

OLA ØVSTEDAL
 Institutt for kartfag, NLH
 Norge

GPSPROG – EN VERKTØYKASSE FOR ANALYSE AV GPS-OBSERVASJONER

ØVSTEDAL HAR GJENNOM SITT FORSKNINGSARBEID UNDER STORE DELER AV 1990-TALLET VÆRT EN FOREGANGSMANN I Å UTNYTTE SATELLITMÅLINGER TIL PRAKTISKE ANVENDELSER OG HAR GITT BETYDELIGE BIDRAG TIL KART- OG OPPMÅLINGSBRANSJEN. HANS TEORETISKE OG PRAKTISKE LØSNINGER PÅ UTNYTTELSE AV GPS-OBSERVASJONER HAR HATT STOR BETYDNING INNEN BLANT ANNET FLYFOTOGRAMMETRI, OGSÅ I INTERNASJONAL SAMMENHENG. ØVSTEDAL ER UTDANNET JORDSKIFTEKANDIDAT VED NLH, 1989, OG FOR TIDEN ANSATT SOM AMANUESIS, INSTITUTT FOR KARTFAG, NORGES LANDBRUKSHØGSKOLE (NLH). HAN HAR FØR DETTE VÆRT STIPENDIAT PÅ SAMME INSTITUTT, SAMT HATT STUDIE- OG KONSULENTOPPHOLD I UTLANDET.

INNLEDNING

Det finnes et utall av kommersielle programmer for beregning av GPS-observasjoner. Felles for disse er at de for brukerne ofte framstår som "svarte bokser", og detaljer om algoritmer og implementering er i regelen ikke er tilgjengelig.

I en beregning der koordinater og eventuelle tilleggsparametere blir estimert fra fase og pseudorange observasjoner, er det flere ulike beregninger som foretas. I de kommersielle programmene er de ulike prosessene linket sammen til en prosess, og for brukeren vil det se ut som om én beregning finner sted. Dersom det oppstår problemer under beregningene, vil det derfor ofte være svært vanskelig å finne ut hvor i prosessen problemene oppsto.

I GPS-kurs vil det for studentene være behov for å kombinere teorikunnskaper med øvinger. For bruk i undervisningen, vil det derfor være ønskelig med et modulært programsystem der de ulike beregningstrinnene (f. eks. identifisering og reparering av fasebrudd) synliggjøres og behandles hver for seg.

Sist men ikke minst er det for GPS-relaterte forskningsprosjekter helt nødvendig med tilgang til

et fleksibelt programsystem der det er lett å gjøre endringer, implementere nye algoritmer og modeller og å eksportere de ønskede resultatene.

Ved Institutt for kartfag, NLH er det derfor i løpet av de senere årene blitt utviklet et sett med programmer for beregning og analyse av GPS-observasjoner. Motivasjonen for dette arbeidet har vært ønsket om et programsystem med følgende egenskaper:

- godt dokumenterte algoritmer
- godt egnet til å håndtere vanskelige data
- modulær oppbygning
- lett å gjøre endringer i kilde-koden, f. eks. eksport av mellomresultater og implementering av nye algoritmer og modeller.

I det følgende vil noen prosjekter bli omtalt der GPSPROG er brukt som analyseverktøy.

GPS ANVENDT I FLYFOTOGRAFERING

En anvendelse av GPS i fotogrammetri er å posisjonsbestemme flykameraets projeksjonssenter ved eksponeringsøyeblikket. De GPS bestemte kameraposisjonene kan erstatte de fleste gitttpunktene i den etterfølgende aerotrianguleringen, og dermed øke effektiviteten og redusere kostnadene i en kartleggingsprosess.

For å oppnå en nøyaktighet bedre enn noen desimeter, må faseobservasjoner på bærebølgen (L1 og/eller L2) brukes som hovedobservasjonstørrelse. Ulempen med faseobservasjonene er som kjent, at de er flertydige i den forstand at de kun gir avstandsending relativt første initielle måletidspunkt. Dersom hele nøyaktighetspotensialet til faseobservasjonene skal oppnås, må faseflertydighetene i form av hele antall

bølgelengder mellom mottakerne og satellittene ved første måletidspunkt bestemmes.

