

IMU ilmakuvauksessa

2005

Jani Pötrönen

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	2
2	IMU	2
2.1	Sagnac-ilmiö.....	4
2.2	Gyroskooppi	5
2.3	Kiihtyvyyssanturi.....	5
3	Käyttö ilmakuvauksessa	5
3.1	Ilmakolmiointi	6
3.2	GPS/IMU-tuettu ilmakolmiointi.....	6
3.3	Suora georeferointi	6
4	Laitteistoja	7
4.1	Applanix POS/AV™	8
5	Yhteenveto.....	9
	Lähdeluettelo	10

1 Johdanto

”Perinteisesti ulkoiset orientoinnit on määritetty välillisesti ilmakolmioinnilla.

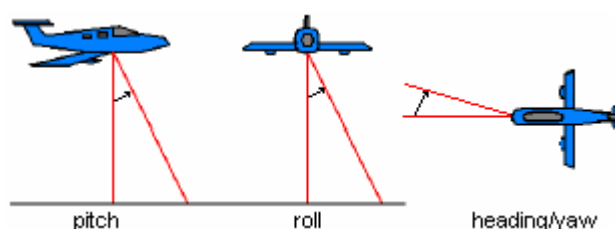
Satelliittipaikannuksen ja inertiaalimittauksen yhdistäminen (GPS/IMU) sallivat myös suoran ulkoisten orientointien määrittämisen ja tätä kautta suoran georeferoinnin” (Honkavaara, 2003).

Suorapaikannusjärjestelmässä kameran sijainti ja orientointi kohdekoordinaatistossa määritetään GPS/IMU/kamera-systeemin avulla.

Ilmakuvauksessa IMU:n (Inertial Measurement Unit) avulla määritetään kameran orientointi kohdekoordinaatistossa. Samaan tekniikkaan perustuvilla laitteilla määritetään esimerkiksi merenmittauksessa aluksen asento, koska veden syvyyttä mittaava luotain on asennettu kiinteästi merenmittausaluksen runkoon. Nykyään monet uudet digitaaliset sensorit on suunniteltu huomioiden suoran georeferoinnin vaatimukset, esimerkiksi Leican ADS40-kamerassa IMU on kiinteä osa sensoria (Honkavaara, 2003).

2 IMU

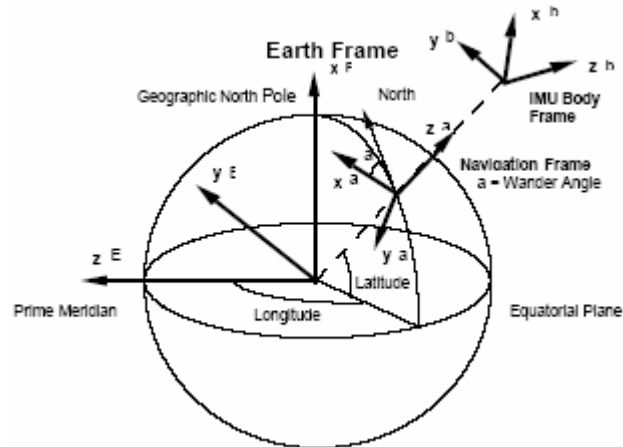
Ilmakuvauksessa IMU:a käytetään havaitsemaan kameran kiihtyvyyksiä, kallistuskulmia poikittais- (pitch) ja pituusakselin (roll) ympäri sekä kiertokulmaa pysty akselin ympäri (heading/yaw) (kuva 1). Kiertokulmaa pysty akselin ympäri suhteessa maantieteelliseen pohjoiseen kutsutaan tosisuunnaksi. Tosisuunnan havaitseminen IMU:n avulla perustuu kiihtyvyyssantureiden havaintoihin putoamiskiihtyvyyden suunnasta ja GPS:stä saatuun latitudi-havaintoon. Täten saadaan IMU:n orientointi suhteessa maantieteelliseen pohjoiseen (Navigation Frame kuvassa 2).



