



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Досптеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Југославија
Деканат: 021 350-413; 021 450-810; Централа: 021 350-122
Рачуноводство: 021 58-220; Студентска служба: 021 350-763
Телефакс: 021 58-133; e-mail: fnDean@uns.ns.ac.yu



Сертификован
систем
квалитета



Studijski program

Geodezija i geomatika

Seminarski rad

Pozicioniranje inercijalnom sistemom i GPS-om

Mentor: Bulatović dr Vladimir

Student: Feher Silard

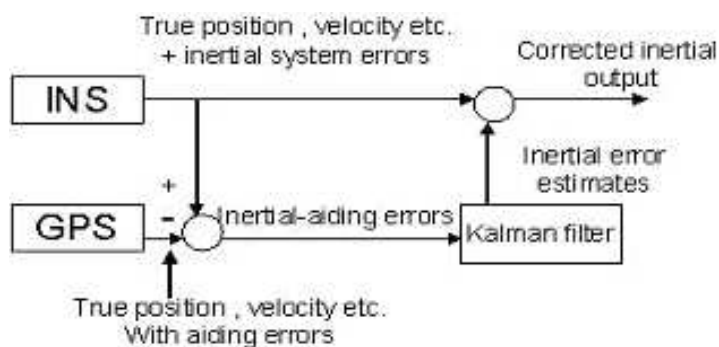
Br. Indeksa: GG 6/2011

Sadržaj

Uvod.....	3
Opšti pregled.....	4
Istorija.....	5
Čovekova orijentacija u svemiru.....	6
Osnovni princip.....	6
Upotreba u vazduhoplovstvu.....	8
Kardanska žiroskopska stabilisana platforma.....	9
Redni sistem.....	10
Oblik baznog poravnanja.....	10
Laserski žiroskop.....	11
Akcelometar sa klatnom.....	12
Metodologija u vazduhoplovstvu.....	13
Greške.....	14
Reference.....	16
Literatura.....	16

Uvod

U semiarskom radu je detaljno analizirano inercijalni navigacionog sistem, GPS i veza između ovih sistema. **Inercijalni navigacioni sistem (INS)**, namenjen je za merenje parametara navigacije objekta u prostoru, sa korišćenjem računara i senzora. Promene „vektora stanja“ objekta u prostoru, detektuju se sa merenjem njegovog translacionog kretanja (akcelerometrima) i rotacije (žiroskopima). **Globalni pozicioni sistem** (engl. *Global Positioning System - GPS*) je trenutno jedini potpuno funkcionalan globalni satelitski navigacioni sistem (engl. *Global Navigation Satellite System - GNSS*). GPS se sastoji od 24 satelita raspoređenih u orbiti Zemlje, koji šalju radio signal na površinu Zemlje. GPS prijemnici na osnovu ovih radio signala mogu da odrede svoju tačnu poziciju - nadmorsku visinu, geografsku širinu i geografsku dužinu - na bilo kom mestu na planeti danju i noću, pri svim vremenskim uslovima.



Koncept inercijalnog navigacionog principa zasniva se na merenju ubrzanja u translacionom kretanju duž osa i ugaonih brzina, rotacije oko osa. Na osnovu poznate mase i izmerene sile inercije računar određuje ubrzanje i na osnovu sile precesije ugaonu brzinu. Veliki nedostatak INS su odstupanja u merenju, sa raspoloživim sensorima. U praksi se to prevazilazi sa kombinacijom INS i drugih navigacionih sistema. Na primer, u kombinaciji sa sistemom GPS, dobijaju se apsolutni podaci položaja svake sekunde, dok sam INS interpolira srednje vrednosti. Sa upotrebom Kalmanovog filtera, u odgovarajućoj petlji regulisanja greške merenja INS-a, svode se na minimum.

Za inercijalni navigacioni sistem, vezani su pojmovi: inercijalna referentna platforma, inercijalni instrument, inercijalna merna jedinica i mnoge druge varijacije naziva.

Opšti pregled

Inercijalni navigacioni sistem poseduje računar, platformu i modul sa sensorima: akcelerometrima, žiroskopima ili drugim uređajima za detekciju kretanja. INS odredi svoju početnu poziciju i brzinu, iz nekog drugog izvora (izmeri je čovek-operator, GPS sa satelitskim prijemnikom, itd), a zatim izračunava svoju poziciju i ažurira brzinu integrisanjem informacija dobijenih od senzora o kretanju. Prednost sistema je u tome što ne zahteva spoljašnje referentne objekte, kako bi se utvrdila sopstvena pozicija, orijentacija i brzina, sa relativnim poređenjem. Sadrži paket senzora, koji u kombinaciji daju informacije za izračunavanje inercilnih sila u tri linearne dimenzije (duž tri ose) i tri ugla rotacije oko tih osa. Specifičnost merenja je u odnosu na meru ubrzanja iz slobodnog pada. U rezultatu merenja uduzima se učešće gravitacionog ubrzanja, tako da ostaje samo relativno pokretnog objekta. Pored kombinacije akcelerometara u linearnim pravcima i žiroskopa za signale ugaonog kretanja oko osa, sistem poseduje i procesorsku ploču, memoriju i senzor temperature. Obezbeđen je digitalni interfejs, za konverziju jedinica i primenu modula senzora kalibracije. Pošto INS samo povremeno koristi sponjno referentno poređenje, isti nije imun na greške. Bez obzira što je nezaobilazan u upotrebi za navigaciju sa brodovima, avionima, svemirskim letelicama i vođenim raketama.

