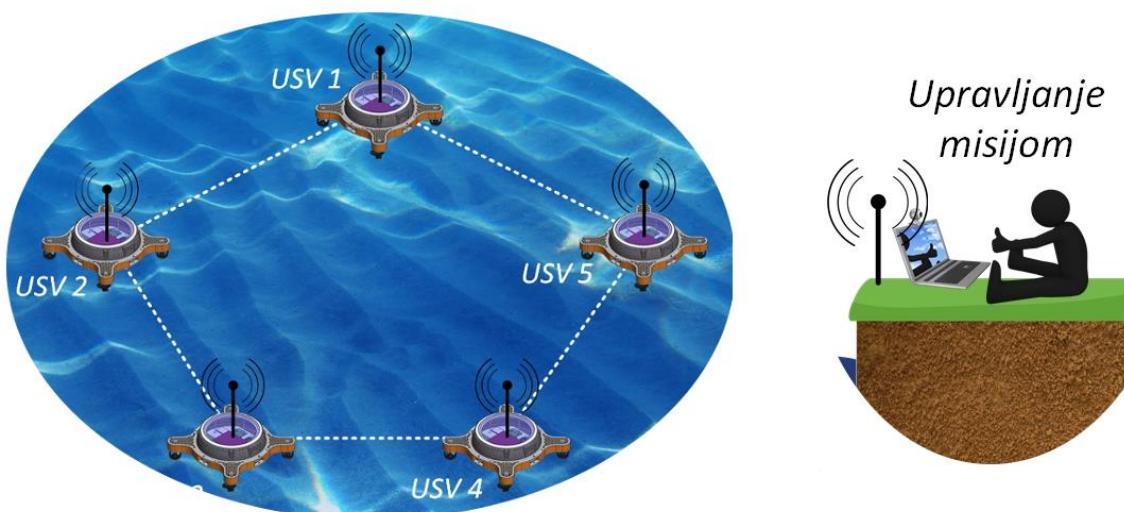




D3.4 Okolišno-adaptivan algoritam za distribuirano upravljanje formacijom



Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije



FER



10. prosinca 2021.

Sadržaj

Uvod	2
Okolišno-adaptivno ponašanje	3
Simulacijska CFD analiza platforme PlaDyPos	4
Algoritam upravljanja formacija s adaptacijom na morske struje	7
Zaključak	10
Reference	11

Uvod

Nadzor podmorja je značajna tema istraživanja posljednjih godina. Podmorje je slabo istraženo područje. Klimatske promjene koje se događaju u današnje vrijeme imaju značajan utjecaj na podvodni ekosustav. Procesi koji se odvijaju u prirodi su najčešće sporo mijenjajući procesi koji zahtijevaju dugoročni nadzor. Stoga, autonomni sustavi za nadzor mora trebaju dugoročnu autonomiju kako bi uspješno prikupili informacije o fenomenima koji se u prirodi javljaju. Za potrebe dugoročnog nadzora se u praksi koriste staticki postavljeni sustavi na lokacije gdje nadzor kemijskih ili fizikalnih veličina može dovesti do novih otkrića. Ovakav pristup nije prikladan za autonomno istraživanje koje po svojoj prirodi zahtjeva mobilnost robota.

Tijekom provodenja dugotrajnih eksperimenata na moru je također potrebno štediti energiju kako ne bi utjecali na uspješnost izvođenja istog. Vanjski faktori koji utječu na potrošnju čak i u stanju mirovanja mogu biti vjetar, morska struja i valovi. Značajnost njihovog utjecaja ovisi o veličini i izgledu plovila. Ukoliko je lokacija sustava na nepristupačnoj lokaciji, zamjena pogonskih baterija predstavlja problem.

Autonomni sustavi imaju limitirani energetski kapacitet koji se može produljiti na mnoštvo načina. Povećanjem energetskog budžeta, iskorištavajući energiju iz okoline (solarna energija, energija valova), usidravanjem (morsko dno ili fiksne strukture) ili optimiziranjem potrošnje energije. Povećanje energetskog budžeta rezultira povećanjem ukupne mase plovila što otežava gibanje ili održavanje pozicije te zahtjeva nekada nemoguću modifikaciju postojećih plovila. Iskorištavanje solarne energije ili energije iz valova omogućava plovilima punjenje baterije tijekom rada potencijalno ostvarujući potpunu autonomiju ako pohranjuje više energije nego troši, što najčešće nije slučaj. Iskorištavanje solarne energije dodatno ovisi o vremenskim prilikama i zahtjeva veliku površinu na koju se postavljaju solarni paneli. Za vrijeme nepovoljnih vremenskih uvjeta se javljaju jači vjetar, morske struje i valovi za vrijeme kojega je otežana plovidba na moru. Usidravanje vozila za morsko dno može pomoći pri održavanju pozicije pomorskog vozila. Praktičnost ovog pristupa ovisi o zadaći sustava i zahtjeva određenu prilagodbu vozila koja omogućava samo usidravanje. Jednostavan pristup smanjenju potrošnje energije može biti optimizacija potrošnje energije. Kroz optimiranje kretanja pojedinog vozila, gašenje sustava koji se ne koriste u trenutku, kooperaciju više vozila za ostvarenje koordiniranih zadataka možemo smanjiti potrošnju bez da nužno žrtvujemo performanse samog sustava i kao takvo se može lako primijeniti na sustav jer ne zahtjeva hardverske izmjene.

