

Metodologie de localizare relativă în medii colaborative robotizate

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Calculatoare și Tehnologia Informației

autor ing. Andrei STANCOVICI

conducător științific Prof. univ. emerit. dr. ing. Vladimir I. Crețu

luna noiembrie anul 2018

Teza de doctorat cu titlul ”Metodologie de localizare relativă în medii colaborative robotizate” aduce contribuții într-un domeniu de mare actualitate, cel legat de localizarea relativă în contextul explorării roboților autonomi în medii necunoscute.

În ultimul deceniu, acest domeniu a cunoscut o dezvoltare puternică, datorită vastei aplicabilități: roboți pentru pază, roboți salvatori, roboți subacvatici, roboți pentru operațiuni miniere, roboți de curățenie, roboți pentru monitorizarea fermelor și avantajelor pe care le aduce: reducerea costurilor în timp, facilitarea activităților umane, îndeplinirea sarcinilor care sunt foarte dificil sau chiar imposibil de efectuat de către o persoană. Astfel problematica atinsă de această teză se bucură de un interes major, atât în mediul academic, cât și în cel industrial.

Luând în considerare faptul că în viitor roboții autonomi vor primi tot mai multe sarcini de realizat în diverse domenii, este evident faptul că localizarea acestora reprezintă în zilele noastre un subiect de mare actualitate.

Scopul principal și rezultatul activității de cercetare este acela de a propune o metodologie de localizare relativă [1], bazată pe modele matematice, algoritmi, metode și tehnologii de localizare, care poate fi utilă în aplicații de explorare cu roboți mobili autonomi în medii necunoscute.

Această metodologie este validată prin implementarea dispozitivului pentru obținerea orientării și a poziției robotului în task-ul de navigare, IRULT (Inter-Robot Ultrasonic Localization Turret) [2][3], care face parte din modulul de percepție al terminalului WIT (Wireless Intelligent Terminal) în cadrul proiectului de cercetare CORE-TX (Collaborative Robotic Environment – the Timisoara eXperiment) [4]. De asemenea, validarea este extinsă prin implementarea unui simulator cu ajutorul căruia sunt cuprinse experimente acoperind cazurile izolate ce pot apărea în practică.

Capitolul 1 al tezei intitulat “**Introducere**” debutează cu o scurtă introducere în domeniul cercetării întreprinse de autor. Capitolul continuă cu actualitatea tezei, aria de aplicabilitate și a motivației care a stat la baza programului de cercetare desfășurat de autor. În continuare sunt prezentate obiectivele principale pe care autorul tezei și le-a propus, iar în finalul capitolului este descrisă structura tezei.

Proiectele laboratorului DSPLabs reprezintă o motivație importantă pentru alegerea acestei teme. O altă motivație o reprezintă problemele existente în localizarea roboților autonomi. Pentru a scoate în evidență problemele existente într-un mod structural, autorul tezei redă factorii de influență în localizare: independența de repere fixe, dinamica mediului, viteza de execuție, acuratețea, scalabilitatea, conectivitatea, eficiența energetică, costul, robustețea și standardizarea. De asemenea o altă motivație o reprezintă aria vastă de aplicabilitate, menționând pe scurt, monitorizarea mediilor radioactive [5], monitorizarea și optimizarea traficului [6], explorarea mării pentru studiul creaturilor maritime [7][8], misiuni în spațiu

pentru cercetarea și descoperirea unor zone încă neexplorate [9], aparate casnice robotizate cum ar fi un aspirator mobil inteligent [10] sau un scaun inteligent cu roți [11][12], roboți pentru distribuirea alimentelor sau robot de companie la cumpărături [13]; acestea fiind doar câteva exemple unde localizarea joacă un rol important.

Obiectivele tezei sunt următoarele:

(1) Analiza și structurarea soluțiilor existente, evidențierea celor mai importante tehnici și tehnologii existente.

(2) Identificarea factorilor de influență și a problemelor existente în localizarea roboților mobili.

(3) Dezvoltarea unor metode de calcul de distanță între doi roboți folosind tehnologii bazate pe semnale mecanice.

(4) Propunerea unui sistem hardware pentru roboți mobili care să ofere facilități de localizare având la bază metodele de calcul a distanței.