Kuva 1. Pitch, roll ja heading/yaw

IMU koostuu kolmesta kiihtyvyyssanturista ja kolmesta gyroskoopista, digitointipiiristä sekä signaalinkäsittelyn ja lämpötila kompensaaion hoitavasta keskusyksiköstä. Havainnot

toimitetaan navigaatiojärjestelmän keskusyksikölle tyypillisesti 200-1000Hz nopeudella. Keskusyksikkö integroi ns. strapdown inertiaalinavigaattorissa havaitut kiihtyvyydet ja kulmanopeudet, jonka tuloksena saadaan IMU:n sijainti, kiihtyvyys ja orientointi suhteessa kohdekoordinaatistoon (Navigation Frame kuvassa 2). (Hutton & Mostafa, 2001).



Kuva 2. Inertiaalinavigoinnin vertausjärjestelmät (Hutton & Mostafa, 2001)

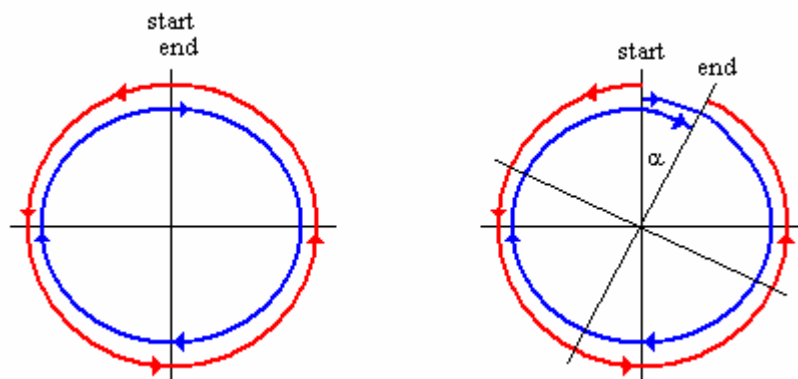
Asentamalla IMU mahdollisimman lähelle itse kameraa (projektiokeskus) saadaan siitä suoraan kameran sijainti ja orientointi, jolloin vähennetään virhelähteitä itse georeferoinnin tuloksissa. Tämän mahdollistamiseksi IMU:n täytyy olla mahdollisimman pieni ja kevyt. Käytännössä IMU:a ei koskaan saada itse kameran projektiokeskukseen. Kulmaeroja kameran ja IMU:n akselistojen välillä kuvaa ns. boresight parametrit, jotka määritetään suorapaikannusjärjestelmän lennonaikaisessa kalibroinnissa.

Gyroskooppi mittaa kiertonopeutta oman akselinsa ympäri, havainnoista integroimalla saadaan kiertokulma akselin ympäri. Tyypillisen korkeatasoisen IMU:n gyroskoopit ovat kuituoptisia (FOG), rengaslaser (RLG) tai dynamically tuned -tyyppisiä (DTG). Uusista gyroskooppi tyypeistä MEMS (MicroElectroMechanical Systems) gyroskooppeja alkaa olla saatavilla, mutta kestää vielä muutaman vuoden ennen kuin ne saavuttavat suoran georeferoinnin vaatiman tason. Suoraan georeferointiin käytettävän IMU:n gyroskoopeilta vaaditaan pientä kokoa, luotettavuutta (bias drift) ja häiriöttömyyttä. Rengaslaser gyroskoopeiden ongelma on koko, DTG gyroskoopissa on pienimmät häiriöt kokoonsa nähden. Viimeisimmät signaalinkäsittelyn innovaatiot ovat tuoneet kuituoptiset gyroskoopit suoran georeferoinnin vaatimalle tarkkuustasolle. (Hutton & Mostafa, 2001).

2.1 Sagnac-ilmio

Sagnac-ilmio on suhteellisuusteorian mukainen fysikaalinen ilmiö. Sen ymmärtäminen vaatii laajaa suhteellisuusteorian tietämystä. (Arditty et al., 2000). Ilmiön periaate voidaan kuitenkin kuvata yksinkertaistetusti.