Kooperacija među pomorskim robotima je ključna kako bi se ostvarila dugoročna autonomija, rekonfigurabilnost i adaptacija na uvjete iz okoline, bilo to za pokrivanje većeg prostora, istraživanju teže pristupačnih lokacija ili postizanje redundancije na kvarove. Kao što je opisano u prethodnim izvještajima, sustav za nadzor i istraživanje se sastoji od pet autonomnih površinskih platformi za dinamičko pozicioniranje i

jednom bespilotnom ronilicom. Tijekom zarona podvodno vozilo gubi informaciju o apsolutnoj poziciji. Kooperacija među površinskim i podvodnim vozilima omogućava potpomognutu navigaciju za podvodna vozila kako bi poboljšala estimat pozicije dok nisu u dometu GNSS signala.

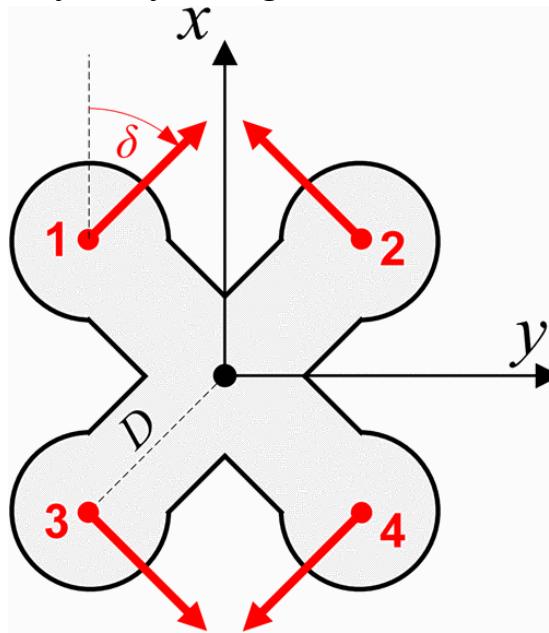
Okolišno-adaptivno ponašanje

Adaptacija na teške uvjete u okolišu je bila ključan faktor za evoluciju živih bića na zemlji. Za preživljavanje je bitno efektivno iskorištavati energiju. Iz tog razloga razni algoritmi koji optimiziraju efikasnost kretanja vuku inspiraciju iz prirode. Kao neki od primjera su ptice selice u letu [1], u letu održavaju takozvanu V formaciju kako bi se održavali u zoni uzdizanja zraka ptice efektivno smanjujući otpor zraka. Tijekom trajanja migracije se mijenjaju na vodećim pozicijama kako bi sve ptice bile na sličnoj razini energije. Patke na vodi plivajući jedna iza druge smanjuju otpor kretanja [2] kako bi mlađe patke s manjim energetskim kapacitetom mogle prevaliti isti put kao i starije patke. Vodeća patka generira valove iza sebe koje prateće patke gura naprijed. Jata riba održavaju formaciju [3] koja također smanjuje otpor vode i dozvoljava prelazak većih udaljenosti za cijelo jato. Svi ovi primjeri pokazuju kroz kooperaciju među jedinkama kolektiv smanjuje potrošnju energije.

U izvještaju D3.3 je demonstriran algoritam upravljanja formacijom. Pokazano je kako algoritam uspješno održava željeni izgled formacije čak i pod utjecajem morskih struja i vjetra. Da bi se povećala autonomija želimo upravljati prostornom konfiguracijom plovila kako bi se ostvarila ušteda energije tijekom održavanja pozicije ili plovidbe. Postavljamo hipotezu da postavljanjem površinskih platformi u linijsku formaciju će za stražnja plovila (gledući iz smjera morske struje) štediti energiju. Ovu hipotezu postavljamo na temelju očekivanog turbulentnog toka koji se formira iza plovila tijekom vožnje. Turbulentni tok se manifestira uslijed hidrodinamički nesavršenog izgleda plovila. Kao metodologiju ćemo koristiti CFD analizu toka. Pretpostavljamo da će se uslijed generiranih turbulencija prekinuti laminaran tok morske struje te bi tok u području iza plovila efektivno trebao imati manju brzinu i time manju silu vršiti na pozadinska plovila.

