



Suvremena primjena inercione navigacije

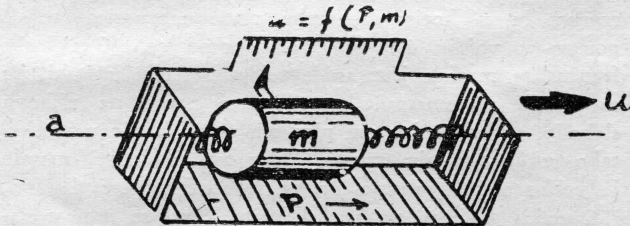
Kap. freg. Pavle Matušić, Split

Podvig podmornice »Nautilus« prilikom poznate polarne navigacije donio je suvremenoj navigaciji još jedan novi termin: inerciona navigacija. Cilj ovog članka nije da u detalje objasni za sada još dosta komplikovane i skupe uređaje, koji omogućavaju vođenje ove vrste navigacije, pomorce će interesovati za sada princip na kojem počiva inerciona navigacija i njena sadašnja praktična upotreba. Ovo će se u članku dati više opisno nego matematički i uz najnužnije šeme, potrebne da se shvati princip rješavanja vođenja broda ili podmornice pomoću inercione navigacije.

Inerciona navigacija nema nekog imena vezanog uz nju kao pronalazača ili nosioca apsolutnog prava na patent. Velika imena nauke i fizike omogućila su ova današnja praktična ostvarenja. To su u prvom redu Newton i njegovi zakoni, ali također i otkrića Galileja, Foucaulta, Schulera i drugih.

Prema drugom Newtonovom zakonu kretanja,* ako su poznate: sila (P), masa (m) i vrijeme (t) može se izračunati prevaljeni put kao nepoznata vrijednost iz poznatih triju navedenih elemenata.

Uređaji za inercionu navigaciju vrlo su komplikovani i skupi, ali šeme treba shvatiti kao prost princip. Tehničko izvođenje mnogo je složenije. Na slici 1. prikazan je osnov funkcionisanja uređaja za inercionu navigaciju: sprava za mjerenje ubrzanja (akceleracije), tako zvani ak-



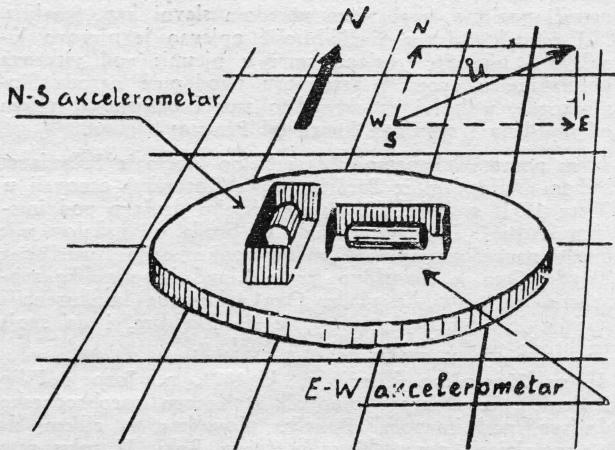
celerometar. U suštini ovaj ekcelerometar je zamjenio čovječiji um što će se najbolje shvatiti na ovom primjeru. Kad vozač vozi auto njegov mozak neprestano zapaža kroz jače ili slabije zanašanje glave unapred ili unazad (prema tom da li vozi brže, sporije ili koči), koliko je ubrzanje njegovih kola. Glava skoro automatski zapovjeda mišićima vrata da je opet vrata u prvobitni položaj. Ovdje mišići vrata igraju ulogu neke vrsti opruge, a kad bi čovječiji mozak bio u stanju da iz časa u čas odredi duljinu i stepen napora kojemu je podvrgao svoje vratne mišiće, mogao bi ocijeniti brzinu kola.

Prema poznatim fizičkim zakonima nikakva promjena kretanja nekog tijela ne može se pokazati bez utjecaja neke sile, a ukoliko dejstvo sile uslijedi tad je i ubrzanje proizašlo od nje proporcionalno jačini sile i u istom pravcu kao i sama sila. Ukoliko je jedina sila težina tijela, tad je ona proizašla od gravitacione sile.

