

Maa-57.290, Fotogrammetrian erikoistyö

Monoplotting

Anna Erving
58394J

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	2
1. Johdanto	3
2. Perusperiaate ja historia.....	3
3. Tarvittavat aineistot	4
3.1 Valokuva kohteesta.....	4
3.2 korkeusmalli.....	5
4. Orientoinnit.....	5
4.1 sisäinen orientointi	6
4.2 Ulkoinen orientointi	6
5. Laskennan matemaattinen malli.....	7
6. Automatisointi	10
7. Tarkkuus	11
8. Sovellusalueet.....	11
9. Monoplotting vs. stereoplotting	12
10. Ohjelmia	13
10.1 Barista	13
10.2 DiMoTeP.....	13
11. Oma tutkimus DiMoTeP-ohjelmalla	14
12. Johtopäätelmät	18
Viitteet	18

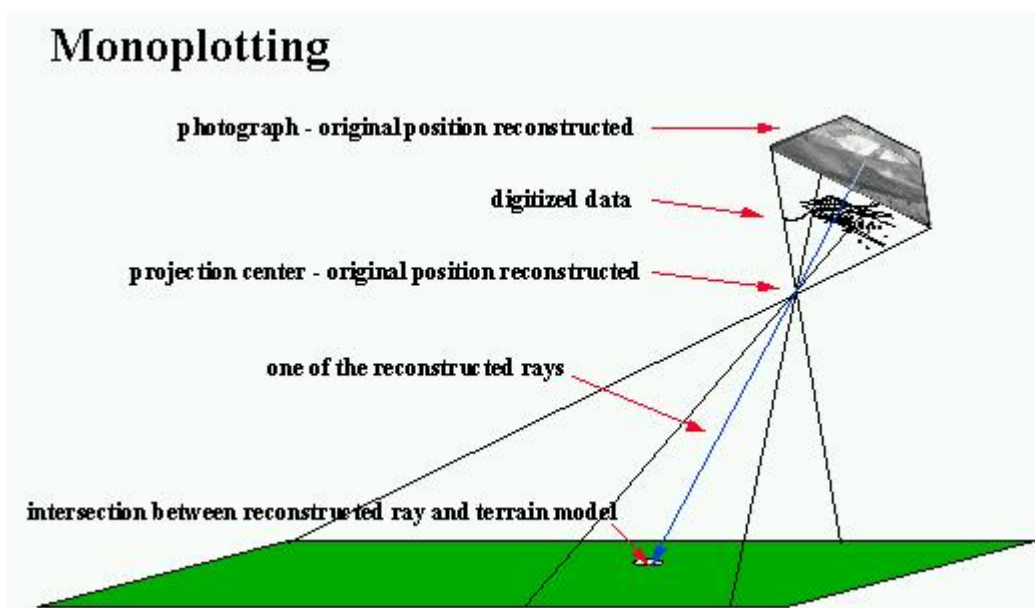
1. Johdanto

Monoplotting on yksikuvamittausmenetelmä, jonka avulla voidaan yhdeltä kuvalta mitata kohteen 3D-koordinaatteja. Mittaamista varten tarvitaan ainoastaan yksi kuva ja maastomalli kohteesta, sekä lisäksi tieto näiden sijainnista kohteeseen nähden. Mitään erikoisia digitointilaitteita tai stereotarkastelun mahdollistavia kojeita ei tarvita, vaan nykyään jo joissakin fotogrammetrisissa mittausohjelmissa on vaihtoehtona monoplotting-mittaus. Sanalle monoplotting ei löydy Suomen kielelle vastaavaa käännettä, joten käytän tässä työssä sanaa monoplotting.

Tämä erikoistyö esittelee monoplotting-mittausmenetelmän aloittaen sen historiasta ja jatkaen tarkemmin mittauksen kulkuun ja siinä tarvittaviin aineistoihin. Huomiota on kiinnitetty myös erilaisiin automatisointimahdollisuuksiin, menetelmän tarkkuuteen ja sen sovellusalueisiin. Esimerkinomaisesti työssä on esitelty kaksi ohjelmaa, joiden avulla kuvilta on mahdollista mitata kohdekoordinaatteja monoplotting-menetelmällä. Lopuksi olen testannut mittaamista fotogrammetrian laboratorion omilla aineistoilla DiMoTep-ohjelmaa käyttäen.

2. Peruseriaate ja historia

Yhdeltä kuvalta voi kohteen mitata vain kaksiulotteisesti, ellei kuvan lisäksi mitään muuta informaatiota ole saatavilla. Jos tuloksena haluaa 3D-koordinaatit, kohteesta tarvitaan maastomalli sekä valokuva (satelliittikuva, ilmakuva, ortokuva, maakuva, panoraama...), jonka sisäinen ja ulkoinen orientointi tunnetaan. Juuri tällaisen mittamisen mahdollistaa monoplotting (Kuva 1). Kuva voi olla pysty- tai viistokuva. Laskennassa kuvakoordinaatit x , y muunnetaan kohdekoordinaatteihin X , Y , Z . Ainoastaan kohteet, jotka on mallinnettu maastomalliin, voidaan mitata. (Rönnholm P. et. al., 2005)



Kuva 1: Monoplotting-menetelmän peruseriaate. (Doneus M., 1999)

Digitaalisen monoplotting-menetelmän idean esitti ensimmäisenä B. Makarovic vuonna 1973. Vaikka ajatus oli hyvä ja sillä oli suuri käyttöpotentiaali, ei siitä juuri kuultu mitään tämän jälkeen. Vasta 1980-luvun loppupuolella menetelmää testattiin kunnolla käytännössä. Monoplotting-mittaamista käytettiin tuolloin hyväksi karttatiedon päivittämisessä. Menetelmää pidettiin stereokartoituksen halpana, helppona ja jopa epäammattimaisena korvikkeena, jota käytettiin vain pienissä ja erikoisissa sovelluksissa. Se ei siis niinkään ollut yleinen kartoitusmenetelmä. (Stefanovic P. et al., 1989)

Digitaalisen monoplottingin alun aikoina digitaalisia korkeusmalleja oli harvassa ja myöskin erilaiset digitaaliset laitteet menetelmän suorittamiseksi olivat hyvin kalliita. Kuitenkin jo 1980-luvun loppupuolella digitaaliset laitteet muuttuivat edullisemmiksi. Korkeusmalleja kuitenkin oli vielä hyvin vähän digitaalisessa muodossa. Toinen ongelma oli hyvien digitointilaitteiden puute, vaikka laitteita saikin jo melko halvalla. (Stefanovic P. et al., 1989)

Nykyään nämä ongelmat eivät ole enää esteenä monoplotting-menetelmän käytölle. Myös satelliittikuvien hyvän tarkkuuden johdosta myös niitä on nykyään mahdollista käyttää yksikuvamittaukseen (Willneff J. et al., 2005).

3. Tarvittavat aineistot

Monoplotting-mittausmenetelmää varten tarvitaan kohteesta oleva valokuva sekä samalta alueelta oleva maastomalli tai jotain muuta korkeusinformaatiota.

Kohteen esittävä kuva voi olla oikeastaan mikä tahansa valokuva riippumatta siitä, onko se otettu satelliitista, lentokoneesta, tai maanpinnalta. Kuvan on vain oltava tarpeeksi tarkka ja sen sisäinen ja ulkoinen orientointi on tunnettava. Myös karttaprojektioon oikaistu ilmakuva eli ortokuva käy. Kuten jo edellä kerrottiin, kuva voi olla sekä pysty- että viistokuva.

