Tromost - budućnost i u geodeziji

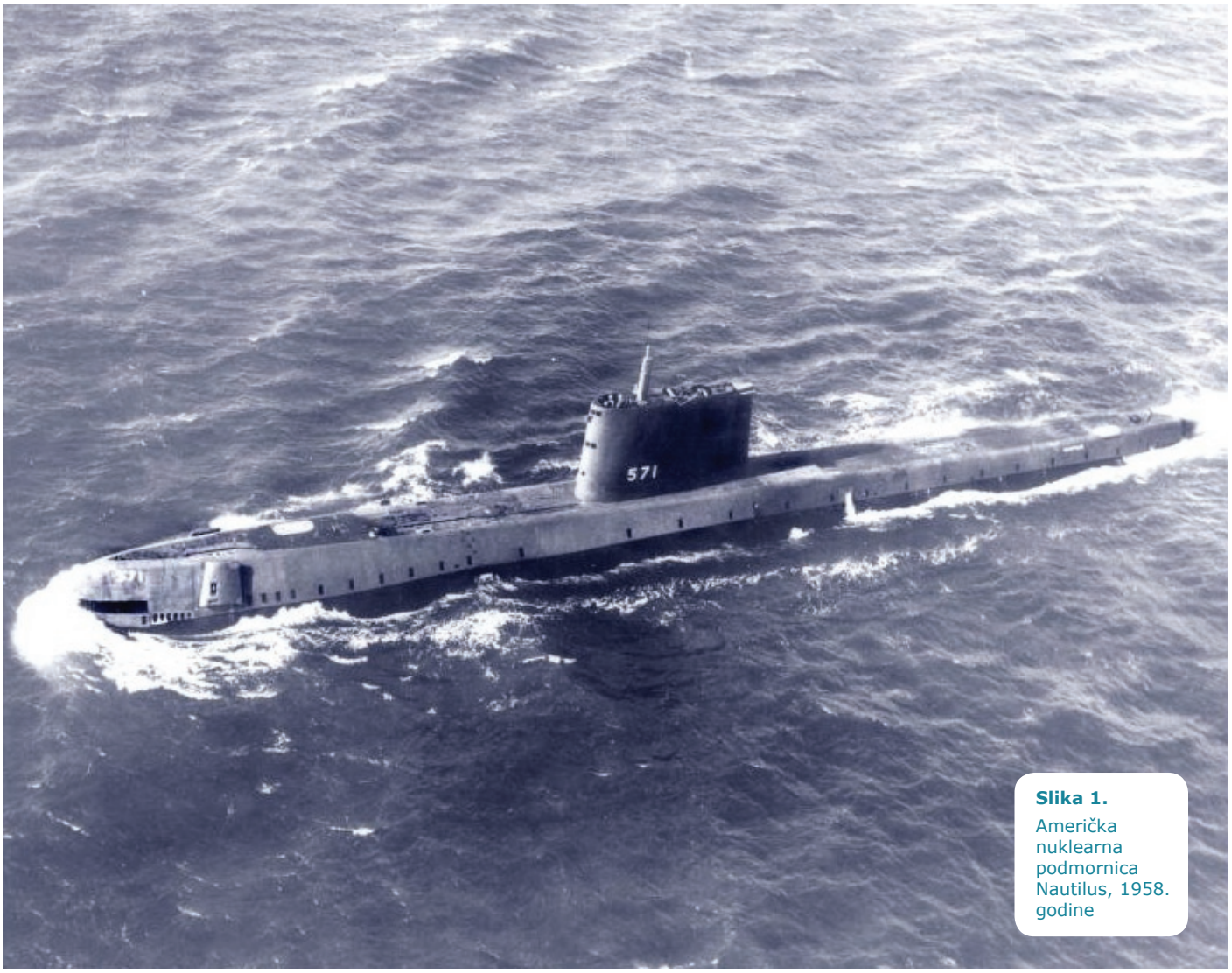
*Ozren Buriša**

1. Noviji sustavi pozicioniranja

Od pojave GPS-a i njegove primjene u navigaciji prošle su godine do vremena kada je preciznost sustava porasla toliko da je on pronašao svoju primjenu i u geodeziji. Danas je upotreba GPS-a toliko raširena da je gotovo nezamislivo obavljanje nekih geodetskih zadataka bez njih i tehnologija satelitskog pozicioniranja se s pravom naziva tehnologijom budućnosti.

