

ENY-C2005 Geoinformation in Environmental Modeling

## Luento 5: Fotogrammetria



Osa 2. Petri Rönholm

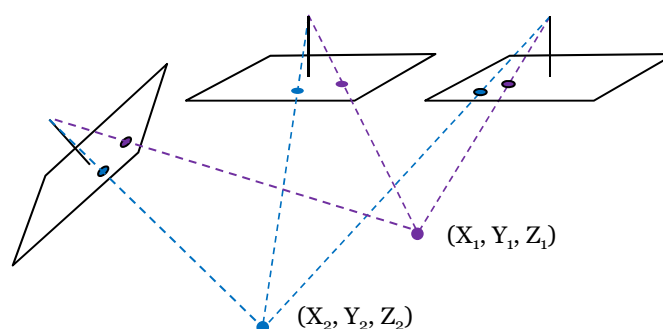
## Oppimistavoitteet

- Ymmärtää fotogrammetristen mittauksen perusperiaatteet

## Fotogrammetriset mittaukset

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

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



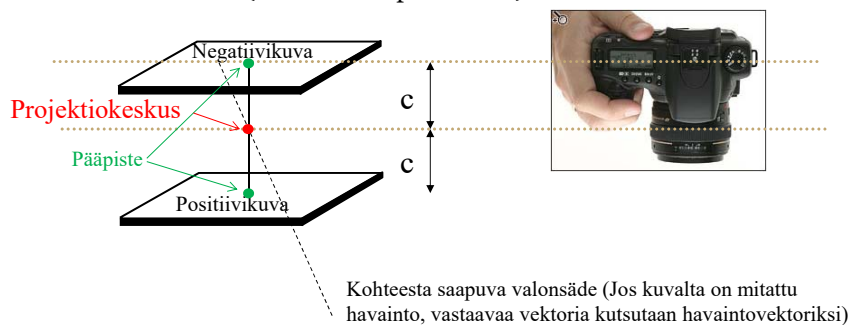
Mittausten tarkkuus paranee, jos kuvia lisätään (lisää kuvahavaintoja)

## 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

## Kameran sisäinen geometria

- Kameravakio=  $c$  (vastaa lähes polttoväliä)



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

## 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)

## Linssivirheiden korjaus



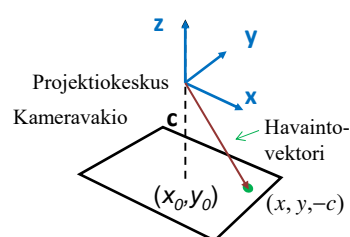
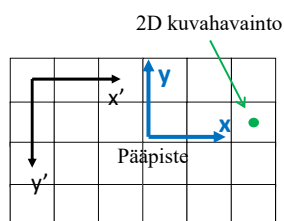
## Linssivirheiden korjaus



Linssivirheet on poistettu kameran kalibroitietojen perusteella

## 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



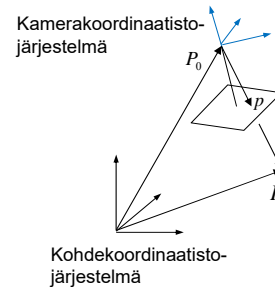
$$\begin{cases} x = x' - x_0 \\ y = y_0 - y' \\ z = -c \end{cases}$$

Eli havaintovektori on tässä tapauksessa:

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

## 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  
 $\lambda$  mittakaavakerroin  
 $R$  3D kiertomatriisi  
 $X_0, Y_0, Z_0$  kameran projektiokeskus kohdekoordinaatistossa

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

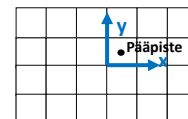
## Erilaisia merkintätapoja

- 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

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

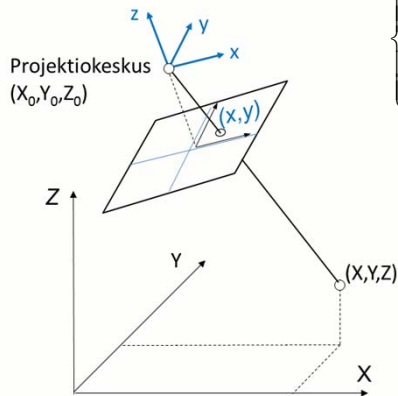


Huomaa, että tässä yhtälössä havaintovektori on kirjoitettu eri kuvakoordinaatistojärjestelmässä kuin aiemmin (saadaksesi samaan, vaihda yhtälön vasen puoli, kalvo 10)

