

D4.3 Distribuirani navigacijski i lokalizacijski filter

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

31. Siječanj 2019.



Sadržaj

Uvod	2
Kolekcija podataka	3
Predobrada podataka	4
Prošireni Kalman filter	6
Modeli mjerenja	7
Kompenzacija kašnjenja mjerenja	8
Zaključak	9
Literatura	9

Uvod

Dokument opisuje implementirane filtere za podvodnu navigaciju i lokalizaciju. Distribuirana priroda filtera proizlazi iz činjenice da pojedina mjerenja dolaze sa senzora drugih vozila. Filteri integriraju tri vanjska mjerenja: 1) akustički sustav za lokalizaciju, 2) mjerenja kamere s površinskog vozila, 3) mjerenja sonara s površinskog vozila.

Idealno, vođenje i upravljanje plovilima zahtjeva kontinuirano i precizno poznavanje stanja sustava. Stanje sustava definirano je pozicijom, orijentacijom i brzinama. Ponekad se vektor stanja proširuje i specifičnim podacima kao udaljenost ili relativna orijentacija u odnosu na metu ili drugo vozilo. Nažalost, u realnom svijetu mjerenja su često nedostupna, nepotpuna, diskontinuirana i/ili zakašnjela čime se znatno otežava implementacija idealne regulacijske petlje. Zbog toga u ovom dokumentu definiramo modele sustava i alate za *kontinuiranu* estimaciju stanja koja se mogu koristiti za regulaciju.

Dugotrajni cilj istraživanja je razviti i testirati software i hardware rješenja potrebna za kooperativnu navigaciju heterogenih sustava koji se sastoje od površinskih, podvodnih a potencijalno i letućih vozila. Cilj kooperativne navigacije je izmjena podataka iz senzora raznih vozila kako bi se povećala preciznost navigacije podvodnih vozila tokom dugotrajnih misija i zarona. Problem kod dugotrajnih zarona ronilica je nedostatak globalne satelitske navigacije (GNSS) čime je vozilo ograničeno na korištenje senzora za koračnu navigaciju (dead-reckoning). Takav oblik navigacije ima poteškoću da je pogreška u navigaciji inkrementalna i neograničena. Standardni senzori u tom slučaju su inercijski senzori i Doppler mjeraci brzine. Zbog nepostojanja običnog senzora za mjerenje pozicije, kao npr. GNSS za površinska vozila, potrebna je integracija brzine koja rezultira spomenutim inkrementalnim rastom greške u poziciji.

Trenutni pristupi za ograničenje te pogreške je korištenje akustičkih sustava kao Long baseline (LBL) i Ultra-short baseline (USBL). U oba slučaja potrebno je akustičke primopredajnike montirati na vozilo, ali i izvan vozila na poznate lokacije kako bi se omogućilo globalno mjerenje pozicije. Većinom se primopredajnici polažu na dno ili na brod što je zahtjevno ili skupo tokom testiranja malih vozila. Zbog toga je jedan od koraka montiranje USBL sustava na autonomno vozilo kako bi se izbjegao trošak broda. Nedostaci akustičkih sustava su kašnjenje signala (red veličine sekunda) i spora frekvencija mjerenja (od 0.1-1Hz).

Jedno od alternativnih rješenja koja su analizirana je korištenje kamere za detekciju podvodnog vozila. Prednosti kamere su velika frekvencija obnavljanja (30 Hz) i precizna mjerenje zbog velike rezolucije. Problem kamere pod vodom je smanjena vidljivost (do 5-6 m u Jadranu). Kamera je odabrana kao dodatni senzor da se istraži mogućnost operacijske dubine i zahtjevnost obrade slike za detekciju ronilice.

Uz akustičke senzore za podvodnu lokalizaciju postoje i moderni visokofrekventni višezračni sonari koji stvaraju sliku podvodne okoline. Frekvencija mjerenja tih senzora je povećana (1-10Hz) obzirom da pokrivaju samo određeno područje i fokusiraju se na manje udaljenosti (<50m). Također, kod tih senzora potrebno je obraditi sonarski signal kako bi se izvukla relativna pozicija ronilice, ali zauzvrat se dobiva znatno preciznija i češća pozicija od klasičnih lokalizacijski sustava [1]. Efektivno, ovakvi sonari su kompromis između kamere i klasičnih akustičkih sustava. Tokom ispitivanja korišten je sonar kao izglednija alternativa ostalim sensorima.