S druge strane, u geodetskom svijetu puno su manje poznati inercijalni navigacijski sustavi (INS ili samo IS). Dok je GPS već zauzeo svoje mjesto u funkciji navigacije i pozicioniranja, inercijalni su sustavi još uvijek u fazi ispitivanja kada se govori o geodetskim primjenama. No ipak, tehnološki razvijenije zemlje sve više prihvaćaju prednosti koje ovi sustavi sa sobom donose. Čak i neke zemlje u razvoju polagano rade prve korake prema prihvaćanju ove »nove« tehnologije. U Hrvatskoj se inercijalni geodetski sustavi još ne koriste.

Međutim, vjerujem da će se i to u skorijoj budućnosti promijeniti. U posljednje vrijeme mnogi geodetski časopisi, pa i Ekscentar među njima, sve češće pišu o IS-u i njegovoj primjeni u geodeziji. To samo pokazuje da se



Slika 1.
Američka nuklearna podmornica Nautilus, 1958. godine

[*] Ozren Buriša, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: oburisa@geof.hr



Slika 2.
Raketa projekta Apollo, inercijalno navođena letjelica

polagano budi interes za »novim« tehnologijama koje bi dodatno doprinijele razvoju geodezije. Taj interes prvi je korak prema otvaranju vrata za inercijalne sustave i u našoj geodetskoj praksi.

2. Duga povijest »mladog sustava«

Iako prošli odlomci govore o rađanju i o novostima, inercijalni sustavi nipošto se ne mogu nazvati »novom« tehnologijom. Početak im seže više od jednog stoljeća u povijest, njihova se evolucija odigrala za vrijeme Drugog svjetskog rata, a praktična primjena u velikim projektima uslijedila je nedugo nakon njegova završetka. Jedan od velikih testova održao se već 1958. godine.

U to se vrijeme naglo razvijala nuklearna tehnologija i proizvedene su prve nuklearne podmornice. Prva od njih, američka podmornica zvana Nautilus, navedene je godine izvela dotad nepokušani pothvat. Na putovanju od Aljaske do Grenlanda zaronila je ispod debelog Arktičkog leda i putem prošla točno ispod točke Sjevernog pola. Ovaj veliki uspjeh ne bi bio izvediv bez inercijalne navigacije. I danas podmornice baziraju navigaciju na sličnim sustavima.

Uskoro je ponovljen sličan pothvat u podmornici Skate koja je, nakon zarona ispod Arktičkog mora, probila led i ugledala svjetlost dana – na Sjevernom polu!

Nešto kasnije, 1960-tih godina, inercijalni sustavi nosili su tešku odgovornost vođenja letjelica Apollo na Mjesec, a bili su ugrađeni i u interkontinentalne balističke rakete Minuteman.

No budući da je geodezija uvijek imala strože kriterije po pitanju preciznosti, tek su '80-tih godina prošloga stoljeća inercijalni sustavi postali dovoljno razvijeni da budu primjenjivi i u geodetskoj izmjeri. Još prije toga, jedno od prvih iskustava sa inercijalnim geodetskim sustavom bilo je postavljanje geodetske mreže na području okruga Du Page u američkoj saveznoj državi Illinois. U samo tjedan dana postavljeno je 68 stalnih geodetskih točaka i to uz troškove koji se procijenjuju na samo petinu cijene izmjere istog područja tada konvencionalnim metodama. Otvorena su vrata IS-u.