(5) Elaborarea unei metodologii de localizare aplicabilă pe o gamă largă de sisteme luând ca exemplu sistemul CORE-TX.

(6) Concepția și definirea unui model matematic de localizare bazat pe cooperare și localizare multilaterală și validarea acestuia.

(7) Definirea unor reguli, pe baza cărora să se păstreze confiența de localizare a roboților mobili la un nivel cât mai înalt.

(8) Exemplificarea metodologiei pe un studiu de caz concret.

(9) Elaborarea unui algoritm de localizare de confiență superioară, destinat sistemelor cu procesare distribuită.

În **Capitolul 2** intitulat „**Localizarea, abordări curente**” se prezintă o clasificare a sistemelor de localizare. Ca și o primă categorisire, sistemele de localizare pot fi grupate în globale și locale. Scopul de bază al acestui capitol este de fapt acela de a defini noțiuni de clasificare care vor fi utilizate în celelalte capitole. Pentru fiecare categorie de clasificare introdusă, se prezintă cel puțin un exemplu de sistem de localizare din literatura de specialitate. Soluțiile de localizare existente, pot avea caracteristici cu apartenență la una sau mai multe categorii din cele definite de autor:

CAT I – sisteme de localizare globală

CAT II – sisteme de localizare locală cu repere fixe - active

CAT III – sisteme de localizare locală cu repere fixe - pasive

CAT IV – sisteme de localizare locală cu repere mobile

CAT V – sisteme de localizare locală fără repere

Tot în acest capitol se prezintă și câteva tehnici reprezentative de localizare precum și tehnologiile specifice aferente. La finalul capitolului, autorul expune factorii care influențează sistemele de localizare pe baza cărora sunt structurate problemele și soluțiile propuse.

Problemele și propunerile sunt redată astfel:

1) independența de repere fixe:

Problema: Cele mai uzuale sisteme de localizare în cazul roboților autonomi sunt construite să fie dependente de repere fixe. Aici putem referi sistemele de localizare din categoriile CAT I, CAT II și CAT III.

Propunere: Dacă se dorește o independență de repere fixe, atunci se poate merge pe una din cele două variante: CAT IV sau CAT V. În lucrarea de față se propune un sistem de localizare aparținând categoriei CAT IV, de asemenea, se propune un sistem hibrid care combină categoriile CAT II și CAT IV.

2) dinamica mediului:

Problema: Dacă apar modificări în mediul în care se utilizează sistemul de localizare, cum ar fi numărul de persoane, prezența diferitelor obiecte (cum ar fi dulapurile, rafturile), localizarea se realizează mult mai dificil. Anumite sisteme de localizare din categoria III ar

putea avea dificultăți la acest capitol. De asemenea, sistemele de localizare din CAT II care folosesc abordări precum fingerprinting (2.4.1), au mari probleme atunci când mediul devine dinamic.

Propunere: Pentru aplicațiile unde mediul este dinamic, oricare categorie ar fi potrivită în afară de categoria III. De asemenea, trebuie evitate abordări precum fingerprinting. În lucrarea de față se propune o abordare metrică în care roboții mobili își conservă pozițiile prin așa numitele “pânze de localizare”. Avantajul acestei abordări, prezentate în capitolul 4, este faptul că poziționarea pânzelor este destul de flexibilă astfel încât sistemul ar putea să funcționeze și în medii dinamice.

3) viteza de execuție:

Problema: În sistemele de localizare, în funcție de algoritmul care se aplică, calculele se fac în mod repetat cu scopul de a se obține o acuratețe mai bună. Acest lucru duce la creșterea timpului în calcularea poziției.

Propunere: Se propune ca algoritmul să fie descompus în mai multe fire de execuție și procese, în așa fel încât, calculul să fie transmis la un nod central (server/cloud) unde urmează să fie executat pe mai multe procesoare. În lucrarea de față acest lucru se propune să se realizeze cu ajutorul nodului central, BRAIN (Background Robotic Activity Induction Node), definit în proiectul de cercetare Core-TX.

