UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Vladimir Ćetković

PREDLOG LOS ALGORITMA ZA AUTOMATSKO VOĐENJE PLOVILA PO ZAKRIVLJENOJ PUTANJI U PRISUSTVU MORSKIH STRUJA

-MASTER RAD-

Podgorica, 2024.

INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime:	Vladimir Ćetković
Datum i mjesto rođenja:	13.01.1999. Podgorica, Crna Gora.
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja:	Energetika i automatika, 2022.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studijskog programa:	Automatika i industrijska elektrotehnika
Naslov rada:	Predlog LOS algoritma za automatsko vođenje plovila po zakrivljenoj putanji u prisustvu morskih struja
Fakultet:	Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada:	10.04.2024.
Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:	16.05.2024.
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:	04.12.2024.

Ime i prezime autora: Vladimir Ćetković, BSc

ETIČKA IZJAVA

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

"Predlog LOS algoritma za automatsko vođenje plovila po zakrivljenoj putanji u prisustvu morskih struja"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Vladimir Ćetković, BSc

Vladimir Ćetković

U Podgorici, dana 27.11.2024. godine

Sažetak

Predmet istraživanja ovog rada su algoritmi za autonomno vođenje plovila po zadatoj parametrizovanoj putanji u prisustvu spoljašnjih sila izazvanih morskim strujama i vjetrom. Konkretno, razmatran je princip vođenja Line-of-sight (LOS), koji se često koristi u autonomnim plovilima zbog svoje jednostavnosti i numeričke efikasnosti. Međutim, u osnovnom obliku, LOS zakon je osjetljiv na uticaj spoljašnjih poremećaja, što ograničava njegovu primjenu u realnim uslovima.

U radu je predložen LOS algoritam koji omogućava estimaciju ugla bočnog klizanja i kompenzaciju njegovog uticaja na praćenje putanje. Predloženi algoritam zasniva se na Kalmanovom filteru i omogućava praćenje krivolinijske putanje sa minimalnom greškom. Za razliku od postojećih algoritama, u predloženom rješenju ugao bočnog klizanja tretira se kao nepoznato stanje sistema, čija se estimacija vrši uporedo sa estimacijom grešaka u praćenju putanje. U radu je izvršena komparativna analiza predloženog LOS zakona i postojećih rješenja iz literature. Rezultati simulacija pokazuju da predloženi metod brže estimira ugao bočnog klizanja u poređenju sa postojećim metodama, što rezultira boljim performansama u praćenju referentne putanje.

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

Abstract

The subject of this thesis is algorithms for autonomous vessel guidance along a given parameterized path in the presence of external forces caused by ocean currents and wind. Specifically, the Line-of-Sight (LOS) guidance principle is considered, which is often used in autonomous vessels due to its simplicity and numerical efficiency. However, in its basic form, the LOS law is sensitive to external disturbances, limiting its applicability in real-world conditions.

This thesis proposes a LOS algorithm that enables the estimation of the sideslip angle and compensates for its impact on path following. The proposed algorithm is based on a Kalman filter and allows for curved path following with minimal error. Unlike existing algorithms, in the proposed solution, the sideslip angle is treated as an unknown system state, and its estimation is performed alongside the estimation of path-following errors. The paper presents a comparative analysis of the proposed LOS law and existing solutions from the literature. Simulation results show that the proposed method estimates the sideslip angle faster compared to existing methods, leading to better performance in the reference path following.

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

Sadržaj

Rezime **iii**

Abstract **iii**

Popis slika **1**

Uvod **2**

1 Modelovanje plovila **3**
1.1 Uvod . . . 3
1.2 Referentni sistemi . . . 4
1.2.1 Geocentrični sistem . . . 4
1.2.2 Geografski sistem . . . 5
1.2.3 Koordinatni sistem vezan za tijelo . . . 5
1.3 Kinematika površinskog vozila . . . 7
1.3.1 Kinematika modela za 3 stepena slobode . . . 7
1.4 Dinamika . . . 8
1.4.1 Dinamika modela sa 3 stepena slobode . . . 10
1.4.2 Nezavisno upravljanje zalijetanjem i manevrisanjem . . . 11
1.5 Modelovanje poremećaja . . . 13
1.5.1 Model vjetra . . . 13
1.5.2 Model morskih struja . . . 14

2 Vođenje, navigacija i upravljanje **16**
2.1 Vođenje plovila . . . 16
2.2 Vođenje pomoću putnih tačaka . . . 16
2.2.1 Putne tačke . . . 18
2.3 Generisanje putanje pomoću interpolacije . . . 18
2.3.1 Kubni splajn i Ermitova interpolacija . . . 19
2.3.2 Polinomna interpolacija . . . 19
2.4 Vođenje plovila u skladu sa vremenskim uslovima . . . 19
2.5 Magnetni i žiroskopski kompas . . . 20

2.5.1 Magnetni kompas 20
2.5.2 Žirokompas 21
2.6 Navigacija 21
2.6.1 Navstar GPS 21
2.6.2 Diferencijalni GPS (DGPS) 21
2.6.3 Diferencijalni GPS sa faznom korekcijom nosioca 22
2.6.4 Inmarsat 22
2.7 Inercijalni sistemi mjerenja 22
2.7.1 Žiroskop 23
2.7.2 Akcelerometar 23
2.8 LOS zakon vođenja 24
2.8.1 Definisanje problema 24

3 LOS zakoni vođenja 30
3.1 ALOS 30
3.2 PLOS 34
3.3 KFLOS zakon vođenja 37
3.3.1 Kalmanov filter 37
3.3.2 KFLOS 39

4 Rezultati simulacija 42
4.1 Opis numeričkih eksperimenata 42
4.2 Rezultati 43
4.2.1 Uticaj morskih struja na praćenje putanje 43
4.2.2 Uticaj mjernih šumova na performanse algoritama 51
4.2.3 Uticaj brzine zalijetanja na performanse algoritama 57
4.2.4 Uticaj parametara PD kontrolera na performase algoritama . . 64

5 Zaključak 70

Bibliografija 71

Popis slika

1.1 Komandni most 4
1.2 Referentni koordinatni sistemi [1] 5
1.3 Referentni sistem vezan za tijelo 6

2.1 Sistem vođenja [2] 17
2.2 Definicija LOS vektora 25
2.3 Krug prihvatanja [1] 26
2.4 LOS zakon vođenja 27

4.1 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P1 45
4.2 Greška položaja tokom praćenja putanje P1 45
4.3 Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P1 46
4.4 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P2 47
4.5 Greška položaja tokom praćenja putanje P2 47
4.6 Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P2 48
4.7 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P3 48
4.8 Greška položaja tokom praćenja putanje P3 49
4.9 Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P3 49
4.10 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P4 50
4.11 Greška položaja tokom praćenja putanje P4 50
4.12 Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P4 51
4.13 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1 52
4.14 Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1 52
4.15 Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1 53
4.16 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2 53

4.17 Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2 54
4.18 Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2 54
4.19 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3 55
4.20 Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3 55
4.21 Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3 56
4.22 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4 56
4.23 Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4 57
4.24 Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4 57
4.25 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P1 59
4.26 Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P1 59
4.27 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P2 60
4.28 Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P2 61
4.29 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P3 62
4.30 Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P3 63
4.31 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P4 63
4.32 Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P4 64
4.33 Stvarna i željena vrijednost ugla skretanja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P1 65
4.34 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim parametrima kontrolera tokom praćenja putanje P1 66
4.35 Greška položaja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P1 67
4.36 Stvarna i željena vrijednost ugla skretanja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P4
67
4.37 Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim parametrima kontrolera tokom praćenja putanje P4 68
4.38 Greška položaja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P4 68

Uvod

Upravljanje pomorskim vozilima na osnovu modela počinje izumom žirokompasa 1908. godine, a dalje se razvija sa uvođenjem sistema lokalnog pozicioniranja tokom 1970-ih godina. Globalna pokrivenost satelitske navigacije omogućena je prvi put 1994. godine. Žirokompas je bio osnovni instrument u prvim sistemima sa povratnom spregom za upravljanje kursom plovila. Ovakvi sistemi, koji koriste različite instrumente i upravljačke algoritme za autonomno upravljanje vozilima, poznati su kao autopiloti [2].

Razvojem autopilota dolazi do pojave prvih autonomnih površinskih vozila (eng. *Autonomous Surface Vehicles*, ASV). Njihova primjena omogućava smanjenje troškova, povećanje sigurnosti i zaštite, proširenje operativnih mogućnosti u nepovoljnim vremenskim uslovima, kao i veću efikasnost rada [3]. Osim toga, ASV-ovi mogu preuzeti fizički zahtjevne ili rizične zadatke, kao što su praćenje ekoloških uslova kroz dugotrajno prikupljanje podataka o kvalitetu vode, nadzor priobalnih područja radi detekcije ilegalnih aktivnosti ili zagađenja, te istraživanje teško dostupnih morskih lokacija i mapiranje morskog dna [4].

Upravljanje ASV-ovima na osnovu modela predstavlja najveći izazov u njihovom razvoju i privlači pažnju sve većeg broja istraživača. Osnovni scenariji upravljanja ASV-ovima su dinamičko pozicioniranje [5, 6], praćenje trajektorije [7], praćenje putanje [8], praćenje mete [9] i približavanje meti [10]. Svaki od ovih scenarija upravljanja ima svoje specifične izazove, kao što su nelinearnost modela, nepoznavanje parametara modela, podpogonjenost, nemogućnost mjerenja svih stanja ili ograničen propusni opseg komunikacionih sistema [11]. Iako je svaki od prethodno opisanih scenarija upravljanja ASV-ovima interesantan sa stanovišta praktične primjene, najviše pažnje se posvećuje praćenju putanje. Praćenje putanje podrazumijeva praćenje, unaprijed definisane parametarizovane putanje, bez vremenskih specifikacija. Drugim riječima, nije bitno u kom trenutku će ASV proći kroz neku tačku na putanji. Da bi vozilo pratilo željenu putanju potrebno je projektovati odgovarajući zakon vođenja, a jedan od najčešće korišćenih je Line of Sight (LOS) zakon vođenja.

LOS zakon se pokazao kao jednostavan, intuitivan i efikasan za zadatke praćenja

putanje. Međutim, konvencionalni oblik LOS-a koji je dat u [12] je osjetljiv na spoljašnje poremećaje kao što su vjetrovi, talasi ili morske struje. Naime, uslijed uticaja spoljnih poremećaja nastaje bočno klizanje, koje se manifestuje tako što se stvarni pravac kretanja ASV-a razlikuje od njegovog kursa. Istraživanja su pokazala da čak male vrijednosti ugla bočnog klizanja mogu izazvati značajne greške u praćenju željene putanje [13].

Posljednjih godina istraživači su posvetili značajnu pažnju problemu kompenzacije uticaja bočnog klizanja na praćenje putanje. Jedan od prvih pristupa uvedenih u literaturi je integralni LOS (ILOS) zakon, opisan u [14]. U odnosu na konvencionalni LOS, ILOS uključuje integralni član, koji omogućava kompenzaciju uticaja bočnog klizanja, ali ne i njegovu estimaciju. Kasnije je u [15] predložen adaptivni LOS (ALOS) zakon sa ciljem poboljšanja performansi ILOS-a. Nedavno su predložene modifikacije LOS-a zasnovane na estimatorima stanja [13] i Kalmanovom filteru [16], koje omogućavaju brzu estimaciju ugla bočnog klizanja bez preskoka, što rezultira boljim performansama u praćenju putanje. Ovaj rad generalizuje zakon iz [16], koji je projektovan za praćenje pravolinijskih putanja. Naime, rješenje predloženo u ovom radu omogućava praćenje generalnih parametrizovanih putanja, što predstavlja značajno unaprjeđenje u odnosu na [16]. Dodatno, za implementaciju predloženog zakona dovoljno je mjeriti rezultantnu brzinu vozila, dok pristup iz [16] zahtijeva poznavanje longitudinalne brzine (brzine zalijetanja). Ovo je posebno važno za praktičnu primjenu, jer je rezultantnu brzinu mnogo jednostavnije izmjeriti.

Master rad se sastoji od uvoda, četiri poglavlja, zaključka i spiska referenci. Prvo poglavlje je posvećeno modelovanju autonomnih vozila i spoljašnjih poremećaja koji utiču na pojavu bočnog klizanja. U drugom poglavlju opisani su različiti pristupi za generisanje referentnih putanja plovila, najčešće korišćeni senzori u navigaciji i njihova uloga u implementaciji različitih zakona vođenja. Takođe je u ovom poglavlju prezentovan princip rada LOS zakona vođenja. Treće poglavlje obrađuje modifikacije konvencionalnog LOS zakona koje omogućavaju kompenzaciju ugla bočnog klizanja, kao i predloženi LOS zakon. U četvrtom poglavlju izvršena je komparativna analiza performansi predloženog zakona i najčešće korišćenih LOS zakona. Simulacije su obuhvatile različite scenarije vođenja plovila od posebnog značaja za praktičnu primjenu. Na kraju, u zaključku su analizirani rezultati rada, istaknuti doprinosi u odnosu na postojeća rješenja i naznačeni budući pravci istraživanja.

Poglavlje 1

Modelovanje plovila

Ovo poglavlje će pružiti osvrt na potrebe za autonomnim površinskim vozilima kao i njihov razvoj, dok će u kasnijem dijelu biti odrađeno njihovo modelovanje, definisani različiti koordinatni sistemi koji se koriste u upravljanju, kinematika i dinamika i načini modelovanja poremećaja koji utiču na praćenje putanje.

1.1 Uvod

Približno dvije trećine planete Zemlje je prekriveno okeanima, ali veoma veliki dio ovih vodenih tijela je i dalje neistražen. Klimatske promjene, vremenske anomalije i potrebe za većom sigurnošću na moru podstiču naučnu, vojnu i privatnu zajednicu na intenzivnija istraživanja i inovacije u oblasti autonomnih površinskih vozila. Uprkos značajnim naporima, većina ASV-ova je samo djelimično autonomna, prvenstveno zbog izazova u postizanju robustnog vođenja, navigacije i upravljanja tokom različitih misija, naročito u rizičnim i kompleksnim okruženjima, te zbog moguće neispravnosti senzora, aktuatora ili komunikacionih sistema [17]. Dalji razvoj ASV-ova treba da bude usmjeren na smanjenje zavisnosti od čovjeka i minimiziranje uticaja ljudske greške na efikasnost, sigurnost i pouzdanost upravljanja [18].

Razvoj autonomnih površinskih vozila mogao bi donijeti značajne prednosti, kao što su smanjenje operativnih troškova, poboljšana bezbijednost, veći opseg operabilnosti, veća preciznost i povećana fleksibilnost u zahtjevnijim okruženjima [17], [9], [19], [20] i [21]. Upotreba naprednih navigacionih uređaja, kao što su GPS i inercioni senzori, zajedno sa modernim bežičnim komunikacionim sistemima [22], može unaprijediti upravljačke algoritme ASV-a, što bi dovelo do njihove šire primjene, poboljšanja ljudske sigurnosti i značajnih finansijskih ušteda.

Autonomna površinska vozila se sastoje od tri glavna podsistema čija je kohezija potrebna za uspješno upravljanje ovim vozilima. Ta tri podsistema su: 1) sistem vođenja, 2) navigacioni sistemi i 3) sistem upravljanja.

Slika 1.1: Komandni most

1. **Sistem vođenja** je zadužen za kontinuirano generisanje i ažuriranje glatkih, izvodljivih i optimalnih komandi koje se prosljeđuju sistemu upravljanja, na osnovu informacija dobijenih od navigacionog sistema, željene misije, manevarskih sposobnosti vozila i meteoroloških uslova.
2. **Navigacioni sistem** odgovoran je za estimaciju sadašnjih i budućih stanja ASV-a (orijentacija, pozicija, brzina...), koristeći prethodna i sadašnja stanja ASV-a, kao i informacije dobijene putem senzora.
3. **Sistem upravljanja** je zadužen na generisanje upravljačkih sila i momenata u skladu sa informacijama dobijenim od prethodna dva podsistema, a sve u cilju zadovoljenja željenih ciljeva upravljanja [17].

Za neautonomna plovila, neophodno je prikazati stanje svih podsistema na komandnom mostu koji je prikazan na slici 1.1, gdje posada prati informacije i reaguje po potrebi, što zahtijeva značajan prostor. S druge strane, autonomna plovila ne zahtijevaju prikaz ovih vrijednosti, čime se eliminiše potreba za velikim komandnim mostom i omogućava kompaktniji i efikasniji dizajn.

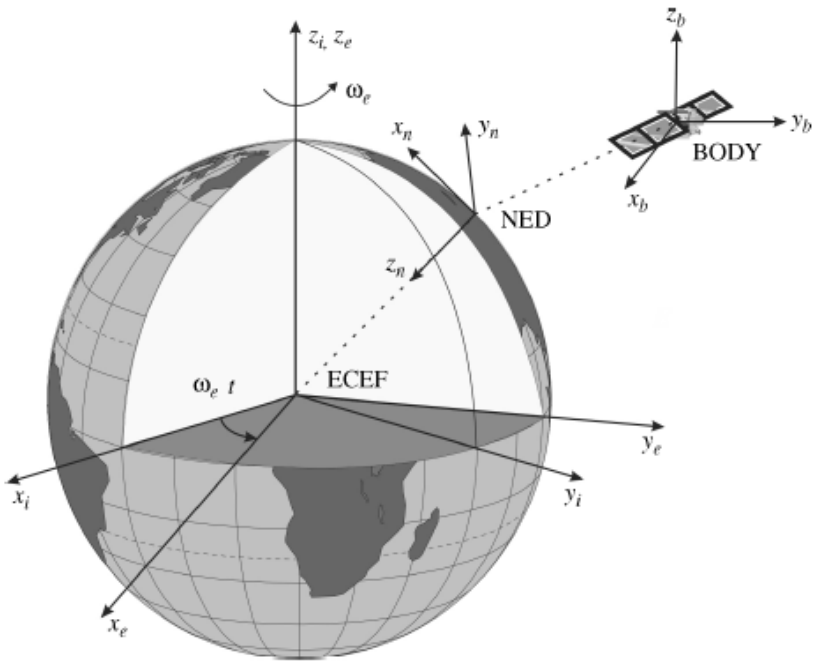
1.2 Referentni sistemi

Analiza kretanja pomorskih vozila sa 6 stepeni slobode zahtijeva definisanje različitih referentnih koordinatnih sistema koji su prikazani na slici 1.2 [2].

1.2.1 Geocentrični sistem

ECI (*Earth-centered inertial*) inercijalni sistem vezan za Zemlju je inercijalni sistem za terestrijalnu navigaciju. Ovo je sistem bez ubrzanja u kojem Njutnovi zakoni važe. Početak ECI koordinatnog sistema x_i, y_i, z_i smješten je u centru Zemlje, kao što je prikazano na slici 1.2.

ECEF (*Earth-centered Earth-fixed*) je geocentrični sistem sa osama x_e, y_e, z_e čiji



Slika 1.2: Referentni koordinatni sistemi [1]

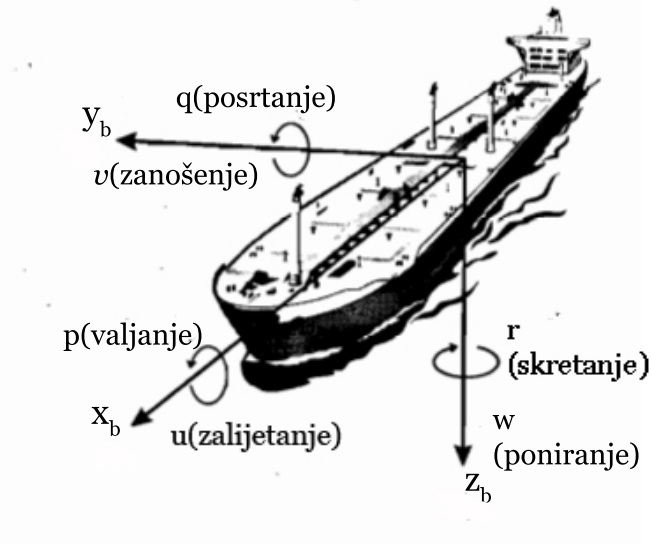
je početak povezan sa središtem Zemlje. Međutim, njegove ose se rotiraju za razliku od ECI sistem koji je fiksiran u prostoru (slika 1.2). Ugaona brzina ovog sistema je $\omega_e = 7.2921 * 10^{-5} \frac{rad}{s}$. Za pomorska vozila koja se kreću relativno malim brzinama ovaj sistem se može smatrati inercijalnim, jer se rotacija sistema može zanemariti. Ovaj sistem se koristi za opisivanje kretanja i lokacije brodova.

1.2.2 Geografski sistem

NED (*North-East-Down*) je koordinatni sistem sa osama x_n, y_n, z_n koji koristimo svakodnevno. Predstavlja se kao tangencijalna površ na površini Zemlje koja se kreće sa pomorskim vozilom (slika 1.2). Osa x_n pokazuje ka sjeveru, y_n ka istoku, a z_n pokazuje nadolje pod normalnim uglom na Zemljinu površinu. Lokacija ovog sistema u odnosu na **ECEF** koordinatni sistem određuje se pomoću dva ugla, l i μ, koji definišu geografsku dužinu i širinu. **NED** koordinatni sistem se često koristi kao lokalni koordinatni sistem vozila. Ovo omogućava lakšu integraciju i interpretaciju inercijalnih mjerenja i pomaže u izračunavanju pozicije i brzine vozila u odnosu na njegovu lokalnu sredinu.

1.2.3 Koordinatni sistem vezan za tijelo

Sistem vezan za tijelo sa osama x_b, y_b, z_b je koordinatni sistem koji se pomijera zajedno sa vozilom. Najčešće se pozicija i orijentacija definišu u **NED** koordinatnom sistemu, dok se linearne i ugaone brzine vozila opisuju u referentnom sistemu vezanom za tijelo. Koordinatni početak ovog sistema za pomorska vozila bira se tako



Slika 1.3: Referentni sistem vezan za tijelo

da se uskladi sa osnovnim osama inercije vozila. Osa x_b je longitudinalna, usmjerena od krme ka pramcu; osa y_b je transverzalna, usmjerena od sredine broda ka desnoj strani plovila; dok je osa z_b normalna na površinu koju formiraju x_b i y_b, usmjerena od vrha ka dnu broda. Ovaj način odabira je prikazan na slici 1.3.

U ovom sistemu se definišu linearne i ugaone brzine, pozicije i uglovi, kao i sile i momenti za svih 6 stepeni slobode i definisani su u tabeli 1.1.

Osnovna kretanja plovila se mogu definisati pomoću sljedećih vektora (1.1) i tabele 1.1:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= [\boldsymbol{\eta_1}, \boldsymbol{\eta_2}]^T, \quad \boldsymbol{\eta_1} = [x, y, z]^T, \quad \boldsymbol{\eta_2} = [\phi, \theta, \psi]^T, \\ \boldsymbol{\upsilon} &= [\boldsymbol{\upsilon_1}, \boldsymbol{\upsilon_2}]^T, \quad \boldsymbol{\upsilon_1} = [u, \upsilon, \omega]^T, \quad \boldsymbol{\upsilon_2} = [p, q, r]^T, \\ \boldsymbol{\tau} &= [\boldsymbol{\tau_1}, \boldsymbol{\tau_2}]^T, \quad \boldsymbol{\tau_1} = [X, Y, Z]^T, \quad \boldsymbol{\tau_2} = [K, M, N]^T, \end{aligned} \tag{1.1}$$

gdje $\boldsymbol{\eta}$ predstavlja poziciju i orijetaciju u geocentričnom sistemu, $\boldsymbol{\upsilon}$ označava linearne i ugaone brzine, dok $\boldsymbol{\tau}$ označava sile i momente. Posljednja dva vektora su definisana u sistemu koji je vezan za tijelo [23].

Tablica 1.1: Notacije korištene od strane ″Društva za brodogradnju i pomorsko inženjerstvo″ (eng. *Society of Naval Architecture and Marine Engineering*, SNAME)

DOF		Sile i momenti	Linearne i ugaone brzine	Pozicija i Ojlerovi uglovi
1	Pravac duž x ose (zalijetanje)	X	u	x
2	Pravac duž y ose (zanošenje)	Y	υ	y
3	Pravac duž z ose (poniranje)	Z	ω	z
4	Rotacija oko x ose (valjanje)	K	p	ϕ
5	Rotacija oko y ose (posrtanje)	M	q	θ
6	Rotacija oko z ose (skretanje)	N	r	ψ

1.3 Kinematika površinskog vozila

Prvi izvod vektora $\boldsymbol{\eta_1}$ po vremenu vezuje se za $\boldsymbol{\upsilon_1}$ pomoću sljedeće transformacije:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathbf{1}} = \mathbf{J_1}(\boldsymbol{\eta_2})\boldsymbol{\upsilon_1}, \tag{1.2}$$

gdje je matrica transformacije $\mathbf{J_1}(\boldsymbol{\eta_2})$ definisana preko Ojlerovih uglova:

$$\mathbf{J_1}(\boldsymbol{\eta_2}) = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) & \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) & \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) & \\ & \sin(\psi)\sin(\phi) + \sin(\phi)\cos(\theta)\cos(\psi) & \\ & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\phi)\cos(\theta)\sin(\psi) & \\ & \cos(\theta)\cos(\phi) & \end{bmatrix}. \tag{1.3}$$

Za matricu $\mathbf{J_1}(\boldsymbol{\eta_2})$ je važno naglasiti da je ona globalno invertabilna.

