



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Lazar Ašanin

**PREDLOG ALGORITMA ZA AUTONOMNO
KRETANJE POVRŠINSKOG VOZILA PO
ZADATOJ PUTANJI SA KOMPENZACIJOM
BOČNOG KLIZANJA**

-MASTER RAD-

Podgorica, 2023.

INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Lazar Ašanin

Datum i mjesto rođenja: 28.06.1999. Podgorica, Crna Gora.

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2021.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studijskog programa: Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Predlog algoritma za autonomno kretanje površinskog vozila po zadatoj putanji sa kompenzacijom bočnog klizanja

Fakultet: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 20.04.2023.

Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 08.05.2023.

Mentor: Prof. dr Žarko Zečević

Komisija za ocjenu i odbranu rada: Prof. dr Milovan Radulović
Prof. dr Žarko Zečević
Prof. dr Božo Krstajić

Datum odbrane:

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Lazar Ašanin, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Predlog algoritma za autonomno kretanje površinskog vozila po zadatoj putanji sa kompenzacijom bočnog klizanja"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Lazar Ašanin, BSc

Lazar Ašanin

U Podgorici, dana 19.09.2023. godine

Zahvalnost dugujem mentoru prof. dr. Žarku Zečeviću na nesebičnoj pomoći i vremenu koje je izdvojio prilikom izrade ovog rada.

Na kraju, veliku zahvalnost dugujem svojoj porodici na neizmjernoj podršci.

Sažetak

Predmet istraživanja ovog rada su algoritmi za autonomno kretanje plovila po zadatoj putanji u prisustvu spoljnih poremećaja. Konkretno, razmotrena je line-of-sight (LOS) metodologija vođenja. Poslednjih godina, LOS metod vođenja zbog svoje efikasnosti i jednostavnosti privukao je ogromno interesovanje istraživača kako sa teorijskog tako i sa praktičnog aspekta.

U radu je dat predlog LOS algoritma koji ima mogućnost kompenzacije ugla između pravca i kursa vozila (ugla bočnog klizanja). Predloženi algoritam se zasniva na nelinearnom estimatoru stanja (Kalmanovom filtru) i omogućava praćenje pravolinijske putanje bez greške. Za razliku od postojećih algoritama, kod predloženog rješenja ugao bočnog klizanja se tretira kao nepoznato stanje sistema čija se estimacija vrši uporedo sa greškom položaja.

U radu je izvršena komparativna analiza predloženog LOS zakona i adaptivnih i prediktivnih LOS zakona iz literature. Rezultati simulacija pokazuju da se predloženim metodom postiže brža estimacija ugla bočnog klizanja u odnosu na postojeće metode, a samim tim i brža konvergencija ka zadatoj putanji. Pored toga, predloženi metod je manje osjetljiv na početnu poziciju i orijentaciju vozila, kao i na longitudinalnu brzinu. Efikasnost predloženog metoda je dodatno utvrđena putem eksperimenata na realnim plovilima.

Ključne riječi: ASV – Vođenje – Praćenje putanje – Line-of-Sight (LOS) – Kompenzacija bočnog klizanja

Abstract

In this thesis, the algorithms for the autonomous movement of vessels along a given path in the presence of external disturbances are investigated. In particular, line-of-sight (LOS) guidance methodology is considered. In recent years, LOS guidance method has attracted great research interest from both theoretical and practical aspect due to its efficiency and simplicity.

The thesis proposes a LOS algorithm that has the possibility of compensating the angle between the heading and the course of the vehicle (sideslip angle). The proposed algorithm is based on a nonlinear state estimator (Kalman filter) and enables the following of a straight-line path without error. In contrast to the existing algorithms, in the proposed solution, the sideslip angle is treated as an unknown system state, whose estimation is performed simultaneously with the cross-track error.

In this thesis, a comparative analysis of the proposed LOS law and adaptive and predictive LOS laws from the literature was performed. The simulation results show that the proposed method achieves a faster estimation of the sideslip angle compared to the existing methods, and therefore a faster convergence towards the given path. In addition, the proposed method is less sensitive to the initial position and orientation of the vehicle, as well as the longitudinal (surge) velocity. The effectiveness of the proposed method was additionally determined through experiments on real vessels.

Keywords: ASV – Guidance – Path Following – Line-of-Sight (LOS) – Sideslip Compensation

Sadržaj

Rezime	ii
Abstract	ii
Spisak slika	1
Uvod	3
1 Modelovanje autonomnih površinskih vozila	4
1.1 Uvod	4
1.2 Elementi ASV	6
1.3 Povezanost podсистema vođenja, navigacije i upravljanja ASV	7
1.4 Koordinatni sistemi	9
1.4.1 Geocentrični koordinatni sistemi	9
1.4.2 Geografski koordinatni sistemi	9
1.5 Kinematika ASV	11
1.6 Kinetika ASV	13
1.7 Modeli autopilota za kontrolu pravca (1 DOF)	15
1.7.1 Nomoto model drugog reda	15
1.7.2 Nomoto model prvog reda	16
2 Metode za autonomno kretanje vozila po zadatoj putanji	17
2.1 Praćenje pravolinijske putanje	17
2.1.1 Generisanje putanje na osnovu putnih navigacijskih tačaka	18
2.1.2 Line-of-Sight zakoni upravljanja	21
2.2 Praćenje krivolinijske putanje	30
2.2.1 Line-of-Sight praćenje putanje	32
2.2.2 Praćenje putanje pomoću Serret-Frenet koordinata	34
3 Pregled postojećih LOS algoritama i predlog novog algoritma	36
3.1 Integralni LOS	38
3.2 Adaptivni LOS	39
3.3 Prediktivni LOS	42

3.4	Predlog LOS algoritma za praćenje putanje zasnovan na upotrebi Kalmanovog filtra	46
3.4.1	Kalmanov filter	46
3.4.2	Predloženi LOS algoritam	50
4	Rezultati	53
4.1	Rezultati simulacija	53
4.2	Eksperimentalni rezultati	57
	Zaključak	65
	Bibliografija	66
	Prilog	70

Spisak slika

1.1	Osnovni elementi ASV [1].	7
1.2	Autopilot GNC blokovi gdje referentni model predstavlja sistem vođenja u otvorenoj petlji [2].	9
1.3	Geocentrični i geografski koordinatni sistemi.	11
1.4	Koordinatni sistem vezan za vozilo.	11
1.5	Šematski prikaz planarnog kretanja ASV.	13
2.1	Prave linije i kružnice za vođenje pomoću putnih tačaka [2]	19
2.2	Kružnica poluprečnika \bar{R}_1 upisana između tačaka (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) [2]	21
2.3	LOS vođenje [2]	24
2.4	Krug prihvatanja sa konstantnim poluprečnikom R	27
2.5	LOS upravljačka šema	28
2.6	LOS metodi. Metod A proizvodi bočno odstupanje u odnosu na putanju.	29
2.7	Šematski prikaz LOS geometrije za praćenje krivolinijske putanje.	32
2.8	Promjenjive i koordinate za praćenje putanje zasnovano na upotrebi Serret-Frenet sistema.	35
3.1	Geometrija LOS zakona vođenja za praćenje putanje u 2-D ravni	37
4.1	S1: Estimacija ugla bočnog klizanja	54
4.2	S1: Greška položaja y_e	54
4.3	S1: Performanse praćenja putanje	54
4.4	S2: Estimacija ugla bočnog klizanja	55
4.5	S2: Greška položaja y_e	55
4.6	S2: Performanse praćenja putanje	56
4.7	Testiranje u luci Genova Prà	58
4.8	Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 0.01$	59
4.9	Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 0.1$	59
4.10	Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 1$	59
4.11	Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 10$	59
4.12	Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 100$	60

4.13	Estimacija ugla bočnog klizanja, varijabilno $Q_{2,2}$	60
4.14	Estimacija greške položaja	60
4.15	Mjere performansi praćenja pravolinijske putanje [3]	61
4.16	Performanse praćenja putanje bez kompenzacije bočnog klizanja za prvi smjer kretanja	62
4.17	Performanse praćenja putanje bez kompenzacije bočnog klizanja za drugi smjer kretanja	62
4.18	Performanse praćenja putanje sa kompenzacijom bočnog klizanja za prvi smjer kretanja	62
4.19	Performanse praćenja putanje sa kompenzacijom bočnog klizanja za drugi smjer kretanja	63

Uvod

Potpogonjena autonomna površinska vozila (eng. *Autonomous Surface Vehicles*, ASV) privlače veliko interesovanje istraživačke zajednice zbog njihove primjene u obavljanju različitih pomorskih operacija kao što su nadzor životne sredine [4], vojno izviđanje [5], zaštita morskih luka [6], itd., te njihove efikasnosti, sigurnosti i niskih troškova. U pomorskim operacijama gdje se koriste ASV, sistem vođenja je od velike važnosti. Vođenje se odnosi na određivanje željene putanje od trenutne pozicije plovila do cilja [7,8].

U oblasti sistema vođenja površinskih vozila najčešće se razmatraju dva scenarija upravljanja: praćenje željene trajektorije (uzimaju se u obzir vremenska ograničenja) i praćenje željene putanje (ne uzimaju se u obzir vremenska ograničenja).

Kod praćenja trajektorije (eng. *trajectory tracking*) glavni cilj je osigurati da izlaz sistema $y(t) \in \mathbb{R}^m$ prati željeni izlaz $y_d(t) \in \mathbb{R}^m$. Željena trajektorija se može izračunati koristeći referentne modele generisane pomoću niskopropusnih filtara, metodama optimizacije ili simulacijom kretanja modela pomorskog vozila. Trajektorije se mogu generisati u prisustvu prostornih i vremenskih ograničenja [2].

Praćenje željene trajektorije se rjeđe implementira u praksi zbog velike zavisnosti od dinamičkog modela ASV i sofisticiranih zakona upravljanja. Sa druge strane, praćenje željene putanje (eng. *path following*) je jednostavnije za implementaciju jer ne zahtijeva nagle promjene brzine, zbog čega nalazi širu primjenu u praksi, što je i glavni razlog za razmatranje tog problema u ovom radu.

Praćenje putanje, kao tipičan scenario kontrole kretanja, se odnosi na dostizanje i kretanje ASV po unaprijed definisanoj parametrizovanoj putanji, bez vremenskih ograničenja. Dva pristupa za praćenje putanje se najčešće koriste u praksi, a to su metod praćenja putanje zasnovan na Serret-Frenet (SF) koordinatnom sistemu i line-of-sight (LOS) metod. LOS metod vođenja je zasnovan na oponašanju iskusnog kormilara i predstavlja efikasan i popularan način da se ostvari konvergencija ka definisanoj putanji [9]. Ova metoda na osnovu geometrije ASV generiše referentne vrijednosti za željeni pravac, koje predstavljaju ulaz u sistem upravljanja kormilom.

Uprkos tome što je efikasan i jednostavan, klasični LOS metod ne može da obezbijedi idealno praćenje željene putanje kada je vozilo izloženo uticaju sila koje su

izazvane okeanskim strujama, talasima i vjetrom. Rezultat ovih smetnji se manifestuje pojavom odstupanja između pravca ka kom je okrenut prednji kraj vozila i stvarnog pravca kretanja vozila (kurs). Ovo odstupanje, poznato kao bočno klizanje, izaziva grešku pri praćenju putanje i negativno utiče na performanse [10]. Ako je ugao bočnog klizanja poznat, njegovi efekti se mogu poništiti odgovarajućim modifikacijama unutar zakona vođenja. Najčešće se ne pribjegava mjerenju ovog ugla zbog visoke cijene implementacije odgovarajućih senzora i šumova u mjerenjima.

Bočno klizanje se može kompenzovati korišćenjem integralnog zakona (Integralni LOS), prvobitno predstavljenog u [11] i detaljno analiziranog u [12]. Međutim, ILOS ne pruža mogućnost procjene ugla bočnog klizanja. Za direktnu estimaciju vrijednosti bočnog klizanja efikasniji je adaptivni ILOS metod (AILOS) [13]. Nedostatak ILOS metoda je u tome što su dizajnirani za sporopromjenljive poremećaje i što mogu da ispolje greške pri praćenju i loše performanse tokom prelaznog procesa [14,15]. Za prevazilaženje pomenutih problema predložene su metode koje koriste predikciju greške položaja za brzu i preciznu estimaciju bočnog klizanja (PLOS) [15,16].

U radu će biti predložen novi algoritam za autonomno kretanje površinskog vozila po zadatoj putanji sa mogućnošću kompenzacije bočnog klizanja. Ugao bočnog klizanja se tretira kao nepoznati parametar sistema koji se uporedo sa greškom položaja estimira primjenom proširenog Kalmanovog filtra. Ovo se razlikuje od dostupnih PLOS metoda u kojima se koriste međusobno nezavisna adaptivna pojačanja za ažuriranje estimacija greške položaja i ugla bočnog klizanja. Biće izvršena komparativna analiza predloženog LOS zakona i adaptivnih i prediktivnih LOS zakona iz literature. Razlika između metoda koje će biti komparirane se ogleda u brzini estimacije ugla bočnog klizanja, tj. brzini konvergencije ka zadatoj putanji, kao i u osjetljivosti na početne uslove (početna pozicija i orijentacija vozila, longitudinalna brzina). Analizom performansi pomenutih metoda biće pokazane prednosti predloženog rješenja.

Master rad se sastoji od uvoda, četiri poglavlja, zaključka, liste referenci i priloga. Prva glava sadrži informacije o mogućnostima primjene autonomnih površinskih vozila i njihovim prednostima u odnosu na druga autonomna i neautonomna vozila. U ovoj glavi je izvršeno i modelovanje kinematike i dinamike ASV. U drugoj glavi je razmotren problem praćenja putanje autonomnih površinskih plovila. Presentovani su najčešće upotrebljavani metodi za praćenje pravolinijske putanje i analizirane su njihove karakteristike. Nakon toga je izvršena analiza metoda vođenja u slučaju kada je željena putanja krivolinijska. Pregled postojećih LOS algoritama je definisan u trećoj glavi. Presentovan je i novi LOS algoritam za praćenje pravolinijske putanje. Četvrta glava sadrži rezultate simulacija i eksperimentalne rezultate. Naime, izvršena je komparacija predloženog algoritma i postojećih rješenja, pri čemu su razmotrene različite situacije, u zavisnosti od longitudinalne brzine, početne pozi-

cije i orijentacije vozila. U zaključku su diskutovani rezultati master rada, odnosno doprinosi u odnosu na postojeća rješenja. Takođe su predstavljeni i dalji pravci u istraživanju. Konačno, u prilogu rada su dati primjeri Matlab kodova pomoću kojih su izvršene simulacije.

Glava 1

Modelovanje autonomnih površinskih vozila

U ovoj glavi će biti dat uvod u autonomna površinska vozila (ASV), njihovu primjenu i značaj u izvršavanju brojnih pomorskih operacija. Nakon toga, biće definisani referentni koordinatni sistemi za vođenje ASV u 2-D ravni. Takođe, biće izvršeno matematičko modelovanje kinematike i kinetike samog vozila.

1.1 Uvod

Oko dvije trećine Zemljine površine zauzimaju okeani [1], ali samo je mali dio ovih površina temeljno istražen. Klimatske promjene, ekološki poremećaji, problemi nacionalne bezbjednosti, doveli su do velike potražnje komercijalne, naučne i vojne zajednice za razvojem inovativnih autonomnih površinskih vozila (ASV). Međutim, obično su korišćena samo poluautonomna površinska vozila, zbog brojnih izazova koji se javljaju prilikom potpune autonomizacije površinskih vozila u pogledu ograničenja pouzdanosti sistema za vođenje, navigaciju i upravljanje (eng. *Guidance, navigation, control* – GNC), rada u opasnim okruženjima, kvarova senzora, aktuatora i nepouzdana komunikacije. Dalji razvoj potpuno autonomnih površinskih vozila je neophodan kako bi se povećala sigurnost i pouzdanost rada ASV [17].

ASV se može okarakterisati kao vozilo bez posade koje obavlja zadatke u različitim morskim okruženjima bez ikakve ljudske intervencije i u suštini ima veoma nelinearnu dinamiku [18]. Razvoj ASV ima za cilj ostvarivanje nižih troškova rada, poboljšanje bezbjednosti osoblja, proširenje radnog dometa (pouzdanosti) i preciznosti, veće fleksibilnosti u izvršavanju opasnih i teških zadataka [18, 19].

Uz pomoć efikasnije, kompaktnije i komercijalno dostupnije navigacione opreme, uključujući globalne pozicione sisteme (GPS) i inercijalne mjerne jedinice (eng. *Inertial measurement units* – IMU), kao i naprednije i pouzdanije sisteme za bežičnu

Tabela 1.1: Primjena ASV [1]

Tipovi	Konkretne aplikacije
Naučna istraživanja	Batimetrijska istraživanja [19]; biološki fenomeni okeana, migracije i promjene u ekosistemima [20]; istraživanje okeanskih aktivnosti; kooperacija više vozila (kooperativni rad kopnenih, vodenih površinskih ili podvodnih vozila) [5, 21]; kao eksperimentalne platforme za potrebe testiranja komunikacione i senzorske opreme, pogonskih i operativnih sistema, kao i upravljačkih šema [18].
Ekološke misije	Monitoring, uzorkovanje i procjena uticaja na životnu sredinu [22]; pomoć u predviđanju i upravljanju katastrofama (kao što je cunami, uragan, erupcija podvodnog vulkana), kao i reagovanju u vanrednim situacijama [23]; mjerenje i saniranje zagađenja.
Istraživanje okeanskih resursa	Istraživanja ležišta nafte, gasa i ruda [19]; izgradnja i održavanje offshore platformi/cjevovoda [24].
Vojna upotreba	Lučki i obalni nadzor, izviđanje i patroliranje [25–27]; traganje i spašavanje [19, 23]; antiterorizam [17]; protivminske mjere; borbeni modul [28].
Ostale primjene	Transport [29]; sredstvo za mobilnu komunikaciju [7]; platforma za dopunu goriva za ASV, bespilotne letjelice (eng. <i>Unmanned aerial vehicles</i> – UAV), podvodne dronove (eng. <i>Unmanned underwater vehicles</i> – UUV) i vozila sa posadom.

komunikaciju, veće su mogućnosti ASV. ASV se mogu razviti za širok spektar potencijalnih primjena (kao što je navedeno u tabeli 1.1) na isplativ način.

ASV su konkurentni drugim sistemima sa posadom ili bez posade kao što su podvodni dronovi (eng. *Unmanned underwater vehicles* – UUV), plutajuće platforme, brodovi sa posadom, bespilotne letjelice (eng. *Unmanned aerial vehicles* – UAV) i letjelice sa posadom. U poređenju sa navedenim sistemima, ASV imaju sljedeće prednosti [28, 30]:

1. ASV mogu da obavljaju duže i opasnije misije od vozila sa posadom;
2. Troškovi održavanja su niži, a bezbjednost osoblja je daleko veća jer nema posade;
3. Mala težina i kompaktne dimenzije ASV omogućavaju bolju upravljivost u plitkim vodama (riječnim i priobalnim oblastima), gdje veća vozila ne mogu raditi efikasno;
4. ASV takođe imaju veću nosivost i mogu da vrše monitoring i uzorkovanje na većim dubinama u poređenju sa UAV.

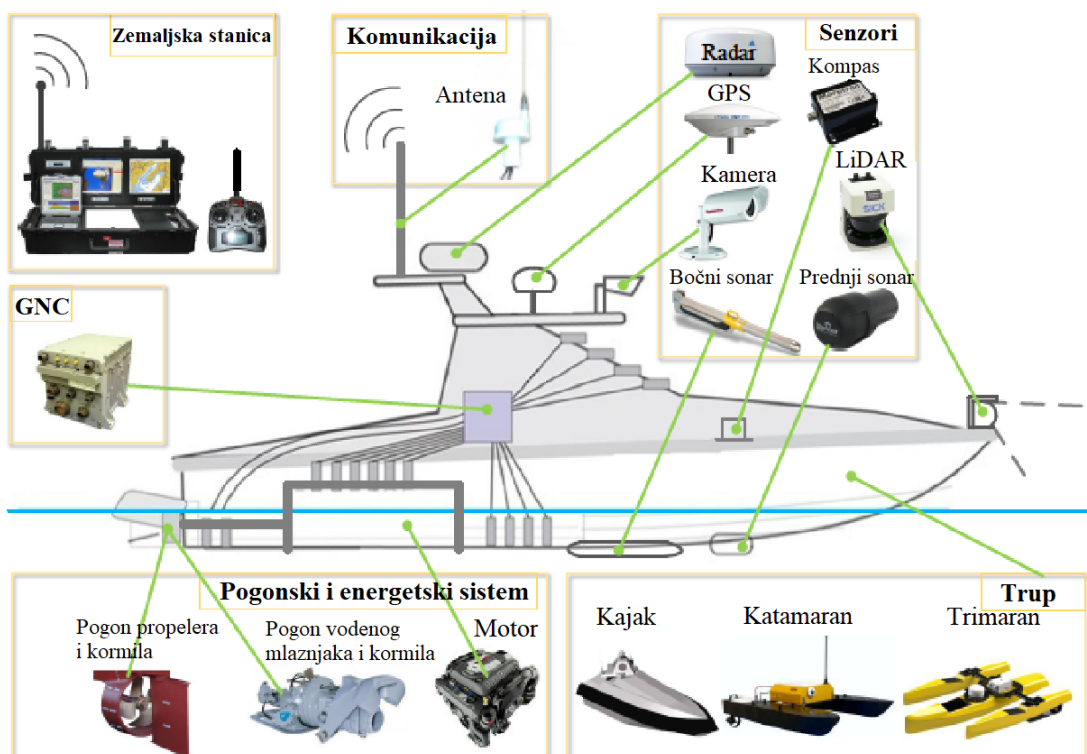
1.2 Elementi ASV

U zavisnosti od praktične primjene, ASV može imati različit izgled i funkcionalnosti. Međutim, sljedeći elementi su sastavni dio svakog ASV (slika 1.1) [1].

1. **Trup i pomoćni konstruktivni elementi:** Varijacije trupa mogu biti svrstane u jednu od četiri grupe: kruti trupovi na naduvavanje [31], kajaci (jednostruki trup) [32], katamarani (dvotrupni) [22], i trimarani (trostruki trupovi) [33]. Ove varijacije u izradi trupa u vezi su sa primjenama ASV. Kruti trupovi na naduvavanje su pogodni za vojnu primjenu prvenstveno zbog veće izdržljivosti i nosivosti. Dizajni kajaka i katamarana su popularni zbog pogodne montaže i utovara. Štaviše, kajak ASV se lako proizvodi ili modifikuje od površinskih vozila sa posadom. Katamaran i trimaran ASV su često poželjni zbog veće stabilnosti sistema, smanjujući rizik od prevrtanja u lošim uslovima na moru [17], zajedno sa obezbjeđivanjem veće nosivosti i redundantnosti.
2. **Pogonski i energetski sistem** [34]: Kontrolu pravca i brzine većine postojećih ASV obezbjeđuju pogonski sistemi kormila i propelera (ili vodenog mlaznjaka), respektivno, dok se ostalima (uglavnom katamaranskim ASV) upravlja diferencijalnim potiskom (eng. *differential thrust*), pomoću dva nezavisna motora pričvršćena za svaki trup. Međutim, ova vozila obično nisu opremljena dodatnim bočnim aktuatorima i stoga se mogu smatrati potpogonjenim ASV. Drugim riječima, broj dostupnih aktuatora je manji od broja stepeni slobode (DOF) ASV u pokretu. Ovo predstavlja značajan izazov za sigurno i precizno upravljanje potpogonjenih površinskih vozila. Drugim potpuno ili prepogonjenim ASV je relativno lakše upravljati nego potpogonjenim ASV, ali oni iziskuju relativno veće troškove [18].
3. **GNC sistemi:** Kao najvažnija komponenta ASV, GNC moduli se obično sastoje od ugrađenih računara i softvera, koji su zajedno odgovorni za upravljanje cijelim sistemom ASV.
4. **Komunikacioni sistemi:** Komunikacioni sistemi uključuju ne samo bežičnu komunikaciju sa zemaljskim kontrolnim stanicama i drugim vozilima za vršenje kooperativnog upravljanja, već i žičanu/bežičnu komunikaciju na vozilu, sa raznim sensorima, aktuatorima i drugom opremom. Pouzdanost komunikacionih sistema je stoga od najveće važnosti.
5. **Oprema za prikupljanje podataka:** Zajedno sa prethodno navedenim komponentama, kao senzori se obično koriste žirostabilizatori (IMU) i GPS u kombinaciji sa sistemom kako bi se garantovalo da ASV ostane u dobrim radnim uslovima, i poboljšale njegove performanse. Osim toga, opciono se implementiraju kamere, radari, sonar, kao i druge vrste senzora, u zavisnosti od konkretnog zadatka, kao što je monitoring i upravljanje ASV pri različitim uslovima

(npr. temperaturama i vlažnosti kabine, stanju elektronske opreme, potrošnje goriva, itd.) [19].

6. **Zemaljska satelitska stanica:** Zemaljska stanica takođe igra važnu ulogu u GNC ASV, i može se nalaziti u objektu na kopnu, mobilnom vozilu ili brodu na moru. Generalno, misije se ASV dodjeljuju putem bežičnih komunikacionih sistema. Stanje ASV i njegove opreme u realnom vremenu se nadgledaju putem zemaljske stanice, dok se za daljinski upravljana površinska vozila, upravljačke komande takođe šalju sa zemaljske stanice.



Slika 1.1: Osnovni elementi ASV [1].

1.3 Povezanost podsistema vođenja, navigacije i upravljanja ASV

Sistem kontrole kretanja obično se sastoji od tri nezavisna bloka, označena kao podsistemi za vođenje, navigaciju i kontrolu (GNC). Ovi podsistemi komuniciraju preko međusobnog prenosa podataka i signala.

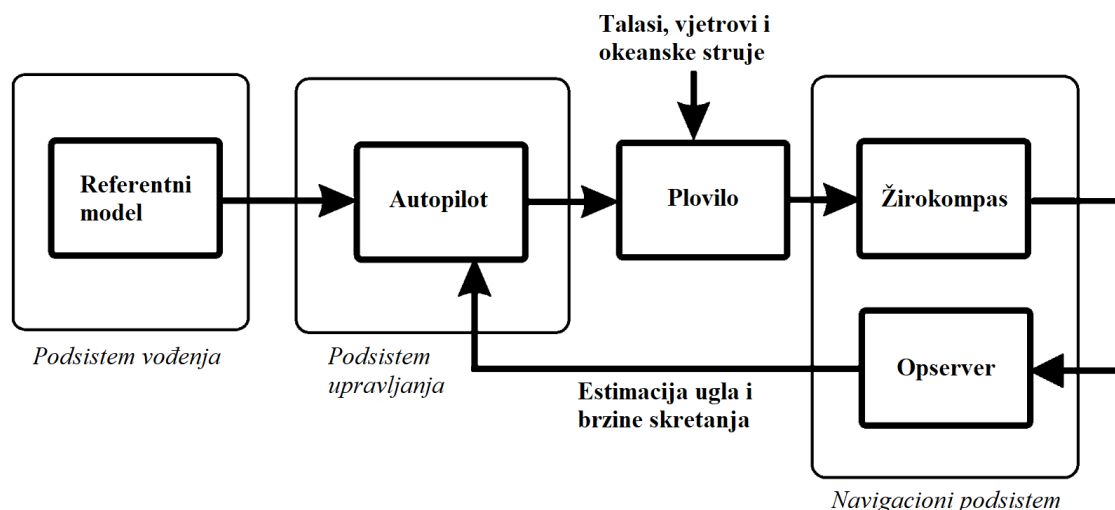
Vođenje podrazumijeva akciju ili podsistem koji u kontinuitetu proračunava referentnu (željenu) poziciju, brzinu i ubrzanje plovila koji se dalje prosljeđuju podsistemu upravljanja. Osnovne komponente podsistema za vođenje su senzori pokreta, eksterni podaci (npr. meteorološki podaci – brzina i pravac vjetera, visina i nagib talasa, brzina i smjer struja) i računar. Računar prikuplja i obrađuje informacije,

a zatim ih šalje podsistemu upravljanja. U mnogim slučajevima, napredne optimizacione tehnike se koriste za izračunavanje optimalne trajektorije ili putanje koju plovilo prati. Ovo može uključivati sofisticirana svojstva kao što su optimizacija goriva, minimalno vrijeme navigacije, izbjegavanje sudara, kontrolu formacije i sinhronizaciju [2].

