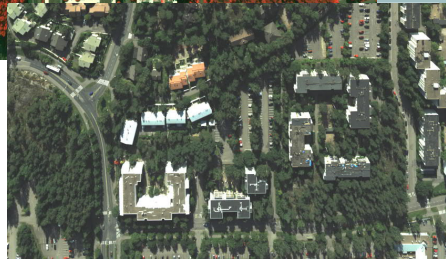


KIG-C1010 Introduction to geoinformatics
Luento 7b: Fotogrammetria



Petri Rönholm

Oppimistavoitteet

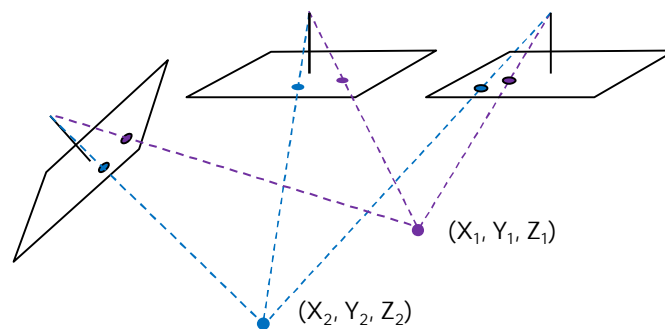
- Ymmärtää fotogrammetristen mittausten perusperiaatteet

Fotogrammetriset mittaukset

Mittauksia varten joudumme muodostamaan matemaattisia malleja, jotka kuvaavat reaali maailman tapahtumia. Fotogrammetriassa sopivat mallit löytyvät usein geometrisista yhteyksistä.

3

Kaksi tai useampi kuva mahdollistaa havaintosäteiden eteenpäinleikkauksen ja siten 3D pisteiden mittaamisen



Mittausten tarkkuus paranee, jos kuvia lisätään (lisää kuvahavaointoja)

4

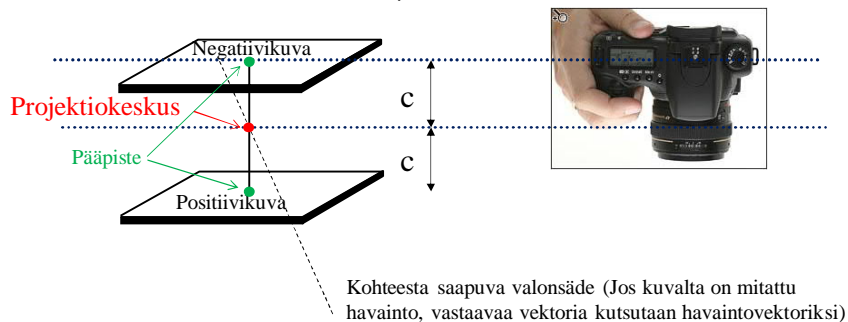
Fotogrammetrisia mittauksia varten tulee tietää

- Kameran sisäinen geometria
 - Sisäinen orientointi, Interior orientation (saadaan selville kameran kalibroinnista)
- Yhteys maastokoordinaatiston (tai kohdekoordinaatiston) ja kameran oman koordinaatiston välille
 - Ulkoinen orientointi, Exterior orientation (selvitetään joko erikseen kullekin kuvalle tai usealle kuvalle yhtä aikaa sädekimpputasoituksessa)
 - Tyypillisesti vaatii tunnettuja maaston tukipisteitä tai suoran georeferoinnin sensorien havaintoja

5

Kameran sisäinen geometria

- Kameravakio = c (vastaa lähes polttoväliä)



- Pääpiste, Principle point (x_0, y_0) : Kuvatason ja projektiokeskuksen kautta kulkevan, kuvatason nähden kohtisuoran, suoran leikkauspiste
- Ideaalitapauksessa (joka ei täysin koskaan toteudu) kaikki kameraan tulevat valonsäteet kulkevat suorasti ja projektiokeskuksen kautta

