

Luento 4: Kolmiointihavainnot

Luento 4: Kolmiointihavainnot

Reconstruction procedure

Kuvahavainnot

Kollineaarisuusyhtälö

Kuvahavainnot suuntahavaintoina

Kuvausvirheet

Refraktio

Karttaprojektio ja maankaarevuus

Objektiivin virheet

Sisäinen orientointi

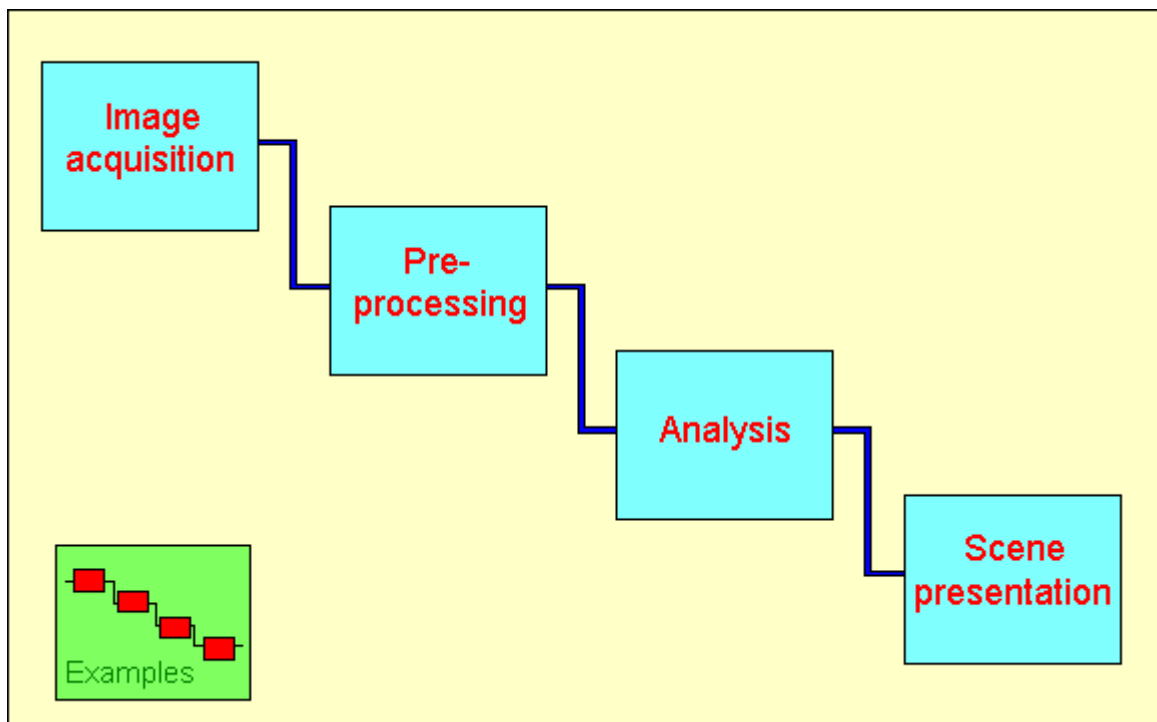
Kalibrointimenetelmät

Goniometrikalibrointi

Testikenttäkalibrointi

Testikenttäkalibrointi suorassa georeferoinnissa

Kirjallisuutta



Reconstruction procedure.

Reconstruction procedure

- Image acquisition (e.g. control survey, targeting, photography, image digitizing)

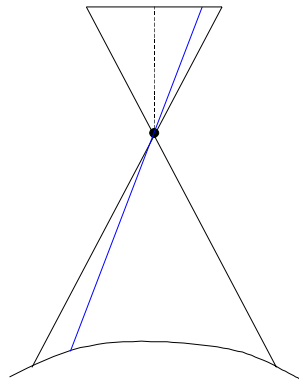
- Preprocessing (e.g. radiometric transformation, orientation, coordinate transformation, georeferencing)
- Analysis (e.g. image interpretation, 3D-digitizing, modelling)
- Scene presentation (e.g. orthophotography, cartography, texture mapping, VRML-modeling)

Kuvahavainnot

Kollineaarisuusyhtälö

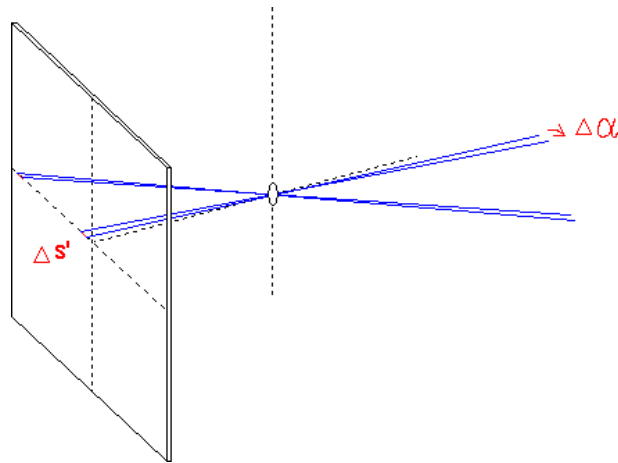
$$x'_{ij} = -c \frac{a_{11i}(X_j - X_{oi}) + a_{21i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{31i}(Z_j - Z_{oi})}{a_{13i}(X_j - X_{oi}) + a_{23i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{33i}(Z_j - Z_{oi})}$$

$$y'_{ij} = -c \frac{a_{12i}(X_j - X_{oi}) + a_{22i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{32i}(Z_j - Z_{oi})}{a_{13i}(X_j - X_{oi}) + a_{23i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{33i}(Z_j - Z_{oi})}$$

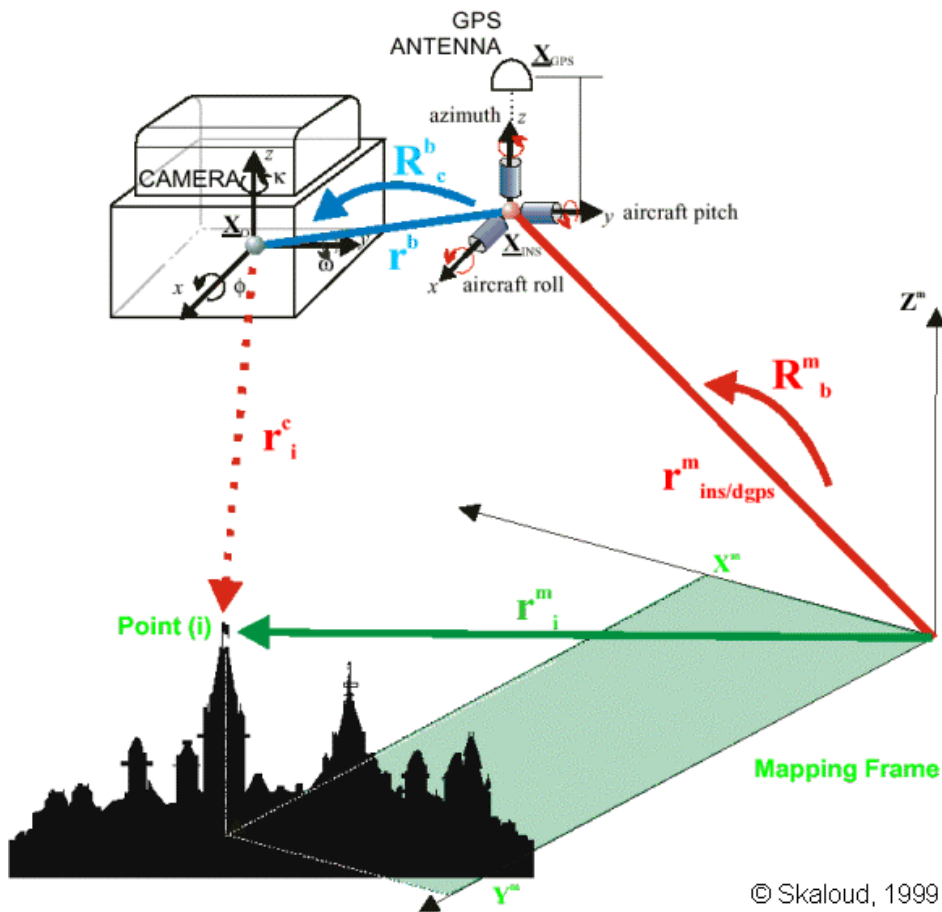


Kuvahavainnot suuntahavaintoina

- Kolmioinnissa havaintoina käytetään kuvakoordinaatteja, jotka muunnetaan pääpistekeskisiksi kamerakoordinaateiksi.
- Kamerakoordinaatit vastaavat suuntahavaintoja, jotka ovat tuttuja geodeettisesta paikanmäärittämisestä.
- Tavanomaisessa ilmakuvakamerassa, jonka kuvakoko on 230 mm x 230 mm:
 - kameravakio $c = 150$ mm, jolloin 0,001 mm:n eli 1 μ m:n [mikrometrin, mikronin] erotuskyky kuvahavainnossa vastaa suuntahavainnon erotuskykyä 0,4 mgon kuvan keskellä, ja 0,3 mgon kuvan reunassa, tai
 - kameravakio $c = 210$ mm, jolloin 0,001 mm:n erotuskyky kuvahavainnossa vastaa suuntahavainnon erotuskykyä 0,3 mgon kuvan keskellä, ja 0,2 mgon kuvan reunassa.