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

## Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt

Tässä tapauksessa  $(x_o, y_o) = (0, 0)$

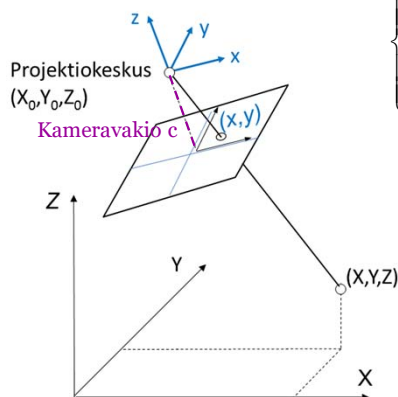


$$\begin{cases} x = -c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \\ y = -c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \end{cases}$$

14

## Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt

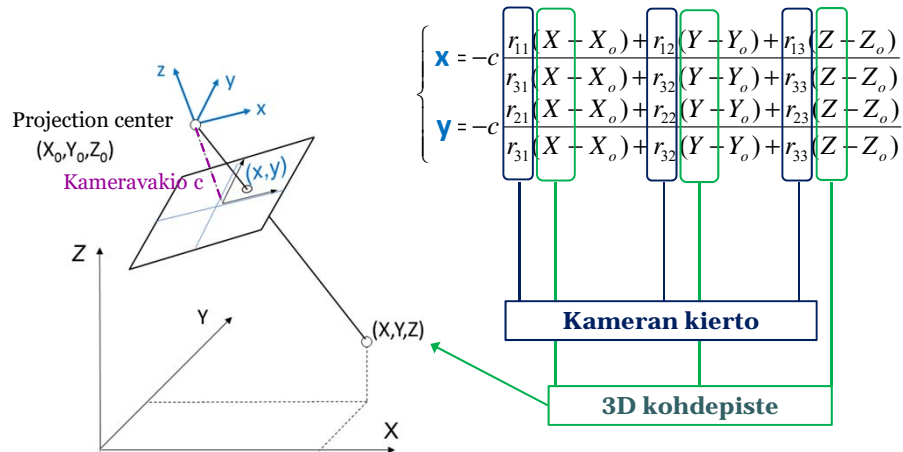
Tässä tapauksessa  $(x_o, y_o) = (0, 0)$



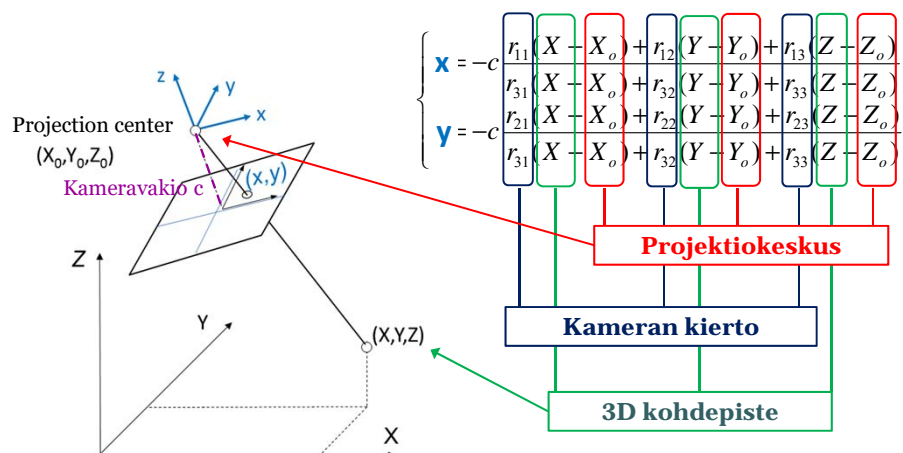
$$\begin{cases} x = -c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \\ y = -c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \end{cases}$$