Uz navedene vanjske senzore treba imati na umu da se trenutno istražuju razna geofizikalna mjerenja kao alternativa daljinskim/vanjskim sensorima. Pod tim mjerenjima podrazumijevamo korištenje lokalnih magnetskih, gravitacijskih ili batimetrijskih mjerenja kako bi se odredila globalna pozicija. Globalna pozicija određuje se ili pomoću postojeće mape ili korištenjem simultane lokalizacije i mapiranja u slučaju nepoznatih područja.

Kako bi se omogućio razvoj i testiranje algoritama bez višestrukih izlazaka na teren potrebno je stvoriti bazu mjerenja za senzore. U D4.1. već je opisan scenarij za provođenje eksperimenata za kolekciju podataka.

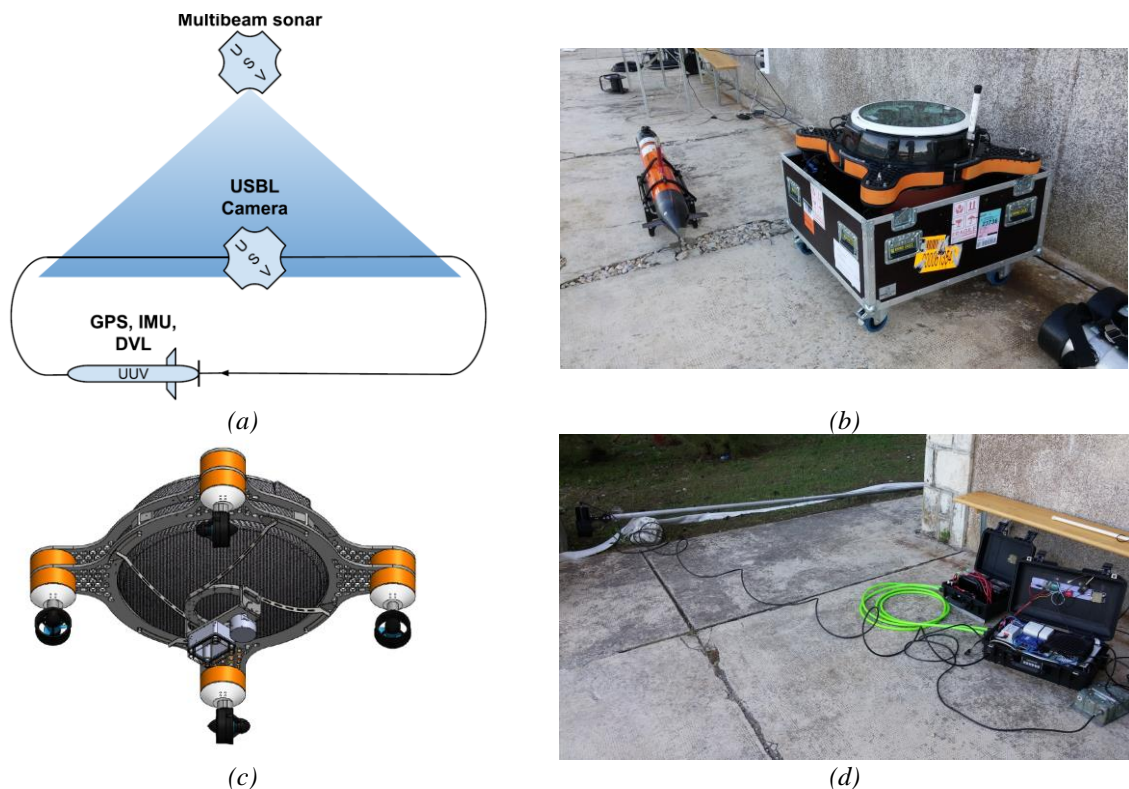
Kolekcija podataka

Kolekcija podataka rađena je u postaji za razmagnetiziranje Marjan ustupljenom od strane Hrvatske mornarice. Na slici 1a prikazan je plan eksperimenta prilagođen na temelju plana iz D4.1. USBL i kamera su montirani na jedno vozilo dok su dodatne kamere predviđene u D4.1. zamijenjene GPS točkama ronilice na površini.