Sprava za mjerenje ubrzanja (akcelerometar) može se izvesti tako da ima masu (m) s pokazivačem baždarenim u stepenima učvršćenu, kako je vidno iz slike 1. sa dvije spiralne opruge. Kod bočnog pomjeranja sprave zbog dejstva neke sile (P) masa se svojom inercijom mirovanja odupire ovom pomjeranju i veličina njenog otpora proporcionalna je sili ubrzanja. Otuda i naziv inerciona navigacija, radi inercije mirovanja mase na kojem se čitav uređaj zasniva.

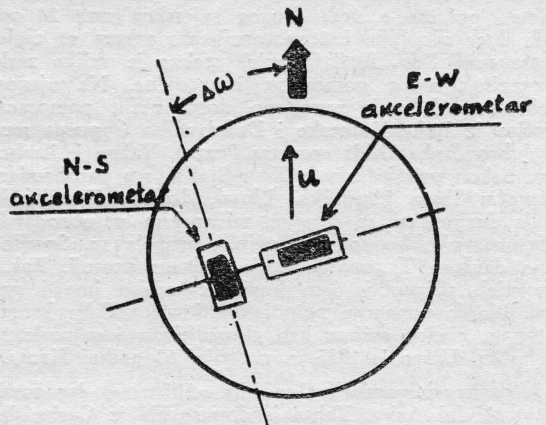
Na podjeli skale akcelerometra može se očitati veličina ubrzanja, ali u ovom primjeru samo u jednom pravcu (bočnom). Ovaj pravac naziva se »osjetljiva os instrumenta«.

Medutim mogu se uzeti i dva akcelerometra i postaviti, jedan u smeru N—S, a drugi u smeru E—W. Ovo je prikazano na slici 2. Ako postoji sila koja proizvodi ubrzanje, dakle ubrzanje broda u kursu »u«, onda će akcelerometar orijentiran N—S mjeriti N—S komponentu ovog ubrzanja, a onaj orijentiran E—W, E—W komponentu.



Svaka od ovih komponenata može se odvojeno integrirati i prikazati u obliku prevaljenog puta prema Sjeveru, Jugu, Zapadu ili Istoku. Zbog sile zemljine gravitacije očigledno je da sprava za mjerenje ubrzanja (akcelerometar) mora da bude smještena uvijek horizontalno, to jest pod pravim kutem na zamišljenu vertikalnu os prema centru zemlje za koju se u navigaciji pretpostavlja da je kugla.

I najmanja greška u orijentaciji azimuta prema N koju možemo nazvati $\Delta \omega$ utiče da ubrzanje koje je us-



*) Prema drugom Newtonovom zakonu kretanja $a = \frac{P}{m}$ (ubrzanje /u/, sila /P/, masa /m/)

Također je: $u = \frac{d^2 s}{dt^2}$ (prevaljeni put /s/, vrijeme /t/)

Gornje se vrijednosti uporede, vrši se dvojnja integracija i konačan rezultat je:

$$s = \frac{P}{m} dt^2 + c_1 t + c_2$$

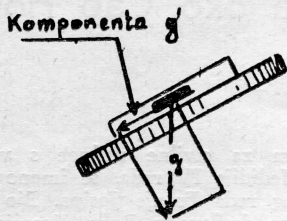
Pri poznatim P, m, t može se odrediti prevaljeni put (s).

mjereno prema N zbog azimutalne greške u orijentaciji utiče i na akcelerometar E — W. Ovo je šematski pokazano na slici 3. Opruge bi morale da budu takve da omogućavaju mjerenja i najsitnijih ubrzanja i da momentalno zauzmu svoj prvobitni položaj. Potrebno je da akcelerometar bude osjetljiv i da reagira i na akceleracije od 1/1000 g. Kako je praktički neostvarljivo izvesti ovako osjetljivu mehaničku oprugu, akcelerometar ima električnu oprugu, koja se sastoji od tankih pločica električnog kondenzatora. Ovaj kondenzator može pokretati masu.

Na ovaj način je izvedeno da promjene brzine prelaze u promjene električnog intenziteta i akcelerometar izaziva električni signal u obliku varijacije potencijala.

Akcelerometar u stvari sabire voltažu koju proizvodi ubrzanje. Elektronskim računarom moguće je zbrojiti geografske koordinate polazne tačke s varijacijama koordinata po širini i dužini. Rezultat ovih zbrajanja odmah daje položaj broda na moru, te se u svakom času raspolaže točnim položajem broda.