Žiroskopi mere ugaonu brzinu sistema u odnosu na inercijalni referentni okvir. Ako se koristiti orijentacija sistema u odnosu na inercijalni referentni okvir, kao početno stanje i kontinualno integrisanje ugaona brzina, trenutna orijentacija sistema poznata je u svakom trenutku. Brzina se meri preko translatorsnog ubrzanja sistema u odnosu inercijalni referentni okvir, ali samo u pravcima osa koordinatnog sistema, u kojima samo i mogu biti mereni u odnosu na pokretni sistem (jer su akcelerometri fiksirani u sistemu i rotiraju se zajedno, ali to ne utiče na njihovo merenje).

Pored navedenih nedostataka INS ima i prednosti, primer su kod pretovara brodova u lukama i kod podmornica u nekim slučajevima. Brodovi povremeno prolaze u lukama pored prepreka, kao što su metalne dizalice i tada je GPS signal nejasan. U tim situacijama INS je pouzdaniji. Takođe na podmornicama korišćeni je dodatni GPS sonar. Pri potapanju njegove antene u vodu gubi se signal.^{1,2}



Sl. Kod inercijalnog navigacionog sistema, senzori registruju signale od translacije duž sve tri ose i od rotacije, oko njih.

Istorija

Inercijalni navigacioni sistemi su prvobitno bili razvijeni za navigaciju raketa. Američki pionir raketne tehnike Robert Godard (engl. *Robert Goddard*), eksperimentisao je sa elementarnim žiroskopskim sistemima. Njegovi sistemi, bili su od velikog interesa za nemačkog konstruktora Vernera fon Brauna, pred Drugi svetski rat. Sistem je ušao u širu upotrebu sa pojavom letelica, vođenih raketa, kao i komercijalnih aviona.

Početak Drugog svetskog rata, na raketi V-2 primenjena je varijanta sistema sa kombinacijom dva žiroskopa i akcelerometra za bočno ubrzanje sa jednostavnim analognim računom za podešavanje azimuta letelice u letu. Analogni signali iz računara, korišćeni su za pomeranje četiri spoljna krmila na perajima repa, za upravljanje sa letom. Kasnije je tehnologija inercijalnih senzora usavršena u eminentnim institucijama, stvarani su prvi inercijalni navigacioni sistemi. Razvijena tehnologija inercijalnih navigacionih sistema, omogućila je realizaciji veliki programa svemirskog letenja, kao što su program Apollo.

Do pojave MEMS tehnologije, inercijalni senzori sastojali su se od preciznih mehaničkih žiroskopa i akcelerometara. Zbog svoje visoke cene, inercijalna tehnologija za detekciju, bila je rezervisana za vrhunske vazduhoplovne aplikacije. Kako je tehnologija inercijalnih senzora MEMS tokom godina sazrela, sa niskim fiksnim cenama čipova, postala je dostupna kao alternativa starijim mehaničkim inercijalnim sensorima. Bez obzira što novi MEMS senzori daju niže ukupne performanse, u odnosu na svoje mehaničke alternative, oni imaju prednost u drastičnom smanjenju zapremine, troškova i u zahtevima za integraciju.

Po završetku rata Fon Braun, prešao je Amerikancima. Preneo je oko 500 svojih najboljih projekata raketa. Naučnici su, zajedno sa projektima i prototipovima, prešli u Ameriku. Stigli su u Teksas 1945. godine, u okviru operacije „spajalica“, a zatim su se preselili u istraživački centar u Alabami, 1950. godine, gde su radili na razvoju i istraživanju američkih vojnih programa raketne tehnike.

U ranim pedesetim godinama, prošlog veka američka vlada želela je da se oslobodi zavisnosti od nemačkih naučnika, u domenu vojne tehnologije. Među oblastima koje su Amerikanci samostalno razvijali bila je vođena raketa. Tada je doneta odluka za samostalan razvoj rezervnog navigacionog sistema „atlas“, za novu interkontinentalnu balističku raketu. Navigacioni sistem „atlas“, trebalo je da bude kombinacija autonomnog navigacionog i komandnog sistema. To je bio početak filozofske polemike, koja u nekim oblastima, ostaje nerešena. Konačno je prevagnula koncepcija balističke rakete sa sopstvenim navigacionim sistemom, iz razumljivih tehnoloških razloga.

U leto 1952. godine, započeto je intezivno istraživanje principa navigacije, zasnovano na računarskim principima i rezultatima. Započet je razvoj algebarskog programskog jezika (MAC), za računar IBM 650, koji je završen i postao operativan u rano proleće 1958. godine. (MAC) je postao radni „konj“ laboratorije. (MAC) je veoma čitljiv jezik, sa tri linije formata, vektorskom matricom i sa indeksiranim oznakama. Današnji jezik Spejs šatla, direktan je ogranak/potomak od (MAC).

