



**UNIVERSITATEA
POLITEHNICA DIN
BUCUREȘTI**



Școala Doctorală de Automatică și Calculatoare

Departamentul de Calculatoare

**Rezumat teză de
doctorat**

Ing. George-Cristian Pătru

Soluții de Localizare pentru Robotică în Medii fără GPS

Solutions for Robotics in GPS-Denied Environments

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Florin Pop Universitatea Politehnica din București	Președinte
Prof. Dr. Ing. Răzvan-Victor Rughiniș Universitatea Politehnica din București	Conducător de doctorat
Conf. Dr. Ing. Daniel Rosner Universitatea Politehnica din București	Referent
Prof. Dr. Răzvan Bologa Academia de Studii Economice din București	Referent
Conf. Dr. Ing. Mircea Hulea Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași	Referent

BUCUREȘTI 2023

Abstract

Roboții autonomi devin omniprezenți în societatea modernă - de la aplicațiile industriale și comerciale, la cele de divertisment și educaționale. Odată cu reducerea costului și creșterea domeniului de aplicare, aceștia devin din ce în ce mai prezenți nu doar în mediul exterior, ci și în interiorul clădirilor și în alte scenarii cu semnal GPS limitat. Această creștere a cererii și a aplicațiilor va continua, fiind determinată de o combinație între cererea tot mai mare de roboți automatizați la scară mică, de progresele în ceea ce privește puterea de calcul încorporată, de îmbunătățirea preciziei senzorilor și de apariția a noi tehnologii de circuite integrate radio.

Teza de față explorează soluții pentru poziționarea autonomă a roboților în mediile în care GPS-ul nu funcționează - cu accent pe soluții pentru roboți de mici dimensiuni și cu putere de calcul redusă. Teza analizează abordări și soluții existente și propune noi metode pentru construirea de sisteme de poziționare eficiente și flexibile, testând implementările practice pe aplicații din viața reală.

Teza este structurată dintr-un capitol introductiv, un capitol privind stadiul actual al tehnologiei, trei capitole de contribuții și un capitol de concluzii. Primul capitol de contribuții se concentrează pe soluțiile de urmărire vizuală din zbor pentru aplicații cu drone autonome, în scenarii care necesită o poziționare relativă rapidă și precisă între dronele autonome și alte ținte mobile. Sunt prezentate soluții de urmărire axate pe markeri fiduciali și o soluție completă hardware-software pentru urmărirea autonomă în timp real a unei ținte în mișcare. Cel de-al doilea capitol de contribuții este axat pe localizarea bazată pe UWB - cu abordări software și hardware pentru implementarea unui sistem de poziționare de mare precizie și de mare viteză în interiorul clădirilor pentru aplicații robotice de interior care necesită atât precizie ridicată, cât și localizare rapidă. O soluție completă - FlexTDOA - este propusă și testată în numeroase scenarii complexe - inclusiv comparații pentru scenarii de tip Line of Sight (LOS) și Non-Line of Sight (NLOS). Cel de-al treilea capitol de contribuții este construit în jurul unei aplicații practice pentru un robot autonom conceput pentru o aplicație industrială - măsurători automate ale anvelopelor - care utilizează un algoritm de navigație bazat pe fuziunea senzorilor de tip LIDAR și de urmărire a deplasării.

Toate capitolele sunt construite în jurul unor soluții hardware și software utilizate pentru a valida modelele matematice și algoritmi software propuși - teza punând bazele unei viitoare explorări a aplicațiilor robotice de ultimă generație în medii interioare și în medii fără GPS.

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Prezentarea domeniului tezei doctorale	1
1.2	Scopul tezei doctorale	2
1.3	Conținutul tezei doctorale	2
2	Starea domeniului	5
2.1	Medii fără semnal GPS	5
2.2	Abordări tehnologice pentru poziționare	7
3	Urmărirea rapidă și fiabilă în timp real a țintelor în mișcare	10
3.1	Introducere	10
3.2	Starea subdomeniului	11
3.3	Performanța simbolurilor 2D	13
3.3.1	Metode de comparare	13
3.3.2	Rezultate	14
3.4	Urmărirea de către drone a simbolurilor 2D	17
3.4.1	Soluția propusă	17
3.4.2	Procesare vizuală	19
3.4.3	Experimente	20
3.5	Concluzii și lucrări ulterioare	21
4	Poziționare omniprezentă	23
4.1	Introducere	23
4.2	Starea subdomeniului	24
4.2.1	Localizare UWB scalabilă	24
4.2.2	Corecția decalajului de ceas	25
4.3	Principii de bază	25
4.3.1	Intervalul de distanță bidirecțional	26
4.3.2	Diferența de timp de sosire	27
4.3.3	Algoritmi de localizare	27
4.3.4	Programarea timpilor	28
4.4	Metodologie de evaluare	29

4.4.1	Sistemul fizic	30
4.4.2	Setările de sistem	30
4.4.3	Mediul și amplasarea ancorelor	31
4.5	Evaluarea parametrilor sistemului	32
4.5.1	Ordine de răspuns	33
4.5.2	Număr de răspunsuri	33
4.5.3	Număr de răspunsuri pentru diferite viteze de etichetă	34
4.5.4	Număr de ancore	37
4.6	Comparație între metode de localizare	37
4.6.1	Ordine a răspusurilor și/sau inițiator fix vs. schimbător	38
4.6.2	Propagare NLOS	38
4.7	Concluzii	39
5	Navigara fără GPS	41
5.1	Introducere	41
5.2	Sistemul fizic	42
5.3	Navigare bazată pe LIDAR	43
5.3.1	Mașina de stare pentru navigare	43
5.3.2	Stratul de legătură între mașina de stare și placa de control	45
5.3.3	Control la nivel inferior	46
5.4	Localizare pe baza fluxului optic	47
5.4.1	Rezultate	48
5.5	Poziționare prin analiză de imagine	49
5.5.1	Poziționare prin triangulație	49
5.5.2	Achiziția de imagini	50
5.5.3	Corecția luminii ambientale	51
5.5.4	Conversia din pixel în distanță	51
5.5.5	Obținerea robusteții	52
5.5.6	Determinarea profilului anvelopei	52
5.5.7	Îndepărtarea marginilor	53
5.5.8	Metoda de scanare în adâncime	53
5.6	Evaluarea rezultatelor	54
5.7	Concluzii	56
6	Concluzii	57
6.1	Rezultatele obținute	57
6.2	Contribuții originale	60
6.3	Listă de publicații originale	63
	Bibliografie	65

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei doctorale

Roboții autonomi, atât cei de la sol, cât și cei aerieni, devin omniprezenți, evoluând și devenind parte integrantă atât în viața noastră de zi cu zi, cât și în multe aplicații industriale și comerciale. Pe măsură ce ne bazăm din ce în ce mai mult pe ei pentru o multitudine de sarcini, trebuie, de asemenea, să le dăm acestora o mai bună localizare, navigare și capacități de înțelegere a mediului înconjurător. Aplicațiile pentru roboții mobili autonomi variază de la cele industriale (deplasarea încărcăturilor utile grele, deplasarea rapidă a pachetelor poștale, curățenia mobilă, inspecția sau ajutorul în situații critice) și aplicațiile comerciale (în comerțul cu amănuntul, în spațiile de birouri și oriunde este necesară livrarea unei încărcături utile sau o sarcină repetitivă) până la servicii din domenii specializate (medical, militar, cercetare științifică, jurnalism și divertisment).

Nu este vorba doar de o exagerare de moment. Roboții sunt aici pentru a rămâne și pentru a-și extinde utilizarea, impulsionați de un amestec de progrese în domeniul senzorilor, de algoritmi mai buni, de progrese în domeniul comunicațiilor radio și de omniprezența tehnologiilor de comunicare fără fir, de prețuri mai mici pentru controlere și componente electronice de serie - precum și de o creștere a puterii de calcul disponibile în pachete cu costuri reduse și cu putere redusă.

Cu toate acestea, suntem departe de un scenariu de tip Terminator, în care roboții mobili ar interpreta lumea din jurul nostru cu o abordare și o precizie asemănătoare cu cea a oamenilor. Deși mașinile autonome s-ar putea apropia de acest lucru, ele se bazează în general pe o putere de procesare uriașă și pe senzori cu costuri ridicate și au mai multe limitări în ceea ce privește consumul de energie (în comparație cu energia utilizată de sistemul de propulsie). Pentru roboții de zi cu zi, în special cei utilizați în interior, care

sunt constrânși din punct de vedere al dimensiunilor fizice, al disponibilității energiei electrice și al prețului, soluțiile actuale trebuie să se bazeze pe soluții mai inteligente, care utilizează platforme de calcul mai mici și senzori mai ușori și mai ieftini (fără Radar, fără 4 camere HD și 4 camere LIDAR) pentru a naviga în mediul lor.

Cu toate acestea, progresele menționate mai sus în ceea ce privește puterea de calcul pentru sistemele integrate și senzorii mai buni, cu consum redus de energie și cu costuri reduse, sunt într-adevăr utile, deschizând și mai mult domeniul de cercetare existent dedicat modului de poziționare și de navigare a roboților autonomi în scenarii de interior / fără GPS. Teza de față explorează diverse soluții de ultimă generație pentru poziționarea roboților autonomi și propune abordări noi, mai eficiente și mai flexibile, cu aplicații atât în exterior, cât și în interior, testând aplicațiile practice ale soluțiilor propuse în aplicații din viața reală.

1.2 Scopul tezei doctorale

Teza își propune să exploreze, să testeze și să valideze soluții care să valorifice la maximum noile soluții de calcul încorporate și wireless pentru poziționarea și navigarea roboților autonomi de dimensiuni mici (atât pentru roboții de la sol, cât și pentru dronele aeriene).

Teza își propune să răspundă la următoarele întrebări de cercetare:

(Q1) Cum pot fi îmbunătățite metodele de localizare în mediile în care nu există GPS pentru a obține cele mai bune rezultate pentru aplicațiile roboților autonomi de mici dimensiuni și cu restricții de energie?

(Q2) Cum îmbunătățește utilizarea cipurilor wireless noi actuale acuratețea poziționării pe roboți de mici dimensiuni, bazați pe sisteme integrate?

(Q3) Cum se pot îmbunătăți rezultatele în scenarii care implică poziționarea relativă în timp real între două sisteme 3D (de exemplu: o dronă aeriană față de o țintă mobilă)?

1.3 Conținutul tezei doctorale

Teza este structurată în 6 capitole: un capitol introductiv, un capitol privind stadiul actual al cunoașterii, care explorează lucrările legate de subiectul tezei de doctorat, trei capitole de contribuții și un capitol de concluzii care rezumă contribuțiile tezei și stabilește bazele pentru viitoarele lucrări de cercetare exploratorie. Primul capitol (cel de față) prezintă teza și motivația din spatele ei.

Cel de-al doilea capitol explorează stadiul actual al tehnologiei în domeniul soluțiilor de poziționare și navigare pentru aplicații robotice destinate mediilor în care GPS-ul este refuzat - de la medii interioare la medii exterioare cu limitări geografice, structurale sau ambientale care îi obligă pe cercetători și dezvoltatori să utilizeze soluții tehnice alternative pentru poziționare, orientare și navigare de precizie. Acest capitol explorează mai întâi caracteristicile generale și limitările și discută exemple de aplicații în care sunt necesare soluții alternative. Apoi, sunt prezentate o serie de tehnici care sunt utilizate de abordările de ultimă generație, prin discutarea unor exemple de discuții din publicații recente din literatura de specialitate: soluții clasice bazate pe WiFi utilizate în medii de interior cu infrastructură WiFi preexistentă, care este exploatată ca balize de poziționare; soluții bazate pe UWB (lățime de bandă ultra largă) care promit o precizie mai bună utilizând cipuri de nouă generație; soluții bazate pe viziune care utilizează progresele în materie de putere de calcul axată pe imagine care permit înregistrarea indicilor vizuali ca referință, urmărirea avansată a obiectelor, estimarea traiectoriei și estimarea poziționării; implementări de urmărire vizuală care sunt utilizate cu accent pe corecțiile sarcinii finale / traiectoriei finale pentru aterizare de precizie, andocare și livrare de obiecte; precum și abordarea clasică a recuperării la punct mort, care revine în actualitate datorită progreselor înregistrate în materie de senzori, procesare încorporată și algoritmi de urmărire.

Primul capitol de contribuții explorează soluții pentru urmărirea dronelor, cu accent pe abordările de urmărire vizuală. Acesta este un capitol prioritar, deoarece ultimii ani au adus o multitudine de cazuri de utilizare pentru aterizare și livrare de precizie, andocare în zbor și în alte scenarii care au necesitat o poziționare relativă rapidă și precisă între o platformă robotică în mișcare și o platformă secundară / “urmărit” statică sau în mișcare. Primul subcapitol explorează variantele de markeri fiduciali, cu accent pe determinarea celor mai bune alternative care pot fi utilizate pentru utilizarea vehiculelor aeriene fără pilot (UAV), în timp ce al doilea subcapitol explorează o implementare complexă pentru urmărirea în timp real a unei ținte în mișcare de pe o platformă 3D (aeriană) în mișcare - utilizând fuziunea senzorilor și procesarea rapidă în timp real pentru a obține o achiziție rapidă și fiabilă a țintei.

Al doilea capitol de contribuții explorează subiectul mai larg al poziționării în orice mediu - și se concentrează pe localizarea bazată pe UWB. Acest capitol explorează atât abordările software, cât și cele hardware pentru implementarea unui sistem de poziționare de înaltă precizie în interior, care poate fi utilizat pentru aplicații robotice în interior care au necesitat atât o precizie ridicată, cât și o localizare rapidă. Se prezintă modul în care sistemul este construit pornind de la tehnici de bază de măsurare a distanței (Single-Sided Two-Way Ranging și Time Difference of Arrival), apoi se explorează algoritmi de calcul al localizării (EKF - bazat pe filtrul Kalman extins și LSE - bazat pe minimizarea erorilor de cel mai mic pătrat), iar apoi o schemă flexibilă de acces multiplu

cu diviziune în timp în care timpul este împărțit în sloturi, care gestionează momentul în care fiecare ancoră își poate începe comunicarea. Pe această bază, se propune o soluție completă - FlexTDOA - care este testată în numeroase scenarii complexe - inclusiv comparații pentru scenarii Line of Sight (LOS) și Non-Line of Sight (NLOS).

Cel de-al treilea capitol de contribuții explorează scenarii și soluții aplicate pentru navigația de precizie fără GPS pentru aplicații robotice. Acest capitol este construit în jurul unei aplicații practice pentru un robot autonom conceput pentru o aplicație industrială - măsurători automate ale anvelopelor. Soluția propusă conține mai multe implementări hardware și software, inclusiv un algoritm de navigație bazat pe fuziunea senzorilor între LIDAR și fluxul optic, o implementare hardware robustă industrială completă, precum și algoritmi specifici pentru procesarea imaginilor și măsurători de mare precizie.

Capitolul privind concluziile rezumă teza, trăgând principalele concluzii și prezintă rezultatele atât în ceea ce privește contribuțiile (21 de contribuții originale), cât și în ceea ce privește publicațiile: o revistă Q1 ca prim autor, o revistă Q1 ca al doilea autor, 3 publicații ca prim autor și alte 7 lucrări în coautorat.

Capitolul 2

Starea domeniului

Navigația, cartografierea, topografia și robotica necesită o plasare exactă. În canioanele urbane, în pădurile dense și în spațiile interioare, acuratețea și precizia pot fi dificile. Căile multiple, atenuarea semnalului și interferențele pot reduce performanța sistemului de poziționare în anumite medii. Obstacolele și împrejurimile dinamice pot cauza, de asemenea, probleme de poziție, viteză și orientare. Prin urmare, cadrele universitare au oferit numeroase metode pentru a rezolva aceste probleme și pentru a crește acuratețea și precizia sistemului de poziționare. Capitolul privind stadiul actual al tehnicii va aborda unele dintre aceste tehnici, utilizând publicațiile din literatura de specialitate care au adus contribuții substanțiale la acest subiect. Vom începe cu mai multe lucrări privind localizarea precisă în diferite contexte, concentrându-ne pe metodele de localizare negăsite de GPS. După aceea, vom discuta șase tehnologii de localizare care îndeplinesc cerințele de precizie. Prima porțiune acoperă localizarea bazată pe WiFi, a doua UWB, a treia și a patra viziune computerizată și aservire vizuală, a patra localizare bazată doar pe IMU și a șasea localizare bazată pe fuziune. În cele din urmă, vom încheia cu câteva subiecte de cercetare deschise și soluții la probleme din lumea reală.

2.1 Medii fără semnal GPS

Numeroase articole din literatura de specialitate abordează problema poziționării de precizie în diverse medii. Rahman et al. [1] propun un sistem de poziționare în interior bazat pe unde radio AM analizate prin metoda amprentei, care combină trei variante ale algoritmilor celui mai apropiat vecin. Sahin et al. [2] au creat un sistem de poziționare pentru spații interioare prin utilizarea etichetelor active care comunică cu cel mai apropiat cititor prin intermediul unor niveluri distincte de putere. Fang et al. [3] au dezvoltat o

soluție pentru spații interioare care se bazează pe rețelele LTE și realizează localizări precise în timp real. Li et al. [4] au explorat tehnica de localizare prin amprentă digitală prin dezvoltarea unui sistem care utilizează informații integrate despre starea canalului și informații despre intensitatea câmpului magnetic. Bencak et al. [5] propun o soluție de poziționare în interior cu Bluetooth Low Energy cu scopul de a ajuta la gestionarea depozitelor. Shi et al. [6] au dezvoltat un sistem pentru vehicule cu ghidare automată care să se deplaseze în interiorul unui depozit cu o precizie de câțiva centimetri. Aceste abordări prezintă diferite avantaje și dezavantaje, cum ar fi cerințele de infrastructură, ratele de eroare și ratele de actualizare.

Au fost propuse diverse metode pentru a aborda setările fără GPS pentru navigația în interior și în exterior. Matos Carvalho et al. [7] utilizează date radio terestre și senzori inerțiali UAV combinați cu filtre Kalman pentru o navigare lină. You et al. [8] sugerează utilizarea datelor de bandă ultra-largă și a unității de măsurare inerțială pentru a naviga cu vehicule aeriene fără pilot quadrotor în interiorul clădirilor. Huang și Wu [9] au dezvoltat un modul distribuit WiFi RSS bazat pe direcția de sosire pentru căutare și salvare în condiții de negare a GPS-ului. Famili et al. [10] au creat o abordare robustă de localizare acustică în interior folosind semnale acustice cu ultrasunete cu FH-CDMA hibrid. Stockel et al. [11] prezintă noi tehnici pentru calcularea cu precizie a mobilității în interior a unui UAV folosind măsurători de fază de la un radar de rotație și date ale unității de măsurare inerțială. Oelsch et al. [12] utilizează localizarea și cartografierea simultană și datele LiDAR 3D pentru a îmbunătăți situațiile în care GPS-ul este refuzat. Norton et al. [13] examinează metodele de navigație pentru sistemele militare americane de mici dimensiuni cu avioane fără pilot la bord în locații subterane și interioare fără semnal GPS. Ismail et al. [14] oferă o alternativă de localizare GPS în aer liber, bazată pe LTE, cu costuri reduse, în timp ce Haddadi et al. [15] utilizează două module pentru a estima poziția UAV cu quadrotor. În cele din urmă, Miraglia et al. [16] studiază metodele de fuziune a datelor pentru un sistem de poziționare 3D bazat pe semnale UWB și pe o unitate de măsurare inerțială cu 3 axe și 9-DOF. Aceste metode oferă o serie de abordări pentru abordarea situațiilor în care nu există GPS, fiecare cu propriile avantaje și limitări.

Dronele au aplicații multiple, de la operațiuni de căutare și salvare la expoziții creative. Farooq et al. [17] au dezvoltat o platformă UAV conștientă de percepție care utilizează viziunea computerizată pentru recunoașterea țintelor și evitarea coliziunilor, în timp ce Kolawole et al. [18] au proiectat o platformă de simulare pentru cartografierea dronelor de urgență și poziționarea dronelor în interior. Shu et al. [19] au propus o metodă de localizare a microvehiculelor aeriene folosind doar IMU și patru senzori ultrasonici, ceea ce le face utile pentru amuzament, monitorizare și salvare. Aceste studii evidențiază necesitatea unor soluții de poziționare a dronelor în afara tehnicilor bazate pe GPS pentru a îmbunătăți scenariile din lumea reală.

2.2 Abordări tehnologice pentru poziționare

Metodele de localizare bazate pe WiFi au fost dezvoltate pentru a asigura poziționarea în interior datorită omniprezenței WiFi în clădirile moderne [20]. Aceste metode utilizează indicatorul de intensitate a semnalului recepționat (RSSI) [21] pentru a estima poziția nodului țintă, localizatorul de rază de greutate (WRL), localizatorul de rază de greutate exponențială cu span relativ (RS-WRL) [22] și unghiul de sosire (AOA) [23] pentru a îmbunătăți localizarea în interior bazată pe rază de acțiune, precum și poziționarea în interior fără fir și abordările de navigație pentru vehiculele terestre autonome (AGV). [24] cu incertitudini de măsurare. S-a demonstrat că aceste metode îmbunătățesc precizia poziționării și determină trasee de deplasare sigure cu o fiabilitate ridicată. De asemenea, acestea au fost utilizate în localizarea micro UAV-urilor de interior și a vehiculelor aeriene fără pilot (UAV) pentru căutare și salvare (SAR) [25] în situații de interior în care GPS-ul nu este disponibil. Deși aceste metode au limitările lor, ele oferă o infrastructură existentă și cu costuri reduse pentru poziționarea în interior.

Tehnologia de bandă ultralargă (UWB) prezintă mai multe avantaje față de alte sisteme de localizare pentru localizarea de înaltă precizie în interior și în exterior [26], în ciuda costului său ridicat și a complexității de calcul. Tehnologia a fost utilizată în diverse aplicații [27], cum ar fi intervenția în situații de urgență, navigația în interiorul vehiculelor și sistemele inteligente de gestionare a depozitelor [28]. Literatura de specialitate sugerează diferite implementări UWB, inclusiv rețele neuronale [29], filtre Kalman [30], algoritmi de învățare automată [31], rețele ad-hoc [32] și abordări bazate pe modele probabilistice [33]. Aceste abordări au îmbunătățit acuratetea localizării UWB [34], au redus inexactitatea în afara liniei de vizibilitate și au minimizat eroarea de derivă a navigației robotului [35]. În timp ce unele dintre sistemele propuse au fost testate pe baza unor date simulate [36], altele au fost implementate cu succes în lumea reală.

Cercetările recente s-au axat, de asemenea, pe utilizarea tehnicilor de procesare a imaginilor pentru a dezvolta sisteme de localizare vizuală precisă și eficientă în interior pentru aplicații robotice. Li et al. [37] au propus un sistem SLAM vizual stereo robust pentru AGV-uri, în timp ce Dong et al. [38] au introdus ViNav, un sistem de navigare în interior bazat pe smartphone. Zhang et al. [39] au sugerat utilizarea telefoanelor mobile pentru localizarea continuă în interior, iar Zhao et al. [40] au introdus Vivid, un sistem vizual de navigare în interior. Zhang [41] a propus utilizarea caracteristicilor ORB pentru spațiile interioare, cum ar fi centrele comerciale. Guan et al. [42] au creat un sistem de localizare a roboților de interior bazat pe ROS, cu poziționare prin lumină vizibilă (VLP), în timp ce Al-Hameed et al. [43] au propus LiDAL, un sistem de detectare și localizare în interior bazat pe comunicare prin lumină vizibilă. În plus, Bavle et al. [44] au descris metoda VPS-SLAM, care permite sistemelor robotice aeropurtate să perceapă și să utilizeze

informații semantice din mediul înconjurător. În plus, Putra și Saputra [45] au propus utilizarea unei hărți virtuale 3D pentru a determina poziția unei drone de interior pe baza datelor IMU, Naufal et al. [46] au dezvoltat un sistem de aterizare autonomă bazat pe viziune pentru drone quadcopter folosind OpenMV, în timp ce Liang și Liu [47] au propus o metodă robustă de localizare VLC-inerțială folosind comunicarea prin lumină vizibilă și măsurători inerțiale, iar Ali et al. [48] au propus o metodă de localizare și determinare a orientării bazată pe viziune de interior pentru un quadrotor, prin determinarea exactă a poziției absolute, a orientării și a altitudinii prin metode de procesare a imaginilor și de localizare Markov. Toți acești cercetători valorifică diferite proceduri de procesare a imaginilor pentru a spori precizia localizării și a reduce erorile, oferind soluții eficiente de poziționare în timp real pentru aplicațiile de robotică.

O altă abordare conexă este prezentă în diverse studii privind aservirea vizuală pentru UAV-uri, inclusiv utilizarea vederii artificiale pentru plasarea dronelor, urmărirea infrastructurilor structurate liniar [49], aservirea vizuală bazată pe pasivitate pentru urmărirea liniilor de cultură [50], urmărirea țintelor pe verticală și orizontală prin momente de imagine [51] și aservirea vizuală bazată pe imagine a vehiculelor aeriene fără pilot pentru urmărirea țintelor la unghiuri variabile [52]. Studiile explorează, de asemenea, tehnici de aterizare a unui UAV cu quadrotor [53], aservirea vizuală bazată pe modele robot-centrice [54], precum și detectarea caracteristicilor ORB și calculul descriptorilor pentru sistemele de navigație bazate pe SLAM pentru situații de interior [41]. În plus, este dezvoltată o nouă tehnică de control al recuperării de la un multicopter în aer [55]. Rezultatele simulărilor și ale testelor pe teren demonstrează eficacitatea tehnicilor propuse.