Izvod po vremenu vektora Ojlerovih uglova $\boldsymbol{\eta_2}$ povezan je sa vektorom $\boldsymbol{\upsilon_2}$ preko transformacije:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathbf{2}} = \mathbf{J_2}(\boldsymbol{\eta_2})\boldsymbol{\upsilon_2}, \tag{1.4}$$

pri čemu je matrica transformacije $\mathbf{J_2}(\boldsymbol{\eta_2})$ definisana na sljedeći način:

$$\mathbf{J_2}(\boldsymbol{\eta_2}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)tan(\theta) & \cos(\phi)tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix}. \tag{1.5}$$

Ova matrica je singularna za $\theta = \pm\frac{\pi}{2}$, ali pošto u praksi nije vjerovatno da će vozilo doseći te uglove, ova karakteristika se može zanemariti u našem slučaju. Povezivanjem jednačina (1.2) i (1.4), ukupna kinematika se može predstaviti na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathbf{1}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathbf{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J_1}(\boldsymbol{\eta_2}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J_2}(\boldsymbol{\eta_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\upsilon_1} \\ \boldsymbol{\upsilon_2} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\upsilon}. \tag{1.6}$$

1.3.1 Kinematika modela za 3 stepena slobode

Za površinska vozila se može smatrati da posjeduju samo tri stepena slobode, pa se jednačina (1.6) može znatno uprostiti. Ova redukcija na 3 stepena slobode je moguća zbog pretpostavke da su uglovi ϕ i θ veoma mali za većinu plovila [2].

Konačna jednačina koja opisuje kinematiku površinskog vozila je:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}. \tag{1.7}$$

1.4 Dinamika

U ovom dijelu će biti izveden opši nelinarni model kretanja, nakon čega je pokazano kako se taj model može značajno pojednostaviti. Prvo se definišu sljedeći vektori:

- $\boldsymbol{f}_{Ob} = [X, Y, Z]^T$: sile predstavljene u sistemu vezanom za tijelo,
- $\boldsymbol{m}_{Ob} = [K, M, N]^T$: momenti predstavljeni u sistemu vezanom za tijelo,
- $\boldsymbol{v}_{Ob} = [u, v, \omega]^T$: linearne brzine predstavljene u sistemu vezanom za tijelo,
- $\boldsymbol{\omega}^E_{Ob} = [p, q, r]^T$: ugaone brzine sistema vezanog za tijelo u odnosu na geocentrični sistem,
- $\mathbf{r}_{Ob} = [x_g, y_g, z_g]^T$: vektor od početka sistema vezanog za tijelo do centra gravitacije predstavljenom u sistemu vezanom za tijelo.

O_b predstavlja koordinatni početak sistema vezanog za tijelo. Korišćenjem Njutn-Ojlerove formulacije za čvrsta tijela sa masom m izbalansirane sile i momenti se prikazuju jednačinama iz [23]:

$$\begin{aligned} m\left[\dot{\boldsymbol{v}}_{Ob} + \dot{\boldsymbol{\omega}}^E_{Ob} \times \mathbf{r}_{Ob} + \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} \times \boldsymbol{v}_{Ob} + \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} \times (\boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} \times \mathbf{r}_{Ob})\right] &= \boldsymbol{f}_{Ob} \\ \mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} + \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} \times \mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} + m\mathbf{r}_{Ob} \times (\boldsymbol{v}_{Ob} + \boldsymbol{\omega}^E{}_{Ob} \times \boldsymbol{v}_{Ob}) &= \boldsymbol{m}_{Ob} \end{aligned} \tag{1.8}$$

gdje je matrica inercije $\mathbf{I}_o$ definisana na sljedeći način:

$$\mathbf{I}_o = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \tag{1.9}$$

gdje su I_x, I_y, I_z momenti inercije oko pojedinačnih osa sistema vezanog za tijelo. Važno je naglasiti sljedeća svojstva elemenata matrice I_o: $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$. Zamjenom definicija za $\boldsymbol{f}_{Ob}, \boldsymbol{m}_{Ob}, \boldsymbol{\omega}^E_{Ob}, \mathbf{r}_{Ob}$ u 1.8 dobija se sljedeća jednačina dinamike čvrstog tijela:

$$\mathbf{M_{RB}}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{C_{RB}}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} = \boldsymbol{\tau}_{\mathbf{RB}}, \tag{1.10}$$

gdje su vektori $\boldsymbol{\upsilon}$ i $\boldsymbol{\tau}$ definisani u (1.1), dok se matrica inercije $\mathbf{M_{RB}}$ i matrica Koriolisovog uticaja i centripetalne sile $\mathbf{C_{RB}}$ mogu zapisati kao:

$$\mathbf{M_{RB}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix}, \tag{1.11}$$

$$\mathbf{C_{RB}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_gq + z_gr) & m(y_gp + \omega) & m(z_gp - \upsilon) \\ m(x_gq - \omega) & -m(z_gr + x_gp) & m(z_gq + u) \\ m(x_gr + \upsilon) & m(y_gr - u) & -m(x_gp + y_gq) \\ m(y_gq + z_gr) & -m(x_gq - \omega) & -m(x_gr + \upsilon) \\ -m(y_gp + \omega) & m(z_gr + x_gp) & -m(y_gr - u) \\ -m(z_gp - \upsilon) & -m(z_gq - u) & m(x_gp + y_gq) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_zr & I_{yz}r + I_{xy}p - I_yq \\ I_{xz}q + I_{xz}p - I_zr & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_xp \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_yq & I_{xz}r + I_{xy}q - I_xp & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.12}$$

Daljim razvojem, koji je detaljno razrađen u [2] i [23], dolazi se do konačnog oblika jednačina kretanja pomorskih vozila sa 6 stepeni slobode i one glase:

$$\begin{aligned} &\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} = -\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} - \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{\mathbf{E}}, \\ &\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\upsilon}. \end{aligned} \tag{1.13}$$

Matrica $\mathbf{M}$ predstavlja inerciju sistema koja sadrži virtuelnu masu (masa vozila sa masom koju izazivaju hidrodinamički procesi zbog kretanja vozila kroz fluid), $\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})$ je matrica Koriolisove sile i centripetalnih sila koja takođe uključuje uticaj virtuelne mase, $\mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})$ je matrica hidrodinamičkog prigušenja, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\upsilon})$ predstavlja vektor povratne sile koji proizilazi iz dejstva gravitacije i sile uzgona. Posljednja dva člana prve jednačine u (1.13) predstavljaju upravljačke ulaze plovila $\boldsymbol{\tau}$ i poremećaje u prirodi $\boldsymbol{\tau_E}$ koji nastaju uslijed uticaja vjetra, morskih struja ili talasa. Ova dva vektora su definisana na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \begin{bmatrix} \tau_u & \tau_\upsilon & \tau_r \end{bmatrix}^T, \\ \boldsymbol{\tau_E} &= \begin{bmatrix} \tau_{uE} & \tau_{\upsilon E} & \tau_{rE} \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \tag{1.14}$$

gdje prvi član vektora ima uticaj na zalijetanje vozila, drugi na zanošenje i posljednji

na rotaciju ili skretanje vozila. Važno je naglasiti da je $\boldsymbol{\tau}$ u (1.14) definisano za potpuno pogonjeno vozilo, međutim, u ovom radu će biti razmatrano potpogonjeno vozilo, tako da je novi oblik upravljačkog vektora: $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_r]^T$.

1.4.1 Dinamika modela sa 3 stepena slobode

Prilikom definisanja modela sa 3 stepena slobode potrebno je razmotriti dvije krajnosti koje je moguće uzeti u obzir prilikom definisanja dinamičkog modela. Prva krajnost je veoma mala brzina vozila, a druga je velika brzina vozila. Zavisno od brzine vozila moguće je izvesti određene aproksimacije koje će omogućiti definisanje dinamike modela za vozilo sa 3 stepena slobode.

Prvo se razmatraju veoma male brzine. Prilikom ovog razmatranja potrebno je uvesti nekoliko pretpostavki:

- Linearna brzina duž z ose kao i ugaone brzine oko x i y ose se mogu zanemariti,
- Masa je homogeno raspoređena,
- Plovilo je simetrično po xz osi.

Sada sistem (1.13) može biti definisan na sljedeći način:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{D}\boldsymbol{\upsilon} = \boldsymbol{\tau}, \tag{1.15}$$

gdje su matrice $\mathbf{M}$ i $\mathbf{D}$ date na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{1.16}$$

Iz prethodnih jednačina može se zaključiti da je dati sistem moguće raspregnuti, tj. nezavisno upravljati zalijetanjem vozila i skretanjem i zanošenjem vozila.

Kada je model za veće brzine u pitanju, nije moguće izvršiti određene pretpostavke iz prošlog primjera i time model za veće brzine postaje nelinearan i definiše se sistemom:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} = \boldsymbol{\tau}. \tag{1.17}$$

1.4.2 Nezavisno upravljanje zalijetanjem i manevrisanjem

Kao što je već pomenuto u potpoglavlju 1.4.1, zalijetanjem je moguće nezavisno upravljati od zanošenja i skretanja, ali samo za rezultantne brzine koje se sporo mijenjaju ili su konstantne, i koje zadovoljavaju:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u. \tag{1.18}$$

Model zalijetanja

U slučaju raspregnutog upravljanja, jednačina koja se koristi za upraljanje zalijetanjem se definiše na sljedeći način:

$$(m - X_{\dot{u}})\,\dot{u} - X_u u - X_{|u|u}\,|u|\,u = \tau_1, \tag{1.19}$$

gdje je τ_1 suma svih sila koje utiču na zalijetanje vozila. U jednačini je uključeno i linearno i kvadratno prigušenje kako bi se obuhvatile i velike i male brzine vozila. Za ovaj raspregnuti model moguće je dizajnirati kontroler brzine koji u povratnoj sprezi jedino koristi mjerenja brzine zalijetanja.

Model zanošenja i skretanja, 2 stepena slobode

Linearni model za manevrisanje je zasnovan na pretpostavci da je brzina $u = u_o \approx const.$, i da su brzine v i r veoma male. Dva prikaza ovog modela su dati u sljedećem dijelu:

1. Matrica Koriolisove i centripetalne sile se definiše na sljedeći način:

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} = \begin{bmatrix} 0 & (m - X_{\dot{u}})u_o \\ (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})u_o & (mx_g - Y_{\dot{r}})u_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix}. \tag{1.20}$$

Ukoliko se koristi samo jedna krma, vektor $\boldsymbol{\tau}$ će biti jednak:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} -Y_\delta \\ -N_\delta \end{bmatrix} \delta = \mathbf{b}\delta, \tag{1.21}$$

pa se dinamika sistema može zapisati u obliku:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{N}(u_o)\boldsymbol{\upsilon} = \mathbf{b}\delta, \tag{1.22}$$

gdje su:

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\upsilon} &= \begin{bmatrix} \upsilon \\ r \end{bmatrix}, \\
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{\upsilon}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{N}(u_o) &= \begin{bmatrix} -Y_{\upsilon} & (m - X_{\dot{u}})u_o - Y_r \\ (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{\upsilon}})u_o - N_{\upsilon} & (mx_g - Y_{\dot{r}})u_o - N_r \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{1.23}$$

2. Drugi način je dat u [24]:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{N}(u_o)\boldsymbol{\upsilon} = \mathbf{b}\delta, \tag{1.24}$$

gdje je:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{\upsilon}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \mathbf{N}(u_o) = \begin{bmatrix} -Y_{\upsilon} & mu_o - Y_r \\ -N_{\upsilon} & mx_g u_o - N_r \end{bmatrix}. \tag{1.25}$$

Model sa jednim stepenom slobode

Pošto rad razmatra potpogonjeno vozilo, potrebno je dodatno uvesti sistem za upravljanje skretanjem, poznatiji kao Nomoto model. Linearni model autopilota za kontrolu kursa može se izvesti iz sljedeće jednačine:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{N}(u_o)\boldsymbol{\upsilon} = \mathbf{b}\delta, \tag{1.26}$$

pri čemu se kao izlaz definiše brzine skretanja:

$$\mathbf{r} = \mathbf{c}^T\boldsymbol{\upsilon}, \mathbf{c}^T = [0, 1]. \tag{1.27}$$

Prelaženjem u Laplasov domen dobija se sljedeća jednačina:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}. \tag{1.28}$$

Gornja jednačina predstavalja Nomoto model drugog reda koji je prikazan u [25]. Moguće je umanjiti red modela tako što se definiše ekvivalentna vremenska konstanta $T = T_1 + T_2 - T_3$, čime se sistem svodi na:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1 + Ts)}, \tag{1.29}$$

gdje se zamjenom $\dot{\phi} = r$ dobija konačna funkcija prenosa koja se koristi za modelo-

vanje većine komercijalnih autopilota:

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1+Ts)}. \tag{1.30}$$

1.5 Modelovanje poremećaja

Poremećaji koji utiču na praćenje putanje pomorskih vozila se mogu svrstati, zavisno od načina nastanka poremećaja, u tri grupe:

- Vjetrovi,
- Talasi,
- Morske struje.

Prilikom dizajniranja sistema upravljanja obično se koristi princip superpozicije kada se razmatraju poremećaji uslijed vjetra i talasa. Za većinu pomorskih aplikacija ovo je dobra aproksimacija, jer su prirodni poremećaji dosta nelinearni i samim tim njihovo zajedničko dejstvo izaziva nelinearni uticaj. Prilikom simulacije u sistemu sa povratnom spregom većina ovih efekata biva suzbijena zbog implementacije zatvorene sprege [2].

U sljedećem dijelu biće ukratko objašnjen postupak modelovanja poremećaja uzrokovanih vjetrovima i morskim strujama. Modelovanje morskih talasa nije obuhvaćeno ovim radom, ali je detaljno objašnjeno u [2].

1.5.1 Model vjetra

Vjetar predstavlja kretanje vazduha u odnosu na površinu Zemlje. Za unaprjeđenje performansi i otpornosti sistema važno je adekvatno modelovanje ovih poremećaja.

Ako definišemo brzinu i smjer vjetra kao V_ω i ψ_ω, sile i momenti koji djeluju na plovilo mogu se izraziti kroz relativne veličine, V_r i γ_r, relativnu brzinu vjetra i relativni ugao vjetra. Sile i momenti koje generiše vjetar i koji utiču na plovilo definisane su sljedećim jednačinama:

$$\begin{aligned} &V_r = \sqrt{{u^2}_r + {v_r}^2}, \quad \gamma_r = \tan^{-1}(v_r/u_r) = \psi_\omega - \psi, \\ &u_r = V_\omega \cos(\gamma_r) - u, \quad v_r = V_\omega \sin(\gamma_r) - v. \end{aligned} \tag{1.31}$$

Korišćenjem odgovarajućih instrumenata moguće je izmjeriti brzinu i ugao vjetra koje je kasnije moguće koristiti za kompenzaciju ovih poremećaja. U slučaju kada je inercija plovila dovoljno velika, kompenzacija poremećaja nije potrebna u situacijama slabijih vjetrova.

1.5.2 Model morskih struja

Morske struje su horizontalni i vertikalni cirkulacioni sistemi vode koji nastaju pod uticajem gravitacije, vjetra i različitih gustina vode. Osim struja koje nastaju uslijed djelovanja vjetra, moguće je dodatno formiranje morskih struja zbog razmjene toplote na površini vode i promjene saliniteta.

Radi simulacije uticaja morskih struja koriste se modeli u kojem se brzina promjene morskih struja smatra veoma sporom ili nepostojećom:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}} + \mathbf{C_{RB}}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{C_A}(\boldsymbol{\upsilon_r})\boldsymbol{\upsilon_r} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon_r})\boldsymbol{\upsilon_r} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g_o} + \mathbf{w}. \tag{1.32}$$

Statičke restaurativne sile i momenti koji potiču od balastnih sistema i rezervoara za vodu obuhvaćeni su terminom $\mathbf{g_o}$. Vektor $\mathbf{w}$ predstavlja generalizovane sile i momente uzrokovane spoljašnjim faktorima poput vjetra, talasa i morskih struja. Relativna brzina vozila definisana je kao $\boldsymbol{\upsilon_r} = \boldsymbol{\upsilon} - \boldsymbol{\upsilon_c}$, gdje je $\boldsymbol{\upsilon_c}$ vektor brzine morskih struja, dok $\boldsymbol{\upsilon}$ označava brzinu vozila bez uticaja poremećaja.

Ukoliko brzinu morskih struja definišemo kao V_c, a njen smjer u odnosu na pokretno vozilo pomoću dva ugla: ugla napada α_c i ugla bočnog klizanja β_c [2], trodimenzioni model morskih struja je moguće definisati na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} {u_c}^b \\ {\upsilon_c}^b \\ {\omega_c}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_c) & 0 & \sin(\alpha_c) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_c) & 0 & \cos(\alpha_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_c) & \sin(\beta_c) & 0 \\ -\sin(\beta_c) & \cos(\beta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{1.33}$$

Daljim uprošćavanjem ovih matrica dobija se konačan izraz za trodimenzini model morskih struja:

$$\begin{aligned} {u_c}^b &= V_c \cos(\alpha_c)\cos(\beta_c), \\ {\upsilon_c}^b &= V_c \sin(\beta_c), \\ {\omega_c}^b &= V_c \sin(\alpha_c)\cos(\beta_c). \end{aligned} \tag{1.34}$$

Uprošćavanjem ovog slučaja na sistem od dvije dimenzije, gdje je uticaj treće dimenzije moguće zanemariti za površinska plovila, dobija se konačna jednačina koja opisuje morske struje:

$$\begin{aligned} {u_c}^b &= V_c \cos(\beta_c), \\ {\upsilon_c}^b &= V_c \sin(\beta_c), \\ Vc &= \sqrt{({u_c}^b)^2 + ({\upsilon_c}^b)^2}. \end{aligned} \tag{1.35}$$

Korišćenjem ovog modela moguće je izvesti jednačine za rezultantnu brzinu površi-

nskog vozila koju je moguće mjeriti pomoću GPS-a. Ova brzina je definisana u **NED** sistemu na sljedeći način:

$$\begin{aligned} u_r &= u + V_c \cos(\beta_c - \psi), \\ v_r &= v + V_c \sin(\beta_c - \psi), \\ U_r &= \sqrt{(u_r)^2 + (v_r)^2}. \end{aligned} \tag{1.36}$$

Poglavlje 2

Vođenje, navigacija i upravljanje

U ovom poglavlju će biti objašnjena dva postupka za generisanje putanje plovila. Takođe će biti opisani mjerni instrumenti koji se koriste prilikom vođenja plovila i princip njihovog rada. Na samom kraju će biti objašnjen i izveden LOS zakon vođenja.

2.1 Vođenje plovila

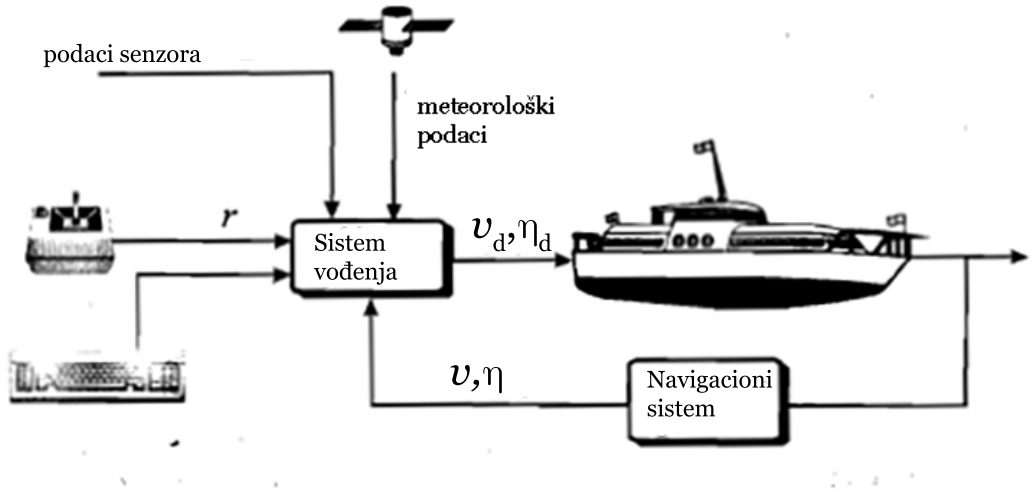
Sistem za vođenje plovila sastoji se od računara koji generiše referentnu trajektoriju ili putanju u zavisnosti od posmatranog problema. Na osnovu prikupljenih podataka iz okoline, ovaj sistem kreira putanju koja osigurava da se stabilnost plovila ne naruši tokom navigacije. Dva glavna podsistema sistema za vođenje su:

- Podsistem upravljanja orijentacijom (*Attitude Control System*) koristi se za održavanje zadatog smjera tako što utiče na vozilo promjenom njegovog kursa.
- Podsistem upravljanja putanjom (*Path Control System*) zadaje komande podsistemu upravljanja orijentacijom na osnovu već definisane dinamike vozila tako da vozilo ostane na željenoj putanji.

2.2 Vođenje pomoću putnih tačaka

Sistemi za stvaranje putnih tačaka sastoje se od generatora putnih tačaka, gdje korisnik može unijeti referentne putne tačke putem tastature ili džojstika. Putne tačke koje definiše operater čuvaju se u memoriji plovila. Nakon unosa, računar generiše putanju ili trajektoriju koju plovilo prati, koristeći prikupljene podatke sa senzora i meteorološke informacije, što je prikazano na slici 2.1.

Parametarizovana putanja je definisana kao geometrijska kriva $\boldsymbol{\eta}_d(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^q$, $q \geq 1$, gdje je θ kontinualna promjenljiva koja predstavlja parametar putanje. Za



Slika 2.1: Sistem vođenja [2]

površinsko vozilo sa tri stepena slobode vektor $\boldsymbol{\eta}_d(\boldsymbol{\theta})$ se obično definiše na sljedeći način:

$$\boldsymbol{\eta}_d(\theta) = \begin{bmatrix} x_d(\theta) \\ y_d(\theta) \\ \psi_d(\theta) \end{bmatrix}. \tag{2.1}$$

Načini implementacije praćenja trajektorije ili putanje se klasifikuju u zavisnosti od broja dostupnih aktuatora, tj. stepeni kontrole plovila. Na primjer, kod plovila sa 3 stepena slobode, potpuno pogonjeno plovilo je ono koje omogućava nezavisno upravljanje brzinom zalijetanja u, brzinom zanošenja v, i uglom skretanja ψ.

- Praćenje trajektorije: Praćenje vremenski promjenljive referentne trajektorije, definisane vektorom $\boldsymbol{\eta}_d(t) = [x_d(t), y_d(t), \psi_d(t)]^T$, ostvaruje se minimizovanjem greške u praćenju $\boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\eta}_d(t)$, gdje je $\boldsymbol{\eta}(t) = [x(t), y(t), \psi(t)]^T$. Ova greška se može razložiti na tri komponente, koje su predstavljene u referentnom sistemu paralelnom sa tijelom plovila:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T(\psi)(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta_d}) = \begin{bmatrix} cos(\psi)(x - x_d) + sin(\psi)(y - y_d) \\ -sin(\psi)(x - x_d) + cos(\psi)(y - y_d) \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

  Fizička interpretacija grešaka je sljedeća: e_1 predstavlja grešku duž putanje, e_2 označava grešku položaja, dok e_3 predstavlja grešku kursa. U zavisnosti od toga na koliko ovih grešaka vozilo može direktno uticati, odnosno kontrolisati ih, pri praćenju trajektorije zavisno od broja stepeni kontrole moguće su sljedeće implementacije:

  – Tri ili više stepena kontrole, ili u potpunosti pogonjeno dinamičko po-

zicioniranje je korisno ukoliko je potrebno kretanje poput krabe ili za održavanje pozicije stanica.

– Dva stepena kontrole, ili potpogonjeno upravljanje je doživjelo veliki procvat u posljednje vrijeme. Glavna prednost ovog upravljanja se ispoljava u slučaju kvara jednog od aktuatora koji tada neće znatno uticati na performanse u praćenju trajektorije.

- Praćenje putanje: Praćenje putanje $(x_d(\theta), y_d(\theta))$ pri određenoj brzini plovila zavisno od broja stepeni kontrole se dijeli na:
  – Tri ili više stepeni kontrole: Regulacija pozicije (x, y) ka $(x_d(\theta), y_d(\theta))$. Pošto ovakav zadatak zahtijeva samo 2 stepena slobode ovo upravljanje daje dodatnu fleksibilnost u rješavanju ovog problema.
  – Dva stepena kontrole: Ovo je tipičan problem koji se sreće u praksi, krma za umanjenje greške od tražene putanje i propeler za ubrzanje ili usporenje.
  – Jedan stepen kontrole: Moguće korišćenjem samo krme za upravljanje kursem plovila dok se ono kreće kostantnom brzinom.

2.2.1 Putne tačke

Putanja plovila je obično definisana pomoću vektora koji sadrži poziciju putnih tačaka, ali je moguće i dodati parametre kao što su brzina i kurs:

$$\begin{aligned} wpt.pos &= \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), ..., (x_n, y_n)\}, \\ wpt.speed &= \{U_0, U_1, ..., U_n\}, \\ wpt.heading &= \{\psi_0, \psi_1, ..., \psi_n\}. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Uvođenje kursa se obično koristi za kompleksnije tipove manevrisanja, a ne za praćenje putanje. Odabir putnih tačaka zavisi od mnogo kriterijuma kao što su: misija vozila, geografski podaci, podaci o okolini, prepreke, izbjegavanje sudara, izvodljivost...

2.3 Generisanje putanje pomoću interpolacije

Primjenom interpolacije ili splajnova na već unijete putne tačke moguće je dobiti podesnije matematičke jednačine za proces praćenja putanje. Neki od najčešćih tipova interpolacija su: kubni splajnovi, Ermitova interpolacija i polinomna interpolacija.

2.3.1 Kubni splajn i Ermitova interpolacija

Glavna razlika između kubnih splajnova i Ermitove interpolacije je odabir krajnjih nagiba. Ermitova interpolacija obezbjeđuje da su prvi izvodi $(\dot{x_d}(t), \dot{y_d}(t))$ kontinualni. Nagibi na oba kraja su odabrani tako da $(x_d(t), y_d(t))$ održavaju izgled krive i poštuju monotonost.

Kubni splajn se obično koristi tako da su drugi izvodi $(\ddot{x_d}(t), \ddot{y_d}(t))$ na početnoj i krajnjoj tački polinoma jednaki. Za razliku od Ermitove interpolacije, kubni splajn garantuje postojanje drugog izvoda funkcije. Kada putne tačke potiču iz glatke funkcije, kubni splajn je obično precizniji od Ermitove interpolacije. Ipak, u određenim situacijama Ermitova interpolacija može biti poželjnija jer stvara manje oscilacija.