Početni navigacioni sistem „delta“, procenjuje razliku položaja objekta od referentne trajektorije. Brzine koje se dobijaju proračunom, koriguju se sa ciljem da se razlika trenutnog položaja i referentne trajektorije postepeno pomera prema nuli. Ovaj matematički pristup u suštini je pouzdan, ali nije prošao kompletan princip zbog nedovoljne preciznosti inercijalnog vođenja i zbog nedostataka tadašnje analogne računarske tehnologije. Problemi, sa kojima se suočavao „delta“ sistem, prevazideni su sa uvođenjem „Q sistema“, prvenstveno primenjenim za balističke rakete. Novina je da „Q sistem“ prinudi usmeravanje rakete, saglasno jednačinama kretanja, izraženih preko matrice Q. Matrice Q predstavljaju parcijalne izvode vektora stanja po brzini. Ključna funkcija ovakvog

pristupa omogućila je primenu izvoda komponenti vektora stanja kao podatak za oformljenje ulaza u autopilot, za upravljanje. „Q sistem“ je predstavljen na prvom tehničkom simpozijumu o balističkim raketama, održanom u Los Angelesu 21. juna 1956. godine. Derivacije ovog principa, koriste se i za današnje rakete

Čovekova orijentacija u svemiru

U februaru 1961. godine, NASA je sa podugovoračima sklopila ugovore za idejni projekat i proučavanja koncepcije za navigacioni sistem Apoloa. General motors grupacija, dobila je ukupni ugovor za projektovanje i proizvodnju sistema za vođenje i navigacioni sistem za „Apolo“, za komandni i lunarni modul.

Za Spejs šatl, otvorena je petlja (bez povratne informacije) sistem se koristi da vodi šatl od lansiranja do razdvajanja od čvrste veze sa raketnim nosačem. Nakon odvajanja, primarni sistem vođenja šatla dobio je oznaku PEG4. On se zasniva na „Q sistemu“ i poseduje korekturne attribute originalnog „delta sistema“. Navigacioni sistem šatla je pretrpio veliki broj izmena i modifikacija, za poslednjih 30 godina. Međutim, ipak današnji navigacioni sistem za vođenje šatla ima sasvim male razlike od početnog rešenja. U okviru sistema navigacije objekata sa ljudskom posadom, postoji interfejs sa posadom, potreban za navigacioni sistem. U tome kontekstu, rigorozna je selekcija astronauta za korišćenje sistema, mnogo novih timova se formiraju da se obučavaju za upotrebu sistema navigacije, a na kraju izaberu se malobrojni, samo najsposobniji. ¹⁰

Osnovni princip

Polazna tačka je detekcija ubrzanja i rotacije, pomoću inercijalnih senzora. Ubrzanje tela u prostoru, određenog inteziteta i pravca, poznato je preko signala iz senzora. Uzimaju se u određenim trenucima, po „koracima“, pa se u tome procesu i integrišu tokom vremena. Rezultati integracije je brzina, promena položaja $s(t)$ i ugaona pozicija tela. Promena pređenjnog puta (dužna pozicija) $s(t)$, dobija se posle druge integracije signala iz akcelerometra (prva daje brzinu). Princip je zasnovan na Njutnovom zakonu mehanike, i to:

$$m \cdot \ddot{s}(t) = m \cdot \frac{d^2 s(t)}{dt^2} = m \cdot a(t) = \sum_I F^I$$

Proračuni ukupnog ubrzanja letelice (uključujući i gravitaciju zemljine teže) mogu biti izvedeni na direktan način.

$$\frac{ds}{dt} = v \quad \longmapsto \quad \frac{dv}{dt} = g + a_T$$

Sa poznatim početnim uslovima, početna brzina i polazni položaj letelice (ili bilo koga drugog objekta), sledi integracija tokom vremena, između dva trenutka predaje podataka senzora.

Isto važi i za ugaone brzine, koje se mogu konvertovati putem utvrđivanja ugaone *precesije* senzora (žiroskopa), sa jednostavnom integracijom tokom vremena u ugaon nagiba u inercijalnim prostoru. INS daje ukupno simultano merenje šest promenljivih, u tri međusobno ortogonalna pravca u prostoru. Oni se odnose, na tri translatorsna stepena slobode sa tri ubrzanja i tri rotacije sa tri ugaone brzine.

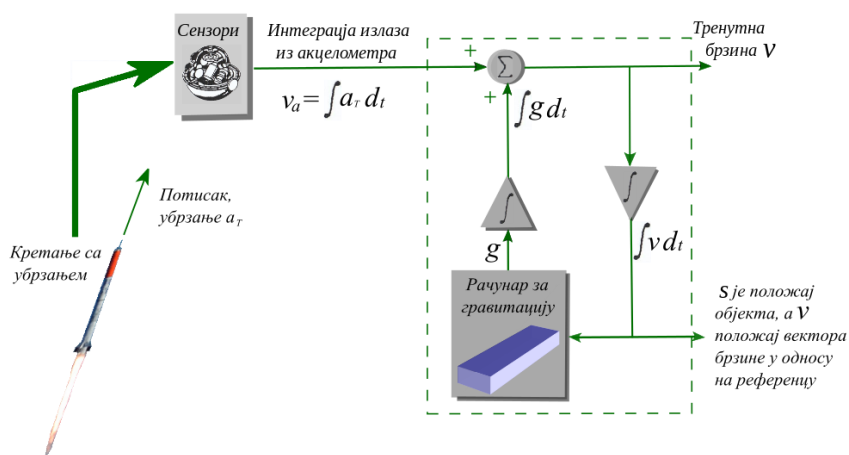
U poslednjoj jednačini je \mathbf{s} položaj letelice, a \mathbf{v} vektor brzine u odnosu na inercijalni referentni okvir. Vektor ubrzanja letelice, definisan je kao posleda razlike između potiska i otpora letelice. Vektor ukupnog ubrzanja predstavlja zbir \mathbf{a}_T i \mathbf{g} . Jednostavan algoritam proračuna položaja i brzine letelice, zasniva se na jednačinama razlika prvog reda, koje imaju oblik:

$$\Delta \mathbf{v}_a(t_n) = \mathbf{v}_a(t_n) - \mathbf{v}_a(t_{n-1})$$

$$\mathbf{s}(t_n) = \mathbf{s}(t_{n-1}) + \mathbf{v}(t_{n-1}) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{g}_{n-1} \cdot (\Delta t)^2 + \frac{1}{2} \cdot \Delta \mathbf{v}_a(t_n) \cdot \Delta t$$

$$\mathbf{v}(t_n) = \mathbf{v}(t_{n-1}) + \Delta \mathbf{v}_a(t_n) + \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{g}_n + \mathbf{g}_{n-1}) \cdot \Delta t$$