Unele studii discută utilizarea metodei de estimare a vitezei de întoarcere pentru localizare și reconstrucția traiectoriei în zone cu semnale GPS slabe sau pierdute. Aparna et al. [56] utilizează un algoritm NARX (Nonlinear Autoregressive Exogenous) pentru a estima poziția actuală în zonele în care nu există GPS, utilizând coordonatele GPS și datele IMU. Jeong și Ko [57] sugerează utilizarea teoriei grupurilor Lie pentru a calcula un robot mobil, îmbunătățind estimările de localizare și atitudine. Zhang et al. [58] propun un sistem de poziționare locală (LPS) bazat pe Dead-Reckoning pentru mașini inteligente care estimează poziția folosind ieșirile senzorilor de viteză și direcție și informații despre starea anterioară. Xue și Jiang [59] oferă un sistem de navigație bazat pe UWB care utilizează măsurătorile de distanță prin metoda dead reckoning și Time-of-Flight (TOF) pentru a crește precizia și stabilitatea localizării în interior. Zhou et al. [60] descriu arhitecturi de estimare a poziției și filtru Kalman pentru urmărirea traiectoriei UAV în situații urbane complicate, în timp ce un alt grup de cercetare, Zhou et al. [61], sugerează utilizarea tehnicii Invariant Extended Kalman Filter (IEKF) pentru a modifica în mod dinamic matricile de covarianță ale procesului și ale zgomotului de

observație folosind mecanismul de atenție și rețeaua neuronală recurentă (RNN) pentru a îmbunătăți localizarea UAV.

O ultimă abordare prezentă în literatura de specialitate analizată include tehnici bazate pe fuziune care combină diferite tehnologii pentru a compensa deficiențele sau pentru a se îmbunătăți reciproc în vederea obținerii unei localizări precise în interior [62]. Metodele includ utilizarea de date accelerometrice, giroscopice și magnetometrice [63], Bluetooth Low Energy, diferența de timp de sosire a ultrasunetelor [64], tehnologia de poziționare UWB [65, 66], date RFID [67], GPS și procesarea imaginilor, cum ar fi viziunea rotațională [68], fluxul optic [69] și SLAM [35, 70]. Aceste tehnici sunt utilizate pentru a crește precizia localizării în interior în zone cu acoperire slabă, pentru a reduce deriva de navigare a robotului, pentru a realiza o autocalizare la nivel de centimetru, pentru a îmbunătăți precizia localizării GPS și pentru a furniza estimări precise de localizare, de exemplu, în cazul roboților de minerit subteran [71]. Cu toate acestea, eficacitatea unei tehnici de amprentare și prelucrare a imaginilor a fost uneori dezamăgitoare [72]. Cercetarea are ca scop dezvoltarea unor servicii de poziționare în interior rentabile și robuste pentru a îmbunătăți performanța localizării în interior.

În cele din urmă, prezentul studiu de literatură științifică examinează diferite aplicații de localizare care utilizează tehnologii avansate, cum ar fi senzorii de bandă ultralargă [73], algoritmi de viziune computerizată bazată pe învățare automată [74], sistemele de autocalizare prin fuziune multisenzorială, sistemele de poziționare în interior [75], abordările de calibrare de mare precizie [76] și sistemele de distanță asistate de senzori pentru drone. Aceste tehnologii oferă soluții pentru scenarii în care GPS-ul este refuzat sau în care GPS-ul este dificil de utilizat [77] în diverse medii interioare și subacvatice [78], medii subterane [79] sau misiuni aeriene [80], ceea ce face ca misiunile autonome și semiautonomie să fie mai sigure și mai fiabile [81]. Studiile arată că aceste tehnologii sunt mai performante decât metodele tradiționale de poziționare, cum ar fi GPS și IMU, în locații interioare și subterane, ceea ce le face mai ieftine și mai accesibile. În plus, aceste studii introduc modele matematice, abordări de calibrare și optimizare [82], precum și algoritmi inovatori pentru aplicații de localizare în interior și în diverse medii naturale.

Capitolul 3

Urmărirea rapidă și fiabilă în timp real a țintelor în mișcare

3.1 Introducere

Există o avalanșă incontestabilă de aplicații din ce în ce mai îndrăznețe pentru drone, cum ar fi inspecțiile la distanță, livrarea de colete sau chiar operațiunile de întreținere la distanță, ceea ce subliniază necesitatea dezvoltării de soluții de autonomie pentru drone. Două aplicații posibile pot necesita ca drona să:

- inspecteze șinele de cale ferată reducând efortul depus în cazul inspecțiilor manuale, prin colectarea pe cale aeriană a datelor imagistice și trimiterea rapidă la evenimente; se propune o soluție nouă pentru zborul de-a lungul șinelor, din cauza limitărilor navigației GPS.
- evalueze inventarul și starea de sănătate a pădurilor prin utilizarea unei drone quadrotor de mici dimensiuni împreună cu o dronă cu aripă fixă mai mare pentru evaluarea inventarului de arbori; se pune accentul pe o soluție nouă pentru sarcina de recuperare a dronei quadrotor folosind cele două drone în aer.

Markerii fiduciali sunt simboluri 2D care pot fi imprimate pe suprafețe plane și utilizate pentru diverse aplicații, cum ar fi localizarea, urmărirea, robotica, calibrarea camerei, estimarea poziției [83], orientarea, aterizare și control automat pentru drone [84], și realitatea augmentată [85], iar sistemele de markeri existente sunt de obicei monocrome, dar există și alternative care utilizează markeri circulari [86] sau cromatici [87].

3.2 Starea subdomeniului

Urmărirea simbolurilor 2D de către drone

Prelucrarea la bord a imaginilor capturate de drone a atras atenția cercetătorilor pentru potențiala sa utilizare în diverse aplicații, inclusiv aservirea vizuală, urmărirea și zborul autonom. Lucrările anterioare au explorat aeronave cu aripi fixe [88] și quadrotoare [89, 90] pentru urmărirea și aterizarea țintelor, utilizând diverse sisteme de viziune computerizată și algoritmi de control [91–93]. Printre exemple se numără utilizarea unei camere video cu cardan transmisă prin intermediul unei legături fără fir și procesată pe un computer staționar [94], un sistem de segmentare și urmărire a țintelor bazat pe culori [95] și rețele neuronale care rulează pe un computer din afara bordului [96]. O lucrare recentă [97] a instalat o cameră cu cardan și un computer încorporat puternic pe un quadrotor comercial pentru a efectua urmărirea vizuală, oferind informații detaliate despre viziunea computerizată și algoritmi de control utilizați. Toate aceste lucrări justifică crearea unei platforme cu costuri reduse, ușor de construit și de operat, care să permită explorarea și experimentarea în continuare a operațiunilor autonome ale dronelor cu ajutorul camerelor de bord.











Prezentare generală a sistemelor de simboluri 2D

În literatura de specialitate au fost propuse mai multe sisteme de markeri fiduciali. Tabela 3.1 oferă o prezentare generală a sistemelor de markeri analizate, prezentând numele acestora, anul primei lor publicații, un exemplu de markeri fiduciali și domeniul de aplicare. Sistemele de markeri din tabel sunt enumerate în ordine crescătoare în funcție de anul apariției lor.

Au fost propuse mai multe sisteme de markeri fiduciali, care au diferite proprietăți particulare care asigură robustețea. ARToolKit [98] utilizează un pătrat alb cu o margine neagră și poate fi personalizat pentru a include un simbol distinctiv ca marker, dar cu o fiabilitate redusă [107]. ARTag [100] utilizează o matrice de pătrate albe și negre în loc de un simbol, ceea ce îl face mai robust [108]. AprilTag [103], deși este similar cu ARTag, aduce câteva îmbunătățiri în ceea ce privește viteza de detecție. ArUco [106, 109] este un tip similar de marker de formă pătrată cu informații codificate în alb și negru, care poate fi personalizat în ceea ce privește dimensiunea. Alte sisteme notabile care utilizează markeri fiduciali de formă pătrată sunt Cybercode [99] și CALTag [102].

O soluție atractivă din punct de vedere vizual, ChromaTag [87] utilizează un marker cromatic pentru a reduce numărul de falsuri pozitive. Markerii fiduciali circulari [110], cum ar fi Rune-Tag [104] și CCTag [105], oferă rezistență la ocluzie și sunt utilizați

Tabela 3.1 Sisteme de markeri fiduciali.

Marker	An	Exemplu	Utilizare
ARToolkit [98]	1999		Realitate augmentată
Cybercode [99]	2000		Realitate augmentată
ARTag [100]	2005		Realitate augmentată
FourierTag [101]	2007		Robotică, Realitate virtuală
CALTag [102]	2010		Camera calibration
AprilTag [103]	2011		Realitate augmentată, Calibrare cameră, Robotică
Rune-Tag [104]	2011		Localizare, Estimare poziție
CCTag [105]	2012		Calibrare cameră
ArUco [106]	2014		Realitate augmentată, Calibrare cameră, Robotică
ChromaTag [87]	2017		Robotică

în estimarea locației și poziției și în calibrarea camerei. FourierTag [101] permite o degradare treptată a numărului de biți de date care pot fi extrași, îmbunătățind detecția la distanță. În funcție de cerințele aplicației, acești markeri au performanțe diferite.

Compararea performanței sistemelor de simboluri 2D

Sistemele de markeri au fost comparate în diverse studii pe baza unor parametri precum rata falsurilor pozitive, rata de confuzie între markeri, dimensiunea minimă a markerilor, imunitatea la condițiile de iluminare și detectarea distanței. ARTag [100, 108] a fost comparat cu alte sisteme, cum ar fi Data Matrix, Maxicode, QR Code, ARStudio și ARToolkit, și s-a constatat că are performanțe mai bune în detectarea markerilor la distanțe mari, cu o distorsiune mai mică și permite estimarea poziției 3D. Rune-Tag [104] și CCTag [111] sunt sisteme de markeri fiduciali circulari care oferă rezistență la ocluzie, Rune-Tag având o acuratețe mai mare pentru estimarea poziției, iar CCTag

având cea mai mare rată de detecție dintre toate în ceea ce privește distanța, ocluzia și neclaritatea mișcării.

În plus, comparațiile între sistemele de markeri precum ArUco, AprilTag, ARTag și ChromaTag [110, 87] au arătat diferențe de performanță pe baza unor parametri precum variația luminii, modelul de podea, nivelul de estompare a imaginii și distanța de detecție. AprilTag [83] a avut cea mai bună rată de detecție pentru variațiile de distanță, în timp ce ARTag a avut cea mai mică. ArUco și AprilTag au detectat markerul în 90% din cazuri pentru variațiile de orientare, în timp ce ARTag l-a detectat doar în 45%. S-a constatat că ChromaTag este mai rapid în detectarea markerului în comparație cu alte sisteme, dar ar trebui să fie utilizat atunci când sarcina implică detectarea unui marker de la o distanță scurtă și poziționat perpendicular pe cameră, în timp ce AprilTag ar trebui utilizat pentru detectarea de la o distanță mai mare sau de la un unghi ascuțit. A fost propusă o nouă abordare pentru markerul ArUco, denumită ArUco3 [112], care are ca rezultat detectarea mai rapidă a markerului prin detectarea markerului într-o imagine mai mică decât cea originală.

3.3 Performanța simbolurilor 2D

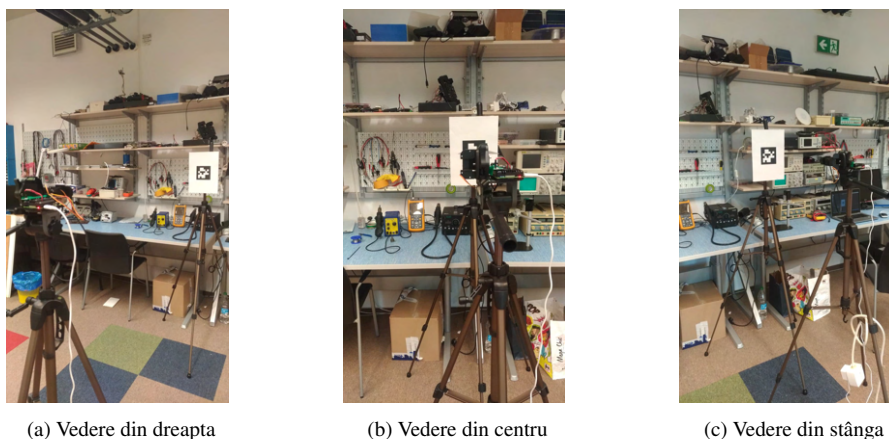
Performanța diferiților parametri ai markerilor este un subiect important atunci când se alege tipul de marker adecvat în scenarii critice. Trei sisteme de markeri fiduciali cu sursă deschisă [110], ArUco, AprilTag și CCTag, nu au fost comparate, în ciuda studiilor anterioare [87] care au arătat rezultate de performanță diferite între ele [112]. Am testat unul față de celălalt, în condiții diferite, cu markeri având valoarea 10 ca ID.

3.3.1 Metode de comparare

Configurația experimentală afișată în figura 3.1 constă în testarea performanțelor diferiților markeri în timp ce variază mai mulți parametri.

Acești parametri de interes includ tipul de marker, distanța până la cameră, luminozitatea luminii și timpul de expunere. Trei markere cu dimensiuni de 10 cm x 10 cm au fost imprimate pe foi de hârtie A4 separate și plasate pe un trepied, unul câte unul. Un alt trepied a fost utilizat pentru a varia distanța față de cameră. În cele din urmă, prin variația distanței, a luminii, a timpului de expunere și a vitezei unghiulare a aparatului foto, am reușit să creăm un set vast de date, colectând un total de 13200 de imagini.

Principalele scenarii de testare includ un scenariu cu cameră fixă și un scenariu cu cameră mobilă:



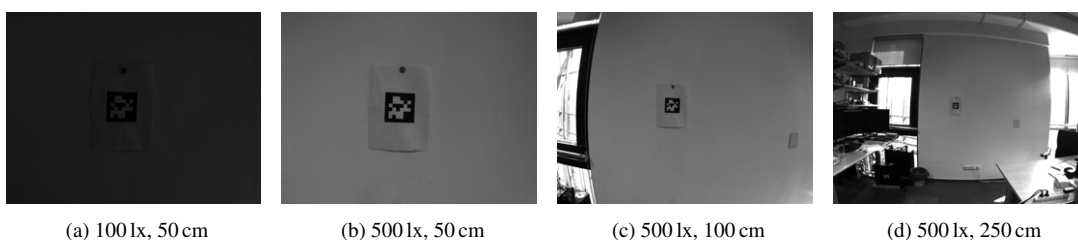
(a) Vedere din dreapta

(b) Vedere din centru

(c) Vedere din stânga

Figura 3.1 Setup-ul

- Scenariul fix afișat în figura 3.2. a testat toate cele trei markere, la o expunere constantă de $3000 \mu\text{s}$, în două condiții de iluminare de 100 și 500 lx și de la o distanță variabilă de 50, 100, 150, 200 și 250 cm.



(a) 100 lx, 50 cm

(b) 500 lx, 50 cm

(c) 500 lx, 100 cm

(d) 500 lx, 250 cm

Figura 3.2 Apriltag: variația distanței și variația intensității luminoase

- scenariul în mișcare afișat în figura 3.3. a testat toți cei trei markeri, la timpi de expunere diferiți între $1000 \mu\text{s}$ și $18\,000 \mu\text{s}$, în condiții de iluminare diferite, între 100 și 500 lx, de la o distanță variabilă de 50, 100 și 150 cm, și variind un alt parametru, viteza unghiulară, de la $45^\circ/\text{s}$ la $180^\circ/\text{s}$.

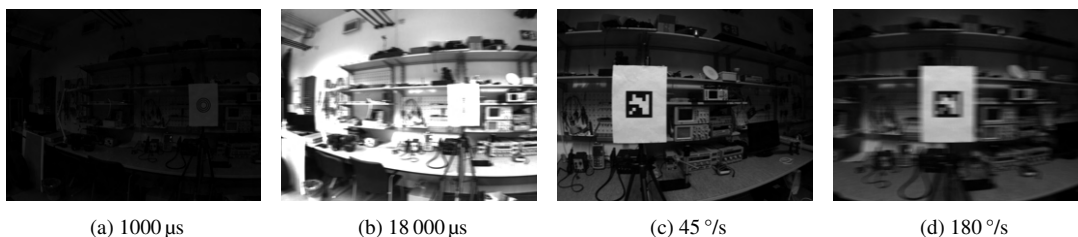
(a) 1000 μs (b) 18000 μs (c) 45 $^\circ/\text{s}$ (d) 180 $^\circ/\text{s}$

Figura 3.3 CCTag: variația timpului de expunere și variația vitezei unghiulare

3.3.2 Rezultate

Algoritmii pentru fiecare sistem de markeri au fost executați pe un sistem Linux 18.04 instalat pe un PC Notebook HP ProBook 440 G4 cu următoarele specificații: Intel Core

i7-7500U Intel HD Graphics 620, 2,7 GHz, până la 3,5 GHz cu tehnologia Intel Turbo Boost, 4 MB cache L3.

3.3.2.1 Variația distanței

Setul de date conține imagini în care distanța dintre marker și cameră este cuprinsă între 50 și 250 cm, iar dimensiunea markerilor este de 10 cm x 10 cm. În cazul imaginilor în mișcare, am observat că CCTag a avut cea mai mare rată de detecție pentru distanțe de 50 și 100 cm, cu un procent de 74,64% și, respectiv, 56,14% de rezultate pozitive corecte. În plus, am observat că la distanța de 250 cm, nu am reușit să obținem o performanță de 100% ca în cazul ArUco și AprilTag. Prin urmare, putem concluziona că distanța maximă de detectare a markerilor CCTag este de cel mult 200 cm între cameră și marker, la o dimensiune a markerului de 10 cm x 10 cm.

3.3.2.2 Variația intensității luminii

Pentru a determina performanța celor trei sisteme ținând cont de variațiile intensității luminii, am analizat două situații, prima cu lumina artificială din laborator aprinsă, numită lumină (325 lx), iar a doua fără lumină artificială, numită întuneric (175 lx). Având în vedere rezultatele bazate pe distanță, am decis că nu mai este necesar să rulăm și să afișăm rezultatele pentru imaginile fixe.

Am observat că a existat o mică diferență între condițiile de întuneric și cele de lumină pe toate cele 3 sisteme, cu o constatare surprinzătoare: CCTag a avut o rată de detecție mai mare în condiții de întuneric; și o rată de detecție mai mică în condiții de lumină. Acest lucru se datorează faptului că am pornit de la o expunere mică de 1000 de microsecunde și am ajuns până la 18 000 μ s. Mai exact, expunerile lungi de 15 000 – 18 000 μ s aduc un dezavantaj pentru imaginile luminoase și un avantaj pentru cele întunecate în sistemul CCTag.

3.3.2.3 Variația vitezei unghiulare

În această subsecțiune, ne concentrăm doar pe imaginile realizate în timp ce camera se deplasa cu ajutorul servomotorului la cinci viteze unghiulare diferite: 45, 60, 90, 135, 180 $^{\circ}$ /s; cu 840 de imagini pentru fiecare viteză unghiulară.

Ceea ce am observat din rezultate a fost că, pe măsură ce viteza unghiulară crește, rata de detectare a tuturor markerilor scade, ceea ce este de așteptat deoarece, cu cât viteza unghiulară este mai mare, cu atât imaginile devin mai neclare. Al doilea lucru pe

care l-am observat este că, pe parcursul tuturor rulărilor, markerii și-au păstrat locul în ierarhie, astfel că AprilTag a avut cea mai mică rată de detecție dintre toți trei, urmat de ArUco și CCTag. Primul loc cu cea mai bună rată de detecție a fost CCTag. Dacă la viteza unghiulară de 45 °/s scorurile privind numărul de markeri detectați au fost relativ apropiate (CCTag = 670, ArUco = 645, AprilTag = 616), la viteza unghiulară de 180 °/s au existat disparități mai mari (CCTag = 323, ArUco = 246, AprilTag = 185). În ceea ce privește acest din urmă scenariu, se poate observa că CCTag a detectat aproape de două ori mai mult decât AprilTag.

3.3.2.4 Rezistența la ocluzie

Pentru a testa rezistența la ocluzie, am făcut o fotografie în care markerul a fost acoperit alternativ în jumătatea stângă, dreaptă, superioară și inferioară cu un pătrat albastru. Am observat că AprilTag și ArUco nu au fost imuni la ocluzie: atunci când un obiect a fost plasat în fața markerului, algoritmul a încetat să detecteze markerul. Dimpotrivă, CCTag a reușit să detecteze cu succes 3 din 4 imagini.

Acest lucru ne-a făcut să concluzionăm că CCTag este rezistent la ocluzie. În plus, am identificat acest lucru și ca fiind motivul pentru care a avut cea mai mare rată de detecție în testele anterioare pe imagini în mișcare. Atunci când imaginile sunt mișcate, nu mai este vizibil întregul marker, ci doar o parte din el, ca și cum ar fi fost ascuns în spatele unui obiect.

3.3.2.5 Performanța algoritmilor

Pentru a analiza performanța algoritmilor, am pornit un ceas chiar înainte de a apela funcția de detectare și l-am oprit imediat după aceea. Am rulat algoritmiile celor trei sisteme pe setul de date fixe separat de setul de date în mișcare și am calculat media timpului necesar pentru ca algoritmiile să detecteze dacă există sau nu un marker într-o imagine.

Sistemul de marcăre cu o performanță remarcabilă de 2 ms a fost ArUco, pe care l-am folosit apoi ca punct de referință pentru celelalte două sisteme. Împărțind timpul de execuție al sistemului AprilTag la timpul de execuție al sistemului ArUco, am ajuns la concluzia că AprilTag a fost de aproximativ 5 ori mai lent decât ArUco în cazul imaginilor statice și de aproximativ 4 ori mai lent în cazul celor în mișcare. CCTag a avut o performanță destul de scăzută, fiind de 58 și respectiv 55 de ori mai lent decât ArUco.

3.4 Urmărirea de către drone a simbolurilor 2D

În această secțiune, propunem și testăm o nouă platformă de dronă quadrotor cu costuri reduse, capabilă de asistare vizuală cu ajutorul unei camere de bord plasate pe un gimbal activ și calcul la bord.

3.4.1 Soluția propusă

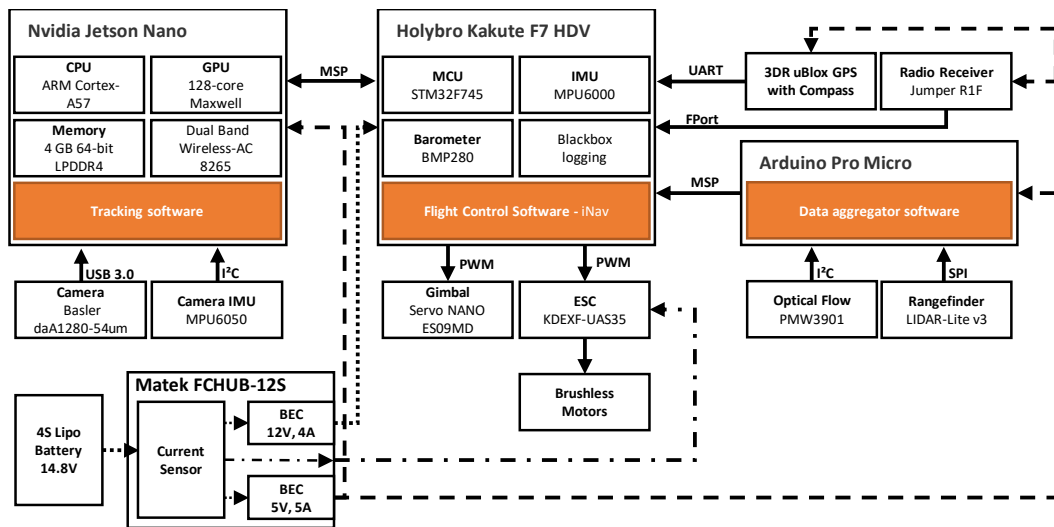


Figura 3.4 Arhitectura hardware. În această figură, se vede clar dreptunghiurile care reprezintă componentele hardware sau PCB-uri (printed circuite imprimare) care conțin mai multe componente, iar cele umplute cu portocaliu reprezintă modulele software, liniile punctate reprezintă conexiunile de alimentare, iar liniile continue reprezintă conexiunile digitale de comunicație digitală.

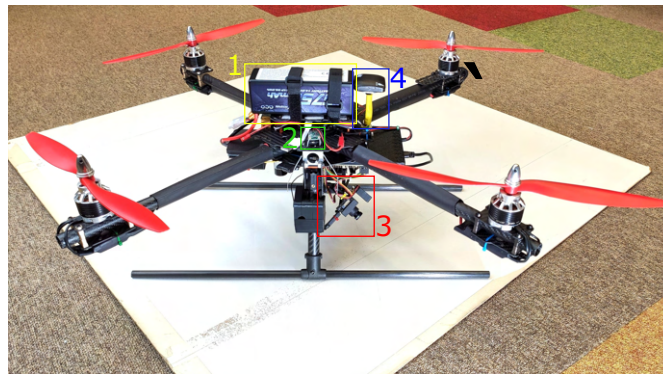


Figura 3.5 Vedere laterală și inferioară a UAV-ului. Legendă: (1) Baterie, (2) Receptor radio RC și telemetrie, (3) Gimbal și cameră, (4) GPS Receptor, Arduino, senzor de flux optic, Lidar de înălțime, placă NVIDIA Jetson

UAV-ul proiectat pentru această lucrare este un quadcopter personalizat, construit pe o structură de carbon. Cadru din fibră de carbon cu o lungime de 70 cm, care este prezentat în Fig. 3.5. Acesta este echipat cu 4 motoare fără perii, KDE Direct 2814XF, care antrenează motoare de plastic de 12 inch elice de plastic, o cameră cu cardan, un

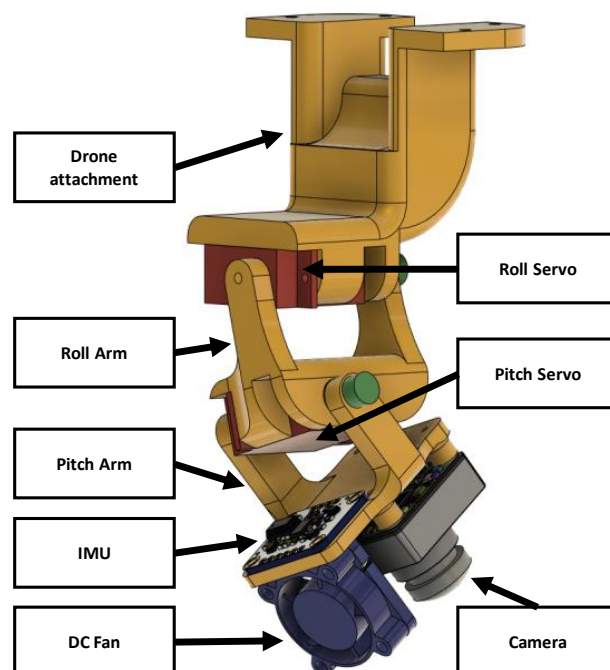


Figura 3.6 Ansamblul cardanic. Acesta este compus din două mini servomotoare RC, camera, IMU și un ventilator de răcire pentru cameră. Toate componentele componente sunt legate între ele prin intermediul a trei piese tipărite 3D.

computer de bord, un sistem de control al zborului și alți senzori, cum ar fi GPS, IMU, telemetru și flux optic. Pentru a alimenta toate aceste componente am folosit o baterie Lipo de la Gens, care este o baterie 4S cu 6750 mAh autonomie și o rată de descărcare de 70C.