2.3.2 Polinomna interpolacija

Korišćenjem kubnog polinoma i putnih tačaka putanje je moguće generisati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} x_d(\theta) &= a_3\theta^3 + a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0, \\ y_d(\theta) &= b_3\theta^3 + b_2\theta^2 + a_1\theta + a_0, \end{aligned} \tag{2.4}$$

gdje je $(x_d(\theta), y_d(\theta))$ pozicija plovila, a θ varijabla putanje koja je definisana sa:

$$\dot{\theta} = f(\theta, t). \tag{2.5}$$

Parcijalni izvodi x_d i y_d po varijabli putanje θ su:

$$\begin{aligned} x'_d(\theta) &= 3a_3\theta^2 + 2a_2\theta + a_1, \\ y'_d(\theta) &= 3b_3\theta^2 + 2b_2\theta + b_1, \end{aligned} \tag{2.6}$$

pa je brzinu vozila moguće izraziti na sljedeći način:

$$\begin{aligned} &\dot{x_d} = \tfrac{dx_d(\theta)}{\theta}\dot{\theta}(t), \\ &\dot{y_d} = \tfrac{dy_d(\theta)}{\theta}\dot{\theta}(t), \\ &U_d(t) = \sqrt{\dot{x}_d^2(t) + \dot{y}_d^2(t)} = \sqrt{{x'_d}^2(\theta) + {y'_d}^2(\theta)}\,\dot{\theta}(t). \end{aligned} \tag{2.7}$$

2.4 Vođenje plovila u skladu sa vremenskim uslovima

Ovaj tip vođenja koristi meteorološke i okeanografske podatke, kao i informacije o plovilu, kako bi generisao putne tačke koje omogućavaju plovilu da na najekonomičniji način dostigne svoje odredište. Rezultat proračuna obično uključuje optimalne putne tačke uz optimalne brzine i kurseve. Savremeni sistemi vođenja plovila

koriste:

- Analizu površine mora i meteorološke modele za predviđanje vremenskih pojava,
- Modele talasa,
- Modele uragana i tropskog vremena,
- Modele morskih struja,
- Performanse plovila zasnovane na prethodnim podacima,
- Optimizaciju putanje prema zadatom vremenu dolaska,
- Različite metode za prikupljanje meteoroloških podataka (internet, satelit).

Optimalna putanja generiše se pomoću numeričke optimizacije u *off-line* režimu. Ovaj proces se izvršava na računaru koji se nalazi na brodu ili na obali, ali koji podatke šalje plovilu svakih 24 sata [2]. Međutim, da bi upravljanje bilo što efikasnije, neophodni su odgovarajući senzori i navigacioni sistem, koji će biti opisani u narednom dijelu.

2.5 Magnetni i žiroskopski kompas

Kompasi mogu funkcionisati na osnovu magnetne ili žiroskopske akcije, kao i putem određivanja pozicije Sunca ili drugih zvijezda. U narednom dijelu fokus će biti na kompasima koji se oslanjaju na Zemljino magnetno polje ili na žiroskopski princip, budući da su ovi tipovi najčešće korišćeni u praksi.

2.5.1 Magnetni kompas

Magnetni kompas, izum koji potiče iz Kine, stigao je u Evropu prije povratka Marka Pola 1295. godine [26]. Iako je prošlo više od sedam vijekova od njegovog otkrića, magnetni kompas i dalje predstavlja ključni instrument na mnogim brodovima.

Ovaj jednostavni uređaj se sastoji od magnetnog materijala poznatog kao igla kompasa, koja ima sposobnost rotacije. Zemljino magnetno polje deluje na iglu, omogućavajući preciznu orijentaciju prema magnetskom polu Zemlje. Važno je napomenuti da se igla usmjerava prema magnetskom, a ne geografskom polu, jer je osa rotacije Zemlje pomjerena u odnosu na magnetski pol. Ta razlika se naziva deklinacija i mora biti kompenzovana prilikom navigacije. Zbog svoje osjetljivosti na magnetske varijacije i deklinaciju, magnetni kompas je izazivao poteškoće u navigaciji. Međutim, izumom žirokompasa, ovi problemi su uspješno prevaziđeni.

2.5.2 Žirokompas

Žirokompas je disk koji se može rotirati oko svojih osa x i y, a njegova orijentacija ostaje stabilna bez obzira na pomijeranje baze. Početkom 20. vijeka, s pojavom prvog žirokompasa, problem magnetnih varijacija u brodskoj navigaciji je eliminisan. Međutim, ovaj kompas se pokazao nepouzdanim tokom valjanja broda jer je izazivao takozvanu "interkardinalnu grešku kotrljanja".

Interkardinalna greška u žirokompasu odnosi se na grešku kursa koja se javlja pretežno prilikom putovanja na interkardinalnim kursevima, odnosno na pravcima pod uglom od 45° između kardinalnih tačaka (npr. sjeveroistok, jugoistok, jugozapad, sjeverozapad). Ove greške nastaju uslijed interakcije između žiroskopskih sila i Zemljine rotacije, kao i efekata ubrzanja na sistem kompasa. Već 1912. godine, *Anschütz* je unaprijedio dizajn žirokompasa, rješivši problem greške prouzrokovane kotrljanjem, što je omogućilo širu primjenu ovog uređaja u brodovima.

2.6 Navigacija

Nekoliko sistema za pozicioniranje je dostupno u komercijalne svrhe kao što su lokalni hidroakustični referentni sistem za pozicioniranje (HPR) i globalni navigacioni satelitski sistem (GNSS). Neki od najpoznatijih GNSS su: američki Navstar GPS, ruski GLONASS i evropski *Galileo*.

2.6.1 Navstar GPS

Navstar GPS je sistem satelita koji omogućava precizno pozicioniranje i očitavanje vremena za plovila, vozila i avione. Razvijen je 1973. godine od strane američke vlade, a prvi put su njegove mogućnosti demonstrirane tokom Zalivskog rata 1991. godine. Nakon toga, GPS je postao neizostavan dio mnogih pomorskih, kopnenih i vazdušnih sistema. Iako je prvobitno bio namijenjen za vojne svrhe, GPS je pronašao široku primjenu i u civilnom sektoru. Uklanjanjem takozvane "Selektivne dostupnosti" 1. maja 2000. godine, koja je bila metoda koju je američko Ministarstvo odbrane koristilo za smanjenje tačnosti GPS-a za civilnu upotrebu, precizna navigacija postala je pristupačna i široko dostupna po niskim cijenama.

2.6.2 Diferencijalni GPS (DGPS)

Prije 2000. godine, navigacioni sistemi u civilnom sektoru imali su slabije performanse, što je stvorilo potrebu za tačnijim navigacionim rješenjima. Kao odgovor na ovu potrebu, razvijen je sistem diferencijalnog globalnog pozicioniranja (DGPS). Ovaj sistem funkcioniše tako što glavni prijemnik, postavljen na fiksnoj lokaciji na kopnu, čija je tačna pozicija poznata, mjeri greške u pozicioniranju. Nakon

toga, te greške se prenose prijemniku na brodu, omogućavajući korekciju pozicije. Korišćenjem ovog sistema, horizontalna preciznost je povećana na manje od jednog metra. Kasnije su razvijeni i sistemi koji obuhvataju uža i šira područja, čime su unaprijeđene mogućnosti precizne navigacije.

2.6.3 Diferencijalni GPS sa faznom korekcijom nosioca

GPS prijemnik ima mogućnost praćenja pomjeraja faze nosioca i kao izlaz generiše dio mjerenja faze pri svakoj epohi. Jednostavno rečeno, mjerenje faze nosioca predstavlja mjerenje razdaljine između satelita i prijemnika izraženo u jedinicama ciklusa nosioca frekvencije. Ovo mjerenje može se obaviti sa vrlo visokom preciznošću (u opsegu milimetara), ali cijeli broj ciklusa između satelita i prijemnika nije mjerljiv.

Dobara analogija za ovo je zamisliti mjernu traku koja se proteže od satelita do prijemnika, sa označenim markerima na svakih jedan milimetar. Nažalost, numeracija markera se vraća na nulu sa svakom talasnom dužinom (približno 20 centimetara za GPS L1). Ovo nam omogućava da veoma precizno mjerimo razdaljinu, ali sa nejasnoćom u broju cijelih ciklusa nosioca [27]. Ukupna mjerenja faze sadrže nepoznat broj ciklusa nosioca, i ovo se naziva broj dvosmislenosti (N). Ovaj broj, ukoliko ga je moguće pronaći, omogućava izuzetno veliku tačnost u pozicioniranju jer je preciznost mjerenja faze oko 0.01 ciklusa, odnosno 2mm za GPS L1. Korišćenjem ovog tipa pozicioniranja moguće je dostići veliku tačnost, ali ovaj tip sistema nije robustan kao GPS ili DGPS.

2.6.4 Inmarsat

Inmarsat je implementacija diferencijalnog servisa za široka područja. Inmarsat predstavlja konzorcijum od 80 država koji je stvoren 1979-te godine kako bi pružio mobilne usluge na moru u većem dijelu svijeta. Korišćenje 4 geostacionarna satelita pruža pokrivenost od $+70°$ do $-70°$ geografske širine. Sateliti šalju podatke mnogim umreženim stanicama na kopnu čime se dopunjava pokrivenost GPS-a i GLONASS sistema, a to doprinosi poboljšanju preciznosti, pokrivenosti i pouzdanosti.

2.7 Inercijalni sistemi mjerenja

Korišćenje inercionih sistema za mjerenja je postalo sve češće zbog smanjenja cijene proizvodnje ovih uređaja. Zbog toga se jeftiniji inercijalni senzori mogu integrisati sa satelitskom navigacijom pomoću Kalmanovog filtera ili nelinearnih observera, čime se povećava tačnost sistema za pozicioniranje. Inercijalna mjerna jedinica (eng. *Inertial measurement unit*) se sastoji od inercijalnih senzora, hardverskog di-

jela zaduženog za očitavanje senzora i softvera koji vrši odabiranje, kalibirsanje temperature i kompenzaciju vibracija. Inercijalni navigacioni sistem se sastoji iz dijela za mjerenje i softvera koji vrši računanje pozicije i brzine na osnovu mjerenja. Prilikom integracije ugaone brzine i linearnog ubrzanja potrebno je spriječiti odstupanje korišćenjem GNSS-a kao reference za poziciju. Dvije osnovne komponente ovih sistema su definisane u nastavku.

2.7.1 Žiroskop

Žiroskop je rotirajući točak koji koristi zakon održanja momenta impulsa za detekciju rotacije. Sa razvojem naprednih tehnologija pojavili su se optički žiroskopi koji pružaju izuzetnu preciznost, ali su i veoma skupi, te su postali ključni dio mjernih instrumenata u sofisticiranim sistemima. Za ekonomičnije sisteme, žiroskopi zasnovani na mikroelektromehaničkim sistemima (*MEMS*) dominiraju zbog svoje pristupačne cijene i dobrih performansi.

2.7.2 Akcelerometar

Postoje različiti tipovi akcelerometara, ali se uglavnom mogu podijeliti u dvije grupe:

- mehanički,
- vibracioni.

Mehanički akcelerometar može biti klatno koje je zasnovano na drugom Njutnovom zakonu:

$$F = ma. \tag{2.8}$$

Sila koja djeluje na tijelo sa masom m izaziva ubrzanje tijela. Kada je kućište senzora pod uticajem ubrzanja koje djeluje u pravcu osjetljive ose senzora, masa pokušava da se odupre promjeni kretanja zbog svoje inercije i kao rezultat masa se pomijera u odnosu na kućište uređaja. U ustaljenom stanju sile koje djeluju na senzor su uravnotežene pomoću opruga. Izduženje ili sabijanje opruge uslijed djelovanja sile na kućište senzora je proporcionalno ubrzanju.

Akcelerometri zasnovani na vibraciji koriste mjerenje promjene frekvencije u žici zbog sabijanja ili istezanja. Način rada je sličan gudačkim instrumentima. Ukoliko je žica zategnuta, frekvencija tona je viša, a ukoliko se žica opusti, ton ima nižu frekvenciju. Masa koja se nalazi na stubu od kvarca utiče na frekvenciju samog kvarca, ukoliko je kvarc sabijen frekvencija je viša. Promjena frekvencije kvarca je takođe proporcionalna sili, a time i ubrzanju koje djeluje na senzor.

2.8 LOS zakon vođenja

U ovom dijelu poglavlja će biti prezentovan osnovni oblik LOS zakona vođenja, kao i njegova modifikacija koja omogućava kompenzaciju uticaja bočnog klizanja na kretanja vozila. LOS zakon vođenja se zasniva na oponašanju iskusnog kormilara tako što pokušava da navede plovilo na osnovu putnih tačaka koje se nalaze na određenoj udaljenosti na željenoj putanji. Zbog svoje efikasnosti i računarske jednostavnosti ovaj tip vodenja je privukao veliku pažnju istraživača.

2.8.1 Definisanje problema

Princip rada LOS (*Line-of-Sight*) zakona vođenja je ilustrovan na slici 2.2, na kojoj su grafički prikazane varijable potrebne za njegovu implementaciju. Prvi korak u primjeni ovog zakona je definisanje referentnog sistema vozila. Najčešće se koristi geocentrični sistem, gdje je osa X_I usmjerena ka sjeveru, dok je osa Y_I usmjerena ka istoku. Plovilo dobija informacije o svojoj poziciji putem senzora, poput GPS-a, koji su opisani u prethodnim dijelovima rada.

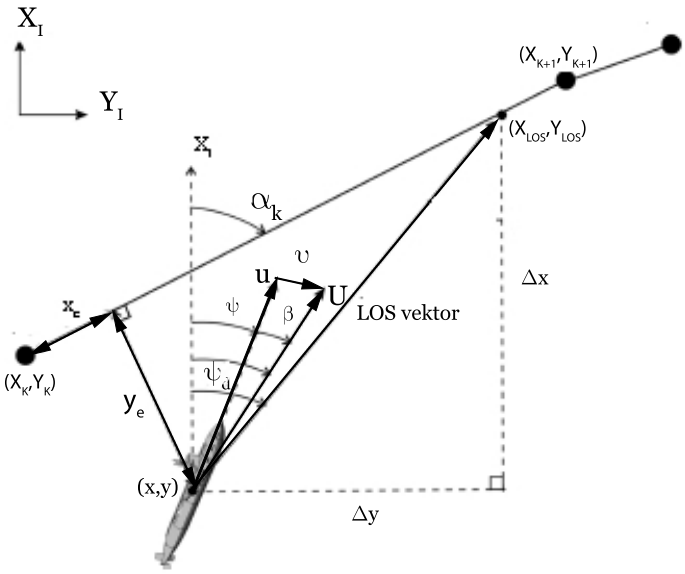
S obzirom na to da je plovilo nepotpuno upravljivo, moguće je kontrolisati brzinu zalijetanja u i ugao skretanja ψ, koji predstavlja otklon od X_I ose. U ovom radu razmatra se i uticaj poremećaja uslovljenih morskim strujama, koje utiču na kretanje plovila. Ovi poremećaji, opisani u prethodnom poglavlju, imaju uticaja kako na brzinu zalijetanja u, tako i na brzinu zanošenja v, što dovodi do formiranja ugla bočnog klizanja β. Bočni klizni ugao se definiše kao $\beta = atan2(v, u)$, dok se rezultantna brzina plovila U računa kao $U = \sqrt{u^2 + v^2}$.

Problem praćenja putanje svodi se na generisanje referentne putanje, što se može postići na više načina, kao što su ranije opisani metodi: interpolacija, generisanje putanje iz niza putnih tačaka, ili korišćenje parametarske matematičke funkcije koja opisuje željenu putanju.

Prvo će biti prikazan pristup rješavanju problema praćenja putanje kada su putne tačke povezane metodom interpolacije. Nakon toga, biće demonstriran i način praćenja putanje kada su putne tačke povezane glatkom funkcijom.

Pošto se za rješavanje problema vođenja koriste dva koordinatna sistema, sistem vezan za tijelo plovila i inercijalni sistem u kojem je putanja definisana, potrebno je uvesti promjenljive pomoću kojih se definišu performanse praćenja putanje. Neka (X_K, Y_K) označava virtuelnu tačku u kojoj vozilo treba da se nalazi u trenutnom vremenskom koraku. Povlačenjem tangente kroz ovu tačku na zadatoj putanji moguće je odrediti ugao tangente α_k, koji se koristi za definisanje grešaka u praćenju putanje i prikazan je na slici 2.2.

Dvije ključne greške koje opisuju performanse praćenja putanje su greška duž



Slika 2.2: Definicija LOS vektora

putanje x_e i greška položaja y_e, koje predstavljaju odstupanje vozila od željene pozicije na putanji. U implementaciji LOS (*Line-of-Sight*) zakona, neophodno je kontinuirano računati LOS vektor, vektor koji spaja trenutnu poziciju vozila sa sljedećom referentnom tačkom na putanji.

Ovaj LOS vektor je osnov za izračunavanje upravljačkih signala, koji se koriste za određivanje željenog ugla kursa ψ_d, omogućavajući tako efikasno upravljanje vozilom ka zadatoj putanji i definiše se na sljedeći način:

$$\psi_d = atan2(y_k - y(t), x_k - x(t)). \tag{2.9}$$

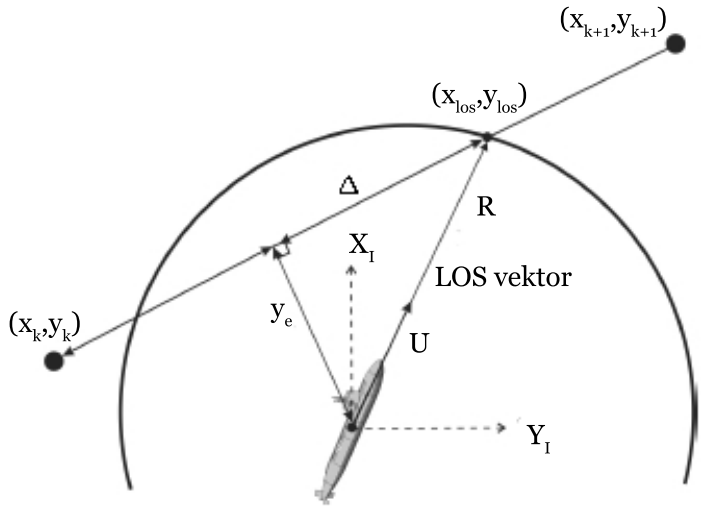
Arkus tangens funkcija $atan2(y, x)$ se koristi kako bi obezbijedilo sljedeće svojstvo:

$$-\pi \leq atan2(y, x) \leq \pi. \tag{2.10}$$

U situacijama kada LOS vektor prelazi između dvije putne tačke, postoji mogućnost da se sljedeća referentna tačka nalazi daleko od plovila, što može izazvati velike greške u položaju. Ovo može negativno uticati na algoritam vođenja, degradirati performanse upravljanja, naročito u prisustvu morskih poremećaja, kao što su vjetar i struje.

Zbog toga se LOS vektor definiše na precizniji način, kao vektor koji povezuje trenutne koordinate plovila sa tačkom (x_{los}, y_{los}) na putanji. Ova tačka se nalazi između dvije putne tačke i prikazana je na slici 2.2.

Uvođenjem ovog pristupa, željeni ugao skretanja definiše se kao:



Slika 2.3: Krug prihvatanja [1]

$$\psi_d = atan2(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)). \tag{2.11}$$

Razlika između ove jednačine i (2.9) je što u ovom slučaju se generiše nova tačka na putanji koja se nalazi između putnih tačaka. LOS koordinate (x_{los}, y_{los}) mogu da zadovoljavaju jednačinu:

$$\begin{aligned} &(y_{los} - y(t))^2 + (x_{los} - x(t))^2 = (nL_{pp})^2 = R^2, \\ &\left(\tfrac{y_{los}-y_{k-1}}{x_{los}-x_{k-1}}\right) = \left(\tfrac{y_k-y_{k-1}}{x_k-x_{k-1}}\right) = const. \end{aligned} \tag{2.12}$$

U prethodnoj jednačini L_{pp} predstavlja dužinu plovila, dok n označava koliko se dužina plovila uvažava. Drugi dio sistema jednačina prikazuje da dvije susjedne putne tačke moraju da imaju konstantan nagib putanje između njih, tj. povezane su pravom linijom.

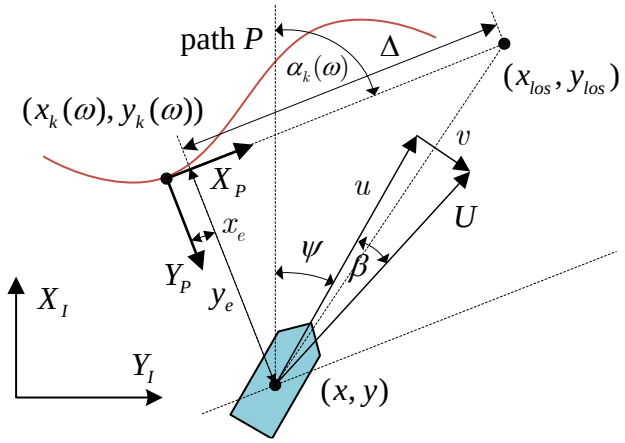
Prilikom kretanja plovila potreban je određeni mehanizam za odabir sljedeće tačke. Krug prihvatanja je jedan način gdje se sljedeća tačka (x_{k+1}, y_{k+1}) može izabrati jedino ako se plovilo nalazi na udaljenosti R_0 od tačke (x_k, y_k). Ako pozicija plovila zadovoljava:

$$(x_k - x(t))^2 + (y_k - y(t))^2 \leq {R_0}^2 \tag{2.13}$$

sljedeća tačka (x_{k+1}, y_{k+1}) treba biti izabrana. Obično se R_0 bira kao dvije dužine broda tj. $R_0 = 2L_{pp}$. Krug prihvatanja je prikazan na slici 2.3.

U ovome radu se koristi drugačiji način stvaranja budućih tačaka, koristeći već poznate i mjerljive vrijednosti plovila kao što je prikazano na slici 2.4. Na osnovu njih stvaraju se buduće tačke u kojima bi vozilo trebalo da se nađe u sljedećem

vremenskom odbirku.



Slika 2.4: LOS zakon vođenja

Pošto se ugao tangente na putanju α_k smatra poznatim, kao i pozicija plovila i tačka na putanji u kojoj bi trebalo vozilo trenutno da se nalazi, moguće je izvesti izraz za grešku duž putanje i grešku položaja

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_k & -\sin\alpha_k \\ \sin\alpha_k & \cos\alpha_k \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_k(\omega) \\ y - y_k(\omega) \end{bmatrix}. \tag{2.14}$$

Malo k označava da se radi o nizu vrijednosti pošto se prilikom kretanja po generalnoj putanji ugao tangente mijenja, kao i pozicija tačke duž putanje koju plovilo treba da prati. Svaka ova vrijednost je definisana u svakom vremenskom odbirku. Diferenciranjem (2.14) po vremenu dolazi se do sljedećih jednačina:

$$\begin{aligned} \dot{x_e} &= (\dot{x} - \dot{x_d}(\dot{\omega}))\cos\alpha_k - (x - x_d(\omega))\sin\alpha_k\,\dot{\alpha_k} \\ &+(\dot{y} - \dot{y_d}(\dot{\omega}))\sin\alpha_k + (y - y_d(\omega))\cos\alpha_k\,\dot{\alpha_k}, \\ \dot{y_e} &= -(\dot{x} - \dot{x_d}(\dot{\omega}))\sin\alpha_k - (x - x_d(\omega))\cos\alpha_k\,\dot{\alpha_k} \\ &+(\dot{y} - \dot{y_d}(\dot{\omega}))\cos\alpha_k - (y - y_d(\omega))\sin\alpha_k\,\dot{\alpha_k}. \end{aligned} \tag{2.15}$$

Zatim, uvođenjem (1.7) u prethodni sistem dobija se sljedeći sistem:

$$\begin{aligned} \dot{x_e} &= \underbrace{u\cos(\psi - \alpha_k) - v\sin(\psi - \alpha_k)}_{n_1} \\ &+\dot{\alpha_k}y_e - \underbrace{(\dot{x_k}\dot{\omega}\cos\alpha_k + \dot{y_k}\dot{\omega}\sin\alpha_k)}_{n_2}, \\ \dot{y_e} &= \underbrace{u\sin(\psi - \alpha_k) + v\cos(\psi - \alpha_k)}_{m_1} \\ &-\dot{\alpha_k}x_e + \underbrace{(\dot{x_k}\dot{\omega}\sin\alpha_k - \dot{y_k}\dot{\omega}\cos\alpha_k)}_{m_2}. \end{aligned} \tag{2.16}$$

Pretvaranjem članova jednačina n_1, n_2, m_1 i m_2 u amplitudno-faznu formu slijedi:

$$\begin{aligned} &\dot{x_e} = \sqrt{u^2 + v^2}\cos(\psi - \alpha_k + \beta) \\ &+\dot{\alpha_k} y_e - \dot{\omega}\sqrt{{x'_k}^2 + {y'_k}^2}, \\ &\dot{y_e} = \sqrt{u^2 + v^2}\sin(\psi - \alpha_k + \beta) \\ &-\dot{\alpha_k} x_e. \end{aligned} \tag{2.17}$$

Prilikom prelaska u amplitudno-faznu formu može se primijetiti da se uvažava uticaj ugla bočnog klizanja koji je definisan kao $\beta = atan2(v, u)$, a sabirak m_2 u jednačini greške položaja y_e se skrati. Daljim uprošćavanjem i zamjenom $\dot{\omega}\sqrt{{x'_k}^2 + {y'_k}^2}$ u jednačini za grešku duž putanje x_e sa u_p koje predstavlja brzinu virtuelne tačke na putanji koju treba pratiti dobija se konačni sistem jednačina:

$$\begin{aligned} &\dot{x_e} = U\cos(\psi - \alpha_k)\cos\beta - U\sin(\psi - \alpha_k)\sin\beta \\ &+\dot{\alpha_k} y_e - u_p, \\ &\dot{y_e} = U\sin(\psi - \alpha_k)\cos\beta + U\cos(\psi - \alpha_k)\sin\beta \\ &-\dot{\alpha_k} x_e. \end{aligned} \tag{2.18}$$

Ovaj sistem jednačina opisuje dinamiku grešaka u praćenja putanje koje će se u kasnijem dijelu ovoga rada koristiti za izvođenje novog algoritma za vođenje plovila.