Uslijedilo je razdoblje mjerenja na golemim, dotad neizmjerenim područjima poput sjevera Kanade, Aljaske i Južne Amerike. Zahtjevana točnost nije bila velika, ali brzina izmjere bila je odlučujuća, što je učinilo inercijalne sustave logičnim izborom.

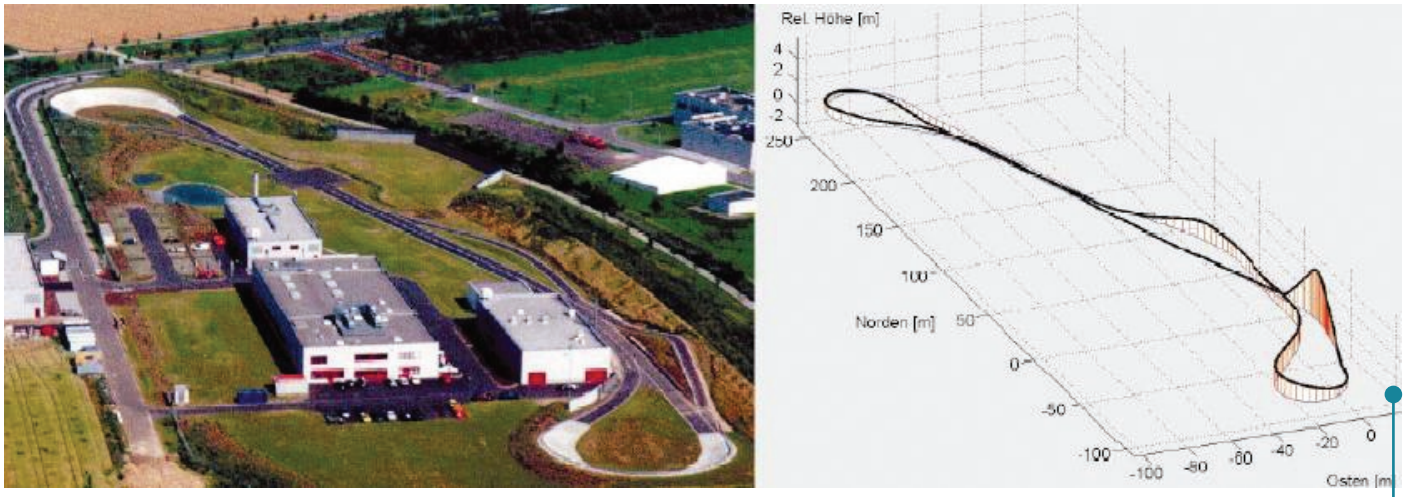
No, nakon pojave GPS-a, razvoj INS-a je usporen. Geodezija je dobila novu suvremenu metodu brze i točne izmjere.

Međutim, INS nije potpuno zamijenjen. Umjesto da postane naslijednikom, GPS je postao partnerom. Budući da je način rada satelitskih navigacijskih sustava potpuno različit od načina rada inercijalnih sustava, oni su postali savršeno komplementarni za navigaciju. Gdje je GPS slab, INS je jak, a i obratno. Čak su i izvori pogrešaka potpuno različiti, što ovo dvoje čini savršenim složenim sustavom za pozicioniranje.

3. Zašto inercijalni sustavi?

Brzina izmjere možda je najveća prednost IS-a nad drugim sustavima. Kada je instrument kalibriran, postupak izmjere svodi se na premještanje sustava s točke na točku, a za razliku od GPS-a, ovdje nema potrebe za dugim stajanjem na jednome mjestu jer je u svakom trenutku položaj poznat. To kontinuirano snimanje je jedna od velikih prednosti. Vrlo je visoka rata registracije, dok se kod GPS-a registracije moraju interpolirati.