Kuvan sisäinen ja ulkoinen orientointi on tunnettava, jotta mittaus kovalta on mahdollista. Sisäistä orientointia varten kuvanottokamera on kalibroitava ja ulkoista orientointia varten kovalta tulee näkyä joitakin koordinaateiltaan tunnettuja pisteitä. Orientointeja käsitellään tarkemmin luvussa 4.

3.1 Valokuva kohteesta

Kuva voi olla nykyään melkein mikä vaan, kunhan se on riittävän tarkka ja sen orientointiparametrit voidaan saada selville. Satelliittikuva otetaan satelliitista, joka kulkee avaruudessa maata kiertävällä radalla. Tarkkoja satelliittikuvia voidaan käyttää monoplotting-mittauksessa (High-Resolution Satellite Imagery, HRSI) (Willneff J. et al., 2005).

Ilmakuva taas otetaan lentokoneesta. Ilmakuvakamera on erityisen tarkka, sillä sen objektiivin geometria on lähes virheetön ja järjestelmän erotuskyky on vähintään 30-40 viivaparia millimetrillä (Haggrén H. et al., 2004). Ilmakuva onkin tarkkuutensa ja informatiivisuutensa takia eniten käytetty kuva-aineisto monoplotting-mittauksessa.

Ortokuva on karttaprojektioon oikaistu ilmakuva, joka on kohtisuorassa kohdekoordinaatiston z-akselia vastaan. Oikaisu suoritetaan georeferoimalla (Rönholm P. et al., 2004). Georeferointi tarkoittaa kuvien sitomista maastokoordinaatistoon joko ortokuvina tai esimerkiksi stereomalleina.

Prosessiin kuuluvat ulkoisten orientointien määrittäminen sekä ortokuvien tapauksessa orto-oikaisu. Tähän tarvitaan ilmakehän kuva, korkeusmalli sekä orientointiparametrit (Honkavaara E., 2003).

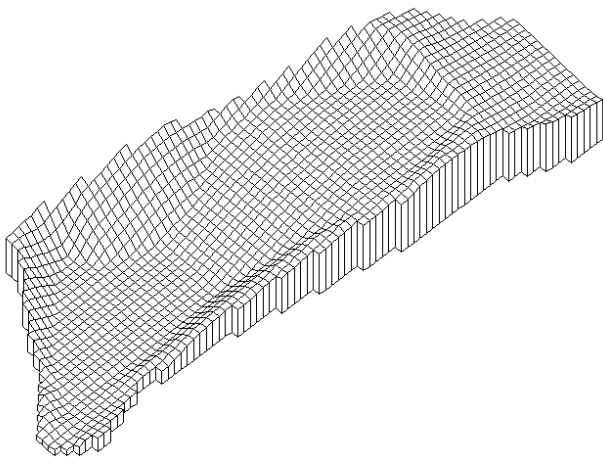
3.2 korkeusmalli

Korkeustiedoksi käy esimerkiksi maastomalli, alueelta muuten vain tunnettuja maastonkorkeuksia, tieto siitä että kohde on vaakasuora taso ja kaikilla z-pisteillä on sama arvo, tai että kohde koostuu erilaisista tasoista. (Schwidefsky K. et. al., 1978)

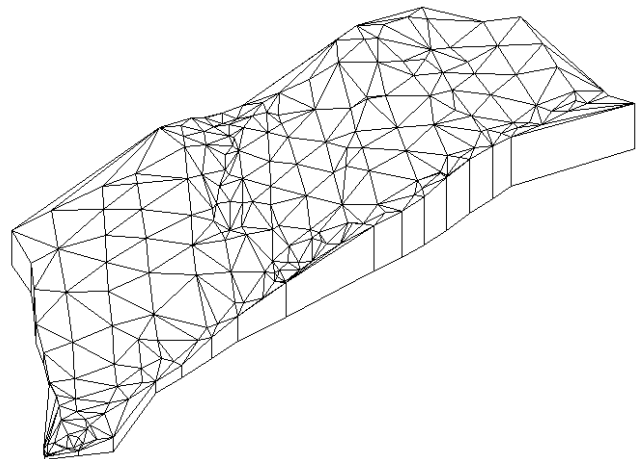
Maastomalli (DEM, Digital Elevation Model) sisältää maaston korkeustiedon x-, y-, ja z-koordinaatteina. Maastomalli koostuu yleensä säännöllisestä hilasta, jonka ruutujen solmukohtat sisältävät korkeustiedot (Kuva 2a). Ruudut mukailevat näin maaston korkeusmuotoja tasoina.

Malli voi olla myös kolmioverkko, joka saadaan optimoituja tasaisiksi esimerkiksi Delanay-kolmioinnin avulla (Kuva 2b). Tällöin satunnaisesti alueella sijaitsevat pisteet sisältävät korkeustiedot, joiden välille muodostetaan yhteyksiä siten että muodostuu kolmioita. Delanay-kolmioinnin avulla kolmioista tulee mahdollisimman tasasivuisia. (Tykkälä T., 2005)

a)



b)



Kuva 2: a) Maastomalli säännöllisenä hilana ja b) kolmioverkkona. (Inno-CAD Oy, 2006)

4. Orientoinnit

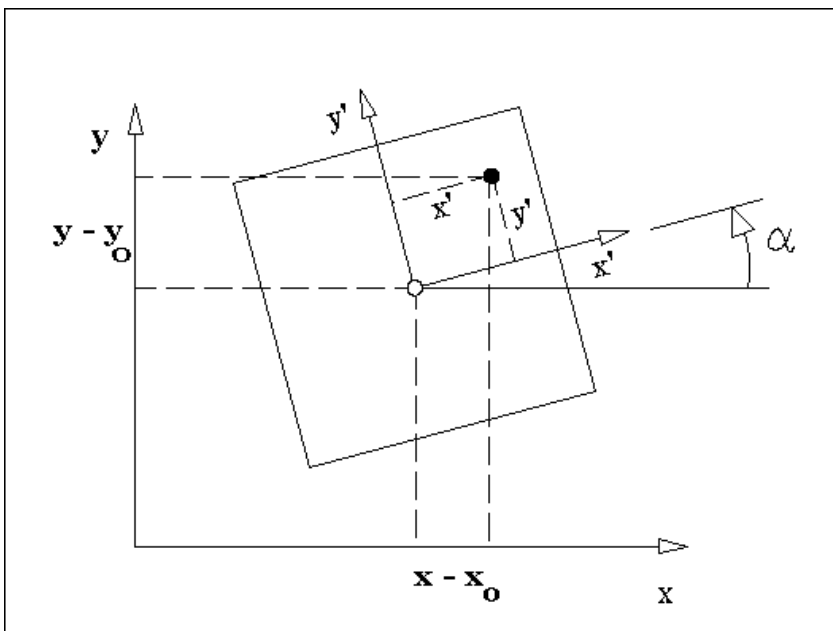
Kuten jo luvussa 3 kerrottiin, kuvalta on tunnettava sen sisäinen ja ulkoinen orientointi, jotta monoplotting-mittaus kohteesta on mahdollista. Sisäisessä orientoinnissa ratkaistaan koordinaattimuunnoksen parametrit 2D-kuvahavainnoista 3D-kamerakoordinaatistoon. Ulkoisessa orientoinnissa taas selvitetään kameran asento kohdekoordinaatistossa (X, Y, Z), jossa myös maastomalli on. Orientoinnin muuttujia ovat kameran kuvaushetkinen sijainti (X, Y, Z) sekä kiertoparametrit kolmen akselin ympäri (omega, fii, kappa). (Haggrén H., 2002)

4.1 sisäinen orientointi

Sisäinen orientointi tarkoittaa projektiokeskuksen sijainnin määrittämistä kuvatasoon nähden. Muuttujia ovat kameravakio c ja kuvan pääpisteen koordinaatit p_x ja p_y . (Schwidefsky K. et. al., 1978)

Sisäisen orientointi tehdään yleensä kalibroimalla kamera ennen käyttöä, ja se koostuu useammasta eri vaiheesta. Kalibroitaessa otetaan kuvia esimerkiksi testikentästä, joka sisältää koordinaateiltaan tunnettuja tähyksiä. Kalibrointi onnistuu myös yhden kuvan avulla, mutta on tarkempaa useammalla kuvalla. Monen kuvan tapauksessa tulokset saadaan tasoittamalla. Tähykset digitoidaan kuvilta ja koordinaattiarvoille tehdään seuraavat muunnokset.

