

D4.4 Distribuirani kooperativni upravljački algoritam s isprekidanom komunikacijom

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Elektrotehnike i Računarstva
Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije

30. Rujna 2019.

Sadržaj

Uvod	2
Algoritmi za praćenje	2
Klasični algoritam	2
Virtualni potencijali	4
Kooperativno praćenje preko traženja maksimuma	5
Implementacija algoritma	9
Simulacijski rezultati	12
Zaključak	13
Literatura	14

Uvod

Dokument opisuje upravljačke algoritme za kombinaciju podvodnog i površinskog vozila. Obzirom da je komunikacija među vozilima uglavnom akustička, cilja se na izmjenu male količine podataka i robusnost na ispade u komunikaciji. Pod kooperativnim algoritmima podrazumijevamo sve algoritme gdje postoji izmjena podataka među vozilima u svrhu upravljanja i/ili navigacije. Prezentirani algoritmi se mogu poopćiti na primjene u kojima praćeno vozilo nije potpuno kooperativno, tj. giba se vlastitom voljom neovisno o vozilu koje ga prati. Tako poopćeno upravljanje dozvoljava buduće primjene na ronioce i druge ne-kooperativne agente.

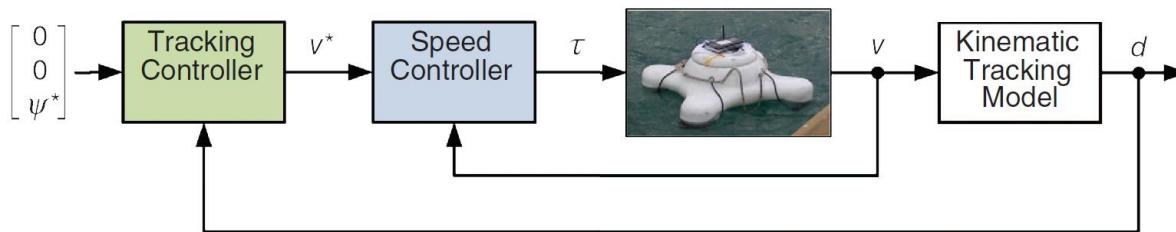
Dokument je podijeljen u dva dijela. Prvo se promatraju postojeći algoritmi za kooperativno praćenje. Razmatra se klasična implementacija korištenjem proporcionalno-integralno-derivativnih (PID) regulatora. Za slučajeve gdje je isprekidanost veća, razmatra se napredniji algoritam koji primjenjuje teoriju umjetnih potencijala. Ostatak dokumenta fokusira se na istraživanje kooperativnog upravljanja u svrhu potpomognute navigacije podvodnog vozila. Razmatra se kooperativni algoritam s mjerenjem udaljenosti i minimalnom izmjenom podatka kako bi se osiguralo istovremeno praćenje i optimiranje kvalitete lokalizacije podvodnog vozila. Takav upravljački algoritam kombinira kooperativno upravljanje s distribuiranim lokalizacijskim filterom opisanim u D4.3.

Algoritmi za praćenje

Klasični algoritam

Algoritmi bazirani oko PID regulatora možemo smatrati klasičnim načinom regulacije. Kaskadno upravljanje, prikazano na Slika 1, koje odvaja upravljanje na niskoj razini i vođenje na visokoj, često je primjenjuje za upravljanje plovilima.

Upravljačka kaskada, na nižem stupnju regulacije, podrazumijeva regulaciju brzine plovila. Ulas u regulator brzine su željene brzine zadane od višeg stupnja regulacije odnosno vođenja. Ispravno postavljanje regulatora brzine je preduvjet za kvalitetno vođenje. Za postavljanje se koriste parametri dinamičkog modela plovila koje je moguće identificirati (1). Vođenje s druge strane ovisi samo o kinematici vozila, a pretpostavka je da su regulatori brzine adekvatno postavljeni kako bi kompenzirali neželjene dinamičke efekte. Praćenje objekata, putanja, trajektorija, dinamičko pozicioniranje i sl. su problemi koji se rješavaju na razini vođenja.



Slika 1. Primjer kaskadne regulacije za površinsku platformu u slučaju praćenja podvodnog vozila

U slučaju površinskog i podvodnog vozila regulator brzine je implementiran u proporcionalno-integralnom obliku:

$$\boldsymbol{\tau} = K_p(v^* - v) + K_I \int (v^* - v) dt + \boldsymbol{\tau}_F \quad (1)$$

gdje je $v = [u^* \ v^* \ r^*]^T$ vektor željenih linearne i kutne brzine. K_p i K_I su dijagonalne matrice pojačanja za PI regulator. $\boldsymbol{\tau}_F$ predstavlja dodatne signale za unaprijedno slijedenje kako bi se poboljšao odziv zatvorene petlje. Unaprijedno slijedenje u obliku $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(v)v$ ostvaruje linearizaciju hidro-dinamičkog otpora pomoću povratne veze. Za potrebe unaprijednog slijedenja koristi se mjerena ili estimirana brzina. Parametri regulatora K_p i K_I mogu se izračunati temeljem željenog modelskog odziva zatvorene petlje (2).

Dizajn regulatora za praćenje će ovisiti o mogućnostima plovila. Obzirom da će se praćenje primarno raditi s površinskim vozilom, dizajn će biti orijentiran na vozila s potpunom upravljivošću. U slučaju potpune upravljivosti, možemo raspregnuti regulaciju zaošijanja i praćenje u horizontalnoj ravnini.

Tokom praćenja, za regulaciju zaošijanja, izabran je PI regulator obzirom da ćemo tako moći kompenzirati sve vanjske poremećaje koje ne možemo regulatorom brzine zaošijanja. Jednadžba regulatora je sljedeća:

$$r^* = K_{p_\Psi}(\Psi^* - \Psi) + K_{I_\Psi} \int (\Psi^* - \Psi) dt \quad (2)$$

gdje se K_{p_Ψ} i K_{I_Ψ} mogu postavljati također po željenom modelskom odzivu, uz pretpostavku idealno postavljene regulacije brzine zaošijanja.