4) acuratețe:

Problema: Acuratețea localizării depinde în mod direct de acuratețea senzorilor și de modul în care sunt folosite informațiile de la senzori. De asemenea, de exemplu, erorile de calcul în cazul măsurării distanțelor, care provin din reflexii, refracții și difracții, pot să ducă la erori mari în localizare.

Propunere: Pentru a obține o estimare precisă a locației, este nevoie de tehnici complexe de procesare a semnalului care să identifice semnalul în linie directă (dacă există) și să minimalizeze/elimine efectele semnalelor pe căi multiple. De exemplu, tehnologiile prezentate în 2.4.2 CSS și 2.4.3 UWB sunt mai robuste la căi multiple și zgomot, comparativ cu tehnologia prezentată în 2.4.1 WLAN. În lucrarea de față se propune aplicarea tehnologiilor robuste, CSS sau UWB, sub forma unui sistem de localizare de categorie CAT II pentru a compensa propagarea erorilor în sistemul de localizare de categorie CAT IV propus în această lucrare. De asemenea, în capitolul 6 se arată cum prin combinarea celor două sisteme se ajunge la o acuratețe mai bună în localizare.

5) scalabilitate:

Problema: Într-o rețea de roboți, numărul acestora poate fi de ordinul sutelor sau miilor, ceea ce duce la creșterea complexității protocolului de localizare. Această problemă este specifică categoriei CAT IV.

Propunere: Se rezolvă prin introducerea bazelor. La nivel de bază, se propune ca protocolul să fie descompus în mai multe fire de execuție și procese, astfel încât localizarea să fie gestionată de un nod central (server/cloud) unde protocolul se execută pe mai multe procesoare. Ca și în cazul vitezei de execuție, în lucrarea de față, scalabilitatea se propune să se realizeze cu ajutorul nodului central, BRAIN.

6) conectivitate:

Problema: Densitatea roboților trebuie să fie destul de mare pentru a nu se pierde legăturile, dar în același timp o densitate mare duce la îngreunarea comunicării din cauza caracteristicii de evitare a coliziunilor a mediului fără fir. Această problemă este specifică categoriei CAT IV.

Propunere: Se propun trei zone de vizibilitate: zona verde pentru calculul distanței sau a unghiului între doi roboți mobili, zona galbenă pentru comunicare între doi roboți și zona roșie în care nu se poate comunica. Aceste definiții fac parte din metodologia propusă expusă în capitolul 4. De asemenea gestionarea conectivității se realizează central (server/cloud) în

funcție de regulele de mobilitate prezentate în capitolul 6.

7) eficiență energetică:

Problema: Algoritmii complecși ar putea să aducă un consum considerabil robotului mobil autonom.

Propunere: Se propune ca algoritmii complecși să fie descompuși în mai multe fire de execuție și procese, astfel încât calculele să se realizeze într-un nod central (server/cloud) unde algoritmii se execută pe mai multe procesoare. Ca și în cazul vitezei de execuție și a scalabilității, în lucrarea de față, algoritmii complecși care duc la un consum semnificativ de energie, se propune să se realizeze cu ajutorul nodului central, BRAIN.

8) costul:

Problema: Prețul modulelor adiționale care aduc o îmbunătățire majoră în localizare este foarte ridicat.

Propunere: Se propune un modul hardware simplu și de cost redus, care se bazează pe calculul distanțelor între două module de același fel folosind unde ultrasonice la o acuratețe de ordinul milimetrilor. Modulul este prezentat în capitolul 3.

9) robustețe:

Problema: Trebuie analizată situația când anumiți senzori se defectează, măsurătorile eșuează, sau, un robot mobil devine complet nefuncțional.

Propunere: În capitolul 3, se propune un modul hardware cu doi senzori funcționali, dar cu un rol dublu, fiecare sensor ar putea să acopere cazul în care celălalt sensor s-ar defecta. Astfel, cu anumite constrângeri, modulul hardware ar fi funcțional, dacă maxim un sensor se defectează. Tot în capitolul 3, se propun două metode pentru calculul distanței: una unidirecțională și cea de a doua, bidirecțională. Astfel, în cazul în care metoda bidirecțională eșuează, ar putea să se apeleze la metoda unidirecțională. Metodologia prezentată în capitolul 4 definește o pânză care este compusă din cel puțin doi roboți. Pentru a crește robustețea, numărul roboților mobili dintr-o pânză poate fi mărit.