Suuntahavaintojen erotuskyky.



© Skaloud, 1999

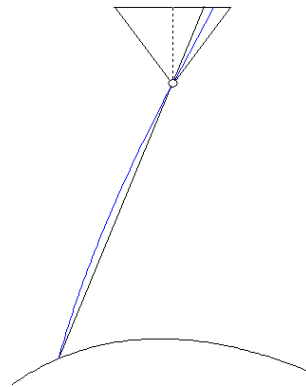
Measurement of image orientation in the air with subsequent determination of object space quantities on the ground is equivalent to extrapolation. As small errors may have large consequences, system needs to be extremely well calibrated. (Heipke, 2001)

Kuvausvirheet

- Kuvablokin samasuoraisuusehto edellyttää lineaarista kuvausta pisteen kohde- ja kuvakoordinaattien välillä.
- Poikkeamia aiheuttavat:
 - karttaprojektio ja maankaarevuus

- refraktio ilmakehässä
- kameran objektiivin virheet
- kameran kuvataso eli kuvaportin poikkeamat tasomaisuudesta (= poikkeama kuvahavaintojen samatasoisuudesta)
- filmin deformatuminen kuvanoton ja mittaushetken välillä
- Em. virheiden vaikutus voidaan kompensoida joko korjaamalla havaintoja, tai laajentamalla samasuoraisuusehtoa lisäparametrein blokkitasoituksen yhteydessä.
- Edellisten lisäksi orientointivirheet aiheuttavat poikkeamia samasuoraisuusehdon toteutumiseen.
- Suoran georeferoinnin menetelmien kehittymisen myötä kuvausvirheet ja kalibrointi ovat jälleen nousemassa tärkeiksi kysymyksiksi.
- [Refraction and earth curvature](#)

Refraktio

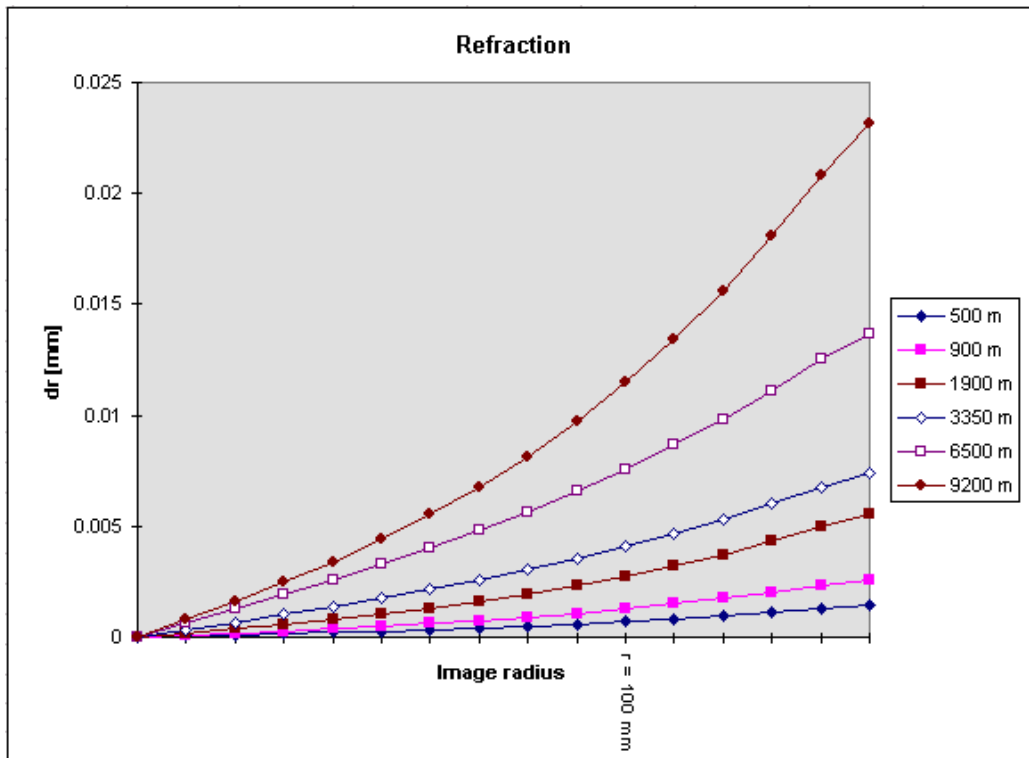


Refraktio.

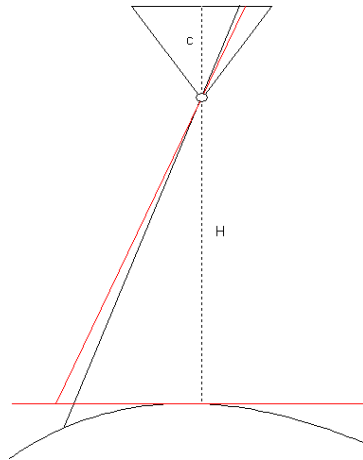
$$dr = k \cdot \left(r + \frac{r^3}{c^2} \right)$$

$$k = \left(\frac{2410 \cdot H}{H^2 - 6 \cdot H + 250} - \frac{2410 \cdot h}{h^2 - 6 \cdot h + 250} \cdot \frac{h}{H} \right) \cdot 10^{-6}$$

H	lentokorkeus [km]
h	maanpinnan korkeus [km]
r	pisteen etäisyys pääpisteestä [mm]
c	kameravakio [mm]



Karttaprojektio ja maankaarevus



Maankaarevus ja karttaprojektio.