U automobile se, radi izmjere ceste, ugrađuje inercijalni navigacijski sustav. Dok se automobil kreće, instrument kontinuirano i neprestano bilježi položaj i kao konačni proizvod je dobiven 3D model ceste. Tako je kartiranje prometnica jedan od geodetskih zadataka koji se već primjenjuje.
Zatim, jedan inercijalni sustav iznimno je koristan alat jer ne mjeri samo koordinate položaja nego i gotovo sve ostale veličine koje se u geodeziji traže. Mjeri otklon težišnice, gravitacijsko ubrzanje, kut azimuta, nadmorsku



Slika 3.
3D model ceste dobiven inercijalnom izmjerom (IS ugrađen u automobil)

visinu i orijentaciju tijela u prostoru. Tako jedan instrument istovremeno obavlja posao nekoliko instrumenata. Naravno, jedan od sastavnih djelova inercijalnog mjernog sustava mora biti i gravimetar.

4. Zašto BAŠ inercijalni sustavi?

Kada se govori o prednostima INS-a, nezaobilazno ih je spomenuti u kontekstu prednosti »nad« drugim navigacijskim sustavima. Ranije sam spomenuo da je GPS postao partnerom, a ne nasljednikom i razlog su tomu upravo neke od važnih mogućnosti INS-a koje GPS nije mogao zamijeniti. Iako je satelitsko pozicioniranje usavršeno do te mjere da s centimetarskom točnošću možemo odrediti koordinate točaka po gotovo cijelome svijetu, sami princip i osnova GPS-a uvijek će biti ograničavajući faktor u nekim situacijama. Objasnit ću neke od prednosti INS-a kroz primjer slabosti GPS-a.

Zanimljivo je primjetiti da se riječ »sustav« nalazi i kod GPS-a i kod INS-a. No, dok se govori o GPS-u, riječ sustav označava kompleksnu vezu svemirskog, kontrolnog i korisničkog segmenta, dakle velikog niza satelita u svemiru, kontrolnih stanica na Zemlji i instrumenata koji određuju svoj položaj. S druge strane, inercijalni je sustav svijet za sebe. Unutar jedne kutije nalazi se niz visokopreciznih instrumenata koji čine potpuno neovisan sustav, iz čega slijedi da su otporni na bilo kakvo vanjsko ometanje. Rat u Afganistanu 2001. godine upozorio je američku vladu na realne opasnosti GPS ometanja koje je zapaženo nekoliko puta. Zatim, 2003. godine, američko ratno zrakoplovstvo uspješno je izvelo nekoliko vježbi istog ometanja. GPS se pokazao ranjivim.

Osim toga, selective availability (namjerno kvarenje signala radi slabljenja preciznosti civilnih prijamnika) također je primjer ovisnosti jednog prijamnika o satelitskom signalu. Iako je službeno ukinuta 2000. godine, američko ministarstvo obrane još uvijek ima mogućnost ponovnog uvođenja selektivne dostupnosti, premda to nije vjerojatno.

Zatim, GPS treba čisto nebo, i to u cijelom krugu oko sebe – od zenita pa gotovo do horizonta. To znači da je precizno mjerenje nemoguće izvoditi u gustim šumama, u gradovima, u dolinama s velikom reljefnom konfiguracijom terena, blizu visokih stijena, blizu zgrada ili u zgradama. Suvišno je i spomenuti – ispod zemlje u tunelima. Danas se u tim situacijama koriste tradicionalne geodetske metode. U budućnosti, to će možda biti posao rezerviran za inercijalne sustave.

5. Pogled unutra

Istina je kada se kaže da su najgenijalniji izumi u osnovi najjednostavniji, ali samo u osnovi, jer kada se uđe u dubinu građe jedne inercijalne mjerne jedinice konstrukcija naglo ulazi u sferu visoke fizike i mehanike. Temelj sustava je sljedeći: Newtonovi zakoni inercije govore o ponašanju svih materijalnih tijela. Sva tijela koja imaju masu troma su. Tromost je svojstvo tijela da se opire bilo kakvoj promjeni brzine. Ako dođe do promjene brzine, govorimo o akceleraciji, a da bi tijelo akceleriralo mora se na masu djelovati nekom silom. Ako odredimo silu, a prethodno smo poznavali masu tijela, jednostavnim računom dolazimo do akceleracije. Instrument koji mjeri akceleraciju na ovaj način zove se akcelerometar.

