelor privind obstacolele se specifică distanța minimă de la vehicul la obstacol care trebuie respectată în procesul de planificare. Valoarea acestui parametru, 73 cm, a fost aleasă în mod empiric și reprezintă jumătate din lățimea vehiculului atât pentru ocolirea obstacole statice cât și a celor mobile. Influența acestui parametru în procesul de generare a traiectoriilor locale de ocolire a obstacolelor statice și mobile este, de asemenea, specificată prin ponderi. Ponderea pentru obstacolele statice are o valoare mare decât pentru cele mobile astfel încât algoritmul să planifice numai traiectorii care să evite coliziuni cu cele statice. Obstacolele mobile sunt generate cu funcția *costmap\_converter* [www56] care primește ca parametri de intrare date, norul de puncte de la senzorii LIDAR, generează poligoane în jurul acestor puncte marcate cu roșu pe harta locală (Fig. 6.10), și transmite datele asociate modulului de planificare/urmărire. Astfel, planificatorul preia datele care descriu comportarea obstacolului (viteza de deplasare, orientarea) și modifică conform intenției de deplasare a acestuia banda elastică asociată traiectoriei (TEB).

Parametrii legați de configurațiile traseelor și traiectoriilor locale specifică: dimensiunea hărții locale, distanța între punctele care definesc traiectoria, numărul de puncte folosite la verificarea fezabilității ei, posibilitatea de a ajunge în punctul destinație deplasându-se cu spatele, o pondere pentru urmărirea traseului global sau parametrii de log în scop de debug.

Deoarece s-a dorit ca vehiculul autonom să urmeze traseul și să nu se îndepărteze mai mult de 0,5 m de acesta, pentru a nu intra în zone interzise (de ex. cu vegetație) a fost implementată o funcție care modifică în timp real (online) ponderea care influențează calculul traiectoriei locale prin ocolirea obstacolelor mobile și ponderea pentru calculul acesteia prin urmărirea traseului global. Această funcție primește ca parametri de intrare traseul global actualizat și poziția actuală a vehiculului autonom obținută prin procesul de localizare. Este verificat în primă fază dacă distanța dintre primul punct al traseului global și poziția actuală a vehiculului este mai mare decât 0,5 m. În cazul acesta ponderea de urmărire a traseului global este setată în așa fel încât influența ei să fie mare, iar vehiculul să revină pe traseul global, iar ponderea pentru ocolirea obstacolelor mobile devine zero. Valorile acestor două ponderi se pot modifica doar după ce vehiculul autonom ajunge pe traseul global și parcurge o distanță predefinită de la poziția de plecare. În cazul în care vehiculul autonom se află la o distanță mai mică de 30 cm de traseul global ponderea pentru planificarea traiectoriei locale de ocolire a obstacolelor mobile este setată la valori care să asigure planificarea traiectoriei cu luarea în considerare a obstacolelor, iar ponderea pentru urmărirea traseului global este redusă. În cazul în care această distanță este între 30 și 50 cm cele două ponderi sunt modificate adaptiv.

Un aspect care trebuie avut în vedere la navigarea vehiculului autonom este legat de posibilitatea de deplasare cu spatele. În cazul în care în fața vehiculului se află multe obstacole, poate apărea alternativa ca singura traiectorie locală posibilă să poată fi parcursă cu spatele. Este de dorit ca vehiculul să ruleze cu spatele doar în situații extreme unde este sigur că înaintarea nu este posibilă. Parametrul care definește ponderea pentru alegerea unui traseu local, pe care vehiculul trebuie să se deplaseze cu spatele, are o valoare foarte mică care să permită alegerea acestei opțiuni, doar în situații de ultimă instanță. De asemenea dimensiunea hărții locale (20 x 11 m) și poziționarea vehiculului pe această hartă restrâng posibilitatea generării

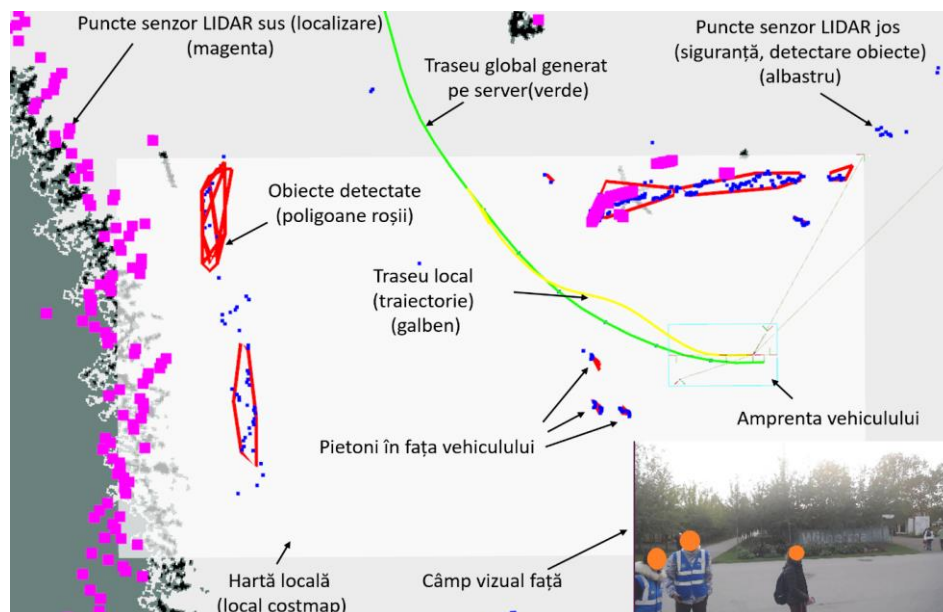


Fig. 6.10 Scenariu de planificare/urmărire a traiectoriei

unei traiectorii pe care vehiculul autonom să se deplaseze cu spatele mai mult de maxim 2 m.

În cazurile în care planificatorul dezvoltat bazat pe algoritmul TEB nu găsește o soluție, deoarece obiectele dinamice nu eliberează calea de deplasare, atunci trebuie luată o decizie la un nivel superior, unde conform unei evaluări globale se poate decide dacă este nevoie de un alt traseu sau de o recalculare a traiectoriei folosind alți parametri. Această recalculare poate fi efectuată mărinđ harta locală, adaptând o altă valoare pentru distanța minimă de ocolire a obstacolelor sau prin luarea unei decizii de planificare a unei traiectorii care să se abată de la regulile de navigare predefinite. Din cauza complexității acestei proceduri în momentul de față funcționalitatea acesteia este decisă de conducătorul auto de supraveghere.

### 6.3 CONCLUZII

În acest capitol este prezentată metoda de generare a traseelor globale la nivel de server care sunt trimise, la începerea execuției sarcinii, vehiculului autonom unde are loc planificarea traiectoriei în vederea urmării traseului. Modelarea traseelor posibile ca sumă de subtrasee, marcate pe un graf principal, și asocierea acestora la planificarea sarcinilor cu etape distincte permite generarea unui traseu global asociat fiecărei sarcini. Generarea traseului global pe serverul principal conduce la resurse de calcul reduse pe unitatea centrală a vehiculului și asigură consistența cu graful folosit pentru planificarea sarcinilor. Singurul dezavantaj al acestei proceduri apare în cazul în care traseul global suferă modificări pe teren (de ex. prin blocarea unei căi de acces). În aceste cazuri, segmentele (subtraseele) afectate trebuie actualizate.

Pornind de la un traseu global generat anterior, pentru determinarea traseelor și traiectoriilor locale, în acest capitol, se descrie concepția, dezvoltarea și implementarea unui modul de planificare/urmărire a traiectoriilor locale de navigare a vehiculului autonom dezvoltat pornind de la funcții specifice navigării roboților mobili, bazate pe algoritmul TEB și implementate în mediul ROS. Adaptarea acestora pentru vehicule autonome cu cinematică de tip Ackermann a presupus concepția și dezvoltarea de funcții dedicate pentru care s-au definit parametri de intrare precum și limite ale acestora. Pentru implementarea acestor funcții pentru navigarea în medii pietonale au fost realizate analize multicriteriale astfel încât funcționarea să se facă cu parametri optimi atât din punct de vedere al timpului de parcurgere a traiectoriei cât și al preciziei de urmărire a acesteia.

## 7. TESTE ȘI STUDII EXPERIMENTALE

Sistemul cu vehicule autonome dezvoltat a fost implementat, cu precădere, pentru livrarea de pachete poștale „pe ultima milă” într-o zonă pietonală (fără accesul autovehiculelor clasice). Vehiculele autonome integrate într-o arhitectura de planificare flexibilă au navigat autonom în mediul pietonal (cu locuințe și magazine), denumit în continuare BUGA pentru livrarea la cerere de colete poștale, validând prin teste și experimente funcționalitatea practică.

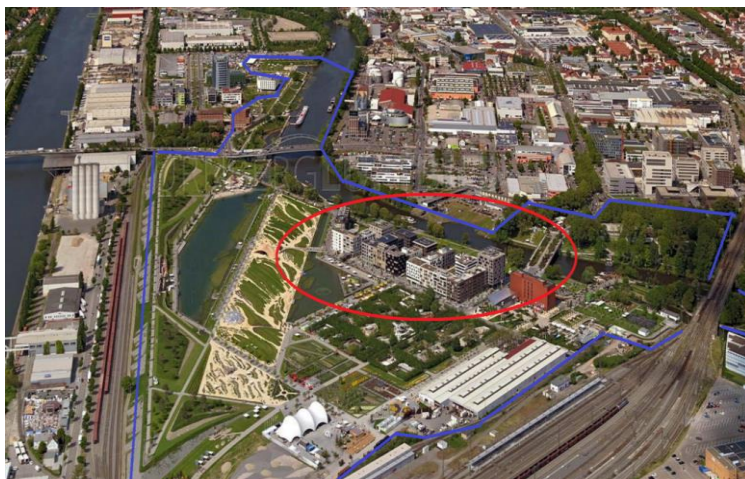
### 7.1 DESCRIERE GENERALĂ A MEDIULUI PIETONAL PENTRU EXPERIMENTE

Testele și experimentele realizate s-au desfășurat în primă fază în campusul Universității din Heilbronn, iar apoi vehiculele autonome au fost integrate pentru servicii de livrări colete într-un cartier rezidențial din Heilbronn. Dezvoltarea cartierului în cadrul târgului a fost menită să prezinte inovații tehnologice care să contribuie la dezvoltarea regională și îmbunătățirea calității vieții pe termen lung. Cartierul rezidențial este compus din 23 clădiri, are aprox. 800 locuitori. În Fig. 7.1 se prezintă o imagine de sus a acestui cartier în care s-a marcat cu albastru zona în care s-a desfășurat târgul din 2019.

Deoarece, accesul vehiculelor rutiere în zona târgului a fost interzisă zilnic în intervalul orar 9 - 19, livrarea la domiciliu a coletelor poștale pentru locuitorii acestui cartier, dar și pentru instituțiile administrative și sociale, a fost îngreunată pe tot parcursul celor 173 de zile de târg. Pornind de la acest inconvenient, dar și de la ideea de a lansa o nouă tehnologie de servicii având la bază autovehiculele autonome de servicii, autoritățile locale au lansat proiectul „BUGA:log“ [Marsden, 2018] care a fost câștigat de Universitatea din Heilbronn și, apoi, s-a derulat, cu precădere, în cadrul cercetărilor doctorale ce au condus la aplicația pilot. Vehiculele autonome au desfășurat activități în zona centrală a târgului, definită ca zonă pietonală, cu o suprafață de aprox. 3 ha. Accesul în această zonă pentru teste și experimente a fost posibil din ziua în care a început târgul, 17.04.2019. În perioada târgului a fost cartografiat terenul și s-au efectuat optimizări ale vehiculelor autonome, sistemelor de planificare, localizare și navigare.

Locuitorii cartierului au avut acces la sistemul de livrare colete cu vehicule autonome începând cu data de 09.08.2019 după finalizarea unei înțelegeri contractuale între firma de curierat DHL, RENZ, și Universitatea din Heilbronn referitoare la preluarea responsabilității asupra livrării. În plus, a fost nevoie și de acordul scris al locuitorilor care au dorit să beneficieze de acest serviciu.

După perioada 09.08.2019 - 21.08.2019, de teste de livrare monitorizate îndeaproape, s-au definit pentru fiecare zi două perioade de livrare, prima între orele 9-14, iar a doua între orele 15-19. Pentru teste în aceste perioade s-au stabilit 17 adrese de livrare la cerere după care odată ce coletele au fost încărcate în vehiculul autonom beneficiarii (clienții) primesc notificări PUSH sau e-mail și pot solicita livrarea prin specificarea datei, orei și a adresei de destinație.



*Fig. 7.1 Vedere de sus a zonei târgului național de horticultură*



## 7.2 TESTAREA ȘI CERTIFICAREA VEHICULULUI ÎN VEDEREA EXPERIMENTELOR

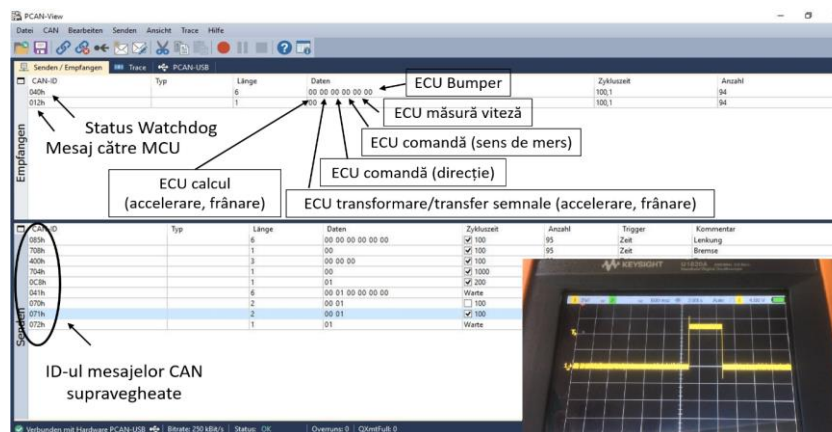
Pentru a putea opera cu siguranță fermă în medii pietonale vehiculul autonom, în special, subsistemele de siguranță au fost testate conform normelor ISO26262. Astfel, conceptele de transformare (v. subcap. 4.2 și 4.3) și de siguranță fermă (v. subcap. 4.3.9) dezvoltate și implementate în cadrul acestei teze de doctorat au fost validate în vederea operării vehiculului autonom în medii pietonale. În plus, au fost efectuate teste pentru a valida funcționarea dispozitivelor electronice (*ECU fail test*), modulelor software (*software fail test*), subsistemul senzorial cu datele achiziționate (*senzor fail test*) și, în final, subsistemului de siguranță bumper în cazul unor simulări de coliziuni.

### 7.2.1 TESTAREA DISPOZITIVELOR ECU, MODULELOR SOFTWARE ȘI A SUBSISTEMULUI SENZORIAL

Primele teste au presupus decuplarea pe rând a fiecărui dispozitiv ECU a sistemului urmărind răspunsul celor două structuri de monitorizare redundante de tip watchdog (v. subcap. 4.3.9.3). Răspunsul acestora a fost adecvat și după o resetare eșuată a ECU-ului decuplat, vehiculul a fost adus într-o stare sigură. În cazul în care ambele structuri watchdog au fost decuplate, controlerul principal a reacționat corespunzător și a oprit vehiculul autonom.

În timpul deplasării, modulele software care transmit parametri de navigare cum ar fi viteza sau unghiul de virare, au fost decuplate și valori neplauzibile au fost transmise pe magistrala CAN către ECU-urile de control. Modulul de siguranță a semnalizat controlerului principal neplauzibilitatea valorilor, iar vehiculul a fost oprit. Mesajele și semnalele au fost procesate și vizualizate utilizând softul PCAN-View și cu ajutorul unui osciloscop (Fig. 7.2).

Teste similare au fost efectuate și pentru componentele senzoriale, datele trimise de acestea au fost procesate astfel încât, valorile să fie neplauzibile. Astfel, au fost efectuate teste pentru senzorul de măsurare a unghiului de rotație a volanului cu valori în domeniul  $-520^{\circ} - +520^{\circ}$ , pentru senzorii HALL și ECU-ul asociat pentru calcularea vitezei de deplasare (max. 6 km/h). În final, s-a verificat redundanța între senzorii LIDAR și cei ultrasonici folosiți pentru ajustarea vitezei de deplasare, respectiv, pentru oprirea vehiculului autonom.



**Fig. 7.2** Mesaje CAN supravegheate și trimise de dispozitivele watchdog și semnalul de reset trimis unui ECU, vizualizat pe osciloscop

### 7.2.2 TESTAREA SUBSISTEMULUI BUMPER

Pentru testarea subsistemului bumper a fost procesată informația primită de la senzorii de proximitate astfel încât aceștia să returneze mesajul *cale liberă*. Vehiculul a intrat în coliziune la viteză maximă cu obiecte ușoare precum cutii de carton goale (Fig. 7.3). În cele din urmă au fost efectuate și teste de coliziune cu persoane adulte. În momentul intrării în coliziune

vehiculul autonom oprește brusc, bumperul se contractă, iar impactul se simte ca o lovitură ușoară, deasupra articulație gleznei piciorului cu începutul tibiei sau a fibulei, care nu produce dezechilibrarea persoanei.



