

8. Simpozij o sistima automatskog upravljanja, Zagreb  
26-29. travanj 1992, št. 207-212

## TEMELJNE ODREDNICE INTELIGENTNOG SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE I OBRADU PODATAKA O PODMORJU\*

D. Stipanićev, I. Mandić  
J. Marasović, Z. Torba, M. Cecić

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje  
SVEUČILIŠTE U SPLITU  
R. Boškovića bb, 58000 SPLIT  
tel. 058/563-777 fax. 058/563-877

**SAŽETAK.** Izlažu se temelje odrednice inteligentnog sustava za prikupljanje i obradu podataka o podmorju (ISPOPOP). Sustav se sastoji od male komercijalne ronilice bez ljudske posade opremljene različitim senzorima i daljinski upravljane iz upravljačke jedinice smještene na matičnom brodu, te od računarskog sustava za prikupljanje, obradu i prezentaciju prikupljenih podataka. U radu je opisana organizacija projekta i metodologija rada na projektu, a posebna pažnja posvećena je rezultatima dosadašnjih istraživanja na kojima se projekt temelji.

**FUNDAMENTAL DETERMINATIONS OF INTELLIGENT SYSTEM FOR UNDERWATER DATA ACQUISITION AND PROCESSING.** The paper discuss fundamental determinations of intelligent system for underwater data acquisition, processing and presentation. System is conceived as an assembly of few distinctive parts. In the middle of the system is a commercial, low-cost remotely operated underwater vehicle equipped with different sensors and controlled by computer located on the base ship through the umbilical cable. Another important part is a computerized subsystem for collecting, analyzing and presentation of underwater environment information. The paper presents the structure of the system and the methodology of the project. Special attention is given to the research done in the first part of the project.

### 1. UVOD

Pomorski orijentirane zemlje angažirale su znatan znanstveno-istraživački potencijal i materijalna sredstva za istraživanje podmorja, s jedne strane zbog izuzetnog strateškog značaja mora i podmorja kao izvora sirovina i hrane, a s druge strane zbog izuzetnog značaja mora za ekološku ravnotežu čovjekovog okružja. Suvremene metode istraživanja podmorja, te obavljanja poslova postavljanja, nadzora i održavanja podvodnih instalacija uključuju, osim slobodnog ronjenja, i primjenu ronilica sa i bez ljudske posade. Posebno mjesto zauzimaju ronilice bez ljudske posade, prije svega kao zamjena za rad ronilaca na dubinama i u područjima koja su za čovjeka opasna. Međutim one s druge strane pružaju i dodatne mogućnosti u odnosu na ronilice, primjerice mogućnost nošenja raznih instrumenata, sistematsko istraživanje određenog područja u automatskom režimu rada i slično, a uz cijenu znatno manju od cijene ronilice s ljudskom posadom.

U evropskim i američkim istraživačkim laboratorijima razvijeno je za vlastite potrebe i u suradnji sa sveučilištima, niz prototipnih ronilica bez ljudske posade. S druge strane u posljednjih par godina javljaju se proizvođači koji nude relativno jeftine, komercijalne ronilice, opremljene video kamerama i senzorima, ručno vodene operaterom na matičnom brodu. Djelotvornost ovakvih komercijalnih ronilica može se znatno povećati korištenjem postupaka razvijenih u okviru računskih znanosti, posebno umjetne inteligencije, te u okviru suvremene teorije vodenja. S druge strane ronilica povezana spojnim kabelom s matičnim brodom predstavlja izuzetno složeni kinematički sustav koji mora djelovati u nepredvidivom okružju. Zbog toga ona predstavlja

\*Rad je nastao u okviru primjenjenog znanstvenog istraživanja 2-06-205 financiranog od strane Ministarstva znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske.

\*The paper is a part of an applied scientific project supported by Ministry of Science, Technology and Informatics of Republic Croatia under contract No. 2-06-205.

idealni objekt na kojem se mogu testirati i usavršavati postuci automatskog vodenja i to posebno senzorski upravljano vodenja i vodenja temeljenog na postupcima umjetne inteligencije.

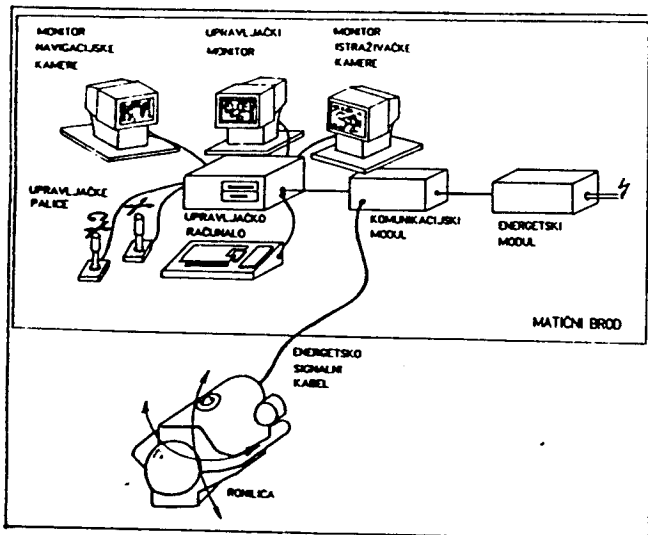
Projekt ISPOPOP zamišljen je kao primjenjeno znanstveno istraživanje koje s jedne strane obuhvaća teorijska istraživanja kinematike i dinamike podvodnih vozila i njihovog inteligentnog senzorski upravljano automatskog vodenja, s tim da bi se dobiveni rezultati mogli primjeniti i pri vodenju drugih složenih sustava. S druge strane predviđa se stvarna izgradnja sustava s ciljem unapređenja istraživanja Jadranskog podmorja. U okviru projekta nabavila bi se mala komercijalne ronilice, dogradila i prilagodila zahtjevima istraživanja Jadrana, te usavršila na temelju rezultata teorijskih istraživanja. Drugi dio projekta obuhvaća teorijska i praktična istraživanja postupka obrade i prikazivanja rezultata istraživanja podmorja prilagodena korisniku.