Navigacija se odnosi na određivanje upravljanja plovilom, identifikovanjem njegovog trenutnog i budućeg položaja/stava, kursa, pređene udaljenosti, brzine i ubrzanja, kao i stanja okoline, na osnovu prethodnih i trenutnih stanja ASV i informacija o okeanskim strujama i brzini vjetra. Ovo se obično postiže korišćenjem globalnog navigacionog satelitskog sistema (GNSS) u kombinaciji sa sensorima pokreta kao što su akcelerometri i žiroskopi. Najnapredniji navigacioni sistem u pomorstvu je inercijalni navigacioni sistem (INS).

Upravljanje, tačnije kontrola kretanja, podrazumijeva određivanje potrebnih upravljačkih sila i momenata koje je potrebno obezbijediti plovilu, kako bi određeni cilj upravljanja bio zadovoljen. Željeni cilj upravljanja obično se ostvaruje na osnovu informacija iz podsistema vođenja i navigacije. Primjeri ciljeva upravljanja su minimalna energija, regulacija zadate vrijednosti, praćenje trajektorije, praćenje putanje i izvođenje manevra. Upravljački algoritam se najčešće ne zasniva samo na principima povratne sprege, već sadrži i takozvani feedforward dio. Povratna sprega se najčešće zatvara po poziciji, brzini ili ubrzanju, dok se za feedforward upravljanje koriste signali iz podsistema vođenja i drugih spoljnih senzora.

Autopilot je GNC sistem u svom najosnovnijem obliku. Najsavremeniji autopilot-ski sistem sastoji se od referentnog modela (podsistem vođenja), žirokompasa/opservera (navigacioni podsistem) i autopilota (podsistem upravljanja), kako je prikazano na slici 1.2.



Slika 1.2: Autopilot GNC blokovi gdje referentni model predstavlja sistem vođenja u otvorenoj petlji [2].

1.4 Koordinatni sistemi

Za analizu kretanja brodskih plovila sa šest stepeni slobode (DOF), pogodno je definisati dva geocentrična koordinatna sistema, kako je prikazano na slici 1.3. Pored toga, u upotrebi je nekoliko geografskih koordinatnih sistema [2].

1.4.1 Geocentrični koordinatni sistemi

1. **ECI:** *The Earth-centered inertial* koordinatni sistem $\{i\} = (x_i, y_i, z_i)$ za zemaljsku navigaciju, koji ne ubrzava i u kome važe Njutnovi zakoni kretanja. Ovo uključuje inercijalne navigacione sisteme (INS). Koordinatni početak sistema $\{i\}$ se nalazi u centru Zemlje sa osama orijentisanim kao na slici 1.3.
2. **ECEF:** *The Earth-centered Earth-fixed* koordinatni sistem $\{e\} = (x_e, y_e, z_e)$ ima koordinatni početak fiksiran za centar Zemlje, ali ose rotiraju u odnosu na inercijalni ECI sistem, koji je fiksiran u prostoru. Ugaona brzina rotacije je $\omega_e = 7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$. Za plovila koja se kreću relativno malom brzinom, rotacija Zemlje se može zanemariti i stoga se $\{e\}$ može smatrati inercijalnim. Koordinatni sistem $\{e\}$ se obično koristi za globalno vođenje, navigaciju i upravljanje, na primjer za opisivanje kretanja i lokacije plovila u tranzitu između kontinenata [2].

1.4.2 Geografski koordinatni sistemi

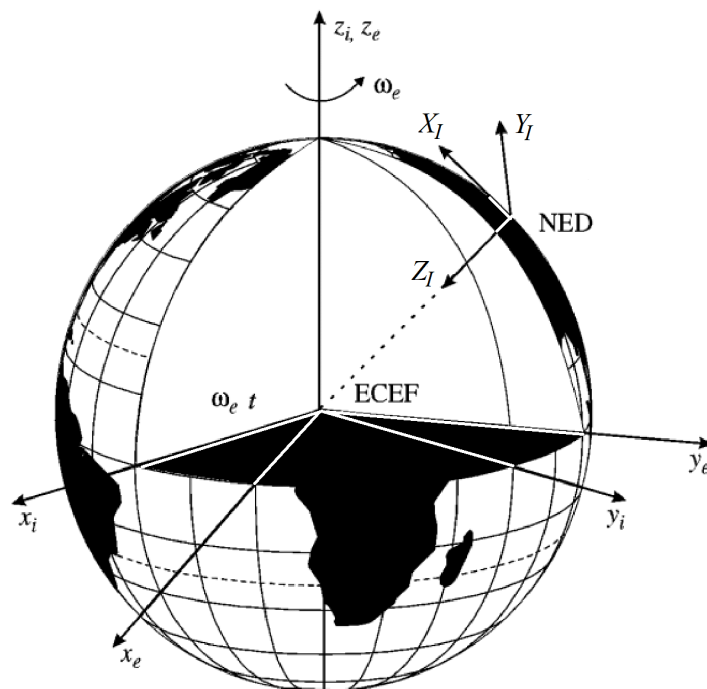
Za vođenje ASV, obično se koriste tri koordinatna sistema kako bi se opisalo kretanje vozila u 2-D ravni [14]:

1. North-East-Down (NED) koordinatni sistem $\{I\}$;
2. Koordinatni sistem vezan za vozilo $\{B\}$;
3. Koordinatni sistem vezan za tangentu u tački referentne putanje $\{P\}$.

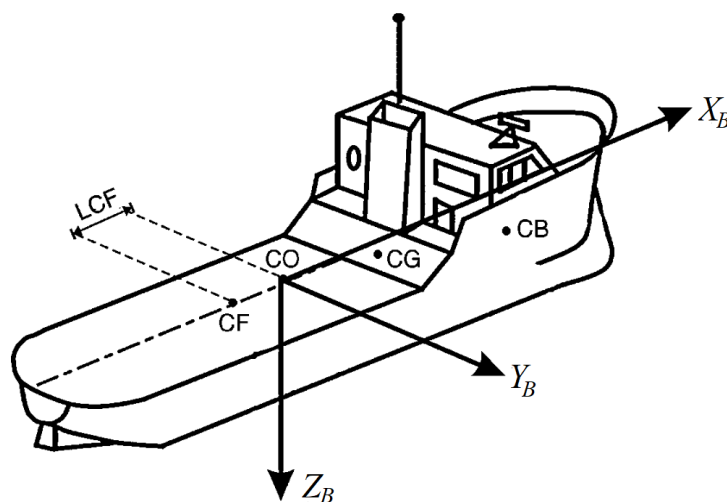
Koordinatni sistem $\{I\}$ definiše se kao tangentna ravan na površini Zemlje. Osa X_I ovog sistema usmjerena je ka Sjeveru, osa Y_I ka Istoku, a osa Z_I je normalna na površinu Zemlje i usmjerena ka njenom centru. Lokacija $\{I\}$ u odnosu na $\{e\}$ definisana je geografskom širinom (latitudom) i dužinom (longitudom). Za plovila koja se nalaze u području sa približno konstantnom geografskom dužinom i širinom, za navigaciju se koristi tangentna ravan fiksirana za površinu Zemlje. Tada se može pretpostaviti da je $\{I\}$ inercijalan tako da Njutnovi zakoni i dalje važe.

Koordinatni sistem $\{B\}$ je fiksiran za ASV i kreće se sa njim, tako da je osa X_B (longitudinalna osa) usmjerena ka pramcu vozila, osa Y_B (transverzalna osa) ka trupu vozila, a osa Z_B (normalna osa) određuje se pravilom desnog zavrtnja. Pozicija i orijentacija vozila su definisane u odnosu na inercijalni koordinatni sistem $\{I\}$, dok linearne i ugaone brzine vozila treba da budu izražene u koordinatama sistema fiksiranog za vozilo. Kao koordinatni početak ovog sistema obično se bira tačka na sredini vozila (tačka CO na slici 1.4). U odnosu na tačku CO , na slici 1.4 su definisane tačke CG (*center of gravity*), CB (*center of buoyancy*) i CF (*center of flotation*). CF se definiše kao geometrijski centar horizontalne ravni na kojoj vozilo pluta. Vozilo ima stepene slobode valjanja (*roll*) i posrtanja (*pitch*) oko ove tačke [2].

Koordinatni sistem $\{P\}$ je fiksiran za virtuelnu tačku koja se kreće duž parametrizovane putanje. Osa X_P pokazuje pravac tangente na putanju, a osa Y_P pravac normale na putanju (vidjeti poglavlje 2.1.2).



Slika 1.3: Geocentrični i geografski koordinatni sistemi.



Slika 1.4: Koordinatni sistem vezan za vozilo.

1.5 Kinematika ASV

Kada je riječ o upravljanju ASV, ne postoji zahtjev za razmatranje udobnosti putnika ili stabilnosti tereta. Primarna uloga upravljanja je da osigura da ASV što preciznije prati željeni put. Na osnovu ove karakteristike, opšti model ASV sa šest DOF (zalijetanje – *surge*, zanošenje – *sway*, poniranje – *heave* i valjanje – *roll*, po-

srtanje – *pitch*, skretanje – *yaw*) se može svesti samo na razmatranje zalijetanja, zanošenja i skretanja, dok se dinamika povezana sa poniranjem, posrtanjem i valjanjem generalno zanemaruje da bi se održala jednostavnost modela [35]. Kao što je prikazano na slici 1.5, tipični kinematički model ASV [8] u planarnom kretanju i bez prisustva poremećaja tada se može izraziti kao

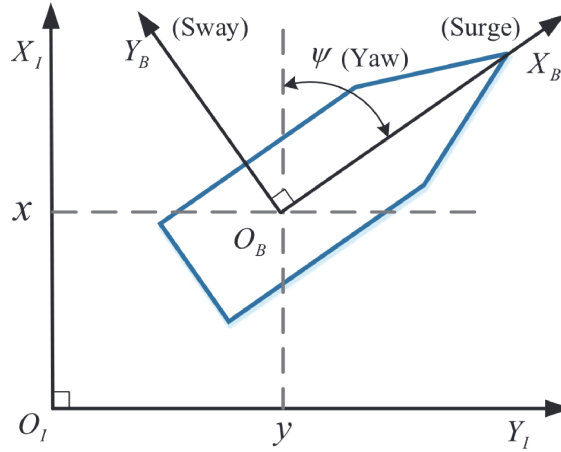
$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\psi)\boldsymbol{\nu}, \quad (1.1)$$

gdje $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ označava vektor pozicije i orijentacije sa koordinatama izraženim u inercijalnom koordinatnom sistemu $\{I\}$, $\boldsymbol{\nu} = [u \ v \ r]^T$ predstavlja vektor linearne i ugaone brzine u koordinatnom sistemu $\{B\}$, $\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ je transformaciona matrica između inercijalnog koordinatnog sistema $(X_I O_I Y_I)$ i koordinatnog sistema vezanog za vozilo $(X_B O_B Y_B)$. Pozicija i orijentacija (skretanje/ugao pravca) ASV u inercijalnom koordinatnom sistemu označeni su sa (x, y) i ψ , respektivno, a u, v i r predstavljaju longitudinalnu, transverzalnu i brzinu skretanja. Zbog postojanja poremećaja (vjetrovi, talasi i struje) i brzog skretanja ASV sa velikom longitudinalnom brzinom, može se javiti i fenomen bočnog klizanja (eng. *sideslip*), [36]. Uzevši u razmatranje ovaj fenomen zajedno sa rezultatnom brzinom $U = \sqrt{u^2 + v^2}$, uglom bočnog klizanja β i uglom kursa χ , $\mathbf{R}(\psi)$ i $\boldsymbol{\eta}$ mogu biti napisani kao:

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ r \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

gdje je $\beta = \arcsin(\frac{v}{U})$ i $\chi = \psi + \beta$.



Slika 1.5: Šematski prikaz planarnog kretanja ASV.

1.6 Kinetika ASV

Kinetika obuhvata analizu sila koje djeluju na kretanje ASV. Razlog za detaljno proučavanje kinetike vozila je njen krucijalni značaj za napredni dizajn kontrolera [35], kao i činjenica da kinematički modeli sami po sebi nisu dovoljni za modelovanje kretanja ASV, naročito kada ASV ima značajno bočno proklizavanje [37]. Detaljan pregled razvoja dinamičkog modela ASV dat je u [2, 8, 35, 38]. Najčešće korišćeni oblik kinetičkog modela u oblasti kontrole kretanja plovila je

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E. \quad (1.4)$$

Fizička značenja simbola iz (1.4) istaknuta su u tabeli 1.2, a reprezentacija svakog simbola je data u nastavku:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & m\chi_g \\ 0 & m\chi_g & I_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} d_{11}(u) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(v, r) & d_{23}(v, r) \\ 0 & d_{32}(v, r) & d_{33}(v, r) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_n(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} -X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v|v}|v| - Y_{r|v}|r| & -Y_{v|r}|v| - Y_{r|r}|r| \\ 0 & -N_{v|v}|v| - N_{r|v}|r| & -N_{v|r}|v| - N_{r|r}|r| \end{bmatrix},$$

Tabela 1.2: Nomenklatura parametara ASV

Simbol	Značenje
\mathbf{M}	Matrica inercije sistema (uključujući virtuelnu masu)
\mathbf{M}_{RB}	Matrica inercije sistema krutog tijela
\mathbf{M}_A	Virtuelna masa
$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})$	Matrica Koriolisovih i centripetalnih sila (uključujući virtuelnu masu)
$\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})$	Matrica Koriolisovih i centripetalnih sila krutog tijela
$\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})$	Hidrodinamička matrica Koriolisovih i centripetalnih sila
\mathbf{D}	Matrica linearnog prigušenja
$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$	Matrica hidrodinamičkog prigušenja
$\mathbf{D}_n(\boldsymbol{\nu})$	Matrica nelinearnog prigušenja
$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$	Sila elastičnosti i moment usljed gravitacije/uzgona
$\boldsymbol{\tau}$	Upravljački ulazi koji djeluju na ASV, $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_u \ \boldsymbol{\tau}_v \ \boldsymbol{\tau}_r]^T$ za potpuno pogonjeno vozilo i $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_u \ 0 \ \boldsymbol{\tau}_r]^T$ za potpogonjeno vozilo
$\boldsymbol{\tau}_u$	Upravljački ulazi (sile) u smjeru zalijetanja
$\boldsymbol{\tau}_v$	Upravljački ulazi (sile) u smjeru zanošenja
$\boldsymbol{\tau}_r$	Upravljački ulazi (momenti) u smjeru skretanja
$\boldsymbol{\tau}_E$	Spoljašnji poremećaji (vjetrovi, talasi i struje)
m	Masa ASV
I_z	Moment inercije oko Z ose koordinatnog sistema vezanog za ASV
χ_g	Centar gravitacije ASV duž X koordinate sistema vezanog za vozilo

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v - \frac{1}{2}(m_{23} + m_{32})r \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v + \frac{1}{2}(m_{23} + m_{32})r & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v - \frac{1}{2}(Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}})r \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ Y_{\dot{v}}v + \frac{1}{2}(Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}})r & -X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(\chi_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(\chi_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}.$$

Ostali hidrodinamički koeficijenti (X_u , Y_v , Y_r , N_v , N_r) definisani su na osnovu [35, 38]. $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ označava vektor pozicije i orijentacije sa koordinatama izraženim u inercijalnom koordinatnom sistemu, $\boldsymbol{\nu} = [u \ v \ r]^T$ predstavlja vektor linearne i ugaone brzine u koordinatnom sistemu vezanom za vozilo. $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_u \ 0 \ \boldsymbol{\tau}_r]^T$, gdje $\boldsymbol{\tau}_u$ predstavlja silu zalijetanja koju generiše propeler, a $\boldsymbol{\tau}_r$ moment skretanja obezbijeden kormilom pravca. $\boldsymbol{\tau}_E = [\boldsymbol{\tau}_{uE} \ \boldsymbol{\tau}_{vE} \ \boldsymbol{\tau}_{rE}]^T$, gdje su $\boldsymbol{\tau}_{uE}$, $\boldsymbol{\tau}_{vE}$ i $\boldsymbol{\tau}_{rE}$ spoljašnji poremećaji (izazvani talasima, vjetrovom i strujama), djelujući na ose zalijetanja, zanošenja i skretanja, respektivno.

U cilju lakšeg sprovođenja dizajna upravljanja, pretpostavljeno je da:

1. ASV se kreću u horizontalnoj ravni u idealnoj tečnosti;
2. masa ASV je ravnomjerno raspoređena;
3. koordinatni početak sistema vezanog za vozilo poklapa se sa težištem (centrom gravitacije – CG);
4. i težište i centar uzgona (eng. *center of buoyancy* – CB) postavljeni su duž Z -ose;
5. ASV posjeduje bilateralnu (eng. *port-starboard*) simetriju;
6. dinamika zalijetanja i zanošenja su odvojene od dinamike skretanja.

Na osnovu navedenih pretpostavki, često korišćeni dinamički model ASV je [38]

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{1}{m_{11}}(\tau_u + \tau_{uE}) \\ \dot{v} &= -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_{22}}(v + \tau_{vE}) \\ \dot{r} &= \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}(\tau_r + \tau_{rE}), \end{aligned} \quad (1.5)$$

gdje m_{11} , m_{22} i m_{33} označavaju inerciju plovila i efekat virtuelne mase, dok d_{11} , d_{22} i d_{33} predstavljaju sile hidrodinamičkog prigušenja.

1.7 Modeli autopilota za kontrolu pravca (1 DOF)

Kontroleri pravca za pomorska vozila obično se zasnivaju na upotrebi Nomoto modela, predstavljenog u [39]. Nomoto model autopilota može se izvesti iz lineari-zovanog modela manevrisanja, kao što je objašnjeno u nastavku.

1.7.1 Nomoto model drugog reda

Linearni model autopilota za kontrolu pravca može se izvesti iz modela manevri-sanja [38]

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{N}(u_o)\boldsymbol{\nu} = \mathbf{b}\delta \quad (1.6)$$

izborom brzine skretanja kao izlaza:

$$r = \mathbf{c}^T \boldsymbol{\nu}, \quad \mathbf{c}^T = [0, 1]. \quad (1.7)$$

U jednačini (1.6), δ predstavlja ugao kormila, matrica \mathbf{M} je oblika

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m\chi_g - Y_{\dot{r}} \\ m\chi_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

a $\mathbf{N}(u_o)$ i \mathbf{b} su

$$\mathbf{N}(u_o) = \begin{bmatrix} -Y_v & (m - X_{\dot{u}})u_o - Y_r \\ (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})u_o - N_v & (m\chi_g - Y_{\dot{r}})u_o - N_r \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Dakle, primjenom Laplasove transformacije, slijedi

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}. \quad (1.11)$$

Slična relacija dobija se pri zanošenju plovila:

$$\frac{v}{\delta}(s) = \frac{K_v(1 + T_v s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}, \quad (1.12)$$

pri čemu se K_v i T_v razlikuju od K i T_3 u jednačini skretanja.

Jednačina (1.11) predstavlja Nomoto model drugog reda [39].

1.7.2 Nomoto model prvog reda

U cilju izvođenja Nomoto modela prvog reda, definišimo ekvivalentnu vremensku konstantu

$$T := T_1 + T_2 - T_3, \quad (1.13)$$

takvu da

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)}. \quad (1.14)$$

Konačno, $\dot{\psi} = r$ daje funkciju prenosa koja se koristi u mnogim komercijalnim autopilotskim sistemima

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1 + Ts)}. \quad (1.15)$$

U vremenskom domenu Nomoto model drugog reda ima oblik

$$T_1T_2\psi^{(3)} + (T_1 + T_2)\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K(\delta + T_3\dot{\delta}) \quad (1.16)$$

što se može aproksimirati sa

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta. \quad (1.17)$$

Glava 2

Metode za autonomno kretanje vozila po zadatoj putanji

U poglavlju će biti predstavljena dva metoda za praćenje putanje autonomnih površinskih vozila: Line-of-Sight (LOS) metod i metod zasnovan na upotrebi Serret-Frenet (SF) koordinata.

2.1 Praćenje pravolinijske putanje

Trajektorija opisuje kretanje objekta u prostoru kao funkciju vremena. Objekat može biti vozilo, projektil, satelit, itd. Trajektorija se može opisati matematički ili geometrijom putanje (odjeljak 2.2) ili pozicijom objekta u vremenu. Zadatak praćenja putanje odnosi se na praćenje unaprijed definisanog puta nezavisno od vremena, odnosno bez vremenskih ograničenja. Međutim, prostorna ograničenja mogu biti uključena u cilju predstavljanja prepreka i drugih pozicionih ograničenja.

Često korišćen metod za praćenje putanje je LOS metod vođenja. LOS vektor, od plovila do sledeće putne navigacijske tačke ili tačke koja se nalazi na putanji između dvije putne navigacijske tačke, može se koristiti za kontrolu kursa i pravca. Ako je plovilo opremljeno autopilotom pravca, ugao između LOS vektora i unaprijed definisane putanje može se koristiti kao zadata vrijednost za autopilot pravca. Na ovaj način biće omogućeno da plovilo prati putanju. LOS zakoni vođenja i upravljački zakon za brzinu mogu se kombinovati na različite načine da bi se postigli različiti ciljevi kontrole kretanja [2].

2.1.1 Generisanje putanje na osnovu putnih navigacijskih tačaka

Sistemi za vođenje pomoću putnih tačaka se koriste i za brodove i za podvodna vozila. Ovi sistemi se sastoje od generatora putnih tačaka sa korisničkim interfejsom. Odabrane tačke se skladište u bazi podataka putnih tačaka i koriste za generisanje trajektorije ili putanje koju će vozilo pratiti pri kretanju. Na ovaj način mogu biti dizajnirani sistemi upravljanja i za praćenje putanje i za praćenje trajektorije. Sofisticirane karakteristike kao što su izbjegavanje prepreka i planiranje misija mogu biti inkorporirane u dizajn sistema vođenja pomoću putnih tačaka.

Putne navigacijske tačke

Putanja površinskog ili podvodnog vozila obično se specificira pomoću putnih tačaka (eng. *waypoints*). Svaka putna tačka definisana je korišćenjem Dekartovih koordinata (x_k, y_k, z_k) , za $k = 1, \dots, n$. Stoga se baza putnih tačaka sastoji od

$$\text{wpt.pos} = \{(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}.$$

Za površinska vozila koriste se samo dvije koordinate, (x_k, y_k) . Pored toga, mogu se definisati i druga svojstva putnih tačaka, kao što su brzina i pravac, tj.

$$\text{wpt.speed} = \{U_0, U_1, \dots, U_n\}$$

$$\text{wpt.heading} = \{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_n\}.$$

Za površinsko vozilo ovo znači da treba da prođe kroz putnu tačku (x_i, y_i) brzinom U_i sa uglom pravca ψ_i . Tri stanja (x_i, y_i, ψ_i) definišu položaj vozila.

Baza podataka putnih tačaka može da se generiše korišćenjem mnogih kriterijuma. Oni se obično zasnivaju na [2]:

1. **Misija:** Vozilo treba da se kreće od početne tačke (x_0, y_0, z_0) do krajnje tačke (x_n, y_n, z_n) , preko putnih tačaka (x_i, y_i, z_i) ;
2. **Podaci o okolini:** Informacije o vjetru, talasima i okeanskim strujama mogu se koristiti za energetski efikasno usmjeravanje vozila (ili izbjegavanje lošeg vremena iz bezbjednosnih razloga);
3. **Geografski podaci:** Treba uključiti informacije o plitkim vodama i ostrvima;
4. **Prepreke:** Moraju se izbjegavati plutajuće konstrukcije i druge prepreke;
5. **Izbjegavanje sudara:** Izbjegavanje drugih vozila koja se kreću blizu putanje, uvođenjem bezbjednosnih margina;
6. **Izvodljivost:** Svaka putna tačka mora biti izvodljiva, tj. manevrisanje do

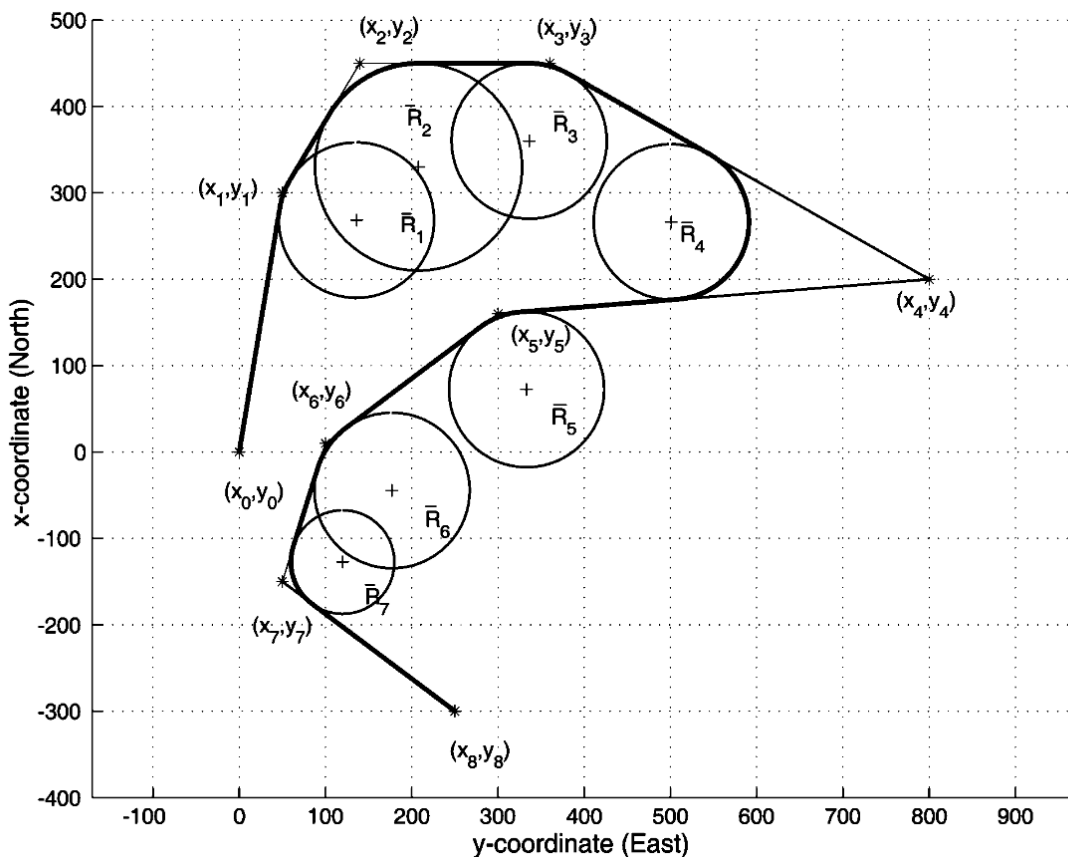
sljedeće putne tačke bez prekoračenja maksimalne brzine i brzine skretanja mora biti moguće.