Fig. 7.3 Testarea subsistemului bumper

### 7.2.3 TESTE NECESARE PENTRU OBTINEREA AUTORIZAȚIEI DE OPERARE ÎN MEDII PIETONALE

Pentru a obține autorizația de operare în medii pietonale au fost definite teste de navigare a vehiculului autonom care conform ISO26262 implică supravegherea permanentă de un conducător auto ce poate prelua în orice moment controlul asupra acestuia. De aceea au fost definite pe lângă *condițiile tehnice* de funcționare și condiții referitoare la *instructajul conducătorului auto*. În Tab. 7.1 sunt descrise riscurile și măsurile de siguranță care au fost definite în cooperare cu asociația pentru inspecție tehnică, TÜV. Obiectivul stabilit pentru autorizare a presupus aducerea vehiculului autonom în stări de siguranță fermă pentru fiecare din situațiile de risc din Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Riscuri și măsuri de siguranță, conform ISO26262

Cod	Descriere risc	Măsura de siguranță
R01	Vehiculul autonom nu detectează obstacole	Folosirea sistemului bumper, cu senzori de proximitate omologat
R02	Vehiculul autonom nu se oprește	Amplasarea de butoane de urgență omologate, accesibile pe fiecare parte a vehiculului
R03	Viteza de operare depășește 6 km/h	Restricționarea vitezei atât pe parte software cât și din configurația setată pe controlerul vehiculului (controler omologat)
R04	Sistemul de frânare al vehiculului se defectează	Verificare periodică
R05	Vehiculul autonom părăsește mediul de operare	Împrejmuirea mediului de operare
R06	Vehiculul autonom accelerează necontrolat	Folosirea sistemului bumper, cu senzori de proximitate omologat. Amplasarea de butoane de urgență omologate, accesibile pe fiecare parte a vehiculului
R07	Vehiculul autonom schimbă direcția de deplasare necontrolat	Folosirea subsistemului bumper, cu senzori de proximitate omologat. Amplasarea de butoane de urgență omologate, accesibile pe fiecare parte a vehiculului
R08	Vehiculul autonom continuă deplasarea după o oprire de urgență, declanșată de componente neomologate	Folosirea sistemului bumper, cu senzori de proximitate omologat. Amplasarea de butoane de urgență omologate, accesibile pe fiecare parte a vehiculului

În cazul operării în medii pietonale, stările de siguranță fermă definite sunt asociate cu *vehiculul autonom în staționare (oprit)* și *controlerul acestuia nealimentat*. Pentru fiecare risc posibil au fost definite măsuri de siguranță care au fost evaluate prin

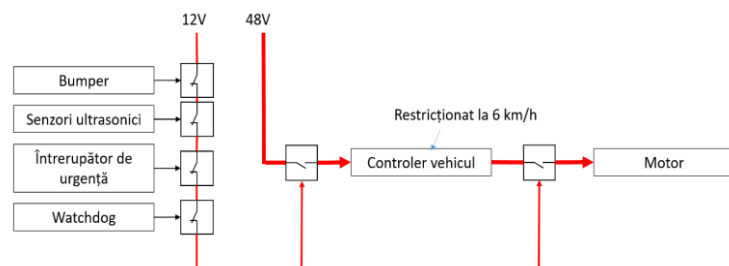


Fig. 7.4 Lanțul de siguranță

teste. În final, subsistemele și componentele din lanțul de siguranță (Fig. 7.4) compus din: subsistemul de bumper, butoanele de urgență, senzorii ultrasonici, dispozitivele watchdog și controlerul vehiculului) au fost validate prin obținerea certificatului de omologare tehnică, respectiv, permisului de operare. În Anexa 2 se prezintă certificatul de omologare tehnică a vehiculului autonom obținut.

În plus, s-a elaborat și un program de instruire a conducătorului auto privind modul de funcționare al vehiculului, posibilitățile de a aduce vehiculul într-o stare sigură și modul de operare manual folosind gamepadul.

### 7.3 EXPERIMENTE DE PLANIFICARE A SARCINILOR

Sistemul de planificare a sarcinilor a avut în perioada de teste, 09.08.2019 – 06.10.2019, 785 de solicitări de la clienții din mediul pietonal BUGA. Din acestea, 631 solicitări au fost făcute cu aplicația pusă la dispoziție clienților și 154 de la centrul logistic de monitorizare. Sistemul de planificare interactiv propus, după ce planifică o sarcină, răspunde la solicitare într-un timp mediu de 146 ms. În cazul în care cererea clientului nu poate fi executată la data și ora solicitată, sistemul oferă trei soluții alternative care presupun livrarea în următoarele două perioade de lucru (operare), desigur cu acceptul acestuia prin notificări electronice.

Pentru a se evalua performanțele planificării interactive a sarcinilor s-au definit următoarele grupe de experimente: analiza cererilor clienților și comportamentul acestora la variantele alternative oferite de sistem; timpii de execuție a sarcinilor planificate; eficiența planificării interactive.

#### 7.3.1 ANALIZA CERERILOR ȘI COMPORTAMENTELOR CLIENȚILOR

În prima perioadă de testare, 09.08 – 21.08, din totalul de 147 solicitări planificate și care nu au fost stornate până la începerea execuției sarcinii, 59 (40,13%) au fost acceptate imediat, iar pentru 88 (59,86%) sistemul de planificare a pus la dispoziție soluții alternative. În perioada a doua, 22.08 – 06.10, din totalul de 484 solicitări, 247 (50,93%) au fost acceptate imediat, iar 238 (50,07%) au primit soluții alternative.

La soluțiile alternativele propuse de sistemul de planificare interactivă clienții au avut un timp de răspuns mediu de 12,93 s/solicitare, în prima perioadă de test și de 29,36 s în cea de a doua. Timpul de răspuns ridicat rezultă și din faptul că în cea de a doua perioadă mai mulți clienți noi au început să folosească sistemul. În Fig. 7.5 se prezintă variația timpului de răspuns a clienților pentru cazul solicitărilor la care sistemul de planificare interactiv a oferit alternative. Rezultatele confirmă că timpul de răspuns de un minut acordat de sistem clienților este suficient. Deoarece, clienții, preliminar, au fost informați de modul de funcționare a procesului de livrare bazat pe sistemul de planificare interactiv, știind că sistemul oferă prima alternativă la cea mai rapidă oră posibilă, la notificările PUSH sau prin e-mail primite, aceștia au solicitat livrarea la data și ora curentă, au așteptat alternativele oferite de sistem și au ales prima opțiune.

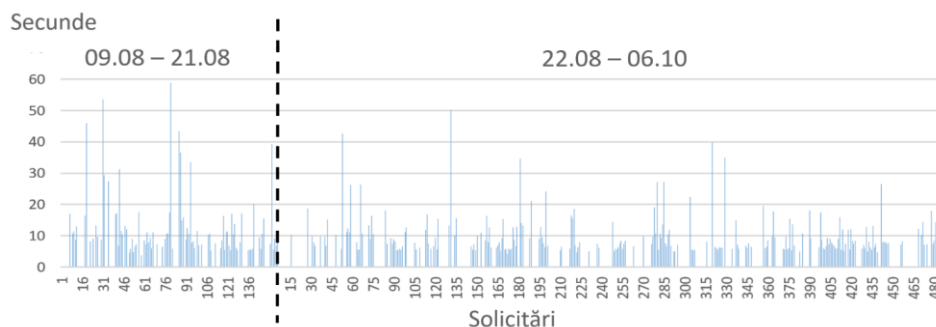


Fig. 7.5 Timpii de răspuns a clienților, la soluțiile alternative oferite de sistem

### 7.3.2 EXECUȚIA SARCINILOR SOLICITATE DE CLIENȚI

Un factor principal, privind acceptanța sistemului propus, este *punctualitatea livrării*. Datorită posibilității de folosire a datelor de planificare și execuție a sarcinilor anterioare pentru sarcinile curente, sistemul de planificare devine mai performant prin estimarea cu precizie mărită a timpilor de livrare necesari.

Pe de altă parte, având în vedere aglomerația care poate exista în zonele pietonale este indicat ca planificarea să fie realizată în așa fel încât vehiculul să ajungă mai repede decât la ora planificată. Solicitățile evaluate au fost împărțite în două categorii: cele executate cu succes și cele planificate în care vehiculul autonom nu a început sau nu a terminat execuția sarcinii din cauza unor situații, de obicei, neprevăzute: sarcina a fost stornată de sistem din cauza unei întârzieri anterioare; sarcina a fost stornată de sistem din cauza unei defecțiuni tehnice al vehiculului; clientul a preluat coletul înainte ca aceasta să fie livrat, fără să anunțe sistemul; a existat o intervenție din partea centrului logistic de monitorizare.

În Tab. 7.3 se prezintă sintetic rezultatele privind punctualitatea executării sarcinilor în cea de a două perioadă de testare. În prima perioadă cu un singur interval orar de livrare pe zi, 77,54% din livrările planificate și 96,59% din livrările executate au fost realizate cu întârzieri de sub 10 minute. În perioada a doua, cu două intervale orare de livrare pe zi, 91,91% din livrările planificate și 97,15% din livrările executate au avut o întârziere de sub 10 minute. În urma chestionării majorității clienților, o întârziere de până la 10 minute intră în marja de acceptanță a acestora.

**Tab. 7.2** Date statistice privind punctualitatea executării sarcinilor în perioada 22.08 – 06.10 cu două intervale orare de livrare

Solicitări/întârzieri/stornări	Nr. livrări	Solicitări planificate [%]	Solicitări executate [%]
Solicitări planificate	484	100	-
Solicitări executate	454	93,8	100
Solicitări executate fără întârziere	337	69,62	74,22
Întârzieri (fără stornări)	117	24,17	25,77
Întârzieri peste 15 minute	4	0,82	0,88
Întârzieri între 10 și 15 minute	7	1,44	1,54
Întârzieri între 5 și 10 minute	24	4,95	5,28
Întârzieri între 3 și 5 minute	17	3,51	3,74
Întârzieri între 1 și 3 minute	35	7,23	7,71
Întârzieri sub un minut	30	6,60	6,20
Solicitări stornate de intervenția sistemului	20	4,13	-
Colete preluate înainte de livrare, fără anunțare	4	0,82	-
Colete stornate din cauza unei întârzieri anterioare	6	1,23	-

### 7.3.3 EFICIENȚA ȘI CALITATEA PLANIFICĂRII SARCINILOR

Metoda de planificare interactivă elaborată în cadrul acestei teze de doctorat ține cont de parametrii pe care algoritmi de planificare existenți în literatură nu i-au luat în considerare. Astfel, clienții sunt cei care specifică/acceptă data și ora livrării, răspunsul la solicitări se face ad-hoc, aceștia pot schimba datele solicitării, iar timpul execuției sarcinilor se schimbă conform dorințelor clienților. Un beneficiu al interactivității permanente este și prezența clienților la destinația solicitată pentru livrare. În cazul livrărilor efectuate de către companiile din domeniu (DHL, UPS etc.) se întâmplă des ca clienții să nu fie disponibili la momentul livrării, aceștia fiind, de regulă, înștiințați post factum să ridice coletul de la un sediu poștal. Datorită acestui beneficiu acceptanța pentru sistem crește a crescut cu 15 %.

În continuare, se prezintă aspecte privind performanțele obținute cu sistemul de planificare interactiv comparativ cu metoda clasică a comis voiajorului, TSP (Travelling Salesman Problem), care nu ia în considerare cerințele clienților, având ca parametri de intrare, doar destinațiile la care trebuie efectuate livrările. Orele de sosire la destinațiile cerute au fost calculate de sistemul de planificare. Astfel, pentru sarcinile (livrările) efectuate în perioada de evaluare au fost calculați timpii planificați pentru execuție. Pentru evaluare au fost reținute zilele în care a avut loc cel puțin o solicitare. Sarcinile solicitate au fost apoi planificate și cu metoda clasică TSP. În Fig. 7.6 se prezintă valorile timpilor planificați pentru parcurgerea traseelor în vederea execuției sarcinilor cu cele două metode. Suma timpilor planificați cu sistemul interactiv în toate zilele de operare pentru teste a fost 5445 min, iar cu metoda clasică TSP 3463 min.

Pe lângă timpii de planificare pentru parcurgerea traseelor în vederea execuției sarcinilor comparația din Fig. 7.6 conține și numărul de destinații la care vehiculul oprește pentru livrare. Astfel, spre deosebire de metoda clasică TSP prin care pot fi executate simultan două (sau mai multe) sarcini la aceeași destinație, nu este posibil cu metoda bazată pe sistemul de planificare interactiv deoarece, solicitările consecutive impun ore de livrare diferite, chiar dacă presupun aceeași adresă de livrare; cazurile în care apar livrări la aceleași oră și destinație sunt foarte rare (excepții). Din analiza rezultatelor testele efectuate (Fig. 7.6) se observă că deși, în majoritatea cazurilor timpul planificat cu metoda interactivă este mai mare decât cel planificat cu metoda clasică TSP, numărul de destinații cu sistemul interactiv este mai mare, fapt ce poate fi considerat ca un avantaj semnificativ, deoarece răspunde mai ferm la cerințele clienților. Astfel, pierderea din punct de vedere al timpului planificat/executat de 36,39%, care poate fi un avantaj pentru firma de livrare, este “compensată” la nivel calitativ prin

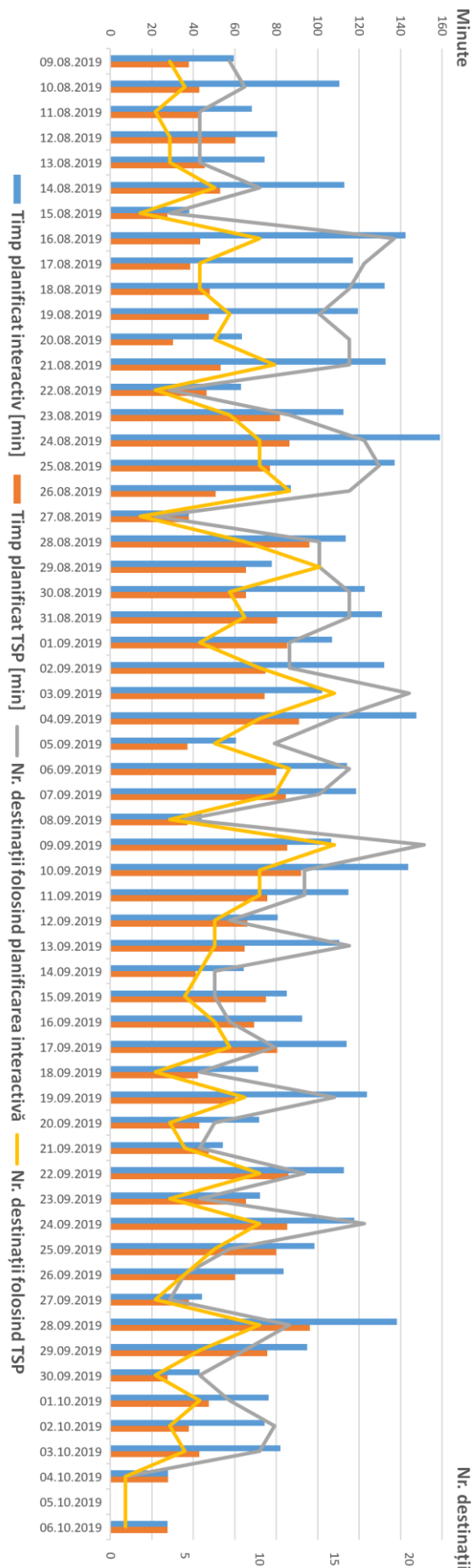


Fig. 7.6 Rezultate planificare interactivă vs. planificare cu metoda clasică TSP



câștigul obținut, de satisfacere a mai multor cerințe (ora de livrare, alternative oferite etc.).

În Fig. 7.7 sunt prezentate grafic traseele obținute cu planificările marcate pe harta reală a mediului de operare împreună prin graful traseelor posibile (v. subcap. 3.5.1) în ziua 13.09 cu sistemul interactiv și, respectiv, cu metoda clasică TSP.

În timpul experimentelor au fost efectuate în paralel și studii psihologice pentru a evalua acceptanța în rândul clienților a sistemul de livrare propus. Astfel, s-a constatat că acceptanța pentru noul sistem a crescut de la 76%, pentru cel cu livrări în mod clasic, la 91%, datorită avantajelor semnificative, inclusiv, cele induse de planificarea interactivă [Allhof, 2020].

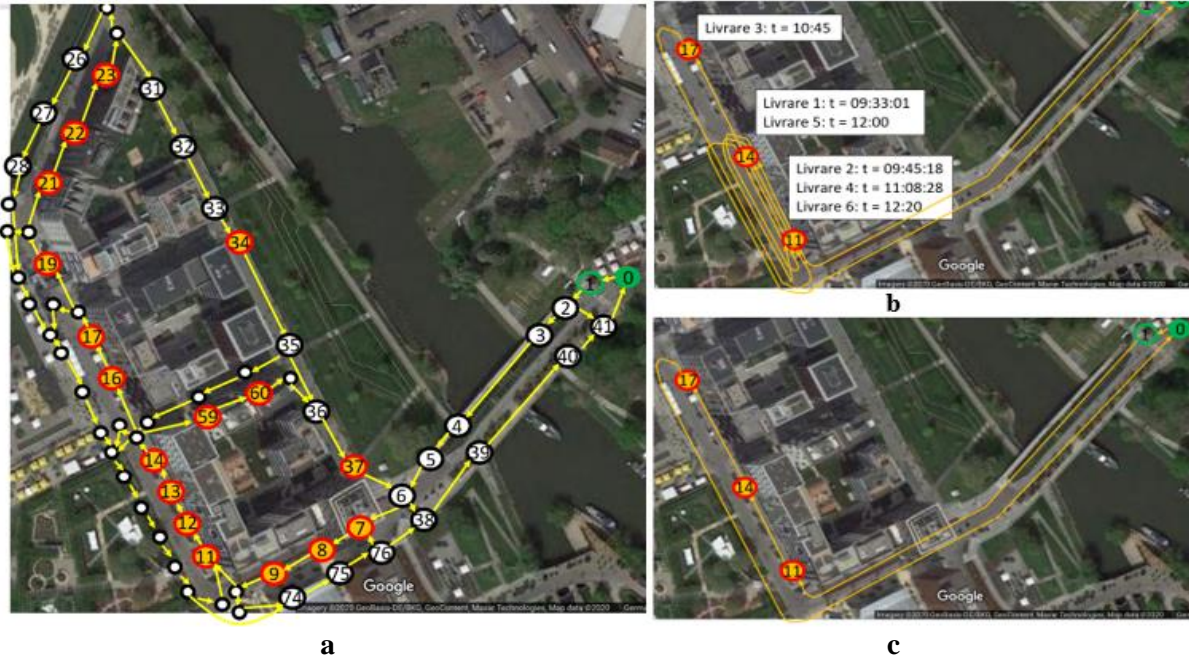


Fig. 7.7 Traseele planificate pentru livrările din data 13.09.2019: **a** – graful traseelor posibile; **b** – cu sistemul interactiv; **c** – cu metoda clasică TSP

## 7.4 EXPERIMENTE DE LOCALIZARE A VEHICULULUI AUTONOM

### 7.4.1 DESCRIEREA MEDIULUI EXPERIMENTAL DE LOCALIZARE

Localizarea vehiculului autonom în mediul pietonal implică precizii mărite și, ca urmare, are la bază un filtru Kalman extins (EKF) care fuzionează datele obținute de la senzori interni, pentru determinarea prin odometrie a poziției relative, a poziției și a abaterii estimate cu GNSS și a poziției și orientării vehiculului, precum și a abaterii estimate obținute cu AMCL care folosește ca date de intrare un LIDAR și o hartă digitală 2D. Procesele de fuziune folosind EKF au fost prezentate detaliat în cap. 5. Deoarece, folosirea de markeri reflectorizanți nu a fost permisă în mediul pietonal BUGA, integrarea și testarea sistemului de localizare dezvoltat s-a derulat în campusul

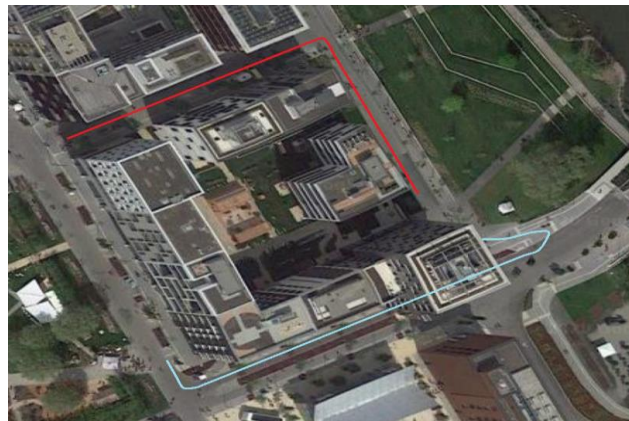


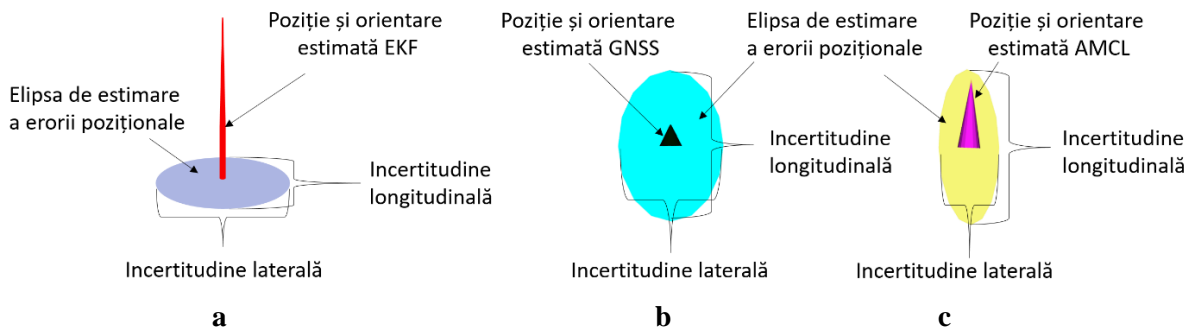
Fig. 7.8 Traseele pentru experimentele de localizare

universității din Heilbronn pentru care s-a obținut aprobare de montare a acestora.