6

Kameran sisäinen geometria

- Korjataan kuvan vääristymiä (eli yritetään palauttaa kuva ideaaliseksi keskusprojektiokuvaksi)
 - Linssivirheet
 - Kuvatason vääristymät
 - Ilmakehän aiheuttama taipuminen
 - jne
- Esimerkiksi tyypillinen linssivirheen korjausmalli (Brownin malli)

$$dx_{tot} = x_0 - \frac{\bar{x}}{c} dc + \bar{x}a_1 + \bar{y}a_2 + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2$$

$$dy_{tot} = y_0 - \frac{\bar{y}}{c} dc + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2$$

$$\bar{x} = x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0$$

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

a_1, a_2 Kuvatason vääristymien korjaus

K_1, K_2, K_3 Radiaalisen linssivirheen korjaus

P_1, P_2 Tangentiaalisen linssivirheen korjaus (johtuu linssijärjestelmän epäideaalisesta linssien asettelusta)

7

Linssivirheiden korjaus



8

Linssivirheiden korjaus

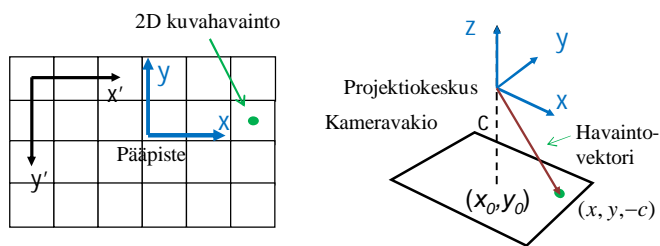


Linssivirheet on poistettu kameran kalibrointitietojen perusteella

9

Tunnetun sisäisen orientoinnin avulla voimme muuttaa 2D kuvahavainnot 3D havaintovektoreiksi

- Sisäisen orientoinnin parametrit (kameravakio, pääpisteen sijainti ja systemaattisten kuvavirheiden korjaus) pitää tuntea, kun tehdään koordinaatistomuunnos 2D kuvakoordinaatistosta 3D kamerakoordinaatistojärjestelmään



$$\begin{cases} x = x' - x_0 \\ y = y_0 - y' \\ z = -c \end{cases}$$

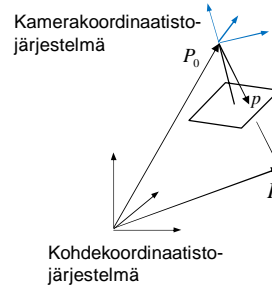
Eli havaintovektori on tässä tapauksessa:

$$\begin{bmatrix} x' - x_0 \\ y_0 - y' \\ -c \end{bmatrix}$$

10

Yhteys kamerakoordinaatiston ja maasto-/kohdekoordinaatiston välille

- Jos meillä on ideaalinen keskusprojektiokuva
 - Kohdepiste, projektiokeskus ja kuvapiste ovat samalla suoralla (=kollineaarisuusehto, collinearity condition)
 - Tällöin suorat piirteet kohteessa näyttävät suorilta myös kuvatasolla (**kollineaarisuus, collinearity**)
- Tyypillinen koordinaatistomuunnos kohdekoordinaatistojärjestelmän ja kamerakoordinaatiston välille on (kollineaarisuusyhtälöt, collinearity equations)



x_0, y_0 pääpiste
 c kameravakio
 λ mittakaavakerroin
 R 3D kiertomatriisi
 X_0, Y_0, Z_0 kameras projektiokeskus kohdekoordinaatistossa

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

11

Erilaisia merkintätapoja

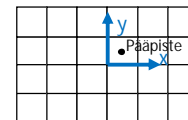
- Kollineaarisuusyhtälöiden matriisi-vektori-esitysmuoto

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

voidaan kirjoittaa myös yhtälöryhmänä

(mittakaava on eliminoitu)

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$



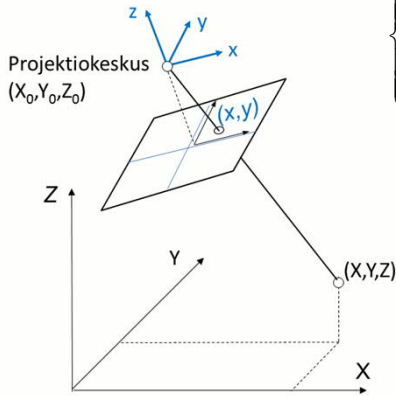
Huomaa, että tässä yhtälössä havaintovektori on kirjoitettu eri kuvakoordinaatistojärjestelmässä kuin aiemmin (saadaksesi samaan, vaihda yhtälön vasen puoli, kalvo 10)