Ensin tehdään koordinaatiston xy -siirto, jossa määritetään pääpisteen paikka oikeaksi. Tämän jälkeen kierretään kuvaa z -akselin ympäri (ja siis myös pääpisteen ympäri) (Kuva 3). Kierro voidaan laskea joko reunamerkeistä tai pääpisteen koordinaattien x - ja y -eroista. Sitten lasketaan mittakaavakerroin, joka saadaan esimerkiksi reunamerkkien välisistä etäisyyksistä. Lopuksi vielä muutetaan kamerakoordinaattien z -koordinaatiksi kameravakio c miinusmerkkisenä. Sisäisessä orientoinnissa voidaan lisäksi tehdä muitakin korjauksia tarpeen mukaan. Esimerkkinä mainittakoon kameran optiikan piirtovirheiden korjaus. (Haggrén H., 2002)

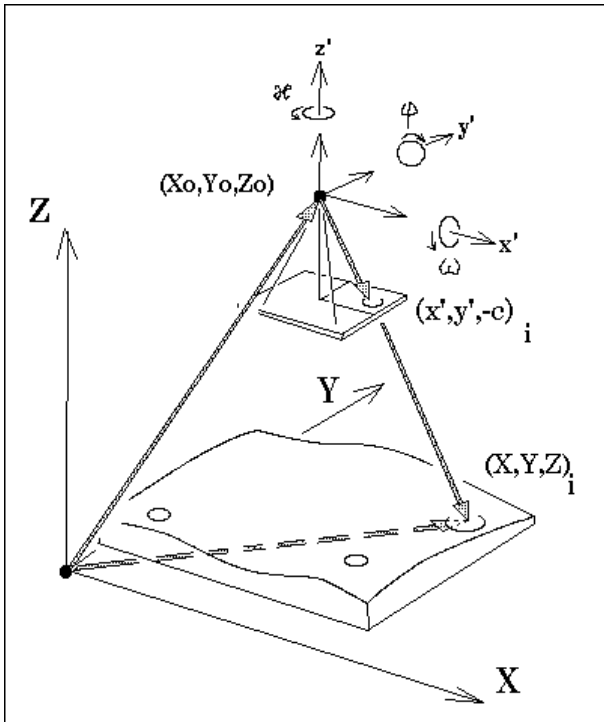


Kuva 3: Sisäisessä orientoinnissa tapahtuva kierto pääpisteen ympäri. (Haggrén H., 2002)

4.2 Ulkoinen orientointi

Ulkoinen orientoinnin avulla määritetään kamerakoordinaatiston sijainti kohdekoordinaatistoon nähden (Kuva 4). Usein kohdekoordinaatisto on alueella käytetty koordinaatisto. Muuttujia ovat kameran projektiokeskuksen koordinaatit (X_0, Y_0, Z_0) kohdekoordinaatistossa sekä kiertokulmat $(\omega, \varphi, \gamma)$ kamera- ja kohdekoordinaatiston välillä. Usein ulkoinen orientointi tehdään jälkikäteen, sillä paikanpäällä tehtävä orientointi kohdekoordinaatistoon esimerkiksi asettamalla kamera

tunnetulle pisteelle ja suuntaamalla se toiselle tunnetulle pisteelle ei ole kovin tarkka. (Haggrén H. et. al., 2005)



Kuva 4: Ulkoinen orientointi. (Haggrén H., 2002)

Ulkoinen orientointi voidaan määrittää myös keskinäisen ja absoluuttisen orientoinnin avulla. Tällöin kuvapisteen orientoidaan ensin keskinäisesti siten, että kohteesta muodostuu kolmiulotteinen malli. Keskinäisessä orientoinnissa toista kuvaa siirretään ja kierretään siten, että sen asento ja sijainti täsmäävät toisen kuvan kanssa. Tämän jälkeen malli sidotaan ulkoiseen koordinaatistoon vähintään kolmen pisteen avulla, joiden sijainti tunnetaan ulkoisessa koordinaatistossa. (Haggrén H. et. al., 2005)

5. Laskennan matemaattinen malli

Taaksepäinleikkaus avaruudessa muodostaa perustan monoplotting-mittausmenetelmälle. Taaksepäinleikkaus voidaan jakaa kahteen eri työvaiheeseen, joita ovat kuvan tai sädekimpun ulkoisen orientoinnin määrittäminen tukipisteiden avulla sekä tuntemattomien maastopisteiden määrittäminen. Oletetaan, että sisäinen orientointi on jo suoritettu esimerkiksi kalibroimalla kamera. (Schwidefsky K. et. al., 1978)

Ensin siis suoritetaan kuvan ulkoinen orientointi. Tällöin lasketaan kuva- ja maastokoordinaattien välinen yhteys. Tunnettuja parametreja laskennassa ovat tukipisteiden maasto- ja kuvakoordinaatit eli X, Y, Z ja x, y, z sekä sisäisellä orientoinnilla saadut projektiokeskuksen kuvakoordinaatit x_0, y_0, z_0 . Tuntemattomia parametreja taas ovat projektiokeskuksen koordinaatit kohdekoordinaatistossa X_0, Y_0, Z_0 ja kiertomatriisin osat a_{xx} . Suureet a_{xx} sisältävät kiertokulmat ω, φ ja γ , joten tuntemattomia parametreja on yhteensä kuusi. Näiden kuuden parametrin ratkaisemiseksi tarvitaan vähintään kolme kolmiulotteista tukipistettä. (Schwidefsky K. et. al., 1978)

Kiertomatriisi sisältää kierrot x -, y - ja z -akselin ympäri ja kiertokulmia ovat ω, φ ja γ . Yhdistämällä kaikkien akselien ympäri tehtävät kierrot, saadaan lopullinen kiertomatriisi R . (Schwidersky K. et. al., 1978)

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \text{ missä}$$

$$a_{11} = \cos \varphi \cos \gamma$$

$$a_{12} = -\cos \varphi \sin \gamma$$

$$a_{13} = \sin \varphi$$

$$a_{21} = \cos \omega \sin \gamma + \sin \omega \sin \varphi \cos \gamma$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos \gamma - \sin \omega \sin \varphi \sin \gamma$$

$$a_{23} = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$a_{31} = \sin \omega \sin \gamma - \cos \omega \sin \varphi \cos \gamma$$

$$a_{32} = \sin \omega \cos \gamma + \cos \omega \sin \varphi \sin \gamma$$

$$a_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

Kun lasketaan kuva- ja kohdekoordinaattien välinen yhteys ottamalla huomioon välillä olevat kierrot kolmen akselin ympäri, saadaan yleiset kuvautumisyhtälöt:

$$\frac{(X - X_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)}$$

$$\frac{(Y - Y_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{23}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)}, \text{ missä}$$

$$z - z_0 = -c$$

a_{xx} kiertomatriisin alkio

X, Y, Z maastokoordinaatit

x, y, z kuvakoordinaatit

X_0, Y_0, Z_0 projektiokeskuksen maastokoordinaatit

x_0, y_0, z_0 projektiokeskuksen kuvakoordinaatit

Kuvautumisyhtälöiden käänteiset muodot ovat seuraavaiset (yhden kuvan ulkoinen orientointi):

$$\frac{(x - x_0)}{(z - z_0)} = \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{21}(Y - Y_0) + a_{31}(Z - Z_0)}{a_{13}(X - X_0) + a_{23}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\frac{(y - y_0)}{(z - z_0)} = \frac{a_{12}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{32}(Z - Z_0)}{a_{13}(X - X_0) + a_{23}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

