

POSTUPCI IDENTIFIKACIJE MATEMATIČKIH MODELA PLOVILA

Nikola Mišković, Zoran Vukić, Matko Barišić

Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Sveučilište u Zagrebu

Unska 3, HR-1000 Zagreb, Hrvatska; nikola.miskovic@fer.hr

SAŽETAK:

Upravljanje površinskim i podvodnim plovilima je zahtjevan zadatak provenstveno jer pokazuju nelinearno, spregnuto ponašanje u upravljivim stupnjevima slobode. Iz ovih razloga, nužno je projektirati sustave upravljanja koji osiguravaju stabilnost i robusnost sustava. Da bi se krenulo na projektiranje različitih razina upravljanja, osnovni zahtjev je poznavanje parametara matematičkog modela plovila. U literaturi je dostupan veliki broj postupaka određivanja ovih parametara i u ovaj rad predstavlja njihov kratak pregled. Uz to, opisani su laboratorijski postavi za određivanje ovakvih modela. U radu su opisani matematički modeli površinskih i podvodnih plovila, s naglaskom na autonomna plovila i plovila manjih dimenzija. Poseban naglasak je stavljen na metode i instrumente koji se koriste u Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije (LaPoST), Sveučilišta u Zagrebu. Rezultati postupaka za površinska plovila su prikazani na autonomnom katamaranu Charlie koji je razvijen na Consiglio Nazionale delle Ricerche u Genovi, Italija s kojima u suradnji su dobiveni rezultati i stvorenu izvorni znanstveni doprinosi. Postupci za određivanje modela ronilica su prikazani na daljinski upravljanoj ronilici VideoRay i autonomnoj ronilici AutoMarine.

Ključne riječi: identifikacija, autonomna plovila, daljinski upravljana ronilica

ABSTRACT:

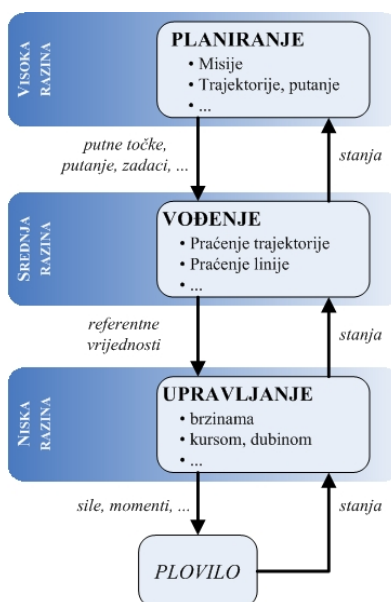
Control of surface and underwater marine vessels is a demanding task primarily due to the fact that they demonstrate nonlinear, coupled behaviour in controllable degrees of freedom. For these reasons, it is necessary to design control systems which ensure stability and robustness. In order to design different control levels, the elementary task is to know the parameters of the mathematical model of the vessel. There are many identification procedures available in the literature and this paper gives their short overview. In addition to that, laboratory set-ups for determining these models are described. The paper presents mathematical models of surface and underwater marine vessels, specifically autonomous vessels and vessels of smaller dimensions. The stress is placed on methods and instruments that are used in the Laboratory for Underwater Systems and Technologies, University of Zagreb. The results for surface vessels are

demonstrated on autonomous catamaran Charlie developed at Consiglio Nazionale delle Ricerche in Genoa, Italy in cooperation with whom the results are obtained and original scientific contributions created. The procedures for determining underwater vehicles' model parameters are demonstrated on a remotely operated underwater vehicle VideoRay and autonomous underwater vehicle AutoMarine.

Keywords: *identification, autonomous marine vessels, remotely operated underwater vehicle*

1. UVOD

Upravljačka se struktura plovila može podijeliti u tri razine upravljanja kao što je prikazano Slikom 1.