Generisanje putanje upotrebom pravih linija i kružnih lukova

U praksi je uobičajeno predstaviti željenu putanju korišćenjem pravih linija i kružnih lukova za povezivanje putnih tačaka, kao što je prikazano na slici 2.1. Ovo je u vezi sa poznatim rezultatom Dubinsa [40], koji se može sažeti na sledeći način:

Najkraći put (minimalno vrijeme) između dvije konfiguracije (x, y, ψ) vozila koje se kreće konstantnom brzinom U je put formiran pomoću pravih linija i kružnih lukova.

Pošto se u obzir uzima plovilo, a ne materijalna tačka, početna i krajnja konfiguracija plovila su specificirane pomoću pozicije (x, y) , ugla pravca ψ i brzine U . Dodatno, pretpostavljeno je da postoje ograničenja veličine poluprečnika ili brzine skretanja r . Pojam Dubinsovih puteva može biti dokazan korišćenjem Pontrijaginog principa maksimuma. O generisanju Dubinsovih puteva uključujući izbegavanje prepreka raspravlja se u [41].



Slika 2.1: Prave linije i kružnice za vođenje pomoću putnih tačaka [2]

U ovom odjeljku, diskusija je ograničena na Dubinsove puteve, kao što je prika-

zano na slici 2.1, gdje upisana kružnica između dvije prave opisuje željeno skretanje. Poluprečnik upisane kružnice označen je sa \bar{R}_i ($i = 1, \dots, n$).

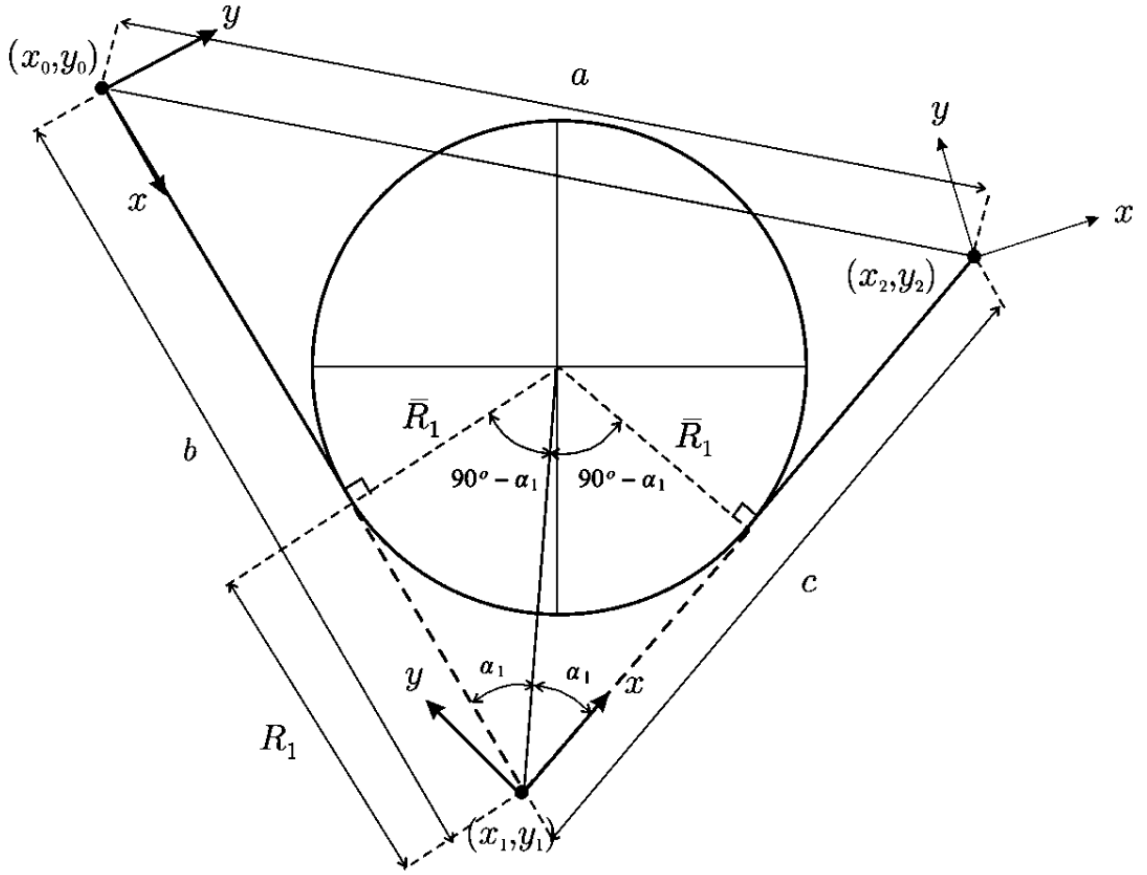
Nedostatak ove strategije, u poređenju sa kubnom interpolacijom, na primjer, je u tome što dolazi do skoka u željenoj brzini skretanja r_d pri prelasku sa prave linije na kružni luk. Ovo proizlazi iz činjenice da je željena brzina skretanja duž prave linije $r_d = 0$, dok je $r_d = \text{const}$ na kružnom luku tokom ravnomjernog kretanja vozila. Rezultat je pojava malog bočnog odstupanja od kursa. Ako se razmatra glatka referentna putanja generisana interpolacijom, ovi nedostaci su prevaziđeni. Međutim, pogodno je koristiti prave linije i kružne lukove zbog jednostavnosti. Takođe je moguće da operater specificira kružnicu poluprečnika R_i za svaku putnu tačku (slika 2.1). Ove vrijednosti smještaju se u bazu

$$\text{wpt.radius} = \{R_0, R_1, \dots, R_n\}.$$

Tačka u kojoj kružni luk dodiruje pravu liniju predstavlja tačku skretanja plovila. Dakle, poluprečnik upisane kružnice se proračunava na osnovu R_i

$$\begin{aligned} \tan(\alpha_i) &= \bar{R}_i / R_i \\ \bar{R}_i &= R_i \tan(\alpha_i), \quad (i = 1, \dots, n) \\ a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc \cos(2\alpha_i), \end{aligned} \tag{2.1}$$

gdje je α_i definisan na slici 2.2.



Slika 2.2: Kružnica poluprečnika \bar{R}_1 upisana između tačaka (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) [2]

2.1.2 Line-of-Sight zakoni upravljanja

Za kretanje u 2-D horizontalnoj ravni, brzina plovila je definisana kao

$$U(t) = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \geq 0, \quad (2.2)$$

dok je upravljanje povezano sa uglom

$$\chi(t) := \text{atan2}(\dot{y}(t), \dot{x}(t)) \in \mathbb{S} := [-\pi, \pi], \quad (2.3)$$

gdje je $\text{atan2}(y, x)$ četvorokvadrantna verzija funkcije $\arctan(y/x) \in [-\pi/2, \pi/2]$. Praćenje putanje je obezbijeđeno određivanjem potrebne vrijednosti $\chi(t)$ sve dok važi $U > 0$, pošto scenario uključuje samo prostorno ograničenje.

Razmatra se pravolinijska putanja, implicitno definisana sa dvije putne tačke $\mathbf{p}_k^n = [x_k, y_k]^T \in \mathbb{R}^2$ i $\mathbf{p}_{k+1}^n = [x_{k+1}, y_{k+1}]^T \in \mathbb{R}^2$. Takođe, razmatra se koordinatni sistem fiksiran za putanju sa koordinatnim početkom u \mathbf{p}_k^n čija je x -osa rotirana za pozitivan ugao

$$\alpha_k := \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k) \in \mathbb{S} \quad (2.4)$$

u odnosu na x -osu NED koordinatnog sistema. Dakle, koordinate plovila u koordinatnom sistemu fiksiranom za putanju, mogu se odrediti na osnovu

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{R}_p(\alpha_k)^T(\mathbf{p}^n(t) - \mathbf{p}_k^n) \quad (2.5)$$

gdje

$$\mathbf{R}_p(\alpha_k) := \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & -\sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{bmatrix} \in SO(2) \quad (2.6)$$

i $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = [x_e(t), y_e(t)]^T \in \mathbb{R}^2$ sa

$x_e(t)$ = greška duž putanje (eng. *along-track error*), tangencijalno na putanju

$y_e(t)$ = greška položaja (eng. *cross-track error*), normalno na putanju

U svrhe rješavanja zadatka praćenja putanje, od značaja je samo greška položaja y_e , s obzirom da $y_e = 0$ znači da plovilo konvergira ka pravolinijskoj putanji. Razvijanjem (2.5), greška duž putanje i greška položaja eksplicitno se mogu predstaviti sa

$$x_e(t) = (x(t) - x_k) \cos(\alpha_k) + (y(t) - y_k) \sin(\alpha_k), \quad (2.7)$$

$$y_e(t) = -(x(t) - x_k) \sin(\alpha_k) + (y(t) - y_k) \cos(\alpha_k), \quad (2.8)$$

a odgovarajući cilj upravljanja za praćenje pravolinijske putanje postaje

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = 0. \quad (2.9)$$

Kako bi se obezbijedilo da $y_e(t) \rightarrow 0$, mogu se koristiti komande i za ugao kursa i za ugao pravca.

Dva različita principa vođenja se mogu koristiti za upravljanje duž LOS vektora, [42]:

1. *Enclosure-based* vođenje,
2. *Lookahead-based* vođenje

Ova dva metoda u suštini funkcionišu na istom principu, ali kao što će u nastavku biti pokazano, *lookahead-based* vođenje, prvobitno korišćeno za vođenje projektila, ima nekoliko prednosti u odnosu na *enclosure-based* pristup.

Enclosure-based vođenje

Razmotrimo kružnicu poluprečnika $R > 0$ koja obuhvata $\mathbf{p}^n = [x, y]^T$. Ako se izabere dovoljno veliki poluprečnik, kružnica će presijecati pravolinijsku putanju u dvije tačke. *Enclosure-based* strategija za obezbjeđivanje da $y_e(t)$ konvergira ka nuli će usmjeriti vektor brzine ka tački presjeka $\mathbf{p}_{los}^n = [x_{los}, y_{los}]^T$, koja odgovara

željenom pravcu kretanja, implicitno definisanom preko redosljeda po kom su putne tačke poređane. Ovakvo rješenje podrazumijeva direktno određivanje χ_d (željeni ugao kursa – ugao između x_I i željenog vektora brzine, slika 2.3). S obzirom da važi

$$\tan(\chi_d(t)) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta x(t)} = \frac{y_{los} - y(t)}{x_{los} - x(t)}, \quad (2.10)$$

može se odrediti željeni ugao kursa

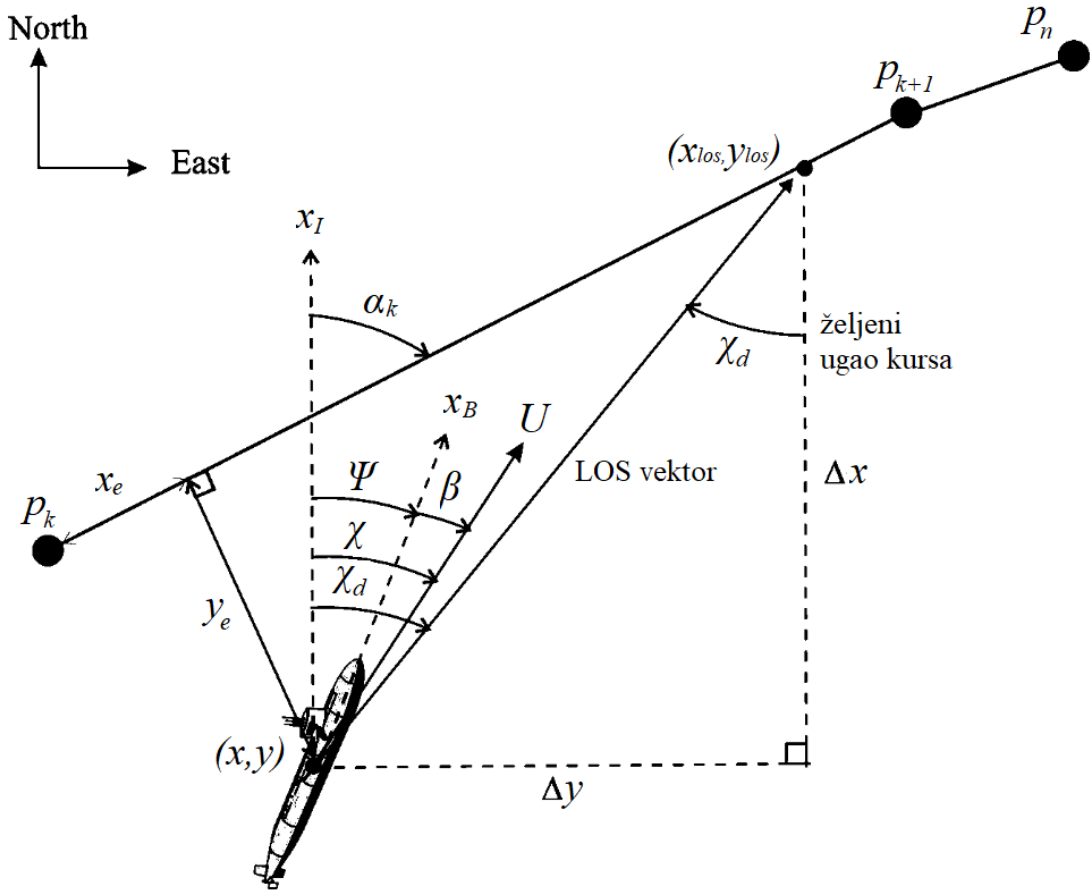
$$\chi_d(t) = \text{atan2}(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)). \quad (2.11)$$

U cilju određivanja dvije nepoznate u $\mathbf{p}_{los}^n = [x_{los}, y_{los}]^T$, potrebno je riješiti sljedeće dvije jednačine:

$$(x_{los} - x(t))^2 + (y_{los} - y(t))^2 = R^2, \quad (2.12)$$

$$\tan(\alpha_k) = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} = \frac{y_{los} - y_k}{x_{los} - x_k} = \text{const}, \quad (2.13)$$

gdje (2.12) proizlazi iz Pitagorine teoreme, dok (2.13) pokazuje da je nagib krive između dvije putne tačke konstantan. LOS zakon vođenja primijenjen je na površinska vozila u [43] i [44]. Rješavanje ovih jednačina dato je u nastavku, pri čemu je vremenska zavisnost promjenjivih izostavljena radi lakšeg označavanja.



Slika 2.3: LOS vođenje [2]

Označimo razliku između x i y pozicija dvije putne tačke sa $\Delta x := x_{k+1} - x_k$ i $\Delta y := y_{k+1} - y_k$, respektivno. Jednačine se prvo rješavaju uz pretpostavku da je $|\Delta x| > 0$, a zatim, za slučaj $\Delta x = 0$.

1. slučaj: Za $|\Delta x| > 0$, jednačina (2.13) dobija oblik

$$y_{los} = \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) (x_{los} - x_k) + y_k. \quad (2.14)$$

Radi jednostavnosti i sažetosti u proračunima koji slijede, označavamo

$$d := \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right), \quad e := x_k, \quad f := y_k.$$

Razvijanjem (2.12) slijedi

$$x_{los}^2 - 2x_{los}e + e^2 + y_{los}^2 - 2y_{los}f + f^2 = R^2, \quad (2.15)$$

gdje je

$$\begin{aligned}
 y_{los}^2 &= \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) (x_{los} - x_k) + y_k \right]^2 \\
 &= [dx_{los} + (f - de)]^2 \\
 &= (dx_{los} + g)^2 \\
 &= d^2 x_{los}^2 + 2dgx_{los} + g^2,
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

pri čemu je $g := f - de = y_k - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) x_k$. Nakon toga, razmotrimo

$$2yy_{los} = 2y(dx_{los} + g) = 2dyx_{los} + 2gy. \tag{2.17}$$

Uvrštavanjem (2.16) i (2.17) u (2.15) dobija se standardna, analitički rješiva jednačina drugog reda

$$(1 + d^2)x_{los}^2 + 2(dg - dy - x)x_{los} + (x^2 + y^2 + g^2 - 2gy - R^2) = 0. \tag{2.18}$$

Označavanjem

$$\begin{aligned}
 a &:= 1 + d^2 \\
 b &:= 2(dg - dy - x) \\
 c &:= x^2 + y^2 + g^2 - 2gy - R^2
 \end{aligned}$$

odakle je rješenje (2.18)

$$x_{los} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \tag{2.19}$$

gdje za $\Delta x > 0$ važi $x_{los} = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac})/(2a)$, a za $\Delta x < 0$ je $x_{los} = (-b - \sqrt{b^2 - 4ac})/(2a)$.

Nakon određivanja x_{los} , y_{los} se određuje iz (2.14). Primijetiti da za $\Delta y = 0$, $y_{los} = y_k (= y_{k+1})$.

2. slučaj: Ako je $\Delta x = 0$, važiće samo (2.12), što znači da

$$y_{los} = y \pm \sqrt{R^2 - (x_{los} - x)^2}, \tag{2.20}$$

gdje je $x_{los} = x_k (= x_{k+1})$. Ako je $\Delta y > 0$, onda $y_{los} = y + \sqrt{R^2 - (x_{los} - x)^2}$, a za $\Delta y < 0$, $y_{los} = y - \sqrt{R^2 - (x_{los} - x)^2}$. Kada je $\Delta x = 0$, ne može važiti $\Delta y = 0$.

Lookahead-based vođenje

Za *lookahead-based* vođenje, ugao kursa se određuje na osnovu

$$\chi_d(y_e) = \chi_p + \chi_r(y_e) \quad (2.21)$$

gdje

$$\chi_p = \alpha_k \quad (2.22)$$

predstavlja tangencijalni ugao putanje (eng. *path-tangential angle*) (vidjeti sliku 2.3), dok je

$$\chi_r(y_e) := \arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right) \quad (2.23)$$

velocity-path relative ugao, koji obezbjeđuje da je brzina usmjerena ka tački na putanji koja se nalazi na udaljenosti $\Delta(t) > 0$ ispred projekcije tačke $\mathbf{p}^n(t)$ na putanju [45].

Kao što se može primijetiti, *lookahead-based* vođenje nije računski zahtjevno kao *enclosure-based* vođenje. Takođe važi za sve vrijednosti greške položaja, dok *enclosure-based* strategija zahtijeva $R \geq |y_e(t)|$. Štaviše, slika 2.4 pokazuje da

$$y_e(t)^2 + \Delta(t)^2 = R^2 \quad (2.24)$$

što znači da *enclosure-based* pristup odgovara *lookahead-based* šemi sa varijacijom u vremenu

$$\Delta(t) = \sqrt{R^2 - y_e(t)^2} \quad (2.25)$$

između 0 i R za $|y_e(t)| = R$ i $|y_e(t)| = 0$, respektivno.

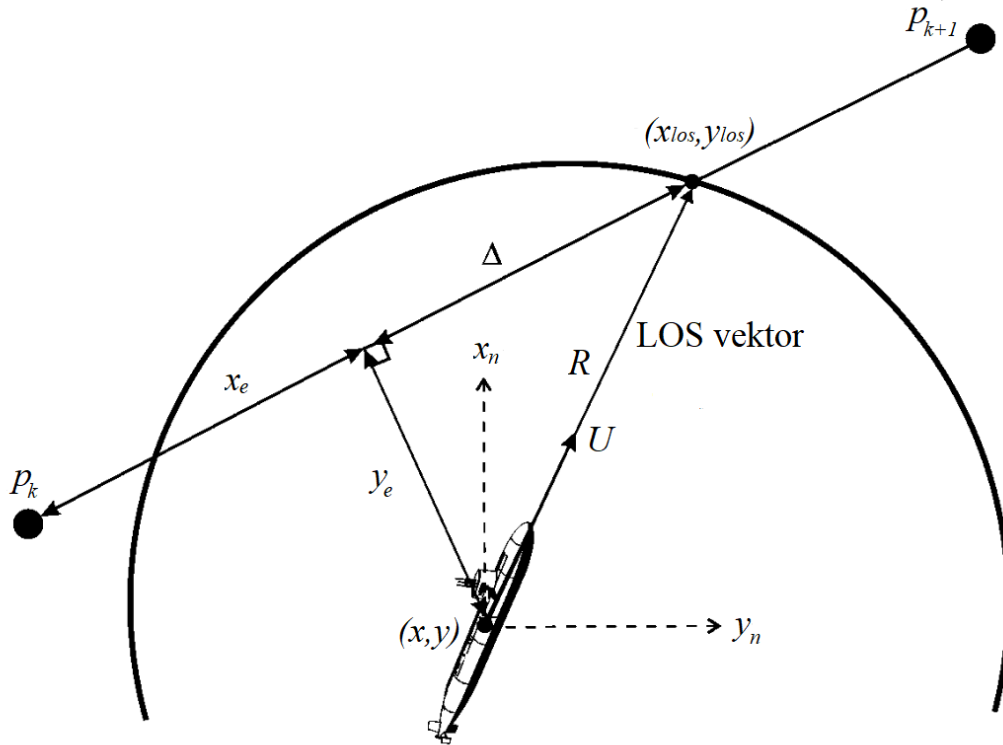
Zakon upravljanja (2.23) može se zapisati i na sljedeći način:

$$\chi_r(y_e) = \arctan(-K_p y_e) \quad (2.26)$$

gdje je $K_p(t) = 1/\Delta(t) > 0$. Treba primijetiti da je *lookahead-based* zakon upravljanja ekvivalentan nelinearnom zakonu upravljanja, efektivno preslikavajući $y_e \in \mathbb{R}$ na $\chi_r(y_e) \in [-\pi/2, \pi/2]$. Dakle, zakon upravljanja (2.26) se ponaša kao linearni za male vrijednosti proizvoda $K_p y_e$, dok za velike vrijednosti ulazi u zasićenje.

Kao što se može zaključiti iz geometrije sa slike 2.4, mala *lookahead* udaljenost označava agresivnije upravljanje, što se intuitivno potvrđuje izborom velike vrijednosti proporcionalnog pojačanja u interpretaciji sa zasićenim upravljačkim djelovanjem. Ova interpretacija takođe sugerise mogućnost dodavanja integralnog člana u (2.23),

$$\chi_r(y_e) = \arctan\left(-K_p y_e - K_i \int_0^t y_e(\tau) d\tau\right) \quad (2.27)$$



Slika 2.4: Krug prihvatanja sa konstantnim poluprečnikom R

gdje $K_i > 0$ predstavlja integralno pojačanje. Integralno dejstvo može biti korisno za potpogonjena vozila koja mogu biti upravljana samo na osnovu informacije o položaju, omogućavajući im praćenje pravolinijske putanje dok su izložena djelovanju okeanskih struja i nenultog ugla bočnog klizanja β , čak i bez posjedovanja informacije o brzini. Dakle, uzimajući u obzir praćenje putanje duž prave linije, željeni ugao skretanja može se izračunati iz

$$\chi_d(y_e) = \alpha_k + \chi_r(y_e) \quad (2.28)$$

sa $\chi_r(y_e)$ definisanim u (2.27). U praksi, da bi se izbjegli preskok i *windup* efekat, mora se voditi računa kada se koristi integralno dejstvo u zakonu upravljanja. Konkretno, integralni član treba koristiti samo kada se detektuje uslov stacionarnog stanja van putanje [2].

Kontroleri za praćenje putanje

Razmotrimo LOS presječnu tačku p_{los}^n na slici 2.3. Različiti metodi praćenja putanje mogu se primijeniti u zavisnosti od toga da li se raspolaže mjerenjima brzine:

Metod A (x -osa vozila se poklapa sa LOS vektorom): Uz pretpostavku da je brzina nepoznata, izračunava se željena vrijednost ugla pravca na osnovu *enclosure-*

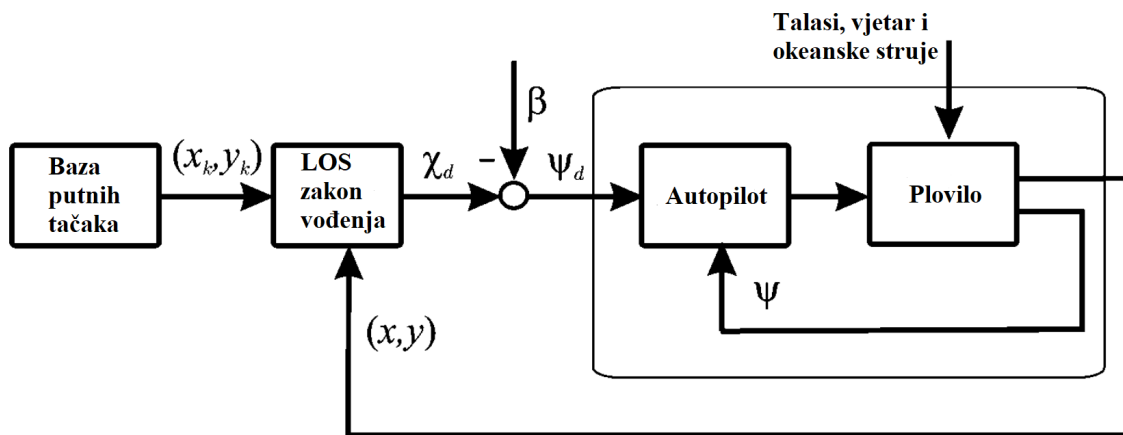
based zakona upravljanja (2.11)

$$\psi_d(t) = \text{atan2}(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)) \quad (2.29)$$

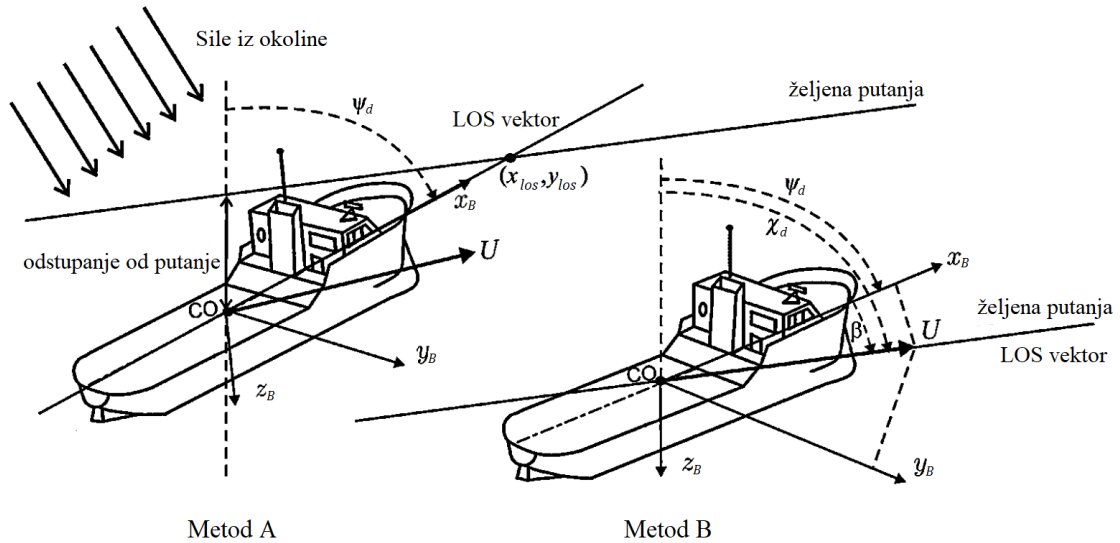
tako da je x -osa vozila usmjerena ka LOS presječnoj tački \mathbf{p}_{los}^n . Kod ovog pristupa se ugao bočnog klizanja β razmatra kao nepoznati parametar, a cilj upravljanja je $\psi \rightarrow \psi_d$ (slika 2.5). Shodno tome, autopilot pravca (eng. *heading autopilot*) PID tipa ima oblik:

$$\tau = -K_p \tilde{\psi} - K_d \dot{\tilde{\psi}} - K_i \int_0^t \tilde{\psi}(\tau) d\tau \quad (2.30)$$

gdje je $\tilde{\psi} = \psi - \psi_d$. Cijena koju treba platiti je da će se plovilo ponašati kao objekt koji visi na užetu, a bočna udaljenost plovila od putanje zavisice od jačine sila iz okoline, a time i ugla bočnog klizanja β . Ovo je posljedica činjenice da je $\psi = \chi$ samo ako je $\beta = 0$. Ako takva odstupanja nisu prihvatljiva, vektor brzine i LOS vektor treba da se poklope korišćenjem Metoda B (vidjeti sliku 2.6).