Koska kuvautumisyhtälöt ovat epälineaarisia, ei taaksepäinleikkausta voida yleensä ratkaista suoralla menetelmällä. Siksi yleisesti käytetäänkin iteratiivista menetelmää. Kuudelle tuntemattomalle parametrille annetaan lähtölikiarvot ja 1. asteen sarjakehitelmäyhtälöiden avulla voidaan johtaa seuraavat virheyhtälöt. (Schwidersky K. et. al., 1978)

$$x + v_x = (x)^0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \omega}\right)^0 d\omega + \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)^0 d\varphi + \left(\frac{\partial x}{\partial \gamma}\right)^0 d\gamma + \left(\frac{\partial x}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0$$

$$y + v_y = (y)^0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \omega}\right)^0 d\omega + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)^0 d\varphi + \left(\frac{\partial y}{\partial \gamma}\right)^0 d\gamma + \left(\frac{\partial y}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0$$

, missä v_x ja v_y ovat iteroinnin tuloksena saatavat korjaukset.

Tässä tapauksessa ei huomioida lainkaan sisäisen orientoinnin korjauksia, vaan otetaan huomioon pelkät tukipisteet. (Schwidersky K. et. al., 1978)

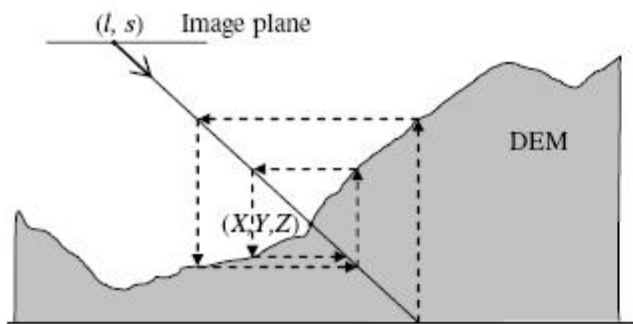
Jos käytettävissä on useamman kuin kolmen tukipisteen 3D-koordinaatit, edellä olevista yhtälöistä muodostetaan normaaliyhtälöt ja ratkaistaan kuusi tuntematonta $dX_0, dY_0, dZ_0, d\omega, d\varphi$ ja $d\gamma$. Näiden avulla saadut korjaukset lisätään likiarvoihin ja lasketaan uusilla parannetuilla likiarvoilla uudet arvot edellä esitetyille virheyhtälöille. Tätä jatketaan lisäten korjaukset aina viimeisimpiin likiarvoihin, kunnes konvergentti on riittävä. (Schwidersky K. et. al., 1978)

Likiarvoja määrittäessä Z_0 :lle johdetaan arvo lentokorkeuden perusteella (jos on kyse ilmakuviasta) ja X_0 ja Y_0 voidaan arvioida tunnettujen tukipisteiden koordinaattien avulla. Jos on kyse pystykuvasta, määritetään ω :n ja φ :n arvoiksi 0 ja γ :n arvoksi likimääräinen lentosuunta. (Schwidersky K. et. al., 1978)

Kolmiulotteisen taaksepäinleikkauksen yhteydessä esiintyy termi vaarallinen pinta. Jos laskennassa käytetään vain minimimäärää eli kolmea tukipistettä, muodostuu näiden kolmen pisteen kautta kulkeva ja niiden tasoa vastaan kohtisuora ympyrälieriö. Tätä ympyrälieriötä kutsutaan vaaralliseksi pinnaksi, jos myös kuvan projektiokeskus sijaitsee lieriön vaipalla. Jos näin käy, jää taaksepäinleikkauksen ratkaisu differentiaalisesti epämääräiseksi. Tällainen tapaus voidaan välttää käyttämällä useampaa kuin kolmea tukipistettä. Nämä ylimääräiset pisteet saava sijaita ympyrälieriön vaipalla, eikä se vaikuta tarkan ratkaisun saavuttamiseen. (Schwidersky K. et. al., 1978)

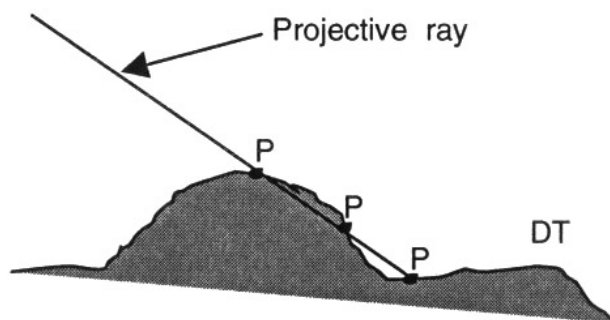
Vielä on jäljellä haluttujen pisteiden (X_p, Y_p) laskenta. Kun kohteesta on tiedossa korkeusmalli tms., voidaan halutut maastokoordinaatit laskea kuvautumisyhtälöiden avulla. Tässä lasketaan orientoidun kuvasäteen ja halutun maastopisteen kautta kulkevan vaakasuoran tason leikkauspiste. (Schwidersky K. et. al., 1978)

Kohdekoordinaattien tasisijainnin (X_p, Y_p) voi määrittää myös esim. pienimmän neliösumman menetelmällä. Kun kuvasäde leikkaa maastomallin, voidaan tehdä useita iterointikierroksia, jotta mitatun kohteen tarkka 3D-sijainti saataisiin selville. Tämä toimenpide on esitetty kuvassa 5. (Willneff J. et al., 2005).



Kuva 5: Koordinaattiarvojen interpolointi kuvan ja maastomallin avulla. (Willneff J. et al., 2005, Figure 1.)

Kohteen Z-arvon laskemiseksi on kehitetty muitakin kuin interpolointiin perustuvia menetelmiä. Vaihtoehtoisten menetelmien kehittämiseen on johtanut se, että yleisesti interpolointimenetelmä on työläs. Ongelmaksi voi myös muodostua se, että kuvasäde leikkaa korkeusmallin useammassa kuin yhdessä paikassa (Kuva 6). Tällöin laskenta tuottaa useita ratkaisuja, joilloin haluttu kohdepiste jää ratkaisematta. (Jauregui M. et al., 1998)



Kuva 6: Kuvasäde leikkaa korkeusmallin useammassa kuin yhdessä paikassa. (Jauregui M. et al., 1998, Figure 2.)

6. Automatisointi

Monoplotting-mittausta voidaan automatisoida jossain määrin. Pääosin automatisointia käytetään kohteiden irroittamisessa digitaaliselta kuvalta. Operaatio koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen on kohteen tunnistus, joka käsittää kuvan tulkinnan, sen ymmärtämisen ja siinä olevien kohteiden luokittelun. Toinen osa on kohteen sijainnin määrittäminen reunaviivan avulla. (Agouris P. et al., 1994)

Nykyään käytössä olevat reunanirroitusoperaattorit voidaan jakaa tarkkuusominaisuuksiensa mukaan seuraavasti.