No, akcelerometar može mjeriti samo ubrzanja u smjeru svoje osi. Kako bi se postiglo mjerenje u stvarnom trodimenzionalnom svijetu, potrebna su nam tri ortogonalno postavljena akcelerometra koji predstavljaju



Slika 4.
Pogled u pričvršćeni inercijalni sustav sa tri vidljiva laserska žiroskopa

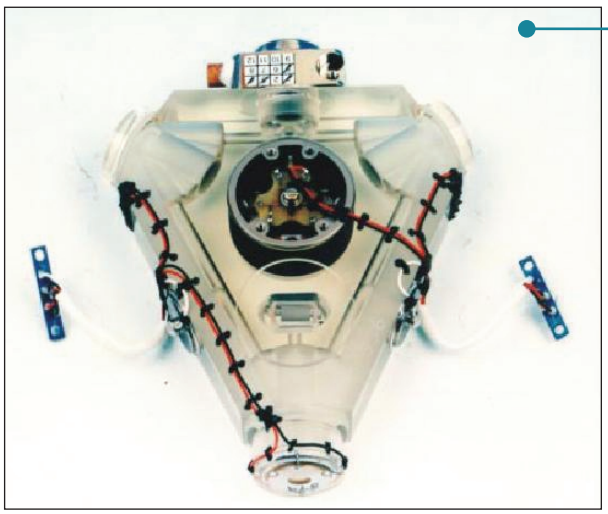
koordinatni sustav. Ova trojka sada može bilježiti prostornu akceleraciju tako da je rastavi na komponente u smjerovima pojedinih akcelerometara.

Međutim, ono što je potrebno u geodeziji nije akceleracija nego položaj. Kako bi se došlo do njega potreban je još jedan instrument – visokoprecizni sat. Dok se mjeri akceleracija, sat bilježi vrijeme, a mikroračunalo integrira mjerenu vrijednost ubrzanja po vremenu i računa brzinu. Brzina još uvijek nije tražena veličina (u geodeziji) i stoga se integrira još jedanput kako bi se izračunala promjena položaja. Vrlo jednostavan sustav sada daje kontinuirane vrijednosti za položaj, brzinu i akceleraciju u svakom trenutku.

6. Mali problemi i genijalna rješenja

6.1 Laserski žiroskop

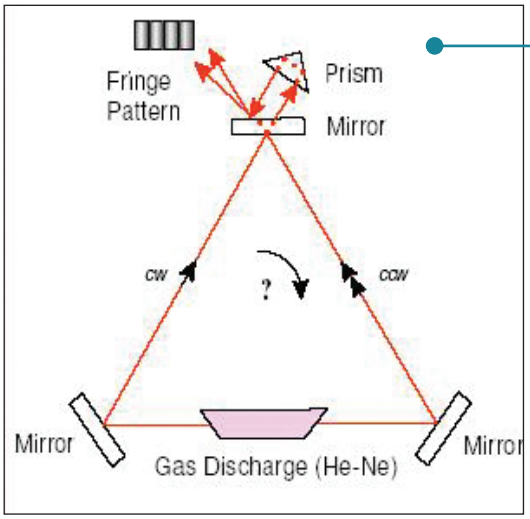
Kada čujemo riječ žiroskop, najčešće zamislimo rotirajući zvrk. To nije čudno jer su donedavno upravo takvi mehanički rotirajući uređaji bili primijenjeni i u konstrukciji inercijalnih



Slika 5.
Izolirani laserski žiroskop

sustava, uglavnom sa stabilizirajućom funkcijom. Budući da rotirajući žiroskop pokazuje osobine kutne tromosti, tzv. stabilizirani inercijalni sustavi bili su fiksno orijentirani u prostoru i za vrijeme manevriranja vozila ili sustava.