- Käytännössä tällä yhtälöllä voidaan projisoida 3D piste (kohteen piste) kuvatasolle
- Yhtälöryhmä voidaan myös kääntää (käännetty versio kuvaa muunnoksen kuvatasolta kohti kohdetilaa)

12

Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt

Tässä tapauksessa $(x_0, y_0) = (0, 0)$



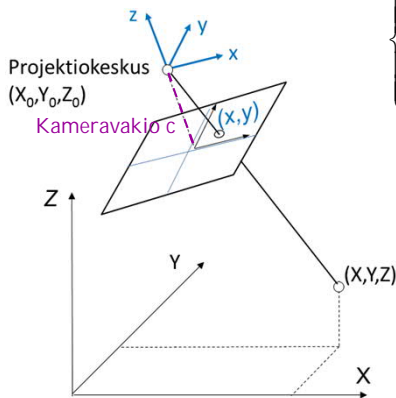
$$\begin{cases} x = -c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \\ y = -c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \end{cases}$$

13

14

Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt

Tässä tapauksessa $(x_0, y_0) = (0, 0)$

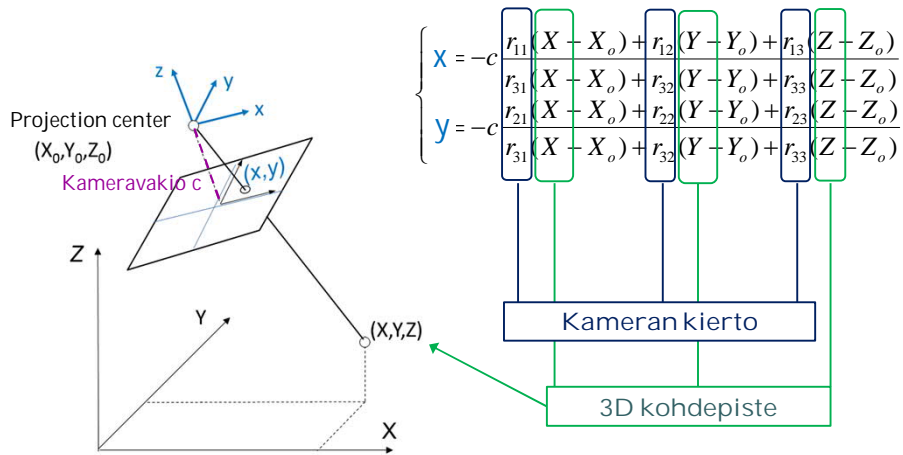


$$\begin{cases} x = -c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \\ y = -c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \end{cases}$$