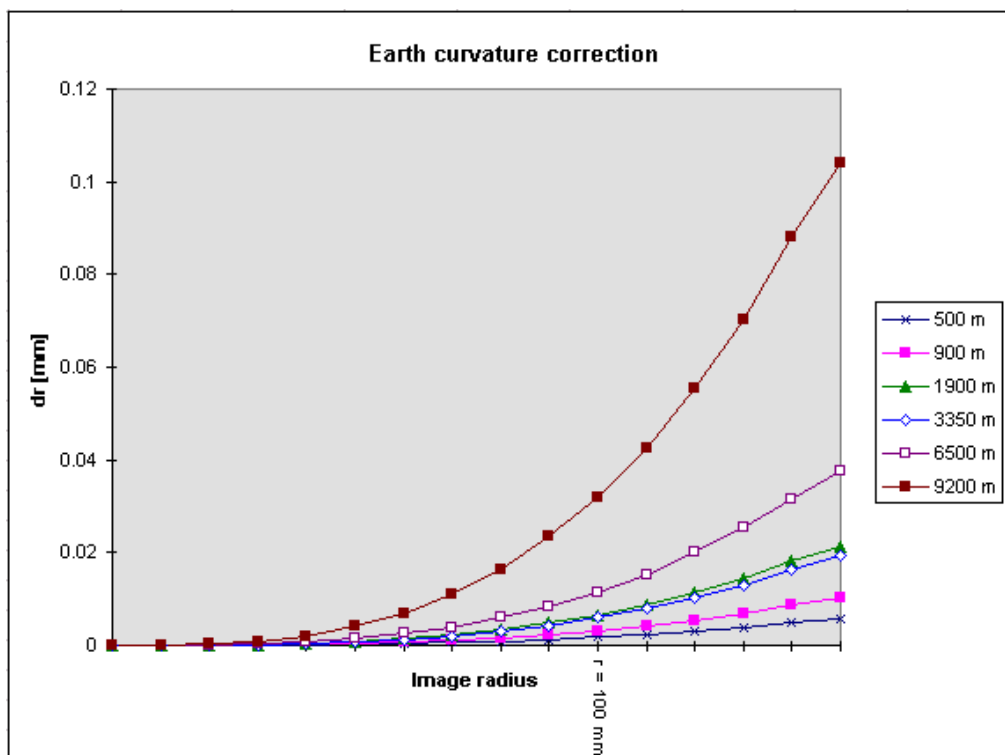
Maankaarevuuden korjaus

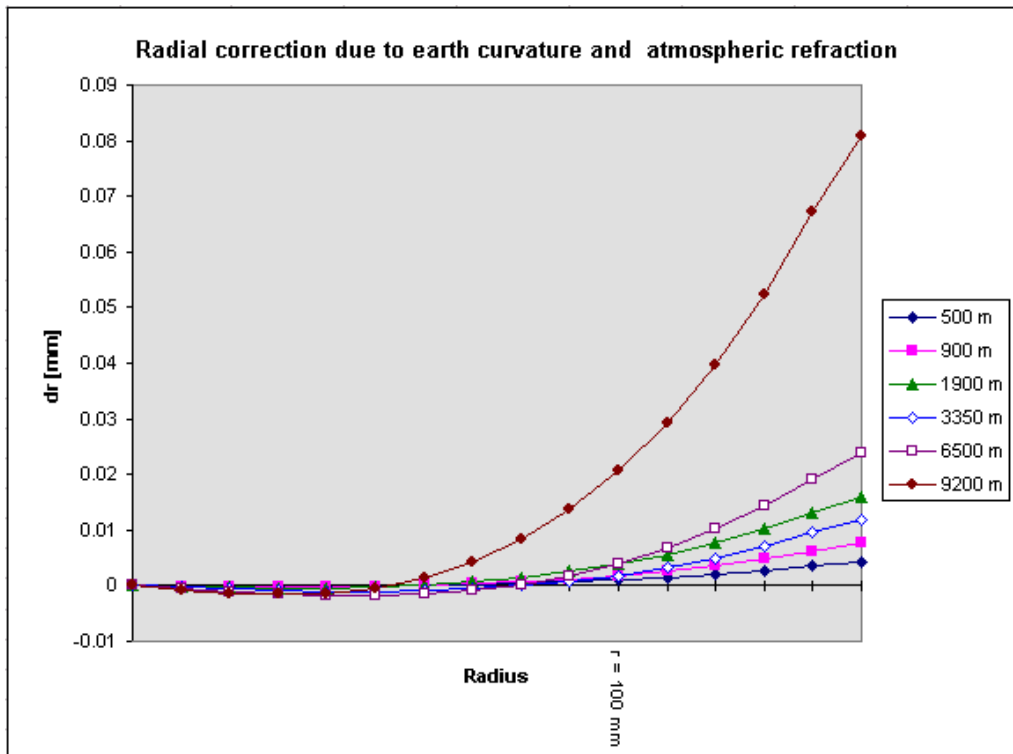
$$dr = \frac{H \cdot r^3}{2 \cdot R \cdot c^2}$$

Projektiokorjaus

$$\begin{cases} dx = \frac{Y^2}{2 \cdot R^2} \cdot x + \frac{r^2 \cdot H \cdot Y_0}{2 \cdot R^2 \cdot c} \cdot \sin \alpha \\ dy = \frac{Y^2}{2 \cdot R^2} \cdot y + \frac{r^2 \cdot H \cdot Y_0}{2 \cdot R^2 \cdot c} \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

- R maan keskikaarevuussäde [km]
- Y projektiokeskuksen etäisyys keskimeridiaanista [km]
- Y₀ pisteen etäisyys keskimeridiaanista [km]
- α x-akselin suunta Gauss-Krüger-tasolla



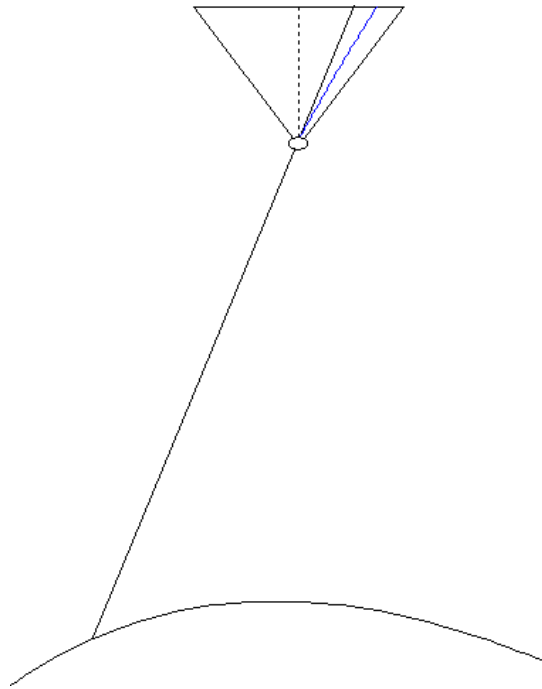


- References
 - [Marko Ollikainen, The Finnish national grid coordinate system](#)

Objektiivin virheet

- Objektiivin piirtovirheet johtuvat eroista osalinssien refraktio-ominaisuuksissa ja objektiivin valmistuksessa syntyvistä valmistusepä tarkkuuksista.
- Piirtovirhettä tarkastellaan valonsäteen poikkeamana suorasta, joka kulkee kohdepisteen, projektiokeskuksen ja terävänä kuvautuvan kuvapisteen kautta. Piirtovirheen tyypit: symmetrinen radiaalinen piirtovirhe (radial distortion), epäkeskisyys piirtovirhe (decentering distortion) ja epäsäännöllinen piirtovirhe.
- Piirtovirhe määritetään kuvatasolla joko symmetrisenä tai epäkeskisenä kuvan pääpisteen suhteen.
- Symmetrinen piirtovirhe on tietyllä etäisyydellä pääpisteestä kaikissa suunnissa sama, ja on radiaalista eli siirtää kuvapistettä joko pääpisteen suuntaan tai siitä poispäin.
- Epäkeskinen piirtovirhe on symmetrinen pääpisteen kautta kulkevan lävistäjän suhteen, ja voi olla joko radiaalista tai tangentialista.
- [Radial distortion](#)

Radiaalinen piirtovirhe



Radiaalisen piirtovirheen syntyminen.

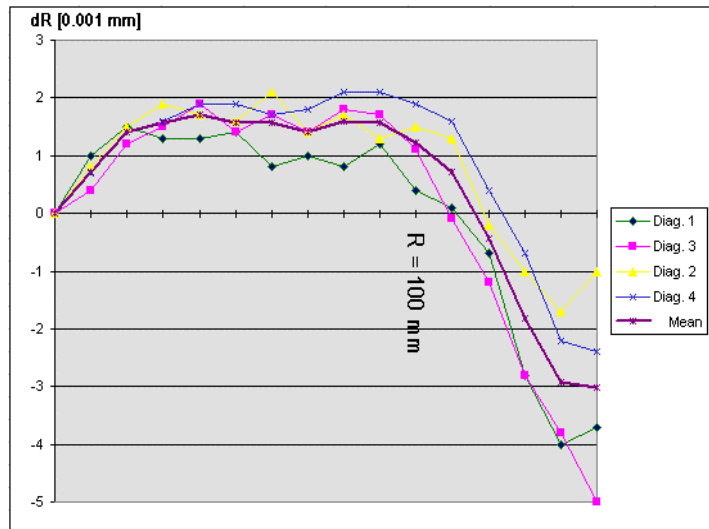
$$\delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots$$

$$\delta r_x = (x - x_0) (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

$$\delta r_y = (y - y_0) (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

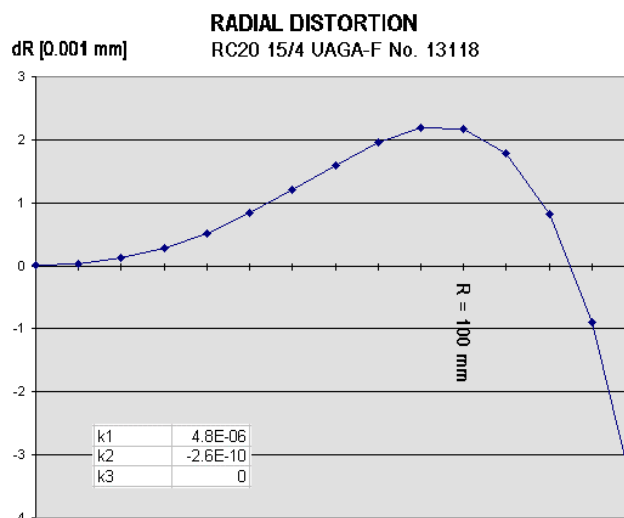
Radiaalisen piirtovirheen vaikutus kamerakoordinaatteihin. Ks. myös: [Esimerkki](#) piirtovirheestä digitaalikameroilla.