Slika 1. Upravljačka struktura plovila

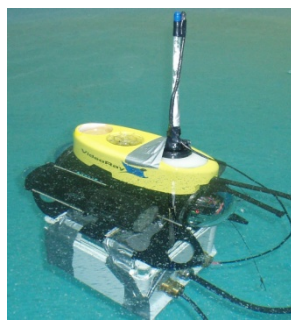
Najviši nivo upravljanja se naziva *Planiranjem* i uključuje planiranje misije [1], planiranje trajektorije i putanje, [2] i generiranje putnih točaka. U potpuno autonomnom sustavu, ova razina uzima u obzir sve promjene u okolini i osigurava poklapanje isplanirane putanje s putanjama ostalih plovila ili pozicijama nepokretnih objekata, [3]. Ulazi u ovu razinu su stanja sustava na osnovu kojih se donose zaključci o trenutnoj misiji. Na osnovi tih podataka, visoka razina će generirati putanje, trajektorije, putne točke koje se prosljeđuju srednjoj upravljačkoj razini. U slučaju da visoka upravljačka razina ne postoji, operater je zadužen za planiranje misije. Srednja upravljačka razina, nazvana *Vodjenjem*, uzima isplanirane putanje, trajektorije ili putne točke od visoke razine (ili operatera), i generira referentne vrijednosti za nisku razinu upravljanja. Zadatak ove upravljačke razine je osigurati uspješno ostvarivanje pojedine putanje, trajektorije ili zadatka općenito, sa zadanom točnošću. Na ovoj se razini

osigurava i parkiranje plovila unutar određenog prostora (dinamičko pozicioniranje), držanje udaljenosti od nekog objekta, [4], itd. Niska upravljačka razina je osnovna razina upravljanja, nazvana jednostavno *Upravljanjem*. Ona je zadužena za kompenzaciju vanjskih poremećaja i održavanje osnovnih upravljačkih varijabli kao što su brzine ili pozicije, na predodređenoj vrijednosti koja je definirana od strane srednje razine upravljanja. Izlaz iz ove razine je izravno povezan s izvršnim uređajima na plovilu, postavljajući željene sile i momente. Ulazi u nisku razinu upravljanja su mjerena ili estimirana stanja. Pojednostavljena struktura upravljanja je opisana počev od najviše prema najnižoj razini. No, prilikom projektiranja pojedine upravljačke razine, prvi korak je najniža razina, pa potom više razine. Projektiranje niske razine upravljanja zahtjeva poznavanje parametara matematičkog modela plovila, tj. potrebno je provesti identifikaciju. Ovaj rad opisuje postupke identifikacije koji se primjenjuju na plovilima u praksi i postupke koji su razvijeni u Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije (LaPoST) na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Rezultati koji su prezentirani u ovome radu su dobiveni na bespilotnoj daljinski upravljanoj ronilici VideoRay (Slika 2a)), autonomnoj bespilotnoj ronilici AutoMarine (Slika 2b)), [5], i bespilotnom katamaranu Charlie (Slika 2c)), [6].



a)



b)



c)

Slika 2. a) Daljinski upravljana ronilica VideoRay, b) autonomna bespilotna ronilica AutoMarine i c) bespilotni katamaran Charlie.

2. MATEMATIČKI MODEL PLOVILA

U svrhu definiranja matematičkog modela plovila, usvaja se nomenklatura iz [7]. Prije svega, definiraju se dva koordinatna sustava:

- inercijski koordinatni sustav {E} koji je miran, nepokretan, opisan s tri osi: N (u smjeru sjevera), E (u smjeru istoka) and D (u smjeru prema dolje tako da je NED pozitivno orijentiran koordinatni sustav);

- mobilni koordinatni sustav {B}, koji je uobičajeno fiksiran za težište (CG) plovila. Opisan je s tri osi x , y i z koje su usmjerene kao i osi NED sustava kada su x i N poravnati.

Tablica 1. Oznake koje se koriste za plovila.

stupanj slobode	napredovanje	zanošenje	zaranjanje	valjanje	naginjanje	zaošijanje	definiran u
η	u	v	w	p	q	r	{B}
ν	x	y	z	φ	θ	ψ	{E}
τ	X	Y	Z	K	M	N	{B}

Inercijski koordinatni sustav {E} se koristi za definiranje pozicija plovila $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$ i orijentacija $\eta_2 = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$ što čini vektor sa 6 elemenata $\eta = [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T$. Na isti način, mobilni koordinatni sustav se koristi za definiranje linearnih brzina $\mathbf{v}_1 = [u \ v \ w]^T$ (napredovanje, zanošenje i zaranjanje) te kutnih brzina $\mathbf{v}_2 = [p \ q \ r]^T$ (valjanje, naginjanje i zaošijanje) što čini vektor od 6 elemenata $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T \ \mathbf{v}_2^T]^T$. Gibanje plovila se postiže primjenom vanjskih sila i momenata. Tri sile (svaka u smjeru jedne osi mobilnog koordinatnog sustava) i tri momenta (definirani kao rotacija oko svake osi mobilnog koordinatnog sustava) čine vektor vanjskih sila i momenata od 6 elemenata u obliku $\tau = [X \ Y \ Z \ P \ Q \ R]^T$.