Pentru evaluarea sistematică a punctelor forte și a punctelor slabe ale sistemului de localizare, metodele de localizare folosite sunt analizate și discutate separat, precum și în diverse combinații. Au fost alese două trasee reprezentative unde pentru localizare a fost nevoie de combinarea mai multor metode, care folosite separat nu pot realiza erori de sub 30 cm. Această precizie a fost impusă de condițiile de navigare în medii pietonale și s-a urmărit să fie atinsă în cadrul experimentelor desfășurate, unde se impune navigarea vehiculului autonom la distanțe de aprox. 0,3 – 0,5 m de straturi cu flori, zone cu gazon de iarbă, borduri etc. care nu sunt percepute de sistemul de siguranță.

În Fig. 7.8 se evidențiază două trasee în zona în care s-au realizat experimentele de localizare. Primul traseu (A), marcat cu roșu în Fig. 7.8, trece în prima parte printre clădiri înalte cu distanță între ele de aprox. 15 m, iar în cea de-a doua parte pe lângă clădiri aflate doar pe partea dreaptă la o distanță de aprox. 7 m de traseu. Lungimea totală a traseului A este de 165 m. La navigarea pe acest traseu uneori, pozițiile și abaterile indicate de GNSS sunt cu erori. Al doilea traseu (B) marcat cu cyan în Fig. 7.8, începe cu o buclă unde obstacolele constau în mare parte din vegetație de parc. În spate este o clădire cu geamuri, la parter este un restaurant, iar fațada clădiri are o suprafață reflectorizantă (gen oglindă) care îngreunează localizarea cu metoda AMCL ce folosește date de la senzori LIDAR. După această buclă urmează un traseu drept unde pe partea dreaptă după aprox. 9 m lungime sunt clădiri, iar pe partea stângă este la început o clădire la o distanță de aprox. 15 m de traseu și în continuare o construcție din grinzi metalice acoperită. Pe această parte a traseului există o zonă unde soluția oferită de semnalul GNSS nu este de tip *fixed* (v. subcap. 5.2.3), iar sistemul nu se poate localiza cu o precizie de sub 30 cm deoarece nu se află în aria de acoperire a tuturor sateliților necesari. Traseul B, cu lungimea totală 160,5 m se termină după o curbă la dreapta.

Reprezentarea rezultatelor este realizată folosind interfața grafică *rviz* [www59] în care se pot vizualiza datele senzoriale, harta digitală, parametrii vehiculului autonom folosit, precum și alți parametri de calcul. Această interfață este integrată în ROS, middlewareul folosit pentru



**Fig. 7.9** Elipsele erorilor (incertitudinilor): **a** – de estimare a poziției folosind EKF; **b** - de estimare a poziției folosind GNSS; **c** - de estimare a poziției folosind AMCL

implementarea pachetelor software la nivel de MCU-ul vehiculului autonom.

În vederea comparării și evaluării rezultatelor localizărilor experimentale se propune modelul din Fig. 7.9. Poziția estimată folosind EKF este reprezentată printr-o săgeată roșie cu lungimea de 3 m, care pentru o vizualizare mai bună, este în unele cazuri înconjurată de un cerc negru transparent cu raza 1 m. Eroarea de estimare a poziției este reprezentată printr-o elipsă albastră unde axa mare, cvasi paralelă cu orientarea vectorului poziției, reprezintă eroarea (incertitudinea) longitudinală și axa mică perpendiculară pe vectorul de poziție eroarea (incertitudinea) laterală (Fig. 7.9,a).

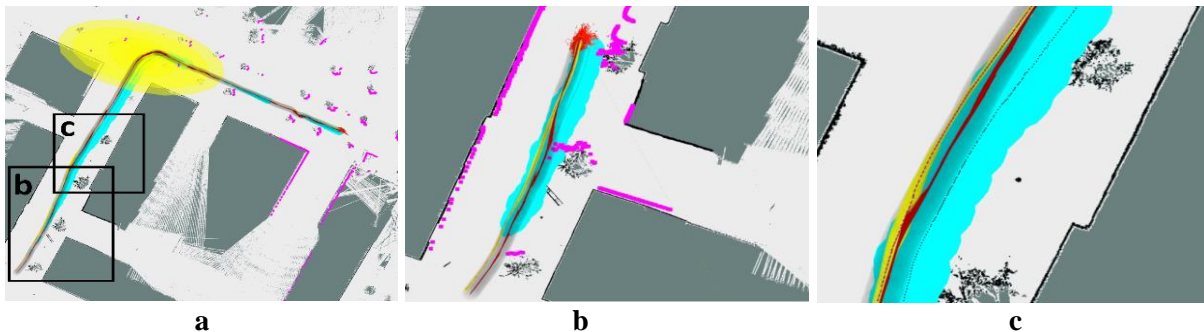
Poziția măsurată cu GNSS este reprezentată printr-un triunghi negru cu laturile de 10 cm (Fig. 7.9,b), elipsa de estimare a erorilor măsurătorilor cu culoarea cyan, iar poziția determinată folosind filtrul de particule AMCL este reprezentată printr-o săgeată de culoare magenta și elipsa de estimare a erorii este de culoare galbenă (Fig. 7.9,c).



## 7.4.5 LOCALIZARE CU ODOMETRIE, GNSS ȘI AMCL (LIDAR)

### 7.4.5.1 LOCALIZARE CU ODOMETRIE, GNSS ȘI AMCL (LIDAR) PE TRASEUL A

Având în vedere că pentru niciunul din cazurile de mai sus nu s-au obținut o combinație care să asigure precizii acceptabile pentru navigarea pe ambele trasee s-a continuat studiul experimental și pentru combinația celor trei metode. Rezultatul obținut este prezentat în Fig. 7.10. Odată ce distanța dintre poziția estimată cu GNSS și cea folosind filtrul de particule AMCL se mărește cu mai mult de 80 cm, iar localizarea AMCL are o eroare mai mică decât 20 cm, este folosită funcția *model* (v. subcap. 5.3) care modifică adaptiv incertitudinea localizării cu GNSS reprezentată prin elipsele erorilor cu cyan. Astfel, localizarea bazată pe filtrul de particule AMCL are o influență mai mare (Fig. 7.10,b). În momentul în care elipsa erorilor obținute cu filtrul de particule AMCL (galben) se mărește, deoarece estimarea are o precizie mai mare (20 cm), elipsa erorilor obținute cu GNSS se micșorează (cyan) iar poziția estimată cu EKF este mai aproape de poziția estimată cu GNSS.



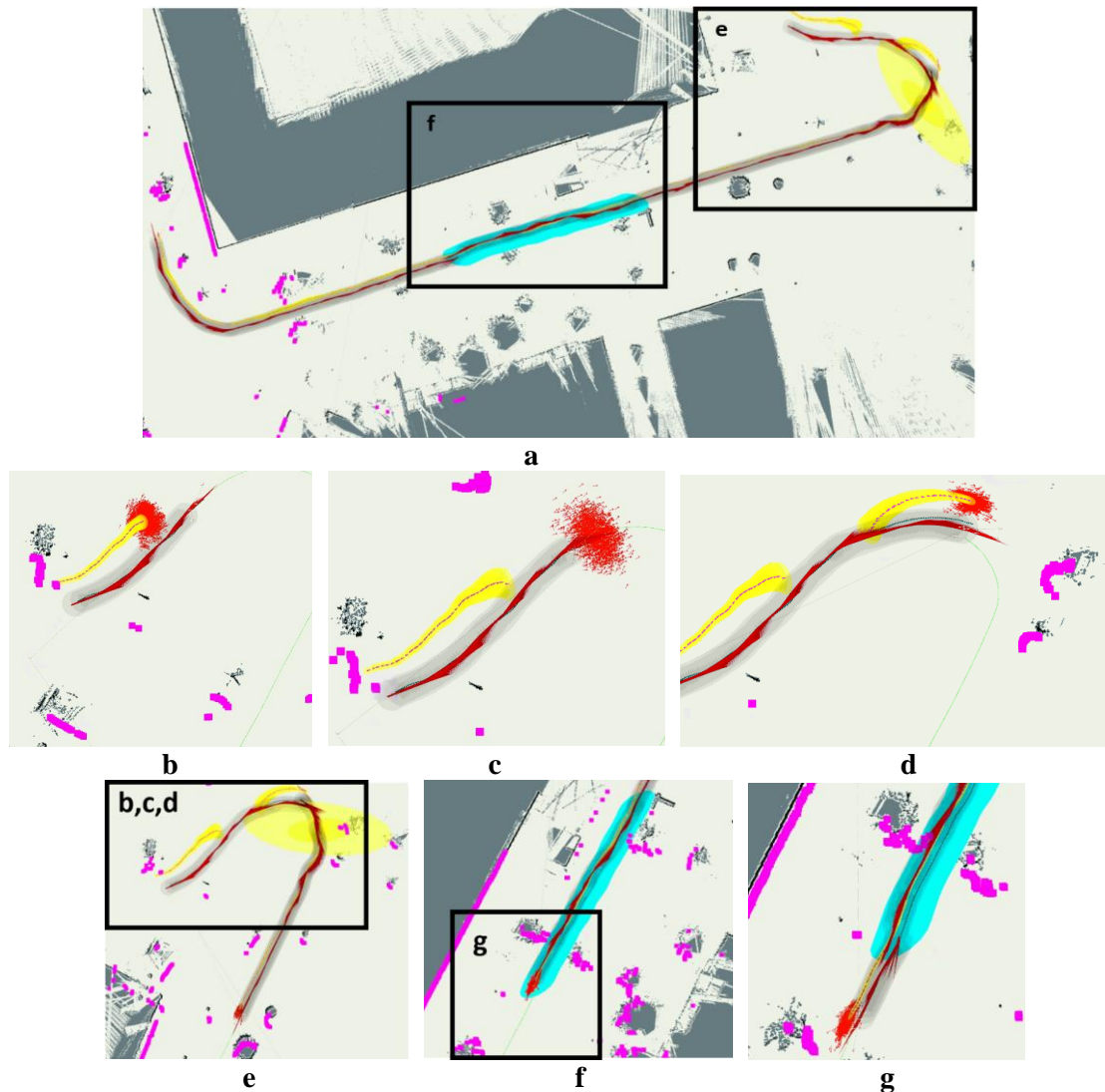
**Fig. 7.10** Rezultatele localizării cu odometrie, GNSS și AMCL pe traseul A: **a** – vedere generală; **b** – detaliu localizării cu elipsele erorilor suprapuse, unde cel cu AMCL este precis; **c** – detaliu cu variația poziției estimate în funcție de eroarea estimată de GNSS și AMCL

Acest comportament este evidențiat în Fig. 7.10,c. După scurt timp eroarea de estimare cu AMCL se micșorează și influențează din nou mai mult rezultatul localizării (roșu). În partea a doua a traseului există, de asemenea, segmente în care diferența dintre pozițiile estimate cu GNSS și cu AMCL este mai mare decât 80 cm. În Fig. 7.10,a acestea sunt evidențiate de elipsa erorilor obținute cu GNSS. Această elipsă nu crește mult deoarece distanța variază în jurul valorii de 80 cm, iar de fiecare dată când distanța scade sub acest prag se micșorează și elipsa conform funcției *model*.

### 7.4.5.2 LOCALIZARE CU ODOMETRIE, GNSS ȘI AMCL (LIDAR) PE TRASEUL B

În Fig. 7.11,a se prezintă rezultatele localizării cu cele trei metode împreună cu elipsele de erorilor suprapuse pe întregul traseu. În prima parte a traseului, GNSS corectează erorile de estimare obținute atât prin odometrie cât și cu LIDAR folosind metoda AMCL (Fig. 7.11,b,c,d,e). Se poate observa că norul de particule este generat a doua oară în jurul poziției curente a vehiculului autonom (Fig. 7.11,c). Totuși din cauza lipsei de obstacole, concludente pe harta digitală 2D, metoda AMCL nu reușește decât după executarea întoarcerii (Fig. 7.11,e) să genereze un rezultat precis. Poziția finală estimată cu EKF nu este influențată negativ de acest aspect. În momentul în care vehiculul intră în zona în care semnalul GNSS este de tip *float*, din cauza lipsei de sateliți, elipsa erorilor poziției finale estimate (EKF) nu se mai mărește, datorită influenței date de localizarea cu AMCL (Fig. 7.11,f). Există și aici acel mic salt de 20 cm în momentul în care sistemul GNSS devine precis (Fig. 7.11,g).

Ca urmare a experimentelor de localizare la navigarea pe traseul B combinând cele trei metode, rezultă că rezultatul se îmbunătățește atât în prima cât și în a doua parte a traseului.

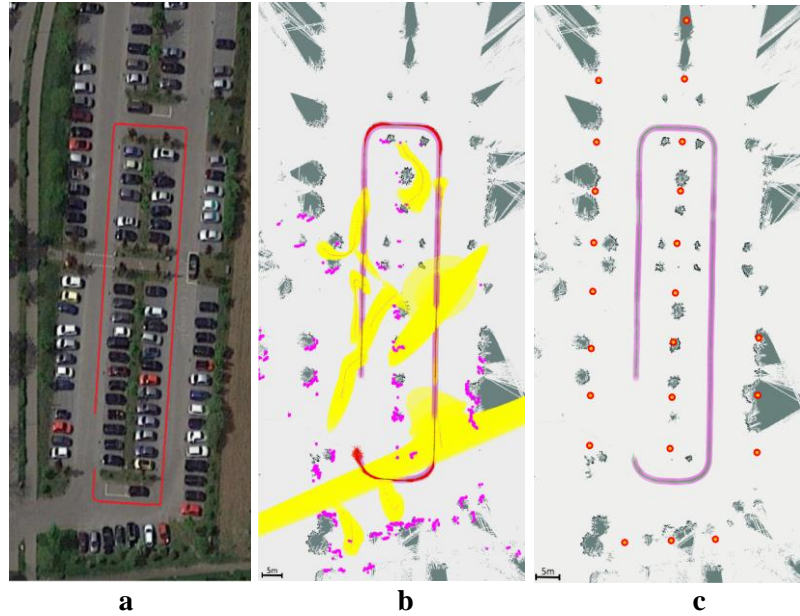


**Fig. 7.11** Rezultatele parțiale și finale ale localizării cu odometrie, GNSS și AMCL pe trasul B: **a** – vedere generală; **b** – elipsa erorilor cu AMCL; **c** – nor de particule în jurul poziției obținute cu GNSS; **d** – localizarea cu GNSS cu influență majoră, localizarea cu AMCL imprecisă; **e** – localizare precisă cu AMCL; **f** – localizare cu GNSS imprecisă; **g** – localizare cu GNSS precisă

#### 7.4.6 LOCALIZARE CU MARKERI REFLECTORIZANȚI

Cele două trasee (A și B) prezentate mai sus cu evidențierea zonelor adiacente au fost alese ca să acopere majoritatea situațiilor posibile întâlnite în mediile pietonale pentru studiile experimentale de localizare. În practică pot apărea situații în care atât cu GNSS cât și cu filtrul AMCL să conducă la localizări imprecise. Pentru a studia aceste situații s-a conceput și dezvoltat un mediu de navigare cu markeri reflectorizanți (v. subcap. 5.2.2.3). Astfel, s-a stabilit, pentru teste de localizare, un traseu (Fig. 7.12,a) cu lungimea de 143 m, în parcarea din campusul Universității din Heilbronn unde au fost amplasați markeri reflectorizanți. În Fig. 7.12,c se evidențiază pozițiile celor 23 de markeri marcați cu roșu. În Fig. 7.12,b se prezintă rezultatul localizării în urma fuziunii tuturor datelor: senzori interni, GNSS, AMCL și LM. Se poate observa că din cauza lipsei de obstacole cu metoda AMCL au rezultat elipse ale erorilor (marcate cu galben) de dimensiuni mari și deci, metoda este neadecvată pentru acest traseu. Opus metodei AMCL cu GNSS s-au obținut precizii de centimetrii. Rezultatul localizării folosind metoda de localizare bazată pe markeri, concepută, dezvoltată și implementată pentru trasee de acest tip este marcat cu culoare verde și încercuit cu culoarea magenta în Fig. 7.12,c.

Abaterea medie dintre pozițiile calculate cu metoda cu markeri și cea rezultată din EKF este de 15,43 cm, iar cea maximă de 23,46 cm. Localizarea folosind markeri reflectorizanți este fiabilă atunci când în fiecare punct de localizare, vehiculul se află în interiorul a cel puțin unui triunghi de markeri. În plus, nu trebuie să existe două triunghiuri identice în aria de căutare a senzorilor. Dezavantajul acestei metode este indus de modificările mediului adiacent zonei de operare a vehiculului autonom prin montarea markerilor reflectorizanți care, din păcate, nu sunt mereu posibile în spații publice.