U ovom radu opisuje se osnovna struktura inteligentnog sustava za prikupljanje i obradu podataka o podmorju i njegova programska podrška, te organizacija projekta i metodologija rada na projektu. Također se ukratko opisuju do sada napravljena istraživanja, prije svega na razvoju matematičkog modela ronilice bez ljudske posade. Iako matematički model nikad ne može u potpunosti opisati stvarno ponašanje sustava, a posebice svako složenog sustava koji djeluje u nepredvidivom okružju, razvoj modela je nužan za razumjevanje ponašanja ronilice, simulacijskog ispitivanja postojećih i novo razvijenih postupaka vodenja, te za obuku potencijalnih operatera u rukovanju ronilicom.

### 2. STRUKTURA INTELIGENTNOG SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE I OBRADU PODATAKA O PODMORJU

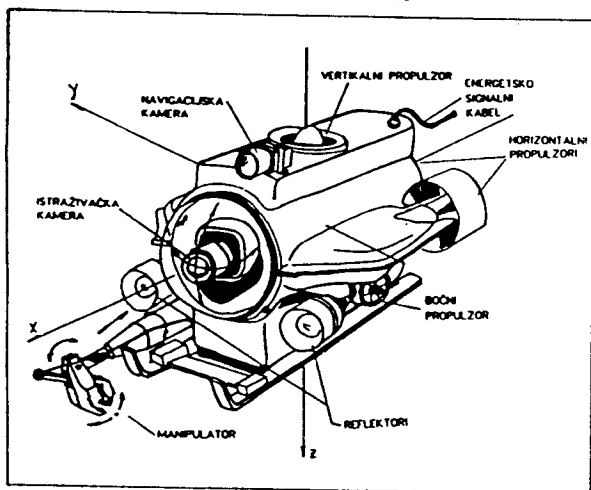
Shematski prikaz sustava prikazuje Sl.1.  
Centralni dio sustava je mala komercijalna ronilica bez ljudske posade, opremljena različitim senzorima i spojena "pupčanim", energetsko/signalnim kabelom s matičnim brodom. Ovakav tip ronilica često se u literaturi naziva "low-cost remotely operated vehicles"

(LCROV) [1,2] kako bi se naglasila razlika između njih i ostalih komercijalnih ronilica koje imaju bolje karakteristike ali i puno veću cijenu. Tipičan izgled jedne takve male komercijalne ronilice s pripadajućom opremom prikazuje Sl.2. Na slici je ucrtan i lokalni koordinatni sustav ronilice sa središtem u centru istisnine ronilice.



Sl.1. Shematski prikaz sustava za prikupljanje i obradu podataka o podmorju

Ronilica najčešće sadrži tri ili četiri upravljačka i pogonska propulzora koje dijelimo u horizontalne, vertikalne i bočne propulzore. Horizontalni propulzori smješteni su u x-y ravnini i služe kao glavni pogon ronilice, te za skretanje ronilice u željeni kurs. Vertikalni propulzor je manje snage. Nalazi se u osi z i koristi pri zaranjanju i izranjanju ronilice. Tipičan način urona ronilice je zaranjanje na željenu dubinu samo uz pomoć vertikalnog propulzora i tek onda vožnja po određenom kursu u x-y ravnini. Četvrti bočni propulzor ima os okomitu na x-z ravninu. Pomaknut je od centra istisnine pa je njegova osnovna zadaća korekcije ljuljanja (okretanje oko x-osi) te pomoć pri naglim manevrima zakretanja. Pri tome on obično radi u suradnji s glavnim horizontalnim propulzorima.



Sl.2. Komercijalna ronilica bez ljudske posade

Ronilica se najčešće konstruira tako da ima neutralnu plovnost, pa se zaustavljanjem zadržava na dubini na kojoj se trenutno našla. Jasno to vrijedi samo u idealnom slučaju za određenu slanost i temperaturu mora pa je prije zaranja obično nužno balansiranje ronilice dodavanjem ili oduzimanjem odatnih tereta. Energetska i signalna veza ronilice s matičnim brodom ostvarena je "pupčanik" kabeom. Obično se radi o višezilnom kabeom neutralne plovnosti, kako bi njegov utjecaj na ronilicu bio što manji.

Ronilica je opremljena nizom osjetila koja možemo podijeliti u dvije grupe:

- navigacijska osjetila, i
- istraživačka i radna osjetila.

iako se često jedno osjetilo može svrstati u obje grupe.

**Navigacijska osjetila** služe za potrebe vođenja ronilice, te uključuju sljedeće uređaje:

- kompas kojim se detektira kurs ronilice
- dubinomjer kojim se detektira udaljenost ronilice od morske razine,
- mjerac udaljenosti od dna,
- navigacijsku crno/bijelu kameru fiksno smještenu na prednjoj strani ronilice i usmjerenu prema unaprijed,
- brzinomjer koji detektiraju brzinu ronilice, i to u većini slučajeva relativnu brzinu u odnosu na strujanje vode oko ronilice, a ne apsolutnu brzinu u odnosu na zemlju,
- mjerače udaljenosti u horizontalnoj ravnini od ronilice do prepreke oko nje, i
- lokator kojim se određuje položaj ronilice unutar područja pokrivenog predajnicima lokatora.