I tidligere tider ble faseflertydighetene bestemt i en egen statisk initialisering før de kinematiske observasjonene tok til. Alle de etterfølgende kinematiske observasjonene må da ha et kjent forhold til de initielle flertydighetene. Eventuelle fasebrudd må repareres. De benyttede metodene var å utføre en tradisjonell statistisk (i den senere tid også korttidsstatisk) bestemmelse av en basislinje samt heltall, stille mottakerne opp i kjente punkter eller å utføre antenne-swapping.

Metodene for statisk initialisering har alle åpenbare svakheter. F. eks. under flyfotografering vil det grunnet restriksjoner på flyplassene og lange avstander fra flyplassene til områdene som skal fotograferes, være sterkt ønskelig å bestemme de heltallsukjente mens flyet er i bevegelse. Metoder for å reparere fasebrudd i kinematiske data har vist seg å ikke være pålitelige nok under alle forhold. Dersom en ikke er i stand til å reparere eventuelle fasebrudd, må en utføre en ny initialisering.

Det er derfor blitt utviklet forskjellige metoder for å bestemme de heltallsukjente mens GPS-

metre blir her estimert i den etterfølgende fotogrammetriske blokkutjevning. I hver flystripe blir omtrentlige estimat for faseflertydighetene innført som kjente størrelser i GPS-beregningen. Ved å tvinge faseflertydighetene til falske verdier, vil selvfølgelig også de beregnede koordinatene bli forfalsket. Koordinatene vil ha et offset og en drift. Simuleringer og empiriske forsøk (f. eks. Øvstedal, 1994) har vist at drifta vil være lineær innenfor korte tidsrom.

Et viktig moment ved denne teknikken er at de beregnede GPS-posisjonene i hver stripe må være homogene. Det betyr at i tillegg til at alle fasebrudd må være reparert, må det ikke skje noen endring i satellittkonstellasjonen innen stripa. Når faseflertydighetene er låst til falske verdier vil det bli innført en tvang i beregningen, og de estimerte koordinatene vil få et sprang på flere centimeter (ofte også flere desimeter) dersom en ny satellitt kommer inn eller en satellitt forsvinner.

Empiriske forsøk i et testnett i Fredrikstad ga følgende estimat for intern nøyaktighet på de GPS bestemte koordinatene ved fotograferingstidspunktene i hver fotostripe for hhv. nord, øst og høydekoordinat: (Blankenberg & Øvstedal, 1993, Øvstedal, 1994):

$$\begin{aligned} \text{RMS}_N &= 2,6 \text{ cm} \\ \text{RMS}_O &= 3,2 \text{ cm} \\ \text{RMS}_h &= 1,9 \text{ cm} \end{aligned}$$

For å ivareta kravene som settes til stripevis beregning for GPS støttet aerotriangulering, er forskjellige moduler i GPSPROG satt sammen i en pakke med et generelt menysystem som overbygning. Det ble særskilt vektlagt at de beregnede koordinatene for hver stripe er homogene.

Denne programpakken har vært brukt siden 1994 av de norske firmaene Fjellanger Widerøe AS og Fotonor AS for rutinemessig beregning av kinematiske GPS data fra flyfotograferinger. Maksimal avstand til referansemottaker har vært satt til 500 km og totalt 616 flyfotograferinger er blitt utført med GPS. I dette tidsrommet er 34 % av alle aerotrianguleringene i Norge utført med kinematisk GPS (se tabell 1).

Programpakken ble også brukt for kvalitetskontroll i forbindelse med et større kartleggingsoppdrag som firmaet Blom AS hadde i Indonesia (Øvstedal, Røste & Bekkhus, 1996). I tillegg blir programmet brukt i studentøvinger i fotogrammetri ved Institutt for kartfag, NLH.

KINEMATISK BEREGNING AV FASE- OG PSEUDORANGE OBSERVASJONER VED MINSTE KVADRATERS METODE

Ved bruk av kinematisk GPS under flyfotografering vil de normale operative forholdene medføre vanskeligheter for beregning av de kinematiske koordinatene. I den tidligere omtalte metoden med "stripevis beregning" blir problemet løst ved at systematiske offset og driftsparametere blir estimert i en etterfølgende fotogrammetrisk blokkutjevning.