3D kohdepiste

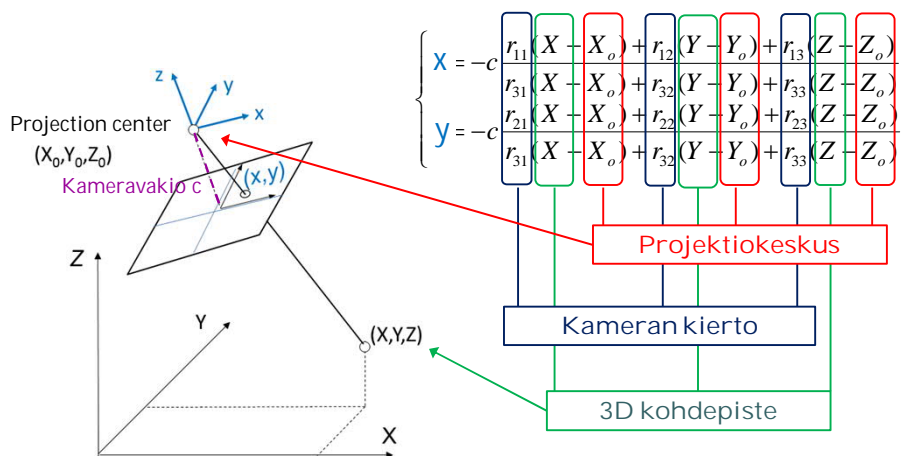
14

Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt



15

Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt



16

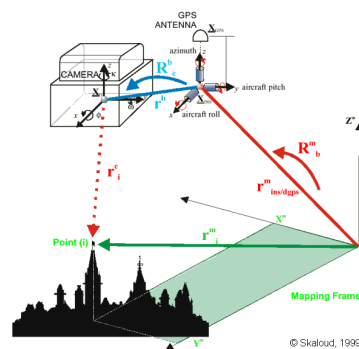
Orientointivaihtoehtoja

- Sisäinen orientointi, Interior orientation
 - Kameran sisäinen geometria
- Ulkoinen orientointi, Exterior orientation
 - Kuvan sijainti ja kallistus (suhteessa kohdekoordinaatistoon)
- Keskinäinen orientointi, Relative orientation
 - Kahden kuvan keskinäinen asema ja kallistus
 - Keskinäinen orientointi riittää siihen, että 3D mittauksista saadaan oikean muotoisia 3D malleja. Mallin mittakaavaa ei saada pelkistä kuvahavainnoista ja tulokset ovat vapaasti valitussa kohdekoordinaatistojärjestelmässä.
- Absoluuttinen orientointi, Absolute orientation
 - Keskinäisesti orientoiduilta kuvilta tehdyt 3D mittaukset muunnetaan maastokoordinaatistojärjestelmään
- Katso lisää "Fotogrammetrian terminologia" -dokumentista MyCourses:ssa

17

Suora georeferointi

- Suoran georeferoinnin sensorit tuottavat likiarvoja kameran ulkoiselle orientoinnille
 - Kennopohjaisten kuvien tapauksessa tämä ei ole välttämätöntä
- Ilmakuvausessa käytetään
 - GNSS (global navigation satellite system) sijainnin selvittämiseksi
 - Inertiajärjestelmää (IMU=inertial measurement unit) sekä sijainnin että kallistusten selvittämiseksi

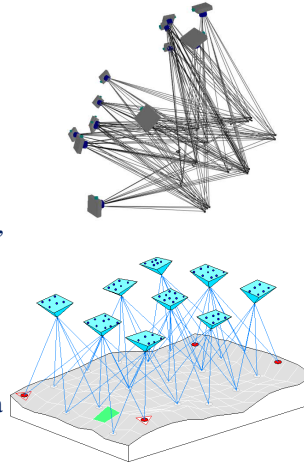


© Skaloud, 1999

18

Sädekimpputasoitus, bundle block adjustment (Ilmakuvauksen tapauksessa: Ilmakolmiointi)

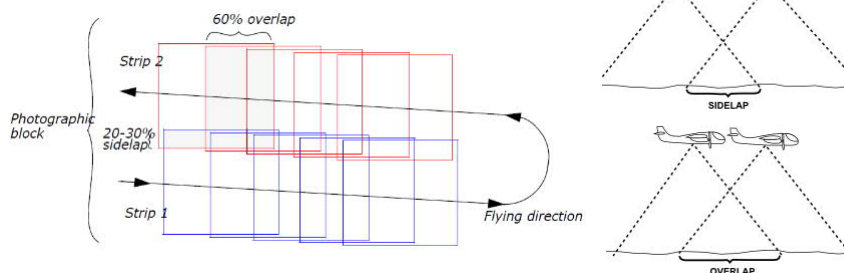
- Sädekimpputasoituksessa ratkaisemme yhtä aikaa
 - Kaikkien kuvablokin (kuvajoukon) kuvien ulkoiset orientoinnit (havaintovektorikimppu) (parametreja on $6m$, jossa m = kuvien lukumäärä) ja
 - Kaikkien liitospisteiden 3D kohdekoordinaatit (liitospisteet = vastinpisteet havaittuna eri kuvilta) eli kolmiointipisteet (parametreja on $3n$, jossa n = pisteiden lukumäärä)
 - Jos kaikki kuvat ovat ilmasta otettuja pystykuvia, sädekimpputasoitusta kutsutaan ilmakolmioinniksi)
 - Lisäksi, jos kuvausgeometria on erittäin hyvä, on mahdollista ratkaista myös sisäisen orientoinnin parametrit sädekimpputasoituksella (=kameran kalibrointi)!