Veze između brzina i akceleracija plovila te sila koje djeluju na plovilo dane su dinamičkim modelom (1) koji uključuje hidrodinamičke efekte i spregnutost među gibanjima. U (1), \mathbf{M}_{RB} je dijagonalna matrica masa i inercija, \mathbf{M}_A matrica dodanih masa (kao posljedica hidrodinamičkih efekata), \mathbf{C}_{RB} i \mathbf{C}_A su Coriolisove i centripetalne matrice krutog tijela i dodane matrice (uzrokuju spregnutost među gibanjima), \mathbf{D} je matrica prigušenja koja se sastoji od nelinearnih dijagonalnih elemenata koji ovise o brzini, \mathbf{g} je vektor povratnih sila koje se javljaju zbog razlike između težine i uzgona potopljenog plovila, i τ_E predstavlja sve vanjske (stohastičke) poremećaje koji djeluju na plovilo, [7].

$$\underbrace{(\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)}_{\mathbf{M}} + \underbrace{(\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}))}_{\mathbf{C}(\mathbf{v})} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) + \mathbf{g}(\eta) = \tau + \tau_E \quad (1)$$

Veza između brzina \mathbf{v} u mobilnom koordinatnom sustavu {B} i prvih derivacija pozicija i kuteva η u inercijskom koordinatnom sustavu {E} dane su kinematičkim jednadžbama u 6 stupnjeva slobode. Cijeli skup tih jednadžbi može se naći u [7] i ne navodi se ovdje.

Opisani model plovila je izuzetno nelinearan i spregnut, što ga čini nepraktičnim za projektiranje upravljanja. Pojednostavljenja koja se koriste prilikom projektiranja upravljanja uključuju pretpostavke da je dinamika plovila nespregnuta te da je matrica prigušenja $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ dijagonalna i svaki se element može opisati polinomom prvog reda koji je ovisan o brzini. Ova pojednostavljenja vode k jednoj, generaliziranoj,

nespregnutoj, nelinearnoj dinamičkoj jednadžbi koja opisuje napredovanje, zanošenje, zaranjanje i zaošijanje zasebno i dana je sa:

$$\alpha_v \dot{v}(t) + \beta(v(t)) \cdot v(t) = \tau_{vE} + \tau(t) \quad (2)$$

gdje je v pojedini stupanj slobode, α_v i $\beta(v)$ su parametri modela gdje je $\beta(v) = \beta_v v + \beta_{vv} |v|$, τ je pojedina pobudna sila ili moment, i $\tau_{vE} = \tau_{NE}$ predstavlja vanjske poremećaje. Treba napomenuti da za zaranjanje τ uključuje i razliku između težine i uzgona.

3. IDENTIFIKACIJSKI POSTUPCI

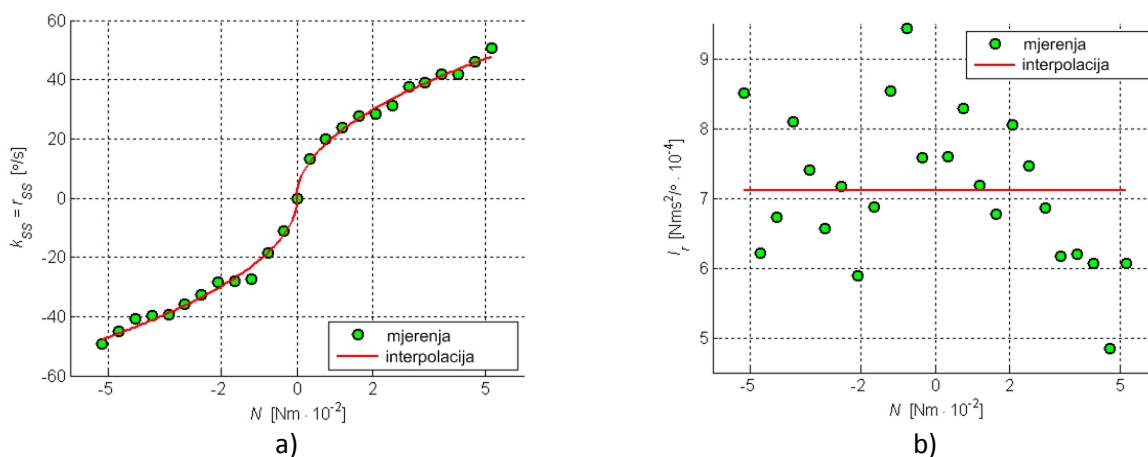
U ovome poglavlju bit će opisani neki postupci identifikacije nepoznatih parametara matematičkog modela plovila koji se uobičajeno koriste u praksi. Ti postupci su identifikacija temeljena na prijelaznom odzivu u otvorenome krugu, postupak temeljen na metodi najmanjih kvadrata, cik-cak manevar i postupak vlastitih oscilacija.