Ukoliko platforma na kojoj leži akcelerometar nije točno stabilizovana horizontalno dolazi do upliva sile gra-



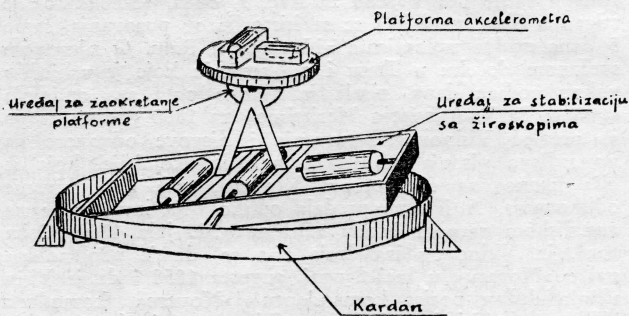
vitacije (g) koja inače ne uzrokuje nikakva ubrzanja sredstva koje plovi.

Ovo je prikazano šematski na slici 4. Ukoliko je ravnina akcelerometra nagnuta u odnosu na horizont prema dolje samo za jedinicu luka ovo izaziva poslije sata vožnje grešku u poziciji broda od 10 milja.

Iz navedenog primjera velike osjetljivosti čitavog uređaja na stabilizaciju u prostoru po horizontalnoj ravnini jasno izlazi potreba da se platformu akcelerometra mora stabilizovati pomoću kardanskog sistema i žiroskopa.

Šematski prikazana stabilizovana platforma vidi se na slici 4. Kardanski sistem pričvršćen je na brod i upravlja akcelerometrijsku grupu. Svaku osovinu kardanskog sistema pokreće električni servomotor preko zupčanika, a servomotor dobiva struju regulisanu preko žiroskopa. Poznato je da žiroskopi, slično žirokompasu, imaju osobinu da zadržavaju stalan položaj u prostoru. Njihov broj ovisi od zahtjeva koji se postavljaju pred pojedini uređaj za inercionu navigaciju. Sa tri žiroskopa moguće je stabilizovati platformu i kontrolisati sve moguće reakcije u trodimenzionalnom prostoru.

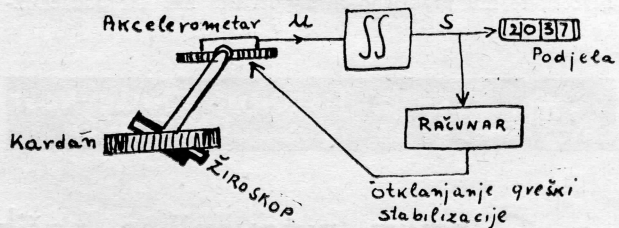
Osim navedenih sprava potrebno je imati i računare koji otklanjaju uticaj rotacija Zemlje oko svoje osovine, uticaj spljoštenosti Zemlje na polovima itd. Žiroskopi su



u posljednje vrijeme tehnički mnogo savršenije izvedeni nego što je to bilo ranije. Da bi se izbjegao uticaj nesimetričnog trenja u ležajima, zatim uticaj sile gravitacije i poremećenja kardanskog sistema rotor žiroskopa stavljeni su u nepropusne cilindre napunjene uljem. Sam cilindar

pliva u visoko viskoznoj tekućini koja se nalazi u nešto većoj posudi. Ovo ga održava u ustaljenom položaju u odnosu na platformu. Kontroliše se čvrstoća i temperatura tekućine, a njihanje rotora je takvo da eventualno pomjeranje njegova težišta uzrokuje precesiju od svega desetinu stepena na sat. Ovakvo fini mehanizam vrlo je teško konstruisati.

Šematski prikaz funkcionisanja cijelog uređaja dat je na slici 6. Radi jednostavnijeg prikaza uzet je uređaj samo sa jednom »osjetljivom osi«, dakle uređaj koji bi izračunavao ubrzanja u jednom smjeru. Akcelerometar mjeri



ubrzanja i prenosi ih električnim putem u elektronski integrator, a ovaj određuje prevaljeni put. Pored toga, vrijednost prevaljenog puta ide još u poseban računar, koji služi za otklanjanje greški u stabilizaciji platforme akcelerometra.