Også i andre krevende anvendelser vil ugunstige forhold som kort måletid, dårlig satellittgeometri, støyede målinger, hyppige fasebrudd, umodellert ionosfære og troposfære, flervegsinterferens m.m., kunne vanskeliggjøre en pålitelig identifisering av heltallsflertydighetene til faseobservasjonene.

Også for disse anvendelsene vil det være behov for et alternativ til en kinematisk fix-løsning med fase som observasjonsstørrelse. Alternativene vil være:

- beregning med kode som observasjonsstørrelse
- beregning med kode og fase som observasjonsstørrelse.

Første alternativ vil for svært mange geomatikk-formål ikke oppfylle nøyaktighetskravene. Ved det andre alternativet blir det vanligvis benyttet en metode som kalles faseglattning av kode (carrier phase smoothing), jfr. f.eks Hofmann-Wellenhof et al. (1997), s. 96-98. Disse algoritmene er enkle å implementere, men de er ikke optimale med tanke på utnyttning av den informasjon som ligger i observasjonsmaterialet.

I noen programsystemer, f. eks. Qin et al. (1992), er det derfor implementert algoritmer som med utgangspunkt i et Kalman-filter

braker både kode og fase som observasjonsstørrelser i en sekvensiell kinematisk beregning. Ulempen med en slik Kalman-filtrering er at kun de estimerte koordinatene fra siste måletidspunkt vil være optimale. Dersom en ønsker optimale estimat for alle måletidspunktene, vil det være nødvendig å utføre en etterfølgende "smoothing", jfr. f.eks. Brown & Hwang (1997). For etterprosessering av kinematiske observasjoner vil minste kvadraters metode derimot straks gi et optimalt beregningsresultat for alle måletidspunktene. Ulempen med denne beregningsmetoden vil være at antall ukjente parametere blir svært stort (gjerne flere tusen).

I GPSPROG er sistnevnte metode implementert der både kode og fase blir brukt som observasjoner, Øvstedal (1996). For å håndtere det store antallet ukjente parametere, blir disse delt i to grupper: *lokale variable* som varierer med tiden og *globale variable* som ikke varierer med tiden.

- Lokale variable: Koordinater for ukjent mottaker.
- Globale variable: Flertydighetene til faseobservasjonene.

I en pre-prosessering blir de lokale variablene eliminert fra normalingene, og kun de globale variablene blir estimert. I en etterfølgende koordinatberegning blir de globale variablene låst til sine estimerte verdier og lokale koordinater for hvert måletidspunkt blir suksessivt estimert for hvert måletidspunkt.

I forsøk med kinematisk GPS under flyfotografering har sammenligning med fotogrammetrisk bestemte koordinater gitt nøyaktigheter i form av standardavvik på 0,15 m - 0,3 m.

PREIS ABSOLUTT POSISJONSBESTEMMELSE MED GPS

Absolutt posisjonsbestemmelse med GPS (bruk av én GPS-mottaker) har inntil nylig gitt den heller beskjedne koordinatnøyaktigheten på 100 m i grunnriss og 156 m i høyde (95 %). Den største feilkilden har vært en bevisst forringelse av signalene fra eierne av GPS-systemet; SA (Selective Availability). Den 2. mai i år ble SA slått av, og foreløpige tester viser at en nå kan forvente en absolutt koordinatnøyaktighet i form av standardavvik på ca. 10 m (jfr. <http://www.igeb.gov/sa/diagram.shtml>). For svært mange geomatikk-formål er dette likevel fremdeles for dårlig.

IGS (International GPS Service) opererer et stort antall globalt fordelte GPS-mottakere, og

mottakeren er i bevegelse (On-The-Fly ambiguity resolution/OTF). Utvikling av ny mottakerteknologi med svært nøyaktige kodeobservasjoner på begge frekvenser, har gjort disse metodene stadig raskere.

