

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Nikola Stilinović, Zoran Triska, Viktor Vladić

# **Napredne metode vođenja i upravljanja autonomnim plovilima**

Zagreb, svibanj 2012.

*Ovaj rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Zavodu za automatiku i računalno inženjerstvo, Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije (SuZ-FER-LAPOST) pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Vukića i doc. dr. sc. Nikole Miškovića i predan je na natječaj za dodjelu rektorove nagrade u akademskoj godini 2011./2012.*

**Tablica 1:** Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu

Skraćenica	Objašnjenje
$\{E\}$	koordinatni sustav vezan za Zemlju
$\{B\}$	koordinatni sustav vezan za plovilo
$u$	brzina napredovanja
$X$	sila napredovanja
$v$	brzina zanošenja
$Y$	sila zanošenja
$r$	brzina zaošijanja
$N$	moment zaošijanja
$w$	brzina zaranjanja
$Z$	sila zaranjanja
$p$	brzina ljuljanja
$K$	moment ljuljanja
$q$	brzina poniranja
$M$	moment poniranja
$x$	apsolutna pozicija u odnosu na N-os $\{E\}$
$y$	apsolutna pozicija u odnosu na E-os $\{E\}$
$z$	dubina
$\Phi$	kut ljuljanja
$\theta$	kut poniranja
$\psi$	orijentacija plovila
$\tau$	$6 \times 1$ vektor sila i momenata na plovilo
$\tau^i$	vektor sila potiska svakog aktuatora
$n^i$	brzina vrtnje propelera
$u_a$	okolna brzina vode
$U_{wake}$	brzina kod koje je još uvijek moguće manevrirati
$U$	vektor apsolutne brzine plovila
$K_T$	pozitivna konstanta koja definira karakteristiku propulzora
$\delta_a$	relativni kut između kormila i protoka vode
$v_{av}$	protok vode u području koje zahvaća kormilo
$\delta_s$	kut kormila pri kojem se postiže najveće zaošijanje
$C_F$	koeficijent kormila

Nastavak na idućoj stranici...

Tablica 1 – Nastavak

Skraćenica	Objašnjenje
$k_F$	koeficijent kormila pri pojednostavljenom modelu
$L_1$	udaljenost kormila do centra mase broda
$L_2, L_3$	udaljenosti tunelskog propulzora do centra mase broda
$\alpha_\nu$	inercijski parametar za pojedini stupanj slobode
$\beta(\nu(t))$	parametar hidrodinamičkog otpora
$\beta_\nu$	parametar hidrodinamičkog otpora (konstantan)
$P$	potisak izražen brojkom
$C$	izlaz iz releja
$x_a$	širina histereze releja
$X_m$	amplituda vlastitih oscilacija
$\omega$	frekvencija vlastitih oscilacija
$x_0$	odstupanje uzrokovano asimetrijom plovila
$T_H$	trajanje visokog izlaza releja tijekom 1 oscilacije
$T_L$	trajanje niskog izlaza releja tijekom 1 oscilacije
$IS - O$	identifikacija na temelju primjene vlastitih oscilacija
$\cdot_{ref}$	referentna vrijednost
$\tau_{\nu E}$	smetnje i nemodelirana dinamika
$\Delta$	poremećajna veličina
KF	Kalmanov filter
EKF	prošireni Kalmanov filter
$\eta$	vektor $6 \times 1$ pozicija i orijentacija
$\nu$	vektor $6 \times 1$ brzina linearnih i kutnih brzina
$\hat{\eta}$	estimirane pozicije i orijentacije
$\hat{\nu}$	estimirane linearne i kutne brzine
$\hat{\cdot}$	estimirana veličina
$\underline{x}(k)$	vektor stanja
$\underline{u}(k)$	ulazni (upravljački) vektor
$\underline{w}(k)$	vektor procesnog šuma
$\hat{\underline{x}}^-$	prediktivni vektor stanja
$\underline{y}(k)$	vektor mjerenja
$f(\cdot, \cdot, \cdot)$	funkcija opisa modela u prostoru stanja

Nastavak na idućoj stranici...

Tablica 1 – Nastavak

Skraćenica	Objašnjenje
$h(\cdot, \cdot, \cdot)$	funkcija opisa izlaza
$\mathbf{A}(\mathbf{k})$	matrica stanja za EKF
$\mathbf{P}(\mathbf{k})$	matrica nesigurnosti stanja za EKF
$\mathbf{H}(\mathbf{k})$	matrica mjerenja za EKF
$\mathbf{W}(\mathbf{k}), \mathbf{V}(\mathbf{k})$	<i>Jacobian</i> matrice za EKF
$\mathbf{Q}$	matrica kovarijance za EKF
$\xi$	procesni bijeli šum
$T$	period uzorkovanja
$\mathbf{I}$	jedinična matrica
$\mathbf{K}(\mathbf{k})$	matrica Kalmanovog pojačanja
$x_c, y_c$	stanja za dinamiku morske struje
$\mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma^2)$	Gaussova normalna razdioba
$\Gamma$	orijentiranost linije
$R(\Gamma)$	rotacijska matrica
$\epsilon$	vektor udaljenosti
$s(t)$	udaljenost duž linije
$e(t)$	udaljenost okomita na liniju
$u_r$	vektor brzine paralelan liniji
$u_d$	vektor brzine okomit na liniju
$X_d$	sila okomita na liniju
$X_r$	sila paralelna liniju
$G$	dinamika napredovanja i zanošenja
$d$	okomita udaljenost do linije
$G_m(s)$	modelska prijenosna funkcija
$G_{Cl}(s)$	prijenosna funkcija zatvorenog kruga
$G_R(s)$	prijenosna funkcija regulatora
$\omega_n$	kružna frekvencija regulatora
$t_u$	vrijeme porasta
$E(s)$	regulacijsko odstupanje
$U_{max}$	gornja granica upravljačkog signala
$U_{min}$	donja granica upravljačkog signala

Nastavak na idućoj stranici...

Tablica 1 – Nastavak

Skraćenica	Objašnjenje
$S$	zastavica uvjetnog integriranja
$ZOH$	Zero order hold element
$\omega_c$	kružna frekvencija
$DP$	dinamičko pozicioniranje
$\cdot^*$	rotirane koordinate
$\psi_e$	orijentacija totalne brzine
$\{F\}$	<i>Serret-Frenet</i> koordinatni sustav
$s$	udaljenost po liniji
$\psi_f$	orijentacija virtualne mete
$c_c(s)$	zakrivljenost putanje
$g_c(s)$	derivacija zakrivljenosti
$\beta$	razlika $\psi_e - \psi_f$
$\varphi(y_1)$	kut prilaza putanji
$r^*$	kinematički referenca zaošijanja
$\dot{V}$	derivacija Lyapunovljeve funkcije
$u_{max}^*$	ograničenje brzine napredovanja
$s_L$	udaljenost vođe po prijedenoj dužini
$s_F$	udaljenost pratitelja po dužini
$\Delta s$	razlika udaljenosti vođe i pratioca
$D^*$	željena udaljenost između plovila
$u_L$	brzina napredovanja vođe
$VT$	virtualna meta
$CVT$	koordinirani virtualni cilj
$\dot{s}_{max}^*$	brzina gibanja CVT-a
$\bar{\beta}$	razlika tangenti CVT-a i VT-a
$v^*$	referentna brzina zanošenja

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Matematičko modeliranje plovila</b>	<b>4</b>
2.1. Aktuatori	5
2.1.1. Model propulzora	6
2.1.2. Model kormila	7
2.2. Alokacija aktuatora	7
2.2.1. Alokacija aktuatora platforme	7
2.2.2. Alokacija aktuatora broda	9
2.3. Dinamički model plovila	10
2.4. Kinematički model plovila	12
<b>3. Opis autonomnih plovila</b>	<b>13</b>
3.1. Platforma PlaDyPos	13
3.1.1. Osnovni podaci	14
3.1.2. Uređaji i oprema na platformi	16
3.2. Tanker CyberShip	21
3.2.1. Trup broda	21
3.2.2. Aktuatori	22
3.2.3. Elektronika	23
3.2.4. Komunikacija	26
<b>4. Identifikacija plovila</b>	<b>28</b>
4.1. Mapiranje potisnika	28
4.1.1. Potisnici platforme PlaDyPos	29
4.1.2. Potisnici tankera CyberShip	30
4.2. Identifikacija parametara primjenom vlastitih oscilacija	31
4.2.1. Vlastite oscilacije platforme	32

4.2.2.	Vlastite oscilacije broda . . . . .	37
<b>5.</b>	<b>Projektiranje Kalmanovog filtra</b>	<b>41</b>
5.1.	Opći izrazi proširenog Kalmanova filtra (EKF) . . . . .	42
5.2.	EKF za estimaciju orijentacije i brzine zaošijanja . . . . .	43
5.3.	EKF za estimaciju pozicije i brzine napredovanja . . . . .	45
5.4.	Rezultati i usporedba EKF-a . . . . .	49
<b>6.</b>	<b>Metode vođenja i upravljanja</b>	<b>52</b>
6.1.	Slijedenje linije . . . . .	52
6.1.1.	Postavljanje problema i definiranje upravljačkih pravila . . . . .	52
6.1.2.	Konačni automat za prebacivanje na praćenje sljedeće linije . . . . .	55
6.1.3.	Projektiranje regulatora . . . . .	58
6.1.4.	Eksperimentalni rezultati . . . . .	65
6.2.	Dinamičko pozicioniranje . . . . .	72
6.2.1.	Metoda 1 . . . . .	72
6.2.2.	Metoda 2 . . . . .	73
6.3.	Regulator orijentacije . . . . .	80
6.4.	Praćenje trajektorije . . . . .	81
<b>7.</b>	<b>Praćenje putanje korištenjem virtualnog cilja</b>	<b>85</b>
7.1.	Model kinematičke pogreške . . . . .	85
7.2.	Projektiranje nelinearnog kinematičkog regulatora . . . . .	89
7.3.	Proširenje na dinamiku . . . . .	91
7.4.	I-P regulator . . . . .	92
7.5.	Kontrola i adaptacija brzine napredovanja . . . . .	94
<b>8.</b>	<b>Kooperativno upravljanje plovilima</b>	<b>96</b>
8.1.	Praćenje plovila . . . . .	96
8.2.	<i>Wingman</i> problem . . . . .	99
<b>9.</b>	<b>Rezultati</b>	<b>102</b>
9.1.	Eksperimentalni rezultati - virtualna meta . . . . .	102
9.2.	Simulacijski rezultati - Praćenje plovila . . . . .	107
9.3.	Simulacijski rezultati - <i>wingman</i> problem . . . . .	110
9.4.	Pristajanje broda uz platformu . . . . .	111
9.4.1.	Pristajanje broda dinamičkim pozicioniranjem . . . . .	112



9.4.2. Pristajanje broda slijeđenjem putanje . . . . .	115
<b>10. Zaključak</b>	<b>119</b>
<b>Literatura</b>	<b>121</b>
<b>Popis slika</b>	<b>124</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>127</b>

# 1. Uvod

Na Zemlji oko 70% površine pokriveno je vodom. Ovo područje ne samo da je iznimno važno za klimu, već je i iznimno bogato rudnim bogatstvima. Na dnu oceana kroz milijune godina taložio se sediment koji je u sebi sačuvao kemijski sastav vremena u kojem je nastao. Iz uzoraka uzetih s dna oceana znanstvenici danas istražuju klimu davno prošlih vremena. Pored toga oko 80% prijevoza roba u svijetu obavlja se morskim putem. Vodni resursi, more i podmorje danas su iznimno važni za našu budućnost. Dvadeset i prvo stoljeće bit će stoljeće prodora u morske dubine koje nisu dovoljno istražene. Mi danas znamo više o tome što se odigrava npr. na Mjesecu ili Marsu nego što znamo što se odigrava u podmorju. Za prodor čovjeka u opasne i negostoljubive prostore podmorja morat će se razviti tehnički sustavi i tehnologije koje će nam u prodoru u dubine pomoći. Kako bi optimalno iskoristili resurse koji su nam na raspolaganju nužno je razvijati i koristiti, kako ronilice tako i površinska plovila. Znali su to i drevni narodi, doduše bez razvijene tehnike koja krasí našu svakodnevicu; krenuli su razvijati i usavršavati svoja plovila koja su im donijela mnoge blagodati. Brodovi su kroz stoljeća postajali sve značajniji: razvijala se trgovina, korišteni su u vojne svrhe, a primjenu su nalazili i u mnogim drugim granama. Nove mehaničke metode propulzije, sposobnost izgradnje metalnih brodova kao i brojne tehničke novine stvorile su izvrsne preduvjete za razvoj plovila kojima više neće biti potreban čovjek da bi njima upravljao. Razvojem znanosti, pogotovo teorije upravljanja nelinearnim sustavima, razvijaju se napredniji algoritmi upravljanja. Nelinearno vođenje plovila zajedno s teorijom upravljanja danas je vrlo aktualno područje u upravljanju plovilima. Vežano za ovu granu razvoja javilo se i koordinirano i kooperativno upravljanje plovilima kao još nedovoljno istraženo i razvijeno područje. Počevši od jednostavnog slijeđenja plovila gdje prateće plovilo pokušava izvršiti istu putanju koju je napravilo vodeće plovilo pa sve do držanja složenih formacija i pritom vodeći brigu da ne dođe do međusobne kolizije. U ovom radu bit će predstavljene napredne metode upravljanja i vođenja autonomnim plovilima te cjelokupni razvoj i identifikacija dva plovila: modela tankera nazvanog CyberShip i autonomne površinske platforme za dinamičko

pozicioniranje pod nazivom PlaDyPos. Radi se o dva autonomna plovila različitih hidrodinamičkih karakteristika i dinamičkih svojstava. Pod autonomnim plovilima podrazumijevamo plovila koja su energetske samostalna (imaju izvore energije na sebi) i koja su u stanju obavljati manevre bez pomoći čovjeka. Današnji autonomni sustavi u stanju su samostalno učiti, reagirati na promjene u okolini, samostalno mijenjati zadatke misije za koju su prvotno programirani i sl.

Rad je organiziran na sljedeći način. U poglavlju 2 opisan je pojedini matematički model plovila. Strukturalno je razložen na nekoliko blokova: aktuatora, alokaciju aktuatora, dinamiku i kinematiku. Dalje u poglavlju daju se specifičniji opisi vezani za sustave koji su korišteni u izradi ovog rada. Opisani modeli su jednostavne prirode što ih čini pogodnim za sintezu upravljačkih algoritama.

Poglavlje 3 opisuje plovne objekte korištene za dobivanje eksperimentalnih rezultata metoda upravljanja i identifikacije čiji opis slijedi u narednim poglavljima. Detaljno su opisani model tankera CyberShip i autonomna površinska platforma za dinamičko pozicioniranje PlaDyPos. Oba plovila nastala su kao rezultat studentskih radova SuZ-FER-LAPOST. Navedena su njihova svojstva, tehničke karakteristike kao i struktura elektroničkih (hardware) rješenja.

U poglavlju 4 obavljena je identifikacija parametara matematičkih modela obaju autonomnih plovila (CyberShip i PlaDyPos). Identifikacija parametara matematičkih modela obavljena je primjenom postupka koji se temelji na vlastitim oscilacijama. Dan je kratak teorijski uvod i prikazani su eksperimentalni rezultati identifikacije za oba plovila. U ovom dijelu kao dio identifikacije sadržan je i postupak mapiranja potisnika uz priložene eksperimentalne rezultate.

U petom poglavlju dan je opis projektiranog Kalmanovog filtra. Kalmanov filter temelji se na proširenom obliku. Kalmanov filter dosta često se susreće osobito u vođenju i upravljanju pokretnim objektima. U istom dijelu prikazana je usporedba odziva s primjenjenim Kalmanovim filtrom s odzivama bez njega.

U poglavlju 6 opisane su konvencionalne metode vođenja i upravljanja plovila. Opisane metode su postupno navođene po složenosti algoritma upravljanja. Prvo je opisan algoritam za slijeđenje linije, zatim su opisane dvije metode dinamičkog pozicioniranja posebno prilagođene za CyberShip i PlaDyPos. Jednostavni algoritmi upravljanja poslužili su kako bi se potvrdilo da su identificirani modeli valjani i da ih je moguće koristiti za napredne algoritme upravljanja koji slijede u sljedećim poglavljima.

U poglavlju 7 opisan je postupak praćenja putanje korištenjem virtualnog cilja. Upotreba virtualnih meta je danas još uvijek aktualna problematika u području po-

dvodne robotike. Njihova upotreba omogućuje slijeđenje proizvoljnih putanja različitih oblika i zakrivljenosti. Virtualne mete iskorištene su i u koordinacijske svrhe. Njihovom upotrebom dobivena je mogućnost raspredanja upravljanja pojedinim plovilom i njihovom koordinacijom.

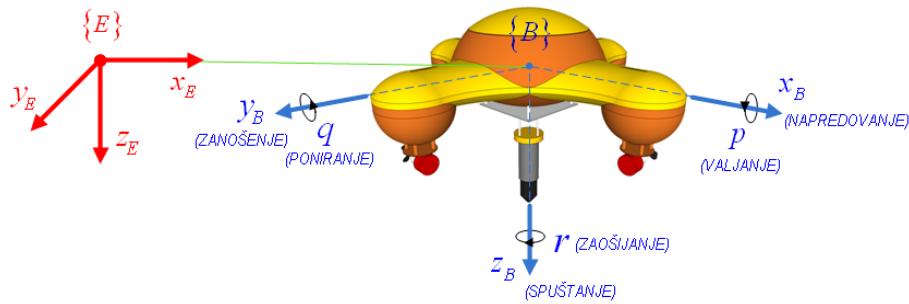
Poglavlje 8 donosi teoriju razrađenu za kooperativno upravljanje primjenom virtualnih meta. Obradena su dva temeljna problema: slijeđenje plovila i *wingman* problem. Na kraju poglavlja prisutni su simulacijski rezultati provedeni u Matlabu nad matematičkim modelima opisanih plovila.

U poglavlju 9 dani su rezultati algoritma za praćenje putanje korištenjem virtualnog cilja. Algoritam je primjenjen na CyberShip brodu unutar laboratorijskog bazena. Snimljeni odzivi mogu se vidjeti na slikama priloženim unutar poglavlja.

Rad je zaključen poglavljem 10 u kojem su navedene spoznaje do kojih se došlo prilikom izrade ovog rada. Opisane su zanimljivosti i poteškoće koje su se našle na putu prilikom testiranja algoritama. Također, navedene su neke od potencijalnih budućih smjernica za istraživanje koje su uočene.

## 2. Matematičko modeliranje plovila

Za definiranje matematičkog modela plovila potrebno je definirati dva koordinatna sustava: koordinatni sustav vezan za Zemlju  $\{E\}$  koji je nepokretan i često se zove inercijski koordinatni sustav; i drugi koordinatni sustav vezan za plovilo  $\{B\}$ , čije ishodište se obično nalazi u centru mase,[9], [12].



Slika 2.1: Definirani koordinatni sustavi

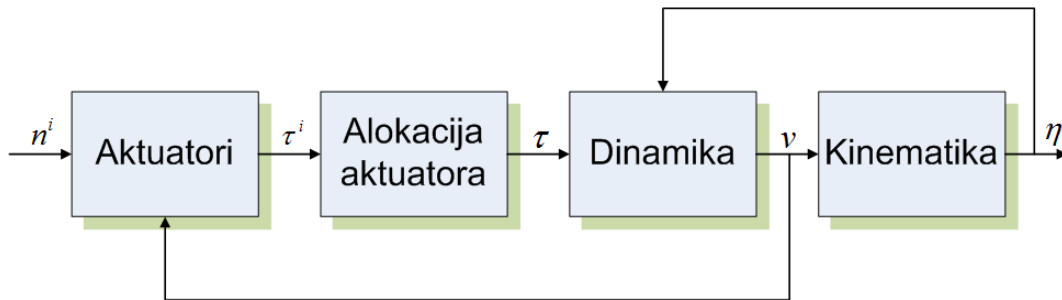
Promatrajući poopćeni model plovila može se uočiti 6 stupnjeva slobode pri čemu se poniranje, valjanje i zaranjanje može zanemariti limitirajući prostor gibanja na 2–dimenzionalni, [18]. Sve moguće varijable prikazane su u tablici 3.1

Tablica 2.1: Notacija koja se koristi kod plovila

	napredovanje	zanošenje	zaranjanje	ljuljanje	poniranje	zaošijanje	def. u
$\nu$	$u$	$v$	$w$	$p$	$q$	$r$	$\{B\}$
$\eta$	$x$	$y$	$z$	$\Phi$	$\theta$	$\psi$	$\{E\}$
$\tau$	$X$	$Y$	$Z$	$K$	$M$	$N$	$\{B\}$

Sila napredovanja i sila zanošenja su definirane kao translacijsko gibanje u  $x$  i  $y$  smjeru  $\{B\}$  koordinatnog sustava. S druge pak strane, zaošijanje je definirano kao rotacija oko  $z$  osi u  $\{B\}$  koordinatnom sustavu. Zemaljski koordinatni sustav se koristi za definiranje pozicije  $[x \ y]^T$  i orijentacije  $\psi$ . Na isti način u  $\{B\}$  koordinatnom sustavu definiraju se linearne brzine (napredovanje i zanošenje) te kutna brzina (zaošijanje).

Samo gibanje platforme ostvaruje se primjenom određenog iznosa sila i momenata  $[X \ Y \ N]^T$  koji se također definiraju u  $\{B\}$  koordinatnom sustavu, [21].



**Slika 2.2:** Blok dijagram matematičkog modela

Osnovni matematički model plovila može se prikazati rastavljen na nekoliko dijelova koji su prikazani slikom 2.2. To su blokovi koji opisuju izvršne organe odnosno aktuatora i njihovu alokaciju te blokovi za dinamiku i kinematiku platforme. U ovom radu od velikog su interesa upravo zadnja dva bloka dok su prva dva manje bitna za samu ideju upravljanja, no bit će spomenuta radi potpunosti modela:

1. Aktuatori koji modeliraju potisak generiran upravljačkom naredbom svakog aktuatora pojedinačno
2. Alokacija aktuatora koja daje relaciju između sila proizvedenih aktuatorima i sila koje djeluju na tijelo plovila
3. Dinamički model koji daje vezu između sila koje djeluju na tijelo plovila i brzina koje plovilo ostvaruje pod njihovim utjecajem
4. Kinematički model koji povezuje brzine ostvarene u  $\{B\}$  koordinatnom sustavu s pozicijom i orijentacijom u  $\{E\}$  koordinatnom sustavu.

## 2.1. Aktuatori

Aktuatori odnosno izvršni organi pretvaraju upravljačke signale u fizikalne veličine kao što su npr. za plovila potisak propulzora ili otklon kormila. Naziva ih se još pogonskim uređajima jer oni doista pogone ono zbog čega su postavljeni. U području primjene upravljanja plovilima česta vrsta aktuatora su propulzori (propeleri) i kormila te zbog činjenice da su oni jedini aktuatori na sustavima korištenim u izradi ovog rada bit će detaljnije opisani.

### 2.1.1. Model propulzora

Propulzori postoje u mnogo različitih izvedbi, no svima je zajedničko iskorištavanje rotirajućeg propelera postavljenog na osovinu motora za ostvarivanje sile i momenta potrebnog za gibanje. Propulzori su, dakle odgovorni za gibanje plovila, a sila koju razvijaju je u općenitom slučaju opisana nekom nelinearnom funkcijom ovisnom o brzini vrtnje propelera. Prema [17], sila koju daje potisnik može se opisati s

$$\tau^i = b_1 |n^i| n^i - b_2 |n^i| u_a \quad (2.1)$$

gdje su  $b_1$  i  $b_2$  pozitivne konstante,  $n^i$  je brzina vrtnje propelera, a  $u_a$  je okolna brzina vode koja može biti izražena s

$$u_a = (1 - u_{wake})U \quad (2.2)$$

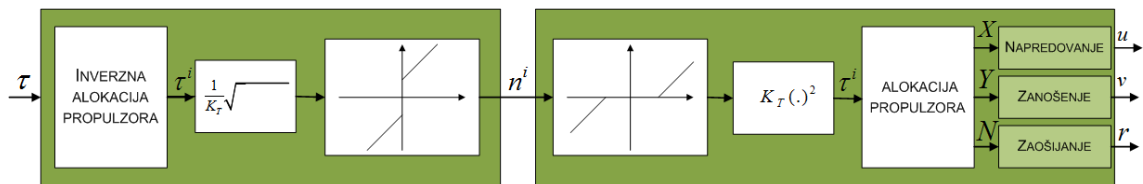
gdje je  $u_{wake}$  takozvana *wake speed* odnosno brzina kod koje je još moguće manevrirati plovilom, a  $U$  je apsolutna brzina platforme dana s

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.3)$$

Ovakav model potisnika naziva se *bilinearnim*. Potisak je uvijek bolje opisan bilinearnim modelom, no ponekad se takav model može zamijeniti jednostavnijim *afinim* modelom.

$$\tau^i = K_T |n^i| n^i \quad (2.4)$$

Pojednostavljenje je opravdano ukoliko se plovilo giba malim brzinama što je u ovom slučaju uvijek ispunjeno. Pri modeliranju potisnika važno je uzeti u obzir još jednu nelinearnu karakteristiku koja se javlja kod većine potisnika. Zbog trenja postoji pojas mrtve zone koji se treba identificirati i kompenzirati inverzom nelinearne funkcije. Osim toga, da bi dobili linearno upravljanje generiranim potiscima potrebno je unaprijed napraviti kompenzaciju kvadratne funkcije nakon inverzne alokacije.



Slika 2.3: Alokacija propulzora i a-priori kompenzacija

### 2.1.2. Model kormila

Kormilo se koristi za zaošijanje plovila oko njegove  $z$ -osi. Sila koju stvara kormilo broda ortogonalna je na površinu kormila. Ta sila može se opisati jednadžbom (2.5), gdje  $\delta_a$  predstavlja relativni kut između kormila i protoka vode, odnosno kut napada, eng. *angle of attack*,  $\delta_s$  predstavlja kut kormila pri kojem se postiže maksimalni moment zaošijanja, eng. *stall angle*, a  $c_F$  predstavlja koeficijent kormila. U slučaju da je bočna brzina  $v$  zanemariva, a brzina zaošijanja  $r$  mala, kut napada  $\delta_a$  može se aproksimirati kutem kormila  $\delta$ .

$$\tau_r = c_F v_{av}^2 \sin\left(\frac{\pi \delta_a}{2 \delta_s}\right) \quad (2.5)$$

Prema [24] parametar  $a_{av}$  predstavlja prosječni protok vode u području koje zahvaća kormilo i može se opisati izrazom  $v_{av}^2 = u_a^2 + C_T \tau_1$  u kojem  $u_a$  predstavlja brzinu okolne vode dok je  $C_T$  konstanta. Ako se zanemari utjecaj strujanja vode, tada je  $u_a \approx U$ , a poznato je da je  $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ . Ako je brzina zanošenja plovila relativno mala u odnosu na brzinu napredovanja ( $u$ ), tada je  $U \approx u$ , a brzina napredovanja može se izraziti preko sile glavnog potisnika  $u^2 = f(\tau_1)$ . U slučaju da nije moguće zanemariti utjecaj strujanja vode, tada se parametar  $u_a$  može promatrati kao nesigurnost u modeliranju. Na opisani način dobije se pojednostavljeni izraz za silu kormila (2.6).

$$\tau_r = c_F v_{av}^2 \sin\left(\frac{\pi}{2 \delta_s} \delta\right) \approx c_F v_{av}^2 \frac{\pi}{2 \delta_s} \delta \approx k_F \tau_1 \delta \quad (2.6)$$

## 2.2. Alokacija aktuatora

Alokacija aktuatora je postupak pretvaranja signala regulatora u potrebne sile i momente kako bi se dobila potrebna ukupna sila i moment na plovilo. Ova veza između dviju vrsta sila najčešće se opisuje alokacijskom matricom čije dimenzije ovise o broju aktuatora i broju stupnjeva slobode gibanja. Slijede opisi alokacijskih matrica plovila

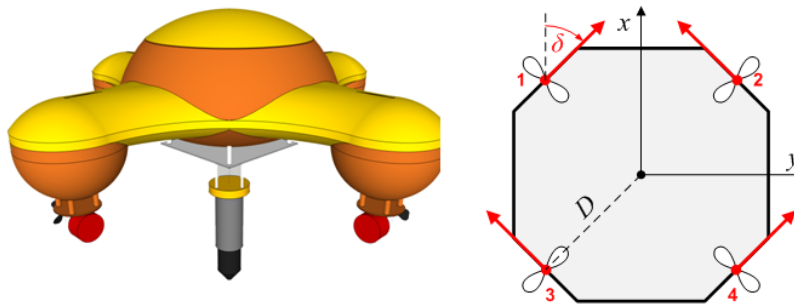
### 2.2.1. Alokacija aktuatora platforme

Budući da smo model platforme ograničili na tri stupnja slobode, a platforma posjeduje četiri aktuatora smještena u standardnoj  $X$ -konfiguraciji [14] prikazanoj na slici 2.4, alokacijska matrica je oblika:



$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) \\ \sin(45^\circ) & -\sin(45^\circ) & \sin(45^\circ) & -\sin(45^\circ) \\ d & -d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \\ \tau^3 \\ \tau^4 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Četiri aktuatora se koriste za ostvarivanje tri stupnja slobode pa je jasno da postoji redundancija u sustavu, [20]. Ona omogućava projektiranje raznih upravljačkih algoritama u slučaju kvara pojedinog aktuatora. Inverzna alokacijska matrica ne može biti određena jer se radi o matrici koja nije kvadratna, no zato se može izračunati pseudoinverzna matrica koja je po svojstvima najbliža inverznoj matrici. Pseudoinverzna alokacijske matrice služi za određivanje koliki potisak treba razviti pojedini propulzor da se ostvari željeno gibanje.



**Slika 2.4:** Platforma i X-konfiguracija propulzora

### Alokacija u slučaju kvara jednog potisnika

S četiri potisnika platforma je nadaktuirana i prisutna je redundancija u njihovom broju. U slučaju da jedan aktuator otkáže, platformom se i dalje može zadovoljavajuće upravljati, no potrebno je realocirati propulzore, ovaj put s isključenim propulzorom koji ne radi. Za potrebe ovog razmatranja, pretpostavit ćemo da je propulzor koji generira potisak  $\tau^3$  ispio iz rada zbog nekog razloga te je potrebno ponovno realocirati matricu. Na sva mjesta u matrici koja su relevantna za treći propulzor stavljaju se nule. Propulzor kao da i ne postoji.

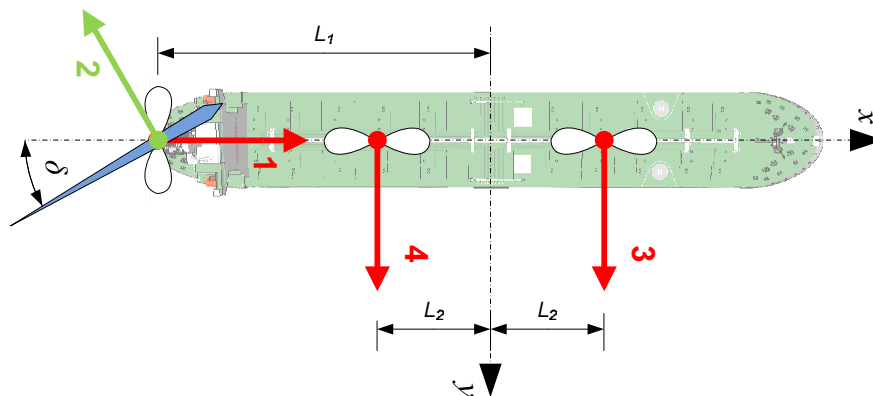
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) & 0 & \cos(45^\circ) \\ \sin(45^\circ) & -\sin(45^\circ) & 0 & -\sin(45^\circ) \\ d & -d & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \\ \tau^3 \\ \tau^4 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Još jednostavnije je smanjiti dimenziju matrice za jedan i prikazati u slijedećoj formi.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) & \cos(45^\circ) \\ \sin(45^\circ) & -\sin(45^\circ) & -\sin(45^\circ) \\ d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \\ \tau^4 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ovakvi scenariji mogu se posebno pripremiti za svaki pojedini aktuator i u slučaju nužde iskoristiti. S otkazivanjem dva i više potisnika istovremeno sustav postaje nedovoljno aktuiran da ostvaruje sve stupnjeve slobode, no i tako pogonjena plovila su upravljiva.

### 2.2.2. Alokacija aktuatora broda



**Slika 2.5:** *CyberShip i njegoa konfiguracija propulzije*

Potisnici CyberShipa broda raspoređeni su po uzoru na klasični razmještaj brodskih aktuatora kako je prikazano na slici 2.5. Udaljenost od kormila do centra mase broda definirana je sa  $L_1$ . Pretpostavljeno je da su udaljenosti od oba bočna potisnika do centra mase broda jednake i definirane su sa  $L_2$ . Smjer djelovanja sila definiran je također kako je prikazano na slici. Alokacija aktuatora broda povezuje vektore sila proizvedene potisnicima i kormilom sa vektorima sila koje uistinu djeluju na trup plovila u

koordinatnom sustavu plovila koji je smješten u centar mase plovila. Iz slike 2.5 mogu se napisati jednadžbe alokacije potisnika.

$$X = \tau_1 - \tau_2 \sin \delta \quad (2.10)$$

$$Y = -\tau_2 \cos \delta + \tau_3 + \tau_4 \quad (2.11)$$

$$N = L_1 \tau_2 \cos \delta + L_2 \tau_3 - L_2 \tau_4 \quad (2.12)$$

Za male iznose otklona kormila navedene jednadžbe mogu se pojednostaviti uvođenjem  $\sin \delta \approx \delta$ ,  $\cos \delta \approx 1$  i  $\delta^2 = 0$  iz čega slijede pojednostavljeni izrazi:

$$X = \tau_1 \quad (2.13)$$

$$Y = -k_F \delta \tau_1 + \tau_3 + \tau_4 \quad (2.14)$$

$$N = L_1 k_F \delta \tau_1 + L_2 \tau_3 - L_2 \tau_4 \quad (2.15)$$

Kod upravljanja brodom pri većim brzinama napredovanja tunelski propulzori su vrlo neefikasni. U tom slučaju bolje je koristiti kormilo jer zakretni moment proizveden kormilom  $N_r$  ovisi o sili  $\tau_1$  proizvedenoj glavnim potisnikom  $N_r = L_1 k_F \delta \tau_1$  koja je pri većim brzinama veća. S druge strane, dok se brod kreće veoma sporo ili pak miruje, kormilo nema gotovo nikakav utjecaj na moment  $N$ , i zbog toga je potrebno koristiti tunelske potisnike. Dakle, općenito postoje dva načina kretanja broda. Prvi način je krstarenje, eng. *cruising* i kod njega se upravlja samo glavnim potisnikom  $\tau_1$  i kormilom  $N_r$ . Drugi način je sporo manevriranje, eng. *low-speed maneuvering* pri čemu se koriste glavni potisnik sa silom  $\tau_1$  te tunelski potisnici sa silama  $\tau_2$  i  $\tau_3$ . Za slučaj krstarenja, slaganje sila može se svesti na  $X = \tau_1$  i  $N = L_1 k_F \delta \tau_1$ , dok je član  $Y = -k_F \delta \tau_1 \approx 0$ . Kod sporih manevara, slaganje sila može se prikazati alokacijskom matricom:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & L_2 & -L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 2.3. Dinamički model plovila

Potpuni dinamički model plovila je izrazito nelinearan i spregnut. Sadržava mnoštvo parametara, spregnutih veličina i nelinearne dinamike što ga čini jako složenim. Zbog

toga nije pogodan za projektiranje sustava upravljanja. U ovom pododjeljku bit će predstavljen samo pojednostavljeni raspregnuti model koji će se koristiti kao polazna točka za projektiranje upravljačkih sustava. Više o punom matematičkom modeliranju plovila može se pronaći u [12] i [18]. Gibajući objekti imaju 6 stupnjeva slobode, no u našem slučaju za oba plovila možemo napraviti dva značajna pojednostavljenja. Pojednostavljenja se rade s ciljem dobivanja jednostavnog matematičkog modela pogodnog za sintezu regulatora. Prvo pojednostavljenje koje je zbog spomenutog razloga opravdano uvesti je smanjenje stupnjeva slobode sa 6 na svega 3. Radni prostor plovila je tako limitiran na  $2 - D$  površinu, a preostali stupnjevi slobode su: napredovanje, zanošenje i zaošijanje. Drugo značajnije pojednostavljenje, vezano je za plovila koja se gibaju malim brzinama čime efekti dodatnih sila koje se javljaju u punom matematičkom modelu postaju nebitni na sveukupnu dinamiku. Kako bi dodatno pojednostavnili matematički model, pretpostavlja se da se centar mase podudara s ishodištem koordinatnog sustava vezanog za plovilo. Tako se postavljeni model može smatrati raspregnutim. Dolazimo do krajnje jednostavnog modela kojeg možemo koristiti za vođenje i upravljanje plovilom. Predstavljen je s tri diferencijalne jednadžbe prvog reda. To su redom diferencijalne jednadžbe kojima je opisano: napredovanje, zanošenje i zaošijanje.

$$\alpha_u \dot{u} + \beta(u)u = \tau_{uE} + X \quad (2.17)$$

$$\alpha_v \dot{v} + \beta(v)v = \tau_{vE} + Y \quad (2.18)$$

$$\alpha_r \dot{r} + \beta(r)r = \tau_{rE} + N \quad (2.19)$$

gdje je  $[u \ v \ r]^T$  vektor brzine, s  $[\tau_{uE} \ \tau_{vE} \ \tau_{rE}]^T$  je označen vektor smetnje i nemodelirane dinamike.  $[X \ Y \ N]^T$  je vektor poopcene sile koji djeluje na tijelo tijekom gibanja. Platforma je simetrična u horizontalnoj ravnini što povlači identičnu diferencijalnu jednadžbu za unaprijedno gibanje i zanošenje. Parametar  $\alpha_u$  je konstantan parametar i u oba slučaja je jednak;  $\beta(u)$  i  $\beta(v)$  kao otpor ovisan o brzini gibanja koji sadržava sve hidrodinamičke efekte. Na sličan način zaošijanje je dano s 2.19 gdje je  $\alpha_r$  inercijski parametar, a  $\beta(r)$  hidrodinamički otpor. Koeficijent  $\beta(v)$  može se u općenitom slučaju odabrati kao konstanta vrijednost ili linearno promjenjiva s porastom brzine gibanja.

$$\beta(v) = \begin{cases} \beta_v & \text{za konstantu vrijednost} \\ \beta_{vv}|v|, & \text{za linearnu vrijednost} \end{cases} \quad (2.20)$$

Koja od vrijednosti bolje opisuje matematički model plovila pokazat će identifikacija parametara vlastitim oscilacijama te će model uključivati samo jednu od ove dvije opisane vrijednosti.

## 2.4. Kinematički model plovila

Kinematički model daje vezu između brzina u koordinatnom sustavu vezanom za plovilo  $\{B\}$  i prve derivacije pozicije i kuteva  $\mu$  u Zemljinom koordinatnom sustavu  $\{E\}$ , [11]. Budući da se plovila nalaze na površini vode potrebno je samo definirati rotacijsku matricu koja rotira varijable oko  $z$ -osi. Pozitivan smjer rotacije je definiran u smjeru kazaljke na satu, a kut za koji se treba zarotirati sustav je označen sa  $\psi$  koji je ujedno i orijentacija plovila.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Pozicija i orijentacija se mogu dobiti integriranjem translacijskih brzina u  $x$ - i  $y$ -smjeru vezanom za Zemlju, dok se orijentacija dobije na isti način integriranjem rotacijske brzine.

## 3. Opis autonomnih plovila

Ovo poglavlje dat će opis dva plovila koja su korištena za dobivanje eksperimentalnih rezultata identifikacije i implementiranih upravljačkih algoritama koji se opisuju u nastavku rada. Korištena plovila su tanker CyberShip i platforma PlaDyPos. Oba plovila razvijena su u Suz-FER-LAPOST od strane autora ovog rada. Glavna motivacija njihove izgradnje je želja za testiranjem novih metoda vođenja i upravljanja kao i njihovo uključivanje u nastavu na kolegiju Vođenje i upravljanje plovilima. Modeli su napravljeni manjih dimenzija što ih čini izuzetno pogodnim za testiranja u laboratorijskom bazenu, a sposobni su se nositi i s vanjskim uvjetima što mogu potvrditi eksperimenti provedeni na Jarunu. U nastavku su dani detaljni opisi platforme i broda kao i njihove tehničke karakteristike te postavljena hardverska infrastruktura.

### 3.1. Platforma PlaDyPos

U ovom dijelu bit će opisana platforma za dinamičko pozicioniranje kao realni sustav nad kojim će biti provedeni brojni eksperimenti i testirani razni algoritmi upravljanja. U potpunosti je napravljena unutar Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije (Suz-FER-LAPOST) od grupe studenata koji su autori ovog rada. Glavna motivacija gradnje ovakve vrste platforme bila je prvotno namjera upoznati studente s područjem podvodne robotike. S njenim daljnjim razvojem pokazala se prikladnom za uključivanje u formacijske sustave s više plovila za testiranje algoritama kooperativnog upravljanja. Kao konačni cilj razvoja, planira se njena upotreba kao pomagala ronocu prilikom ronjenja na opasnim i zahtjevnim zadacima. Platforma je napravljena manjih dimenzija s ciljem da je može nositi jedan čovjek pri odlasku na misiju, no isto tako, prilikom njenog projektiranja pazilo se da ne bude preosjetljiva na vanjske uvjete poput uzburkanih valova koji bi je mogli prevrnuti. S druge strane, motivacija za izgradnju platforme pronađena je u mogućnosti testiranja naprednih algoritama upravljanja u vanjskom okruženju koje često zna biti vrlo nepovoljno i podložno nepredvidljivim smetnjama. Testiranje projektiranih sustava upravljanja koja su izložena

takvim poremećajima (valovi, vjetar, struje) može potvrditi razvijeni teorijski koncept upravljanja ili ga vratiti natrag na početnu fazu razvoja. Oprema koja se nalazi na platformi također treba biti verificirana upotrebom u vanjskim uvjetima. Navigacijski uređaji implementirani s ostalom opremom, komunikacijska struktura kao i ostala periferna oprema moraju biti testirani prije nego sustav dobije zeleno svjetlo za upuštanje u interakciju s čovjekom. U nastavku poglavlja bit će opisane tehničke karakteristike kao i sva oprema u platformi.



*Slika 3.1: PlayDyPos autonomna platforma na jezeru Jarun u Zagrebu*

### **3.1.1. Osnovni podaci**

Još jednom je dobro napomenuti da je cilj tehničkog dizajna bio stvoriti platformu manjih dimenzija i mase, a istovremeno zadržati svojstva stabilnosti na obalama mora i većim jezerima. Imajući takve zahtjeve na umu krenulo se na projektiranje kućišta same platforme. Kućište platforme je napravljeno od poliesterske smole koja se nanosila sloj po sloj na unaprijed izrađeni stirodurski kalup. Podno kućište je zaobljenog oblika povećeg radijusa što pridonosi izuzetnoj okretnosti s velikom mogućnosti manevriranja. Na centralno kućište nastavljaju se četiri kraka koja su također zaobljena i sa svojom unutrašnjosti unose dodatni prostor za daljnja proširenja.



**Slika 3.2:** *Proces nastajanja platforme*

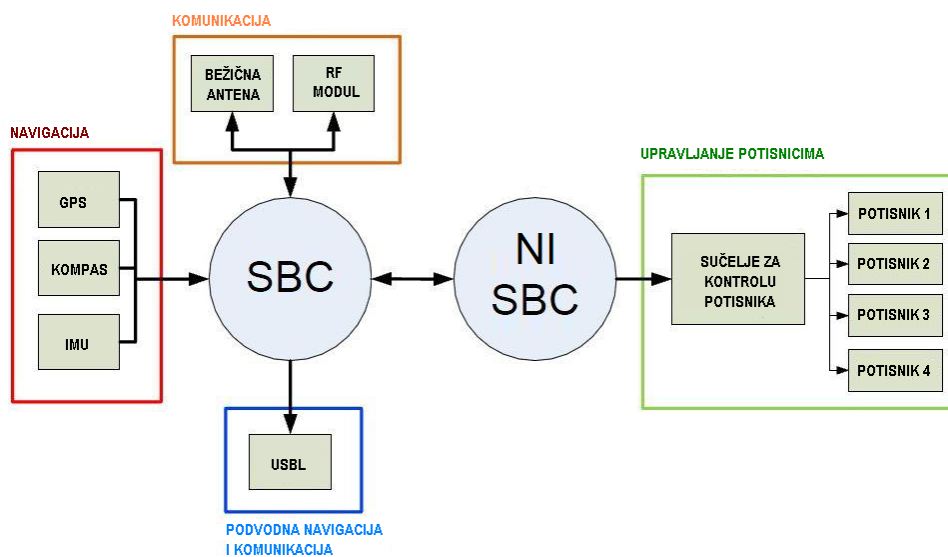
Na rubovima su postavljeni nosači uronjeni u plastiku kućišta i na njih su postavljeni propulzori koji formiraju standardnu X-konfiguraciju. Sva četiri propulzora su otklonjena od  $x$ -osi platforme za  $\pm 45^\circ$ . X-oblik konfiguracije omogućuje gibanje platforme u tri stupnja slobode (napredovanje, zanošenje, zaošijanje). Ovaj oblik konfiguracije pogonskih aktuatora uobičajen je za zadatke dinamičkog pozicioniranja, no koristi se i za ostvarivanje praćenja trajektorija. Često se plovila projektiraju sa zalihošću u broju aktuatora. To je i ovdje slučaj: četiri aktuatora se koriste za kontrolu tri stupnja slobode. Ovo svojstvo osigurava pouzdanost rada sustava i u slučaju otkazivanja pojedinog aktuatora s pravilnom realokacijom može se postići zadovoljavajuće ponašanje sustava.