3.1. Postupci temeljeni na prijelaznom odzivu

Postupak temeljen na pokusima u otvorenom krugu će biti opisan na primjeru identifikacije zaošijanja bespilotne autonomizirane ronilice AutoMarine koja je razvijena u LaPoST-u. Korištenjem (2), zaošijanje se podvodnih plovila može prikazati općenitom diferencijalnom jednadžbom oblika:

$$\alpha_r \dot{r} + \beta(r)r = N. \quad (3)$$

Općenito, član $\beta(r)$ predstavlja hidrodinamički otpor koji se u praksi može estimirati konstantnim članom $\beta(r) = \beta_r$ ili linearnim članom $\beta(r) = \beta_{rr} |r|$.



Slika 3. Rezultati identifikacije a) statičkog pojačanja i b) inercije.

Iznos hidrodinamičkog otpora, kao i njegova karakteristika mogu se odrediti nizom eksperimenata u ustaljenom stanju. Ronilica se pobuđuje iznosima normiranog momenta u rasponu [-1.2, 1.2] sa korakom od 0.1. Za svaki od ovih momenata snima se odziv kursa ronilice. Zbog astatičkog karaktera ovakvog sustava, odziv će biti stalno

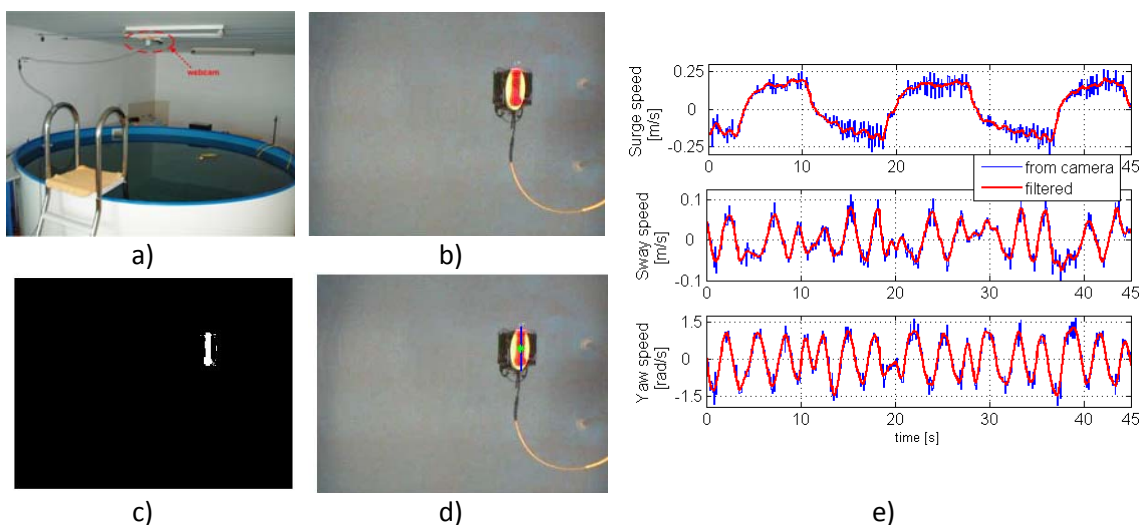
rastući. Eksperimentalno dobivena statička karakteristika prikazana je Slikom 3a). gdje zeleni kružići određuju točke na karakteristici koje su dobivene eksperimentom. Crvena linija pokazuje čistu kvadratnu karakteristiku koja najbolje interpolira dobivene točke. Inerciju sustava α_r se može odrediti na sličan način iz prijelaznog odziva, bilježenjem brzinske pogreške odziva. Slikom 3b) prikazani su eksperimentalni rezultati za brzinsku pogrešku sustava pri različitim pobudama. Detaljnu analizu rezultata čitatelj može pronaći u [8].