Vektor \mathbf{v}_a , dobijen je integralenjem, bez uzimanja u obzir uticaja komponente sile od gravitacionog ubrzanja. Vektor gravitacije \mathbf{g}_n je funkcija položaja u vremenu t_n . Pošto se brzina ažurira pomoću prosečne vrednosti gravitacije u jednom intervalu za vremenski korak, ovaj metod se naziva „prosečni \mathbf{g} metod“. Pažljivom analizom grešaka kretanja letelice u orbiti Zemlje, pokazalo se da ovaj algoritam daje grešku, za pređeni put od 100 m i u brzinu od 0,2 m/s, za period leta od 35 minuta, koristeći vremenski korak integracije od 2 sekunde. Poredeći to sa tipičnom greškom akcelometra, greška od računarskog algoritma je za nekoliko redova veličine manja.^{10,11}



Шема инерцијалног навигационог система лета

Upotreba u vazduhoplovstvu

Jedan od primera popularnih INS, za komercijalne avione, je „Delko karusel“ (engl. *Delco Carousel*), koji je obezbeđivao delimičnu automatizaciju plovidbe u periodu pre nego što je sa potpunim letom upravljao navigacioni sistem, kao stalni standard. „Delko karusel“ je omogućavao pilotu vođenje aviona između niza poznatih tačaka, a zatim i za vođenje aviona sa jedne putanje na sledeću, koristeći i instrumente za dopunsko određivanje položaja i brzine aviona. Boeing korporacija, naručila je proizvodnju INS „Delko karusel“. Dženeral motors je određen za projektovanje i proizvodnju prvog sistema „Delko karusel“, za prve tipove aviona (B-100, B-200, B-300) i za poznati B-747. Boeing 747 koristi trostruki sistem „Delko karusel“, koji rade paralelno, sa povećanom pouzdanošću. INS „Delko karusel“ i njegovi derivati, kasnije su usvojeni za korišćenje u mnogim drugim komercijalnim i vojnih avionima. Američkog ratnog vazduhoplovstva, opremilo je prvi vojni avion C-141 starlifter, koji je koristio dvostruki INS „Delko karusel“, zatim C-5 galaksija koji koristi trostruki sistem, slično kao i Boeing 747. Boeing KC-135 flota, opremljena je sa dvostrukim „Delko karusel“ sistemom, koji radi uz pomoć dopler radara.^{13,14,15}

Detalji inercijalnog navigacionog sistema

INS poseduje inercijalnu mernu jedinicu, koja meri ugaono i linearno ubrzanje (za proračun promene pozicije), neke jedinice uključuju i žiroskopski element (za održavanje apsolutne ugaone reference).



SLi. Francuski inercijalni navigacioni sistem, za balističku raketu srednjeg dometa S3.

Rotaciju letelice u prostoru meri ugaoni brzinomer. Generalno, postoji barem jedan senzor za svaku od tri ose: propinjanje (vrh trupa ide gore i dole), skretanje (nos ide levo i desno) i rotacija (u smeru kazaljke na satu ili suprotnom smeru kazaljke na satu, gledano iz kabine). Linearni brzinomer meri ubrzanje letelice, bez doprinosa gravitacije. Budući da se može pomerati duž osa (gore i dole, levo i desno, napred i nazad), postoji linearni akcelerator za svaku osu. Računar kontinualno računa trenutni položaj letelice. Prvo, za svaki od šest stepeni slobode (x , y , z i uglove θ_x , θ_y , θ_z), on integriše tokom vremena registrovano ubrzanje, zajedno sa procenom gravitacije, za računanje

trenutne brzine. Tada integriše brzinu, da izračuna trenutnu poziciju, tkođe sa integraciom ugaonih brzina određuje uglove položaja tela.

Inercijalna navigacija se teško može ostvariti bez računara. Želja za korišćenje inercijalnog navođenja u projektilima, kao projekat „Apolo“ doveo je do pokušaja smanjenja računara. Inercioni navigacioni sistemi, danas se obično kombinuju sa satelitskim navigacionim sistemom, preko sistema digitalnog filtriranja, sa uvođenjem Kalmanovog filtra. Inercijalni sistem obezbeđuje kratkoročne podatke, dok atelitski sistem ispravlja akumulirane greške inercijalnih sistema. Inercioni navigacioni sistem koji radi blizu površine Zemlje mora imati ugrađeno podešavanje, to jest modifikacije elektronskog sistema upravljanja, pa platforma nastavlja da se reperiše na centar Zemlje pri kretanju letelice od mesta do mesta.