**Tablica 3.1:** Neke karakteristike platforme

visina [m]	0.35	Vrijeme autonomnog rada [h]	12
dužina [m]	0.707	Maksimalan potisak [N]	15
širina [m]	0.707	Maksimalna brzina napredovanja i zanošenja [ $\frac{m}{s}$ ]	1
težina [kg]	25	Maksimalna brzina zaošijanja [ $\frac{rad}{s}$ ]	1

Razvoj platforme uključuje izradu elektroničkog sučelja za pogon propulzora, GPS modul, kompas, bateriju, komunikacijsko sučelje i dva računala (*Single-Board Computer*) od kojih jedan posjeduje mogućnost rada u realnom vremenu. Njihov detaljniji opis može se naći u [25]. Nabrojane komponente omogućavaju ručnu kontrolu s obale kao i autonomni način rada. Komunikacija s obalnom stanicom ostvarena je preko bežične mreže. Shematska reprezentacija hardverske infrastrukture ugrađene unutar platforme može se vidjeti na slici 3.3.





Slika 3.3: Shematska reprezentacija hardverske infrastrukture

### 3.1.2. Uređaji i oprema na platformi

U ovom pododjeljku bit će ukratko opisani svi uređaji i sva oprema koja se nalazi na platformi.

#### Propulzori tvrtke Seabotix

Za pogonske aktuatora odabrani su potisnici tvrtke *Seabotix* zbog svoje kvalitete i pristupačnosti. Dolaze u odlično zabrtvljenom kućištu i relativno jednostavno ih je postaviti na željena mjesta. Svaki potisnik je sustav za sebe i integracija s drugim sustavom odvija se preko dvožičanog kabla. Propelerska osovina nalazi se u prostoru zaštićenom rešetkom s obje strane čime doprinosi sigurnosti rada.



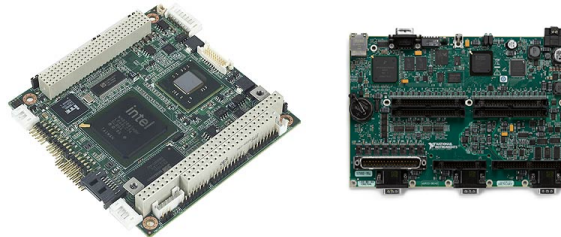
Slika 3.4: Potisnik tvrtke Seabotix

### **Računalo Advantech PCM-3362**

Računalo na kartici koje se koristi u platformi opremljen je Intelovim Atom procesorom sa Microsoft Windows 7 operacijskim sustavom. Ovo računalo se ponajviše koristi za integraciju senzora zbog činjenice da neki navigacijski uređaji rade samo na Windows platformi. Ovakvo računalo je izabrano zbog svojih malih dimenzija i male potrošnje što je izuzetno bitno za autonomiju platforme. Računalo je spojeno s bežičnim modulom i s *real-time* računalom (sbRIO) preko Etherneta. Svi navigacijski uređaji su spojeni s računalom preko USB veze.

### **Računalo na kartici sbRIO-9642 firme National Instruments**

Računalo koje radi u stvarnom vremenu s 400 MHz *real-time* procesorom i 256 MB neizbrisive memorije koristi se za determinističku kontrolu platforme. Glavne LabVIEW aplikacije rade na ovom modulu i primaju podatke sa senzora ili s vanjske stanice za ostvarivanje ručnog ili autonomnog režima rada. sbRIO je spojen s pogonskom elektronikom preko *RS – 232* ulaza i upravlja potisnicima. Ovaj modul se preventivno koristi zbog svojih visokih performansi koje nikad ne bi mogle biti ostvarene s običnim SBC računalima.



**Slika 3.5:** a) SBC b) sbRIO

### **USBL modul**

USBL (Ultra-Short baseline) je metoda podvodne lokalizacije. Sastoji se od transpondera, transducera i kontrolne jedinice. Transponder se postavlja na podvodnu ronilicu ili ronioca koji na taj način komuniciraju preko kontrolne jedinice s prijemnikom. Kontrolna jedinica računa poziciju prema poziciji transducera koju može dobiti iz GPS modula. Podaci koje kontrolna jedinica šalje na SBC računalo su opisani tablicom 3.2.

**Tablica 3.2:** Podatci primljeni s USBL modula

$z$ [ $m$ ]	Dubina transpondera
SlantRangeFromUSBL [ $m$ ]	Udaljenost između transpondera i transducera
BearingFromUSBL [ $rad$ ]	Kurs transpondera
USBL_z [ $m$ ]	Dubina glave transducera
USBL_yaw [ $rad$ ]	Kurs transducera

### LS20030 GPS modul

GPS modul komunicira s SBC računalom preko USB porta i šalje NMEA poruke frekvencijom  $10[Hz]$ . Svaki GPS modul ima vertikalnu i horizontalnu promjenjivu pogrešku u računanju točne pozicije što predstavlja veliki problem za dinamičko pozicioniranje gdje se platforma giba malim brzinama i ima male promjene pozicije. Greška GPS-a može biti izračunata iz omjera signala i šuma (S/N omjer) dobivenog od svakog satelita s kojim je spojen. Informacija o greški koja je važna za dinamičko pozicioniranje se naziva HDOP (Horizontal Dillution of Precision).



**Slika 3.6:** LS20030 GPS modul

### Kompas modul

Komunikacija s kompasom radi na istom principu kao i s GPS modulom. Može se spojiti na računalo preko USB ili RS-232 veze sa izlaznom frekvencijom od  $40[Hz]$ . Modul šalje NMEA poruke čiji se primjer može vidjeti u tablici 3.3. Ovaj modul također ima 3-osni akcelometar koji može biti iskorišten za mjerenje brzine i pozicije.

### AirLive AirMax2 bežični modul

SBC računala su spojena s ovim bežičnim dalekometnim modulom za upotrebu na otvorenom s matičnom stanicom. Modul osigurava signal bez šuma u okrugu od

**Tablica 3.3:** Primjer NMEA poruke s kompasa

$z \$C90.9P - 0.6R - 1.9T28.5D0.00 * 4E$	
$C90.9$	Zaošijanje [ <i>deg</i> ]
$P - 0.6$	Poniranje [ <i>deg</i> ]
$R - 1.9$	Ljuljanje [ <i>deg</i> ]
$D0.00$	Dubina [ <i>fp</i> ]
$*4E$	Suma za provjeru

10[*km*]. Zahvaljujući ovom modulu sa stanice na obali može se ručno upravljati platformom kao i pratiti varijable i stanja od interesa.



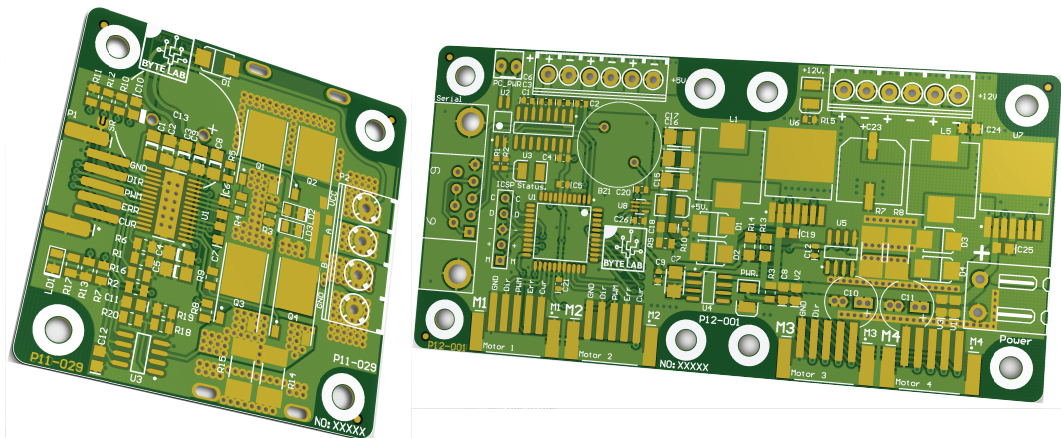
**Slika 3.7:** AirLive AirMax2 bežični modul

### Sučelje za pogon motora i napajanje opreme

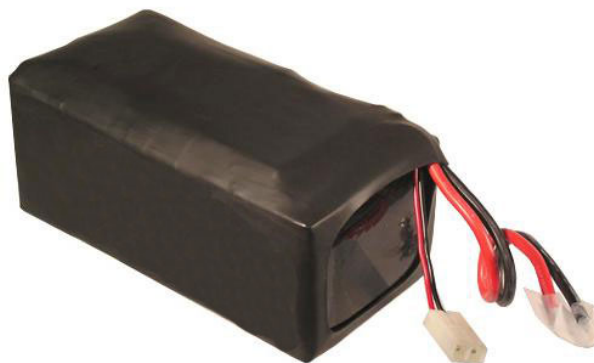
Sučelje za pogon motora i napajanje opreme je elektronički uređaj koji omogućuje upravljanje četiri istosmjerna motora i spajanje trošila na dva zasebna stabilizirana izvora napajanja. Baterija maksimalnog napona od 24[V] priključuje se na sučelje koje daje izvore od 5 i 12[V] za svu opremu u platformi. Sučelje omogućava i nadzor napona izvora, struje svakog motora, mjerenje ukupne struje i struje stabiliziranih izvora napajanja. Uređaj se na računalo spaja putem RS – 232 sučelja standardnim serijskim kablom, a komunikacija se obavlja putem odgovarajućeg serijskog ulaza. Sve naredbe uređaju se šalju isključivo ASCII znakovima.

**Tablica 3.4:** Pregled ASCII simbola i njihovo značenje

simbol	Značenje
(	Start
)	Stop
P	PWM
C	Current
B	Buzzer
S	PC
A	Address
@	Ping
!	Acknowledge
?	Error



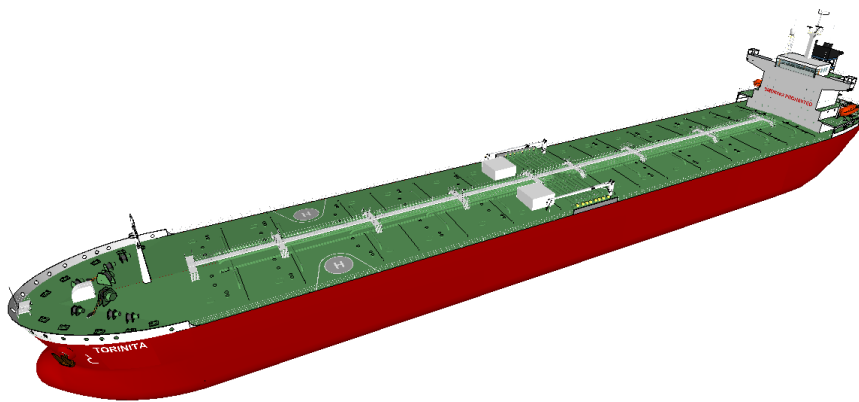
**Slika 3.8:** Sučelje za pogon motora i napajanje opreme



**Slika 3.9:** Baterija korištena za napajanje platforme

## 3.2. Tanker CyberShip

Motivacija za izradu fizikalnog laboratorijskog modela broda proizlazi iz želje za stjecanjem praktičnog znanja i za upoznavanjem sa stvarnim problemima koji se javljaju kod automatskog upravljanja plovila. Ovakav pristup problemu upravljanja puno je veći izazov jer sadrži puno problema koji ne postoje kod simulacije na računalu npr. povećanje smetnje senzora pri radu aktuatora ili brtvljenje osovine broda. Model tankera odabran je iz više razloga. Tanker predstavlja tipični teretni brod, često je korišten i relativno je stabilan što se tiče valjanja. Model je rađen po uzoru na 3D skicu tankera klase *Panamax* na slici 3.10.



Slika 3.10: Skica modela tankera klase *Panamax*

Zbog iznimno velikog opsega područja koji pokriva ovaj rad, poglavlje o izradi laboratorijskog fizikalnog modela je sažeto u najosnovnije crte.

### 3.2.1. Trup broda

Trup broda izrađen je od poliesterske smole impregnirane staklenim vlaknima. Najprije je obrađen sirovi komad poliuretanske pjene na način da poprimi što sličniji oblik trupa broda prikazanog na skici sa slike 3.10. Zatim je laminiranjem nanoseno nekoliko slojeva poliesterske smole zajedno sa platnima od staklenih vlakana. Nakon laminiranja izvađen je komad poliuretanske pjene koji se koristio kao kalup. Površina je zatim obrađena i zaglađena masom za popunjavanje neravnina od poliestera. U trup broda ugrađeni su tuneli za tunnelske propulzore, nosači za aktuatore, kormilo i elektroniku. Na slici 3.11 može se vidjeti kako stvarno izgleda trup broda.

Dimenzije broda su sljedeće:

- Duljina: 120[cm]
- Širina: 27[cm]
- Visina: 17[cm] (s kabinom 25[cm])



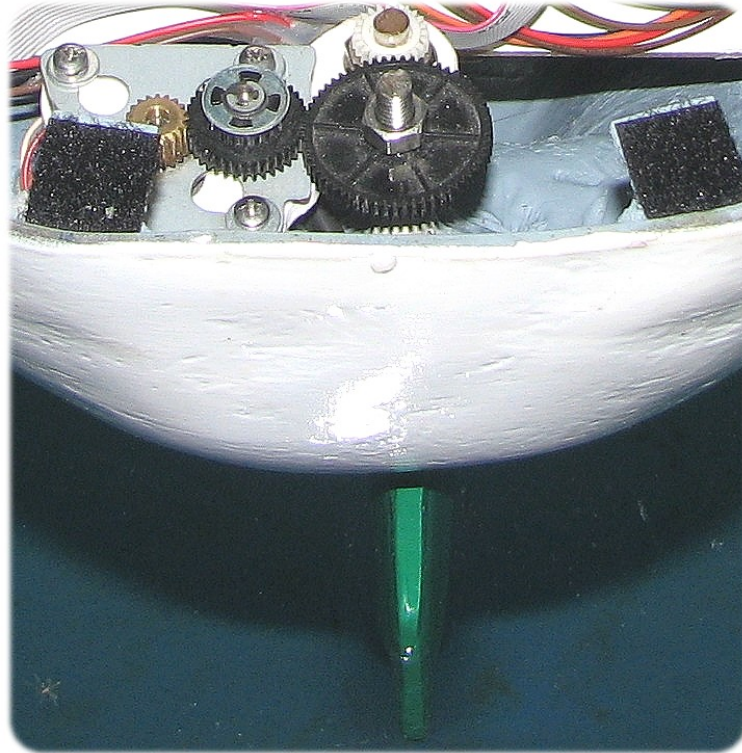
**Slika 3.11:** Brod na jarunskom jezeru

### 3.2.2. Aktuatori

Brod pokreću četiri električna aktuatora. Osovinu glavnog propelera pokreće istosmjerni motor nazivnog napona 24[V] i nazivne struje 250[mA]. Osovina motora i osovina propelera spojene su zupčastim remenom. Osovina se brtvi pomoću posebno dizajnirane i izrađene brtve od nehrđajućeg čelika i teflonskih prstenova. Teflonska brtva je korištena da se omogući vrtnja osovine broda *na suhom* i da trenje bude minimalno. Brod posjeduje i sustav tunelske propulzije koji se sastoji od pramčanog i krmenog tunelskog propulzora, eng. *Bow thruster* i *Stern thruster*. Tunelske propulzore pokreću također istosmjerni motori nazivnog napona 24[V] i nazivne struje 200[mA].

Kormilo se zakreće uz pomoć koračnog motora a radi na sljedeći način: osovina koračnog motora preko sustava zupčanika pokreće osovina kormila i osovina potenciometra. Otpor potenciometra ovisi o zakretu njegove osovine. Na temelju otpora potenciometra može se precizno odrediti zakret kormila u svakom trenutku. Sustav

kormila prikazan je na slici 3.12. Istosmjerne motore pokreću četverokvadratni usmjernivači snage poznatiji kao H-mostovi, dok koračni motor pokreće tranzistorsko pojačalo sa četiri faze.



**Slika 3.12:** *Sustav kormila*

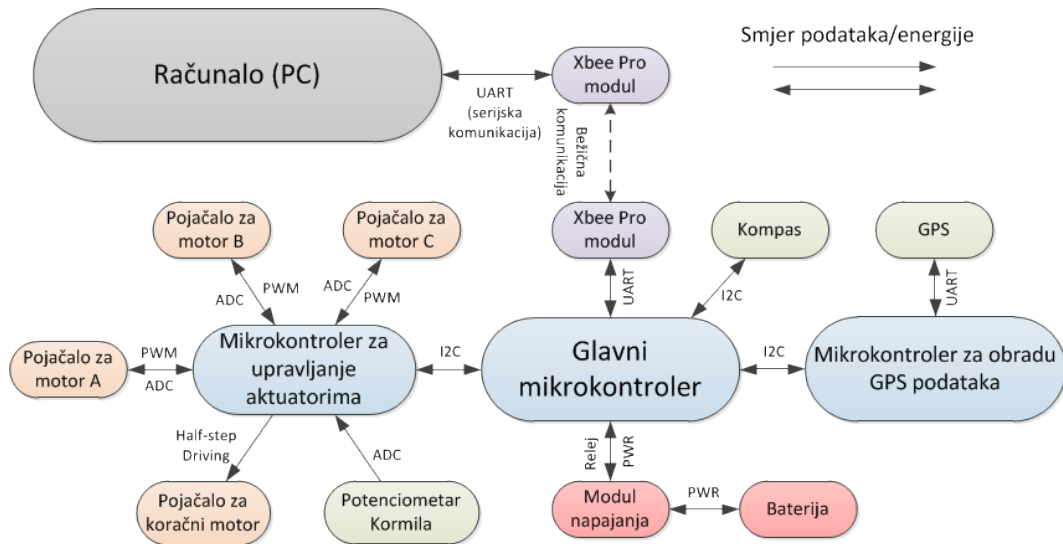
### 3.2.3. Elektronika

Elektronika broda je složeni sustav koji obavlja razne funkcije na brodu. Elektronika broda osmišljena je i izrađena tako da bude maksimalno modularna. Na taj način moguće je vrlo jednostavno zamijeniti pojedine dijelove elektronike i omogućena je eventualna nadogradnja sustava. Na slici 3.13 može se vidjeti na koji je način strukturirana elektronika. Plavom bojom označeni su mikrokontroleri, narančastom bojom označena su pojačala, zelenom bojom označeni su senzori, ljubičastom bojom označeni su komunikacijski moduli, a crvenom bojom označeni su elementi napajanja.

Glavna zadaća mikrokontrolera je razmjena podataka i upravljanje sa ostalim komponentama. Zbog računске složenosti i izbjegavanja konflikata postoje tri mikrokontrolera. Glavni mikrokontroler obavlja komunikaciju sa računalom, upravljanje  $I^2C$  sabirnicom, dobavljanje i kontrolu svih stanja broda i razne upravljačke algoritme vezane za navigaciju. On sadrži podatke o:

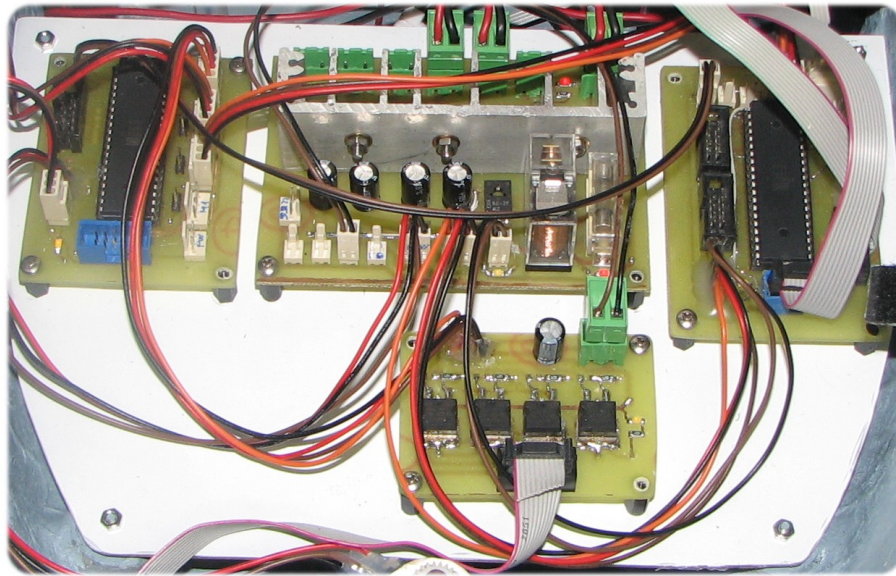


- Naponu napajanja, strujama pojedinih motora
- Zakretu kormila, orijentaciji
- GPS koordinatama, brzini kretanja
- Vremenu i datumu itd. ...



**Slika 3.13:** Načelna struktura elektronike

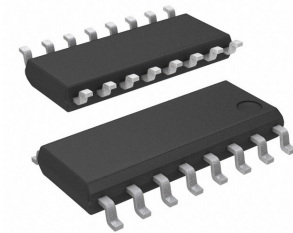
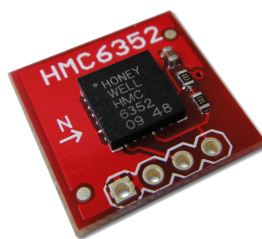
Dio sustava prikazan je na slici 3.16. Na lijevoj strani nalazi se mikrokontroler za upravljanje aktuatorima, u sredini je jedinica napajanja sa relejom, dok se na desnoj strani nalazi glavni mikrokontroler. Na dnu slike je pojačalo za koračni motor.



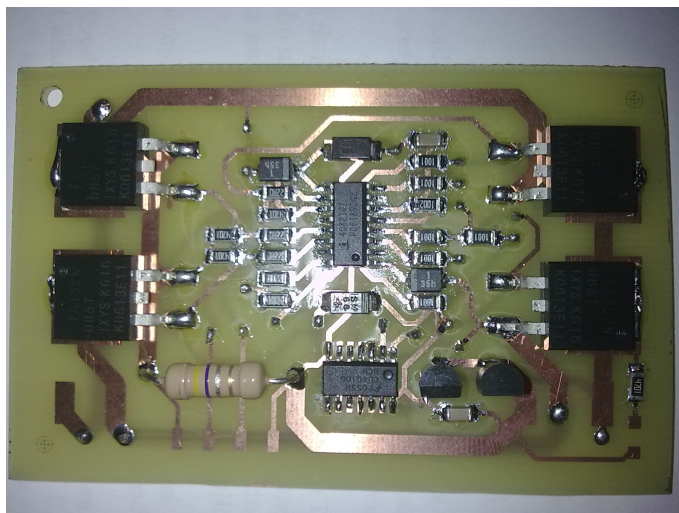
**Slika 3.14:** *Elektronika broda*

Najbitnije komponente su sljedeće:

- MCU - 2 x ATmega16 i ATmega8 takta 8MHz
- Compass - HMC6352
- GPS - LS20031
- H-bridge MOSFET driver - HIP4082



**Slika 3.15:** *GPS LS20031, kompas HMC6352, HIP4082 Driver*



Slika 3.16: *Usmjerivač snage*

### 3.2.4. Komunikacija

Na brodu postoji više vrsta i razina komunikacija. Brod komunicira s računalom bežičnom vezom koristeći serijsku komunikaciju. Mikroprocesori također međusobno komuniciraju, i ta se komunikacija odvija preko  $I^2C$  protokola. GPS i odgovarajući mikroprocesor, prevoditelj NMEA poruka, koriste se serijskom komunikacijom.  $I^2C$  odnosno *Inter Integrated Circuit* protokol je oblik komunikacije koji je namijenjen povezivanju integriranih krugova i razne periferije sa računalom, a izumila ga je tvrtka *Philips*. Veoma je raširen i često se koristi u sustavima automatskog upravljanja. Glavne prednosti su da za komunikaciju koristi samo dvije žice, postiže brzine do  $1\text{Mbit/s}$  i na sabirnicu istovremeno može biti spojeno do 127 uređaja, što uvelike povećava fleksibilnost i mogućnost nadogradnje. Isti protokol se koristi i pod imenom *TWI*, odnosno *Two Wire Interface*. Komunikacija broda i računala se odvija na principu *Zahtjev/Odgovor*. Ideja je da računalu brodu pošalje komandu ili zahtjev za nekim podatkom, na što brod odgovara da je primio i izvršio komandu ili šalje zahtjevane podatke.



## 4. Identifikacija plovila

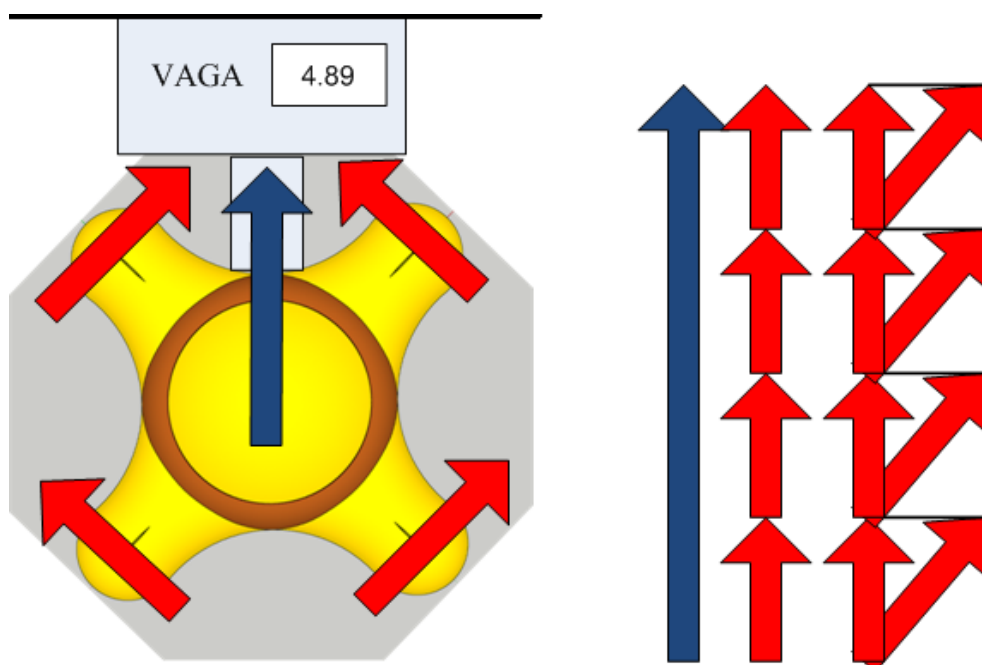
Kako bi se mogli napraviti upravljački sustavi visoke kvalitete potrebno je imati zadovoljavajući matematički model koji dobro opisuje bitnu dinamiku plovila. Identifikacija plovila ovdje podrazumijeva nalaženje parametara u matematičkom modelu. Parametri definiraju dinamiku gibanja i tako identificiran matematički model koristi se za potrebe sinteze regulatora. U LAPOST-u se u novije vrijeme udomaćila praksa da se prije uključivanja automatskog načina rada uvijek iznova izvrši identifikacija parametara jer su oni ovisni o više čimbenika. Primjerice, ako se na plovilo doda neka masa više nemamo istu dinamiku kao i prije. Metoda identifikacije korištena za određivanje parametara dinamike zasniva se na primjeni vlastitih oscilacija. Njezina velika prednost je što se provodi jako brzo i nakon samo jednog eksperimenta sustav je spreman za rad. Vlastite oscilacije su veoma česte i vrlo nepoželjne u sustavima upravljanja. Ipak, ovdje su iskorištene za identifikacijske svrhe. Opisane su samo osnovne značajke ove metode potrebne za razumijevanje dobivenih eksperimentalnih rezultata dok se detaljna razrada primjene vlastitih oscilacija može naći u [18]. U ovo poglavlje kao sastavni dio uključeno je i mapiranje potisnika jer je bilo potrebno odrediti statičku funkciju koja opisuje njihov rad.

### 4.1. Mapiranje potisnika

Određivanje statičke karakteristike potisnika, odnosno pronalazak veze između upravljačkog signala narinutog na potisnik i sile koju isti stvara zove se mapiranje potisnika. Prilikom mapiranja potisnika treba voditi računa o minimalnom i maksimalnom potisku kao i energetskim ograničenju. Potisnici opisani u odjeljku 2.1.1 ne daju isti potisak prema naprijed i prema nazad pa je bilo potrebno obaviti mapiranje za oba smjera vrtnje.

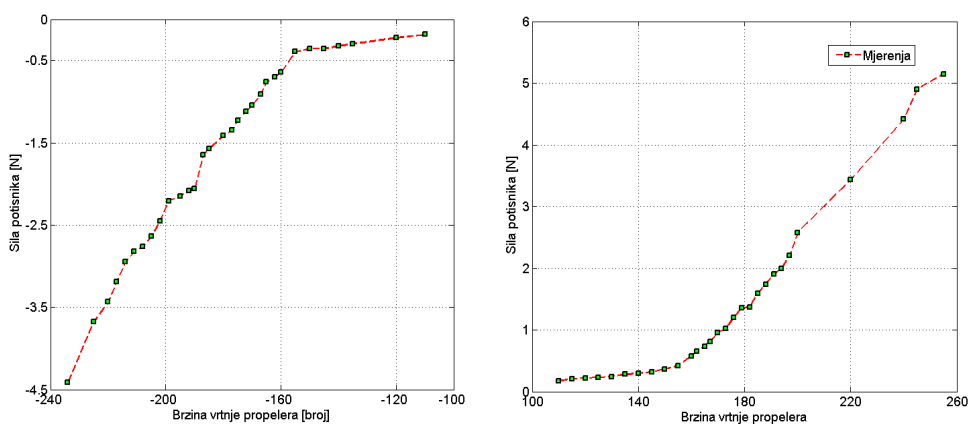
### 4.1.1. Potisnici platforme PlaDyPos

Mapiranje platforme se provelo na sljedeći način. Za mjerenje sile potiska korištena je digitalna kuhinjska vaga. Platforma je usmjerena prema njoj i svim potisnicima je zadano da se vrte istom brzinom u istom smjeru. Eksperiment je ponavljan za različite brzine vrtnje propulzora. Dobiven je skup točaka koji povezuje generiranu silu kojom se platforma giba u određenom smjeru sa zadanom kontrolnom naredbom. Izmjerena sila se zatim dijeli na četiri jednaka dijela jer postoje četiri jednaka potisnika. Zadnji korak je dijeljenje izračunate sile s faktorom  $\cos 45^\circ$  jer se potisnik nalazi pod  $45^\circ$  u odnosu na koordinatni sustav platforme. Provedeni eksperiment mapiranja potisnika može se prikazati na sljedećoj slici.



**Slika 4.1:** Eksperiment mapiranja potisnika

Mjerenja generirane sile u ovisnosti o brzini vrtnje propelera je prikazan na slici 4.2. Lijeva slika prikazuje ovisnost generirane sile o smjeru vrtnje prema nazad dok desna prikazuje kako se mijenja sila s brzinom prema naprijed. Interpolirane funkcije su linearne po segmentima i sadržane su unutar tablice. Mogu se primjetiti male razlike u linearnim funkcijama koje opisuju provedene eksperimente. Karakteristika potisnika nije u potpunosti simetrična, već postoji mala razlika zbog same konstrukcije.



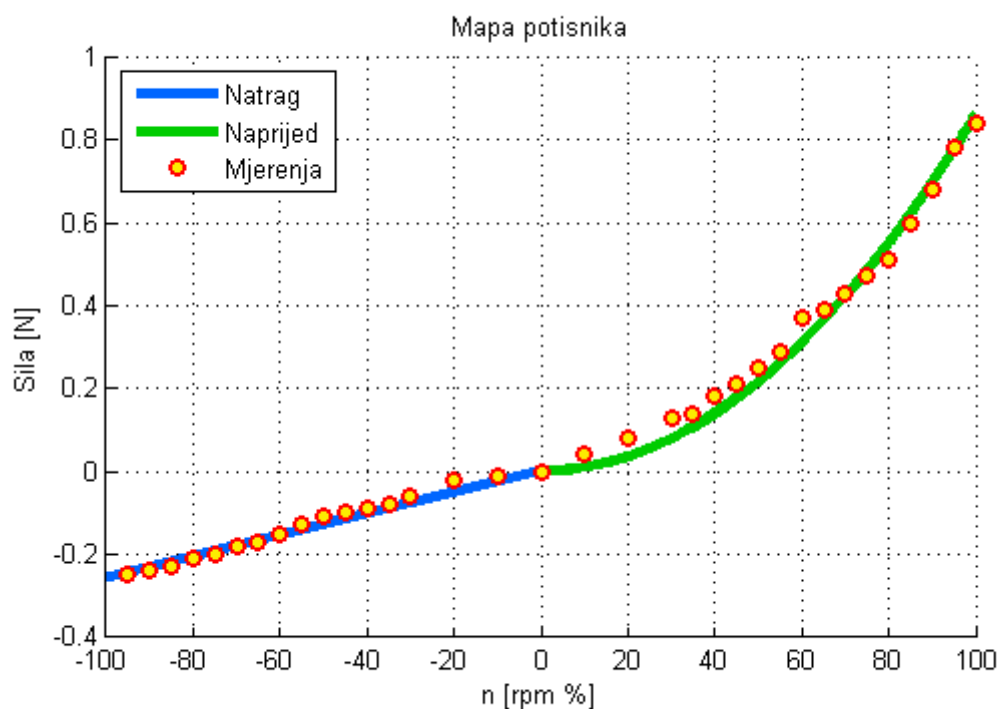
Slika 4.2: Mapirani potisci prema nazad i naprijed

Tablica 4.1: Interpolirajuće mapirajuće funkcije

$\tau [N]$	$\tau \leq -1.1099$	$-1.1099 < \tau < 0.2$	$0.2 < \tau < 1.1792$	$\tau \geq 1.1792$
Potisak [broj]	$P = \frac{\tau - 19.99}{0.1343}$	$P = \frac{\tau - 0.9418}{0.01319}$	$P = \frac{\tau + 1.052}{0.01383}$	$P = \frac{\tau + 21.21}{0.1405}$

#### 4.1.2. Potisnici tankera CyberShip

Da bi bilo moguće upravljati brodom, potrebno je znati koliku silu stvaraju potisnici pobuđeni određenim upravljačkim signalom. To je moguće postići izradom mape potisnika. Za  $n$  ekvidistalnih točaka na cijelom području upravljačkog signala mjeri se sila generiranog potiska. Nakon toga se nekom od metoda interpolacije generira krivulja koja matematički opisuje ovisnost potiska o upravljačkom signalu. U ovom slučaju je upravljački signal brzina vrtnje elektromotora izražena u postocima, dok je sila potiska mjerena dinamometrom i izražena u  $[N]$ . Može se primjetiti da je pri pozitivnom smjeru vrtnje sila kvadratna funkcija brzine vrtnje, dok je u negativnom smjeru vrtnje ovisnost sile o brzini vrtnje linearna. Dobivene nelinearnosti eliminiraju se inverznim mapiranjem potisnika. Na slici 4.3 prikazani su rezultati mapiranja glavnog potisnika. Potisak u smjeru prema naprijed može se izraziti kao  $\tau_1 = 8.603 \cdot 10^{-3} n_1^2$ , dok se potisak u smjeru prema natrag može izraziti kao  $\tau_1 = 2.585 \cdot 10^{-3} n_1$ . Na isti način mapiraju se ostali potisnici. Za bočne potisnike dobiveno je da je ovisnost sile o brzini vrtnje u oba smjera linearna i iznosi  $\tau_{3,4} = 10^{-3} n_{3,4}$ .



Slika 4.3: Mapa potisnika

## 4.2. Identifikacija parametara primjenom vlastitih oscilacija

Ideja za korištenjem vlastitih oscilacija za određivanje parametara sustava je uvedena iz [3] pod imenom "automatsko podešavanje varijacije". Prema matematičkom modelu danom s (2.17) - (2.19) parametre koje treba identificirati su koeficijenti  $\alpha_v$  te  $\beta_n u$ . Identifikacija vlastitih oscilacija, engl. IS-O) provedena u zatvorenoj petlji sastoji se od procesa i releja sa histerezom ( $C$  je izlaz iz releja, a  $x_a$  je širina histereze). Metoda se temelji na tome da se sustav uvede u vlastite oscilacije. Amplituda  $X_m$  i frekvencija  $\omega$  dobivene vlastitim oscilacijama koriste se za određivanje parametara modela procesa računajući opisnu funkciju nelinearnog elementa [27]. Detaljan izvod općeg algoritma za određivanje parametara linearnih, vremenski nepromjenjivih procesa je prikazan u [22]. Kratak pregled jednadžbi koje su korištene za određivanje parametara linearnog ili nelinearnog modela za plovila je prikazan u Tablici 4.2.  $x_0$  je odstupanje dobiveno vlastitim oscilacijama uzrokovano asimetrijom plovila ili vanjskim smetnjama, a  $T_H$  i

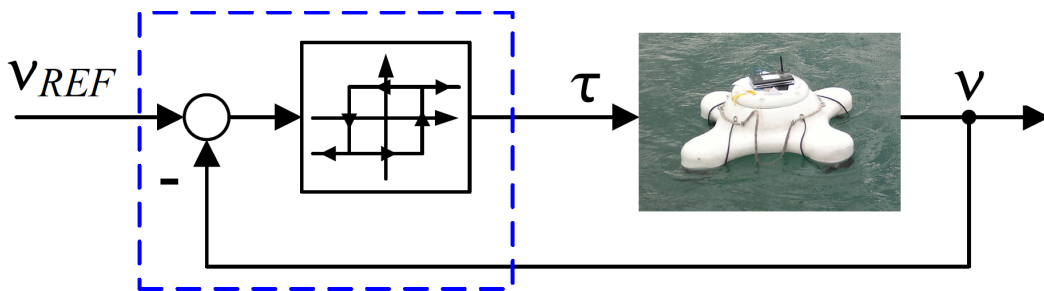


**Tablica 4.2:** Formule za određivanje nepoznatih parametara primjenom IS–O metode korištenjem releja s histerezom

LINEARNI MODEL (KONSTANTNI $\beta$ )	NELINEARNI MODEL (LINEARNI $\beta_{rr}$ )
$\alpha_\nu = \frac{2C}{\pi} \frac{1}{\omega^2 X_m} \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{x_a - x_0}{X_m}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{x_a + x_0}{X_m}\right)^2} \right]$	
$\beta_\nu = \frac{4Cx_a}{\pi} \frac{1}{\omega X_m^2}$	$\beta_{\nu\nu} = \frac{3Cx_a}{2} \frac{1}{\omega^2 X_m^3}$
$\Delta = C \frac{T_H - T_L}{T_H + T_L}$	

$T_L$  je trajanje visokog i niskog izlaza releja tijekom jedne oscilacije.

Da bi se inicirale vlastite oscilacije korištenjem releja s histerezom, fazna karakteristika procesa mora prijeći  $90^\circ$ . To za plovila znači da procedura ne može biti primjenjena postavljanjem brzina (brzina zaošijanja  $r$ , napredovanja  $u$  i zanošenja  $v$ ) na nelinearni element jer diferencijalne jednadžbe koje opisuju odnos između brzina i potisaka koji ju generiraju su prvog reda. To znači da proces mora imati astatizam prvog reda. Ovisno o stupnjevima slobode, mogući su različiti pristupi.



**Slika 4.4:** Poopćena struktura zatvorenog kruga za pobuđivanje vlastitih oscilacija

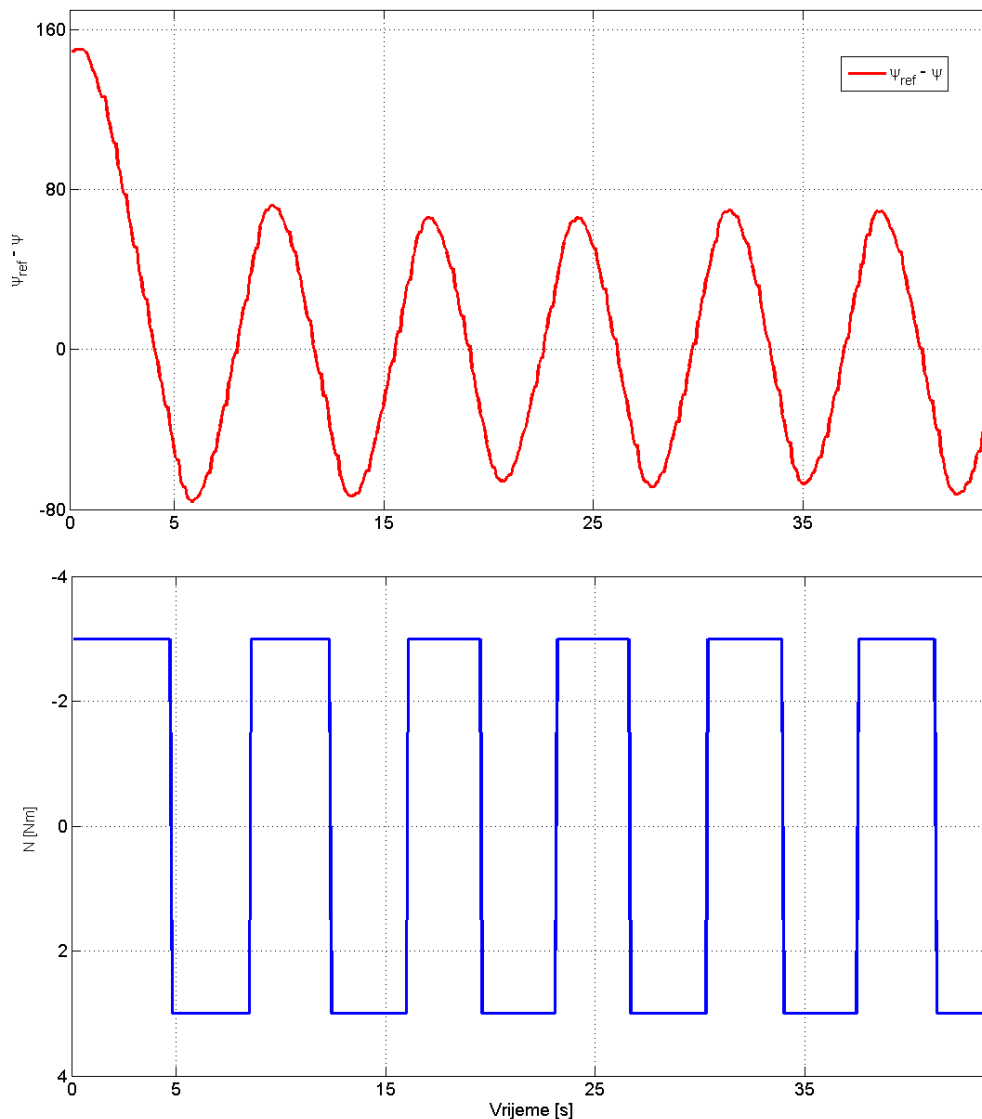
#### 4.2.1. Vlastite oscilacije platforme

Pojednostavljeni matematički model platforme limitiran je na tri diferencijalne jednadžbe. Za identifikaciju njihovih koeficijenata izvršene su serije eksperimenata unutar laboratorijskog bazena. Kao mjerni instrument povratne grane korištena je kamera smještena iznad bazena. Dobivene koordinate u pikselima su preračunate u metre tako da je identificirani model u skladu sa SI jedinicama. Polučeni rezultati pokazali su da platformu bolje opisuje nelinearni matematički model te je kao takav korišten u svim

simulacijama, dok se za poneka projektiranja regulatora koristio linearni model.

### Identifikacija parametara za zaošijanje

Identifikacija stupnja slobode zaošijanja provedena je korištenjem izlučene informacije o orijentaciji platforme iz slike koja se on-line obrađuje unutar algoritma. Kao referenca zadavana je nula dok se izlaz releja mjenjao u skladu s unaprijed određenim redosljedom. Slika 4.5 prikazuje odzive jednog od brojnih eksperimenata provedenih u laboratoriju.



**Slika 4.5:** Pobuda i odziv platforme pri identifikaciji parametara zaošijanja

Snimljeni eksperiment je izvršen s histerezom releja u iznosu  $45^\circ$ , izlaz releja je postavljen na  $\pm 3 Nm$ . Snimljeni signal na ulazu u relej s histerezom kao i njegov izlaz

vidljivi su na slici. Rezultati ostalih izvršenih eksperimenata vezanih za metodu identifikacije zaošijanja sadržani su u tablici 4.3. Eksperimenti su se sastojali od minimalno 4 uspješne oscilacije čije amplitude se nisu smjele međusobno razlikovati za više od 10%. Napravljeno je više serija eksperimenata, a u tablici su prikazani rezultati za  $x_a = 0.2$  i  $x_a = 0.6$ . Za postavljeni  $x_a$ , izlaz releja se mjenjao od početne vrijednosti  $1Nm$  do  $10Nm$ . Izračunati koeficijenti su također prikazani u tablici.