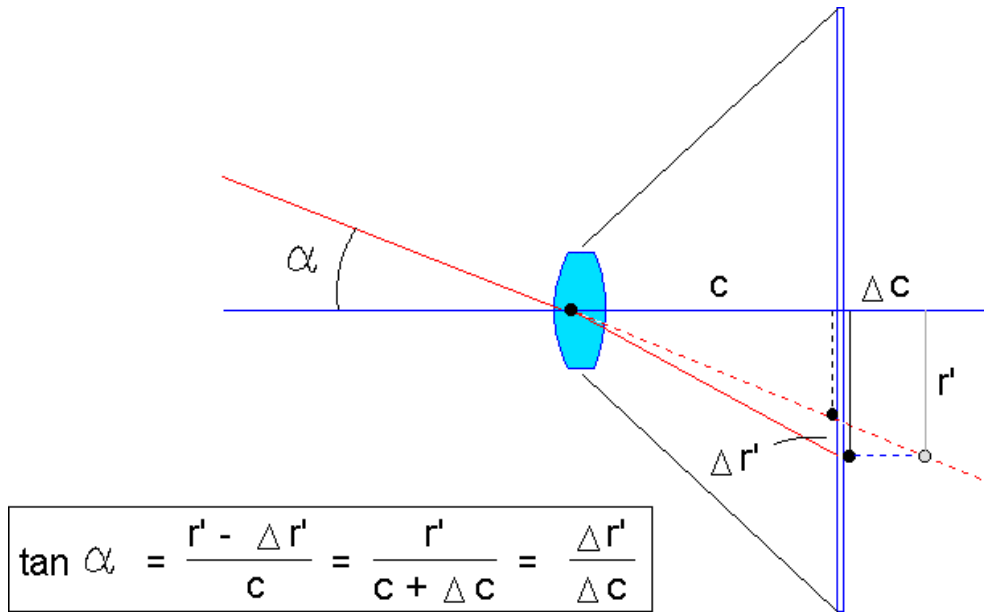
Radiaalinen piirtovirhe kuvan neljän lävistäjän suunnassa.

Radius	Diag. 1	Diag. 3	Diag. 2	Diag. 4	Mean
0	0	0	0	0	0
10	1	0.4	0.8	0.7	0.725
20	1.5	1.2	1.5	1.4	1.4
30	1.3	1.5	1.9	1.6	1.575
40	1.3	1.9	1.7	1.9	1.7
50	1.4	1.4	1.6	1.9	1.575
60	0.8	1.7	2.1	1.7	1.575
70	1	1.4	1.4	1.8	1.4
80	0.8	1.8	1.7	2.1	1.6
90	1.2	1.7	1.3	2.1	1.575
100	0.4	1.1	1.5	1.9	1.225
110	0.1	-0.1	1.3	1.6	0.725
120	-0.7	-1.2	-0.2	0.4	-0.425
130	-2.8	-2.8	-1	-0.7	-1.825
140	-4	-3.8	-1.7	-2.2	-2.925
148	-3.7	-5	-1	-2.4	-3.025

Radiaalinen piirtovirhe arvoina.

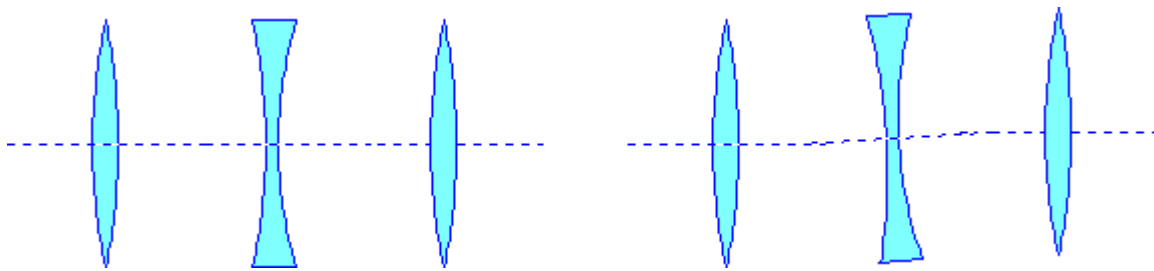


Radiaalinen piirtovirhe funktiona.

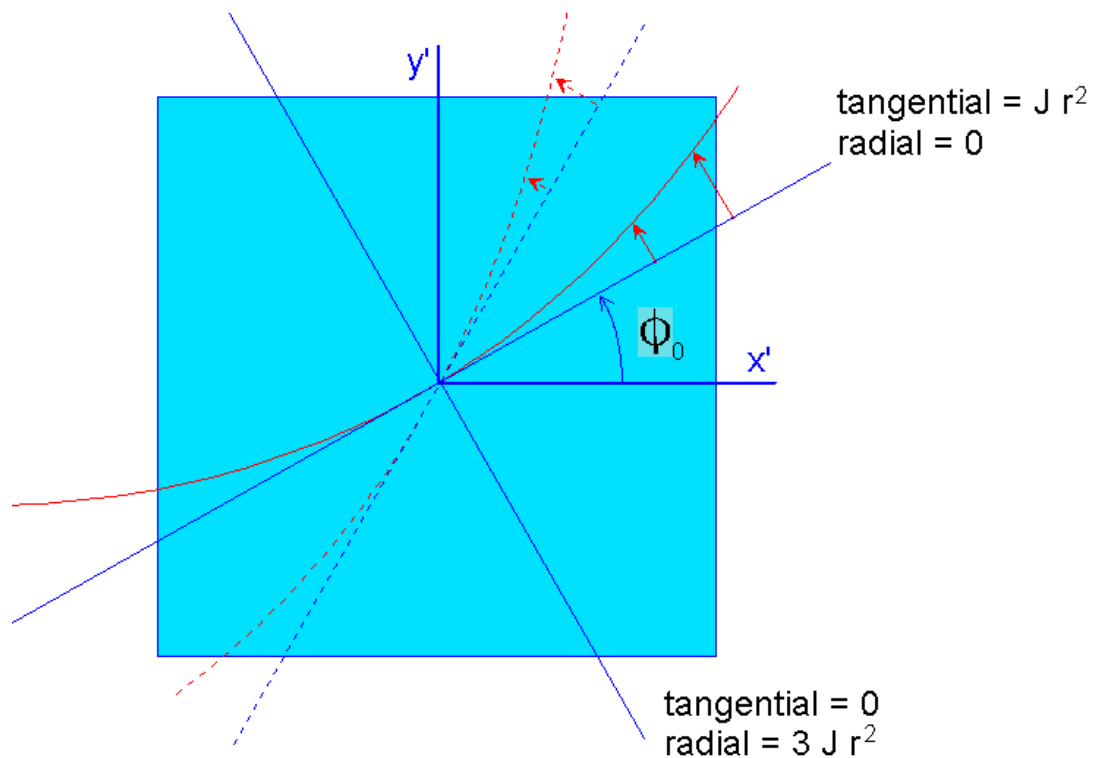


Kameravakio c on suure, jonka arvo määritetään kamerakalibroinnin yhteydessä. Piirtovirheet dr' lasketaan tällä kameravakion arvolla kuvapisteen pääpiste-etäisyyden r' suhteen. Piirtovirhe voitaisiin laskea myös kameravakion korjauksena Δc , jolla korjattaisiin pisteen kamerakoordinaattia $z = -(c + \Delta c)$. Näin ei kuitenkaan käytännössä tehdä, koska silloin kaikille kuvapisteille saataisiin erisuuruiset z -koordinaattiarvot. Sen sijaan piirtovirheet korjataan kunkin pisteen kamerakoordinaateista x ja y , ja ne saavat samansuuruiset z -koordinaattiarvot ($z = -c$).

Tangentiaalinen piirtovirhe



EpäkeskisyySPIirtovirhe johtuu osalinssien suuntausvirheestä objektiivin valmistuksessa.