1. Hyvä tarkkuus kohteiden luokittelussa
2. Hyvä tarkkuus reunaviivojen tunnistuksessa

Ei ole olemassa operaattoria, joka luokittelisi kohteet tarkasti ja samalla tunnistaisi hyvin reunaviivat. Nämä kaksi menetelmää voidaan kuitenkin yhdistää, jolloin saadaan puoliautomaattinen monoplottin (semi-automatic monoplottin). (Agouris P. et al., 1994)

Yhdistäminen tapahtuu seuraavasti. Ensin tyyppiä 1 oleva operaattori tehdään manuaalisesti. Yhdeltä kovalta siis etsitään halutut kohteet, luokitellaan kohde tiettyyn luokkaan ja määritetään suurpiirteinen kohteen reunaviivan sijainti. Kohteiden reunaviivojen tunnistus tarkemmin tehdään tyyppiä 2 olevalla operaattorilla. Näin kuvalla olevat kohteet tulevat tarkasti tunnistettua ja niiden sijainti määritettyä. (Agouris P. et al., 1994)

Automatisoinnin taso riippuu siitä, miten tarkkaan kohteet on tunnistettava manuaalisesti. Esimerkiksi miten monta pistettä täytyy tunnistaa automaattisen reunanirroituksen aikaansaamiseksi ja kuinka lähelle oikeaa reunaa nämä pisteet on manuaalisesti merkittävä. Reunaviivojen sijainnin tarkka automaattinen määrittäminen korvaa eniten aikaavievän prosessin nopealla ja objektiivisella tavalla. (Agouris P. et al., 1994)

Automatisointia voidaan myös käyttää taaksepäinmuunnoksen laskennassa, jolloin likiarvot määritetään täysin automaattisesti. (Schwidefsky K. et al., 1978)

7. Tarkkuus

Tarkkuus riippuu korkeusmallin, kuvan ja sen sisältämän informaation tarkkuudesta (Flühler M., 2004(program)). Korkeusmallin tarkkuus taas riippuu siitä, kuinka tiheästi korkeustietoa on kerätty, mikä on korkeustiedon esitystapa ja minkälaista interpolointimenetelmää käytetään, kun lasketaan kuvasäteen leikkausta korkeusmallin kanssa (Jauregui M. et al., 1998). Lisäksi tarkkuuteen vaikuttavat menetelmät, joiden avulla lasketaan kuvan ulkoinen ja sisäinen orientointi. Tämä tarkoittaa sitä, että koordinaattimuunnos kovalta kohteeseen on tehtävä riittävällä tarkkuudella. Willneff J. et al., 2005 on käyttänyt satelliittikuvista tehtävässä monoplottin-mittauksessa orientointiin affiinista muunnosta sekä rationaalipolynomikertoimia (rational polynomial coefficients, RPCs). (Willneff J. et al., 2005)

Willneff J. et al., 2005 on tutkimuksissaan osoittanut, että tarkkuus yksittäisten pisteiden mittauksessa oli pienempi kuin pikseli, kun kuvat oli orientoitu yhden pikselin tarkkuudella ja maastomallin tarkkuus oli 0,4 metriä. Tutkimuksessa käytettiin IKONOS ja QuickBird –satelliittikuvia sekä Barista-ohjelman monoplottin-mittausmahdollisuutta. Tarkkuutta tutkittiin vertaamalla monoplottin-mittauksen tuloksia Barista-ohjelmalla tehtyihin stereo- ja monikuvamittauksiin. (Willneff J. et al., 2005)

8. Sovellusalueet

Ennen monoplottin-menetelmää suositeltiin käytettäväksi silloin, kun mittauksella ei tavoiteltu suurta tarkkuutta. Nykyään saatavilla on erittäin tarkkoja kuvia ja maastomalleja, joten monoplottin-mittauksen tarkkuus on melko hyvä. Jos stereokuvia ei ole saatavilla tai stereokartoitus ei muuten ole mahdollista, on monoplottin hyvä vaihtoehto. Nykyään on olemassa ohjelmia, joissa on yksikuvamittaukseen tarvittavat toiminnot. Näillä ohjelmilla monoplottin-mittaus käy helposti ja nopeasti.

Menetelmää on käytetty esimerkiksi metsätaloudessa, jäätikkötutkimuksissa sekä pinta-ala ja tilavuuslaskennassa. Metsätaloudessa monoplotting on hyödyksi rajojen mittaamisessa ja eri aikoina otettujen kuvien analysoinnissa ja vertaamisessa. Jäätikkötutkimuksissa tarkkaillaan jäätiköiden liikkeitä. Pinta-ala- ja tilavuuslaskennassa määritetään alueen kokoa ja sen sisältämää maamassaa erilaisiin tarkoituksiin. (Flühler M., 2004(program))

Sovellusalueita on jo nyt useita, ja tekniikan vielä kehittyessä varmasti vielä paljon lisää on tulossa.



Kuva 7: Monoplotting-menetelmän sovelluskohteita. (Flühler M., 2004(program))

9. Monoplotting vs. stereoplotting

Monoplotting-menetelmän kilpailijoita ovat muun muassa stereoplotting (stereomittaus), ortokuvilta digitointi ja digitointi muilta kuin ortokuvilta. (Stefanovic P. et. al., 1989)

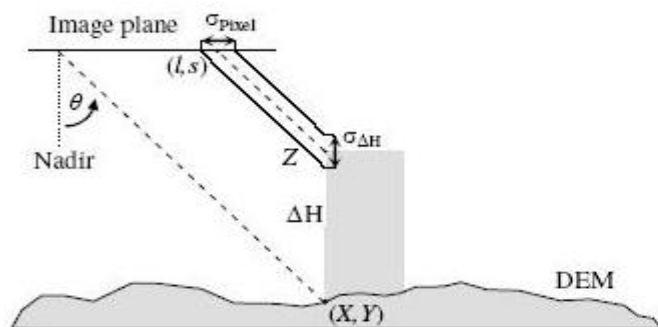
Stereomittauksessa mittaja näkee maaston tarkasti kolmiulotteisena, ja tuloksena on hyvä tarkkuus. Stereomittauksessa ei tarvita lainkaan maastomallia, sillä stereonäkymä korvaa sen. Yksikuvamittauksessa taas tarvitaan vain yksi kuva, kun stereomittauksessa tarvitaan kaksi kuvaa jotka peittävät toisiaan. Stereomittauksessa mittajan tulee osata mitata korkeudet oikein, ja tämä vaatii jonkin verran harjoittelua jotta kolmiulotteisen näkymän osaa tulkita oikein. (Stefanovic P. et. al., 1989)

10. Ohjelmia

10.1 Barista

Barista on Melbournen Yliopistossa kehitetty sovellus tarkkojen satelliittikuvien käsittelyyn. Barista-ohjelmalle on tehty monoplotting-toteutus, jossa orientointeihin voi vaihtoehtoisesti käyttää joko rationaalipolynomikertoimia (rational polynomial coefficients, RPCs) tai affiinista muunnosta. Mittaus on mahdollista missä tahansa koordinaattisysteemissä. Ohjelma laskee tasosijainnin pienimmän neliösumman menetelmällä, ja lopullinen korkeusarvo määritetään interpoloimalla korkeusmallista. Käyttäjä voi mitata yksittäisiä pisteitä, viivoja, korkeuseroja ja rakennusten nurkkapisteitä. Ohjelmalla on mahdollista tehdä erilaisia koordinaattimuunnoksia, jotta kaikki tieto olisi samassa kordinaatistossa. (Willneff J. et al., 2005)

Rakennusten korkeuksien mittaaminen on mahdollista tietyin erikoistoimenpitein (Kuva 8). Rakennuksen maan pinnalla oleva nurkka mitataan tavallisella monoplotting-menetelmällä. Tämän jälkeen mitataan rakennuksen katon nurkkapiste, joka on suoraan ensimmäiseksi mitatun pisteen yläpuolella. Pienimmän neliösumman menetelmällä lasketaan 3D-koordinaatit rakennuksen alkupisteelle (maanpinnalla oleva) ja kuvakoordinaatit kattopisteelle. Alkupisteen X ja Y koordinaatteja sekä kattopisteen kuvakoordinaatteja käytetään Z-arvon laskemiseen. Z-arvo on rakennuksen katon korkeusarvo. (Willneff J. et al., 2005)



Kuva 8: Rakennuksen korkeuden mittaaminen Barista-ohjelmalla. (Willneff J. et al., 2005, Figure 3.)