Kardanska žiroskopska stabilisana platforma

Kod nekih sistema postavljaju se i linearni akcelerometri na stabilisanu platformu, sa kardanskim žiroskopima. Kardanski mehanizmi su sklop od tri prstena (vidi desno), svaki sa parom ležaja, pod pravim uglom. Oni omogućuju platformi da se obrće oko sve tri ose rotacije (ili, bolje rečeno, dozvoljava platformi da zadrži istu orijentaciju dok se vozilo okreće oko njega). Na platformi se obično udvajaju žiroskopi, u funkciji neutralisanja njihove precesije. Precesija je tendencija žiroskopa da se zaokrene pod pravim uglom prema ulaznoj sili poremećaja. Pri ugradnji para žiroskopskopa za jednu osu (iste rotacione inercije i pri istoj brzini obrtanja) pod pravim uglom se neutrališe precesija, a platforma se opire obrtanju.

Ovaj sistem dopušta, da se direktno meri precesija na ležajevima kardana, analogna uglovima valjanja, propinjanja i skretanja letelice. Relativno jednostavna električna kola mogu se koristiti za sabiranje linearnih ubrzanja, jer pravci linearnog ubrzanja se ne menjaju.

Veliki nedostatak ovog koncepta, što se koriste mnogo skupi precizni mehanički delovi. Ovi sistemi poseduju veliki broj pokretnih delova, koji se habaju ili zaglavljaju, te su prisutni otkazi kardana. Primarno vođenje sistema Apolo letelice, zasniva se na primeni žiroskopske stabilisane platforme sa tri ose, koji snabdeva računar „Apola“ sa podacima za navigaciju. Manevar je morao biti pažljivo planiran (ograničen) da se izbegne otkaz kardana.



Sl. Kardanski mehanizam, sa tri slobodna prstena.

Redni sistemi

Lagani digitalni računari dozvoljavaju sistemu da eliminiše kardanov prsten, stvarajući redni sistem, tako se može zvati jer su njegovi senzori jednostavno zasebno *nanizani* na letelici. Ovo smanjuje troškove, eliminiše zastoje kardana, smanjuje se potreba kalibracije, i povećava pouzdanost uklanjanjem nekih pokretnih delova. Ugaoni opseg senzora zove se opseg žiroskopskog merenja promene ugaone brzine letelice.

Redni sistem ima dinamički opseg merenja nekoliko stotina puta veći od kardanskog sistema. To jest, on mora integrisati promene vozila u odnosu na propinjanje, valjanje i skretanje, kao i ukupno kretanje. Kardanski sistemi mogli bi se obično dobro ažurirati sa opsegom 50-60 Hz. Međutim, redni sistemi obično se ažuriraju na oko 2.000 Hz. Što je veći opseg od potrebnog za maksimalna ugaona merenja bilo koga zahteva za realni žiroskop. Najveće opseg žiroskopa, obezbeđuju laserski interferometri. Ažuriranja uključenih podataka u algoritam navigacije, previše su složena da bi se moglo izvesti precizno to izvođenje, sem sa digitalnom elektronikom. Međutim, na sreću su digitalni računari sada toliko jeftini i brzi, da se žiroskopski sistemi, sada praktično koriste i proizvede, masovno. Lunarni modul Apola koristi redni sistem, kao rezervnu opciju.

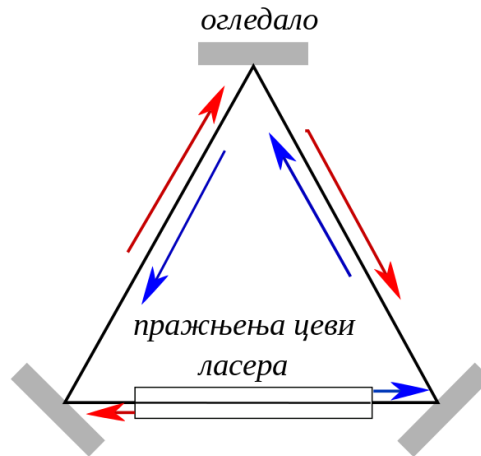
Danas se najčešće koriste redni sistemi u komercijalnoj i taktičkoj primeni (avioni, rakete, itd.) Međutim, oni još uvek nisu rasprostranjeni u aplikacijama gde se traži potrebna vrhunska tačnost (kao što su podmornice za navigaciju ili strateško vođenje raketa).

Oblik baznog poravnanja

Orijentacija sistema žiroskopa može se ponekad jednostavno ustanoviti na osnovu njegove istorije pozicije (npr. u odnosu na GPS). Ovo je posebno slučaj sa avionima i automobilima, pri čemu vektor brzine obično podrazumeva orijentaciju trupa, odnosno karoserije.

Na primer, poremećaj u pokretu je proces, kada se avion kreće, u vazduhu ili na Zemlji. Ovo se ustanovljava korišćenjem GPSa i inercijalnom logičkom proverom, čime se omogućava komercijalni integritet uslova podataka koje moraju ispuniti. Ovaj proces je FAA sertifikat (međunarodni vazduhoplovni propis), da se povrati na čist ekvivalent stacionarnih performansi INS i uskladi procedura za civilni let, u vremenskom periodu trajanja, do 18 sati.

Laserski žiroskop



Sl. Šema rama laserskog žiroskopa.

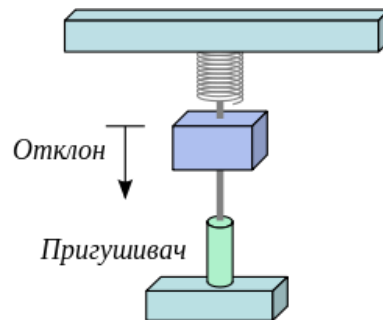
Prsten laserskog žiroskopa deli snop laserske svetlosti u dva dela, u suprotnim smerovima, kroz uske tunele u zatvorenom optičkom kružnom putovanju po obodu bloka trouglastih temperaturno stabilnih slojeva stakla sa odrazom ogledala postavljenim u svakom uglu trougla (vidi sliku desno). Kada žiroskop rotira, u nekom ugaonom delu, rastojanje koje svaki zrak pređe za različiti kraći put, biće suprotan od rotacije. Tada se laserski snopovi fazno diferenciraju. Faza pri pomeranju između dva snopa, može se meriti interferometrom, a razlika je proporcionalna brzini rotacije.