Epäkeskisyyspiirtovirhe sisältää säteen suuntaisen (radiaalisen) ja sitä vastaan kohtisuoran (tangentialisen) osan. Kuvan lävistäjällä, joka muodostaa kuvan x-akselin kanssa **kulman** Φ_0 , tangentialinen osa on suurimmillaan eikä radiaalista osaa ole lainkaan, kun taas tätä vastaan kohtisuoralla lävistäjällä osat ovat päinvastoin.

$$\delta d_r = 3 (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \sin(\phi - \phi_0)$$

$$\delta d_t = (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \cos(\phi - \phi_0)$$

$$\delta d_x = P_1 (r^2 + 2 x'^2) + 2 P_2 x' y'$$

$$\delta d_y = 2 P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2 y'^2)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

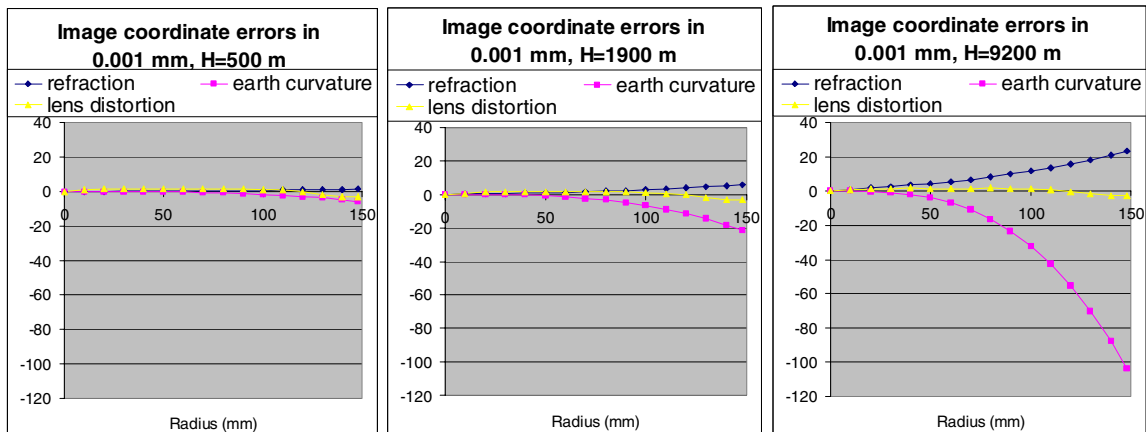
$$P_1 = J \sin \phi_0$$

$$P_2 = J \cos \phi_0$$

$$J = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

$$\tan \phi_0 = \frac{P_1}{P_2}$$

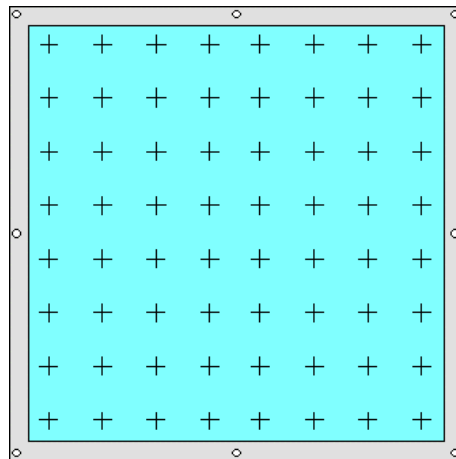
Epäkeskisyyspiirtovirheen vaikutus kamerakoordinaatteihin.



Refraktion, maankaarevuuden ja radiaalisen piirtovirheen vaikutus kuvakoordinaatteihin kuvattaessa 500 m, 1900 m ja 9200 m korkeudesta.

Sisäinen orientointi

- Sisäinen orientointi on kuvattu kameran kalibrointitodistuksessa:
 - [Fotogrammetrian yleiskurssi, luento 4](#)
 - vakioreunamerkit,
 - pääpisteet
 - kameravakio.
- Kamerassa voi olla kuvaportin reunamerkkien lisäksi réseau-gitteri. Gitteri on lasilevy, joka sijaitsee kameran kuvaportissa. Gitteri on erittäin tarkka tasavälinen rististö, joka kuvautuu filmille. Gitteriristien avulla kamerakoordinaatisto määritetään tasaisesti yli koko kuva-alan ja tarkemmin kuin pelkillä reunamerkeillä. Tällä on merkitystä korjattaessa kuvahavainnoista filmin muodonmuutoksista aiheutuvia virheitä.



Reseau-ristikko kameran kuvaportissa.

Kalibrointimenetelmät

Komponenttikalibrointi

- Systemaattiset virheet määritetään laboratorio-olosuhteissa. Virheet voidaan erottaa toisistaan koejärjestelyin.

- Kalibroittavat ominaisuudet
 - kameravakio
 - pääpisteet
 - kuvaportti
 - piirtovirheet
 - optiikan ja filmin erotuskyky

Testikenttäkalibrointi

- Järjestelmän systemaattiset virheet määritetään käytännön olosuhteissa tarkasti tunnetun testikentän avulla. Virheet määritetään blokkitasoituksen yhteydessä ja erotetaan toisistaan lisäparametreina.
- Kalibroittavat ominaisuudet
 - kameravakio
 - pääpisteet
 - piirtovirheet
 - filmin muodonmuutosmalli
 - refraktiomalli
 - kuvausjärjestelmän erotuskyky
- Nykyisin testikenttäkalibroinnilla määritetään myös GPS/IMU/kamerajärjestelmän kalibrointi. Tällöin keskeisiä kalibroittavia suureita ovat kameravakio, pääpiste ja IMU:n ja kamera-akseliston väliset kallistukset.

Itsekalibrointi

- Systemaattiset virheet pyritään huomioimaan kartoitusprojektin kolmiointivaiheessa lisäparametrein. Näille estimoidaan arvot samanaikaisesti muiden parametrien avulla. Lisäparametrit määrittyvät blokin sisäisten liitospistehavaintojen ja ulkoisten lähtöpistehavaintojen perusteella. Erona testikenttäkalibrointiin nähden on se, että testikentän lähtöpisteistö on tiheydeltään ylimääritetty, kun taas itsekalibroinnissa lähtöpisteistö on sama, joka kartoitusalueella on käytössä.
- Virheiden määrittävyys riippuu suuresti blokin geometriasta. Yleensä tässä määritetään
 - pääpiste
 - symmetrinen piirtovirhe
- Luento 5

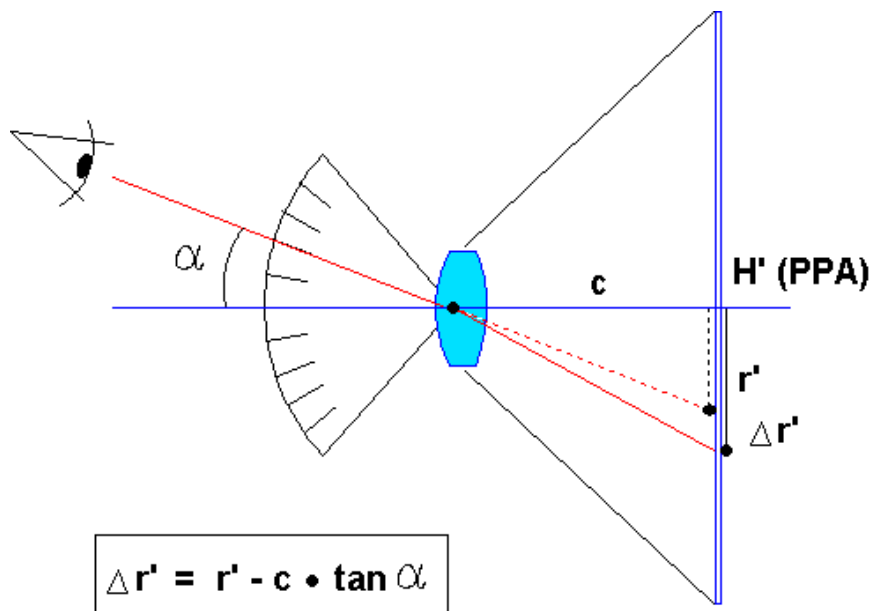
Perinteisten ilmakuvakameroiden tyypillinen kalibrointimenettely on ollut laboratoriokalibrointi, jota on tarvittaessa täydennetty itsekalibroinnilla. Laboratoriokalibrointi on tyypillisesti suoritettu 2-3 vuoden välein, tai tarvittaessa kun on epäilty kalibroinnin muuttuneen. Testikenttiä on käytetty järjestelmien tarkastuksessa (k.s. Luento 2). GPS/IMU-järjestelmien käyttöönotto ja suorageoreferointi ovat tehneet testikenttäkalibroinnin välttämättömäksi. Testikenttäkalibrointia voidaan tarvittaessa parantaa käyttämällä ns. in-situ kalibrointia (kuvataan kuvausalueella sopiva kalibrointiblokki) tai itsekalibroinnilla. Digitaalisten kameroiden käyttöönotto edellyttää niille soveltujen kalibrointimenettelyjen kehittämistä.