**Fig. 7.12** Rezultatele localizării pe traseul cu markeri :  
**a** – vedere de sus a zonei traseului; **b** – cu EKF;  
**c** – numai cu metoda bazată pe markeri

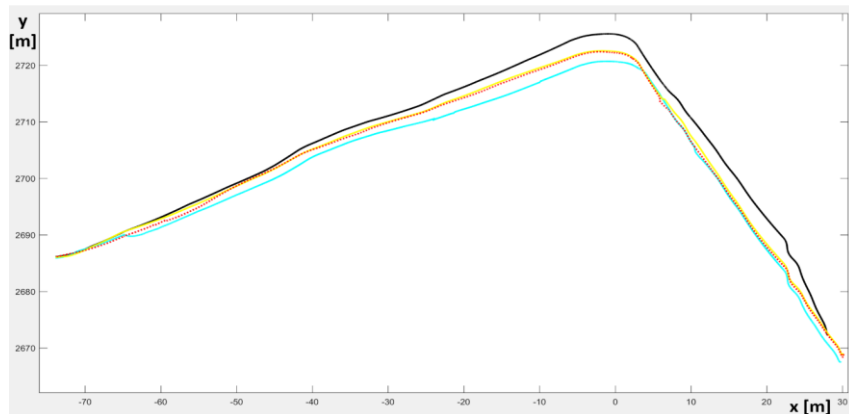
#### 7.4.7 ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTELOR DE LOCALIZARE ÎN MEDIUL PIETONAL

La navigarea pe traseul A sistemul s-a localizat în 19.015 de puncte. Acestea au fost folosite pentru evaluarea abaterilor dintre metodele prezentate bazat pe aprecierile privind dimensiunile elipselor de eroare asociate. În Tab. 7.3 se prezintă abaterile pozițiilor cu una sau două metode combinate raportate la rezultatul obținut cu cele trei metode.

**Tab. 7.3** Abaterile de poziție obținute cu una sau două metode de localizare combinate

Abaterea \ Metoda	Odometrie	Odometrie + GNSS	Odometrie + AMCL
Minimă [m]	0,0251	0,0011	0,0024
Medie [m]	3,1140	1,1219	0,3977
Maximă [m]	5,3522	4,5958	1,8525

În Fig. 7.13 sunt prezentate toate pozițiile estimate ale vehiculului autonom pe traseul A folosind metodele prezentate. Cu negru este reprezentat rezultatul obținut folosind doar odometria, cu cyan rezultatul obținut din fuziunea dintre odometrie și datele GNSS, cu galben rezultatul obținut din fuziunea dintre odometrie



**Fig. 7.13** Rezultatele localizărilor cu odometrie (negru), odometrie+GNSS (cyan), odometrie+AMCL (galben), EKF (roșu) pe traseul A



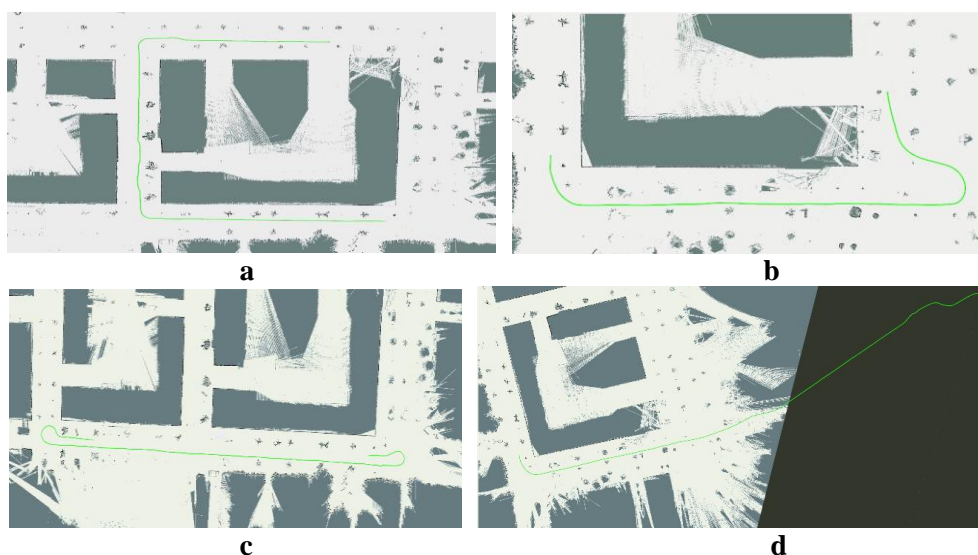
și datele AMCL, iar cu roșu rezultatul fuziunii tuturor datelor. Pe primul traseu rezultatele localizării cu odometrie și AMCL sunt foarte apropiate cu cele obținute din fuziunea tuturor datelor, datorită obstacolelor statice care sunt reprezentate pe harta digitală. Datele AMCL au cea mai mare influență în EKF, iar contribuția adusă de sistemul GNSS nu este la prima vedere mare, totuși limitarea generării de particule numai în jurul punctului GNSS aduce un plus resurselor folosite de algoritm, mai ales atunci când harta digitală pe care are loc căutarea este de dimensiuni mari și are o rezoluție mică. În cazul de față harta are o rezoluție de 5 cm.

Pe traseul B au fost efectuate localizări în 23.204 puncte. Rezultatul obținut folosind doar odometria, reprezentat cu negru, este inutilizabil (abateri mărite). Localizarea folosind combinarea metodei AMCL și odometrie nu este fezabilă din cauza imposibilității de localizare cu metoda AMCL în prima parte a traseului. Rezultatul obținut prin combinarea odometriei cu sistemul GNSS este reprezentat cu cyan, iar cel obținut prin combinarea celor trei metode este marcat cu roșu. Abaterile medie și maximă ale rezultatelor obținute prin combinarea odometriei cu GNSS și prin combinarea celor trei metode sunt, 0,1365 cm și, respectiv 0,9771 cm.

## 7.5 TESTE DE PLANIFICARE A TRASEELOR ȘI A TRAIECTORIILOR

### 7.5.1 TESTE DE PLANIFICARE A TRASEELOR GLOBALE

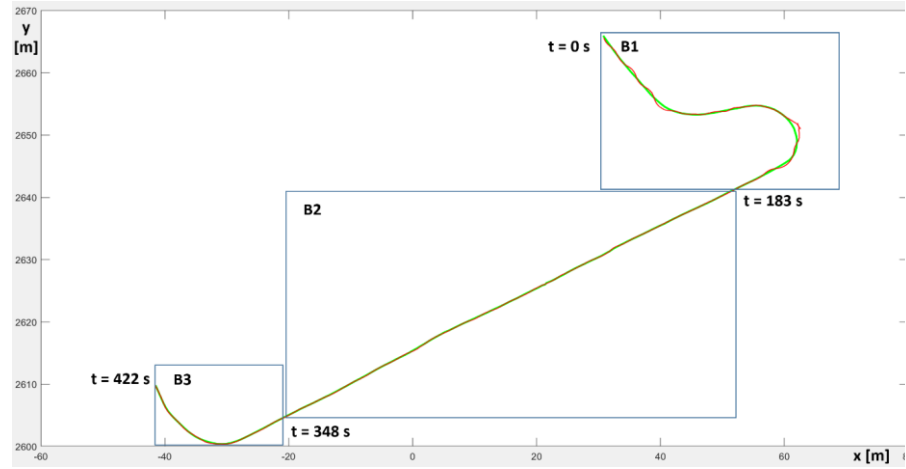
Subtraseele sunt asociate muchiilor grafului de planificare a sarcinilor și nu există posibilitatea unei inconsistențe între planificarea sarcinilor și traseul rezultat. Traseele sunt generate numai prin zone permise, iar regulile de circulație impuse sunt respectate. Deoarece, traseele de deplasare sunt generate prin învățare, conducerea manual a vehiculului, acestea sunt netede și ușurează procesul de planificare a traiectoriilor, care la urmărirea acestora trebuie să respecte restricțiile cinematice. În Fig. 7.14 se prezintă selectiv trasee planificate în mediul BUGA: în jurul unor clădiri (Fig. 7.14,a), o zonă cu vegetație la început (Fig. 7.14,b), vehiculul poate întoarce doar în locuri permise (intersecții), și respectă regula de deplasare numai pe partea dreaptă (Fig. 7.14,c), iar în (Fig. 7.14,d) este prezentat un caz unde pe prima parte a traseului nu există harta digitală. În ultimul caz harta nu a fost creată din cauza lipsei de obstacole necesare pentru localizare prin metoda AMCL. Pe acest tronson precizia GNSS a fost de centimetri.



**Fig. 7.14** Trasee planificate în mediul BUGA descrise în graful de planificare a sarcinilor de ID-urilor nodurilor: **a** – 11-37 (în jurul unor clădiri); **b** – 37-11 (în zone cu vegetație); **c** – 17-11 (respectând regulile de circulație definite); **d** – 0-11 (în zone fără hartă digitală)

## 7.5.2 TESTE DE PLANIFICARE A TRASEELOR ȘI TRAIECTORIILOR LOCALE

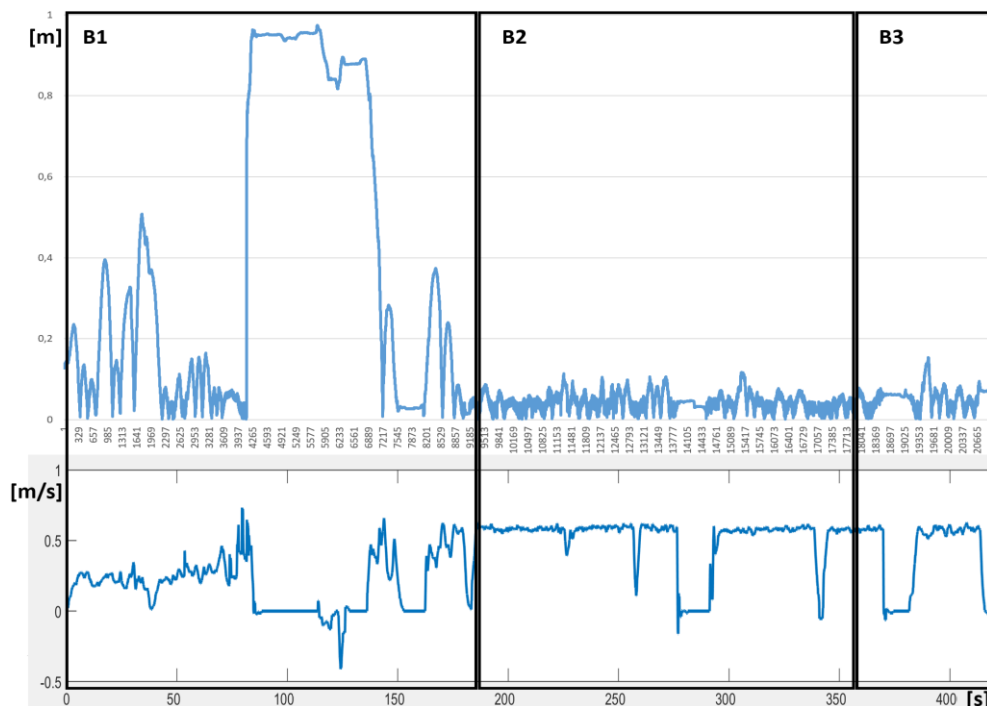
La navigare, vehiculul autonom încearcă să urmeze traseul global prin intermediul traiectoriilor locale planificate. Pentru această planificare s-a folosit pachetul software *teb\_local\_planner* a cărei structură și parametrizare sunt descrise în subcap. 6.2. Acesta a fost



**Fig. 7.15** Traiectorii parcurse (roșu) suprapuse peste traseul global

parametrizat și adaptat pentru ca ponderea de urmărirea a traseului global să fie mare. Astfel, s-a impus ca traseele și traiectoriile planificate și urmărite să nu se depărteze de traseul global cu mai mult de 0,5 m, iar ponderea de luare în considerare a obstacolelor dinamice a fost adaptată în funcție de distanța vehiculului de la traseul global. De asemenea, a fost setată cu pondere redusă și posibilitatea de a planifica traiectorii care să fie parcurse cu spatele.

Pentru evaluarea preciziei de parcurgere a traseelor precum și traiectoriilor locale planificate au fost realizate experimente de navigare pentru determinarea abaterilor laterale la urmărirea traseului B, descrise în subcap. 7.4.1 (v. Fig. 7.8). La deplasarea pe acest traseu s-au evidențiat următoarele trei zone (Fig. 7.15): în prima zonă (B1) vehiculul efectuează o buclă de întoarcere unde sunt mai mulți pietoni, zona a doua (B2) deplasarea în linie dreaptă unde numărul pietonilor este redus iar, în ultima zonă (B3) vehiculul realizează o curbă la dreapta, de asemenea, în prezența unui număr redus de pietoni.



**Fig. 7.16** Variațiile abaterilor traseului parcurs de la traseul global și vitezei de deplasare

În Fig. 7.15 se evidențiază traseul global planificat (verde) și traiectoria parcursă de vehiculul autonom (roșu). Abaterea maximă între acestea de 97,39 cm apare la întoarcerea din zona B1, abaterea medie pe întreg traseul este de 5,6 cm, iar abaterea minimă este 0,05 cm. Traseul B este urmărit de vehiculul autonom în 7 min și 2 s cu viteze în intervalul -0,4 m/s – 0,73 m/s. În Fig. 7.16 sunt reprezentate abaterile în fiecare punct împreună cu vitezele de deplasare. Rezultatele sunt analizate pentru fiecare zonă separat. Pentru a obține rezultatele descrise algoritmul TEB planifică la fiecare 100 ms câte un traseu local potențial, care chiar dacă nu sunt parcurse de vehiculul autonom sunt importante pentru analiza sistematică a planificării traiectoriilor. Aceste trasee sunt reprezentate cu culori diferite în Fig. 7.17 și oferă un detaliu a unui traseu local planificat în zona B1 unde abaterea de la traseul global este maximă, iar pentru a reveni pe traseu, vehiculul autonom trebuie să se deplaseze cu spatele. Acest traseu conține aprox. 50 de puncte, iar pentru punctele fiecărui traseu au fost, de asemenea, calculate abaterile de la traseul global (Fig. 7.18). Media aritmetică a abaterilor medii ale traseelor locale de la traseul global este de 9,03 cm, iar mediile aritmetice ale abaterilor maxime și minime sunt 24,08 cm și, respectiv 0,9 cm. Vehiculul autonom ajunge în punctul destinație cu o abatere de 7,04 cm.

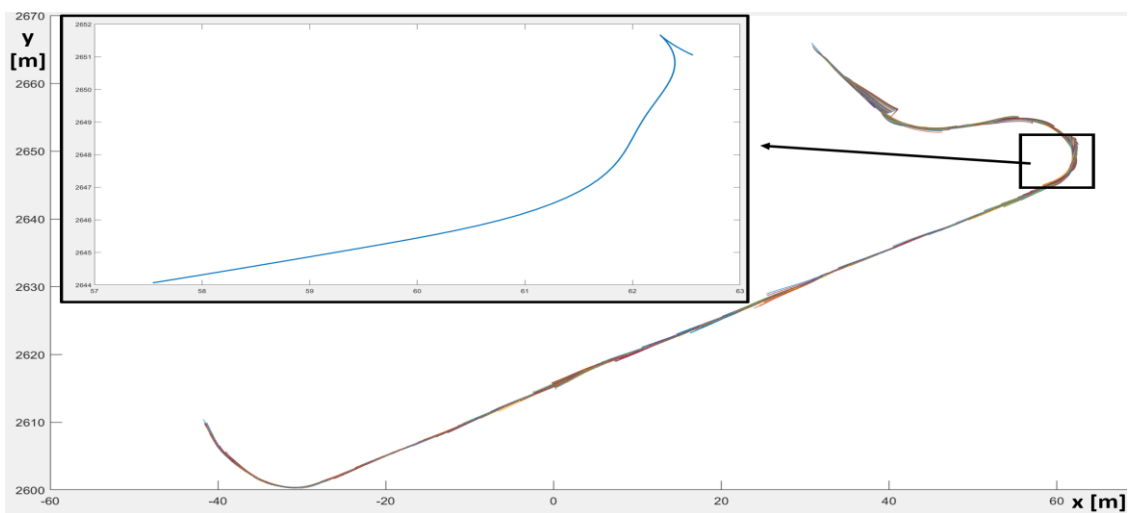


Fig. 7.17 Trasee locale planificate (suprapuse), inclusiv un traseu care pornește cu spatele în (detaliu)

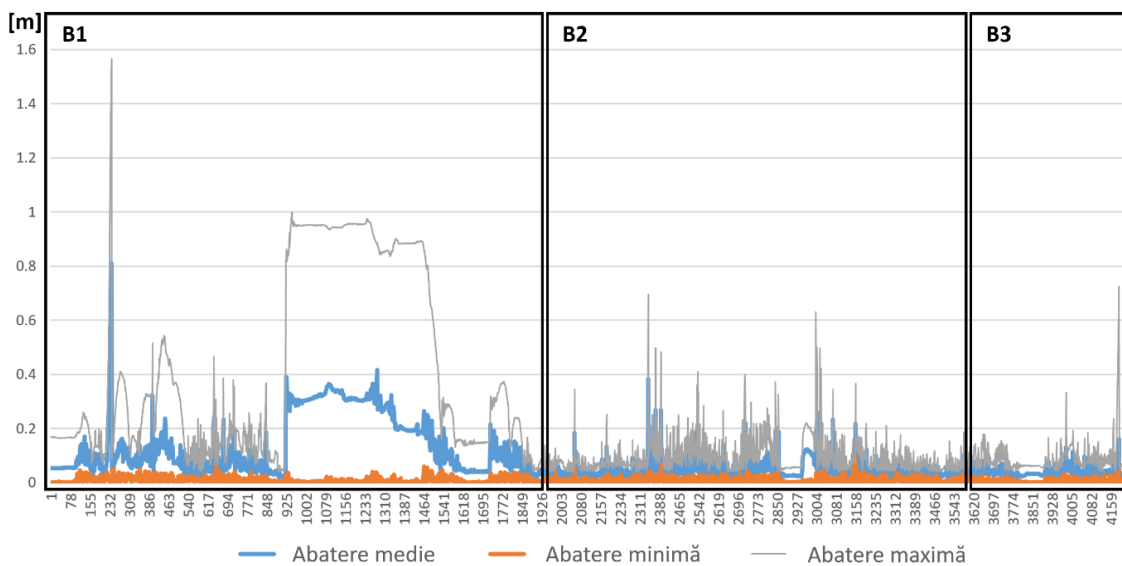
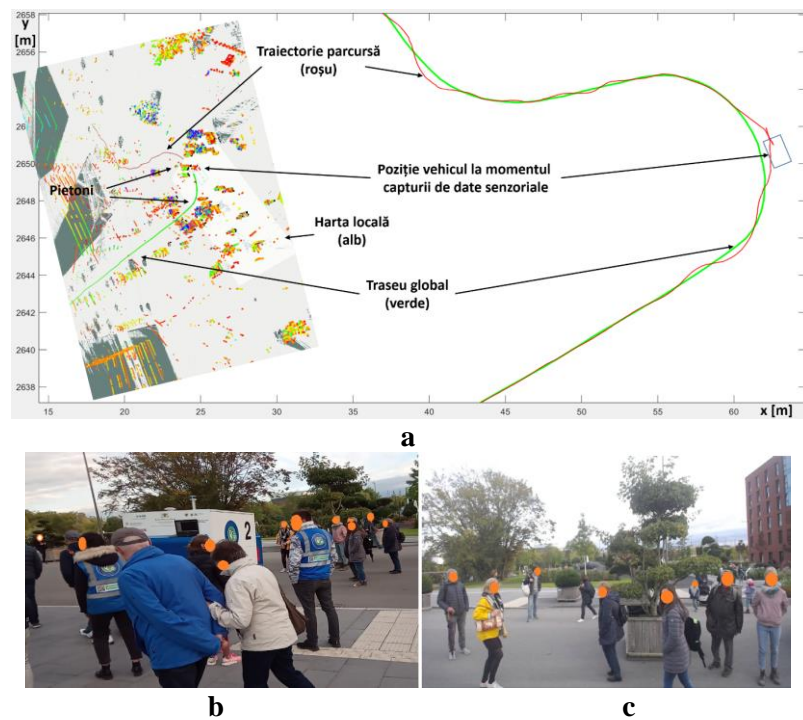