Praćenje se može ostvariti zadavanjem unaprijedne i lateralne brzine. Pretpostavka je da postoji estimator ili direktno mjerjenje pozicije i brzine cilja koji su potrebni za potpuno praćenje. Praćenjem možemo regulirati udaljenost do cilja, pa se onda može koristiti i adekvatni model udaljenosti $\mathbf{d} = [x - x_t, y - y_t]^T$ za estimator. Temeljem toga modela, definiramo kinematički model za regulaciju udaljenosti koji će se koristiti za estimaciju kao:

$$\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{R}(\Psi) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \mathbf{R}_t(\Psi_t) u_t \quad (3)$$

gdje je $\mathbf{R}(\psi)$ matrica rotacije za površinsko vozilo, a $\mathbf{R}_t(\psi_t)$ matrica rotacije za podvodni cilj koja koristi estimirani kurs podvodnog vozila ψ_t . Također, prepostavlja se da ukupna brzina u smjeru kursa iznosi u_t .

S tako definiranim model, jednadžba regulatora se može prikazati kao

$$\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T(\psi) \left(-\mathbf{K}_{Pd} - \mathbf{K}_{Id} \int dt \right) + \mathbf{v}_F \quad (4)$$

gdje su \mathbf{K}_{Pd} i \mathbf{K}_{Id} PI pojačanja u obliku dijagonalne matrice. Unaprijedno slijedeće koje koristiti estimiranu brzinu cilja označeno je s \mathbf{v}_F . Korištenjem prikazane kaskadne regulacije ostvarit će se kontinuirano praćenje ciljeva bez greške u praćenju dok god je estimacija parametara cilja ispravna.

Virtualni potencijali

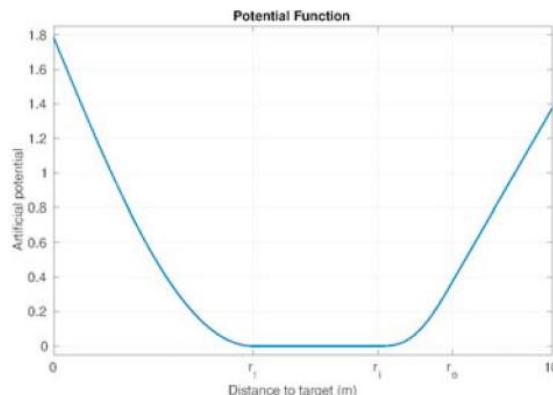
Prethodna metoda regulacije prepostavlja da želimo imati kontinuirano praćenje cilja, te da imamo dovoljno podataka o cilju i modelu. Ukoliko su gibanja kompleksna, cilj prebrz i sl., potrošnja aktuatora i energije korištenjem prethodne strategije upravljanja je velika.

Praćenje istom brzinom i/ili putanjom, pozicioniranje direktno iznad cilja često nisu kritični zahtjev. U takvim slučajevima korisnije je primijeniti koncept virtualnih potencijala (3), (4) gdje se može modelirati željeni način gibanja, a da se pri tome ostvari relaksirano praćenje cilja. Vođenje pomoću virtualnih potencijala podrazumijeva izračun ukupnog potencijala na lokaciji vozila sumiranjem svih potencijskih polja, a vozilo je upravljano prema točci najnižeg potencijala. Navedena potencijalna polja mogu biti privlačna ili odbojna, a njihovom kombinacijom stvara se rezultanti potencijal u prostoru.

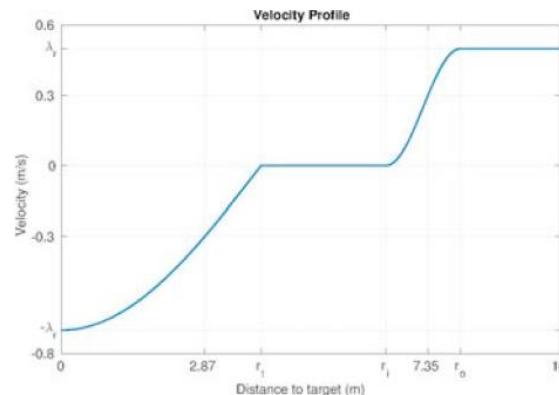
U slučaju praćenja dovoljno je definirati samo jedno polje. Ideja je napraviti područje oko cilja gdje je potencijal nula, a svugdje izvan područja imamo pozitivan potencijal koji vozilo usmjerava natrag u područje. Potencijalna funkcija može se definirati kao:

$$U = \begin{cases} 0 & \|\mathbf{p}_{vt}\| \leq r_i \\ \left(\|\mathbf{p}_{vt}\| - r_o + \frac{r_o - r_i}{2} \right) \lambda_a & r_o > \|\mathbf{p}_{vt}\| > r_i \end{cases} \quad (5)$$

gdje je \mathbf{p}_{vt} udaljenost vozila i cilja, r_o vanjski radius područja, a r_i unutarnji radius područja gdje je potencijalno polje nula. Presjek ove funkcije prikazan je na Slika , dok je rezultanti profil brzine, u obliku gradijenta, za jednu os prikazan na Slika . Profili brzine su ujedno i izlazne vrijednosti ovog regulatora za vođenje i koristi se kao ulaz u regulator brzine. Dok je na slici prikazan profil brzine za jednu os, treba imati na umu da je potencijalna funkcija zapravo 3D objekt definiran u navigacijskim koordinatama (npr. North-East-Down). Zbog toga, brzine dobivene izračunom gradijenta treba konvertirati u koordinatni sustav vozila prije nego su poslane u regulator brzine.