Pošto je $u_p = \dot{\omega}\sqrt{{x'_k}^2 + {y'_k}^2}$ da se zaključiti da će sljedeća tačka biti izabrana uz pomoć parametra ω koji se mijenja kroz vrijeme kao:

$$\dot{\omega} = \frac{u_p}{\sqrt{{x'_k}^2 + {y'_k}^2}}. \tag{2.19}$$

Iz prethodne jednačine se zaključuje da odabir buduće tačke zavisi od brzine virtuelne tačke i ta brzina se treba odabrati tako da umanjuje grešku duž putanje x_e, tj. da je stabilizuje. Odabir ove brzine će biti detaljnije objašnjen u sljedećoj glavi.

Nakon odabira budućih tačaka i definisanja potrebnih parametara performansi praćenja putanje potrebno je i definisati LOS zakon vođenja, gdje je željeni ugao definisan na sljedeći način:

$$\psi_d = \alpha_k + \chi_e, \tag{2.20}$$

gdje je χ_e ugao koji obezbjeđuje da vektor brzine bude usmjeren ka budućoj tački na putanji koja je udaljena za *lookahead* distancu Δ u odnosu na projekciju na putanju:

$$\chi_e = arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right). \tag{2.21}$$

Ovaj oblik je mnogo manje zahtjevan po pitanju kompjuterskih resursa u odnosu na ostale implementacije LOS zakona i podržava velike greške položaja, dok u sistemu iz (2.12) mora biti zadovoljeno $R \geq |y_e|$.

Novi zakon vođenja poprima sljedeći izgled:

$$\psi_d = \alpha_k + arctan\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right). \tag{2.22}$$

Prethodna formula demonstrira da odabir Δ utiče na agresivnost upravljanja. Pri malim vrijednostima Δ brže su promjene željenog ugla, jer će se češće mijenjati željena tačna na putanji, a za veće vrijednosti sporije. Samim time se može primijeniti već navedena vrijednost $R_0 = 2L_{pp} = \Delta$ koja u izboru *lookahead* distance uvodi i dužinu plovila [28], čime se implementira i zavisnost od sposobnosti skretanja pomorskih vozila.

Ukoliko na vozilo djeluju i poremećaji, prethodni zakon vođenja je potrebno modifovati na adekvatan način kako bi se kompenzovao uticaj poremećaja. Iako je moguće koristiti instrumente za mjerenje bočnog klizanja, njihova visoka cijena doprinosi istraživanju alternativnih načina identifikacije bočnog klizanja. Ukoliko je ugao bočnog klizanja poznat LOS zakon postaje:

$$\psi_d = \alpha_k - arctan\left(\frac{y_e}{\Delta} + \beta\right). \tag{2.23}$$

Ovakav oblik predstavlja idealni LOS zakon sa kompenzacijom poremećaja od morskih struja i vjetrova, međutim mjerenje ovog ugla putem senzora je veoma skupo i u sljedećem dijelu će biti prezentovane modifikacije klasičnog LOS zakona vođenja kod kojih se kompenzacija ugla bočnog klizanja vrši korišćenjem drugačijeg pristupa.

Poglavlje 3

LOS zakoni vođenja

U ovom poglavlju analizirani su najčešće korišćeni zakoni vođenja zasnovani na Line-of-Sight (LOS) principu. Pored adaptivnog zakona vođenja i zakona zasnovanog na estimatorima stanja, u poglavlju će biti izveden novi zakon vođenja koji koristi Kalmanov filter. Ovaj zakon je osmišljen za praćenje generalne putanje, uz kompenzaciju ugla bočnog klizanja, čime se poboljšava preciznost i stabilnost vođenja.

3.1 ALOS

Proporcionalni zakon vođenja koji ima mogućnosti kompenzacije ugla bočnog klizanja je uveden u radovima [29] i [30], pri čemu je ovaj zakon definisan na sljedeći način:

$$\psi_d = \alpha_k(\theta) - arctan(k_p y_e) - \beta, \tag{3.1}$$

gdje $k_p = 1/\Delta$ predstavlja proporcionalno pojačanje, dok je Δ *lookahead* rastojanje. Član β se koristi za kompenzaciju ugla bočnog klizanja. Međutim, ovaj zakon zahtijeva dodatne senzore koji mogu mjeriti ugao bočnog klizanja, što stvara potrebu za sofisticiranijim zakonima vođenja. Kao poboljšanje ovog zakona, u radu [31] uveden je proporcionalno-integralni zakon vođenja, koji je definisan kao:

$$\psi_d = \alpha_k(\theta) - arctan(k_p y_e + k_{int} y_{int}), \tag{3.2}$$

gdje su k_p proporcionalno, a k_i integralno pojačanje. Član y_{int} je integralne prirode i koristi se za kompenzaciju nepoznatog ugla bočnog klizanja. Dinamika člana y_{int} definisana je izrazom kao u [31], [32], [33]:

$$\dot{y_{int}} = \frac{\Delta y_e}{\Delta^2 + (y_e + k_{int}\Delta y_{int})^2}. \tag{3.3}$$

Glavni nedostatak ovog zakona je u njegovoj dinamici. Zbog većeg uticaja greške položaja u imeniocu, pri velikim greškama položaja integralno dejstvo postaje manje izraženo, što smanjuje efikasnost kompenzacije. Jedno od rješenja za mane oba prethodno pomenuta zakona vođenja jeste nelinearni integralni LOS zakon, baziran na teoriji adaptivnog upravljanja [15], poznatiji kao ALOS. Ovaj zakon je dizajniran za scenarije u kojima su uglovi bočnog klizanja konstantni ili se sporo mijenjaju kroz vrijeme, a odlikuje ga jednostavna implementacija.

Ako se u jednačini (2.14) parametar ω odabere tako da greška duž putanja x_e uvijek bude jedanaka nuli, jedančina (2.18) se može pojednostaviti na sljedeći način:

$$\dot{y_e} = U\sin(\psi - \alpha_k)\cos\beta + U\cos(\psi - \alpha_k)\sin\beta. \tag{3.4}$$

Ukoliko je ugao bočnog klizanja mali i sporo promjenljiv ili konstantan, moguće je koristiti aproksimaciju $cos(\beta) \approx 1$ i $sin(\beta) \approx \beta$, čime prethodna jednačina poprima oblik:

$$\dot{y_e} = U\sin(\psi - \alpha_k) + U\cos(\psi - \alpha_k)\beta. \tag{3.5}$$

Za dalje izvođenje potrebno je prvo definisati proporcionalni zakon koji glasi:

$$\psi_d = \alpha_k + arctan\left(-\frac{1}{\Delta}(y_e + \alpha)\right), \tag{3.6}$$

gdje je α ulazni parametar koji je potrebno dizajnirati. Sljedeća svojstva trigonometrijskih funkcija se koriste u daljoj analizi [15]:

$$\begin{aligned} \sin\left(arctan\left(-\tfrac{1}{\Delta}\left(y_e + \alpha\right)\right)\right) &= -\tfrac{y_e+\alpha}{\sqrt{\Delta^2+(y_e+\alpha)^2}}, \\ \cos\left(arctan\left(-\tfrac{1}{\Delta}\left(y_e + \alpha\right)\right)\right) &= \tfrac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2+(y_e+\alpha)^2}}. \end{aligned} \tag{3.7}$$

Uvrštavanje prethodnog sistema jednačina u jednačinu (3.5) daje:

$$\dot{y_e} = -\frac{U(y_e + \alpha)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \alpha)^2}} + \frac{U\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \alpha)^2}}\beta. \tag{3.8}$$

U implementaciji adaptivnog zakona vođenja, estimirana vrijednost ugla bočnog klizanja označava se kao $\hat{\beta}$, dok je greška u estimaciji ugla bočnog klizanja definisana kao $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$. Adaptivni kontroler se dizajnira tako da ulazni parametar $\alpha = \Delta\hat{\beta}$ kompenzuje ugao bočnog klizanja β. Na osnovu ove definicije ulaznog parametra α, adaptivni LOS (ALOS) zakon vođenja dobija sljedeći oblik:

$$\psi_d = \alpha_k + arctan\left(-\frac{1}{\Delta}y_e - \hat{\beta}\right), \tag{3.9}$$

gdje je dinamika estimatora ugla bočnog klizanja:

$$\dot{\hat{\beta}} = \gamma \frac{U\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \left(y_e + \Delta\hat{\beta}\right)^2}} y_e \ , \ y_e > 0. \tag{3.10}$$

Teorema: Pod pretpostavkom da $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ i $0 < U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$, adaptivni LOS zakon vodjenja (3.9)-(3.10) obezbjeđuje uniformnu semiglobalnu ekosponenciajnu stabilnost (USGES) ekvilibrijuma $(y_e, \tilde{\beta}) = (0, 0)$ sistema (3.5) [15].

Dokaz. Dokaz teoreme je zasnovan na [15]. Jednačina (3.8) za $\alpha = \Delta\hat{\beta}$ postaje:

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

Pošto su i U i Δ vremenski promjenljive varijable zaključuje se da dinamika greške položaja nije autonomna. Razmotrimo Ljapunovu funkciju:

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

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

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

Pošto je $\dot{\tilde{\beta}} = -\dot{\hat{\beta}}$, jednačina (3.10) se može uvrstiti u (3.13), odakle slijedi:

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

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

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

Ukoliko definišemo $x = [x_1, x_2]^{\mathrm{T}} := \left[y_e, \tilde{\beta}\right]^{\mathrm{T}}$, takvo da je

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

za $\bar{r} > 0$ i $\|x(t)\| \leq \bar{r}$, imamo:

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

Iz jednačina (3.10) i (3.11) slijedi:

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

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

Kako bi se dokazala USGES osobina koristimo sljedeću Ljapunovu funkciju:

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

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

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon \\ -\varepsilon & 1/\gamma \end{bmatrix} > 0. \tag{3.21}$$

Time je

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

Dalje imamo

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

gdje je

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

Matrica $Q(t)$ je vremenski promjenljiva, ali važi da je $0 < \Delta_{\min} \leq \Delta(t) \leq \Delta_{\max}$ za svako $t \geq 0$. Samim tim, za svako $\gamma > 0$ postoji pozitivna konstanta ε za koju važi:

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

čime se garantuje da je

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

gdje je $p_{\max} = \max\{1, 1/\gamma\}$ i $q_{\min} = \lambda_{\min}(Q)$. S obzirom na (3.15), prethodno navedeno važi za sve trajektorije generisane na osnovu početnih uslova $x(t_0)$. Sada se možemo pozvati na lemu (Lema 3.4, [34]), 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 tačka ekvilibrijuma $x = 0$ USGES (Definicija 2.7, [35]). □

Ovaj zakon unaprjeđuje praćenje putanje uz kompenzaciju ugla bočnog klizanja, i to bez potrebe za skupim senzorima. Međutim, i dalje pokazuje određene nedostatke. Prvi problem leži u tome što, kao adaptivni algoritam, može izazvati oscilacije u upravljačkom signalu pri korišćenju velikih adaptivnih pojačanja. Drugi nedostatak odnosi se na dinamiku estimacije ugla bočnog klizanja iz jednačine (3.10), gdje je uočena značajna zavisnost od greške položaja y_e. Ova zavisnost negativno utiče na performanse algoritma, naročito kada se vozilo nalazi daleko od zadate putanje.

3.2 PLOS

U poređenju sa ALOS zakonom iz rada [15], zakon zasnovan na estimatorima poznatiji kao PLOS (*Predictor based LOS*), otklanja nekoliko ključnih nedostataka ALOS pristupa. Prvo, neželjeni tranzijenti koji nastaju prilikom ažuriranja ALOS zakona uslijed velikih grešaka položaja mogu se u potpunosti izbjeći primjenom PLOS zakona. Drugo, PLOS omogućava bržu estimaciju ugla bočnog klizanja bez stvaranja značajnih oscilacija, koje se kod ALOS zakona često javljaju kada se koriste velike vrijednosti adaptivnih pojačanja. Na taj način, PLOS osigurava preciznije vođenje sa manjim oscilacijama. Treće, izbor adaptivnih parametara kod PLOS algoritma je jednostavniji u poređenju sa ALOS zakonom vođenja [36].

PLOS zakon vođenja se zasniva na kinematičkom modelu površinskog vozila koji se koristi za estimaciju grešaka u praćenju putanje, i adaptivnog estimatora koji na osnovu grešaka u estimaciji praćenja putanje vrši estimaciju ugla bočnog klizanja [36]. Kao i kod ALOS zakona, pretpostavlja se da je ugao bočnog klizanja mali i sporopromjenljiv, što dozvoljava korišćenja aproksimacija $cos(\beta) \approx 1$ i $sin(\beta) \approx \beta$. Samim tim, izrazi za dinamiku grešaka u praćenju putanje imaju sljedeći oblik:

$$\begin{aligned} &\dot{x_e} = U\cos(\psi - \alpha_k) - U\sin(\psi - \alpha_k)\beta \\ &+\dot{\alpha_k} y_e - u_p, \\ &\dot{y_e} = U\sin(\psi - \alpha_k) + U\cos(\psi - \alpha_k)\beta \\ &-\dot{\alpha_k} x_e. \end{aligned} \tag{3.28}$$

Polazeći od (3.28), moguće je definisati sljedeće estimatore grešaka u praćenju putanje:

$$\begin{aligned} &\dot{\hat{x_e}} = U\cos(\psi - \alpha_k) - U\sin(\psi - \alpha_k)\hat{\beta} \\ &+\dot{\alpha_k}\hat{y_e} - u_p - k_1\tilde{x_e}, \\ &\dot{\hat{y_e}} = U\sin(\psi - \alpha_k) + U\cos(\psi - \alpha_k)\hat{\beta} \\ &-\dot{\alpha_k}\hat{x_e} - k_2\tilde{y_e}, \end{aligned} \tag{3.29}$$

gdje su $\tilde{x_e} = \hat{x_e} - x_e$ i $\tilde{y_e} = \hat{y_e} - y_e$ greške u estimaciji, a k_1 i k_2 pozitivne konstante. Brzina virtuelne tačke je definisana kao $u_p = Ucos(\psi - \alpha_k) - Usin(\psi - \alpha_k)\hat{\beta} + k\hat{x_e}$.

Estimacija ugla bočnog klizanja se vrši na osnovu grešaka u praćenju i to na sljedeći način:

$$\dot{\hat{\beta}} = \Gamma\left[Usin(\psi - \alpha_k)\tilde{x_e} - Ucos(\psi - \alpha_k\tilde{y_e})\right]. \tag{3.30}$$

Konačno, dinamika grešaka u estimaciji stanja se može zapisati na sljedeći način:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x_e}} = -U\sin(\psi - \alpha_k)\tilde{\beta} - k_1\tilde{x_e}, \\ \dot{\tilde{y_e}} = U\cos(\psi - \alpha_k)\tilde{\beta} - k_2\tilde{y_e}, \\ \dot{\tilde{\beta}} = \Gamma\left[Usin(\psi - \alpha_k)\tilde{x_e} - Ucos(\psi - \alpha_k\tilde{y_e})\right]. \end{cases} \tag{3.31}$$

U okviru sljedeće leme je pokazano da je evkilibrijum sistema (3.31) globalno uniformno asimptotski stabilan (GUAS).

Lema 1. *Adaptivni zakon* (3.30) *obezbjeđuje globalnu uniformnu asimptotsku stabilnost (GUAS) ekvilibrijuma* $(\tilde{x_e}, \tilde{y_e})$ *sistema* (3.31) .

Dokaz. Korištenjem Ljapunove funckije

$$V_1 = \frac{1}{2}\tilde{x_e}^2 + \frac{1}{2}\tilde{y_e}^2 + \frac{1}{2}\Gamma^{-1}\tilde{\beta}^2, \tag{3.32}$$

čiji je izvod po vremenu uz primjenu jednačina (3.30) i (3.31)

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 = \tilde{x_e}\left(-U\sin\left(\psi-\alpha_k\right)\tilde{\beta}-k_1\tilde{x_e}\right)+\tilde{y_e}\left(U\cos\left(\psi-\alpha_k\right)\tilde{\beta}-k_2\tilde{y_e}\right)\\ +\tilde{\beta}\left(U\sin\left(\psi-\alpha_k\right)\tilde{x_e}-U\cos\left(\psi-\alpha_k\right)\tilde{y_e}\right)\leq -k_1{\tilde{x_e}}^2-k_2{\tilde{y_e}}^2,\end{aligned} \tag{3.33}$$

na osnovu **Teoreme 2.1** iz [37] se zaključuje da je sistem (3.31) GUAS. □

U [36] je pokazano da L_2 norme grešaka u estimaciji zadovoljavaju sljedeće jednakosti:

$$\left\|\tilde{x_e}\right\|_{L_2} = \frac{1}{\sqrt{2k_1}}\left(\left|\tilde{x_e}(0)\right|+\left|\tilde{y_e}(0)\right|+\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right), \tag{3.34}$$

$$\left\|\tilde{y_e}\right\|_{L_2} = \frac{1}{\sqrt{2k_2}}\left(\left|\tilde{x_e}(0)\right|+\left|\tilde{y_e}(0)\right|+\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right) \tag{3.35}$$

i

$$\left\|\dot{\hat{\beta}}\right\|_{L_2} = \Gamma U_{max}\left(\frac{1}{\sqrt{2k_1}}+\frac{1}{\sqrt{2k_2}}\right)\left(\left|\tilde{x_e}(0)\right|+\left|\tilde{y_e}(0)\right|+\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right). \tag{3.36}$$

L_2 norma mjeri oscilacije signala i povezuje ih sa njihovim frekventnim karakteristikama [36]. Prema istraživanju [38], manja L_2 norma $\dot{\hat{\beta}}$ ukazuje na manje oscilacije signala, što rezultira boljim tranzijentnim performansama.

Napomena 1. Iz jednačine (3.36), zaključuje se da se povećavanjem koeficijenata k_1 i k_2 smanjuje L_2 norma $\dot{\hat{\beta}}$, a time se smanjuju osilacije adaptivnog signala.

Napomena 2. Stanja estimatora (3.29) mogu se incijalizovati na nulu, čime se L_2 norma može zapisati kao

$$\left\|\tilde{x_e}\right\|_{L_2} = \frac{1}{\sqrt{2k_1}}\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right), \tag{3.37}$$

$$\left\|\tilde{y_e}\right\|_{L_2} = \frac{1}{\sqrt{2k_2}}\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right) \tag{3.38}$$

i

$$\left\|\dot{\hat{\beta}}\right\|_{L_2} = \Gamma U_{max}\left(\frac{1}{\sqrt{2k_1}}+\frac{1}{\sqrt{2k_2}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\left|\tilde{\beta}(0)\right|\right). \tag{3.39}$$

Napomena 3. U poređenju sa ALOS zakonom vođenja, gdje se greška položaja y_e koristi za ažuriranje adaptivnog zakona, PLOS omogućava značajno poboljšanje tranzijentnih performansi sistema. Ovo je moguće zbog činjenice da povećavanja koeficijenata k_1 i k_2, i inicijalizacija $\tilde{x_e}=0$ i $\tilde{y_e}=0$ doprinose smanjenju L_2 norme

adaptivnog signala.

Napomena 4. Korišćenjem PLOS zakona, glatka i brza indentifikacija ugla bočnog klizanja je moguća bez stvaranja oscilacija adaptivnog signala koje nastaju uslijed korišćenja velikih adaptivnih pojačanja. Ovo omogućava lakši izbor adaptivnih pojačanja za PLOS u odnosu na ALOS.

Na osnovu estimiranog ugla bočnog klizanja, zakon vođenja se dizajnira na sljedeći način:

$$\psi_d = \alpha_k(\omega) + arctan\left(-\frac{\hat{y_e}}{\Delta} - \hat{\beta}\right). \tag{3.40}$$

Iako je PLOS zahtevniji u pogledu računarske kompleksnosti, moderna procesorska jedinica omogućava njegovu implementaciju bez značajnih prepreka [36].

Za razliku od ALOS zakona [15], koji koristi grešku položaja y_e za estimaciju ugla bočnog klizanja, PLOS se oslanja na greške predikcije za ažuriranje adaptivnog zakona. Ova razlika omogućava dinamici greške predikcije bržu konvergenciju u poređenju sa dinamikom greške položaja. Kao rezultat toga, PLOS može da ostvari bržu adaptaciju koristeći velika adaptivna pojačanja, što dodatno olakšava izbor ovih pojačanja [36].

3.3 KFLOS zakon vođenja

Ova sekcija je podijeljena na dvije podsekcije koje se bave ključnim aspektima primjene Kalmanovog filtera. U prvoj podsekciji biće predstavljena opšta teorija Kalmanovog filtera, uz uvod u osnovne pojmove i koncepte koji su od značaja za razumijevanje njegove primjene. Druga podsekcija će se fokusirati na izvođenje predloženog LOS zakona, koji se oslanja na Kalmanov filter kako bi unaprijedio praćenje putanje i predstavlja proširenje [16] i [39]. U ovoj podsekciji biće detaljno objašnjen način implementacije ovog zakona.

3.3.1 Kalmanov filter

Ovaj dio je posvećen kratkom uvodu u diskretni Kalmanov prošireni filter (eng. *Extended Kalman Filter*, EKF), kao i njegovoj varijanti, "*Augmented*" EKF (AEKF). Detaljnije objašnjenje ovih filtera može se pronaći u radovima [40] i [41].

Kalmanov filter, predstavljen u radu [42], nudi rekurzivno rješenje za filtriranje diskretnih linearnih sistema. Sa razvojem računarskih tehnologija, ovaj filter postaje predmet sve većih istraživanja i primjena, naročito u oblastima kao što su autonomni roboti i navigacija, što dodatno ističe njegov značaj i sveprisutnost u savremenim sistemima [43].

Kalmanov filter funkcioniše kroz dva ključna koraka: korak predikcije i korak

korekcije. U koraku predikcije, filter predviđa buduće stanje sistema na osnovu prethodnih mjerenja i poznatih jednačina koje definišu sistem. Nakon toga, u koraku korekcije, prikupljeni podaci iz okoline putem senzora omogućavaju povratnu spregu, što dovodi do korekcije procijenjenog stanja iz koraka predikcije. Ova dva koraka zajedno omogućavaju kontinuirano unapređenje tačnosti estimacije stanja, čime se Kalmanov filter pokazuje kao efikasan alat za kontrolu sistema.

Osnovni oblik Kalmanovog filtera koji je predstavljen u [42] definisan je za sisteme linearnih diferencijalnih jednačina. Međutim, ukoliko je proces nelinearan moguće je koristiti Kalmanov filter gdje je proces linearizovan u okolini trenutnog stanja i koji se naziva Prošireni Kalmanov filter (EKF). Sistem je definisan kao:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n+1) &= f_d\left(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n), \boldsymbol{\omega}_d(n)\right), \\ \mathbf{y}(n) &= g_d\left(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n),\right) + \mathbf{v}_d, \end{aligned} \tag{3.41}$$

gdje su f_d i g_d nelinearne funkcije. Koraci za ažuriranje Kalmanovog filtera su dati u sljedećim jednačinama gdje je predikcija stanja označavana kao $\hat{x}\left(n+1|n\right)$, a korekcija kao $\hat{x}\left(n+1|n+1\right)$. Pseudokod EKF-a se nalazi u tabeli 3.1.

Korak	
1	Inicijalizacija Kalmanovog Filtera $\hat{\mathbf{x}}(1\|0) = E\left[\mathbf{x}(1\|0)\right], \mathbf{P}(1\|0), \mathbf{Q}_d = E\left[\mathbf{w}_d(n)\mathbf{w}_d^T(n)\right], \mathbf{R}_d = E\left[\mathbf{v}_d(n)\mathbf{v}_d^T(n)\right]$
2	za trenutke $n > 0$ $\mathbf{K}(n) = \mathbf{P}(n\|n-1)\mathbf{C}_d^T(n)\left(\mathbf{C}_d(n)\mathbf{P}(n\|n-1)\mathbf{C}_d^T(n) + \mathbf{R}_d\right)^{-1}$ $\hat{\mathbf{x}}(n\|n) = \hat{\mathbf{x}}(n\|n-1) + \mathbf{K}(n)\left(\mathbf{y}(n) - \mathbf{g}_d\left(\mathbf{x}(n\|n-1)\right)\right)$ $\hat{\mathbf{x}}(n+1\|n) = \mathbf{f}_d\left(\hat{\mathbf{x}}(n\|n), \mathbf{u}(n)\right)$ $\mathbf{P}(n\|n) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}(n)\mathbf{C}_d(n)\right)\mathbf{P}(n\|n-1)$ $\mathbf{P}(n+1\|n) = \mathbf{A}_d(n)\mathbf{P}(n\|n)\mathbf{A}_d^T(n) + \mathbf{M}_d\mathbf{Q}_d\mathbf{M}_d^T$

Tablica 3.1: Kalmanov Filter inicijalizacija i koraci

Matrica $\mathbf{R}_d$ predstavlja kovarijansu mjernog šuma, dok $\mathbf{Q}_d$ označava kovarijansu procesnog šuma. Ove dvije matrice imaju značajan uticaj na brzinu konvergencije i efikasnost Kalmanovog filtera. Matricu $\mathbf{R}_d$ moguće je odrediti na osnovu mjerenja u *off-line* režimu, što omogućava preciznije postavljanje parametara. S druge strane, dobijanje parametara matrice $\mathbf{Q}_d$ je manje deterministički proces; obično se koristi analogija koja sugeriše da ovi parametri predstavljaju nesigurnost u poznavanju modela procesa. Pravilnim podešavanjem ovih dviju matrica moguće je postići superiornije performanse filtera.