Kuvitellaan vyyhti valokuitua. Kuten hyvin tiedetään, valo etenee hyvin valokuidussa. Vyyhdellä on periaatteessa kaksi uloskäyntiä, yksi kuidun molemmissa päissä. Syötettäessä valopulssi toiseen päähän valokuitua se tulee ulos toisesta päästä tarkalleen sen ajan kuluttua kuin valolta kestää matkustaa koko kuituvyyhden läpi. Syötettäessä kaksi erillistä valopulssia yhtä aikaa vyyhden molemmista päistä ne kulkevat vastakkaisiin suuntiin, kohtaavat puolessa välissä vyyhteä ja tulevat ulos eri päistä. Valon kulku aika vyyhdessä ei riipu suunnasta ja täten kaksi pulssia tulee ulos yhtä aikaa vyyhden eri päistä. Kuvitellaan vyyhden pyörivän pääkselinsa ympäri, tämä liike ”helpottaa” toista valopulssia ja ”pidättelee” toista (kuva 3). Tämä voidaan nähdä siitä, että kaksi samaan aikaan liikkeelle lähetettyä pulssia poistuu vyyhden päistä eri aikaan. Mittaamalla tämä ajallinen ero voidaan johtaa vyyhden pyörimisnopeus. (Arditty et al., 2000).



Kuva 3. Valokuituvyyhden pyöriminen

Käytännössä ajallinen ero määritetään optiikassa käyttäen interferometriä, joka tarjoaa mahdollisuuden mitata vaihe-ero kahden eri suuntiin vyyhdessä matkustavan valopulssin välillä. Kuituoptisen gyroskoopin tapauksessa interferometri luodaan sulkemalla vyyhti käyttämällä integroitua optista piiriä. Mahdollisen kiertoliikkeen sisältävän, optisessa muodossa olevan informaation muuntaminen digitaaliseen, laskentaan sopivaan muotoon vaatii suuren määrän optoelektronisia komponentteja. (Arditty et al., 2000).

Perusteellisempi selvitys kuituoptisen gyroskoopin rakenteesta ja toiminnasta löytyy tietolähteestä Arditty et al. (2000) ja sen viitteistä.

2.2 Gyroskooppi

DTG gyroskooppi on klassinen pyörivä massa -tekniikkaan perustuva gyroskooppi, joka on suunniteltu minimoiden mekaaniset rajoitteet (constraints) tilanteessa jossa pyörimisnopeus saavuttaa tietyn tason (Silicon Sensing Systems, 2005). Kuituoptisen ja rengaslaser gyroskoopin toimintaperiaate on hyvin samanlainen, valopulssi kulkee kuituoptisessa gyroskoopissa valokuituvyyhdin läpi ja rengaslaser gyroskoopissa peilien heijastamana gyroskoopin akselin ympäri. Pyörähdysliike akselin ympäri aiheuttaa muutoksen valopulssin kulkunopeudessa, josta kulmanopeus voidaan mitata

Kuituoptinen gyroskooppi on viimeaikainen teknologia, joka on kehitetty vastaamaan ilmailuteollisuuden vaatimuksia. Siinä ei ole lainkaan liikkuvia osia eikä se tarvitse ylläpitoa tai uudelleen kalibrointia. Kuituoptinen gyroskooppi on kykeneväinen toimimaan hyvin laajalla dynaamisella alueella ja se kestää erittäin vaativia mekaanisia olosuhteita suorituskyvyn kärsimättä. (IXSea SAS, 2001). Gyroskoopin akselin ympäri tapahtuvan kiertoliikkeen havaitseminen perustuu valon interferenssiin, Sagnac-ilmio.

2.3 Kiihtyvyyssanturi

Kolme kiihtyvyyssanturia on asennettu kaikkien kolmen IMU:n akselin suuntaisesti ja niiden avulla saadaan selville sekä putoamiskiihtyvyyden suunta että IMU:n kiihtyvyydet. Korkeatasoisen IMU:n kiihtyvyyssanturit ovat tyypillisesti force rebalance -tyyppiä.