Jasno nije nužno postojanje svih navigacijskih osjetila, posebno što su neka od njih, primjerice lokator zajedno sa sustavom predajnika skuplje i od same ronilice.

**Istraživačka i radna osjetila** služe za prikupljanje znanstvenih informacija i pomažu pri obavljanju zadataka kojeg ronilica treba napraviti. Od svih osjetila najznačajnija je:

- pokretljiva istraživačka kamera koja se može okretati oko svojih osi, nezavisno od gibanja ronilice. Ona je obično smještena u prozirnoj centralnoj kupoli ronilice i ima pokretački mehanizam koji omogućava okretanje kamere oko y i z osi. Na taj način kamera ima puno veće vidno polje bez potrebe pokretanja same ronilice. Položaj kamere uočljiv je i an Sl.2.

Ostala osjetila uključuju:

- mjerače temperature,
- mjerače slanosti,
- mjerače prozirnosti,
- detektore pojedinih kemijskih spojeva u morskoj vodi,
- foto aparat velike rezolucije za dodatno dokumentiranje pojedinih situacija ili stereo foto aparat koji omogućava naknadnu trodimenzionalnu rekonstrukciju snimljenih objekata, i slično.

Osim osjetilima, ronilica može biti opremljena i izvršnim uređajima. Tipičan primjer je

- manipulator s jednim ili više stupnjeva slobode opremljen odgovarajućom hvataljkom u ovisnosti o zadatku ronilice.

Prema zamisli projekta ISPOPOP centralna upravljačka i energetska jedinica nalazi se na matičnom brodu i sastoji se od energetskog modula, komunikacijskog modula, upravljačkog računala i tri monitora (Sl.1). Jedan monitor priključen je na računalo i služi za komunikaciju korisnika s računalom i ronilicom. Druga dva monitora priključena su preko sustava za digitalizaciju slike (frame grabber) na video kamere, pa se na monitoru u boji prikazuju slike koje snima istraživačka kamera, dok se na crno/bijelom monitoru prikazuju slike dobivene od navigacijske kamere. U oba slučaja slike se dodatno obrađuju na računalu. Dorada se sastoji u dodavanju grafičke maske s podacima korisnim navigatorom i/ili istraživaču, primjerice podatke o dubini, kursu, datumu, vremenu, poziciji i slično. Slike se po naredbi operatera mogu arhivirati na dva načina, kontinuirano na video recorderu, a posebno zanimljive slike i scene i direktno na tvrdom disku računala. U post-istraživačkoj obradi snimljeni materijal može se naknadno reproducirati, i što je najvažnije naknadno obrađivati, te uključivati u istraživačke izvještaje i baze podataka o podmorju.

Na centralnom monitoru spojenom s računalom prikazuju se podaci dobiveni od senzora, te biraju režimi rada senzora i načini upravljanja ronilicom. Prikaz podataka i način izbora izvršnih radnih maksimalno je prilagođen korisniku korištenjem prozora, grafičkih prikaza, padajućih izbornih listi, upotrebom miša, predefiniраниh funkcijskih tipki i slično. Osnovna komunikacija operatera i ronilice odvija se preko ovog

ekrana, s tim da se pojedini važni podaci prenose i na monitore navigacijske, odnosno istraživačke kamere.

Neke od upravljačkih opcija, o kojima će kasnije biti više govora, su i direktno daljinsko i operatersko daljinsko, ručno vođenje ronilice. Kao dodatna pomoć u takvom režimu rada dodane su i dvije (ili tri) upravljačke palice. U verziji s dvije upravljačke palice jedna služi za upravljanje ronilicom, a druga za usmjeravanje istraživačke kamere.

Palica za upravljanje ronilicom može imati dva ili tri para pokreta unaprijed-unatrag, lijevo-desno i zakret ulijevo-zakret unatrag, s tim da u verziji s dva para pokreta optada treća opcija. Svakom od pokreta palice pridružuje se jedan od načina kretanja ronilice npr. pokretu naprijed-natrag može biti također pridruženo kretanje ronilice naprijed-natrag ili pak izranjanje-uranjanje.

U slučaju da palica ima tri para pokreta pomoću nje može se upravljati s tri stupnja koji uključuju sve translacijske i kutne pomake (više detalja u Poglavlju 4). To je najčešće i dovoljno, zato što u ručnom upravljanju neki pomaci nisu zanimljivi već se nastoje stabilizirati posebnim regulacijskim petljama. Tipičan primjer je kutni zaokret oko osi x (liulanje). Kod palice s dva para pokreta neki pomaci ronilice prebacuju se na tastaturu računala ili se dozvoljava prebacivanje pojedinih stupnjeva slobode pritiskom okidača na palici. Tako naprimjer pokret palice naprijed natrag uz nepritisnut okidač odgovara pomaku ronilice naprijed-natrag, a uz pritisnut okidač zaranjanju-izranjanju.

Palica za usmjeravanje istraživačke kamere ima samo dva para pokreta zato što se istraživačka kamera može samo okretati oko svoje vertikalne i horizontalne osi. Na taj način ona pokriva polukružni prostor ispred ronilice.

U verziji s tri upravljačke palice, dvije bi bile za upravljanje ronilicom, pa bi se na taj način moglo simultano upravljati sa svih šest stupnjeva slobode ronilice.