Rakennusten mittaaminen yhdeltä satelliittikuvalta on mahdollista seuraavin ehdoin. Ainakin yksi pohjapiste on näkyvässä kuvassa ja se pystytään mittaamaan monoplotting-menetelmällä. Pohjapistettä vastaava kattopiste on myös mahdollista mitata. Oletuksena on, että kattopisteet ovat kaikki samassa tasossa. Jokaisella kattopisteellä on vastaava pohjapiste, joka lasketaan korkeusmallin leikkauksena. (Willneff J. et al., 2005)

10.2 DiMoTeP

DiMoTeP (Digital Monoplotting Teaching Program) on opetuskäyttöön tarkoitettu monoplotting-mittausohjelma (Kuva 9). Ohjelma on vapaasti saatavana internetissä osoitteessa <http://www.photogrammetry.ethz.ch> -> Research -> Projects -> Students works. Ohjelman on tehnyt Matthias Flüher osana diplomityötään kesällä 2004.

DiMoTeP jakautuu kahteen osaan. Teoreettinen osa käsittelee monoplottin-mittauksen perusteet, ja tätä voidaan käyttää esimerkiksi luennoilla ja harjoituksissa. Toinen osa sisältää demon, jonka avulla voi oikealla aineistolla suorittaa mittauksia monoplottin-menetelmällä. Ohjelma tarvitsee ilma- tai ortokuvan orientointitietoineen sekä korkeusmallin, jonka jälkeen ohjelma laskee kohteen 3D-koordinaatit reaaliaikaisena. Mittaustulokset voi tallentaa joko teksti- tai VRML-tiedostona visualisointia varten.



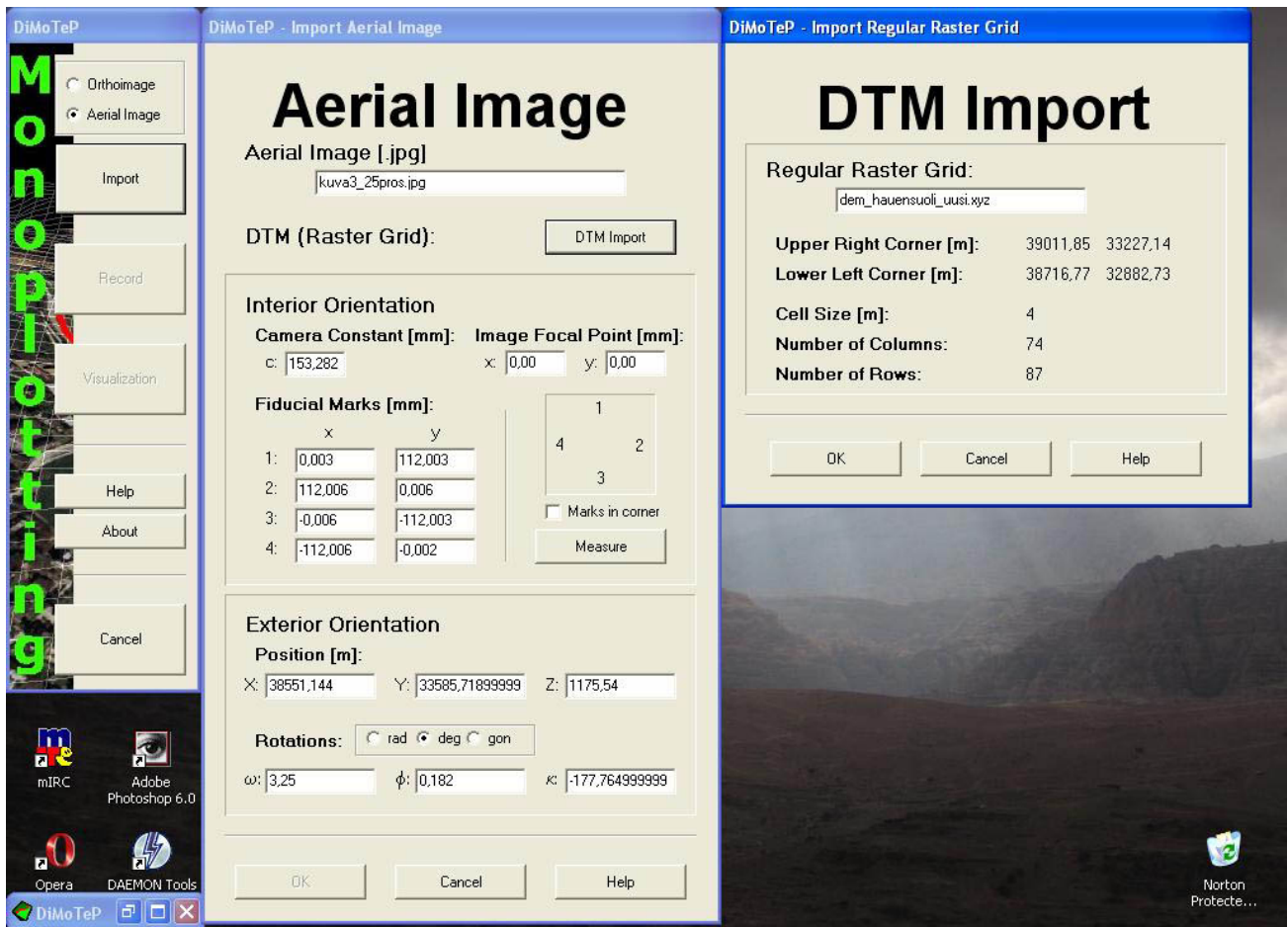
Kuva 9: DiMoTeP-ohjelman aloitussivu (Flühler M., 2004(program))