Slika 2.5: LOS upravljačka šema



Slika 2.6: LOS metodi. Metod A proizvodi bočno odstupanje u odnosu na putanju.

Metod B (Vektor brzine i LOS vektor se poklapaju): Izračunati željeni ugao kursa χ_d tako da vektor brzine bude duž putanje (LOS vektora) koristeći *lookahead-based* zakon upravljanja:

$$\begin{aligned}\chi_d(y_e) &= \chi_p + \chi_r(y_e) \\ &= \alpha_k + \arctan(-K_p y_e)\end{aligned}\quad (2.31)$$

Cilj upravljanja $\chi \rightarrow \chi_d$ može biti zadovoljen i ako se umjesto komande za ugao kursa χ_d , koristi komanda za ugao pravca ψ_d (slika 2.5):

$$\chi = \psi + \beta. \quad (2.32)$$

Ovo zahtijeva poznavanje ugla β :

$$\psi_d = \chi_d - \beta. \quad (2.33)$$

Dakle, brzinu i LOS vektor moguće je poklopiti korišćenjem kontrolera pravca sa sljedećim signalom greške:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi} &= \psi - \psi_d \\ &= \psi - \chi_d + \beta\end{aligned}\quad (2.34)$$

kako je predstavljeno na slici 2.5. Ako su brzine vozila mjerljive, ugao bočnog klizanja može se odrediti iz

$$\beta = \arcsin\left(\frac{v}{U}\right). \quad (2.35)$$

Zakoni vođenja PI tipa, na primjer (2.27), omogućavaju izbjegavanje potrebe za mjerenjima brzine tretirajući β kao nepoznat sporo promjenjiv poremećaj za koji važi $\dot{\beta} \approx 0$.

Krug prihvatanja za površinska vozila

Kada se vozilo kreće duž dio po dio linearne putanje koju čini n pravolinijskih segmenata povezanih sa $n + 1$ putnih tačaka, potreban je mehanizam izbora sljedeće putne tačke. Putna tačka (x_{k+1}, y_{k+1}) može biti odabrana na osnovu toga da li se vozilo nalazi unutar kruga prihvatanja (eng. *circle of acceptance*) poluprečnika R_{k+1} oko (x_{k+1}, y_{k+1}) . Štaviše, ako pozicija vozila (x, y) u trenutku t zadovoljava

$$[x_{k+1} - x(t)]^2 + [y_{k+1} - y(t)]^2 \leq R_{k+1}^2, \quad (2.36)$$

onda sljedeća putna tačka (x_{k+1}, y_{k+1}) treba biti odabrana. Smjernica za izbor poluprečnika kruga prihvatanja može biti da se odabere R_{k+1} jednako dvije dužine plovila, odnosno $R_{k+1} = 2L_{pp}$.

Treba imati na umu da za *enclosure-based* pristup, takav kriterijum prelaska na sljedeću putnu tačku podrazumijeva dodatni zahtjev $R \geq R_{k+1}$. Prihvatljiviji kriterijum izbora sljedeće putne tačke uključuje samo udaljenost duž putanje x_e , tako da ako je ukupna udaljenost duž putanje između putnih tačaka \mathbf{p}_k^n i \mathbf{p}_{k+1}^n označena $x_{e,k+1}$, promjena putne tačke će biti napravljena kada

$$x_{e,k+1} - x_e(t) \leq R_{k+1}, \quad (2.37)$$

što je slično (2.36) ali sa tom prednošću da $\mathbf{p}^n(t)$ ne mora da uđe unutar kruga koji okružuje putnu tačku, da bi došlo do prebacivanja na sljedeću putnu tačku; tj. nema ograničenja vezanih za grešku položaja. Prema tome, ako nijedna suštinska vrijednost nije povezana sa prolaskom vozila kroz putne tačke i njihova jedina svrha je da implicitno definišu dio po dio linearnu putanju, nema razloga za primjenu metoda kruga prihvatanja (2.36) za prebacivanje na sljedeću putnu tačku.

2.2 Praćenje krivolinijske putanje

Ovaj odjeljak ublažava uslov da se putanja sastoji od pravih linija između putnih tačaka. Umjesto toga, pretpostavlja se da sistemi za vođenje mogu da koriste unaprijed definisanu parametrizovanu putanju. Kontroler za praćenje putanje je *kinematički kontroler* (vidjeti [2]) koji generiše željena stanja za sistem upravljanja ASV koristeći parametrizaciju putanje. Nedostatak je što putanja mora biti parametrizovana i poznata unaprijed. U mnogim slučajevima ovo je nepraktično i mora se koristiti jednostavnija putanja koja se sastoji od putnih tačaka i pravih linija, što

je predstavljeno u odjeljku 2.1.2.

Za parametarizovanu putanju, sljedeće definicije su usvojene iz [46]:

Definicija 2.2.1 (Parametrizovana putanja) *Parametrizovanom putanjom se smatra geometrijska kriva $\mathbf{p}_d(\rho) \in \mathbb{R}^q$ za $q \geq 1$, parametrizovana kontinualnom promjenjivom ρ .*

Uobičajen način rješavanja problema praćenja putanje je da se posmatra kao geometrijski zadatak *problema manevrisanja*, dat sljedećom definicijom:

Definicija 2.2.2 (Problem manevrisanja) *Problem manevrisanja obuhvata rješavanje dva zadatka:*

1. *Geometrijski zadatak: Navesti vozilo da iz pozicije $\mathbf{p}^n(t) = [x, y]^T$ konvergira ka zadatoj putanji $\mathbf{p}_d^n(\rho(t))$,*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\mathbf{p}^n(t) - \mathbf{p}_d^n(\rho(t))] = \mathbf{0} \quad (2.38)$$

za bilo koju kontinualnu funkciju $\rho(t)$. Eksponent n označava da su pozicija vozila i parametrizovana putanja izražene u NED koordinatama.

2. *Dinamički zadatak: Navesti brzinu $\dot{\rho}(t)$ da konvergira ka željenoj brzini U_d prema*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\dot{\rho}(t) - \frac{U_d(\rho(t))}{\sqrt{(x'_d)^2 + (y'_d)^2}} \right] = 0. \quad (2.39)$$

Za rješavanje geometrijskog zadatka potrebno je obezbijediti da ugao kursa χ konvergira ka

$$\chi_d = \text{atan2}(y_{los} - y, x_{los} - x), \quad (2.40)$$

gdje je LOS pozicija $\mathbf{p}_{los} = [x_{los}, y_{los}]^T$ tačka na putanji, ka kojoj ASV treba da bude usmjereno.

Dinamički zadatak proizlazi iz

$$U_d(\rho(t)) = \sqrt{u_d^2(t) + v_d^2(t)} = \sqrt{x'_d(\rho)^2 + y'_d(\rho)^2} \dot{\rho}(t) \quad (2.41)$$

$$\dot{\rho}(t) = \frac{U_d(\rho(t))}{\sqrt{(x'_d)^2 + (y'_d)^2}} \quad (2.42)$$

Definicija 2.2.2 implicira da se dinamika $\rho(t)$ duž putanje može specificirati nezavisno od dinamike greške. Poseban slučaj problema manevrisanja je

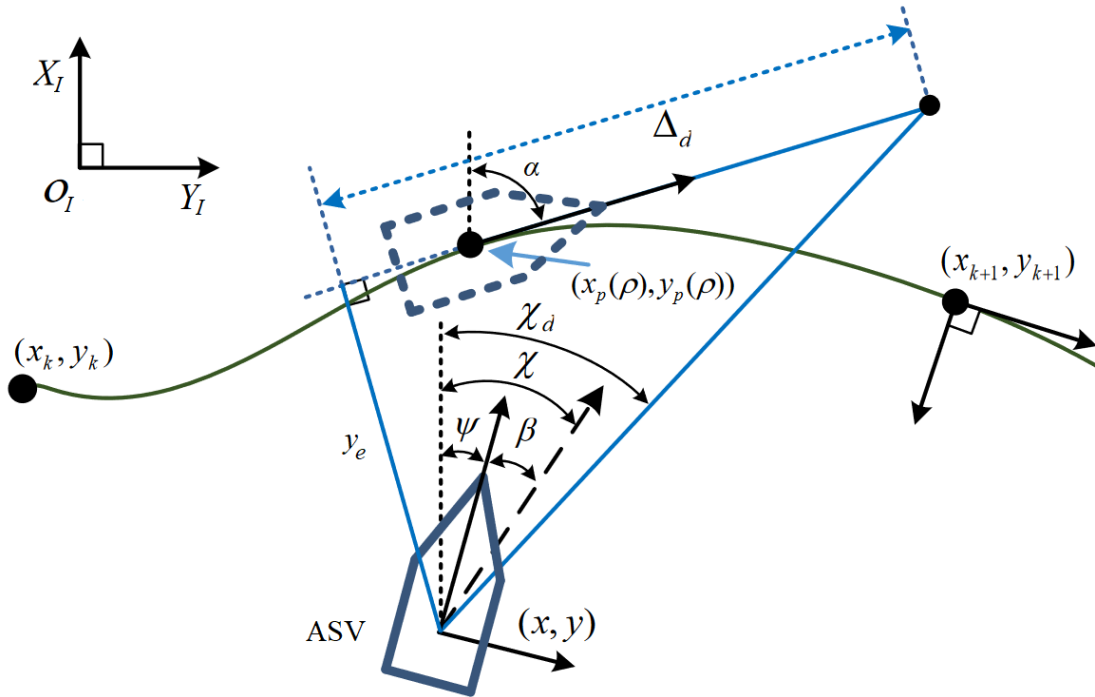
$$\dot{\rho}(t) = 1, \quad \rho(0) = 0 \quad (2.43)$$

što je u literaturi poznato kao problem praćenja trajektorije (eng. *tracking*), pošto

je rješenje (2.43) $\rho = t$. Rješenje za problem manevrisanja kod potpuno pogonjenih vozila može se naći u [46].

Za generisanje parametrizovane krivolinijske putanje kroz set N predefinisanih putnih tačaka, koriste se metode interpolacije: kubni splajn, Hermitova i polinomijska interpolacija. Detaljan pregled metoda interpolacije dat je u [2].

2.2.1 Line-of-Sight praćenje putanje



Slika 2.7: Šematski prikaz LOS geometrije za praćenje krivolinijske putanje.

Kao što je ilustrovano na slici 2.7, u ovom odjeljku se razmatra dvodimenzionalna (2-D) kontinualna C^1 parametrizovana putanja $(x_p(\rho), y_p(\rho))$ za koju se pretpostavlja da prolazi kroz skup uzastopnih putnih tačaka (x_k, y_k) za $k = 1, \dots, N$, gde ρ predstavlja promjenjivu putanje. Za proizvoljnu tačku putanje $(x_p(\rho), y_p(\rho))$, tangencijalni ugao putanje $\alpha(\rho)$ se izračunava na sljedeći način:

$$\alpha(\rho) = \arctan(y_p'(\rho), x_p'(\rho)), \quad (2.44)$$

gdje je $x_p'(\rho) = \partial x_p / \partial \rho$ i $y_p'(\rho) = \partial y_p / \partial \rho$. Treba napomenuti da je u slučaju pravolinijske putanje između putnih tačaka, ovaj ugao konstantan, što je prethodno prikazano relacijom (2.4).

Za ASV koje se nalazi na poziciji (x, y) , greška položaja, koja se definiše kao ortogonalna udaljenost do tangencijalnog referentnog koordinatnog sistema putanje,

može se izračunati na sljedeći način:

$$y_e = -(x - x_p(\rho)) \sin(\alpha(\rho)) + (y - y_p(\rho)) \cos(\alpha(\rho)). \quad (2.45)$$

Normala na putanju tada se može dobiti iz

$$y - y_p(\rho) = -\frac{1}{\tan(\alpha(\rho))}(x - x_p(\rho)). \quad (2.46)$$

Diferenciranjem (2.45) po vremenu dobija se

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= -(\dot{x} - \dot{x}_p(\rho)) \sin(\alpha(\rho)) + (\dot{y} - \dot{y}_p(\rho)) \cos(\alpha(\rho)) \\ &\quad - [(x - x_p(\rho)) \cos(\alpha(\rho)) + (y - y_p(\rho)) \sin(\alpha(\rho))] \dot{\alpha}(\rho). \end{aligned} \quad (2.47)$$

Na osnovu (2.44) i (2.46), slijedi:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(\rho) \sin(\alpha(\rho)) - \dot{y}_p(\rho) \cos(\alpha(\rho)) &= 0, \\ (x - x_p(\rho)) \cos(\alpha(\rho)) + (y - y_p(\rho)) \sin(\alpha(\rho)) &= 0. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Na osnovu (2.48), u kombinaciji sa (1.1) i (2.47):

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= -\dot{x} \sin(\alpha(\rho)) + \dot{y} \cos(\alpha(\rho)) \\ &= -(u \cos \psi - v \sin \psi) \sin(\alpha(\rho)) + (u \sin \psi + v \cos \psi) \cos(\alpha(\rho)). \end{aligned} \quad (2.49)$$

U amplitudno-faznom domenu (2.49) postaje

$$\dot{y}_e = U \sin(\chi - \alpha), \quad (2.50)$$

gdje $U = \sqrt{u^2 + v^2}$, ugao kursa $\chi = \psi + \beta$, a β ugao bočnog klizanja $\beta = \text{atan2}(v, u)$, koji je posljedica sila drifta (vjetrova, talasa i struja) i kormilarenja ASV tokom praćenja putanje.

Pretpostavka 1 *Pretpostavlja se da je ugao bočnog klizanja konstantan i mali tako da važi $\dot{\beta} = 0$ tokom praćenja putanje, što takođe implicira da je $\sin \beta \approx \beta$ i $\cos \beta \approx 1$.*

Ova pretpostavka je prihvatljiva kada je ASV u normalnom radnom režimu, kao što je slučaj u [13] gdje se primjećuje samo nekoliko stepeni bočnog klizanja. Štaviše, varijacije ugla bočnog klizanja su mnogo sporije od upravljačkog propusnog opsega, te se ove varijacije na taj način mogu pratiti pomoću adaptivnog zakona. Međutim, performanse praćenja putanje ASV u određenoj mjeri mogu biti narušene, iako ugao bočnog klizanja ima relativno malu vrijednost (obično $\beta < 5^\circ$). Značajno odstupanje od predviđene putanje može se javiti ako se ne preduzmu odgovarajuće mjere za

kompenzaciju ugla bočnog klizanja.

Koristeći svojstvo, $\sin(A_k + B_k) = \sin(A_k) \cos(B_k) + \cos(A_k) \sin(B_k)$, onda (2.50) postaje

$$\dot{y}_e = U \sin(\psi - \alpha) \cos \beta + U \cos(\psi - \alpha) \sin \beta. \quad (2.51)$$

Ako se uzme u obzir pretpostavka 1, (2.51) se svodi na

$$\dot{y}_e = U \sin(\psi - \alpha) + U \cos(\psi - \alpha) \beta. \quad (2.52)$$

2.2.2 Praćenje putanje pomoću Serret-Frenet koordinata

Definicija 2.2.3 (Serret-Frenet sistem) *Virtuelni cilj definisan projekcijom stvarnog plovila na tangencijalni koordinatni sistem putanje (Serret-Frenet sistem {SF}) kreće se prema [47]*

$$\dot{x}_e = U \cos(\chi_{SF}) - (1 - \kappa y_e) \dot{x}_{e,a}, \quad (2.53)$$

$$\dot{y}_e = U \sin(\chi_{SF}) - \kappa x_e \dot{x}_{e,a}, \quad (2.54)$$

$$\dot{\chi}_{SF} = r + \dot{\beta} - \kappa \dot{x}_{e,a}, \quad (2.55)$$

gdje je U brzina plovila, a (y_e, x_e) lokacija {SF} na putanji u odnosu na {B}. Ako je $x_e = 0$, promjenjiva y_e predstavlja najkraće rastojanje između stvarnog plovila i koordinatnog početka sistema {SF} koji tangira putanju. Dakle, x_e se može posmatrati kao dodatni parametar za dizajn kontrolera pri kretanju duž putanje. Dužina luka za koji se virtuelni cilj pomjerio duž putanje označena je sa $x_{e,a}$ dok je χ_{SF} ugao između x -ose {SF} sistema i vektora brzine. Sa κ je označena zakrivljenost putanje [2].

Serret-Frenet koordinatni sistem (ilustrovan na slici 2.8) se često usvaja kako bi se dobila dinamika greške kao [28]

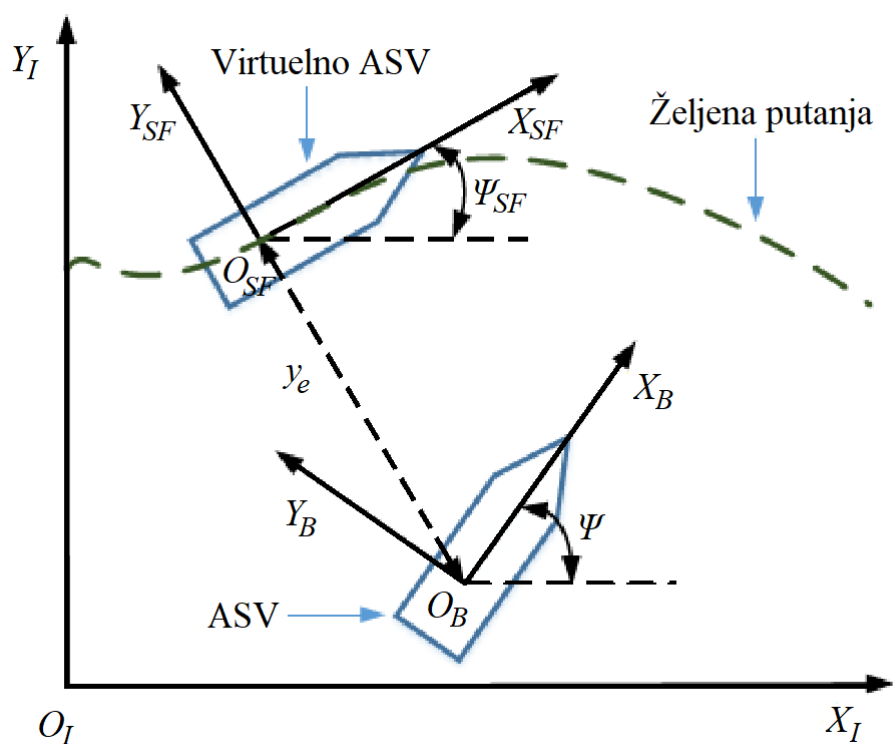
$$\dot{\tilde{\psi}} = \dot{\psi} - \dot{\psi}_{SF} = \frac{\kappa}{1 - y_e \kappa} (u \sin \tilde{\psi} - v \cos \tilde{\psi}) + r, \quad (2.56)$$

$$\dot{y}_e = u \sin \tilde{\psi} + v \cos \tilde{\psi}. \quad (2.57)$$

Simboli u (2.56) i (2.57) kao i na slici 2.8, opisani su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1: Nomenklatura parametara ASV

Simboli	Značenje
$Y_I O_I X_I$	Inercijalni (NED) koordinatni sistem
$Y_B O_B X_B$	Koordinatni sistem fiksiran za vozilo
$Y_{SF} O_{SF} X_{SF}$	Serret-Frenet koordinatni sistem
y_e	Greška položaja
$\tilde{\psi}$	Greška pravca
ψ_{SF}	Ugao pravca virtuelnog plovila
κ	Zakrivljenost željene putanje
X_{SF}	Pravac tangente u koordinatnom početku sistema $Y_{SF} O_{SF} X_{SF}$
Y_{SF}	Pravac normale u koordinatnom početku sistema $Y_{SF} O_{SF} X_{SF}$
X_B	Pravac tangente u koordinatnom početku sistema $Y_B O_B X_B$
Y_B	Pravac normale u koordinatnom početku sistema $Y_B O_B X_B$



Slika 2.8: Promjenjive i koordinate za praćenje putanje zasnovano na upotrebi Serret-Frenet sistema.

Opšti princip Serret-Frenet praćenja putanje zasniva se na težnji da y_e i $\tilde{\psi}$ konvergiraju ka nuli, uz zadržavanje specifičnog ugla kormila kako bi se neutralisali poremećaji okoline. Pored toga, kada ASV prati pravolinijsku putanju, κ teži nuli.

Glava 3

Pregled postojećih LOS algoritama i predlog novog algoritma

U prethodnom poglavlju bilo je riječi o LOS zakonu vođenja kao popularnom i efikasnom načinu za postizanje konvergencije ka željenoj putanji, koji oponaša iskustvenog kormilara. Prednosti LOS zakona su jednostavnost i niska računaska složenost. LOS zakoni vođenja se takođe mogu koristiti zajedno sa komercijalnim sistemima autopilota pravca kao što je prikazano na slici 2.5.

LOS algoritmi za praćenje putanje obično se implementiraju na kinematičkom nivou gdje je cilj da se odredi željena vrijednost ugla pravca ψ u (2.50), [13]. Shodno tome, usvaja se sljedeća pretpostavka:

Pretpostavka 2 *Autopilot pravca omogućava praćenje željenog ugla pravca $\psi = \psi_d$ bez greške.*

S obzirom da je tangencijalni ugao putanje α poznat, a greška položaja y_e se mjeri, proporcionalni LOS zakon ima sljedeći oblik

$$\psi_d = \alpha + \arctan\left(-\frac{1}{\Delta}(y_e + c)\right), \quad (3.1)$$

gdje $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ je proizvoljno odabrana *lookahead* udaljenost i c je upravljački ulaz. Prilikom analize stabilnosti (2.50) sa (3.1) koriste se

$$\sin\left(\arctan\left(-\frac{1}{\Delta}(y_e + c)\right)\right) = -\frac{y_e + c}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + c)^2}}, \quad (3.2)$$

$$\cos\left(\arctan\left(-\frac{1}{\Delta}(y_e + c)\right)\right) = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + c)^2}}. \quad (3.3)$$

Zamjenom (3.2), (3.3) u (2.52) pod pretpostavkama 1 i 2 dobijamo

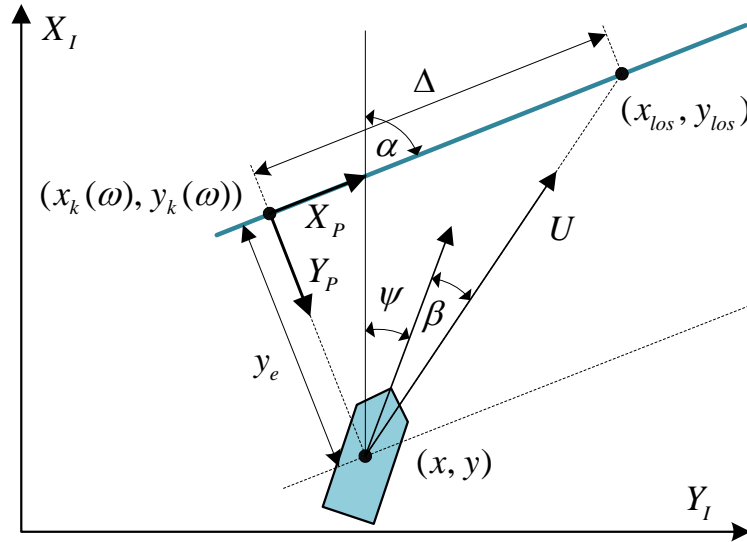
$$\dot{y}_e = -\frac{U(y_e + c)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + c)^2}} + \frac{U\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + c)^2}}\beta. \quad (3.4)$$

Ako je poznata tačna vrijednost ugla bočnog klizanja, može se izabrati c kako bi se poništio drugi član u (3.4). Konkretno, $c = \Delta\beta$ daje

$$\dot{y}_e = -\frac{U}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + c)^2}}y_e. \quad (3.5)$$

Ravnotežna tačka $y_e = 0$ sistema (3.5) sa $c = \Delta\beta$ je uniformno semi-globalno eksponencijalno stabilna (USGES) ako $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ i $0 < U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$. Dokaz stabilnosti proporcionalnog LOS zakona za poznatu vrijednost ugla bočnog klizanja je izveden u [13].

Geometrija LOS zakona vođenja za praćenje putanje u 2-D ravni prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1: Geometrija LOS zakona vođenja za praćenje putanje u 2-D ravni

Uprkos efikasnosti i jednostavnosti, izvorni (proporcionalni) LOS zakon vođenja ima ograničenja kada je vozilo izloženo nepoznatim silama drifta, koje su uzrokovane talasima, vjetrom, okeanskim strujama ili drugim spoljnim smetnjama. Da bi se kompenzovao negativan uticaj pomenutih eksternih poremećaja i omogućilo da vozilo prati željenu putanju, potrebno je poznavati vrijednost ugla bočnog klizanja [1,2]. Najprije se pribjegavalo njegovom direktnom mjerenju upotrebom optičkih korelacionih senzora ili proračunu na osnovu mjerenja longitudinalne i transverzalne brzine [10], [48]. Optički korelacioni senzori imaju veliku cijenu, a mjerenja brzine mogu biti značajno zašumljena i proizvesti grešku pri proračunu. Zbog toga su u literaturi predloženi algoritmi za kompenzaciju i estimaciju ugla bočnog klizanja.

