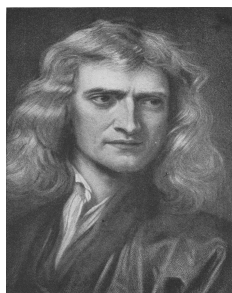


INERCIJALNI SUSTAVI



Povijest inercijalnih sustava seže od početka prošlog stoljeća. Prvi inercijalni instrumenti pojavili su se još davne 1900. godine. Bili su to žiroskopi ugrađeni u automobile i prvi Sparryjevi (airborn) žiroskopi.

Korjene inercijalne navigacije nalazimo 20-ih godina prošlog stoljeća u Njemačkoj u razvoju sustava navođenja balističkih projektila. Prvi inercijalni navigacijski sustav (INS) za letjelice konstruirao je Charles S. Draper s Massachusetts Institute of Technology 1950. godine. U istom desetljeću u SAD-u počinje razvoj bespilotnih letjelica/raketa. Jedan od takvih projekata bio je NAVAHO sa ciljem nošenja atomskih bojnih glava na udaljenostima većim od 5.500 milja te pogađanjem cilja u krugu radijusa 500m. Od tada se INS ugrađuje u avione, brodove, vlakove, automobile, i dr. Danas se inercijalni instrumenti koriste kao izvor podataka za poziciju, brzinu i smjer civilnih i vojnih vozila, ali i u druge više komercijalne svrhe kao što je npr. izrada animiranih filmova te različite kompjuterske simulacije. U mnogim slučajevima inercijalni sustavi integrirani su s drugim navigacijskim sustavima kao što je GPS (Global Positioning System), gdje jedan



sustav nadopunjuje nedostatke onog drugog, i obrnuto. Važnost inercijalnih navigacijskih sustava u geodeziji je u tome što nam oni pomažu u pridruživanju prostorne komponente podacima unutar neke baze podataka, te nam služi za navigaciju, odnosno, usmjeravanje mjernih instrumenata tamo gdje geodetski instrumenti, kao što je npr. GPS, ne funkcioniraju (u tunelima, pri prekidima signala, i dr.). Osim što pomažu pri navođenju, inercijalni instrumenti su svojevrsna kontrola GPS-u, jer za kratke destinacije daju visokotočne podatke. Za razliku od te lokalne točnosti koju posjeduju inercijalni instrumenti, GPS ima globalnu točnost.

Inercijalni sustavi sastavljeni su primarno od uređaja koji nam, na ovaj ili onaj način, pomažu pri prikupljanju prostornih podataka i pridruživanju prostornog opisa

nekom mjerenju, a takvu skupinu uređaja nazivamo sensorima. Pri tome, svakom senzoru mora biti definirana ostvariva točnost, primjena, referentni sustav i način na koji će se taj sustav prilagoditi ili uklopiti u okruženje, mjerni sustav u koji je možda integriran i konačno u nekakav prostorni informacijski sustav. Svođenje prostornih podataka prikupljenih sensorima na jedinstven referentni sustav, definiranje baza prostorno vezanih podataka i GIS-a te integracija različitih sustava u jedinstvene funkcionalne cjeline danas predstavlja osnovni preduvjet u gospodarenju prostornim podacima i planiranju razvoja.

U svrhu izrade što kvalitetnijeg prostornog informacijskog sustava pomažu nam i drugi senzori kao što su npr. geodetski instrumenti, bilo terestrički, fotogrametrijski ili satelitski, zatim hidrografski, meteorološki, geološki uređaji, različite CCD (Charge Coupled Device) i video kamere i dr. Međutim, ono što odvaja te sustave od inercijalnih senzora jest ono što ih definira, a to je prisutnost inercije i Newtonovih aksioma.

Klasična definicija kaže da su inercijalni sustavi oni sustavi u kojima vrijede Newton-ovi aksiomi. Pri tome je potrebno objasniti pojmove inercije i Newton-ovih aksioma.

Inercija je, u fizici, definirana kao svojstvo tijela da zadrži stanje mirovanja ili da se jednoliko giba sve dok na njega ne djeluje neka vanjska sila. Kao takva, inercija je dakle svojstvena svakoj stvari ili tijelu. Iako je pojava inercije bila poznata još i davnim filozofima i umovima kao što je Aristotel, inercijom se prvotno pozabavio Galileo, ali je u potpunosti definirao Isaac Newton, engleski fizičar, matematičar, astronom, filozof i kemičar, u djelu *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687.) i to svojim prvim zakonom ili aksiomom poznatim još kao i zakon inercije.