11. Oma tutkimus DiMoTeP-ohjelmalla

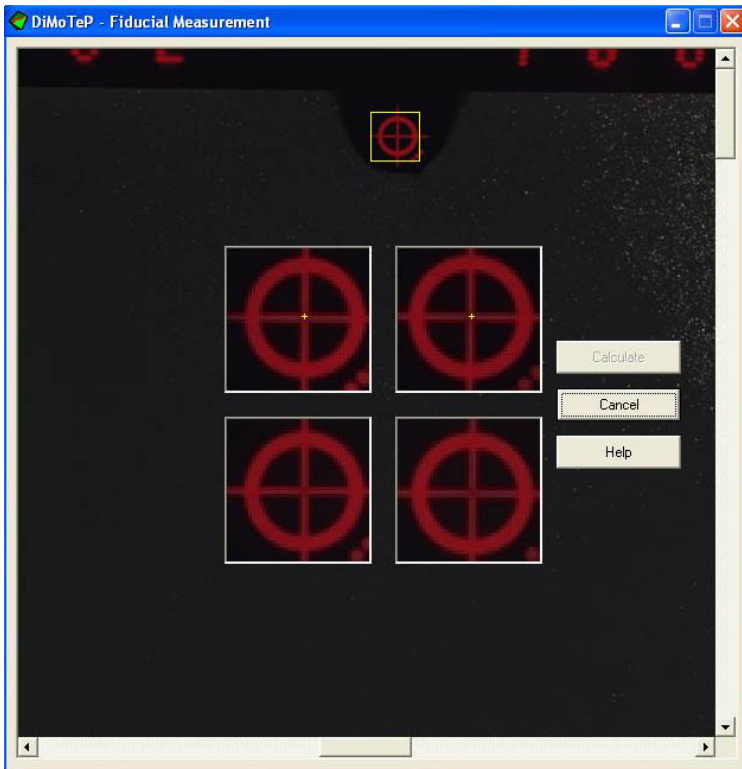
Testasin DiMoTeP-ohjelmaa Fotogrammetrian ja Kaukokartoituksen laboratorion omilla aineistoilla. Testiaineistona minulla oli Hangon saaristossa sijaitsevasta kapeasta salmesta eli Hauensuolesta otettu ilmakekuva sekä samalta alueelta oleva korkeusmalli. Ilmakekuvan sisäinen ja ulkoinen orientointi olivat tunnettuja. Kuva sisälsi myös reunamerkit, joten ne oli helppo mitata kuvasta ohjelman avulla. Korkeusmalli oli säännöllinen ruudukko xyz-tiedostona. Yhden ruudun koko korkeusmallilla oli 4*4 metriä.

Ohjelma toimii seuraavasti. Aluksi valitaan käytettävä ortokuva tai ilmakekuva, jonka pitää olla jpg-formaatissa. Itse valitsin testissani ilmakekuvan. Seuraavaksi valitaan korkeusmalli, jonka täytyy olla säännöllinen ruutuverkko xyz- tai arc-tiedostona. Ohjelmalle syötetään tiedot kameravakiosta, pääpisteen paikasta, reunamerkkien sijainnista sekä ulkoisen orientoinnin muunnosparametreista

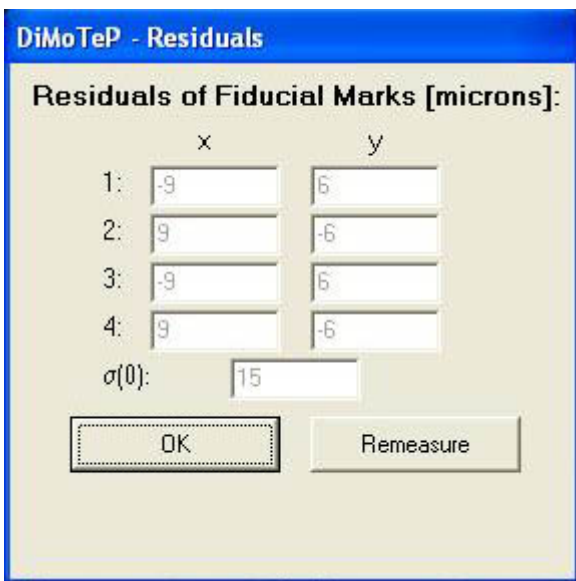
(Kuva10). Lisäksi kuvalta mitataan reunamerkit (Kuva 11), ja ohjelma laskee näistä mittauksista residuaalit kullekin reunamerkille (Kuva 12).



Kuva 10: DiMoTeP-ohjelman käyttöliittymä, kun valitaan aineisto mittauksista varten. (Flühler M., 2004(program))

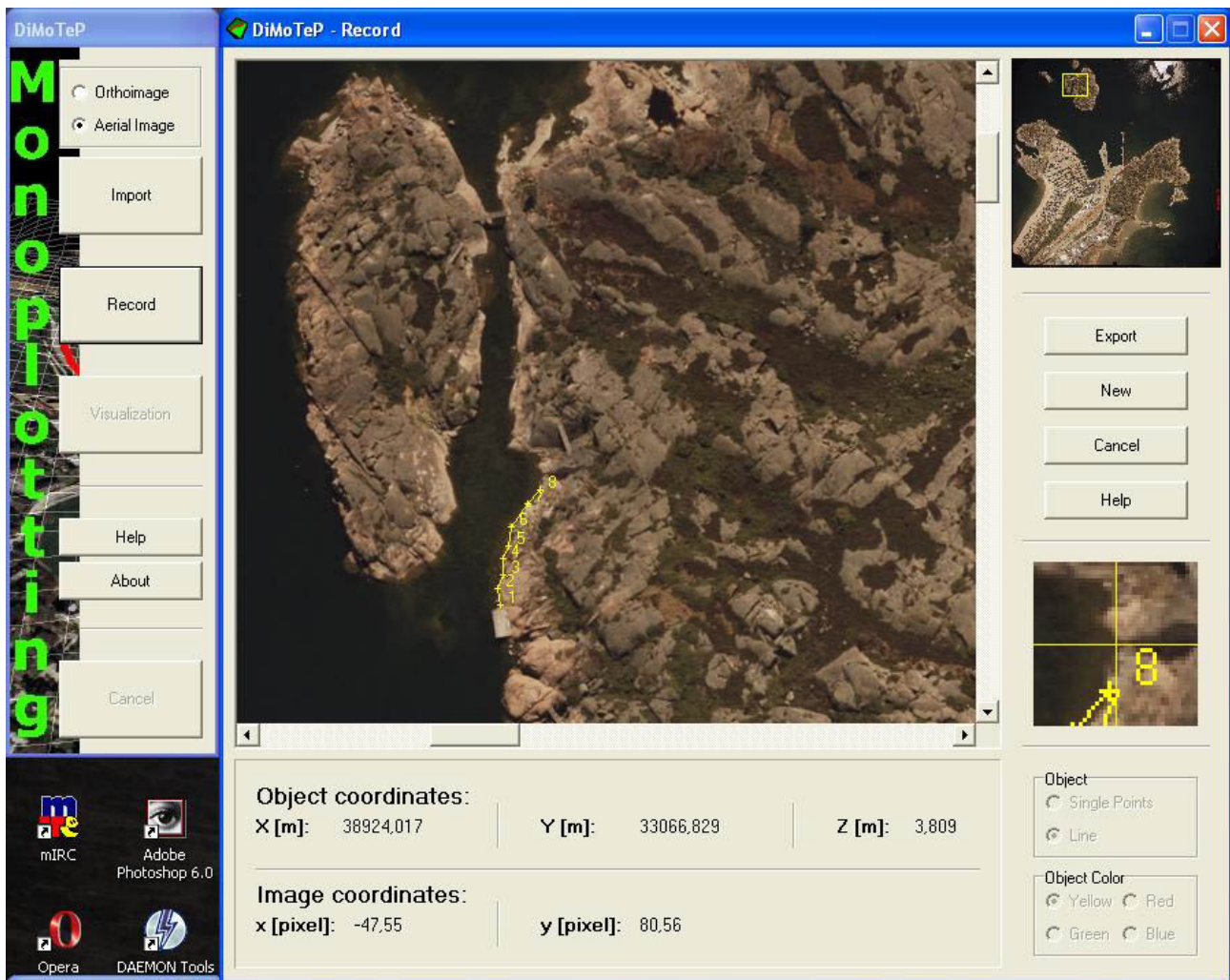


Kuva 11: Reunamerkkien mittaaminen DiMoTeP-ohjelmalla. (Flühler M., 2004(program))



Kuva 12: Ohjelman laskemat residuaalit mitatuille reunamerkeille. (Flühler M., 2004(program))

Kun kaikki tarvittavat tiedot on syötetty ja reunamerkit mitattu, voi itse kuvalta mittaaminen alkaa. Tällöin avataan ikkuna, jossa näkyy itse kuva, kuvakoordinaatit x ja y, kohdekoordinaatit X, Y ja Z, sekä muita tarvittavia tietoja (Kuva 13).