Software-ul de control al zborului pe care l-am ales a fost INAV, o soluție open-software pentru controlul dronelor multirotor, care este un fork al software-ului Cleanflight. În comparație cu celelalte programe, INAV este construit cu un accent puternic pe GPS și navigarea prin puncte de parcurs. INAV este pe deplin compatibil cu controlerul de zbor pe care l-am ales și cu INAV Configurator. De asemenea, acesta ne oferă acces la modificarea oricărei setări fără a fi nevoie să reprogramăm controlerul.

Prezentăm arhitectura hardware în Fig. 3.4. Am construit drona în jurul a trei componente principale: Nvidia Jetson Nano pentru detecția vizuală și urmărire, Holybro Kakute F7 HDV pentru controlul zborului și Arduino Pro Micro pentru agregarea datelor de la senzori.

În Fig. 3.6 se află ansamblul gimbal. Partea mecanică este construită din componente tipărite 3D proiectate de noi. Pentru a acționa brațele de gimbal am folosit două servomotoare. Pe capul acestui gimbal am montat o cameră monocromă, model Basler daA1280-54um. Această cameră a fost aleasă pentru obturatorul său global, care ne ajută să reducem numărul de imagini neclare.

În cele din urmă, am creat o platformă de testare pentru algoritmi noștri cu un cost total de 1400 de euro.

3.4.2 Procesare vizuală

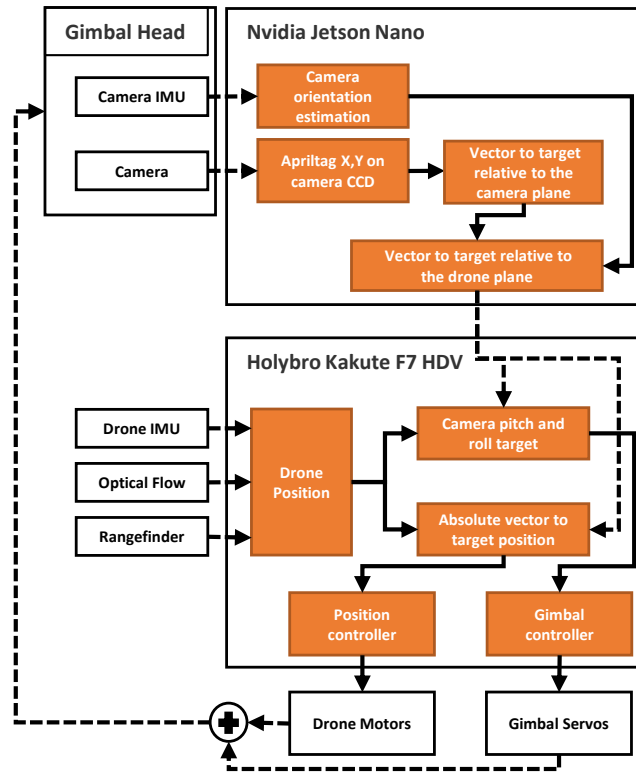


Figura 3.7 Fluxul datelor

După cum se poate observa în Fig. 3.7 avem două blocuri mari în care procesăm informațiile provenite de la cameră și senzori. Primul bloc este placa de dezvoltare Nvidia Jetson. În primul rând, luăm imagini de la camera Basler la o rezoluție de 1280x960 pixeli. Pentru fiecare cadru, aplicăm algoritmul de detectare a markerilor Apriltag 2[113]. Dacă markerul a fost găsit, generăm un vector de poziție al markerului în raport cu planul camerei. În același timp, citim valorile de la IMU al camerei, peste care aplicăm un filtru complementar pentru a obține orientarea camerei în spațiu. Astfel, cu aceste două informații, știm cu mare precizie care a fost poziția camerei în momentul realizării cadrului respectiv și putem construi vectorul către țintă în raport cu planul dronei.

Al doilea bloc reprezentat de placa Kakute F7 HDV care rulează software-ul de control al zborului INAV 2.5 [114], generează comenzile pentru motoarele dronei pentru a se deplasa spre țintă, precum și comenzile pentru servomotoarele gimbalului, astfel încât camera să mențină ținta în prim plan. În acest moment, cunoaștem atât poziția țintei în

raport cu drona, cât și poziția estimată a dronei, aceasta din urmă fiind calculată de către controlul de zbor al software-ului INAV, care preia date de la senzorii dronei, cum ar fi IMU, senzorul de flux optic și telemetrul. Cu aceste două informații, se calculează comenzile pentru controlerul de poziție al dronei și al cardanului.

3.4.3 Experimente

Pentru a testa platforma noastră, am pregătit o sarcină în care drona trebuie să plutească deasupra unei ținte folosind doar feedback vizual și calculul de la bord. La sol, am imprimat un marker fiducial AprilTag [113, 115] care drona folosește ca țintă. Pentru procesarea imaginilor, am utilizat biblioteca AprilTag care rulează pe Jetson Nano. Configurația experimentală este prezentată în Figura 3.8. Pentru inițierea experimentului și din motive de siguranță, s-a folosit drona are o comandă manuală cu ajutorul telecomenzii.



Figura 3.8 Drona care zboară în biroul nostru. Imaginea a fost realizată după ce a fost achiziționată țigeta și camera a fost orientată automat spre țintă.

Drona decolează sub control manual și este condusă manual deasupra țintă. Odată ce sistemul vizual detectează marcajul de referință, drona începe zborul autonom, controlând înălțimea dronei (1,4 m), poziția dronei și camera de luat vederi. orientarea gimbalului. Am evaluat fiabilitatea întregului sistem pe parcursul aproximativ 80 de minute de experimente în care drona a rămas stabilă deasupra ținta. Sunt observate mici oscilații de mai puțin de 10 cm datorită zgomotului inerent al sistemului. Diferite perturbații sunt aplicate prin aplicarea manuală a împingând manual drona sau trimițând comenzi de mișcare prin intermediul telecomenzii radio. În plus, am deplasat manual ținta pe sol pentru a testa capacitatea dronei de a se capacitatea dronei de a menține blocarea.

Pentru a testa răspunsul în trepte al sistemului, am plasat două markeri la aproximativ 80 cm. unul de celălalt și le-am acoperit manual alternativ, forțând drona să se deplaseze de

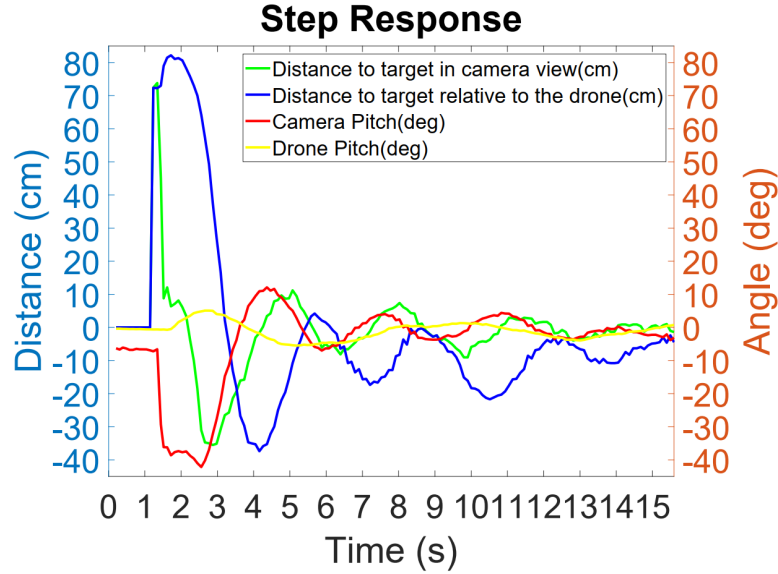


Figura 3.9 Pasul răspunsului.

la o poziție la cealaltă. Datele colectate în cadrul unei astfel de mișcări sunt prezentate în Figura 3.9. Gimbalul se orientează rapid către noua țintă și menține fixarea țintei indiferent de atitudinea dronei (drona trebuie să se încline spre țintă pentru a avansa, orientând astfel camera foto departe de țintă).

3.5 Concluzii și lucrări ulterioare

Proiectăm, implementăm și evaluăm o nouă platformă de dronă reproductibilă, cu costuri reduse (1400 EUR), capabilă de zbor autonom, cu o cameră cardanică și viziune la bord. Am demonstrat performanțele sale în zbor în cadrul unui experiment de urmărire a țintelor. Comparativ cu ofertele comerciale, utilizatorul are control total asupra hardware-ului și software-ului.

După ce am comparat performanța celor trei sisteme de markeri fiduciali folosind criterii multiple, putem concluziona că CCTag poate fi utilizat cu încredere în detecțiile în timp real și în situații care implică ocluzie. Cu toate acestea, ArUco este o alternativă mai bună atunci când se ia în considerare doar viteza de detecție. Acesta din urmă a obținut cel mai bun timp de funcționare de numai 2 ms. AprilTag a avut, de asemenea, performanțe bune în ceea ce privește diferiți parametri, dar nu la fel de bune ca CCTag și ArUco. De asemenea, trebuie remarcat faptul că nici AprilTag, nici ArUco nu sunt rezistente la ocluzie: dacă un obiect acoperă o parte din markerul fiducial, algoritmi nu mai detectează markerul.

CCTag este un sistem de markeri fiduciali care are proprietăți speciale, cum ar fi o rată de detecție remarcabilă pe imagini neclare sau rezistența la ocluzie. Cu toate acestea, performanța algoritmului în ceea ce privește timpul de execuție este destul de scăzută. Prin urmare, lucrările viitoare se vor concentra pe o înțelegere mai profundă a algoritmului care stă la baza sistemului de marcare fiducială CCTag, cu scopul de a îmbunătăți performanțele sale în ceea ce privește timpul de execuție.

Capitolul 4

Poziționare omniprezentă

4.1 Introducere

Tehnologia de bandă ultralargă (UWB) a cunoscut un reviriment în ultimii ani, în special pentru capacitățile sale de mare precizie în ceea ce privește distanța și localizarea. Se estimează că, până în 2025, vor fi livrate peste 1 miliard de dolari în dispozitive UWB și că, în următorii 5-10 ani, toate smartphone-urile vor avea capabilități UWB [116].

Sistemele de localizare bazate pe UWB constau, de obicei, dintr-un nod mobil care trebuie localizat, numit *tag*, și mai multe noduri fixe cu locații cunoscute, numite *ancore*, care comunică cu tag-ul și ajută la procesul de localizare. Localizarea bazată pe distanță este, fără îndoială, cea mai populară tehnică de localizare, deoarece oferă cea mai mare precizie și, cel puțin în sistemele care utilizează o distanță bidirecțională, nu este necesară sincronizarea ceasului nici între ancore și etichetă, nici între ancorele însele [117, 118].

Diferența de timp de sosire (TDOA) este o metodă alternativă de localizare care utilizează diferența dintre timpii de sosire a două pachete (de obicei, schimbate de către etichetă și două ancore) [119]. Prin calcularea TDOA pentru mai multe perechi de ancore, locația etichetei poate fi găsită la intersecția mai multor hiperbole [120].

În acest capitol, propunem, implementăm și evaluăm o nouă schemă eficientă de programare TDMA pentru localizarea TDOA, numită FlexTDOA. În FlexTDOA, nu există o singură ancoră de referință; în schimb, toate ancorele din sistem pot fi configurate pentru a transmite pe rând baliza de sincronizare. În mod similar, ordinea ancorelor care răspund la semnalul de semnalizare se schimbă în mod circular. Prin urmare, în funcție de nevoile sistemului, mai puține ancore decât numărul maxim disponibil pot răspunde la o baliză, ceea ce reduce erorile de deviere a ceasului cauzate de întârzierea dintre primul și ultimul răspuns, permițând în același timp tuturor ancorelor să participe la procesul de localizare. Prin urmare, FlexTDOA exploatează întreaga diversitate a

canalelor din mediul înconjurător, nu este supusă eșecurilor unei singure legături și poate menține erori mici chiar și în rețele mari.

Am implementat FlexTDOA într-un sistem de localizare bazat pe chipset-ul Qorvo DW3000 UWB [121]. Comparăm sistemul propus cu abordarea clasică TDOA și cu algoritmul standard de multilateralizare bazat pe distanță în cazul unei implementări de zece ancore și o etichetă într-un mediu de birou, atât în condiții de vizibilitate directă (LOS), cât și în condiții de ne-vizibilitate directă (NLOS). De asemenea, evaluăm impactul mai multor parametri asupra acurateții de localizare și a distanței, cum ar fi: numărul de răspunsuri pentru fiecare baliză de sincronizare pentru diferite rate de actualizare a sistemului, numărul de ancore din sistem și impactul modificării inițiatorului și/sau a ordinii răspunsurilor.

4.2 Starea subdomeniului

În cele ce urmează, vom trece în revistă cele mai importante lucrări anterioare privind localizarea TDOA, cu accent pe schemele TDOA *DL* TDOA care oferă cea mai bună scalabilitate multi-utilizator.

4.2.1 Localizare UWB scalabilă

În [122], este propus un sistem de localizare *DL* TDOA care implementează un protocol de sincronizare a ceasului cu o ancoră de referință. Autorii menționează că sistemul nu se adaptează la rețele mari de ancore. Într-o configurație cu opt ancore, sistemul a obținut o eroare medie pătratică (RMSE) de localizare 2D de 14 cm și o RMSE 3D de 28 cm. Într-o configurație comparabilă cu șapte ancore în LOS (dar pe o zonă de urmărire puțin mai mică decât cea din [122]), FlexTDOA a obținut o RMSE 2D de 7 cm și o RMSE 3D de 13.26 cm, deci de două ori mai mică decât cea din [122].

În citepelka2016s, autorii propun o schemă *DL* TDOA în care ancorele răspund doar la mesajul transmis anterior, în loc să răspundă la o singură baliză de sincronizare, ca în cazul nostru. Deși sunt denumite concurrent ranging, lucrările din [123, 124] implementează în esență schema *DL* TDOA clasică. În [125], este prezentat un sistem de localizare TDOA implementat utilizând dispozitive UWB denumit ATLAS. Un sistem de localizare numit VULoc care urmează principiile *DL* TDOA a fost propus recent în [126]. Poate că cea mai semnificativă diferență dintre VULoc și FlexTDOA este că noi propunem, de asemenea, o schemă TDMA flexibilă și foarte ușor de configurat pentru transmisiunile de ancorare, în timp ce în [126] se menționează că VULoc nu are nevoie de un protocol de programare deoarece etichetele sunt pasive.

Deși nu implementează o schemă DL TDOA, lucrarea din [127] propune o schemă scalabilă de localizare UL TDOA numită TALLA. Sincronizarea de înaltă precizie necesară pentru localizarea TDOA este menținută de un server.

O altă contribuție importantă a lucrării noastre este faptul că am evaluat performanța unui sistem de localizare DL TDOA în condiții NLOS *experimental*, deoarece majoritatea lucrărilor anterioare fie iau în considerare doar scenarii LOS, fie își bazează observațiile pe date simulate. În [126], sistemul TDOA propus este, de asemenea, evaluat în condiții NLOS și este propusă o metodă de selectare a ancorei bazată pe un parametru de încredere ales empiric.

În [128], autorii propun o strategie de plasare a senzorilor pentru medii aglomerate, care este validată prin date experimentale. Un sistem de localizare UL TDOA care ia în considerare condițiile NLOS a fost propus și evaluat experimental [129]. În [130], autorii propun un algoritm de selectare a perechilor de ancore în cadrul unui UL TDOA luând în considerare erorile cauzate de propagarea NLOS.

4.2.2 Corecția decalajului de ceas

În schema noastră TDOA, evităm urmărirea parametrilor ceasului folosind filtre Kalman, ca în lucrările anterioare [122, 131]. În schimb, corectăm decalajul relativ al ceasului între două dispozitive direct la receptor, utilizând funcția de estimare CFO a chipsetului DW3000. Metoda a fost descrisă în [132], iar eroarea sistematică a fost derivată pentru single-sided two-way ranging (SS-TWR), A-TDOA și SS-TWR cu extindere A-TDOA. Metoda a fost evaluată experimental, dar numai pentru schemele TWR. O corecție CFO similară este evaluată pentru o schemă TDOA în [133]. Cu toate acestea, schema TDOA propusă se bazează pe metoda alternativă TWR pe două fețe (AltDS-TWR), în care eticheta este activă, ceea ce este diferit de schemele DL TDOA evaluate în lucrarea noastră.

4.3 Principii de bază

În această secțiune, prezentăm principiile de bază ale metodelor de localizare propuse în sistemul nostru. Pentru mai multe detalii aprofundate privind localizarea și distanța UWB, trimitem cititorul la lucrările [134, 135]. În secțiunile 4.3.1 și 4.3.2 explicăm cum se obțin măsurătorile de distanță și, respectiv, măsurătorile TDOA cu ajutorul dispozitivelor UWB. În secțiunea 4.3.3, descriem cele două abordări pe care le folosim pentru a rezolva sistemul de ecuații în vederea estimării locației utilizatorului: fie minimizarea celor mai mici pătrate între distanțele măsurate și cele calculate, fie un filtru Kalman extins (EKF).

În secțiunea 4.3.4, descriem schema de programare implementată în sistemul FlexTDOA de localizare propus.

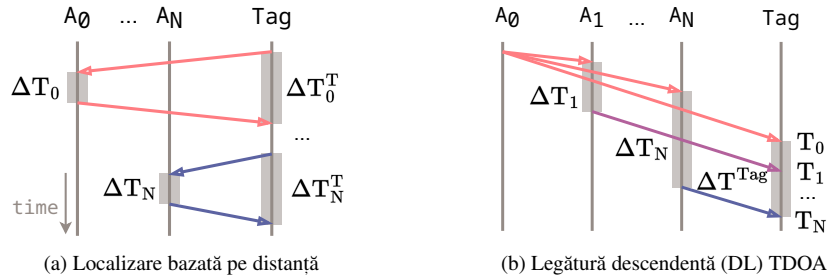


Figura 4.1 Localizare bazată pe TWR sau pe DL TDOA (perioadele de timp nu sunt la scară).

4.3.1 Intervalul de distanță bidirecțional

Localizarea bazată pe distanță utilizează distanțele dintre o țintă mobilă, numită etichetă, și ancorele cu locații cunoscute pentru a calcula locația etichetei la intersecția cercurilor (într-un spațiu 2D) sau a sferelor (într-un spațiu 3D) cu o rază egală cu distanțele dintre ancoră și etichetă și centrate pe ancore.

Pentru a evita sincronizarea ancorelor și a etichetei, distanțele sunt de obicei obținute folosind TWR prin schimbul a cel puțin două mesaje între etichetă și fiecare ancoră [134]. Am implementat varianta SS-TWR care utilizează două schimburi de mesaje între fiecare ancoră și etichetă, ilustrată în Figura 4.1a. Distanța măsurată între o etichetă și o ancoră A_i se obține astfel:

$$\tilde{d}_{TA_i} = c \cdot \frac{\Delta T_i^T - \Delta T_i}{2}, \quad (4.1)$$

unde c este viteza luminii. ΔT_i este timpul dintre sosirea solicitării etichetei la ancora A_i și transmiterea mesajului de răspuns de către ancoră, măsurat de către ancoră. În mod similar, ΔT_i^T reprezintă timpul dintre transmiterea cererii de către etichetă și sosirea răspunsului ancorei, măsurat de către etichetă.

Localizarea bazată pe SS-TWR (pe care o vom numi alternativ localizare TWR) este atractivă deoarece permite localizarea la nivel de centimetru și nu are nevoie de nicio sincronizare între dispozitive. Cu toate acestea, nu se adaptează bine la creșterea numărului de ancore și etichete, deoarece necesită schimburi de mesaje pe perechi între fiecare ancoră și fiecare etichetă din sistem.

4.3.2 Diferența de timp de sosire

O tehnică alternativă de localizare utilizează diferența de timp *diferența* dintre sosirea a două mesaje fie la un dispozitiv, fie la mai multe dispozitive sincronizate cu ceasul[118].

Pentru a evita sincronizarea ancorelor, folosim o variantă DL TDOA cu ancore de referință și de răspuns utilizate anterior în [122, 131, 123, 124]. Schema este ilustrată în Figura 4.1b. Ancora A_0 este inițiatorul și transmite un mesaj de difuzare, recepționat de etichetă la momentul T_0 . Ancorele de la A_1 la A_N primesc mesajul și apoi așteaptă o perioadă ΔT_i care include timpul de procesare și o întârziere necesară pentru a evita suprapunerea transmisiunilor de la ancore succesive. Eticheta primește răspunsurile la intervale de timp cuprinse între T_1 și T_N .

Pentru cazul general în care A_i este inițiatorul și A_j este respondentul, să notăm cu $\Delta T_{ij} \triangleq T_j - T_i$ diferența dintre momentul în care eticheta primește răspunsul (T_j) și momentul în care eticheta primește cererea (T_i). Pentru a obține TDOA estimat între etichetă și ancorele A_i și A_j , notat cu $\tilde{t}_{TA_iA_j}$, trebuie să scădem timpul de procesare ΔT_j și TOF-ul între ancorele A_i și A_j (notat cu t_{ij}) din diferența de timestamp ΔT_{ij} :

$$\tilde{t}_{TA_iA_j} = T_j - T_i - \Delta T_j - t_{ij}, \quad (4.2)$$

TOF t_{ij} este de obicei cunoscut, deoarece ancorele sunt plasate în locații fixe, cunoscute.

4.3.3 Algoritmi de localizare

Până acum, am discutat principiile de bază pentru a obține intervalele sau diferențele de intervale între ancore și etichetă. Scopul nostru este de a estima locația utilizatorului, astfel că am implementat doi algoritmi de localizare, fiecare capabil să funcționeze fie cu date TWR, fie cu date TDOA, fiecare dintre ei fiind adaptat la nevoi diferite.

Primul algoritm, AlgMin, rezolvă problema de localizare pentru o serie de măsurători consecutive folosind minimizarea erorii pătrate. Acest algoritm nu urmărește locația utilizatorului și nici nu netezește estimările de localizare și, prin urmare, este potrivit pentru a evalua impactul mai multor parametri (de exemplu, numărul de răspunsuri sau de ancore) asupra preciziei localizării.

Al doilea algoritm, AlgEKF, rezolvă problema localizării folosind un EKF, prin actualizarea incrementală a locației cu fiecare măsurătoare suplimentară disponibilă. Această abordare este avantajoasă, deoarece nu trebuie să așteptăm numărul minim de măsurători (patru în cazul localizării TWR și cinci în cazul localizării TDOA) pentru a actualiza locația etichetei. Cu toate acestea, ea netezește estimările de localizare și ascunde impac-

tul măsurătorilor zgomotoase, motiv pentru care o folosim numai atunci când comparăm mai multe configurații care generează un număr diferit de ecuații pe interval de timp în secțiunea 4.5.3.

4.3.4 Programarea timpilor

În abordarea TDOA "clasică", există o singură ancoră de referință desemnată care transmite mesajul de sincronizare, la care restul ancorelor răspund într-o ordine prestabilită. În schimb, noi propunem, implementăm și evaluăm o abordare *flexibilă* schemă de programare TDOA în care toate ancorele din sistem pot juca rolul de inițiator și în care ordinea răspunsurilor se poate schimba.

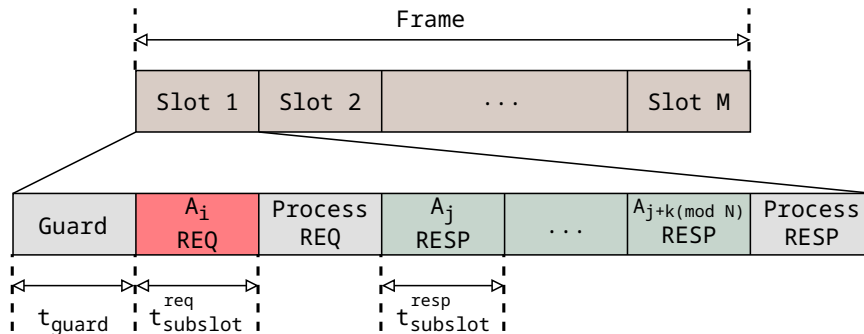


Figura 4.2 Program TDMA utilizat atât pentru localizarea TDOA, cât și pentru localizarea TWR. Fiecare slot dintr-un cadru aparține unui nod care este inițiatorul în acel slot și care decide ce noduri K să interogheze (în funcție de schema curentă)..

Propunem și implementăm o schemă de acces multiplu cu diviziune în timp (TDMA) prezentată în Figura 4.2, care poate fi configurată fie pentru localizarea TWR, fie pentru localizarea TDOA. În acest moment, nu facem diferențe între ancore și etichete și, în schimb, le considerăm pe toate nodurile participante în mod egal. Distincția se va face în funcție de metoda de localizare implementată.

Schema TDMA este organizată în *sloturi de timp*, care sunt compuse dintr-un mesaj de difuzare trimis de un nod inițiator, pe care îl vom numi *cerere*, și K răspunsuri de la alte noduri, unde $K < N$ și N este numărul de noduri din sistem. Fiecare răspuns va furniza o măsurătoare TWR între nodul inițiator și nodul care răspunde și o măsurătoare TDOA pentru fiecare dintre celelalte noduri care ascultă schimbul. În cadrul unui interval de timp, fiecare transmisie efectuată de un nod are loc într-un *subslot* cu durata t_{subslot} . La începutul unui interval de timp, există un timp de gardă, urmat de cererea nodului inițiator. Cererea include numărul de noduri care vor răspunde, ID-ul acestora și ordinea răspunsului. Toate nodurile de ascultare din sistem procesează cererea. În cazul în care inițiatorul a solicitat un răspuns de la nodul de ascultare din subslot cu indicele

$k \in \{1, \dots, K\}$, nodul va aștepta o perioadă de $(k - 1) \times t_{\text{subslot}}$ și apoi va răspunde. În ultima parte a unui interval de timp, inițiatorul procesează răspunsurile.