Dodatno, matrica $\mathbf{P}$ se naziva kovarijaciona greška u estimaciji. U prethodnim jednačinama, kovarijaciona matrica predikcije označava se kao $\mathbf{P}(n|n-1)$ ili $\mathbf{P}(n+1|n)$, gdje se koristi za prikazivanje neizvijesnosti u predviđenju stanja i definisana

je kao:

$$\mathbf{P}(n+1|n) = E\left[(\mathbf{x}(n+1) - \hat{\mathbf{x}}(n+1|n))\,(\mathbf{x}(n+1) - \hat{\mathbf{x}}(n+1|n))^T\right], \tag{3.42}$$

a kovarijaciona matrica korekcije sa $\mathbf{P}(n|n)$ ili $\mathbf{P}(n+1|n+1)$ je definisana kao:

$$\mathbf{P}(n+1|n+1) = E\left[(\mathbf{x}(n+1) - \hat{\mathbf{x}}(n+1|n+1))\,(\mathbf{x}(n+1) - \hat{\mathbf{x}}(n+1|n+1))^T\right]. \tag{3.43}$$

Ostale matrice su definisane na sljedeći način:

$$\mathbf{A}_d = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots \end{array}\right]_{\mathbf{x}(n)=\hat{\mathbf{x}}(n|n)}, \tag{3.44}$$

$$\mathbf{C}_d = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \cdots \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \cdots \end{array}\right]_{\mathbf{x}(n)=\hat{\mathbf{x}}(n+1|n)}. \tag{3.45}$$

Matrica $\mathbf{M}_d$ se računa slično $\mathbf{A}_d$, razlika je u tome što se parcijalni izvodi računaju u tački $E\left[\mathbf{w}_d(n)\right]$ po $\mathbf{w}_d(n)$ [44].

AEKF se ne razlikuje puno od EKF po implemetaciji. Glavna razlike je što se uvodi dodatno stanje koje može predstavljati nepoznati poremećaj ili nepoznati parametar sistema. Obično su ova stanja konstantna ili sporo promjenljiva pa ih je moguće modelovati sljedećom diferencnom jednačinom:

$$x(n+1) = x(n), x(0) = const. \tag{3.46}$$

za diskretni sistem i tako ih uvesti u jednačine sistema.

3.3.2 KFLOS

Dinamika greške u praćenju putanje, koja je ranije predstavljena u jednačini (2.18), a koja je korišćena i za izvođenje PLOS zakona vođenja, koristi se i za izvođenje predloženog algoritma. Uvođenjem aproksimacija $\cos(\beta) \approx 1$ i $\sin(\beta) \approx \beta$, jednačina (2.18) poprima oblik:

$$\begin{array}{l} \dot{x_e} = U\cos(\psi - \alpha_k) - U\sin(\psi - \alpha_k)\beta \\ +\dot{\alpha_k} y_e - u_p, \\ \dot{y_e} = U\sin(\psi - \alpha_k) + U\cos(\psi - \alpha_k)\beta \\ -\dot{\alpha_k} x_e. \end{array} \tag{3.47}$$

Prilikom implementacije AEKF-a, potrebno je proširiti postojeći sistem kako bi se uključilo dodatno nepoznato stanje. Uvođenjem dodatnog stanja $\dot{\beta} = 0$, koje predstavlja nepoznati ugao bočnog klizanja, vektor stanja proširenog sistema definiše

se kao $\boldsymbol{\zeta} = [x_e, y_e, \beta]^T$ [45]. Dinamika proširenog sistema tada se opisuje sljedećim sistemom jednačina:

$$\dot{\boldsymbol{\zeta}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta}) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{\alpha}_k & -U\sin(\psi - \alpha_k) \\ -\dot{\alpha}_k & 0 & U\cos(\psi - \alpha_k) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U\cos(\psi - \alpha_k) - u_p \\ U\sin(\psi - \alpha_k) \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{3.48}$$

Nakon definisanja proširenog sistema, potrebno je uvesti vektor estimiranih vrijednosti za prošireni sistem, označen kao $\hat{\boldsymbol{\zeta}} = \left[\hat{x_e}, \hat{y_e}, \hat{\beta}\right]^T$. Cilj je dizajnirati estimator na takav način da estimirane vrijednosti teže stvarnim vrijednostima, tj. da $\hat{\boldsymbol{\zeta}} \to \boldsymbol{\zeta}$ kada $t \to \infty$. Vektor estimiranih stanja ažurira se na osnovu dinamike modela i dostupnih senzorskih mjerenja, i može se predstaviti sljedećim jednačinama:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\zeta}}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_e \\ \dot{\hat{y}}_e \\ \dot{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta}) + \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_e - \hat{x}_e \\ y_e - \hat{y}_e \end{bmatrix}, \tag{3.49}$$

gdje se Kalmanovo pojačanje $\mathbf{K}$ ažurira pomoću jednačine iz tabele 3.1. Za Digitalni AEKF potrebno je dati sistem diskretizovati i digitalni oblici matrica stanja su definisani kao:

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{I} + dt\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{x}},$$

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{I} + \begin{bmatrix} 0 & \dot{\alpha}_k dt & -U\sin(\psi - \alpha_k)dt \\ -\dot{\alpha}_k dt & 0 & U\cos(\psi - \alpha_k)dt \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 1 & \dot{\alpha}_k dt & -U\sin(\psi - \alpha_k)dt \\ -\dot{\alpha}_k dt & 1 & U\cos(\psi - \alpha_k)dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3.50}$$

$$\mathbf{B}_d = dt \begin{bmatrix} U\cos(\psi - \alpha_k) - u_p \\ U\sin(\psi - \alpha_k) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Matrica $\mathbf{C}_d$ definiše odnos između stanja sistema i mjerenja, i u ovom primjeru je oblikovana na osnovu dostupnih mjerenja pozicije plovila. Budući da su dostupna

samo mjerenja grešaka u položaju, tj. greške duž putanje x_e i greške položaja y_e, matrica $\mathbf{C}_d$ uključuje samo te informacije. Matrica $\mathbf{C}_d$ može biti predstavljena na sljedeći način:

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.51}$$

Na ovaj način, matrica $\mathbf{C}_d$ osigurava da se samo informacije o položaju x_e i y_e koriste u procesu estimacije kroz Kalmanov filter. Brzina virtuelne tačke u_p u matrici $\mathbf{A}_d$ je definisana kao:

$$u_p = Ucos(\psi - \alpha_k) - Usin(\psi - \alpha_k)\hat{\beta}(n|n) + k_x x_e(n), \tag{3.52}$$

Nakon estimacije ugla bočnog klizanja pomoću AEKF moguće je datu vrijednost upotrijebiti za proračun željenog ugla pravca ψ_d. Konačna vrijednost željenog ugla pravca se računa kao:

$$\psi_d = \alpha_k - arctan\left(\frac{y_e}{\Delta} + \hat{\beta}\right). \tag{3.53}$$

Poglavlje 4

Rezultati simulacija

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati simulacija sprovedenih u MATLAB-u, s ciljem analize prednosti i nedostataka predloženog algoritma i poređenja sa postojećim LOS zakonima vođenja.

4.1 Opis numeričkih eksperimenata

Performanse predloženog zakona vođenja upoređene su sa PLOS i ALOS zakonima vođenja kroz seriju simulacija koje obuhvataju nekoliko različitih scenarija. U prvom scenariju analizirano je praćenje različitih putanja vozila u idealnim uslovima, bez prisustva šuma i uz optimalno podešen kontroler skretanja. Drugi scenario ispituje uticaj mjernog šuma na performanse različitih metoda vođenja. Treći scenario fokusira se na analizu osjetljivosti LOS algoritama na promjene brzine plovila. Na kraju, četvrti scenario istražuje uticaj brzine odziva autopilota na performanse estimacije ugla klizanja, kao i na ukupne performanse sistema u praćenju putanje.

U simulacijama su razmotrene četiri karakteristične referentne putanje, parametarizovane na sljedeći način:

- **P1**=$(\omega, 0.5\omega)$
- **P2**=$(\omega, \omega + 15\sin(0.08\omega))$
- **P3**=$(45\cos(\omega) + 10\omega, 45\sin(\omega))$
- **P4**=$\left(\omega, \frac{250\sin(0.1\omega)}{\sqrt{\sin(0.1\omega)^2+(10^{-4})^2}}\right)$

Putanja P1 predstavlja pravu liniju i ona se najčešće koristi za komparaciju performansi različitih zakona vođenja. Putanja P2 je zakrivljena i za nju je karakteristično što se željeni smjer kretanja stalno mijenja, za razliku od pravolinijske putanje. Putanja P3 je cikloidna i često se koristi u operacijama pomorske policije ili vojske, gdje služi za opkoljavanje i usmjeravanje plovila. Putanja P4 je najbliža reprezentacija

pravougaone putanje koja je diferencijabilna i često se koristi u primjenama kao što su mapiranje morskog dna ili pretraživanje određenog područja.

Parametri Nomoto modela prvog reda koji se koristi za simulaciju autopilota iznose: $K = 20$ i $T = 1$. Uglom zakretanja se upravlja pomoću PD regulatora čiji su parametri: $K_p = 0.6$ i $K_d = 0.35$. Perioda odabiranja iznosi $dT = 0.01s$. Zajednički parametri algoritama su postavljeni na sljedeće vrijednosti: $\Delta = 10$, $k = 1$. Parametri PLOS algoritama su: $k_1 = 3$, $k_2 = 3$ i $\Gamma = 0.145$. Kod ALOS metoda se koristi parametar $\gamma = 0.005$, dok su kovarijacione matrice KFLOS-a postavljene na vrijednosti:

$$R_D = \begin{bmatrix} 8.5 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 8.5 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$Q_D = \begin{bmatrix} 1 \times 10^{-8} & 0 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 15 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

$$P_P = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Uticaj morskih struja na kretanja plovila je modelovan na sljedeći način:

- **Putanja P1**: Morska struja je modelovana tako da uzrokuje konstantan ugao bočnog klizanja od $\beta = 0.1$ rad.
- **Putanja P2**: Morska struja ima konstantnu brzinu $V_c = 0.3\,\mathrm{m/s}$ i konstantan ugao djelovanja $\beta_c = \pi$. Ovo znači da će ugao bočnog klizanja biti promjenljiv prilikom praćenja zakrivljene putanje.
- **Putanje P3 i P4**: Morska struja djeluje pod uglom $\beta_c = -\pi/4$ s istom brzinom kao kod putanje P2, tj. $V_c = 0.3\,\mathrm{m/s}$.

4.2 Rezultati

4.2.1 Uticaj morskih struja na praćenje putanje

U prvom scenariju ispitane su performanse različitih algoritama u slučaju kada longitudinalna brzina plovila iznosi $u = 3m/s$. Iako je ova brzina relativno mala za većinu komercijalnih brodova, ona je tipična za naučne ekspedicije i primjene kao što su mapiranje morskog dna [46]. Rezultati simulacija su prikazani na slikama 4.1-4.12, a dodatno je izvršeno poređenje srednjih kvadratnih grešaka u estimaciji ugla

bočnog klizanja i srednjih kvadratnih grešaka položaja. Srednja kvadratna greška se definiše kao

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{T_{sim}/dT}(X_i - \hat{X}_i)^2}{n}, \tag{4.2}$$

gdje Tsim predstavlja dužinu trajanja simulacije, a n broj odbiraka signala. U tabelama 4.1 i 4.2 su date ove greške za sve četiri razmatrane putanje.

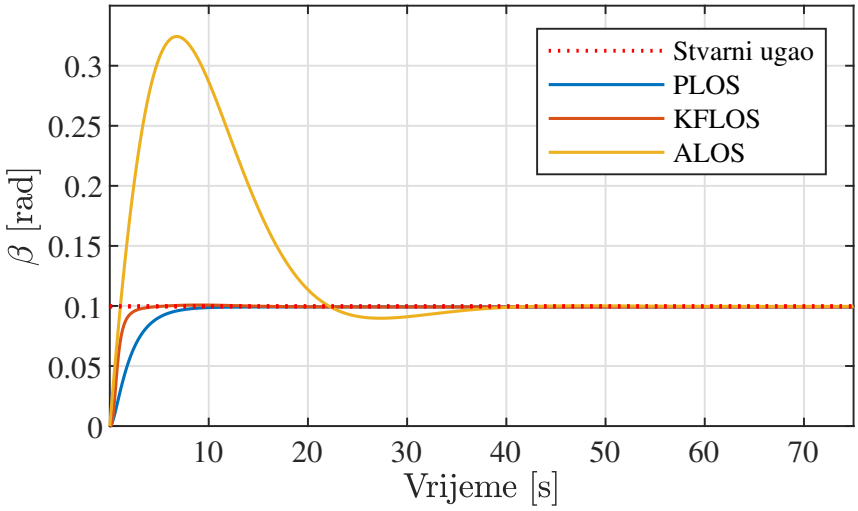
Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	1.7454×10^{-4}	4.1930×10^{-4}	1.5993×10^{-4}	1.6106×10^{-4}
KFLOS	4.5719×10^{-5}	1.1282×10^{-4}	1.4326×10^{-4}	1.0419×10^{-4}
ALOS	0.0055	0.0023	0.0010	5.0696×10^{-4}

Tablica 4.1: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β

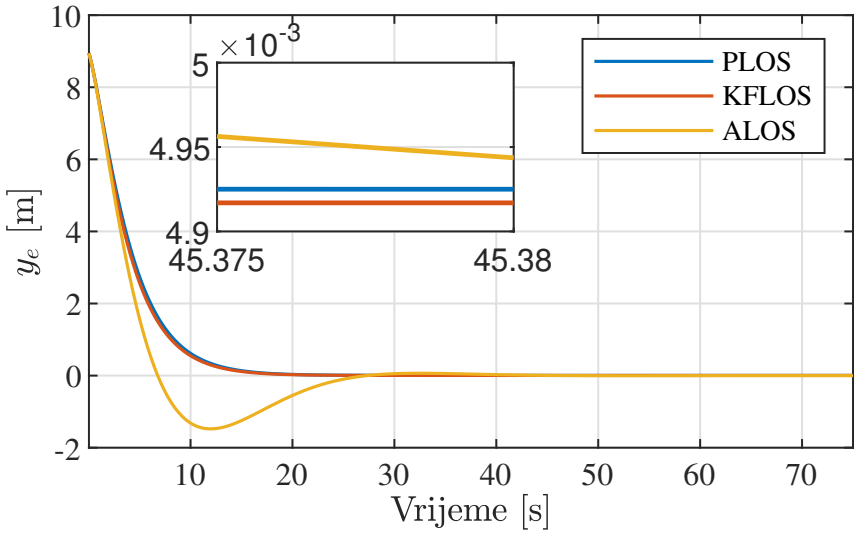
Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	2.4943	0.0348	0.0505	0.1606
KFLOS	2.3522	0.0331	0.0450	0.1457
ALOS	2.3417	0.1292	0.1119	0.1480

Tablica 4.2: Srednja kvadratna greška položaja y_e

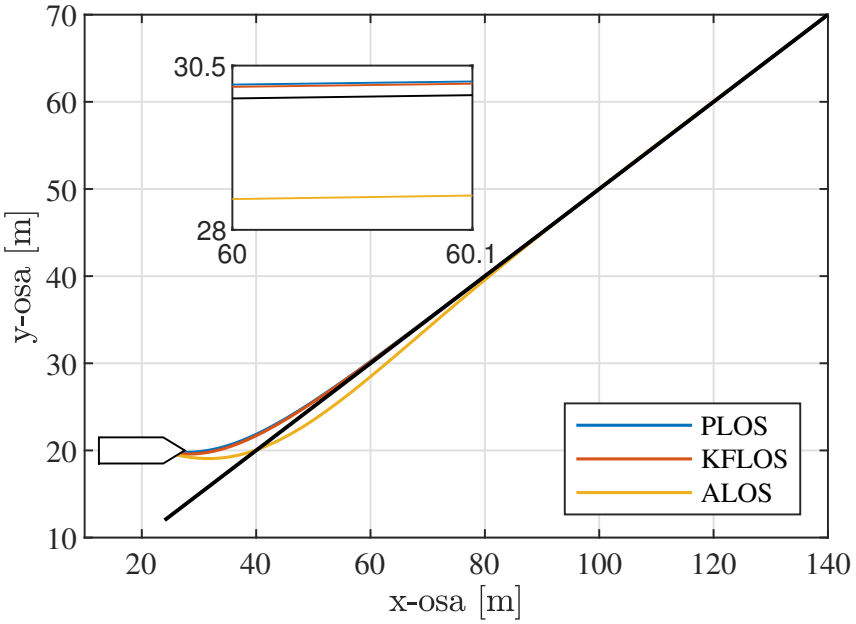
Na slici 4.1 su prikazane stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri praćenju putanje P1. Može se uočiti da KFLOS obezbjeđuje najbržu konvergenciju ka stvarnoj vrijednosti ugla bočnog klizanja, i to bez preskoka. Pored toga, KFLOS najtačnije estimira ugao bočnog klizanja, što se može vidjeti i iz tabele 4.1. PLOS algoritam nešto sporije konvergira, ali takođe bez preskoka, dok ALOS ispoljava značajno velike oscilacije. Bočne greške položaja i trajektorije plovila su prikazane na slikama 4.2 i 4.3 respektivno. Može se uočiti da KFLOS obezbjeđuje najbržu konvergenciju ka stvarnoj putanji. Primjećuje se da iako KFLOS najbrže konvergira, najmanju grešku položaja nakon prelaznog procesa obezbjeđuje ALOS, zbog čega i ima najmanju srednju kvadratnu grešku u tabeli 4.2.



Slika 4.1: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P1

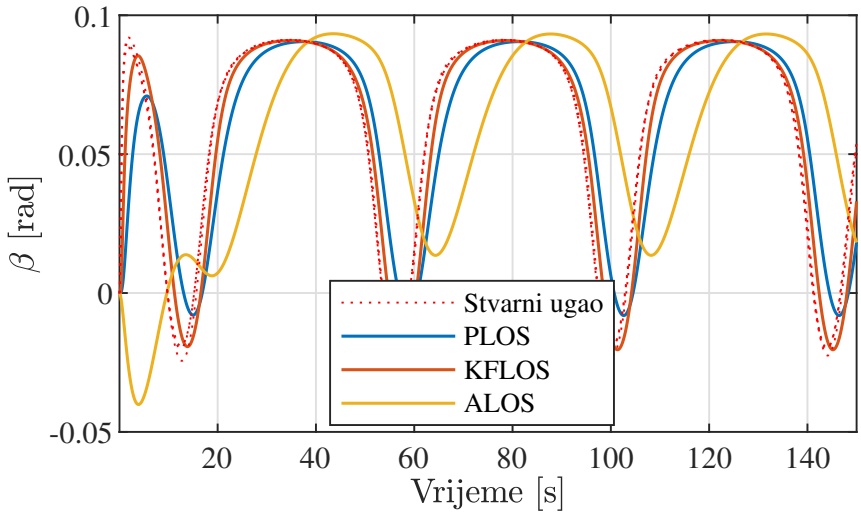


Slika 4.2: Greška položaja tokom praćenja putanje P1

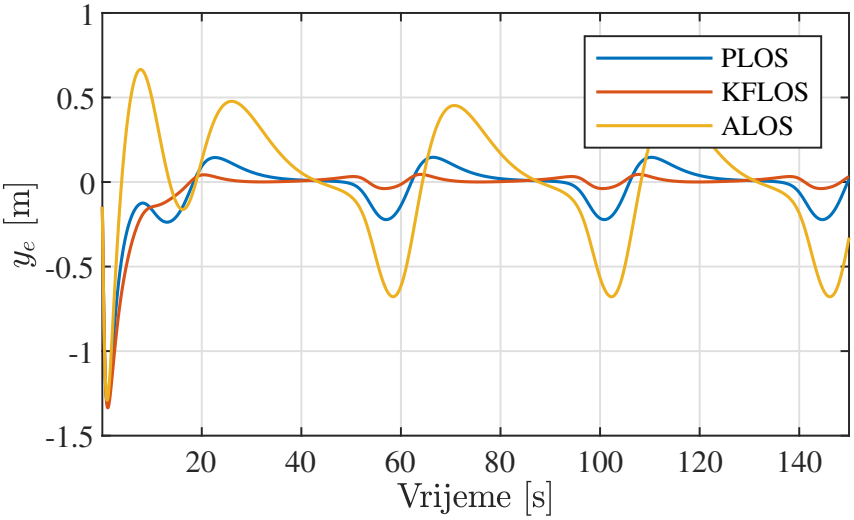


Slika 4.3: Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P1

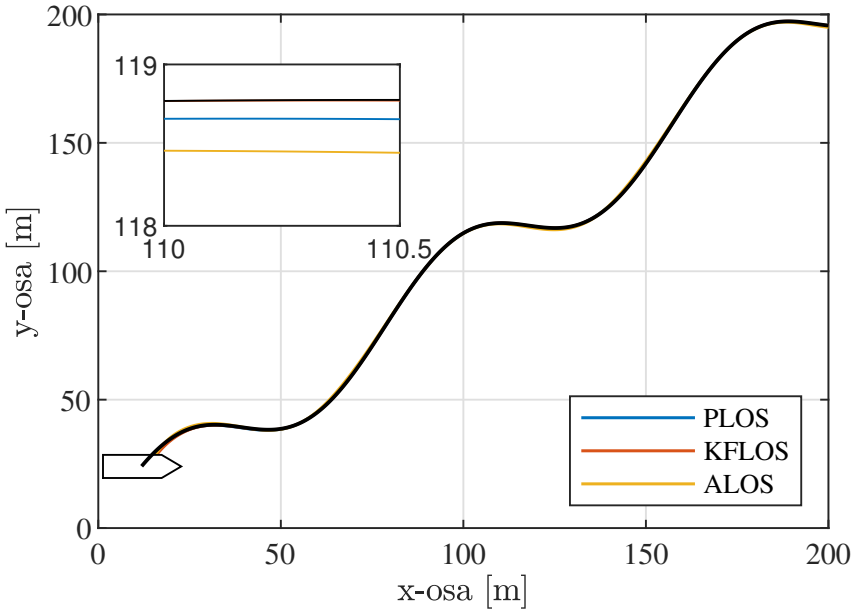
Rezultati simulacija u slučaju kada se prati putanja P2 su prikazani na slikama 4.4-4.6. Zbog zakrivljenosti putanje, u ovom primjeru ugao bočnog klizanja je vremenski promjenljiv, za razliku od prethodnog primjera u kome je ugao bočnog klizanja bio konstantan. Sa slike 4.4 se može primijetiti da predloženi algoritam najbrže i sa najmanjom greškom estimira ugao bočnog klizanja. PLOS ima nešto sporiju konvergenciju u odnosu na predloženi algoritam, dok ALOS najsporije konvergira. Na osnovu slike 4.5 na kojoj je prikazana greška položaja mogu se donijeti slični zaključci. Naime, predloženi algoritam ima najmanju grešku položaja, potom PLOS, dok ALOS ima najveću grešku. Primjećuje se da su greške najveće na prevojnim tačkama putanje koja je data na slici 4.6. Na kraju, Tabele 4.1 i 4.2 pokazuju da predloženi algoritam obezbjeđuje najmanju grešku u estimaciji ugla bočnog klizanja i najmanju grešku položaja.