Drugi Newton-ov zakon ide dalje i kaže kako je ta vanjska sila koja djeluje na tijelo proporcionalna ubrzanju. Konstanta proporcionalnosti je poznata kao masa tijela, koja je zapravo numerička vrijednost inercije; što je masa tijela veća, to je akceleracija ili ubrzanje manje. U trećem aksiomu Newton kaže da svakoj sili akcije odgovara jednakovrijedna, ali suprotna po smjeru, sila reakcije.

SENZORI

Senzori nam omogućuju permanentno zbrajanje malih promjena koordinata u bilo kojem smjeru, ovisno o vrsti senzora. Parametri gibanja pri tome mogu biti brzina, smjer, ubrzanje, nagib, rotacija ili promjena visine. Pri tome je važno naglasiti da senzori kao samostalni uređaji ne posjeduju početni položaj (početne koordinate), pa je to i jedan od

osnovnih razloga integracije ovih, možemo reći, lokalnih sustava sa globalnim kao što je to GPS. Međutim, kao glavnu prednost senzora moramo naglasiti autonomnost i izrazito visoku točnost u malim vremenskim periodima, pa tako mogu poslužiti kao kontrola za sustave poput GPS-a. Mana ovih sustava je upravo ta da traže početne koordinate te da daju samo određene podatke gibanja i zadovoljavajuću točnost na kratkim intervalima, dok pri dugotrajnom mjerenju na rezultat utječu različiti vanjski utjecaji koji u znatnoj mjeri i naglo umanjuju pouzdanost mjerenja senzora.

U geodeziji i geomatici dva su najučestalija inercijalna senzora: akcelerometri i žiroskopi. Oni se često integriraju u sustave akcelerometra odnosno sustave žiroskopa i to na način da se postave u tri osi koje omogućuju dobivanje podataka (koordinata) u tri smjera proizvoljnog koordinatnog sustava. Na taj način omogućena je i transformacija koordinata u jedinstven koordinatni sustav ukoliko se radi o integriranim sustavima, ili jednostavna transformacija iz proizvoljnog, lokalnog sustava u globalni sustav. Ovi su senzori našli svoju primjenu ne samo u geomatici nego i u zračnom, morskom i kopnenom prometu, gdje su se zapravo i primarno počeli upotrebljavati.

Isto tako je i kompas našao svoju primjenu u geodeziji, a i u ostalim područjima znanosti i javnog života, kao jedan od danas najjednostavnijih i najprimitivnijih uređaja za opće orijentiranje u prostoru. Često se jedan takav uređaj kombinira sa žiroskopom u nešto što se zove žirokompas (eng. gyrocompass). To je zapravo kompas s motoriziranim žiroskopom pri čemu žiroskop služi za kompenziranje utjecaja kutnog momenta rotacije Zemlje na određivanje smjera sjevera. Ovakvi uređaji koriste se uglavnom na brodovima i zrakoplovima.

Barometri i altimetri koristili su se prije kao primitivni instrumenti koji su nam davali podatke o visinskoj razlici. Međutim, zbog svoje jednostavnosti i primitivnosti danas se koriste samo onda kad nam visoka točnost nije zahtjevana. Upravo zbog te jednostavnosti praktičan su uređaj za brzo dobivanje takvih informacija, koje vjerojatno poslužuju samo kao orijentir i onda kada nam točnost zaista nije presudna. Isto se može kazati za libele, iako su one u geodeziji dugo godina (pa čak i danas) predstavljale veoma precizan instrument za korigiranje i očitavanje nagiba.

Brzinomjeri, odometri i tahometri nemaju direktnu primjenu u geomatici; oni se zapravo najviše koriste u prometnim znanostima i integrirani su u vozila kako bi dali podatke o brzini, odnosno prijeđenom putu. Međutim kako je danas sve u službi dobivanja što bolje i kvalitetnije baze prostornih podataka odnosno GIS-a, sve više se i ovakvi sustavi implementiraju kao mjerne jedinice za dobivanje visoko vrijednih prostornih podataka, koji će konačno poslužiti za

bolje, kvalitetnije i svrsishodnije gospodarenje prostorom i resursima.