**Tablica 4.3:** Rezultati IS-O metode za stupanj zaošijanja

$x_a$ [rad]	N $Nm$	$\alpha_r$ [ $\frac{Nms^2}{rad}$ ]	$\beta_r$ [ $\frac{Nms}{rad}$ ]	$\beta_{rr}$ [ $\frac{Nms}{rad}$ ]	$x_a$ [rad]	N $Nm$	$\alpha_r$ [ $\frac{Nms^2}{rad}$ ]	$\beta_r$ [ $\frac{Nms}{rad}$ ]	$\beta_{rr}$ [ $\frac{Nms}{rad}$ ]
0.2	1	3.162	0.947	2.280	0.6	1	3.000	1.377	2.807
	1.5	2.83430	0.996	1.805		1.5	2.821	1.512	2.339
	2	2.378	1.122	1.624		2	2.348	1.581	1.928
	2.5	2.740	1.274	1.781		2.5	2.710	1.913	2.249
	3	2.889	1.274	1.781		3	2.962	2.149	2.397
	3.5	3.165	1.619	1.955		3.5	3.160	2.378	2.524
	4	3.173	1.621	1.812		4	3.256	2.569	2.554
	4.5	3.308	1.991	2.141		4.5	3.386	2.734	2.601
	5	3.363	1.976	2.046		5	3.435	2.864	2.581
	5.5	3.301	2.008	1.956		5.5	3.533	2.978	2.58
6	3.469	2.004	1.853	6	3.646	3.174	2.664		
6.5	3.433	2.222	2.012	6.5	3.625	3.366	2.667		
7	3.513	2.399	2.089	7	3.761	3.396	2.649		
7.5	3.560	2.365	1.991	7.5	3.760	3.587	2.749		
8	3.487	2.443	1.961	8	3.840	3.672	2.696		
8.5	3.548	2.597	2.058	8.5	3.803	3.582	2.531		
9	3.539	2.457	1.883	9	3.914	3.818	2.633		
9.5	3.632	2.588	1.967	9.5	3.931	3.883	2.614		
10	3.514	2.599	1.867	10	3.962	4.049	2.673		

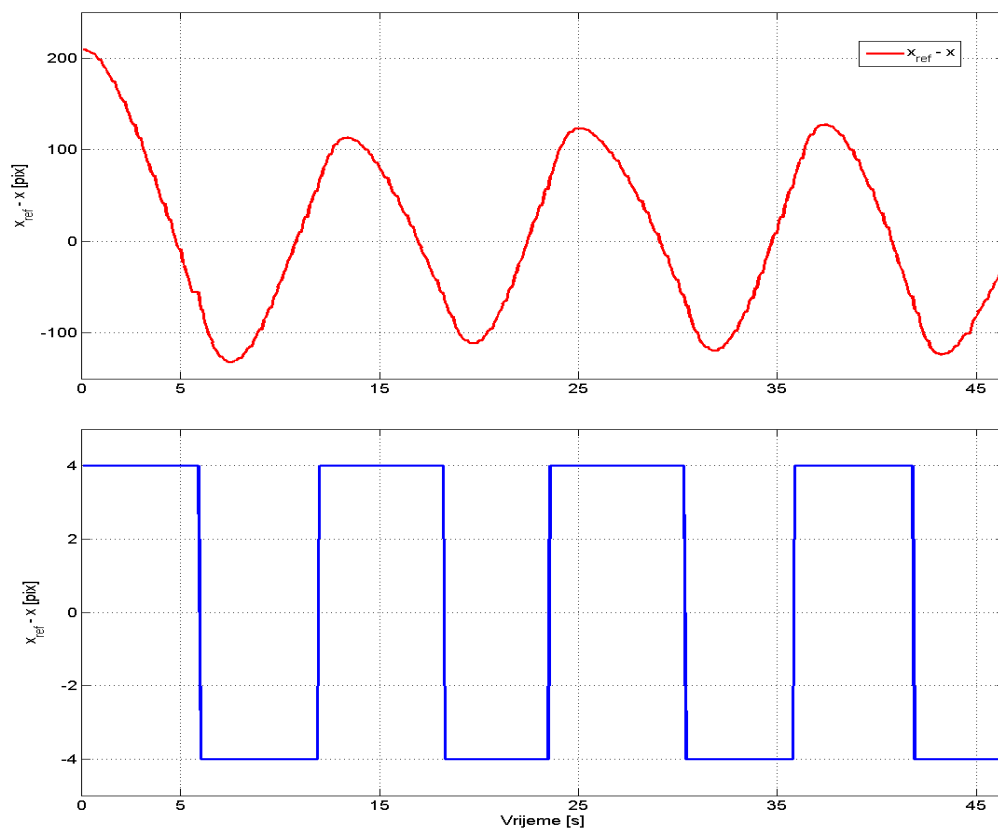
### Identifikacija parametara za napredovanje

Analogno provedenim eksperimentima za identifikaciju zaošijanja, proveli su se i eksperimenti za stupanj slobode napredovanja. Ulaz u relej s histerezom je  $x_{ref} - x(t)$ , odnosno negativni prijedeni put u smjeru napredovanja. Budući da je dosta teško pravilno usmjeravati platformu, ovdje smo se poslužili malim trikom. Napravljen je inverz

matrice koja opisuje kinematiku plovila i budući da su nam na raspolaganju promjene  $\dot{x}$  i  $\dot{y}$  dobivene iz kamere računao se vektor brzina

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Nakon toga slijedila je integracija vektora brzina i takav ulaz dovođen je s negativnim predznakom na ulaz releja. Ostvarene vlastite oscilacije kao i izlaz iz releja vidljivi su na slici 4.6. Ostali provedeni eksperimenti i rezultati identifikacije sadržani su u tablici.



**Slika 4.6:** Pobuda i odziv platforme pri identifikaciji parametara napredovanja

**Tablica 4.4:** Rezultati IS-O metode za stupanj napredovanja

$x_a$	X	$\alpha_u$	$\beta_u$	$\beta_{uu}$	$x_a$	X	$\alpha_u$	$\beta_u$	$\beta_{uu}$
[m]	N	$[\frac{Ns^2}{rad}]$	$\frac{Ns}{rad}$	$\frac{Ns}{rad}$	[rad]	Nm	$[\frac{Ns^2}{rad}]$	$\frac{Ns}{rad}$	$\frac{Ns}{rad}$
	1	3.162	0.947	2.280		1	3.000	1.377	2.807
	2	21.000	8.115	51.835		2	23.605	8.715	52.807
	2.5	21.447	8.520	46.848		2.5	22.794	9.289	48.908
	3	20.077	9.231	45.333		3	21.345	9.652	44.074
	3.5	19.461	9.461	41.932		3.5	20.133	10.182	41.905
	4	20.397	10.548	44.813		4	21.387	10.972	43.048
	4.5	21.113	11.248	45.491		4.5	22.082	12.505	48.248
	5	22.023	11.600	44.619		5	23.397	12.558	45.683
	5.5	22.523	12.235	45.350		5.5	23.919	13.284	46.524
0.2	6	23.127	13.050	47.124	0.6	6	24.356	13.928	47.105
	6.5	23.537	13.667	47.951		6.5	25.260	14.483	45.756
	7	24.298	14.145	47.670		7	25.353	14.345	46.654
	7.5	24.629	14.464	46.911		7.5	25.706	15.299	46.697
	8	25.972	14.789	47.106		8	25.900	16.097	47.946
	8.5	26.225	15.314	46.582		8.5	26.516	16.704	48.733
	9	25.519	15.288	45.243		9	26.926	16.645	46.516
	9.5	26.085	16.520	47.533		9.5	27.387	17.346	47.722
	10	26.232	15.789	44.262		10	27.282	17.813	47.370

### Identifikacija parametara za zanošenje

S obzirom na simetričnost platforme identifikacija parametara provodi se gotovo identično kao i za stupanj slobode napredovanja. Zbog te činjenice ovdje ćemo samo prikazati finalne rezultate u obliku tablice.

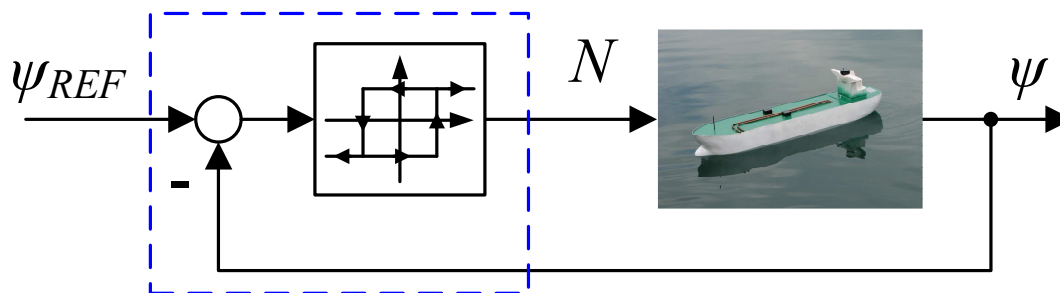
**Tablica 4.5:** Rezultati IS-O metode za stupanj napredovanja

$x_a$	Y	$\alpha_v$	$\beta_v$	$\beta_{vv}$	$x_a$	Y	$\alpha_v$	$\beta_v$	$\beta_{vv}$
[m]	[N]	$[\frac{Ns^2}{rad}]$	$[\frac{Ns}{rad}]$	$[\frac{Ns}{rad}]$	[rad]	Nm	$[\frac{Ns^2}{rad}]$	$[\frac{Ns}{rad}]$	$[\frac{Ns}{rad}]$
	1	3.162	0.947	2.280		1	3.000	1.377	2.807
	2	25.168	7.870	63.594		2	25.741	9.775	64.293
	2.5	24.145	8.655	60.307		2.5	25.186	10.487	59.793
	3	23.236	9.002	55.802		3	22.084	10.715	52.284
	3.5	20.588	9.520	51.316		3.5	21.971	11.583	52.006
	4	22.308	9.913	51.832		4	23.596	12.970	56.680
	4.5	22.707	10.923	53.600		4.5	24.047	13.297	54.177
	5	24.242	11.212	53.436		5	23.941	13.864	53.222
	5.5	24.682	11.851	54.478		5.5	25.080	15.150	57.176
0.1	6	25.298	12.946	57.929	0.3	6	26.380	15.627	56.983
	6.5	25.985	13.154	57.123		6.5	26.689	16.630	58.931
	7	25.815	13.023	52.739		7	27.127	16.721	56.770
	7.5	24.948	12.901	49.610		7.5	27.109	17.305	56.344
	8	26.922	14.104	53.807		8	29.684	18.431	60.825
	8.5	27.232	14.338	53.529		8.5	28.179	18.889	59.302
	9	27.398	13.393	48.437		9	27.555	18.682	55.748
	9.5	28.034	15.479	54.455		9.5	27.751	19.401	56.674
	10	28.230	14.668	49.613		10	27.459	20.129	57.454

#### 4.2.2. Vlastite oscilacije broda

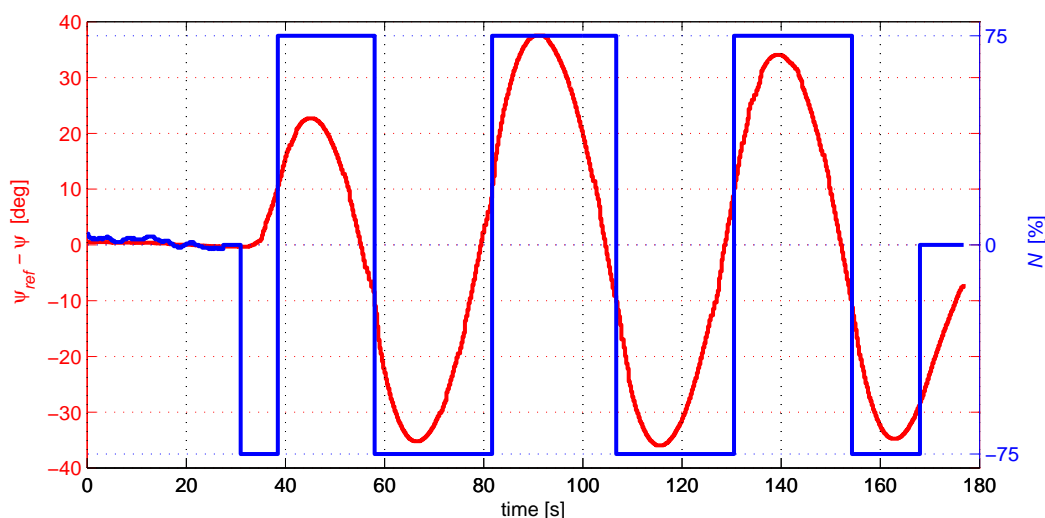
Matematički model broda potrebno je identificirati za sve modelirane stupnjeve slobode. Modelirani stupnjevi slobode broda su napredovanje, zanošenje i zaošijanje. Model se identificira primjenom vlastitih oscilacija [18], eng. *IS-O*. Identifikacija zaošijanja provodi se tako da se na ulaz nelinearnog elementa dovodi odstupanje mjerene vrijednosti zakreta broda od proizvoljne referentne veličine  $\psi_e = \psi_{ref} - \psi$  kako je prikazano blok dijagramom na slici 4.7. Na taj način brod se dovodi u stanje vlastitih oscilacija i snima se odziv. Iz snimke odziva prema formulama iz tablice 4.2 mogu se odrediti parametri modela zaošijanja  $\alpha_r$  i  $\beta_r$  koji čine model prema jednadžbi 4.2, gdje  $\Delta$  predstavlja poremećajnu veličinu.

$$\alpha_r \dot{r}(t) + \beta_r r(t) = \Delta + N \quad (4.2)$$



Slika 4.7: Blok shema identifikacije zaošijanja

Primjer pobude i odziva broda pri identifikaciji zaošijanja vlastitim oscilacijama prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8: Pobuda i odziv broda pri identifikaciji parametara zaošijanja

Identifikacija je provedena za dva slučaja, koristeći zasebno kormilo i zasebno bočne potisnike za stvaranje momenta  $N$ . Koristeći bočne potisnike proveden je niz eksperimenata u bazenu Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije SuZ-FER pri kojima se dobiju parametri modela  $\alpha_r = 0.143514$  i  $\beta_r = 0.00799233$ . Za upravljanje kormilom je proveden set od 21 IS-O eksperimenata koristeći kao razne vrijednosti momenta  $N = \tau_1 \delta$  odnosno  $\tau$  i  $\delta$ . Eksperimenti su provedeni u jarunskom jezeru u Zagrebu i potvrđeni u bazenu Brodarskog instituta u Zagrebu. Rezultati su prikazani u tablici 4.6. Može se primjetiti da su rezultati vrlo konzistentni bez obzira na kut otklona kormila  $\delta$  i silu glavnog potisnika  $\tau_1$  odnosno brzinu vrtnje propelera  $n_1$ .

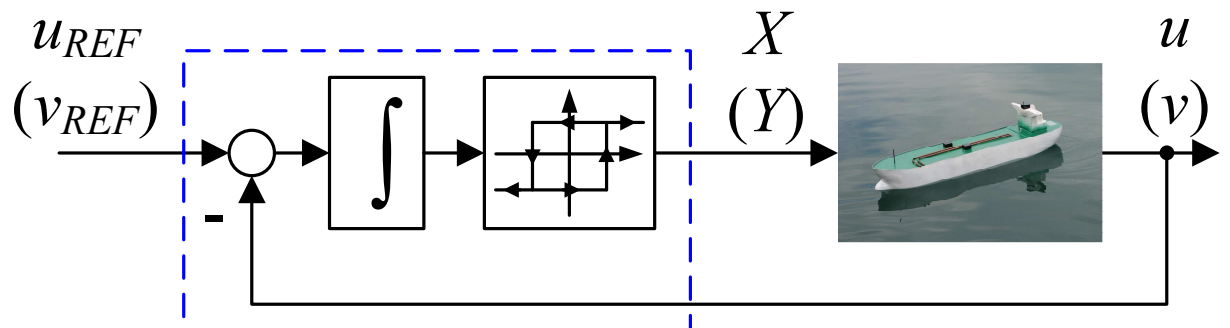
**Tablica 4.6:** Rezultati IS-O stupnja slobode zaošijanja koristeći kormilo.

$n$ [%]	$\delta_c$ [deg]	$N$ [mNm]	$\frac{\alpha_r}{k_F}$ [ $\frac{\text{Nms}^2}{\text{deg}}$ ]	$\frac{\beta_r}{k_F}$ [ $\frac{\text{Nms} \cdot 10^{-1}}{\text{deg}}$ ]	$\frac{\beta_{rr}}{k_F}$ [ $\frac{\text{Nms}^2 \cdot 10^{-2}}{\text{deg}^2}$ ]
60	10	3.114	4.237	2.472	5.922
	20	6.228	4.356	3.304	7.205
	25	7.785	4.834	3.529	6.889
	30	9.342	5.078	3.851	7.213
	35	10.899	4.851	3.991	6.447
	40	12.456	4.538	3.391	4.710
	45	14.013	5.253	3.715	5.194
75	15	7.298	4.476	2.973	5.698
	20	9.730	4.529	4.243	7.484
	25	12.163	4.625	4.052	5.965
	30	14.595	4.425	3.724	4.742
	35	17.028	4.681	3.845	4.473
	40	19.460	4.805	3.925	4.268
	45	21.893	5.835	3.610	3.714
90	15	10.509	4.521	3.204	4.917
	20	14.012	4.658	3.407	4.333
	25	17.515	4.442	3.638	4.021
	30	21.018	4.461	3.835	3.753
	35	24.521	4.841	3.846	3.512
	40	28.024	5.908	4.357	3.992
	45	31.527	5.696	4.429	3.715
$\frac{\sigma_x}{\bar{x}} \cdot 100\%$			10.050	12.527	25.272

Kod identifikacije parametara modela stupnja slobode napredovanja i zanošenja ne postoje mjerenja pomaka koja bi inherentno bila integral brzine u otvorenoj petlji. Međutim, moguće je mjeriti brzinu napredovanja ili zanošenja broda te uvesti dodatno integralno djelovanje u otvorenoj petlji, kako je prikazano na slici 4.9.. Na taj način postižu se uvjeti za identifikaciju pomoću vlastitih oscilacija. Nakon što su snimljeni odzivi i pobude vlastitih oscilacija napredovanja i zanošenja, na isti način kao i kod zaošijanja po formulama iz tablice 4.2, izračunaju se parametri  $\alpha_u$ ,  $\beta_u$  odnosno  $\alpha_v$  i



$\beta_v$ . Nakon što su identificirani svi parametri pretpostavljenog modela danog s (2.17) - (2.19), može se krenuti s projektiranjem, razvijanjem i primjenom raznih algoritama vođenja i upravljanja, eng. *guidance and control*.

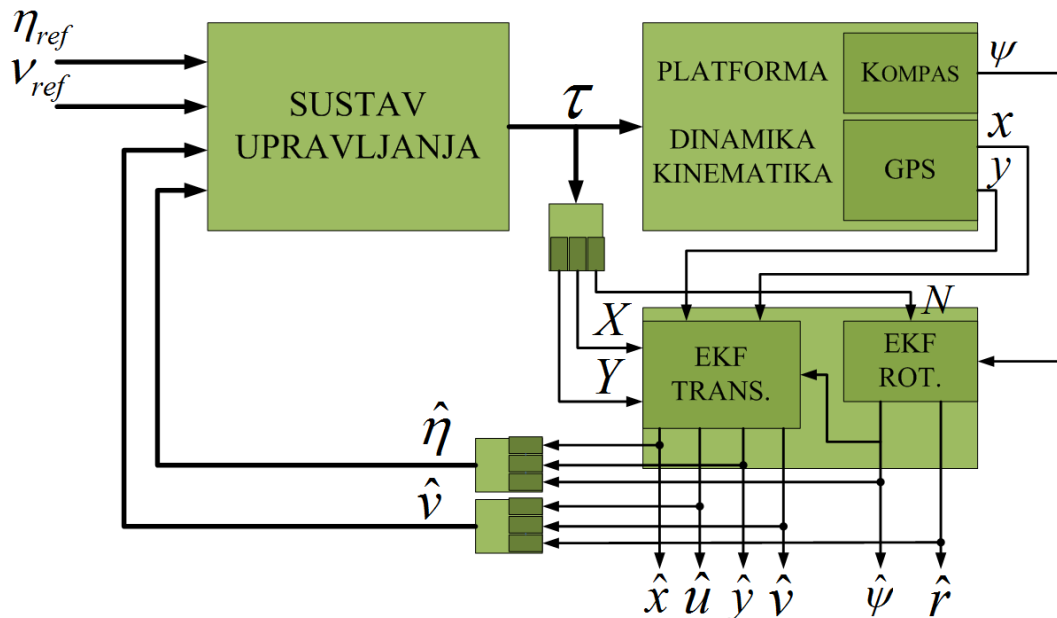


Slika 4.9: Blok shema identifikacije napredovanja i zanošenja

## 5. Projektiranje Kalmanovog filtra

Mjerenja sa senzora su redovito zašumljena i prije njihove upotrebe u zatvorenom sustavu upravljanja, potrebno ih je isfiltrirati kako bi se zadržala prava informacija s mjerenja bez šumova i drugih krivih informacija o obavljenom mjerenju (npr. tzv. "outlier"). Mjerenja s GPS-a često znaju imati vrlo velike pogreške koje onemogućavaju precizno dinamičko pozicioniranje plovila. Osim toga i praćenje putanje postaje teže ostvarivo. U ovom poglavlju opisan je postupak projektiranja Kalmanova filtra (KF) kojem je glavni zadatak učiniti vrijednosti varijabli stanja što bliže njihovim pravim vrijednostima. Kalmanov filter svoju svrhu pronalazi također u estimaciji nemjerljive brzine zaošijanja kao i nemjerljive brzine napredovanja; veličina koje su ponekad potrebne za projektiranje sustava upravljanja. Pomoću njega mogu se identificirati i morske struje uključujući ih u dinamički model plovila. Još jedna velika prednost uvođenja Kalmanovog filtra leži u činjenici da ponekad senzorska periferija radi frekvencijom koja je manja od frekvencije rada kontrolnog sustava i zbog toga je potrebna estimacija stanja između dva uzastopna mjerenja. U našem slučaju usko grlo je GPS modul koji radi frekvencijom  $10[Hz]$  i ukoliko želimo da sustav radi u stvarnom vremenu na implementiranom *sbRIO* sustavu ili jednostavno s periodom uzorkovanja manjim od  $0.1[s]$  tad nam je izrazito potrebna estimacija stanja. Dođe li do krajkotrajnog gubljenja mjernih signala zbog vanjskih smetnji ili pak do otkazivanja mjernog sustava u potpunosti, estimacija postaje bitna za sigurnost čitavog plovila. Estimirani signali su svojim oblikom glađi od mjerenih i nemaju naglih skokova što je izuzetno poželjno svojstvo sa stajališta upravljačkog sustava jer će njegov izlaz biti gladak, a samim time štede se aktuatori i pridonosi njihovom očuvanju. Nelinearnost matematičkog modela plovila diktira koju vrstu Kalmanovog filtra treba koristiti. Diskretni prošireni Kalmanov filter pokazao se kao idealan za ovu vrstu primjene. U prilog mu ide činjenica da je vrlo teško odrediti nazivnu trajektoriju sustava. U takvim se situacijama umjesto linearizacije oko poznatog nazivnog stanja provodi linearizacija oko trenutačne estimirane vrijednosti stanja. Ovo je određena vrsta samopodizanja (*engl. bootstrap*). Naime, KF estimira stanje na osnovi lineariziranog modela, a linearizirani se model izračunava

oko estimirane vrijednosti dobivene Kalmanovim filtrom. Kalmanov filtar opisan u nastavku, razložen je na dva dijela: jedan za estimaciju orijentacije i brzine zaošijanja i drugi za estimaciju pozicije i unaprijedne brzine. Struktura poopćenog sustava upravljanja može se vidjeti na slici 5.1



Slika 5.1: Poopćeni sustav upravljanja s Kalmanovim filtrom

## 5.1. Opći izrazi proširenog Kalmanova filtra (EKF)

EKF kao stohastički alat koristi se za što točniju estimaciju pozicije i orijentacije platforme. Sastoji se od dva modela

1. model stanja - za predikciju stanja na temelju matematičkog modela
2. model mjerenja - za korekciju stanja na temelju očitavanja mjerenja

- Jednadžbe procesa

$$\underline{x}(k+1) = f(\underline{x}(k), \underline{u}(k), \underline{w}(k)) \quad (5.1)$$

$$\underline{y}(k+1) = h(\underline{x}(k+1), \underline{v}(k+1)) \quad (5.2)$$

- Jednadžbe predikcije

$$\hat{\underline{x}}^- = f(\hat{\underline{x}}(k), \underline{u}(k), 0) \quad (5.3)$$

$$\mathbf{P}^-(\mathbf{k}+1) = \mathbf{A}(\mathbf{k})\mathbf{P}(\mathbf{k})\mathbf{A}(\mathbf{k})^T + \mathbf{W}(\mathbf{k})\mathbf{Q}(\mathbf{k})\mathbf{W}(\mathbf{k})^T \quad (5.4)$$

- Jednadžbe korekcije

$$\mathbf{K}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)^T[\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)^T + \mathbf{V}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{R}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{V}(\mathbf{k} + 1)^T]^{-1} \quad (5.5)$$

$$\hat{\underline{x}}^-(k + 1) = \hat{\underline{x}}^-(k + 1) + \mathbf{K}(\mathbf{k} + 1)[\underline{y}(\mathbf{k} + 1) - \mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)\hat{\underline{x}}^-] \quad (5.6)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{k} + 1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)]\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1) \quad (5.7)$$

gdje je s  $\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)$  predstavljena nesigurnost stanja, dok su matrice  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{H}$  i  $\mathbf{V}$  jacobian matrice definirane na sljedeći način:

$$\mathbf{A}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) \quad (5.8)$$

$$\mathbf{W}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) \quad (5.9)$$

$$\mathbf{H}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) \quad (5.10)$$

$$\mathbf{V}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) \quad (5.11)$$

Vektor  $\underline{x}(k)$  je vektor stanja, a matrica  $\mathbf{Q}$  matrica kovarijance. Minus kao superskript označava predikciju.

## 5.2. EKF za estimaciju orijentacije i brzine zaošijanja

Kontinuirani deterministički dinamički model okretanja oko  $z$ -osi opisan s (2.19) potrebno je proširiti sa stohastičkim uvodeći procesni bijeli šum kao izvor nesigurnosti u model.

$$\dot{r} = -\frac{\beta_{rr}}{\alpha_r}|r + \xi_r|(r + \xi_r) + \frac{1}{\alpha_r}N \quad (5.12)$$

$$\dot{\psi} = r + v_\psi \quad (5.13)$$

$$v_\psi = \xi_{v_\psi} \quad (5.14)$$

gdje je nesigurnost definirana kao Gaussov bijeli šum kako slijedi:

$$\xi_r = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_r^2) \quad (5.15)$$

$$\xi_{v_\psi} = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_{v_\psi}^2) \quad (5.16)$$

Nadalje, prošireni kontinuirani model predstavlja se ekvivalentnim diskretnim modelom.

$$r_{k+1} = r_k - \frac{\beta_{rr}}{\alpha_r} |r_k + \xi_{r_k}| (r_k + \xi_{r_k}) T + \frac{1}{\alpha_r} N_k T \quad (5.17)$$

$$\psi_{k+1} = \psi_k + r_k T + v_{\psi_k} T \quad (5.18)$$

$$v_{\psi_{k+1}} = v_{\psi_k} T + \xi_{v_{\psi_k}} T \quad (5.19)$$

gdje je  $T$  period uzorkovanja i za svaki  $k$ -ti korak uzorkovanja za  $r_k$  i  $\psi_k$  pretpostavljene su konstantne vrijednosti unutar tog koraka. Pretpostavlja se također da za svaki korak vrijedi:

$$\xi_{r_{k+1}} = \xi_{r_k} \quad (5.20)$$

$$\xi_{v_{\psi_{k+1}}} = \xi_{v_{\psi_k}} \quad (5.21)$$

Vektor stanja se može napisati iz gornjih relacija kao  $\underline{x}_k = [r_k \ \psi_k \ v_{\psi_k}]^T$  dok je procesni šum  $\underline{w}_k = [\xi_{r_k} \ \xi_{\psi_k}]$ . Računajući *Jacobian* matrice po definiciji prema (5.8) - (5.11) dobivamo slijedeće vrijednosti.

$$\mathbf{A}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} 1 - 2\frac{\beta_{rr}}{\alpha_r} |\hat{r}_k| T & 0 & 0 \\ T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$\mathbf{W}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} -2\frac{\beta_{rr}}{\alpha_r} |\hat{r}_k| T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{H}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$\mathbf{V}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) = 1 \quad (5.25)$$

Zbog mogućnosti gubitka signala s kompasa pa tako i dobivanja pogrešne informacije, matrica mjerenja  $\mathbf{H}(\mathbf{k})$  realizirana je za dva slučaja: kad su mjerenja dostupna i valjana (5.26) i za slučaj da mjerenja nisu dostupna (5.27). Matrica  $\mathbf{H}(\mathbf{k})$  pojavljuje se u

**Tablica 5.1:** Jednadžbe Kalmanova filtra (EKF)

Jednadžbe predikcije
$r_{k+1}^- = r_k - \frac{\beta_{rr}}{\alpha_r}  r_k  r_k T + \frac{1}{\alpha_r} N_k T$
$\psi_{k+1}^- = \psi_k + r_k T + v_{\psi_k} T$
$v_{\psi_{k+1}} = v_{\psi_k}$
$P^-(k+1) = \mathbf{A}(\mathbf{k})\mathbf{P}(\mathbf{k}+1)\mathbf{A}(\mathbf{k})^T + \mathbf{W}(\mathbf{k})\mathbf{Q}\mathbf{W}(\mathbf{k})^T$
Jednadžbe korekcije
$\mathbf{K}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{P}^-(\mathbf{k}+1)\mathbf{H}(\mathbf{k}+1)^T[\mathbf{H}(\mathbf{k}+1)\mathbf{P}^-(\mathbf{k}+1)\mathbf{H}(\mathbf{k}+1)^T + \mathbf{V}(\mathbf{k}+1)\mathbf{R}(\mathbf{k}+1)\mathbf{V}(\mathbf{k}+1)^T]^{-1}$
$\hat{\mathbf{x}}^-(k+1) = \hat{\mathbf{x}}^-(k+1) + \mathbf{K}(\mathbf{k}+1)[\mathbf{y}(\mathbf{k}+1) - \mathbf{H}(\mathbf{k}+1)\hat{\mathbf{x}}^-(\mathbf{k}+1)]$
$\mathbf{P}(\mathbf{k}+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(\mathbf{k}+1)\mathbf{H}(\mathbf{k}+1)]\mathbf{P}^-(\mathbf{k}+1)$

jednadžbama korekcije pa u slučaju da nemamo mjerenja, korekcije u biti i nema te je konačna estimacija stanja bazirana samo na matematičkom modelu dinamike.

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$\mathbf{H}_2(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Izvedene jednadžbe diskretnog proširenog Kalmanovog filtra za okretanje oko  $z$ -osi mogu se sažeti u tablici 5.1.

### 5.3. EKF za estimaciju pozicije i brzine napredovanja

Diskretni prošireni Kalmanov filter za estimaciju pozicije i brzine napredovanja je drugi dio estimacijskog bloka. Njihovo razdvajanje je napravljeno zbog više razloga. Jedan od najznačajnijih je realizacija u obliku algoritma na sBRIO sustavu. Ovakav način postavljanja estimacije daje preglednost i strukturiranost u kontrolnoj strukturi čime je omogućeno da otkazivanje jednog bloka ne mora nužno doprinijeti otkazivanju drugog. Blok za estimaciju brzine zaošijanja i pozicije radit će jednako dobro bez obzira pojavi li se greška u EKF-u za estimaciju položaja i unaprijedne brzine. Ovo svojstvo je bitno sa stajališta same pouzdanosti kontrolnog sustava. S druge strane rasprezanje je napravljeno zbog činjenice da je teško opisati kompletan EKF za jedan kompleksni sustav kao što je plovilo. U ovom drugom dijelu nužno je bilo uvesti određene pretpostavke. Pretpostavljeno je da su  $u_k$ ,  $v_k$  i  $\psi_k$  konstante vrijednosti tijekom

izvršavanja  $k$ -tog koraka algoritma. Ovdje treba posebno naglasiti da je  $\psi_k$  parametar dobiven estimacijom iz prvog dijela EKF-a. U tome leži možda i najvažniji razlog njihovog razdvajanja. Želeći zadržati stvari na jednostavnoj razini, promatranje orijentacije kao konstantne vrijednosti umjesto kao jednog od stanja pojednostavljaju se konačne jednadžbe EKF-a, dok se na estimaciju ostalih stanja neznatno utječe. U opis Kalmanova filtra, krenut ćemo kao i u prethodnom pododjeljku od proširenja determinističkog kontinuiranog modela predstavljenog jednadžbama (2.17) i (2.18). Osim dodavanja Gaussovog bijelog šuma, proširit ćemo ga uključujući i model morskih struja u dinamički stohastički model plovila.

$$\dot{u} = -\frac{\beta_{uu}}{\alpha_u}|u + \xi_u|(u + \xi_u) + \frac{1}{\alpha_u}X \quad (5.28)$$

$$\dot{v} = -\frac{\beta_{vv}}{\alpha_v}|v + \xi_v|(v + \xi_v) + \frac{1}{\alpha_v}Y \quad (5.29)$$

$$\dot{x} = (u + \xi_u) \cos \psi - (v + \xi_v) \sin \psi + \dot{x}_c \quad (5.30)$$

$$\dot{y} = (u + \xi_u) \sin \psi + (v + \xi_v) \cos \psi + \dot{y}_c \quad (5.31)$$

$$\dot{x}_c = \xi_{x_c} \quad (5.32)$$

$$\dot{y}_c = \xi_{y_c} \quad (5.33)$$

gdje su vektor stanja  $\underline{x}$  i vektor procesnog šuma  $\underline{w}$  dani s:

$$\underline{x} = [u \ v \ x \ y \ \dot{x}_c \ \dot{y}_c] \quad \underline{w} = [\xi_u \ \xi_v \ \xi_{x_c} \ \xi_{y_c}] \quad (5.34)$$

Morske struje opisuju se stanjima  $\dot{x}_c$  i  $\dot{y}_c$  dok je Gaussov šum definiran normalnom razdiobom srednje vrijednosti nula.

$$\xi_u = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_u^2) \quad (5.35)$$

$$\xi_v = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_v^2) \quad (5.36)$$

$$\xi_{x_c} = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_{x_c}^2) \quad (5.37)$$

$$\xi_{y_c} = \mathbf{N}(\mathbf{0}, \sigma_{y_c}^2) \quad (5.38)$$

Analogno postupku za dobivanje diskretnog proširenog Kalmanova filtra za brzinu zaošijanja i ovdje se kontinuirani model nadomješta diskretnim opisom

$$u_{k+1} = u_k - \frac{\beta_{uu}}{\alpha_u} |u_k| u_k T + \frac{1}{\alpha_u} X_k T \quad (5.39)$$

$$v_{k+1} = v_k - \frac{\beta_{vv}}{\alpha_v} |v_k| v_k T + \frac{1}{\alpha_v} Y_k T \quad (5.40)$$

$$x_{k+1} = x_k + u_k \cos \psi_k T - v_k \sin \psi_k T + \dot{x}_{c_k} T \quad (5.41)$$

$$y_{k+1} = y_k + u_k \sin \psi_k T + v_k \cos \psi_k T + \dot{y}_{c_k} T \quad (5.42)$$

$$\dot{x}_{c_{k+1}} = \dot{x}_{c_k} + \xi_{x_c} T \quad (5.43)$$

$$\dot{y}_{c_{k+1}} = \dot{y}_{c_k} + \xi_{y_c} T \quad (5.44)$$

s pripadnim diskretnim vektorom stanja i procesnog šuma

$$\underline{x}_k = [u_k \ v_k \ x_k \ y_k \ \dot{x}_{c_k} \ \dot{y}_{c_k}] \quad \underline{w} = [\xi_{u_k} \ \xi_{v_k} \ \xi_{x_{c_k}} \ \xi_{y_{c_k}}] \quad (5.45)$$

Još je jednom bitno napomenuti da se vrijednosti  $u_k$ ,  $v_k$  i  $\psi_k$  promatraju kao konstante veličine unutar  $k - \text{tog}$  koraka. Također pretpostavljeno je da za svaki korak vrijedi:

$$\xi_{u_{k+1}} = \xi_{u_k} \quad (5.46)$$

$$\xi_{v_{k+1}} = \xi_{v_k} \quad (5.47)$$

$$\xi_{x_{c_{k+1}}} = \xi_{x_{c_k}} \quad (5.48)$$

$$\xi_{y_{c_{k+1}}} = \xi_{y_{c_k}} \quad (5.49)$$

Jacobian matrice  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{H}$  i  $\mathbf{V}$  odredit ćemo prema definicijama (5.8) - (5.11).

$$\mathbf{A}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} 1 - 2\frac{\beta_{uu}}{\alpha_u} |\hat{u}_k| T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\frac{\beta_{vv}}{\alpha_v} |\hat{v}_k| T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \hat{\psi}_k T & -\sin \hat{\psi}_k T & 1 & 0 & T & 0 \\ \sin \hat{\psi}_k T & \cos \hat{\psi}_k T & 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.50)$$



$$\mathbf{W}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} -2\frac{\beta_{uu}}{\alpha_u}|\hat{u}_k|T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\frac{\beta_{vv}}{\alpha_v}|\hat{v}_k|T & 0 & 0 \\ \cos \hat{\psi}_k T & -\sin \hat{\psi}_k T & 0 & 0 \\ \sin \hat{\psi}_k T & \cos \hat{\psi}_k T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

$$\mathbf{H}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

$$\mathbf{V}_{[i,j]}(\mathbf{k}) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\hat{x}_{k+1}^-, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Kao što je bio slučaj za kompas i ovdje ćemo matricu mjerenja  $\mathbf{H}(\mathbf{k})$  opisati i za slučaj kad nema mjerenja ili GPS modul daje mjerenje koje je daleko od predikcije modela pa se takvo mjerenje odbacuje. Zbog toga se definiraju dvije matrice mjerenja. Matrica dana izrazom (5.55) se koristi kad je mjerenje previše nepouzđano ili ga uopće nema te se na taj način za estimaciju stanja koristi samo model stanja.

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

$$\mathbf{H}_2(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.55)$$

Točnost GPS-a uvelike ovisi o broju satelita s kojima je spojen, no nikako se ne preporuča korištenje njegovog mjerenja bez filtriranja Kalmanovim filtrom. Imamo li na raspolaganju više GPS modula uvijek je dobra ideja kombinirati više mjerenja kako bi dobili što točniju poziciju plovila. Konačne jednadžbe za diskretni proširen Kalmanov filtar za estimaciju pozicije i unaprijedne brzine prikazane su u tablici 5.2

Matrice  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  postavljene su na konstantne vrijednosti

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

gdje su vrijednosti unutar matrice odabrane prema *a-priori* odzivima.

**Tablica 5.2:** Jednadžbe Kalmanova filtra (EKF)

---

Jednadžbe predikcije

---

$$u_{k+1}^- = u_k - \frac{\beta_{uu}}{\alpha_u} |u_k| u_k T + \frac{1}{\alpha_u} X_k T$$

$$v_{k+1}^- = v_k + \frac{\beta_{vv}}{\alpha_v} |v_k| v_k T + \frac{1}{\alpha_v} Y_k T$$

$$x_{k+1}^- = x_k + u_k \cos \psi_k T - v_k \sin \psi_k T + \dot{x}_{c_k}$$

$$y_{k+1}^- = y_k + u_k \sin \psi_k T + v_k \cos \psi_k T + \dot{y}_{c_k}$$

$$\dot{x}_{c_{k+1}}^- = \dot{x}_{c_k}$$

$$\dot{y}_{c_{k+1}}^- = \dot{y}_{c_k}$$

$$\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{A}(\mathbf{k})\mathbf{P}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{A}(\mathbf{k})^T + \mathbf{W}(\mathbf{k})\mathbf{Q}\mathbf{W}(\mathbf{k})^T$$


---

Jednadžbe korekcije

---

$$\mathbf{K}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)^T [\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)^T + \mathbf{V}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{R}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{V}(\mathbf{k} + 1)^T]^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^-(\mathbf{k} + 1) = \hat{\mathbf{x}}^-(\mathbf{k} + 1) + \mathbf{K}(\mathbf{k} + 1)[\mathbf{y}(\mathbf{k} + 1) - \mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)\hat{\mathbf{x}}^-(\mathbf{k} + 1)]$$

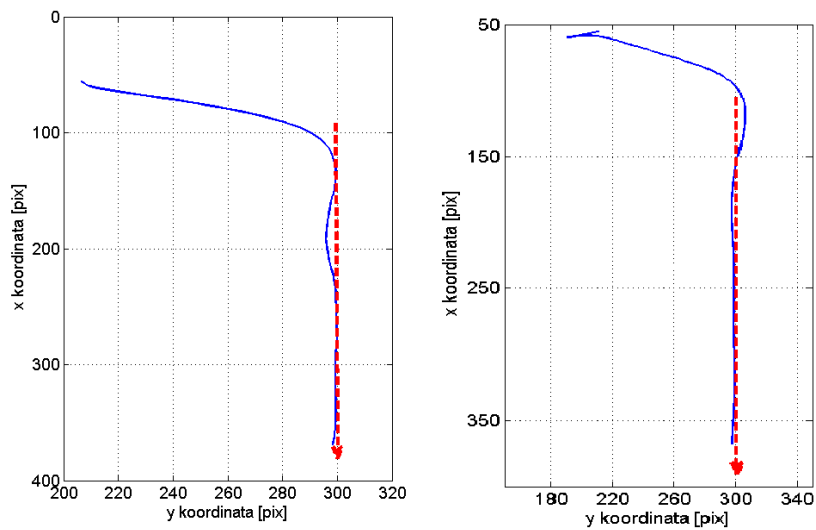
$$\mathbf{P}(\mathbf{k} + 1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(\mathbf{k} + 1)\mathbf{H}(\mathbf{k} + 1)]\mathbf{P}^-(\mathbf{k} + 1)$$


---

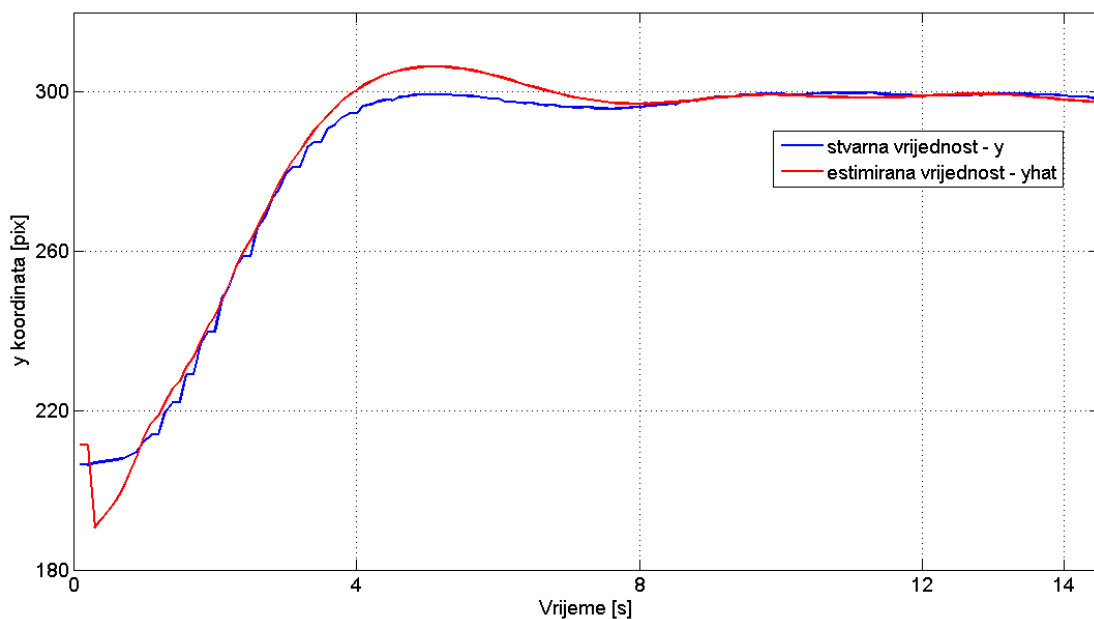
## 5.4. Rezultati i usporedba EKF-a

U ovom dijelu bit će prikazani odzivi mjerenih veličina dobivenih obradom slike s kamere smještene iznad bazena i odzivi Kalmanovog estimata. Mjera je zadržana u pikselima zbog veće razlučivosti. Eksperiment koji je poslužio testiranju Kalmanovog filtra sastojao se od praćenja jedne linije koja je bila definirana točkama  $T_1 = (120, 300)$  i  $T_2 = (400, 300)$ . Ostvarena putanja i ona estimirana prikazane su na slici 5.2.

Zbog različitog mjerenja u kojem su putanje iscrtane nije baš na prvi pogled uočljivo da značajnijih razlika nema. Kako bi potvrdili valjanost EKF-a slijede odzivi koji prikazuju kako se pojedina koordinata mijenjala u vremenu. Na slici 5.3 iscrtana je prava mjerena vrijednost i njezin estimat.

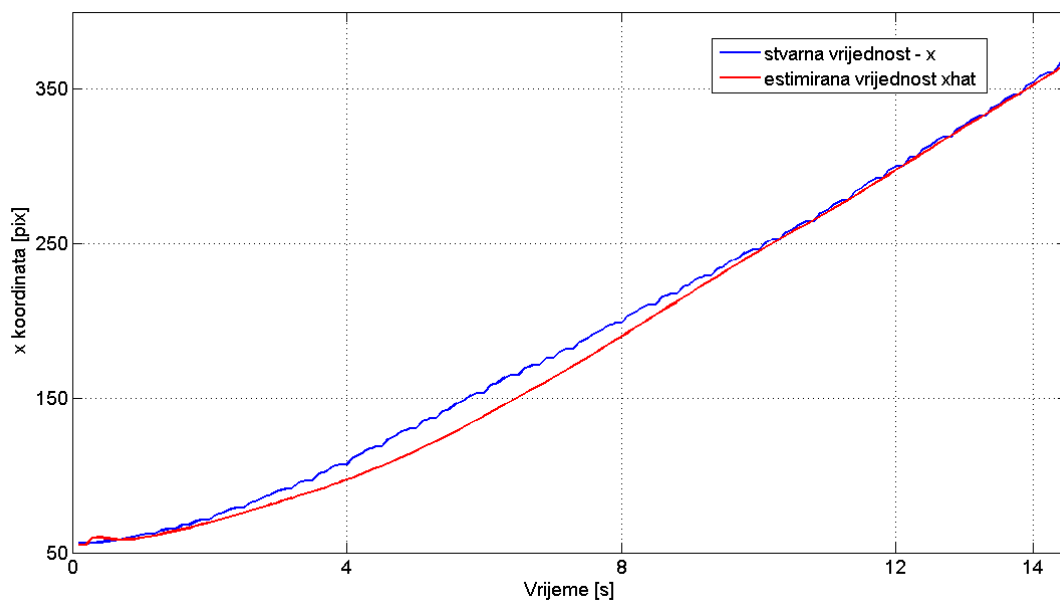


**Slika 5.2:** Stvarna putanja (lijevo) i estimirana (desno)



**Slika 5.4:** Stvarna vrijednost y koordinate kroz vrijeme i estimirana vrijednost

Primjećuje se da se upotrebom Kalmanovog filtra dobio glađi signal nego što su to sama mjerenja kao takva. Iako je obrada slike izrazito točna, a pogreška mala preporuča se uvijek koristiti Kalmanov filter u zatvorenom krugu upravljanja. Upotreba Kalmanovog filtra dobiva na značenju prilikom terenske primjene korištenjem GPS-a kao mjernog instrumenta povratne grane. GPS ima puno veću pogrešku i za fine algoritme regulacije nužno je filtrirati njegova očitavanja. Osim toga, Kalman može estimirati vrijednosti neko kratko vrijeme čak i ako senzor ispadne iz rada i na taj način se



**Slika 5.3:** Stvarna vrijednost  $x$  koordinate kroz vrijeme i estimirana vrijednost

moгу spriječiti neželjeni događaji. Čovjek ima vremena preuzeti nadzor i primjerice spriječiti sudar s drugim plovilom.