3D kohdepiste

## Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt



## Tyypillinen matemaattinen malli: kollineaarisuusyhtälöt



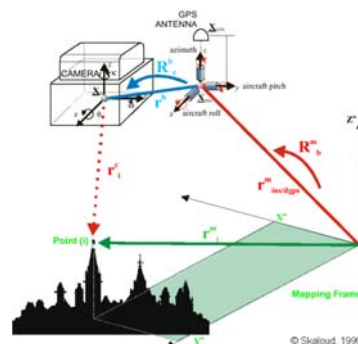


## Orientointivaihtoehtoja

- 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 tehty 3D mittaukset muunnetaan maastokoordinaatistojärjestelmään
- Katso lisää "Fotogrammetrian terminologiaa" -dokumentista MyCourses:ssa

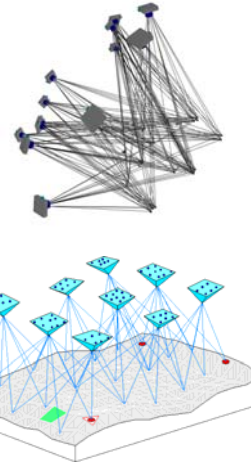
## Suora georefereointi

- Suoran georeferoinnin sensorit tuottavat likiarvoja kameran ulkoiselle orientoinnille
- Ilmakuvauksessa käytetään
  - GNSS (global navigation satellite system) sijainnin selvittämiseksi
  - Inertiajärjestelmää sekä sijainnin että kallistusten selvittämiseksi



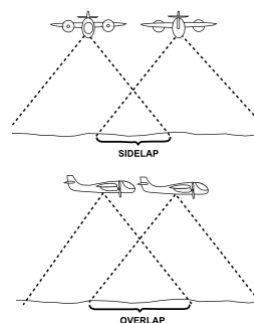
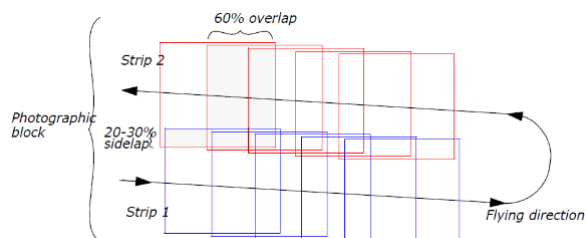
## Sädekimpputasoitus, block adjustment (Ilmakuvauksen tapauksessa: Ilmakolmiointi)

- 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)!



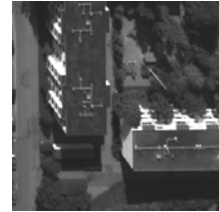
## Ilmakuvien (pystykuvat) ottaminen

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



## 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

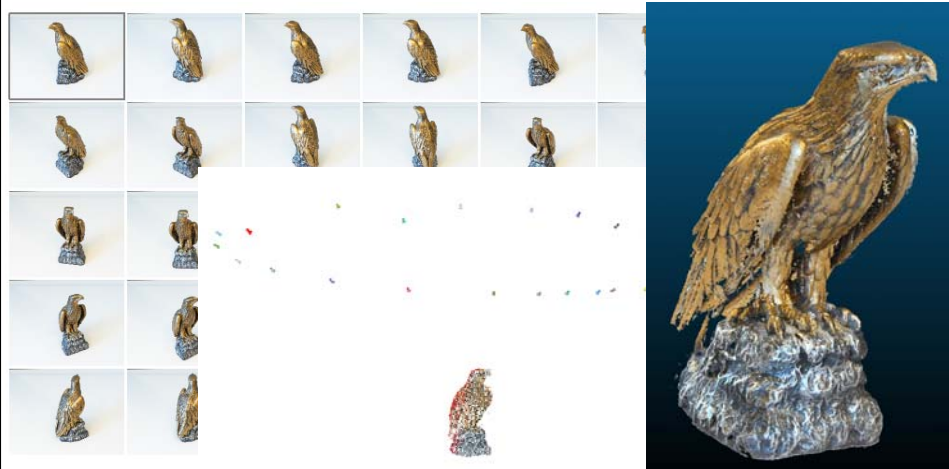


IR-kuva



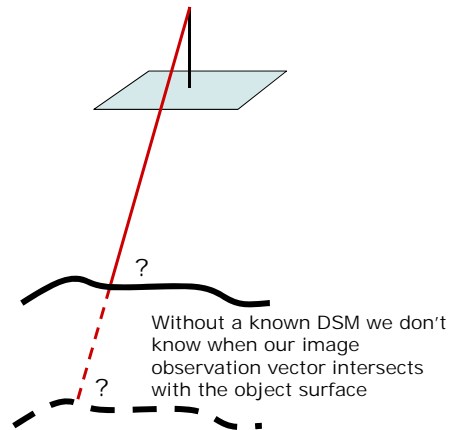
Väärävärikuva (IR R G)