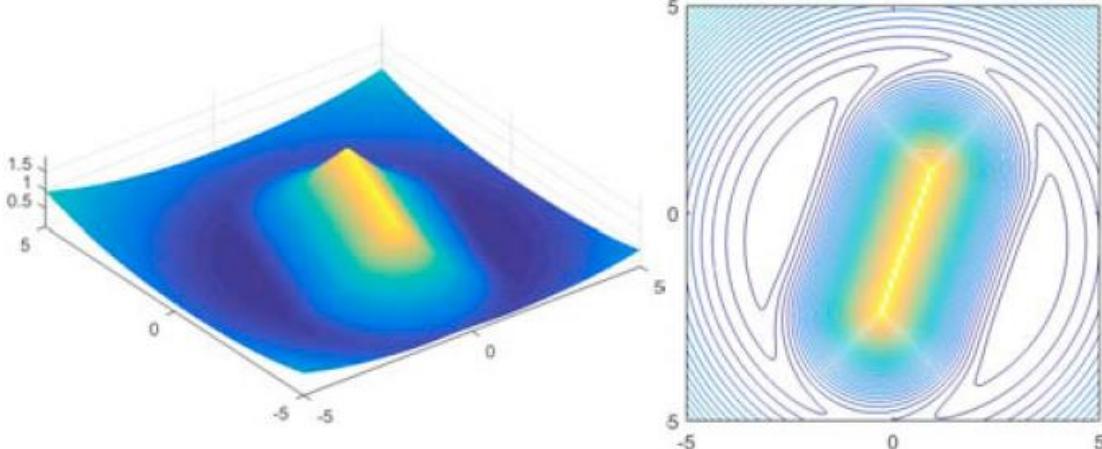


Slika 2. Presjek potencijalne funkcije za praćenje područja oko objekta praćenja.



Slika 3. Profil brzine kao izlaz iz regulatora za praćenje s virtualnim potencijalima.

Ova metoda ima prednost luke podesivosti i proširivosti. Npr. ukoliko ne želimo da se površinsko vozilo nalazi blizu podvodnog vozila u slučaju izranjanja moguće je generirati dodatno odbijajuće polje oko podvodnog vozila koje će udaljiti površinsko vozilo tokom izrona. U tom slučaju kombinirano polje izgleda kao na Slici 4.



Slika 4. Primjer proširenja polja u slučajevima gdje je podvodno vozilo blizu površine.

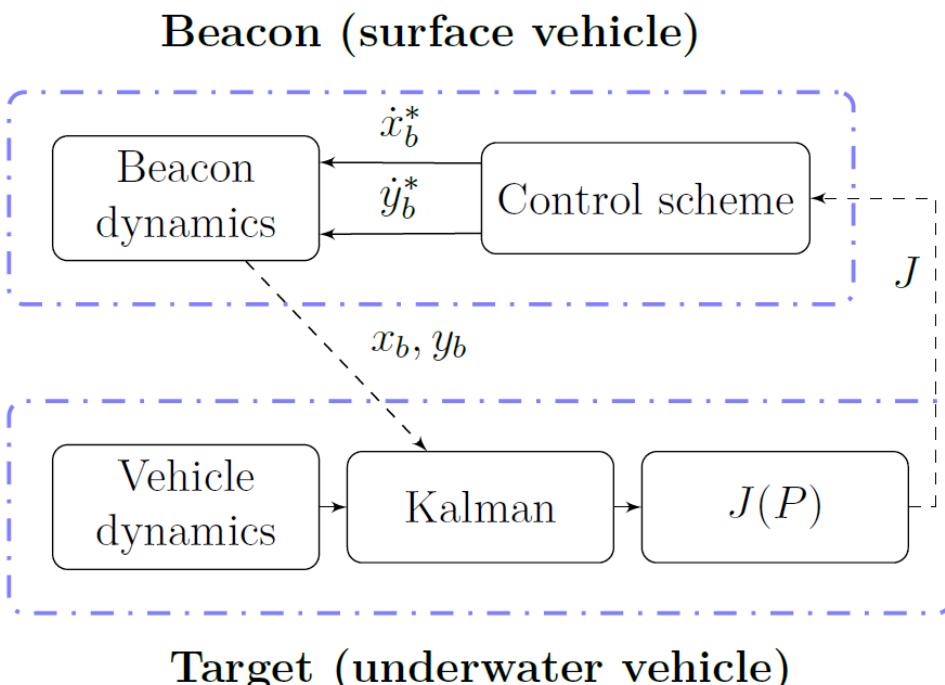
Dodatna prednost ove metode je što estimator može biti jednostavniji, a mogu se direktno koristiti i filtrirana mjerena s lokalizacijskog senzora neovisno o isprekidanosti. Naime, dok u prethodnom slučaju trebamo kontinuirane podatke da izračunamo sljedeći korak, u ovom slučaju možemo direktno koristiti mjerenu kako bi preračunali potencijalno polje, a regulacija temeljem potencijala internu izračunava brzinu.

Kooperativno praćenje preko traženja maksimuma

Prethodni algoritmi estimiraju stanje praćenog vozila, dok u još složenijim upravljanjima kao leader-follower i praćeno vozilo mora estimirati površinsko u svrhu poboljšanja mjerena i kompenziranja zakašnjelih signala. Takvi algoritmi zahtijevaju često više senzorskih mjerena, a u slučaju kad se istovremeno vrši upravljanje i kooperativna lokalizacija i prijenos mnogo podataka s oba vozila.