Inercijalni koordinatni sustavi definirani su kao sustavi u kojima vrijede Newtonovi zakoni. U takvom sustavu inercija je homogena i izotropna, gdje homogenost implicira da se svako materijalno tijelo, oslobođeno vanjskih utjecaja, giba konstantnom brzinom po pravcu. Izotropnost je opisana kao svojsvo jednakomjernosti u svim smjerovima. U našem svijetu inercijalni sustavi su apstrakcija budući da zbog gravitacijskih utjecaja Zemlje, Sunca i Mjeseca nikako ne može biti zadovoljen zahtjev homogenosti, odnosno, na tijelo uvijek djeluje sila, koja to tijelo ubrzava.

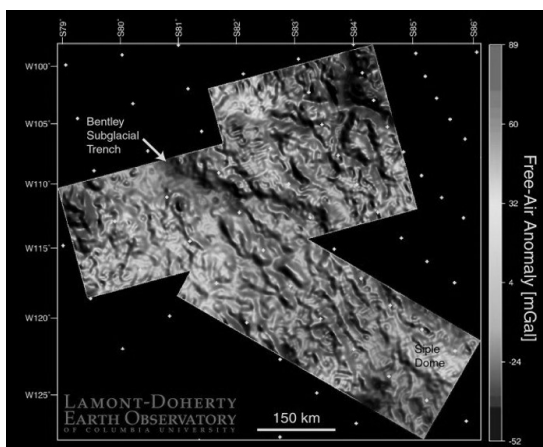
Transformacija jednog koordinatnog sustava u drugi podrazumijeva tri vrste promjena: translacija, rotacija i promjena mjerila. Kada govorimo o transformacijama među inercijalnim koordinatnim sustavima, možemo općenito reći da je ta transformacija slična transformacijama između neka druga dva koordinatna sustava. Potrebno je dakle definirati oba sustava te uspostaviti matematički odnos između njih. Tada sa jednostavnim transformacijskim formulama možemo izraziti bilo koju točku jednog sustava u drugom sustavu.

Međutim, kod inercijalnih sustava moramo se ipak osvrnuti na njegove specifičnosti, kao što su Galileove i Lorentzove transformacije, odnosno, prisutnost gibanja jednog sustava u odnosu na drugi.

INERCIJALNI NAVIGACIJSKI SUSTAV

Svaki se inercijalni navigacijski sustav sastoji od senzora koje nazivamo inercijalnim mjernim uređajima (IMU - Inertial Measurement Units). Gibanja koja promatramo u navigaciji jesu translacijska i rotacijska pa prema tome koristimo dvije vrste inercijalnih mjernih uređaja, akcelerometre i žiroskope. Uređaje integriramo na platforme, koji zajedno sa ostalim uređajima (mikroprocesor) potrebnim za izračunavanje koordinatnih razlika između dvije točke, tvore inercijalne navigacijske sustave. Akcelerometri prvenstveno služe za mjerenje linearnih akceleracija, pomoću kojih kasnije, računskim putem, dolazimo do prijeđenog puta. Žiroskopi služe za mjerenje kutnih pomaka, pomoću kojih stabiliziramo sustav (koordinatne osi) bilo mehanički ili analitički. Za mjerenje kutnih pomaka moguće je koristiti i kutne akcelerometre, ali su se žiroskopi pokazali boljim izborom za potrebe navigacije.

Prvi inercijski navigacijski sustavi razvijaju početkom 20 st. za vojne svrhe u Njemačkoj. U II. svjetskom ratu sustavi su se razvili u tolikoj mjeri da su se počeli koristiti za skoro sve segmente navigacije. Veliki



doprinos inercijalnim sustavima na području zračne navigacije dao je Charles Draper, koji je 50-ih godina razvijao sustave na MIT-u (Massachusetts Institute of Technology). Kako se žiroskopi kroz 60-te i 70-te godine poboljšavaju, i razvijaju se sve brža računala, inercijalni sustavi se brzo šire na komercijalnu i vojnu zračnu navigaciju, uključujući navođenje delekometnih projektila i svemirsku navigaciju.

Iako su danas primarnu ulogu u navigaciji preuzeli satelitski navigacijski sustavi, inercijalnim sustavima i dalje pripada nezamjenjiva uloga u mnogim područjima navigacije. Također INS uspješno nadopunjuju satelitsku i radio navigaciju pa tako omogućuju neprekidno praćenje vozila uzrokovano smetnjom signala, što je vrlo važno kod navigacije (slijetanje aviona).