10) standardizare:

Problema: În prezent, nu există niciun standard care să guverneze cercetarea localizării în mediul interior al clădirilor [14].

Propunere: În lipsa unui standard, în prezenta lucrare se propune o metodologie de localizare relativă care poate fi utilă la proiectarea soluțiilor de explorare a roboților autonomi în medii necunoscute.

Capitolul al treilea, “Sistemul hardware de localizare propus” prezintă un nou concept hardware pentru orientarea și localizarea roboților mobili în plan 2D, denumit IRULT (Inter-Robot Ultrasonic Localization Turret). Se prezintă și alte module hardware de localizare existente în literatura de specialitate. În partea a doua a capitolului, autorul prezintă o serie de metode care stau la baza modelului de orientare și localizare a roboților mobili propus. Una dintre aceste metode este cea bazată pe algoritmul de aliniere [15][16]. Alinierea reprezintă o etapă esențială în cadrul modelului de orientare și localizare a roboților mobili, fiind tocmai punctul de pornire al acestuia. La finalul capitolului sunt descrise două metode de calcul a distanței și rezultatele experimentale aferente. Aceste rezultate sunt expuse pentru a fi referite și utilizate în cadrul capitolelor următoare ale tezei.

Rezultatele experimentale arată că, deși metoda MTDOA (Modified Time Difference of Arrival) [17] generează erori absolute relativ ridicate, valoarea medie este mai apropiată de distanța reală și are o evoluție liniară, acestea fiind obținute după ajustările de calibrare corespunzătoare. Mai mult decât atât, erorile maxime relative tind să scadă odată cu distanța măsurată. Aceasta este o indicație care arată că întârzierile provocate de modul de operare a modulelor Xbee contribuie predominant la influențarea rezultatelor experimentale. O îmbunătățire a acestei tehnici ar putea fi să se efectueze măsurători în ambele direcții pentru o anumită poziționare a robotului, iar în cazul în care rezultatele diferă în mod semnificativ,

procedura ar trebui reluată.

Pe de altă parte, metoda CTOF (Combined Time of Flight) [17] se comportă mult mai bine. După calibrările necesare, caracteristicile sale de măsurare sunt liniare iar rezultatele măsurătorilor sunt mult mai apropiate de distanța reală. Prin aceasta se arată independența acestei tehnici de întârzierile aleatorii introduse de către modulele de comunicare Xbee.

Capitolul 4 intitulat „**Metodologia de localizare propusă**” este un capitol original în care autorul prezintă metodologia de localizare care se bazează pe trei niveluri: 1-PREDICȚIE, 2-COOPERARE și 3-CENTRALIZARE. Cele trei niveluri sunt detaliate în continuare în capitolele 5 și 6. Tot în cadrul acestui capitol sunt aprofundate noțiunile pe care se bazează metodologia propusă, dintre care se pot evidenția: conceptele de bază, măsurarea unghiului, inițializarea sistemului, metoda LOAD și localizarea bilaterală. De asemenea este prezentat un set extins de experimente dintr-un studiu de caz efectuat în cadrul laboratorului DSPLabs, pentru a evalua metodologia de localizare propusă. În urma experimentelor, autorul constată că este nevoie de mai multe seturi de experimente care trebuie să fie efectuate prin simulare pentru a cuprinde cât mai multe dintre cazurile izolate ce pot apărea în practică.

Experimentele au fost făcute folosind doar două module IRULT. Roboții nu s-au deplasat, au fost poziționați static. Măsurătorile de distanță reală au fost făcute folosind o ruletă. Modulele IRULT au putut realiza procedura de aliniere și calculul distanței. Ca și informație de ieșire, folosind interfața Xbee, modulul IRULT putea să ofere distanța măsurată, timpul de durată a unei măsurători de distanță și timpul de aliniere. Toate datele au fost acumulate și adăugate într-o tabelă de tip Microsoft Excel, inclusiv măsurătorile repetate pentru distanțe diferite. Datele au fost procesate manual și rezultatele de poziționare au fost stabilite în urma calculelor făcute în tabel. Prin urmare, timpul pentru efectuarea unui astfel de studiu a crescut semnificativ.