Efekt koji može negativno utjecati na pobijanje ove hipoteze je povećanje brzine toka vode iza propulzora a time i iza plovila. Da bi se plovilo gibalo po površini mora (ili održavalo poziciju dok na plovilo djeluje morska struja) propulzori ubrzavaju tok vode koji prolazi kroz propulzor time generirajući potisak koji ovisi o razlikama tlakova ispred i iza propulzora. Postavljajući dodatan propulzor iza prvog orijentiranog u istom smjeru neće rezultirati dvostruko većim potiskom. Ovaj efekt se događa uslijed veće brzine ulaznog toka u drugi propulzor koji mora raditi većom brzinom kako bi postigao istu razliku tlakova, odnosno isti potisak. Utjecaj ove pojave će se nastojati umanjiti dobrim odabirom razmaka među plovilima tijekom održavanja pozicije.

Kao i u prethodnim izvještajima, kao površinska plovila se koriste platforme PlaDyPos. Vozila se gibaju pomoću propulzora raspoređenih u X konfiguraciju prikazanu slikom Slika 1. Ovakva konfiguracija omogućava gibanje u svim smjerovima pod bilo kojom orijentacijom (engl. *over-actuated*).



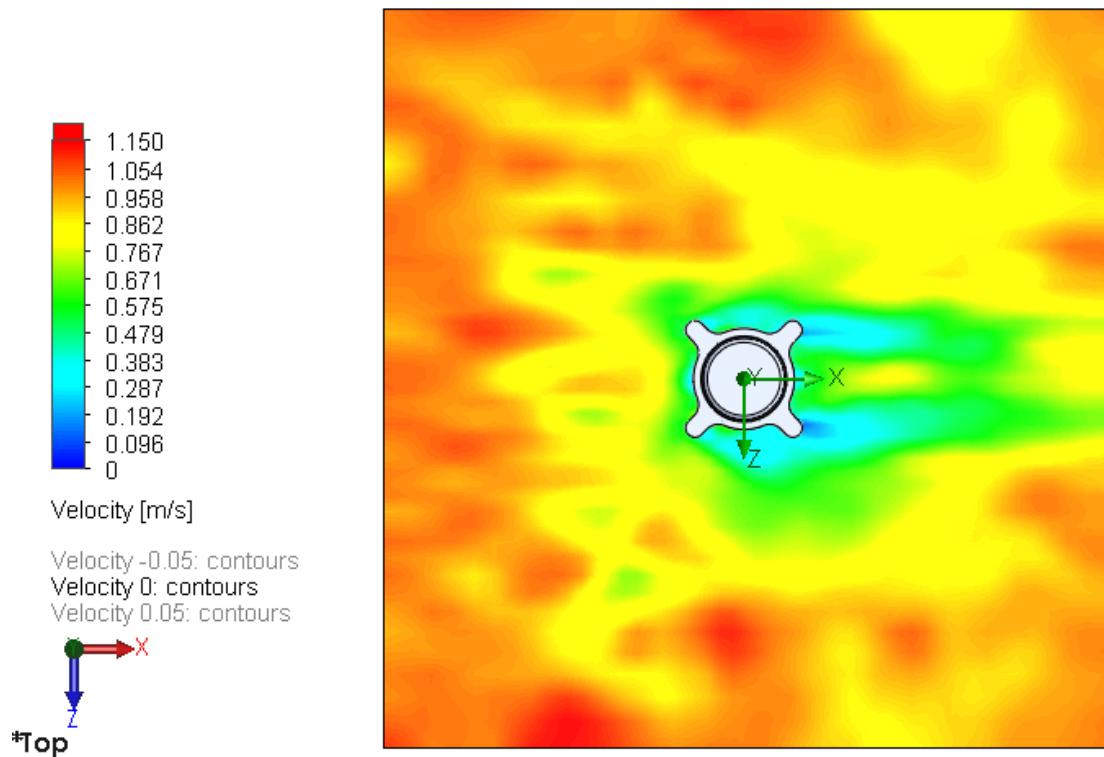
Slika 1. Tlocrt prostorne konfiguracije propulzora uz krak $D = 0.5\text{m}$ ia kut $\delta = 45^\circ$

Kao što je ranije spomenuto, prostorni razmještaj vozila uvelike utječe na povećanje ili smanjenje učinkovitosti sustava tijekom održavanja pozicije. U [1], [2], precizno pozicioniranje je ključno za iskorištavanje latentne energije sadržane u turbulencijama. Autori u [2] su primijetili da prateće patke pozicionirane u povoljnem razmaku faze vala štede energiju dok u nepovoljnoj troše dodatnu energiju kako bi se gibale istom brzinom. U [1], ptice iza sebe generiraju područja uzdizanja zraka (engl. *updraft*) i propadanja zraka (engl. *downdraft*) koje slijedeće ptice trebaju povoljno iskoristiti. Stoga je ključno pozicionirati plovila jedno iza drugog kako bi ostvarili smanjenje a ne povećanje potrošnje energije. Iz tog razloga smo odlučili analizirati tok vode kako bi mogli procijeniti na kojem razmaku što je prikazano u slijedećem poglavljju.