## 6. Metode vođenja i upravljanja

Nakon postavljenog matematičkog modela plovila te napravljene identifikacije sljedeći korak su sustavi vođenja i upravljanja. U ovom poglavlju bit će opisane neke od konvencionalnih metoda vođenja i upravljanja. Struktura ovog poglavlja prati složenost algoritma pa će se tim redom i opisati algoritmi. Krenut ćemo od jednostavnog praćenja jedne linije, proširiti na praćenje više linija s mehanizmom prebacivanja, zatim će biti opisano dinamičko pozicioniranje i slijeđenje trajektorije. Eksperimentalni rezultati dobiveni u laboratoriju ili na vanjskim testiranjima na Jarunu daju potvrdu teorijskog koncepta izloženog u ovom dijelu. Veliki značaj ovog poglavlja je i validacija identificiranih modela plovila. S dobivanjem valjanih eksperimentalnih rezultata potvrđeno je da su plovila dobro matematički modelirana te da je njihova dominantna dinamika zadovoljavajuće opisana.

### 6.1. Slijeđenje linije

U ovom dijelu opisana je problematika slijeđenja linije. Postupno je razrađen algoritam upravljanja zadužen za ostvarivanje slijeđenja linije. Dalje u tekstu razrađen je mehanizam prebacivanja s praćenja jedne linije na praćenje druge kad se plovilo približi kraju prve linije.

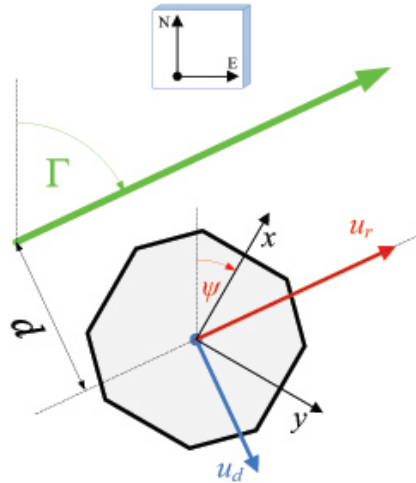
#### 6.1.1. Postavljanje problema i definiranje upravljačkih pravila

Linija koju bi platforma trebala slijediti je određena sa dvije točke u  $2D$  prostoru i njihovim koordinatama. Označimo početnu točku sa  $T_1$  i krajnju sa  $T_2$  te definirajmo orijentiranost linije od točke  $T_1$  prema točki  $T_2$ . Označimo i trenutnu poziciju platforme sa  $p(t) = [x(t), y(t)]^T$ , a vektore koordinata pridruženih točkama  $T_1$  i  $T_2$  sa  $p_{T_1}(t) = [x_{T_1}(t), y_{T_1}(t)]^T$  i  $p_{T_2}(t) = [x_{T_2}(t), y_{T_2}(t)]^T$ . U skladu s koordinatnim sustavima definiranim u početnom poglavlju, zamislimo da je koordinatni sustav vezan za liniju slijeđenja tako da se ishodište nalazi u točki  $T_2$  te je rotiran oko  $z$ -osi, odnosno

$x$ -os je rotirana za pozitivan kut

$$\Gamma = \text{atan2}(y_2 - y_1, x_2 - x_1) \quad (6.1)$$

u odnosu na stacionarni položaj plovila koji se podudara sa globalnim koordinatnim sustavom.



**Slika 6.1:** Koncept slijeđenja linije

Koordinate u koordinatnom sustavu vezanom za liniju<sup>1</sup> se računaju prema:

$$\varepsilon(t) = R(\Gamma)^T(p(t) - p_{T2}(t)) \quad (6.2)$$

gdje je:

$$R(\Gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\Gamma) & -\sin(\Gamma) \\ \sin(\Gamma) & \cos(\Gamma) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Vektor  $\varepsilon(t)$  sastoji se od udaljenosti duž linije  $s(t)$  i udaljenosti okomite na liniju  $e(t)$ .

$$\varepsilon(t) = [s(t), e(t)]^T \in R^2 \quad (6.4)$$

Bitno je uočiti da udaljenosti mogu poprimiti i negativne vrijednosti. Glavna zadaća slijeđenja je osigurati da je

$$\varepsilon(t) = -(x(t) - x_2(t))\sin(\Gamma) + (y(t) - y_2(t))\cos(\Gamma) = 0 \quad (6.5)$$

<sup>1</sup>Transponirana rotacijska matrica jednaka je rotacijskoj matrici u smjeru kazaljke sata

odnosno, mora vrijediti:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (6.6)$$

Sad je poprilično jasno da se mora osigurati konvergencija okomite udaljenosti koju je sasvim razumno imenovati pogreškom, odnosno regulacijskim odstupanjem, [7], [13]. Projektirani regulator opisan u sljedećem poglavlju imat će upravo taj zadatak. Za razliku od  $e(t)$ , uzdužnom dužinom  $s(t)$  se ne upravlja. Smanjuje se kako se približavamo drugoj točki, a u trenutku kad se dovoljno približimo za prebacivanje na drugu liniju koju treba pratiti skače na veliku vrijednost. Potrebno je još definirati vezu između dinamičkih i kinematičkih veličina u koordinatnom sustavu vezanom za platformu i zemaljskog koordinatnog sustava. Ukupna brzina plovila u zemaljskom koordinatnom sustavu se može razložiti na dva vektora brzine: vektor  $u_r$  paralelan liniji te vektor  $u_d$  koji je na nju okomit. Prema [8], veza između tih brzina i brzina u koordinatnom sustavu plovila je dana s

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_d \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}}_{\Phi} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

gdje je  $\gamma = \Gamma - \psi$  kut za koji je plovilo zakrenuto u odnosu na liniju. Na sličan način definira se relacija između sila koje djeluju na platformu (sila napredovanja i sila zanošenja) i sila u smjeru paralelnom i okomitom na liniju.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_d \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Zahvaljujući činjenici da je platforma simetrična, diferencijalne jednadžbe za  $X$  i  $Y^2$  kojima je opisana dinamika sustava su praktično iste. Treba biti spomenuto da vrijedi  $\Phi = \Phi^{-1}$  Shematski dinamički model plovila može se predstaviti slikom 6.10 i sljedećom jednadžbom

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_d \end{bmatrix} = \underbrace{\Phi^{-1} \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \Phi}_{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} X_r \\ X_d \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

---

<sup>2</sup>X - Sila napredovanja, Y - Sila zanošenja, N - Moment zaošijanja vidljivi na slici 6.2.

gdje  $G_1$  i  $G_2$  predstavljaju dinamiku napredovanja i dinamiku zanošenja. Samo ako vrijedi  $G_1 = G_2$ , a ovdje uz zanemarenje male razlike koja se javlja kod identificiranih parametara uistinu vrijedi, može se napisati

$$\Phi^{-1}G\Phi = G \quad (6.10)$$

Drugim riječima, dinamika koja povezuje brzinu u smjeru paralelnom liniji sa silom u smjeru paralelnom liniji je ista kao i dinamika napredovanja gledano iz koordinatnog sustava platforme. Isto vrijedi i za okomiti smjer i dinamiku zanošenja. Potpuni matematički model slijeđenja linije dan je sljedećim jednadžbama, [4]:

$$X_d = \alpha_u \dot{u}_d + \beta(u_d)u_d \quad (6.11)$$

$$\dot{d} = u_d + \zeta \quad (6.12)$$

gdje su:

$X_d$  - izlaz iz regulatora, odnosno proračunata sila u smjeru okomitom na liniju

$u_d$  - brzina u smjeru okomitom na liniju

$\dot{u}_d$  - akceleracija u smjeru okomitom na liniju

$\alpha_u$  - inercijska konstanta procesa

$\beta(u)$  - parametar otpora strujanju

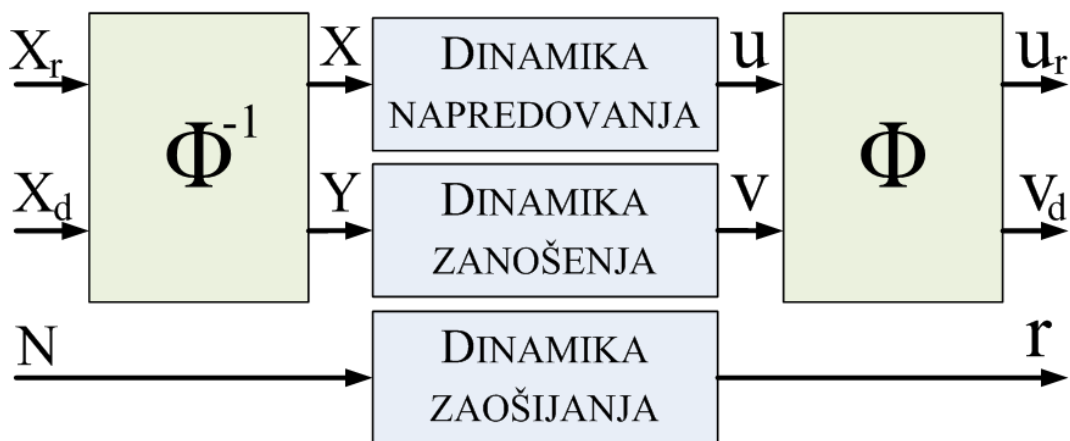
$d$  - udaljenost platforme od linije

$\zeta$  - smetnje okomite na liniju

### 6.1.2. Konačni automat za prebacivanje na praćenje sljedeće linije

Sad kad je definiran problem praćenja linije, sljedeći korak je bio primijeniti automatsko prebacivanje na sljedeću liniju kad se platforma približi kraju linije koju prati. Dakle, kad je platforma u relativnoj blizini konačne točke, automatski se treba aktivirati zadatak praćenja sljedeće linije. Za rješenje ovog problema korištena je matematička tvorevina konačnih automata. Konačni automat ili automat konačnih stanja definira se kao diskretni matematički model koji se sastoji od konačnog broja stanja,





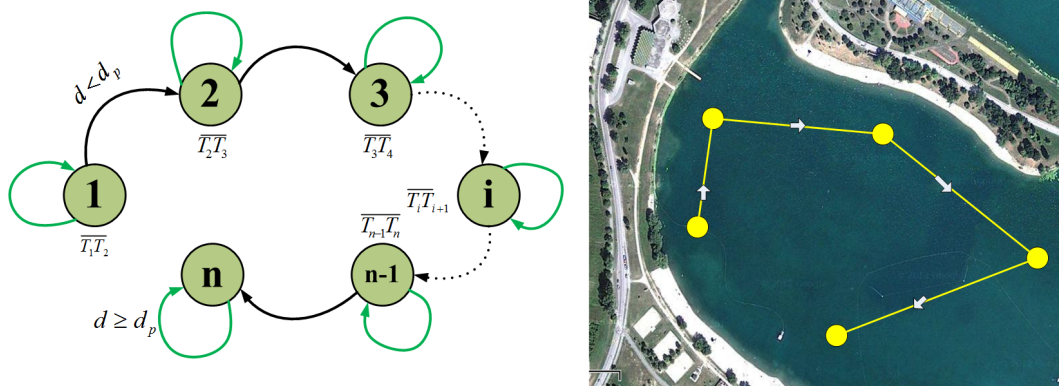
Slika 6.2: Slijeđenje linije

prijelaza između stanja i akcija koje obavlja. Jednom kad korisnik odabere točke između kojih se interpoliraju linije koje platforma treba pratiti pokreće se blok u kojem je programski implementiran konačni automat. Stanja su označena rednim brojevima koja odgovaraju označenim točkama na grafičkom sučelju, a počinju od broja 1. Svako stanje ima drugačiju liniju za praćenje. Tako npr. stanje broj 1 ima pridruženu liniju koju definiraju točke  $T_1$  i  $T_2$ , stanje broj 2 ima pridruženu liniju koju definiraju točke  $T_2$  i  $T_3$ , stanje  $n$  ima pridruženu liniju koja je definirana točkama  $T_n$  i  $T_{n+1}$ . Važno je uočiti da je krajnja točka prethodnog stanja početna točka sljedećeg stanja. Prijelaz između stanja je jednoznačan, odnosno, moguć je samo u smjeru stanja rastućih indeksa. Nije moguće vratiti se na liniju koju je platforma upravo završila pratiti, već se mora prebaciti na sljedeću. Isto tako, nije moguće preskočiti pojedinu točku prilikom praćenja linije. Uvjet koji je potrebno ispuniti da se prebacimo iz trenutnog stanja u sljedeće je da trenutna udaljenost platforme od krajnje točke linije bude manja od 10% sveukupne dužine linije. Sve dok je proračunata udaljenost veća od definirane udaljenosti koja vodi u sljedeće stanje, ostajemo u istom stanju. To je pokazatelj da platforma još nije završila sa praćenjem trenutne linije te da treba pričekati da to napravi te joj onda proslijediti iduću liniju.

Iako se za mjerenje udaljenosti od krajnje točke mogla koristiti udaljenost duž linije uvedena u (6.2), ipak je odabrana udaljenost proračunata u koordinatnom sustavu vezanom za Zemlju.

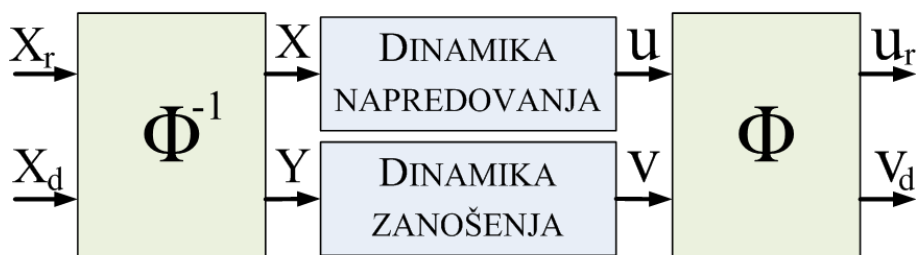
$$d_i = \sqrt{(x_{i+1}(t) - x(t))^2 + (y_{i+1}(t) - y(t))^2} \quad (6.13)$$

To je napravljeno iz činjenice da ako se zbog utjecaja raznih smetnji platforma ne na-



Slika 6.3: Konačni automat i veza s linijama

lazi na liniji, već s pogreškom  $d$  lijevo ili desno od nje uzme upravo prava udaljenost od točke. Uzdužna udaljenost bi mogla težiti k nuli, a platforma bi se mogla nalaziti poprilično daleko od linije i točke. Ipak, ovaj dio je jako bitan prilikom uključanja u rad ako se platforma nalazi jako daleko od definirane prve linije. Tada je potrebno isključiti željenu unaprijednu silu  $X_r$ <sup>3</sup> i pričekati da se platforma nađe u razumnom području u kojem može izvršiti svoj zadatak. Uz isključeni  $X_r$  platforma putuje iz svoje trenutne poziciju okomito prema liniji i kad se nađe u dopuštenom radijusu nastavlja s normalnim radom. Zadnje stanje se bitno razlikuje od ostalih. Ono je okarakterizirano točkom u kojoj se platforma dinamički pozicionira. Dinamičko pozicioniranje podrazumijeva održavanje željene pozicije i orijentacije. Ako platformu gurnemo rukom iz pozicije koju je zauzela, ona mora biti sposobna vratiti se u istu poziciju s istom orijentacijom koju je držala prije djelovanja poremećaja. Nadograđeni regulator za održavanje pozicije i orijentacije u zadnjoj točki putanje opisan je kasnije.



Slika 6.4: Kontrolirane sile kod praćenja linije

<sup>3</sup>Unaprijednom silom se ne upravlja već je konstantna duž cijelog putovanja

### 6.1.3. Projektiranje regulatora

U ovom poglavlju opisana je procedura projektiranja regulatora za praćenje linije na temelju željene modelske funkcije koji osigurava pogrešku u ustaljenom stanju jednaku nuli pod utjecajem vanjskih smetnji.

#### Odabir modelske funkcije

Željena prijenosna funkcija zatvorene petlje je dana s:

$$G_m(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_vs^v}{b_0 + b_1s + \dots + b_us^u}, u > v \quad (6.14)$$

gdje su  $\alpha(s)$  i  $\beta(s)$  polinomi kompleksne varijable  $s$ , [2]. Pri sintezi regulatora metodom zatvorene prijenosne funkcije postavljen je zahtjev da ne smije biti trajnog regulacijskog odstupanja, odnosno:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G_m(0) = 1 \quad (6.15)$$

Matematički model praćenja linije dan s (6.11) i (6.12) može također biti opisan racionalnom prijenosnom funkcijom procesa.

$$G_s(s) = \frac{D(s)}{C(s)} = \frac{d_0 + d_1s + \dots + d_ms^m}{c_0 + c_1s + \dots + c_ns^n}, n > m \quad (6.16)$$

Prijenosna funkcija regulatora kojeg treba projektirati je pretpostavljenog oblika:

$$G_R(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = K_R + \frac{K_I}{s} + K_Ds \quad (6.17)$$

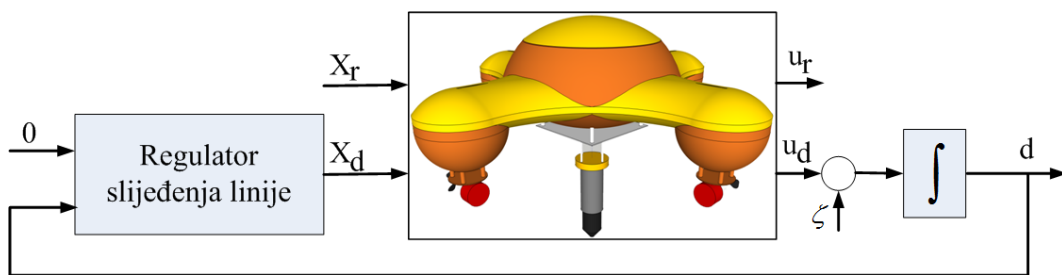
S obzirom na okruženje u kojem se platforma treba kretati i moguća sudaranja s drugim plovnim objektima, izabrana je *binomna modelska funkcija* zbog njenog aperiodskog odziva. Osim toga, binomna funkcija daje najbrži aperiodski odziv zbog svojih višestrukih polova koji se nalaze na realnoj osi. Nadalje, odabrana je i zbog samog afiniteta autora prema asimptotskom približavanju liniji kojeg osigurava upravo ova modelska funkcija

$$G_m(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^3}s^3 + \frac{3}{\omega_n^2}s^2 + \frac{3}{\omega_n}s + 1} \quad (6.18)$$

## Sinteza regulatora u kontinuiranoj domeni

Projektiranju regulatora se pristupilo u s-domeni što je i bilo najlogičnije. Struktura regulatora dana s (6.17) proširena je na poseban oblik, tj. I-PD regulator. Strukturu opisanu u prethodnom poglavlju možemo slobodno zadržati budući da je referentna vrijednost na ulazu u regulator  $d_{ref} = 0$  što je uvjet za praćenje linije prema [17] i [19]. S  $d_{ref} = 0$ , I-PD regulator svodi se na klasičan PID regulator. Osim toga, I-PD struktura regulatora je prihvaćena u podvodnoj robotici zbog toga što nagle promjene referentne veličine ne izazivaju nagle promjene upravljačke veličine što je jako poželjno u sustavima upravljanjima plovilima. Izlaz iz regulatora je generirana sila  $X_d$  koja je dana sa sljedećom integro-diferencijalnom jednačbom.

$$X_d = K_I \int_0^t (d_{ref} - d) dt - K_{RD} - \frac{d}{dt}d \quad (6.19)$$



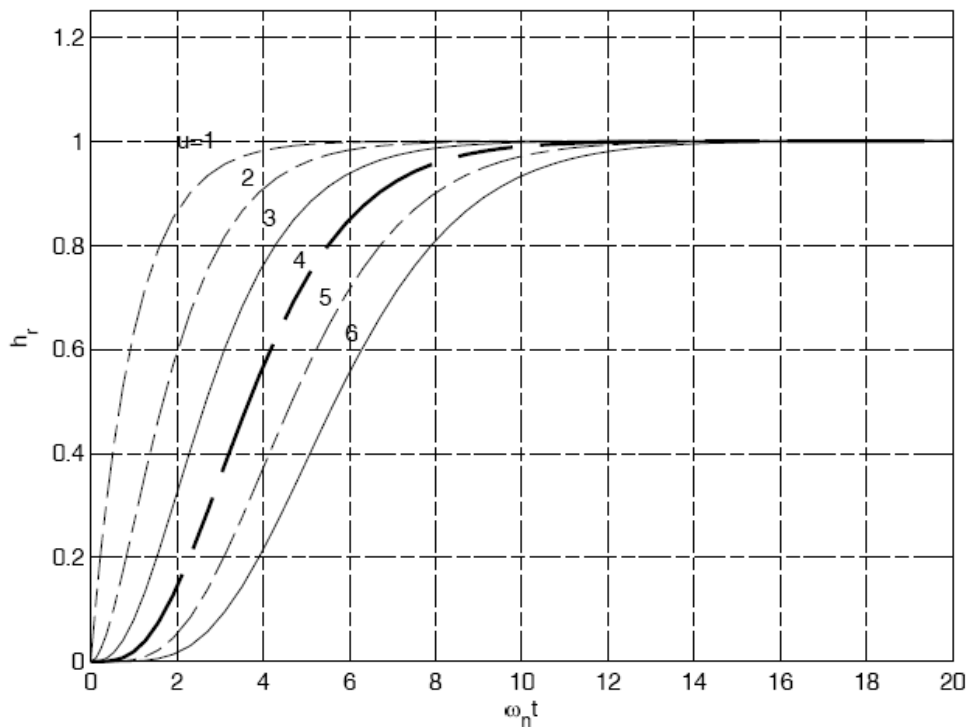
**Slika 6.5:** Zatvorena petlja upravljanja za slijeđenje linije

Jedini dinamički parametar prema kojem je određena  $\omega_n$  regulatora je vrijeme porasta prijelazne funkcije<sup>4</sup>. Pritom, vodilo se zahtjevom da se u realnim uvjetima dobije stabilan, dinamički što brži sustav. Zbog kompleksnosti matematičkog modela ulazno vrijeme  $t_u$ , odnosno  $\omega_n$  regulatora određeni su metodom pokušaja i promašaja. Iz normirane prijelazne funkcije  $h_x(\omega_n t)$  za binomni oblik trećeg reda očitano je:

$$\omega_n t = 10 \quad (6.20)$$

Postupno povećavajući vrijeme porasta i pri tome smanjujući  $\omega_n$  promatran je simulacijski odziv sustava. Postupak je zaustavljen kad se dobio stabilan odziv sustava, a za sigurnost dobiveni iznos je još malo uvećan. Vrijeme porasta  $t_u$  je na kraju zadržano na 4 sekunde što se može činiti dosta velikim, no s obzirom na masu platforme i inertnost sasvim je opravdano.

<sup>4</sup>Vrijeme porasta definira se kao ono vrijeme koje je potrebno prijelaznoj funkciji da dođe prvi put do ustaljenog stanja



**Slika 6.6:** Normirane prijelazne funkcije za binomne oblike

Uz određenu  $\omega_n$  jedini preostali zadatak je odrediti parametre regulatora. Budući da je ranije definirana binomna modelska funkcija trećeg reda kao željeno ponašanje sustava i prema relaciji koja povezuje otvoreni i zatvoreni krug

$$G_m(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (6.21)$$

te postupnim zatvaranjem povratnih petlji, ukupna zatvorena petlja za praćenje linije može se prikazati u sljedećoj formi:

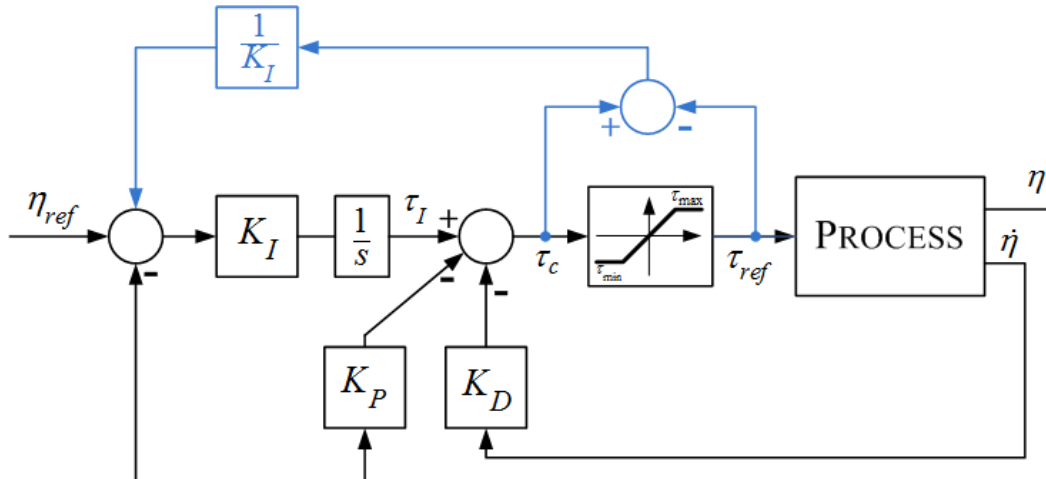
$$\frac{d}{d_{ref}} = \frac{1}{\frac{\alpha_u}{K_I}s^3 + \frac{(\beta_u + K_D)}{K_I}s^2 + \frac{K_R}{K_I}s + 1} \quad (6.22)$$

Izjednačavanjem koeficijenata željene modelske funkcije i koeficijenata u (6.22) možemo odrediti parametre regulatora sljedećim redoslijedom:

$$K_I = \frac{\alpha_u}{b_3},$$

$$K_R = K_I b_1,$$

$$K_D = b_2 K_I - \beta_u,$$



Slika 6.7: I-PD regulator s anti-windup mehanizmom

Idealan derivacijski kanal u realizaciji je zamijenjen realnim dodajući mu u seriju  $PT_1$  član te je konačan oblik derivacijskog člana:

$$G_D(s) = \frac{K_D s}{\frac{K_D}{10} s + 1} \quad (6.23)$$

### Analiza točnosti u ustaljenom režimu rada

Pod ustaljenim režimom rada u našem slučaju podrazumijeva se da nakon eventualnog prebacivanja na praćenje slijedeće linije i prijelaznih pojava koje se pritom događaju platforma slijedi zadanu liniju. Analiza točnosti provedena u ovom odjeljku pokazat će s kolikom točnošću ona to radi, odnosno koliko je statičko regulacijsko odstupanje koje osigurava projektirani regulator. Budući da je ulaz (referentna veličina) regulatora postavljena na nulu što je zahtjev slijeđenja linije, za potrebe ovog razmatranja, zamislimo da je ulaz skokovita (konstantna) pobuda veličine  $A$ . To bi odgovaralo slijeđenju linije s razmakom  $A$  od nje. Statičko regulacijsko odstupanje definira se kao odstupanje sustava u ustaljenom stanju, nakon istitravanja prijelaznog procesa, uslijed djelovanja konstantne (skokovite) postavne veličine. Za naš sustav slijedi:

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_R(s)G_S(s)} R(s) = \frac{s(\alpha_u s + \beta_u)A}{\alpha_u s^3 + (K_D + \beta_u)s^2 + K_R s + K_I} \quad (6.24)$$

Koristeći teorem o konačnoj vrijednosti prema [26], u Laplaceovom području proizlazi:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0 \quad (6.25)$$

**Tablica 6.1:** Parametri

Parametar	Vrijednost	Opis
$b_1$	6	koeficijent uz $s$ u željenoj binomnoj funkciji
$b_2$	12	koeficijent uz $s^2$ u željenoj binomnoj funkciji
$b_3$	8	koeficijent uz $s^3$ u željenoj binomnoj funkciji
$K_R$	6.189	proporcionalna konstanta
$K_I$	1.0315	integracijska konstanta
$K_D$	12.378	derivacijska konstanta
$\alpha_u$	$25.43 \frac{s^2}{\pi x}$	inercijski koeficijent procesa
$\beta_u$	$52.34 \frac{s^2}{\pi x^2}$	koeficijent otpora strujanja
$\omega_n$	$0.3 s^{-1}$	kružna frekvencija regulatora
$t_u$	4 s	ulazno vrijeme

čime je pokazano da statičke pogreške u sustavu nema te da u ustaljenom stanju platforma slijedi liniju bez pogreške.

### **Efekt namatanja integratora**

Pri projektiranju regulatora posebna pažnja se mora posvetiti ograničenjima izvršnih elemenata kojima regulator prosljeđuje upravljački signal. U realnim uvjetima, prema [23], modelira se element zasićenja između regulatora i procesa koji ograničava kontrolnu akciju bez obzira na izlaz iz regulatora. Ponašanje elementa za zasićenje je vrlo jednostavno.

$$u(t) = \begin{cases} U_{max} & \text{ako } u(t) \geq U_{max}; \\ u(t) & \text{ako } U_{min} < u(t) < U_{max}; \\ U_{min} & \text{ako } u(t) \leq U_{min}. \end{cases} \quad (6.26)$$

Ulaskom upravljačkog signala u zasićenje prekida se povratna veza i sustav radi u otvorenoj petlji, budući da izvršni elementi ostaju u graničnom položaju neovisno o izlaznom signalu regulatora. Izvršni elementi, u ovom slučaju potisnici ne mogu dati veći potisak od maksimalnog<sup>5</sup>, a algoritam regulatora to od njih zahtijeva u nekim slučajevima. I-PD regulator, kao i svaki regulator koji sadrži integracijsku komponentu nastavit će integrirati regulacijsko odstupanje i time upravljački signal može poprimiti vrlo velike iznose. Pri smanjenju regulacijskog odstupanja regulator vrlo sporo izlazi

<sup>5</sup>Maksimalan izmjereni potisak platforme je oko 15 N

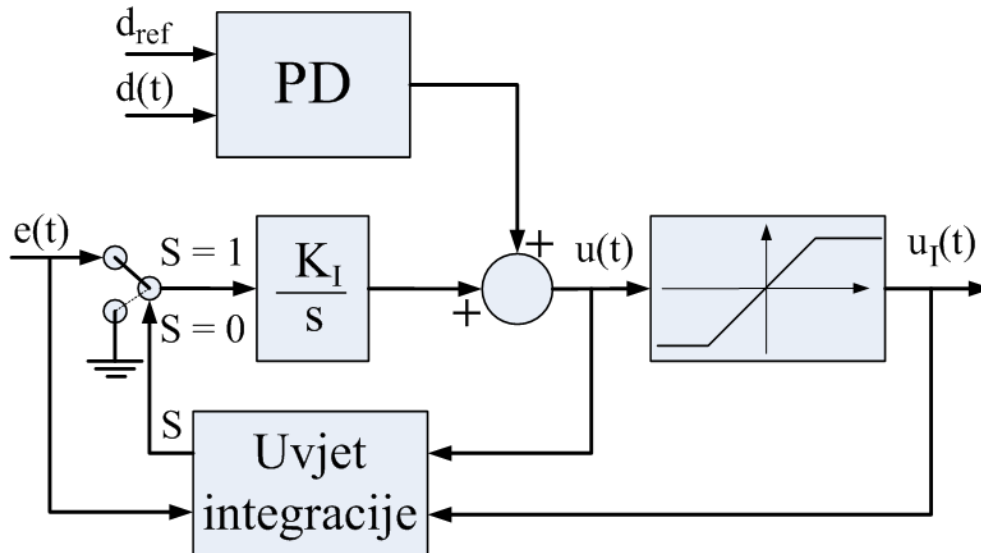
iz zasićenja. To treba spriječiti i zato je kod regulatora slijeđenja linije implementirano spriječavanje efekta zaleta uvjetnim integriranjem, [1]. Integracijski član I-PD regulatora će integrirati ako su ispunjeni određeni uvjeti, odnosno neće integrirati ako nisu. Ako je ispunjen jedan od ova dva uvjeta

$$(u(t) > U_{max} \wedge e(t) > 0) \vee (u(t) < U_{min} \wedge e(t) < 0) \quad (6.27)$$

onda se zastavica  $S$  postavlja u nulu,

$$S = 0 \quad (6.28)$$

a ako nijedan nije ispunjen tada  $S$  poprima vrijednost jedan.  $S$  simbolizira prekidač s dva moguća toka signala. Na indeksu 0 nalazi se nula koju se vodi integratoru kad dolazi do zasićenja te se zaustavlja rad integratora na taj način. Jedinica spaja signal regulacijskog odstupanja s ulazom u integrator. Ovo je slučaj kad regulator normalno radi i ne dolazi do namatanja integratora. Cjelokupna struktura konačnog regulatora prikazana je sljedećom slikom



Slika 6.8: Struktura I-PD regulatora s uvjetnim integriranjem

### Diskretizacija - konačne rekurzivne jednadžbe

Kako bi mogli ostvariti računalom upravljani sustav, projektirani kontinuirani regulator potrebno je prije svega diskretizirati. Prije nego se posvetimo samom postupku



diskretizacije, bitno je napomenuti da je kontinuiran regulator projektiran uz zanemaren utjecaj diskretizacije prema *EMUL1* metodi. Vrijeme uzorkovanja je izabrano na standardnih 0.1 sekundi te se čitav program realiziran u LabVIEW-u vrti u petlji s tim vremenom. Osim toga, malo vrijeme uzorkovanja ima za posljedicu da ZOH element koji je zanemaren nema gotovo nikakvog utjecaja na amplitudnu i faznu karakteristiku otvorenog kruga. Kružna frekvencija  $\omega_c$  može se približno odrediti prema izrazu:

$$\omega_c = \frac{1.5}{t_{a50}} = 0.215 \frac{rad}{s} \quad (6.29)$$

gdje je  $t_{a50}$  procijenjen na oko 7 sekundi. Ako ZOH element aproksimiramo *PT1* članom izraza

$$\frac{1}{1 + \frac{T}{2}s} = \frac{1}{1 + 0.05s} \quad (6.30)$$

njegov utjecaj na presječnu frekvenciju i pojačanje na niskim frekvencijama je neznatan.

$$\left| \frac{1}{1 + 0.05j\omega_c} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.05^2\omega_c^2}} = 0.999 \quad (6.31)$$

Utjecaj na faznu karakteristiku također je zanemariv.

$$\varphi = -\arctan 0.05\omega_c = 0.615^\circ \quad (6.32)$$

Sama diskretizacija provedena je Eulerovom metodom unazadne diferencije i konačne prijenosne funkcije pojedinih regulacijskih kanala izražene samo u ovisnosti o kružnoj frekvenciji regulatora i parametrima procesa:

$$G_P(z) = 3\alpha_u\omega_n^2 \quad (6.33)$$

$$G_I(z) = \frac{\alpha_u\omega_n^3 z}{z - 1} \quad (6.34)$$

$$G_D(z) = \frac{\frac{30\alpha_u\omega_n - 10\beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10} z - \frac{30\alpha_u\omega_n - 10\beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10}}{z - \frac{3\alpha_u\omega_n - \beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10}} \quad (6.35)$$

Konačna paralelna implementacija digitalnog regulatora napravljena je s rekurzivnim jednadžbama za svaki član posebno.

$$u_P[k] = 3\alpha_u\omega_n^2 d[k] \quad (6.36)$$

$$u_I[k] = u_I[k-1] + \alpha_u\omega_n^3 e[k] \quad (6.37)$$

$$u_D[k] = \frac{3\alpha_u\omega_n - \beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10} u_D[k-1] + \frac{30\alpha_u\omega_n - 10\beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10} d[k] - \frac{30\alpha_u\omega_n - 10\beta_u}{3\alpha_u\omega_n - \beta_u + 10} d[k-1] \quad (6.38)$$

### 6.1.4. Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni rezultati prikazani ovdje donose potvrdu valjanosti identificiranog matematičkog modela platforme. Osim toga, od značaja je i potvrda teorijskog koncepta algoritma za slijeđenje linije. Unatoč činjenici da je identifikacija parametara pokazala nelinearni model kao bolje odgovarajući, projektiranju regulatora se pristupilo kao da je model linearan. Dobiveni odzivi su zadovoljavajući te će biti prikazani u dijelu koji slijedi.

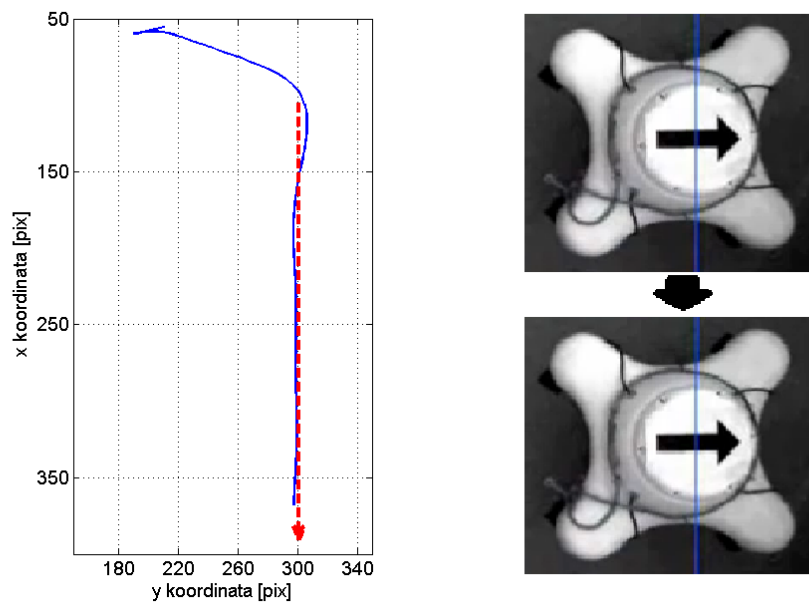
#### Test 1) - Okomita linija

Prvi provedeni eksperiment izvršen je u laboratorijskom bazenu gdje su vanjske smetnje zanemarive, a mjerenja izrazito točna. Eksperiment se sastojao od praćenja okomite linije postavljene otprilike na sredini vidnog polja kamere. Platforma se inicijalno nalazila udaljena od linije koju treba pratiti i tokom eksperimenta može se promatrati asimptotsko približavanje liniji. Slika koja zorno opisuje provedeni eksperiment kao i ostvarenu putanju može se vidjeti na slici 6.9.

Referirajući se na sliku 6.9. možemo vidjeti da je algoritam slijeđenja linije brzo usmjerio platformu prema liniji te da se platforma uz zanemarivu grešku dalje giba po liniji. Kroz cijeli eksperiment referentna orijentacija je zadržana na konstantnoj vrijednosti od  $90^\circ$ . Slijede odzivi signala od značaja za zatvoreni krug upravljanja.

Regulacijsko odstupanje je zapravo negativna udaljenost od linije. S odziva se može očitati početna udaljenost platforme od linije u iznosu većem od 35 cm. Kako je regulator počeo obavljati svoj zadatak tako se regulacijsko odstupanje smanjivalo dok nije poprimilo vrijednost vrlo blizu nuli.

Upravljački signal je svojom formom u skladu s regulacijskim odstupanjem. Prilikom prilazanja liniji zapažaju se skokoviti prijelazi dok se u slučaju kad se platforma nalazi na liniji, vrijednost upravljačkog signala stabilizira. Vrijednost upravljačkog signala,



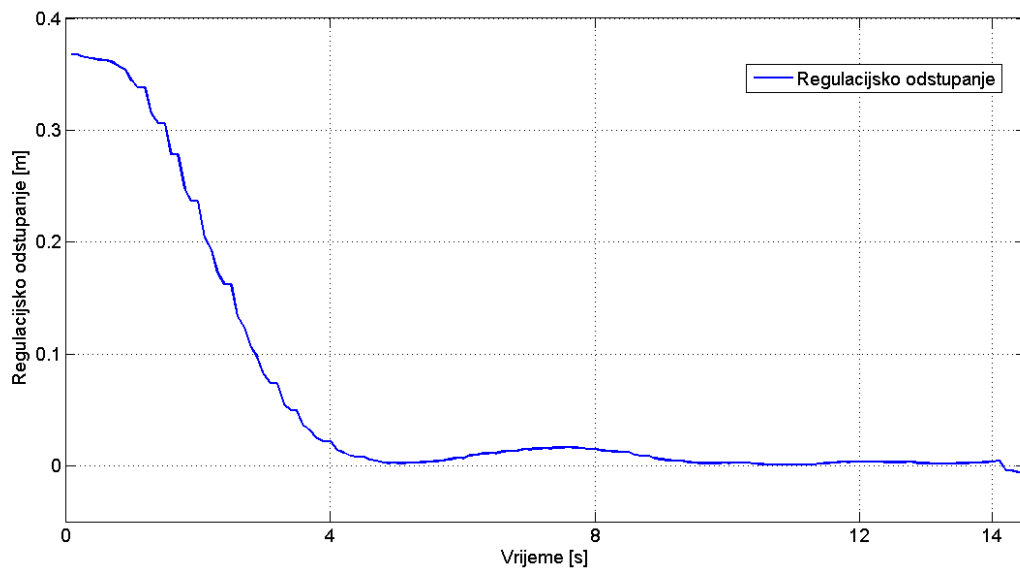
**Slika 6.9:** Test 1) - praćenje okomite linije

programski je limitirana na raspon vrijednosti  $\pm 4N$  te u slučaju da je generirani signal većeg iznosa primjenjen je anti-windup algoritam.

Za kontrolu orijentacije brzine poseban regulator odvojen od regulatora za slijeđenje linije. Odziv orijentacije uz referentu veličinu prikazan je na slici 6.12. Primjetne su male oscilacije oko reference, no može se ustvrditi da je odziv zadovoljavajući. Ako uzmemo u obzir da se istovremeno kontroliraju dva stupnja slobode za pretpostaviti je da kontrola jednog utječe na drugi stupanj unatoč raspregnutom modelu koji je korišten za projektiranje regulatora.

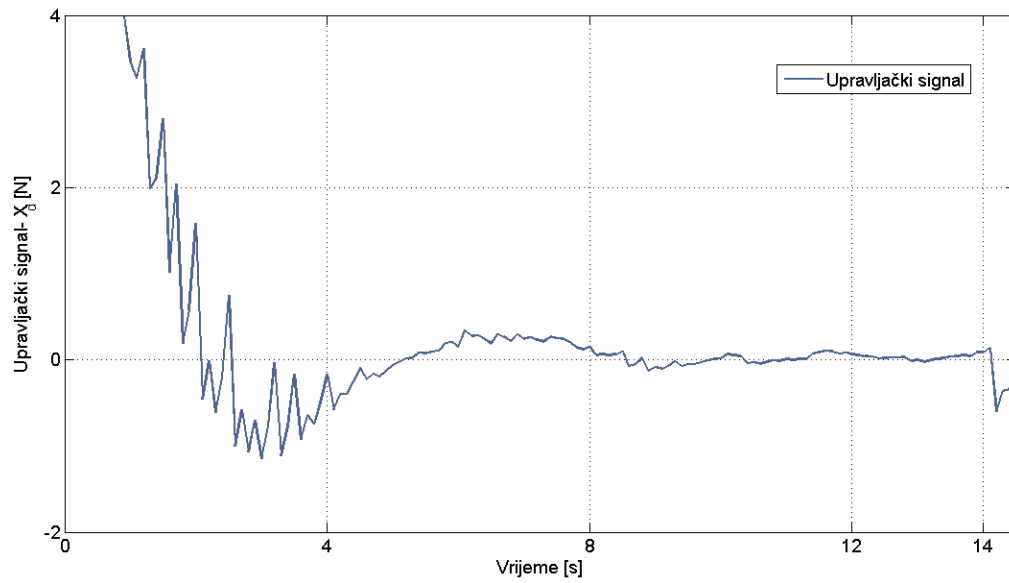
### Test 2) - pravokutnik

Drugi eksperiment proveden unutar laboratorijskog bazena sastojao se od praćenja četiri linije koje formiraju zatvoreni pravilni četverokut. Ovaj eksperiment je od velikog značaja zbog algoritma konačnog automata koji služi za prebacivanje s praćenja jedne linije na praćenje druge linije. Snimljeni odzivi sadrže prijelazne pojave koje nastaju prilikom promjena linija čija orijentacija se tada mijenja za oštih  $90^\circ$ . Prebacivanje se događa kad se platforma nađe u blizini druge točke linije, a to je u ovom eksperimentu postavljeno na 45 piksela. Kad se dogodi prebacivanje, regulacijsko odstupanje koje je iskonvergiralo k nuli poprima upravo vrijednost približnu vrijednosti prebacivanja. Zbog tog skoka prisutno je nadvišenje u odzivu, no vrlo brzo se platforma nađe na liniji, a samo nadvišenje nije od prevelikog značaja. Tokom eksperimenta, referentna

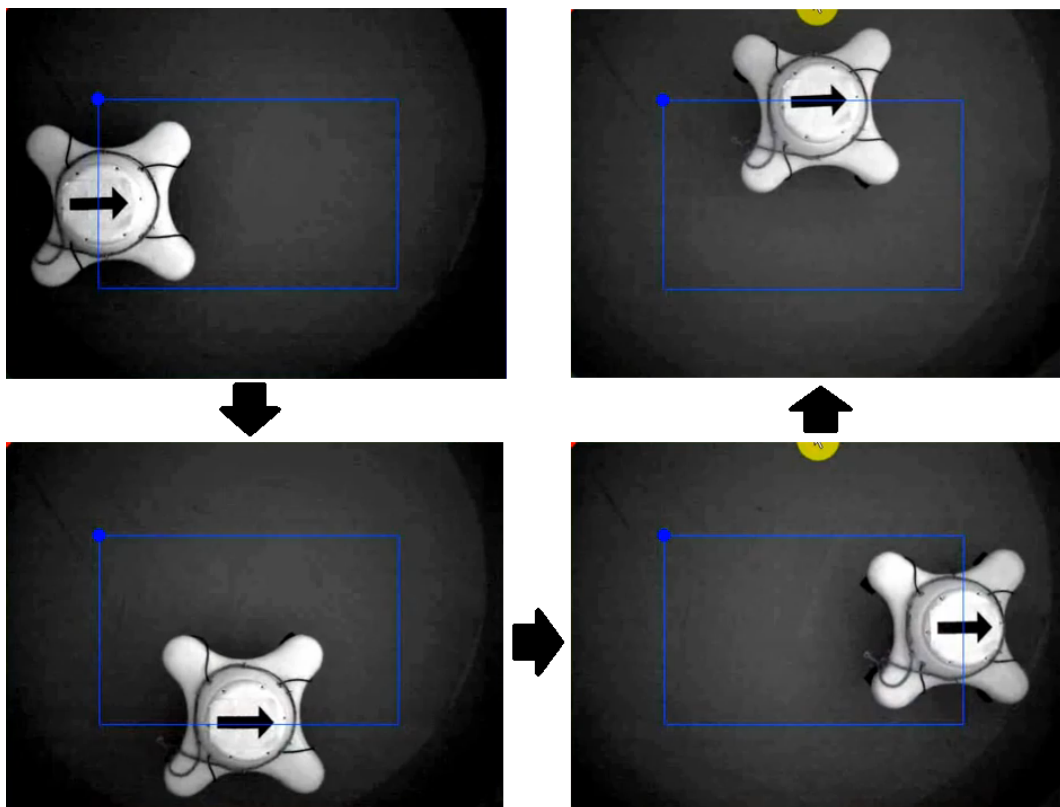


**Slika 6.10:** Regulacijsko odstupanje tokom eksperimenta

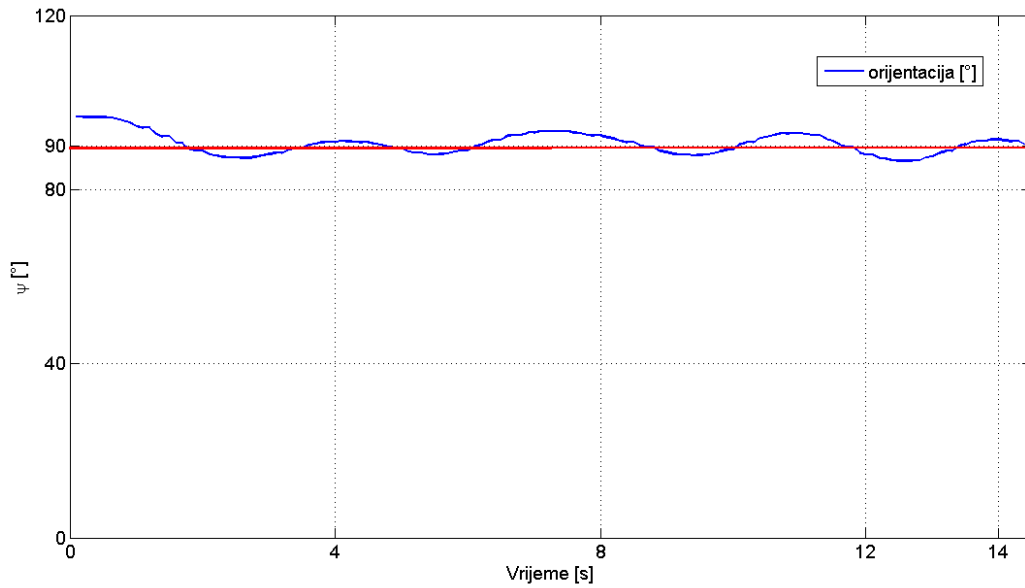
orijetacija je postavljena na  $90^\circ$ . Ostvarena putanja može se vidjeti na slici. Uz prijedenu putanju priložena je i slika koja pobliže opisuje provedeni eksperiment. Sastoji se od četiri podslike koje sugeriraju način plovidbe platforme. Uočljive su postavljene linije i položaj platforme u odnosu na njih.