Tokom eksperimenta ronilica je zaranjala na 5m dubine kako bi se ostala vidljiva u slici kamere. Ronilica je zaranjala na rubovima gornje ravne linije duljine 200m. Donja linija pređena je na površini kako bi se osigurala dovoljno duga raspoloživost GPS signala koji bi umjerio filter za sljedeći podvodni transekt. Ronilica je kružila po pet puta tokom jedne misije.

Oprema koja je sudjelovala u eksperimentu prikazana je na slikama 1 b-d. Kao ronilica korišten je autonomni torpedo (slika 1b lijevo). Vozilo je opremljeno inercijskom jedinicom i Doppler mjerачem brzine (DVL) za horizontalnu navigaciju, a moguće je kontrolirati unaprijedno gibanje, zaošijanje i poniranje vozila. GNSS sustav raspoloživ je samo na površini. Za površinsku platformu korišten je Omni-X model, nazvan Proteus, koji je razvijen na Fakultetu za elektrotehniku i računarstvo. Za potrebe eksperimenta izrađene su modifikacije i nosači (slika 1c) za kućište kamere i USBL senzor. Korištena je kamera Logitech C920 HD Pro zbog velikog kuta gledanja i Seatrac X150 USBL. Površinska platforma je opremljena Ublox C94 sustavom za

precizno pozicioniranje. Bazna stanica za GNSS korekcije bila je umjerenja na udaljenosti od oko 150 m od lokacije vozila čime se postigla preciznost pozicije površinske platforme reda veličine 10 centimetara. Platforma je održavala zadanu poziciju iznad transekt ronilice kako bi ju uhvatila u video slici. Za detekciju sonarom korišten je širokokutni višezračni sonar BlueView M450. Opremu su za potrebe eksperimenta ustupili američki partneri iz Space and Naval Warfare Systems Center Pacific (SPAWAR), San Diego. Zbog problema s transportom vozilo koje nosi sonar nije bilo raspoloživo u vremenu eksperimenata. Zbog toga je sva elektronika površinskog vozila sa sonarom postavljena na vanjski stup za razmagnetiziranje i usmjerena na transekt ronilice.



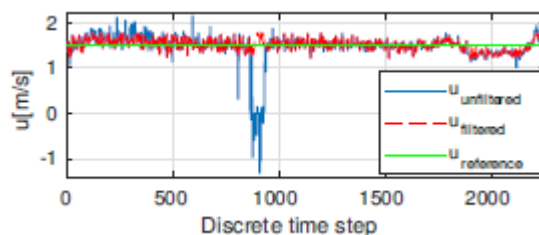
Slika 1. Plan i korištena vozila tokom kolekcije podataka

Predobrada podataka

Sakupljeni podatci sa senzora su obrađeni nakon terena kako bi ih se pripremilo za korištenje na različitim algoritmima. Na taj način izbjegava se unošenje outlier-a u filter koji će i biti eksterno filtrirani nakon implementacije filtera. Bilo je potrebno obraditi i validirati: 1) DVL mjerenja ronilice, 2) detekciju u kameri, 3) detekciju u sonaru, 4) USBL mjerenja.

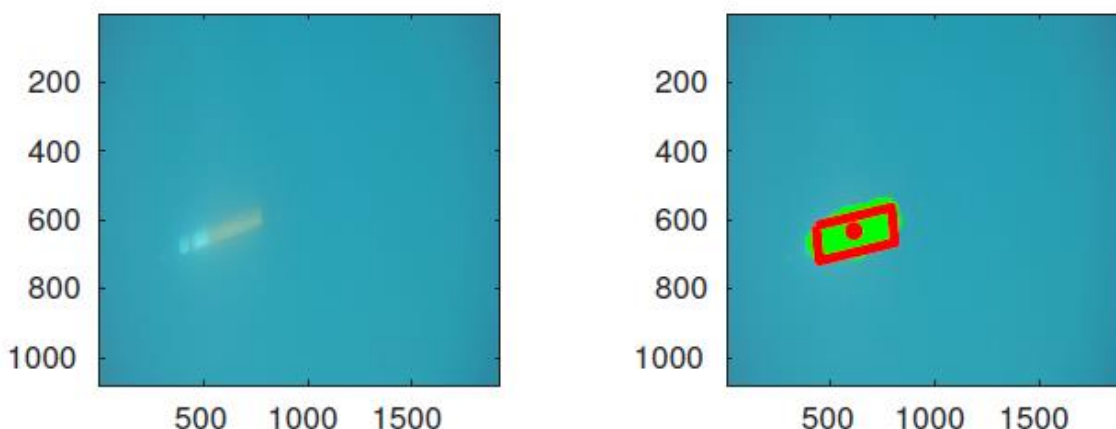
Kako bi se izbjeglo korištenje filtiranih mjerenja i koračnog filtera ronilice, korištena su sirova mjerenja. U slučaju DVL-a pokazalo se da mjerenje brzine ima netipična ili neispravna mjerenja, posebno tokom manevara skretanja i zaranjanja. Za izdvajanje