Sloturile de timp sunt organizate în cadre (Figura 4.2). Fiecare cadru conține M intervale de timp, fiecare dintre acestea fiind atribuit unuia dintre noduri (ancore sau etichete). Pentru a configura schema TDMA în vederea efectuării localizării TWR, tag-ul va fi setat ca inițiator în toate sloturile, iar ancorele vor fi respondenții. Într-un interval de timp cu K răspunsuri, eticheta obține K măsurători brute de distanță care sunt introduse în sistemul de multilaterare pentru a estima locația etichetei.

Pentru a efectua localizarea DL TDOA, numai ancorele vor fi inițiatori, interogând alte ancore, în timp ce eticheta va fi un ascultător pasiv. În funcție de modul în care alegem inițiatorii și respondenții, putem obține patru variante de localizare TDOA:

- *Inițiator fix, respondenți fixi (FI-FR)* sau TDOA “clasică”, care are o singură ancoră inițială și toate celelalte ancore răspund într-o ordine fixă în funcție de indexul lor.
- *Inițiator fix, respondenți schimbători (FI-CR)*, care are, de asemenea, o singură ancoră inițială, dar alte ancore răspund într-o ordine ciclică.
- *Inițiator schimbător, respondenți fixi (CI-FR)*, care are mai multe ancore inițiale, iar toate celelalte ancore răspund într-o ordine fixă.
- *Inițiator schimbător, respondenți schimbători (CI-CR)*, care are mai multe ancore inițiale, dar alte ancore răspund într-o ordine ciclică. Această metodă este opusă, dezvoltată și validată de autorul tezei.

Observăm că schema TDMA permite, de asemenea, ancorelor să localizeze *themselves* folosind TWR.

4.4 Metodologie de evaluare

În această secțiune, prezentăm sistemul de localizare utilizat pentru a evalua algoritmi TWR și TDOA. În secțiunea 4.4.1, descriem hardware-ul utilizat; în secțiunea 4.4.2, prezentăm setările utilizate pentru radioul UWB, algoritmul de programare și EKF. În secțiunea 4.4.3, descriem mediul în care am efectuat măsurătorile și amplasarea ancorelor.

4.4.1 Sistemul fizic

Pentru evaluarea experimentală, am proiectat și fabricat propriul nostru nod UWB, prezentat în Figura 4.3, folosind transceiverul wireless Qorvo DWM3000 [121], care implementează standardul IEEE 802.15.4 [136].

În centrul nodului UWB se află un microcontroller STM32F429ZIT6 bazat pe Arm Cortex-M4 [137]. Nodul UWB este alimentat de o singură baterie reîncărcabilă Li-ion care asigură o autonomie de peste 15 ore.

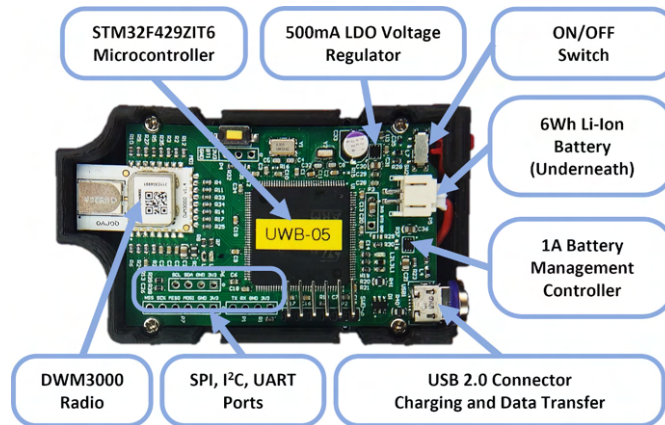


Figura 4.3 Nod UWB construit la comandă: un nod UWB hardware și software finalizat, alimentat cu baterii și capabil să expună informații privind distanța prin mai multe interfețe de comunicare serială.

4.4.2 Setările de sistem

Am configurat transceiverul UWB pentru a funcționa pe canalul 5 (6.5 GHz) cu o lungime de preambul de 128 de simboluri, o rată de date de 6.8 Mb/s și o frecvență de repetiție a impulsurilor de 64 MHz. Durata unui interval de timp în schema TDMA este prezentată în Figura 4.2.

$$t_{TS} = t_{\text{guard}} + t_{\text{subslot}}^{\text{req}} + t_{\text{process}}^{\text{req}} + K * t_{\text{subslot}}^{\text{resp}} + t_{\text{process}}^{\text{resp}} \quad (4.3)$$

Tabela 4.1 arată durata unui interval de timp pentru fiecare număr de respondenți.

Tabela 4.1 Durata unui interval de timp (t_{TS}) pentru fiecare număr de respondenți K.

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{TS}(\text{ms})$	3.35	4.20	5.05	5.90	6.75	7.60	8.45	9.30	10.15

Pentru ambele filtre EKF (bazate pe măsurătorile TWR și TDOA) am ales o abatere standard a incertitudinii modelului de $\sigma_Q^2 = 100 \text{ cm}^2$, care ia în considerare mișcarea

etichetei între măsurători și presupune o viteză maximă a etichetei de 10 cm/s. Am ales o deviație standard de $\sigma_R^2 = 10 \text{ cm}^2$ pentru zgomotul de măsurare, care s-a bazat pe zgomotul de măsurare obținut în timpul experimentelor.

Pentru filtrul EKF utilizat pentru autocalizarea ancorelor, am folosit $\sigma_Q^2 = 1 \text{ cm}^2$ deoarece ancorele sunt statice. Locația ancorelor este determinată o singură dată, la începutul experimentelor, și menținută fixă ulterior.

4.4.3 Mediul și amplasarea ancorelor



Figura 4.4 Office setup.

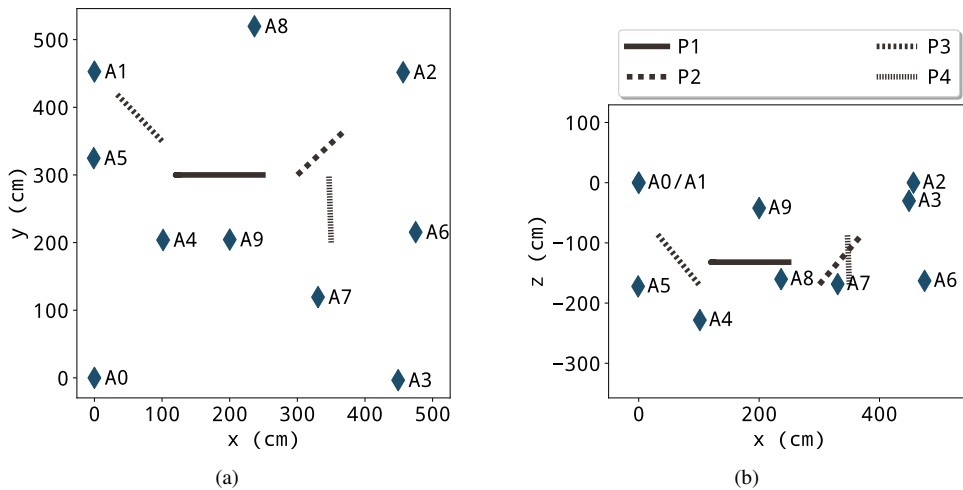


Figura 4.5 Configurarea ancorelor și a plăcuței în planurile (a) xy și (b) xz . Ancorele sunt notate cu A_0 până la A_9 . Se evaluează precizia localizării în patru poziții ale dispozitivului de acționare liniară, de-a lungul căruia se deplasează eticheta, notate cu P1 până la P4.

Evaluăm sistemele de localizare în biroul prezentat în Figura 4.4. Amplasarea ancorelor 3D este prezentată mai clar în Figura 4.5. Cinci dintre ancore (de la A_0 la A_3 și A_9) sunt

fixate pe tavan cu ajutorul unor bare metalice, în timp ce restul ancorelor sunt plasate fie pe sol (A_4), fie pe mese (de la A_5 la A_8). Locația ancorelor este determinată cu ajutorul algoritmului de autocalizare descris în secțiunea 4.3.3 și validată cu ajutorul unui nivel cu laser și al unui telemetru cu laser, ambele cu o precizie la nivel de mm.

Pentru a măsura cu precizie locația reală (GT) al etichetei, am construit un actuator liniar electronic personalizat, prezentat în Figura 4.6.

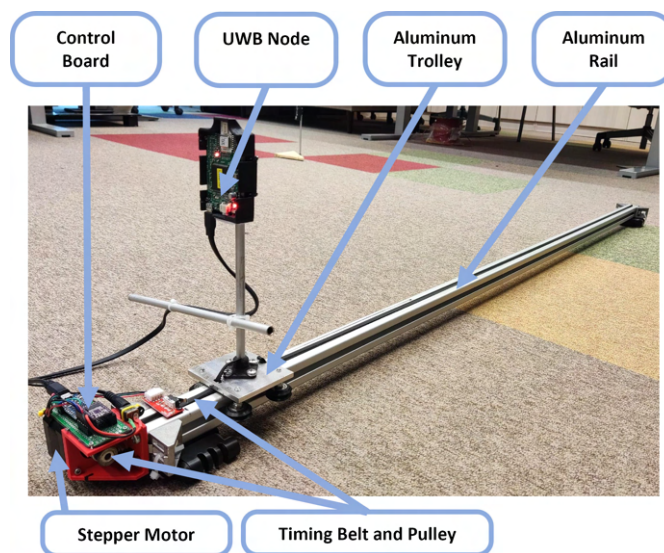


Figura 4.6 Adevărul de bază al dispozitivului de acționare liniară: Un cărucior din aluminiu care transportă eticheta și care întoarce prin USB poziția etichetei în raport cu punctul zero al dispozitivului de acționare.

4.5 Evaluarea parametrilor sistemului

În această secțiune, evaluăm impactul mai multor factori asupra preciziei localizării: ordinea de răspuns a unei ancore, numărul de răspunsuri într-un interval de timp pentru rata maximă de actualizare a sistemului de localizare și pentru rate de actualizare mai mici, precum și numărul de ancore disponibile. Evaluăm acești parametri pentru algoritmi de localizare care utilizează măsurători de distanță (obținute cu ajutorul TWR), pe care îi numim "localizare TWR", și pentru sistemul din FlexTDOA, numit simplu "localizare TDOA". Scopul comparației dintre localizarea TWR și TDOA este de a evalua impactul parametrilor sistemului atât al măsurătorilor de distanță, cât și al celor TDOA.

Cu excepția cazului în care se menționează în mod explicit, folosim algoritmul AlgMin descris în secțiunea 4.3.3 pentru a estima locația utilizatorului.

Vom folosi boxplots pentru a ilustra distribuțiile erorilor. Într-un boxplot, cum ar fi cele din Figura 4.7, caseta este trasată de la primul până la al treilea cuartil (sau, respectiv, percentilele de 25th și 75th), care este, de asemenea, cunoscut ca interval interquartil

(IQR). Boxplot-urile desenate pentru eşantioanele care pot lua valori negative și pozitive (de exemplu, erorile de distanță și TDOA) au mustăți care se extind de la percentilele 5th la percentilele 95th. Pentru erorile strict pozitive (de exemplu, erorile de localizare care se calculează ca distanță euclidiană între locația estimată și locația de bază), valorile de tip "whiskers" se extind de la 0th la 95th percentile. Raționamentul este că, atunci când reprezentăm grafic distribuția erorilor *absolute*, suntem interesați de valoarea minimă a erorii. Din motive de simplitate, ometem să reprezentăm grafic valorile aberante. Vom raporta frecvent percentila 95th, pe care o vom numi alternativ eroarea 95% (sau P₉₅) pe scurt, care reprezintă valoarea sub care se găsesc 95% din erori.

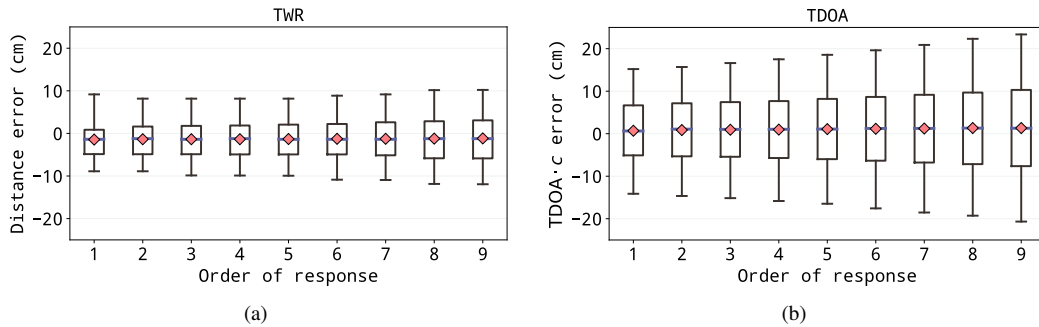


Figura 4.7 Distribuția erorilor (a) TWR și (b) TDOA (exprimate în cm folosind viteza luminii) în funcție de ordinea răspunsului agregat pe toate ancorele.

4.5.1 Ordine de răspuns

În primul rând, investigăm modul în care eroarea TWR sau TDOA *measurement* se modifică în funcție de ordinea răspunsului într-un interval de timp.

Pentru a evalua magnitudinea erorilor, efectuăm un experiment în care eticheta este menținută nemișcată pentru a evita orice pierdere de precizie datorată mișcării etichetei. Configurăm sistemul pentru a calcula fie distanța (utilizând TWR) dintre fiecare ancoră și etichetă, fie TDOA dintre etichetă și fiecare pereche de ancore. Utilizăm numărul maxim de ancore ($N = 10$) și de răspunsuri ($K = 9$ pentru TDOA și $K = 10$ pentru TWR).

Figura 4.7 prezintă distribuțiile de erori TWR și TDOA pentru fiecare ordin de răspuns.

4.5.2 Număr de răspunsuri

Deoarece eroarea de *măsurare* TWR și TDOA crește odată cu ordinea răspunsurilor în intervalul de timp, investigăm în ce măsură precizia *localizării* se modifică odată cu numărul de răspunsuri într-un interval de timp.

Pentru această evaluare, folosim $N = 10$ ancore, dar variem numărul de răspunsuri $K \in \{1, \dots, 9\}$ și lăsăm eticheta să se deplaseze pe cărucior.

Rezultatele par contra-intuitive, deoarece sistemul generează aproximativ 300 de măsurători pe secundă, ceea ce este suficient pentru a se apropia de performanța teoretică maximă, având în vedere viteza relativ mică a etichetei de 10 cm/s.

Figura 4.8 prezintă eroarea de localizare a localizării TWR și TDOA cu un număr variabil de răspunsuri.

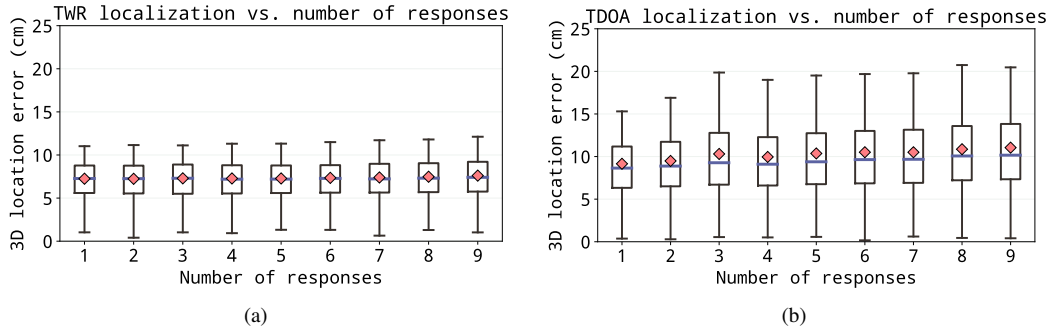


Figura 4.8 Eroarea de localizare a localizării TWR și TDOA în funcție de numărul de răspunsuri într-un slot. Eroarea crește la un număr mai mare de răspunsuri din cauza perioadei mai lungi dintre primul și ultimul răspuns, ceea ce sporește efectul erorii de estimare a deviației ceasului.

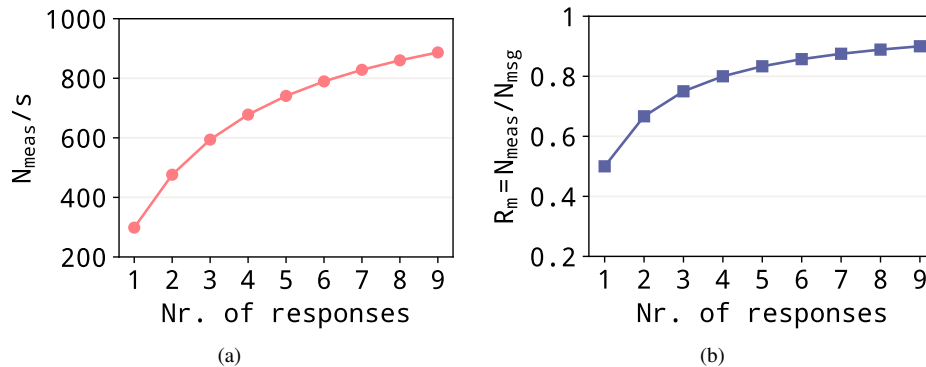


Figura 4.9 (a) Numărul de măsurători TWR/TDOA (N_{meas}) obținute pe secundă în funcție de numărul de răspunsuri (K) într-un slot și (b) raportul dintre N_{meas} și numărul de mesaje (N_{msg}) obținute pe secundă în funcție de K .

4.5.3 Număr de răspunsuri pentru diferite viteze de etichetă

Deși utilizarea unui singur răspuns pe interval de timp produce cea mai mică răspândire a erorilor, această configurație are cel puțin două dezavantaje. În primul rând, pe o perioadă de timp fixă, numărul de măsurători TDOA scade odată cu numărul de răspunsuri pe interval de timp, din cauza costurilor suplimentare adăugate de solicitarea inițiatorului. Această tendință este ilustrată în Figura 4.9a, care arată numărul de măsurători de distanță sau TDOA (N_{meas}) obținute pe secundă pentru $K \in 1, \dots, 9$ răspunsuri.

În al doilea rând, din același motiv, energia consumată de etichetă pentru a primi un anumit număr de TDOA crește pe măsură ce numărul de răspunsuri scade. Putem calcula raportul dintre numărul de măsurători și numărul de mesaje schimbate (N_{msg}) în aceeași perioadă de timp, ceea ce reprezintă un indicator al eficienței etichetei. Acest raport (notat cu R_m) este ilustrat în Figura 4.9b.

Evaluăm modul în care eroarea de localizare 3D se modifică cu K atunci când menținem constante, pe aceeași perioadă de timp, fie *timpul total de transmisie* (T_{TX}), fie *numărul de mesaje schimbate* (N_{msg}).

În plus, pentru a măsura efectul asupra erorilor unei etichete care se deplasează mai repede decât căruciorul nostru de referință, încetinim în mod deliberat sistemul nostru prin introducerea unor timpi de inactivitate. Pentru a realiza toate acestea, grupăm unul sau mai multe intervale de timp plus o parte din timpul de inactivitate necesar într-un cadru care are o lungime fixă pe care am numit-o perioadă de repetiție (Figura 4.10), numită $T_{\text{rep}} \in \{0,02,0,5,1\}$ s.

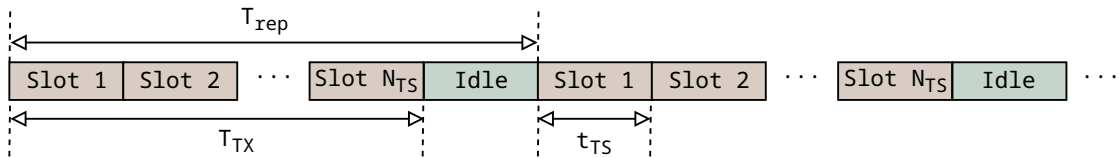


Figura 4.10 Pentru a evalua K optimă în diferite situații simulate (constrângeri de timp, constrângeri energetice și viteza etichetei), creăm cadre de localizare cu durată fixă T_{rep} , care conțin N_{TS} intervale de timp și timpul de inactivitate necesar. Fiecare interval de timp conține o cerere și K răspunsuri. Facem două experimente: (1) variem N_{TS} și K , menținând în același timp timpul total de emisie ($T_{\text{TX}} = N_{\text{TS}} * t_{\text{TS}}$) constant, simulând astfel constrângerile de timp, și (2) variem N_{TS} și K , dar menținem constant numărul total de mesaje schimbate ($N_{\text{msg}} = N_{\text{TS}} * (K + 1)$), simulând astfel constrângerile energetice. În ambele cazuri, variem timpul de inactivitate pentru a simula o etichetă care se deplasează la diferite viteze.

În ambele experimente, am folosit $N = 10$ ancore și am variat numărul de răspunsuri $K \in \{1,4,9\}$. Prin urmare, am urmărit să găsim *timpul de repetiție* (sau viteza de etichetare) pentru care mai multe măsurători TDOA compensează eroarea de deviere a ceasului cauzată de un număr mai mare de răspunsuri, fie atunci când avem un buget de timp fix (T_{TX}), fie un buget de energie fix (N_{msg}). Considerăm că numărul de mesaje primite este proporțional cu energia consumată de etichetă. Pentru evaluare, realizăm localizarea cu ajutorul algoritmului AlgEKF.

4.5.3.1 Același timp de transmisie

Mai întâi evaluăm modul în care se modifică eroarea de localizare 3D atunci când timpul total de transmisie (T_{TX}) este constant și numărul de răspunsuri variază. În toate cele trei experimente, în timpul fiecărei perioade de repetiție, avem aproximativ 10 ms de timp de transmisie, restul fiind timp de inactivitate, după cum se vede în tabelul 4.2.

Tabela 4.2 Configurație pentru experimente cu aproximativ același timp de transmisie (T_{TX}).

K	N_{TS}	N_{meas}	T_{TX} (ms)
9	1	9	10.15
4	2	8	11.80
1	3	3	10.05

Figura 4.11 prezintă distribuțiile erorilor pentru toate combinațiile de număr de răspunsuri și număr de măsurători TDOA pe perioadă de repetiție ((K, N_{meas})) și pentru toate perioadele de repetiție (T_{rep}). Prin urmare, la o viteză mare de etichetare sau la o rată de actualizare scăzută, este preferabil să se utilizeze un număr mare de răspunsuri.

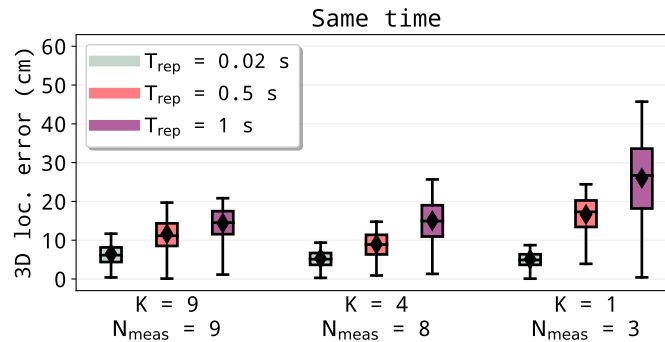


Figura 4.11 Distribuția erorilor pentru același timp de transmisie (T_{TX}). Prin creșterea T_{rep} , simulăm o viteză mai mare a etichetei.

4.5.3.2 Același număr de mesaje

Considerăm că energia consumată de etichetă este proporțională cu numărul de mesaje primite, notat cu N_{msg} .

După cum se vede în Tabelul 4.3, menținem numărul de mesaje (N_{msg}) fix în timpul fiecărei perioade de repetiție și variem timpul de repetiție ca în experimentul anterior. Figura 4.12 prezintă distribuțiile erorilor pentru un număr fix de mesaje schimbate. La fel ca în cazul anterior, pentru o rată de actualizare ridicată, $K = 1$ este numărul optim de răspunsuri. Cu toate acestea, pe măsură ce T_{rep} crește, este mai avantajos să existe mai multe TDOA decât să se minimizeze eroarea de deviere a ceasului.

Tabela 4.3 Configurare pentru experimente cu același număr de mesaje (N_{msg}).

K	N_{TS}	N_{meas}	N_{msg}
9	1	9	10
4	2	8	10
1	5	5	10

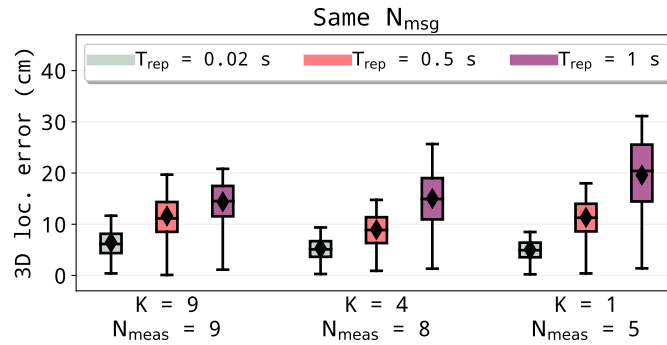


Figura 4.12 Distribuția erorilor pentru același număr de mesaje transmise (N_{msg}).

4.5.4 Număr de ancore

Evaluăm eroarea de localizare 3D în timp ce variem numărul de ancore care participă la localizare între 5 și 10.

Figura 4.13 prezintă eroarea de localizare 3D pentru localizarea TWR și TDOA atunci când variază numărul de ancore. Tendința generală este că eroarea de localizare scade cu cât mai multe ancore.

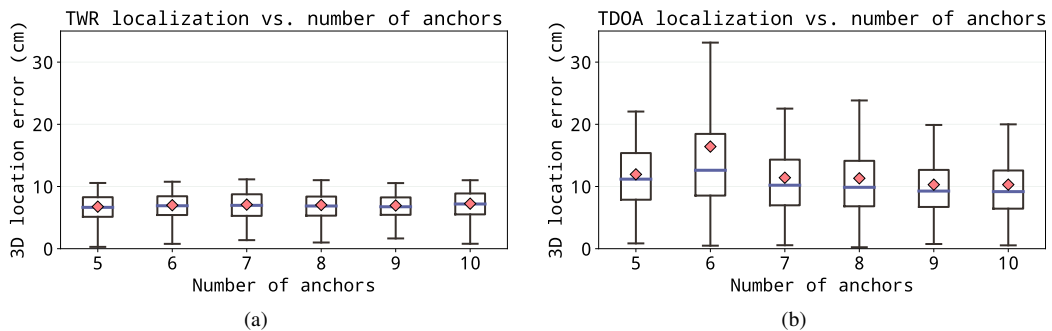


Figura 4.13 Eroarea de localizare 3D a localizării bazate pe distanță în funcție de numărul de dispozitive.