Fig. 7.18 Mediile aritmetice ale abaterilor medii (albastru), minime (portocaliu) și maxime (gri) ale traseelor locale planificate de la traseul global

### 7.5.2.1 ANALIZA REZULTATELOR OBTINUTE LA NAVIGAREA ÎN ZONA B1

În această zonă, din cauza deselor modificări ale traiectoriilor, pentru evitarea pietonilor, vehiculul se abate de la traseul global, cu aproape 1 m. Asemenea situații au fost rare în timpul efectuării testelor experimentale. Abaterile maximă și minimă în zona B1 sunt 0,9739 cm, respectiv, 0,0009 cm, iar abaterea medie, 0,2009 cm. În Fig. 7.19 se prezintă cazul în care abaterea de la traseul global este cea maximă și este necesară o manevră de mers cu spatele. Cu culoarea cyan este reprezentată amprenta vehiculului și harta locală, folosită pentru planificarea traseelor și traiectoriilor locale, cu alb. Punctele sesizate cu senzorii LIDAR, sunt reprezentate în culori



**Fig. 7.19** Vehiculul autonom navigând în zona pietonală:  
**a** – detaliu cu traseul global și traiectoria locală parcursă;  
**b** – poză cu vehiculul autonom în zona B1; **c** – imaginea zonei B1 achiziționată cu senzorul vision de pe vehicul

diferite în funcție de distanța la care se află. Traseul global este reprezentat cu culoarea verde, iar traseul parcurs până la momentul capturii este reprezentat cu roșu. În Fig. 7.19,a este prezentată o imagine realizată din spatele vehiculului aflat în poziția descrisă, iar în Fig. 7.19,b o captură a senzorului vision aflat pe vehicul. Se observă cum vehiculul este înconjurat de pietoni, iar o înaintare printre aceștia, urmărind traseul global este imposibilă. Deoarece, vehiculul se află într-o poziție în care abaterea de la traseul global este mult prea mare (0,97cm), acesta planifică traiectorii care nu iau în considerare pietonii, iar datorită modulelor de siguranță vehiculul autonom staționează până în momentul în care pietonii ocupă poziții care permit urmărirea traiectoriei. Deoarece, pietonii din spate sunt primii care eliberează zona din jurul vehiculului, pentru a putea ajunge pe traseul global este nevoie de o manevră de mers cu spatele. Datorită dimensiunii hărții locale alese, vehiculul poate planifica doar distanțe mici de mers cu spatele. În Fig. 7.17 se prezintă un detaliu cu unul din traseele planificate, evidențiat printr-un chenar negru și în Fig. 7.19,a se observă un detaliu cu traiectoria obținută. Din poziția în care se află, vehiculul merge cu spatele ca. 1 m, iar apoi înaintează și ajunge pe traseul global. Datorită ponderii mici pentru traiectorii cu spatele și a dimensiunii hărții locale, aceste trasee sunt planificate foarte rar, iar distanța de mers cu spatele nu poate să depășească niciodată 2 m.

Traseele locale planificate în zona B1 urmăresc, cu precădere traseul global, media aritmetică a abaterilor medii, ale traseelor planificate de la traseul global este de 14,7 cm, iar mediile aritmetice ale abaterilor maxime și minime sunt 43,57 cm și respectiv, 1,05 cm.

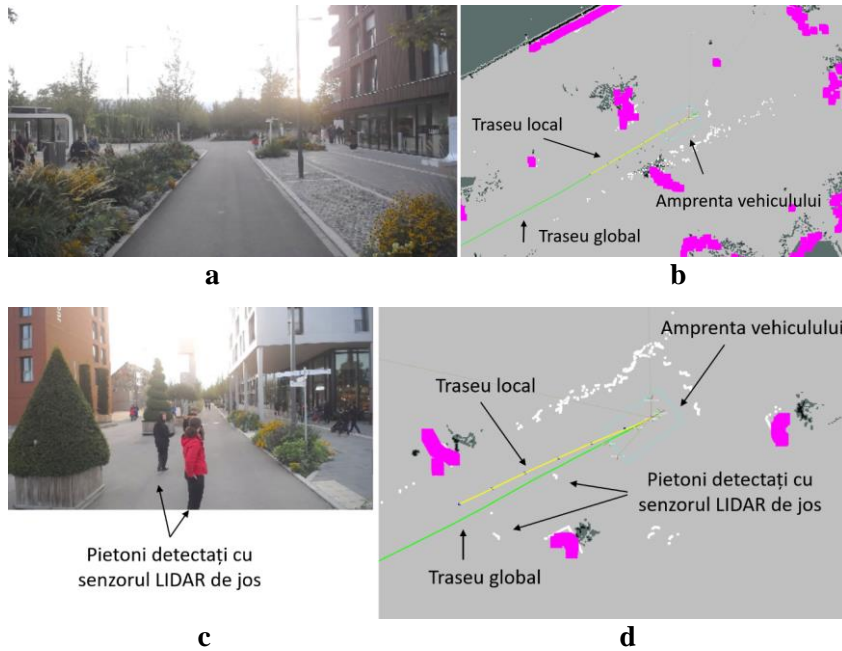
### 7.5.2.2 ANALIZA REZULTATELOR OBTINUTE LA NAVIGAREA ÎN ZONA B2

La navigarea vehiculului autonom după traseul în linie dreaptă din zona B2 se evidențiază două situații: fără pietoni și cu 3 pietoni în fața vehiculului. În prima situație reprezentată în Fig. 7.20,a,b traseul local planificat reprezentat cu galben folosit pentru



planificarea traiectoriei se suprapune peste traseul global.

Neexistând obstacole dinamice criteriul de urmărirea a traseului global are pondere mare și influențează, împreună cu criteriile de respectare a cinematicii, cel mai mult rezultatul. În cea de a doua porțiune (Fig. 7.20, b) traseul local planificat se abate de la traseul global atunci când apare necesitatea de planificare a unui traseu local pe lângă pietoni și vehiculul nu se află la mai mult de 0,5 m de primul punct al traseului global care este actualizat la fiecare pas de calcul. În Fig. 7.20,b,d s-a marcat cu



**Fig. 7.20** Rezultatele navigării în zona B2: **a, c** – imagini achiziționate cu senzorul vision de pe vehicul; **b, d** – traseul local planificat suprapus peste traseul global

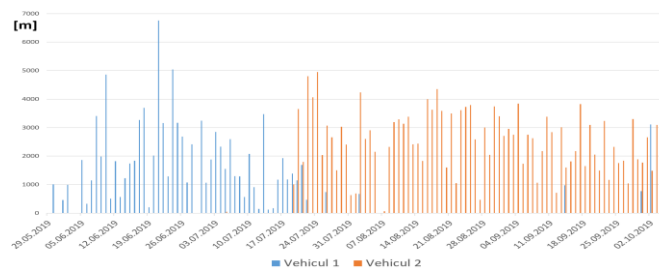
alb rezultatul scanării cu LIDAR folosit pentru planificarea traiectoriei, senzorul sesizând în acest caz și vegetația din lateral. Deoarece, situațiile de ocolire sunt scurte traiectoria parcursă se suprapune, în principal, peste traseul global. Astfel, pentru zona B2 abaterea traiectoriei de la traseul global este în medie de 4,01 cm, iar abaterile maximă și minimă sunt 11,72 cm, respectiv 0,05 cm. Din punct de vedere al traseelor locale planificate media aritmetică a abaterii medii a tuturor traseelor este de 5,01 cm, cea maximă de 9,5 cm, iar cea minimă de 1 cm.

### 7.5.2.3 ANALIZA REZULTATELOR OBTINUTE LA NAVIGAREA ÎN ZONA B3

În ultima zonă B3, vehiculul autonom execută un viraj la dreapta. În Fig. 7.15 și Fig. 7.17 se observă cum că atât traiectoria parcursă cât și traseele planificate urmează traseul global, iar traseul nu este scurtat. Și în această situație apare un punct în care vehiculul se oprește din cauza pietonilor urmând să reia navigarea după modificarea scenei din fața acestuia. Acest punct poate fi observat în Fig. 7.16 unde viteza între secundele 370 și 380 este 0 m/s. Abaterea medie a traiectoriei parcurse pe acest segment este de 5,83 cm, cea maximă de 15,41 cm și cea minimă de 0,09 cm. Media aritmetică a abaterii medii a tuturor traseelor locale planificate în zona B3 este de 3,9 cm, situându-se între 0,7 cm (abaterea minimă) și 8,3 cm (abaterea maximă).

## 7.6 TESTE DE EVALUARE A PERFORMANTELOR GLOBALE

În perioada 30.05.19 – 06.10.19 cele două vehiculele autonom au parcurs în total, 299,085 km. Primul vehicul autonom a parcurs 101,877 km iar cel de-al doilea 197,207 km. În Fig. 7.21 sunt reprezentate distanțele parcurse de cele două vehicule pe zile.



**Fig. 7.21** Distanțele parcurse de cele două vehicule

În Tab. 7.4 se prezintă date privind distanțele parcurse de două vehicule care au realizat sarcini de livrare colete la adrese solicitate de clienți.

**Tab. 7.4** Media și maximul kilometrilor parcurși în zilele de operare

Vehicul	Distanța totală parcursă [km]	Distanța medie pe zi [km/zi]	Distanța maximă [km] în ziua
1	101,877	1,819	6,7 km în 20.06.2019
2	197,207	2,528	4,9 km în 24.07.2019

În perioada de operare temperaturile atmosferice au variat între 0° și 38° și nu au afectat funcționarea dispozitivelor electronice și electromecanice ale vehiculelor autonome. În această perioadă un senzor LIDAR (velodyne) a fost afectat de ploaie și a trebuit schimbat. Boxele de depozitare a coletelor, confecționate din aluminiu și cu masa de 200 kg, au fost puse la dispoziție de firma RENZ. Împreună cu celelalte componente detașabile s-a ajuns la o masă de 260 kg, permițând conform subcap. 4.3.1 depozitarea de pachete cu masa totală de 100 kg.

În Fig. 7.22 se vizualizează vehiculele autonome dezvoltate. Cel de-al treilea vehicul autonom a fost finalizat abia în ultima săptămână a târgului de horticultură din Heilbronn și nu a mai fost folosit în misiuni de livrare colete.



**Fig. 7.22** Vehicul autonom: **a** – la stația de alimentare; **b** – în cadrul flotei

## 7.7 CONCLUZII

Testele și experimentele prezentate în acest capitol s-au făcut cu respectarea normele de siguranță ISO26262 care au fost implementate în subsistemul de siguranță testat în subcap. 7.2. În vederea pregătirii autovehiculului autonom pentru studiile experimentale s-au făcut teste în care componentele electronice și senzoriale au fost deconectate de la sistem sau datele senzoriale au fost modificate cu valori implauzibile, iar vehiculul autonom a fost adus de fiecare dată într-o stare sigură de funcționare. Lanțul de siguranță conține componente hard și soft care acționează în mod redundant. Vehiculele autonome dezvoltate au fost omologate pentru navigarea/operarea în medii pietonale reale, fiind supravegheate de un conducător auto de siguranță conform legislației rutiere actuale care încă nu permite navigarea vehiculelor autonome fără supervizarea de către un operator uman.

Ca urmare a implementării sistemului de planificare interactivă a sarcinilor a crescut acceptanța clienților privind livrările de colete cu vehicule autonome cu 15% în raport cu acceptanța în cazul inexistenței planificării interactive. Experimentele realizate au aratat că clienții acceptă “colaborarea” cu sistemul de planificare interactiv propus și reacționează pozitiv la soluțiile alternative oferite de acesta. Îndeplinirea sarcinilor planificate s-a făcut în majoritatea cazurilor respectând timpii planificați, în peste 97% din cazuri vehiculele autonome au ajuns la timp sau cu o întârziere de sub 10 minute. Chiar dacă eficiența din punct de vedere al timpului planificat/executat este de 64% comparativ cu o planificare teoretic optimă, unde toate destinațiile sunt cunoscute de la început, iar dorințele clienților referitoare la timpul și destinația livrării nu sunt luate în considerare, acest procent este justificat considerând, beneficiile interactivității cu clienții care au condus la o acceptanța a acestora ridicată, 91%. Sistemul dezvoltat este reimplementabil și în alte zone similare, numărul vehiculelor folosite

depinde de numărul de colete solicitate și de aria pe care acestea își desfășoară activitatea. Astfel se poate elabora o teorie pornind de la statistica din Germania unde la o populație de 84 milioane de locuitori au loc în medie 3,4 milioane de livrări zilnic, adică ca. 4% din cetățeni primesc un colet/zi. În zona expozițională în care au fost efectuate testele experimentale la aprox. 800 de locuitori se ajunge la ca. 32 colete/zi. Pentru a optimiza livrările coletelor și numărul de vehicule necesare se poate solicita ca încărcarea vehiculelor să fie efectuată la o locație și o oră fixă. Astfel pentru mediul BUGA sunt necesare două vehicule pentru a asigura livrarea autonomă a necesarului de colete. Folosind acest principiu se poate estima necesarul de vehicule pentru orice zonă rezidențială unde livrarea coletelor este necesară în aceeași zi. De exemplu, în Brașov pentru zona din centrul vechi, marcată pe harta din Fig. 7.23, se poate defini un traseu cu o lungime totală, similară cu cea în care s-au desfășurat experimentele și pleca de la premisa că la fiecare din cele 250 de adrese existente locuiesc în medie 8 persoane. Respectând proporția din Germania, de 4% locuitori care primesc colete zilnic, se ajunge la 80 colete/zi pentru cele 2000 de persoane potențiale. Pentru a putea livra aceste colete este nevoie de 5 vehicule autonome cu o capacitate medie de aprox. 16 colete/zi. În plus, pentru implementare se vor parcurge etapele descrise în această lucrare.



**Fig. 7.23** Zonă pietonală din centrul vechi al Brașovului, pretabilă pentru servicii de livrare colete cu vehicule autonome

Testele experimentale pentru localizarea vehiculului autonom în zona pietonală au fost realizate pe două trasee, primul unde pe de o parte și alta a acestuia sunt clădiri înalte ce implică imprecizii ale GNSS, iar cel de al doilea trece printr-o zonă unde nu există clădiri sau obstacole care să poată fi sesizate cu senzorul LIDAR. Pozițiile de localizare au fost estimate folosind EKF care fuzionează datele senzoriale obținute prin odometrie, cu datele de poziție GNSS și cu datele de poziție și orientare de la AMCL, precum și cu abaterile estimate ale acestora. Astfel, s-au obținut localizări cu precizii ridicate. Nu s-au evidențiat, în cazul testelor realizate, situații în care atât semnalul GNSS cât și localizarea pe harta digitală cu AMCL să fie simultan imprecise. Deoarece, în practică pot apărea asemenea situații s-a propus ca alternativă un sistem de localizare bazat pe markeri reflectorizanți montați în zone adiacente căilor de navigare a vehiculului autonom. Experimentele realizate în campusul Universității din Heilbronn, au condus la o abatere medie a localizărilor obținute cu sistemul cu markeri și cu metoda EKF, de 15,43 cm. Pentru ca această soluție să poată fi utilizată este nevoie de aprobarea instalării markerilor reflectorizanți în mediul de operare.

Traseele globale planificate formate din subtrasee salvate la nivelul serverului principal sunt precise și nu necesită resurse de calcul pe MCU-ul vehiculului autonom. Pentru planificarea traseelor și traiectoriilor locale s-au utilizat subprograme specifice navigării roboților mobili bazate pe algoritmul TEB care au fost adaptate, modificate și implementate pentru navigarea vehiculelor autonome. Având o pondere mare de urmărire a traseului global, traseul local și implicit traiectoria asociată, nu se depărtează în majoritatea situațiilor cu mai mult de 0,5 m de la traseul global. Situații extreme precum cea prezentată în subcap. 7.5.2.1 unde din cauza dinamicii vehiculului autonom și obstacolelor mobile din jurul acestuia se ajunge la abateri mai mari de 0,5 m de la traseul global, apar rar. În aceste cazuri vehiculul se oprește și prin manevre de mers cu spatele sau de întoarcere se revine la traseul global. Experimentele și testele efectuate au demonstrat viabilitatea algoritmilor și programelor dezvoltate.

Evaluarea întregului sistem demonstrează că vehiculele și sistemul de planificare dezvoltat funcționează în mediul de operare pe durată îndelungată.

## 8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PROPRII, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI NOI DIRECȚII DE CERCETARE

Această teză de doctorat, prin tematica abordată, are caracter multidisciplinar de cercetare-dezvoltare și prin rezultatele obținute pune bazele cunoașterii în domeniul vehiculelor autonome pentru servicii în medii pietonale. În acest cadru complex, cercetările necesită numeroase componente transversale din domeniile: vehicule autonome utilitare, robotică, tehnologie informatică, psihologie (acceptanță) și chiar juridic.