U ovom poglavlju će biti izvršeni pregled i analiza postojećih LOS algoritama za praćenje putanje. Nedostaci postojećih algoritama će biti istaknuti, a samim tim biće pružena motivacija za dizajn novog algoritma.

Ova glava je organizovana na sljedeći način. U potpoglavlju 3.1 je prezentovan integralni LOS algoritam. Potpoglavlja 3.2 i 3.3 sadrže opis adaptivnog i prediktivnog LOS algoritma, respektivno. Adaptivni i prediktivni LOS poslužiće kao referenca za poređenje sa algoritmom koji je predložen u potpoglavlju 3.4.

3.1 Integralni LOS

Potpogonjena vozila nemaju direktnu kontrolnu silu u bočnom (zanošenje) smjeru, pa postizanje konvergencije ka željenoj putanji pod uticajem nepoznate sile drifta nije trivijalno. Primjenom proporcionalnih zakona vođenja, takva vozila će imati veliku grešku položaja tokom praćenja putanje, a takođe i u stacionarnom stanju.

Da bi se na efikasniji način pristupilo otklanjanju nedostataka proporcionalnog LOS zakona, uvedena je njegova modifikacija dodavanjem integralnog člana [11, 12]. Ovaj pristup ne zahtijeva poznavanje ugla bočnog klizanja. Integralni LOS (ILOS) zakon vođenja za površinska vozila je prezentovan u [11], gdje je izveden dokaz o konvergenciji ka željenoj pravolinijskoj putanji. Za dokaz globalne uniformne asimptotske stabilnosti (UGAS) i uniformne lokalne eksponencijalne stabilnosti (ULES), korišćena je teorija Ljapunova. Analiza je zasnovana na modelu plovila sa tri DOF (zalijetanje, zanošenje i skretanje) u kaskadi sa ILOS zakonom vođenja. Konkretno, dokazano je da je integralni LOS zakon vođenja globalno κ -eksponencijalno stabilan za praćenje pravolinijske putanje pri konstantnoj brzini.

Za razliku od konvencionalnog ILOS zakona oblika

$$\psi_d = \alpha - \arctan \left(K_p y_e + K_i \int_0^t y_e(\tau) d\tau \right), \quad (3.6)$$

u [11] je izveden nelinearni ILOS

$$\psi_d = \alpha - \arctan (K_p y_e + K_i y_{\text{int}}), \quad (3.7)$$

$$\dot{y}_{\text{int}} = \frac{\Delta y_e}{\Delta^2 + (y_e + \kappa y_{\text{int}})^2}, \quad (3.8)$$

gdje $K_p = 1/\Delta$, $K_i = \kappa K_p$ i $\kappa > 0$ su podesivi parametri. Sa Δ je označena *lookahead* udaljenost. Ideja iza (3.7) i (3.8) je da će integral greške položaja omogućiti da ψ_d bude različito od nule kada je $y_e = 0$, tj. kada je plovilo na željenoj putanji. Konkretno, u prisustvu smetnji koje udaljavaju sistem od njegove putanje, integral greške položaja y_e će se akumulirati da bi se formiralo ψ_d različito od nule. Kada

je plovilo na željenoj putanji, integralno dejstvo će proizvesti potreban ugao bočnog klizanja za praćenje putanje.

Primjedba 3.1.1 Treba imati na umu da jednačina (3.8) ima svojstvo da je $\dot{y}_{\text{int}} \rightarrow 0$ pri $y_e \rightarrow \infty$. To znači da će se integralno djelovanje smanjiti sa velikim greškama položaja. Konkretno, integralni član će imati manji uticaj kada je greška položaja velika, odnosno kada je plovilo daleko od željene putanje. Ovo svojstvo će otkloniti rizik od pojave efekta navijanja integratora (eng. *integrator wind-up*) i smanjiti ograničenja performansi povezana sa navijanjem integratora.

3.2 Adaptivni LOS

Pošto integralni LOS metod može samo kompenzovati silu drifta, bez procjene ugla bočnog klizanja, u [13] je predložen adaptivni LOS metod (ALOS) koji omogućava direktnu estimaciju pomenutog ugla. Poboljšani ILOS za online estimaciju vremenski promjenjivog ugla bočnog klizanja, zasnovan na opserveru redukovano reda prezentovan je u [49].

Neka $\hat{\beta}$ označava adaptivnu estimaciju ugla β i neka je $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$ greška u estimaciji ugla bočnog klizanja. Adaptivni kontroler se može dizajnirati tako da ulaz $c = \Delta\hat{\beta}$ kompenzuje ugao bočnog klizanja u (3.4). Ako se uzmu u obzir pretpostavke 1 i 2, ALOS zakon vođenja integralnog tipa predložen u [13], ima oblik

$$\psi_d = \alpha + \arctan\left(-\frac{1}{\Delta}y_e - \hat{\beta}\right). \quad (3.9)$$

Adaptivni zakon za $\hat{\beta}$ je dizajniran kao

$$\dot{\hat{\beta}} = \frac{\gamma U \Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}} y_e, \quad (3.10)$$

gdje $\gamma > 0$ predstavlja pojačanje adaptivnog zakona.

Teorema 3.2.1 *Adaptivni zakon (3.9) i (3.10), primijenjen na (2.52), pod pretpostavkama 1 i 2, sa $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ i $0 < U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$, daje USGES rješenje $(y_e, \tilde{\beta}) = (0, 0)$.*

Dokaz. Dokaz teoreme je zasnovan na [13]. Jednačina (3.4) sa $c = \Delta\hat{\beta}$ postaje:

$$\dot{y}_e = -\frac{U}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}} y_e + \frac{U \Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}} \tilde{\beta}. \quad (3.11)$$

Primijetimo da dinamika greške položaja nije autonomna s obzirom da i U i Δ mogu

biti vremenski promjenjivi. Razmotrimo:

$$V_2(t, y_e, \tilde{\beta}) = \frac{1}{2}y_e^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\beta}^2 > 0, \quad y_e \neq 0, \tilde{\beta} \neq 0, \quad (3.12)$$

pri $\gamma > 0$. Na osnovu (3.11) i (3.12) slijedi da je

$$\dot{V}_2(t, y_e, \tilde{\beta}) = -\frac{U}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}}y_e^2 + \tilde{\beta} \left(\frac{U\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}}y_e + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\beta}} \right). \quad (3.13)$$

S obzirom da je $\dot{\tilde{\beta}} = -\dot{\hat{\beta}}$, jednačina (3.10) se može zamijeniti u (3.13). Slijedi,

$$\dot{V}_2(t, y_e, \tilde{\beta}) = -\frac{U}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta\hat{\beta})^2}}y_e^2 \leq 0. \quad (3.14)$$

Iz $V_2(t, y_e, \tilde{\beta}) > 0$ i $\dot{V}_2(t, y_e, \tilde{\beta}) \leq 0$ slijedi da

$$|y_e(t)| \leq |y_e(t_0)|, \quad |\tilde{\beta}(t)| \leq |\tilde{\beta}(t_0)| \quad \forall t \geq t_0. \quad (3.15)$$

Dalje, definišimo $x = [x_1, x_2]^T := [y_e, \tilde{\beta}]^T$, takvo da je

$$\bar{\phi}(t, x) := \frac{U}{\sqrt{\Delta^2 + (x_1 + \Delta(\beta - x_2))^2}}. \quad (3.16)$$

Za svako $\bar{r} > 0$ i sve $\|x(t)\| \leq \bar{r}$, imamo

$$\bar{\phi}(t, x) \geq \frac{U_{\min}}{\sqrt{\Delta_{\max}^2 + (\max\{1, \Delta_{\max}\}\bar{r} + \Delta_{\max}|\beta|)^2}} := c(\bar{r}). \quad (3.17)$$

Iz jednačina (3.10) i (3.11) slijedi:

$$\dot{x}_1 = -\bar{\phi}(t, x)x_1 + \Delta\bar{\phi}(t, x)x_2, \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_2 = -\gamma\Delta\bar{\phi}(t, x)x_1. \quad (3.19)$$

U cilju dokazivanja USGES koristimo

$$V_3(t, x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2\gamma}x_2^2 - \varepsilon x_1 x_2 := \frac{1}{2}x^T P x \quad (3.20)$$

gdje $0 < \varepsilon < 1/\sqrt{\gamma}$ takvo da

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon \\ -\varepsilon & 1/\gamma \end{bmatrix} > 0 \quad (3.21)$$

Stoga,

$$\begin{aligned}\dot{V}_3(t, x) &= x_1(-\bar{\phi}(t, x)x_1 + \Delta\bar{\phi}(t, x)x_2) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma}x_2(-\gamma\Delta\bar{\phi}(t, x)x_1) \\ &\quad - \varepsilon x_2(-\bar{\phi}(t, x)x_1 + \Delta\bar{\phi}(t, x)x_2) \\ &\quad - \varepsilon x_1(-\gamma\Delta\bar{\phi}(t, x)x_1).\end{aligned}\tag{3.22}$$

Odatle slijedi

$$\dot{V}_3(t, x) = -\bar{\phi}(t, x) \left((1 - \varepsilon\gamma\Delta)x_1^2 + \varepsilon\Delta x_2^2 - \varepsilon x_1 x_2 \right) \leq -2c(\bar{r})x^T Q(t)x, \tag{3.23}$$

gdje

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - \varepsilon\gamma\Delta(t) & -\frac{\varepsilon}{2} \\ -\frac{\varepsilon}{2} & \varepsilon\Delta(t) \end{bmatrix}. \tag{3.24}$$

Matrica $Q(t)$ je vremenski promjenjiva ali $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta(t) \leq \Delta_{\max}$ za svako $t \geq 0$. Dakle, postoji pozitivna konstanta ε :

$$0 < \varepsilon < \min \left\{ \frac{1}{\sqrt{\gamma}}, \frac{1}{\gamma\Delta_{\max}}, \frac{4\Delta_{\min}}{4\gamma\Delta_{\max}^2 + 1} \right\} \tag{3.25}$$

za svako $\gamma > 0$, koja obezbjeđuje da

$$\dot{V}_3 \leq -2\frac{q_{\min}}{p_{\max}}c(\bar{r})V_3, \quad \forall \|x(t)\| \leq \bar{r} \tag{3.26}$$

gdje $p_{\max} = \max\{1, 1/\gamma\}$ i $q_{\min} = \lambda_{\min}(Q)$. S obzirom na (3.15), prethodno navedeno važi za sve trajektorije generisane početnim uslovima $x(t_0)$. Dakle, možemo se pozvati na lemu (Lema 3.4, [50]) tako što ćemo primijetiti da linearni sistem $\dot{w} = -2(q_{\min}/p_{\max})c(\bar{r})w$ ima rješenje $w(t) = e^{-2(q_{\min}/p_{\max})c(\bar{r})(t-t_0)}w(t_0)$, što ukazuje da $v_3(t) \leq e^{-2(q_{\min}/p_{\max})c(\bar{r})(t-t_0)}v_3(t_0)$ za $v_3(t) = V_3(t, x(t))$. Definisanjem $p_{\min} = \min\{1, 1/\gamma\}$ slijedi da

$$\|x(t)\| \leq \sqrt{\frac{p_{\max}}{p_{\min}}} e^{-\frac{q_{\min}}{p_{\max}}c(\bar{r})(t-t_0)} \|x(t_0)\| \tag{3.27}$$

za svako $t \geq t_0$, $\|x(t_0)\| \leq \bar{r}$ i bilo koje $\bar{r} > 0$. Otuda se može zaključiti da je ravnotežna tačka $x = 0$ USGES (Definicija 2.7, [51]).

■

3.3 Prediktivni LOS

Navedene adaptivne ILOS metode obezbjeđuju praćenje putanje samo pri sporo promjenjivim ili konstantnim vrijednostima ugla bočnog klizanja. Pored toga, kod ove grupe metoda se javljaju velike greške u praćenju i oscilacije tokom prelaznog procesa, kao i poteškoće pri odabiru adaptivnih pojačanja ([14], [15]). Kako bi se prevazišli nedostaci adaptivnih ILOS metoda, predloženi su prediktivni LOS zakoni (PLOS) [15], [16].

Posmatrajući sliku 3.1, za ASV na poziciji (x, y) , definišimo ω^* kao jedinstvenu vrijednost parametra ω koja minimizuje Euklidsku razdaljinu između (x, y) i $(x_k(\omega), y_k(\omega))$. Za pravolinijsku putanju, ω^* zadovoljava jednačinu (2.46)

$$y - y_k(\omega^*) = -\frac{1}{\tan(\alpha)}(x - x_k(\omega^*)). \quad (3.28)$$

Definišimo tangencijalni referentni koordinatni sistem putanje u tački $(x_k(\omega^*), y_k(\omega^*))$. Greška između (x, y) i $(x_k(\omega^*), y_k(\omega^*))$ izražena u koordinatama tangencijalnog referentnog sistema putanje je, na osnovu (2.45)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_k(\omega^*) \\ y - y_k(\omega^*) \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Iz jednačine (2.47) slijedi:

$$\begin{aligned} \dot{y}_e = & \underbrace{-\dot{x} \sin(\alpha) + \dot{y} \cos(\alpha)}_{n_1} + \underbrace{\dot{x}_k(\omega) \sin(\alpha) - \dot{y}_k(\omega) \cos(\alpha)}_{n_2} \\ & - \dot{\alpha} \underbrace{[(x - x_k(\omega)) \cos(\alpha) + (y - y_k(\omega)) \sin(\alpha)]}_{\text{greška duž putanje, } x_e=0}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Prvi član n_1 može se transformisati u amplitudno-fazni oblik,

$$\begin{aligned} n_1 = & -(u \cos(\psi) - v \sin(\psi)) \sin(\alpha) + (u \sin(\psi) + v \cos(\psi)) \cos(\alpha) \\ = & U \sin(\psi - \alpha + \beta), \end{aligned} \quad (3.31)$$

gdje brzina plovila zadovoljava $0 < U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$, a $\beta = \text{atan2}(v, u)$.

Drugi član n_2 može se zapisati kao

$$n_2 = \dot{\omega} \sqrt{x'_k(\omega)^2 + y'_k(\omega)^2} \sin(\alpha + \phi) = 0, \quad (3.32)$$

gdje

$$\phi = \text{atan2}(-y'_k(\omega), x'_k(\omega)) = -\alpha. \quad (3.33)$$

Konačno, izvod greške položaja je, prema (2.50)

$$\dot{y}_e = U \sin(\psi - \alpha + \beta). \quad (3.34)$$

Dalje, pri izvođenju PLOS zakona u obzir je uzeta aproksimacija o malom i konstantnom uglu bočnog klizanja zbog čega važi relacija (2.52).

Kako bi se estimirala vrijednost ugla bočnog klizanja β , razmatra se prediktor stanja

$$\dot{\hat{y}}_e = U \sin(\psi - \alpha) + U \cos(\psi - \alpha)\hat{\beta} - k\tilde{y}_e, \quad (3.35)$$

gdje $\tilde{y}_e = \hat{y}_e - y_e$, k je pozitivna konstanta, a $\hat{\beta}$ je estimacija β .

Zakon za ažuriranje $\hat{\beta}$ je zasnovan na predikciji greške

$$\dot{\hat{\beta}} = -\Gamma U \cos(\psi - \alpha)\tilde{y}_e. \quad (3.36)$$

Tada, dinamika greške \tilde{y}_e postaje

$$\dot{\tilde{y}}_e = U \cos(\psi - \alpha)\tilde{\beta} - k\tilde{y}_e. \quad (3.37)$$

Željena vrijednost ugla pravca je

$$\psi_d = \alpha - \arctan\left(\frac{1}{\Delta}y_e + \hat{\beta}\right). \quad (3.38)$$

Posljedično, dinamika greške u pogledu \hat{y}_e može se predstaviti kao

$$\dot{\hat{y}}_e = -\frac{U\hat{y}_e}{\sqrt{\hat{y}_e^2 + \Delta^2}} - k\tilde{y}_e. \quad (3.39)$$

Primjedba 3.3.1 Ova grupa metoda koristi predikciju greške položaja, tj. normalnog rastojanja između referentne pravolinijske putanje i pozicije ASV, kako bi se sa visokom tačnošću ostvarila estimacija ugla bočnog klizanja. Prediktivni metodi predstavljeni u [15], posjeduju dodatne podesive parametre kojima se vrši predikcija i greške položaja y_e i greške duž putanje x_e , pa na taj način obezbjeđuju brzu i glatku estimaciju. Uz to, prediktori se mogu koristiti za estimaciju morskih struja što će rezultovati boljim performansama pri praćenju putanje [14, 52, 53]. PLOS zakoni [15] omogućavaju brzu identifikaciju ugla bočnog klizanja odabirom velikih adaptivnih pojačanja, bez generisanja oscilacija u praćenju. Međutim, kao i ALOS, uzimaju u obzir samo male vrijednosti bočnog klizanja. LOS zakon vođenja za praćenje putanje kod amfibijskih plovila sa kompenzacijom velikog, vremenski promjenjivog ugla bočnog klizanja izveden je u [54].

U cilju sprovođenja analize stabilnosti, biće uvedeno nekoliko definicija i lema.

Definicija 3.3.1 (Definicija 4.4 u [50]) Tačka ekvilibrijuma $x = 0$ sistema $\dot{x} = f(t, x)$ je uniformno globalno asimptotski stabilna (UGAS) ako i samo ako postoji funkcija ξ iz klase \mathcal{KL} , takva da

$$\|x(t)\| \leq \xi(\|x(0)\|, t), \quad (3.40)$$

za svako $t > 0$.

Definicija 3.3.2 (Definicija 4.7 u [50]) Sistem

$$\dot{x} = f(t, x, u), \quad (3.41)$$

se smatra input-to-state stabilnim (ISS) ako postoji funkcija δ iz klase \mathcal{KL} i funkcija γ iz klase \mathcal{K} takve da za svako početno stanje $x(0)$ i ograničen ulazni signal u , rješenje $x(t)$ postoji za svako $t > 0$ i zadovoljava

$$\|x(t)\| \leq \delta(\|x(0)\|, t) + \gamma(\|u\|). \quad (3.42)$$

Lema koja slijedi, zasnovana na teoriji Ljapunova, daje dovoljan uslov za ISS.

Lema 3.3.1 (Teorema 4.19 u [50]) Neka je $V : [0, \infty) \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ neprekidno diferencijabilna funkcija takva da

$$\alpha_1(\|x\|) \leq V(t, x) \leq \alpha_2(\|x\|), \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(t, x, u) \leq -W(x), \quad \forall \|x\| \geq \rho(\|u\|) > 0, \quad (3.44)$$

$\forall (t, x, u) \in [0, \infty) \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, gdje su α_1, α_2 funkcije klase \mathcal{K}_∞ , ρ je funkcija iz klase \mathcal{K} , a $W(x)$ je neprekidna pozitivno definitna funkcija na \mathbb{R}^n . Tada je sistem (3.41) ISS sa $\gamma = \alpha_1^{-1} \cdot \alpha_2 \cdot \rho$.

Sljedeća lema uspostavlja stabilnost kaskadnog sistema.

Lema 3.3.2 (Lema 4.7 u [50]) Razmotrimo kaskadni sistem

$$\dot{x}_1 = f_1(t, x_1, x_2), \quad (3.45)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(t, x_2). \quad (3.46)$$

Ako je sistem (3.45), sa ulazom x_2 , ISS i ishodište sistema (3.46) UGAS, tada je ishodište kaskadnog sistema (3.45) i (3.46) UGAS.

Analiza stabilnosti PLOS algoritma za praćenje pravolinijske putanje predstavljena je u [16]. Razmotrimo prvo stabilnost dinamike (3.37) i uvedimo sljedeću lemu.

Lema 3.3.3 (Lema 3 u [16]) *Adaptivni zakon za ažuriranje $\hat{\beta}$ dat jednačinom (3.36) garantuje da će ishodište $\tilde{y}_e = 0$ sistema (3.37) biti UGAS.*

Dokaz. Formirajmo sljedeću funkciju Ljapunova

$$V_1 = \frac{1}{2}\tilde{y}_e^2 + \frac{1}{2}\Gamma^{-1}\tilde{\beta}^2. \quad (3.47)$$

Izvod po vremenu funkcije V_1 zajedno sa (3.36) i (3.37) daje

$$\dot{V}_1 = \tilde{y}_e(U \cos(\psi - \alpha)\tilde{\beta} - k\tilde{y}_e) + \tilde{\beta}(-U \cos(\psi - \alpha)\tilde{y}_e) \leq -k\tilde{y}_e^2. \quad (3.48)$$

Iz (3.48), može se zaključiti da je sistem (3.37) UGAS pod adaptivnim zakonom (3.36). ■

Sljedeća lema važi za dinamiku (3.39).

Lema 3.3.4 (Lema 4 u [16]) *Sistem (3.39) sa stanjem \hat{y}_e je ISS u odnosu na egzogeni ulaz \tilde{y}_e .*

Dokaz. Razmotrimo kandidata za funkciju Ljapunova

$$V_2 = \frac{1}{2}\hat{y}_e^2. \quad (3.49)$$

Izvod funkcije V_2 u odnosu na (3.39), zadovoljava

$$\dot{V}_2 = \hat{y}_e\left(-\frac{U\hat{y}_e}{\sqrt{\hat{y}_e^2 + \Delta^2}} - k\tilde{y}_e\right) = -\frac{U}{\sqrt{\hat{y}_e^2 + \Delta^2}}\hat{y}_e^2 - k\hat{y}_e\tilde{y}_e. \quad (3.50)$$

Dalje, definišimo

$$\Phi(y_e, t) = \frac{U}{\sqrt{\hat{y}_e^2 + \Delta^2}}. \quad (3.51)$$

Za svako $\bar{\epsilon} > 0$ i $\|y_e\| \leq \bar{\epsilon}$, imamo

$$\Phi(y_e, t) \geq \frac{U_{\min}}{\sqrt{\bar{\epsilon}^2 + \Delta_{\max}^2}} = c(\bar{\epsilon}). \quad (3.52)$$

Iz toga proizilazi da

$$V_2 \leq -c(\bar{\epsilon})\hat{y}_e^2 - k\hat{y}_e\tilde{y}_e \leq -c(\bar{\epsilon})(1 - \theta)\hat{y}_e^2 - c(\bar{\epsilon})\theta\hat{y}_e^2 - k\hat{y}_e\tilde{y}_e, \quad (3.53)$$

gdje $0 < \theta < 1$. Sada imamo,

$$V_2 \leq -c(\bar{\epsilon})(1 - \theta)\hat{y}_e^2, \quad (3.54)$$

ako

$$\|\hat{y}_e\| \geq k_2 \|\tilde{y}_e\| / (c(\bar{\epsilon})\theta). \quad (3.55)$$

Dakle, uslovi leme 3.3.1 su zadovoljeni izborom $\alpha_{p1}(s) = \alpha_{p2}(s) = (1/2)s^2$, $\rho_p(s) = (k/(\kappa\theta))s$. Prema lemi 3.3.1, postoji funkcija δ_p iz klase \mathcal{KL} i funkcija γ_p iz klase \mathcal{K} , takve da

$$\|x(t)\| \leq \delta_p(\|\hat{y}_e(0)\|, t) + \gamma_p(\|\tilde{y}_e\|). \quad (3.56)$$

Zaključujemo da je sistem (3.39) ISS sa $\gamma_p(s) = (k/(c(\bar{\epsilon})\theta))s$.

■

Teorema 3.3.5 *LOS zakon vođenja dat jednačinom (3.38), adaptivni zakon (3.36), zajedno sa prediktorom (3.35) daju UGAS ishodište kaskadnog sistema (3.37) i (3.39).*

Dokaz. Leme 3.3.3 i 3.3.4 pokazuju da

1. Sistem (3.37) je UGAS;
2. Sistem (3.39) je ISS;

Sistem u zatvorenoj sprezi (3.37) i (3.39) tada zadovoljavaju uslov leme 3.3.2, koji garantuje da će ishodište (\hat{y}_e, \tilde{y}_e) biti UGAS.

■

3.4 Predlog LOS algoritma za praćenje putanje zasnovan na upotrebi Kalmanovog filtra

Sekcija je podijeljena na dvije podsekcije. U prvoj će biti prezentovana opšta teorija Kalmanovog filtra i uvedeni osnovni pojmovi. Druga podsekcija sadrži izvođenje predloženog LOS zakona.

3.4.1 Kalmanov filter

Kalmanov filter je efikasan rekurzivni filter koji procjenjuje stanja linearnog ili nelinearnog dinamičkog sistema na osnovu niza zašumljenih mjerenja. Široko je rasprostranjen u senzorskim i navigacionim sistemima gdje se koristi za rekonstruisanje neizmjenjenih stanja, kao i eliminisanje bijelog i obojenog šuma pri estimaciji stanja. U slučajevima privremenog gubitka mjerenja, Kalmanov filter se ponaša kao prediktor. Čim nova mjerenja postanu dostupna, vrši se korekcija i ažuriranje prediktora u realnom vremenu, kako bi se dobila estimacija sa minimalnom varijansom. Ova funkcija je naročito korisna kada dođe do gubitka satelitskih signala, jer se pomoću Kalmanovog filtra može predvidjeti kretanje koristeći samo žiroskope i akcelerome-

tre [2].

Posmatramo linearni sistem koji je u prostoru stanja opisan sljedećim jednačinama:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{M}\mathbf{w}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) + \mathbf{v}(t).\end{aligned}\tag{3.57}$$

Prva jednačina predstavlja jednačinu stanja, pa se stoga šum $\mathbf{w}(t)$ često naziva procesni šum. Ovim šumom se modeluju spoljni poremećaji koji utiču na sistem, a koji nisu poznati. Osim toga, greške u modelovanju sistema i nemodelovana dinamika se takođe mogu predstaviti procesnim šumom. Druga jednačina predstavlja jednačinu mjerenja, pa se šum $\mathbf{v}(t)$ naziva mjerni šum. Ovaj šum modeluje neizbježne greške mjerenja. Pretpostavlja se da su šumovi $\mathbf{w}(t)$ i $\mathbf{v}(t)$ bijeli Gausovi šumovi čija je srednja vrijednost 0, a varijansa \mathbf{Q} i \mathbf{R} , respektivno [55]:

$$\begin{aligned}E[\mathbf{w}(t)\mathbf{w}(t+\tau)^T] &= \mathbf{Q}\delta(\tau), \\ E[\mathbf{v}(t)\mathbf{v}(t+\tau)^T] &= \mathbf{R}\delta(\tau), \\ E[\mathbf{w}(t)\mathbf{v}(t+\tau)^T] &= \mathbf{0}.\end{aligned}\tag{3.58}$$

Kalmanov filtar predstavlja dinamički sistem čiji su ulazi deterministički signal $\mathbf{u}(t)$ i izmjereni signal $\mathbf{y}(t)$. Izlaz iz Kalmanovog filtra je estimacija stvarnih stanja $\mathbf{x}(t)$, označena sa $\hat{\mathbf{x}}(t)$.