4.6 Comparație între metode de localizare

În această secțiune, comparăm precizia de localizare a metodelor de localizare luate în considerare. În secțiunea 4.6.1, comparăm mai întâi cele patru variante de localizare TDOA prezentate în secțiunea 4.3.4: FI-FR (sau classic TDOA), FI-CR, CI-FR și CI-CR (sau FlexTDOA). Scopul este de a evalua îmbunătățirea adusă de schimbarea doar a inițiatorului, doar a listei de respondenți sau ambele. În secțiunea 4.6.2, comparăm doar classic TDOA, FlexTDOA și localizarea TWR într-un scenariu NLOS. Pe parcursul acestei secțiuni, folosim algoritmul AlgMin pentru a estima locația utilizatorului.

4.6.1 Ordine a răspusurilor și/sau inițiator fix vs. schimbător

În această parte, evaluăm în ce măsură diversitatea canalelor îmbunătățește acuratețea localizării în condiții LOS. Evaluăm erorile de localizare pentru $(N, K) \in \{(5, 4), (7, 6), (10, 9)\}$ ¹ în trei poziții ale șinei pe care se deplasează eticheta, notate cu P1, P2 și P3 în Figura 4.5. Poziția P1 se află în centrul camerei, paralel cu planul XY, unde ar trebui să avem cea mai mare precizie. Pozițiile P2 și P3 sunt înclinate în raport cu planul XY, astfel încât să putem evalua erorile la mai multe înălțimi ale etichetei.

Figura 4.14 prezintă distribuțiile erorilor de localizare pentru classic TDOA (FI-FR) și FlexTDOA (CI-CR) agregate pe toate locațiile luate în considerare.

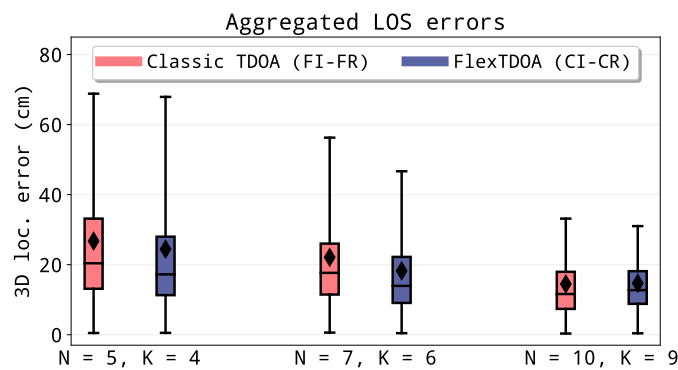


Figura 4.14 Distribuțiile erorilor de localizare ale classic TDOA (FI-FR) și FlexTDOA (CI-CR), în LOS, agregate pe toate pozițiile evaluate (P1, P2, P3).

4.6.2 Propagare NLOS

Obstacolele dintre nodurile unui sistem de localizare sunt frecvente în scenariile din viața reală. Prin urmare, în această parte, evaluăm performanța celor trei abordări de localizare luate în considerare până acum: bazată pe TWR, classic TDOA și FlexTDOA.

Am efectuat măsurători în două poziții ale șinei pe care se deplasează eticheta. Pozițiile sunt indicate prin P1 și P4 în Figura 4.5. La P1, am plasat un panou acoperit cu folie de aluminiu între ancoră A_1 și etichetă, indicat în Figura 4.15a. La P4, am plasat două astfel de panouri, prezentate în Figura 4.15b.

Efectuăm experimentele pentru $N \in \{5, 7, 10\}$ ancore. Pentru localizarea TDOA, folosim $K = N - 1$ răspunsuri, în timp ce pentru TWR folosim $K = N$ răspunsuri. Figura 4.16 prezintă distribuția erorilor de localizare 3D agregate pentru ambele locații. FlexTDOA obține erori mai mici decât classic TDOA în toate scenariile NLOS.

¹În fiecare caz, $K = N - 1$ astfel încât, chiar și pentru o ordine fixă de răspunsuri, toate ancorele să participe la procesul de localizare.

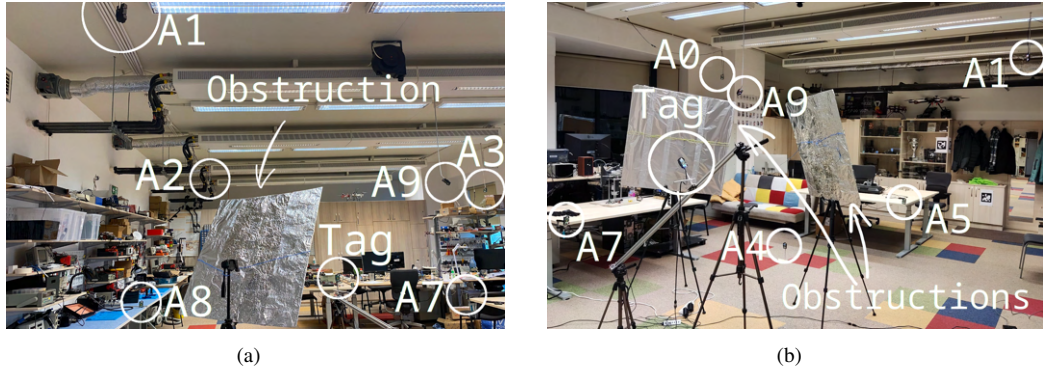


Figura 4.15 Fotografii ale instalațiilor utilizate pentru a obține măsurători NLOS. Configurația din Figura 4.15a, care corespunde poziției P1 a dispozitivului de acționare din Figura 4.5, include un panou de aluminiu plasat ca obstacol între ancora A_1 și etichetă. Configurația din Figura 4.15a, care corespunde poziției P4 a dispozitivului de acționare din Figura 4.5, include două panouri de aluminiu plasate ca obstacole. Cel mai din dreapta panou de aluminiu blochează LOS între etichetă și A_1 și parțial A_5 , în timp ce cel mai din stânga blochează anchor0 și anchor9. Există o interferență semnificativă datorată propagării prin mai multe căi pentru A_4 , A_7 și A_8 .

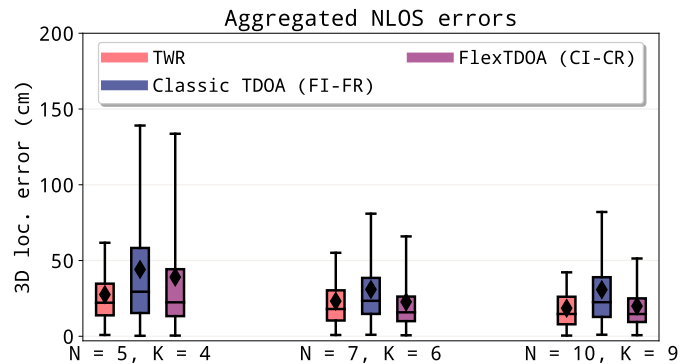


Figura 4.16 Distribuțiile erorilor de localizare în NLOS utilizând TWR, classic TDOA (FI-FR) și FlexTDOA (CI-CR), agregate pe ambele scenarii NLOS (la locația P1, cu o obstrucție, și la locația P4, cu două obstrucții).

În localizarea TDOA, în cazul în care obstacolul se află între ancora de inițiere și etichetă, se produce o eroare în toate TDOA din acel interval de timp. În acest caz, FlexTDOA este mai avantajoasă decât classic TDOA: prin schimbarea ancorei de inițiere, asigurăm o diversitate suficientă a canalelor pentru a îmbunătăți robustețea estimării localizării în cazul în care ancora de inițiere este obstrucționată.

4.7 Concluzii

În această lucrare, propunem, implementăm și evaluăm o nouă schemă de programare TDMA flexibilă pentru localizarea TDOA care exploatează pe deplin diversitatea canalelor din mediu. Am comparat metoda propusă, FlexTDOA, cu implementarea classic TDOA cu o ancoră de referință fixă și o listă de respondenți, precum și cu localizarea

pe bază de rază de acțiune într-o desfășurare de până la zece ancore și o etichetă într-un mediu de birou.

FlexTDOA obține erori de localizare mai mici decât metoda clasică TDOA în majoritatea scenariilor, cu și fără obstacole. În LOS, îmbunătățirea preciziei mediane aduse de FlexTDOA în comparație cu TDOA clasic este modestă (2–3 cm), deoarece inițiatorul în classic TDOA are deja o legătură bună cu eticheta. Cu toate acestea, robustețea adusă de diversitatea sporită este evidentă în NLOS, unde FlexTDOA reduce percentilul 95th al erorii de localizare cu până la 38% în comparație cu classic TDOA. În general, FlexTDOA obține o eroare mediană de localizare de 13–17 cm în LOS și de 15–22 cm atunci când una sau mai multe ancore se află în NLOS cu eticheta (eroarea depinde de numărul de ancore utilizate).

În timp ce localizarea TWR oferă cea mai mare precizie dintre toate metodele, aceasta are o scalabilitate slabă cu un număr tot mai mare de ancore și de respondenți. În schimb, FlexTDOA se poate adapta la un număr nelimitat de etichete.

În viitor, vom extinde sistemul propus la un mediu cu mai multe camere sau clădiri, ceea ce va necesita abordarea mai multor aspecte: perechi de ancore care nu se află în raza de comunicare, calibrarea sistemului (autocalizare) pentru rețeaua slab conectată și o schemă TDMA eficientă care reutilizează sloturile pentru nodurile aflate în afara razei de acțiune.

Capitolul 5

Navigara fără GPS

5.1 Introducere

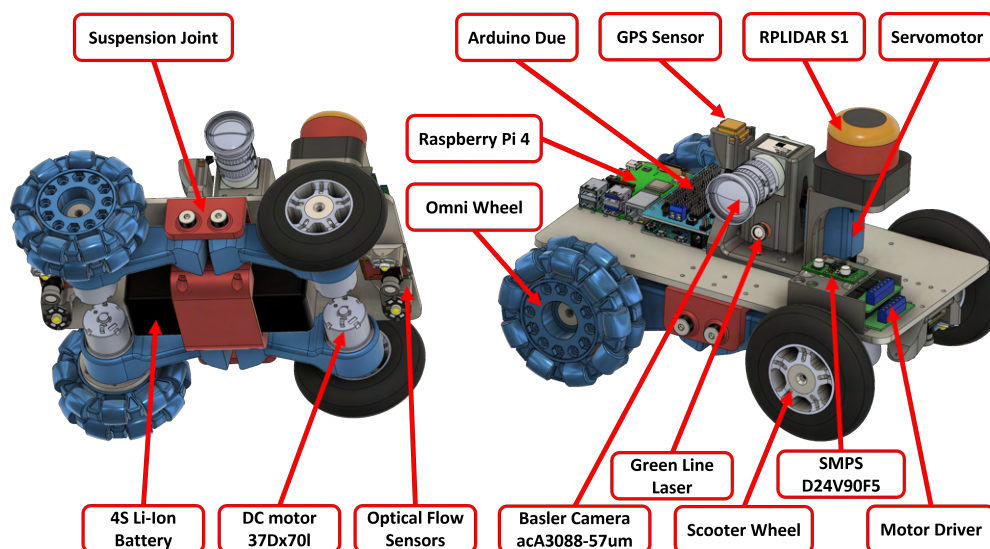
Industria transporturilor se confruntă cu un mediu de afaceri dificil, cu marje de profit reduse, ceea ce determină companiile să caute modalități de optimizare a fiecărui aspect al operațiunilor lor [138]. Una dintre cheltuielile majore pentru companiile de transport este lipsa verificărilor periodice ale anvelopelor și utilizarea neconformă a acestora, care poate duce la accidente grave, la creșterea consumului de combustibil și la poluarea mediului. Condițiile anvelopelor sunt reglementate în majoritatea țărilor și în UE [139], cu cerințe legale pentru canelurile anvelopelor. Cu toate acestea, verificările sunt supuse unor limitări, inclusiv dificultăți în ceea ce privește digitalizarea, urmărirea stării anvelopelor și achiziționarea de anvelope noi, ceea ce duce la o gestionare deficitară a parcului auto.

Pe baza acestor cerințe, în colaborare cu TSG România [140] am lucrat la un proiect de cercetare pentru îmbunătățirea calității transportului și reducerea pierderilor companiilor cauzate de starea defectuoasă a anvelopelor. Scopul proiectului a fost acela de a construi o soluție personalizată de măsurare a gradului de uzură a anvelopelor pentru a ajuta companiile de transport să optimizeze unele aspecte ale procesului de transport.

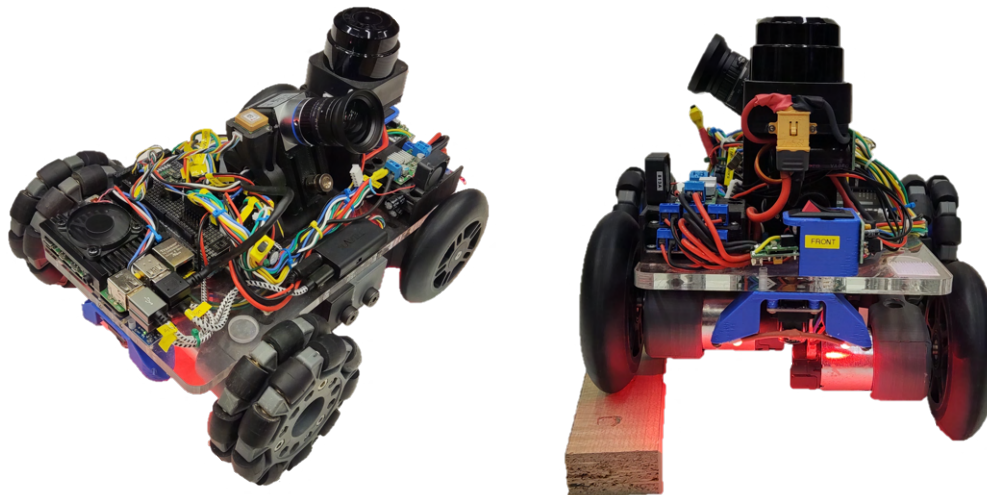
Soluția pe care am implementat-o a fost un robot terestru capabil să navigheze în mod autonom sub mașini și camioane într-o stație de parcare și să detecteze automat gradul de uzură a anvelopelor. Pentru ca acest robot să navigheze în mod autonom am implementat doi algoritmi: unul pentru navigare și celălalt pentru poziționarea robotului sub mașină. Acești algoritmi se bazează pe tehnicile LIDAR și, respectiv, pe o estimare a vitezei mortale bazată pe flux optic. Pentru a detecta gradul de uzură a anvelopelor, folosim metoda triangulației.

5.2 Sistemul fizic

Sistemul nostru de măsurare a uzurii roților constă dintr-un mic robot terestru prezentat în figura 5.1 împreună cu componentele sale principale. Robotul se numește TireBot și are o lungime de 28 cm, o lățime de 25 cm și o înălțime de 20 cm.



(a) Modelul 3D al robotului cu evidențierea părților principale.



(b) Robot complet asamblat, cu articulații de suspensie capabile să mențină tracțiunea pe drumuri accidentate.

Figura 5.1 TireBot: un robot mobil autonom capabil să se deplaseze sub mașini și camioane și să detecteze automat gradul de uzură al anvelopelor acestora.

După cum se vede în Figura 5.2, am montat laserul la 10° față de cameră și la o distanță de 45 mm, ceea ce a făcut ca distanța dintre senzorul camerei și punctul de intersecție a normalei la centrul senzorului camerei și a fasciculului laser să fie de 255 mm. Sistemul a fost montat pentru a scana anvelopa dinspre părțile laterale ale TireBot. Cu această configurație, TireBot poate măsura parametrii anvelopei de la o distanță maximă de aproximativ 30 cm și de pe ambele părți ale robotului, deoarece cardanul are un unghi de virare de 180° .

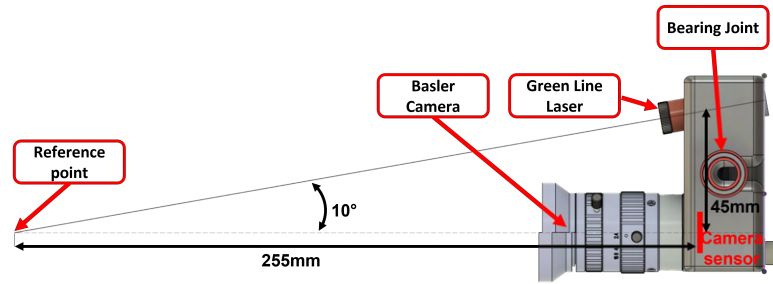


Figura 5.2 Alinierea camerei cu fascicul laser

Procesăm informațiile și controlăm TireBot folosind două plăci de calcul: Raspberry Pi 4 [141], care este placa principală de procesare (numită Main Board în referințele viitoare), și Arduino Due bazat pe procesorul Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU [142], care este placa de control de nivel scăzut (numită Control Board în referințele viitoare).

5.3 Navigare bazată pe LIDAR

Stiva de navigație este compusă din trei module principale: mașina de navigație și planificare (care poate fi văzută în Figura 5.3), placa Control Board care se ocupă de controlul de nivel inferior și stratul de legătură între cele două.

5.3.1 Mașina de stare pentru navigare

Mașina de stări dezvoltată pentru navigarea robotului are sarcina de a-l poziționa în zona de scanare a fiecărei roți a unei mașini.

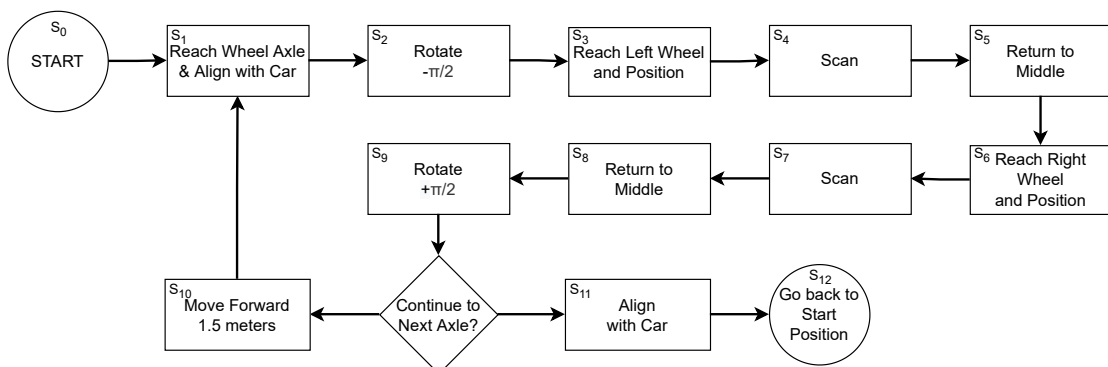


Figura 5.3 Mașina de stări pentru navigare

Datele de intrare pentru mașinăria de stare sunt datele de ieșire ale senzorului LIDAR, care constau în 720 de distanțe (distribuite în mod egal într-un cerc, ceea ce înseamnă că

fiecare punct măsurat are o rezoluție unghiulară de 0.5°) reprezentând punctele în care este prezentă o suprafață/obiect.

În timpul unei stări, emitem comenzi de deplasare către stratul de legătură, care sunt definite ca o poziție relativă (x, y) în mm și o rotație $\angle yaw$ în rad, în care dorim ca robotul să se deplaseze. Toate mișcărilor sunt relative la punctul de referință al robotului, așa cum se arată în Figura 5.4.

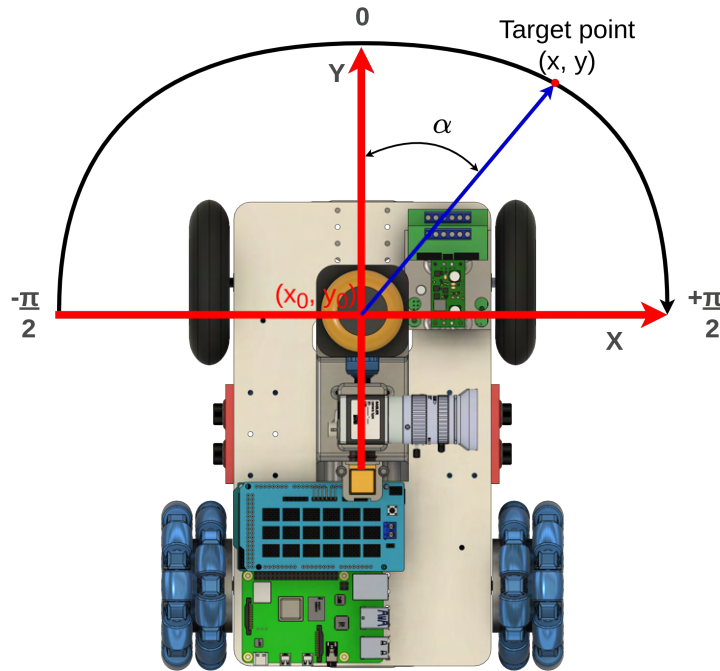


Figura 5.4 Sistemul de coordonate Tirebot.

În continuare, va fi explicat fluxul prin mașina de stare, în care punctele roșii reprezintă ceea ce robotul percepe ca fiind o roată, punctele verzi sunt ignorate deoarece se află în afara cadranelor în care robotul caută roțile, iar punctele albastre reprezintă robotul (patru puncte reprezintă roțile robotului, iar punctul suplimentar din centru reprezintă centrul de rotație al robotului).

- În prima etapă a algoritmului, S_1 , identificăm roțile din stânga și din dreapta ca fiind punctele cele mai apropiate în sectoarele $(-\frac{\pi}{2}, 0)$ și, respectiv, $(0, \frac{\pi}{2})$, după cum se poate vedea în Figura 5.5a și Figura 5.5b. După atingerea țintei, ne aliniem cu axa mașinii folosind din nou cele mai apropiate puncte din sectoarele $(-\pi, 0)$ și $(0, \pi)$, rotindu-ne pentru a ne poziționa direcția ca bisectoarea unghiului creat de cele 2 puncte și originea noastră.
- În starea S_2 robotul se rotește cu $-\frac{\pi}{2}$ spre roată ca în Figura 5.5c.
- State S_3 este utilizat pentru a muta robotul în zona de scanare a anvelopei stângi (în raport cu robotul), ca în Figura 5.5d.

- Din cauza erorilor din datele de intrare și din mișcarea robotului, după ce se ajunge la zona de scanare generală, se execută o etapă mai fină.
- Starea S_4 este o stare în care scanăm adâncimile canelurilor anvelopei stângi. Aceasta va fi descrisă în secțiunea 5.5.
- În starea S_5 ne întoarcem la mijlocul axei roții ca în Figura 5.5e, o mișcare similară cu S_1 .
- State S_6 este utilizat pentru a muta robotul în zona de scanare a celeilalte anvelope, ca în Figura 5.5f. Similar cu starea S_3 , se efectuează mișcări mai fine.
- Starea S_7 este o stare în care scanăm adâncimile canelurilor anvelopei.
- În starea S_8 ne întoarcem la mijlocul axei roții ca în Figura 5.5g.
- În starea S_9 , robotul se rotește cu $\frac{\pi}{2}$ ca în Figura 5.5h.
- Starea S_{10} este următoarea stare, dacă mai există mai multe axe de roți care trebuie scanate. Acest lucru se face pentru a trece de axa precedentă și pentru a se putea reveni la starea S_1 și a continua scanarea roților rămase. Noua poziție poate fi observată în Figura 5.5i.
- Starea S_{10} este următoarea stare, dacă mai există mai multe axe de roți care trebuie scanate. Acest lucru se face pentru a trece de axa precedentă și pentru a se putea reveni la starea S_1 și a continua scanarea roților rămase. Noua poziție poate fi observată în Figura 5.5i.
- În starea S_{12} robotul va încerca să se întoarcă în partea din față a mașinii prin deplasarea înapoi ca în Figura 5.5k.

5.3.2 Stratul de legătură între mașina de stare și placa de control

Acest strat de legătură are ca intrare o comandă de deplasare formată din punctul (x, y) , care reprezintă poziția dorită în raport cu poziția curentă a robotului, și unghiul de yală $\angle yaw$, care reprezintă orientarea dorită în raport cu orientarea actuală. Scopul acestei părți din stiva de navigație este de a transforma starea robotului țintă în comenzi simple de “rotație” și “înainte/înapoi deplasare”.