netipičnih mjerenja korišteno je dva koraka. Prvi korak je izdvojio sve brzine vozila između 0 i 2m/s. Obzirom da vozilo tokom cijele misije ima konstantni potisak unaprijed, a izloženo je slaboj struji, nije očekivano da brzina pada ispod 0 m/s. Također, maksimalna brzina vozila je 2m/s u idealnim uvjetima. Drugi korak ograničava akceleraciju između dva mjerenja kako bi bila u skladu s fizičkim parametrima vozila. Na slici 2 vidi se primjer odbijana netipičnih mjerenja između 800-900 uzorka.



Slika 2. Primjer filtriranja netipičnih mjerenja iz Doppler mjeraca brzine.

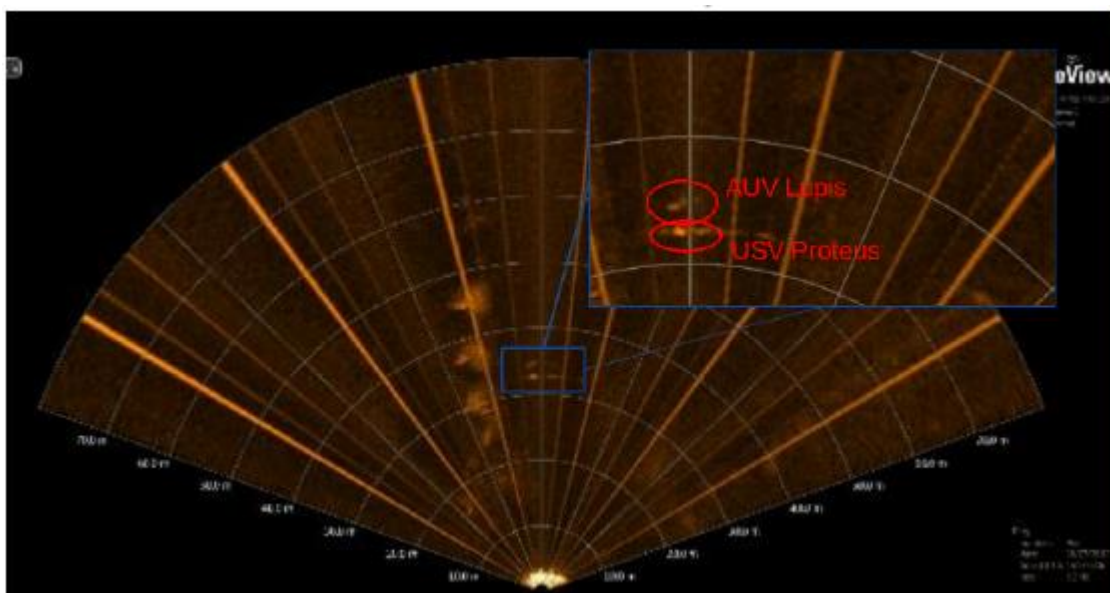
Za detekciju torpeda implementiran je jednostavan algoritam detekcije. Obzirom na istaknutu boju (narančastu) vozila na plavu pozadinu bilo je lagano izdvojiti povezane pixele. Temeljem kvalitete detekcije, upitne slike su izdvojene na ručnu anotaciju i provjeru. Većina podataka mogla je biti obrađena autonomno, a ručna anotacija rađena je za granične slučajeve kad je vozilo dijelom bilo u slici. Za poziciju vozila korišten je centar težišta detektiranog oblika (Slika 3). Obzirom da je kamera prethodno kalibrirana položaj u slici se može pretvoriti u relativnu horizontalnu udaljenost od centra kamere. Fuzijom relativne udaljenosti s GNSS pozicijom platforme odredila se apsolutna pozicija ronilice.