Podmornica »Nautilus« ispitala je uređaj za inercionu navigaciju na svojoj poznatoj plovitbi pod ledenom kapom Sjevernog Pola. Na njoj je bio instaliran uređaj za inercionu navigaciju čim je taj put bio planiran. Pored njega na podmornici su postojala: tri žirokompasa Sperry Mark, 19 sprava za mjerenje brzine broda novog tipa — elektromagnetski »jog-log«, periskop sa žiroskopskim vještačkim horizontom s kojim se je moglo mjeriti visinu zvijezda sa periskopske dubine, aparatura za automatsku kontrolu kursa i dubine ronjenja, serija goniometara na jeku i panoramskih sonde itd. Za čitavo vrijeme plovitbe podaci dobiveni uređajem za inercionu navigaciju i drugim konvencionalnim načinima su se vrlo često poklapali. Elektromagnetski »jog-log« davao je uvijek, najpreciznije podatke o brzini. Iz izvještaja navigacijskog oficira podmornice, poručnika fregate Jenk-a, vidi se da je razlika u poziciji dobivenoj uređajem za inercionu navigaciju i astronomskoj poziciji (dvije stajnice pomoću sunca) iznosila svega 10 milja. Iza 96 sati plovljenja pod vodom srednjom brzinom od 18 čvorova, dakle poslije prevaljenih cirka 1830 milja, ovo je dobro položen praktički ispit uređaja za inercionu navigaciju. Osobito u blizini pola on je davao dragocjene i sigurne podatke.

Ipak je uređaj za inercionu navigaciju nazvan SINS (Ship Inertial Navigational System) unatoč velikoj tehničkoj preciznosti finih mehanizama od kojih je sastavljen podložan greškama, te se kod sadašnjeg stanja na njega ne može isključivo osloniti. Ove greške osobito dolaze do izražaja ako je u pitanju dug put. One se tad gomilaju po eksponentnim zakonima. Moguća je početna greška u orijentaciji ili nagibu platforme akcelerometra, greška u podjeli njegove skale gdje se očitava vrijednost akceleracija, a u znatnoj mjeri utiče na tačnost osjetljivost instrumenata i na najsitnija ubrzanja fluida u kojem se brod kreće (zanošenje zbog struje). Greške uslijed nesavršenosti žirostatske aparature rastu kubičnim eksponentom. Iako je moderna tehnika majstorskim riješenjima vrlo smanjila mogućnost takvih grešaka, potpuna savršenost još nije postignuta.

Za sada je uređaj za inercionu navigaciju podesniji za praktičnu primjenu na sredstvima velike brzine kao što su suvremeni avioni i projektili. Međutim on je našao i svoju praktičnu primjenu u podvodnoj polarnoj navigaciji, gdje je zbog blizine pola nužno potreban. Činjenica je da je aparat upotrebljen na »Nautilus-u« bio konstruiran za avion, a ne za brod, pa je ipak i kod relativno mnogo manjih brzina odlično funkcionisao. Kasniji podvizi drugih podmornica u polarnoj navigaciji ponovno su potvrdili nesumnjivu praktičnu vrijednost ovog sistema.

Svakako da skupoća vanredno finih mehanizama isključuje kod sadašnjeg stanja tehničkih mogućnosti upotrebu ove vrsti navigacije u širim okvirima u pomorstvu. I postojeći sistemi konvencionalne astromske, radarske i elektronske navigacije u dovoljnoj mjeri obezbjeđuju pomorcima sigurno vođenje broda. Sigurno je da će razvoj nauke i tehnike uspjeti u budućnosti da još više pojednostavi i učini jeftinijim i uređaj za inercionu navigaciju, koji svakako ima prednost pred svim drugim sistemima u tome što mu iza upućivanja nisu više potrebna nikakva mjerenja, ni jačine vjetera, ni struje, a neovisan je o stanju vidljivosti, te mu praktično nisu potrebni nikakvi podaci iz-

vana kao što su osmatranja sunca, zvijezda, smjerenje objekata ni bilo što drugo.

Poput nekog elektronskog robota on iza upućivanja sve riješava sam i pomorcu daje uvijek podatak o položaju njegova broda. Tako savršenom sistemu svakako će se težiti u budućnosti.

L i t e r a t u r a :

- Alvise Fon: Navigazione inertiiale
- D. E. Adams: Introduction to inertial navigation
- E. W. Anderson: Inertial Navigation System
- L. L. Lechock: Navigation of guideal misile ships
- M. G. D'Artogna: Guida.