Goniometrikalibrointi

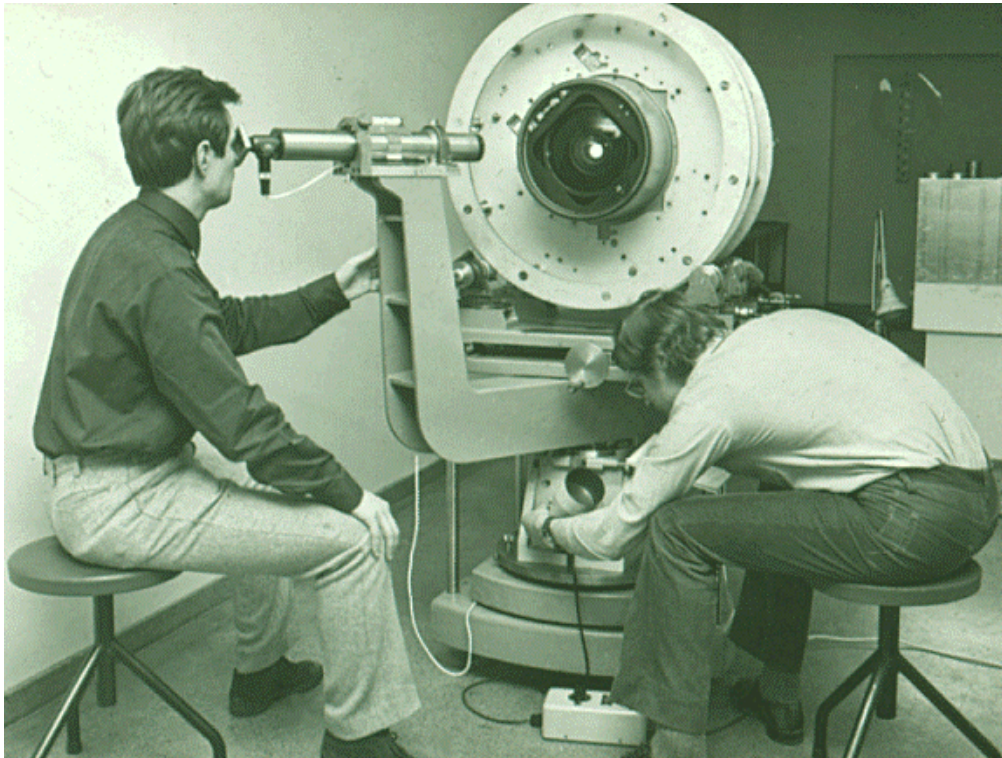
- Goniometri on laite, joka rakentuu kollimaattorin kahdesta kaukoputkesta. Toinen on kiinteä, toinen kiertyy keskisästi asetetun vaakakehän suhteen. Kamera asetetaan

goniometriin siten, että kameran kuvaportti on kohtisuoraan kiinteätä kollimaatiosuoraa vastaan ja objektiivin tulopupilli luodattu vaakakehän keskipisteen suhteen. Goniometrillä havaitaan objektiivin piirtovirheitä siten, että kuvatasoon asetetaan pääpisteen suhteen keskisesti mitta-asteikko. Mitta-asteikkoa havaitaan kääntyvällä kaukoputkella objektiivin läpi. Vertaamalla vaakakehältä luettuja kulmia mitta-asteikon ja kameravakion avulla laskettuihin kulmiin, voidaan piirtovirheet määrittää.

- Suomessa olevat goniometrit ovat tyypiltään edellä esitetyn kaltaisia ns. horisontaaligonometrejä. Ne soveltuvat ilmakuvakameroiden laboratoriokalibrointiin (TKK:ssa, kuvakoko 230 mm x 230 mm, objektiivin polttoväli $c = 150$ mm) ja pienempien ilmakehän ja kinofilmikoon kameroiden kalibrointiin ([Joensuun yliopistolla](#), kuvakoot 6 cm x 6 cm ja 24 mm x 36 mm).
- Vertikaaligonometreissä on yleensä useita kiinteitä kollimaattorikaukoputkia (esim. NRC:n multikollimaattorigoniometri). Tällaisia ei ole Suomessa. Vertikaaligonometrillä pidetään sitä, että kamera on kalibroinnin ajan kuvausasennoissa. Kameran raskaan rakenteen mahdollisesti aiheuttama vaikutus kalibrointitulokseen voidaan näin minimoida.
- Julkaisuja
 - Hakkarainen, Juhani, 1973. Ilmakuvakameran kaartuman määrittäminen goniometrillä ja ilmakehän ja ilmakehän objektiivin laadun tutkiminen, lisensointityö, TKK:n Maanmittausosasto, 1973.
 - Hakkarainen, Juhani, 1976. On the Use of the Horizontal Goniometer in the Determination of the Distortion and Image Quality of Aerial Wide-angle Cameras. Väitöskirja, TKK:n Maanmittausosasto, 1976.
 - ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 8.5, Calibration. s. 645-668.



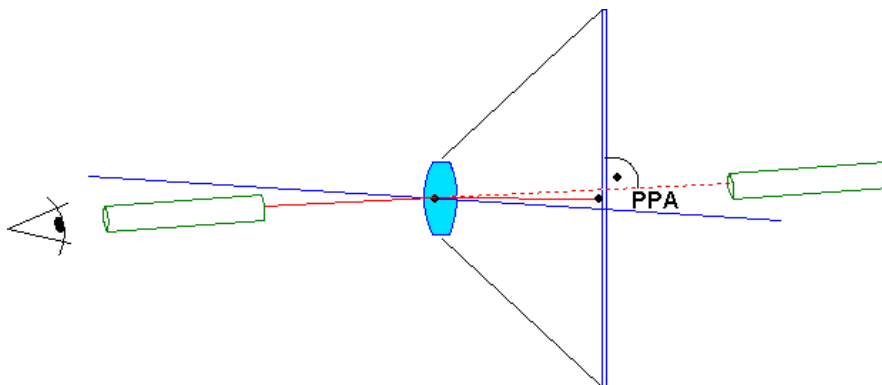
Goniometrimitäuksen periaate.



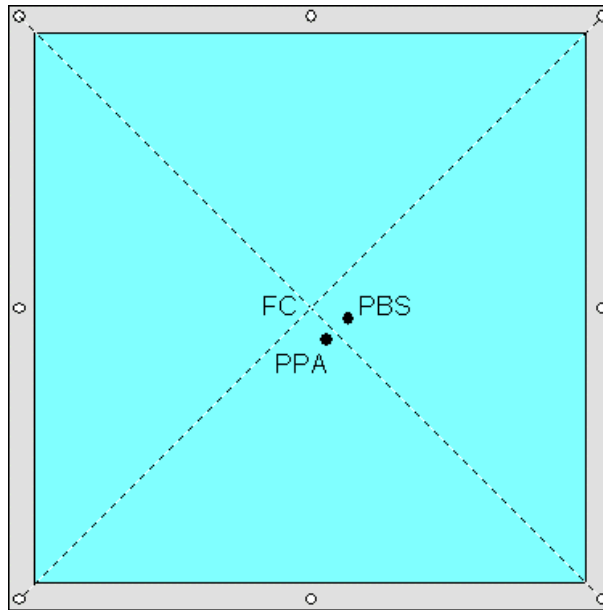
TKK:n horisontaaligonometri.

Pääpisteet

- Kameran kalibrointitodistuksessa mainitaan toisinaan pääpiste kolmella eri tavalla:
 - **FC = Fiducial Center**, eli reunamerkkien kautta piirrettävien suorien leikkauspiste. Analogiakojeissa pääpisteenä voidaan käyttää ainoastaan FC:tä. Kalibrointitodistuksissa piirtovirheet määritellään yleensä FC:n suhteen ja erikseen kullekin kuvan neljästä päälävistäjästä.
 - **PPA = Principal Point of Autocollimation** on objektiivin pääsäteen kuvautumispiste, kun pääsäde yhtyy tulopupillin puolella sellaiseen suoraan, joka on kohtisuorassa kuvatasoa vastaan.
 - **PBS = Principal Point of Best Symmetry** on symmetrisen piirtovirheen symmetriapiste, jota käytetään itsekalloinoinnin pääpisteenä.



Autokollimoitu pääpiste.



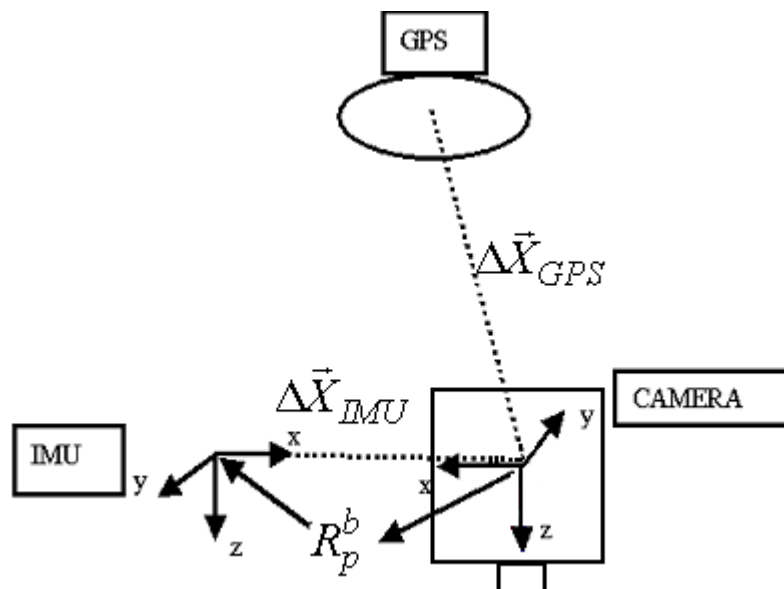
Kuvan erilaiset pääpisteet.