Glavne prednosti ovog postupka su te što se može dobiti po volji precizan model (ako se provede dovoljan broj eksperimenata), prikladan je za izvedbu u laboratorijskim uvjetima i parametri se određuju na egzaktn način. S druge strane, nedostaci su što je cijeli postupak vremenski zahtjevan, nije prikladan za provedbu u stvarnim uvjetima i osjetljiv je na poremećaje.

3.2. Metoda najmanjih kvadrata

Metoda najmanjih kvadrata se temelji na prikupljanju što većeg broja podataka o pozicijama i brzinama plovila dok ga se pobuđuje različitim pobudnim silama i momentima. Ova metoda će biti prikazana na primjeru određivanja spregnutog modela bespilotne daljinski upravljane ronilice VideoRay.

Pozicije ronilice za vrijeme eksperimenta su bilježene tako da je iznad bazena promjera 3.5 m i dubine 1.2 m u LaPoST-u stavljena kamera, kao što je prikazano Slikom 4a).



Slika 4. a) Bazen u LaPoST-u sa kamerom, b) slika iz kamere, c) obradena slika sa detektiranom ronilicom, d) određena pozicija i orijentacija ronilice, te e) brzine dobivene obradom slike iz kamere.

Obradom slike za vrijeme eksperimenta može se odrediti pozicija ronilice (slike 4b)–d)). Deriviranjem pozicije, dolazi se do brzina koje se koriste u određivanju modela. Primjer dobivenih brzina je prikazan Slikom 4e). Tako dobiveni podaci se mogu metodom

najmanjih kvadrata provesti kroz matematički model ronilice da bi se odredili nepoznati parametri. Opći oblik metode najmanjih kvadrata koji je korišten je dan sa (4) gdje je Θ vektor nepoznatih parametara modela a δ_x poremećaj za vrijeme eksperimenta.

$$\frac{1}{T} \begin{bmatrix} x(1)-x(0) \\ x(2)-x(1) \\ \vdots \\ x(N)-x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) & F(0) & x_2(0)x_3(0) & 1 \\ x(1) & F(1) & x_2(1)x_3(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N) & F(N) & x_2(N)x_3(N) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

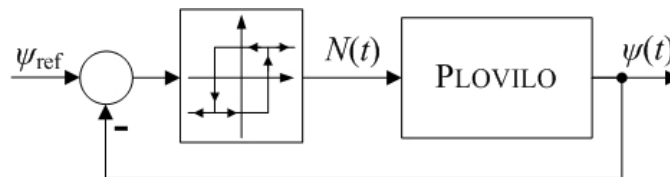
Ako se određuju parametri zaošijanja onda $x=r, x_2=u, x_3=v$ i $F=\tau_N$; za napredovanje $x=u, x_2=r, x_3=v$ i $F=X$; dok za zanošenje $x=v, x_2=u, x_3=r$ i $F=0$. Rezultati identifikacije se mogu naći u [9].

3.3. Cik-cak manevar

Standardni brodski manevari koji se koriste za ispitavanje manevarskih sposobnosti broda su krug okretanja, naglo zaustavljanje, cik-cak i izravni i unazadni spiralni test. Kratak opis ovih testova može se naći u [10]. Cik-cak manevar se može isto tako iskoristiti za određivanje nepoznatih parametara matematičkog modela zaošijanja plovila. Cik-cak manevar je nužan za brodove prema pravilima Međunarodne pomorske organizacije (IMO). Manevar koji se koristi za brodove je dan ukratno sljedećim algoritmom, dok brod plovi određenom unaprijednom brzinom:

- I. Okreni kormilo najvećom mogućom brzinom udesno za 10° .
- II. Kada se kurs broda promijeni za 10° od početnog kursa, okreni kormilo na suprotnu stranu na 10° . Nakon nekog vremena brod će se okrenuti nalijevo.
- III. Kada se kurs broda promijeni za 10° od početnog kursa, okreni kormilo u suprotnu stranu za 10° .