19

Ilmakuvien (pystykuvat) ottaminen

- Kartoitushankkeissa kuvat otetaan jonoina siten, että lentosuunnassa kuvien pituuspeitto on vähintään 60 % ja vierekkäisten lentojonon kanssa sivupeitto 20%-30%



20

Multispektraalit ilmakuvat

- Nykyaikaiset digitaaliset ilmakuvakamerat ottavat
 - Pankromaattisen kuvan (parempi resoluutio kuin värikanavilla)
 - RGB + IR kuvat (R=punainen, G=vihreä, B=sininen, IR=infrapuna) huomommalla resoluutiolla
 - Värikanavat voidaan terävöittää parempaan resoluutioon pan-terävöityksellä



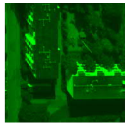
Pankromaattinen kuva



RGB kuva-yhdistelmä



R-kuva



G-kuva



B-kuva

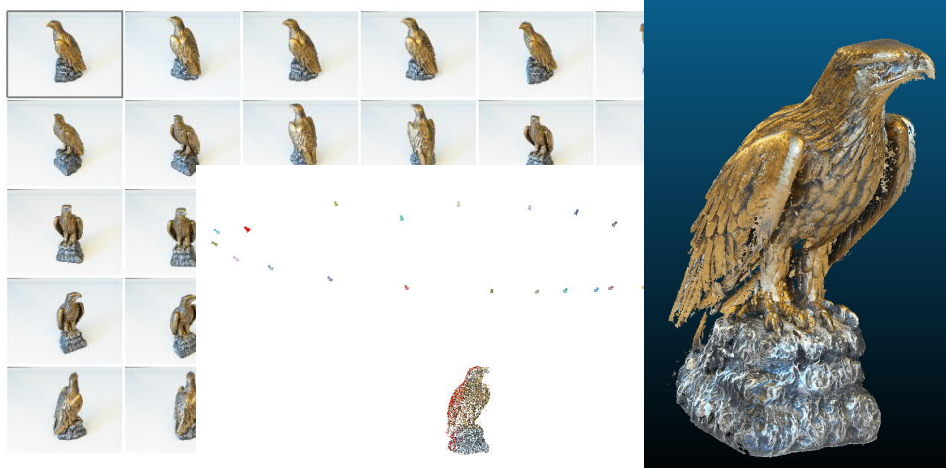


IR-kuva



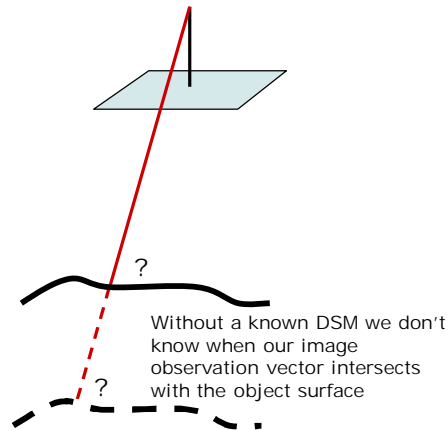
Väärävärikuva (IR R G)

Lähifotogrammetria



Yksikuvamittaus, monoplotting

- Voimme tehdä 3D mittauksia yksittäiseltä kovalta vain jos
 - Tunnetun kohteen pintamallin (DSM)
- Muuten tarvitaan enemmän kuin yksi kuva, jotta 3D-mittaus onnistuu
- Pictometry