Vesentlige ulemper med OTF-teknikkene er likevel at avstandene til referansemottakeren ikke kan være for lang (30 km?) og at et tilstrekkelig lang tidsrom med fasebrudd-frie data må være tilgjengelig.

Under flyfotografering vil det ofte være upraktisk (og uøkonomisk) å lokalisere en referansemottaker så nære at en kan stole på OTF-teknikkene. Grunnet de relativt store høydeforskjellene mellom referansemottakeren og mottakeren i flyet, vil umodellerte troposfæriske effekter være en betydelig feilkilde. Flykroppen vil også forårsake flervegsinferens (multipath). Fotostripene vil som regel være relativt korte (1/2-3 minutters flytid). Dette resulterer i at støy og umodellerte effekter kan hindre en pålitelig fastsetting av de faseflertydighetene.

For å oppnå sub-desimeter nøyaktighet i en GPS støttet aerotriangulering, kan en bruke metoden "stripevis beregning". Gjenværende systematiske driftspara-

År	Totalt antall flygninger	Flygninger med GPS
1994	290	16
1995	316	42
1996	324	77
1997	316	117
1998	289	184
1999	261	180

TABELL 1.

observasjoner fra disse brukes av forskjellige analysesentra til blant annet å beregne satellittkoordinater og satellittklokkekorreksjoner med en nøyaktighet på ca. 0,10 m, jfr. <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>. Presise satellittkoordinater og -klokkekorreksjoner er fritt tilgjengelig over Internett noen dager i etterkant. I tillegg blir det også estimert atmosfæriske parametere.

Modulen i GPSPROG som utfører absolutt posisjonsbestemmelse med kode-observasjoner, er blitt modifisert til å kunne benytte presise satellittkoordinater og -klokkekorreksjoner. I Øvstedal (1999a, 1999b) er det vist at en med denne metoden oppnår en like god nøyaktighet som med tradisjonell dGPS med kode som observasjonstørrelse. Prosessering av tofrekvente kodeobservasjoner fra en geodetisk GPS-mottaker har gitt koordinat-nøyaktigheter i form av standardavvik på ca. 0,50 m i grunnriss og 0,75 m for hvert måletidspunkt.

I områder der det er vanskelig eller kostbart å framskaffe GPS-observasjoner fra en referansemottaker, vil absolutt posisjonsbestemmelse med etterprosesserte satellittkoordinater og -klokkekorreksjoner være et reelt alternativ for svært mange formål.

FORTETTING AV GEODETISKE NETT MED GPS-VEKTORER SOM ER PROSESSTERT MED KOMMERSIELL PROGRAMVARE

Den optimale metoden for prosessering av GPS-observasjoner fra målesesjoner der flere enn to GPS-

mottakere er i bruk, vil være å prosessere observasjonene fra alle GPS-mottakere i en felles beregning. Standardavvikene til og korrelasjoner mellom alle vektorene vil da være tilgjengelige for den etterfølgende analysen av det geodetiske nettet. Dessverre er det kun beregningsprogram utviklet for vitenskapelig bruk som kan utføre en slik multi-stasjons beregning.

Programvare for vektorberegning som er blitt utviklet av mottakerprodusentene, kan i regelen kun prosessere observasjoner fra to mottakere for hver beregning. Dersom flere enn to mottakere har vært i samtidig bruk, vil ikke korrelasjonene mellom ulike vektorer være tilgjengelige. Fra r mottakere vil det være mulig å prosessere $r(r-1)/2$ enkel-vektorer. Bare $r-1$ av disse vektorene vil være uavhengige i den forstand at de ikke kan uttrykkes som en lineær kombinasjon av de andre vektorene. De resterende vektorene er trivielle da de tilsynelatende er en lineær kombinasjon av de $r-1$ uavhengige vektorene.