Slika 3. Primjer vidljivosti i detekcije vozila na dubini 5m

Zbog manje količine podataka i teže detekcije vozila, obrada sonarskih slika učinjena je ručno. Obzirom da je cilj razvoj algoritma korištenjem neuronskih mreža potrebno je bilo napraviti kvalitetan skup anotiranih podataka koje bi se mogle koristiti za treniranje. Istovremeno, te podatke možemo koristiti i za razvoj lokalizacijskog filtera. Fuzijom polarnih koordinata određenih iz sonara (Slika 4) s GNSS pozicijom sonarske

glave dobivena su apsolutna mjerenja ronilice. Kao što je vidljivo na Slici 4 u sonar su se također vidi i površinska platforma iznad transekta.



Slika 4. Sonarska slika s uvećanom lokacijom oko refleksija površinske platforme i ronilice

Posljednji korišteni senzor je bio USBL. Korišteni USBL se pokazao kao neprecizan senzor te je bilo potrebno znatno filtriranja netipičnih mjerenja. Zbog refleksije USBL signala od okoline pojavljivala su se mjerenja s krivim relativnim kutom, ali približno točnom udaljenosti. Netipična mjerenja uklonjena su usporedbom trenutne pozicija, prethodnog mjerenja USBL-a i trenutne brzine vozila. Na taj način su odabrana validna mjerenja udaljenosti i relativnog kuta. Fuzijom s GNSS mjerenjima platforme dobilo se apsolutno mjerenje pozicije.

Prošireni Kalman filter

Za filtriranje u stvarnom vremenu odbran je sveprisutni Kalman filter (KF), dok je za filtriranja nakon kolekcije podataka korišten Rauch-Tung-Streiebel (RTS) filter. RTS filter koristi Kalman filter za kauzalnu propagaciju modela i mjerenja, a potom provodi propagaciju u negativnom vremenu. Ovaj filter je pogodan za slučajeve kao što su fotogrametrija ili batimetrija gdje obrada signala dolazi nakon korekcije pa korištenjem RTS-a lokalizacija može dodatno poboljšati u usporedbi sa propagacijom u stvarnom vremenu. Zbog nelinearnosti kinematičkog modela koriste se proširene verzije (EKF i ERTS) koje dozvoljavaju nelinearne modele.

U generalni slučaju podvodnih vozila procesni model ima šest stupnjeva slobode, unaprijed, bočnu i vertikalnu brzinu, te kutne brzine zaošijanja, poniranja i valjanja. U svrhe mapiranja misije se često izvode sa konstantnom dubinom bez valjanja i poniranja. Zbog toga, u našem slučaju možemo pojednostaviti procesni model na tri stupnja slobode u horizontalnom gibanju. U procesni model moguće je uključiti

dinamički model vozila. Dinamički modela vozila *uzima* generičke sile koje djeluju na vozilo (propulzija i vanjske smetnje) i estimira brzinu vozila zbog istih. Takav model koristan je kad nema direktnog mjerenja brzine već su samo poznate komande za propulziju. U slučaju podvodnih vozila korištenih za svrhe CroMarX projekta, sva vozila su opremljena mjeračem brzine pa nije nužno uključivati dinamički model sa svim parametrima u filter. Kao alternativa, moguće je koristiti bez parametarski model nultog reda koji pretpostavlja kontinuiranost u stanju. Procesni šum postavljen je slično parametrima koračnog estimatora koji već postoji na torpedu [2]. Uz procesni model bilo je potrebno definirati i modele mjerenja za pojedinačne senzore.

Modeli mjerenja

Na površini su dostupna mjerenja GNSS-a pa se u tom slučaju koriste za korekciju pozicije. Geografska širina i duljina se preračunavaju u lokalnu tangentnu ravninu te se koristi horizontalna komponenta. Vektor mjerenja je dakle $z_m(k) = [n_{GPS}, e_{GPS}]^T$. Varijanca mjerenja izračunava se dinamički ovisno o varijanci estimiranoj na GNSS sustavu, dakle korištenjem horizontal i vertical dilution of precision (HDOP/VDOP).

Video mjerenja emuliraju GNSS sustav i daju mjerenje u horizontalnoj ravnini. Varijanca mjerenja se izračunava po kvaliteti detekcije, ovisno o lokaciji u slici i odstupanju detektirane površine od očekivane.