Treba napomenuti da se cik-cak manevar može izvoditi i za druge kuteve zakretanja kormila. Rezultati ovog testa upućuju na manevarske sposobnosti broda, tj. na sposobnost kormila da upravlja kursom broda. Kurs ψ i pozicija kormila δ se moraju bilježiti tijekom cijelog eksperimenta. Ovaj algoritam se može simulirati kao što je prikazano Slikom 5.



Slika 5. Blokowska shema cik-cak manevara.

Osnovna pretpostavka za korištenje ovog manevara pri identifikaciji parametara je da se zaošijanje može opisati jednosvnim Nomotovim modelom danim sa:

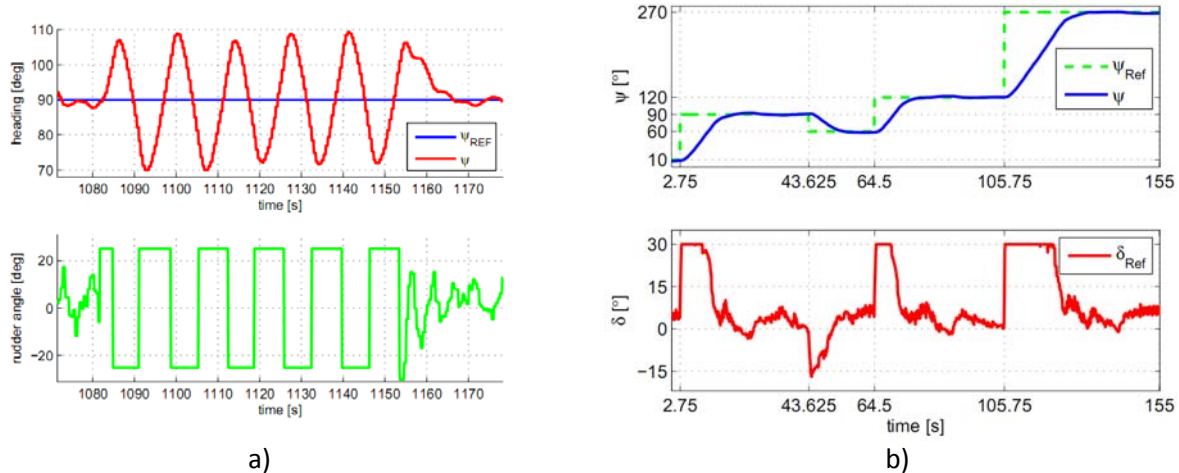
$$\frac{\psi}{\delta} = \frac{K}{(Ts+1)s} \quad (5)$$

gdje je δ odklon kormila, ψ kurs a K i T parametri Nomotovog modela koje treba identificirati. U [11] je pokazano da se vrijednosti K i T mogu odrediti iz odziva sustava za vrijeme cik-cak manevra, jednostavnom integracijom. Nedostaci ovog pristupa identifikaciji su:

- Ovim postupkom se mogu odrediti samo parametri linearnog Nomotovog modela – ako se javljaju nelinearni članovi u opisu otpornosti, postupak se ne može primijeniti.
- Ukoliko vanjski poremećaj djeluje na sustav, jednadžbe za računanje nepoznatih parametara postaju kompleksne i izrazi za računanje nepoznatih parametara su implicitni.
- Ukoliko se u razmatranje uključi i dinamika kormila, tj. nelinearni element u zatvorenom krugu je složeniji od dvopoložajnog releja sa histerezom (vidi Sliku 5), proračun nepoznatih parametara postaje iterativan, kao što je prikazano u [30].

3.4. Identifikacija postupkom vlastitih oscilacija (IVO)

Postupak identifikacije vlastitim oscilacijama je razvijen u LaPoST-u i do sada je primjenjen na daljinski upravljanoj ronilici VideoRay, autonomnoj ronilici AutoMarine, [12] i na bespilotnom katamaranu Charlie u suradnji sa Consiglio Nazionale delle Ricerche, [13].



Slika 6. a) Odziv kursa i kormila plovila tijekom IVO eksperimenta i b) odziv plovila sa autopilotom podešenim prema rezultatima dobivenim IVO eksperimentom.