Konstrukcija samih inercijalnih navigacijskih uređaja moguća je na dva načina, pomoću stabiliziranih ili pričvršćenih sustava (strapdown systems). Ovisno o navigacijskom okviru, sustave je moguće stabilizirati u odnosu na inercijalni prostor ili na lokalno tako da se platforma uvijek održava horizontalno u prostoru. Stabilizirani inercijalni sustavi su dugo vremena dominirali u području inercijalne navigacije, najviše zbog konstrukcije samih senzora koji su radili na mehaničkom principu (mehanički žiroskopi). Razvojem računala i analitičkih senzora pričvršćeni sustavi postižu sve bolje rezultate, te se u novije vrijeme počinju sve više koristiti. Iako se platforme donekle same stabiliziraju na osnovu inercije stabilnog elementa u prstenovima, servo motorima se dodatno postiže stabilizacija platformi.

Kao što i samo ime kaže, kod pričvršćenih sustava, akcelerometri i žiroskopi su nalaze na platformi koja je pričvršćena za vozilo te slijede sva gibanja vozila. Najčešće se između vozila i platformi postavljaju posebni nosači radi ublaživanja vibracija i udaraca koje stvara vozilo. U ove sustave ugrađuju se optički žiroskopi koji prate kutna gibanja vozila te se mjerenja akcelerometara analitički transformiraju iz okvira sustava u navigacijski okvir. Kod ovih sustava navigacijske jednadžbe je moguće riješiti u proizvoljno određenom okviru, ali se većinom određuju rješenja u inercijalnom i lokalnom okviru. Performanse ovakvih uređaja su umanjene time jer su senzori, za razliku kod stabiliziranih platformi, izloženi velikoj dinamici gibanja vozila.

PRIMJENA IS-a

Inercijalni sustavi, posebice INS našao je široku primjenu i u geodeziji. Zapravo, možemo kazati da je na neki način INS pravi geodetski instrument. Naime, kako je geodezija znanost koja se između ostalog bavi i izmjerom i kartiranjem Zemljine površine, gdje je određivanje koordinata primarna djelatnost, to isto možemo kazati i za INS, koji također računa koordinate vozila o nekoj trajektoriji. Čak je i prvotna motivacija za korištenje žiroskopa u određivanju referentnog smjera u pomorskoj navigaciji, bila geodetske prirode. Ipak, ono što izdvaja inercijalne sustave iz grupe geodetskih instrumenata je njihova loša točnost na većim udaljenostima. Unatoč tome, INS posjeduje neke kvalitete koje su bile presudne da ti sustavi budu toliko često primjenjivani u geodetske svrhe. Te su se kvalitete iskazale tek integracijom s drugim geodetskim sensorima te se na taj način omogućilo dobivanje novih podataka, koje nije bilo moguće dobiti klasičnim geodetskim instrumentarijem, te poboljšanje kvalitete izmjerenih podataka. Kod integracije senzora vrlo je važno, uz tehničko rješavanje integracije, odrediti zajednički koordinatni sustav u kojem će se kasnije provesti računanje.

Danas su inercijalni sustavi neizostavno pomoćno sredstvo daljinskih istraživanja. Koristimo ih u avionima kod aerofotogrametrije, za računanje pomaka i deformacija građevina (zgrada, mostova,...), moving-base gravimetriji itd.

Osim u geodeziji, inercijalni sustavi koriste se, kako je već kazano, u mnogim drugim sferama znanosti i javnog života, počevši od prometnih znanosti, gdje se takvi sustavi ugrađuju u vozila radi praćenja (tracking). Danas su takvi sustavi neizostavni u praćenju velikih transportnih kamiona-prikolica, ili u velikim lukama za praćenje položaja kontejnera. Osim toga, danas je stvar prestiža imati jedan takav sustav u automobilu, iako to rapidno vodi većem sustavu nadzora na cestama.

Inercijalni sustavi prisutni su danas sve više, iako još uvijek u jednoj eksperimentalnoj fazi, i u medicini i to kada se radi o robotizaciji operacijskih instrumenata.

Osim u znanstvene svrhe, inercijalni sustavi našli su zaista zanimljivu primjenu i u industriji animiranih filmova, gdje se pomoću tzv. senzora za biomehaniku mogu bilježiti direktno na računalu pokreti čovjeka te kasnije obradom dobiti pokrete nekog lika iz animiranog filma.



Ana Karabatić