Cilj Kalmanovog filtra je da na osnovu dostupnih mjerenja estimira stanja $\mathbf{x}(t)$, tj. da se minimizuje greška između stvarnih i estimiranih stanja sistema.

Ključna pretpostavka pri dizajniranju Kalmanovog filtra je da je model sistema opservabilan. Ovo je neophodno da bi se ostvarila konvergencija estimiranih stanja $\hat{\mathbf{x}}$ ka \mathbf{x} .

Realizacija Kalmanovog filtra u prostoru stanja ima sljedeći oblik [55]:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{D}\mathbf{u}).\tag{3.59}$$

U prethodnoj relaciji, deterministički model sistema ($\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u}$) koristi se za predikciju evolucije stanja sistema na osnovu trenutne estimacije stanja $\hat{\mathbf{x}}$. Predikcija se dodatno ažurira tako što se dodaje razlika između izmjerenog izlaza \mathbf{y} i predikovanog izlaza $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}$, pomnožena pojačanjem filtra \mathbf{K} .

Pri određivanju pojačanja \mathbf{K} potrebno je uzeti u obzir stepen „povjerenja“ u model sistema i mjerenja. Stepem povjerenja u model sistema se izražava pomoću kovarijanse procesnog šuma \mathbf{Q} : ako je model precizniji (i sistem nije izložen spoljnim poremećajima) tada \mathbf{Q} ima manju vrijednost, i obrnuto. Slično, kovarijansa mjernog šuma \mathbf{R} ima malu vrijednost ako su mjerenja precizna.

Dakle, potrebno je odrediti pojačanje \mathbf{K} koje će minimizovati sljedeću funkciju performanse:

$$J = \sum_{i=1}^n E [e_i(t)^2] = \sum_{i=1}^n E [\mathbf{e}^T(t)\mathbf{e}(t)] = \text{trace}E [\mathbf{e}(t)\mathbf{e}^T(t)] = \text{trace}\mathbf{P}(t). \quad (3.60)$$

U prethodnom izrazu

$$\mathbf{P}(t) = E [(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t))(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t))^T] \quad (3.61)$$

je kovarijaciona matrica greške u estimaciji. Trag matrice (trace) predstavlja sumu elemenata matrice na glavnoj dijagonali.

Tokom izvođenja optimalnog vektora \mathbf{K} treba uzeti u obzir nezavisnost procesnog i mjernog šuma, odnosno:

$$E \left[\begin{bmatrix} \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} \right] [\mathbf{w}(t+\tau) \quad \mathbf{v}(t+\tau)] = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \delta(\tau). \quad (3.62)$$

Optimalno pojačanje \mathbf{K} određujemo minimizacijom traga matrice \mathbf{P} :

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1}. \quad (3.63)$$

Kada se prethodni vektor uvrsti u jednačinu za kovarijacionu matricu dobija se:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}^T - \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P}(t) + \mathbf{M}\mathbf{Q}\mathbf{M}^T. \quad (3.64)$$

Prethodna jednačina označava matričnu Rikatijevu diferencijalnu jednačinu koju je potrebno integraliti od početnog trenutka t_0 do t , pri zadatoj početnoj vrijednosti $\mathbf{P}(0)$.

Kontinualni Kalmanov filter opisan je jednačinama (3.59), (3.63) i (3.64). U cilju izračunavanja Kalmanovog pojačanja $\mathbf{K}(t)$ neophodno je integraliti diferencijalnu Rikatijevu jednačinu za zadato $\mathbf{P}(0)$, tj. odrediti $\mathbf{P}(t)$. Dobijeno optimalno pojačanje se zatim koristi za predikciju stanja sistema na osnovu modela i mjerenja, (3.59).

Pojačanje $\mathbf{K}(t)$ moguće je odrediti offline ili u realnom vremenu. Ukoliko se računa offline, $\mathbf{K}(t)$ je potrebno čuvati u memoriji računara.

Sa praktičnog stanovišta, Kalmanov filter je potrebno implementirati na računaru, u diskretnom obliku, i pri tom upotrijebiti neki od metoda diskretizacije (Euler, Tustin, itd.). Diskretni Kalmanov filter u suštini ima isti oblik kao njegova kontinualna verzija. Razlika proističe iz činjenice da se u diskretnom obliku predikcija stanja na osnovu determinističkog modela sistema i korekcija stanja na osnovu inovacije (razlike između predikcije i stvarnih mjerenja) sprovode u dva odvojena koraka. Prema

tome kod diskretnog Kalmanovog filtra uočavamo [55]:

1. Predikciju stanja u trenutku $n + 1$ označenu sa $\hat{\mathbf{x}}(n + 1|n)$. Predikcija stanja se obavlja na osnovu mjerenja do trenutka n i nosi naziv apriorna estimacija. Kovarijaciona matrica apriorne greške je jednaka:

$$\mathbf{P}(n + 1|n) = E [(\mathbf{x}(n + 1) - \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n))(\mathbf{x}(n + 1) - \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n))^T], \quad (3.65)$$

2. Korigovana (ažurirana) stanja označena sa $\hat{\mathbf{x}}(n + 1|n + 1)$. Korekcija zavisi od mjerenja do trenutka $n + 1$ i naziva se aposteriorna estimacija. Kovarijaciona matrica aposteriorne greške je jednaka:

$$\mathbf{P}(n + 1|n + 1) = E [(\mathbf{x}(n + 1) - \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n + 1))(\mathbf{x}(n + 1) - \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n + 1))^T]. \quad (3.66)$$

U trenutku n poznata je aposteriorna estimacija $\hat{\mathbf{x}}(n|n)$. Predikcija stanja vrši se prema modelu sistema:

$$\hat{\mathbf{x}}(n + 1|n) = \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{x}}(n|n) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(n). \quad (3.67)$$

U trenutku n kovarijaciona matrica aposteriorne greške je jednaka $\mathbf{P}(n|n)$, dok kovarijaciona matrica apriorne greške ispunjava sljedeću diferencnu jednačinu:

$$\mathbf{P}(n + 1|n) = \mathbf{A}_d \mathbf{P}(n|n) \mathbf{A}_d^T + \mathbf{M}_d \mathbf{Q}_d \mathbf{M}_d^T. \quad (3.68)$$

Korekcija (ažuriranje) apriorne estimacije obavlja se u trenutku $n + 1$:

$$\hat{\mathbf{x}}(n + 1|n + 1) = \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n) + \mathbf{K}(n + 1)(\mathbf{y}(n + 1) - \mathbf{C}_d \hat{\mathbf{x}}(n + 1|n) - \mathbf{D}_d \mathbf{u}(n)), \quad (3.69)$$

gdje je sa $\mathbf{K}(n + 1)$ označeno Kalmanovo pojačanje koje je potrebno odrediti. Kao u kontinualnom slučaju, neophodno je izračunati vektor $\mathbf{K}(n + 1)$ tako da se minimizuje trag aposteriorne kovarijacione matrice.

Za optimalni Kalmanov vektor dalje važi:

$$\mathbf{K}(n + 1) = \mathbf{P}(n + 1|n) \mathbf{C}_d^T (\mathbf{C}_d \mathbf{P}(n + 1|n) \mathbf{C}_d^T + \mathbf{R}_d)^{-1}. \quad (3.70)$$

Da bi odredili optimalni vektor neophodno je poznavati kovarijacionu matricu apriorne greške koja se može odrediti na osnovu (3.68). Međutim, da bi izračunali $\mathbf{P}(n + 1|n)$ neophodno je poznavati $\mathbf{P}(n|n)$. Jednačina za ažuriranje aposteriorne kovarijacione matrice je

$$\mathbf{P}(n + 1|n + 1) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(n + 1) \mathbf{C}_d) \mathbf{P}(n + 1|n). \quad (3.71)$$

Posmatrajmo nelinearni diskretni sistem prikazan u prostoru stanja na sljedeći način:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(n+1) &= \mathbf{f}_d(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n), \mathbf{w}_d(n)), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}(n) &= \mathbf{g}_d(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n)) + \mathbf{v}_d(n)\end{aligned}\quad (3.72)$$

gdje su \mathbf{f}_d i \mathbf{g}_d nelinearne funkcije. Za estimaciju stanja zadatog nelinearnog sistema koristi se prošireni Kalmanov filtar (eng. *Extended Kalman filter*, EKF).

Estimaciju stanja nelinearnog sistema potrebno je takođe sprovesti u dva koraka. U svakom diskretnom trenutku $n > 0$ izvršava se sljedeći set jednačina [55–57]:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}(n) &= \mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{C}_d(n)^T(\mathbf{C}_d(n)\mathbf{P}(n|n-1)\mathbf{C}_d(n)^T + \mathbf{R}_d)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(n|n) &= \hat{\mathbf{x}}(n|n-1) + \mathbf{K}(n)(\mathbf{y}(n) - \mathbf{g}_d(\hat{\mathbf{x}}(n|n-1))) \\ \hat{\mathbf{x}}(n+1|n) &= \mathbf{f}_d(\hat{\mathbf{x}}(n|n), \mathbf{u}(n)) \\ \mathbf{P}(n|n) &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}(n)\mathbf{C}_d(n))\mathbf{P}(n|n-1) \\ \mathbf{P}(n+1|n) &= \mathbf{A}_d(n)\mathbf{P}(n|n)\mathbf{A}_d(n)^T + \mathbf{M}_d\mathbf{Q}_d\mathbf{M}_d^T.\end{aligned}\quad (3.73)$$

gdje je

$$\mathbf{A}_d(n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \vdots \end{bmatrix}_{\mathbf{x}(n)=\hat{\mathbf{x}}(n|n)}, \quad \mathbf{C}_d(n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \vdots \end{bmatrix}_{\mathbf{x}(n)=\hat{\mathbf{x}}(n+1|n)}, \quad (3.74)$$

dok je matrica \mathbf{M}_d :

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial w_{d1}} & \frac{\partial f_1}{\partial w_{d2}} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial w_{d1}} & \frac{\partial f_2}{\partial w_{d2}} & \vdots \end{bmatrix}_{\mathbf{w}_d(n)=E[\mathbf{w}_d(n)]}. \quad (3.75)$$

3.4.2 Predloženi LOS algoritam

Na osnovu [54], definicije ugla bočnog klizanja, gdje $v = u \tan \beta$, i resultantne brzine U u kombinaciji sa modelom izvedenim u (2.51), dinamika greške za scenario praćenja putanje može biti zapisana kao

$$\dot{y}_e = u \sin(\psi - \alpha) + u \cos(\psi - \alpha) \tan \beta. \quad (3.76)$$

Neka je $\theta = \tan \beta$, tada se relacija (3.76) može preformulisati u

$$\dot{y}_e = u \sin(\psi - \alpha) + u \cos(\psi - \alpha) \theta. \quad (3.77)$$

Konstantan ugao bočnog klizanja implicira $\dot{\theta} = 0$. Definišimo prošireni vektor stanja kao $\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} y_e & \theta \end{bmatrix}^T$. Tada se dinamika proširenog vektora stanja može napisati kao

$\dot{\zeta} = \mathbf{f}(\zeta)$, gdje je

$$\mathbf{f}(\zeta) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \sin(\psi - \alpha) + u \cos(\psi - \alpha)\theta \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Dalje, definišimo $\hat{\zeta} = [\hat{y}_e \ \hat{\theta}]^T$ kao estimiranu vrijednost ζ . Cilj je dizajnirati estimator takav da je $\zeta - \hat{\zeta} \rightarrow 0$ pri čemu $t \rightarrow \infty$.

Za dizajn predloženog algoritma koristi se prošireni Kalmanov filter (eng. *Augmented Extended Kalman filter*) u cilju estimacije ζ , [57]. LOS zakon vođenja za potpogonjena površinska vozila, zasnovan na upotrebi proširenog Kalmanovog filtra (KFLOS), prezentovan je u [58]. Prošireni vektor stanja se estimira na osnovu modela sistema i mjerenja greške položaja

$$\dot{\hat{\zeta}} = \mathbf{f}(\hat{\zeta}) + \mathbf{K}(y_e - \hat{y}_e), \quad (3.78)$$

gdje se ažuriranje vremenski promjenjivog Kalmanovog pojačanja \mathbf{K} vrši prema

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^T - \mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{P} + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{K} &= \mathbf{P}\mathbf{C}^T\mathbf{R}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.79)$$

Ovdje, \mathbf{P} predstavlja kovarijacionu matricu greške, \mathbf{Q} procesnu kovarijacionu matricu, a \mathbf{R} označava kovarijansu mjernog šuma. Dobro je poznato da je \mathbf{K} optimalno Kalmanovo pojačanje koje minimizuje trag kovarijacione matrice \mathbf{P} . S obzirom da procesni i mjerni šumovi nisu razmatrani u ovoj tezi, \mathbf{Q} i \mathbf{R} mogu se iskoristiti kako bi se podesila brzina konvergencije estimatora.

Matrice \mathbf{A} i \mathbf{C} su

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_e} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_e} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \end{bmatrix}_{\zeta(t)=\hat{\zeta}(t)} = \begin{bmatrix} 0 & u \cos(\psi - \alpha) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.80)$$

Konačno, estimirana vrijednost ugla bočnog klizanja se proračunava kao

$$\hat{\beta} = \arctan \hat{\theta}, \quad (3.81)$$

na ograničenom intervalu $[-\pi/2, \pi/2]$. U poređenju sa [13] i [16], ne postoji potreba za aproksimacijom sa malom vrijednošću ugla bočnog klizanja, čime predloženi pristup postaje primenljiviji i precizniji.

Željeni ugao pravca je

$$\psi_d = \alpha - \arctan\left(\frac{1}{\Delta}y_e + \hat{\beta}\right). \quad (3.82)$$

U nastavku ove podsekcije ukratko će biti prezentovana verzija predloženog KFLOS algoritma koja umjesto longitudinalne brzine u koristi rezultatnu brzinu $U = \sqrt{u^2 + v^2}$. Ova verzija algoritma biće korišćena pri dobijanju eksperimentalnih rezultata. Dinamika greške položaja za scenario praćenja putanje (pri maloj konstantnoj vrijednosti β) je

$$\dot{y}_e = U \sin(\psi - \alpha) + U \cos(\psi - \alpha)\beta. \quad (3.83)$$

Definišimo prošireni vektor stanja kao $\boldsymbol{\zeta} = [y_e \ \beta]^T$. Estimirana vrijednost $\boldsymbol{\zeta}$ je $\hat{\boldsymbol{\zeta}} = [\hat{y}_e \ \hat{\beta}]^T$, a za estimaciju ugla bočnog klizanja važi $\dot{\hat{\beta}} = 0$. Dinamika proširenog vektora stanja je $\dot{\boldsymbol{\zeta}} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\zeta}) = [f_1 \ f_2]^T$. Prošireni Kalmanov filter (AEKF) ima oblik:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{y}}_e & \dot{\hat{\beta}} \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} U \sin(\psi - \alpha) + U \cos(\psi - \alpha)\hat{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{K}(t)\tilde{y}_e, \\ \dot{\mathbf{P}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}^T - \mathbf{K}(t)\mathbf{C}\mathbf{P}(t) + \mathbf{Q}(t), \\ \mathbf{K}(t) &= \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T\mathbf{R}(t)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.84)$$

Matrice \mathbf{A} i \mathbf{C} su

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_e} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_e} & \frac{\partial f_2}{\partial \beta} \end{bmatrix}_{\boldsymbol{\zeta}(t)=\hat{\boldsymbol{\zeta}}(t)} = \begin{bmatrix} 0 & U \cos(\psi - \alpha) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.85)$$

Konačno, željena vrijednost ugla pravca je

$$\psi_d = \alpha - \arctan\left(\frac{1}{\Delta}y_e + \hat{\beta}\right). \quad (3.86)$$

Glava 4

Rezultati

U ovoj glavi su prezentovani rezultati simulacija i eksperimentalni rezultati. Glava je podijeljena na dva dijela. U prvom dijelu je izvršena komparativna analiza različitih LOS algoritama, implementiranih u MATLAB programskom paketu i metrika za ocjenu performansi predloženog algoritma. U drugom dijelu su predstavljeni rezultati eksperimenta praćenja pravolinijske putanje sa odgovarajućim indeksima performansi.

4.1 Rezultati simulacija

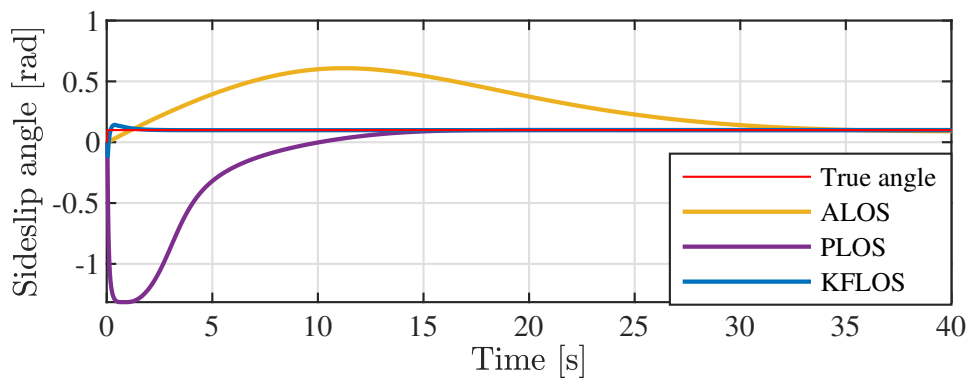
Za opisivanje dinamike skretanja ASV izabran je Nomoto model prvog reda sa dinamikom aktuatora kao u [2]:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\frac{1}{T}r + \frac{K}{T}\delta \end{cases}, \quad (4.1)$$

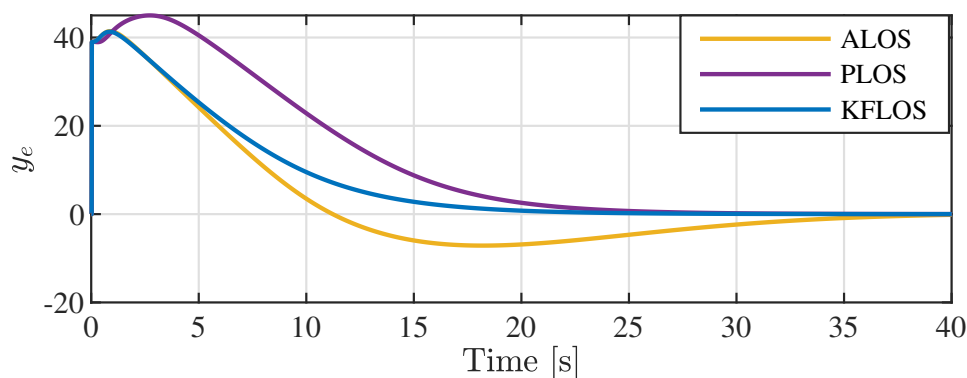
gdje δ predstavlja ugao kormila ASV. U cilju kontrole brzine skretanja, koristi se PD regulator sa proporcionalnim pojačanjem $K_p = 0.6$ i diferencijalnim pojačanjem $K_d = 0.35$. Parametri ASV su $K = 20$ i $T = 1$.

Razmotrena su dva scenarija praćenja pravolinijske putanje, S_1 i S_2 . Longitudinalne brzine za scenarije S_1 i S_2 su $u = 5m/s$ i $u = 3m/s$, respektivno. Ova dva scenarija takođe se razlikuju i po pitanju početne pozicije i orijentacije vozila. Transverzalna brzina je $v = 0.5m/s$. U oba slučaja, parametri simulacija su izabrani tako da je: $\Delta = 20m$, $\gamma = 0.001$, $k = 4$, $\Gamma = 0.1$, $\mathbf{R} = 0.1$ i dijagonalni elementi kovarijacione matrice \mathbf{Q} su postavljeni na vrijednost 10.

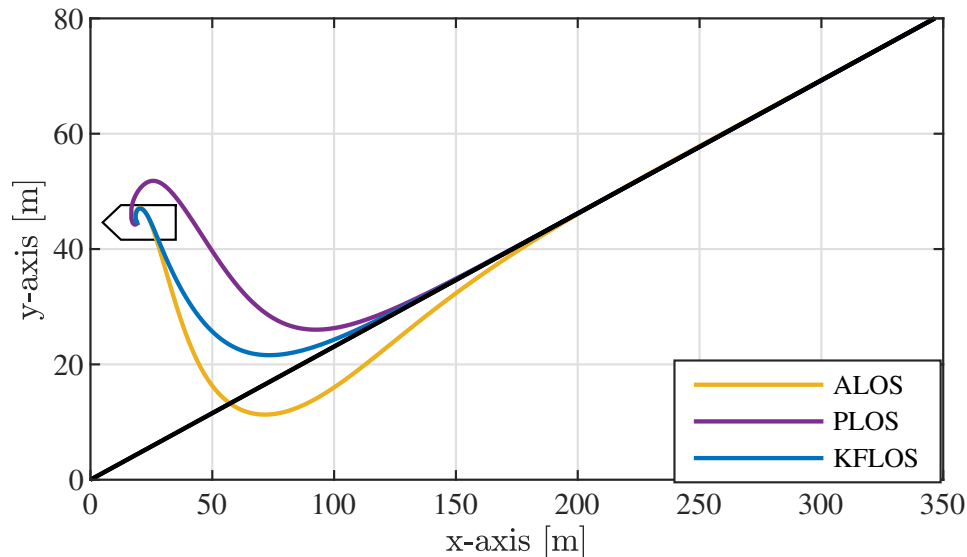
Rezultati simulacija za scenario S_1 su prikazani na slikama 4.1, 4.2 i 4.3. Sa slike 4.1 može se zapaziti da je primjenom KFLOS vođenja postignuta brza estimacija ugla bočnog klizanja. Štaviše, brzina konvergencije predloženog LOS algoritma je



Slika 4.1: S1: Estimacija ugla bočnog klizanja



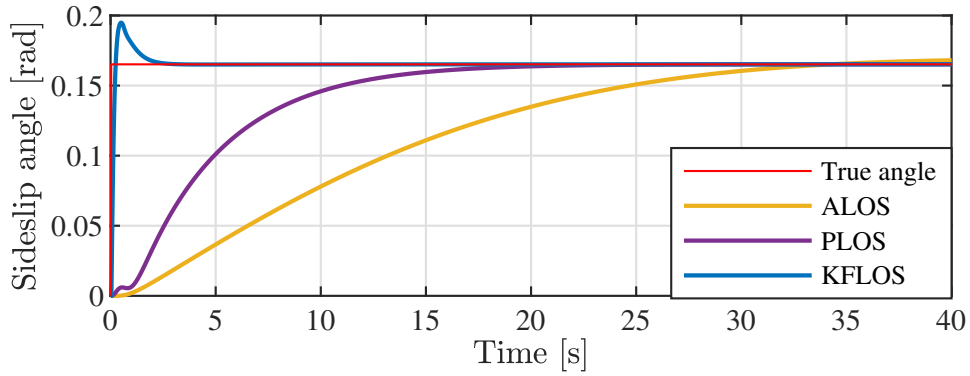
Slika 4.2: S1: Greška položaja y_e



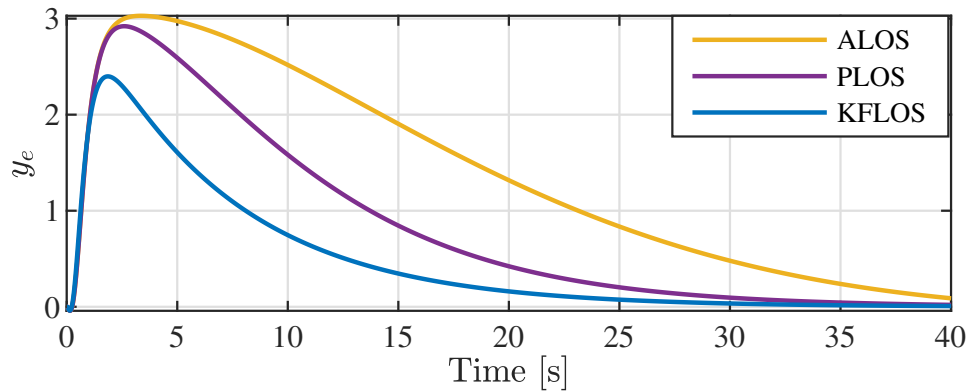
Slika 4.3: S1: Performanse praćenja putanje

znatno veća nego u slučaju ALOS i PLOS vođenja. Kao posljedica toga, greška položaja takođe ima najbržu konvergenciju ka nuli, kao što se može vidjeti sa slike 4.2. Konačno, na slici 4.3 možemo zapaziti da predloženi LOS metod osigurava najbržu konvergenciju ASV ka željenoj putanji.

Drugi scenario S_2 , odnosi se na situaciju u kojoj je početna pozicija vozila na



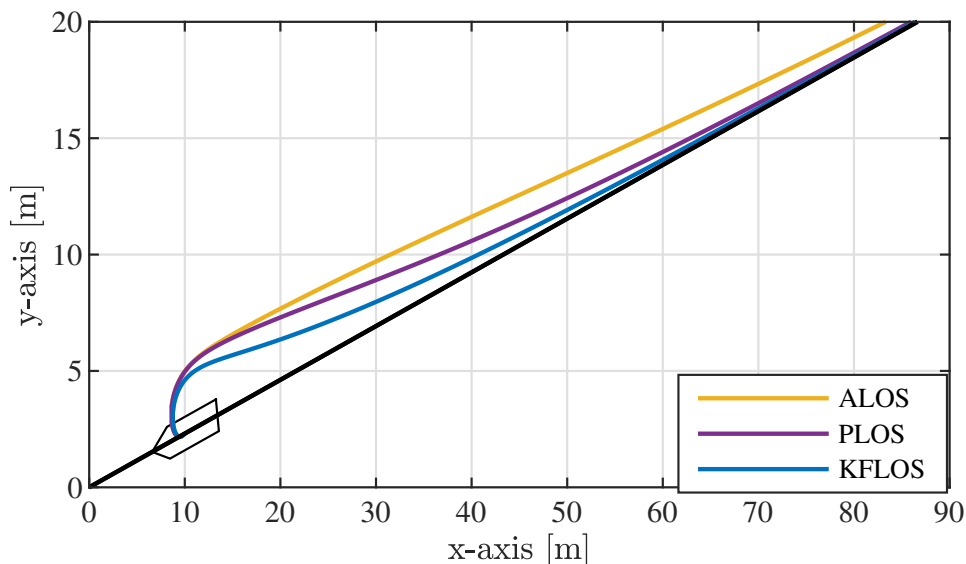
Slika 4.4: S2: Estimacija ugla bočnog klizanja

Slika 4.5: S2: Greška položaja y_e

željenoj putanji, ali je njegov pramac okrenut suprotno od željenog smjera kretanja. Estimirani ugao bočnog klizanja, greška položaja i stvarna putanja kretanja vozila, prikazani su na slikama 4.4, 4.5 i 4.6, respektivno. Kod ovog scenarija, LOS metod zasnovan na upotrebi Kalmanovog filtra estimira stvarnu vrijednost ugla bočnog klizanja znatno brže u odnosu na ostala dva LOS metoda korišćena za poređenje. Takođe, greška položaja konvergira ka nuli znatno brže.