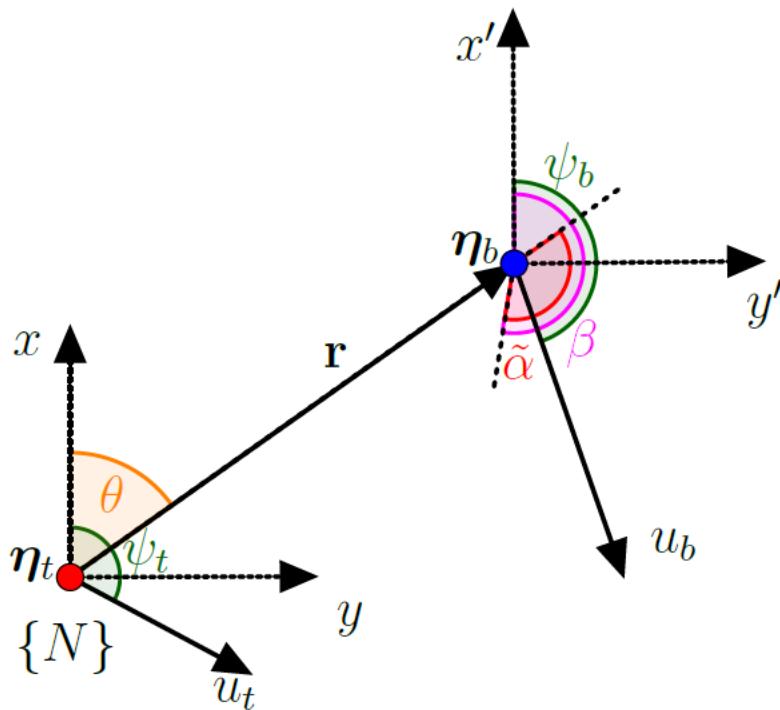
Kod jeftinjih akustičkih sustava uglavnom su dostupna samo mjerena udaljenosti, a propusnost je malena. Unesena kašnjenja i vrijeme obnove podataka proporcionalno rastu s brojem prenesenih informacija. U takvim slučajevima vrlo je bitno da se smanji količina podataka. Zbog toga se istražio kontrolni algoritam koji koristi traženje maksimuma (5).

Za potrebe izvoda algoritma, površinsko vozilo definiramo kao mobilnu bovu i pretpostavljamo da se može gibati brže od podvodnog vozila. U ovom slučaju za podvodno vozilo neće se koristiti torpedo AUV, već inspekcijsko podvodno vozilo čija gibanja su sporija, ali teže predvidiva od gibanja torpeda.



Slika 2. Koncept simultane lokalizacije i kooperativnog upravljanja.

Glavna ideja, prikazana na Slika 5, prikazuje upravljanje mobilnom bovom u svrhu smanjenja pogreške lokalizacije. Koriste se mjerena udaljenosti između podvodnog vozila i mobilne bove kombinirana s pozicijom mobilne bove (x_b, y_b). Kvalitetu estimacije može se poboljšati i slanjem brzine mobilne bove, ali to nije nužno. Temeljem podatka iz navigacijskog filtera podvodnog vozila računa se $J(\mathbf{P})$ koji daje mjeru osmotrivosti odnosno kvalitete mjerena koja se dobivaju iz mobilne bove. Kvaliteta mjerena je skalarna vrijednost koja se šalje od podvodnog vozila mobilnoj bovi te je jedina ulazna vrijednost u regulator traženja maksimuma. Dakle, u svrhu upravljanja potreban je samo jedan skalarni podataka s vozila. Mjera udaljenosti do mobilne bove se dobiva kroz mjereno povratnog vremena akustičkog signala.



Slika 3. Sustav relativne udaljenosti i orijentacija između mobilne bove i podvodnog vozila.

Za izvod upravljačkog algoritma prvo definiramo kinematiči model sustava. Vrijednosti potrebne za definiciju relativnog sustava u kojem operira mobilna bova prikazane su na Slika 6. Pozicija mobilne bove definirana je s η_b , a vozila s η_t . Za mobilnu bovu možemo prepostaviti podaktuiranu kinematiku kako bi proširili primjenjivost. U tom slučaju, kinematika je definirana kao:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = u_b \begin{bmatrix} \cos(\psi_b) \\ \sin(\psi_b) \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdje je ψ_b orijentacija mobilne bove, a u_b unaprijedna brzina. Kako bi se ostvarila najbolja osmotrivost potrebno je da su smjerovi gibanja između mobilne bove i podvodnog vozila okomite. Relativnu orijentaciju između vozila možemo definirati kao $\theta = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x)$, a relativni kut između vektora brzina kao $\beta = \text{atan2}(\Delta \dot{y}, \Delta \dot{x})$. S time možemo definirati efektivni kut između smjerova gibanja kao $\alpha = \beta - \theta$. U tom slučaju upravljački algoritam treba težiti da održava $|\tilde{\alpha}| = \frac{\pi}{2}$. Uz ove definicije možemo modelirati poziciju mobilne bove pomoću polarnih koordinata kao:

$$r = \sqrt{(x_b - y_t)^2 + (y_b - y_t)^2} \quad (7)$$

$$\theta = \text{atan2}(y_b - y_t, x_b - y_t) \quad (8)$$

gdje je r relativna udaljenost, a θ relativna orijentacija u horizontalnoj ravnini. Ukoliko prepostavimo da je ishodište koordinatnog sustava na lokaciji podvodnog vozila, možemo modelirati kinematiku gibanja kao:

$$\dot{r} = u_b \cos(\psi_b - \theta) - u_t \cos(\psi_t - \theta) \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{r} [u_b \sin(\psi_b - \theta) - u_t \sin(\psi_t - \theta)] \quad (10)$$