3 Käyttö ilmakuvauksessa

Kappale perustuu pääosin lähteisiin Cramer & Stallmann (2001) ja Haggrén & Honkavaara (2004).

Suorapaikannusjärjestelmää käytetään nykyään ilmakuvauksessa useimmiten perinteisen ilmakolmioinnin tukena, jolloin puhutaan GPS/IMU-tuetusta ilmakolmioinnista.

Satelliittipaikannuksen ja inertiaalinavigoinnin yhdistäminen mahdollistaa myös suoran georeferoinnin ilman maastoon merkittäviä kiintopisteitä.

3.1 Ilmakolmiointi

Perinteisessä ilmakolmioinnissa (välillinen/epäsuora sensoriorientointi) orientoinnit lasketaan välillisesti kolmiointipisteiden kuvahavainnoista. Kolmiointipisteitä ovat kuvien väliset liitospisteet sekä kuvien ja maaston väliset lähtöpisteet. Kolmiointi lasketaan blokkitasoitukseksi, jossa havaintoina ovat siis liitospisteiden kuvakoordinaatit, maastotukipisteiden kuva- ja maastokoordinaatit.

3.2 GPS/IMU-tuettu ilmakolmiointi

GPS/IMU-tuettu ilmakolmiointi (integroitu sensoriorientointi) on vartenotettava menetelmä orientointien määrittämiseen. Menetelmä perustuu blokkitasoitukseen, jossa liitospisteiden lisäksi havaintoina ovat GPS/IMU-orientoinnit sekä mahdolliset maastotukipisteet. Tuntemattomia ovat kuvien ulkoiset orientoinnit ja maastopisteet sekä tarvittaessa myös kuvien sisäiset orientoinnit ja laajennetun kuvautumismallin parametrit.

GPS/IMU-tuetuissa blokeissa kuvien projektiokeskukset voidaan määrittää 5-10 cm:n tarkkuudella. Tarkkuus saavutetaan vasta blokkitasoituksen myötä, koska se perustuu GPS-havaintojen sisäiseen tarkkuuteen. Ulkoisen orientoinnin määrittystarkkuus ei riipu kuvauskorkeudesta eikä kuvamittakaavasta. Maastotukipisteitä käyttämällä saavutetaan paras luotettavuus, jo yhdelläkin maastotukipisteellä on suuri merkitys.

Tuetussa ilmakolmioinnissa maastoon merkittävien kiinto- eli runkopisteiden tarvittava määrä on oleellisesti pienempi kuin perinteisessä ilmakolmioinnissa. Tuettu ilmakolmiointi tuottaa tarkkuudeltaan erittäin homogeenisia blokkeja eikä tarkkuus riipu blokin koosta. Samaan tarkkuuteen päästään perinteisellä ilmakolmioinnilla ainoastaan lähtöpisteiltään hyvin tiheissä blokeissa.

Integroitu sensoriorientointi on merkittävästi suoraa georeferointia tarkempaa ja luotettavampaa. Blokkitasoituksen myötä y-parallaksit minimoituvat, mikä helpottaa stereotulkintaa.

3.3 Suora georeferointi

Suora sensoriorientointi mahdollistaa nopean ja joustavan tiedonkeruun ja prosessoinnin. Perinteisten ilmakuvien ja perinteisen kartoituksen tapauksessa suora sensoriorientointi on

vaihtoehto, jonka kustannustehokkuutta arvioidaan paraikaa. On selvää, että GPS/IMU-havaintojen optimaalinen hyödyntäminen tehostaa radikaalisti perinteisten ilmakuvien prosessointia. Käytännön kokemusten perusteella suoran georeferoinnin tarkkuus on riittävä ortokuvatuotantoon. Suoraan georeferoiduilla stereomalleilla sen sijaan ilmenee haitallisen suuria parallakseja (15-20 μm). GPS/IMU tulee pian olemaan standardi osa myös perinteisillä ilmakuvilla tehtävää kartoitusta. Luotettavuussyistä ilmakolmiointia tullaan kuitenkin käyttämään jossakin muodossa suoran sensoriorientoinnin ohessa tarkkuutta vaativissa sovellutuksissa.