Slika 4.4: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P2

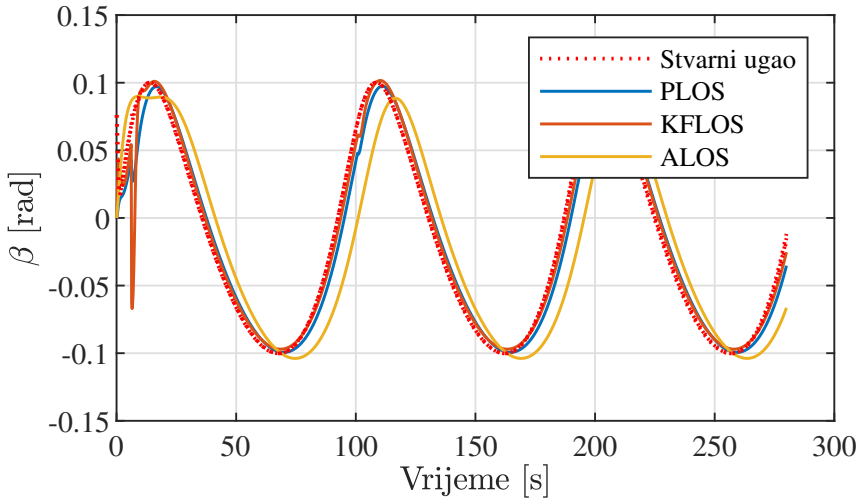


Slika 4.5: Greška položaja tokom praćenja putanje P2

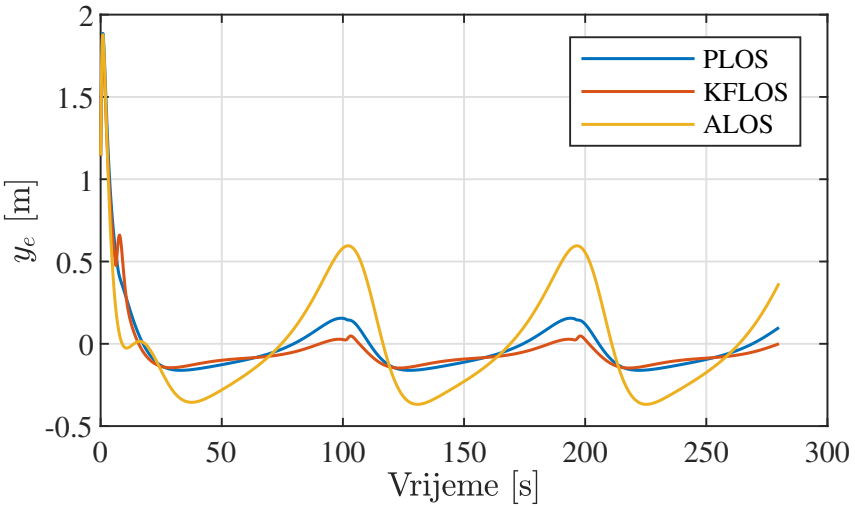


Slika 4.6: Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P2

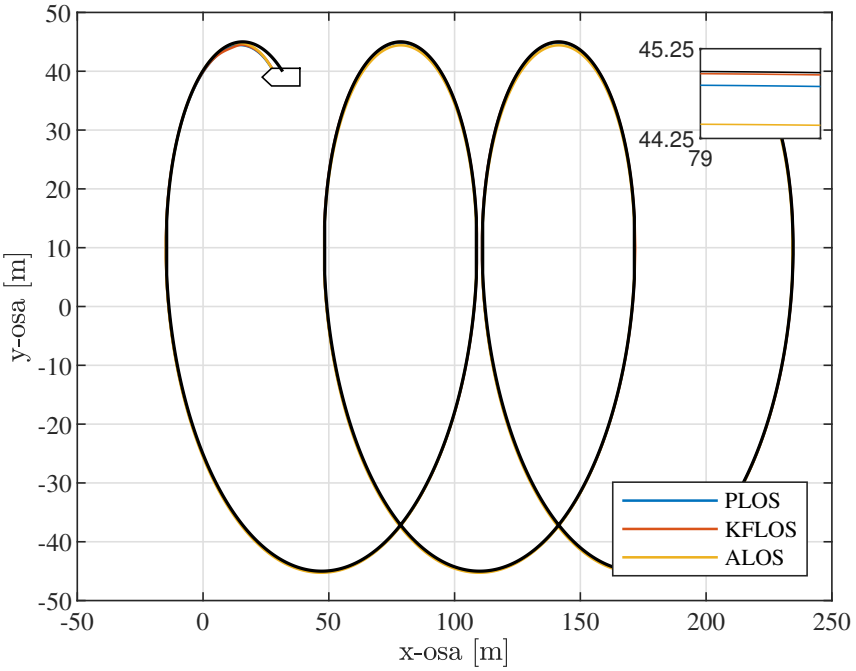
Prilikom praćenja putanje P3, predloženi algoritam na samom početku pokazuje veliki skok u estimaciji ugla bočnog klizanja, što izaziva značajnu grešku, što je prikazano na slici 4.7. Ipak, zahvaljujući malim greškama u estimaciji na ostatku putanje, KFLOS algoritam postiže najmanju kvadratnu grešku u estimaciji ugla bočnog klizanja, kao i najmanju grešku položaja u poređenju sa ostala dva zakona vođenja, a vrijednosti ovih grešaka su date u tabelama 4.1 i 4.2. Na slikama 4.8 i 4.9 uočava se da predloženi algoritam takođe ostvaruje najmanju grešku položaja, kao i najbolje performanse u praćenju putanje P3.



Slika 4.7: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P3



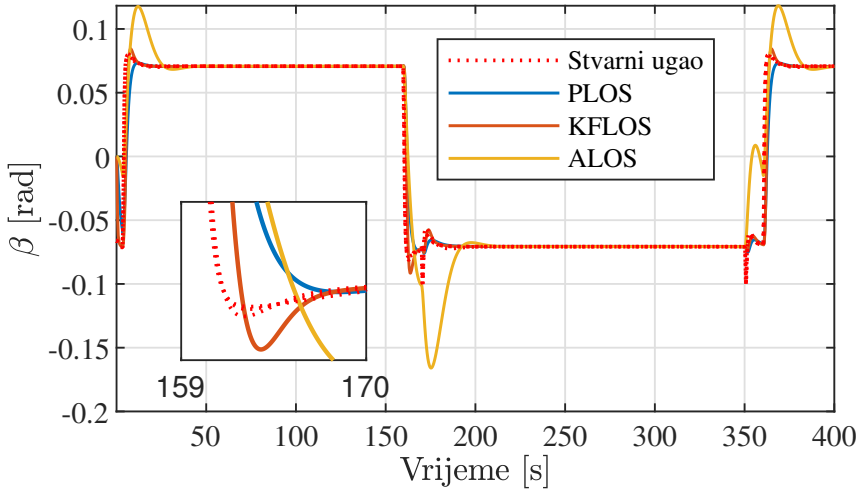
Slika 4.8: Greška položaja tokom praćenja putanje P3



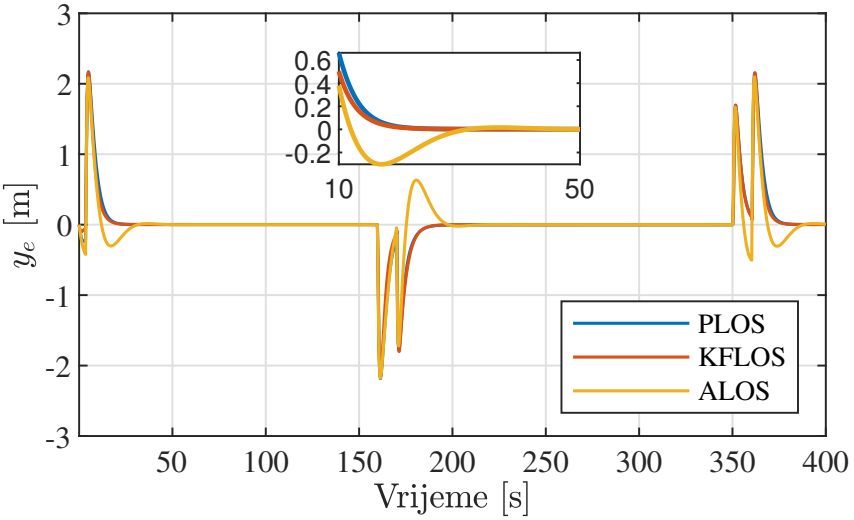
Slika 4.9: Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P3

Na slici 4.10 prikazane su stvarne i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja prilikom praćenja putanje P4, pri čemu KFLOS algoritam pokazuje najveću tačnost u estimaciji ovog ugla. Najveće odstupanje u estimaciji javlja se na oštrim skretanjima putanje, gdje takođe dolazi do najvećih grešaka u položaju, što je prikazano na slici 4.11. Iako slike ne ukazuju na značajne razlike između predloženog algoritma i PLOS algoritma, tabele 4.1 i 4.2 jasno pokazuju da predloženi algoritam postiže veću tačnost u estimaciji ugla bočnog klizanja, kao i bolju konvergenciju prema zadatoj putanji u poređenju sa preostala dva algoritma. Na slici 4.12 se vidi da KFLOS algoritam najbrže konvergira prema putanji prilikom skretanja, dok PLOS

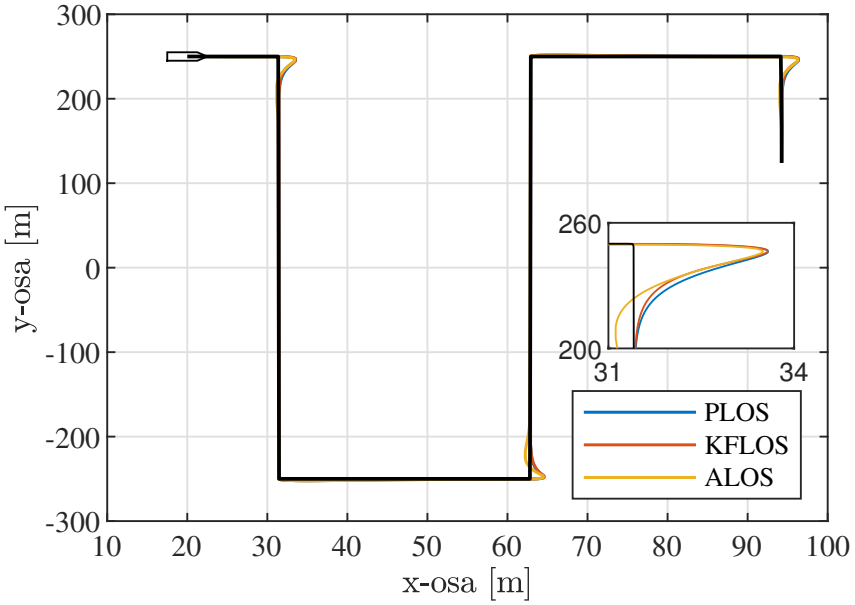
algoritam ima nešto sporiju konvergenciju, a ALOS stvara oscilacije na skretanjima, što dovodi do grešaka u praćenje putanje.



Slika 4.10: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P4



Slika 4.11: Greška položaja tokom praćenja putanje P4



Slika 4.12: Performanse različitih algoritama tokom praćenja putanje P4

4.2.2 Uticaj mjernih šumova na performanse algoritama

U ovom dijelu je analiziran uticaj mjernih šumova na performanse zakona vođenja. Šumovi koji utiču na mjerenja mogu se podijeliti na šumove u mjerenju pozicije i mjerenju brzine. Šum u mjerenju pozicije ima varijansu $\sigma^2 = 10^{-4}$ i srednju vrijednost $\mu = 0$, dok šum u mjerenju rezultantne brzine ima varijansu $\sigma^2 = 0.01$ i srednju vrijednost $\mu = 0$. Oba šuma predstavljaju bijeli šum koji je često prisustan u mjerenjima.

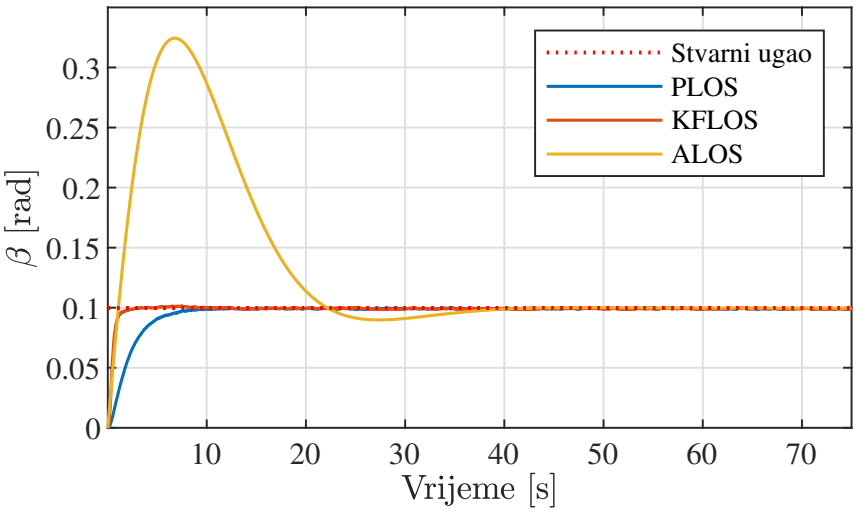
Rezultati simulacija u slučaju kada se prati putanja P1 su prikazani na slikama 4.13-4.15. Sa slike 4.13 se uočava da predloženi algoritam najbrže konvergira ka stvarnom uglu bočnog klizanja, dok se sa slike 4.14 primjećuje da KFLOS algoritam obezbjeđuje najbržu konvergenciju greške položaja. Rezultati iz tabele 4.3 potvrđuju da KFLOS obezbjeđuje najbolju estimaciju ugla bočnog klizanja, dok rezultati iz tabele 4.4 pokazuju da iako KFLOS ima najbržu konvergenciju greške položaja, najmanju grešku ipak ostvaruje ALOS. Na slici 4.15 prikazane su performanse algoritama prilikom praćenja pravolinijske putanje. S obzirom na to da šum izaziva neznatne varijacije u estimiranom uglu bočnog klizanja, može se uočiti da je uticaj ovih varijacija na performanse praćenja putanje praktično neprimjetan.

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	1.7478×10^{-4}	4.3727×10^{-4}	1.6015×10^{-4}	1.6129×10^{-4}
KFLOS	4.5575×10^{-5}	1.1334×10^{-4}	1.4250×10^{-4}	1.0586×10^{-4}
ALOS	0.0055	0.0024	0.0010	5.0826×10^{-4}

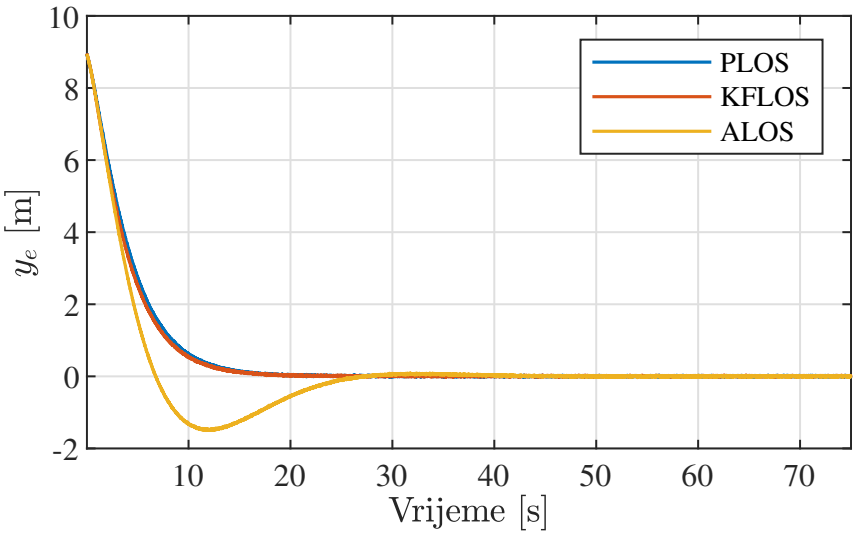
Tablica 4.3: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β u prisustvu šuma

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	2.4943	0.0416	0.0507	0.1613
KFLOS	2.3519	0.0414	0.0449	0.1466
ALOS	2.3417	0.1361	0.1120	0.1481

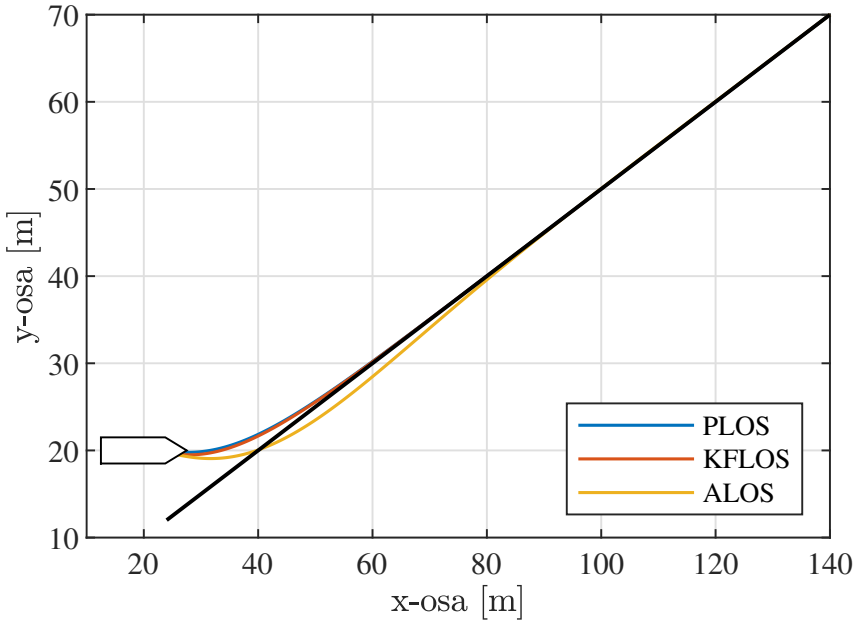
Tablica 4.4: Srednja kvadratna greška položaja y_e u prisustvu šuma



Slika 4.13: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1

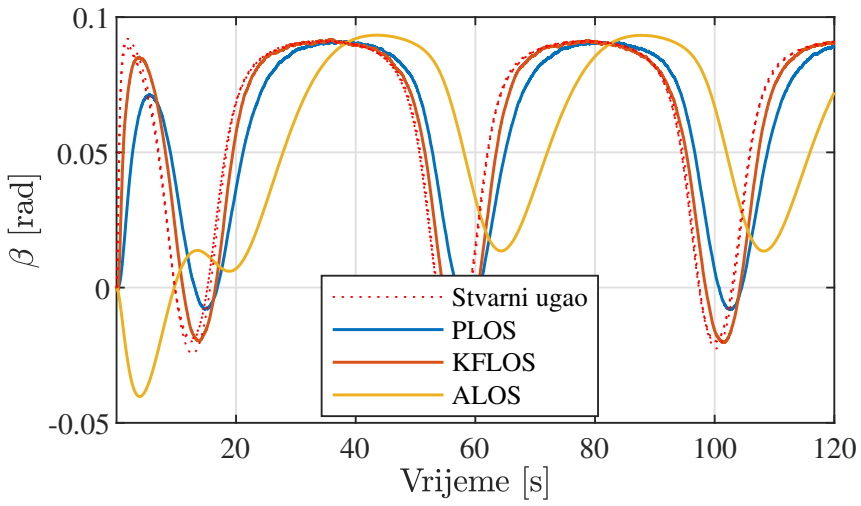


Slika 4.14: Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1

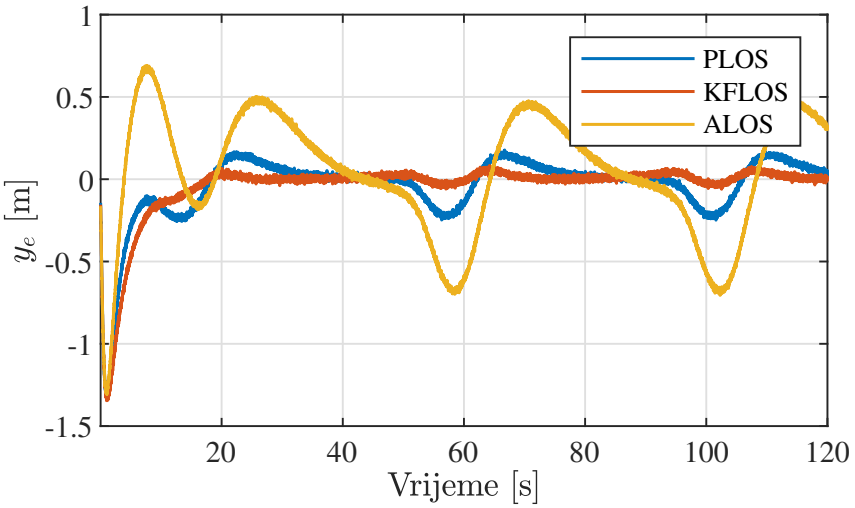


Slika 4.15: Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P1

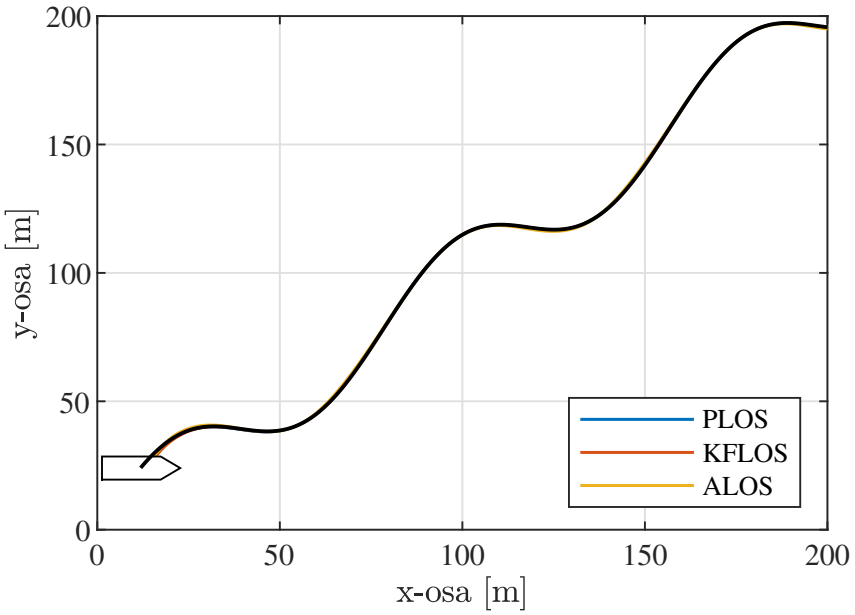
Prilikom praćenja krive putanje P2, KFLOS algoritam najbrže i sa najmanjom greškom estimira stvarni ugao bočnog klizanja, što je prikazano na slici 4.16 i dodatno potvrđeno u tabeli 4.3. Slika 4.17 prikazuje grešku položaja pri praćenju putanje, gdje se vidi da predloženi algoritam i PLOS algoritam imaju slične greške položaja. Međutim, analiza podataka iz tabele 4.4 ukazuje da KFLOS pruža bolje performanse u praćenju putanje, što se vidi sa slike 4.18.



Slika 4.16: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2

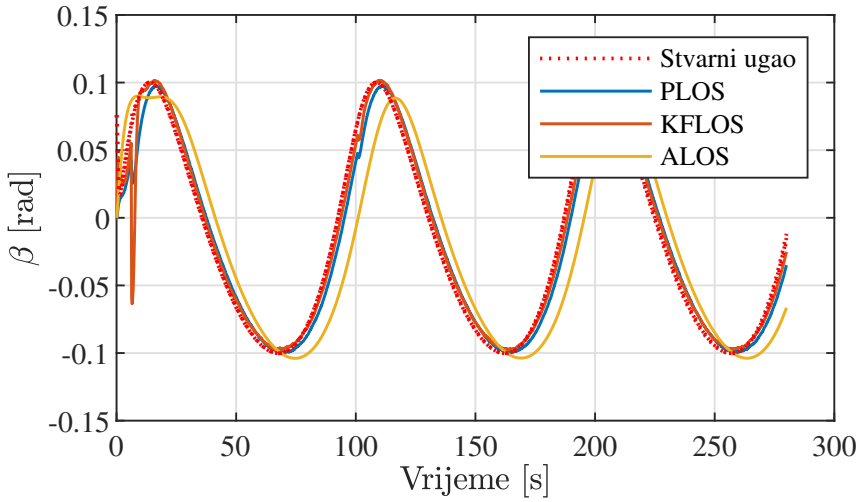


Slika 4.17: Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2

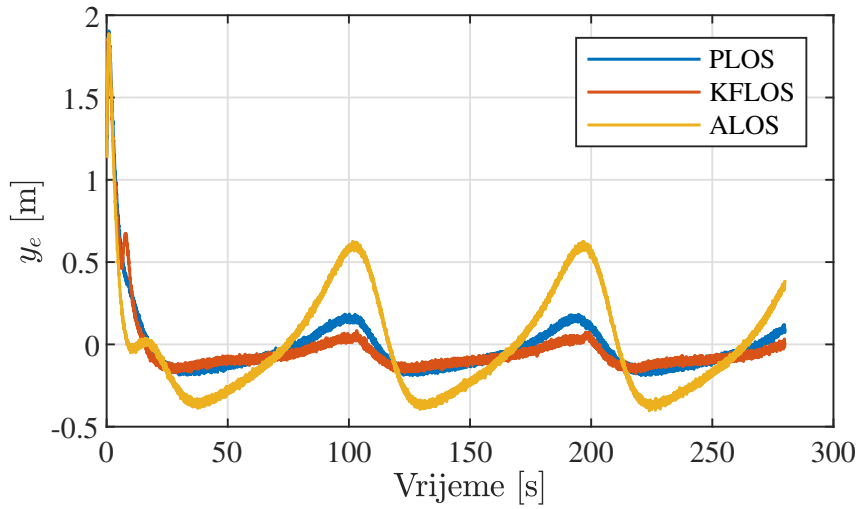


Slika 4.18: Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P2

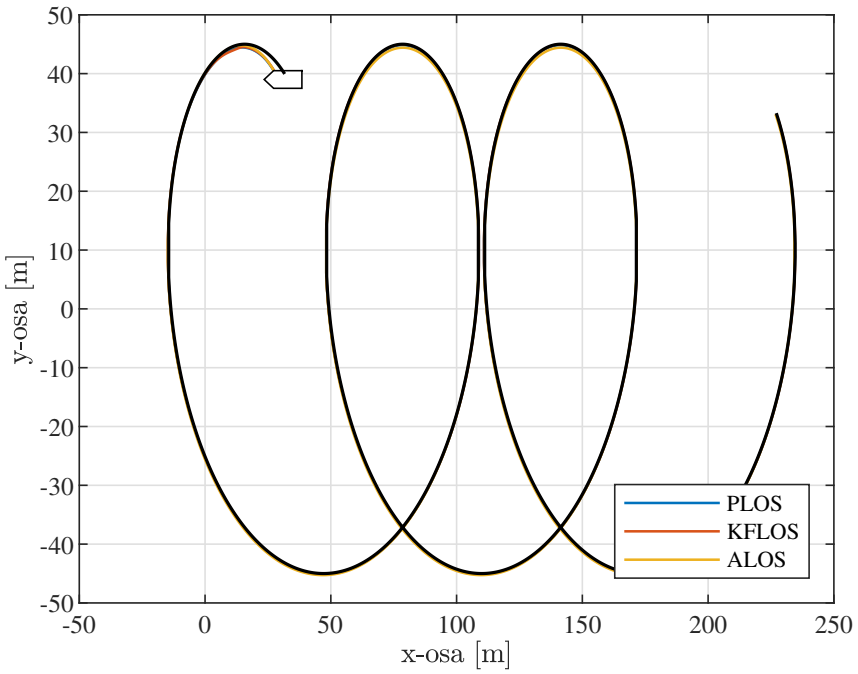
Rezultati simulacija u slučaju kada se prati putanja P3 su prikazani na slikama 4.19-4.21. Sa slike 4.19 se uočava da KFLOS najbrže prati vremensko promjenljivi ugao bočnog klizanja, dok je sa slike 4.20 teško zaključiti koji algoritam ima najbolje performanse u smislu greške položaja. Međutim, rezultati iz tabela 4.3 i 4.4 pokazuju da KFLOS algoritam postiže najbolju estimaciju stvarnog ugla bočnog klizanja kao i najmanju grešku položaja, sa najmanjom razlikom u odnosu na simulacije bez mjernih šumova. Na slici 4.21 prikazane su performanse tri algoritma pri praćenju putanje P3, gdje se uočava da su performanse algoritama slične onima u scenariju bez mjernog šuma.