Kuva 13: DiMoTeP-ohjelman mittaussikkuna. (Flühler M., 2004(program))

Ohjelmalla voi mitata pisteitä tai viivaa, ja mittaustulokset voi tallentaa erilliseen tiedostoon jatkokäyttöä varten (Taulukko 1).

ID	X	Y	Z
1	38935.80	33105.85	3.51
2	38936.61	33101.23	4.03
3	38934.93	33097.28	4.48
4	38936.35	33090.78	0.60
5	38933.96	33088.13	3.16
6	38933.34	33082.37	3.06
7	38928.47	33075.35	3.34
8	38925.24	33070.58	2.13

Taulukko 1: Kuvassa 13 mitatun viivan pisteiden koordinaatit.

Ohjelmaa testatessani törmäsin muutamiin ongelmiin. Aluksi käytin aineistona Jordaniasta otettua maakuvaa ja saman alueen korkeusmallia. Käyttämäni kuva ei sisältänyt reunamerkkejä. Ohjelma edellyttää mittaamisen onnistumiseksi reunamerkkien mittaamista, joten merkitsin itse kuvalle nämä kohdat suoraan pääpisteen sijainnin avulla. Näillä aineistoilla mittaaminen ei onnistunut.

Kuva kyllä tuli näkyviin mittausikkunassa, ja kuvakoordinaatit olivat oikein. Kohdekoordinaateiksi ohjelma antoi aina arvon -9999,000. Liekö ongelmana ollut se, että käytin testissä ilmakuvan sijasta maakuvaa.

Jordanian aineiston jälkeen otin käyttööni Hauensuolen materiaalit, ja tällöin ohjelma toimi melko moitteettomasti. Sekä pisteiden että viivan mittaaminen onnistui, ja tulokset pystyi tallentamaan tekstitiedostoon. Välillä ohjelma saattoi jumitua, jos hiirtä liikutti liian nopeasti kuvan päällä.

Täytyy kuitenkin muistaa, että DiMoTep on Diplomityönä tehty demo-ohjelma, jota on testattu vain muutamilla aineistoilla. Käytettävien aineistojen täytyy olla tarkasti oikeassa formaatissa, jotta niitä voi käyttää.

12. Johtopäätelmät

Monoplotting-mittaus on melko uusi mittausmenetelmä. Kun B. Makarovic vuonna 1973 ensimmäisenä esitteli menetelmän, ei sitä tuolloin vielä kovinkaan moni ottanut käyttöön. Vaikka idea on yksinkertainen, vaatii menetelmä toimiakseen digitaalisessa muodossa olevan maastomallin sekä oikeanlaiset laitteet, joilla mittaus voidaan suorittaa. Siihen aikaan digitaalisessa muodossa olevia maastomalleja oli hyvin vähän ja mittauslaitteet olivat kalliita.

Nykyään materiaalit ja laitteet eivät enää ole ongelmana, ja menetelmää onkin käytetty monissa eri sovelluksissa. Menetelmän helppouden ansiosta lähes kuka tahansa voi mitata monoplotting-menetelmällä, sillä muuta ei tarvita kuin aineistot, tietokone ja mittaamiseen soveltuva ohjelma.

Viitteet

(Agouris P. et. al., 1994)

Agouris P., Stallmann D., Li H., 1994, "Semi-Automatic Monoplotting on a Digital Photogrammetric Station", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30/2, ISPRS Commission II, Intercommission II/III, Canada, pp. 146-153

(Doneus M., 1999)

Doneus M., 1999, Aerial Archive, Analysis of Obliques, Institute for prehistory and protohistory of the University of Vienna, http://www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/archiv/aa_mano.htm, sivu päivitetty 20.4.1999, sivu luettu 23.1.2006

(Flühler M., 2004(program))

Flühler M., 2004, Digital Monoplotting Teaching Program – DiMoTep version 1.1, Diploma thesis Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology Zürich

(Flühler M., 2004(manual))

Flühler M., 2004, "Manual for the Digital Monoplotting Teaching Program – DiMoTep", Diploma thesis Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology Zürich

(Haggrén H., 2002)

Haggrén H., 2002, Fotogrammetrian yleiskurssi, Luento 4, ”Kuvahavainnot”, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, <http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/4/4.html>, sivu päivitetty 11.10.2002, sivu luettu 23.1.2006

(Haggrén H. et. al., 2005)

Haggrén H., Koistinen K., 2005, Fotogrammetrian perusteet, Luento 7, ”Fotogrammetrinen mittausprosessi”, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, <http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/7/7.html>, sivu päivitetty 21.2.2005, sivu luettu 23.1.2006

(Haggrén H. et. al., 2004)

Haggrén H., Koistinen K., 2004, Fotogrammetrian perusteet, Luento 8, ”Ilmakuvaus”, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, <http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/8/8.html>, sivu päivitetty 10.2.2004, sivu luettu 23.1.2006

(Honkavaara E., 2003)

Honkavaara E., 2003, ”Digitaalisten kuvien laatu”, Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu n:o 40, Maanmittaustieteiden päivät 20.-21.11.2003, Pikseleitä ja pistepilviä – kuvauksen uudet ulottuvuudet, Maanmittaustieteiden Seura ry, Suomen Maanmittausinsinöörien Liitto ry, Espoo, pp. 48, <http://mts.fgi.fi/paivat/2003/paperit/honkavaara.pdf>, sivu luettu 6.1.2006

(Inno-CAD Oy, 2006)

Inno-CAD Oy, 2006, Maastomallikuvat (Kuva 2): <http://www.innocad.com/suunnit.htm>, sivu päivitetty 15.1.2006, sivu luettu 23.1.2006

(Jauregui M. et al., 1998)

Jauregui M., Vilchez J., Chacón L., 1998, “A Procedure for map updating using digital monoplotting and DTMs”, IAPRS, Vol. 32, Part 4, “GIS-Between Visions and Applications”, ISPRS Commission IV Symposium on GIS, Stuttgart, Germany, pp. 270

(Rönholm P. et. al., 2004)

Rönholm P., Haggrén H., 2004, Fotogrammetrian yleiskurssi, Luento 9, ”Ortokuvaus”, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/9/9_pr2004.html#Ortokuvaus, sivu päivitetty 13.10.2004, sivu luettu 23.1.2006

(Rönholm P. et. al., 2005)

Rönholm P., Haggrén H., 2005, Fotogrammetrian yleiskurssi, Luento 1, ”Yksikuvamittaus”, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio, http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/1/1_pr2005.html#Yksikuvamittaus, sivu päivitetty 13.9.2004, sivu luettu 23.1.2006

(Schwidefsky K. et. al., 1978)

Schwidefsky K., Ackermann F., 1978, ”Fotogrammetria”, Otapaino, Espoo, pp. 149

(Stefanovic P. et. al., 1989)

Stefanovic P., Drummond J., Oybode T., 1989, “Digital monoplotting: Its potential and realisation”, Technical Papers 1989 ASPRS/ACSM Annual Convention, American Congress on Surveying and Mapping, ASPRS, Bethesda, MD, USA, pp. 29

(Tykkälä T., 2005)

Tykkälä T., 2005, "Delaunay-kolmiointi", Seminaariesitelmä, T-106.850 Geometriset algoritmit, Tietotekniikan osasto, TKK, Espoo

(Willneff J. et al., 2005)

Willneff J., Poon J., Fraser C., 2005, "Single-image high-resolution satellite data for 3D information extraction", Cooperative Research Center for Spatial Information & Department of Geomatics, University of Melbourne, ISPRS Hannover Workshop