Prsten laserskog žiroskopa pruža odlične performanse po nižoj ceni i sa većom pouzdanošću, nego što je to ostvarljivo sa mehaničkim žiroskopom, koji je po svojoj prirodi složeniji i sklon kvarovima. Iako prsten laserskog žiroskopa pruža veoma elegantno rešenje za merenje ugaonih vrednosti, čini jedan značajan problem, pošto na niskim vrednostima frekvencije se pojavljuje „zaključavanje“ između dva suprotna snopa. U praksi, pri niskim vrednostima rotacije, izlazna frekvencija može pasti na nulu nakon toga zaostalo rasipanje izaziva zonu pokrivanja, u kojoj se međusobno zruci sinhronizuju i spajaju se. Ovo je poznato kao „zaključavanje“, ili „blokada lasera“. Rezultat je da tada nema promene u obrascu mešanja, a samim tim ni mogućnosti merenja.

Da bi se to izbeglo, ili otključalo kontra rotirajuće svetlo snopa, žiroskopi ili imaju nezavisne putanje svetlosti za dva pravca (tada je izbegnuta ta pojava), ili je laserski žiroskop postavljen na piezo-električni vibracioni pokretač, koji ga brzo vibrira. Tada se laserski prsten brzo pomera napred i nazad i sa njegovim ulazom, kroz prevodnicu u regionu, razdveje se svetlosni talasi.

Ovaj rincip „mučkalice“ je najprecizniji, pošto oba svetlosna snopa koriste potpuno isti put.

Akcelometar sa klatnom

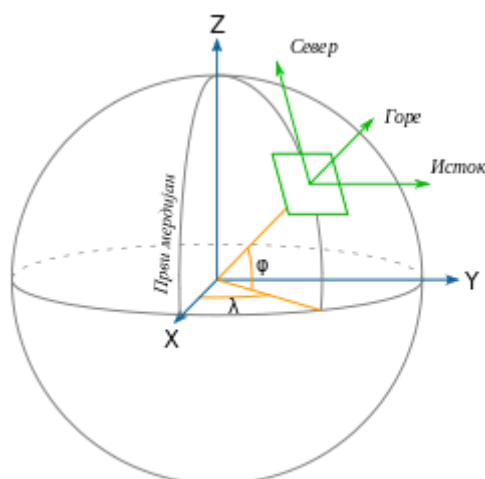


Sl. Princip otvorene petlje akcelometra. Ubrzanje u smeru na gore izaziva masu da se kreće na dole, pod dejstvom inercijalne sile.

Osnova, „otvorenog kola“ akcelometra, sastoji se od mase vezane za oprugu. Masi je ograničeno kretanje, u skladu sa karakteristikama opruge. Ubrzanje, usled sile inercije, izaziva težnju da masa zaostane. To zaostajanje je joj omogućava elastična opruga. Intezitet ubrzanja, izvodi se iz vrednosti ugiba opruge, to jest dužini zaostajanja mase, što zavisi od veličini mase i krutosti opruge (smatra se konstanta). Sistem mora biti prigušen da bi se izbegle oscilacije. Stabilizuju sistema, postiže sa ugradnjom prigušivača. Akcelometar sa zatvorenom petljom postiže bolje performanse. Posедуje povratnu spregu, pomoću koje se poništava ugib opruge, pa se masa skoro drži u stacionarnom stanju pri dejstvu ubrzanja. Kad god se masa pomeri, povratna sprega generiše suprotnu silu na masu, poništavajući njeno pomeranje. Generiše se elektromagnetna sila sa električnim kalemom (magnetom) istog inteziteta, a suprotnog smera, u odnosu na izazvanu silu inercije sa ubrzanjem. Ovde se vrednost ubrzanja određuje od iznosa negativne elektromagnetne sile, odnosno potrebne jačine struje za napajanje elektromagneta. Pošto se masa skoro ne pomera, nelinearnost krutosti opruge, njen histerezis i karakteristike sistema prigušenja su znatno smanjenog uticaja na merenje ubrzanja. Pored toga, ovaj akcelometar omogućava povećanu propusnu moć, izbegnut je problem rezonance, sa aspekta poklapanja prinudnih i sopstvenih učestanosti, te nije uslovljeno kroz projekat njihovo međusobno udaljavanje. Vrednosti ubrzanja, bez obzira na vrstu kola regulisanja, određuju se lako sa proračunom, a konačno sa merenjem i podešavanjem.

Obe vrste akcelometra, proizvode se kao integrisani mikro-mašinski elementi, u silicijumskom čipu.

Metodologija u vazduhoplovstvu



Sl. Geografski koordinatni sistem u vazduhoplovstvu, istok–sever–gore (ENU).