Testikenttäkalibrointi

- Testikenttäkalibrointiä tutkittiin erityisesti 1970-luvulla. Testikenttäkalibrointi on noussut jälleen esille suoran georeferoinnin kehittymisen myötä, kalibrointiä GPS/IMU-havaintojen ollessa mukana tarkastellaan luennon lopussa. Seuraavassa tiivistelmä 1970-luvulla saaduista tuloksista.
 - Ilmakuvaus tulee tehdä vähintään kahdessa toisiaan vastaan ristikkäisessä suunnassa. Tällä on erityinen merkitys pääpisteiden määrittämiselle.
 - Mikäli halutaan määrittää myös kameravakio, testikentän tulee olla mahdollisimman kolmiulotteinen. Tällaisia kartoituskuvaussoveltuvia testikenttiä ei Suomessa ole, mutta esimerkiksi Saksassa ja Sveitsissä kylläkin. Aiemmin on käytetty myös tähtitaivasta kamerakalibrointiin, esimerkkinä USA (stellar calibration)
- Jämijärvellä pisteistö koostuu kahdesta osasta:
 - 0.8 km x 0.8 km alueella 187 pistettä, XY-keskivirheellä ± 3 mm
 - 2.0 km x 2.0 km alueella 131 pistettä, XY-keskivirheellä ± 5 mm.
- ISPRS:n koetyö
 - Yhteenvetona todettiin mm. seuraavaa
 - Fysikaalinen malli riittää optiikan ja filmin muodonmuutosten määrittämiseen.
 - Kutakin blokkia kohden tulisi käyttää vain yksiä kameraparametreja, mikäli kuvat on samasta kuvauksesta (sama kamera). Jonokohtaisia parametreja pitää välttää.
 - Mikäli jonojen välinen sivupeitto on alle 30 %, lisäparametrien käytössä tulee olla erittäin kriittinen.
 - Lisäparametrien käyttö ei korvaa komponenttikalibrointiä.
 - Koetyössä käytetyt kuvaukset
 - Kuvaukset tehtiin Suomessa Jämijärven ja Australiassa Kapundan ja Willungan koekentillä. Jämijärvellä kamerana käytettiin Zeissin RMK A2 ja MRB kameroita, Kapundassa ja Willungassa Zeissin RMK AR kameraa.

- Testikentät
 - Jämijärvi 2.6 km x 2.6 km
 - Kapunda 40 km x 40 km
 - Willunga 3 km x 3 km
- Koetyön tasoitukset
 - Vertaustasoituksena tehtiin tavanomainen blokkitasoitus
 - sisäinen orientointi affinisella muunnoksella,
 - havainnoista korjattiin symmetrisen radiaalisen piirtovirheen ja refraktion vaikutukset,
 - kuvahavaintoja painotettiin 1:llä, lähtöpisteitä äärettömällä.
 - Osa koetasoituksista tehtiin lähinnä lisäparametrien käytön vaikutusten selvittämiseksi.
 - Koetuloksia laskettiin kolmella kuvitteellisella lähtöpistekuviolla: harva, medium, tiheä.

Testikenttäkalibrointi suorassa georeferoinnissa



Kalibroituavia suureita ovat:

- IMU:n ja kameran akselistojen välinen orientointi (boresight misalignment: fotogrammetrisesti)
- Eri järjestelmien väliset vektorit (lever arm: geodeettisin menetelmin)
 - Kamera ja GPS-antenni
 - IMU ja kamera
 - IMU ja GPS antenni
- Eri järjestelmien välinen synkronointi
- Kameran kalibrointi lento-olosuhteissa (fotogrammetrisesti)

Tuntemattomat määritetään blokkitasoituksessa.

Boresight misalignment: $R_p^m = R_b^m R_p^b$,

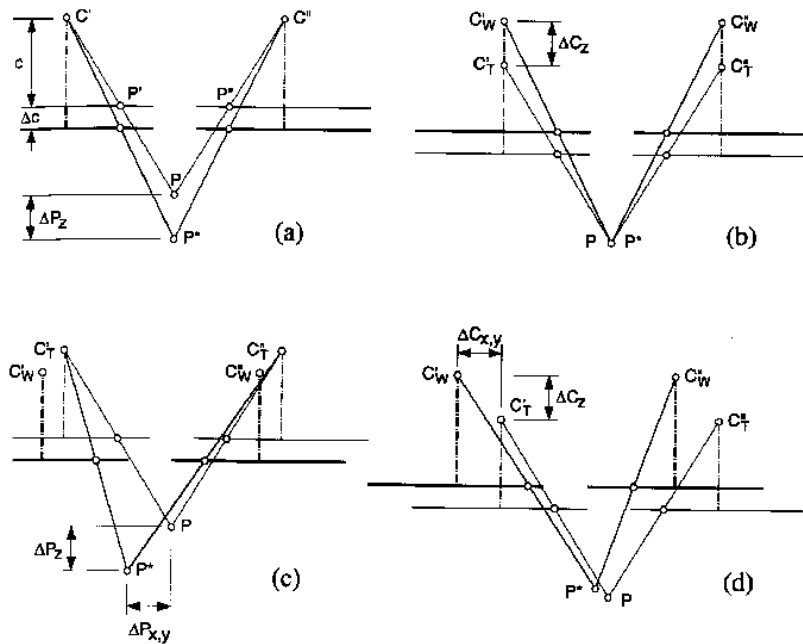
Rotation matrixes:

R_p^m image frame \rightarrow object frame (AT)

R_p^b image frame \rightarrow IMU body frame (boresight)

R_b^m body frame \rightarrow object frame (GPS/IMU)

Kuvausvirheiden vaikutuksesta suorassa georeferoinnissa



© Schenk, 1999

Ylläolevissa kuvissa esitetään sisäisen orientoinnin virheiden vaikutusta fotogrammetriseen pisteenmääritykseen suorassa ja “epäsuorassa” georeferoinnissa.

- (a) suora georeferointi, polttovälän virheestä aiheutuva korkeusvirhe siirtyy sellaisenaan korkeuskoordinaattiin kohteessa
- (b) epäsuora georeferointi: polttovälän virheet absorboituvat projektioksekuksen korkeuskoordinaattiin
- (c) suora georeferointi: pääpisteen ja polttovälän virheestä aiheutuvat virheet vaikuttavat suoraan maastokoordinaatteihin
- (d) epäsuora georeferointi: pääpisteen virheestä aiheutuvat virheet absorboituvat suurelta osin ulkoisten orientointien parametreihin

Voidaan siis todeta, että epäsuorassa georeferoinnissa sisäisen orientoinnin virheet absorboituvat ulkoisten orientointien parametreihin, kun taas suorassa georeferoinnissa sisäisen orientoinnin virheet siirtyvät maastokoordinaatteihin mittakaavalla skaalattuna. Sisäisen orientoinnin virheiden lisäksi myös kaikki muut kuvausvirheet siirtyvät suoraan määritettäviin parametreihin. Aihepiiriä tutkitaan paraikaa eripuolilla maailmaa.

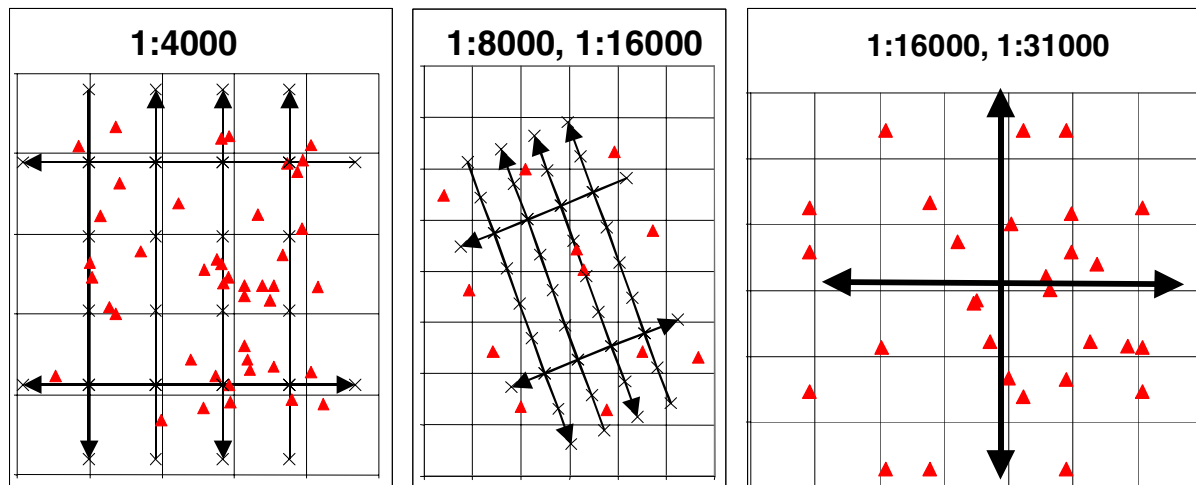
Esimerkki sisäisten orientointien virheiden vaikutuksesta suorassa ja epäsuorassa sensorientoinnissa (Schenk 1999: Digital Photogrammetry):