U cilju dalje procjene performansi praćenja pravolinijske putanje, uvodimo sljedeću metriku:

1. Integral vremenski ponderisane apsolutne vrijednosti greške u estimaciji ugla bočnog klizanja – $J_\beta = \int_0^\infty |\beta - \hat{\beta}| dt$. Ovaj integral ima malu vrijednost kada $\hat{\beta}$ ima manji preskok i veću brzinu konvergencije.
2. Integral vremenski ponderisane apsolutne vrijednosti greške položaja – $J_{y_e} = \int_0^\infty |y_e| dt$.
3. Preskok $\Pi[m]$ i vrijeme smirenja $T_s[s]$. Preskok je definisan u [59], dok vrijeme smirenja definišemo kao vrijeme potrebno da greška položaja uđe u opseg $\pm 0.02m$ bez ponovnog napuštanja tog opsega. Poželjno je imati što manji preskok i kraće vrijeme smirenja.



Slika 4.6: S2: Performanse praćenja putanje

 Tabela 4.1: Pokazatelji performansi: različite longitudinalne brzine i početna pozicija ista kao u S_1

Algoritam	Kriterijum	$3m/s$	$5m/s$	$7m/s$	$9m/s$
ALOS	J_β	313.47	141.43	84.74	58.64
PLOS		196.44	47.86	19.59	9.95
KFLOS		0.23	0.16	0.13	0.11
ALOS	J_{y_e}	566.16	392.67	315.95	272.30
PLOS		929.78	593.28	445.16	359.85
KFLOS		484.70	339.19	276.70	242.45
ALOS	Π [m]	6.38	7.89	9.04	10.05
PLOS		0	0	0	0
KFLOS		0	0	0	0
ALOS	T_s [s]	109.38	66.75	48.24	37.90
PLOS		83.89	42.85	29.86	23.14
KFLOS		56.86	35.32	25.95	20.71

Sprovedena su tri numerička eksperimenta čiji su rezultati izloženi u tabelama 4.1-4.3. U primjerima I i II, početna pozicija je konstantna dok se longitudinalna brzina mijenja, dok u primjeru III, longitudinalna brzina je konstantna, a početna pozicija se mijenja. Može se zapaziti da predloženi KFLOS zakon vođenja rezultira u najmanjim vrijednostima svih pomenutih indikatora performansi. Poboljšanje predloženog algoritma u odnosu na ALOS i PLOS naročito je uočljivo kada je početna pozicija vozila daleko od željene putanje. Štaviše, takođe se može primijetiti da su performanse procjene ugla bočnog klizanja najmanje osjetljive na varijaciju brzine/početne pozicije u slučaju primjene predloženog algoritma.

Tabela 4.2: Pokazatelji performansi: različite longitudinalne brzine i početna pozicija ista kao u S_2 .

Algoritam	Kriterijum	$3m/s$	$5m/s$	$7m/s$	$9m/s$
ALOS	J_β	21.01	13.38	14.01	12.83
PLOS		3.84	0.43	0.13	0.06
KFLOS		0.05	0.05	0.05	0.04
ALOS	J_{y_e}	70.74	45.68	47.44	49.03
PLOS		48.29	38.52	37.71	38.15
KFLOS		34.63	35.98	37.03	38.01
ALOS	Π [m]	0	0.55	1.31	2.00
PLOS		0	0	0	0
KFLOS		0	0	0	0
ALOS	T_s [s]	50.14	49.61	36.88	29.49
PLOS		41.86	25.74	19.67	16.23
KFLOS		37.83	25.53	19.70	16.29

Tabela 4.3: Pokazatelji performansi: različite početne pozicije ($[20, 40i+20 \tan(13^\circ)]$) i konstantna longitudinalna brzina $u = 7m/s$

Algoritam	Kriterijum	$i = 1$	$i = 2$	$i = -1$	$i = -2$
ALOS	J_β	84.74	254.99	60.46	211.37
PLOS		19.59	41.86	6.23	14.57
KFLOS		0.13	0.22	0.08	0.15
ALOS	J_{y_e}	315.95	818.76	212.55	663.68
PLOS		445.16	1096.40	195.61	607.61
KFLOS		276.70	703.82	159.58	522.78
ALOS	Π [m]	9.04	18.00	7.94	17.17
PLOS		0	0	0	0
KFLOS		0	0	0	0
ALOS	T_s [s]	48.24	54.07	45.99	52.57
PLOS		29.86	36.61	24.63	30.85
KFLOS		25.95	31.53	22.99	29.27

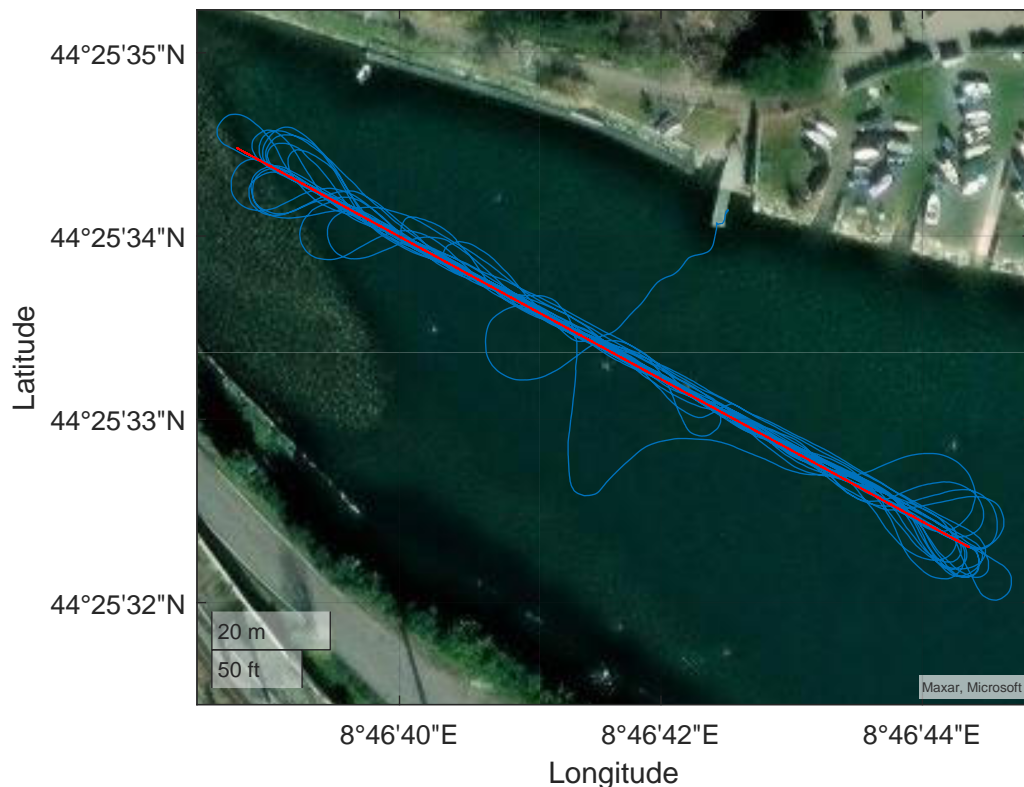
4.2 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalna testiranja sprovedena su u luci Genova Prà. Postavka eksperimenta sastoji se od sljedećih koraka:

1. Definisanje krajnjih tačaka željene pravolinijske putanje;
2. Kada je ASV blizu krajnjih tačke putanje, mijenja se smjer kretanja;
3. Ponavljanje prethodnog koraka;
4. Prikupljanje mjerenja;
5. Procjena performansi.

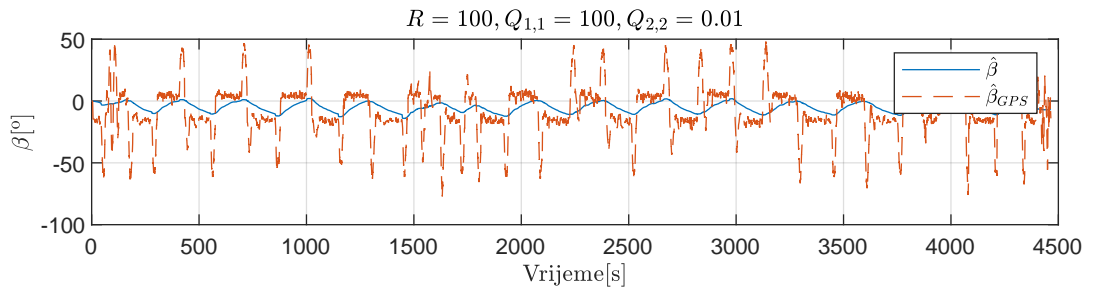
Na slici 4.7 je prikazan tok eksperimenta. Crvenom bojom označena je referentna

putanja, dok je plavom bojom označeno kretanje ASV.

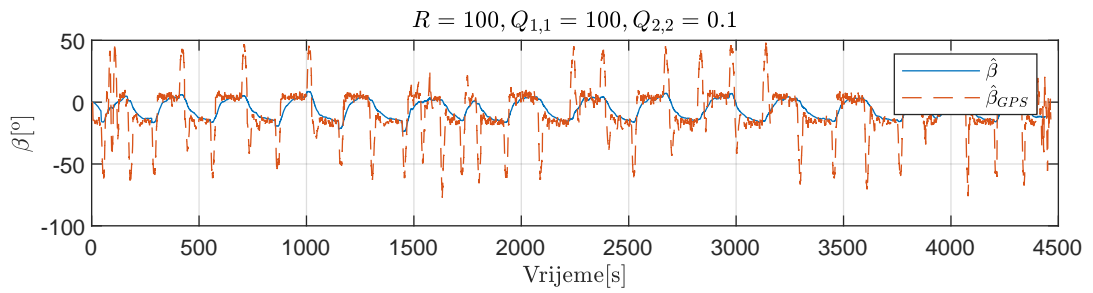


Slika 4.7: Testiranje u luci Genova Prà

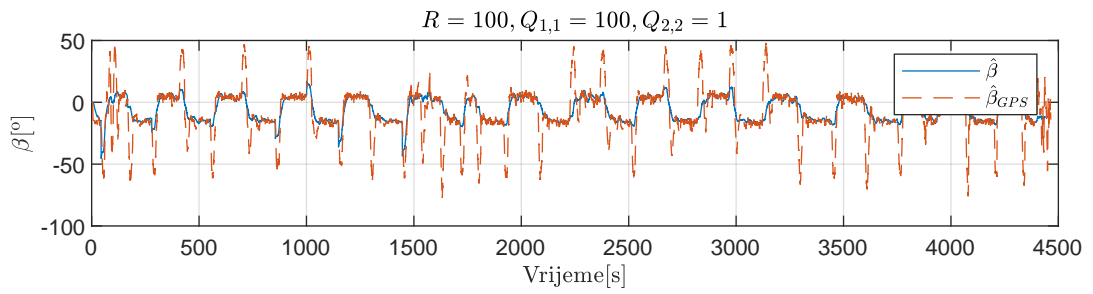
Na osnovu prikupljenih senzorskih mjerenja (pozicije ASV, ugla pravca, ugla kursa, rezultatne brzine...) implementiran je Kalmanov filtar u offline režimu za različite vrijednosti elementa $Q_{2,2}$ kovarijacione matrice \mathbf{Q} . Cilj ovog eksperimenta je bio da se evaluiraju performanse estimatora, kako bi se odredila optimalna vrijednost elementa $Q_{2,2}$ za estimaciju ugla koji se koristi u upravljačkoj petlji. Na slikama 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 je prikazana estimacija ugla bočnog klizanja u zavisnosti od vrijednosti elementa $Q_{2,2}$. Može se primijetiti da povećanje $Q_{2,2}$ doprinosi bržoj konvergenciji estimacije $\hat{\beta}$ ka $\hat{\beta}_{GPS}$, gdje $\hat{\beta}_{GPS}$ predstavlja estimaciju ugla bočnog klizanja koja se dobija na osnovu mjerenja GPS-a. S obzirom da povećanje $Q_{2,2}$ takođe rezultuje u većim oscilacijama, u eksperimentu na slici 4.13 korišćena je heuristička formula takva da je $Q_{2,2}$ veće kad je y_e veće, odnosno da se smanjuje kad je y_e manje. Na taj način se postiže kompromis u performansama.



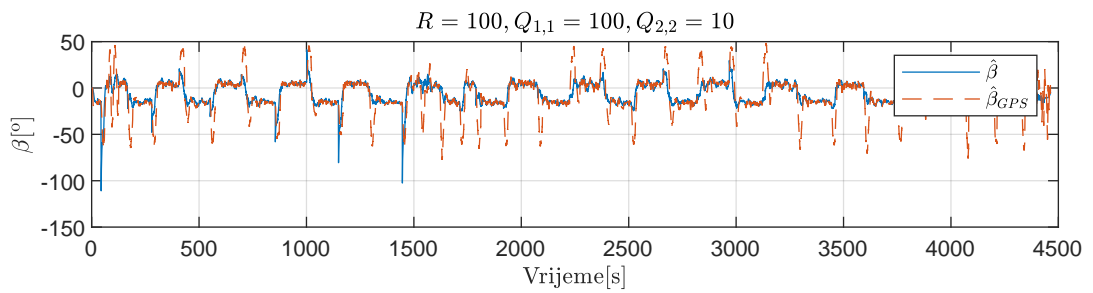
Slika 4.8: Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 0.01$



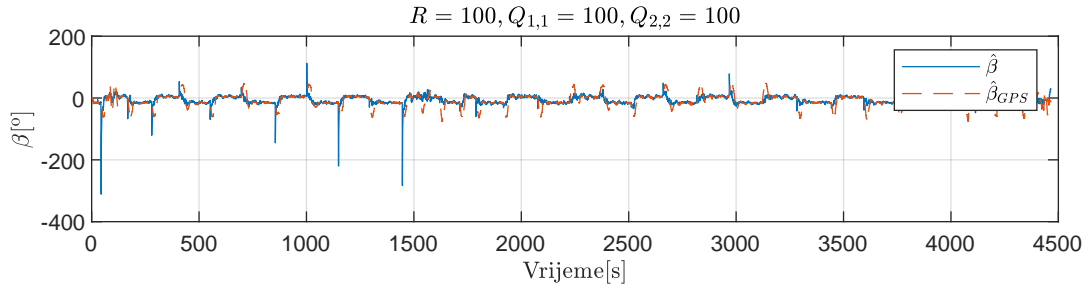
Slika 4.9: Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 0.1$



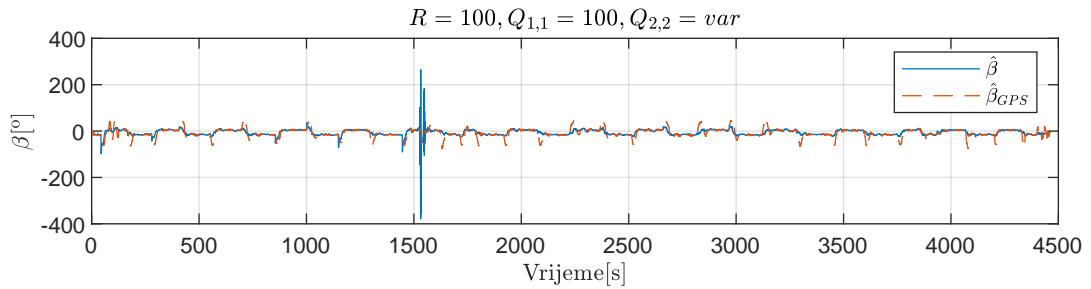
Slika 4.10: Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 1$



Slika 4.11: Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 10$

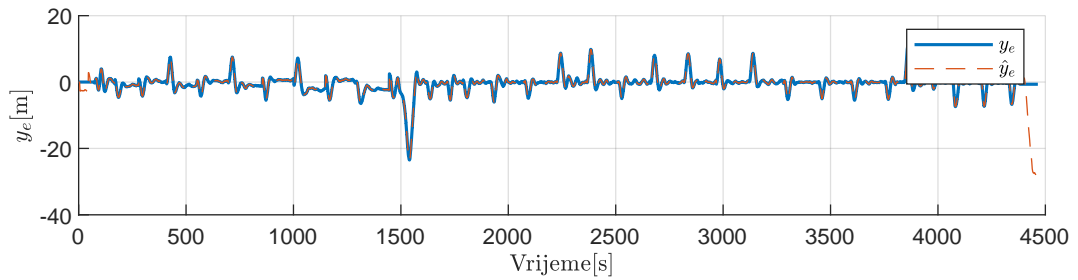


Slika 4.12: Estimacija ugla bočnog klizanja, $Q_{2,2} = 100$



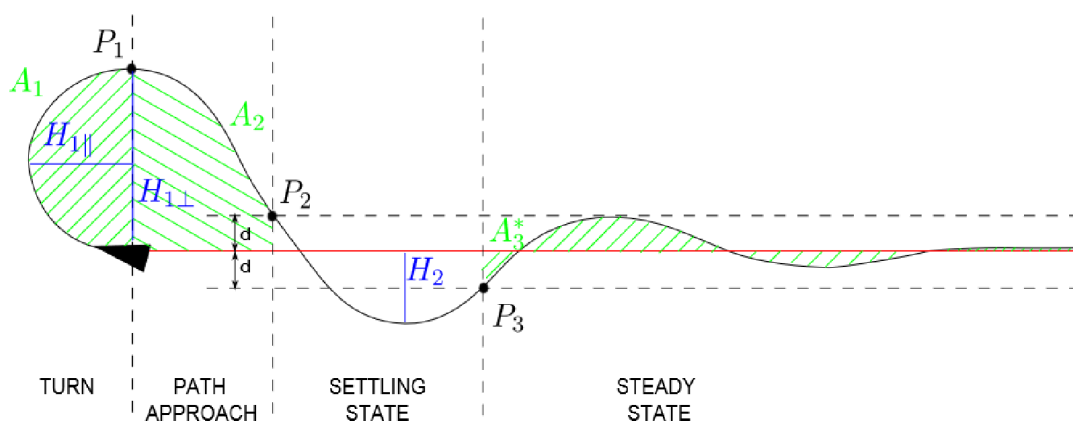
Slika 4.13: Estimacija ugla bočnog klizanja, varijabilno $Q_{2,2}$

Slika 4.14 prikazuje da Kalmanov filter sa velikom tačnošću estimira y_e . Nakon uključenja ugla bočnog klizanja u zakon upravljanja (nakon 1500 sekundi), greška položaja iznosi približno 0m. U ovom dijelu je korišćeno nekoliko vrijednosti $Q_{2,2}$ ($Q_{2,2} = 0.01$, $Q_{2,2} = 0.1$, $Q_{2,2} = 1$, $Q_{2,2} = 10$, $Q_{2,2} = 100$).



Slika 4.14: Estimacija greške položaja

Kretanje plovila tokom eksperimenta se može podijeliti u četiri faze: Skretanje (*Turn*); Prilazak putanji (*Path Approach*); Prelazni proces (*Settling state*); Stacionarno stanje (*Steady state*), kako je prikazano na slici 4.15.

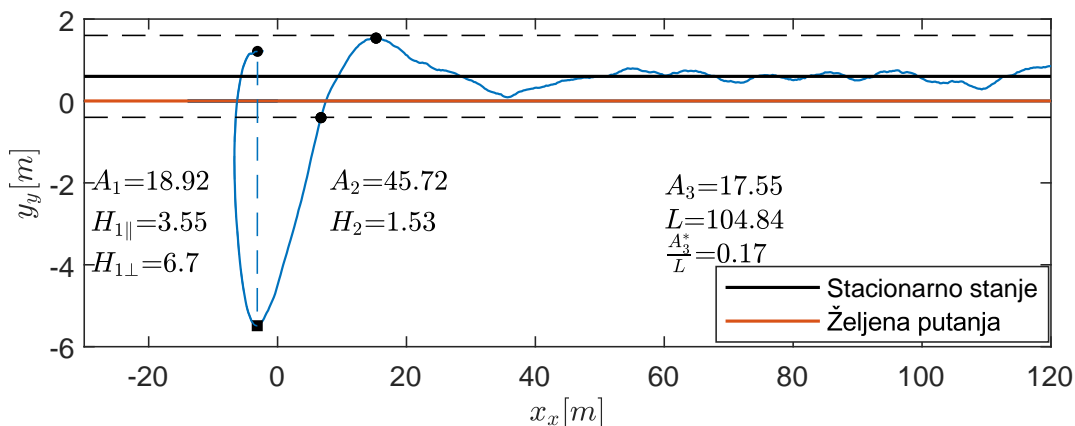


Slika 4.15: Mjere performansi praćenja pravolinijske putanje [3]

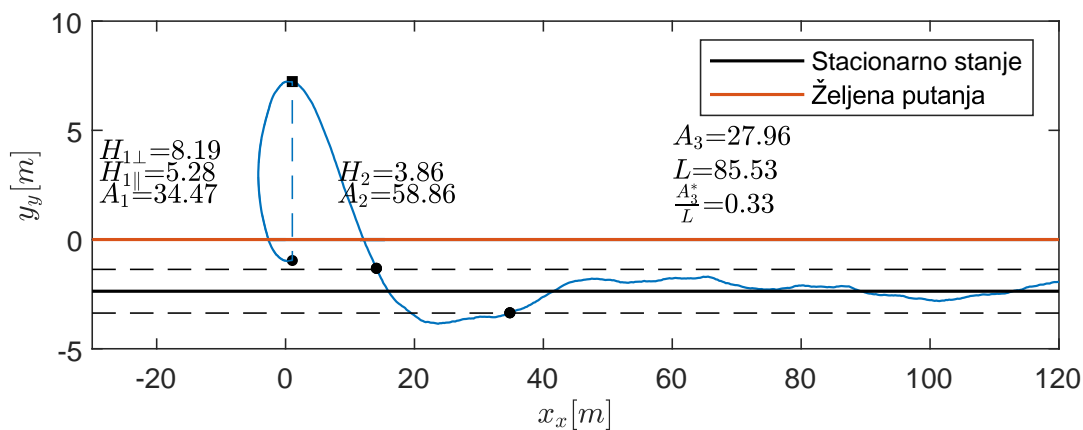
U cilju evaluacije eksperimentalnih rezultata biće korišćeni sljedeći indeksi performansi, prezentovani u [3, 59]:

1. Površina između stvarne i željene putanje plovila - A_1 , A_2 i A_3 (u stacionarnom stanju normalizovana dužinom željene putanje - A_3^* na slici 4.15). Može se proračunati u realnom vremenu;
2. Hausdorfova udaljenost - rastojanje između željene i stvarne putanje ($H_{1\perp}$ i H_2 na slici 4.15). Pri računanju $H_{1\parallel}$ treba razmotriti pravu koja je normalna na referentnu putanju i prolazi kroz tačku P_1 ;
3. Srednji i maksimalni stepen smanjenja greške položaja.

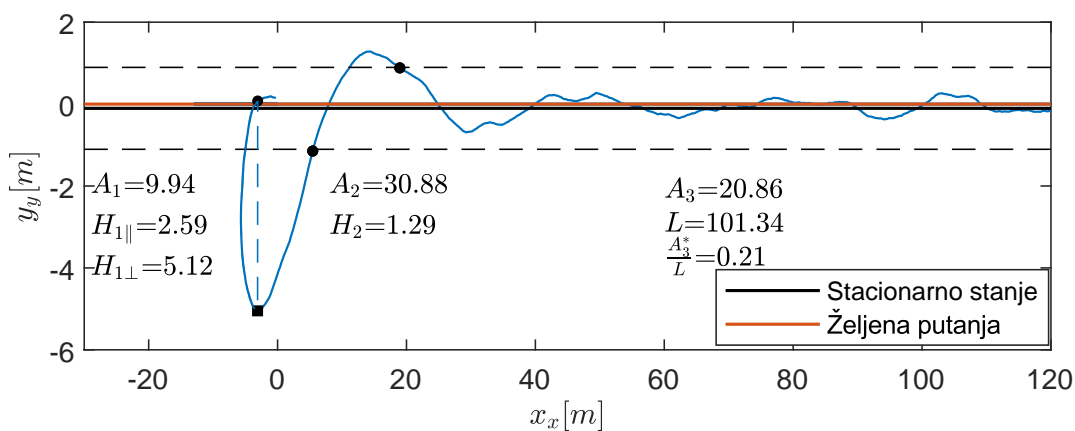
Na slikama 4.16 i 4.17 prikazani su eksperimentalni rezultati praćenja željene pravolinijske putanje bez kompenzacije bočnog klizanja, za oba smjera kretanja. Uočljivo je postojanje odstupanja od referentne putanje u stacionarnom stanju. Sa druge strane, slike 4.18, 4.19 prikazuju rezultate praćenja putanje kada se vrši kompenzacija uticaja ugla bočnog klizanja. U ovim slučajevima ASV dostiže i kreće se duž referentne putanje. Vrijednosti indeksa performansi su manje u slučaju kada se vrši kompenzacija bočnog klizanja.



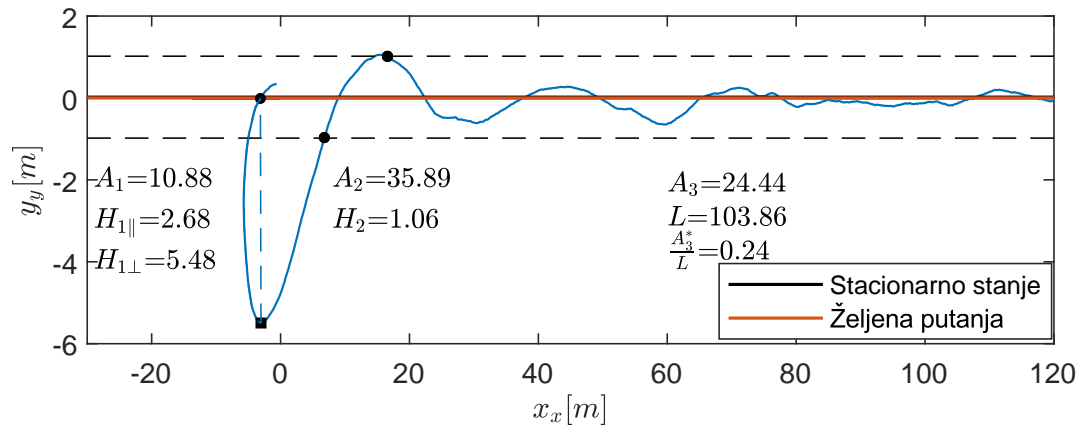
Slika 4.16: Performanse praćenja putanje bez kompenzacije bočnog klizanja za prvi smjer kretanja



Slika 4.17: Performanse praćenja putanje bez kompenzacije bočnog klizanja za drugi smjer kretanja



Slika 4.18: Performanse praćenja putanje sa kompenzacijom bočnog klizanja za prvi smjer kretanja



Slika 4.19: Performanse praćenja putanje sa kompenzacijom bočnog klizanja za drugi smjer kretanja

Zaključak

U radu je razmatran problem autonomnog kretanja plovila po zadatoj putanji u prisustvu spoljnih poremećaja. Konkretno, razmatrana je line-of-sight metodologija i izvršena je analiza postojećih LOS algoritama iz literature. U radu je predložen i originalni LOS algoritam zasnovan na Kalmanovom filtru. Za razliku od postojećih rješenja, kod predloženog algoritma se istovremeno vrši estimacija greške položaja i ugla bočnog klizanja, čime se postiže brža konvergencija ka stvarnom uglu bočnog klizanja, a samim tim i bolje performanse u praćenju putanje. Pored toga predloženo rješenje nije ograničeno na male uglove bočnog klizanja u poređenju sa drugim metodama.