Slika 4.19: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3

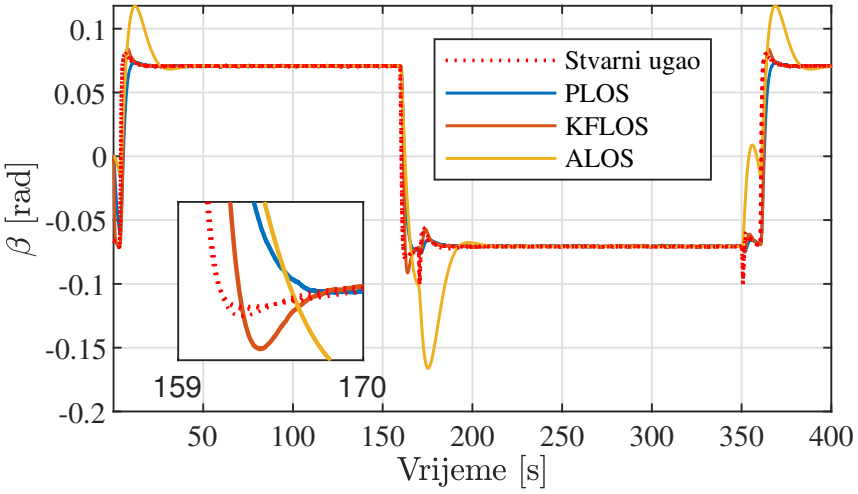


Slika 4.20: Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3

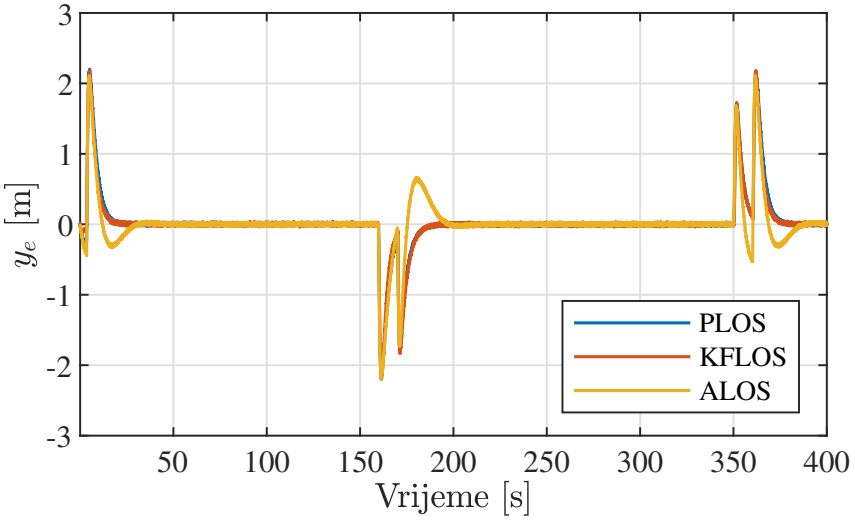


Slika 4.21: Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P3

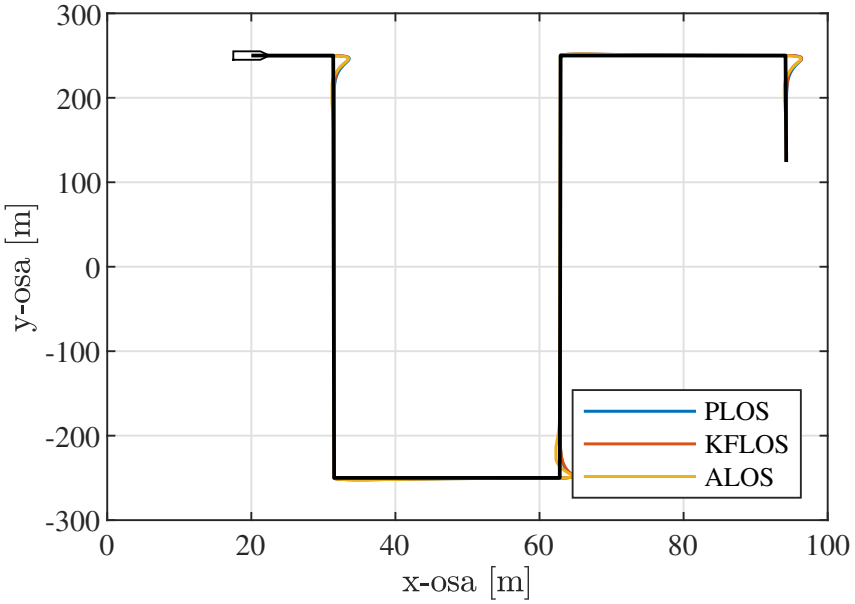
Na slici 4.22 prikazane su stvarne i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja tokom praćenja putanje P4, pri čemu se jasno vidi da ALOS algoritam ima najlošiju estimaciju ugla bočnog klizanja. S druge strane, KFLOS algoritam postiže najtačniju estimaciju, naročito prilikom naglih skretanja na putanji, što je potvrđeno rezultatima iz tabele 4.3. Slika 4.23 prikazuje greške položaja, gdje sva tri algoritma pokazuju slične performanse na pravim segmentima putanje. Međutim, rezultati iz tabele 4.4 pokazuju da je greška položaja najmanja kod predloženog algoritma.



Slika 4.22: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4



Slika 4.23: Greška položaja u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4



Slika 4.24: Performanse različitih algoritama u prisustvu šuma tokom praćenja putanje P4

4.2.3 Uticaj brzine zalijetanja na performanse algoritama

U ovom dijelu analizirane su performanse razmatranih algoritama pri različitim brzinama kretanja. Razmotrene su dvije brzine: $u = 1.5m/s$ i $u = 6m/s$. Radi jednostavnosti na slikama su prikazane samo performanse estimatora ugla bočnog klizanja i greške položaja zakona vođenja, dok su odgovarajuće srednje kvadratne greške date u tabelelama 4.5-4.8.

Pri praćenju putanje P1, sa slike 4.25 primjećuje se da predloženi algoritam brže konvergira ka stvarnoj vrijednosti ugla bočnog klizanja u odnosu na druga dva algoritma, pogotovo pri manjim brzinama. Međutim, pri većim brzinama, PLOS

algoritam pokazuje poboljšane performanse u poređenju sa manjom brzinom, gotovo dostižući preciznost KFLOS algoritma. Ipak, pri većim brzinama javlja se značajan preskok u estimaciji ugla bočnog klizanja kod PLOS algoritma, što može uticati na njegovu ukupnu tačnost. Dalje, sa slike 4.6 se primjećuje da predloženi algoritam ima bržu konvergenciju greške položaja u odnosu na ostale algoritme pogotovo pri manjim brzinama. U slučaju kada je brzina $u = 6m/s$, PLOS algoritam dostiže približno istu vrijednost greške položaja kao kod predloženog algoritma, ali najmanju srednju kvadratnu grešku položaja u oba slučaja obezbjeđuje ALOS.

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	5.9026×10^{-4}	0.004	0.0021	0.0013
KFLOS	7.0036×10^{-5}	2.8624×10^{-4}	3.9667×10^{-4}	4.2746×10^{-4}
ALOS	0.0099	0.0081	0.0044	0.0019

Tablica 4.5: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β pri brzini vozila od $1.5m/s$

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	4.6477	0.1364	0.2342	0.1576
KFLOS	4.2075	0.0220	0.0675	0.0707
ALOS	4.1969	0.3220	0.4388	0.1956

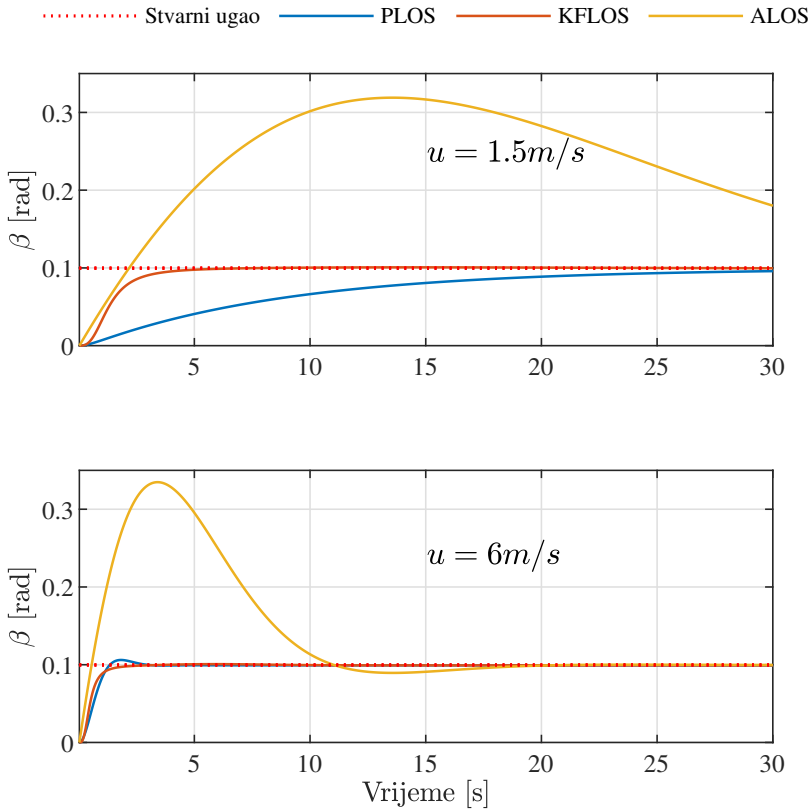
Tablica 4.6: Srednja kvadratna greška položaja pri brzini vozila od $1.5m/s$

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	5.7115×10^{-5}	4.6788×10^{-5}	3.1034×10^{-4}	2.3061×10^{-5}
KFLOS	2.6272×10^{-5}	6.8383×10^{-5}	1.0316×10^{-4}	3.5701×10^{-5}
ALOS	0.0028	0.0014	4.9346×10^{-4}	0.0033

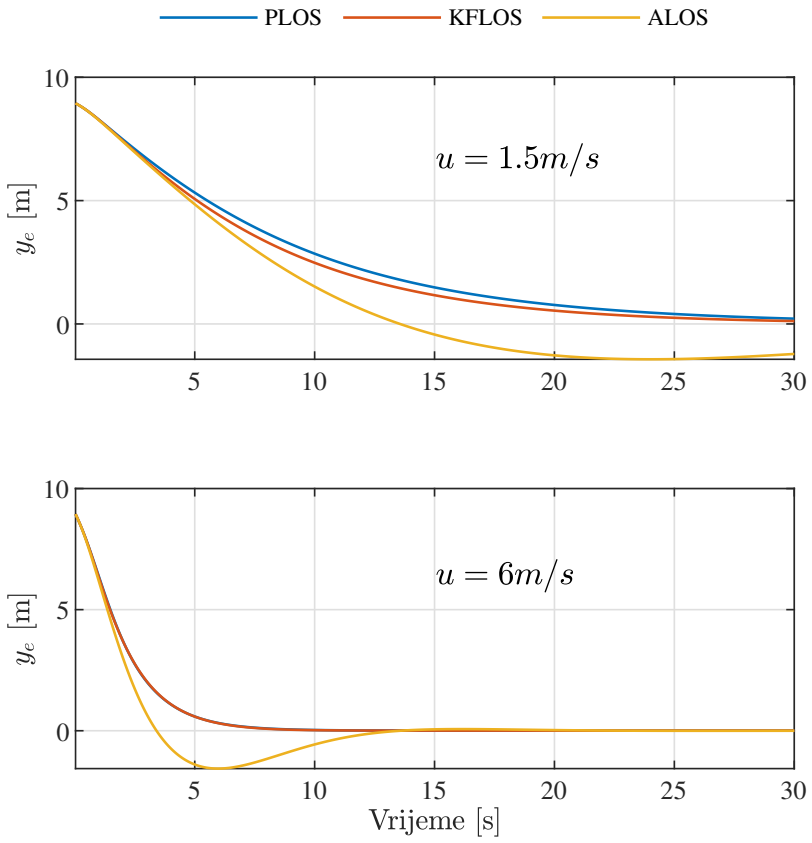
Tablica 4.7: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β pri brzini vozila od $6m/s$

Zakoni/Putanje	P1	P2	P3	P4
PLOS	1.2166	0.0839	0.0535	0.4868
KFLOS	1.1866	0.0841	0.0480	0.4812
ALOS	1.1803	0.1201	0.0504	0.4538

Tablica 4.8: Srednja kvadratna greška položaja pri brzini vozila od $6m/s$

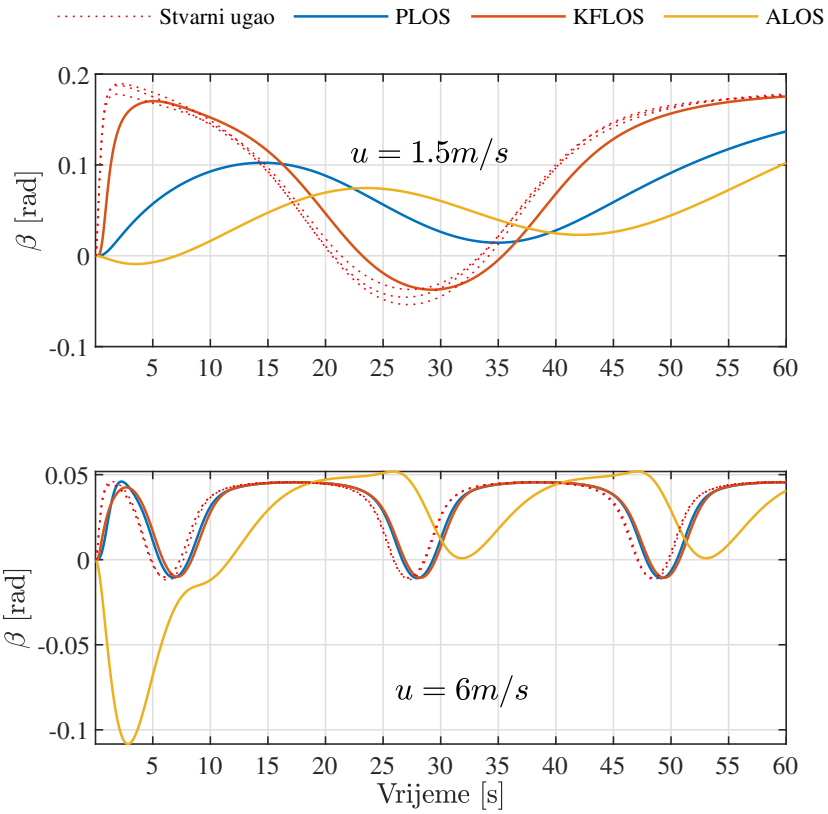


Slika 4.25: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P1

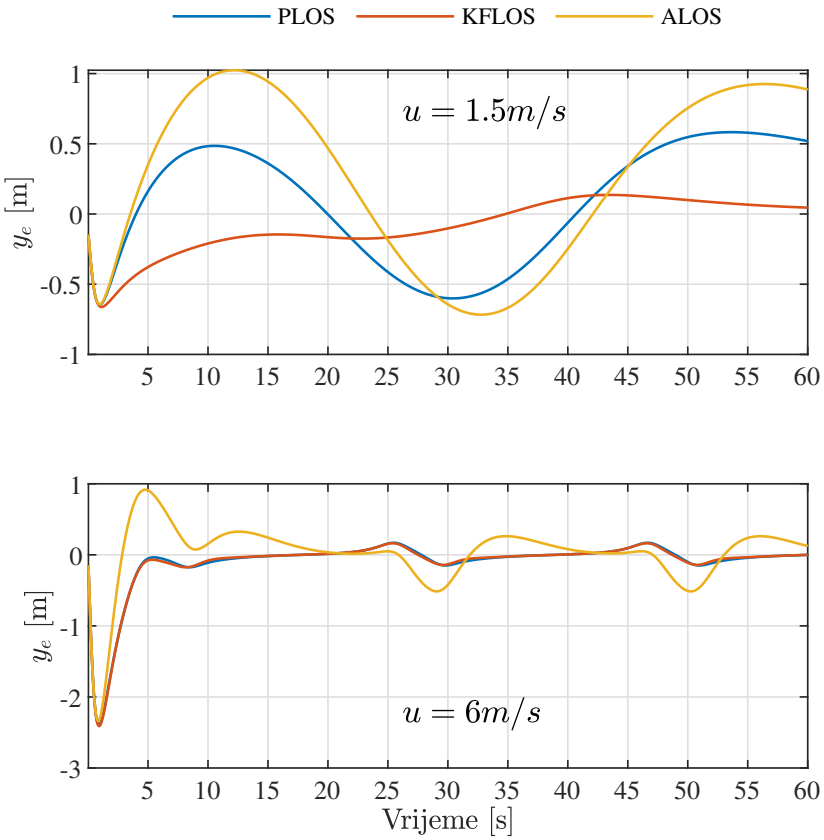


Slika 4.26: Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P1

U slučaju kada plovilo prati putanja P2 mogu se donijeti slični zaključci kao u slučaju kada se prati putanja P1. Predloženi algoritam i dalje najbolje estimira ugao bočnog klizanja pri manjim brzinama, dok PLOS pokazuje poboljšane performanse pri većim brzinama, čak nadmašujući KFLOS, kao što je prikazano na slici 4.27. Iako PLOS algoritam bolje procjenjuje ugao bočnog klizanja pri većim brzinama, dok KFLOS pokazuje slične karakteristike kao i PLOS po pitanju greške položaja pri većoj brzini što je vidljivo na slici 4.28.

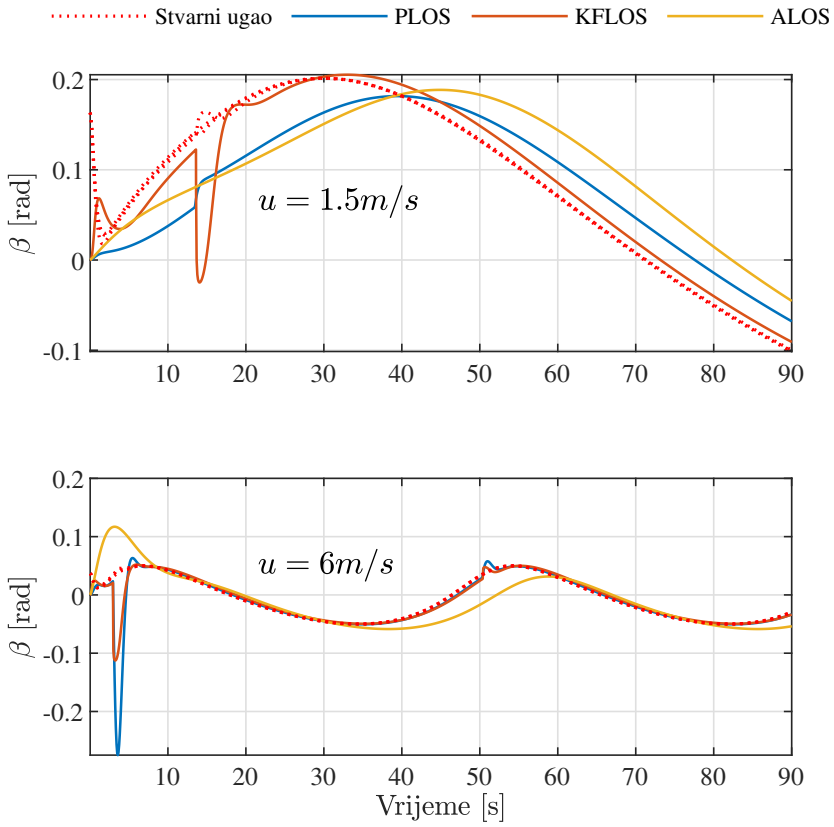


Slika 4.27: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P2

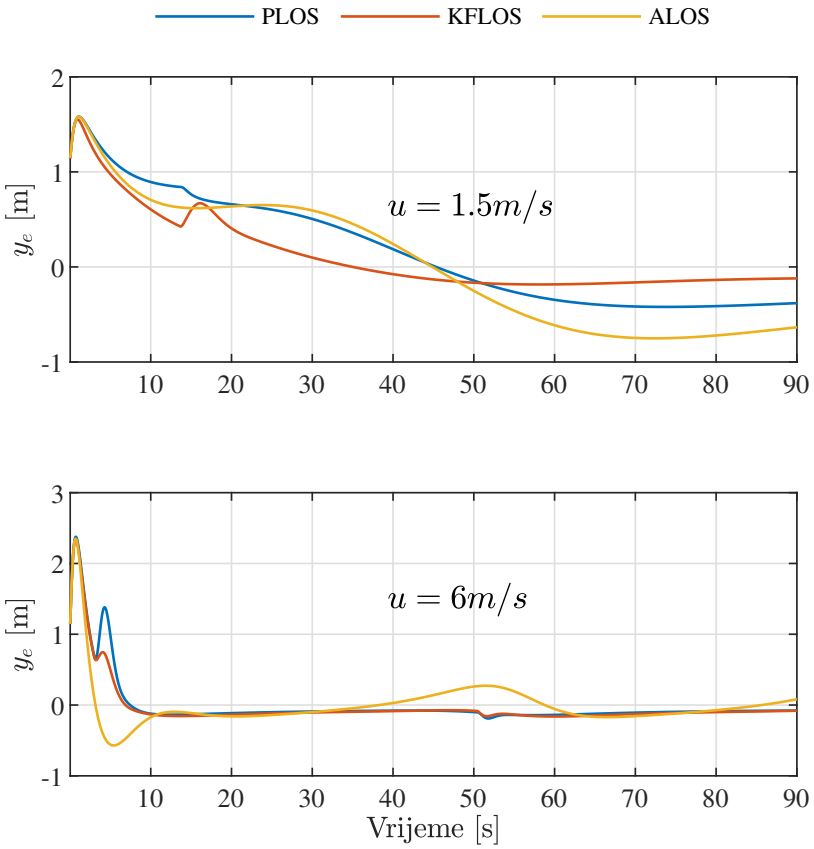


Slika 4.28: Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P2

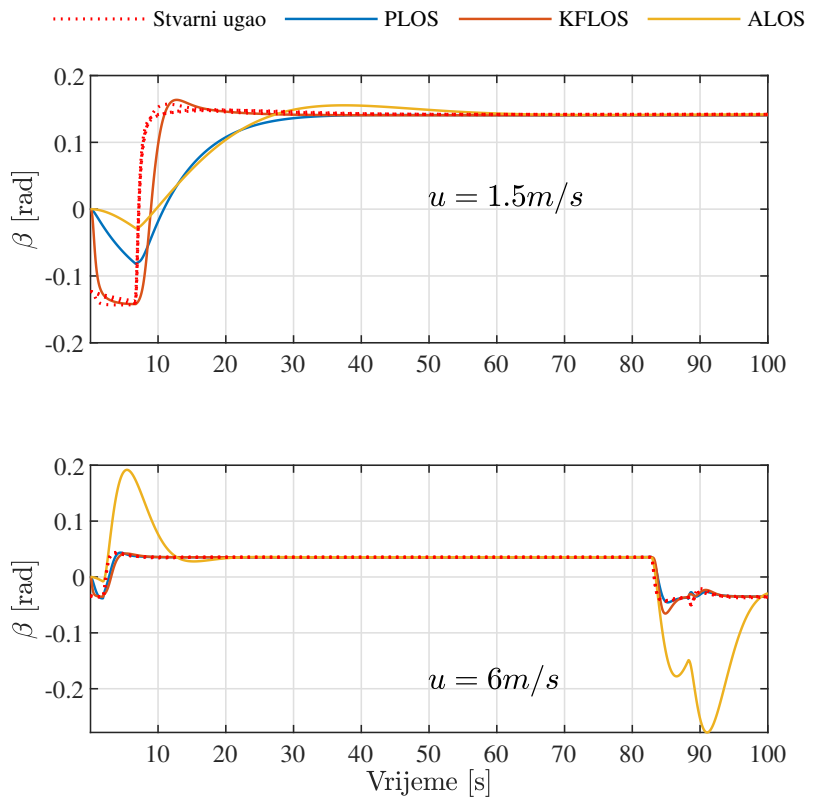
Kao i u prethodnim primjerima, u slučaju kada plovila prate putanju P3 i P4, pokazuje se da KFLOS ostvaruje najbolje performanse pri manjim brzinama, dok PLOS poboljšava svoje rezultate pri većim brzinama. Međutim, na slici 4.29 može se primijetiti da PLOS pri većim brzinama pokazuje preskok u estimaciji ugla bočnog klizanja. Slično prethodnim primjerima, na slici 4.30 vidi se da PLOS poboljšava svoje performanse, te pri većim brzinama čak dostiže predloženi algoritam. Slično, tokom praćenja putanje P4, KFLOS ostvaruje bolje performanse pri manjim brzinama u odnosu na ostale algoritme, dok PLOS značajno poboljšava svoje rezultate u pogledu estimacije ugla bočnog klizanja i nadmašuje predloženi algoritam pri većim brzinama. Stvarne i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja su prikazane na slici 4.31, dok je greška položaja prikazana na slici 4.32.