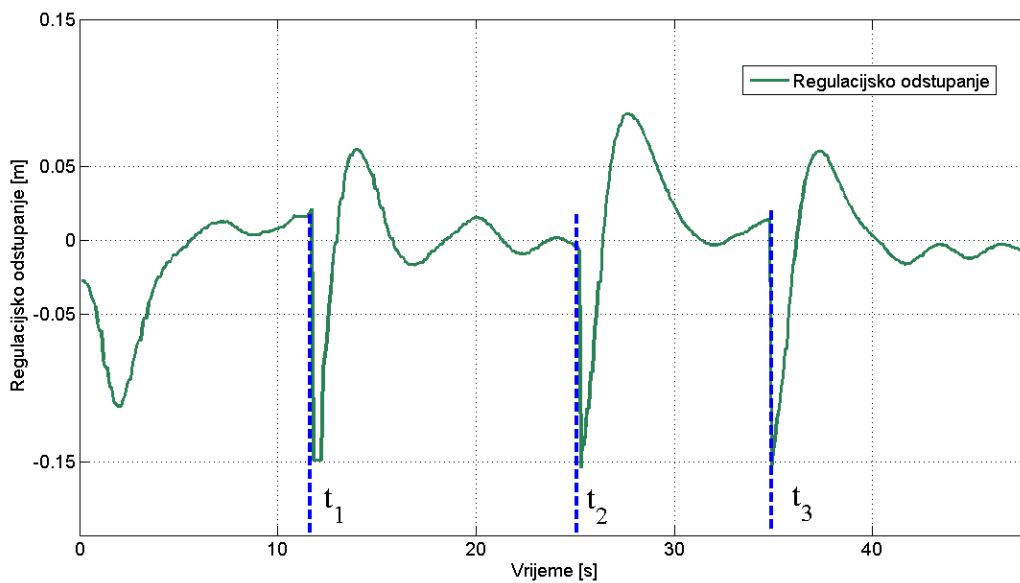
Slika 6.11: Upravljački signal tokom eksperimenta



Slika 6.14: Ostvarena putanja platforme tokom eksperimenta

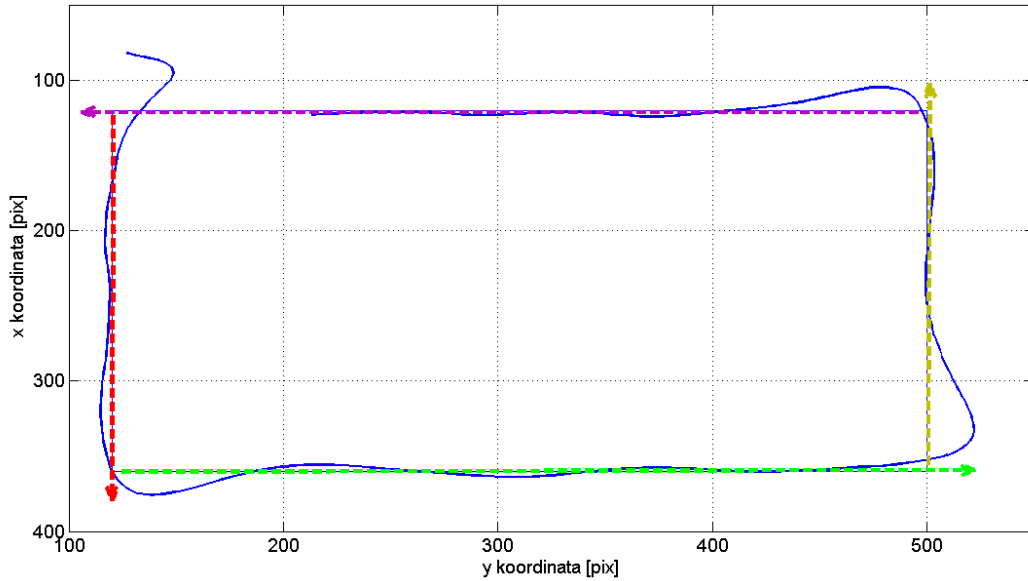


**Slika 6.12:** Odziv orijentacije platforme tokom eksperimeta



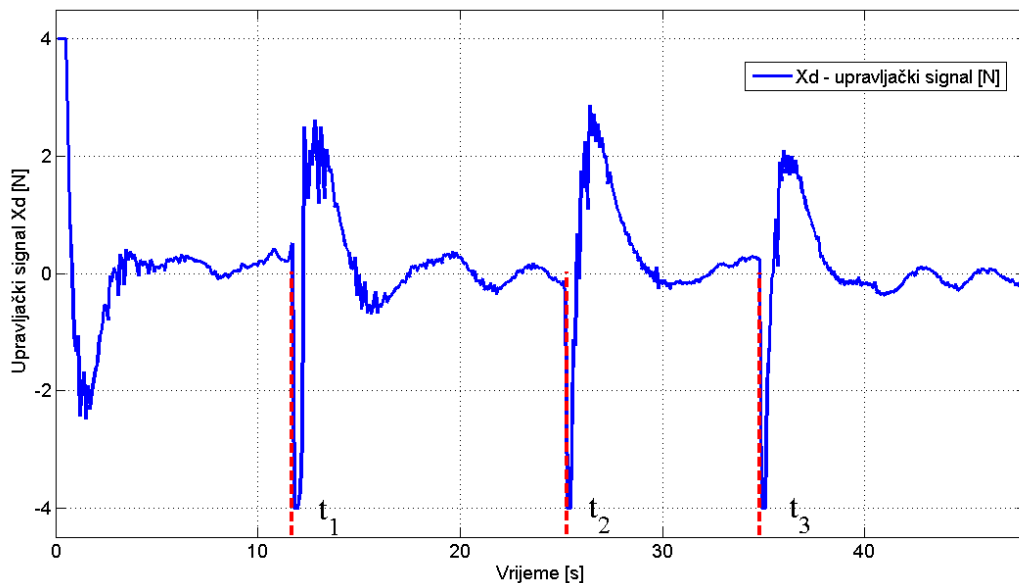
**Slika 6.15:** Regulacijsko odstupanje tokom eksperimeta

Na slici se može vidjeti signal regulacijskog odstupanja. U trenucima  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$  dolazi do prebacivanja na praćenje sljedeće linije te regulacijsko odstupanje skače na vrijednost koja je ekvivalentna udaljenosti od 45 piksela. Svi regulacijski algoritmi koriste fizikalne vrijednosti stanja, no upotreba kamere kao povratne veze čini logičnijim upotrebu piksela zbog malog radnog prostora i bolje razlučivosti. Linije su poprilično kratke, no vrlo brzo regulacijsko odstupanje poprima vrijednosti između  $\pm 2$  cm. Drugim riječima udaljenost centra platforme u odnosu na liniju ne prelazi 2 cm. Kod



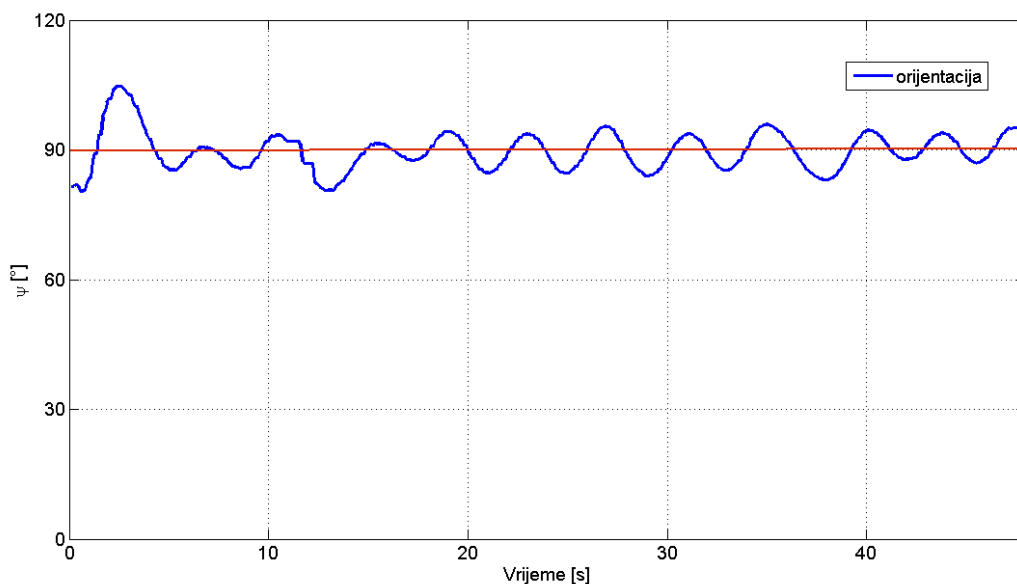
**Slika 6.13:** Ostvarena putanja platforme tokom eksperimenta

prebacivanja na slijedeću liniju, regulacijska pogreška u sva tri slučaja pada na negativnu vrijednost. Razlog tome je u činjenici da nakon prebacivanja, platforma se nalazi s lijeve strane linije gdje je udaljenost definirana kao pozitivna, a samim time regulacijsko odstupanje je negativna udaljenost zbog referentne veličine koja je postavljena na 0. Skokovi upravljačkog signala događaju se u istim trenucima kao i skokovi regulacijskog odstupanja zbog već opisanog razloga. Kao i u prvom eksperimentu ovdje se još bolje uočava ograničenje upravljačkog signala na iznos od  $\pm 4N$ . Prisutno je blago drhtanje signala, no ispunjava zahtjeve upravljanja. Iznos ograničenja odabran je heurističkim principom promatrajući iznose sila napredovanja i zanošenja i dovodeći ih u vezu s generiranim potiskom platforme. Iznos od  $\pm 4N$  omogućava dovoljnu jačinu reakcije da se brzo dođe do linije, a s druge strane, onemogućeno je generiranje prevelikog potiska kojeg propulzori ne mogu ostvarit. Provedeni su eksperimenti i s drugim vrijednostima, no ova vrijednost se pokazala najprikladnijom.



**Slika 6.16:** Upravljački signal tokom eksperimenta

Slika 6.17 prikazuje odziv orijentacije platforme tokom eksperimenta. Odziv je oscilatorniji nego u prvom eksperimentu. Dio zasluga se pripisuje mijenjanju linija i skokovima upravljačkog signala regulatora za slijeđenje linije koji djeluje na platformu. Orijehtacija platforme se ipak nalazi u okviru dopustivih vrijednosti i slijeđenje linije je osigurano.

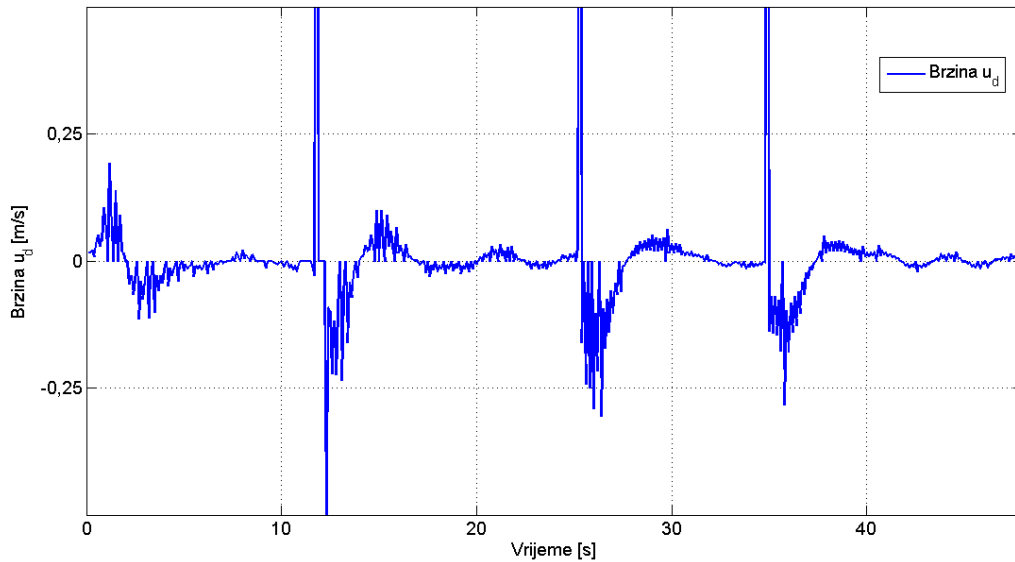


**Slika 6.17:** Upravljački signal tokom eksperimenta

Na kraju, prikazan je odziv brzine u smjeru okomitom na liniju. Brzina je dobivena diferenciranjem mjernih podataka za udaljenost iz dva uzastopna koraka diskretizacije.



Radi se o malim vrijednostima kad se platforma nalazi na liniji, što je vrlo teško za mjeriti. Tek za veće udaljenosti od linije se dobivaju opipljive vrijednosti. Odziv brzine u smjeru okomitom na liniju može se vidjeti na slijedećoj slici.



Slika 6.18: Upravljački signal tokom eksperimenta

## 6.2. Dinamičko pozicioniranje

Dinamičko pozicioniranje (DP), eng. *dynamic positioning* je jedno od najvrijednijih i najšire rasprostranjenih načina upravljanjem plovila. Nalazi mnogo primjena, npr. održavanje fiksne pozicije i orijentacije platforme za bušenje nafte na vrlo velikim morskim dubinama, broda uz naftnu platformu, broda jaružala pri podvodnim radovima, nosača aviona, itd. Konvencionalni regulatori za dinamičko pozicioniranje baziraju se na spregnutom modelu plovila. Parametre spregnutog modela plovila uobičajeno je vrlo teško identificirati. Pretpostavljeni model plovila je raspregnut i njegovi parametri mogu se veoma brzo identificirati IS-O metodom, dakle dinamičko pozicioniranje bit će temeljeno na raspregnutom modelu.

### 6.2.1. Metoda 1

Ova vrsta dinamičkog pozicioniranja odnosi se na platformu. Cjelokupan sustav regulacije korišten za slijeđenje linije nadograđen je za upravljanje dinamičkim pozicioniranjem. Radi se zapravo o kontroliranju unaprijedne sile koja je kod slijeđenja linije kontrolirana u otvorenoj petlji, odnosno bila je konstantna cijelo vrijeme putovanja.

Prema izrazu (6.4), ukupna udaljenost je razložena na udaljenost okomitu na liniju  $e(t)$  i na udaljenost uzduž linije  $s(t)$ . Iz (6.5) slijedi potpuni izraz prema kojem se računa duljina uzduž linije.

$$s(t) = \cos(\Gamma)(x(t) - x_{T2}) + \sin(\Gamma)(y(t) - y_{T2}) \quad (6.39)$$

Prilikom definiranja pravila upravljanja za slijeđenje linije rečeno je da se unaprijednom silom ne upravlja. Nadogradnja opisana u ovom odjeljku zasniva se upravo na uvođenju kontrole za tu silu uz već postojeći regulator slijeđenja linije. Treba napomenuti da je dinamičko pozicioniranje aktivno samo pri slijeđenju zadnjeg segmenta zadnje linije te se može promatrati kao stabilizacija platforme u ishodištu odabranog sustava vezanog uz drugu točku linije. Pri projektiranju regulatora iskorištena je pogodnost simetrije platforme. Parametri identificirani za gibanje unaprijed isti su kao i parametri za gibanje u smjeru okomitom na liniju. Upravo zbog toga regulator stupnja slobode prema naprijed je isti kao i opisani I-PD regulator slijeđenja linije. Razlikuje ih samo ulaz, koji u slučaju novog regulatora više nije udaljenost okomita na liniju već udaljenost uzduž linije do druge njezine točke. Svi postupci pri dizajniranju regulatora slijeđenja linije vrijede i za ovaj regulator. Jedna misija koju bi platforma obavljala sastojala bi se dakle od slijeđenja  $n$  linija pri čemu se kod zadnje linije upravlja i gibanjem prema naprijed s ciljem da se platforma zaustavi u željenoj poziciji držeći željenu orijentaciju koju je držala cijelim putovanjem. Dakako, upravljanje njezinom orijentacijom je neovisno o ostalim upravljanjem pa je moguće i mijenjati orijentaciju. O reguliranju orijentacije (držanja kursa) bit će riječi u nastavku.

## 6.2.2. Metoda 2

Ova vrsta dinamičkog pozicioniranja je razrađena i prilagođena za model broda. Neka su rotirane koordinate nekog koordinatnog sustava definirana množenjem vektora pozicije rotacijskom matricom prema (6.40). U nastavku članovi s zvjezdicom predstavljaju koordinate u rotiranom koordinatnom sustavu.

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

Svaki stupanj slobode broda nezavisno je upravljan posebnim I-PD regulatorom čija je struktura definirana jednadžbom (6.41), u kojoj  $\boldsymbol{\eta}_{ref} = \begin{bmatrix} x_{ref} & y_{ref} & \psi_{ref} \end{bmatrix}^T$ , a  $\mathbf{K}_I$ ,

$K_P$  and  $K_D$  predstavljaju vektore pojačanja integralnog, proporcionalnog, i derivacijskog člana za svaki stupanj slobode, respektivno. I-PD kontroler posebno je prilagođen plovilima i mehaničkim sustavima jer se nagla promjena referentne veličine na ulazu ne prenosi direktno na izlaz, što znači da nema uobičajenog *trzaja* kao kod konvencionalnog PID regulatora, već se izlaz iz regulatora *glatko* mijenja. Vektori označeni tildom ( $\tilde{x}$ ), označavaju stanja sustava estimirana diskretnim proširenim Kalmanovim filtrom (EKF) koji je detaljno opisan u prethodnom poglavlju. Kalmanov filter koristi se za uklanjanje šuma iz mjerenja i za estimiranje brzine plovila iz mjerene pozicije.

$$\tau = K_I \int_0^t [\eta_{ref}^* - \tilde{\eta}^*] dt - K_P \tilde{\eta}^* - K_D \dot{\tilde{\eta}}^* \quad (6.41)$$

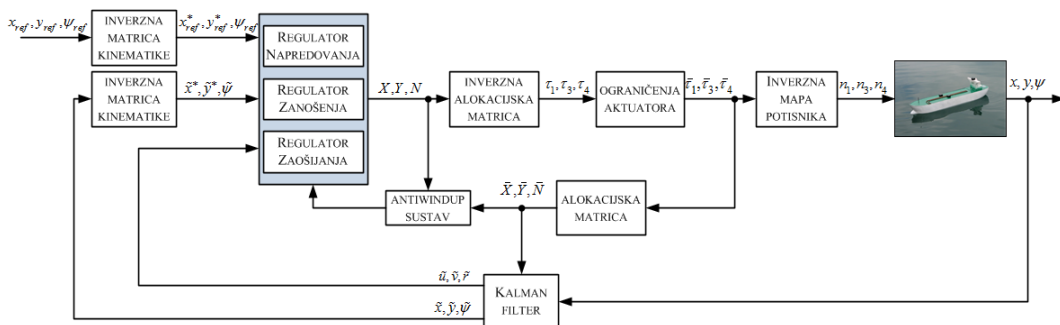
Koristeći regulator definiran sa (6.41), i proces definiran sa (2.17) prijenosna funkcija zatvorenog kruga upravljanja za svaki od stupnjeva slobode glasi:

$$\frac{\eta}{\eta_{ref}} = \frac{1}{\frac{\alpha_\nu}{K_{I\nu}} s^3 + \frac{\beta_\nu + K_{D\nu}}{K_{I\nu}} s^2 + \frac{K_{P\nu}}{K_{I\nu}} s + 1}. \quad (6.42)$$

Parametri regulatora se postavljaju tako da prijenosna funkcija zatvorenog kruga sustava bude jednaka prijenosnoj modelskoj funkciji, koja je stabilna i željene dinamike. Dakle, parametri regulatora mogu se izraziti izrazima (6.43). Zbog integralnog djelovanja, u regulatoru je izveden sklop protiv efekta namatanja integratora, eng. *antiwindup*. Kompletna struktura DP upravljanja prikazana je blok dijagramom na slici 6.19.

$$K_{I\nu} = \frac{\alpha_\nu}{a_3}, K_P = \frac{a_1}{a_3} \alpha_\nu, K_{D\nu} = \frac{a_2}{a_3} \alpha_\nu - \beta_\nu. \quad (6.43)$$

$$G_m(s) = \frac{1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (6.44)$$

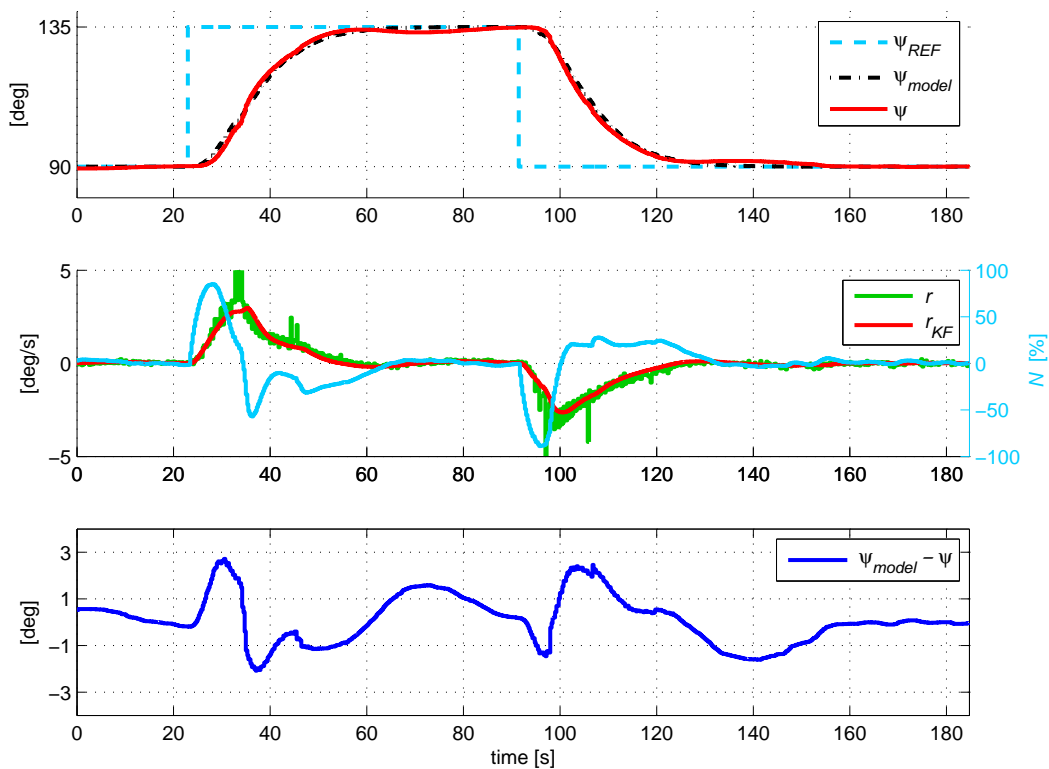


Slika 6.19: Shema upravljanja DP

DP regulator podešen je tako da je krug upravljanja orijentacijom podešen prema binomnom filtru (6.44) sa karakterističnom frekvencijom  $\omega_n = 0.2 \frac{rad}{s}$ , dok su oba kruga upravljanja pozicijom podešena sa  $\omega_n = 0.1 \frac{rad}{s}$ . Ovakve vrijednosti parametara dinamike sustava izabrane su tako da aktivnost potisnika bude u normalnim granicama. S porastom brzine dinamike raste i aktivnost potisnika. Binomni filter korišten je da bi se dobio glatki aperiodski odziv, jer je kod dinamičkog pozicioniranja plovila izuzetno bitno da nema nadvišenja, jer bi u protivnom moglo doći do kolizije među plovnim objektima. Kako bi se testirala kvaliteta sustava za dinamičko pozicioniranje, proveden je niz eksperimenata u bazenu LAPOST-a.

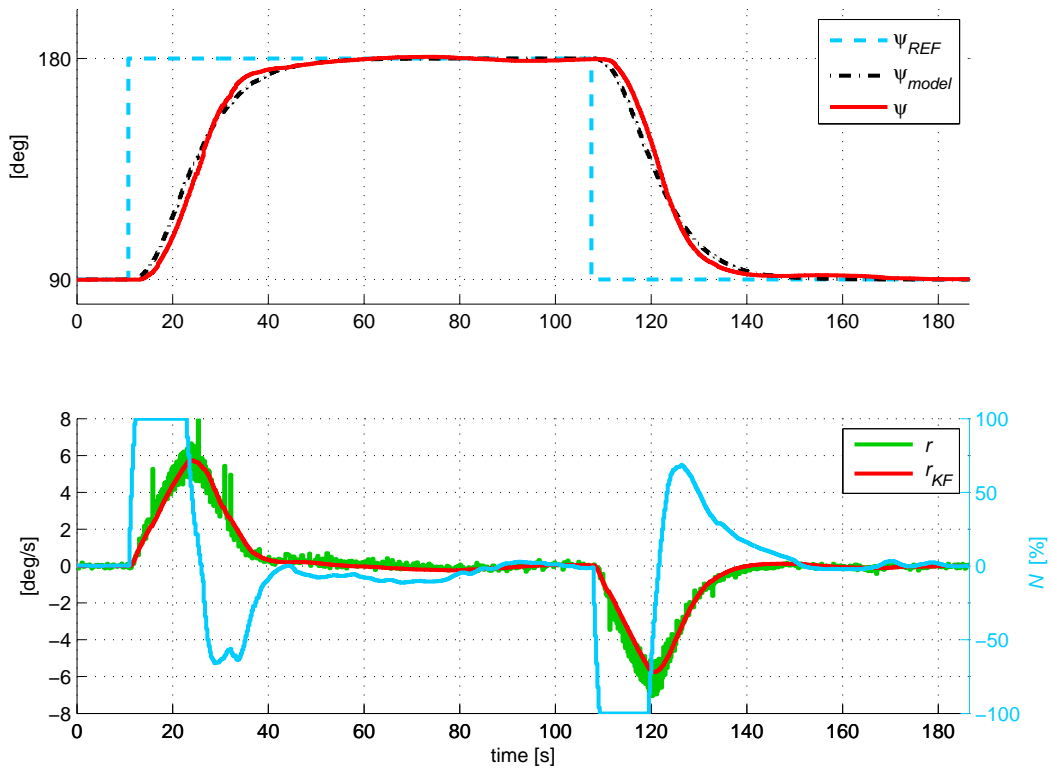
### **Eksperimentalni rezultati**

Kao rezultati su navedeni samo neki od provedenih eksperimenata. Najprije se razmatra kvaliteta zatvorenog kruga upravljanja orijentacijom. Referentna veličina je promijenjena za  $45^\circ$  tako da potisnici ne uđu u zasićenje. Odzivi su prikazani na slici (6.20) gdje se mogu usporediti sa željenim odzivima, odnosno odzivima modelske funkcije koji su prikazani iscrtkanom crnom linijom. Može se primjetiti da razlika između tih *idealnih* i stvarnih odziva nikada ne prelazi  $3^\circ$ . Drugi graf na slici (6.20) prikazuje glatku promjenu izlaza iz regulatora odnosno upravljačkog signala potisnika, i vidljivo je da nema nagle promjene brzine potisnika. Također zelenom linijom iscrtana je izračunata kutna brzina diferenciranjem kuta, a crvenom bojom prikazan je estimat kutne brzine Kalmanovim filtrom. Potreba za filtriranjem brzine je očita, kao i kvaliteta rada Kalmanovog filtra temeljena na IS-O metodi identifikacije parametara.



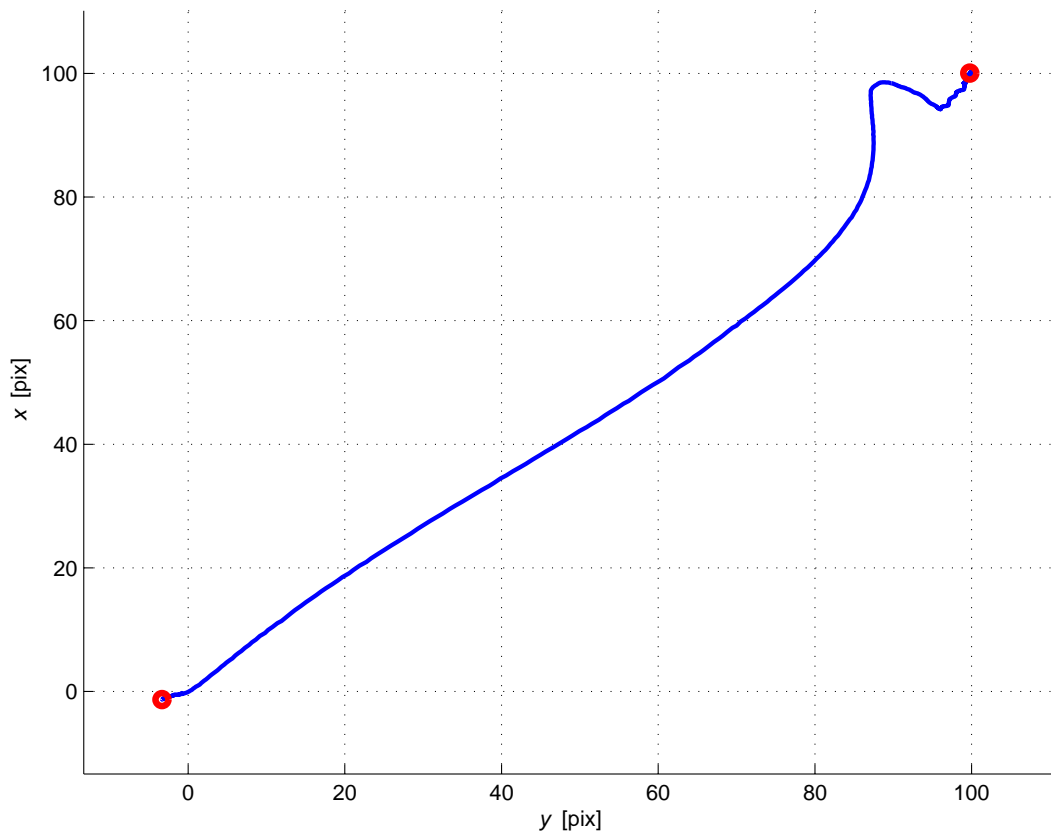
**Slika 6.20:** Odzivi na promjenu referentnog kuta za  $45^\circ$

Nakon toga referentna veličina promijenjena je za  $90^\circ$  tako da potisnici uđu u zasićenje, kako bi se moglo demonstrirati kako sustav protiv namatanja integratora uspješno obavlja svoj posao. Odzivi su prikazani na slici (6.21). S obzirom da željena modelska funkcija nema nikakvo zasićenje kao što potisnici realno imaju, prirodno je zaključiti da će stvarni odziv nešto kasniti za *idealnim* odzivom, što se može i uočiti iz odziva na slici. Ipak, stvarni odziv izrazito dobro prati modelirani odziv. Na drugom grafu plavom linijom vidi se odziv momenta koji je ušao u zasićenje. Također može se primjetiti da je pri većim brzinama veći i mjerni šum, što potvrđuje potrebu za Kalmanovim filtrom. Problem namatanja integratora također je uspješno riješen.

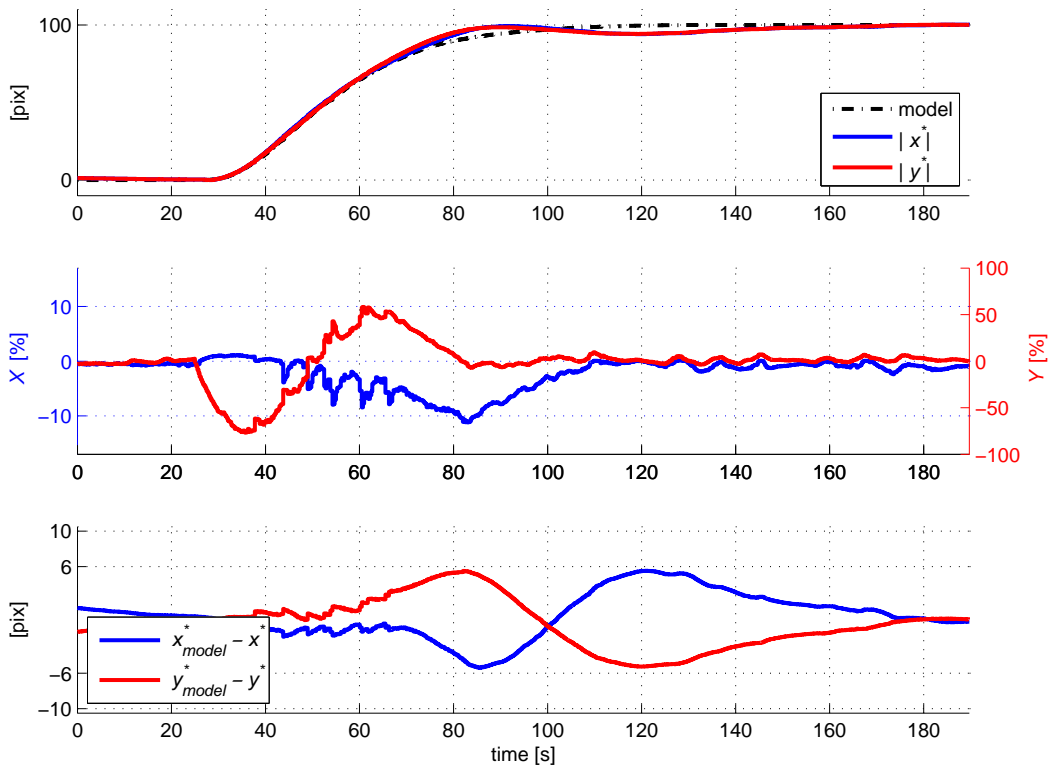


**Slika 6.21:** Odzivi na promjenu referentnog kuta za  $90^\circ$

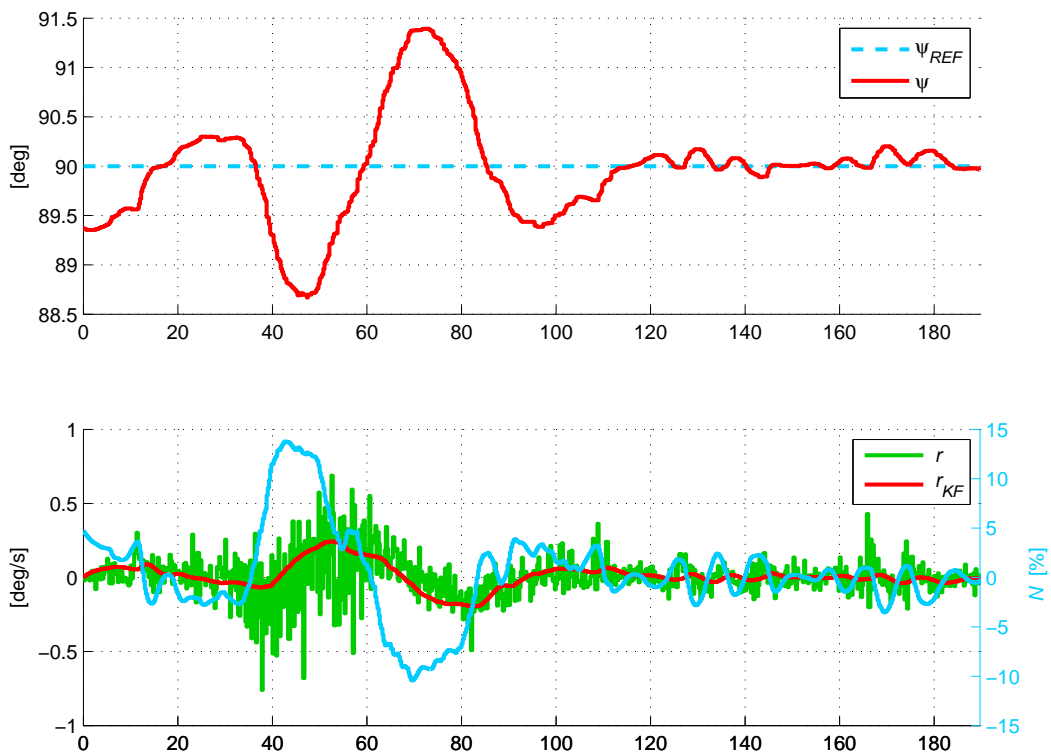
Upravljanje pozicijom testirano je tako da je brodu zadano da se sa pozicije (0 pix, 0 pix) premjesti na poziciju (100 pix, 100 pix) u mjerilima kamere. Putanja broda prikazana je na slici 6.22 i ukazuje na to kako je dinamičko pozicioniranje uspjelo. Kako je prikazano na slici 6.23, obje upravljane veličine (koordinate broda  $x$  i  $y$ ) vrlo dobro prate modelsku funkciju te razlika između *idealnog* odziva i stvarnog izmjenjenog odziva nije nikad veća od 6 piksela. Na slici 6.24 može se vidjeti da je orijentacija broda za vrijeme tranzijentnog stanja dinamičkog pozicioniranja približno konstantna bez obzira što promjena pozicija djeluje kao dosta velik poremećaj na zatvorenu petlju upravljanja orijentacijom. Prikazani rezultati demonstriraju kvalitetu i opravdanost predloženog pristupa problemu dinamičkog pozicioniranja plovila.



**Slika 6.22:** Putanja broda tijekom dinamičkog pozicioniranja prema točki (100,100)



Slika 6.23: Odzivi na promjenu referentne pozicije za (100,100) pix



Slika 6.24: Promjena kuta tijekom dinamičkog pozicioniranja

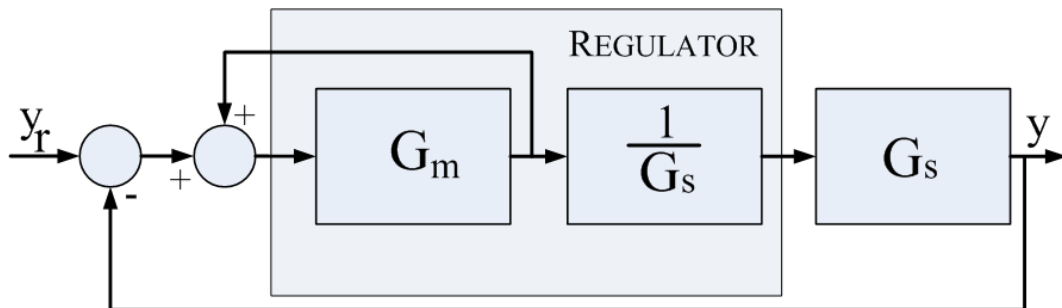


### 6.3. Regulator orijentacije

Treći stupanj slobode gibanja odnosi se na orijentaciju platforme. Ona se upravlja željenim momentom zaošijanja  $N$ . U skladu sa koordinatnim sustavima  $N$  se definira kao pozitivan u smjeru kazaljke sata i stoga je i pozitivni smjer orijentacije platforme definiran upravo tim smjerom. Regulatorom trećeg stupnja slobode željelo se postići održavanje željene orijentacije tokom cijelog putovanja. Odnosno, slijeđenje referentne veličine na ulazu u regulacijski krug. Sam postupak sinteze regulatora temeljen je na Truxal - Guilleminovom postupku. Kao i u slučaju regulatora slijeđenja linije, opet se razmatraju prijenosne funkcije procesa i regulatora definirane s (6.16) i (6.17). Regulator je projektiran tako da prijenosna funkcija zatvorenog sustava odgovara modelskoj funkciji  $G_m(s)$ . Iskorištena je binomna modelska funkcija trećeg reda, kao i za regulator slijeđenja linije s time da regulator više nije pretpostavljenog oblika već sadrži u sebi inverznu prijenosnu funkciju procesa. Prema vezi otvorenog i zatvorenog regulacijskog regulacijskog kruga koja je dana u (6.21), slijedi prijenosna funkcija regulatora.

$$G_R(s) = \frac{1}{G_S(s)} \frac{G_m(s)}{1 - G_m(s)} \quad (6.45)$$

Regulatorom bi se moglo potpuno kompenzirati dinamičko vladanje procesa i stoga se regulator projektiran TG postupkom naziva i kompenzacijskim regulatorom. Struktura zatvorenog kruga s opisanim regulatorom može se prikazati slikom 6.25



Slika 6.25: zatvoreni regulacijski krug

Referentna veličina koja se zadaje na ulazu je željena orijentacija u stupnjevima, dok je signal povratne veze trenutna orijentacija platforme, također u stupnjevima. Regulacijsko odstupanje računa se na temelju ove dvije veličine i programski je prilagođeno tako da je ono pozitivno u smjeru kazaljke na satu. Implementirano je također računanje regulacijskog odstupanja tako da ono bude minimalno. Ako se npr. platforma nalazi

$30^\circ$  u odnosu na referentni zemaljski sustav, a mi želimo da zauzme orijentaciju od  $330^\circ$ . Odstupanje će biti izračunato kao  $-60^\circ$ , što govori o tome da platforma prilikom kontrole orijentacije vrši najmanji mogući put prema željenoj orijentaciji. Odabrano ulazno vrijeme zatvorenog kruga je  $4s$ , a iz normirane prijelazne funkcije za binomni oblik trećeg reda dobije se  $\omega_n t = 10$ . Iz toga je izračunata  $\omega_n$  iznosa  $2s^{-1}$ . Konačna rekurzivna jednadžba digitalnog regulatora implementirana u programu upravljanja je

$$u[k] = a_1 u[k-1] - a_2 u[k-2] + b_0 e[k] + b_1 e[k-1] - b_2 e[k-2] \quad (6.46)$$

## 6.4. Praćenje trajektorije

Uz spomenuto dinamičko pozicioniranje, kod upravljanja plovilima, jedna od najatraktivnijih osobina plovila je slijeđenje puta, eng. *path following*. Put je općenito unaprijed kreiran na način da se želi postići neki određeni cilj npr. maksimalna ušteda energije, minimalna udaljenost, praćenje ostalih plovnih objekata, izbjegavanje kolizije s ostalim plovnim objektima, itd. Glavni nedostatak pri slijeđenju putanje je taj što putanja nije definirana vremenski nego samo prostorno. Ako se uzme na primjer da se putanje dvaju plovila sijeku, algoritmom slijeđenja puta ne može se garantirati da neće doći do kolizije između ta dva plovila. Da ne bi došlo do kolizije mora se odrediti vrijeme u kojem će se određeno plovilo nalaziti na svom putu. Logično je da uz prostornu dimenziju uvede i vremenska. Dakle, sljedeći korak nakon slijeđenja putanje je praćenje trajektorije. Glavna razlika između ta dva upravljačka koncepta je to što slijeđenje putanje ne unosi dimenziju vremena kao cilj upravljanja. Kod praćenja trajektorije vrijeme i mjesto su inherentno povezani u isti cilj upravljanja. Drugim riječima, kod praćenja trajektorije cilj je da se objekt upravljanja u točno određeno vrijeme nalazi u unaprijed predviđenoj točki u prostoru. Pri planiranju trajektorije, mora se uzeti u obzir dinamika upravljanog objekta, odnosno dinamika trajektorije mora biti sporija od dinamike upravljanog objekta, jer u suprotnom plovilo ne bi moglo slijediti trajektoriju. U slučaju da aktuator plovila ispadne, referentna vrijednost se nastavlja gibati po trajektoriji, ostavljajući plovilo iza sebe. Dakle interakcija sustava generiranja trajektorije i upravljanog objekta može se interpretirati kao unaprijedno u otvorenoj petlji, odnosno komunikacija je jednosmjerna i sustav reference nema nikakvog saznanja o poziciji plovila. Neka je neka trajektorija definirana prema (6.47), gdje  $t$  predstavlja parametar trajektorije.

$$\boldsymbol{\nu}_{ref} = f(t) \quad (6.47)$$

Odabranim pristupom greška pozicije i orijentacije prikazana je u rotiranom koordinatnom sustavu koji se nalazi u ishodištu broda. Regulacijsko odstupanje definirano je prema (6.48), i cilj upravljanja je minimizirati to regulacijsko odstupanje. Ovakav pristup odabran je jer je pretpostavka da se brodom upravlja po svim stupnjevima slobode, eng. *fully actuated*. U slučaju da se upravlja samo kormilom, eng. *underactuated* orijentacija broda je inherentno zadana kao tangenta na trajektoriju u trenutku  $t$ , i tada je regulacijsko odstupanje bolje promatrati u koordinatnom sustavu referentne veličine, koji je rotiran u odnosu na inercijski sustav za kut tangente na trajektoriju u trenutku  $t$ . Na taj način regulacijsko odstupanje definira se kao (6.50). S obzirom da se radi o praćenju trajektorije, koja se giba određenom brzinom, nije dovoljno za uvjete uzeti samo pozicije jer će u tom slučaju uvijek postojati određena greška slijeđenja. Dakle potrebno je uvesti i zahtjev na brzinu gibanja. Regulacijsko odstupanje brzine definira se slično kao i odstupanje pozicije i definirano je prema (6.49) i (6.50), za slučaj kada je dostupno upravljanje po svim stupnjevima slobode, odnosno za slučaj upravljanja samo kormilom.

$$\boldsymbol{\epsilon}_\eta = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}(t))(\boldsymbol{\eta}_{ref}(t) - \boldsymbol{\eta}(t)) \quad (6.48)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}_\nu = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}(t))(\boldsymbol{\nu}_{ref}(t) - \boldsymbol{\nu}(t)) \quad (6.49)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}_\eta = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}_{ref}(t))(\boldsymbol{\eta}_{ref}(t) - \boldsymbol{\eta}(t)) \quad (6.50)$$

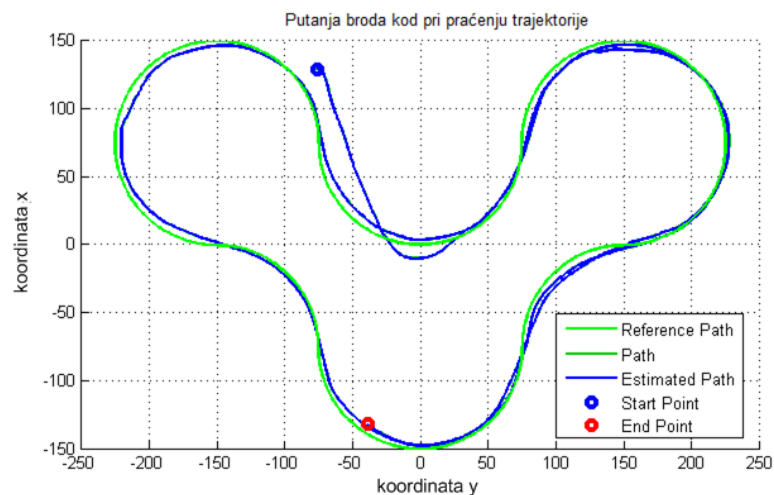
$$\boldsymbol{\epsilon}_\nu = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}_{ref}(t))(\boldsymbol{\nu}_{ref}(t) - \boldsymbol{\nu}(t)) \quad (6.51)$$

Cilj upravljanja je definirano regulacijsko odstupanje svesti na nulu. U ovom dijelu bit će promatrano praćenje trajektorije brodom u slučaju da je dostupno upravljanje po svim stupnjevima slobode, odnosno koriste se glavni i bočni potisnici, dok je kormilo fiksirano u nultom položaju i ne utječe na upravljanje. Regulatori pozicije i orijentacije jednaki su regulatorima kod dinamičkog pozicioniranja i parametrirani su preko binomne funkcije uz nešto bržu dinamiku  $\omega_n = 0.3$ . Izabrani regulatori brzine su I-P strukture odnosno bez derivacijskog člana i definirani su jednačbom (6.52).  $K_I$  i  $K_P$  predstavljaju vektore pojačanja integralnog odnosno proporcionalnog člana, dok je  $R(\boldsymbol{\psi})$  rotacijska matrica definirana sa (2.21).