Experimentele nu au fost făcute automatizat din două motive: modulele hardware necesare nu au fost disponibile și s-a dorit ca funcționalitatea de localizare să fie testată separat, izolând astfel erorile de localizare care puteau să provină din alte surse, altele decât modulul IRULT. Astfel erorile de localizare expuse în acest capitol, obținute prin experiment, includ doar erori care provin de la modulul de măsurare a distanței, și nu conțin alte surse de erori.

Scopul acestei cercetări a fost acela de a izola restul de componente ale sistemului CORE-TX iar atenția să fie pusă pe modulul IRULT și de asemenea de a găsi metode bune de a filtra erorile dobândite prin măsurarea distanței. Astfel, ținând cont de erorile pe care le poate genera modulul IRULT, autorul tezei a dezvoltat un simulator în care a implementat modelul matematic de localizare. Simulatorul are ca și intrare eroarea absolută de măsurare a distanței și poate genera inclusiv poziționări de cel mai defavorabil caz, ceea ce în practică ar fi greu de obținut sau și mai greu de reprodus, pentru că sunt cazuri rare care au o probabilitate foarte mică de apariție. De aceea, pentru a obține o validare corectă, autorul tezei folosește mediul de simulare pentru a cuprinde toate cazurile izolate ce pot apărea în practică. Simulările necesare au fost realizate și sunt expuse în capitolele 5 și 6.

În cadrul **Capitolului 5** al lucrării având titlul „**Aplicarea metodologiei de localizare relativă pentru stratul de percepție și operare CORE-TX**” este evidențiat inițial primul nivel și anume PREDICȚIA din cadrul metodologiei de localizare relativă propuse. La acest nivel fiecare robot mobil se auto-localizează pe baza resurselor proprii de mobilitate și navigare, prin procesare locală. Abordarea propusă de autor se bazează pe conceptul dead reckoning. Acesta reprezintă un proces de subordonare față de următoarele două niveluri de localizare care sunt prezentate în continuare. Nivelul doi (COOPERARE), abordat în continuare în cadrul acestui capitol, are la bază metoda de localizare multilaterală. În consecință, autorul prezintă tehnici și metode existente care se referă la localizare multilaterală precum și modelul matematic original propus, model bazat pe metoda ILS (Iterative Least Squares). De asemenea sunt prezentate regulile de formare a pânelor care reduc amplitudinea efectului de propagare a erorilor. Pentru

validarea modelului matematic autorul se bazează pe măsurătorile de calcul a distanței descrise în capitolul 3 și realizează simulări multiple de propagare a erorilor în cele mai defavorabile cazuri, ale căror rezultate le prezintă în acest capitol. Tot aici este descris simulatorul SiMuLoC dezvoltat de autor pentru validarea modelului, precum și un exemplu de aplicație care evidențiază maniera în care poate fi utilizat modelul matematic propus.

Modelul matematic propus, generalizat, oferă posibilitatea de a localiza o pânză în raport cu alta, indiferent de numărul de roboți care alcătuiesc o pânză. Trebuie remarcat faptul că localizarea prin COOPERARE se face secvențial din pânză în pânză, astfel o pânză care trebuie localizată este dependentă doar de pânza de referință. Acest lucru face posibilă implementarea modelului matematic la nivel de WIT. Avantajul acestei idei este că sistemul de localizare la nivelul COOPERARE poate fi funcțional și atunci când, din diverse motive, lipsește comunicarea cu entitatea BRAIN.

S-a ales ca validarea modelului să fie făcută prin simulări de tip Monte Carlo, deoarece, în practică, erorile de localizare cu propagare secvențială sunt foarte greu de reprodus. Atunci când distribuția zgomotului în cazul măsurării distanței nu poate fi modelată, singurul lucru ce se poate face este să fie găsit intervalul maxim și minim al distribuției. Cu un astfel de zgomot, găsirea celor mai defavorabile cazuri în practică este imposibilă. De aceea, aplicând metoda Monte Carlo în simulări, se poate evalua modelul rapid și corect. În simulările efectuate în simulatorul SiMuLoC se ține cont de acest aspect. De aceea s-a și reușit să se reproducă anumite probleme cunoscute în literatura de specialitate, cum ar fi problema minimelor locale și globale evidențiate de Seong Yun Cho în lucrarea [18]. În cazul metodologiei de față, aceste probleme sunt rezolvate prin folosirea regulilor de formare a pânzelor și prin apelarea la informației de poziție de la un nivel inferior, cum ar fi metoda LOAD sau nivelul I de localizare (PREDICȚIE).