Takav dizajn bio je vrlo uspješan, ali složena mehanička građa pokazala se kao ograničavajući faktor u daljnjem razvoju. A budući da je tehnologija u zadnjih dvadesetak godina brže napredovala na polju elektronike nego mehanike, započeo je razvoj sustava koji u potpunosti izbjegavaju osjetljive



Slika 6.
Shema rada laserskog žiroskopa

mehaničke prstenove. Izum optičkih žiroskopa omogućio je taj razvoj.

Sustavi koji koriste ovaj princip mjerenja zovu se pričvršćeni sustavi. Ovdje žiroskopi imaju mjernu funkciju jer detektiraju rotacije oko sve tri osi i šalju informaciju računalu koje na temelju tih podataka određuje pojedine komponente ubrzanja u kardinalnim smjerovima. Znači da se, naprimjer, komponenta ubrzanja u smjeru sjeverjug može izračunati iako je akcelerometar promijenio svoju prvotnu orijentaciju.

No, zahtjevi za preciznošću su također porasli. Optički žiroskopi (laserski i oni od optičkih vlakana) odgovorili su na taj izazov funkcionalnim rješenjem. U osnovi, princip rada svodi se na interferometrijsko mjerenje. Laserska zraka se odvaja u svome izvoru i suprotnim smjerovima prolazi kroz zatvoreni krug. Kada žiroskop rotira dolazi do Dopplerovog efekta i mijenja se frekvencija pojedinog vala. Valovi interferiraju i izlazna frekvencija se također mijenja i to proporcionalno brzini rotacije (Sagnacov efekt).

Problem se javlja pri polaganim rotacijama zbog sklonosti vala da se »zakoči« u jednoj frekvenciji stojnog vala u čvornim točkama na zrcalima. U takvoj situaciji žiroskop ne detekira rotaciju. No, problem je riješen još jednim inovativnim tehnološkim rješenjem zvanim »ditherov motor«. Primjenjuje se oscilatorna rotacija na kompletan žiroskop i tako se kompenzira »zakočenje« vala.

6.2 ZUPT – jednostavan trik s velikim učinkom

Kada govorimo o metodama rada, a ne o tehnološkim inovacijama, ovo je primjer vrlo jednostavne ideje sa nevjerojatnim pozitivnim posljedicama na preciznost mjerenja i na održavanje visoke točnosti kroz dugi vremenski period. U osnovi, ona se svodi na povremeno zaustavljanje (zero velocity update).

Kako je već spomenuto, akcelerometri mjere akceleraciju, zatim se računa brzina i konačno integracijom dobiva položaj. Slabost inercijalnih sustava je sklonost nagomilavanju pogrešaka u akceleraciji, a vezano s njom, i u brzini i položaju (slabost koja nije prisutna kod GPS-a). Kada instrumentalni sustav miruje, znamo da se brzina smanjuje na nulu. Međutim, zbog nagomilavanja pogrešaka instrument će pokazivati određenu brzinu koja će se razlikovati od nule za neko odstupanje. Ako računalo odmah nakon zaustavljanja reducira taj iznos na nulu, akumulacija pogrešaka se smanjuje i s točnim vrijednostima se mjerenje nastavlja.

Osim toga, u stanju mirovanja sustav ima priliku obraditi još neke podatke i izvršiti izmjeru ubrzanja sile teže, koja utječe na kvalitetu akcelerometrijskih mjerenja. Budući da g nije konstantan, povremenim gravimetrijskim mjerenjem tog ubrzanja osigurava se točnije mjerenje akceleracija, a paralelno s njima i svih ostalih veličina.

Literatura

• Benčić, D., Geodetski instrumenti, Zagreb, 1990.
• URL-1: http://www.imar-navigation.de (01.04.2007.)
• URL-2: http://en.wikipedia.org/ (01.04.2007.)
• URL-3: http://www.xbow.com/ (01.04.2007.) ◆