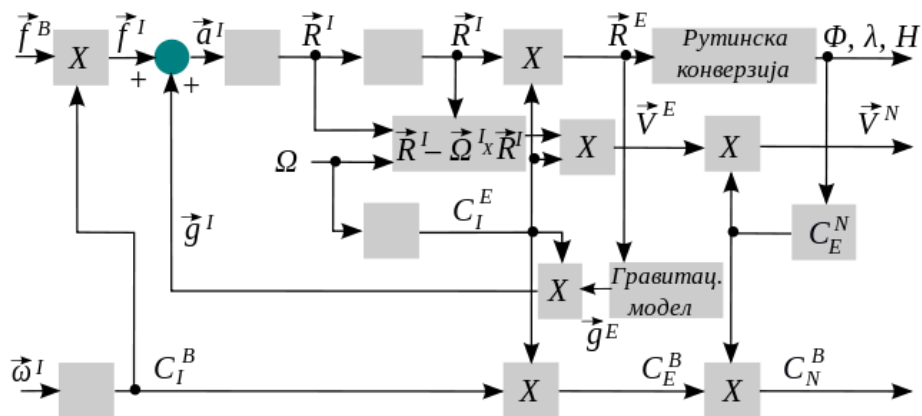
U vazduhoplovstvu se usvaja geografski koordinatni sistem, za predstavljanje vektora stanja u navigaciji. Princip izbora koordinatnog sistema, obično se zasniva na činjenici da je avion centar gravitacije. Sastoji se iz tri podatka: jedan predstavlja poziciju duž severne ose, drugi duž istočne ose, a treći parametar predstavlja vertikalni položaj letelice (visinu). U međunarodnoj terminologiji, ovaj sistem je poznat kao engl. *North east down*, skraćeno NED (vidi sliku desno). Ovaj okvir se naziva lokalni nivo referentnog okvira. NED se kreće oko površine Zemlje, zajedno sa referentnom platformom. U okviru navigacije, definiše se koordinatni okvir, koji je referentno fiksiran sa pozicijom centra zemlje, kao za **z** osu kroz severni pol, **x** osu kroz Griničov meridijan, i **y** osa da završi koordinatni sistem, po pravilu „desnorukog okvira“.

Referentni centar se poklapa sa centrom Zemlje. Tada Zemlja predstavlja fiksni okvir (engl. *earth-centered, earth-fixed*), te se koristi skraćenica ECEF. Transformacijom ECEF, okvir NED definiše geografsku širinu i dužinu.

Sistem jednačina, koji definiše navigaciju, sadrži rezultate merenja linearnih i ugaonih vrednosti inercije iz senzora letelice, u odnosu na inercijalni okvir. Odnosno, izračunava konačno stanje i poziciju u referentnom okviru NED, u odnosu na centar Zemlje. Gde je: \mathbf{f} specifična sila, $\boldsymbol{\omega}$ je ugaona brzina, \mathbf{a} je ubrzanje, \mathbf{R} je pozicija, $\dot{\mathbf{R}}$ i \mathbf{V} su brzine, $\boldsymbol{\Omega}$ je ugaona brzina zemlje, $\boldsymbol{\xi}$ je ubrzanje usled gravitacije, Φ , λ i \mathbf{H} su NED parametri lokacije. Indeksi \mathbf{E} , \mathbf{I} i \mathbf{B} predstavljaju promenljive u odnosu na centar Zemlje, inercijalno ili referentno telo, u nizu, a \mathbf{C} je transformacija u referentnom okviru.

Žiroskopi i akcelerometri brzo mere ugaonu brzinu i linearno ubrzanje tela, u odnosu na inercijalni okvir. Integrisanjem ugaone brzine, za letelicu, dobijene sa transformacijom $\mathbf{C}_{I}^{\mathbf{B}}$. Inverzija ove transformacije se koristi za specifičnu silu rotiranja koordinata. Ponovo dodavanje gravitacije daje ubrzanje tela u odnosu na prostor. Integralni deo ovog pojma je vreme, to jest brzina promene položaja u odnosu na vektor prostora. (Ovo nije za navigaciju brzina. Definisana brzina za navigaciju, u odnosu na koordinatni okvir, kada je isti fiksiran za zemlju. To je „zemaljska navigacija“).

Korekcija ovog pojma za rotacione efekte za dobijanje ECEF brzine, data je principijelno prikazano na slici. Drugi integral ubrzanja daje poziciju vektora u koordinatama. Rotirajući ovaj vektor inercijalnog položaja za ECEF transformacije C_I^E , koje se dobiju integracijom vrednosti za zemlju. Ostatak navigacione solucije ide da se, ECEF pozicija vektora pretvara u geografsku širinu, dužinu i visinu. Oni se koriste za matricu transformacije, između ECEF i okvira inercije za NED, C_E^N . Tada se transformacije C_I^B , C_I^E i C_E^N kombinuju, za formiranje NED parametara za telo, preko transformacije C_N^B .