În abordarea de față, s-a considerat că zgomotul aleator în cazul măsurării distanțelor poate fi descompus în două părți. Prima parte are distribuție gaussiană iar a doua nu poate fi modelată. Distribuția gaussiană se rezolvă la nivel de modul IRULT, prin măsurători repetitive, aplicând de exemplu filtru Kalman, iar distribuția non-gaussiană nu poate fi rezolvată ci trebuie cuantificată secvențial din pânză în pânză, iar acest lucru se poate face folosind simulatorul SiMuLoC. Aplicând diverse reguli de formare a pânzelor, evidențiate în subcapitolul 5.7, cuantificarea erorilor de propagare se modifică. De aceea metodologia propune un set de reguli, prin care, confiența în localizare crește.

Capitolul 6, „Aplicarea metodologiei de localizare relativă pentru stratul de control și supraveghere CORE-TX” prezintă cel de-al treilea nivel (CENTRALIZARE) din cadrul metodologiei de localizare propuse, nivel care include un algoritm destinat sistemelor cu procesare distribuită. Algoritmul BPF (Backtracking Particle Filter) [19] propus ca o tehnică originală în domeniul localizării, este un algoritm de tip „filtru de particule“ sub forma de „backtracking“ și care se bazează pe modelul algoritmilor probabiliști Las Vegas. Deoarece experimentele făcute în practică și expuse în capitolul 4 acoperă un context relativ izolat, pentru a putea valida metodologia propusă, autorul execută mai multe seturi de experimente prin simulare pentru a cuprinde cât mai multe dintre cazurile izolate ce pot apărea în practică. Prin analiza rezultatelor experimentale și prin introducerea conceptului „bază” cu rolul de a reseta propagarea erorilor în localizare, autorul demonstrează că metodologia de localizare relativă propusă este aplicabilă în contextul explorării roboților autonomi în medii necunoscute.

De obicei în literatura de specialitate găsim sisteme de localizare pentru roboți mobili care folosesc următoarele abordări sau derivă din acestea: SLAM, Kalman Filter, ILS sau filtre de particule bazate pe metoda Monte Carlo. Fiecare abordare are o problemă specifică aparte pentru a fi aplicată pentru aplicații de explorare în medii necunoscute. De exemplu, prin abordarea SLAM, nu se poate reconstitui locația în mediu dacă mediul este dinamic. Kalman Filter are nevoie de un model pentru senzori, iar comportamentul senzorilor în practică este

greu de modelat. ILS pierde din acuratețe la calcularea valorii reziduale, iar erorile se acumulează ad-hoc. Filtrele de particule prin abordările existente în literatura de specialitate necesită o hartă, în schimb atunci când se face o explorare a unui mediu necunoscut harta nu există.

În acest capitol s-a discutat un concept nou în domeniul localizării. Ideea a venit după analiza abordărilor existente. Era nevoie de o metodă care să păstreze istoricul măsurătorilor și estimărilor în așa fel încât prin estimări și validări repetitive să fie găsită soluția potrivită. Apelând la metoda BPF prezentată în acest capitol, nu se pierde așa de mult din acuratețe așa cum ILS pierde din acuratețe la calcularea valorii reziduale. În schimb, metoda BPF necesită foarte multe resurse de calcul. Acum zece ani, sau mai mult, era mai greu de imaginat un astfel de concept din lipsa resurselor de calcul sau costurilor imense nesuportabile. Astăzi, când noțiunea „cloud computing” este pusă în practică, se deschid drumuri spre idei noi. Spre exemplu, entitatea BRAIN poate fi văzută ca și o soluție software care se execută în „cloud”. Algoritmul BPF, prezentat în acest capitol, a fost construit pentru nivelul CENTRALIZARE care are la bază entitatea BRAIN, entitate care poate fi reprezentată ca și un ansamblu de servicii de calcul în „cloud”.