Energetski modul sadrži sve energetske jedinice potrebne za napajanje uređaja, a prije svega električnih pogonskih motora propulzora. Sva energetska i signalna komunikacija centralne upravljačke i energetske jedinice ide preko komunikacijskog modula.

### 3. PROGRAMSKA PODRŠKA ISPOPOP-a

Za svrhovito funkcioniranje sustava nužna je odgovarajuća programska podrška. U skladu s funkcionalnom podjelom projekta ISPOPOP na projekte RONILICA, SENZORI i EXPERT programsku podršku možemo podijeliti na sličan način.

U prvom i djelomično drugom dijelu razvijaju se programski okviri i algoritmi za potrebe vođenja ronilice. U drugom dijelu, osim toga, razvijaju se algoritmi inteligentnog i selektivnog prikupljanja senzorskih informacija o okruženju ronilice, obrađuje se fuzija informacija dobivenih redundantnim senzorima, te razvija programska podrška prilagođenih i novo razvijenih senzora.

Treći dio, EXPERT, uključuje postupke i programe za obrdu i pohranu prikupljenih podataka o podmorju, te postupke stvaranja znanja o podmorju na temelju podataka o podmorju, te algoritme "hypermedijskog" prikaza prikupljenih podataka i znanja prilagođenog ne tehnički obrazovnim korisnicima. U okviru ovog rada osvrnut ćemo se detaljnije na postupke vođenja ronilice.

Moguća su četiri osnovna načina vođenja ronilice [3]: direktno daljinsko vođenje (telepresent), operatersko daljinsko vođenje (teleoperated), nadzorno daljinsko vođenje (supervisory control) i autonomno vođenje (autonomous). Kod direktnog daljinskog vođenja na upravljačkom mjestu postoji dovoljno senzorskih informacija kojima se simulira okružje ronilice, pa operater vodi ronilicu kao da je on direktno prisutan na samom vozilu.

Operatersko daljinsko vođenje u osnovi je vođenje tipa gospodar-sluga (master-slave) a minimalnom količinom senzorskih informacija predočenih operateru. Sustav vođenja preuzima određene funkcije i izvodi ih automatski, primjerice nadzor i dijagnostiku ronilice.

predprocesiranje senzorskih informacija s automatskim odabirom prikazan na upravljačkom monitoru, te rad motora propulzora u zatvorenoj regulacijskoj petlji, tako da operater samo zadaje referentne veličine.

Dodatna nadgradnja je nadzorno daljinsko vođenje, kod kojega sustav vođenja pojedine radnje preuzima automatski. Tipični primjeri su samostalno praćenje kursa, ronjenje na konstantnoj dubini ili fiksnoj udaljenosti od dna, praćenje gradijenta temperature, praćenje pokretnog objekta, automatsko vraćanje na početnu poziciju. Operater zadaje sustavu vođenja određeni parcijalni zadatak koji on, nakon toga, sam izvršava.

Najsloženiji način vođenja je autonomno vođenje kod kojeg se zadaje samo konačni globalni cilj, a sve radnje nužne za postizanje tog cilja obavljaju se samostalno, bez učesća operatera. Primjer bi bilo izdavanje naredbe: "Pronadi potopljeni objekt u području xy!", koju bi sustav izvršavao sam, razbijajući naredbu na sastavne dijelove, kreirajući globalni plan zadatka i izvršavajući pojedine podzadatke samostalno.

U okviru ISPOPOP-a radi se na teorijskim istraživanjima i razvoju sva četiri načina vođenja s posebnim naglaskom na operatersko i nadzorno daljinsko vođenje s elementima autonomnog vođenja. Autonomnost se očituje u ugradnji inteligentnih reakcija, prije svega sa ciljem samozaštite ronilice u opasnim situacijama, ali i u mogućnosti iskorištavanja informacija dobivenih od redundantnih senzora. Naprimjer u hijerarhiji zadataka kao najvažniji zadatak postavlja se samozaštita ronilice, pa ukoliko operater nepažnjom ili namjerno usmjeri ronilicu prema prepreci, sustav vođenja preuzima kontrolu i automatski izbjegava prepreku. Ili ukoliko dođe do otkaza navigacijske kamere sustav bi se automatski prebacio na istraživačku kameru koju bi postavio tako da ima isto vidno polje kao i navigacijska kamera.

Dio samozaštitnih reakcija prenijet je i na samu ronilicu. To se prije svega odnosi na automatsko izranjanje ukoliko dođe do prekida ili oštećenja energetske/signalnog kabela.

### 4. PREGLED DOSADAŠNJIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Dosadašnji rad na projektu ISPOPOP prvenstveno je teorijski znanstveno - istraživački rad koji služi kao priprema i predranja praktičnom dijelu do kojeg će doći nabavkom ronilice. Međutim, rad na projektu ISPOPOP zamišljen je i provodi se tako da dobiveni teorijski rezultati budu dovoljno opći kako bi se mogli koristiti i u drugim područjima.

U proteklom razdoblju (1991) osim što je globalno razrađena struktura sustava nastojalo se paralelno raditi i na pojedinim dijelovima sva tri podprojekta (RONILICA, SENZORI i EKSPERT). Posebno treba istaknuti rad na razvoju matematičkog modela ronilice. Kratak pregled dan je u Poglavlju 5., a ovdje treba istaknuti značaj razvoja modela, bez obzira na brojne poteškoće i netočnosti koje su se javile kod određivanja vrijednosti koeficijenata. Matematički model je izuzetno značajan, ne samo zbog toga što se njeovim razvojem dobije potpuniji uvid u funkcioniranje ronilice, već i zbog toga što je potreban pri testiranju algoritama vođenja, kao i u izgradnji simulatora za obuku operatera u rukovanju ronilicom.