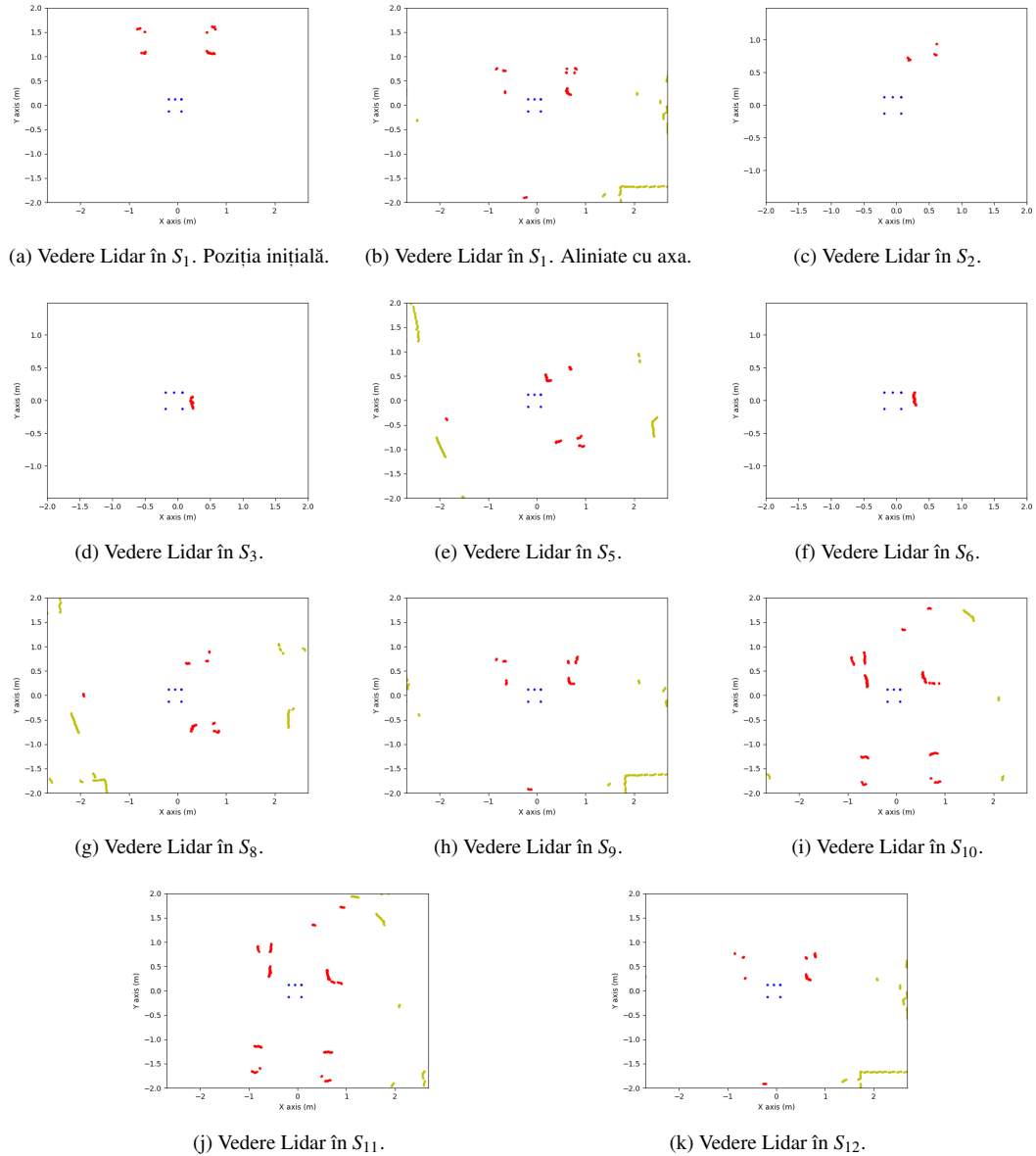


Figura 5.5 Mașina de stari pentru navigație

5.3.3 Control la nivel inferior

Pentru a controla mișcarea servomotorului robotului, pentru a porni/opri laserul sau pentru a citi senzorii optici de flux în placa principală, folosim placa Control Board ca intermediar. Placa Main Board emite comenzi prin intermediul interfeței seriale, cum ar fi: deplasarea pe o anumită distanță, rotirea la un anumit grad, rotirea servomotorului la un anumit grad, comutarea laserului și obținerea distanței de deplasare de la senzorii optici de flux.

Pentru a executa comanda primită de la “Link Layer between State Machine and Control Board”, pe Control Board sunt implementate două controlere PID, câte unul pentru fiecare roată a robotului.

5.4 Localizare pe baza fluxului optic

Pornind de la scopul acestui robot de a rula pe sub mașini sau camioane, a trebuit să implementăm o soluție de localizare a acestuia, astfel încât să știe unde se află în orice moment și cum să se întoarcă la stația de andocare. Deoarece va sta sub mașină în cea mai mare parte a timpului, nu putem utiliza o soluție bazată pe GPS pentru localizare, deoarece semnalul va fi blocat de mașină și, în general, GPS-ul are o eroare de peste 1 m.

Soluția noastră de localizare a robotului sub mașină se bazează pe metoda "dead reckoning". Am ales să folosim un senzor de flux optic care poate măsura deplasarea prin procesarea imaginilor. Pentru aplicația noastră, citim datele de la acești senzori și, prin integrare, obținem poziția relativă față de punctul de plecare.

Pentru a implementa algoritmul de localizare cu această configurație am analizat trei cazuri diferite de mișcare a robotului care pot apărea:

- direct înainte, se poate vedea în Figura 5.6a
- rotație pe loc, se poate vedea în Figura 5.6b
- rotație pe un arc de cerc, se poate vedea în Figura 5.7

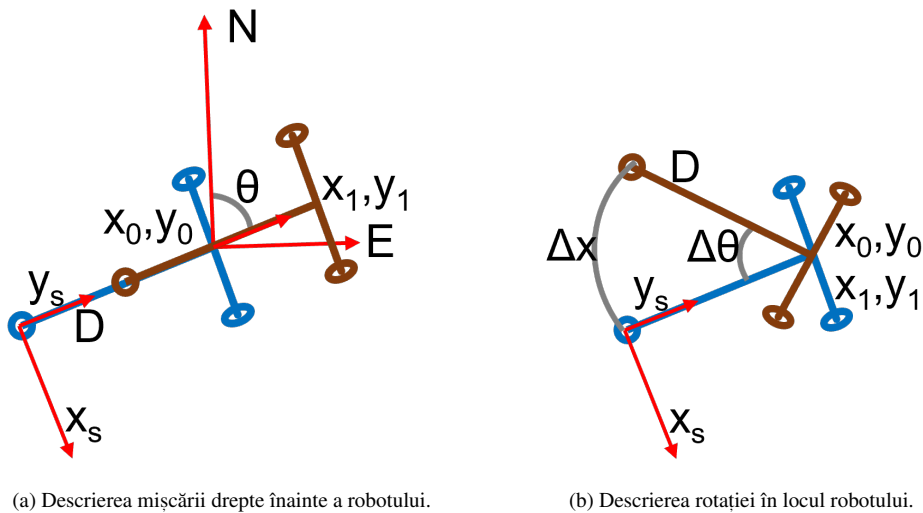


Figura 5.6 Mișcări de înaintare și de rotație în loc

Pentru toate cazurile, poziția robotului (x, y) poate fi calculată prin cunoașterea următoarelor valori, unde:

- (x_0, y_0) este punctul inițial
- D este distanța dintre centrul axei de rotație a robotului și senzorul de flux optic.

- Δx_s și Δy_s sunt variațiile de mișcare înregistrate de senzori.
- θ este unghiul de deviație al robotului.

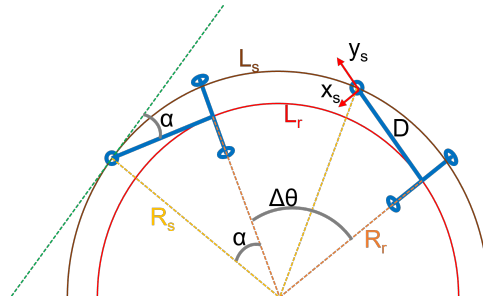


Figura 5.7 Descrierea rotației robotului pe un arc de cerc.

5.4.1 Rezultate

Această soluție ne ajută să cartografiem mișcarea robotului sub mașină și să știm în orice moment unde se află. Figura 5.8 ilustrează traiectoriile robotului atunci când acesta efectuează o scanare. De asemenea, această soluție este integrată cu partea de navigație pentru a compensa alunecarea roților. Atunci când robotul se deplasează, comparăm distanța și rotația pe care robotul trebuie să le parcurgă cu deplasarea înregistrată de această soluție. Dacă acestea nu sunt identice, robotul adaptează comanda către controlerul motorului până când robotul ajunge în poziția dorită.

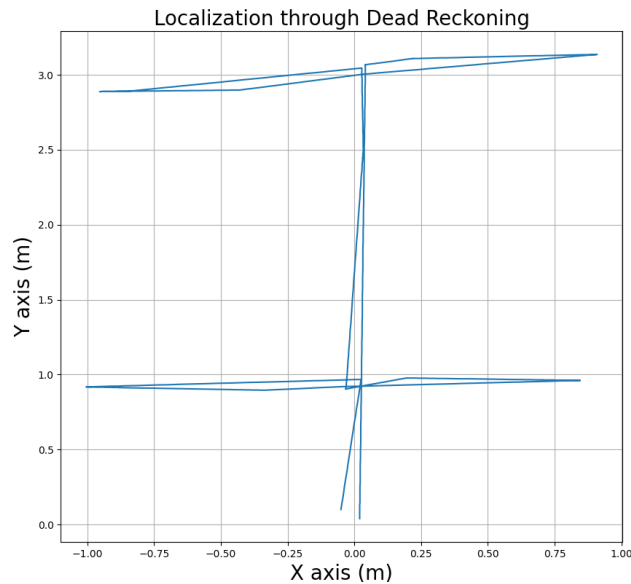


Figura 5.8 Traiectoriile în timp real ale robotului atunci când efectuează o scanare.

5.5 Poziționare prin analiză de imagine

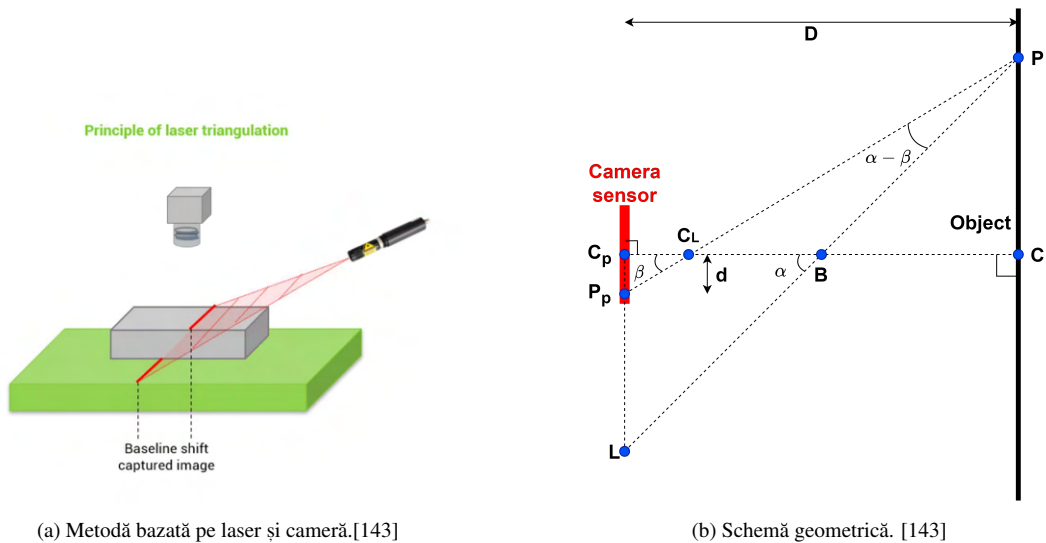
În acest capitol, am propus o metodă de triangulație care utilizează o soluție optică pentru a determina distanța dintre cameră și banda de rulare a anvelopei. Soluția optică este construită dintr-o cameră video și un laser. O reprezentare schematică a principalelor etape ale soluției propuse pentru calcularea distanței este prezentată în Figura 5.9.



Figura 5.9 Fluxul de lucru al soluției propuse

5.5.1 Poziționare prin triangulație

Pentru a calcula distanțele și hărțile de adâncime față de diverse obiecte sau pentru a schița conturul lucrurilor studiate, am folosit un laser și o cameră, așa cum este demonstrat în Figura 5.10a. Am desenat schematic această tehnică în Figura 5.10b:



(a) Metodă bazată pe laser și cameră.[143]

(b) Schemă geometrică. [143]

Figura 5.10 Schema de triangulație.

Pentru a putea calcula adâncimea benzii de rulare, este esențial să se cunoască: unghiul dintre camera de luat vederi și laserul însuși α (în Figura 5.10b) și distanța dintre laser și camera de luat vederi LC_p (în Figura 5.10b). Atât unghiul, cât și distanța menționată au fost definite în secțiunea 5.2, de asemenea, distanța focală a camerei este cunoscută din informațiile tehnice ale lentilelor utilizate pentru cameră (C_pC_L în Figura 5.10b).

Pe baza specificațiilor sensorului camerei, cunoaștem dimensiunea fiecărui pixel și putem calcula distanța milimetrică a lui C_pP_p în Figura 5.10b. Cunoscând toate datele,

putem calcula:

$$C_{LP} = \frac{BC_L \cdot \sin(180^\circ - \alpha)}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (5.1)$$

Conform principiilor de triangulație, singura modalitate de a determina distanța oricărui punct față de cameră este de a ști în ce pixel al imaginii este reprezentat. Formulele descrise mai sus cu privire la triangulație sunt valabile, însă ele nu țin cont de imperfecțiunile obiectivului (distorsiune) sau de adăugarea unui filtru între obiectiv și cameră. Pentru implementarea noastră, am folosit o metodă empirică pentru a calibra și a găsi pixelul corespunzător pentru fiecare distanță la care poate fi localizat fasciculul laser. Această metodă păstrează în mod natural teoria procesului de triangulație.

După cum se arată în Figura 5.11, robotul pentru anvelope, inclusiv camera și laserul, a fost montat în fața unui perete alb paralel cu acesta. Apoi, am deplasat robotul de la 10 cm cu un pas de 1 cm până la 35 cm distanță de perete, am luat o imagine la fiecare pas și am salvat-o. Pe baza imaginii capturate și a distanței la care a fost luată, am aplicat interpolarea pentru a obține o funcție care ia ca intrare un anumit indice de pixel și returnează o anumită distanță.

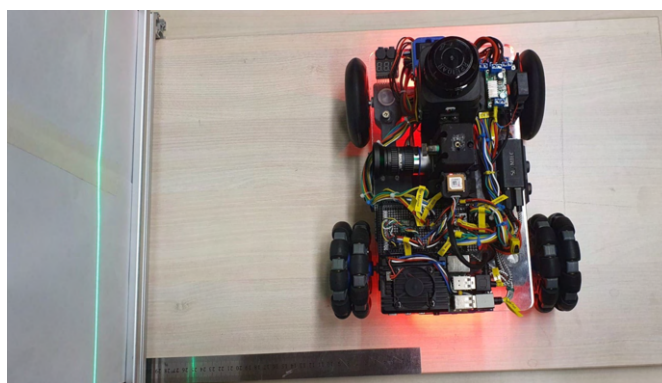


Figura 5.11 Configurare de calibrare pentru a determina relația dintre poziția pixelului și distanța față de fasciculul laser.

5.5.2 Achiziția de imagini

Pentru o măsurare precisă a adâncimii canelurii de pe anvelopă, este important unghiul la care unda laser lovește anvelopa. Situația ideală este atunci când senzorul camerei este paralel cu suprafața roții. Dacă această condiție nu este îndeplinită, distanțele măsurate vor fi mai mari decât cele reale.

Datorită montării camerei și a cadrului laser pe un cardan, ansamblul optic poate fi rotit până când camera devine paralelă cu partea din față a anvelopei, ceea ce face posibilă găsirea poziției optime.

În Figura 5.12 arătăm modul în care sistemul optic este întors în poziția de scanare a anvelopei.



Figura 5.12 Exemplu de poziție optimă pentru cameră și fasciculul laser.

În cele din urmă, prima etapă a algoritmului de poziționare returnează două imagini cu anvelopa privită la 90 de grade, Figura 5.13.

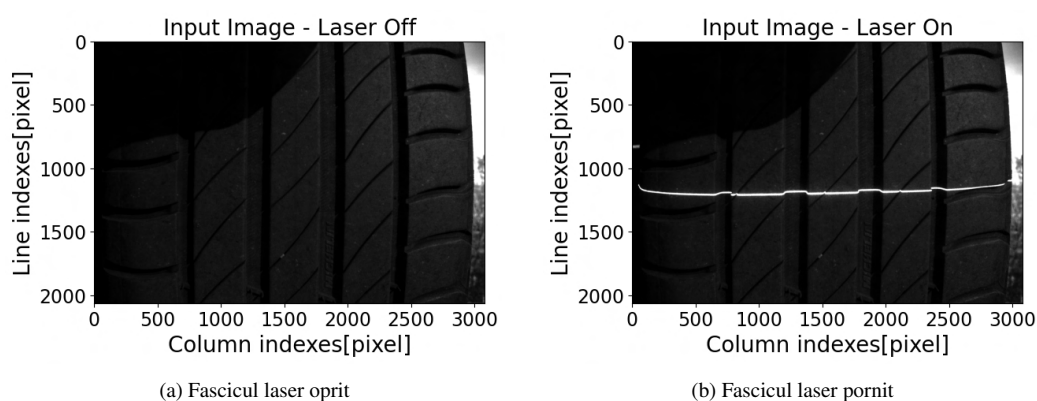


Figura 5.13 Imaginile de intrare în cele două cazuri

5.5.3 Corecția luminii ambientale

Detectarea fasciculului laser în imagine și măsurarea valorii reale a adâncimii anvelopei poate fi dificilă din cauza luminii ambientale și a reflexiilor acesteia. Pentru a reduce efectul luminii ambientale, am ales să realizăm două imagini ale anvelopei, una când laserul este oprit, iar cealaltă când laserul este pornit, apoi să scădem una din cealaltă. Imaginea rezultată poate fi văzută în Figura 5.14.

5.5.4 Conversia din pixel în distanță

În această etapă, folosim ca intrare imaginea din Figura 5.14. În conformitate cu explicațiile privind triangulația din secțiunea 5.5.1, în imagine, fasciculul laser de pe

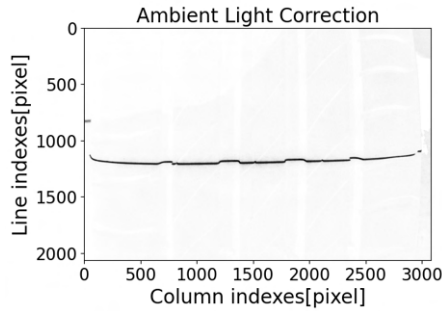


Figura 5.14 Imaginea de intrare rezultată din diferența de pixeli dintre imaginile din Figura 5.13.

suprafața anvelopei este mai jos decât fasciculul laser de pe banda de rulare. Din imagine se extrage o matrice care conține cel mai luminos pixel de pe fiecare coloană și indicele acestuia. Această matrice reprezintă raza laser de pe anvelopă. Matricea obținută este convertită într-o distanță folosind principiile din secțiunea 5.5.1. În Figura 5.15 sunt afișate distanțele măsurate.

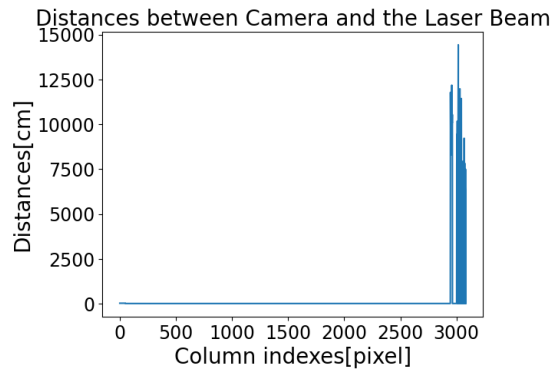


Figura 5.15 Distanțele dintre cameră și fasciculul laser în cm.

5.5.5 Obținerea robusteții

Pe baza navigației noastre, anvelopa poate fi poziționată doar la o distanță cuprinsă între 5 cm și jumătate de metru față de cameră. Eliminăm toate distanțele care sunt peste sau sub limita impusă și, după cum se observă în Figura 5.16, toate distanțele măsurate în această etapă se află între limitele impuse.

5.5.6 Determinarea profilului anvelopei

Deoarece forma semnalului nu corespunde formei reale a anvelopei, am implementat o soluție pentru a găsi o aproximare a semnalului folosind o parabolă a unei funcții de gradul doi, care va fi apoi scăzută din semnalul real. În Figura 5.17a, au fost desenate

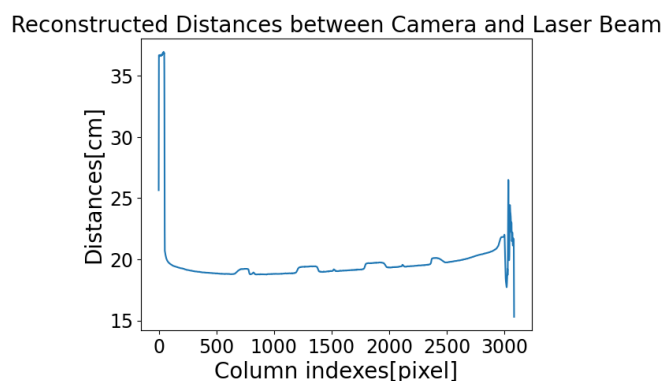
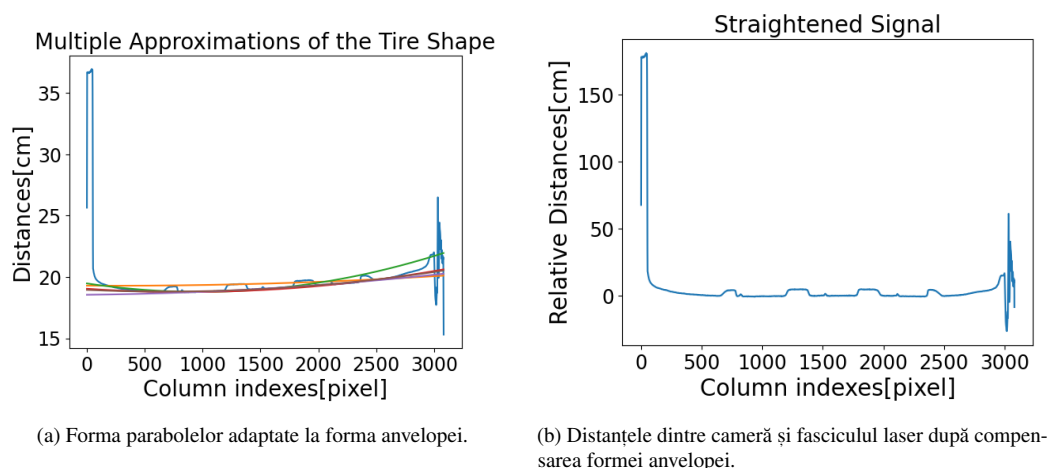


Figura 5.16 Distanțele dintre cameră și fasciculul laser după eliminarea valorilor aberante.

mai multe parabole generate care aproximează semnalul, iar în Figura 5.17b, semnalul după sustragere.



(a) Forma parabolilor adaptate la forma anvelopei.

(b) Distanțele dintre cameră și fasciculul laser după compensarea formei anvelopei.

Figura 5.17 Aproximarea profilului anvelopei

5.5.7 Îndepărtarea marginilor

Pentru a elimina posibilitatea de a avea în continuare valori aberante cauzate de lumina ambientală și/sau pentru a elimina marginile anvelopei, am efectuat o altă etapă de rafinare. Am pornit de la ipoteza că suprafața anvelopei este obiectul cel mai apropiat de cameră, astfel încât distanța cea mai îndepărtată nu poate depăși $cutLimit$. Această etapă returnează toate valorile sub $cutLimit$, așa cum se vede în Figura 5.18.

5.5.8 Metoda de scanare în adâncime

Pentru a returna în cele din urmă adâncimea tuturor pașilor și pentru a detecta câte sunt, am implementat un algoritm care utilizează o tehnică de fereastră glisantă pentru a determina diferența dintre cea mai mare și cea mai mică distanță. Acesta glisează prin

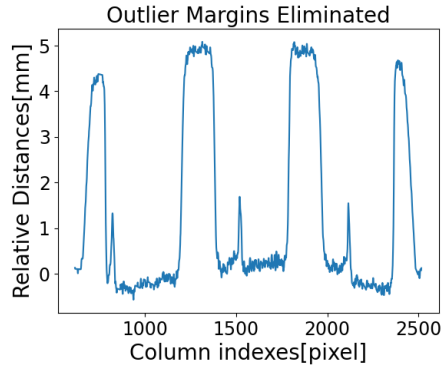
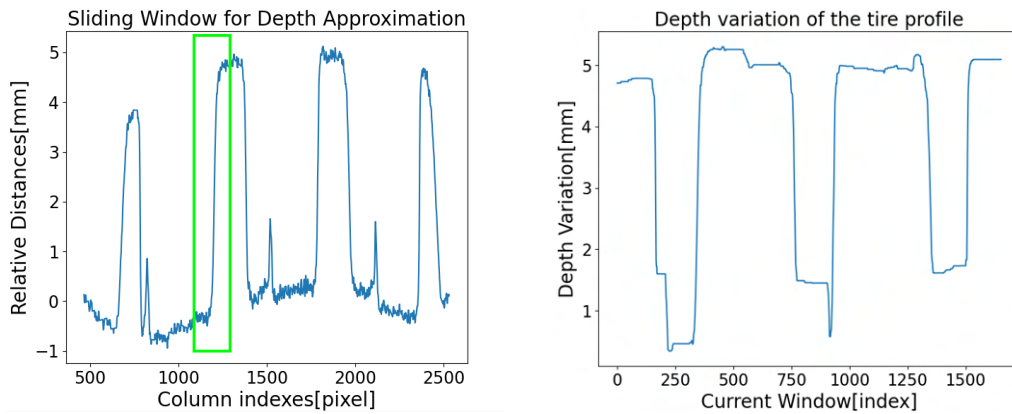


Figura 5.18 Forma semnalului final al distanțelor dintre camera de luat vederi și fasciculul laser după o nouă eliminare a valorilor aberante.

semnal de la un capăt la altul și returnează diferența dintre valoarea maximă și valoarea minimă inclusă în fereastră. Valorile cele mai mici reprezintă suprafața anvelopei, iar valorile cele mai mari reprezintă adâncimea benzii de rulare.



(a) Fereastră glisantă care se deplasează pe forma finală a semnalului.

(b) Variația de adâncime a profilului anvelopei.

Figura 5.19 Imaginile de intrare (a) și de ieșire (b) ale algoritmului de scanare a adâncimii

Am ilustrat în Figura 5.19a numărul total de fluctuații de adâncime găsite în timpul semnalului de intrare, iar valoarea adâncimilor este prezentată în Figura 5.19b. Ca urmare, adâncimea maximă care a fost detectată pentru anvelopa studiată în acest capitol a fost de 5,32 mm, ceea ce nu este departe de adâncimea scanată manual de 5,22 mm.