Algoritmul BPF este un algoritm de tip „filtru de particule” dar este foarte diferit de abordarea filtrelor de particule regăsite în literatura de specialitate prin simplul fapt că nu necesită o hartă. Mai mult, filtrele de particule din literatura de specialitate se bazează pe modelul Monte Carlo, în schimb algoritmul BPF se bazează pe modelul Las Vegas.

S-au realizat mai multe experimente în simulator folosind algoritmul BPF. Din rezultatele obținute se observă că metoda BPF are acuratețe mai bună comparativ cu metoda ILS. S-a constatat că fuziunea de date este relevantă pentru a crește confiența în localizare. O fuziune de date pentru metoda ILS nu este exclusă, doar că este mai grea în implementare. De asemenea a fost propusă soluția de localizare prin construire a bazelor pentru problema aplicațiilor cu roboți mobili care explorează medii necunoscute indiferent că traseul este scurt sau foarte lung.

În **Capitolul 7**, intitulat „**Concluzii și perspective**”, autorul prezintă concluziile rezultate din cercetarea științifică efectuată, evidențiază contribuțiile originale și schițează câteva dintre direcțiile viitoare de cercetare.

Dintre contribuțiile originale revendicate de autor se pot menționa:

- Identificarea celor mai semnificative exemple de aplicații în domeniul roboților autonomi pentru care se poate aplica metodologia propusă.
- Identificarea factorilor de influență în localizarea roboților mobili, semnificativi pentru aplicații cu roboți mobili autonomi în medii necunoscute.
- Clasificarea sistemelor de localizare pe 5 categorii și exemplificarea categoriilor.
- Analiza problemelor de localizare în funcție de factorii de influență identificați și propunerea soluțiilor aferente.
- Identificarea celor mai semnificative module în domeniul roboților autonomi care folosesc tehnologia semnalelor ultrasonice și identificarea problematicii acestora.
- Propunerea și implementarea unui modul original (IRULT) care se bazează pe semnale ultrasonice pentru a măsura distanța în raport cu alte module IRULT și care are un set comun de cerințe pentru sistemul robotizat țintă, respectiv CORE-TX. Modulul IRULT a fost patentat. După ce cererea de brevet a fost depusă, această activitate a fost publicată și într-un articol de conferință în domeniu, indexată Thomson Reuters.
- Dezvoltarea unui algoritm de aliniere pentru două turele care sunt echipate cu câte un modul IRULT. Această activitate a fost publicată într-un articol de conferință în domeniu, indexată Thomson Reuters și într-un capitol de carte publicată în străinătate.

- Dezvoltarea metodelor MTDOA și CTOF pentru măsurarea distanței dintre două module IRULT. Această activitate a fost publicată într-un jurnal indexat Thomson Reuters.
- Propunerea unei metodologii de localizare compusă din trei niveluri: PREDICȚIE, COOPERARE și CENTRALIZARE.
- Definirea unor concepte de bază în cadrul metodologiei. Parțial, conceptele au fost publicate într-un articol de conferință în domeniu, indexată Thomson Reuters.
- Elaborarea metodei de orientarea și localizare LOAD.
- Elaborarea metodei de localizare bilaterală.
- Elaborarea modelului matematic de localizare bazat pe cooperare și localizare multilaterală.
- Dezvoltarea simulatorului SiMuLoC pentru validarea modelului matematic.
- Definirea unor reguli de formare a pânelor.
- Exemplificarea metodologiei propuse pe un studiu de caz concret. Această activitate a fost publicată într-un articol de conferință în domeniu, indexată Thomson Reuters.
- Elaborarea algoritmului de localizare BPF, de confiență superioară, destinat sistemelor cu procesare distribuită.
- Dezvoltarea simulatorului Simon-TX pentru testarea algoritmului BPF și validarea metodologiei.
- Extinderea algoritmului BPF pentru localizare relativă bazată pe măsurarea unghiului și distanței între roboți.
- Extinderea algoritmului pentru localizarea relativă prin construirea bazelor.

Elementele revendicate de către autor drept contribuții originale au fost valorificate prin 5 publicații indexate ISI, un patent indexat ISI și un capitol de carte publicată în străinătate.