Uz pretpostavku da je brzina mobilne boje puno veća od brzine podvodnog vozila, možemo uvesti aproksimaciju $\alpha = \psi_b - \theta + \frac{\pi}{2}$. Uz ovu pretpostavku možemo dodatno pojednostaviti sustav uz zanemarivanje utjecaja brzine podvodnog vozila. Konačna pojednostavljena kinematika definirana je s:

$$\dot{r} = u_b \sin \alpha \quad (11)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\psi}_b + \frac{1}{r} u_b \cos \alpha \quad (12)$$

Upravljački algoritam prepostavlja mogućnost regulacije brzine rotacije i unaprijedne brzine. Te dvije vrijednosti će biti izlaz upravljačkog algoritma. Kutna brzina može se smatrati kao konstantna perturbacija sustava potrebna za traženje maksimuma, a regulacija unaprijedne brzine definirana je kao

$$\dot{\psi}_b = \omega, u_b = k_j \quad (13)$$

$$j = -\frac{j}{k_j} (a - \sin \alpha) + \frac{q}{k_j} \quad (14)$$

gdje su $a > 1$, a $k_j > 0$ parametri regulatora. Stabilni sustav postiže se za $\alpha = 2n\pi$. Dakle, za sustav zadan vektorom stanja $x = [r \ \alpha \ j]$, uz pretpostavku $x = a > 1$, stabilna točka je $x = \left[-\frac{kq}{\omega} \ 2n\pi \ q \right]$. Jednadžbe sustava u ovoj stabilnoj točci su

$$\dot{r} = k(j + q) \sin \alpha \quad (15)$$

$$\dot{\alpha} = \omega + \frac{1}{r - \frac{kq}{\omega}} k(j + q) \cos \alpha \quad (16)$$

$$j = -\frac{1}{k_j} (j + q)(1 - \sin \alpha) + \frac{q}{k_j} \quad (17)$$

Za mali k_j , dinamika stanja j je mnogo brža od ostatka sustava. Korištenjem teorije perturbacije red sustava se može smanjiti zamjenom ($j = \frac{q \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}$) što reducira sustav na

$$\dot{r} = k \frac{q}{1 - \sin \alpha} \sin \alpha \quad (18)$$

$$\dot{\alpha} = \omega + \frac{1}{r - \frac{kq}{\omega}} k \frac{q}{1 - \sin \alpha} \cos \alpha \quad (19)$$

Lokalna stabilnost ovakvog sustava može se provjeriti linearizacijom i provjerom svojstvenih vrijednosti. Linearizirani sustav i njegove svojstvene vrijednosti su

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_e} = \begin{bmatrix} 0 & kq \\ -\omega^2 & kq \\ kq & -\omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}\omega \pm i\frac{\sqrt{3}}{2}\omega \quad (21)$$

Obzirom da su obje svojstvene vrijednosti negativne za pozitivne frekvencije ω , možemo zaključiti da je ekvilibrij asimptotski stabilan.

Za slučaj velikih udaljenosti, jednadžba (12), reducira se na $\dot{\alpha} = \omega$ što rezultira sljedećim jednadžbama

$$\dot{r} = kj \sin(\omega t + \alpha_0) \quad (22)$$

$$\dot{j} = -\frac{j}{k_j}(a - \sin(\omega t + \alpha_0)) + \frac{q}{k_j} \quad (23)$$

Promotrimo li ponovo situaciju za mali k_j dobivamo rješenje za j kao

$$j = \frac{q}{a - \sin(\omega t + \alpha_0)} \quad (24)$$

Što nam daje dinamiku relativne udaljenosti kao

$$\dot{r} = kq \frac{\sin(\omega t + \alpha_0)}{a - \sin(\omega t + \alpha_0)} \quad (25)$$

Moguće je promotriti smanjuje li se udaljenost u prosjeku kroz usrednjavanje ove relacije. Usrednjavanjem se dobiva:

$$\dot{r}_{avg} = kq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin(\tau + \alpha_0)}{a - \sin(\tau + \alpha_0)} d\tau = kq \mathbf{I}(\mathbf{a}) \quad (26)$$

gdje je $\mathbf{I}(\mathbf{a}) > \mathbf{0}$ for $\mathbf{a} \in (1, a_1)$. Ako se promotri derivacija Lypanuov funkcije $V = r_{avg}^2$ koja je $\dot{V} = kqr_{avg}\mathbf{I}(\mathbf{a})$, može se zaključiti da sustav konvergira u područje $B_l(r_l) = \{r \geq 0 | r < r_l\}$. Područje r_l je teoretska granična vrijednost za koju vrijedi pretpostavka velike udaljenosti.

Implementacija algoritma

Kao što je vidljivo iz izvoda, cilj je dizajnirati algoritam koji upravlja mobilnom bovom po trajektoriji gdje se osiguravaju najbolja mjerena za navigacijski sustav podvodnog vozila, a da se pri tome koristi samo jedna skalarna vrijednost za upravljanje. Time nije potrebna izmjena navigacijskih podataka između vozila. Prvi zadatak je implementirati metodologiju kojom se određuje skalarna vrijednost osmotrivosti. Potom se može implementirati potrebni upravljački algoritam s tom ulaznom vrijednošću.

Kako bi se odredio signal $J(\mathbf{P})$ potrebno je estimirati varijancu pozicije podvodnog vozila. Za estimaciju se može koristi prošireni Kalmanov filter, slično kao što je

opisano u D4.3, ili pojednostavljena Kalman filter verzija dedicirana samo za estimat varijance, a specijaliziran za mjerjenja udaljenosti. U slučaju dediciranog estimatora, sustav se može opisati varijablama stanja kao

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{v} + \boldsymbol{\varsigma} \quad (27)$$

$$r_m = \|\boldsymbol{\eta}\| + \varsigma_r \quad (28)$$

gdje je $\mathbf{A} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, vektor stanja dan je s $\boldsymbol{\eta} = [\Delta x \quad \Delta y]$, gdje su $\Delta x = x_t - x_b$ i $\Delta y = x_t - y_b$ relativne pozicije u navigacijskom koordinatnom sustavu. Kao ulaz uzima se promjena brzine između vozila, također u navigacijskom koordinatnom sustavu. Model mjerjenja je onda samo norma vektora stanja. Potrebno je primijetiti da je model mjerjenja u horizontalnoj ravnini, dok je pravo mjerjenje udaljenosti u tri dimenzije. Zbog toga je potrebno mjeriti i dubinu podvodnog vozila kako bi se mogla preračunati horizontalna udaljenost kao $r_m = \sqrt{R^2 - z^2}$.