Sl. Rotirajući sferni zemljin navigator

Greške

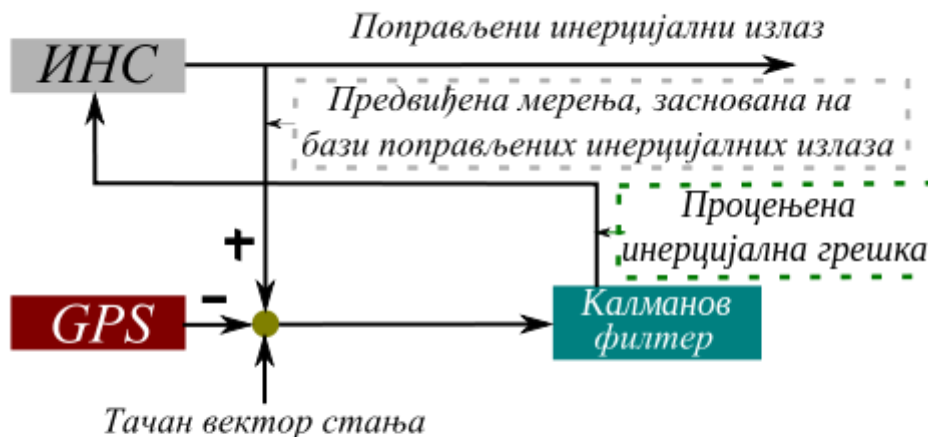
Svi inercijalni navigacioni sistemi skloni su unošenju odstupanja, od tačnih rezultata. Male greške u merenju ubrzanja i ugaone brzine, integrišu se u progresivno uvećavanje greške parametara navigacije. Primenjeni princip određivanja novog položaja, u odnosu na prethodni, računato u koracima merenja i sa proračunima na osnovu trenutno pristiglog signala o translatorskom ubrzanju i ugaonoj brzini, u odnosu na sve tri ose koordinatnog sistema, stalno dodaje sistemsku grešku u konačan rezultat. Greške se uvećavaju kumulativno, u odnosu na početno stanje, po istoj stopi, kao kao što se obnavlja proces merenja i proračuna. Zbog ove karakteristike neophodno je prikazani položaj povremeno korigovati, sa referentnim podatkom sa nekog drugog sistema navigacije.

Odstupanje od tačnog položaja objekta, sa navigacijom sa INS-om, u rezultujućem iznosu, je prosečno manje u pređenom putu od 1,1 km, a u promeni pravca, desetak stepeni, za sat rada sistema. Shodno tome, inercijalni navigacioni sistem, obično se koristi u kombinaciji sa drugim nekim sistemom, obezbeđujući viši stepen tačnosti nego što je to moguće uz korišćenje bilo kog samostalno. Na primer, ako je, u terenskoj upotrebi, inercijalno praćena brzina, povremeno ažurirana na nulu, sa zaustavljanjem objekta kretanja (na tlu), pozicija će ostati precizna za duže vreme. Često se koristi ta takozvana nulta brzina ažuriranja.

Teorija opšte kontrole, posebno Kalmanovo filtriranje, obezbeđuje teorijski okvir za kombinovanje informacija od strane senzora raznih vrsta. Jedan od najčešćih alternativnih senzora je satelitski navigacioni radio kao što je GPS. Pravilnim kombinovanjem informacije iz INS-a i GPS, dobijen je sistem GPS / INS, sa kojim se stabilizuje pojava grešaka u položaju lokacije i u brzini objekta kretanja. Osim toga, INS se može koristiti kao kratkoročno sredstvo, dok su nedostupni GPS signali, na primer kada vozilo prolazi kroz tunel.

Kalmanov filter (KF), veoma je djelotvorni stohastički procenjivač (sudija) u navigaciji. On je optimalna kombinacija, u smislu minimizacije varijacija odstupanja, između vrednosti prethodnih parametara i trenutnih stvarnih. On je izuzetno efikasan i svestran u proceduri ujedinjenja „bučnih“ signala senzora, za procenu stanja sistema sa neizvesnom dinamikom. U „bučne“ izlaze (signale) senzora uključuju se i izlazi iz GPS i INS. U stanje sistema može da se uključi položaj, brzina i dinamika vazduhoplova. Neizvesna dinamika uključuje i nepredvidive poremećaje parametara senzorskih signala ili poremećaje izazvane od pilota ili spoljnih poremećaja (kao što je udar vetra).

Kalmanov filter, koristi se za procenu greške uvedene u sistem zbog grešaka žiroskopa i akcelometra. Ove greške su u formi vektora stanja x_k , a izmerene vrednosti vektora stanja sa GPS oblika z . Greške, uz pomoć GPS sistema u petlji regulacije „sprega-unapred“, sa uključenim Kalmanovim filterom u njoj, teže nultim vrednostima (vidi sliku ispod).^{1,2}



ИНС са спрегом унапред, са GPS и Калмановим филтером.

Reference

1. Inercijalna navigacija, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
2. Inercijalni navigacioni sistem, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
3. MEMS tehnologija, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
4. MEMS inercijalni navigacioni sistem, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
5. Verner fon Braun (1912—1977), Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
6. Uvod u matematiku i metode astrodinamike, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
7. Publikacija NASA, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
8. Mornarička istorija, Pristupljeno 30. 11. 2011.g.
9. MacKenzie 1993, strane 22
10. Navigacija za Apolo, Pristupljeno 6. 12. 2011.g.
11. Osnove inercijalne navigacije, Pristupljeno 6. 12. 2011.g.

Literatura

- MacKenzie, Donald A. (1993). *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*. MIT Press. strp. 22-. ISBN 978-0-262-63147-1.
- Space guidance evolution
- A.D. King (1998). „Inertial Navigation – Forty Years of Evolution“. *GEC Review* (General Electric Company plc) **13** (3): 140-149.
- Cuesta, Jorge García de la (2003). *Aviation Terminology: Terminología Aeronáutica: English-Spanish, Spanish-English Aeronautical Dictionary = Diccionario Aeronáutico Inglés-Español, Español-Inglés*. Ediciones Díaz de Santos. ISBN 978-84-7978-579-6.
- Minijaturni GPS pomognut sa inercijalnim navigacionim sistemom
- Jeftine inercijalni navigacioni sistem
- Inercijalni sistem- T. Ninkov, V. Bulatović