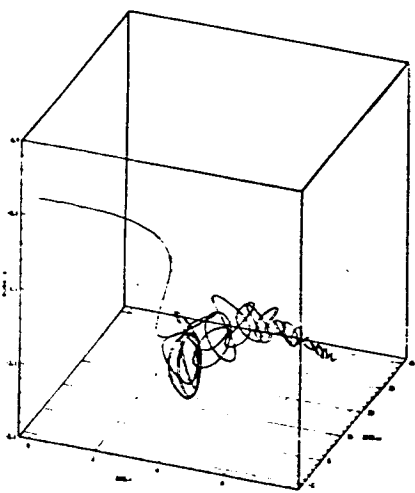
U temeljna istraživanja spada i rad na razvoju postupaka jedinstvenog prikaza senzorskih informacija, ponašanja sustava, upravljačkih akcija i algoritama vođenja. Postavljene su teorijske osnove temeljene na teoriji neizrazitih relacija (fuzzy relation) [4].

Rad na automatskom vođenju upravljanoj senzoru vida drugo je značajno područje rada koje spada i u podprojekte RONILICA i SENZOR. Postavljene su teorijske osnove pozitivnog senzora vida (fuzzy eye) inspiriranog kompadnim okom insekta i dostatnog za niz zadataka senzorski upravljanoj vođenja, primjerice praćenje svjetlosnog ili toplinskog izvora. Preliminarni rezultati objavljeni su u radu [5], a na ovoj problematici nastavlja se intenzivno raditi i u sljedećem razdoblju, pa se potpuniji rezultati očekuju. Četvrtu grupu čine istraživanja u okviru podprojekta EXPERT. Raspoložive informacije o podmorju često su rezultat samo opservacije istraživača, a ne

mjerenja, pa su po svom karakteru kvalitativne, a ne kvantitativne. Kako bi se ipak mogle provesti određene analize nužno je razraditi i primijeniti postupke formiranja kvalitativnih modela sustava, te postupke njegove kvalitativne analize. Prilog ovim nastojanjima je i programski paket QUANA za interaktivnu, kvalitativnu analizu složenih sustava [6]. Primjer primjene postupaka i programa u analizi morskih ekosustava opisan je u radu [7].

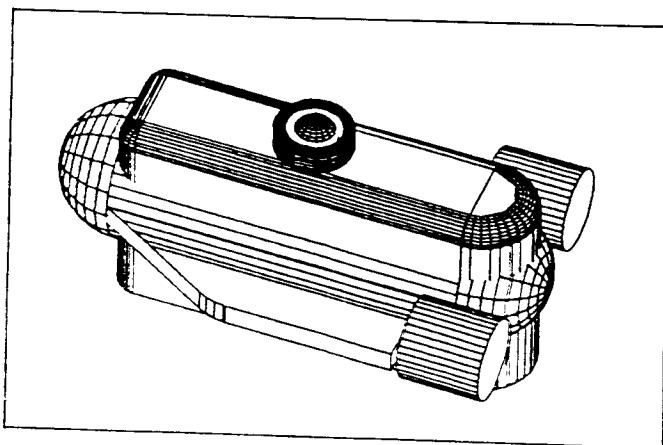
### 5. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA RONILICE BEZ LJUDSKE POSADE

U ovom dijelu navode se temeljne odrednice kojih smo se držali pri razvoju matematičkog modela ronilice bez ljudske posade. Točnije kazano tijekom pripreme projekta i u proteklom istraživačkom razdoblju razvijeno je nekoliko matematičkih modela ronilica različitih koncepcija i geometrije. Primjeri su ronilica torpednog oblika s krmnim propulzorom i vertikalnim i horizontalnim krmnim kormilima [8,9] i ronilice torpednog oblika s dva horizontalna i jednim vertikalnim propulzorom [10]. Slika 3. prikazuje primjer putanje ronilice s krmnim kormilima u slučaju otkazivanja upravljačkog mehanizma kormila.



Sl.3. Putanja ronilice s krmnim kormilima pri otkazivanju upravljačkog mehanizma kormila

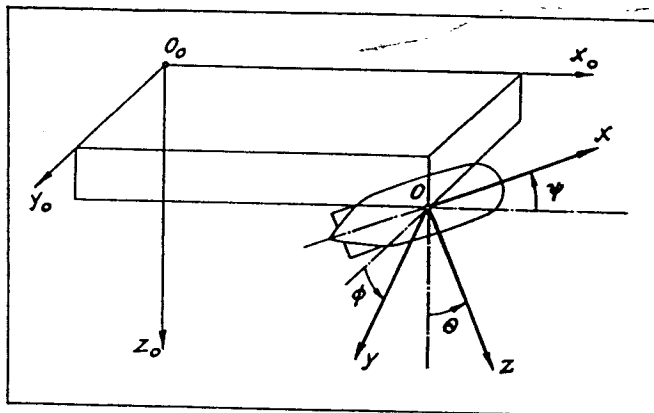
Na temelju stečenih iskustava krenulo se u razvoj matematičkog modela ronilice složenije geometrije, izgledom slične komercijalnoj ronilici koja bi trebala biti centralni dio ISPOPOP-a. Perspektivni prikaz ronilice dan je na slici 4.