În finalul capitolului, autorul sintetizează într-o manieră pertinentă perspectivele de dezvoltare ulterioare ale cercetării întreprinse.

Bibliografie

- [1] A. Stancovici, S. Indreica, M. V. Micea, V. Cretu, și V. Groza, „Relative localization methodology for autonomous robots in collaborative environments”, în *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013, pp. 1730-1733.
- [2] A. Stancovici, M. V. Micea, V. Cretu, și V. Groza, „Relative positioning system using Inter-Robot Ultrasonic Localization Turret”, în *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2014, pp. 1427-1430.
- [3] M. V. Micea, A. Stancovici, și V. I. Cretu, „Sistem și metodă pentru orientare și localizare relativă a unor subsisteme autonome”, RO 129802 A0, 30-sep-2014.
- [4] R. D. Cioargă, M. V. Micea, B. Ciubotaru, D. Chiciudean, și D. Stănescu, „CORE-TX: Collective Robotic Environment - the Timisoara Experiment”, prezentat la Proc. 3rd Romanian-Hungarian Joint Symp. Applied Computational Intellig., SACI 2006, 2006.
- [5] K. Ohno, S. Kawatsuma, T. Okada, E. Takeuchi, K. Higaschi, și S. Tadokoro, „Robotic control vehicle for measuring radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, prezentat la Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on, 2011.
- [6] M. D. Venkata, M. M. M. Pai, R. M. Pai, și J. Mouzna, „Traffic monitoring and routing in VANETs — A cluster based approach”, prezentat la ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on, 2011.

- [7] I. X. Gao, Z. FeiFei, și M. Ito, „Underwater acoustic positioning system based on propagation loss and sensor network”, prezentat la OCEANS, 2012 - Yeosu, 2012.
- [8] R. Piza, J. Salt, A. Cuenca, și V. Casanova, „Control network architecture for an autonomous underwater vehicle divisamos project”, prezentat la OCEANS, 2011 IEEE - Spain, 2011.
- [9] A. Parness, M. Frost, N. Thatte, și J. P. King, „Gravity-independent mobility and drilling on natural rock using microspines”, prezentat la Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, 2012.
- [10] K. Soowoong, S. Jae-Young, și Y. Seungjoon, „Vision-based cleaning area control for cleaning robots”, *Consum. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 58, pp. 685-690, mai 2012.
- [11] M. Rampinelli, T. F. Bastos, R. F. Vassallo, și D. Pizarro, „Implementation of an intelligent space for localizing and controlling a robotic wheelchair”, prezentat la Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2012 ISSNIP, 2012.
- [12] R. A. Gonzales, F. A. Gaona, și R. R. Peralta, „An autonomous robot based on a Wheelchair”, prezentat la Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP), 2012 22nd International Conference on, 2012.
- [13] T. Matsumoto, S. Satake, T. Kanda, M. Imai, și N. Hagita, „Do you remember that shop? — Computational model of spatial memory for shopping companion robots”, prezentat la Human-Robot Interaction (HRI), 2012 7th ACM/IEEE International Conference on, 2012.
- [14] F. Zafari, A. Gkelias, și K. K. Leung, „A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies”, *CoRR*, vol. abs/1709.01015, 2017.
- [15] M. V. Micea, A. Stancovici, și I. Sînziana, „Distance Measurement for Indoor Robotic Collectives”, în *Mobile Robots / Book 2*, InTech, 2011.
- [16] S. Indreica, A. Stancovici, M. V. Micea, V. Crețu, și V. Groza, „Simulator based study of robot alignment and localization”, în *2013 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2013, pp. 107-111.
- [17] M. V. Micea, A. Stancovici, D. Chiciudean, și C. Filote, „Indoor Inter-Robot Distance Measurement in Collaborative Systems”, *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, pp. 21-26, aug. 2010.
- [18] S. Y. Cho și Y. W. Choi, „Access point-less wireless location method based on peer-to-peer ranging of impulse radio ultra-wideband”, *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 4, pp. 733-743, 2010.
- [19] A. Stancovici, M. V. Micea, și V. Cretu, „Cooperative positioning system for indoor surveillance applications”, în *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2016, pp. 1-7.