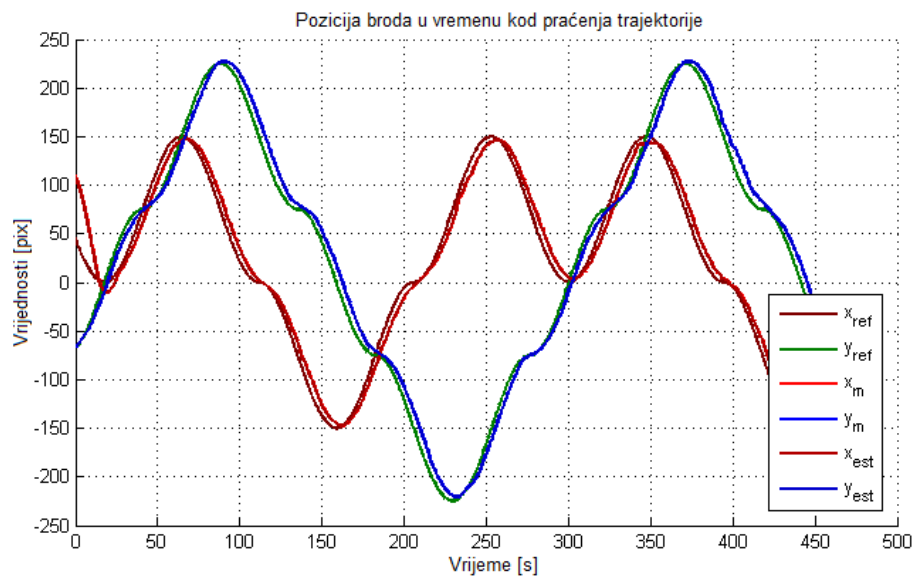
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_I \int_0^t \boldsymbol{\epsilon}_\nu dt - \mathbf{K}_P \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) \boldsymbol{\nu} \quad (6.52)$$

Parametri regulatora brzine određeni su po binomnoj modelskoj funkciji drugog reda uz dinamiku  $\omega_n = 0.3$ , i njihovi iznosi su  $\mathbf{K}_P = \begin{bmatrix} 0.054 & 0.357 & 0.172 \end{bmatrix}^T$ ,  $\mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} 0.0048 & 0.092 & 0.038 \end{bmatrix}^T$ .

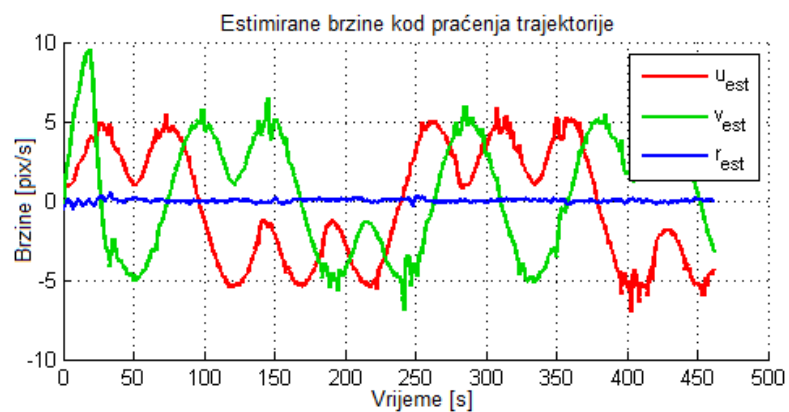
Definirana trajektorija je sastavljena od nekoliko kružnica kako bi se moglo promatrati kako se plovilo ponaša u točkama infleksije. Dinamika definirane trajektorije je sporija od dinamike plovila kako bi je plovilo moglo pratiti. Kut je cijelo vrijeme konstantan odnosno  $\psi_{ref} = 90^\circ$ . Na slici 6.26 može se vidjeti putanja broda kao i referentna putanja trajektorije. Vidljivo je da brod zadovoljavajuće prati trajektoriju. Na slici 6.27 mogu se detaljnije usporediti referentne vrijednosti pozicije trajektorije i broda u vremenu. Može se primjetiti da brod kasni tri do pet sekundi za referentnom vrijednosti trajektorije što je za brod koji ima veoma sporu dinamiku zadovoljavajući rezultat. Kako se i očekivalo, u točkama infleksije realna pozicija broda i referentna pozicija se sijeku. Što znači da je točkama infleksije regulacijsko odstupanje jednako nuli. To se događa kao rezultat upravljanja brzinom. Na slikama 6.28 i 6.29 mogu se vidjeti odzivi brzina estimiranih Kalmanovim filtrom, odnosno upravljački signali, sile  $X$  i  $Y$ , te moment  $N$ . Ovim eksperimentom predložen je i potvrđen jedan od mnogo mogućih pristupa problemu praćenja trajektorije.



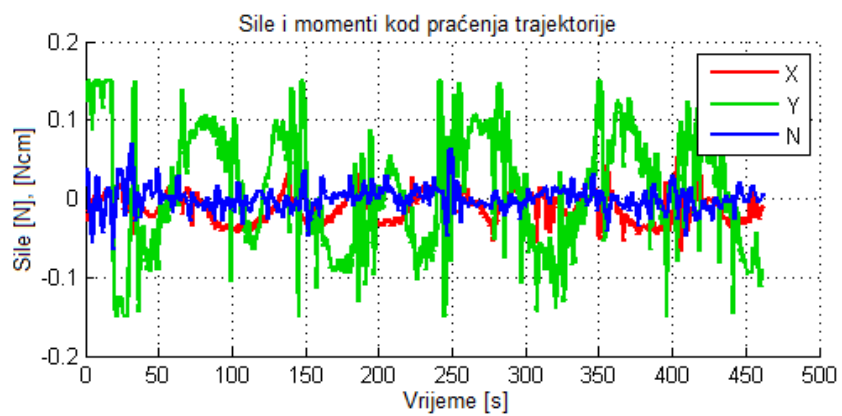
**Slika 6.26:** Putanja broda tijekom praćenja trajektorije



**Slika 6.27:** Odzivi pozicije broda pri praćenju trajektorije



**Slika 6.28:** Odzivi brzina broda pri praćenju trajektorije



**Slika 6.29:** Odzivi upravljačkih signala pri praćenju trajektorije

# 7. Praćenje putanje korištenjem virtualnog cilja

U ovom poglavlju predstavljena je teorijska razrada praćenja putanje korištenjem virtualnog cilja. Nakon upravljačkih sustava koji su većinom linearne prirode, ovdje je riječ o nelinearnoj vrsti upravljanja. Upravljanje putem virtualnog cilja danas predstavlja izrazito zanimljivo područje u području podvodne robotike. Korištenjem te metode moguće je ostvariti slijeđenje bilo koje proizvoljno definirane putanje,[10].

## 7.1. Model kinematičke pogreške

Prije nego što krenemo u samu problematiku, potrebno je uvesti nove veličine kako bi se za potrebe sinteze regulatora moglo matematički opisati model. Kinematički model dan s (2.21) izrazit ćemo preko vektora totalne brzine

$$\dot{x} = U \cos \psi_e \quad (7.1)$$

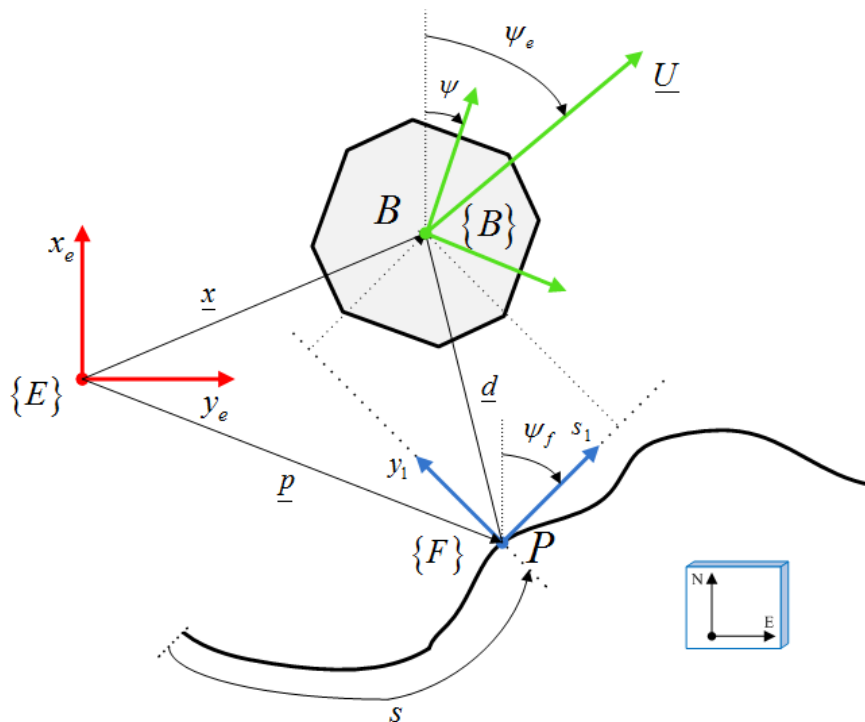
$$\dot{y} = U \sin \psi_e \quad (7.2)$$

gdje

$$U = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad \psi_e = \arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \quad (7.3)$$

označuju apsolutnu vrijednost brzine i njezinu orijentacije u  $\{E\}$  koordinatnom sustavu. Uz već definirane koordinatne sustave vezane za zemlju  $\{E\} := \{x_E, y_E, z_E\}$  i za plovilo  $\{B\} := \{x_B, y_B, z_B\}$  uvodi se još jedan koordinatni sustav, tzv. *Serret-Frenet frame*  $\{F\} := \{s_1, y_1, 0\}$ , [15]. Taj koordinatni sustav vezan je uz točku P na putanji i giba se po njoj. Definirajmo još točku B kao centar mase plovila koje se poklapa sa ishodištem  $\{B\}$  koordinatnog sustava. Rješenje problema slijeđenja putanje koje je izloženo ovdje, temelji se donekle i na intuitivnom objašnjenjenju. Projektirani regulator bi morao obavljati dvije zadaće: računati udaljenost između centra mase plovila B i točke P, računati kut između vektora totalne brzine plovila i tangente u točki P

na putanji i svoditi oboje na nulu. Ovo je glavni motiv za uvođenje i razvijanje kinematičkog modela u *Serret-Frenet* koordinatnom sustavu koji se giba duž putanje. Gibajući pokretni sustav, ilustrativno možemo shvatiti kao virtualnu pokretnu metu koja treba biti praćena stvarnim plovilom. Prethodno spomenuta udaljenost i kut postaju prostor kinematičke pogreške za koji treba kinematički formulirati i riješiti problem. Prilikom spominjanja udaljenosti plovila do ishodišta Serret-Frenet koordinatnog sustava, bitno je naglasiti da taj koordinatni sustav nije postavljen na način da je udaljenost minimalna, već je mjesto na kojem se nalazi rezultat definiranog upravljačkog algoritma. Na taj način uvodi se još jedan dodatni stupanj slobode pri projektiranju regulatora, a ujedno je riješen problem singularnosti koji se javljao u samim počecima razvoja ove metode [16]. Prema slici 7.1 P je obična točka koju treba slijediti. Nalazi se u ishodištu *Serret-Frenet* koordinatnog sustava i giba se s njim po nekakvoj krivulji. Krivulja je parametrizirana po parametru  $s$  koji predstavlja udaljenost po krivulji od početne točke krivulje za koju je  $s = 0$  i konačne točke u kojoj poprima vrijednost  $s = s_{max}$



**Slika 7.1:** Koncept slijeđenja putanje i definirani koordinatni sustavi

Koordinate točke  $B$  može se izraziti u zemaljskom koordinatnom sustava  $\{E\}$  kao  $\underline{x} = [x \ y \ 0]^T$  ili kao  $[s_1 \ y_1 \ 0]^T$  u  $\{F\}$  koordinatnom sustavu. Veza među njima dana

je rotacijskom matricom s parametrom  $\psi_f$  koji je kut koji zatvara tangenta u točki  $P$ .

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\psi_f) & \sin(\psi_f) & 0 \\ -\sin(\psi_f) & \cos(\psi_f) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Definirajući  $r_f = \dot{\psi}_f$  i označavajući sa  $s$  *curvilinear* apscisu duž putanje slijede izrazi:

$$r_f = \dot{\psi}_f = c_c(s)\dot{s} \quad (7.5)$$

$$c_c(s) = g_c(s)\dot{s} \quad (7.6)$$

gdje su sa  $c_c(s)$  i  $g_c(s) = \frac{dc_c}{ds}$  označene zakrivljenost i njezina derivacija. Brzina gibanja točke  $P$  u  $\{E\}$  može biti izražena u  $\{F\}$  kao

$$\left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F = \begin{bmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Isto tako, na jednoznačan način se može izračunati brzina točke  $B$  u  $\{E\}$

$$\left(\frac{d\mathbf{x}}{dt}\right)_E = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_E + R^{-1} \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_F + R^{-1}([0 \ 0 \ r_f]^T \times \mathbf{d}) \quad (7.8)$$

gdje je  $\mathbf{d}$  vektor usmjeren od točke  $P$  prema  $B$ . Množenjem izraza (7.8) s lijeve strane s rotacijskom matricom  $R$  dobije se:

$$\left(\frac{d\mathbf{x}}{dt}\right)_F = R \left(\frac{d\mathbf{x}}{dt}\right)_E = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F + \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_F + ([0 \ 0 \ r_f]^T \times \mathbf{d}) \quad (7.9)$$

Uzevši u obzir relacije:

$$\left(\frac{d\mathbf{x}}{dt}\right)_E = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_E = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ y_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

i vektorski produkt

$$[0 \ 0 \ r_f]^T \times \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c_c(s)\dot{s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ y_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_c(s)\dot{s}y_1 \\ c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.11)$$



jednadžba (7.9) može biti napisana na sljedeći način

$$R \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}(1 - c_c(s)y_1) + \dot{s}_1 \\ y_1 + c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

Rješavajući jednadžbe po  $\dot{s}_1$  i  $y_1$  proizlazi:

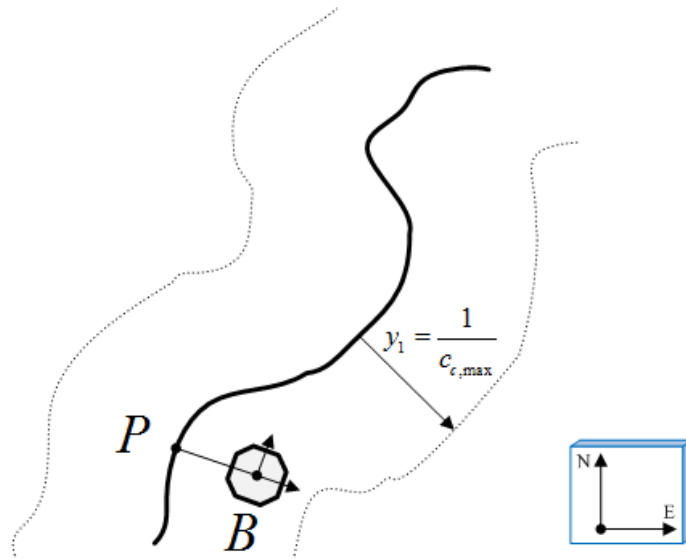
$$\dot{s}_1 = \begin{bmatrix} \cos\psi_f & \sin\psi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} - \dot{s}_1(1 - c_c y_1) \quad (7.13)$$

$$y_1 = \begin{bmatrix} -\sin\psi_f & \cos\psi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} - c_c \dot{s}s_1 \quad (7.14)$$

Konačno, uvrstivši izraze (7.1) i (7.2) u jednadžbe (7.14) i (7.15) i uvodeći novu varijablu  $\beta = \psi_e - \psi_f$  proizlazi kinematički model u (s,y) koordinatama kao

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\dot{s}(1 - c_c y_1) + U \cos\beta \\ \dot{y}_1 = -c_c \dot{s}s_1 + U \sin\beta \\ \dot{\beta} = r_e - c_c \dot{s} \end{cases} \quad (7.15)$$

gdje je  $r_e = \dot{\psi}_e$  U ovom trenutku važno je naglasiti da u [16] točka  $P$  je definirana kao projekcija točke  $B$  na putanju, pretpostavljajući pritom da je projekcija dobro definirana. Taj kinematički model je jednak kao u [16] sa  $s_1 = 0$ . Prva jednadžba u izrazu se tada rješava za  $\dot{s} = 0$  jer je projekcijom  $s_1$  direktno postavljen na nula. U rješenju se pojavljuje singularitet za  $y_1 = \frac{1}{c_c}$  koji bitno ograničava početne uvjete prilikom pokretanja upravljačkog algoritma. Položaj točke  $B$  mora biti unutar polumjera koji je određen maksimalnom zakrivljenošću putanje  $\frac{1}{c_{c,max}}$ .



**Slika 7.2:** Ograničenost početnih uvjeta maksimalnom zakrivljenošću krivulje

Dozvolivši da  $s_1$  ne mora nužno biti jednak nuli, kreirana je virtualna meta koja se ne poklapa sa projekcijom plovila na putanju. Na ovaj način uvodi se dodatni stupanj slobode prilikom projektiranja regulatora. Upravljanje brzinom novodefinirane virtualne mete singularitet pri udaljenosti  $y_1 = \frac{1}{c_c}$  je uklonjen.

## 7.2. Projektiranje nelinearnog kinematičkog regulatora

Sa opisanim kinematičkim sustavom u  $(s, y)$  koordinatama pred regulator se mogu postaviti sljedeći zahtjevi: za zadanu putanju koju treba slijediti i za željenu unaprijednu brzinu  $u_d > u_{min} > 0$  treba odrediti upravljački algoritam za moment zaošijanja  $N$  i brzinu napredovanja  $\dot{s}$  virtualne mete duž putanje da  $s_1, y_1, \psi$  i  $u - u_d$  teže asimptotski prema nuli. Pojednostavljeno gledano, zadatak se svodi na reduciranje k nuli udaljenosti između točke  $P$  i  $B$  i kuta  $\beta$  koje je razlika između vektora brzine  $U$  i tangente u točki  $P$ . Glavna ideja predstavljena u ovom odjeljku je razmatranje pokretne mete pridružene *Serret-Frenet* koordinatnom sustavu koja se giba po definiranom upravljačkom algoritmu. Cilj nam je odrediti zakon po kojem se virtualna meta giba i ostvariti gore navedene specifikacije. Prvo je potrebno definirati kut prilaza  $\varphi$  kao funkciju udaljenosti plovila do tangente na krivulju u točki  $P$  izražene u koordinati  $y_1$ . Kut prilaza je uobičajen u oblikovanju prijelaznih manevara pri fazi približavanja putanji. Potrebno je odabrati funkciju koja ima svojstva zasićenja te zadovoljava neka ograničenja. Norma funkcije  $\varphi(y_1)$  mora biti manja od  $\frac{\pi}{2}$ ,  $y_1\varphi(y_1) \leq 0$  i  $\varphi(0) = 0$ . Uvjeti osiguravaju usmjeravanje plovila prema putanji i zadržavanje na njoj jednom

kad dođe do nje. Tangens hiperbolni sa podesivim parametrom  $k_\varphi$  pokazao se kao pogodna funkcija za realizaciju prilaženja putanji.  $\psi_a$  je kut pod kojim se plovilo giba u odnosu na virtualnu metu kad se nalazi na velikim udaljenostima od nje. Taj parametar treba odabrati u rasponu  $0 < \psi_a < \frac{\pi}{2}$ .

$$\varphi(y_1) = -\psi_a \tanh(k_\varphi y_1) \quad (7.15)$$

S izborom takve funkcije kutu prilaza  $\beta$  se nameće da prati željeni  $\varphi$ . Potrebno je pokazati asimptotsku stabilnost prilaženja krivulji, a samo razmatranje Lyapunovljevog kandidata će polučiti kakav treba biti upravljački signal da bi ostala zadržana stabilnost. Za Lyapunovljevu funkciju prikladno je izabrati kvadratnu formu oblika, [5]

$$V = \frac{1}{2}(\beta - \varphi)^2 \quad (7.16)$$

Vremenska derivacija iznosi

$$\dot{V} = (\dot{\beta} - \dot{\varphi})(\beta - \varphi) = [r - c_c \dot{s} - \dot{\varphi}](\beta - \varphi) \quad (7.17)$$

Potrebno je izabrati upravljački algoritam takav da vremenska derivacija Lyapunovljeve funkcije bude negativna pa odabirom za

$$r^* = \dot{\varphi} - k_1(\beta - \varphi) + c_c(s)\dot{s} \quad (7.18)$$

je ostvareno upravo  $\dot{V} = -k_1(\beta - \varphi)$  s  $k_1 > 0$ . S ovim je zajamčena konvergencija kuta plovila prema kutu virtualne mete kako se približavamo putanji. Daljnje promatranje kinematičkog upravljanja vodi nas na razmatranje druge Lyapunovljeve funkcije vezane uz sam proces gibanja. I u ovom slučaju formirani kandidat je kvadratičnog oblika.

$$\dot{V}_E = \frac{1}{2}(s_1^2 + y_1^2) \quad (7.19)$$

Računajući vremensku derivaciju dobivamo

$$\dot{V}_E = (U \cos \beta - \dot{s})s_1 + U y_1 \sin \beta \quad (7.20)$$

Primjećuje se da je jedini podesivi stupanj upravo brzina virtualne mete  $\dot{s}$  koja može biti kontrolirana da osigura konvergenciju plovila na željenu putanju. Izborom za  $\dot{s}$

$$\dot{s} = U \cos \beta + k_2 s_1 \quad (7.21)$$

gdje je  $k_2 > 0$  proizlazi  $\dot{V}_E \leq 0$  i time je pokazana asimptotska konvergencija na željenu putanju s pravilnom orijentacijom. S izrazima (7.18) i (7.21) nelinearni regulator će ispunjavati sve zadatke koje smo na početku poglavlja stavili pred njega. Nelinearni kut prilaza definiran s (7.15) dopušta mijenjanje kuta upada s udaljenošću u odnosu prema putanji. Kad je udaljenost velika, orijentacija platforme je postavljena na  $\pm\psi_a$ . Kako se  $y_1$  smanjuje tako se i kut upada smanjuje i teži prema nuli kako  $y_1$  postaje jednak nuli, odnosno kad se platforma nalazi na putanji. Još jednom se naglašava, princip virtualne mete, označen sa  $\dot{s}$  uvodi dodatni stupanj slobode koji se kontrolira izrazom i pri tome se uklanja bilo koja moguća pojava singularnosti koja bi značajno ograničila cijeli upravljački algoritam.

### 7.3. Proširenje na dinamiku

S razvijenim kinematičkim upravljanjem ide se korak dalje te se dobiveni model proširuje na dinamiku. Plovilo kao realan sustav giba se pod utjecajem sila i momenata koji su narinuti na njega pa se ovo proširenje smatra opravdanim u smislu ostvarivanja konačnog upravljanja. Razvijene virtualne kinematičke algoritme upravljanja može se promatrati kao nadređenu petlju koja generira referencu za niži stupanj kontrole koji se odnosi upravo na iznos momenta zaošijanja koji treba primijeniti da se izvrši željeno gibanje. I u ovom slučaju promatrat ćemo Lyapunovljevog kandidata s kojim bi integrirali samo dinamičko ponašanje s prethodno definiranim virtualnim algoritmima.

$$V_r = \frac{1}{2}(r - r^*)^2 \quad (7.22)$$

Vremenska derivacija funkcije iznosi

$$\dot{V}_r = (r - r^*)(\dot{r} - \dot{r}^*) = -k_3(r - r^*)^2 \quad (7.23)$$

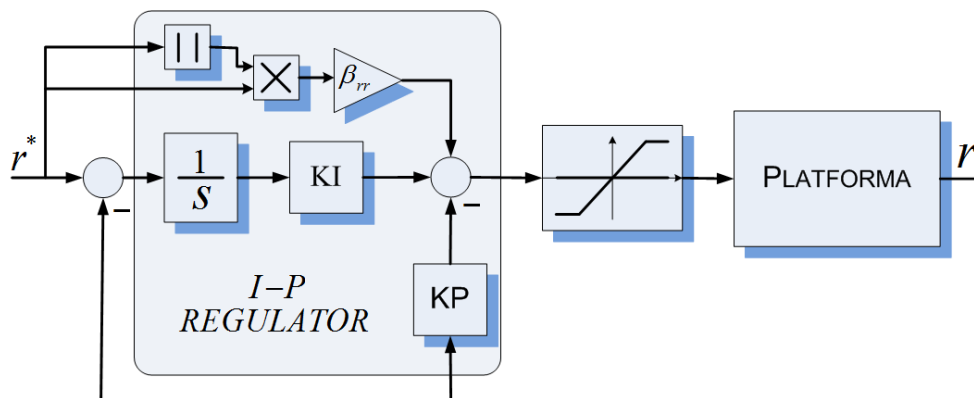
i cilj nam je svesti ju na oblik koji će cijelo vrijeme biti negativan uz  $k_3 > 0$ . Dinamika samog procesa zaošijanja dana je s (2.19) i uz zanemarenje smetnje i nemodelirane dinamike, kutna akceleracija može biti izražena kao:

$$\dot{r} = \frac{1}{\alpha_r}(N - \beta(r) r) \quad (7.24)$$



sporijom dinamikom nemoguće za ostvariti. Pokazana je ovisnost parametara modela  $\alpha_r$  s parametrom pojačanja regulatora  $k_3$ . Zadržavši se na izrazu (7.27), treba naglasiti da je inercijski koeficijent  $\alpha_r$  u nazivniku prijenosne funkcije dobiven identifikacijom plovila. Drugim riječima, to je koeficijent korišten u matematičkom modelu za potrebe sinteze regulatora. S druge strane, isti taj koeficijent  $\alpha_r$  u brojniku je istinski parametar koji opisuje inerciju realnog plovila. Ako postoji značajnija razlika među njima, tada statičko pojačanje prijenosne funkcije postaje različito od jedan što ukazuje na postojanje pogreške u ustaljenom stanju. Nikad neće biti ostvaren uvjet praćenja reference bez pogreške nakon istitravanja početnih uvjeta. Osim toga, budući da se na kraju prijenosna funkcija svodi na realnu brojku koja je s velikom vjerojatnosti različita od jedan i nemogućnosti potisnika da prati takvo zadavanje referentnog signala, prisutno je drhtanje, eng. *chattering* odziva propulzora koje se poprilično osjeti budući da je dinamika DC motora kao konačnih aktuatora relativno brza pa ipak stignu reagirati na brze skokovite promjene reference.

Zbog navedenih nedostataka, predložen je postupak izgradnje I-P regulatora s kompenzacijom nelinearnosti na nižoj razini kontrole. Iskorištena je izgrađena struktura upravljanja virtualnom metom, a generirana upravljačka veličina brzine zaošijanja je postala referentna veličina za I-P regulator koji ima zadatak osigurati da se plovilo zakreće referentnom brzinom.



Slika 7.4: I-P regulator

Nakon kompenzirane nelinearnosti putem predupravljanja sinteza I-P regulatora temelji se na željenoj prijenosnoj funkciji zatvorene petlje. Kao i u slučaju slijedenja linije i ovdje je odabrana binomna modelska funkcija za željeno ponašanje, no ovaj put za jedan stupanj niža. Glavna odlika binomne modelske funkcije je u tome što daje najbrži aperiodski odziv zbog svojih realnih negativnih polova koji se nalaze na istom mjestu.

$$G_m(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2}{\omega_n} s + 1} \quad (7.28)$$

Osim toga I-P regulator ublažuje nagle promjene referentne veličine što ga čini pogodnim za sustav upravljanja plovilima. Izlaz iz regulatora je generirani moment zaošijanja  $N$  koji je dan sljedećom jednačinom

$$N = K_I \int_0^t (r^* - r) dt - K_P r \quad (7.29)$$

Prema relaciji koja povezuje otvoreni i zatvoreni krug (6.21) te uvrštavanjem prijenosnih funkcija regulatora i procesa ukupna zatvorena petlja za kontrolu brzine zaošijanja može se prikazati kao

$$\frac{r}{r^*} = \frac{1}{\frac{\alpha_r}{K_I} s^2 + \frac{K_P}{K_I} s + 1} \quad (7.30)$$

Izjednačavanjem koeficijenata uz istu potenciju kompleksne varijable modelske prijenosne funkcije (7.28) i dobivene ukupne zatvorene petlje određeni su parametri I-P regulatora.

$$K_I = \alpha_r \omega_n^2 \quad (7.31)$$

$$K_P = 2 \frac{K_I}{\omega_n} \quad (7.32)$$

gdje je  $s \omega_n$  određena brzina regulatora koja je odabrana u skladu s rezultatima testiranja nad simulacijskim modelom. Kružna frekvencija regulatora može se odabrati prema normiranoj prijenosnoj binomnoj funkciji gledajući pritom vrijeme porasta kao relevantan pokazatelj brzine dinamike.

## 7.5. Kontrola i adaptacija brzine napredovanja

Kroz cijeli rad sve do ove točke brzina napredovanja se smatrala konstantnom i kontrolirala se u otvorenoj petlji jednostavno narinuvši određeni iznos sile napredovanja. Željevši ostvariti bolji sustav upravljanja uvodi se kontrola unaprijedne brzine. Sustav upravljanja unaprijednom brzinom temelji se na već opisanom konceptu upravljanja

brzinom zaošijanja te mu zbog toga neće biti pridodana veća pažnja. Fokus ovog dijela teksta je kako poboljšati kvalitetu performansi s adekvatno odabranom brzinom napredovanja.

Algoritmi vođenja plovila razvijeni i opisani u prethodnim sekcijama postižu vrlo dobre performanse u slučaju idealnog plovila, idealnih uvjeta na površini i slično. Svako plovilo ima sebi karakteristične fizikalne granice maksimalne brzine zaošijanja i ako regulator generira veći iznos referentne brzine nego što plovilo može ostvariti, zbog neregulirane brzine napredovanja dolazi do zanošenja plovila. Ploveći konstantnom brzinom napredovanja bez problema se svladavaju okreti velikog radijusa, no dolazi do problema kod praćenja krivulja velikih zakrivljenosti. S ciljem poboljšanja sustava upravljanja u ovom dijelu opisat će se heurističko pravilo kako pravilno prilagoditi brzinu napredovanja putanji koja se trenutno prati. Osnovna ideja povećanja kvalitete upravljanja temelji se na intuitivnom ponašanju čovjeka prilikom vožnje automobila. Prilazeći oštrom zavoju smanjuje se brzina vozilu kako bi se se zavoj što lakše svladao. Ovo jednostavno čovjekovo ponašanje pretočit ćemo u heurističko pravilo primjenjivo u regulacijskom sustavu plovila za svladavanje oštih krivina. Pod pretpostavkom da se brzina plovila nalazi unutar minimuma  $U_{min}$  potrebnog za manevriranje i maksimuma brzine  $U_{max}$  uvodi se pravilo za reguliranje referentne brzine napredovanja kao funkcija trenutne referentne brzine zaošijanja koju generira regulator

$$u_{max}^* = \frac{U_{max} + U_{min}}{2} + \frac{U_{max} - U_{min}}{2} \cos\left(\frac{\pi r^*}{r_{sat}}\right) \quad (7.33)$$

gdje su  $U_{min}$ ,  $U_{max}$  i  $r_{sat}$  parametri adaptacijskog pravila. Ovo omogućuje redukciju unaprijedne brzine kad je orijentacija plovila daleko od željene, odnosno drugim riječima kad je generiran velik iznos brzine zaošijanja. Konačna referentna brzina napredovanja odabire se kao minimum konstantne postavljene referentne brzine  $\bar{u}^*$  i novoproracunatog maksimuma brzine.

$$u^* = \min(\bar{u}^2, u_{max}^*) \quad (7.34)$$

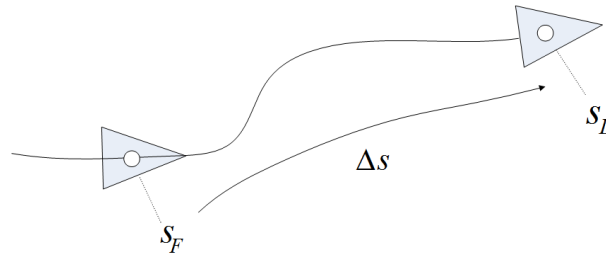


## 8. Kooperativno upravljanje plovilima

U ovom poglavlju proširuje se koncept upravljanja uvodeći više objekata u sustav. Glavnu ideju čini daljnja upotreba virtualnih meta u koordinaciji dva ili više plovila. Na principu virtualnih meta računa se relativna pozicija među agentima sustava i pri tome se upravlja njihovom brzinom s ciljem ostvarenja željenog koordiniranog gibanja. Prednost ovakvog načina upravljanja je u tome što je moguće raspregnuti zadatke slijeđenje putanje i koordinacijske zadatke što olakšava samo implementiranje u konačnici.

### 8.1. Praćenje plovila

Pri praćenju plovila postoji jedno vodeće plovilo (engl. *Leader*) i plovilo koje ga prati (engl. *Follower*),[7]. Prateće plovilo mora održavati svoju udaljenost u odnosu na vođu na nekoj unaprijed određenoj udaljenosti. Dakako, udaljenost se može mijenjati tokom misije, no cilj je ne izazvati sudar plovila. Njihova relativna udaljenost mjeri se u *curvilinear* abscisi željenog puta. U jednoj takvoj misiji vođa izvodi nekakvu unaprijed definiranu putanju ili s njim direktno upravlja čovjek dok je zadatak pratećeg plovila slijediti vođu i ponoviti putanju koju je vođa izveo održavajući udaljenost na fiksnoj vrijednosti. Dok traje misija vođa šalje podatke o svojoj horizontalnoj poziciji, a u slučaju predefirane putanje i podatke o trenutnim vrijednostima tangente i zakrivljenosti krivulje. U tom slučaju možemo smatrati da i plovilo koje treba slijediti vođu zna putanju koju treba izvesti. Uz već razrađeni koncept upravljanja u prijašnjim poglavljima, ovdje se pojavljuje upravljanje unaprijednom silom napredovanja s ciljem da se ostvari željena udaljenost među plovilima. Upravljanje silom napredovanja rezultira određenom brzinom napredovanja koja će opet utjecati na brzinu virtualne mete koja je dodijeljena tom plovilu te će iskonvergirati jedno k drugome. Na taj način postiže se željena udaljenost između dva plovila. Dakle, definira se udaljenost po krivulji između vođe i pratioca kao  $\Delta s = s_L - s_F$  i postavlja se zadatak naći upravljački algoritam kojim će se postići željena udaljenost  $D^*$ .

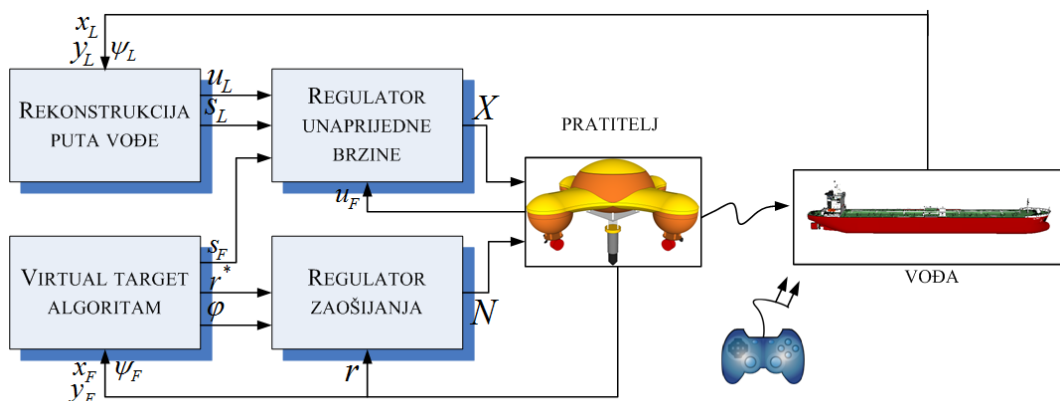


**Slika 8.1:** Definicija udaljenosti pri praćenju plovila

Zbog toga se definira pogreška udaljenosti  $e_s = \Delta s - D^*$  koju treba svesti na nulu. Upravljački signal koji se koristi za korekciju brzine pratioca sastoji se od unaprijednog signala unaprijedne brzine kojom se giba vođa i kojeg se korigira tangens hiperbolnim funkcijom

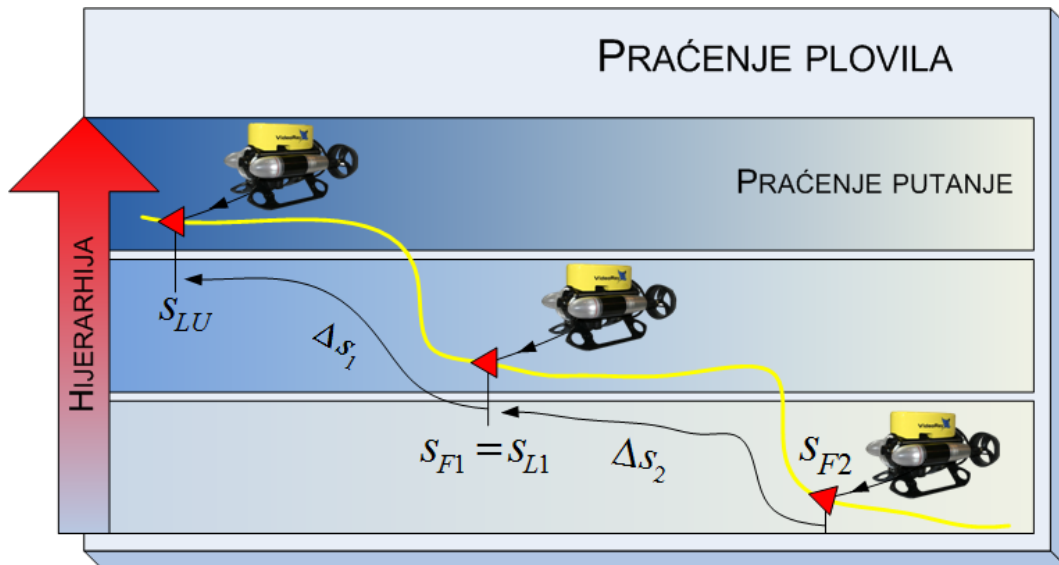
$$u^* = u_L + k_u \tanh(k_e e_s) \quad (8.1)$$

gdje su  $k_e$  i  $k_u$  parametri koji se mogu namještati. Vođa može podatak o svojoj brzini slati direktno komunikacijom koja mora postojati s pratiocom ili pak pratioc može na neki način estimirati taj podatak. Izračunata unaprijedna brzina kojom se treba gibati pratitelj daje referencu za niži stupanj kontrole kojom se dobiva konačna sila koju treba primjeniti na prateće plovilo. Regulator koji se koristi za osiguranje željene unaprijedne brzine je  $I-P$  tipa koji je već ranije opisan. Postupak sinteze je analogan provedenom postupku na str. uz razliku što se ovdje kontrolira drugi stupanje slobode gibanja. Struktura koordiniranog praćenja plovila i sama konceptualna ideja prikazana je na slici ispod.



**Slika 8.2:** Strukturna shema kooperativnog upravljanja

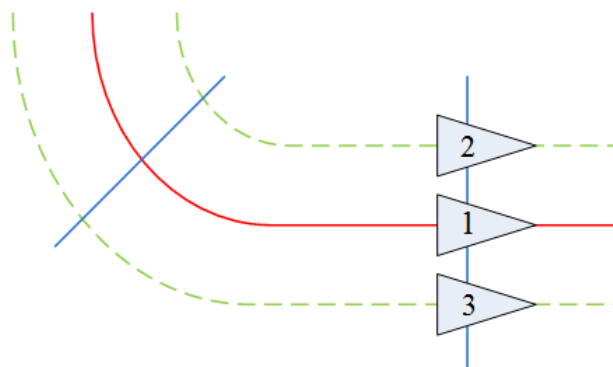
Čitava kontrolna struktura može se razložiti u četiri neovisna bloka. Blok za rekonstrukciju putanje vođe na temelju koordinata i orijentacije koje vođa periodički šalje rekonstruira putanju koju pratitelj treba izvršiti. Točke se prikupljaju u ciklički akumulator i onda se dalje procesiraju. Pri ručnom upravljanju vođom, napravljena je pretpostavka da se vođa i njegova virtualna meta gibaju skupa, odnosno nema razlike između koordinata virtualne mete i koordinata vođe. Pretpostavka je opravdana imajući u vidu da zadajući ručno komande, plovilo se uistinu i giba u skladu s primljenim naredbama. Rekonstruirana dužina koju je plovilo vođa izvršilo od početka misije  $s_L$  zajedno s njegovom estimiranom brzinom  $u_L$  prosljeđuje se bloku za kontrolu brzine napredovanja pratioca. Glavni zadatak ovdje je osigurati željenu udaljenost među plovilima, a algoritam koji to ostvaruje dan je s relacijama prikanim na početku poglavlja. Drugi stupanj upravljanja temelji se na principu virtualne mete koji je opisan u poglavlju 7. Pogledom na sliku 8.2 uočava se već spominjano raspredanje između upravljanja plovilom od koordinacijskih zadataka. Na ovaj način lako se uključuje dodatno plovilo formirajući hierarhijski lanac odnosa vođa-pratioc. Nadalje, dodavajući više plovila relacija *Vođa - pratioc* može se poopćiti. Jedno plovilo postat će glavni vođa koje izvršava svoju misiju ili se njim ručno upravlja. Slijedeće u hierarhiji, bit će drugo plovilo koje je u isto vrijeme pratioc glavnog vođe i vođa plovilu koje je ispod njega u hierarhijskom sustavu. Na samom dnu je najjednostavniji pratioc kao rep takvog formacijskog sustava čiji jedini zadatak je pratiti svog lokalnog vođu. Cijeli kooperacijski sustav ponaša se kao golema zmija i uključivši veći broj plovila u igru, treba pripaziti na mogućnost sudara glavnog vođe u nekog od svojih članova prilikom izvršavanja oštrih skretanja. Algoritam izbjegavanja sudara je izvan opsega ovog rada i postavljena je pretpostavka da plovila izvode glatke putanje bez naglih manuvera.