5.6 Evaluarea rezultatelor

Pentru a demonstra eficiența algoritmilor utilizați pentru a calcula uzura anvelopelor folosind principiile de poziționare, am creat o bază de date de 360 de fotografii, ceea ce echivalează cu 180 de anvelope diferite. Există două imagini pentru fiecare anvelopă, având în vedere metoda utilizată pentru ajustarea luminii ambientale: o imagine cu laserul

pornit și una cu laserul oprit. Pentru fiecare scanare automată a anvelopei, am măsurat manual la fața locului uzura reală a anvelopei cu ajutorul unui calibru digital fabricat special pentru a măsura adâncimea canelurilor, așa cum este ilustrat în Figura 5.20.



Figura 5.20 Măsurarea manuală a benzii de rulare a anvelopei cu un calibru digital.

Setul de date pentru testare cuprinde diferite variații, cum ar fi: tipul de anvelopă, gradul de uzură a anvelopei, forma benzii de rulare, temperatura mediului înconjurător, iluminarea mediului înconjurător, formele mașinilor (ceea ce duce la diferite distanțe și unghiuri de măsurare).

Am rulat algoritmul pentru cele 180 de anvelope și am obținut distribuția erorilor ilustrată în Figura 5.21 și o inexactitate medie de 0,28 mm. După cum se poate observa, distribuția erorilor ia în mod natural forma unei distribuții normale cu centrul la 0 mm. Acest lucru înseamnă că majoritatea scanărilor automate au produs rezultate comparabile cu cele efectuate manual, care reprezintă standardul în cadrul experimentului actual, demonstrând astfel acuratețea abordării automate de detectare a uzurii anvelopelor.

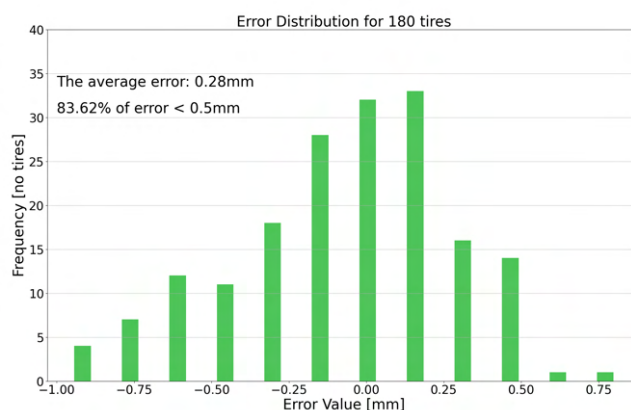


Figura 5.21 Distribuția erorilor pentru 180 de anvelope.

Majoritatea măsurătorilor automate au produs erori acceptabile, astfel încât 83,62

Din cauza aproximării conturului anvelopei, algoritmul nu este determinist. Metoda propusă produce valori diferite pentru adâncimea maximă pentru fiecare dintre rulările repetate pe setul de date, pe același pneu și din aceeași perspectivă. După 150 de rulări, adâncimea medie a anvelopei este de 5,32 mm, rezultând o eroare de 0,1 mm în comparație cu valoarea reală de 5,22 mm. Distribuția valorilor de adâncime obținute pentru unul dintre anvelopele scanate este prezentată în Figura 5.23.

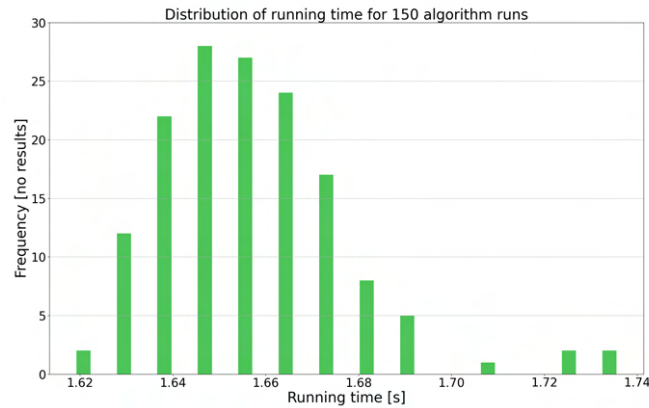


Figura 5.22 Distribuția timpului de execuție pentru 150 de rulări ale algoritmului.



Figura 5.23 Distribuția erorilor la rulări multiple pe aceeași anvelopă.

5.7 Concluzii

Am proiectat, implementat și evaluat o soluție nouă pentru măsurarea uzurii anvelopelor. Soluția este reprezentată de un robot mobil autonom care se poate deplasa sub mașini sau camioane parcate și le scanează anvelopele cu ajutorul unui sistem optic format dintr-o cameră și un laser liniar. Robotul poate măsura gradul de uzură a anvelopelor în mod automat, precis, obiectiv și periodic, ceea ce duce la creșterea profitului pentru companiile de transport, la reducerea timpului pierdut de participanții la trafic, la o mai mare siguranță pe șosele, precum și la un mediu mai curat. Detectarea uzurii a fost testată pe 180 de anvelope, obținându-se o eroare medie de 0.28 mm cu un timp de execuție de 1.65 s. De asemenea, 83,62% dintre scanări au avut o inexactitate mai mică de 0.5 mm.

Capitolul 6

Concluzii

6.1 Rezultatele obținute

Importanța optimizării navigației roboților autonomi de mici dimensiuni în medii fără GPS nu poate fi supraestimată, deoarece acești roboți sunt utilizați din ce în ce mai mult într-o mare varietate de aplicații industriale, comerciale și diverse aplicații specializate. În timp ce progresele în materie de senzori, algoritmi și tehnologii de comunicare fără fir au făcut ca roboții autonomi să devină mai omniprezenți, aceștia se confruntă încă cu numeroase limitări în ceea ce privește dimensiunea fizică, disponibilitatea energiei electrice și prețul. Prin urmare, este esențial să se dezvolte soluții inteligente, eficiente și flexibile care să utilizeze platforme de calcul mai mici și senzori mai ușori și mai accesibili pentru a le permite acestor roboți să navigheze în mediul înconjurător. Prezenta teză de doctorat oferă perspective exploratorii, proiecte, implementări și soluții validate pentru poziționarea și navigarea roboților autonomi în scenarii fără GPS, atât în interior, cât și în exterior. Prin testarea acestor soluții pe aplicații din viața reală, teza contribuie la dezvoltarea unor metode practice și eficiente de optimizare a navigării roboților autonomi într-o gamă largă de contexte.

Cercetarea s-a axat pe identificarea și dezvoltarea în continuare a celor mai bune metode de localizare în medii fără GPS pentru roboții autonomi mici și cu restricții de energie. În plus, teza a investigat și a propus soluții pentru îmbunătățirea preciziei de poziționare, utilizând noi cipuri wireless în roboți de mici dimensiuni, bazați pe sisteme integrate. În cele din urmă, teza a propus o abordare nouă pentru îmbunătățirea poziționării relative în timp real între două sisteme 3D, cum ar fi o dronă aeriană și o țintă mobilă.

Prima contribuție principală a tezei constă într-un studiu cuprinzător privind urmărirea dronelor cu un sistem de tip gimbal activ, utilizând o abordare de fuziune a senzorilor. În primul rând, a fost proiectată o arhitectură hardware pentru a valida abordarea propusă

pentru urmărirea bunurilor. Arhitectura integrează date de la mai mulți senzori într-un sistem de tip fuziune de senzori, iar o configurație hardware completă a fost implementată pe baza unor piese de dronă de calitate comercială și integrând mai mulți senzori, inclusiv integrarea Inav, date GPS, date OpticalFlow, date RangeFinder, date ale camerei optice, o platformă de procesare Jetson Nano puternică și electronice suplimentare pentru controlul și gestionarea energiei. În al doilea rând, a fost propus, implementat și validat un nou algoritm de detectare și control pentru controlul dronei printr-un sistem de reglare în timp real în raport cu o țintă în mișcare. Algoritmul a fost implementat pe configurația hardware propusă și s-a constatat că permite o soluție semnificativ îmbunătățită de achiziție și de blocare a țintei. În al treilea rând, a fost propusă o clasificare nouă pentru sistemele actuale de markeri fiduciali. Pentru a testa sistemul, a fost dezvoltat un set de date format din 13200 de imagini și a fost propusă și testată o metodologie de testare pe trei sisteme de markeri fiduciali pe setul de date propus, împreună cu o configurație hardware pentru evaluarea unor parametri suplimentari, cum ar fi performanța la anumite viteze unghiulare.

Pentru cea de-a doua contribuție principală a tezei, referitoare la poziționare, au fost propuse dezvoltarea și validarea unei arhitecturi hardware pentru un sistem îmbunătățit de localizare de înaltă precizie în interior care utilizează noua abordare propusă FlexTDOA. A fost proiectat, construit și testat un banc de testare complet, care cuprinde o serie de noduri senzoriale personalizate pentru testarea, ajustarea și îmbunătățirea algoritmului propus. În al doilea rând, au fost dezvoltate două metode de măsurare a distanțelor dintre noduri: prima se bazează pe Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR), care utilizează două schimburi de mesaje între două noduri, iar a doua se bazează pe Time Difference of Arrival (TDOA), care utilizează diferența de timp dintre sosirea a două mesaje. De asemenea, au fost implementați doi algoritmi care utilizează măsurătorile TWR sau TDOA pentru a calcula locația nodului urmărit. Primul algoritm calculează locația etichetei în mișcare în mod iterativ, utilizând un filtru Kalman extins (EKF), iar al doilea algoritm calculează locația utilizând minimizarea erorii de cel mai mic pătrat între distanțele măsurate și cele calculate. În al treilea rând, a fost dezvoltată o schemă flexibilă și personalizată de acces multiplu cu diviziune în timp (TDMA), bazată pe o abordare în care ancorele nu au nevoie de sincronizarea ceasurilor lor. În al patrulea rând, pe baza celor de mai sus, a fost propus și testat un sistem software complex denumit FlexTDOA, ca metodă de localizare personalizată cu ancore fixe și mobile, care este simultan rapidă, precisă și scalabilă. În al cincilea rând, a fost proiectat, implementat și validat un sistem de verificare la sol pentru a avea un punct de referință pentru rezultatele experimentale care implică poziționarea în interior. În cele din urmă, precizia de localizare a FlexTDOA a fost evaluată în diferite scenarii, variind numărul de răspunsuri, ordinea răspunsurilor și numărul de ancore, atât în scenarii cu vizibilitate directă (LOS), cât și în scenarii fără vizibilitate directă (NLOS). De asemenea, a fost simulat și evaluat efectul vitezei fizice a etichetei asupra alegerii parametrilor optimi ai

sistemului. FlexTDOA a fost comparat cu abordările clasice TDOA și cu localizarea bazată pe distanță - și s-a constatat că are mai multe avantaje distincte.

Cea de-a treia contribuție principală a tezei se referă la navigația fără GPS. Pentru această secțiune, a fost propusă o nouă tehnică de măsurare automată a uzurii anvelopelor, punându-se accentul pe caracterul practic și pe mobilitate în scenariile din lumea reală. Contribuțiile cercetării includ proiectarea unei arhitecturi hardware care a fost testată atât în laborator, cât și în medii industriale, împreună cu implementarea unui model matematic robust pentru extragerea adâncimii anvelopelor din imagini obținute automat. În plus, a fost dezvoltat un sistem de conducere autonomă care fuzionează datele provenite de la senzorii LIDAR și de la senzorii optici de flux, pentru a permite robotului să se autodepășească în jurul unui anumit camion, să identifice poziția anvelopelor și să se autopozitioneze pentru o achiziție optimă a imaginilor. Au fost proiectate și testate mai multe subsisteme hardware pentru a asigura o implementare hardware robustă și eficientă care să abordeze diverse probleme din lumea reală. A fost implementat un API de comunicare între placa de procesare a imaginilor și de planificare a navigației și placa de control și achiziție a vitezei. În general, abordarea propusă prezintă rezultate promițătoare pentru măsurători precise ale uzurii anvelopelor și oferă o soluție practică și eficientă pentru aplicații din lumea reală.

Următoarele subsecțiuni prezintă o prezentare detaliată a contribuțiilor originale ale tezei în raport cu stadiul actual al tehnologiei și publicațiile științifice rezultate în urma cercetării doctorale.

6.2 Contribuții originale

- **Urmărirea rapidă și fiabilă în timp real a țintelor în mișcare**

- Am proiectat o arhitectură hardware pentru a valida abordarea propusă pentru utilizarea unui sistem gimbal activ de urmărire a bunurilor care integrează date de la mai mulți senzori într-o abordare de tip fuziune de senzori.
- Am implementat o configurație hardware completă, bazată pe componente de dronă de calitate comercială și care integrează mai mulți senzori, inclusiv - integrarea Inav, date GPS, date OpticalFlow și RangeFinder, date ale camerei foto, împreună cu o platformă de procesare Jetson Nano puternică și electronice suplimentare pentru control și pentru gestionarea energiei, pentru a testa abordarea propusă.
- Am propus, implementat și validat un nou algoritm de detecție și control pentru controlul dronei printr-un sistem de reglare în timp real în raport cu o țintă în mișcare, care permite o achiziție și o fixare mult mai bună a țintei în medii reale.
- Am propus o clasificare pentru sistemele actuale de markeri fiduciali.
- Am dezvoltat un set de date de 13200 de imagini pentru testarea sistemului.
- Am propus o metodologie de testare și am testat trei sisteme de markeri fiduciali cu ajutorul setului de date obținut, împreună cu o configurație hardware pentru evaluarea unor parametri suplimentari (de exemplu, performanța la anumite viteze unghiulare).

- **Poziționare omniprezentă**

- Am proiectat o arhitectură hardware pentru a valida abordarea propusă (FlexTDOA) pentru un sistem îmbunătățit de localizare de înaltă precizie în interior.
- Am proiectat, construit și testat un banc de testare complet - care cuprinde o serie de noduri de senzori personalizate pentru testarea, ajustarea și îmbunătățirea algoritmului propus.
- Am dezvoltat două metode de măsurare a distanțelor dintre noduri. Prima se bazează pe Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR), care utilizează două schimburi de mesaje între două noduri, iar a doua se bazează pe Time Difference of Arrival (TDOA), care utilizează diferența de timp dintre sosirea a două mesaje.
- Am implementat doi algoritmi care utilizează măsurătorile TWR sau TDOA pentru a calcula locația nodului pe care îl urmărim. Primul algoritm calculează localizarea etichetei în mișcare în mod iterativ, folosind un filtru

Kalman extins (EKF), iar celălalt algoritm calculează localizarea folosind o minimizare a erorii de cel mai mic pătrat între distanțele măsurate și cele calculate.

- Am dezvoltat o schemă flexibilă și personalizată de acces multiplu cu diviziune în timp (TDMA), în care timpul este împărțit în sloturi, care gestionează momentele în care fiecare ancoră poate începe comunicarea. În fiecare interval de timp, o ancoră interoghează una sau mai multe ancore, care răspund în același interval. Ancorele nu au nevoie ca ceasurile lor să fie sincronizate.
- Am propus și am testat un sistem software complex numit FlexTDOA, care este o metodă de localizare personalizată care utilizează măsurarea diferenței de timp de sosire (TDOA), astfel încât dispozitivul utilizatorului rămâne pasiv și își poate calcula locația prin simpla ascultare a comunicării dintre ancorele fixe, asigurând scalabilitatea sistemului.
- Am proiectat, implementat și validat un sistem de verificare la sol pentru a avea un punct de referință validat pentru rezultatele experimentale care implică poziționarea în interior.
- Am evaluat acuratețea localizării FlexTDOA în diferite scenarii, cum ar fi variația numărului de răspunsuri, a ordinii răspunsurilor și a numărului de ancore, în scenarii cu vizibilitate directă (LOS) și fără vizibilitate directă (NLOS). De asemenea, am simulat și evaluat efectul vitezei fizice a etichetei asupra alegerii parametrilor optimi ai sistemului.
- Am comparat FlexTDOA cu abordarea clasică TDOA și cu localizarea bazată pe distanță în cazul unei desfășurări de zece ancore și o etichetă, atât cu cât și fără obstacole.

• Navigare fără GPS

- Am proiectat o arhitectură hardware pentru a oferi o nouă tehnică de măsurare automată a uzurii anvelopelor - cu accent pe o soluție practică și mobilă care poate fi implementată rapid în scenarii din lumea reală.
- Am construit o implementare hardware și software completă - pentru a testa abordarea propusă atât într-un scenariu de laborator, cât și într-un scenariu industrial sau relevant din punct de vedere practic (cum ar fi o parcare industrială cu camioane reale).
- Am implementat un model matematic robust pentru un algoritm de procesare în mai multe etape, pentru a extrage profunzimea anvelopelor din imagini într-o gamă largă de scenarii, în condiții mai puțin ideale. Algoritmul primește mai întâi ca intrare o imagine alb-negru a roții, pe care a fost proiectat un fascicul de linii laser. Acesta are apoi 5 etape de procesare: prima detectează

linia laser în imagine și o convertește într-o distanță pe un grafic; a doua elimină valorile aberante cauzate de lumina soarelui; a treia elimină distorsiunile cauzate de obiectivul camerei; a patra elimină marginile semnalului (deoarece acestea sunt reprezentative pentru marginile plicului), iar ultima etapă determină variația de adâncime folosind o fereastră glisantă.

- Am implementat și am testat un sistem de conducere autonomă care fuzionează datele de la senzorii optici de flux și LIDAR pentru a permite robotului să se autodepășească în jurul camionului și să găsească anvelopele acestuia.
- Am proiectat și testat mai multe subsisteme hardware, pentru a obține o implementare hardware robustă, care să țină cont de mai multe probleme din lumea reală (de exemplu, un sistem avansat de gestionare a energiei).
- Am implementat un API de comunicare între placa de procesare a imaginilor și de planificare a navigației și placa de control și achiziție a vitezei.

6.3 Listă de publicații originale

Jurnale

- **George-Cristian Pătru**, Laura Flueraș, Iuliu Vasilescu, Dragoș Niculescu, and Daniel Rosner. FlexTDOA: Robust and Scalable Time-Difference of Arrival Localization Using Ultra-Wideband Devices. *IEEE Access*, 11:28610–28627, 2023. [144]
- Vladimir Tanasiev, **George Cristian Pătru**, Daniel Rosner, Gabriela Sava, Horia Necula, and Adrian Badea. Enhancing environmental and energy monitoring of residential buildings through iot. *Automation in Construction*, 126:103662, 2021. [145]

Jurnale: acceptate spre publicare

- **George-Cristian PĂTRU**, Alina-Irina PÎRVAN, Daniel ROSNER and Răzvan-Victor RUGHINIȘ. Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin. Series C: Electrical Engineering and Computer Science*. 2023

Conferințe

- **George-Cristian Pătru**, Iuliu Vasilescu, Daniel Rosner, and Dan Tudose. Aerial drone platform for asset tracking using an active gimbal. In *2021 23rd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, pages 138–142. IEEE, 2021. [146]
- **George-Cristian Pătru**, Dumitru-Cristian Trancă, Ciprian-Marian Costea, Daniel Rosner, and Răzvan-Victor Rughiniș. Lora based, low power remote monitoring and control solution for industry 4.0 factories and facilities. In *2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–6. IEEE, 2019. [147]
- Denis Ilie-Ablachim, **George Cristian Pătru**, Iulia-Maria Florea, and Daniel Rosner. Monitoring device for culture substrate growth parameters for precision agriculture: Acronym: Monisen. In *2016 15th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research*, pages 1–7. IEEE, 2016. [148]
- Alina Irina Pîrvan, **George Cristian Pătru**, Dumitru Cristian Trancă, Cristian Contașel, and Daniel Rosner. Infrastructure independent rail quality diagnosis and

monitoring system. In *2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–5. IEEE, 2019. [149]

- Andrei-Bogdan Stanescu, Vlad-Ioan Pantea, and **George Cristian Patru**. Application of mobile technology in sport leisure time activities. In *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education*, volume 3, page 215. "Carol I" National Defence University, 2017. [150]
- Dumitru-Cristian TRANCĂ, Eugen BUZILĂ, Daniel Rosner, **George Cristian PĂTRU**, and Răzvan Victor RUGHINIȘ, . Intact industrial internet of things communication solution. *University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin. Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 2018. [151]
- Vladimir Tanasiev, Horia Necula, Adrian Alistar, **George Cristian Pătru**, and Adrian Badea. Energy-efficient solution for smart lighting through iot. In *2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, pages 1–4. IEEE, 2021. [152]
- Andra-Laura Antonache, Silvia Cristina Stegaru, Mihail-Bogdan Caruțașiu, and **Cristian Patru**. Modeling a thermal area for energy consumption estimation using artificial neural networks. In *2020 19th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–4. IEEE, 2020. [153]
- Daniel Marian Nicolescu, Răzvan Tătăroiu, Dumitru Cristian Trancă, and **George Cristian Pătru**. Logger and analyser for modbus-based industrial networks. In *2020 19th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–4. IEEE, 2020. [154]

Bibliografie

- [1] Md Mahbubur Rahman, Vahideh Moghtadaiee, and Andrew G. Dempster. Design of fingerprinting technique for indoor localization using am radio signals. In *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–7, 2017.
- [2] Suhap Sahin, Hikmetcan Ozcan, and Kerem Kucuk. Smarttag: An indoor positioning system based on smart transmit power scheme using active tags. *IEEE Access*, 6:23500–23510, 2018.
- [3] Wei Fang, Changjun Xie, and Bin Ran. An accurate and real-time commercial indoor localization system in lte networks. *IEEE Access*, 9:21167–21179, 2021.
- [4] Peihao Li, Xu Yang, Yuqing Yin, Shouwan Gao, and Qiang Niu. Smartphone-based indoor localization with integrated fingerprint signal. *IEEE Access*, 8:33178–33187, 2020.
- [5] Primož Bencak, Darko Hercog, and Tone Lerher. Indoor positioning system based on bluetooth low energy technology and a nature-inspired optimization algorithm. *Electronics*, 11(3), 2022.
- [6] Dongqing Shi, Haiyan Mi, Emmanuel G. Collins, and Jun Wu. An indoor low-cost and high-accuracy localization approach for agvs. *IEEE Access*, 8:50085–50090, 2020.
- [7] J. P. Matos-Carvalho, Ricardo Santos, Slavisa Tomic, and Marko Beko. Gtrs-based algorithm for uav navigation in indoor environments employing range measurements and odometry. *IEEE Access*, 9:89120–89132, 2021.
- [8] Weide You, Fanbiao Li, Liqing Liao, and Meili Huang. Data fusion of uwb and imu based on unscented kalman filter for indoor localization of quadrotor uav. *IEEE Access*, 8:64971–64981, 2020.
- [9] Shih-Yi Huang and Ruey-Beei Wu. Positioning for search and rescue in gps-denied area by distributed wifi rss-based doa modules. *IEEE Access*, 10:76105–76113, 2022.
- [10] Alireza Famili, Angelos Stavrou, Haining Wang, and Jung-Min Jerry Park. Rail: Robust acoustic indoor localization for drones. In *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, pages 1–6, 2022.
- [11] Philipp Stockel, Patrick Wallrath, Nils Pohl, and Reinhold Herschel. High accuracy position calculation of a hovering uav using a rotating radar. In *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*, pages 129–132, 2022.

- [12] Martin Oelsch, Mojtaba Karimi, and Eckehard Steinbach. Init-loam: Lidar-based localization and mapping with a static self-generated initial map. In *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 865–872, 2021.
- [13] Adam Norton, Peter Gavriel, Brendan Donoghue, and Holly Yanco. Test methods to evaluate mapping capabilities of small unmanned aerial systems in constrained indoor and subterranean environments. In *2021 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pages 1–8, 2021.
- [14] Khairuldaniel Ismail, Ran Liu, Jie Zheng, Chau Yuen, Yong Liang Guan, and U-Xuan Tan. Mobile robot localization based on low-cost lte and odometry in gps-denied outdoor environment. In *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 2338–2343, 2019.
- [15] Seyed Jamal Haddadi and Eugenio B. Castelan. Visual-inertial fusion for indoor autonomous navigation of a quadrotor using orb-slam. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 106–111, 2018.
- [16] Giovanni Miraglia, K. Niki Maleki, and Loyd R. Hook. Comparison of two sensor data fusion methods in a tightly coupled uwb/imu 3-d localization system. In *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pages 611–618, 2017.
- [17] Adil Farooq, Antreas Anastasiou, Nicolas Souli, Christos Laoudias, Panayiotis S. Kolios, and Theocharis Theocharides. Uav autonomous indoor exploration and mapping for sar missions: Reflections from the icuas 2022 competition. In *2022 19th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, pages 621–626, 2022.
- [18] Oluwatayo Kolawole and Mythri Hunukumbure. A drone-based 3d localization solution for emergency services. In *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, pages 1–6, 2022.
- [19] Xiangqian Shu, Lingyu Yang, Xiaoke Feng, and Jing Zhang. An imu/sonar-based extended kalman filter for mini-uav localization in indoor environment. In *2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, pages 1–6, 2018.
- [20] Christian Gentner, Markus Ulmschneider, Isabel Kuehner, and Armin Dammann. Wifi-rtt indoor positioning. In *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pages 1029–1035, 2020.
- [21] Biljana Risteska Stojkoska, Jordan Palikrushev, Kire Trivodaliev, and Slobodan Kalajdziski. Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on rssi. In *IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies*, pages 120–125, 2017.
- [22] Jirapat Sangthong, Jutamas Thongkam, and Sathapom Promwong. Indoor wireless sensor network localization using rssi based weighting algorithm method. In *2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pages 1–4, 2020.
- [23] Weizhong Ding, Shengming Chang, and Jun Li. A novel weighted localization method in wireless sensor networks based on hybrid rss/aoa measurements. *IEEE Access*, 9:150677–150685, 2021.