Suoran georeferoinnin ongelma on luotettavuus. Käytännön kokeet ovat osoittaneet, että GPS/IMU-ratkaisun tarkkuus on ennen kaikkea riippuvainen GPS:n tarkkuudesta. GPS:n potentiaalisia ongelmia ovat mm. vaihekatkokset, kokonaislukutuntemattomien ratkaisu, monitieheijastukset ja ilmakehä. Suora georeferointi on ekstrapolointia ja edellytys on, että kuvautumisen matemaattinen malli ja sen suureet tunnetaan tarkasti. Mahdolliset virheet siirtyvät suoraan määritettyihin maastokoordinaatteihin. Ulkoisen orientoinnin epäluotettavuuden lisäksi mahdollisia ongelmakohtia ovat mm. kamerakalibrointi, GPS/IMU-systeemin kalibrointi ja erilaiset kuvautumiseen vaikuttavat fysikaaliset ilmiöt. Perinteinen blokkitasoitus on tarjonnut keinot näiden ongelmien torjumiseksi.

4 Laitteistoja

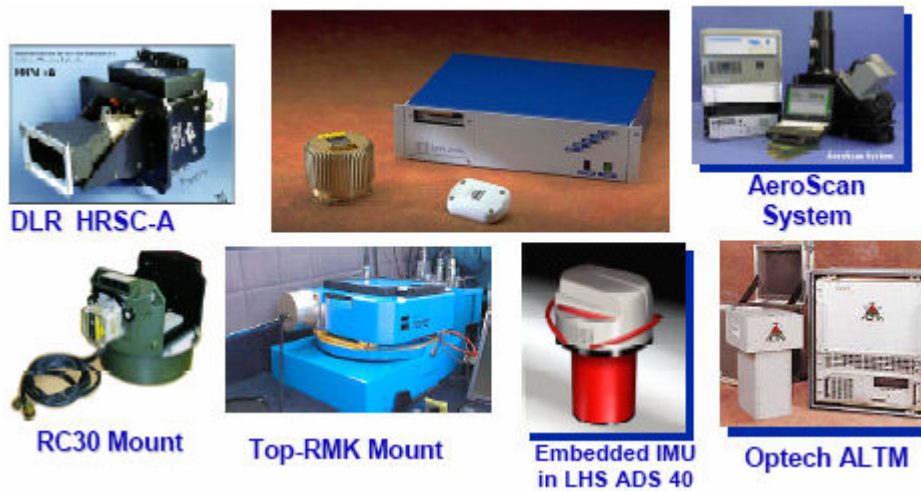
Suomessa Maanmittauslaitos on varustanut kuvauskoneensa Applanix POS/AVTM 510 GPS/IMU-järjestelmillä (Honkavaara, 2003). Muita vastaavanlaisia järjestelmiä on ainakin AEROcontrol (kuva 4), jonka on kehittänyt saksalainen IGI mbH.



Kuva 4. AEROcontrol-laitteisto (IGI mbH, 2005)

4.1 Applanix POS/AV™

Vuonna 1994 julkaistua kanadalaisen Applanixin POS/AV™ (Position and Orientation System for Airborne Vehicles) on käytetty menestyksekkäästi erilaisten kaukokartoitussensoreiden keräämän datan suoraan georeferointiin. Järjestelmä koostuu inertiaalimittausyksiköstä (IMU), GPS-vastaanottimesta ja lopullisen inertiaalinavigointi ratkaisun muodostavasta keskusyksiköstä sekä lisäksi operatiiviseen toimintaan kiinteästi liittyvästä jälkikäsitteilyohjelmistosta. POS/AV™-järjestelmän (kuva 5) IMU käyttää mallista riippuen kuituoptyisia tai DTG gyroskooppeja. (Hutton & Mostafa, 2001).