Osmotrivost sustava se ispituje rankom matrice osmotrivosti. Nažalost, ta matrica daje diskretni uvid u osmotrvost ili neosmotrvost sustava, a ne govori mnogo o kvaliteti osmotrvosti. Zbog toga se uvodi novi faktor κ koji koristi matricu kovarijance za proračun kvalitete dobivenih mjerjenja odnosno trenutnog stupnja osmotrvosti. Faktor je definiran kao

$$\kappa = \frac{tr(\mathbf{P}) + \sqrt{tr(\mathbf{P})^2 - 4det(\mathbf{P})}}{tr(\mathbf{P}) - \sqrt{tr(\mathbf{P})^2 - 4det(\mathbf{P})}} \quad (29)$$

gdje su operatori, $tr(\cdot)$ i $det(\cdot)$, trag i determinanta matrice. Minimalna i idealna vrijednost faktora je 1. Dakle, potrebno je minimizirati iznos pod korijenom što znači da definiramo optimizacijski kriterij kao

$$J(\mathbf{P}) = \sqrt{tr(\mathbf{P})^2 - 4det(\mathbf{P})} \quad (30)$$

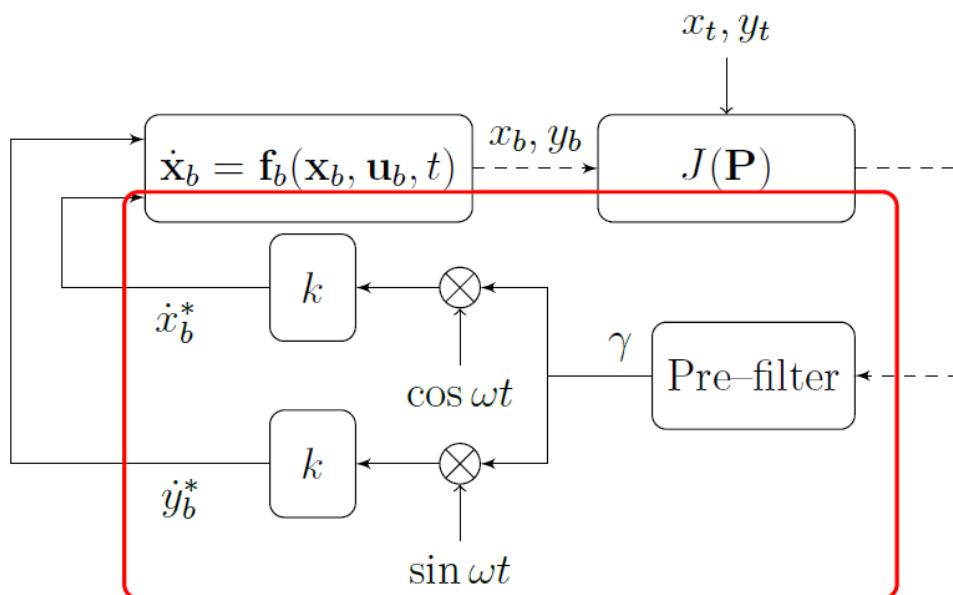
Ova funkcija je pogodna za korištenje obzirom da će svi sustavi s estimacijom pozicije imati dostupnu matricu \mathbf{P} . Dakle, ne postoji potreba za dodatnim računskim opterećenjem sustava. Za iznimne slučajeve gdje nema estimacije koristiti će se predloženi pojednostavljeni linearni model.

Blok dijagram kontrolnog algoritma, koji koristi vrijednost $J(\mathbf{P})$, prikazan je na Slici 7. Kako bi se izbjeglo zasićenje, povratna veza prolazi kroz visoko-propusni prefilter definiran kao:

$$\gamma = \left(1 - \frac{\omega}{s + \omega}\right) J(\mathbf{P}) + c \quad (31)$$

Na taj način je signal γ uvijek ograničen. Konstanta c koristi se kao odmak kako bi brzina bila pozitivna. Također, ona će odrediti i stacionarnu brzinu kojom će se površinsko vozilo gibati kad podvodno vozilo stane.

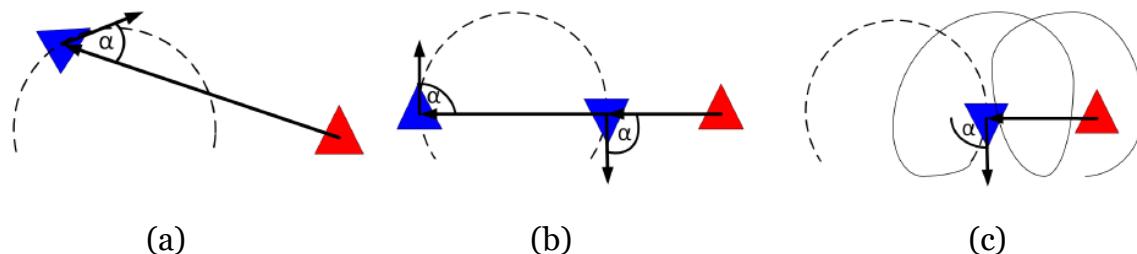
Signal se razlaže na dvije komponente unaprijedne brzine obzirom da je mobilna bova u mogućnosti upravljati objema brzinama. Ovo ne smanjuje općenitost obzirom da se iste reference mogu preračunati u reference željene unaprijedne brzine i orijentacije ($\text{atan2}(y, x)$).