- [24] Po Ting Lin, Che-An Liao, and Shu-Hao Liang. Probabilistic indoor positioning and navigation (pipn) of autonomous ground vehicle (agv) based on wireless measurements. *IEEE Access*, 9:25200–25207, 2021.
- [25] Md Moin Uddin Chowdhury, Fatih Erden, and Ismail Guvenc. Rss-based q-learning for indoor uav navigation. In *MILCOM 2019 - 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 121–126, 2019.
- [26] Srinivas Karuparthi and Taşkın Padır. System design for quadrant-based indoor localization of emergency responders. In *2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pages 1–6, 2019.
- [27] Tong Wu, Min Lu, Zhipeng Xi, and Dengkun Xiao. Uwb-based multi-source fusion positioning for cooperative uavs in complex scene. In *2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8, 2022.
- [28] Kang Zhao, Minghua Zhu, Bo Xiao, Xuguang Yang, Changlei Gong, and Junyi Wu. Joint rfid and uwb technologies in intelligent warehousing management system. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(12):11640–11655, 2020.
- [29] Peter Krapež and Marko Munih. Uwb-radio distance measurements error mitigation due to tag orientation in localization systems. In *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 836–841, 2021.
- [30] Jian Wang, Minmin Wang, Deng Yang, Fei Liu, and Zheng Wen. Uwb positioning algorithm and accuracy evaluation for different indoor scenes. *International Journal of Image and Data Fusion*, 12(3):203–225, 2021.
- [31] Leyla Nosrati, Mohammad Sadegh Fazel, and Mohammad Ghavami. Improving indoor localization using mobile uwb sensor and deep neural networks. *IEEE Access*, 10:20420–20431, 2022.
- [32] Yu Xianjia, Li Qingqing, Jorge Peña Queralt, Jukka Heikkonen, and Tomi Westerlund. Applications of uwb networks and positioning to autonomous robots and industrial systems. In *2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pages 1–6, 2021.
- [33] Felix Vollmer, Jan Graßhoff, and Philipp Rostalski. Probabilistic ultra-wideband tdoa localization with bias correction. In *2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pages 1512–1516, 2022.
- [34] Roman S. Kulikov. Integrated uwb/imu system for high rate indoor navigation with cm-level accuracy. In *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, pages 1–4, 2018.
- [35] Huei-Yung Lin and Ming-Chi Yeh. Drift-free visual slam for mobile robot localization by integrating uwb technology. *IEEE Access*, 10:93636–93645, 2022.
- [36] Youssef Ibnatta, Mohammed Khaldoun, and Mohammed Sadik. Indoor localization system based on mobile access point model mapm using rss with uwb-ofdm. *IEEE Access*, 10:46043–46056, 2022.
- [37] Gang Li, Xiang Liao, Huilan Huang, Shaojian Song, Bin Liu, and Yawen Zeng. Robust stereo visual slam for dynamic environments with moving object. *IEEE Access*, 9:32310–32320, 2021.

- [38] Jiang Dong, Marius Noreikis, Yu Xiao, and Antti Ylä-Jääski. Vinav: A vision-based indoor navigation system for smartphones. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18(6):1461–1475, 2019.
- [39] Xing Zhang, Jing Lin, Qingquan Li, Tao Liu, and Zhixiang Fang. Continuous indoor visual localization using a spatial model and constraint. *IEEE Access*, 8:69800–69815, 2020.
- [40] Wei Zhao, Liangjie Xu, Bozhao Qi, Jia Hu, Teng Wang, and Troy Runge. Vivid: Augmenting vision-based indoor navigation system with edge computing. *IEEE Access*, 8:42909–42923, 2020.
- [41] Chengyi Zhang. Sparse visual localization in gps-denied indoor environments. In *2019 International Conference on Information Technology and Computer Application (ITCA)*, pages 87–91, 2019.
- [42] Weipeng Guan, Shihuan Chen, Shangsheng Wen, Zequn Tan, Hongzhan Song, and Wenyuan Hou. High-accuracy robot indoor localization scheme based on robot operating system using visible light positioning. *IEEE Photonics Journal*, 12(2):1–16, 2020.
- [43] Aubida A. Al-Hameed, Safwan Hafeedh Younus, Ahmed Taha Hussein, Mohammed Thamer Alresheed, and Jaafar M. H. Elmirghani. Lidal: Light detection and localization. *IEEE Access*, 7:85645–85687, 2019.
- [44] Hriday Bavle, Paloma De La Puente, Jonathan P. How, and Pascual Campoy. Vps-slam: Visual planar semantic slam for aerial robotic systems. *IEEE Access*, 8:60704–60718, 2020.
- [45] Jonathan Putra and Dany Eka Saputra. Autonomous drone indoor navigation based on virtual 3d map reference. In *2022 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, pages 01–05, 2022.
- [46] Rizqy Ilmi Naufal, Nyoman Karna, and Soo Young Shin. Vision-based autonomous landing system for quadcopter drone using openmv. In *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pages 1233–1237, 2022.
- [47] Qing Liang and Ming Liu. A tightly coupled vlc-inertial localization system by ekf. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2):3129–3136, 2020.
- [48] Fares Tarek Ali, Omar AbdulAziz Fahmy, and Ayman A. El-Badawy. An indoor vision-based markov localization technique of a quadrotor. In *2019 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 1–6, 2019.
- [49] O. Araar and N. Aouf. Visual servoing of a quadrotor uav for the tracking of linear structured infrastructures. In *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 3310–3315, 2013.
- [50] Jorge A. Sarapura, Flavio Roberti, Ricardo Carelli, and José M. Sebastián. Passivity based visual servoing of a uav for tracking crop lines. In *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, pages 1–6, 2017.
- [51] Xuefei Wang, Yizhen Yin, Hongjun Ma, and Hua Bai. Image-based visual servoing of unmanned aerial vehicles for variable angle target. In *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 6065–6070, 2021.

- [52] Xuetao Zhang, Yongchun Fang, Xiao Liang, and Xuebo Zhang. Geometric adaptive dynamic visual servoing of a quadrotor uav. In *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 312–317, 2016.
- [53] Yongwei Zhang, Yangguang Yu, Shengde Jia, and Xiangke Wang. Autonomous landing on ground target of uav by using image-based visual servo control. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 11204–11209, 2017.
- [54] Yihang Li, Guozheng Lu, Dongjiao He, and Fu Zhang. Robocentric model-based visual servoing for quadrotor flights. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pages 1–12, 2023.
- [55] Jiaxing Che, Kun Yang, Zhiming Zhou, Yi Ding, Haotian Zhang, and Quan Quan. Hi-speed visual servo docking for multicopter uav based on velocity control mode. In *2022 China Automation Congress (CAC)*, pages 6909–6914, 2022.
- [56] Ravula Aparna, H. T. Sai Ruchitha, Nanawath Pranavi, and Avinash G. keskar. Imu based tracking of a person using nonlinear autoregressive exogenous(narx) algorithm in gps-denied areas. In *2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA)*, pages 1–4, 2020.
- [57] Da Bin Jeong and Nak Yong Ko. Dead reckoning of a mobile robot in 2-dimensional special euclidean group. In *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pages 1069–1071, 2022.
- [58] Meng Zhang, Jian Yang, Jifu Zhao, and Yanjie Dai. A dead-reckoning based local positioning system for intelligent vehicles. In *2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, pages 513–517, 2019.
- [59] Wei-Wei Xue and Ping Jiang. The research on navigation technology of dead reckoning based on uwb localization. In *2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pages 339–343, 2018.
- [60] Qing-Li Zhou, Youmin Zhang, Yao-Hong Qu, and Camille-Alain Rabbath. Dead reckoning and kalman filter design for trajectory tracking of a quadrotor uav. In *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, pages 119–124, 2010.
- [61] Hang Zhou, Yibo Zhao, Xiaogang Xiong, Yunjiang Lou, and Shyam Kamal. Imu dead-reckoning localization with rnn-iekf algorithm. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 11382–11387, 2022.
- [62] Jong Tai Jang and Wonkeun Youn. Autonomous indoor proximity flight of a quadcopter drone using a directional 3d lidar and vio sensor. In *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pages 1981–1983, 2022.
- [63] Yali Yuan, Christian Melching, Yachao Yuan, and Dieter Hogrefe. Multi-device fusion for enhanced contextual awareness of localization in indoor environments. *IEEE Access*, 6:7422–7431, 2018.
- [64] Georg Fischer, Joan Bordoy, Dominik Jan Schott, Wenxin Xiong, Andrea Gabrielli, Fabian Höflinger, Kai Fischer, Christian Schindelbauer, and Stefan Johann Rupitsch. Multimodal indoor localization: Fusion possibilities of ultrasonic and bluetooth low-energy data. *IEEE Sensors Journal*, 22(6):5857–5868, 2022.

- [65] Yu-Chih Chen, Aleksander I-Chi Lai, and Ruey-Beei Wu. Uwb-assisted high-precision positioning in a utm prototype. In *2020 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNeT)*, pages 42–45, 2020.
- [66] Kate Blake, Robert Huey, Devaughn Menezes, James Root, Lycia Tran, and Haige Chen. Robot navigation using ultra-wideband indoor localization and dead reckoning algorithms. In *2022 Opportunity Research Scholars Symposium (ORSS)*, pages 12–15, 2022.
- [67] Christoph Kammel, Tobias Kögel, Matthias Gareis, and Martin Vossiek. A cost-efficient hybrid uhf rfid and odometry-based mobile robot self-localization technique with centimeter precision. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 6:467–480, 2022.
- [68] Bingjie Chen, Zhiwen Zhu, Yuanze Zhang, Shuai Yue, Bo Yu, and Haibo Du. Indoor uav positioning system based on rotational vision and cascade controller. In *2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, pages 3621–3626, 2022.
- [69] Shengyang Ge, Feng Pan, Dadong Wang, and Pu Ning. Research on an autonomous tunnel inspection uav based on visual feature extraction and multi-sensor fusion indoor navigation system. In *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 6082–6089, 2021.
- [70] Pawarut Karaked, Watcharapol Saengphet, and Suradet Tantrairatn. Multi-sensor fusion with extended kalman filter for indoor localization system of multicopter uav. In *2022 19th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, pages 1–5, 2022.
- [71] Meng-Gang Li, Hua Zhu, Shao-Ze You, and Chao-Quan Tang. Uwb-based localization system aided with inertial sensor for underground coal mine applications. *IEEE Sensors Journal*, 20(12):6652–6669, 2020.
- [72] Zhongshuai Wang, Pheng Sokliep, Chengpei Xu, Jiayu Huang, Linfa Lu, and Zhuo Shi. Indoor position algorithm based on the fusion of wifi and image. In *2019 Eleventh International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, pages 212–216, 2019.
- [73] Samet Güler, Mohamed Abdelkader, and Jeff S. Shamma. Peer-to-peer relative localization of aerial robots with ultrawideband sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(5):1981–1996, 2021.
- [74] Yeon Ji Choi, Tariq Rahim, I Nyoman Apraz Ramatryana, and Soo Young Shin. Improved cnn-based path planning for stairs climbing in autonomous uav with lidar sensor. In *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, pages 1–7, 2021.
- [75] Gennaro Ariante, Salvatore Ponte, and Giuseppe Del Core. Bluetooth low energy based technology for small uas indoor positioning. In *2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, pages 113–118, 2022.
- [76] Markus Hehn, Erik Sippel, Christian Carlowitz, and Martin Vossiek. High-accuracy localization and calibration for 5-dof indoor magnetic positioning systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(10):4135–4145, 2019.

- [77] Pei-Yuan Hong, Chi-Yu Li, Hong-Rong Chang, YuanHao Hsueh, and Kuochen Wang. Wbf-ps: Wigig beam fingerprinting for uav positioning system in gps-denied environments. In *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1778–1787, 2020.
- [78] Huiming Xing, Yu Liu, Shuxiang Guo, Liwei Shi, Xihuan Hou, Wenzhi Liu, and Yan Zhao. A multi-sensor fusion self-localization system of a miniature underwater robot in structured and gps-denied environments. *IEEE Sensors Journal*, 21(23):27136–27146, 2021.
- [79] Alireza Famili, Angelos Stavrou, Haining Wang, and Jung-Min Jerry Park. Spin: Sensor placement for indoor navigation of drones. In *2022 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6, 2022.
- [80] Alireza Famili and Jung-Min Jerry Park. Rolatin: Robust localization and tracking for indoor navigation of drones. In *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2020.
- [81] Antoine Courtay, Mickaël Le Gentil, Olivier Berder, Pascal Scalart, Sébastien Fontaine, and Arnaud Carer. Anchor selection algorithm for mobile indoor positioning using wsn with uwb radio. In *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pages 1–5, 2019.
- [82] Vlad Niculescu, Daniele Palossi, Michele Magno, and Luca Benini. Energy-efficient, precise uwb-based 3-d localization of sensor nodes with a nano-uav. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(7):5760–5777, 2023.
- [83] Michail Kalaitzakis, Sabrina Carroll, Anand Ambrosi, Camden Whitehead, and Nikolaos Vitzilaios. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 781–789. IEEE, 2020.
- [84] Mohammad Fattahi Sani and Ghader Karimian. Automatic navigation and landing of an indoor ar. drone quadrotor using aruco marker and inertial sensors. In *2017 International Conference on Computer and Drone Applications (IconDA)*, pages 102–107, 2017.
- [85] Silvio RR Sanches, Daniel M Tokunaga, Valdinei F Silva, Antonio C Sementille, and Romero Tori. Mutual occlusion between real and virtual elements in augmented reality based on fiducial markers. In *2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV)*, pages 49–54. IEEE, 2012.
- [86] Youngkwan Cho Jongweon Lee Ulrich Neumann. A multi-ring color fiducial system and an intensity-invariant detection method for scalable fiducial-tracking augmented reality. In *Proc. Int'l Workshop Augmented Reality*, pages 147–165, 1999.
- [87] Joseph DeGol, Timothy Bretl, and Derek Hoiem. Chromatag: A colored marker and fast detection algorithm. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 1472–1481, 2017.
- [88] Zhiyuan Li, Naira Hovakimyan, Vladimir Dobrokhodov, and Isaac Kaminer. Vision-based target tracking and motion estimation using a small uav. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2505–2510. IEEE, 2010.

- [89] P. Vlantis, P. Marantos, C. P. Bechlioulis, and K. J. Kyriakopoulos. Quadrotor landing on an inclined platform of a moving ground vehicle. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2202–2207, 2015.
- [90] K Boudjit and Chevif Larbes. Detection and implementation autonomous target tracking with a quadrotor ar. drone. In *2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, volume 2, pages 223–230. IEEE, 2015.
- [91] Yi Feng, Cong Zhang, Stanley Baek, Samir Rawashdeh, and Alireza Mohammadi. Autonomous landing of a uav on a moving platform using model predictive control. *Drones*, 2(4):34, 2018.
- [92] Guanya Shi, Xichen Shi, Michael O’Connell, Rose Yu, Kamyar Azizzadenesheli, Animashree Anandkumar, Yisong Yue, and Soon-Jo Chung. Neural lander: Stable drone landing control using learned dynamics. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 9784–9790. IEEE, 2019.
- [93] Aytaç Altan and Rifat Hacıoğlu. Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on uav for real-time target tracking under external disturbances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138:106548, 2020.
- [94] V. N. Dobrokhodov, I. I. Kaminer, K. D. Jones, and R. Ghabcheloo. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small uavs. In *2006 American Control Conference*, pages 6 pp.–, 2006.
- [95] Yingcai Bi and Haibin Duan. Implementation of autonomous visual tracking and landing for a low-cost quadrotor. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 124(18):3296–3300, 2013.
- [96] Ali Rohan, Mohammed Rabah, and Sung-Ho Kim. Convolutional neural network-based real-time object detection and tracking for parrot ar drone 2. *IEEE Access*, 7:69575–69584, 2019.
- [97] Hui Cheng, Lishan Lin, Zhuoqi Zheng, Yuwei Guan, and Zhongchang Liu. An autonomous vision-based target tracking system for rotorcraft unmanned aerial vehicles. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1732–1738. IEEE, 2017.
- [98] H. Kato and M. Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR’99)*, pages 85–94, 1999.
- [99] Jun Rekimoto and Yuji Ayatsuka. Cybercode: designing augmented reality environments with visual tags. In *Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments*, pages 1–10, 2000.
- [100] M. Fiala. Artag, a fiducial marker system using digital techniques. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, volume 2, pages 590–596 vol. 2, 2005.
- [101] Junaed Sattar, Eric Bourque, Philippe Giguere, and Gregory Dudek. Fourier tags: Smoothly degradable fiducial markers for use in human-robot interaction. In *Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV’07)*, pages 165–174. IEEE, 2007.

- [102] Bradley Atcheson, Felix Heide, and Wolfgang Heidrich. Caltag: High precision fiducial markers for camera calibration. In *VMV*, volume 10, pages 41–48, 2010.
- [103] Edwin Olson. Apriltag: A robust and flexible visual fiducial system. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3400–3407, 2011.
- [104] Filippo Bergamasco, Andrea Albarelli, Emanuele Rodolà, and Andrea Torsello. Rune-tag: A high accuracy fiducial marker with strong occlusion resilience. In *CVPR 2011*, pages 113–120, 2011.
- [105] L. Calvet, P. Gurdjos, and V. Charvillat. Camera tracking using concentric circle markers: Paradigms and algorithms. In *2012 19th IEEE International Conference on Image Processing*, pages 1361–1364, 2012.
- [106] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, and M.J. Marín-Jiménez. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6):2280–2292, 2014.
- [107] Michail Kalaitzakis, Brennan Cain, Sabrina Carroll, Anand Ambrosi, Camden Whitehead, and Nikolaos Vitzilaios. Fiducial markers for pose estimation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 101(4):1–26, 2021.
- [108] Mark Fiala. Comparing artag and artoolkit plus fiducial marker systems. In *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*, pages 6–pp. IEEE, 2005.
- [109] Sergio Garrido-Jurado, Rafael Munoz-Salinas, Francisco José Madrid-Cuevas, and Rafael Medina-Carnicer. Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming. *Pattern Recognition*, 51:481–491, 2016.
- [110] Gaetano C La Delfa, Salvatore Monteleone, Vincenzo Catania, Juan F De Paz, and Javier Bajo. Performance analysis of visualmarkers for indoor navigation systems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 17(8):730–740, 2016.
- [111] Lilian Calvet, Pierre Gurdjos, Carsten Griwodz, and Simone Gasparini. Detection and accurate localization of circular fiducials under highly challenging conditions. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 562–570, 2016.
- [112] Francisco J Romero-Ramirez, Rafael Muñoz-Salinas, and Rafael Medina-Carnicer. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and vision Computing*, 76:38–47, 2018.
- [113] John Wang and Edwin Olson. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 2016.
- [114] iNavFlight. inavflight/inav. <http://www.inavflight.com/>, Accessed on: Feb. 10, 2023, 2023.
- [115] Maximilian Krogius, Acshi Haggemiller, and Edwin Olson. Flexible layouts for fiducial tags. In *IROS*, pages 1898–1903, 2019.
- [116] FiRa™. Unleashing the potential of UWB: Regulatory considerations. <https://www.firaconsortium.org/sites/default/files/2022-08/Unleashing-the-Potential-of-UWB-Regulatory-Considerations.pdf>, August 2022.

- [117] Matteo Ridolfi, Abdil Kaya, Rafael Berkvens, Maarten Weyn, Wout Joseph, and Eli De Poorter. Self-calibration and collaborative localization for UWB positioning systems: a survey and future research directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(4):1–27, 2021.
- [118] Davide Dardari, Andrea Conti, Ulric Ferner, Andrea Giorgetti, and Moe Z Win. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments. *Proceedings of the IEEE*, 97(2):404–426, 2009.
- [119] Fredrik Gustafsson and Fredrik Gunnarsson. Positioning using time-difference of arrival measurements. In *2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings.(ICASSP'03).*, volume 6, pages VI–553. IEEE, 2003.
- [120] Andreu Urruela, Josep Sala, and Jaume Riba. Average performance analysis of circular and hyperbolic geolocation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(1):52–66, 2006.
- [121] Qorvo. Dwm3000 6.5 & 8.0 ghz ultra-wideband (uwb) module. <https://www.qorvo.com/products/p/DWM3000>, Accessed on: Nov. 15, 2022, 2023.
- [122] Anton Ledergerber, Michael Hamer, and Raffaello D’Andrea. A robot self-localization system using one-way ultra-wideband communication. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3131–3137. IEEE, 2015.
- [123] Bernhard Großwindhager, Michael Stocker, Michael Rath, Carlo Alberto Boano, and Kay Römer. SnapLoc: An ultra-fast UWB-based indoor localization system for an unlimited number of tags. In *2019 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 61–72. IEEE, 2019.
- [124] Pablo Corbalán, Gian Pietro Picco, and Sameera Palipana. Chorus: UWB concurrent transmissions for GPS-like passive localization of countless targets. In *2019 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 133–144. IEEE, 2019.
- [125] Janis Tiemann, Fabian Eckermann, and Christian Wietfeld. Atlas-an open-source tdoa-based ultra-wideband localization system. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [126] Jing Yang, BaiShun Dong, and Jiliang Wang. VULoc: Accurate UWB localization for countless targets without synchronization. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 6(3):1–25, 2022.
- [127] Davide Vecchia, Pablo Corbalán, Timofei Istomin, and Gian Pietro Picco. TALLA: Large-scale TDoA localization with ultra-wideband radios. In *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8. IEEE, 2019.
- [128] Wenda Zhao, Abhishek Goudar, and Angela P Schoellig. Finding the right place: Sensor placement for UWB time difference of arrival localization in cluttered indoor environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3):6075–6082, 2022.

- [129] Amanda Prorok, Phillip Tomé, and Alcherio Martinoli. Accommodation of NLOS for ultra-wideband TDOA localization in single-and multi-robot systems. In *2011 international conference on indoor positioning and indoor navigation*, pages 1–9. IEEE, 2011.
- [130] Ben Van Herbruggen, Jaron Fontaine, and Eli De Poorter. Anchor pair selection for error correction in time difference of arrival (TDoA) ultra wideband (UWB) positioning systems. In *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8. IEEE, 2021.
- [131] Michael Hamer and Raffaello D’Andrea. Self-calibrating ultra-wideband network supporting multi-robot localization. *IEEE Access*, 6:22292–22304, 2018.
- [132] Igor Dotlic, Andrew Connell, and Michael McLaughlin. Ranging methods utilizing carrier frequency offset estimation. In *2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [133] Juri Sidorenko, Volker Schatz, Norbert Scherer-Negenborn, Michael Arens, and Urs Hugentobler. Error corrections for ultrawideband ranging. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(11):9037–9047, 2020.
- [134] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F Molisch, H Vincent Poor, and Zafer Sahinoglu. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks. *IEEE signal processing magazine*, 22(4):70–84, 2005.
- [135] Moe Z Win and Robert A Scholtz. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications. *IEEE Transactions on communications*, 48(4):679–689, 2000.
- [136] IEEE. IEEE standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, pages 1–800, 2020.
- [137] STMicroelectronics. Stm32f429zi - high-performance advanced line, arm cortex-m4 core with dsp and fpu, 2 mbytes of flash memory, 180 mhz cpu, art accelerometer, chrom-artaccelerator, fmc with sdram, tft. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f429zi.html>, Accessed on: Nov. 15, 2022, 2023.
- [138] Rahul Dasgupta. The brutal truth about the transportation industry’s cutthroat profit margins. <https://blog.route4me.com/transportation-profit-margins/>, Accessed on: Jan. 16, 2023, 2021.
- [139] THE COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Council directive of 18 july 1989 on the approximation of the laws of the member states relating to the tread depth of tyres of certain categories of motor vehicles and their trailers (89/459/eec). <https://www.legislation.gov.uk/eudr/1989/459?view=plain>, Accessed on: Jan. 16, 2023, 1989.
- [140] TSG Romania. Technical Services Group - TSG Romania. <https://www.tsg-solutions.com/ro/despre-noi/>, Accessed on: Jan. 18, 2023, 2023.
- [141] Raspberry Pi. Raspberry Pi 4. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>, Accessed on: Jan. 10, 2023, 2023.
- [142] Arduino. Arduino Due. <https://store.arduino.cc/products/arduino-due>, Accessed on: Jan. 10, 2023, 2023.

- [143] Germany phil-vision GmbH. High-performance 3d laser triangulation systems. <https://www.phil-vision.com/en/products/3d-laser-triangulation>, Accessed on: Jan. 18, 2023, 2023.
- [144] George-Cristian Pătru, Laura Flueratoru, Iuliu Vasilescu, Dragoș Niculescu, and Daniel Rosner. FlexTDOA: Robust and Scalable Time-Difference of Arrival Localization Using Ultra-Wideband Devices. *IEEE Access*, 11:28610–28627, 2023.
- [145] Vladimir Tanasiev, George Cristian Pătru, Daniel Rosner, Gabriela Sava, Horia Necula, and Adrian Badea. Enhancing environmental and energy monitoring of residential buildings through iot. *Automation in Construction*, 126:103662, 2021.
- [146] George-Cristian Pătru, Iuliu Vasilescu, Daniel Rosner, and Dan Tudose. Aerial drone platform for asset tracking using an active gimbal. In *2021 23rd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, pages 138–142. IEEE, 2021.
- [147] George-Cristian Pătru, Dumitru-Cristian Trancă, Ciprian-Marian Costea, Daniel Rosner, and Răzvan-Victor Rughiniș. Lora based, low power remote monitoring and control solution for industry 4.0 factories and facilities. In *2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [148] Denis Ilie-Ablachim, George Cristian Pătru, Iulia-Maria Florea, and Daniel Rosner. Monitoring device for culture substrate growth parameters for precision agriculture: Acronym: Monisen. In *2016 15th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [149] Alina Irina Pîrvan, George Cristian Pătru, Dumitru Cristian Trancă, Cristian Contășel, and Daniel Rosner. Infrastructure independent rail quality diagnosis and monitoring system. In *2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [150] Andrei-Bogdan Stanescu, Vlad-Ioan Pantea, and George Cristian Patru. Application of mobile technology in sport leisure time activities. In *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education*, volume 3, page 215. "Carol I" National Defence University, 2017.
- [151] Dumitru-Cristian TRANCĂ, Eugen BUZILĂ, Daniel Rosner, George Cristian PĂTRU, and Răzvan Victor RUGHINIȘ. Intact industrial internet of things communication solution. *University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin. Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 2018.
- [152] Vladimir Tanasiev, Horia Necula, Adrian Alistar, George Cristian Pătru, and Adrian Badea. Energy-efficient solution for smart lighting through iot. In *2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, pages 1–4. IEEE, 2021.
- [153] Andra-Laura Antonache, Silvia Cristina Stegaru, Mihail-Bogdan Caruțașiu, and Cristian Patru. Modeling a thermal area for energy consumption estimation using artificial neural networks. In *2020 19th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–4. IEEE, 2020.

- [154] Daniel Marian Nicolescu, Răzvand Tătăroiu, Dumitru Cristian Trancă, and George Cristian Pătru. Logger and analyser for modbus-based industrial networks. In *2020 19th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–4. IEEE, 2020.