Sl.4. Perspektivni prikaz analizirane ronilice

Ronilica je izrazito složeni, nelinearni mehanizam. Pri proučavanju njene dinamike potrebno je definirati dva koordinatna sustava: statički  $(O_0, X_0, Y_0, Z_0)$ , vezan za površinu mora (matični brod), sa osi  $Z_0$  usmjerenom prema

dnu i dinamički, čije se središte nalazi u metacentru ronilice (centru istisnine), a os  $X$  se podudara sa uzdužnom osi ronilice. Ronilica ima 6 stupnjeva slobode kretanja. Položaj joj je u osnovnom (statičkom sustavu), određen pozicijom  $\epsilon, \eta, \zeta$ , te zakretnim kutovima  $\theta, \phi, \psi$ . Koordinatni sustavi ronilice prikazani su na Sl.5.



Sl.5. Koordinatni sustavi ronilice

Transformacija sile i gibanja iz lokalnog (dinamičkog) sustava u osnovni (statički) odvija se preko transformacijske matrice  $\underline{I}$ , a iz osnovnog u lokalni preko  $[\underline{I}]^{-1}$ , gdje je

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \cos\theta\sin\psi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\psi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\theta\cos\psi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \sin\theta\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gibanje tijela određeno je vektorima translatorne i kutne brzine

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \vec{\omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \vec{R}_C = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdje je  $\vec{R}_C$  radijus vektor točke čije gibanje treba ispitati u dinamičkom sustavu ronilice. Temeljna dinamička jednadžba sila dana je izrazom:

$$\vec{F}_V = \underline{M}_T \dot{\vec{v}} + \vec{\omega} \times \underline{M}_T \vec{v} + \underline{M}_{RT}^T \dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times \underline{M}_{RT}^T \vec{\omega} \quad (3)$$

gdje je

$$\underline{M}_T = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad \underline{M}_{RT} = \begin{bmatrix} 0 & -mZ_C & mY_C \\ mZ_C & 0 & -mX_C \\ -mY_C & mX_C & 0 \end{bmatrix}$$

$m$  je masa ronilice, a  $\underline{M}_{RT}^T$  transponirana matrica od  $\underline{M}_{RT}$ .

Analognim razmatranjem dobije se jednadžba momenata:

$$\vec{M}_V = \underline{M}_{RT} \dot{\vec{\omega}} + \underline{M}_R \dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times \{ \underline{M}_{RT} \vec{v} + \underline{M}_R \vec{\omega} \} + \vec{v} \times \{ \underline{M}_T \dot{\vec{v}} + \underline{M}_{RT}^T \vec{\omega} \} \quad (4)$$

gdje je  $\underline{M}_R$  matrica momenata inercije

$$\underline{M}_R = \begin{bmatrix} I_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & I_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Sve vanjske sile i momenti u podvodnom režimu rada djeluju u centru istisnine. Budući je centar istisnine ujedno i metacentar (oko te točke ronilica rotira), to je za opisivanje dinamike ronilice značajno ponašanje centra istisnine. Kako je to u našem slučaju ujedno i središte dinamičkog sustava jednadžbe sila i momenata mogu se pojednostavniti u oblik

$$\vec{F}_V = M_T \dot{\vec{v}} + \vec{\omega} \times M_T \vec{v} \quad (5)$$

$$\vec{M}_V = M_R \dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times (M_R \vec{\omega}) \quad (6)$$

Jedan od osnovnih zahtjeva pri radu ronilice postizavanje je neutralnog trima (sila uzgona jednaka sili težine). Zbog toga gustoća vode mora biti jednaka prosječnoj gustoći ronilice. Pri proračunu dinamike potrebno je uzeti u obzir da se ubrzanjem ronilice ujedno mora ubrzati i sloj fluida koji pristanja uz ronilicu i giba se zajedno s njom. Ovakv dodatni inercijski utjecaj naziva se pridružene mase i izražava koeficijentima koji utječu na linearnu i kutnu akceleraciju. Pravi način dolaženja do vrijenosti pridruženih masa jesu dinamički testovi zasnovani na mehanizmu ravninskog gibanja. Uzevši u obzir pridružene mase dinamičke jednadžbe postaju

$$\vec{F}_V = (M_T + A_T) \dot{\vec{v}} + \vec{\omega} \times (M_T + A_T) \vec{v} \quad (7)$$

$$\vec{M}_V = (M_R + A_R) \dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times (M_R + A_R) \vec{\omega} + \vec{v} \times (M_T + A_T) \vec{v} \quad (8)$$

gdje su  $A_T$  i  $A_R$  matrice pridruženih masa translacije i rotacije.

$$A_T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad A_R = \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix}$$

Meduutjecajne pridružene mase su zanemarene, zato što je ronilica hidrodinamički simetrična.

Vanjska sila na ronilicu određena je sumom hidrodinamičkih sila  $F_H$ , gravitacijskih sila  $F_B$ , pokretačkih sila  $F_T$ , te sila poremećaja  $F_C$ .

$$\vec{F}_V = \vec{F}_H + \vec{F}_B + \vec{F}_T + \vec{F}_C = \vec{F}_H + \vec{F}_C + \vec{F}_I + \sum \vec{F}_{Ti} + \vec{F}_C \quad (9)$$

$$\vec{M}_V = \vec{M}_H + \vec{M}_B + \vec{M}_T + \vec{M}_C = \vec{M}_H + \vec{R}_H \times \vec{F}_C + \vec{R}_I \times \vec{F}_I + \sum \vec{R}_{Ti} \times \vec{F}_{Ti} + \sum \vec{M}_{Ti} + \vec{M}_C \quad (10)$$

gdje su  $\vec{F}_C$  i  $\vec{F}_I$  sile težine, odnosno istisnine a  $R_H$  i  $R_I$  radijus vektori težista i centra istisnine ronilice u dinamičkom koordinatnom sustavu, a  $R_{Ti}$  radijus vektori središta i-tog propulzora.