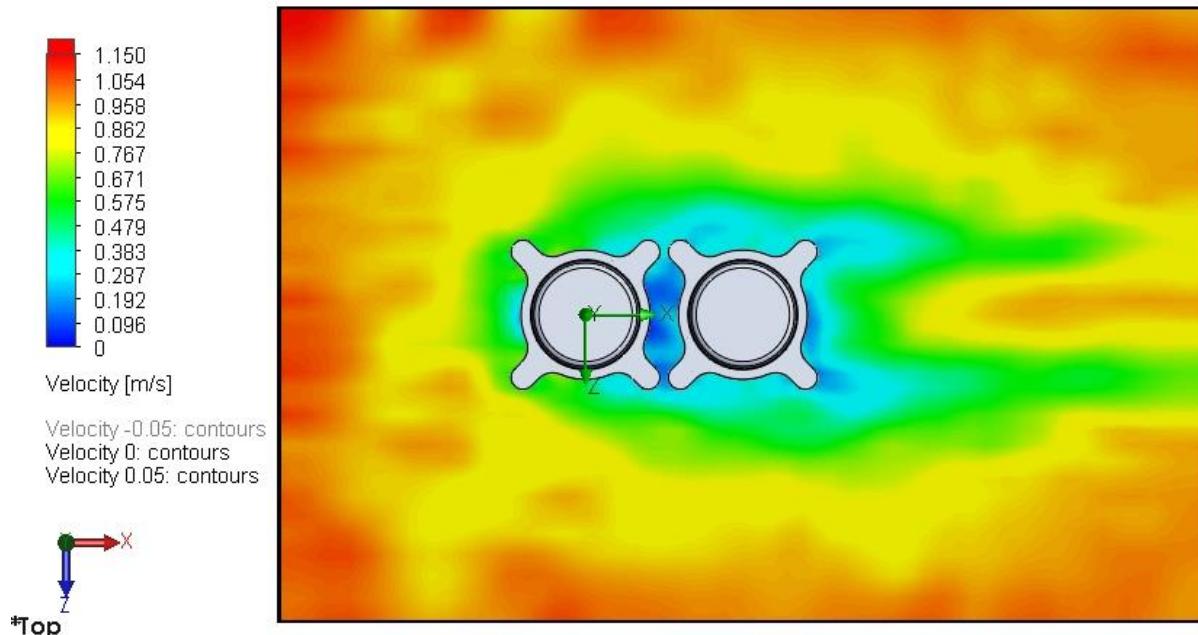
Simulacijska CFD analiza platforme PlaDyPos

Provedena je CFD (*computational fluid dynamics*) analiza za jedno i dva vozila postavljeno u homogeni strujni tok. Ovom analizom želimo otkriti kako utječe objekt (plovilo) na tok tekućine. Iznosi CFD analize su prostorni tlak u fluidu, prostorna brzina toka i sila koja djeluje na objekt zbog posljedica toka. Tok vode iza vozila daje informaciju o brzini struje vode koje djeluje na objekte iza njega. Što su veće turbulencije u toku, to je veća vjerojatnost da je efektivna brzina toka manja od brzine homogenog toka. Kao indikator smo koristili prosječnu силу kojom tok djeluje na objekt u stabilnom stanju. Unutar programskog paketa Solidworks je dostupan alat Flow Simulation koji omogućava CFD analizu 3D modela dizajniranih u 3D CAD

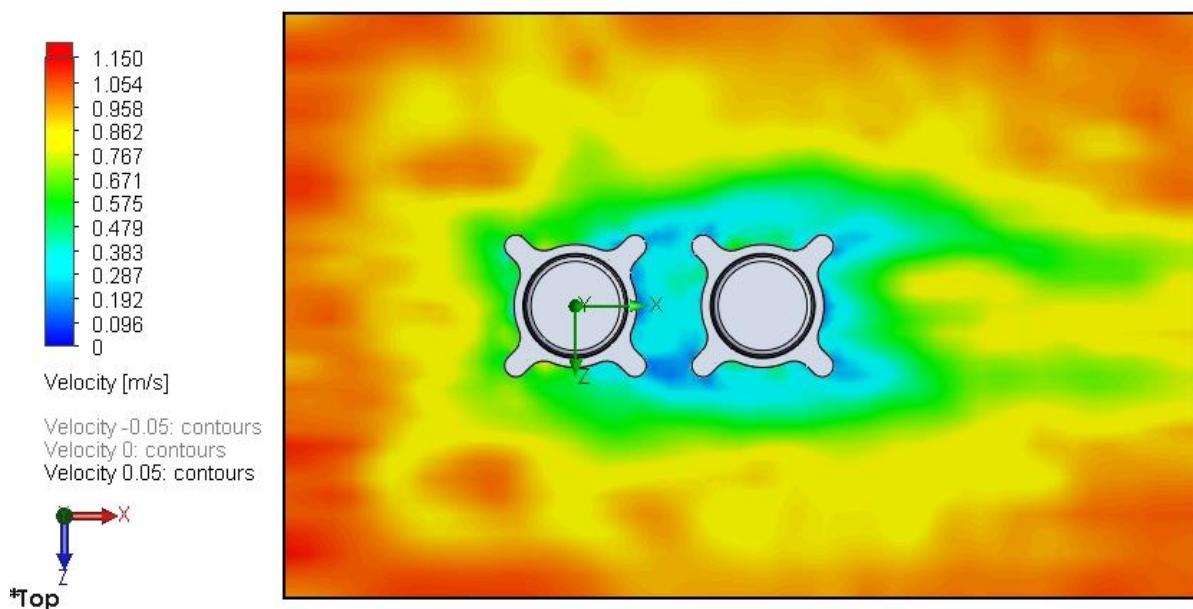
alatima. Za potrebe analize implementirali smo pojednostavljeni model plovila bez nepotrebnih dijelova koji otežavaju simulaciju. U ovakvoj konfiguraciji nije bilo moguće modelirati utjecaj propulzora kako bi proveli što vjerniju analizu.