Slika 4. Blok shema sustava upravljanja mobilnim bovom.

Ovaj pristup sličan je uobičajenim regulatorima traženja maksimuma, ali je konstantni perturbacijski signal zamijenjen gibanjem mobilne bove i njenim efektom na kovarijantu \mathbf{P} . Također, statička mapa je u ovom slučaju zapravo dinamička, ali s dinamikom znatno manjom od dinamike mobilne bove zbog čega ju se može tretirati kao statičku.

Mobilna bova počinje s cirkularnim gibanjem s unaprijednom brzinom definiranom preko povratne veze čime se mijenja kut α , prikazan na Slici 8a. Kad je alfa $\frac{\pi}{2}$, sustav je osmotrov, a $J(\mathbf{P})$ je minimalan. Na Slici 8b vidljivo je da će se ovaj slučaj ponoviti barem dva puta tokom ciklusa. Također, u tim točkama unaprijedna brzina je najmanja. U slučaju kad je alfa minimalan, oko nula stupnjeva, osmotrivost ne postoji i $J(\mathbf{P})$ je velik. Posljedično se povećava unaprijedna brzina i mobilna bova se ubrzano giba prema podvodnom vozilu. Zbog takvog ponašanja nastaje trajektorija gibanja, pokazana na Slici 8c. Vidljivo je da trajektorija teži podvodnom vozilu čime se osigurava željeno praćenje vozila. Treba primjetiti da se ovo postiže bez ikakvog znanja o pravoj poziciji podvodnog vozila.

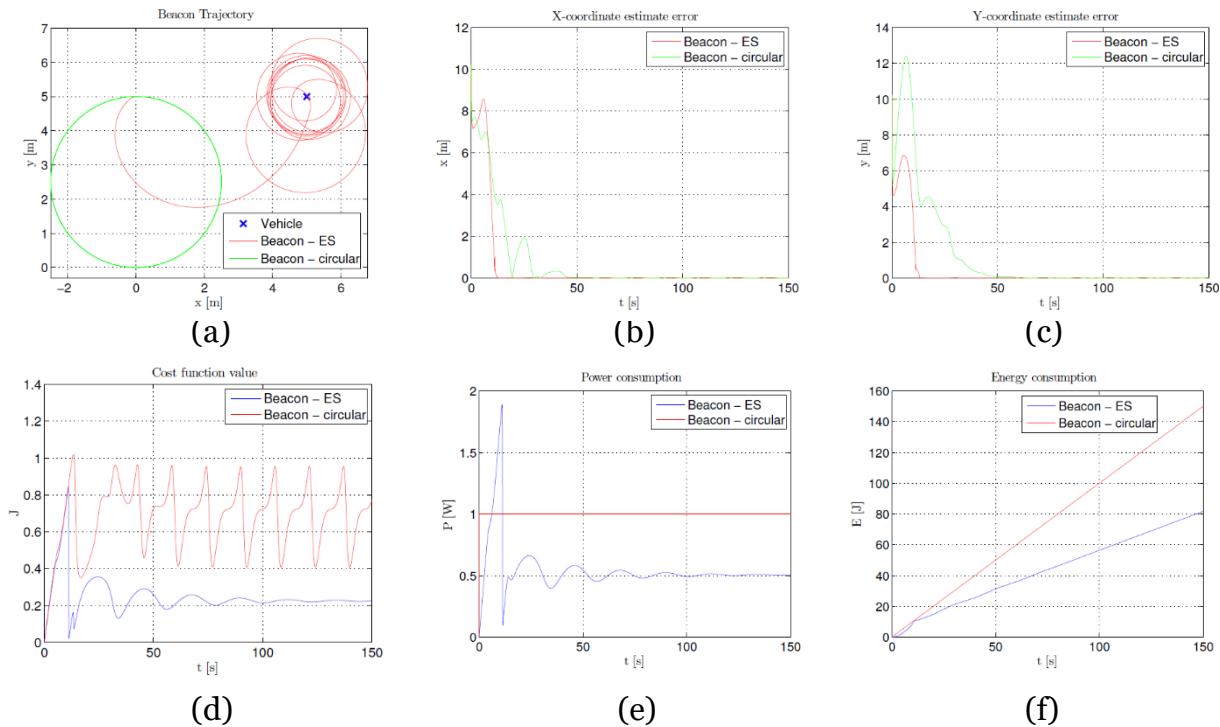


Slika 5. a) primjer početka cirkularnog gibanja, b) tokom jednog ciklusa maksimalna osmotrivost ostvaruje se barem dva puta, c) tokom više ciklusa mobilna bova prati podvodno vozilo i teži konvergenciji u čisto kružno gibanje oko podvodnog vozila.

Simulacijski rezultati

Kako bi se izvršila analiza, prethodno predložena implementacija simulirana je u MATLAB simulacijskom okruženju. Promatrana su dva scenarija: stacionarno podvodno vozilo i podvodno vozilo koje se giba kružnicom. Za oba slučaja predložen algoritam uspoređen je s kružnim algoritmom gdje se mobilna bova giba konstantnom brzinom po kružnoj trajektoriji. Ovaj algoritam osigurava osmotrivost, ali ne i praćenje, ali se može koristiti kao referentni algoritam za usporedbu kvalitete lokalizacije. U simulacijama se koristi poznata dinamika i kinematika ova vozila.