Slika 8.3: Hijerarhijski sustav i definirane udaljenosti po putanji

## 8.2. Wingman problem

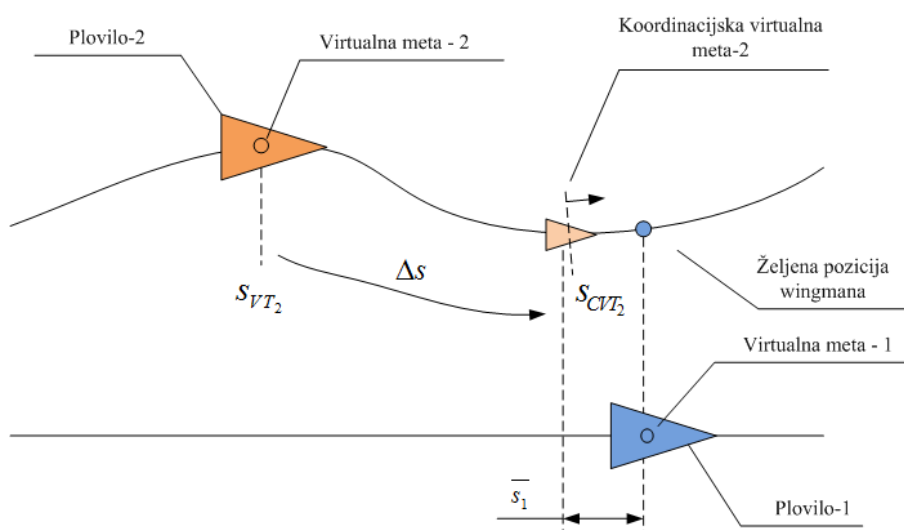
Koordinirana plovila mogu biti višestruko iskorištena sa zadacima praćenja i istraživanja većeg područja. Više koordiniranih plovila može u istom vremenu napraviti puno više i pokriti veće područje nego što to može pojedino plovilo samo. U daljnjem razmatranju koordinacije plovila zbog jednostavnosti ograničit ćemo se na dva plovila koja će postati tim. Dakle, imamo dva plovila koja moraju koordinirati svoja gibanja održavajući relativnu poziciju u odnosu jedan prema drugom. Ovdje definicija vodećeg plovila i plovila koje ga prati gubi na značenju te možemo reći da su plovila ravnopravna. Oba znaju referentnu putanju koju trebaju izvršiti i dijele osnovne navigacijske informacije. Ovdje proširujemo koncept upravljanja temeljen na virtualnim ciljevima na koordinirano upravljanje plovilima. Glavna prednost predložene metode je mogućnost raspredanja običnog upravljanja kojem je zadatak slijedeće putanje i koordinacijskih zadataka kao višeg stupnja u cijelom sustavu. Jedan od najjednostavnijih koordinacijskih zadataka je gibanje dvaju plovila jedno pored drugog držeći paralelnu formaciju. Problem koji se ovdje javlja (engl. Wingman Problem) odnosi se na koordinaciju gibanja kad se dva plovila nalaze upravo jedno kraj drugog, a gibaju se po različitim putanjama. Koordinacijski zadatak je regulirati brzinu gibanja *wingman* plovila tako da ono drži paralelnu formaciju s drugim plovilom. Putanje ne moraju biti potpuno paralelne, no moraju biti orijentirane u istom smjeru,[6].



Slika 8.4: Primjer formacije plovila sa različitim putanjama

Glavna ideja na kojoj se temelji koordinacijski zadatak paralelnog gibanja je dodati još jedan novi virtualni cilj koji nosi oznaku *Koordinirani virtualni cilj* (CVT) za svako *wingman* plovilo. Koordinirani virtualni cilj odnosi se na *wingman* plovilo i definira se na putanji tog plovila. Na slici 8.5 prikazan je generalizirani *wingman* problem. Iako je spomenuto da uloge vođe i pratioca gube na značenju, ovdje ipak možemo smatrati da imamo jedno vodeće plovilo koje je glavno u izvršavanju misije a drugo se prilagođava njemu. Tako po hijerarhiji treba razlikovati *plovilo-1* koje ima karakteristike vođe i *plovilo-2* koje ima karakteristike pratioca. Koordinirani virtualni cilj nalazi se dakle na putanji *plovila-2* i primjenjujući upravljački algoritam prisiljen je konvergirati prema *plovilu-1*. Prilikom približavanja plovilu smanjuje se greška projekcije  $\bar{s}_1$  u odnosu na *plovilo-1*. Poput običnog upravljanja brzinom gibanja virtualnog cilja i ovdje se definira upravljački algoritam za brzinu gibanja CVT-a

$$\dot{s}_{CVT_2}^* = U_1 \cos \bar{\beta} + k_2 \bar{s}_1 \quad (8.2)$$



Slika 8.5: Poopćeni wingman problem

Kordinirani virtualni cilj ponaša se kao virtualni cilj za *plovilo-1* koje se giba po putanji *plovila-2*.  $U_1$  je brzina *plovila-1*, dok je  $\bar{\beta}$  je razlika između tangenti u točkama putanja na kojima se trenutno nalaze *CVT* i virtualni cilj prvog plovila,  $\bar{s}_1$  je uzdužna greška projekcije u odnosu na prvo plovilo i  $\bar{k}_2$  je podesivi parametar. Uzdužna projekcija pogreške definira se u koordinatnom sustavu vezanom za vodeće plovilo prema:

$$\bar{s}_1 = -(x_1 - x_{CVT}) \sin\psi + (y_1 - y_{CVT}) \cos\psi \quad (8.3)$$

gdje je  $\psi$  orijentacija *plovila-1*. Za  $\psi$  se može uzeti i orijentacija virtualne mete budući da nakon prolaska početnih uvjeta to dvoje se giba kao jedno. Kad se osigura konvergencija *CVT-a* prema prvom plovilu, *CVT* se tada koristi za računanje udaljenosti po parametru  $s$  između virtualnog cilja drugog plovila i sebe samog. Dolazimo do problema koji je opisan u prethodnom odjeljku te se za njegovo rješavanje definira pogreška pozicije

$$\Delta s = s_{CVT_2} - s_{VT_2} \quad (8.4)$$

Cilj je iskoristiti *CVT* na način da virtualni cilj drugog plovila iskonvergira k njemu, a samim time i drugo plovilo zauzme paralelnu poziciju u odnosu na prvo plovilo. Definira se pogreška:

$$e_s = \Delta s - D^* \quad (8.5)$$

i koristi se algoritam upravljanja definiran izrazom 6.1 dok se za  $D^*$  uzima vrijednost nula.

## 9. Rezultati

U ovom dijelu daju se konačni rezultati ovog rada. Prvo će biti prikazani rezultati slijeđenja putanje korištenjem virtualnog cilja za jedno plovilo, a zatim će se pokazati simulacijski rezultati za kooperativno upravljanje (slijeđenje plovila, wingman problem) i na kraju bit će prikazana jedna od mnogobrojnih primjena metoda opisanih u ovom radu.

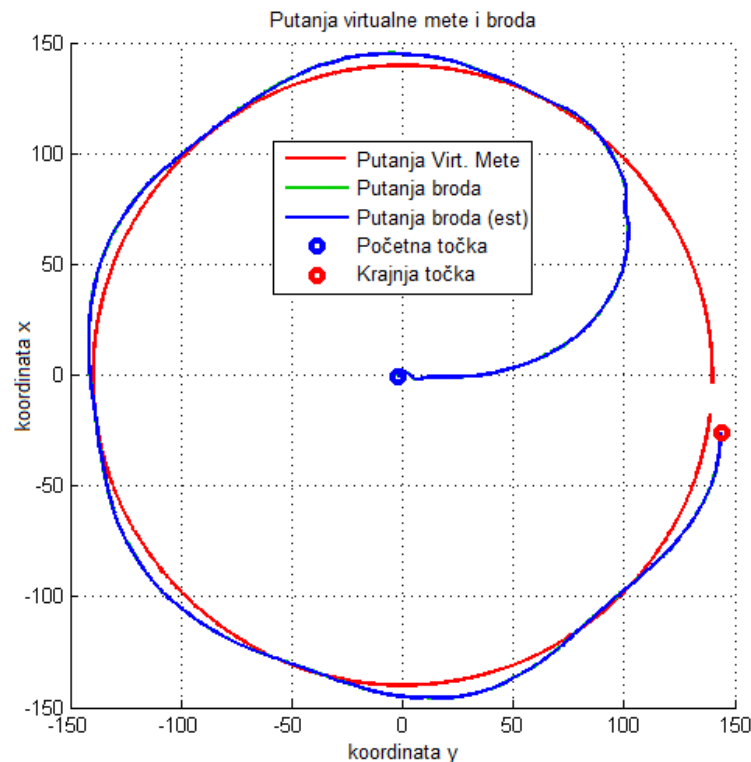
### 9.1. Eksperimentalni rezultati - virtualna meta

S ciljem validacije teorije vođenja plovila algoritmom virtualne mete, na modelu broda je izvršen niz eksperimenata. U nastavku je prikazan primjer jednog eksperimenta. Parametri korišteni pri ovom eksperimentu dani su  $k_\phi = 0.01$ ,  $k_1 = 0.075$ ,  $k_2 = 0.1$ . S obzirom da se koristi upravljanje po svim stupnjevima slobode, algoritam je modificiran na način da se uz referentni signal kutne brzine  $r^*$  na izlazu uvodi i referentni signal brzine zanošenja  $v^*$ . Izraz za  $v^*$  dan je jednadžbom (9.1). Vidljivo je da se uz prethodna tri parametra uvode dva nova parametra u sustav virtualne mete.  $k_\beta$  predstavlja parametar kojim se određuje postotak kojim će se generirati signal brzine zanošenja u odnosu na kut  $\beta$ . To je bitno jer ukoliko je kut između vektora brzine virtualne mete i vektora brzine plovila veliki, nema smisla korigirati lateralno odstupanje zanošenjem. Ukoliko je taj kut mali, zanošenje u smjeru lateralnog odstupanja približava plovilo virtualnoj meti. Parametar  $k_3$  predstavlja mjeru kojom će se uzimati u obzir bočna udaljenost plovila  $y_1$  od virtualne mete pri generiranju reference  $v^*$ . Vrijednosti novih parametara su  $k_\beta = 0.1$  i  $k_3 = 0.15$ .

$$v^* = -(1 - \tanh^2(k_\beta\beta))k_1y_1 \quad (9.1)$$

Eksperiment je proveden tako što plovilo kreće iz koordinata  $(0, 0)$  pod kutem od  $90^\circ$  i treba slijediti kružnicu radijusa 140. Mjere su izražene u pikselima koordinatnog sustava kamere. U idealnom slučaju, brod bi se trebao asimptotski približiti putanji

i nastaviti se gibati po njoj. Kako je spomenuto ranije, sustav virtualne mete zapravo generira referentne vrijednosti brzine koje je potrebno pratiti kako bi se postigla željena pozicija. Jedna od temeljnih pretpostavki takvog načina upravljanja je da se te brzine mogu dovoljno brzo pratiti. U idealnom slučaju plovilo nema masu i inerciju i shodno tome trenutno poprima te vrijednosti. U realnom slučaju, potisnici koji pogone plovilo odlaze u zasićenje, i za slijeđenje brzine koju zadaje sustav virtualne mete obavljaju I-P regulatori za svaki od stupnjeva slobode.

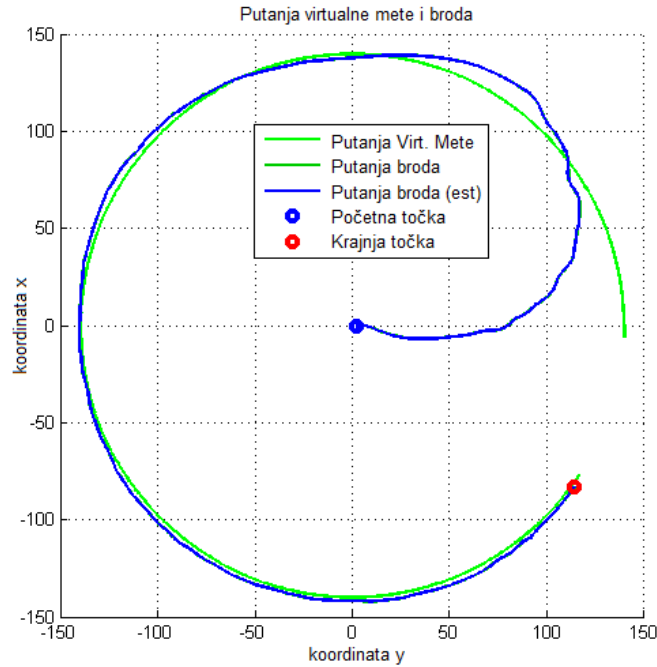


**Slika 9.1:** Putanje broda i virtualne mete

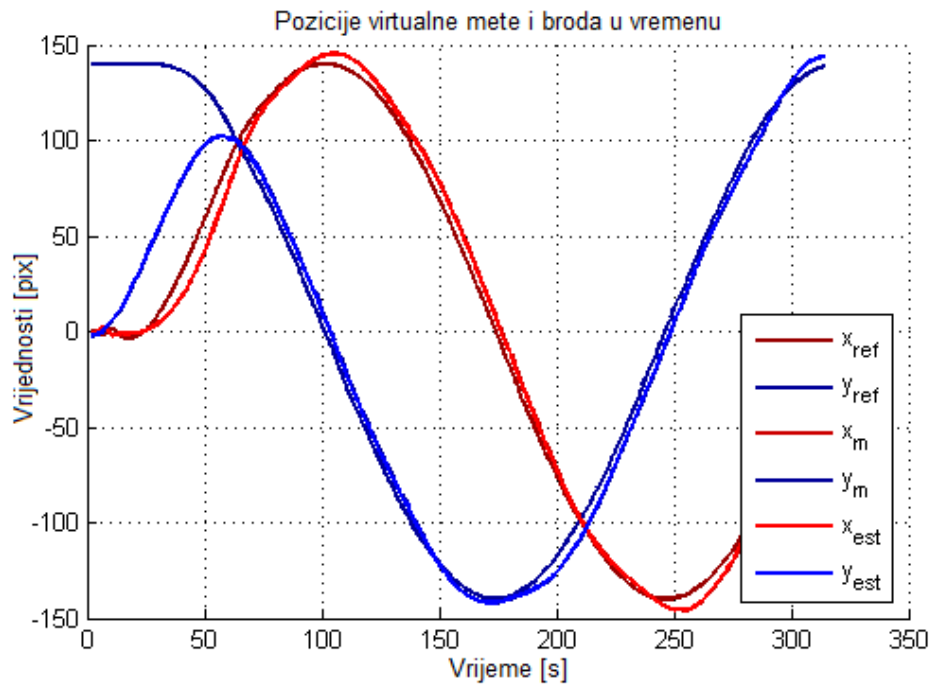
Na slici 9.1 prikazane su putanje virtualne mete i plovila. Ako se pogleda putanja kojom se plovilo približava virtualnoj meti može se uočiti da ne postoji prebačaj prijelazne pojave. Nakon što se plovilo približilo putanji virtualne mete, nastavlja se gibati po putanji virtualne mete uz minimalne oscilacije koje postoje zbog konstantne rotacije koordinatnog sustava. To dolazi do izražaja jer regulatori rade u koordinatnom sustavu broda. Na slici 9.3 prikazani su odzivi pozicija plovila i virtualne mete u vremenu. Kašnjenje za virtualnom metom svedeno je na minimum te se povećanjem pojačanja  $k_2$  to odstupanje može još dodatno po želji smanjiti. Na slici 9.2 prikazana je putanja od drugog sličnog eksperimenta s manjim parametrom  $k_1$  na kojoj se može primjetiti da nema oscilacija uz putanju, ali postoji prebačaj kod prilaženja putanji. Na sljede-



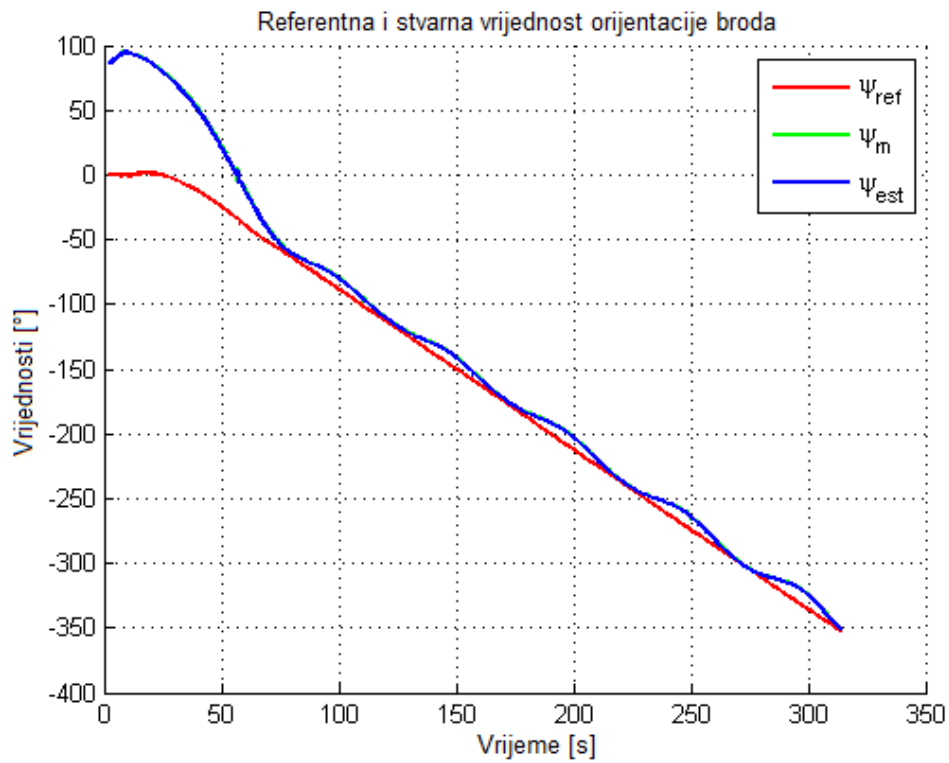
ćoj slici prikazana je razlika pozicije i orijentacije plovila i virtualne mete u vremenu. Može se primjetiti da se plovilo nakon prilaza putanji od nje nikad ne udaljava više od 10 piksela i 12 stupnjeva.



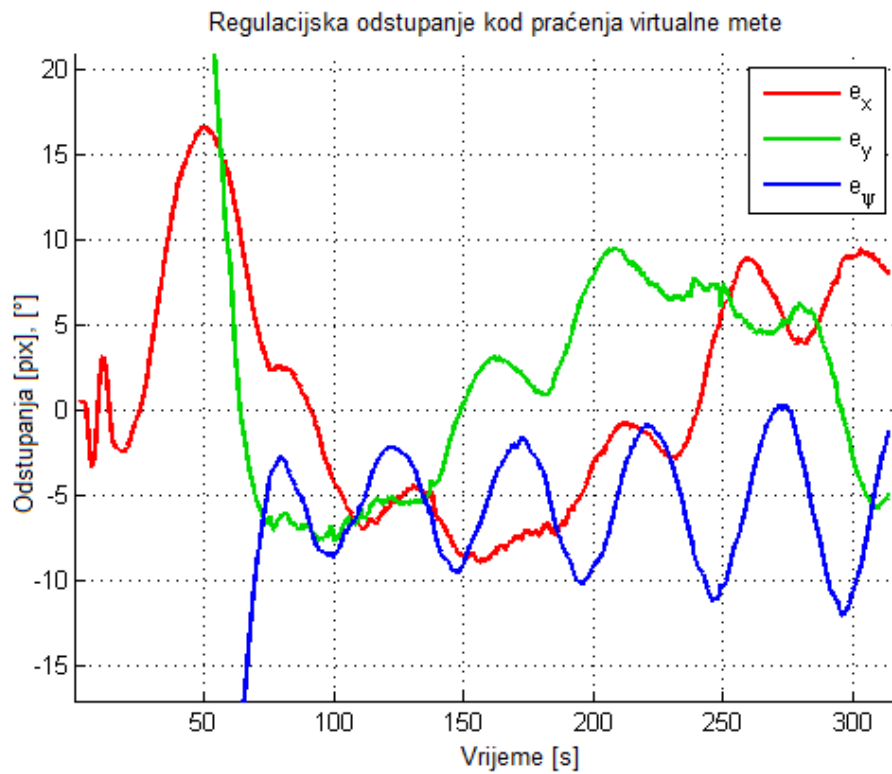
Slika 9.2: Putanje broda i virtualne mete



Slika 9.3: Odziv pozicije broda pri praćenju virtualne mete



Slika 9.4: Odziv orijentacije broda pri praćenju virtualne mete



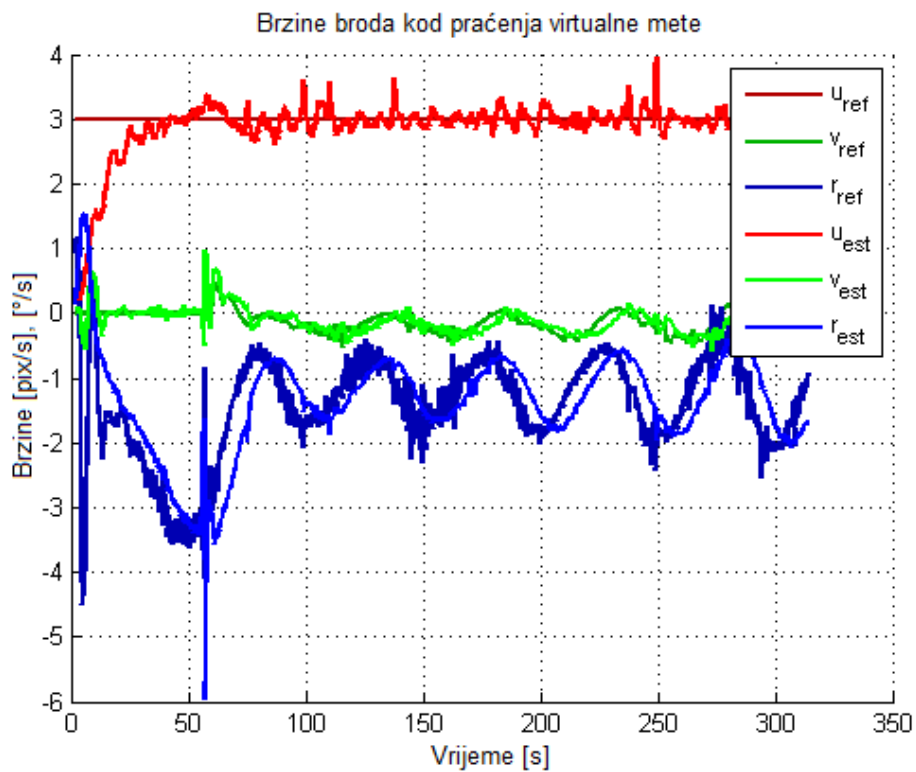
Slika 9.5: Odziv pozicije broda pri praćenju virtualne mete

Brzina slijeđenja referentnih brzina koje zadaje sustav virtualne mete može se vidjeti na slici 9.6. Kako je spomenuto, za slijeđenje brzine su zaduženi I-P regulatori koji zajedno s pripadajućim procesom  $G_v = \frac{1}{\alpha_v s + \beta_v}$  čine krug upravljanja koji u zatvorenoj petlji ima prijenosnu funkciju prema (7.29). Ako se vrijednosti uz kompleksnu varijablu  $s$  izjednače onima modelske binomne funkcije drugog reda definirane sa (7.28). Mogu se dobiti izrazi za pojačanja regulatora.

$$K_i = \alpha_v \omega_n^2 \quad (9.2)$$

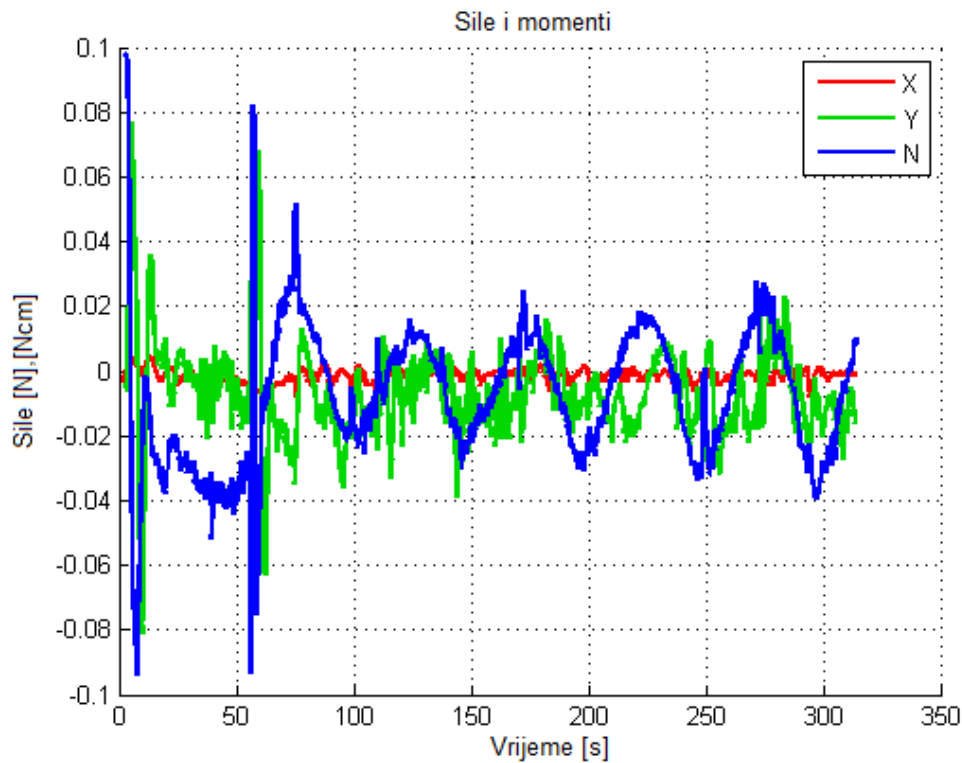
$$K_p = \frac{K_i \cdot 2}{\omega_n} - \beta_v \quad (9.3)$$

Dakle, dinamika slijeđenja referentnih vrijednosti brzina može se namještati po potrebi. U ovom eksperimentu korištene su vrijednosti  $\omega_u = 0.1$ ,  $\omega_v = 0.4$ ,  $\omega_r = 0.3$ .



**Slika 9.6:** Odziv brzina broda pri praćenju virtualne mete

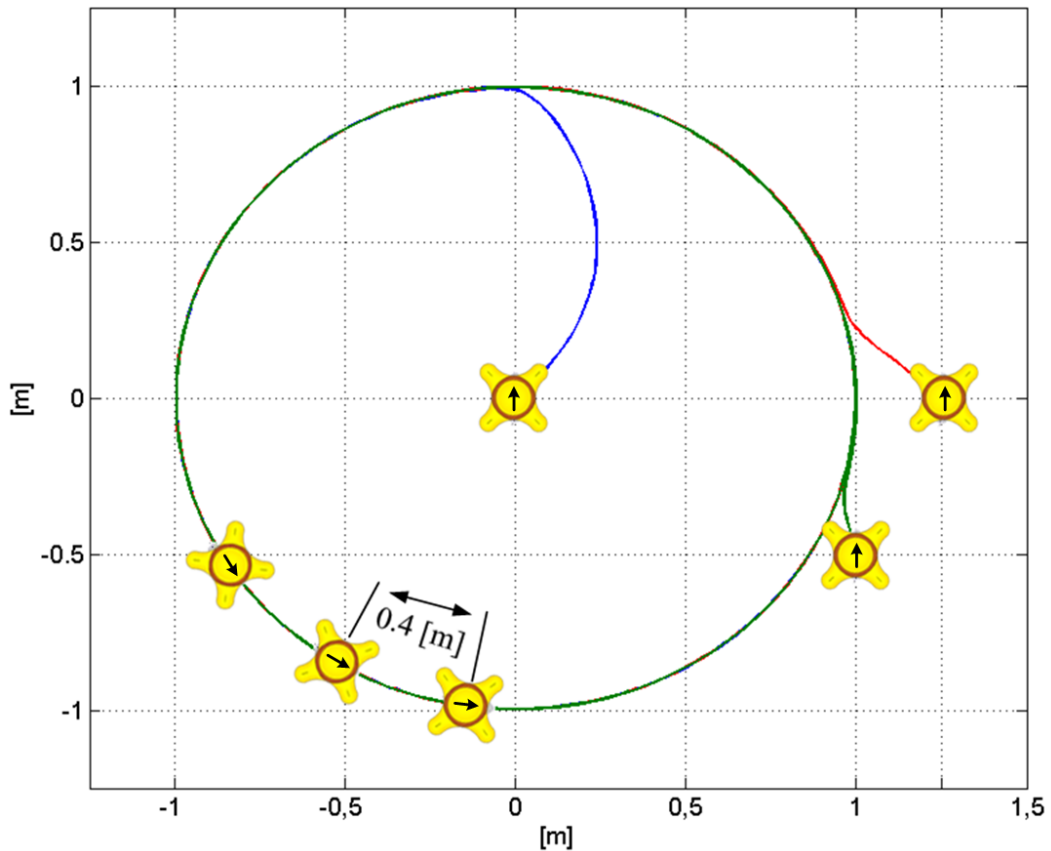
Odziv sila prikazan je na slici 9.7. Prilikom početnog zakreta može se primjetiti pojačana aktivnost potisnika. Pri korištenim vrijednostima parametara, aktuatori ne ulaze u zasićenje, što ukazuje na to da se može odabrati mnogo brža dinamika slijeđenja brzina.



Slika 9.7: Odziv sila broda pri praćenju virtualne mene

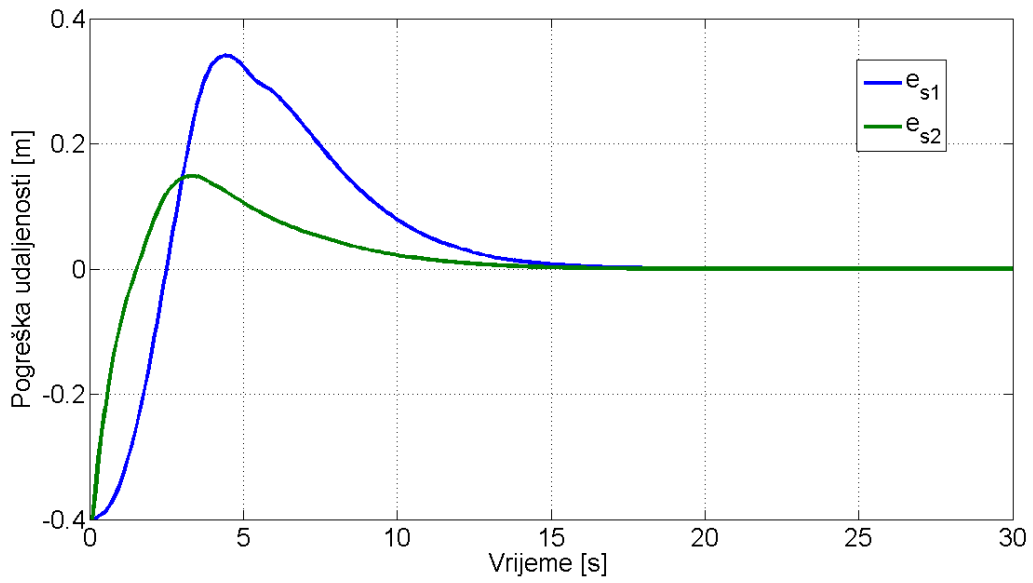
## 9.2. Simulacijski rezultati - Praćenje plovila

U ovom simulacijskom eksperimentu proširit ćemo sustav s još jednim modelom plovila formirajući višeagentski sustav. Cijeli kooperacijski sustav se poopćava. Jedno plovilo postaje *glavni* vođa i on jedini izvršava svoju misiju. Sljedeće plovilo u sustavu je u istom trenutku pratitelj *glavnog* vođe i vođa za sljedeće plovilo. Na takav način formirana se hierarhijski lanac gdje se na samom kraju nalazi plovilo koje samo prati svog lokalnog vođu. Uključivši više plovila u sustav posebna pažnja treba se posvetiti izbjegavanju međusobnih sudara, no to prelazi opseg ovog rada. Pretpostavljeno je da plovila izvršavaju glatke putanje s malom zakrivljenošću. Test opisan ovdje, uključuje dakle tri modela platforme, a put koji moraju slijediti je opisan kružnicom polumjera  $1m$  s konstantnom zakrivljenošću putanje koja je u ovom slučaju  $1m^{-1}$ . U trenutku  $t = 0s$  glavni vođa nalazi se u ishodištu  $NE$  koordinatnog sustava. Prvi pratitelj pozicioniran je u točki  $P_1 = [1.25m, 0m]$  dok se drugi nalazi na poziciji određenoj točkom  $P_2 = [1m, -0.5m]$

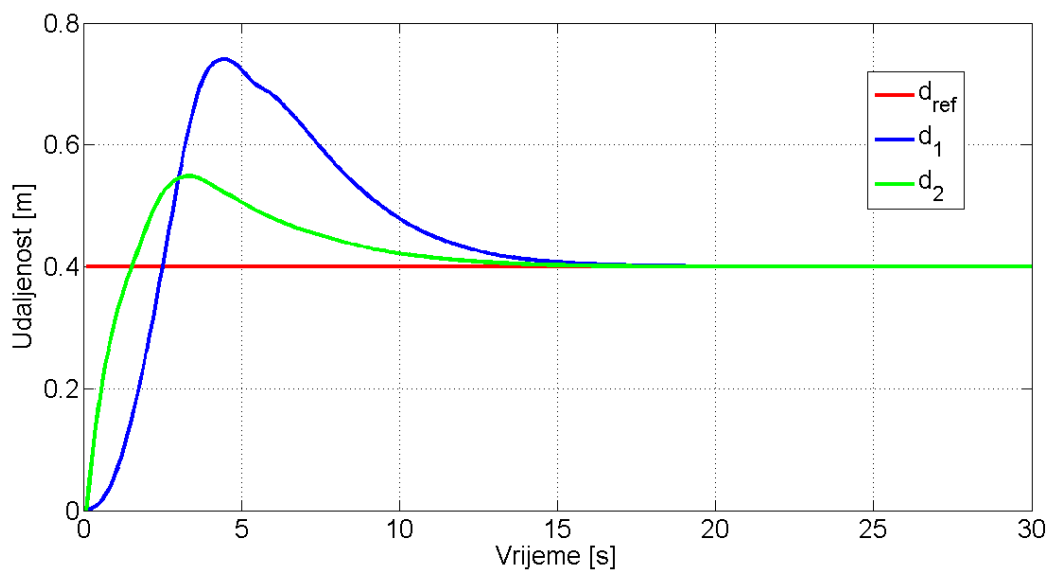


**Slika 9.8:** Putanje plovila tijekom simulacije

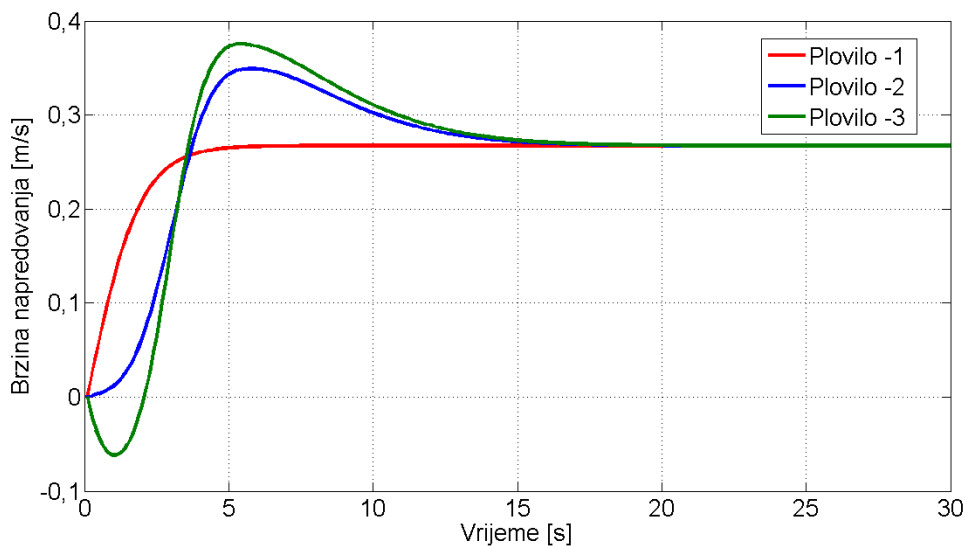
Kroz cijelu simulaciju, željena referentna udaljenost među plovilima je držana na konstantnoj vrijednosti u iznosu  $0.4[m]$ . Snimljeni odzivi međusobne udaljenosti plovila mogu se vidjeti na slici 9.10 . Prvi pratitelj generira putanju za drugog pratitelja tako da se pogreška u udaljenosti mora promatrati u odnosu na prvog pratitelja. Slika 9.8 daje putanju izvršene simulacije za sva tri plovila. Regulacijska odstupanja prikazana su na slici 9.9. Sa slike se vidi da nakon inicijalnog nadvišenja plovila u ustaljenom stanju održavaju željeni razmak bez greške. Nadvišenje koje se javlja je izravna posljedica nastojanja da se što prije približe refentnoj vrijednosti razmaka.



**Slika 9.9:** Odziv pogreške udaljenosti



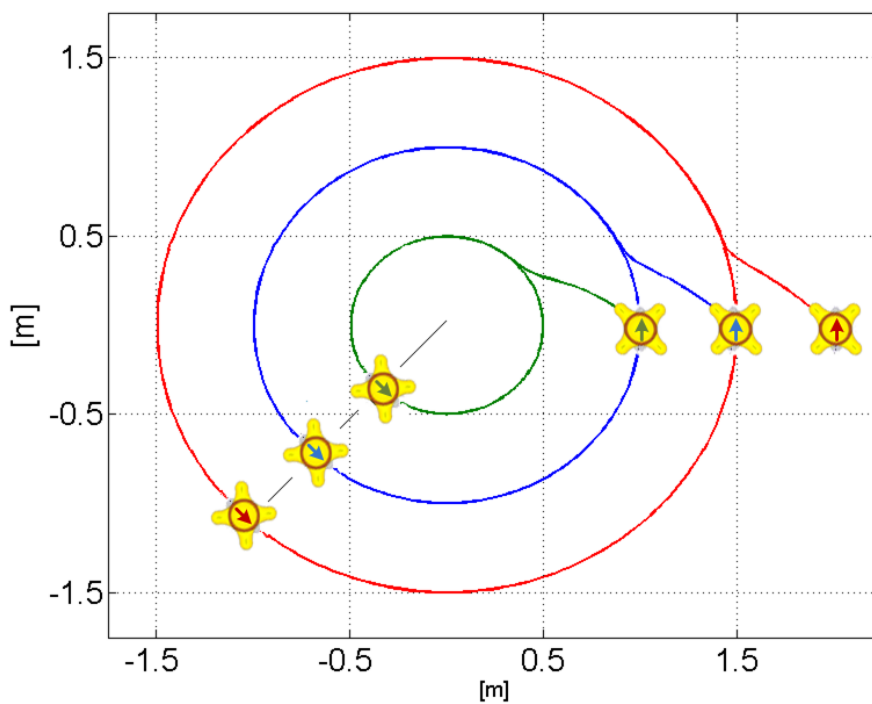
**Slika 9.10:** Razmak plovila tijekom simulacije



Slika 9.11: Brzine napredovanja plovila za vrijeme simulacije

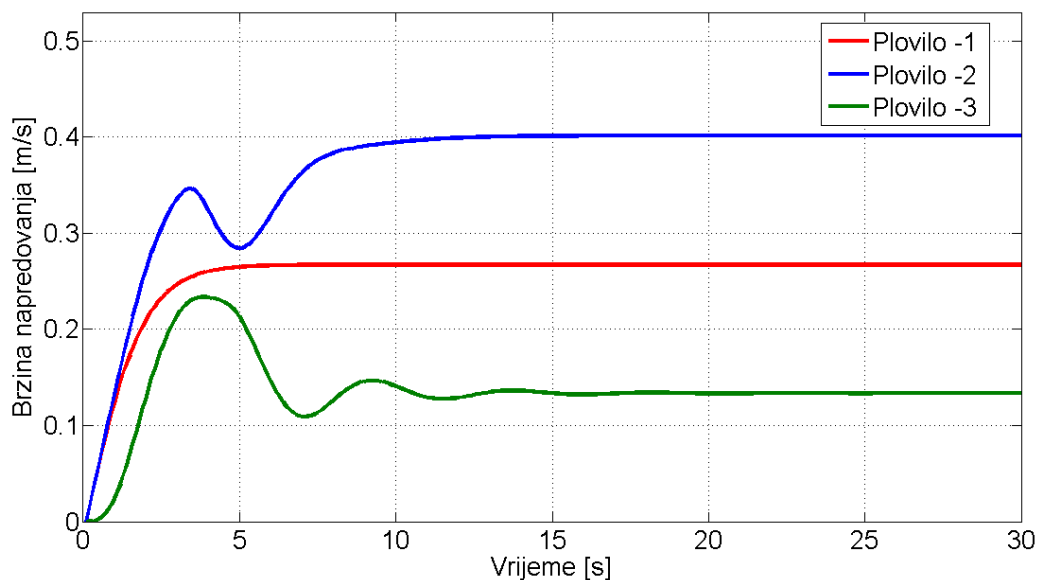
### 9.3. Simulacijski rezultati - *wingman* problem

Za simulacijski eksperiment *Wingman problema* glavni vođa izvršava istu misiju kao i u prethodnom eksperimentu (krug polumjera  $1[m]$ ) dok preostala dva plovila trebaju opisivati kružnice polumjera  $R = 0.5[m]$  i  $R = 1.5[m]$ .



Slika 9.12: Ostvarene putanje plovila tijekom simulacije

Glavni zadatak simulacije je bio ostvarivanje paralelne formacije plovila unatoč putanjama različitih udaljenosti. Prijeđene putanje kao i držanje paralelne formacije može se vidjeti na slici 9.12. Kroz cijelu simulaciju izuzev kratkog početnog razdoblja ostvareno je koordinirano gibanje. Na slici 9.13 može se vidjeti odziv brzina napredovanja plovila. Očito je da plovilo koje mora prevaliti najveću udaljenost, mora razviti i veću brzinu. Brzina vođe ima gladak asimptotski odziv dok su brzine *wingman* plovila rezultat upravljanja brzinom napredovanja. Treba spomenuti, sila napredovanja vođe držana je na konstantnoj vrijednosti tijekom simulacije što je rezultiralo konstantnom brzinom napredovanja u ustaljenom stanju. *Wingman* plovila ostvaruju brzinu koja se računa prema (8.1).



Slika 9.13: Brzine napredovanja plovila za vrijeme simulacije

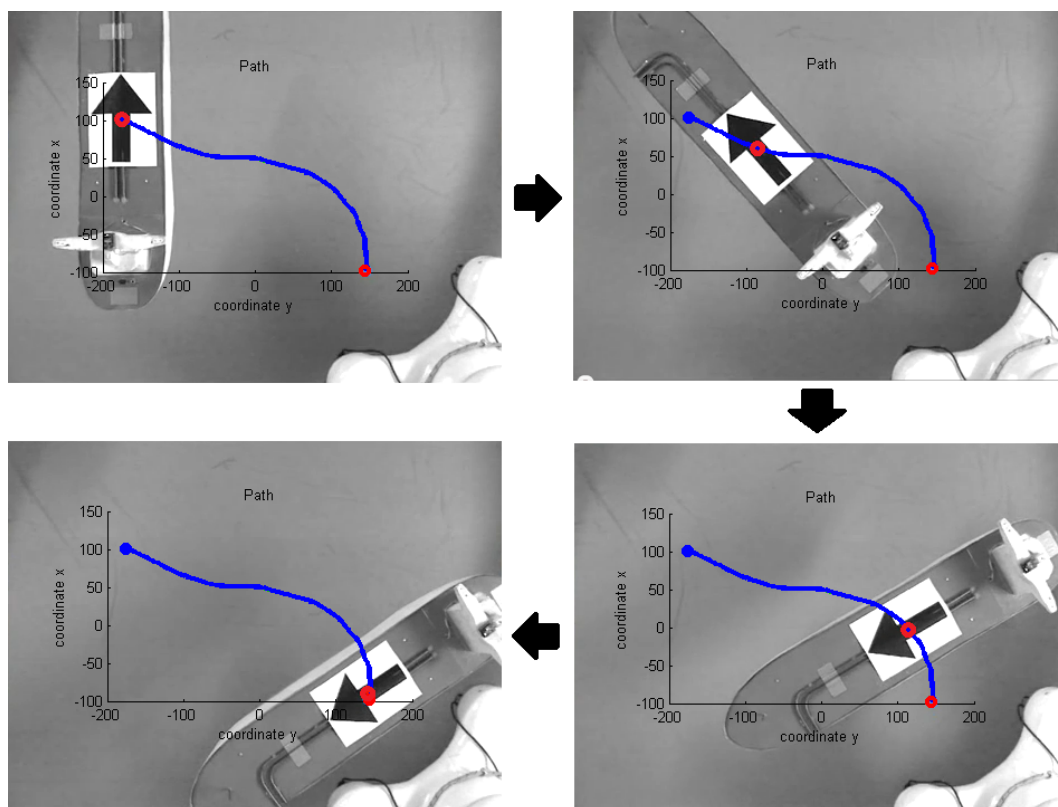
## 9.4. Pristajanje broda uz platformu

Automatsko pristajanje broda eng. *auto-docking* uz platformu na moru ili u luku predstavlja veoma zanimljiv problem kod vođenja i upravljanja plovilima. U ovom poglavlju bit će opisana dva eksperimenta. U prvom brod koristeći dinamičko pozicioniranje (DP) pristaje uz plovnu platformu koja se nalazi već pozicionirana u bazenu. U drugom eksperimentu brod treba pristati bočno uz terminal i pritom ne smije doći do sudara s preprekom na putu. Zbog toga nije moguće koristiti dinamičko pozicioniranje, nego je korišten algoritam slijeđenja putanje.