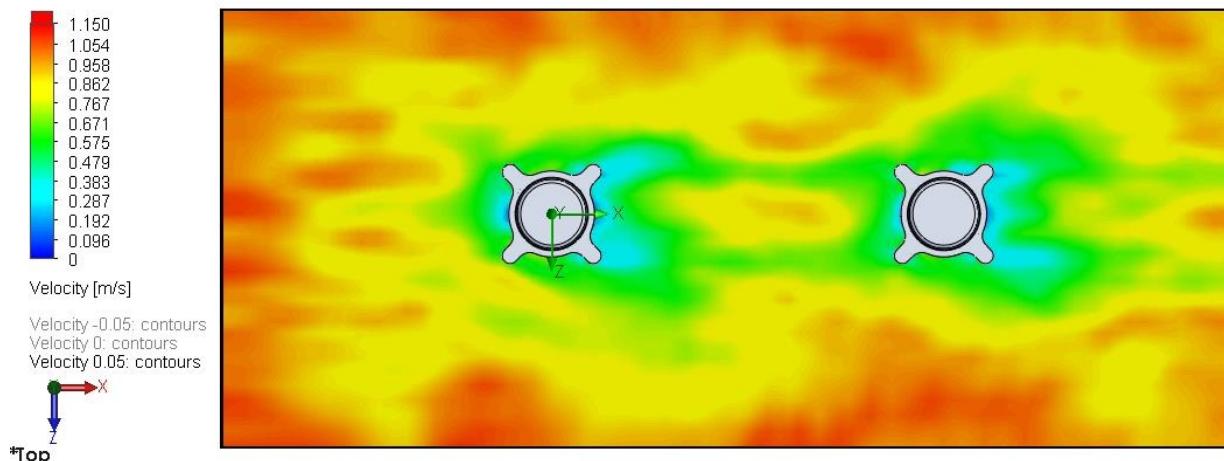
Slika 2. Analiza brzine toka vode oko jednog vozila za $|v_c| = 1\text{m/s}$ u smjeru pozitivne X osi



Slika 3. Analiza brzine toka vode oko dva vozila udaljena 0.8m uz $|v_c| = 1\text{m/s}$ u smjeru pozitivne X osi



Slika 4. Analiza brzine toka vode oko dva vozila udaljena 1.0m uz $|v_c| = 1\text{m/s}$ u smjeru pozitivne X osi



Slika 5. Analiza brzine toka vode oko dva vozila udaljena 3.0m uz $|v_c| = 1\text{m/s}$ u smjeru pozitivne X osi

Slike Slika 2-Slika 5 prikazuju rezultate CFD analize brzine toka fluida obavljene za različite prostorne konfiguracije dva površinska plovila. Platforme su postavljene u vodenim tok brzine $|v_c| = 1 \text{ [m/s]}$. Odabrane su prostorne konfiguracije kako slijedi: na slici Slika 2 je analiziran utjecaj jednog vozila u strujnom toku, na slici Slika 3 su prikazane dvije platforme udaljene dovoljno da ne utječu značajno jedna na drugu, na slici Slika 4 su prikazane dvije platforme udaljene 1m i na slici Slika 5 su prikazane platforme udaljene 0.8m što je najmanja udaljenost na kojoj bi one mogle stabilno održavati poziciju. Minimalna vrijednost brzine toka se ostvaruje u području između zbijenih platformi (eksperiment DV1 i DV2) gdje brzina toka skoro pada na nulu. Značajni propadi u brzini se dešavaju oko propulzora zbog hidrodinamičke karakteristike.

U tablici Tablica 1 prikazani su rezultati analize sile kojom fluid djeluje na vozila za provedene eksperimente. Kao referencu smo koristili prvi eksperiment gdje je bilo samo jedno vozilo prisutno gdje je prosječna sila koja djeluje u X smjeru jednaka $\bar{F}_{V1} = 25.1 [N]$. U ostalim eksperimentima sila koja je djelovala na prednje vozilo je bila u svakom slučaju veća što može biti zbog načina na koji Flow Simulation provodi simulaciju. U slučaju gdje imamo dva vozila odvojena 3m, prepostavili smo da neće imati značajan utjecaj jedno na drugo i prosječne sile na plovilo su bile veoma slične (28.88N na prednje i 27.48N stražnje). U eksperimentima DV1 i DV2 vidimo značajan pad u sili koja djeluje na stražnje vozilo.