### 8.1 CONCLUZII FINALE

Întrebarea principală la care răspunde teza de doctorat este: *Cum se pot dezvolta vehicule autonome în vederea efectuării de servicii (sarcini) în medii pietonale?*. Aspecte importante care trebuie avute în vedere sunt, pe de-o parte *realizarea tehnică* a vehiculului autonom care trebuie să respecte normele de siguranță impuse de legislație și, pe de altă parte, să fie capabil să se localizeze și să navigheze în medii pietonale. Îndeplinirea acestor cerințe este legată și de *acceptanța* în rândul clienților (beneficiarilor) serviciilor precum și a pietonilor din mediul de navigare a vehiculelor autonome. În cadrul acestei teze de doctorat pentru exemplificare și validare a rezultatelor s-au abordat în detaliu serviciile de livrare (transport) colete (“pe ultima milă”), dar care pot fi aplicate cu mici personalizări și la alte servicii.

Pentru dezvoltarea vehiculelor autonome s-a elaborat un *concept de transformare* top-down a unor vehicule existente care pot fi adaptate pentru execuția sarcinilor impuse. Pentru navigarea în medii pietonale vehiculele electrice sunt cel mai indicate, datorită emisiilor și a poluării (cu noxe și fonic) reduse, compatibilității sistemului de propulsie cu cele de comandă și control a navigării, precum și eficienței și eficacității energetice, inclusiv privind alimentarea. Astfel, pentru *transformarea în vederea executării de sarcini de livrare colete la domiciliu* a fost ales un cart de golf electric, deoarece, pe de-o parte, astfel de vehicule sunt des întâlnite în medii pietonale (de ex. aeroporturi, gări, parcuri etc.), iar pe de altă parte, acestea intră în categoria vehiculelor ușoare ceea ce simplifică procesul de omologare în vederea operării în aceste medii. Conform algoritmului de transformare propus au fost modificate și completate subsistemele de accelerare, frânare, schimbare de sens, direcție și de alimentare prin integrare de unități electronice (ECU-uri) și senzori interni pentru măsurarea parametrilor vehiculului (de ex. viteză, unghiul de orientare), precum și senzori externi (GNSS, LIDAR, Vision, Ultrasonici) pentru percepția mediului de operare.

Deoarece, stadiul actual referitor la arhitecturi pentru siguranța vehiculelor autonome este foarte vag, a fost dezvoltat *conceptul de siguranță fermă* aliniat la normele ISO26262 și implementat pe vehiculul autonom dezvoltat. ECU-urile sistemului sunt supravegheate de două componente de tip watchdog, care operează în mod redundant și în cazul depistării unei erori informează componenta de decizie de la nivelul MCU sau intervin direct prin oprirea vehiculului și deconectarea actuatorilor și a electronicii de putere de la sursa de alimentare. Fiecare componentă software dezvoltată are și o parte de siguranță care verifică dacă datele recepționate/calculate sunt plauzibile. În plus, senzorii LIDAR și ultrasonici sunt folosiți în mod redundant pentru detectarea obstacolelor. În jurul vehiculului au fost definite zone de siguranță, iar dacă sunt detectate obstacole în cadrul acestor zone, în funcție de zona de siguranță, viteza este redusă sau vehiculul este oprit. Deoarece zona este pietonală, iar vehiculul se deplasează cu viteze reduse pentru protecție maximă au fost concepute și dezvoltate *două bumpere*, primul folosind senzori hall magnetici și arcuri, iar cel de-al doilea cu senzori de presiune și perne de



aer, care inițiază o frână bruscă a vehiculului. Astfel, chiar la o atingere cu forțe mult reduse, se poate împiedica coliziunea cu obstacole fixe și mobile (alte vehicule, pietoni sau chiar copii, animale de dimensiuni reduse). Din cauza dificultăților întâmpinate pentru omologarea tehnică a acestor prototipuri pe vehiculele autonome finale a fost integrat, pentru testele în medii pietonale reale, un sistem bumper omologat, care folosește senzori de tip panglică și spumă poliedrică pentru minimizarea impactului. Prin testele efectuate, de tip fail safe test, s-a demonstrat fezabilitatea implementării conceptului de siguranță fermă, iar *vehicul a fost omologat pentru operarea în medii pietonale* de către asociația TÜV (*Technischer Überwachungs-Verein*) acreditată pentru acest scop. După omologare vehiculele autonome dezvoltate au navigat în regim autonom aprox 300 km într-o perioadă de aprox. 6 luni într-un mediu pietonal urban, unde au operat în varii condiții meteorologice.

Pentru a crește acceptanța în rândul beneficiarilor de servicii, în special, în cazul livrării de colete la domiciliu a fost dezvoltat un sistem pentru *planificarea și monitorizarea sarcinilor de efectuat în mod interactiv*. Astfel, după ce clientul specifică date despre sarcina impusă (dată, oră, locație, tip), sistemul planifică ad-hoc cererea și îl informează. Algoritmii de planificare existenți nu pot fi folosiți din cauza constrângerilor impuse, aceștia având nevoie de toate datele referitoare la orele și destinațiile care trebuie atinse. De aceea singura soluție viabilă a fost conceperea și dezvoltarea sistemului de planificare interactiv, ca un sistem ierarhic, care integrează clienții, folosind pentru servirea acestora principiul primul venit primul servit, dar încearcă, în plus, să optimizeze traseele care trebuie parcurse în vederea îndeplinirii sarcinilor. În cazul în care executarea sarcinilor nu poate fi planificată, sistemul oferă soluții alternative care pot fi acceptate de client sau acesta poate specifica noi date. Pentru efectuarea solicitărilor precum și pentru monitorizarea interactivă clientul are la dispoziție o aplicație care poate rula pe orice dispozitiv mobil (telefon inteligent, tabletă).

Sistemul dezvoltat poate fi folosit pentru o întregă flotă de vehicule autonome care pot executa sarcini de diferite tipuri. De aceea, a fost implementată o aplicație client pentru monitorizarea vehiculelor autonome de către un operator uman, care poate urmări execuția sarcinilor în timp real și interveni în caz de nevoie. Sistemul permite și conectarea la alte sisteme auxiliare (de ex. servere bancar, servicii administrative etc.). În implementarea efectuată în cadrul acestei teze de doctorat s-a integrat un sistem de management al boxelor amplasate pe vehiculele autonome în care sunt introduse coletele. Din motive de siguranță cibernetică managementul clienților și comunicarea cu sisteme auxiliare are loc pe un server separat de serverul pe care rulează planificarea sarcinilor și managementul și monitorizarea vehiculelor autonome. Un alt aspect la îndeplinirea sarcinilor vehiculelor autonome, referitor la acceptanță, este punctualitatea cu care sunt efectuate serviciile solicitate. De aceea după parcurgerea fiecărui subtraseu, datele de deplasare sunt salvate pentru a fi utilizate ca date pentru planificări viitoare. În plus, se poate specifica ca vehiculele să ajungă mai devreme la destinația solicitată, prevenind astfel posibile întârzieri din cauza unor situații neprevăzute (de ex. căile de rulare foarte aglomerate cu mulți pietoni). Teste experimentale au evidențiat interacțiunile clienților cu sistemul dezvoltat, livrări la timp, peste 70% din sarcini fără întârziere și 27% cu întârzieri de sub 10 min. Datorită posibilității oferite clienților de sistemul de planificare interactiv de a solicita livrările la ziua și ora dorită, conform *studiului de acceptanță a beneficiarilor s-a evidențiat că aceasta crește de la 76% la 91%*.

Pentru a putea efectua servicii în medii pietonale vehiculele autonome trebuie să se poată localiza în aceste medii cu o precizie de sub 30 cm. În plus, se dorește ca resursele de calcul alocate acestui proces să fie minime, iar precizia localizării să fie în această marjă definită. Pornind de la aceste specificații *s-a dezvoltat un sistem de localizare dedicat mediilor pietonale*. Pentru acesta s-au folosit, pe lângă *odometria vehiculului* două metode de localizare care funcționează de regulă, alternativ: *GNSS și un filtru de particule adaptiv (AMCL) care are ca date senzoriale de intrare un senzor LIDAR 3D și folosește o hartă digitală 2D creată în prealabil*. Astfel, în medii unde vehiculul autonom este înconjurat de clădiri, foarte probabil

localizarea GNSS nu va returna mereu poziția în marja de eroare definită, iar metoda cu AMCL va estima în majoritatea cazurilor poziția corect, iar în medii fără obstacole statice metoda GNSS va fi cea mai precisă. Folosirea hărților digitale 2D a fost preferată datorită resurselor de calcul reduse pentru localizarea folosind senzorul LIDAR față de metodele cu hărți 3D și a unei precizii acceptabile. Senzorul LIDAR, de tip Velodyne Puck cu care s-au realizat atât cartografierea cât și localizarea a fost amplasat deasupra vehiculului la o înălțime de 2,5 m de sol și s-au folosit doar razele LIDAR care au oferit poziții la înălțimi mai mari decât 2,5 m. Astfel, s-au evitat interferențele cu pietonii și o implementare suplimentară pentru filtrarea acestora. Pe lângă poziția și orientarea estimată returnată atât de GNSS cât și de AMCL, metodele oferă și informația abaterii estimate la măsurarea acestor poziții. *Aceste informații împreună cu informațiile despre odometria vehiculului, și incertitudinile senzorilor interni folosiți (hall, pentru măsurarea vitezei; encoder, pentru măsurarea unghiului de virare; inertiali, pentru măsurarea accelerației și a vitezei unghiulare și magnetometru, pentru măsurarea orientării) sunt folosite ca date de intrare într-un filtru Kalman extins (EKF).* Deoarece, abaterea estimată de GNSS nu este mereu corectă, a fost implementată o *funcție model* care poate corecta această abatere estimată folosind informațiile de la AMCL. Astfel, dacă distanța între cele două estimări (GNSS și AMCL) depășește un *threshold* definit și abaterea AMCL este mică, abaterea GNSS este modificată artificial. Testele experimentale demonstrează funcționalitatea metodei la navigarea în medii pietonale, dar și faptul că excluderea unei metode din fuziune duce în unele cazuri la imposibilitatea unei localizări acceptabile. De asemenea, cele două metode se completează foarte bine, iar folosirea poziției GNSS la (re)inițializarea filtrului de particule duce la diminuarea calculelor.

Deși, în cadrul testelor realizate nu au apărut situații în care atât metoda GNSS cât și AMCL să nu funcționeze în același timp, totuși având în vedere cazurile restrânse în cadrul testelor, *a fost dezvoltată o metodă nouă de localizare bazată pe markeri reflectorizanți* care trebuie montați în mediul de operare. Acești markeri formează triunghiuri unice care stau la baza generării unei hărți topologice. La navigare se identifică online triunghiuri, folosind makerii detectați cu senzorul LIDAR, care sunt căutate pe harta topologică folosind lungimile laturilor. Și aici pentru reducerea volumului calculelor sunt alese triunghiurile unde toți trei markeri se află la o distanță predefinită de poziția returnată GNSS. Aceste triunghiuri împreună cu distanța măsurată până la fiecare marker sunt folosite pentru estimarea poziției folosind metoda de trilaterăției. Orientarea vehiculului este determinată folosind unghiurile dintre direcțiile vectorilor de deplasare în punctele anterior și cel actual. Metoda calculează și abaterea cu care se face estimarea, iar informațiile sunt folosite ca parametri de intrare în EKF. Testele experimentale efectuate în mediul pietonal din campusul Universității din Heilbronn unde au fost montați 23 de markeri, au condus abateri de localizare medii de aprox. 15 cm și maxime de sub 25 cm. Astfel, se poate spune că sunt acoperite toate situațiile care ar putea apărea la navigarea în medii pietonale, singurul impediment pentru situațiile în care atât GNSS cât și AMCL nu returnează rezultate fezabile, este montarea de markeri reflectorizanți pentru care, este nevoie de aprobare specială.

Pentru a putea efectua sarcini în medii pietonale, vehiculele autonome trebuie să parcurgă trasee pentru a ajunge la destinațiile de execuție a sarcinilor. În literatura de specialitate există diverse metode de planificare a traseelor (RRT, A\*, Lattice) care folosesc de regulă o harta digitală. Traseele generate cu algoritmul lattice a condus rezultatele cele mai bune folosind harta digitală 2D utilizată și în procesul de cartografiere și localizare. Deoarece, harta conține doar obstacolele identificate la înălțimi de peste 2,5 m, iar zonele interzise nu sunt marcate pe hartă, este necesară corijarea acesteia. Aceste trasee includ și întoarceri ale vehiculului de parcurs sau deplasări cu spatele care *nu sunt dorite la navigarea în mediul pietonal, mai ales, din cauza zgomotului produs de alarma de avertizare.* Acest inconvenient este eliminat în cadrul procesului de învățare prin evitarea acestor situații. Un alt aspect care



trebuie luat în considerare la generarea acestor trasee este *consistența în raport cu sarcinile planificate* ce implică respectarea traseelor cerute de realizarea sarcinii.

Planificarea sarcinilor are loc offline pe server folosind teoria grafurilor. Astfel, traseul adoptat prin căutare pentru o sarcină planificată este compus din subtrasee asociate muchiilor din graf. Obținerea datelor asociate se realizează prin înregistrare (învățare), conducând manual vehiculul în mediul de operare, iar datele înregistrate constând din stările vehiculului (poziție și unghi de orientare) au fost salvate în fișiere pe server. La inițierea unei sarcini planificate se determină traseul care este compus din subtraseele asociate muchiilor ale căror date sunt trimise ca traseu global planificat. Avantajele acestei soluții sunt, pe de-o parte, reducerea volumului de calcule și de memorie la nivelul unității de comandă și control a vehiculului autonom, dar și la nivel de server unde nu mai este nevoie de operații de căutare folosind o hartă digitală, iar pe de altă parte, asocierea directă a traseului cu sarcina de realizat.

Pentru a închide bucla localizare – planificare - comandă este nevoie de *un algoritm de planificare a traseelor și traiectoriilor locale* urmărind traseul global impus generat pe server. Pentru planificarea traiectoriilor locale s-a folosit algoritmul TEB modificat pentru vehicule cu cinematică de tip Ackermann, integrat în pachetul software *move\_base* din ROS care a fost adaptat cu o componentă de recepționare a traseului global de la serverul de planificare a sarcinilor. Interfețele de comunicație au fost conectate la modulul de localizare implementat și la cel de comandă și control. Algoritmul TEB modificat calculează traiectoria optimă în funcție de parametri legați de cinematica vehiculului (de ex. geometrie, viteză maximă), parametrii legați de obstacolele statice și mobile, parametrii legați de eroarea maximă de atingere a punctului destinație și parametrii traiectoriei însăși. Acești parametri influențează găsirea traiectoriei în funcție de o pondere specificată preliminar.

În urma proceselor de planificare s-au generat traiectorii fezabile și din punct de vedere al cinematicii vehiculului. Deoarece, acesta a rulat cu viteze mici distanța dintre traiectorie și obstacole a fost aleasă în așa fel încât acestea să poată fi ocolite în siguranță. Pentru generarea unei traiectorii locale care să nu permită deplasări cu spatele mai mari de 2 m s-a adoptat o hartă cu dimensiunile de 20 x 11 m și ponderea pentru deplasarea cu spatele a fost mică. Astfel, s-a impus ca vehiculul să urmeze traseul global și să ocolească obstacolele mobile (pietonii) fără a se îndepărta mai mult de 0,5 m de acesta. Pentru aceasta a fost implementată o funcție care să adapteze ponderile pentru urmărirea traseului global și pentru ocolirea pietonilor în funcție de distanța curentă dintre poziția estimată folosind EKF și primul punct al traseului global, care sunt actualizate în fiecare pas de calcul.

În cadrul studiilor experimentale efectuate s-a evidențiat un comportament natural la mersul înainte al vehiculului, existând puține situații care au necesitat parcurgerea traiectoriei cu spatele și vehiculul nu a atins zone interzise deoarece de fiecare dată când s-a îndepărtat de la traseul global, ponderea de urmărire a acestuia a fost mărită. De regulă, traiectoriile planificate au ocolit pietonii, iar în cazurile în care aceștia au manifestat mișcări imprevizibile acesta s-a oprit consecință a intervenției modulului de siguranță. După reevaluarea scenei din jurul vehiculului acesta reia deplasarea. În cei aprox. 300 km parcurși în mod autonom nu s-au înregistrat accidente.

Sistemul de livrare de colete interactiv are caracter general și poate fi utilizat în orice zonă pietonală folosind un vehicul autonom cu capacitate de 16 colete la aprox. 400 locuitori.

Cercetările realizate în cadrul acestei teze de doctorat au un caracter teoretico-experimental și au condus la validarea modelelor teoretice propuse și la atingerea cu succes a țintelor stabilite în cadrul obiectivelor specifice prezentate în subcap. 1.3.

Aceste cercetări acoperă cu precădere aspectele legate de navigarea vehiculelor autonome în medii pietonale, în vederea transportului de mărfuri ușoare și mai puțin aspecte de efectuare de sarcini la beneficiar care în acest caz este efectuată de acesta (preluarea coletului din boxă). Există cazuri în care vehiculele autonome trebuie să execute sarcini utilitare (îngrijire vegetație etc.) la beneficiar. În acest scop se impune dezvoltarea acestor vehicule autonome și

cu agregate suplimentare pentru execuția acestor sarcini. În Anexa 6 se prezintă spre exemplificare procesul de concepție și implementare a unui vehicul autonom cu un agregat de cosit vegetație dezvoltat în cadrul proiectului: *Entwicklung eines neuartigen Aufsitzmähers mit elektromotorisch unterstütztem Mähwerk und elektrischem Fahrantrieb* (Dezvoltarea unei motocostoare inovative cu sistem de cosit hibrid și propulsie electrică) din programul central de inovare pentru companiile mijlocii (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) în cooperare cu AS-MOTOR și finanțat Ministerul de Economie și Energie, 2014 – 2015.