▫ <https://www.youtube.com/watch?v=rYzcKylZJwE>

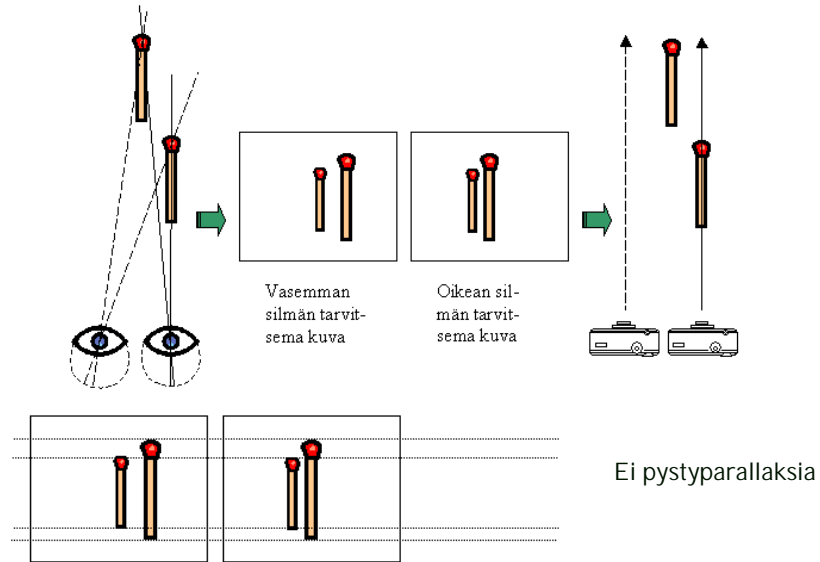
23

Stereonäkö

- Stereonäköä käytetään apuna fotogrammetrisessä kuvatulkinnassa ja 3D mittauksissa
- Stereonäkeminen edellyttää:
 - Kahta kuvaa (yksi kullekin silmälle)
 - Stereokuvauksen normaalitapausta eli
 - Kaksi kuvaa ovat samalla tasolla (ei keskinäistä kallistumaa)
 - Ei esiinny pystyparallaksia (eli voit löytää vastinpuolelta vierekkäiseltä kovalta seuraamalla vaakasuoraa suoraa)
 - Kuvakanta (Kuvien projektiokeskusten välinen etäisyys) ei ole liian pitkä tai lyhyt

24

Stereokuvauksen normaalitapaus



25

Tyypillinen stereofotogrammetrinen prosessi

- Kuvien otto, maastotyöt (maaston referenssipisteet)
- Stereokuvat (kuvilla pitää olla yhteistä peittoa)
- Kuvien esikäsittely
- Kuvien orientoinnit
- Stereoskooppinen mittaaminen (3D pistepilvi)
- Analysointi
- 3D mallinnus
- Mallit, kartat

26

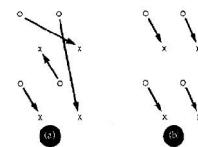
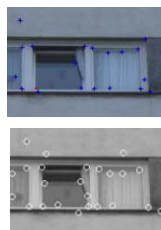
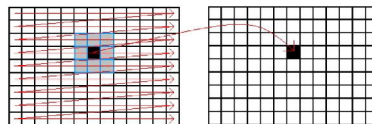
Vastinpisteiden mittaaminen

- Oleellinen osa fotogrammetrisia mittauksia on löytää stereokuvilta (tai useammalta kovalta) toisiaan vastaavia pistepareja
- Interaktiivisesti mittaaminen on varsin luotettavaa, koska ihmisen hahmotuskyky on erittäin hyvä. Valitettavasti manuaalinen mittaaminen on hidasta...
- Automaattiset mittaukset vähentävät manuaalisten mittausten tarvetta. Valitettavasti luotettavuus ei ole aina manuaalisten mittausten tasolla...

27

Automaattiset mittaukset

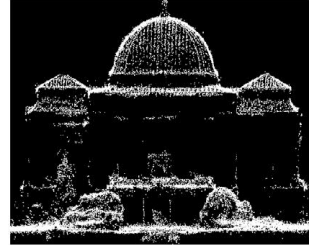
- Kuvankäsittelyalgoritmit löytävät kuvilta vastinpisteitä tai -piirteitä
 - Aluepohjaiset menetelmät (etsitään parasta korrelaatiota kuvien välille)
 - Valitaan toiselta kovalta pieni "näytepala" ("maski") ja liu'utetaan sitä yli toisen kuvan. Jokaisessa kohdassa lasketaan korrelaatioarvo ja lopulta valitaan vastinpisteeksi kohta, jossa oli paras korrelaatio
 - Piirreperohjaiset menetelmät
 - Etsitään "kiinnostuspisteitä" kuten nurkkia
 - Tunnistetaan näistä vastinpisteitä kuvien välille