Sonarska mjerenja se mogu integrirati kroz dva model, kroz polarni model ili kartezijski model. U slučaju kartezijskog modela pozicija se izračunava direktno iz polarnih vrijednosti te kombinira s apsolutnom pozicijom sonarske glave i mjerenjem dubine vozila. To rezultira istim setom mjerenja kao u slučaju GNSS-a. U tom slučaju je potrebno preračunati varijance iz polarnih koordinata u kartezijske kako bi se osigurala točna integracija mjerenja u estimat. Kod polarnog modela potrebno imati nelinearni model mjerenja te uključiti položaj sonara. Na ovaj način nije potrebno preračunati varijance, ali je potreban izračun derivata matrice mjerenja. Za prvu analizu odabran je kartezijski model.

U slučaju USBL-a mogućnost modeliranja mjerenja je ista obzirom da se dobivaju sferne koordinate kao izvorno mjerenje senzora. I u ovom slučaju je odabran kartezijski model kako bi se očuvala linearnost matrice mjerenja. Također, potrebno je primijetiti da se korištenjem kartezijskih modela može emulirati mjerenje GNSS-a što je korisno u slučajevima ukoliko ne možemo mijenjati običnu strukturu GNSS+DVL filtera, ali želimo ukomponirati vanjske korekcije.

U prethodnom poglavlju je naveden niz problem s realnim mjerenjem. Korištenjem Kalman filtera s dinamičkim modelom možemo osigurati dostupnost mjerenja u svakom periodu uzorkovanja. Time pokrивamo problematiku asinkronih i

diskontinuiranih mjerenja. Kod akustičke lokalizacije moramo također uzeti u obzir i netrivialno kašnjenje mjerenja koje je potrebno kompenzirati.

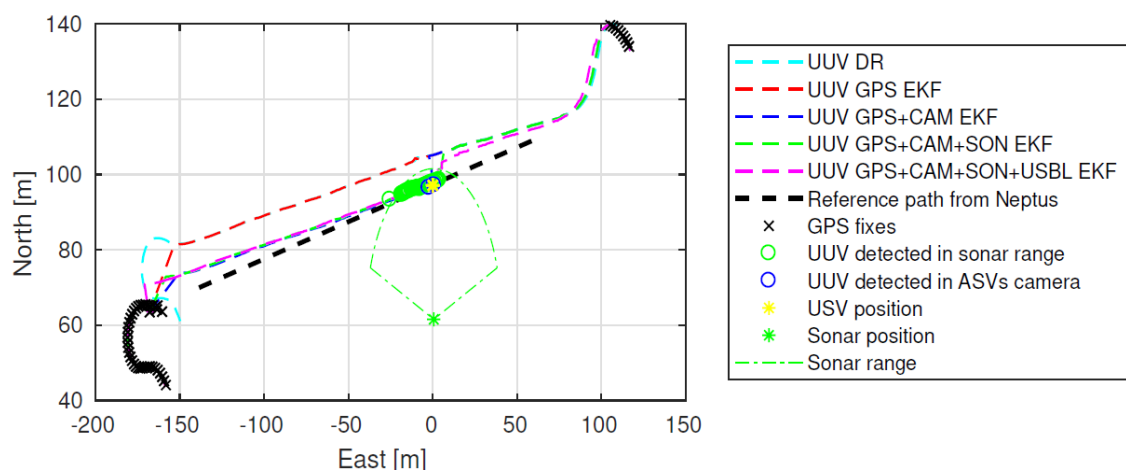
Kompenzacija kašnjenja mjerenja

Distribuirani sustavi često unose kašnjenje u transportu mjerenja, a ponekad i u sam proces mjerenja. Kod diskretnih sustava, trivijalna kašnjenja manja od vremena uzorkovanja mogu se ignorirati kod realnih sustava. U slučaju kad su kašnjenja veća od vremena uzorkovanja ona vidljivo utječu na kvalitetu rada sustava. Korištenje zakašnjelih mjerenja u estimaciji rezultira suboptimalnom estimacijom, a može prouzročiti oscilacije kod upravljanja. Dok se trivijalna kašnjenja mogu integrirati malom modifikacijom Kalman jednadžbi [3], za veća je potrebno izvršiti korekciju u pravom trenutku mjerenja. To zahtjeva pomak stanja filtera u trenutak nastanka mjerenja, korekciju estimata zakašnjelim mjerenjem, te ponovnu propagaciju modela filtera i reintegraciju mjerenja nastalih između trenutka zakašnjelog mjerenja i sadašnjeg koraka filtera. Kod nelinearnih modela to je najčešći postupak kompenzacije kašnjenja u estimaciji.