Når en importerer vektorer fra sistnevnte enkel-vektor prosessering i en nettanalyse, må en ta stilling til om alle $r(r-1)/2$ vektorene skal benyttes eller om kun de $r-1$ uavhengige vektorene skal benyttes. Førstnevnte metode vil ha som åpenbar svakhet at analysen vil gi falske pålitelighetsmål. Ved bruk av den andre metoden vil en tildele de $r-1$ lineært uavhengige vektorene en høy kvalitet. I tillegg vil en under praktiske måleforhold oppleve at ulike valg av de $r-1$ uavhengige vektorene gir forskjellige resultat

i nettanalysen.

I Øvstedal (2000) er det utviklet en algoritme der korrelasjonene mellom de lineært uavhengige vektorene blir rekonstruert ved hjelp av standardavvik og korrelasjoner fra alle de $r(r-1)/2$ enkel-vektorene. GPSPROG er blitt brukt som beregningsverktøy for å demonstrere at den foreslåtte metoden gir et beregningsresultat som er identisk med en multi-stasjons beregning.

OPPSUMMERING

Ved Institutt for kartfag, NLH er det utviklet et sett med beregningsprogrammer som har vært brukt i undervisning, hovedoppgaver og ulike forskningsprosjekter. Det har vist seg svært nyttig å ha et programsystem med godt kjente algoritmer der det er lett å gjøre modifikasjoner.

Noen prosjekter der programsystemet er blitt brukt som verktøy er kort omtalt i denne artikkelen.

ARBETETS BAKGRUND, INNEHÅLL OCH MÅLSÄTTNING

Förnyelsen av bebygga områden blev aktuell till en följd av de ekonomiska och strukturella förändringar som skedde i slutet av 1980-talet och början av 1990-talet. I och med att den ekonomiska aktiviteten sjönk i samband med lågkonjunkturen minskade kommunernas och statens skattemedel samtidigt som stora bebygga områden, främst industri-, hamn-, lager- och andra liknande områden, frigjordes för annan verksamhet på grund av strukturella förändringar i näringslivet och samhället. Detta ledde till att kommunerna gick in för att planera om redan bebygga områden. På detta sätt hade de inte bara möjlighet att minska sina utgifter genom att utnyttja den infrastruktur och de byggnader som redan fanns, utan också möjlighet att förbättra och förtäta den förändrade samhällsstrukturen. Dagens utmaning är att utveckla samarbets-, genomförande- och finansieringsmodeller som möjliggör en effektiv förnyelse av outnyttjade bebygga områden.

Målet med detta arbete var att undersöka vilka möjligheter och

Ola Øvstedal,
ola.ovstedal@ikf.nlh.no

REFERANSER

- Blankenberg, L.E., Øvstedal, O., (1993), *Block adjustment with GPS – Results from test flight FREDRIKSTAD*, Photogrammetric Week '93, Wichman, Karlsruhe, s. 85–96.
- Brown, R. B., Hwang, P. Y. C., (1997), *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 3rd edition.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., (1997), *GPS – Theory and Practice*, Springer Verlag, New York.
- Qin, X., Gourevitch, S., Kuhl, M., (1992), *Very precise GPS: Development status and results*, Proc. ION-GPS-92, 615–624.
- Øvstedal, O., (1994), *Experiences with Kinematic GPS for Photogrammetric Purposes*, Proceedings of XX FIG Congress, Melbourne-Australia 1994, TS. 504.4, 11 sider.
- Øvstedal, O., Røste, P. B., Bekkhus, R., (1996), *Digital mapping in Indonesia – Ground Control and Aerial Photogrammetry with Kinematic GPS*, International Journal for Geomatics, vol. 10.
- Øvstedal, O., (1996), *Kinematisk beregning av fase- og pseudorange observasjoner fra GPS*, Geodesi og Hydrografidagene 1996, 20 s.
- Øvstedal, O., (1999a), *Nøyaktig posisjonsbestemmelse med GPS uten bruk av referansestasjon*, KART OG PLAN, Vol. 59, Nr.2 1999.
- Øvstedal, O., (1999b), *Absolute Positioning with GPS – An Accurate Alternative*, Proceedings of ION GPS'99, Institute of Navigation, USA, pp. 1014–1018.
- Øvstedal, O., (2000), *Single Processed Independent and Trivial Vectors in Network Analysis*, Journal of Surveying Engineering, Vol. 126, No. 1/2000.