### 9.4.1. Pristajanje broda dinamičkim pozicioniranjem

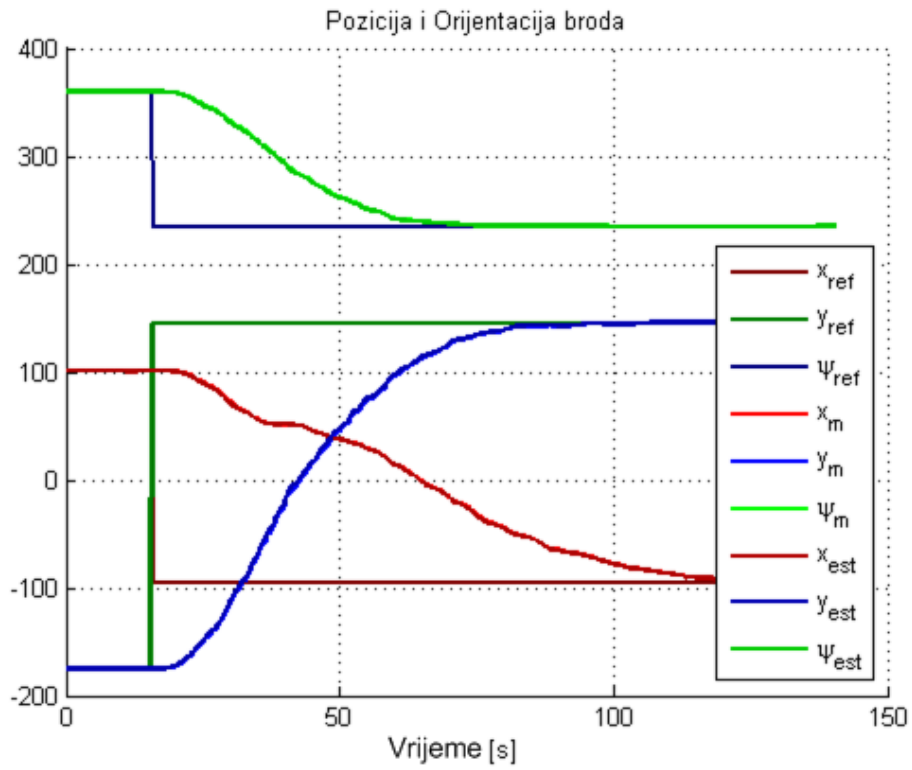
Ukoliko u okolini broda i platforme ne postoje druga plovila koji ograničavaju prostor kretanja broda, dinamičko pozicioniranje broda može se iskoristiti za automatsko pristajanje broda uz platformu. U prethodnom eksperimentu demonstrirano je da kod dinamičkog pozicioniranja nema nadvišenja pri promjeni pozicije ili orijentacije broda. Shodno tome, neće doći do sudara modela broda i platforme. Tijek eksperimenta iz perspektive kamere iznad bazena prikazan je na slici 9.14. Obradom slike iz kamere određuje se pozicija i orijentacija broda i platforme u bazenu.



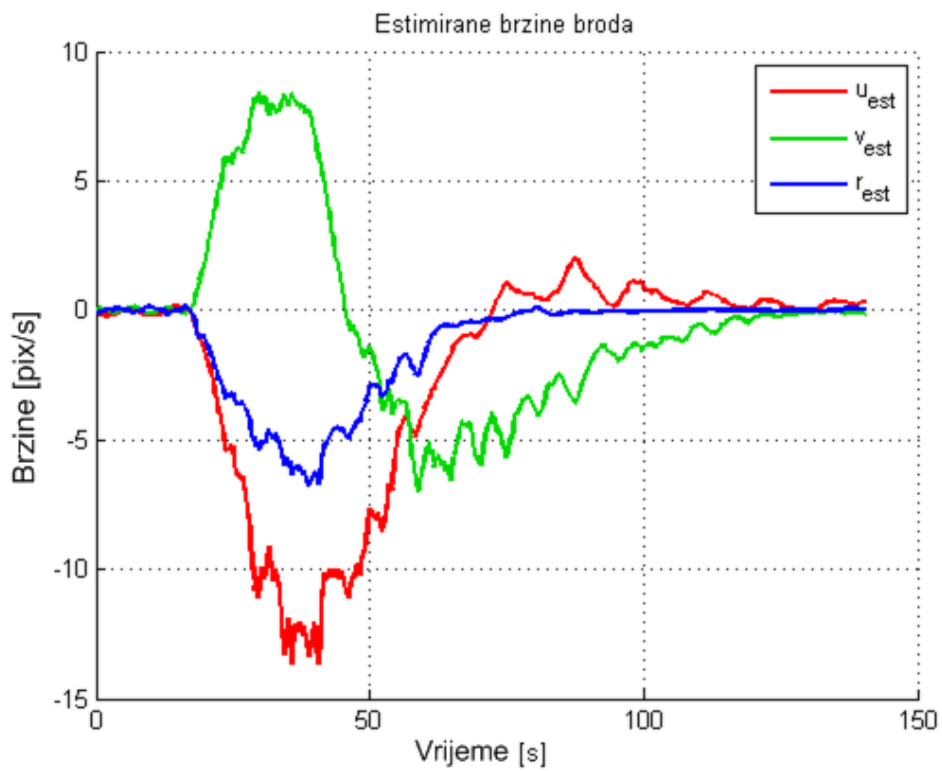
**Slika 9.14:** Pristajanje broda uz platformu dinamičkim pozicioniranjem

Na slici 9.15 prikazani su odzivi pozicije i orijentacije tijekom dinamičkog pozicioniranja. Može se primjetiti da je odziv u sva tri stupnja slobode aperiodski, što potvrđuje činjenicu da neće doći do sudara. Slika 9.16 prikazuje estimirane brzine kretanja i zaošijanja broda u vremenu. Može se primjetiti kako se zbog zakretanja broda, unaprijedna brzina pretvara u bočnu i obratno. Ako se promotri putanja kojom se brod gibao, vidljivo je da se brod od početne do završne pozicije ne giba nužno po pravcu. To se ne događa zbog asimetričnog razmještaja mase broda i zato što gibanje po pravcu nije cilj kod dinamičkog pozicioniranja. Odziv sila koje djeluju na brod prikazan je na slici

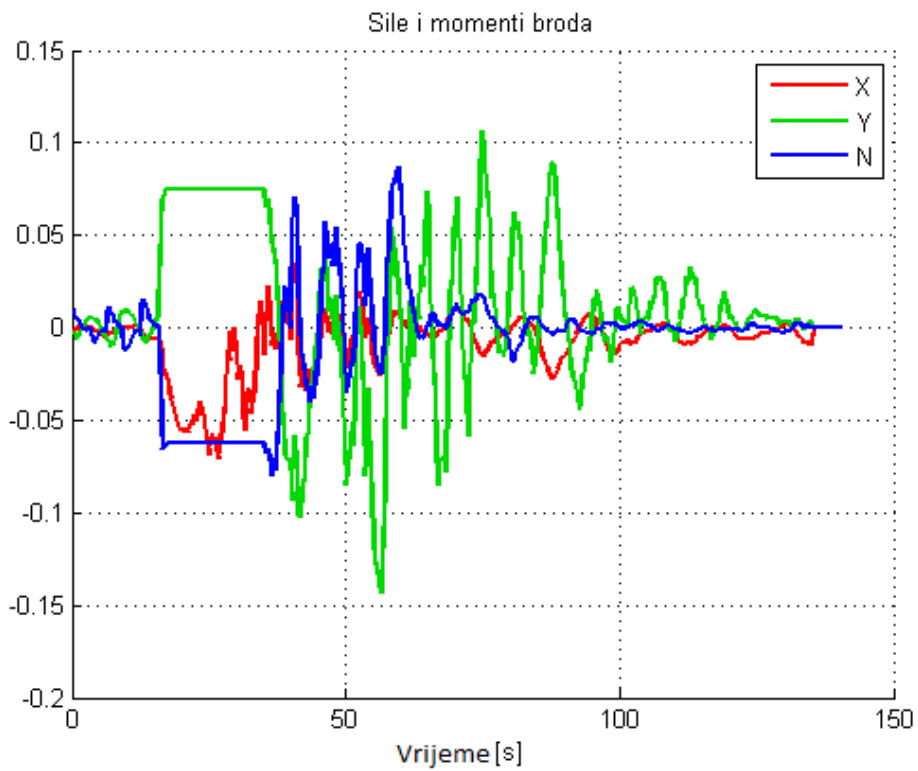
9.17. Do oscilacija sila dolazi zbog prenošenja unaprijednog gibanja u bočno gibanje i obratno prilikom rotacije broda, odnosno korekcija koje je pritom potrebno vršiti.



Slika 9.15: Odzivi pozicija broda tijekom pristajanja uz platformu



Slika 9.16: Odzivi brzina broda tijekom pristajanja uz platformu

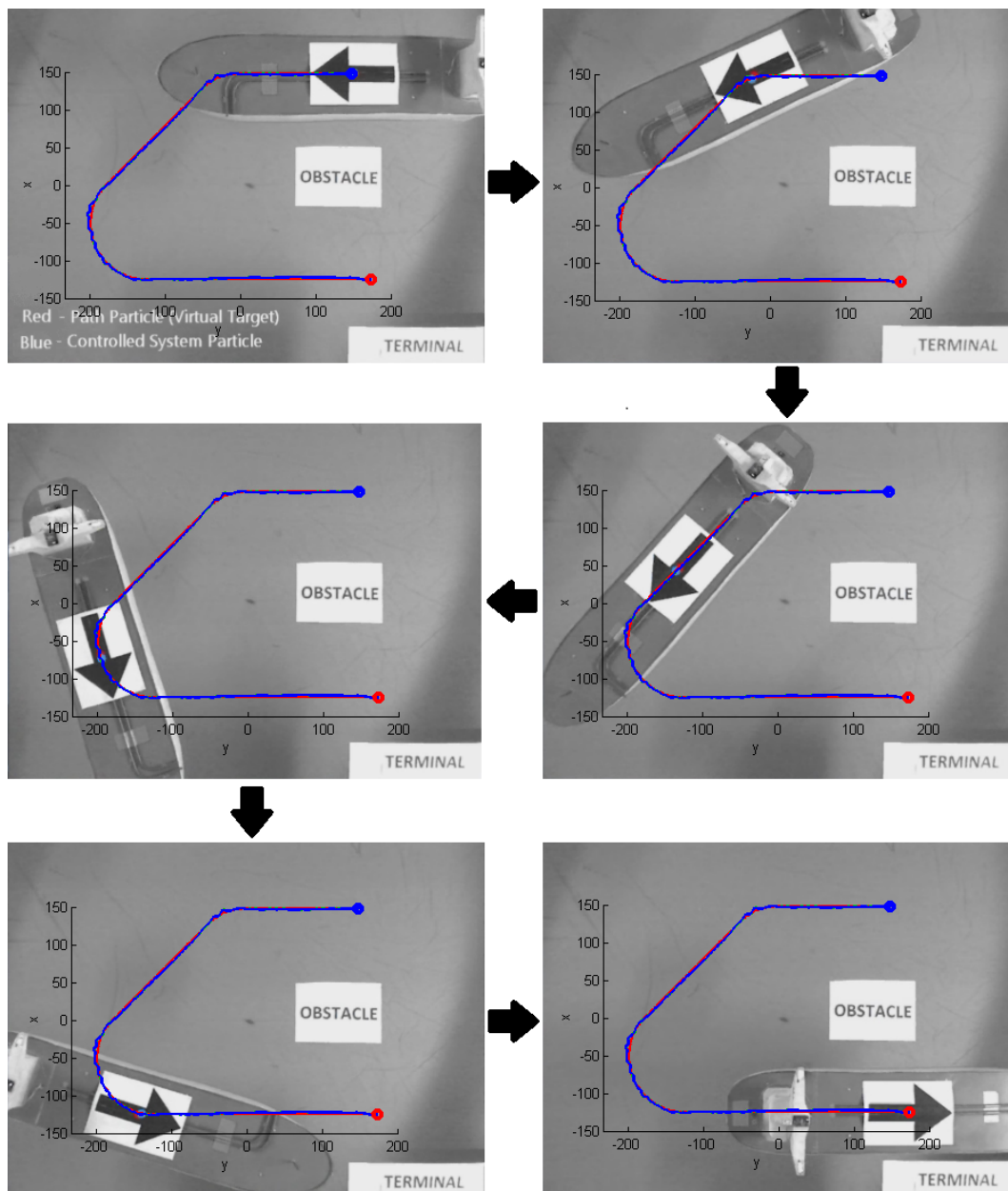


Slika 9.17: Sile i momenti broda tijekom pristajanja uz platformu

### 9.4.2. Pristajanje broda slijeđenjem putanje

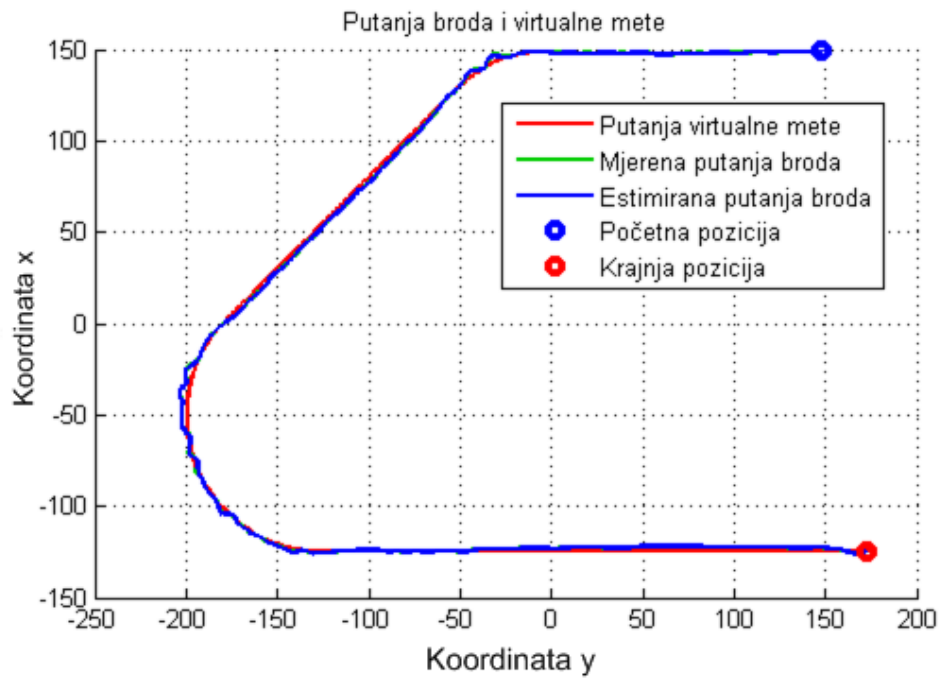
Ako se razmatra slučaj da u okolini broda i terminala ili platforme postoje neke prepreke npr. svjetionik, lukobran ili drugi brod, tada se dinamičko pozicioniranje ne može koristiti za pristajanje broda uz terminal jer se njime ne definira put kojim se brod treba kretati. Na taj način ne može se garantirati da neće doći do sudara broda i ostalih objekata. U ovom eksperimentu je demonstrirano pristajanje modela broda uz naftni terminal u slučaju da se na putu nalazi prepreka. Tijek eksperimenta iz perspektive kamere iznad bazena prikazan je na slici 9.18. Kao i ranije, obradom slike iz kamere određuje se pozicija i orijentacija broda i platforme u bazenu. Za praćenje putanje korišten je algoritam virtualne mete prilagođen za upravljanje svim stupnjevima slobode detaljno opisan u poglavlju 9.1.

Željena putanja broda sastavljena je od pravaca i kružnih lukova. Po pravcima je referentna unaprijedna brzina kretanja veća nego pri kretanju po kružnom luku. Prije prelaska na kružni luk, potrebno je usporiti, nakon čega brod može ponovo ubrzati. Na taj način dolazi do izražaja svojstvo da se pri slijeđenju putanje dinamika slijeđenja može mijenjati bez obzira na samu putanju, što omogućuje automatsku adaptaciju broda putanji npr. brzina kretanja plovila se smanjuje porastom zakrivljenosti putanje i regulacijskog odstupanja.

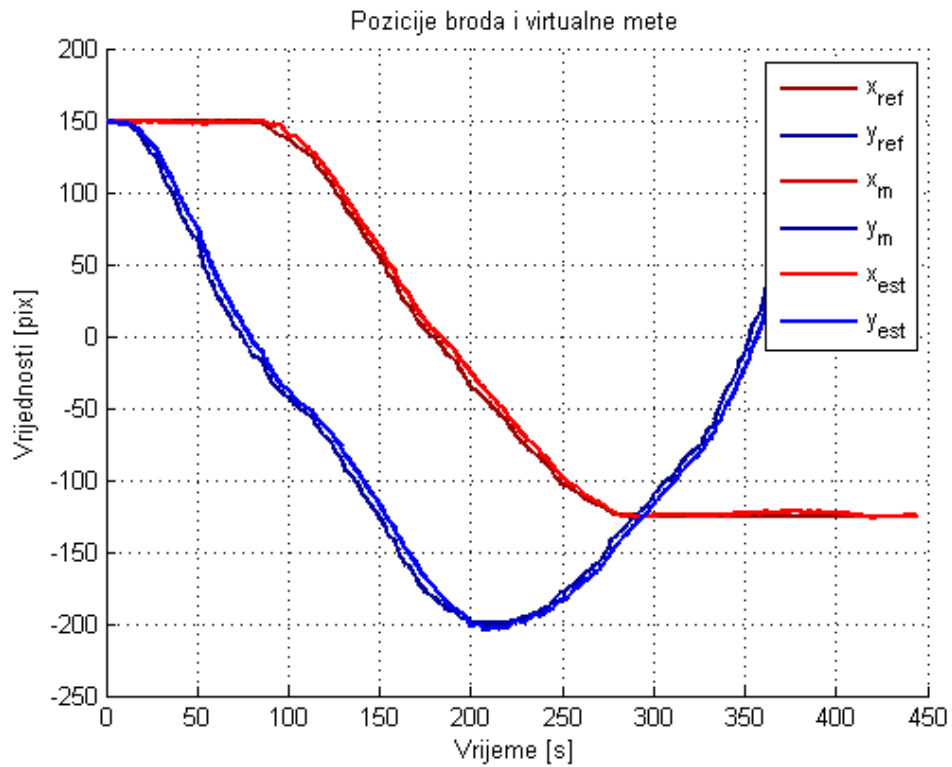


**Slika 9.18:** *Pristajanje broda s preprekom uz terminal slijeđenjem putanje*

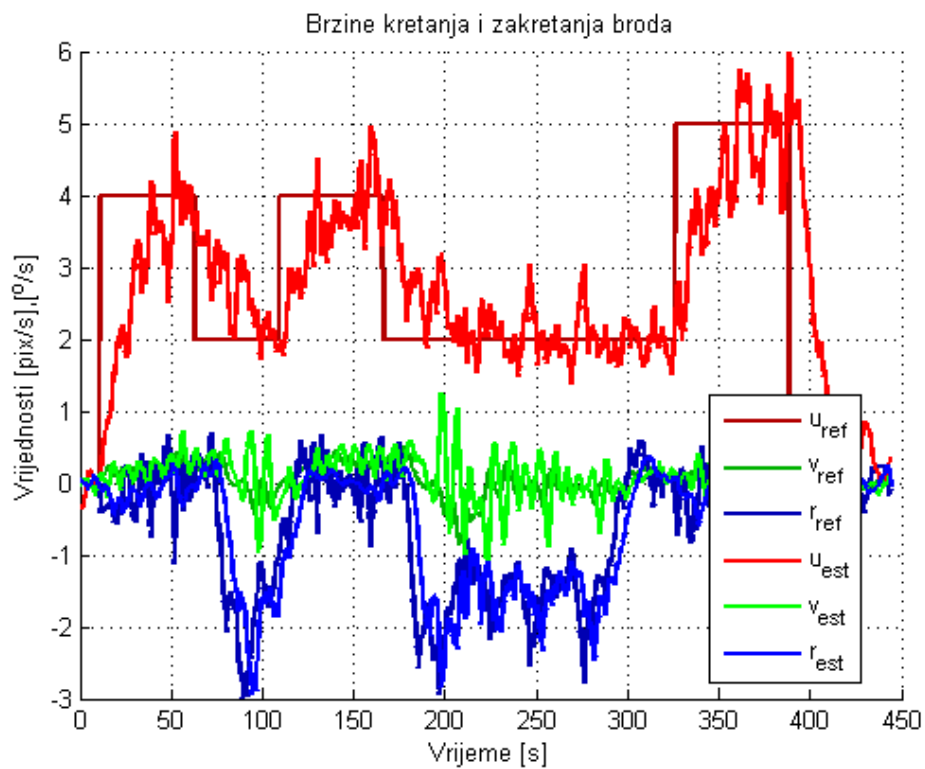
Putanja broda i virtualne mete prikazana je na slici 9.19, dok su pozicije broda i virtualne mete u vremenu prikazane na slici 9.20. Sa slika se može zaključiti da brod vrlo dobro prati definiranu putanju. Na slici 9.21 su prikazane referentne brzine kao i estimirane brzine broda. Može se primjetiti da I-P regulatori brzine broda vrlo dobro prate referentne vrijednosti. Greške slijeđenja prikazane su na slici 9.22. Može se zaključiti da se brod nikad ne udaljava od virtualne mete za više od 20 piksela.



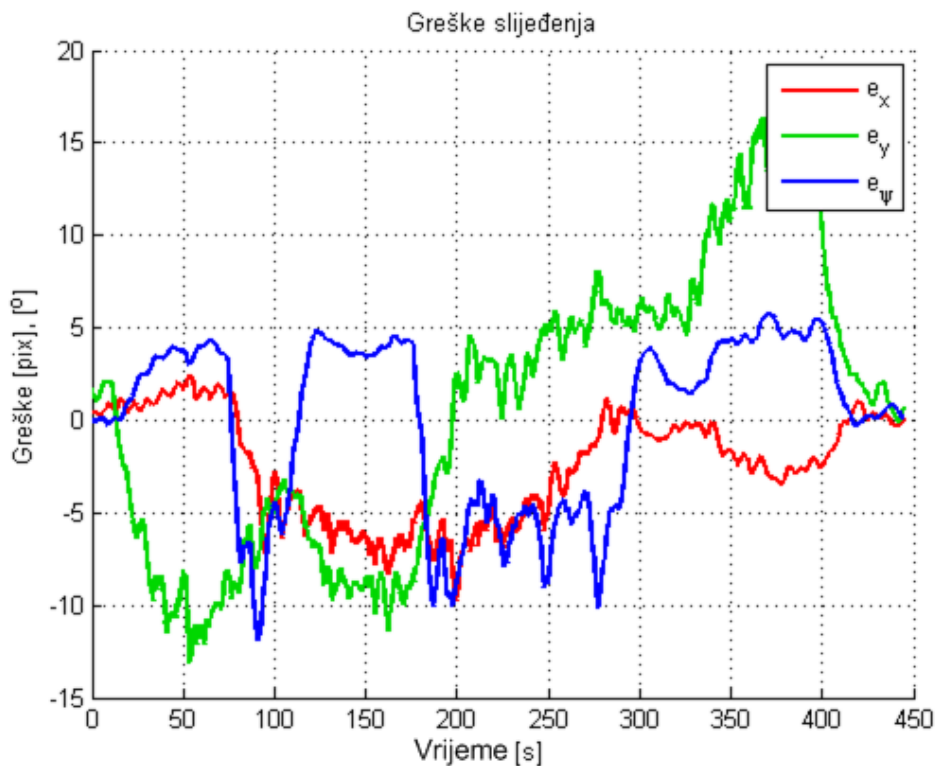
Slika 9.19: Putanja broda i virtualne mete



Slika 9.20: Referentne pozicije i estimirana pozicija broda pri slijeđenju putanje



Slika 9.21: Referentne brzine i estimirane brzine broda pri slijeđenju putanje



Slika 9.22: Regulacijska odstupanja kod slijeđenja putanje

## 10. Zaključak

Upravljanje gibajućim plovnim objektima predstavlja izazov za svakog automatičara zbog njihovog složenog matematičkog modela kao i nepredvidljive okoline. U ovom radu predanom na natječaj za dodjelu rektorove nagrade u akademskoj godini 2011./2012. opisane su različite metode vođenja i upravljanja plovilima. Plovila opisana u ovom radu su u potpunosti izgrađena unutar SuZ-FER-LAPOST-a i korištena su za testiranje projektiranih sustava upravljanja. Treba naglasiti da naš interes nije bio vođen željom da sagradimo plovila po pravilima hidrodinamike i brodogradnje, već je bio zadatak doći do plovila s kojima će se moći obaviti eksperimentalna provjera različitih algoritama vođenja i upravljanja. Poseban naglasak je stavljen na cijenu gradnje takvih sustava. Izgrađena su potpuno autonomna plovila sa svim potrebnim funkcionalnim karakteristikama. U tom smislu rad je uspješno priveden kraju i zaokružena je cijelina. Okosnicu ovog rada čine dobiveni eksperimentalni rezultati na realnim plovilima kao i simulacijski rezultati nad matematičkim modelima. Izloženi su eksperimentalni rezultati za identifikaciju parametara temeljem vlastitih oscilacija:

- identifikacija stupnja slobode napredovanja za PlaDyPos i CyberShip
- identifikacija stupnja slobode zanošenja za PlaDyPos i CyberShip
- identifikacija stupnja slobode zaošijanja za PlaDyPos i CyberShip

Također, prikazani su eksperimentalni rezultati za različite metode vođenja i upravljanja plovilima:

- slijeđenje linije za površinsku platformu PlaDypos
- dinamičko pozicioniranje za CyberShip
- praćenje trajektorije i putanje za CyberShip

Kako je rad evaluirao u njega je uključeno i koordinirano i kooperativno upravljanje. Uključeni su eksperimentalni rezultati koji obuhvaćaju korištenje virtualne mete za ostvarivanje slijeđenja putanje. Prikazani su simulacijski rezultati koji opisuju djelovanje sustava koji se sastoji od više plovila:



- slijeđenje putanje na temelju virtualnog cilja za Cyberhip
- slijeđenje plovila - simulacijski rezultati
- koordinirano gibanje - simulacijski rezultati

Rad završavamo s razvijanjem jedne nove metode vođenja. Pristajanje broda u luci ili tik uz naftnu platformu pobuđuje interes za razvoj algoritama za što sigurniji, brži prilaz. Stoga su brod CyberShip i platforma PlaDyPos iskorišteni za testiranje algoritama prilaznja i održavanja pozicije. Opisane su dvije metode pristajanja, svaka sa svojim specifičnostima i priloženi su eksperimentalni rezultati.

Glavni značaj ovog rada autori vide u narednom:

- proveden je postupak identifikacije hidrodinamičkog koeficijenta otpora i inercijskog koeficijenta na temelju upotrebe vlastitih oscilacija.
- Dobivena je eksperimentalna potvrda teorije razrađene za postupak slijeđenja linije te su pokazani rezultati.
- Razvijen i potvrđen je novi algoritam dinamičkog pozicioniranja pogodan za korištenje CyberShip broda.
- Dobiveni su eksperimentalni rezultati praćenja putanje brodom te je koncept proširen manevrom pristajanja uz platformu ili terminal u luci. Ovo je trenutno aktualno područje pa se očekuje pojačano istraživanje u tom pravcu.

# LITERATURA

- [1] *Predavanja - Automatsko upravljanje*, chapter 21 - Dodatne funkcije u PID regulatoru. 2009.
- [2] *Predavanja - Računalno upravljanje sustavima*, chapter 6: Analitički postupci sinteze upravljanja. 2009.
- [3] K. J. Åstrom and Hagglund. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Proc. of the NGCUV'08 Conference*, 20:645, 1984.
- [4] M. Bibuli. *Advanced guidance techniques and mission Control Architectures Development Towards Marine Robotic Systems Enhancement*. PhD thesis, University of Genova, Faculty of Engineering, 2010.
- [5] M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, and L. Lapiere. Path-following algorithm and experiments for an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009.
- [6] M. Bibuli, M. Caccia, and L. Lapiere. Virtual target based coordinated path-following for multi-vehicle systems. Technical report, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microelectronique de Montpellier, 2009.
- [7] M. Bibuli, O. Parodi, and L. Lapiere. Vehicle-following guidance for unmanned marine vehicles. Technical report, CNR-CNRS bilateral agreement "Coordinated mission control for autonomous marine vehicles, 2010.
- [8] E. Borhaug, E. Pavlov, R. Ghabcheloo, Pettersen K. Y., A. Pascal, and C. Silvestre. *Formation Control of Underactuated Marine Vehicles With Communication Constraints*. Dept. of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology and Dept. Electrical Engineering of Lisbon, Portugal.

- [9] M. Breivik. *Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, 2010.
- [10] M. Breivik and I. T. Fossen. *Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles*. Norwegian University of Science and Technology, Centre for Ships and Ocean Structures, 2008.
- [11] M. Collu, H. M. Patel, and F. Trorieux. *The longitudinal static stability of an aerodynamically alleviated marine vehicle, a mathematical model*. Proceedings of The Royal Society, 2009.
- [12] T. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, Chichester, New York, 1994.
- [13] B. M. Greytak. *High Performance Path Following for Marine Vehicles Using Azimuthing Podded Propulsion*. Massachusetts Institute of Technology, February 2006.
- [14] N. Jenssen and B. Realfsen. *Power Optimal Thruster Allocation*. Dynamic positioning conference, October, 2006.
- [15] L. Lionel and D. Soetanto. Nonlinear path-following control of an auv. *Science Direct, Elsevier*, 2006.
- [16] A. Micaelli and C. Samson. Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots. Technical report, Unite´ de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 1993.
- [17] N. Mišković. *Bespilotne ronilice - identifikacija i upravljanje*. Kvalifikacijski doktorski ispit, 2007.
- [18] N. Mišković. *Use of self-oscillations in guidance and control of marine vessels*. PhD thesis, University of Zagreb Faculty of electrical engineering and computing, 2010.
- [19] N. Mišković, M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, and Z. Vukić. *Tuning marine guidance controllers through self-oscillation experiments*. Proceedings of IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, 2009.
- [20] N. Mišković, Đ. Nađ, and Z. Vukić. *Guidance of Laboratory Platforms*. Proceedings of MIPRO Conference, 2010.

- [21] N. Mišković, Đ. Nađ, Z. Vukić, and B. Marszalek. *Laboratory Platforms for Dynamic Positioning - Modeling and Identification*. Proceedings of OCEANS Conference, 2010.
- [22] N. Miskovic. *Guidance and control of marine vehicles by use of self-oscillations*. PhD thesis, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, Croatia, 2010.
- [23] A. Packard. *Saturation and Antiwindup Strategies*. Mechanical Engineering Magazine Nr.132, UC Berkley, 2005.
- [24] T. Pérez and M. Blanke. Mathematical ship modeling for marine applications. *Technical Report, Automation at Ørsted DTU, Technical University of Denmark*, April, 2002.
- [25] N. Stilinović, N. Mišković, Đ. Nađ, and Z. Vukić. Testing and technical characteristics of a small overactuated marine platform. *in press, Proceedings of MIPRO'12 Conference*, 2012.
- [26] Z. Vukić and Lj. Kuljača. *Automatsko upravljanje - analiza linearnih sustava*. Kigen, Zagreb, 2004.
- [27] Z. Vukic, Lj. Kuljaca, D. Donlagic, and S. Tesnjak. *Nonlinear Control Systems*. Marcel Dekker, New York, 2003.

# POPIS SLIKA

2.1.	<i>Definirani koordinatni sustavi</i>	4
2.2.	<i>Blok dijagram matematičkog modela</i>	5
2.3.	<i>Alokacija propulzora i a-priori kompenzacija</i>	6
2.4.	<i>Platforma i X-konfiguracija propulzora</i>	8
2.5.	<i>CyberShip i njegova konfiguracija propulzije</i>	9
3.1.	<i>PlayDyPos autonomna platforma na jezeru Jarun u Zagrebu</i>	14
3.2.	<i>Proces nastajanja platforme</i>	15
3.3.	<i>Shematska reprezentacija hardverske infrastrukture</i>	16
3.4.	<i>Potisnik tvrtke Seabotix</i>	16
3.5.	<i>a) SBC b) sBRIO</i>	17
3.6.	<i>LS20030 GPS modul</i>	18
3.7.	<i>AirLive AirMax2 bežični modul</i>	19
3.8.	<i>Sučelje za pogon motora i napajanje opreme</i>	20
3.9.	<i>Baterija korištena za napajanje platforme</i>	20
3.10.	<i>Skica modela tankera klase Panamax</i>	21
3.11.	<i>Brod na jarunskom jezeru</i>	22
3.12.	<i>Sustav kormila</i>	23
3.13.	<i>Načelna struktura elektronike</i>	24
3.14.	<i>Elektronika broda</i>	25
3.15.	<i>GPS LS20031, kompas HMC6352, HIP4082 Driver</i>	25
3.16.	<i>Usmjerivač snage</i>	26
3.17.	<i>XbeePro komunikacijski modul</i>	27
4.1.	<i>Eksperiment mapiranja potisnika</i>	29
4.2.	<i>Mapirani potisci prema nazad i naprijed</i>	30
4.3.	<i>Mapa potisnika</i>	31
4.4.	<i>Poopćena struktura zatvorenog kruga za pobuđivanje vlastitih oscilacija</i>	32

4.5.	<i>Pobuda i odziv platforme pri identifikaciji parametara zaošijanja . . . .</i>	33
4.6.	<i>Pobuda i odziv platforme pri identifikaciji parametara napredovanja . . . .</i>	35
4.7.	<i>Blok shema identifikacije zaošijanja . . . . .</i>	38
4.8.	<i>Pobuda i odziv broda pri identifikaciji parametara zaošijanja . . . . .</i>	38
4.9.	<i>Blok shema identifikacije napredovanja i zanošenja . . . . .</i>	40
5.1.	<i>Poopćeni sustav upravljanja s Kalmanovim filtrom . . . . .</i>	42
5.2.	<i>Stvarna putanja (lijevo) i estimirana (desno) . . . . .</i>	50
5.4.	<i>Stvarna vrijednost y koordinate kroz vrijeme i estimirana vrijednost . . . . .</i>	50
5.3.	<i>Stvarna vrijednost x koordinate kroz vrijeme i estimirana vrijednost . . . . .</i>	51
6.1.	<i>Koncept slijeđenja linije . . . . .</i>	53
6.2.	<i>Slijeđenje linije . . . . .</i>	56
6.3.	<i>Konačni automat i veza s linijama . . . . .</i>	57
6.4.	<i>Kontrolirane sile kod praćenja linije . . . . .</i>	57
6.5.	<i>Zatvorena petlja upravljanja za slijeđenje linije . . . . .</i>	59
6.6.	<i>Normirane prijelazne funkcije za binomne oblike . . . . .</i>	60
6.7.	<i>I-PD regulator s anti-windup mehanizmom . . . . .</i>	61
6.8.	<i>Struktura I-PD regulatora s uvjetnim integriranjem . . . . .</i>	63
6.9.	<i>Test 1) - praćenje okomite linije . . . . .</i>	66
6.10.	<i>Regulacijsko odstupanje tokom eksperimenta . . . . .</i>	67
6.11.	<i>Upravljački signal tokom eksperimenta . . . . .</i>	68
6.14.	<i>Ostvarena putanja platforme tokom eksperimenta . . . . .</i>	68
6.12.	<i>Odziv orijentacije platforme tokom eksperimenta . . . . .</i>	69
6.15.	<i>Regulacijsko odstupanje tokom eksperimenta . . . . .</i>	69
6.13.	<i>Ostvarena putanja platforme tokom eksperimenta . . . . .</i>	70
6.16.	<i>Upravljački signal tokom eksperimenta . . . . .</i>	71
6.17.	<i>Upravljački signal tokom eksperimenta . . . . .</i>	71
6.18.	<i>Upravljački signal tokom eksperimenta . . . . .</i>	72
6.19.	<i>Shema upravljanja DP . . . . .</i>	74
6.20.	<i>Odzivi na promjenu referentnog kuta za 45° . . . . .</i>	76
6.21.	<i>Odzivi na promjenu referentnog kuta za 90° . . . . .</i>	77
6.22.	<i>Putanja broda tijekom dinamičkog pozicioniranja prema točki (100,100) . . . . .</i>	78
6.23.	<i>Odzivi na promjenu referentne pozicije za (100,100) pix . . . . .</i>	79
6.24.	<i>Promjena kuta tijekom dinamičkog pozicioniranja . . . . .</i>	79
6.25.	<i>zatvoreni regulacijski krug . . . . .</i>	80
6.26.	<i>Putanja broda tijekom praćenja trajektorije . . . . .</i>	83

6.27. Odzivi pozicije broda pri praćenju trajektorije . . . . .	84
6.28. Odzivi brzina broda pri praćenju trajektorije . . . . .	84
6.29. Odzivi upravljačkih signala pri praćenju trajektorije . . . . .	84
7.1. Koncept slijeđenja putanje i definirani koordinatni sustavi . . . . .	86
7.2. Ograničenost početnih uvjeta maksimalnom zakrivljenošću krivulje . . . . .	89
7.3. Reprezentativna shema sustava upravljanja . . . . .	92
7.4. I-P regulator . . . . .	93
8.1. Definicija udaljenosti pri praćenju plovila . . . . .	97
8.2. Strukturna shema kooperativnog upravljanja . . . . .	97
8.3. Hijerarhijski sustav i definirane udaljenosti po putanji . . . . .	99
8.4. Primjer formacije plovila sa različitim putanjama . . . . .	100
8.5. Poopćeni wingman problem . . . . .	100
9.1. Putanje broda i virtualne mete . . . . .	103
9.2. Putanje broda i virtualne mete . . . . .	104
9.3. Odziv pozicije broda pri praćenju virtualne mete . . . . .	104
9.4. Odziv orijentacije broda pri praćenju virtualne mete . . . . .	105
9.5. Odziv pozicije broda pri praćenju virtualne mete . . . . .	105
9.6. Odziv brzina broda pri praćenju virtualne mete . . . . .	106
9.7. Odziv sila broda pri praćenju virtualne mene . . . . .	107
9.8. Putanje plovila tijekom simulacije . . . . .	108
9.9. Odziv pogreške udaljenosti . . . . .	109
9.10. Razmak plovila tijekom simulacije . . . . .	109
9.11. Brzine napredovanja plovila za vrijeme simulacije . . . . .	110
9.12. Ostvarene putanje plovila tijekom simulacije . . . . .	110
9.13. Brzine napredovanja plovila za vrijeme simulacije . . . . .	111
9.14. Pristajanje broda uz platformu dinamičkim pozicioniranjem . . . . .	112
9.15. Odzivi pozicija broda tijekom pristajanja uz platformu . . . . .	113
9.16. Odzivi brzina broda tijekom pristajanja uz platformu . . . . .	114
9.17. Sile i momenti broda tijekom pristajanja uz platformu . . . . .	114
9.18. Pristajanje broda s preprekom uz terminal slijeđenjem putanje . . . . .	116
9.19. Putanja broda i virtualne mete . . . . .	117
9.20. Referentne pozicije i estimirana pozicija broda pri slijeđenju putanje . . . . .	117
9.21. Referentne brzine i estimirane brzine broda pri slijeđenju putanje . . . . .	118
9.22. Regulacijska odstupanja kod slijeđenja putanje . . . . .	118

# POPIS TABLICA

1.	Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu . . . . .	iv
2.1.	Notacija koja se koristi kod plovila . . . . .	4
3.1.	Neke karakteristike platforme . . . . .	15
3.2.	Podatci primljeni s USBL modula . . . . .	18
3.3.	Primjer NMEA poruke s kompasa . . . . .	19
3.4.	Pregled ASCII simbola i njihovo značenje . . . . .	20
3.5.	Parametri serijskog porta broda . . . . .	27
4.1.	Interpolirajuće mapirajuće funkcije . . . . .	30
4.2.	Formule za određivanje nepoznatih parametara primjenom IS-O metode korištenjem releja s histerezom . . . . .	32
4.3.	Rezultati IS-O metode za stupanj zaošijanja . . . . .	34
4.4.	Rezultati IS-O metode za stupanj napredovanja . . . . .	36
4.5.	Rezultati IS-O metode za stupanj napredovanja . . . . .	37
4.6.	Rezultati IS-O stupnja slobode zaošijanja koristeći kormilo. . . . .	39
5.1.	Jednadžbe Kalmanova filtra (EKF) . . . . .	45
5.2.	Jednadžbe Kalmanova filtra (EKF) . . . . .	49
6.1.	Parametri . . . . .	62



## Napredne metode vođenja i upravljanja autonomnim plovilima

### Sažetak

Podvodna robotika puna je izazova i u novije vrijeme brzo se razvija zbog potrebe istraživanja podmorja i praćenja stanja u podmorju kako zbog rudnih bogatstava tako i zbog klimatskih promjena. Nadziranje luka, plovnih puteva, mjerenje kvalitete mora, inspekcija podvodnih objekata samo su neke od zadaća koje autonomno plovilo može obavljati; brže, sigurnije i jeftinije od čovjeka. Ovim radom željelo se postići nekoliko ciljeva od kojih je najvažniji cilj bio sagraditi autonomna plovila odgovarajućih karakteristika (model tankera CyberShip i autonomna površinska platforma PlaDyPos) kako bi se s njima moglo obavljati testiranja novih algoritama vođenja i upravljanja. U radu su za te potrebe obavljene identifikacije parametara matematičkih modela plovila, na simulacijama i u realnim uvjetima testirani su algoritmi vođenja i upravljanja (praćenje linije, koordinirano upravljanje, dinamičko pozicioniranje, automatsko pristajanje, plovidba u formaciji). Plovila su u potpunosti izrađena u Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo (SuZ-FER-LAPOST). Plovila su opisana popćenim matematičkim modelom koji je pogodan za sintezu upravljačkih algoritama. Implementacija Kalmanovog filtra pridonijela je povećanju preciznosti pri npr. dinamičkom pozicioniranju. Identifikacijom parametara temeljem metode vlastitih oscilacija dobiveni su matematički modeli potrebni za različite metode vođenja i upravljanja plovilima: slijeđenje linije, dinamičko pozicioniranje, praćenje trajektorije i putanje. Osim vođenja i upravljanja plovilima individualno, obrađeno je i koordinirano te kooperativno upravljanje za ostvarivanje: slijeđenja putanje na temelju virtualnog cilja, slijeđenja plovila, simulacijski rezultati koordiniranog gibanja. Glavni znanstveni doprinos ovog rada leži u sljedećem: proveden je postupak identifikacije sustava pomoću vlastitih oscilacija, dobivena je eksperimentalna potvrda teorije slijeđenja linije te su prikazani rezultati, razvijen i potvrđen je novi algoritam dinamičkog pozicioniranja pogodan za korištenje CyberShip broda, dobiveni su eksperimentalni rezultati praćenja putanje brodom te je koncept proširen manevrom pristajanja uz platformu ili terminal u luci. Ovo je aktualno područje pa se očekuje pojačano istraživanje u tom pravcu.

Autori: Nikola Stilinović, Zoran Triska, Viktor Vladić

**Ključne riječi:** autonomna bespilotna plovila, dinamičko pozicioniranje, koordinirano upravljanje, kooperativno upravljanje, praćenje putanje

## **Advanced methods of guidance and control of the autonomous vessels**

### **Abstract**

Underwater robotics is full of challenges and recently is fast developing due to the need of underwater research and monitoring due to climate changes and mineral resources. Surveillance of ports or channels, examination of sea and lake quality, inspection of underwater facilities are just some of the tasks that autonomous vessel can perform; faster, safer, and cheaper than a man. With construction and identification of the vessels, authors of this paper wish to present the most important methods in guidance and control of autonomous surface vessels. For this purpose, two vessels were made: a model of tanker named CyberShip and autonomous surface platform PlaDyPos. The vessels are fully developed at the Laboratory for Underwater Systems and Technology, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Department of Control and Computer Engineering (UNIZG-FER-LABUST). Vessels are described with generalized mathematical model that is suitable for the synthesis of control algorithms. Implementation of the Kalman filter contributed to the increase of accuracy in, e.g. dynamic positioning. With parameter identification based on method of self-oscillation, mathematical models required for different methods of guidance and control of vessels were obtained: path following for autonomous surface platform PlaDyPos, dynamic positioning for tanker CyberShip, trajectory tracking for tanker CyberShip. In addition to individual guidance and control, coordinated and cooperative control is presented for: trajectory tracking based on virtual target method for tanker CyberShip vessel tracking, simulation results for coordinated motion. The main scientific contribution of this work is in following: the procedure of identification of hydrodynamic coefficient of resistance and inertia coefficient based on the use of self-oscillation is implemented, the experimental confirmation of the theory developed for the process of line following is obtained, new algorithm of dynamic positioning suitable for tanker CyberShip is developed and validated, experimental results of trajectory tracking were obtained and the concept is extended with docking maneuver along platform or terminal in the port, increased research in this direction is expected.

Authors: Nikola Stilinović, Zoran Triska, Viktor Vladić

**Keywords:** autonomous unmanned vessels, dynamic positioning, coordinated guidance, cooperative control, path following