Glavna motivacija za razvijanje ovog postupka je proizašla iz potrebe za jednostavnim određivanjem parametara nelinearnog modela plovila (kao što je cik-cak manevar jednostavan za određivanje parametara linearnog modela). Postupak je uz to morao biti neosjetljiv na prisustvo poremećaja (struja, valova, vjetra, itd.), biti vremenski nezahtevan i prikladan za terenske uvjete. Kao glavna ideja vodilja bila je činjenica da je cik-cak manevar zapravo uvođenje sustava u vlastite oscilacije. Kroz istraživanje se

dokazalo da su vlastite oscilacije (tj. njihova amplituda i frekvencija) dovoljno informativne za određivanje inercije i parametra linearne otpornosti. Primjer izazivanja ovakvih vlastitih oscilacija na katamaranu Charlie je prikazan Slikom 6a). Autopilot koji je projektiran za Charlie na osnovu parametara identificiranih IVO postupkom je rezultirao odzivima prikazanim Slikom 6b). Uz to, ovaj postupak je primijenjen i za podešavanje regulatora, [14], za praćenje linije, [15], te regulatora za držanje udaljenosti, [4].

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeni su postupci identifikacije parametara matematičkih modela površinskih i podvodnih plovila koji se koriste u Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije (LaPoST) na Sveučilištu u Zagrebu. Dan je kratki pregled prednosti i nedostataka sveg postupka. Rezultati su prikazani na primjeru daljinski upravljane ronilice, autonomne ronilice ta autonomnog katamarana. Nadalje, opisan je i laboratorijski postav koji se koristi za određivanje parametara matematičkog modela, a temelji se na obradi slike. Postupak identifikacije korištenjem vlastitih oscilacija je opisan kao originalan postupak razvijen na LaPoST-u. Njegova primjena u laboratorijskim uvjetima i uvjetima na terenu je pokazala da je jednostavan i da daje zadovoljavajuće rezultate koji se mogu iskoristiti za projektiranje različitih razina upravljanja plovilima.

POPIS LITERATURE

1. M. Barbier and E. Chanthery. *Autonomous mission management for unmanned aerial vehicles*. Aerospace Science and Technology, 8(4):359–368, 2003.
2. F. Repoulas and E. Papadopoulos. *Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs*. Ocean Engineering, 34(11–12):1650–1667, 2007.
3. Y. il Lee, Y.-G. Kim, and L. J. Kohout. *An intelligent collision avoidance system for AUVs using fuzzy relational products*. Information Sciences, 158:209–232, 2004.
4. N. Miskovic, Z. Vukic, I. Petrovic, and M. Barisic. *Distance keeping for underwater vehicles – Tuning Kalman filters by using self-oscillations*. Proc. of the OCEANS'09 Conference, 2009.
5. M. Stipanov. *Autonomizacija VideoRay Pro II daljinski upravljane ronilice*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2007.
6. M. Caccia, G. Bruzzone, and R. Bono. *Modelling and identification of the Charlie2005 ASC*. Proc. of IEEE 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2006.
7. T.I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1994.

8. M. Stipanov, N. Miskovic, Z. Vukic i M. Barisic. *ROV autonomization – yaw identification and Automarine module architecture*. Proc. of the CAMS'07 Conference, Bol, Croatia, 2007.
9. N. Miskovic, Z. Vukic, and M. Barisic. *Identification of coupled mathematical models for underwater vehicles*. Proc. of the OCEANS'07 Conference, 2007.
10. E. López, F.J. Velasco, E. Moyano, and T.M. Rueda. *Full-scale manoeuvring trials simulation*. Journal of Maritime Research, 1(3):37–50, 2004.
11. J. M. J. Journée. *A simple method for determining the manoeuvring indices K and T from zigzag trial data*. Technical 0267, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft, Netherlands, 2001.
12. N. Miskovic, Z. Vukic, M. Barisic, and P.P. Soucacos. *AUV identification by use of self-oscillations*. Proc. of the CAMS'07 Conference, Bol, Croatia, 2007.
13. N. Miskovic, Z. Vukic, M. Bibuli, M. Caccia and G. Bruzzone. *Marine vehicles' line following controller tuning through self-oscillation experiments*. Proc. of the 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece, 2009.
14. N. Miskovic, Z. Vukic, M. Barisic, and B. Tovornik. *Autotuning autopilots for micro-ROVs*. Proc. of the 14th Mediterranean Conference on Control and Applications, 2006.
15. N. Miskovic, M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia and Z. Vukić. *Tuning Marine Vehicles' Guidance Controllers through Self--Oscillation Experiments*. Proceedings of the MCMC'09 Conference, Guarujá, Brasil, 2009.