Kuva 5. POS/AV™-laitteisto, IMU integroituna erilaisiin sensoreihin (Hutton & Mostafa, 2001)

Järjestelmän sydän on Integrated Inertial Navigation (IIN) -ohjelma. Ohjelma muodostaa yhdistetyn inertiaalinavigointi ratkaisun, sijainnin ja orientoinnin, yhdistämällä kantoaallon vaihehavainnoja käyttävän DGPS -paikannuksen ja IMU-havainnot. GPS-mittauksilla pystytään ratkaisun muodostamisessa kontrolloimaan IMU-havainnoja. Lopullisessa inertiaalinavigointi ratkaisussa säilyy inertiaalimittauksen dynaaminen tarkkuus ja GPS-paikannuksen absoluuttinen tarkkuus. (Hutton & Mostafa, 2001).

	POS/AV TM
Tarkkuus (RMS)	510
Paikannus (m)	0.05 – 0.30
Kiihtyvyys (m/s)	0.005
Roll & Pitch (°)	0.005
Heading (°)	0.008

Taulukko 1. POS/AVTM 510 -laitteiston inertiaalinavigointi ratkaisun tarkkuus jälkilaskennassa (Hutton & Mostafa, 2001)

5 Yhteenveto

GPS/IMU:n käytön myötä, tulevaisuudessa suora georeferointi tulee yleistymään myös ilmakuvausssä. Tämä vaatii kuitenkin vielä lisää käytännön tutkimuksia ja kehitystyötä menetelmän luotettavuuden parantamiseksi ja ongelmakohtien ratkaisemiseksi. Tutkimustyötä menetelmän kehittämiseksi tehdään jatkuvasti. Myös uusien laitteistojen hankintahinnan lasku tulevaisuudessa tulee lisäämään menetelmän yleistymistä.

Toistaiseksi tarkkuudeltaan parempaa ja luotettavampaa GPS/IMU-tuettua ilmakolmiointia tultaneen kuitenkin varmuudella jatkossakin käyttämään erityistä tarkkuutta vaativissa ilmakuvauussovelluksissa.

Lähdeluettelo

Arditty, H. Cottreau, Y. Faussot, N. Gaiffe, T. Hardy, G. Lefevre, H. Simonpietri, P. (2000). Highly Compact Fiber Optic Gyrocompass for Applications at depths up to 3,000 meters. IXSea SAS.

Cramer, M. Stallmann, D. (2001). On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. [Viitattu 24.4.2005]. Saatavissa: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/Cramer_Oeepe2001.pdf.

Geodeettinen laitos (2005). Pysyvät testikentät GPS/IMU/kamera-systeemikalibrointia varten Suomessa. 24.1.2005. [Viitattu 23.4.2005]. Saatavissa: <http://www.fgi.fi/osastot/foto/projektit/kalibr.html>.

Haggrén, H. Honkavaara, E. (2004). Luento 5: Kolmioinnin laskenta (Fotogrammetrinen kartoitus –kurssin luennot). 19.9.2004. [Viitattu 23.4.2005]. Saatavissa: http://foto.hut.fi/opetus/220/luennot/5/L5_2004.pdf.

Honkavaara, E. (2003). Digitaalisten kuvien laatu. Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu n:o 40.

Hutton, J. Mohamed M.M.R. (2001). Direct Positioning and Orientation Systems. [Viitattu 16.4.2005]. Saatavissa: http://www.applanix.com/media/downloads/products/articles_papers/POSAV_2001_04_DirectPositioning.pdf.

IGI mbH. (2005). Yrityksen kotivut. 18.3.2005. [Viitattu 16.4.2005]. Saatavissa: <http://www.igi-systems.com/>.

IXSea SAS. (2001). Octans Surface Unit, User's guide. Document no: MU/3453/EGF/003/E.

Pajula, K. (2001). GPS/INS-paikannus, TKK, fotogrammetrian erikoistyö, Espoo. [Viitattu 3.4.2005]. Saatavissa: http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Kimmo_Pajula/sisal.htm.

Silicon Sensing Systems. (2005). Yrityksen kotisivut. [Viitattu 16.4.2005]. Saatavissa:
<http://www.spp.co.jp/sss/comp-e.html>.