- Simulointi todellisella stereomallilla. $H=4500$ m, oletettu $c=150$ mm, todellinen $c=150,02$ mm. Polttovälin virheestä aiheutui $-0,67$ m korkeusvirhe suorassa georeferoinnissa. Epäsuorassa sensoriorientoinnissa virhe pääosin absorboitui ulkoisiin orientoihin, mallikoordinaatteihin aiheutuvat virheet olivat $(-0,02, -0,02, 0,01)$ m X-, Y- ja Z-suunnissa. Seuraavaksi lisättiin $-0,01$ ja $0,015$ mm virheet pääpisteeseen. Tällöin rekonstruointivirheet olivat $(-0,33, 0,33, -0,92)$ m suorassa georeferoinnissa ja $(-0,03, -0,17, -0,22)$ m epäsuorassa georeferoinnissa.

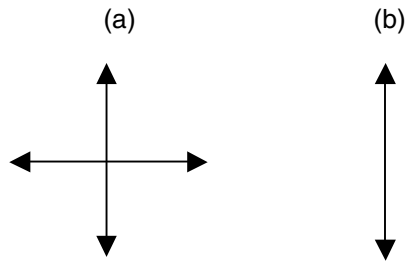
	pressurised cabin, cover glass		lens in free atmosphere, constant temperature 7°C		lens in free atmosphere temperature	
flying height	6 km	14 km	6 km	14 km	6 km	14 km
wide angle camera $f=153\text{mm}$	$-20\ \mu\text{m}$	$-38\ \mu\text{m}$	$-36\ \mu\text{m}$	$-58\ \mu\text{m}$	$-47\ \mu\text{m}$	$-80\ \mu\text{m}$
Normal angle camera $f=305\text{mm}$	$12\ \mu\text{m}$	$-17\ \mu\text{m}$	$-33\ \mu\text{m}$	$-28\ \mu\text{m}$	$-110\ \mu\text{m}$	$-172\ \mu\text{m}$

Kameravakion muutokset erilaisilla lentokorkeuksilla ja erilaisissa olosuhteissa. Meier 1978: The effect of Environmental Conditions on Distortion, Calibrated Focal Length and Focus of Aerial Survey Cameras, ISP Symposium, Tokyo, May 1978.

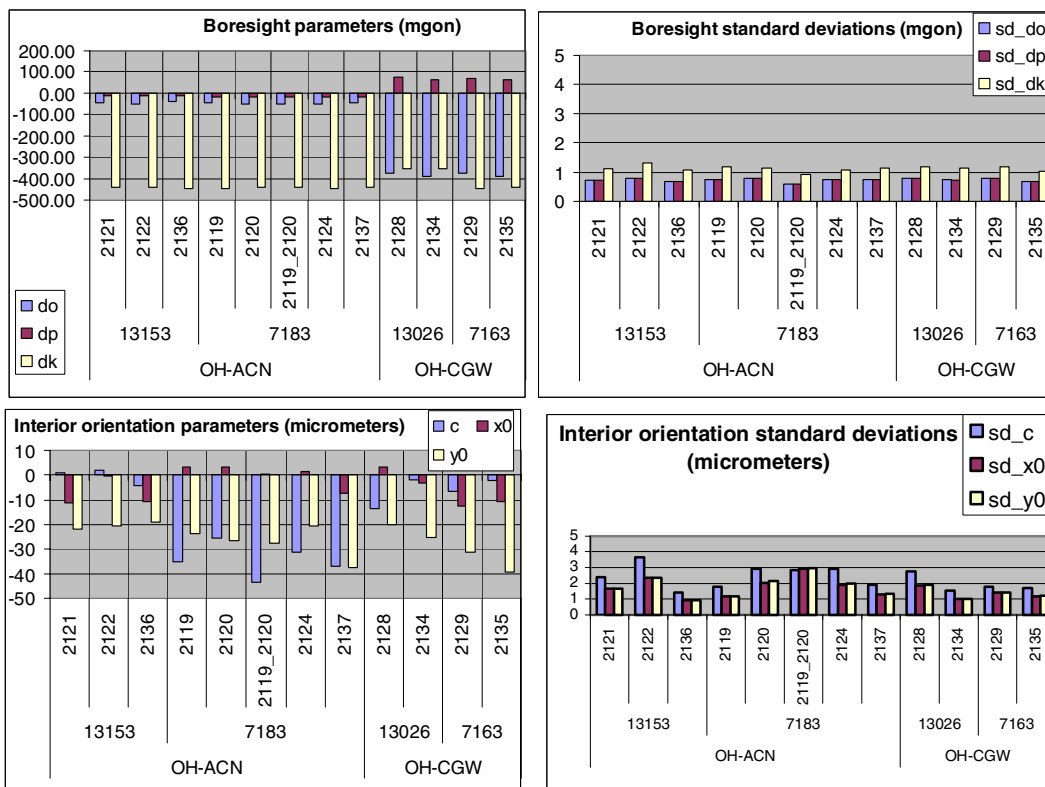
GPS/IMU/kamera-järjestelmän kalibrointi Geodeettisen laitoksen Sjököllan testikentällä



Geodeettisen laitoksen testikenttiä esiteltiin luennolla 2. Sjököllässä voidaan kalibrointi suorittaa mittakaavoissa $1:3000-1:4000$, $1:6000-1:16000$ sekä $1:16000-1:31000$. Jämsän kentällä kalibrointi voidaan suorittaa mittakaavoissa $1:16000-1:31000$. Ylläolevissa kuvissa näytetään esimerkit $1:4000$, $1:8000/1:16000$ sekä $1:16000/1:31000$ testikentistä.



Käytännön työssä voidaan käyttää myös kevyempiä blokkirakenteita. Kaksi ristikkäisitä vastakkaisiin suuntiin lennettyä kuvalinjaa (a) sallivat kalibroinnin määrityksen riittävän hyvin. Edestakaisin lennetty lentolinja (b) ei ole ideaalinen täyteen kalibrointiin, mutta sillä voidaan kalibroida esim. pelkkä boresight misalignment sekä pääpiste.



Tuloksia MML:n kuvauskalustolla kesällä 2002 suoritetuista systeemikalibroinneista. Kalibroitavana oli kaksi lentokonetta (OH-ACN ja OH-CGW) joissa molemmissa laajakulma- (150 mm) ja normaalikulmaoptiikka (214 mm). Kuvausmittakaavat olivat 1:4000, 1:8000 ja 1:16000, lentokorkeudet 600 m-3500 m. Kaikilla optiikoilla esiintyi merkittävä 20-40 mikrometrin suuruinen korjaus y0-suunnassa. Optiikalla 7183 ilmeni merkittävä korjaus myös kameravakiossa (Honkavaara et al. 2003)

Kirjallisuutta

ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 8.5, Calibration. s. 645-668.

ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 11.2.9, The Concept of Camera Self-Calibration. s. 870-879.

Honkavaara, E., Ilves R., Jaakkola, J., 2003. Practical Results of GPS/IMU/camera System Calibration. In. Proceedings of Workshop: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation. Castelldefels, September 22-23, 2003.

Jacobsen, Karsten, 2002. Calibration aspects in Direct Georeferencing of Frame Images. IntArchPhRS, Com.I, Denver, Vol.XXXIV Part 1, pp 82-88. <http://www.ipi.uni-hannover.de/index1.htm>

Salmenperä, Hannu, 1989.: Fotogrammetrisen pistetihennyksen menetelmät ja sovellutukset. Kappale 3.32, Itsekalibroiva pistetihennys. Tampere 1989.

Salmenperä, Hannu, 1989.: Fotogrammetrisen pistetihennyksen menetelmät ja sovellutukset. Kappale 5.4, Kuvakoordinaattien systemaattiset virheet ja niiden korjaaminen. Tampere 1989.

[Maa-57.220 Fotogrammetrinen kartoitus](#)

[Luento-ohjelma](#) [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) [11](#) [12](#) [13](#)