Ispod su sumirani glavni zaključci izvedeni na osnovu analize simulacija i eksperimenata:

1. Na osnovu rezultata simulacija zaključuje se da predloženo rješenje postiže bržu procjenu ugla bočnog klizanja u odnosu na druge metode, a samim tim i bržu konvergenciju plovila ka zadatoj putanji;
2. Rezultati simulacija pokazali su da predloženi algoritam ima naročito primjetna poboljšanja u odnosu na postojeće algoritme u scenarijima kada je početna pozicija vozila daleko od željene putanje. Pored toga, predloženi algoritam je manje osjetljiv na promjene brzine vozila;
3. Pokazatelji performansi definisani za procjenu rezultata simulacija imaju najmanje vrijednosti u slučaju predloženog algoritma;
4. Analizom eksperimentalnih rezultata dodatno je potvrđeno da predloženi LOS algoritam koji se zasniva na upotrebi proširenog Kalmanovog filtra smanjuje negativan uticaj bočnog klizanja;
5. Eksperimentalno je pokazano da vrijednost kovarijacione matrice \mathbf{Q} značajno utiče na performanse predloženog estimatora. Naime, sa povećanjem elemenata ove matrice postiže se brže praćenje ugla bočnog klizanja, dok sa druge strane greška u estimaciji u stacionarnom stanju postaje izraženija.

U daljem istraživačkom radu fokus će biti na razvijanju sistema upravljanja brzinom skretanja umjesto upravljanja uglom pravca, radi postizanja veće brzine upra-

vljanja. Dio budućeg istraživanja biće opširnija analiza mogućnosti uvođenja varijabilne kovarijacione matrice. Cilj daljeg istraživanja takođe će biti implementacija predloženog algoritma za praćenje krivolinijske putanje. Na kraju, budući rad biće posvećen kooperativnom praćenju putanje sa ciljem da grupa od N plovila prati referentnu putanju održavajući željenu geometrijsku konfiguraciju.

Bibliografija

- [1] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, “Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges,” *Annual Reviews in Control*, vol. 41, pp. 71–93, 1 2016.
- [2] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley and Sons, 4 2011.
- [3] E. Saggini, E. Zereik, M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, and E. Riccomagno, “Performance indices for evaluation and comparison of unmanned marine vehicles’ guidance systems,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, pp. 12182–12187, 1 2014.
- [4] A. Gaugue, M. Menard, E. Migot, P. Bourcier, and C. Gaschet, “Development of an aquatic usv with high communication capability for environmental surveillance,” *OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019*, vol. 2019-June, 6 2019.
- [5] R. jian Yan, S. Pang, H. bing Sun, and Y. jie Pang, “Development and missions of unmanned surface vehicle,” *Journal of Marine Science and Application*, vol. 9, pp. 451–457, 12 2010.
- [6] E. Simetti, A. Turetta, G. Casalino, and M. Cresta, “Towards the use of a team of usvs for civilian harbour protection: The problem of intercepting detected menaces,” *OCEANS’10 IEEE Sydney, OCEANSSYD 2010*, 2010.
- [7] M. Caccia, M. Bibuli, R. Bono, and G. Bruzzone, “Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle,” *Autonomous Robots*, vol. 25, pp. 349–365, 11 2008.
- [8] T. I. Fossen, *Marine Control Systems – Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.
- [9] A. J. Healey and D. Lienard, “Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 18, pp. 327–339, 1993.
- [10] A. M. Lekkas and T. I. Fossen, “Integral los path following for curved paths

- based on a monotone cubic hermite spline parametrization,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, pp. 2287–2301, 2014.
- [11] E. Børhaug, A. Pavlov, and K. Y. Pettersen, “Integral los control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents,” *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4984–4991, 2008.
- [12] W. Caharija, K. Y. Pettersen, M. Bibuli, P. Calado, E. Zereik, J. Braga, J. T. Gravdahl, A. J. Sorensen, M. Milovanovic, and G. Bruzzone, “Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, pp. 1623–1642, 9 2016.
- [13] T. I. Fossen, K. Y. Pettersen, and R. Galeazzi, “Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, pp. 820–827, 3 2015.
- [14] N. Gu, D. Wang, Z. Peng, J. Wang, and Q. L. Han, “Advances in line-of-sight guidance for path following of autonomous marine vehicles: An overview,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, pp. 12–28, 1 2023.
- [15] L. Liu, D. Wang, Z. Peng, and H. Wang, “Predictor-based los guidance law for path following of underactuated marine surface vehicles with sideslip compensation,” *Ocean Engineering*, vol. 124, pp. 340–348, 9 2016.
- [16] L. Liu, D. Wang, and Z. Peng, “Predictor-based line-of-sight guidance law for path following of underactuated marine surface vessels,” *Proceedings of 6th International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2015*, pp. 284–288, 1 2015.
- [17] S. Campbell, W. Naeem, and G. W. Irwin, “A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres,” *Annual Reviews in Control*, vol. 36, pp. 267–283, 12 2012.
- [18] M. Breivik, “Topics in guided motion control of marine vehicles,” 2010.
- [19] G. N. Roberts and R. Sutton, “Advances in unmanned marine vehicles,” *Advances in Unmanned Marine Vehicles*, pp. 1–442, 1 2006.
- [20] C. Goudey, T. Consi, J. Manley, M. Graham, B. Donovan, and L. Kiley, “A robotic boat for autonomous fish tracking,” *Marine Technology Society Journal*, 1998.
- [21] J. Majohr and T. Buch, “Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin messin,”

- Advances in Unmanned Marine Vehicles*, pp. 329–351, 1 2006.
- [22] W. Naeem, T. Xu, R. Sutton, and A. Tiano, “The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 222, pp. 67–79, 5 2008.
- [23] R. R. Murphy, E. Steimle, C. Griffin, C. Cullins, M. Hall, and K. Pratt, “Co-operative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane wilma,” *Journal of Field Robotics*, vol. 25, pp. 164–180, 3 2008.
- [24] M. Breivik, V. E. Hovstein, and T. I. Fossen, “Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles,” *Modeling, Identification and Control*, vol. 29, pp. 131–149, 10 2008.
- [25] M. Caccia, M. Bibuli, R. Bono, G. Bruzzone, G. Bruzzone, and E. Spirandelli, “Unmanned surface vehicle for coastal and protected waters applications: the charlie project,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 41, pp. 62–71, 6 2007.
- [26] T. Pastore and V. Djapic, “Improving autonomy and control of autonomous surface vehicles in port protection and mine countermeasure scenarios,” *Journal of Field Robotics*, vol. 27, pp. 903–914, 11 2010.
- [27] P. Svec and S. K. Gupta, “Automated synthesis of action selection policies for unmanned vehicles operating in adverse environments,” *Autonomous Robots*, vol. 32, pp. 149–164, 2 2012.
- [28] Z. Liu, “Reliable and safe motion control of unmanned vehicles,” 10 2016.
- [29] U. Kiencke, L. Nielsen, R. Sutton, K. Schilling, M. Papageorgiou, and H. Asama, “The impact of automatic control on recent developments in transportation and vehicle systems,” *Annual Reviews in Control*, vol. 30, pp. 81–89, 1 2006.
- [30] S. Savitz, I. Blickstein, P. Buryk, R. W. Button, P. DeLuca, J. Dryden, J. Mastbaum, J. Osburg, P. Padilla, A. Potter, C. C. Price, L. Thrall, S. K. Woodward, R. J. Yardley, and J. Yurchak, “U.s. navy employment options for unmanned surface vehicles (usvs),” 2013.
- [31] A. Motwani, “A survey of uninhabited surface vehicles,” 2012.
- [32] J. Curcio, J. Leonard, and A. Patrikalakis, “Scout - a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy,” *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, 2005*, vol. 2005, pp. 725–729, 2005.
- [33] Y. Peng, J. Han, and Q. Huang, “Adaptive ukf based tracking control for unmanned trimaran vehicles,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC International c*, vol. 5, pp. 3505–3515, 2009.

- [34] N. Khare and P. Singh, “Modeling and optimization of a hybrid power system for an unmanned surface vehicle,” *Journal of Power Sources*, vol. 198, pp. 368–377, 1 2012.
- [35] K. D. Do and J. Pan, “Control of ships and underwater vehicles,” 2009.
- [36] C. R. Sonnenburg and C. A. Woolsey, “Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle,” *Journal of Field Robotics*, vol. 30, pp. 371–398, 5 2013.
- [37] A. S. Gadre, C. Sonnenburg, S. Du, D. J. Stilwell, and C. Woolsey, “Guidance and control of an unmanned surface vehicle exhibiting sternward motion,” *OCEANS 2012 MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean*, 2012.
- [38] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*. Wiley, 1994.
- [39] K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, and S. Hirano, “On the steering qualities of ships,” *Osaka University, Department of Naval Architecture, Japan, Published in: International Shipbuilding Progress, ISP, Volume 4, No. 35, 1957 pp. 354-370, 1957*.
- [40] L. E. Dubins, “On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents,” *American Journal of Mathematics*, vol. 79, p. 497, 7 1957.
- [41] A. Tsourdos, B. White, and M. Shanmugavel, “Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles,” *Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles*, pp. 1–185, 1 2010.
- [42] M. Breivik and T. I. Fossen, “Guidance laws for autonomous underwater vehicles,” *Underwater Vehicles*, 1 2009.
- [43] E. W. McGookin, D. J. Murray-Smith, Y. Li, and T. I. Fossen, “Ship steering control system optimisation using genetic algorithms,” *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 429–443, 4 2000.
- [44] T. I. Fossen, M. Breivik, and R. Skjetne, “Line-of-sight path following of underactuated marine craft,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, pp. 211–216, 9 2003.
- [45] F. A. PAPOULIAS, “Bifurcation analysis of line of sight vehicle guidance using sliding modes,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 01, pp. 849–865, 12 1991.
- [46] R. Skjetne and T. Fossen, “On integral control in backstepping: analysis of different techniques,” *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 2004.
- [47] L. Lapiere and D. Soetanto, “Nonlinear path-following control of an auv,”

- Ocean Engineering*, vol. 34, pp. 1734–1744, 8 2007.
- [48] A. Hac and M. D. Simpson, “Estimation of vehicle side slip angle and yaw rate,” *SAE Technical Papers*, 3 2000.
- [49] L. Wan, Y. Su, H. Zhang, B. Shi, and M. S. AbouOmar, “An improved integral light-of-sight guidance law for path following of unmanned surface vehicles,” *Ocean Engineering*, vol. 205, p. 107302, 6 2020.
- [50] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. 2002.
- [51] A. Loría and E. Panteley, “Cascaded nonlinear time-varying systems : Analysis and design. ch. 2. in: Advanced topics in control systems theory,” 2004.
- [52] Y. Xia, K. Xu, Y. Li, G. Xu, and X. Xiang, “Improved line-of-sight trajectory tracking control of under-actuated auv subjects to ocean currents and input saturation,” *Ocean Engineering*, vol. 174, pp. 14–30, 2 2019.
- [53] T. I. Fossen and A. M. Lekkas, “Direct and indirect adaptive integral line-of-sight path-following controllers for marine craft exposed to ocean currents,” *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 31, pp. 445–463, 4 2017.
- [54] Y. Wang, H. Tong, and M. Fu, “Line-of-sight guidance law for path following of amphibious hovercrafts with big and time-varying sideslip compensation,” *Ocean Engineering*, vol. 172, pp. 531–540, 1 2019.
- [55] Žarko Zečević, “Optimalno upravljanje, materijali sa predavanja,” <https://www.ucg.ac.me/>, pristupano 14.09.2023.
- [56] Q. Li, R. Li, K. Ji, and W. Dai, “Kalman filter and its application,” *Proceedings - 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, ICINIS 2015*, pp. 74–77, 8 2016.
- [57] V. Vukadinovic, L. Martinovic, Z. Zecevic, and B. Krstajic, “Comparative analysis of kalman-type filters for effective wind speed estimation,” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2 2021.
- [58] L. Ašanin, L. Martinović, Žarko Zečević, M. Bibuli, R. Ferretti, and M. Caccia, “Improved los guidance law for path following of underactuated usv with sideslip compensation,” *2023 27th International Conference on Information Technology (IT)*, pp. 1–4, 2 2023.
- [59] M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, and L. Lapierre, “Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle,” *Journal of Field Robotics*, vol. 26, pp. 669–688, 8 2009.

Prilog

1. Matlab kod u kom su realizovani različiti LOS algoritmi

```
%% https://sci-hub.se/10.1109/tcst.2014.2338354
% close all
clearvars -except colors KSI THETA DELTA BETA TETA YE j xp x perf path
    alg gama1 k1 k gama U1 u Gamma gamma2 k2 Delta boje k3 i line h1 h2
    h3 algs leg tetad teta
load net.mat
T=1; K=20;
A=[0 1;0 -1/T];B=[0;K/T]; %% autopilot state space model
Kx=[ 0.2000    0.1500];
v=0.5;% sway USV speed
Vx=0.; %% ocean current
Vy=0.; %% ocean current
%%
dt=0.01; % sampling speed
Kp=0.6;Kd=0.35;Ki=0.00; % PID parameters
a=(Kp+Ki*dt/2+Kd/dt);b=(-Kp+Ki*dt/2-2*Kd/dt);c=Kd/dt; % parameters of
    discrete PID control low
e(1:2)=0; delta(2)=0; %% heading angle tracking error
T=250/dt; % simulation time
%% initialisation of variables
i=1;
yint(3)=0; beta_hat(3)=0; beta_hat1(3)=0;
ye_hat(3)=0; ye_tilda(3)=0; ye(2)=0; yee(3)=0; xee(3)=0; gr(3)=0;
Pp=diag([1e2 1e2]);
xc(:,2)=[0;0];
for n=3:T
    if n<T/2
        beta(n)=atan2(v,u); % true sideslope angle
    elseif n>=T/2
        beta(n)=atan2(v,u);
        %         v=1; %% after T/2 the sway speed is changed
    end
    ksi(n)=atan2(path{2}(2)-path{1}(2),path{2}(1)-path{1}(1));% path-
        tangential angle
    ye(n)=-[x(1,n)-path{1}(1)]*sin(ksi(n))+[x(2,n)-path{1}(2)]*cos(ksi(n));
    xe(n)=-[x(1,n)-path{1}(1)]*cos(ksi(n))+[x(2,n)-path{1}(2)]*sin(ksi(n));
```

```

U=sqrt(u^2+v^2);
if alg==1 | alg==6 %% proposed
yee(n+1)=yee(n)+dt*[U*sin(xp(1,n)-ksi(n)+beta_hat(n))-k1*sin([yee(n)-ye(n)
(n)])];
beta_hat(n+1)=beta_hat(n)-dt*([k3*U*cos(xp(1,n)-ksi(n))^1*(yee(n)-ye(n)
)]);
beta_hat(n+1)=beta_hat(n)-dt*([(k3*U*cos(xp(1,n)-ksi(n)+beta_hat(n))+k2
)^1*sin(yee(n)-ye(n))]);
% beta_hat(n+1)=beta_hat(n)-dt*([k2^1*sin(yee(n)-ye(n))+k*gr(n)
]);
% beta_hat(n+1)=beta_hat(n)-dt*([gamal*U*cos(xp(1,n)-ksi(n)+(
yee(n)-ye(n))*k2)*sin(yee(n)-ye(n))]);
elseif alg==2
yee(n+1)=yee(n)+dt*[-k1*yee(n)-k1^2*ye(n)-k1*U*sin(xp(1,n)-ksi(n))];
g=yee(n)+k1*ye(n);
beta_hat(n+1)=atan(g/U/cos(xp(1,n)-ksi(n)));
elseif alg==3
beta_hat(n+1)=beta_hat(n)+dt*(k1*Delta*U*ye(n)/sqrt(Delta^2+(ye(n)+
Delta*beta_hat(n))^2));% beta_hat je adaptivna estimacija ugla beta
, beta_tilda=beta-beta_hat
elseif alg==4
yee(n+1)=yee(n)+dt*[U*sin(xp(1,n)-ksi(n))+U*cos(xp(1,n)-ksi(n))*
beta_hat1(n)-k1*(yee(n)-ye(n))];
beta_hat1(n+1)=beta_hat1(n)+dt*(-k2*U*cos(xp(1,n)-ksi(n))*(yee(n)-ye(n)
));
beta_hat(n+1)=atan(beta_hat1(n+1));
elseif alg==5
M=1.95;M1=1.97;
alfa=Delta*beta_hat(n)/U/sqrt(1-beta_hat(n)^2/U^2);
yee(n+1)=yee(n)+dt*[-U*(yee(n)+alfa)/sqrt(Delta^2+(yee(n)+alfa)^2)+
beta_hat(n)+k1*(ye(n)-yee(n))];
if abs(beta_hat(n))>M1 & beta_hat(n)*k2*(ye(n)-yee(n))>0
mm(n)=min(1,beta_hat(n)^2-M^2)/(M1^2-M^2);
beta_hat(n+1)=beta_hat(n)+dt*(1-mm(n))*k2*(ye(n)-yee(n));
else
beta_hat(n+1)=beta_hat(n)+dt*k2*(ye(n)-yee(n));
end
elseif alg==7
C=[1 0]; Rr=1e-1;Q=diag([1e1 1e1]);
Ad=[1 dt*U*cos(xp(1,n)-ksi(n)+xc(2,n-1));0 1];
% Ad=[1 dt*U*cos(xp(1,n)-ksi(n));0 1];
xpp(1,n)=xc(1,n-1)+dt*[U*sin(xp(1,n)-ksi(n)+xc(2,n-1))];
% xpp(1,n)=xc(1,n-1)+dt*[U*sin(xp(1,n)-ksi(n))+U*cos(xp(1,n)-ksi(n)
)*xc(2,n-1)];
xpp(2,n)=(xc(2,n-1));
K1{n}=Pp*C'*[C*Pp*C'+Rr]^-1;
xc(:,n)=xpp(:,n)+K1{n}*(ye(n)-xpp(1,n));
Pc=(eye(2)-K1{n}*C)*Pp;

```

```

Pp=Ad*Pc*Ad'+Q;
beta_hat(n+1)=(xc(2,n));
elseif alg==8
C=[1 0]; Rr=1e-1;Q=diag([1e-0 1e1]);
Ad=[1 dt*u*cos(xp(1,n)-ksi(n));0 1];
% Ad=[1 dt*U*cos(xp(1,n)-ksi(n));0 1];
xpp(1,n)=xc(1,n-1)+dt*[u*sin(xp(1,n)-ksi(n))+u*cos(xp(1,n)-ksi(n))*xc
(2,n-1)];
% xpp(1,n)=xc(1,n-1)+dt*[U*sin(xp(1,n)-ksi(n))+U*cos(xp(1,n)-ksi(n)
)*xc(2,n-1)];
xpp(2,n)=(xc(2,n-1));
K1{n}=Pp*C'*[C*Pp*C'+Rr]^-1;
xc(:,n)=xpp(:,n)+K1{n}*(ye(n)-xpp(1,n));
Pc=(eye(2)-K1{n}*C)*Pp;
Pp=Ad*Pc*Ad'+Q;
beta_hat(n+1)=atan(xc(2,n));
end
if alg==3
tetad(n)=[ksi(n)+atan2(-ye(n),Delta)-beta_hat(n)];% ALOS sa
kompenzacijom side-slip ugla
elseif alg==10
tetad(n)=[ksi(n)+atan2(-ye(n)-(beta_hat(n))*Delta,Delta)];
else
tetad(n)=[ksi(n)+atan2(-ye(n),Delta)-(beta_hat(n))];
end
if alg==6
tetad(n)=[ksi(n)+atan2(-ye(n),Delta)-(beta_hat(n))];
tetad(n)=ksi(n)+net1([ye(n);beta_hat(n)]);
end
%tetad(n)=[ksi(n)-atan(ye(n)/Delta+kappa/Delta*yint(n))];% Nelinearni
ILOS
%yint(n+1) = yint(n) + dt * U * ye(n) / ( Delta^2 + (ye(n) + kappa *
yint(n))^2 ); % integralno stanje: yint[k+1]
%tetad(n)=[ksi(n)-atan(ye(n)/Delta)]; % Proporcionalni LOS
if radius(x(:,n),path{2})<10 %% swith to the next waypoint
path=circshift(path,-1);
i=i+1;
end
e(n)=tetad(n)-xp(1,n); % heading angle tracking error
delta(n)=delta(n-1)+a*e(n)+b*e(n-1)+c*e(n-2); %% digital PID
deltal(n)=delta(n);
delta(n)=deltal(n);
% deltal(n)=Kx(1)*tetad(n)-Kx*xp(:,n); %% state space controler
if abs(deltal(n))>pi/6*100 %% check if saturation is occured
deltal(n)=sign(deltal(n))*pi/6; %% max control input
end
% deltal(n)=net2([ye(n);beta(n);xp(1,n);ksi(n)]);
xp(:,n+1)= xp(:,n)+dt*[A*xp(:,n)+B*deltal(n)]; %% heading angle

```

```

    dynamics
teta(n)=xp(1,n);
R=[cos(teta(n)) -sin(teta(n));sin(teta(n)) cos(teta(n))];
x(:,n+1)=x(:,n)+dt*[R*[u;v]+[Vx;Vy]]; %% kinematic model
Vv=[u;v]+R'*[Vx;Vy]; %% calculate true angle beta
beta(n)=atan2(Vv(2),Vv(1));
end
%%
function r=radius(x,y)
r=sqrt([x(1)-y(1)]^2+[x(2)-y(2)]^2);
end

```

2. Matlab kod za komparaciju predloženog LOS algoritma i postojećih rješenja

```

close all
clear all
path={[-20;-tan(0.2)*20],[1;0.2]*29500};
k=tand(13);
path={[-20;k*-20],[20;k*20]*29500};
x(:,1:3)=[20;40+k*20].*ones(2,3); % initial position
xp(:,1:3)=[pi;0].*ones(2,3); % initial heading angle
u=5; % forward speed
Delta=20; % lookahead distance
colors=lines(10); line={'-', '-', '-', '-', '-', '-', '-', '-', '-'};
leg={'Proposed', 'Reduced obs', 'ALOS', 'PLOS', 'Dir. Ad.', 'NN', 'KFLOS', '
    KFLOS'} %% algorithms
%% parameters for each algorithm are set at the end of file
algs=[3 4 8]; %% algorithms to be included in comparison/test, 1=
    Proposed, etc.
figure(3)
R1=[cos(xp(1)) -sin(xp(1));sin(xp(1)) cos(xp(1))];
p=R1*30*[1 0;0 0.1]*[-0.5 0.25 0.5 0.25 -0.5;-1 -1 0 1 1];
h=fill([x(1,1)+p(1,:),x(2,1)+p(2,:)],'w');
hold on
for k=algs
[alg,k1,k2,k3]=parameters(k);
USV_simulation
figure(1)
h1{k}=plot([1:T]*dt,(beta_hat(1:end-1)),line{k},'color',colors(k,:),'
    linewidth',1); hold on
perf(1,k)=sum(abs([beta_hat(1:end-1)-beta].*[0:T-1]*dt)*dt);
figure(2)
h2{k}=plot([1:T]*dt,(ye(1:end)),line{k},'color',colors(k,:),'linewidth'
    ,1); hold on
perf(2,k)=sum(abs(ye(1:end))*dt);
perf(3,k)=-min(ye*sign(ye(3)));
step=stepinfo(ye+1,[0:T-1]*dt);
perf(4,k)=step.SettlingTime;
figure(3)

```

```

h3{k}=plot(x(1,:),x(2,:),line{k},'color',colors(k,:),'LineWidth',1);
    hold on
%     plot(x(1,3),x(2,3),'s','color',colors(k,:))
figure(4)
h4{k}=plot([1:T]*dt,(teta(1:end)),':','color',colors(k,:),'linewidth'
    ,1); hold on
h44{k}=plot([1:T]*dt,(tetad(1:end)),line{k},'color',colors(k,:),'
    linewidth',1); hold on
end
figure(1)
h1{k+1}=plot([1:T]*dt,beta,'-','color','r');
l1=legend([h1{end} h1{algs}],{'True angle' leg{algs}})

% ylim([0.  0.7])
xlim([0 40])
set(gca,'FontName','Times','FontSize',7);
set(gcf,'units','centimeters','position',[5,6,9,3.2]);
set(gcf,'renderer','Painters');
l1.Position=[0.6476 0.2047 0.2573 0.3750];
xlabel('Time [s]','Interpreter','latex')
ylabel('Sideslip angle [rad]','Interpreter','latex')
grid on
%print(gcf,'..\slike\ex1_f1.eps','-depsc','-r0')
print(gcf,'..\slike\ex1_f1.eps','-depsc','-painters','-r300')
%%
figure(2)
l2=legend([h2{algs}],leg{algs})
l2.Position=[0.6615 0.6394 0.2417 0.2785];;
grid
set(gca,'FontName','Times','FontSize',7);
set(gcf,'units','centimeters','position',[5,6,9,3.2]);
xlabel('Time [s]','Interpreter','latex')
ylabel('$y_e$','Interpreter','latex')
xlim([0 40])
print(gcf,'..\slike\ex1_f2.eps','-depsc','-r0')

%%
figure(3)
P=[path{:}];
h3{k+1}=plot([P(1,:) P(1,1)],[P(2,:) P(2,1)],'k','linewidth',1)
ylim([0 80])
xlim([0 350])
grid
set(gca,'FontName','Times','FontSize',7);
set(gcf,'units','centimeters','position',[5,6,9,4.8]);
xlabel('x-axis [m]','Interpreter','latex')
ylabel('y-axis [m]','Interpreter','latex')
l3=legend([h3{algs}],leg{algs})

```

```
l3.Position=[0.6615 0.1352 0.2417 0.210];
print(gcf, '..\slike\ex1_f3.eps', '-depsc', '-r0')
%%
figure(4)
set(gca, 'FontName', 'Times', 'FontSize', 7);
set(gcf, 'units', 'centimeters', 'position', [5, 6, 9, 3.2]);
xlabel('Time [s]', 'Interpreter', 'latex')
% ylabel('$y_e$', 'Interpreter', 'latex')
l4=legend([h4{1} h44{1}], 'Actual angle', 'Desired angle')
xlim([0 40])
grid on
print(gcf, '..\slike\ex1_f4.eps', '-depsc', '-r0')
perf(:,algs)
%%
function [alg,k1,k2,k3]=parameters(i)
if i==1 %% proposed
alg=1; k1=12; k2=2; k3=0;
elseif i==2 %% reduced order
alg=2; k1=0.4; k2=0; k3=0;
elseif i==3 %% ALOS
alg=3; k1=0.001; k2=0; k3=0;
elseif i==4 %% predictor based
alg=4; k1=4; k2=0.1; k3=0;
elseif i==5
alg=5; k1=3; k2=0.1; k3=0;
elseif i==6 %% NN
alg=6; k1=12; k2=2; k3=0;
elseif i==7 %% proposed
alg=7; k1=0; k2=0; k3=0;
elseif i==8 %% proposed
alg=8; k1=0; k2=0; k3=0;
end
end
```