Hidrodinamičke sile i momenti javljaju se kao posljedica opiranja fluida gibanju ronilice. Stvarne vrijednosti hidrodinamičkih sila dobijaju se eksperimentalnim putem mjerenjem u vodenim tunelima, dok se matematički najčešće izražavaju silom koja je proporcionalna kvadratu brzine gibanja:

$$\vec{F}_H = K_{TH} \vec{v} |\vec{v}| \quad (11)$$

$$\vec{M}_H = K_{RH} \vec{\omega} |\vec{\omega}| \quad (12)$$

$K_{TH}$  i  $K_{RH}$  su matrice hidrodinamičkih koeficijenata zbog translacije i rotacije. Za simetrično tijelo ostaju samo dijagonalni članovi ovih matrica.

Za konačan proračun, sile gravitacije i uzgona trebaju biti definirane u statičkom koordinatnom sustavu pa ih je potrebno dodatno transformirati jednadžbe glase

$$\vec{F}_B = \vec{F}_C + \vec{F}_I = (mg - \rho g V) [-\sin\theta \cos\phi \sin\theta \cos\phi] \vec{I} \quad (13)$$

$$\vec{M}_B = \vec{M}_C + \vec{M}_I = \vec{R}_C \times \vec{F}_C + \vec{R}_I \times \vec{F}_I \quad (14)$$

U našem slučaju  $\vec{R}_I$  je nul vektor, a težiste ronilice se nalazi u točki  $(0, 0, z_g)$ , pa u neutralnom trimu vrijedi

$$\vec{F}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{M}_B = \begin{bmatrix} -G_0 z_g \cos\theta \sin\theta \\ -G_0 z_g \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

gdje je  $G_0 = mg$  težina ronilice.

Rezultantne sile i momenti pokretačkog mehanizma izražavaju se sumom pokretačkih sila i momenata svih pojedinih propulzora.

$$\vec{F}_T = \sum \vec{F}_{Ti} \quad (16) \quad \vec{M}_T = \sum \vec{M}_{Ti} + \sum \vec{R}_{Ti} \times \vec{F}_{Ti} \quad (17)$$

Ronilica ima četiri propulzora: dva krmena, jedan vertikalni i jedan bočni. Krmeni propulzori djeluju slobodno u prostoru, pa im je djelovanje bitno drugačije u odnosu na vertikalni i bočni propulzor koji djeluju u tunelu (sapnici).

Vijak u sapnici stvara potisnu silu kombinacijom reaktivnog potiska morske vode usisane i izbačene kroz sapnicu i zbog promjene distribucije pritiska na ulazu i izlazu iz sapnice. Potisna sila zbog varijacije u distribuciji pritiska na trupu ronilice jako ovisi o linearnoj brzini u smjeru osi x, pa se koeficijenti sile i momenata najčešće izražavaju u ovisnosti o kvocijentu  $u/|n|$ , gdje je u linearna brzina u smjeru osi x, a n broj okretaja propulzora. Smještanjem propulzora na vrh ronilice i poklapanjem osi sapnice s osi z ronilice, ostaju samo sile u smjeru osi z. Matematički se izražavaju složenim nelinearnim izrazima [10].

Slično, bočni propulzor razvija silu u smjeru osi y, ali kako je on pomaknut u točku  $(x_{T2}, y_{T2}, z_{T2})$  dodatno se razvijaju momenti oko osi x i z. Nelinearni koeficijenti propulzora pronalaze se eksperimentalnim putem, međutim ako su poznati za propulzor određenih dimenzija, približne vrijednosti mogu se izračunati i za propulzore drugih dimenzija koristeći teoriju sličnosti.

Pokretačke sile i momenti koje razvijaju stražnji, slobodni propulzori definiraju se izrazima

$$F_{T3,4} = K_{Ti} \rho n_{3,4} |n_{3,4}| D_{3,4}^4 \quad (18)$$

$$M_{T3,4} = K_{Qi} \rho n_{3,4} |n_{3,4}| D_{3,4}^5 \quad (19)$$

gdje su  $D_{3,4}$  promjeri propulzora,  $\rho$  je gustoća fluida,  $n_{3,4}$  brojevi okretaja propulzora, a  $K_{Ti}$  i  $K_{Qi}$  koeficijenti propulzije. Osnovni problem je taj što su koeficijenti  $K_{Ti}$  i  $K_{Qi}$  nelinearne promjenjive veličine koje se također obično određuju eksperimentom.

Četvrtu grupu čine poremećajne sile i momenti. Ronilica nema vlastite izvore energije već je s matičnim plovilom spojena energetsko signalnim kabelom. Poremećajne sile i momenti kabela aproksimiraju se izrazima

$$\vec{F}_C = \underline{C} [\vec{v} \quad |\vec{v}|] \quad (20)$$

$$\vec{M}_C = \underline{D} [\vec{\omega} \quad |\vec{\omega}|] \quad (21)$$

gdje su  $\underline{C}$  i  $\underline{D}$  matrice koeficijenata utjecaja kabela. Pod utjecajem morskih struja kabel može imati nepredvidivi oblik i djelovanje, pa se koeficijenti najčešće određuju eksperimentalno.