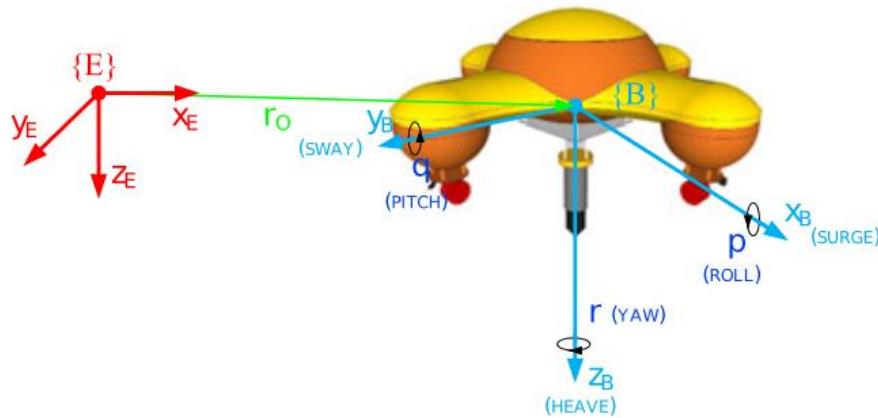
Tablica 1. Rezultati CFD analize sile na vozila

Eksperiment	v_c [m/s]	d_{12} [m]	\bar{F}_{V1} [N]	\bar{F}_{V2} [N]	$\bar{F}_{V1} + \bar{F}_{V2}$ [N]
Jedno vozilo	1	-	25.1	-	-
Dva vozila 1 (DV1)	1	0.8	27.75	15.76	43.51
Dva vozila 2 (DV2)	1	1.0	28.35	16.65	45.00
Dva vozila 3 (DV3)	1	3.0	28.88	27.48	56.36

Dobiveni rezultati ukazuju na mogućnost značajne uštede energije grupiranjem plovila u liniju gdje bi se trebala favorizirati manja udaljenost. U slijedećem poglavlju će se prikazati razvijeni algoritam

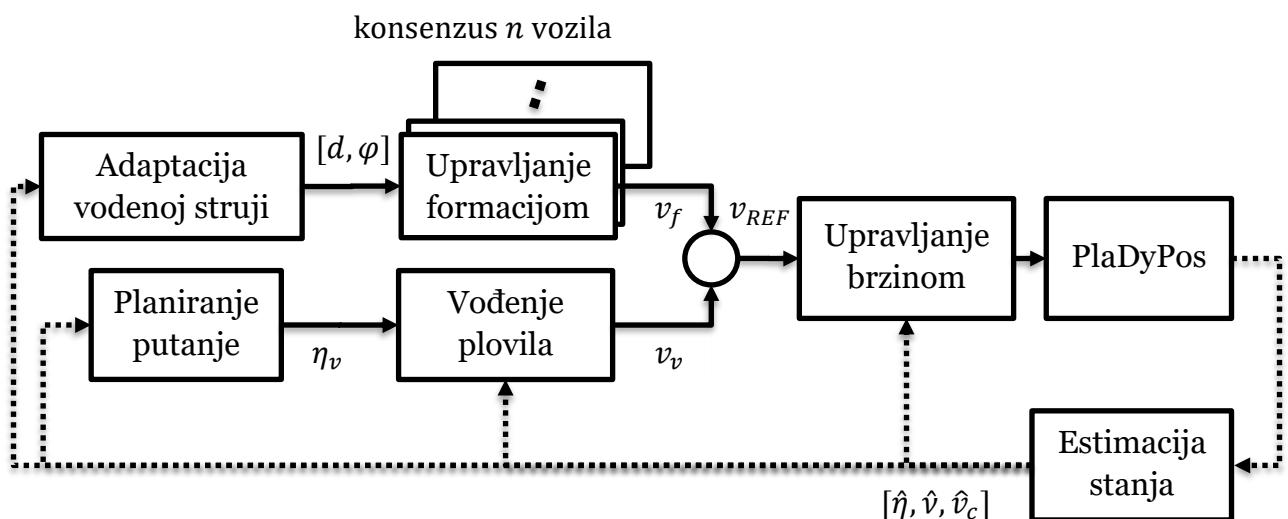
Algoritam upravljanja formacijom s adaptacijom na morske struje