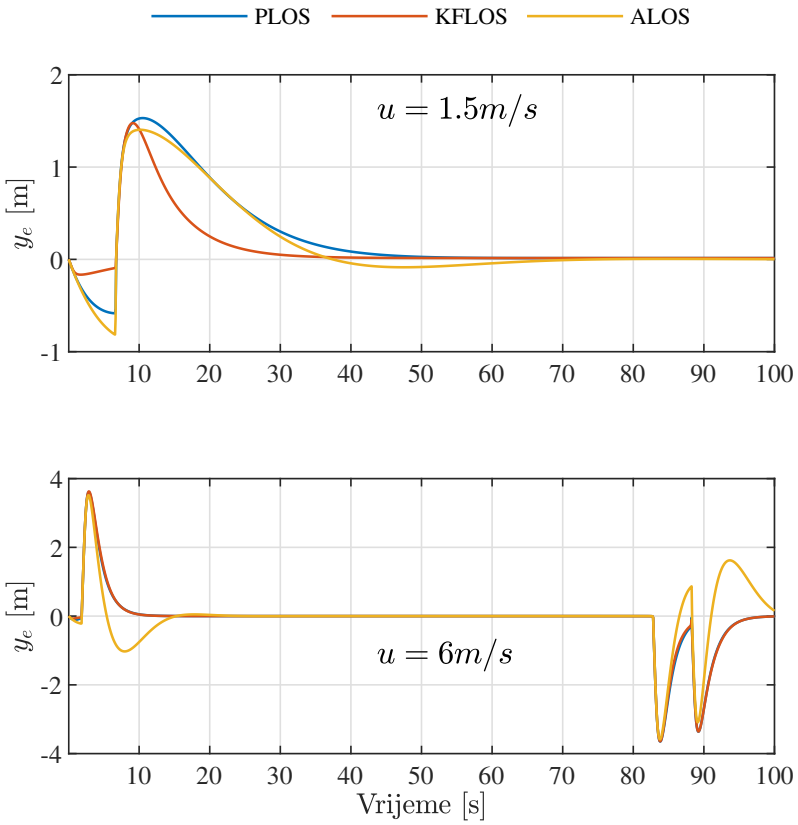
Slika 4.29: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P3



Slika 4.30: Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P3



Slika 4.31: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim brzinama tokom praćenja putanje P4



Slika 4.32: Greška položaja za različite brzine plovila tokom praćenja putanje P4

Na kraju, na osnovu tabela 4.5, 4.6, 4.7 i 4.8, može se primijetiti da, iako PLOS i ALOS algoritmi u nekim situacijama, posebno pri većim brzinama, ostvaruje bolje rezultate od predloženog algoritma, KFLOS pokazuje robusnije performanse. To je vidljivo kroz manje srednje kvadratne greške u estimaciji ugla bočnog klizanja i greške položaja, kao i sa slika 4.25-4.32. Zaključak je da KFLOS ne zahtijeva dodatno podešavanje parametara za različite brzine, jer njegove performanse gotovo da ne zavise od brzine vozila, što predstavlja značajnu prednost u praktičnim primjenama.

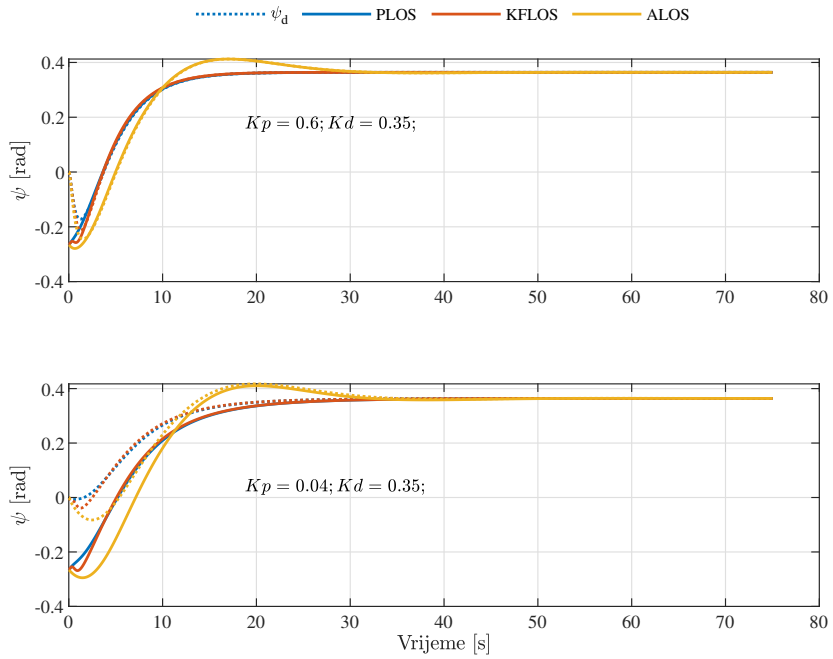
4.2.4 Uticaj parametara PD kontrolera na performase algoritama

U prethodnim simulacijama korišćen je veoma brz PD kontroler skretanja. U ovom dijelu vrši se poređenje tog brzog kontrolera sa sporijim kontrolerom, pri čemu je brzinu plovila $u = 3m/s$. Parametri brzog kontrolera su $K_p = 0.6$ i $K_d = 0.35$, dok sporiji kontroler koristi parametre $K_p = 0.04$ i $K_d = 0.35$. Poređenje je izvršeno za dvije putanje: P1, koja je pravolinijska i najčešće se koristi za analizu performansi algoritama, i P4, jer je to najčešće korišćena putanja za autonomna plovila.

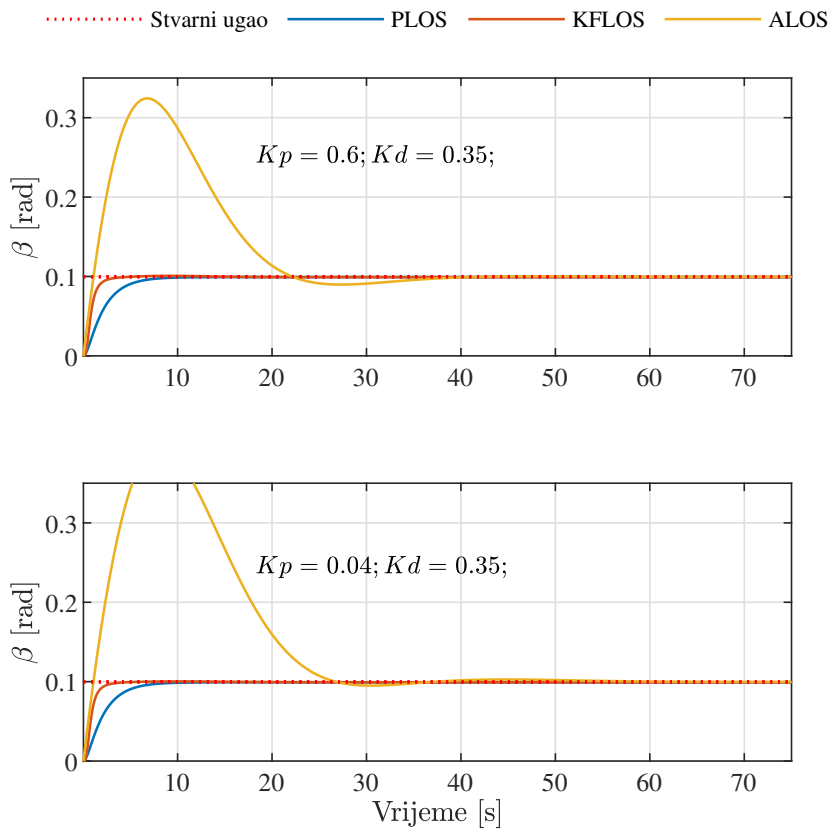
Performanse kontrolera skretanja u slučajevima kada se prate putanje P1 i P4 prikazane su na slikama 4.33 i 4.36, respektivno. Može se uočiti da u drugom slučaju

dolazi do značajnog odstupanja željenog ugla kursa ψ_d i stvarnog ugla kursa, iz razloga što kontroler nije brz. Slike 4.34 i 4.37 prikazuju performanse estimatora ugla bočnog klizanja. Može se uočiti da brzina kontrolera nema velikog uticaja na performanse KFLOS-a i PLOS-a, dok se performanse ALOS-a značajno pogoršavaju u slučaju kada se koristi sporiji kontroler. Slični zaključci važe i za grešku položaja koja je prikazana na slikama 4.35 i 4.38, za putanje P1 i P4 respektivno.

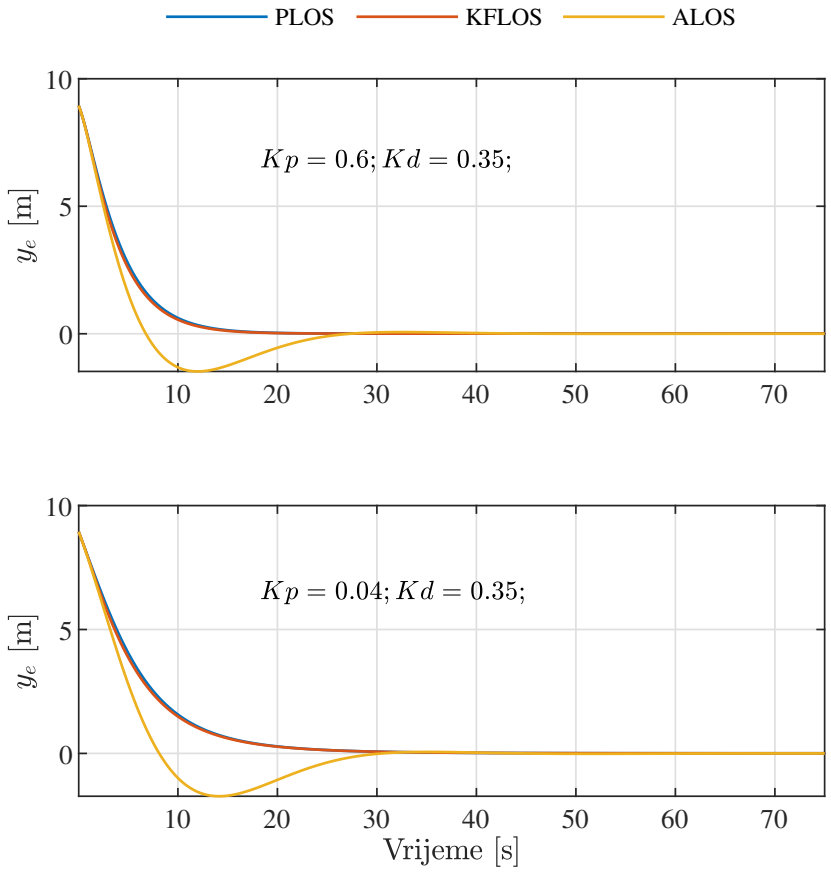
Srednje kvadratne greške u estimaciji ugla bočnog klizanja prikazane su u tabelama 4.9 i 4.11, dok su srednje kvadratne greške položaja date u tabelama 4.10 i 4.12. Iz rezultata prikazanih u tabelama 4.9 i 4.10, vidljivo je da KFLOS algoritam postiže najbolje performanse pri implementaciji bržeg kontrolera. S druge strane, tabela 4.11 pokazuje da estimacija ugla bočnog klizanja ostaje približno ista za obje putanje. Što se tiče greške položaja, podaci iz tabele 4.12 pokazuju da ALOS algoritam ostvaruje najmanju srednju kvadratnu grešku položaja prilikom implementacije sporijeg kontrolera. Međutim, sa slike 4.38 se može uočiti da ALOS ima najmanju MSE zbog najbržeg odziva, ali je ujedno i jedini metod koji dovodi do preskoka, što je nepoželjno ponašanje.



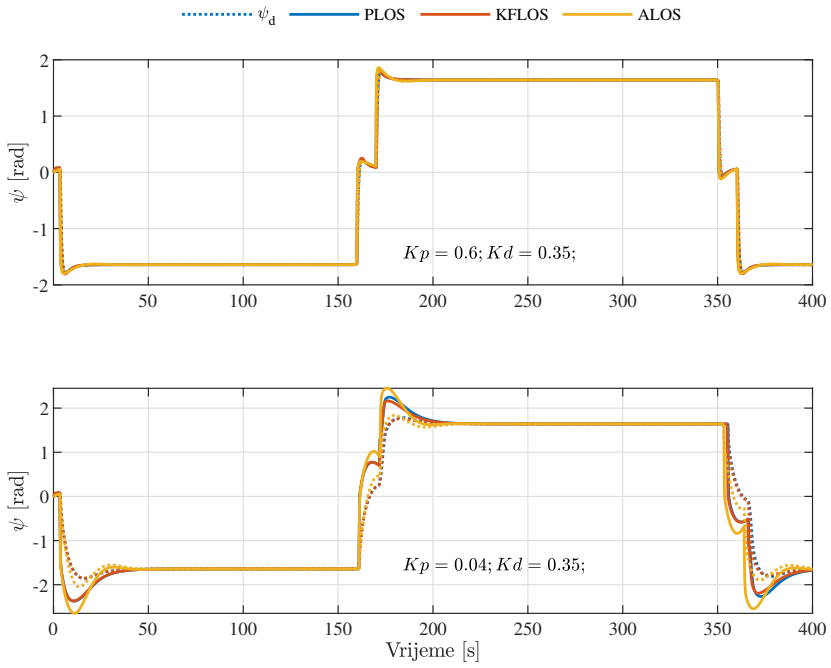
Slika 4.33: Stvarna i željena vrijednost ugla skretanja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P1



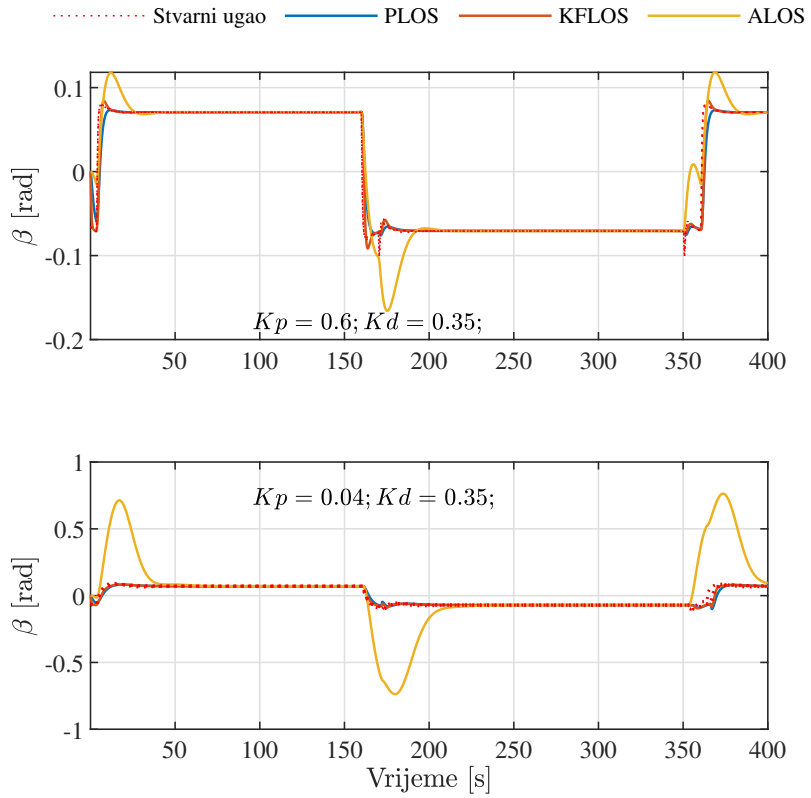
Slika 4.34: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim parametrima kontrolera tokom praćenja putanje P1



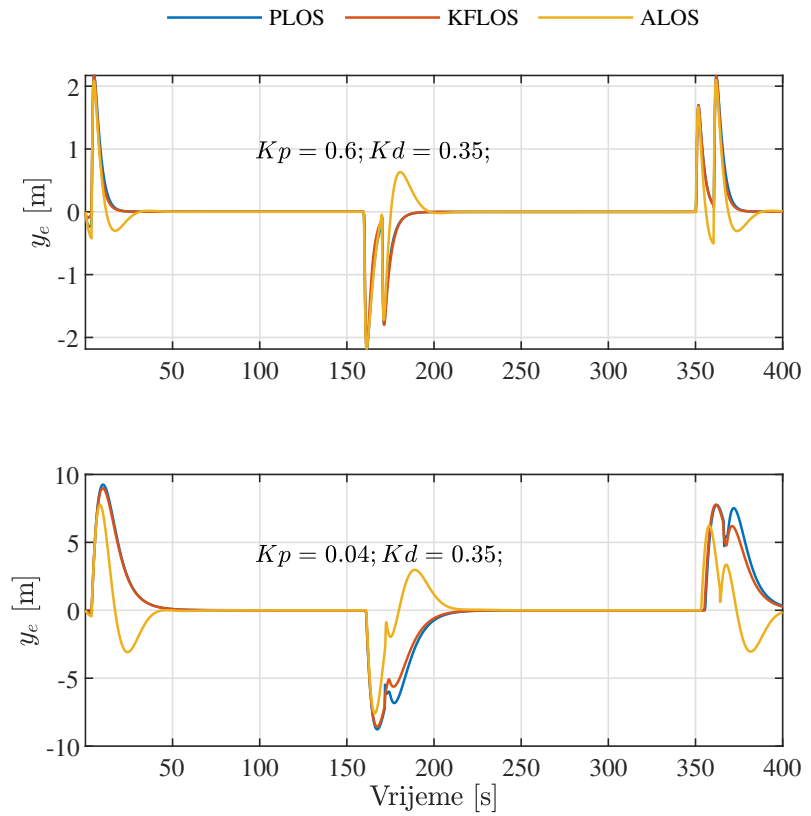
Slika 4.35: Greška položaja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P1



Slika 4.36: Stvarna i željena vrijednost ugla skretanja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P4



Slika 4.37: Stvarna i estimirane vrijednosti ugla bočnog klizanja pri različitim parametrima kontrolera tokom praćenja putanje P4



Slika 4.38: Greška položaja za različite parametre kontrolera tokom praćenja putanje P4

Zakoni/Putanje	P1	P4
PLOS	1.7454×10^{-4}	1.6106×10^{-4}
KFLOS	4.5719×10^{-5}	1.0753×10^{-4}
ALOS	0.0055	4.998×10^{-4}

Tablica 4.9: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β za parametre $K_p = 0.6; K_d = 0.35$

Zakoni/Putanje	P1	P4
PLOS	2.4943	0.1606
KFLOS	2.3522	0.1457
ALOS	2.3417	0.1480

Tablica 4.10: Srednja kvadratna greška položaja za parametre $K_p = 0.6; K_d = 0.35$

Zakoni/Putanje	P1	P4
PLOS	1.7428×10^{-4}	1.2352×10^{-4}
KFLOS	4.5648×10^{-5}	4.0274×10^{-5}
ALOS	0.0112	0.0555

Tablica 4.11: Srednja kvadratna greška estimacije ugla bočnog klizanja β za parametre $K_p = 0.04; K_d = 0.35$

Zakoni/Putanje	P1	P4
PLOS	3.4208	7.8161
KFLOS	3.2209	6.7304
ALOS	2.9790	3.3293

Tablica 4.12: Srednja kvadratna greška položaja za parametre $K_p = 0.04; K_d = 0.35$

Poglavlje 5

Zaključak

U radu je razmotren problem vođenja autonomnog plovila po zadatoj krivolinijskoj putanji u prisustvu spoljašnjih poremećaja. Predložen je LOS algoritam koji omogućava estimaciju ugla bočnog klizanja i kompenzaciju njegovog uticaja na praćenje putanje. Predloženi algoritam se zasniva na Kalmanovom filteru i omogućava precizno praćenje krivolinijske putanje sa minimalnom greškom. Za razliku od postojećih rješenja, u predloženom algoritmu ugao bočnog klizanja se tretira kao nepoznato stanje sistema, koje se istovremeno estimira sa greškama u praćenju putanje. Ovakvim pristupom se postiže brža estimacija ugla klizanja i manja greška u praćenju putanje.

Na osnovu detaljne analize rezultata simulacija, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Predloženi zakon vođenja brže estimira ugao bočnog klizanja u poređenju sa postojećim metodama, a samim tim postiže i bolje performanse u praćenju referentne putanje.
- Za razliku od postojećih rješenja, brzina konvergencije predloženog estimatora ugla bočnog klizanja ne zavisi od brzine plovila, što je od posebnog značaja u praktičnim primjenama, jer pojednostavljuje implementaciju i povećava robusnost sistema.
- Iako je izveden pod pretpostavkom da je ugao bočnog klizanja konstantan, predloženi estimator efikasno estimira i vremenski promjenljive uglove. Međutim, važno je pronaći kompromis između brzine konvergencije estimatora i osjetljivosti na mjerni šum, što se postiže odgovarajućim odabirom matrica Q i R.
- Pokazano je da parametri kontrolera skretanja nemaju značajan uticaj na estimaciju ugla bočnog klizanja, već da utiču samo na brzinu konvergencije greške položaja, što je takođe poželjna osobina sa stanovišta praktične implementacije.

Dalja istraživanja biće usmjerena na detaljniju analizu uticaja matrice Q i njenih pojedinačnih elemenata na performanse u praćenju putanje i preciznost estimacije ugla bočnog klizanja. Takođe, predloženo rješenje biće implementirano na realnom plovilu u cilju verifikacije rezultata simulacija i dodatnog unaprjeđenja algoritma za praktičnu primjenu.

Bibliografija

[1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley and Sons, 2011.

[2] T. I. Fossen, *Marine control systems : guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.

[3] 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, jan 2023.

[4] 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, nov 2008.

[5] Y. L. Wang, Q. L. Han, M. R. Fei, and C. Peng, "Network-Based T-S Fuzzy Dynamic Positioning Controller Design for Unmanned Marine Vehicles," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 48, pp. 2750–2763, sep 2018.

[6] A. J. Sørensen, "A survey of dynamic positioning control systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 35, pp. 123–136, apr 2011.

[7] A. P. Aguiar and J. P. Hespanha, "Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, pp. 1362–1379, aug 2007.

[8] R. Skjetne, T. I. Fossen, and P. V. Kokotović, "Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory," *Automatica*, vol. 41, pp. 289–298, feb 2005.

[9] M. Breivik, V. E. Hovstein, and T. I. Fossen, "Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles," *Modeling, Identification and Control*, vol. 29, no. 4, pp. 131–149, 2008.

[10] Y. Jiang, Z. Peng, D. Wang, and C. L. Chen, "Line-of-Sight Target Enclosing of an Underactuated Autonomous Surface Vehicle with Experiment Results," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, pp. 832–841, feb 2020.

[11] Z. Peng, J. Wang, D. Wang, and Q. L. Han, "An Overview of Recent Advances in Coordinated Control of Multiple Autonomous Surface Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, pp. 732–745, feb 2021.

[12] E. Fredriksen and K. Y. Pettersen, "Global κ-exponential way-point maneuvering of ships: Theory and experiments," *Automatica*, vol. 42, pp. 677–687, apr 2006.

[13] 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, jan 2016.

[14] 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, no. 6, pp. 2287–2301, 2014.

[15] 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, mar 2015.

[16] L. Asanin, L. Martinovic, Z. Zecevic, 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 2023*, 2023.

[17] 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, jan 2016.

[18] 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, dec 2012.

[19] V. Bertram, "Unmanned Surface Vehicles-A Survey,"

[20] M. Breivik and T. I. Fossen, "Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles," *226*, vol. 2005, pp. 1518–1523, 2010.

[21] G. Roberts and R. Sutton, eds., *Advances in unmanned marine vehicles*. The Institution of Engineering and Technology, 2006.

[22] J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," *OCEANS 2008*, 2008.

[23] K. D. Do and J. Pan, "Control of Ships and Underwater Vehicles," 2009.

[24] K. Davidson and L. Schiff, "Turning and course keeping qualities," *Stevens Institute of Technology, Experimental Towing Tank, Hoboken, New Yersey,*

Presented at The Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME Transactions, 1946.

[25] 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.

[26] M. Kono, "Geomagnetism: An Introduction and Overview," *Treatise on Geophysics: Second Edition*, vol. 5, pp. 1–31, jan 2015.

[27] "GNSS Solutions." www.insidegnss.com, 2010.

[28] L. Liu, D. Wang, Z. Peng, and T. Li, "Modular adaptive control for LOS-based cooperative path maneuvering of multiple underactuated autonomous surface vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, pp. 1613–1624, jul 2017.

[29] K. Y. Pettersen and E. Lefeber, "Way-point tracking control of ships," *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 940–945, 2001.

[30] T. I. Fossen and K. Y. Pettersen, "On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws," *Automatica*, vol. 50, pp. 2912–2917, nov 2014.

[31] 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.

[32] A. M. Kohl, K. Y. Pettersen, E. Kelasidi, and J. T. Gravdahl, "Planar Path Following of Underwater Snake Robots in the Presence of Ocean Currents," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, pp. 383–390, jan 2016.

[33] 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, sep 2016.

[34] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, 2002.

[35] A. Loría and E. Panteley, "Cascaded Nonlinear Time-Varying Systems: Analysis and Design," *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol. 311, pp. 23–64, aug 2005.

[36] 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, sep 2016.

[37] M. Krstic, P. Kokotovic, and I. Kanellakopoulos, *Nonlinear and adaptive control design*. John Wiley & Sons Ltd., 1995.

[38] T. E. Gibson, A. M. Annaswamy, and E. Lavretsky, "On adaptive control with closed-loop reference models: Transients, oscillations, and peaking," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 703–717, 2013.

[39] L. Ašanin, "Predlog algoritma za autonomno kretanje površinskog vozila po zadatoj putanji sa kompenzacijom bočnog klizanja." https://www.ucg.ac.me/radovi/13/Master rad - LAZAR ASANIN.pdf, 2023. Master rad.

[40] P. S. Maybeck, "Stochastic models, estimation, and control. Vol. 3 Peter S. Maybeck," 1982.

[41] H. W. Sorenson, "Least-squares estimation: from Gauss to Kalman: The Gaussian concept of estimation by least squares, originally stimulated by astronomical studies, has provided the basis for a number of estimation theories and techniques during the ensuing 170 years—prob," *IEEE Spectrum*, vol. 7, no. 7, pp. 63–68, 1970.

[42] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, mar 1960.

[43] "The Discrete Kalman Filter." https://cs.brown.edu/stc/education/course95-96/Kalman-Filters/kalman.html.

[44] Ž. Zečević, "Optimalno upravljanje materijal sa predavanja." https://www.ucg.ac.me/.

[45] V. Cetkovic, L. Martinovic, and Z. Zecevic, "Improved LOS Guidance Law for Curved Path Following of Underactuated USV in Presence of Ocean Currents," *2024 28th International Conference on Information Technology, IT 2024*, 2024.

[46] "Hydrographic Boat 120 - 12m strong design of survey boat — MAURIC." https://www.mauric.ecagroup.com/hydrographic-boat-120.