Sumiramo li na kraju sve vanjske utjecaje i uvrstimo li ih u dinamičke jednadžbe dobije se sustav od 6 nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Uz to, kako se ronilica prati u statičkom koordinatnom sustavu, potrebno je linearne i kutne brzine transformirati u statički koordinatni sustav pomoću transformacijske matrice  $\underline{I}$ . Ovo nam daje dodatnih 6 jednadžbi što ukupno čini sustav od 12 nelinearnih diferencijalnih jednadžbi sa 12 nepoznanica koje u potpunosti opisuju ponašanje ronilice.

Određivanje vrijednosti koeficijenata i pridruženih masa čini najveći je problem kod razvoja matematičkog modela ronilice. Najtočniji način određivanja koeficijenata su dinamički i statički eksperimenti u vodenim tunelima, s ronilicom stvarne veličine ili sa skaliranim modelom ronilice. Mi smo se u ovom trenutku zadovoljili manje točnim postupkom preračunavanja, koristeći vrijednosti date za eksperimentalno ispitane ronilice slične forme [11] i teoriju sličnosti. Takav postupak osigurava dobivanje vrijednosti koje su tek u redu veličine sa stvarnim vrijednostima. Međutim, kao što smo u uvodu naglasili nama matematički model prije svega treba za bolje razumijevanje dinamike i ponašanja ronilice, za testiranje algoritama vodenja i

privikavanje operatera u rukovanju ronilicom, a za te svrhe model približnog ponašanja u potpunosti zadovoljava. Potpuniji opis modela i postupka njegovog razvoja biti će predmet posebnog rada.

## 6. ZAKLJUČAK

Inteligentni sustav za istraživanje podmorja (ISPOPOP) sastoji se od male komercijalne ronilice bez ljudske posade opremljene senzorima i spojene energetsko/ signalnim kablom s matičnim brodom. Na brodu se nalazi centralni sustav vođenja ronilice koji upravlja svim njenim funkcijama, od vođenja ronilice po određenoj putanji, do prikupljanja, selekcije i pohrane informacija prikupljenih senzorima.

Razrađena je osnovna organizacijska struktura sustava, uključujući i module za postprocesiranje prikupljenih informacija o podmorju i njihovu prezentaciju krajnjem, ne tehnički obrazovanom korisniku.

Misljenje smo da je ovakav sustav od izuzetnog značaja za istraživanje podmorja, te da ga zemlja koja sebe smatra pomorskom treba nužno posjedovati.

U okviru dosadašnjeg rada na ISPOPOP-u nastojalo se napraviti teorijsku pripremu praktičnoj realizaciji sustava, s tim da su zadaci vezani uz vođenje, ali i obradu, pohranu i prikazivanje senzorskih informacija tako postavljeni i rješavani da se mogu koristiti i u drugim područjima. Osim toga poseban napor dan je na razvoju matematičkog modela ronilice, s jedne strane kako bi se bolje shvatila njena dinamika i ponašanje, ali i kako bi se uz pomoć modela mogli analizirati algoritmi vođenja, te izgraditi simulator za obuku operatera u upravljanju ronilicom.

## 7. LITERATURA

- [ 1 ] D. Walsh, R.F. Busby, The Low-cost Remotely Operated Vehicle (LCROV), Proc of SUBTECH'85: Advances in Underwater Technology, Aberdeen, UK, 1985, pp. 343-351
- [ 2 ] L.L. Steward, P.J. Auster, Low-cost ROV's for Science, Proc. of OCEANS'89, Seattle, Washington, USA, 1989, pp. 816-819

- [ 3 ] J. Durham, Engineering Intelligent Undersea Vehicles, Proc. of OCEANS'89, Seattle, Washington, USA, 1989, pp. 788-792
- [ 4 ] D. Stipanicev, Fuzzy Relational Models for Intelligent Control, u knjizi R. Hanus, P. Kool, S. Tzafestas (ed), "Mathematical and Intelligent Models in System Simulation", J.C. Baltzer AG Sc. Pub. Co, 1991, pp. 275-279
- [ 5 ] D. Stipanicev, Fuzzy Vision and Fuzzy Control, Proc. of 13th IMACS World Congress on Computation and Applied Mathematics, Dublin, Ireland, 1991, pp. 1210-1211
- [ 6 ] D. Stipanicev, Z. Torba, QUANA-an Interactive Software for Qualitative Analysis of Complex Systems, Proc. of 13th Int. Conf. ITI-1991 (Information, Technology, Interface), Cavtat, 1991.
- [ 7 ] D. Stipanicev, J. Marasović, N. Gačić, Kvalitativno modeliranje složenih morskih ekosustava, Zbornik radova 33. simpozija ETAN U POMORSTVU, Zadar, 1991, pp. 355-359
- [ 8 ] I. Mandić, I. Hrboka, J. Marasović, Modelling and Simulation of the Underwater Manipulator Vehicle, Proc. the Fifth Int. Congress on Marine Technology, Athens, Greece, 1990, pp. 163-165.
- [ 9 ] I. Mandić, J. Marasović, A. Batina, N. Gačić, CAD of the Underwater Robotic Vehicle, Proc. of the Computer Aided Robotic Systems and Factory of the Future Conf., London, 1991.
- [ 10 ] D. Stipanicev, Z. Domazet, Matematički model gibanja daljinski upravljane ronilice, Strojarstvo, 32(4), 1990, pp. 277-283.
- [ 11 ] M. Nomoto, M. Hattori, A Deep ROV "DOLPHIN 3K": Design and Performance Analysis, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-11, No. 3., July 1986, pp. 373-391