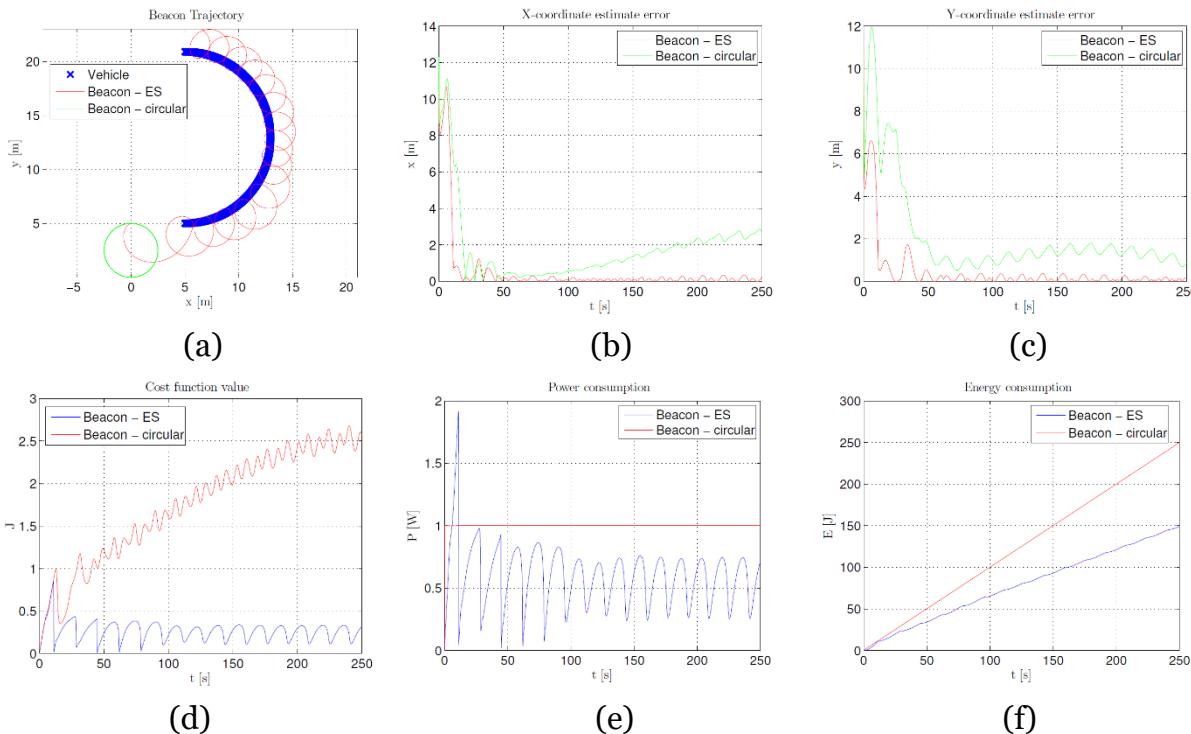
Slika 9 prezentira rezultate za slučaj stacionarnog podvodnog vozila. Podvodno vozilo je stacionarno na poziciji (5,5), a mobilna bova kreće s lokacijom (0,5). Filteri su inicijalizirani s pogrešnim inicijalnim pozicijama kako bi simulacija bila realistična. Slika 9a prikazuje trajektoriju kružnog algoritma u zelenom i predloženog algoritma u crvenom. Na slici je također vidljiva konvergencija mobilne bove oko podvodnog vozila. Na Slika 9b i Slika 9c prikazano je da korištenjem predloženog algoritma navigacijski filter podvodnog vozila brže konvergira. I dok je trenutna maksimalna energija veća kod predloženog algoritma nego kružnog, na Slika 9e i Slika 9f moguće je uočiti da je ukupna potrošnja energije manja u slučaju predloženog algoritma. Također, na Slika 9d vidljivo je da predloženi algoritam ostvaruje bolju osmotrivost.



Slika 6. Scenarij 1: Stacionarno vozilo

U drugom scenariju podvodno vozilo prati kružnu trajektoriju s radijusom 7.5m kao što je vidljivo u Slika 10a. Na slici je također uočljivo da mobilna bova prati podvodno

vozilo kao što je zamišljeno predloženim algoritmom. Na Slika 1od vidljivo je da osmotritost raste s udaljenosti u slučaju kružnog algoritma dok je s predloženim algoritmom stabilna. Također, iz Slika 1oe i Slika 1of vidljivo je da predloženi algoritam i dalje ima manju potrošnju energije od kružnog.



Slika 7. Scenarij 2: Mobilna bova

Zaključak

U dokumentu su prikazani različiti algoritmi za praćenje i kooperativno praćenje uz istovremenu lokalizaciju podvodnog vozila. Dok su osnovni algoritmi za praćenje lako primjenjivi, oni zahtijevaju i prijenos više podataka te poznavanje vozila koje se prati. S druge strane predloženi algoritam s traženjem maksimuma izmjenjuje malo podataka, a upravljački algoritam ne zahtjeva zaseban estimator na mobilnoj bovi, već regulator koristi jedan podatak koji se prenosi iz estimatora podvodnog vozila. Na taj način ostvaruje se jednostavno kooperativno upravljanje. Ovaj algoritam je energetski manje efikasan od prezentiranih osnovnih algoritama, ali s boljim usmjerenjem u regulatoru moguća su dodatna poboljšanja u energetskoj potrošnji.

Literatura

1. *Full-scale identification by use of self-oscillations for overactuated marine surface vehicles.* **Mišković, Nikola and Nađ, Đula and Vukić, Zoran.** 2017, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, pp. 674-692.
2. *Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle.* **Caccia, Massimo and Bibuli, Marco and Bono, Riccardo and Bruzzone, Gabriele.** 01 Nov 2008, Autonomous Robots, pp. 349-365.
3. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots.* **Khatib, .** 1985, Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 500-505.
4. **Latombe, .** *Robot Motion Planning.* s.l. : Kluwer Academic Publishers, 1991.
5. *Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems.* **Krstic, M., Wang, H.** 4, 2000, Automatica, Vol. 36.