Definirajmo globalni (engl. *earth*) $\{E\}$ i lokalni (engl. *body*) $\{B\}$ referentni sustav kao što je prikazano slikom Slika 6 gdje η predstavlja poziciju vozila $\{B\}$ u $\{E\}$, v predstavlja brzinu gibanja u $\{B\}$, a v_c predstavlja brzinu gibanja morske struje u $\{B\}$. Upravljačka shema jednog od vozila prikazana je na slici Slika 7. Ovo je proširena shema upravljanja površinskim plovilom u odnosu na shemu iz D4.4 bez dijela praćenja podvodnog vozila. Upravljanje se odvija kaskadno gdje svaka razina djeluje na jedan aspekt gibanja. Najniža razina upravljanja je upravljanje brzinom pojedinog vozila u globalnom referentnom sustavu objašnjena detaljnije u D4.4. Na slijedećoj razini upravljanja se nalazi distribuirano upravljanje formacijom vozila i vođenje plovila koja omogućava gibanje formacije.



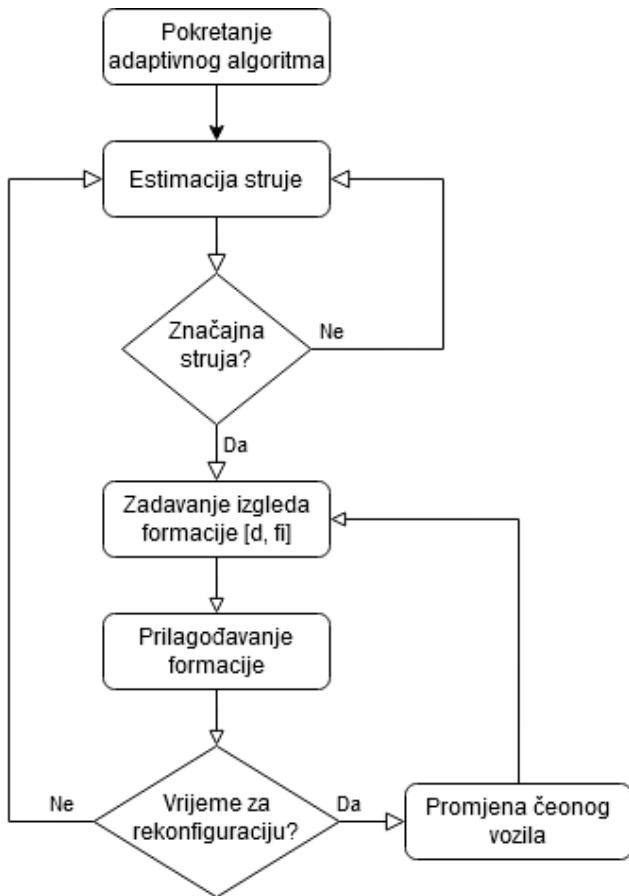
Slika 6. Veza lokalnog $\{B\}$ i globalnog $\{E\}$ koordinatnog sustava [4]

Kao što je opisano u izvještaju D3.3, vozila međusobno razmjenjuju telemetrijske podatke $[\hat{\eta}, \hat{v}]$ (pozicija, brzina, ubrzanje, orijentacija) kako bi se organizirala u željenu prostornu formaciju. Tijekom validacijskih eksperimenata, željene prostorne konfiguracije su odabранe proizvoljno kako bi se demonstrirale ostvarene funkcionalnosti. U ovom izvještaju ulaz algoritma za distribuirano upravljanje formacijom treba biti zadan od strane algoritma upravljanja formacijom s adaptacijom na morsku struju. Ovo je, uz planiranje putanje, najviša razina upravljanja prikazana na slici Slika 7.



Slika 7. Upravljačka shema vozila

Algoritam upravljanja prikazan slikom Slika 8 se sastoji od tri faze: estimacije morske struje; odabir izgleda formacije; prilagođavanje formacije. Na dijagramu toka su izostavljeni dijelovi koji se tiču pokretanja i zaustavljanja algoritma zbog preglednosti.



Slika 8. Dijagram toka adaptivnog algoritma

Estimacija morske struje se može odrediti pomoću senzora brzine morske struje ili estimacijom smetnji koje djeluju na plovilo. S obzirom da vozilo nije opremljeno senzorom brzine vode niti DVL (*doppler velocity log*) senzorom koristit ćemo drugi pristup. Za korištena plovila smo identificirali kinematički modela plovila koji povezuje ovisnost brzine gibanja plovila o upravljačkom signalu na propulzorima. Estimator stanja sustava iz očekivanog ponašanja može estimirati jačinu i smjer smetnje koja djeluje na vozilo. Jednadžbe koje modeliraju utjecaj morske struje na vozilo usvojene od autora u [5] su prikazane slijedećom jednadžbom:

$$\dot{\eta} = J\nu_r + \nu_c$$

gdje $\nu_c = [u_c, v_c, 0]$ predstavlja morskou struju izraženu u $\{B\}$ prepostavljajući nerotirajući strujni tok, $\nu_r = \nu - \nu_c$ predstavlja relativnu brzinu vozila u odnosu na gibanje morske struje, J predstavlja rotacijsku matricu vozila iz koordinatnog sustava $\{B\}$ u $\{E\}$. Ova implementacija jednostavno opisuje Kao implementacija estimatora se koristi proširen kalmanov filter. Za određivanje pozicije i indirektno brzine gibanja se koriste GPS mjerjenja a morska struja se tretira kao poremećaj u estimaciji tih veličina. Kao rezultat estimacije dobijemo $\hat{\nu}_c = [\hat{u}_c, \hat{v}_c]$ razložen na komponente

prikazane u $\{B\}$ iz kojih se trivijalno izračuna smjer strujanja vode slijedećom relacijom:

$$\hat{\phi} = \tan^{-1} \hat{v}_c / \hat{u}_c$$

Faza odabira izgleda formacije uvelike ovisi o plovilima koji čine tu formaciju. Orientacija linijske formacije se mijenja u ovisnosti o smjeru morske struje, ukoliko je ona značajna. Pod značajnu brzinu morske struje podrazumijevamo struju za koju algoritam može postići značajnu uštedu energije. S obzirom da se estimacija strujnog toka odvija na svakom od plovila, orientacija linijske formacije je odabrana kao srednja vrijednost estimiranih smjerova strujnog toka. Ukoliko ima potrebe, može se uvesti dogovaranje o estimatu morske struje među plovilima kako greške ili kvarovi nekih od plovila ne bi utjecali na konačni estimat. Rezultati CFD analize pokazuju smanjenje brzine morske struje iza plovila uslijed turbulentnog toka efektivno smanjujući silu na prateće plovilo. Kako analiza pokazuje smanjenje utjecaja vozila na brzinu toka a time i silu na prateće vozilo, daljim odmakom od vozila potencijalno gubimo uštedu energije što je demonstrirano eksperimentom DV2 sa slike Slika 5. Uzimajući to u obzir, udaljenost među plovilima bi trebala biti što manja kako bi se efikasnije iskoristila latentna energija.

U zadnjoj fazi algoritam za održavanje formacije plovila iz D3.3 generira upravljačke signale kako bi ostvario izgled formacije iz prethodne faze. Dijagram toka se ponavljaju više puta u sekundi kako bi mogle pravovremeno adaptirati na promjene u okolini do njegovog zaustavljanja.

Zaključak

Cilj ovog dokumenta je bio razviti metodu uštede energije robotskog sustava sastavljenog od više agenata tijekom plovidbe u morskoj struji adaptiranjem prostornog razmještaja vozila. U literaturi se može naći mnogo primjera adaptacije grubim uvjetima u prirodi koji kroz grupiranje imaju brojne koristi među kojima je i očuvanje energije. Inspirirano prirodnom pretpostavljenjem je kako će postavljanje površinskih PlaDyPos platformi u linijsku formaciju rezultirati uštedom energije za vozila koja se nalaze iza čeonog vozila. Napravljena je simulacijska CFD analiza vodenog toka oko jednog ili više plovila kako bi se saznao kakav utjecaj plovilo u strujnom toku utječe na isti tok. Rezultati analize ukazuju na potencijalnu uštedu energije za prateća vozila. Razvijen je algoritam koji na temelju estimirane morske struje adaptira orientaciju linijske formacije kako bi se uskladio sa smjerom vodenog toka. Algoritam uzima u obzir smjer i jačinu estimiranog toka te sukladno mijenja orientaciju linije formacije kako bi ostvario uštedu energije sustava.

U dokumentu „D6.4 Izvještaj o validacijskim eksperimentima Scenarija 3“ će se validirati algoritam i metodologija opisana u ovom dokumentu.

Reference

- [1] S. J. Portugal i ostali, „Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight“, *Nature*, sv. 505, izd. 7483, Art. izd. 7483, sij. 2014, doi: 10.1038/nature12939.
- [2] Z.-M. Yuan, M. Chen, L. Jia, C. Ji, i A. Incecik, „Wave-riding and wave-passing by ducklings in formation swimming“, *J. Fluid Mech.*, sv. 928, str. R2, pros. 2021, doi: 10.1017/jfm.2021.820.
- [3] S. Marras, S. S. Killen, J. Lindström, D. J. McKenzie, J. F. Steffensen, i P. Domenici, „Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position“, *Behav Ecol Sociobiol*, sv. 69, izd. 2, str. 219–226, velj. 2015, doi: 10.1007/s00265-014-1834-4.
- [4] N. Mišković, Đ. Nadđ, i Z. Vukić, „Full-scale identification by use of self-oscillations for overactuated marine surface vehicles: Full-scale identification by use of self-oscillations for overactuated marine surface vehicles“, *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, sv. 31, izd. 4, str. 674–692, tra. 2017, doi: 10.1002/acs.2709.
- [5] J. Almeida, C. Silvestre, i A. Pascoal, „PATH-FOLLOWING CONTROL OF FULLY-ACTUATED SURFACE VESSELS IN THE PRESENCE OF OCEAN CURRENTS“, str. 6.