28

Tiheä yhteensovitus

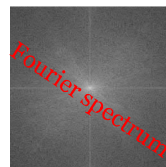
- Tavoitteena on löytää jokaiselle kuvan pikselille vastin piste toiselta kuvalta (jos mahdollista)
- Tuloksena saadaan tiheä 3D pistepilvi
- Laskennallisesti raskas ja jos käytetään vain kahta kuvaa, usein kohinainen tulos
- Jos tunnetaan ulkoiset tai keskinäiset orientoinnin, voidaan pienentää vastinpiirteen etsintävaruutta
- Semi-globaali yhteensovitus on suosituin algoritmi tiheän yhteensovituksen laskemiseksi



29

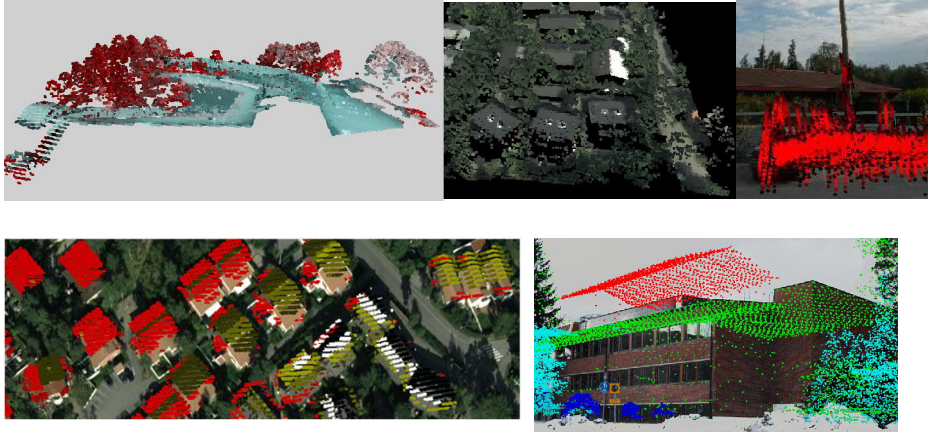
Digitaalinen kuvankäsittely

- Digitaalista kuvankäsittelyä (signaalinkäsittely) tarvitaan useissa fotogrammetristen prosessien vaiheissa
- Kuvien ehostuksella voidaan parantaa kuvien tulkittavuutta
- Digitaalisten kuvien entistäminen palauttaa ideaalisen geometrian ja radiometrian kuville
- Piirteiden irrotus vaaditaan automaattista kuvatulkintaa varten



30

Rekisteröinti ja integrointi laserkeilausten kanssa



© Petri Rönholm, Aalto-University

31

32

Kuinka tulla fotogrammetrian ammattilaiseksi - 4 askelta?

1. Tule "Master's Programme in Geoinformatics" -koulutusohjelmaan
2. Valitse fotogrammetrian ja laserkeilauksen valinnaisia kursseja kuten
 - Digital Image Processing and Feature Extraction
 - Advanced Photogrammetry
 - Advanced Laser Scanning
3. Valitse fotogrammetrinen aihe kurssilla GIS-E6010 Project Course (10 op)
4. Valitse fotogrammetrinen aihe diplomityöllesi

32

Kandiopinnoissa

- Valitse GIS-suuntaus
- Erityisesti kurssilla KIG-C1040 Paikkatiedon keruu (suomeksi) tulee lisää tietoa fotogrammetriasta, laserkeilauksesta, kaukokartoituksesta ja geodesiasta
- Kandityön voi tehdä fotogrammetriaan liittyvistä aiheista

33

Suositteluja matemaattisia taitoja fotogrammetrian opintoihin

- Geometria
- Laajojen lineaaristen ja epälineaaristen yhtälöryhmien ratkaisu
 - Epälineaaristen yhtälöiden linearisointi
 - Erityisesti pienimmän neliösumman menetelmä
- Laskeminen matriiseilla ja vektoreilla
- Tilastollinen analyysi ja virhetarkastelu
- Homogeenisten koordinaattien ymmärtäminen ja käyttö
- jne.
- (Matlab ohjelmointi)

34