## 8.2 CONTRIBUȚII PROPRII

Prezenta teză de doctorat are un profund caracter inovativ, autorul aducând o serie de contribuții originale privind conceperea, dezvoltarea și testarea unui vehicul autonom dedicat executării de servicii de livrare a coletelor la domiciliu în medii pietonale și a unui sistem de planificare interactiv prin care se iau în considerare toate solicitările clienților precum și monitorizarea execuției sarcinilor cerute, de clienți. Pornind de la metodologia de cercetare propusă în capitolul unu, urmărind acoperirea obiectivelor propuse, în urma cercetărilor efectuate, precum și a rezultatelor obținute se sintetizează următoarele contribuții proprii:

1. Analiza stadiului actual al cercetărilor și realizărilor din domeniul dezvoltării vehiculelor autonome și roboților mobili, în special, aspecte necesare pentru dezvoltarea de vehicule autonome în medii pietonale, cu precădere, din punct de vedere al structurilor de senzori folosiți, a algoritmilor existenți pentru procesele de localizare și navigare și a sistemelor de siguranță în vederea omologării pentru operarea în medii reale. În plus, sunt analizate posibilitățile existente de planificare a sarcinilor, cu precădere, folosite în domeniul logistice.
2. Concepția, dezvoltarea și implementarea unui sistem ierarhic pentru planificarea de sarcini în mod interactiv, care se ocupă și cu managementul și supravegherea vehiculelor autonome.
3. Concepția și dezvoltarea unui algoritm dedicat planificării interactive de sarcini, care răspunde prompt la solicitările clienților, după principiul primul venit primul servit.
4. Propunerea și dezvoltarea unui concept de proiectare și dezvoltare de vehicule autonome prin transformare și implementarea acestui concept prin transformarea unui vehicul electric în vederea navigării în medii pietonale.
5. Propunerea și dezvoltarea conceptului de siguranță fermă, aliniat cu norma ISO26262, și implementarea acestuia pe vehiculele autonome dezvoltate, omologate de asociația acreditată TÜV (Technischer Überwachungsverein) în vederea operării în medii pietonale.
6. Concepția și dezvoltarea în fază de prototip a două sisteme de tip bumper și integrarea acestora în sistemul de siguranță fermă al vehiculului autonom.
7. Analiza, testarea și evaluarea a trei metode de cartografiere (hector, gmapping și hdl) în vederea utilizării lor pentru generarea de hărți digitale pentru medii pietonale.
8. Concepția și dezvoltarea unei noi metode de localizare bazat pe markeri reflectorizanți detectați cu un senzor LIDAR care estimează poziția și orientarea vehiculului, precum și abaterea cu care are loc această estimare.
9. Concepția și dezvoltarea unui algoritm de localizare în medii pietonale bazat pe un filtru Kalman extins și fuziunea datelor obținute prin odometrie, GNSS, AMCL și prin metoda cu markeri reflectorizanți.
10. Analiza, testarea și evaluarea algoritmilor Dijkstra, A\* și sbpl\_lattice pentru planificarea traseelor globale pe hărți digitale pentru medii pietonale.
11. Modelarea traseelor globale prin învățare (conducere manuală și înregistrare) bazat pe subtrasee și asocierea acestora cu muchiile grafului configurat inițial, folosit și la planificarea interactivă a sarcinilor.

12. Adaptarea algoritmului Time Elastic Band (TEB) pentru planificarea de traiectorii în medii pietonale.
13. Testarea și validarea sistemului de planificare interactivă pe o perioadă de 6 săptămâni cu beneficiari reali în care au fost livrate în mod autonom 572 colete.
14. Testarea și validarea filtrului EKF dezvoltat pentru localizarea vehiculului autonom într-un mediu pietonal real folosind date odometrice, de la GNSS, de la AMCL și/sau de la combinații ale acestora.
15. Testarea și validarea metodei proprii de localizare cu markeri reflectorizanți cu date de la LIDAR; pentru aceasta s-a configurat un mediu pietonal experimental în care s-au montat markerii reflectorizanți.
16. Testarea și validarea algoritmilor de planificare a traseelor și traiectoriilor, concepuți și programați, pentru navigarea în zone pietonale reale; pentru aceasta s-a ales un traseu care acoperă majoritatea variantelor posibile în medii pietonale.
17. Testarea și validarea sistemului general de livrare colete (cu sistemul de planificare interactivă a sarcinilor integrat) pentru cazuri reale într-o perioadă 6 luni când vehiculele autonome au parcurs aproximativ 300 km.
18. Concepția dezvoltarea și integrarea pe un vehicul autonom a unui agregat de cosit în medii pietonale.

## 8.3 VALORIFICAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

### 8.3.1 LUCRĂRI PUBLICATE

In perioada de elaborare a tezei de doctorat au fost publicate 11 lucrări (7 cu IEEE/ISI proceedings din care 5 ca prim autor, 4 BDI din care 1 ca prim autor):

1. **Kocsis, M.**, Baumbach, T., Olbrich, H., Uhler, R., Zöllner, R., *Hybridization of agriculture vehicles using a ride-on lawn mower*, 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) IEEE, pp. 170 - 175, 2015, ISBN: 978-1-4799-7043-8 (IEEE), DOI: 10.1109/RoMoCo.2015.7219731
2. Buyer, J., Vollert, M., Haas, A., **Kocsis, M.**, Zöllner, R., *An adaptive multi-layer particle filter for tracking of traffic participants in a roundabout*, 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 2625-2631, 2016, ISBN:978-1-5090-1890-1 (IEEE), DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795978, Impact Score: 5,45.
3. **Kocsis, M.**, Schultz, A., Zöllner, R., Mogan, G., *A Method for Transforming Electric Vehicles to Become Autonomous Vehicles*, CONAT - International Congress of Automotive and Transport Engineering, pp. 752-761, 2016, ISBN: 978-3-319-45447-4 (Springer), DOI: 10.1007/978-3-319-45447-4\_83.
4. **Kocsis, M.**, Buyer, J., Zollner, R., *A modular and scalable simulation framework for agricultural vehicles*, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 168-173, 2016, ISBN:978-1-5090-3330-0, DOI: 10.1109/SII.2016.7843993, Impact Score: 1,16.
5. **Kocsis, M.**, Buyer, J., Sußmann, N., Zöllner, R., Mogan, G., *Autonomous Grocery Delivery Service in Urban Areas*, 15th IEEE SmartCity, pp. 186-191, 2017, ISBN:978-1-5386-2589-7, DOI: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2017.24, Impact Score: 1,65.
6. Buyer, J., Vollert, M., **Kocsis, M.**, Sußmann, N., Zoellner, R., *Image-Based Multi-Target Tracking using a Multi-Layer Particle Filter and Extended EM Clustering*, IEEE

- International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 620-625, 2017, ISBN:978-1-5090-6065-8, DOI: 10.1109/MFI.2017.8170391.
7. **Kocsis, M.**, Sußmann, N., Buyer, J., Zollner, R., *Safety Concept for Autonomous Vehicles that Operate in Pedestrian Areas*, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 841-846, 2017, ISBN:978-1-5386-2589-7, DOI: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2017.24, Impact Score: 1,16.
  8. Buyer, J., Vollert, M., **Kocsis, M.**, Sußmann, N., Zöllner, R., *Multi-object Tracking Based on a Multi-layer Particle Filter for Unclustered Spatially Extended Measurements*, Multisensor Fusion and Integration in the Wake of Big Data, Deep Learning and Cyber Physical System, pp. 219-238, 2018, (Springer), DOI: 10.1007/978-3-319-90509-9\_13.
  9. Sußmann, N., **Kocsis, M.**, Zöllner, R., *Neue Technologiekonzepte zur urbanen autonomen Logistik*, AALE Autonome und intelligente Systeme in der Automatisierungstechnik, pp. 17-19, 2019, ISBN 978-3-8007-4860-0, E-Book: ISBN 978-3-8007-4861-7.
  10. **Kocsis, M.**, Winckler, J., Sußmann, N., Zöllner, R., *Interactive Mission Planning System of an Autonomous Vehicle Fleet that Executes Services*, 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1-6, 2020, ISBN:978-1-7281-4150-3 (IEEE), DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294595, Impact Score: 5,45.
  11. Zöllner, R., Bernecker, T., **Kocsis, M.**, *Autonome Quartierszustellung im Spannungsfeld zwischen Fahrzeugtechnik und Logistik*, in Heike Proff (ed.) – MAKING CONNECTED MOBILITY WORK, pp. 603-620, 2021, (Springer), DOI: 10.1007/978-3-658-32266-3\_37.

### 8.3.2 PARTICIPĂRI LA CONFERINȚE ȘI EXPOZIȚII

În perioada elaborării tezei de doctorat am prezentat lucrări științifice în cadrul următoarelor conferințe:

1. The 10<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), 2015, Poznan, Polonia.
2. CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering, Brasov, Romania.
3. System Integration (SII) 2016 IEEE/SICE International Symposium, Sapporo, Japonia.
4. System Integration (SII) 2017 IEEE/SICE International Symposium, Taipei, Taiwan.
5. 15<sup>th</sup> IEEE SmartCity 2017, Bangkok, Tailanda.
6. Autonome und intelligente Systeme in der Automatisierungstechnik 16, Fachkonferenz, 28. Februar – 1. März 2019, Heilbronn, Germania.
7. The 23<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 20 – 23 Septembrie, 2020, Rhodos, Grecia.

În plus, am participat pentru prezentarea vehiculelor autonome dezvoltate la următoarele expoziții:

1. Nacht der Technik, Heilbronn, 2017 și 2019.
2. Nachhaltigkeitstage, Heilbronn, 2017 și 2019.
3. Testfeld Autonomes Fahren, Heilbron, 2017 și 2018.
4. Reallabor Symposium, Karlsruhe, 2018.
5. Vision Smart City, Stuttgart, 2019.

### 8.3.3 PARTICIPĂRI LA CONTRACTE DE CERCETARE - DEZVOLTARE

În cadrul studiilor doctorale dezvoltate în Universitatea din Heilbronn și Universitatea Trasilvania din Brașov am participat ca membru în cadrul contractelor de cercetare:

1. *Entwicklung eines neuartigen Aufsitzmähers mit elektromotorisch un-terstütztem Mähwerk und elektrischem Fahrantrieb* (Dezvoltarea unei motocosoare inovative cu sistem de cosit hibrid și propulsie electrică) din programul central de inovare pentru companiile mijlocii (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) în cooperare cu AS-MOTOR și finanțat Ministerul de Economie și Energie, 2014 – 2015.
2. „BUGA:log“ – *Reallabor*, (Laborator real în cadrul târgului de horticultură pentru experimente cu sisteme autonome), realizat de Universitatea Heilbronn din Germania în colaborare cu Primăria orașului Heilbronn și finanțat de Ministerul de Știință, Cercetare și Artă, Baden-Württemberg, 2015 – 2020.
3. *Testfeld Autonomes Fahren* (Zonă de testare pentru conducere autonă) condus de centrul de cercetare informatică FZI (Forschungszentrum Informatik) Karlsruhe și finanțat de Ministerul Transporturilor, Baden-Württemberg, 2018 – 2021.
4. *Automatisierte Bürgershuttle* (Autobuze expres autonome) în cooperare cu Emm! Solutions GmbH, orașul Künzelsau, Stegmeier Nutzfahrzeuge GmbH, hfcon, castelul Stetten finanțat de Ministerul de Economie, Baden Württemberg, 2020 – prezent.

### 8.4 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Cercetările realizate împreună cu rezultatele teoretice, experimentale și practice obținute, integrate într-un sistem de planificare interactiv pentru efectuarea de servicii cu vehicule autonome în medii pietonale, precum și monitorizarea îndeplinirii acestora acoperă o mare parte din studiile impuse în acest domeniu și oferă o bază solidă pentru cercetări viitoare. Astfel, în viitor se pot dezvolta cercetări privind:

- Studii, pentru integrarea de noi tipuri de sarcini, unde timpul de planificare depinde și de modul de execuție a acestora. Acestea sunt, de regulă, sarcini utilitare (de ex. stopire/îngrijire vegetație, salubritate, curățenie stradală etc.) pentru care este nevoie de un agregat care trebuie integrat în vehiculul autonom.
- Concepția și dezvoltarea, conform procesului de transformare, de vehicule autonome cu agregate pentru îndeplinirea în siguranță de servicii în medii pietonale și integrarea acestora în sistem.
- Studii privind analiza, dezvoltarea și implementarea unui sistem de decizie inteligent la nivel superior procesului de navigare pentru situațiile în care pietonii nu eliberează traseul, iar vehiculul trebuie să replanifice traseul/traectoria prin încălcarea regulilor de navigație impuse.
- Studii privind identificarea pietonilor în vederea determinării intenției de deplasare a acestora [Buyer, 2017], [Buyer, 2018]
- Studii de colaborare a vehiculelor autonome organizate în flote pentru servicii în medii pietonale.

# BIBLIOGRAFIE

1. [Anandan, 2015] Anandan, M., "Robots and Healthcare Saving Lives together", *Robotic Industries Association*, 2015.
2. [Alami, 1998] Alami, R., Fleury, S., Herrb, M., Ingrand, F., Robert, F., "Multi-robot cooperation in the MARTHA project", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 36–47, 1998.
3. [Ater, 2017] Ater, T., "Building progressive web apps", ISBN:9781491961650, 2017.
4. [Balachandar, 2017] Balachandar, B. M., "RESTful Java web services", ISBN:1788294963, 2017.
5. [Bauer, 2009] Bauer, A., Klasing, K., Lidoris, G., Mühlbauer, Q., Rohrmüller, F., Sosnowski, S., Xu, T., Kühnlenz, K., Wollherr, D., Buss, M., "The Autonomous City Explorer", *International Journal of Social Robotics*, pp. 127–140, 2009.
6. [Bish, 2013] Bish, T., "Instant Apache ActiveMQ Messaging", ISBN: 978-1782169413, 2013
7. [Buyer, 2016] Buyer, J., Vollert, M., Haas, A., **Kocsis**, M., Zollner, R. D., "An adaptive multi-layer particle filter for tracking of traffic participants in a roundabout", *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2625–2631, 2016.
8. [Buyer, 2017] Buyer, J., Vollert, M., **Kocsis**, M., Susmann, N., Zollner, R., "Image-based multi-target tracking using a multi-layer particle filter and extended EM clustering", *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration*, pp. 620–625, 2017.
9. [Buyer, 2018] Buyer, J., Vollert, M., **Kocsis**, M., Sußmann, N., Zöllner, R., "Multi-object Tracking Based on a Multi-layer Particle Filter for Unclustered Spatially Extended Measurements", *Lee, Ko et al. (Hg.) 2018 – Multisensor Fusion and Integration*, pp. 219–238, 2018.
10. [Castanedo, 2013] Castanedo, F., "A review of data fusion techniques", *TheScientificWorldJournal*, Vol. 13, 2013.
11. [Clement, 2017] Clement, S. J., McKee, D., W., Xu, J., "Service-Oriented Reference Architecture for Smart Cities", *IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering*, pp. 81–85, 2017.
12. [Curiel-Ramirez, 2019] Curiel-Ramirez, L. A., Ramirez-Mendoza, R. A., Izquierdo-Reyes, J., Bustamante-Bello, M. R., Navarro-Tuch, S. A., "Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1647–1658, 2019.
13. [De Maesschalck, 2000] De Maesschalck, R., Jouan-Rimbaud, D., Massart, D. L., "The Mahalanobis distance", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, pp. 1–18, 2000.
14. [Dolgov, 2010] Dolgov, D., Thrun, S., Montemerlo, M., Diebel, J., "Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 485–501, 2010.
15. [Duchon, 2014] Duchon, F., Hanzel, J., Babinec, A., Rodina, J., Paszto, P., Gajdosik, D., "Improved GNSS Localization with the Use of DOP Parameter", *Applied Mechanics and Materials*, pp. 450–466, 2014.
16. [Hugh, 2016] Hugh F. D-W., "Sensor Models and Multisensor Integration", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 97–113, 2016.
17. [Eliazar, 2003] Eliazar, A., Parr, R., "DP-SLAM: Fast, Robust Simultaneous Localization and Mapping Without Predetermined Landmarks", *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1135–1142, 2003.
18. [Eustice, 2006] Eustice, R. M., Singh, H., Leonard, J. J., "Exactly Sparse Delayed-State Filters for View-Based SLAM", *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1100–1114, 2006.
19. [Gee, 2016] Gee, T., James, J., Mark, W., Delmas, Patrice, Gimel'farb, Georgy, "Lidar guided stereo simultaneous localization and mapping (SLAM) for UAV outdoor 3-D scene reconstruction", *2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, pp. 1–6, 2016.
20. [Gîrbacia, 2019] Gîrbacia, T., "Contribuții privind modelarea, planificarea și simularea traseelor și traiectoriilor autovehiculelor autonome de transport intern în medii industriale.", *Teză de doctorat la Universitatea Transilvania din Brașov*, 2019.
21. [Goyal, 2014] Goyal, A., Mogha, P., Luthra, R., Sangwan, N., "Path Finding: A\* or Dijkstra", *International Journal in IT and Engineering IJITE*, Vol. 02 Issue-01, ISSN: 231-1776, 2014.



- 
22. [Grisetti, 2007] Grisetti, G., Stachniss, C., Burgard, W., "Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters", *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 34–46, 2007.
23. [Gutin, 2007] Gutin, G., Punnen, A. P., "The Traveling Salesman Problem and Its Variations", ISBN: 978-0-306-48213-7, 2007.
24. [Hazewinkel, 2002] Hazewinkel, M. "Encyclopaedia of mathematics", vol. 3, ISBN: 978-0-306-48373-8, 2002.
25. [Hähnel, 2003] Hähnel, D., Burgard, W., Thrun, S., "Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot", *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 15–27, 2003.
26. [Eskandarian, 2012] Eskandarian, A. "Handbook of Intelligent Vehicles", ISBN:978-0857290847, 2012.
27. [Harris, 2015] Harris, M., "Uber Could Be First to Test Completely Driverless Cars in Public", *IEEE Spectrum*, 2015.
28. [Hoang, 2013] Hoang, V-D., Le, M-H., Hernandez, D. C., Jo, K-H., "Localization estimation based on Extended Kalman filter using multiple sensors", *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5498–5503, 2013.
29. [Horwick, 2010] Horwick, M., Siedersberger, K. H., "Strategy and architecture of a safety concept for fully automatic and autonomous driving assistance systems", *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 955–960, 2010.
30. [Jia, 2010] Jia, Q., Wang, X., "An improved potential field method for path planning", *2010 Chinese Control and Decision Conference*, pp. 2265–2270, 2010.
31. [Kavraki, 1996] Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J.-C., Overmars, M. H., "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 566–580, 1996.
32. [Kiel, 2016] Kiel, C., "Precision Farming: Technologiespring in der Landwirtschaft", *Digitaler Mittelstand*, 2016.
33. [Kim, 2017] Kim, C., Jo, K., Bradai, B., Sunwoo, M., "Multiple vehicles based new landmark feature mapping for highly autonomous driving map", *14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, pp. 1–6, 2017.
34. [Kisacanin, 2017] Kisacanin, B., "Deep Learning for Autonomous Vehicles", *IEEE 47th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, pp. 142, 2017.
35. [Kohlbrecher, 2011] Kohlbrecher, S., Stryk, O., Meyer, J., Klingauf, U., "A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation", *9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2011*, pp. 155–160, 2011.
36. [Koide, 2019] Koide, K., Miura, J., Menegatti, E., "A portable three-dimensional LIDAR-based system for long-term and wide-area people behavior measurement", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 16, Issue 2, 2019.
37. [Kocsis, 2015] **Kocsis, M.**, Baumbach, T., Olbrich, H., Uhler, R., Zollner, R., "Hybridization of agriculture vehicles using a ride-on lawn mower", *10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) IEEE*, pp. 170–175, 2015.
38. [Kocsis, 2016] **Kocsis, M.**, Buyer, J., Zollner, R., "A modular and scalable simulation framework for agricultural vehicles", *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 168–173, 2016.
39. [Kocsis, 2016a] **Kocsis, M.** Schultz, A., Zöllner, R. Mogan, G. L., "A Method for Transforming Electric Vehicles to Become Autonomous Vehicles", *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering*, pp. 752–761, 2016.
40. [Kocsis, 2017] **Kocsis, M.** Susmann, N., Buyer, J., Zollner, R., "Safety concept for autonomous vehicles that operate in pedestrian areas", *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 841–846, 2017.
41. [Kocsis, 2017a] **Kocsis, M.**, Buyer, J., Sussmann, N., Zollner, R., Mogan, G. L., "Autonomous Grocery Delivery Service in Urban Areas", *IEEE 19th International Conference on High Performance Computing and Communications, IEEE*, pp. 186–191, 2017.
42. [Kocsis, 2020] **Kocsis, M.**, Winckler, J., Sussmann, N., Zollner, R., "Interactive Mission Planning System of an Autonomous Vehicle Fleet that Executes Services", *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020.
43. [Kröger, 2017] Kröger, T., "Sensor-based Control, Real-time Motion Planning, and Reinforcement Learning for Industrial Robots", *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 3-3, 2017.