Kod autonomnih sustava odnosno modela kod kojih nema ulaznog signala moguće je izvoditi kompenzaciju u jednom koraku [4]. U slučaju našeg kinematičkog modela moguće je provoditi takvu kompenzaciju kašnjenja da se smanji broj kalkulacija. Obzirom da je vrijeme uzorkovanja 50ms, računalo na raspolaganju u ronilici dovoljno je moćno da izvodi rekalkulaciju filtera za akustička kašnjenja od 2s. Zbog toga napravljena je generalna verzija EKF-a koja izvodi rekalkulaciju kako bi mogli koristiti isto i u slučaju proširenja s neautonomnim modelima sustava.

Rezultati

Korištenjem snimljenih podataka provedena je usporedba kvalitete lokalizacije u više slučajeva: 1) koračna navigacija (DR) bez distribuiranih mjerenja, 2) DR i GNSS bez distribuiranih mjerenja, 3) DR+GNSS s distribuiranim mjerenjem s kamere, 4) DR+GNSS s distribuiranim mjerenjem s kamere i sonara, 5) DR+GNSS sa sva tri distribuirana mjerenja. Rezultati jedne od analiziranih trajektorija su prikazani na Slici 5. Sa slike je vidljivo da svako dodatno mjerenje poboljšava kvalitetu lokacije, odnosno da se točka izranjanja i prvo pouzdano GNSS mjerenje bolje poklapaju. Konačna kumulativna greška kroz sve transekte za svaki od razmatrani slučajeva prikazana je u Tablici 1. Kriterij usporedbe je udaljenost između estimirane točke izrona i GNSS pozicije izrona. Treba primjetiti da se u ovom slučaju pod izron smatra prva pouzdana GNSS koordinata, a ne potencijalna GNSS mjerenja s lošijom kvalitetom koja se dobivaju tokom prijelaza GNSS antene iz vode u zrak. Uočljivo je da korištenjem distribuiranih mjerenja može ostvariti duplo veća preciznost.



Slika 5. Usporedba transekata s različitim kombinacijama korištenih mjerenja

Potrebno je primijetiti da tokom koračne navigacije trenutni (komercijalni) filter ronilice akumulira znatnu pogrešku (oko 15% udaljenosti) što je potencijalna indikacija loše tvorničke kalibracije relativne pozicije inercijskog i Doppler senzora. Proširenjem modela kako bi se estimirao pomak između osi tih dviju senzora mogla bi se dodatno poboljšati lokalizacija u slučajevima kad postoje distribuirana mjerenja.

Tablica 1. Prikaz pogreške estimata za različite kombinacije mjerenja

	Pogreška (m)
DR	26.75
DR+GNSS	24.38
DR+GNSS+Kamera	19.64
DR+GNSS+Kamera+Sonar	13.32
DR+GNSS+Kamera+Sonar+USBL	13.38

Zaključak

U ovom radu opisana je kolekcija podataka i odabrani filtera fuziju distribuiranih mjerenja. Matematički detalji i vrijednosti parametara se mogu naći u [5]. Trenutno je u tijeku integracija filtera na oba podvodna vozila laboratorija kao bi se poboljšala estimacija pozicije za konačnu podvodnu akviziciju i izradu podvodnog mozaika.

Literatura

- [1] Nađ, Đula, Nikola Mišković, Vladimir Djapic, and Zoran Vukić. "Sonar aided navigation and control of small uuv's." In 19th Mediterranean Conference on Control and Automation. 2011.
- [2] J. Pinto, P. Calado, J. Braga, P. Dias, R. Martins, E. Marques, and J. Sousa, "Implementation of a control architecture for networked vehicle systems," IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, no. 5, pp. 100 – 105, 2012, 3rd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles.

- [3] Andersen, G., Christensen, A., Ravn, O., “Augmented models for improving vision control of a mobile robot”, in Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications, 1994, pages 53–58.
- [4] Alcocer, A., Oliveira, P., Pascoal, A., “Study and Implementation of an EKF GIB Based Underwater Positioning System”, in IFAC CAMS, 2004.
- [5] Kapetanović, N., Nađ, Đ., Mišković, N., Vukić, Z. „Towards Enhancing the Navigational Accuracy of UUVs Through Collaboration of Multiple Heterogenous Marine Vehicles“, IEEE AUV 2018. (to be published in proceedings)