44. [Kümmerle, 2014] Kümmerle, R., Ruhnke, M., Steder, B., Stachniss, C., Burgard, W., "Autonomous Robot Navigation in Highly Populated Pedestrian Zones", *Journal of Field Robotics*, pp. 565-589, 2012.
45. [Landsiedel, 2017] Landsiedel, C., Wollherr, D., "Global localization of 3D point clouds in building outline maps of urban outdoor environments", *International journal of intelligent robotics and applications*, pp. 429–441, 2017.
46. [Latecki, 2005] Latecki, J., Lakämper, R., Wolter, D., "Optimal partial shape similarity", *Image and Vision*, 2005.
47. [LaValle, 2006] LaValle, S. M., "Planning Algorithms", ISBN:9780511546877, 2006.
48. [Liu, 2019] Liu, X., Ballal, T., Al-Naffouri, T., "GNSS-based Localization for Autonomous Vehicles: Prospects and Challenges", *EUSIPCO*, 2019.
49. [López-Ibáñez, 2013] López-Ibáñez, M., Blum, C., Ohlmann, W., Thomas, W., "The Travelling Salesman Problem with Time Windows: Adapting Algorithms from Travel-time to Makespan Optimization", *Appl. Soft. Comput.*, 2013.
50. [López-Ibáñez, 2010] López-Ibáñez, M., Blum, Ch., "Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows", *Computers & Operations Research*, pp. 1570–1583, 2010.
51. [March, 1995] March, S. T., Smith, Gerald F., "Design and natural science research on information technology", *Decision Support Systems*, pp. 251–266, 1995.
52. [Marchthaler, 2017] Marchthaler, R., Dingler, S., "Kalman-Filter", ISBN:978-3-658-16727-1, 2017.
53. [Marsden, 2018] Marsden, N., Bernecker, T., Zollner, R., Submann, N., Kapser, S., "BUGA:Log – A Real-World Laboratory Approach to Designing an Automated Transport System for Goods in Urban Areas", *IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pp. 1–9, 2018.
54. [Martin, 2002] Martin, C., Thrun, S., "Real-time acquisition of compact volumetric 3D maps with mobile robots", *Proceedings International Conference on Robotics and Automation*, pp. 311–316, 2002.
55. [Mckee, 2017] Mckee, D., Clement, S., Xu, J., "Massive scale automation in cyber-physical systems: Vision & challenges", *13th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS). IEEE*, pp. 5-11, 2017.
56. [Montemerlo, 2002] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B., "FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem", *In Eighteenth national conference on Artificial*, pp. 593–598, 2002.
57. [Murtra, 2010] Murtra, A. C., Trulls, E., Sandoval, O., Perez-Ibarz, J., Vasquez, D., Mirats-Tur, J. M., Ferrer, M., Sanfeliu, A., "Autonomous navigation for urban service mobile robots", *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4141–4146, 2010.
58. [Nüchter, 2004] Nüchter, A., Surmann, H., Hertzberg, J., "Automatic Classification of Objects in 3D Laser Range Scans", *8th Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, pp. 963–970, 2004.
59. [Oktay, 2013] Oktay, A., Panagiotis, T., "Use of relaxation methods in sampling-based algorithms for optimal motion planning", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2421–2428, 2013.
60. [Olivares-Mendez, 2013] Olivares-Mendez, M. A., Mondragón, I. F., Campoy, P., "Autonomous Landing of an Unmanned Aerial Vehicle using Image-Based Fuzzy Control", *IFAC Proceedings Volumes*, pp. 79–86, 2013.
61. [Paden, 2016] Paden, B., Cap, M., Yong, S. Z., Yershov, D., Frazzoli, E., "A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles", *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, pp. 33–55, 2016.
62. [Pendleton, 2016] Pendleton, S. D., Andersen, H., Shen, X., Eng, Y. H., Zhang, C., Kong, H., X., Leong, W., K., Ang, M. H., Rus, D., "Multi-class autonomous vehicles for mobility-on-demand service", *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 204–211, 2016.
63. [Pendleton, 2017] Pendleton, S. D., Andersen, H., Du, X., Shen, X., Meghjani, M., Eng, Y. H., Rus, D., Ang, M. H., "Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles", *Machines*, 2017.
64. [Quigley, 2009] Quigley, M., Gerkey, B., Conley, K., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Berger, E., Wheeler, R., Ng, A., "ROS: an open source Robot Operating System", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 3. pp. 5, 2009.
65. [Reschka, 2016] Reschka, A., "Safety Concept for Autonomous Vehicles", *Autonomous Driving - Technical, Legal and Social Aspects*, pp. 473–496, 2016.
66. [Rohde, 2016] Rohde, J., Jatzkowski, I., Mielenz, H. Zöllner, J., "Vehicle Pose Estimation in Cluttered Urban Environments Using Multilayer Adaptive Monte Carlo

- Localization", *Conference: Conference: 19th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, pp. 1774-1779, 2016.
67. [Rohmer, 2013] Rohmer, E., Singh, Surya P. N., Freese, M., "V-REP", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1321–1326, 2013.
68. [Rösmann, 2015] Rösmann, Ch., Hoffmann, F., Bertram, T., "Planning of multiple robot trajectories in distinctive topologies", *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pp. 1–6, 2015.
69. [Rösmann, 2017] Rösmann, C., Hoffmann, F., Bertram, T., "Kinodynamic Trajectory Optimization and Control for Car-Like Robost", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5681-5686, 2017.
70. [Sakai, 2017] Sakai, T., Koide, K., Miura, J., Oishi, S., "Large-scale 3D outdoor mapping and on-line localization using 3D-2D matching", *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 829–834, 2017.
71. [Sanfeliu, 2010] Sanfeliu, A., Andrade-Cetto, J., Barbosa, M., Bowden, R., Capitán, J., Corominas, A., Gilbert, A., Illingworth, J., Merino, L., Mirats, J. M., Moreno, P., Ollero, A., Sequeira, J., Spaan, M. T. J., "Decentralized sensor fusion for Ubiquitous Networking Robotics in Urban Areas", *Sensors (Basel, Switzerland)*, pp. 2274–2314, 2010.
72. [Siegwart, 2011] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., Scaramuzza, D., "Introduction to autonomous mobile robots", ISBN: 978-0262015356 2011.
73. [Surhone, 2013] Surhone, L. M., Timpledon, M. T., Marseken, S. F., "Trilateration", ISBN: 9786130314293, 2013.
74. [Sußmann, 2019] Sußmann, N. **Kocsis, M.**, Zöllner R., "Neue Technologiekonzepte zur urbanen autonomen Logistik", *AALE 2019 Autonome und intelligente Systeme in der Automatisierungstechnik*, ISBN: 978-3-8007-4861-7, 2019.
75. [Tanzmeister, 2014] Tanzmeister, G., Thomas, J., Wollherr, D., Buss, M., "Grid-based mapping and tracking in dynamic environments using a uniform evidential environment representation", *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6090–6095, 2014.
76. [Thrun, 2000] Thrun, S., Burgard, W., Fox, D., "A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping", *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, pp. 321–328, 2000.
77. [Thrun, 2016] Thrun, S., "A Probabilistic On-Line Mapping Algorithm for Teams of Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 335–363, 2016.
78. [Trahanias, 2005] Trahanias, P., Burgard, W., Argyros, A., Hahnel, D., Baltzakis, H., Pfaff, P., Stachniss, C., "Tourbot and webfair web-operated mobile robots for tele-presence in populated exhibitions", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 77–89, 2005.
79. [Unger, 2020] Unger, F., "Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) ", ISBN: 9783946374893, 2020.
80. [Vaishnavi, 2007] Vaishnavi, V., Küchler, W., "Design Science Research Methods and Patterns", ISBN:978-1-4200-5932-8, 2007.
81. [Wawerla, 2010] Wawerla, J., Vaughan, R. T., "A fast and frugal method for team-task allocation in a multi-robot transportation system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1432–1437, 2010.
82. [Werling, 2012] Werling, M., Kammel, S., Ziegler, J., Gröll, L., "Optimal trajectories for time-critical street scenarios using discretized terminal manifolds", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 346–359, 2012.
83. [Wu, 2016] Wu, Q., Sun, K., Zhang, W., Huang, Ch., Wu, X., "Visual and LiDAR-based for the mobile 3D mapping", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1522–1527, 2016.
84. [Zhang, 2015] Zhang, G., Lee, J. H., Lim, J., Suh, Il H., "Building a 3-D Line-Based Map Using Stereo SLAM", *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1364–1377, 2015.
85. [Zöllner, 2021] Zöllner, R., Bernecker, T., **Kocsis, M.**, "Autonome Quartierszustellung im Spannungsfeld zwischen Fahrzeugtechnik und Logistik", *Proff (Hg.) 2021 – MAKING CONNECTED MOBILITY WORK*, pp. 603–620, 2021.
86. [\*\*\*04] "A DPDHL perspective on implications and use cases for the logistics industry", *Robotics in Logistics*, 2016.
87. [\*\*\*05] "ROAD VEHICLES FUNCTIONAL SAFETY", *International Organization of Standardization*, 2011.
88. [www06] <http://www.fzi.de/forschung/projekt-details/testfeld/>, accesat la 10.06. 2021.

89. [www07] <https://www.dekra-roadsafety.com/en/pedestrian-crossings-and-traffic-calmed-zones/>, accesat la 10.06.2021.
90. [www13] <http://news.mit.edu/2015/autonomous-self-driving-golf-carts-0901>, accesat la 10.06.2021.
91. [www27] <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2855570/Amazons-new-robot-army-ready-ship.html>, accesat la 10.06.2021.
92. [www28] <https://www.starship.xyz/>, accesat la 10.06.2021.
93. [www29] <https://www.marble.io/>, accesat la 10.06.2021.
94. [www30] <http://www.neolix.ai/>, accesat la 10.06.2021.
95. [www31] <https://www.swiftnav.com/piksi-multi>, accesat la 10.06.2021.
96. [www35] <https://www.ncsl.org/research/transportation/autonomous-vehicles-self-driving-vehicles-enacted-legislation.aspx>, accesat la 10.06.2021.
97. [www36] <http://connectedautomateddriving.eu/projects/>, accesat la 10.06.2021.
98. [www37] <http://www.ko-haf.de/startseite/>, accesat la 10.06.2021.
99. [www38] <https://www.renzgroup.de/>, accesat la 10.06.2021.
100. [www39] <https://www.adac.de/verkehr/standpunkte-studien/positionen/laermschutz/>, accesat la 10.06.2021.
101. [www40] <https://www.manualslib.com/manual/762508/E-Z-Go-Rxv-Golf-Car.html>, accesat la 10.06.2021.
102. [www43] [https://wiki.ros.org/swiftnav\\_piksi](https://wiki.ros.org/swiftnav_piksi), accesat la 10.06.2021.
103. [www44] <http://wiki.ros.org/ueye>, accesat la 10.06.2021.
104. [www45] <http://wiki.ros.org/tf>, accesat la 10.06.2021.
105. [www46] [http://wiki.ros.org/hector\\_mapping](http://wiki.ros.org/hector_mapping), accesat la 10.06.2021.
106. [www47] <http://wiki.ros.org/gmapping>, accesat la 10.06.2021.
107. [www48] [https://github.com/koide3/hdl\\_graph\\_slam](https://github.com/koide3/hdl_graph_slam), accesat la 10.06.2021.
108. [www49] <http://wiki.ros.org/amcl>, accesat la 10.06.2021.
109. [www50] [http://wiki.ros.org/rrt\\_exploration](http://wiki.ros.org/rrt_exploration), accesat la 10.06.2021.
110. [www51] [http://wiki.ros.org/global\\_planner](http://wiki.ros.org/global_planner), accesat la 10.06.2021.
111. [www52] [http://wiki.ros.org/sbpl\\_lattice\\_planner](http://wiki.ros.org/sbpl_lattice_planner), accesat la 10.06.2021.
112. [www53] [http://wiki.ros.org/move\\_base](http://wiki.ros.org/move_base), accesat la 10.06.2021.
113. [www54] [http://wiki.ros.org/teb\\_local\\_planner](http://wiki.ros.org/teb_local_planner), accesat la 10.06.2021.
114. [www55] [https://github.com/rst-tu-dortmund/teb\\_local\\_planner](https://github.com/rst-tu-dortmund/teb_local_planner), accesat la 10.06.2021.
115. [www56] [https://wiki.ros.org/costmap\\_converter](https://wiki.ros.org/costmap_converter), accesat la 10.06.2021.
116. [www57] <https://www.fsw-luftbilder.de/projekte/buga-heilbronn>, accesat la 10.06.2021.
117. [www59] ROS. <https://wiki.ros.org/rviz>, accesat la 10.06.2021.

## REZUMAT

Prezenta teză de doctorat *Contribuții privind concepția, dezvoltarea și implementarea autovehiculelor autonome pentru transport mărfuri ușoare în medii pietonale* are ca obiectiv realizarea unui sistem de planificare și executare în mod autonom de sarcini în medii pietonale. Pentru atingerea acestui obiectiv, cercetările realizate urmăresc studiul, conceperea, dezvoltarea, implementarea și testarea unui vehicul autonom pentru execuția sarcinilor cât și a unui sistem nou de planificare interactivă a cerințelor clienților și de monitorizare a execuției acestora prin intermediul de aplicații client. Sistemul de planificare interactivă răspunde imediat la solicitări, oferă soluții alternative dacă acestea nu pot fi efectuate și comunică cu vehiculele autonome pe care le monitorizează. Acest sistem este supervizat/administrat din centrul logistic, de un operator uman, care poate interveni în procesele de planificare, monitorizare și execuție a sarcinilor. Implementarea sistemului este realizată pentru sarcini de livrare colete la domiciliu („pe ultima milă”) într-un mediu pietonal. Pentru dezvoltarea vehiculului autonom pentru realizarea acestei sarcini s-a parcurs un algoritm de transformare a unui vehicul clasic (cart de golf de tip EZGO RXV) în vehicul autonom care să navigheze în medii pietonale. Vehiculul a fost echipat cu senzori interni pentru determinarea propriei stări și cu senzori externi pentru perceperea mediului de navigare. În cadrul lucrării este propus și implementat conceptul de siguranță fermă, corelat cu normele ISO26262. După procesele de transformare și testare funcțională vehiculul autonom a fost omologat pentru navigarea în medii pietonale. Pentru procesul de localizare în medii pietonale s-a dezvoltat un filtru Kalman extins (EKF) care fuzionează date de la senzori interni cu date de poziție și orientare obținute cu GNSS, filtrul de particule AMCL și cu o metodă de localizare proprie bazată pe markeri reflectorizanți. Astfel, pot fi acoperite majoritatea situațiilor care pot apărea la navigarea în zone pietonale. Planificarea traseelor globale are la bază un proces de învățare offline și de asociere a subtraseelor înregistrate cu graful folosit și la planificarea sarcinilor. Generarea traseului global are loc pe serverul de planificare a sarcinilor, reducând astfel resursele de calcul ale unității centrale a vehiculului. Planificarea traiectoriilor are la bază algoritmul Time Elastic Band (TEB), care a fost adaptat și parametrizat pentru vehicule cu cinematică de tip Ackermann și pentru medii pietonale. În scopul validării funcționării sistemului și al vehiculelor autonome dezvoltate, au fost propuse și realizate studii experimentale în medii reale, care s-au derulat într-o perioadă de aprox. 6 luni. În urma analizei rezultatelor experimentale, s-au validat modelele și algoritmii propuși evidențiindu-se fiabilitatea întregului sistem, vehiculele parcurgând în total aprox. 300 km și livrând un număr de 572 colete. Acceptanța beneficiarilor pentru livrarea coletelor la domiciliu cu vehicule autonome a crescut datorită planificării interactive cu 15%.

## ABSTRACT

The present research *Contributions on design, development and implementation of autonomous vehicles for goods transportation in pedestrian areas* aims to achieve a system of planning and execution of services autonomously in pedestrian environments. To achieve this goal, the research aims to design, develop, and test an autonomous vehicle for the execution of services and a novel system of interactive mission planning of customer requirements and monitoring their execution through client applications. The interactive planning system responds immediately to requests, offers alternative solutions if the requests cannot be fulfilled and communicates with the autonomous vehicles it monitors. This system is supervised/managed from a logistics center by a human operator who can intervene in the planning process and execution of the tasks. The implementation of the system is performed for parcel delivery tasks (on the last mile) in a pedestrian environment. In order to accomplishing the services, a transformation methodology for a classic vehicle (EZGO RXV golf cart) into an autonomous vehicle was developed. The vehicle was equipped with internal sensors to determine its own state and external sensors to perceive the navigation environment. The paper proposes and implements a safety concept correlated with ISO26262 standards. After the transformation and functional testing processes, the autonomous vehicle was approved for navigation in pedestrian environments. For the localization process in this environments, an extended Kalman filter (EKF) has been developed. This fuses data from internal sensors with position and orientation data obtained with GNSS, AMCL particle filter and with an own localization method based on reflective markers. Thus, most localization situations that may occur in pedestrian areas can be covered. The global path planning is based on an offline learning process and the association of path segments with the graph used for mission planning. The generation of the global path occurs on the mission planning server, thus reducing the computing resources of the main control unit of the vehicle. The trajectory planning is based on the Time Elastic Band (TEB) algorithm, which has been adapted and parameterized for vehicles with Ackermann kinematics and for pedestrian environments. In order to validate the functionality of the system and of the developed autonomous vehicles, experimental studies were proposed and performed in real environments that took place over a period of about 6 months. The analysis of the experimental validated the research results, highlighting the reliability of the entire system, the vehicles traveling in total about 300 km and delivering 572 packages. The user acceptance for autonomous delivery packages increased by 15% due to the interactive planning.