## Lähifotogrammetria



## Yksikuvamittaus, monoplotting

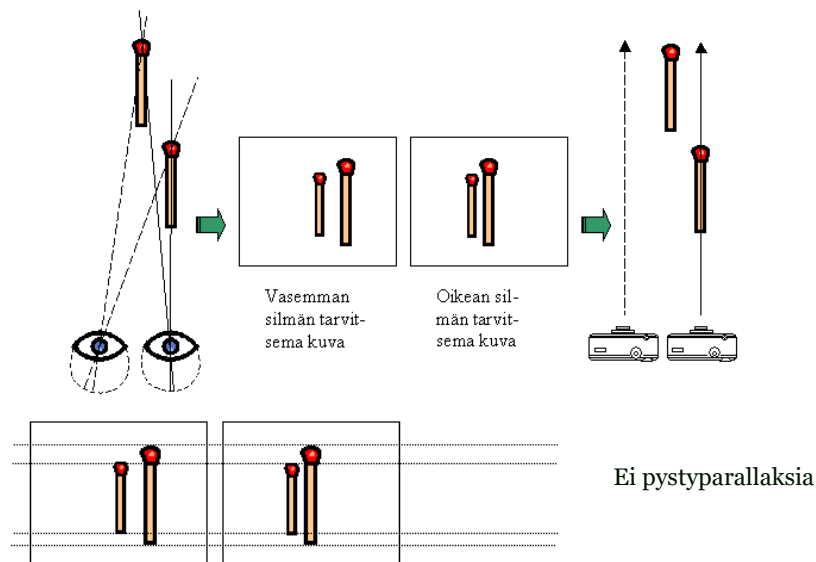
- Voimme tehdä 3D mittauksia yksittäiseltä kuvalta vain jos
  - Tuntemme kohteen pintamallin (DSM)
- Muuten tarvitaan enemmän kuin yksi kuva, jotta 3D-mittaaminen onnistuu
- Pictometry
  - <https://www.youtube.com/watch?v=rYzcKyIZJwE>



## Stereonäkö

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

## Stereokuvauksen normaalitapaus

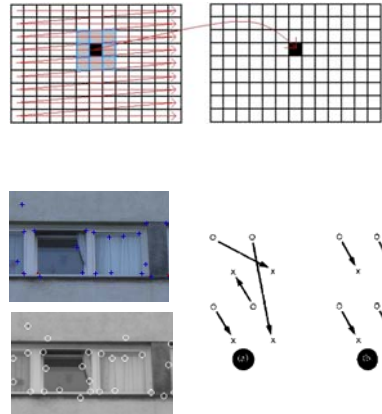


## Vastinpisteiden mittaaminen

- Oleellinen osa fotogrammetrisia mittauksia on löytää stereokuvilta (tai useammalta kuvalta) 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...

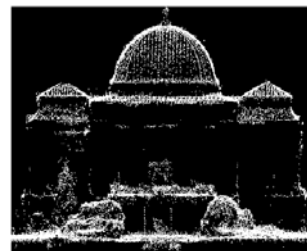
## Automaattiset mittaukset

- Kuvankäsittelyalgoritmit löytävät kuville vastin pisteitä tai -piirteitä
  - Aluepohjaiset menetelmät (etsitään parasta korrelaatiota kuvien välille)
    - Valitaan toiselta kuvalta pieni “näytepala” (“maski”) ja liu’utetaan sitä yli toisen kuvan. Jokaisessa kohdassa lasketaan korrelaatioarvo ja lopulta valitaan vastin pisteeksi kohta, jossa oli paras korrelaatio
  - Piirrepohjaiset menetelmät
    - Etsitään “kiinnostuspisteitä” kuten nurkkia
    - Tunnistetaan näistä vastin pisteitä kuvien välille

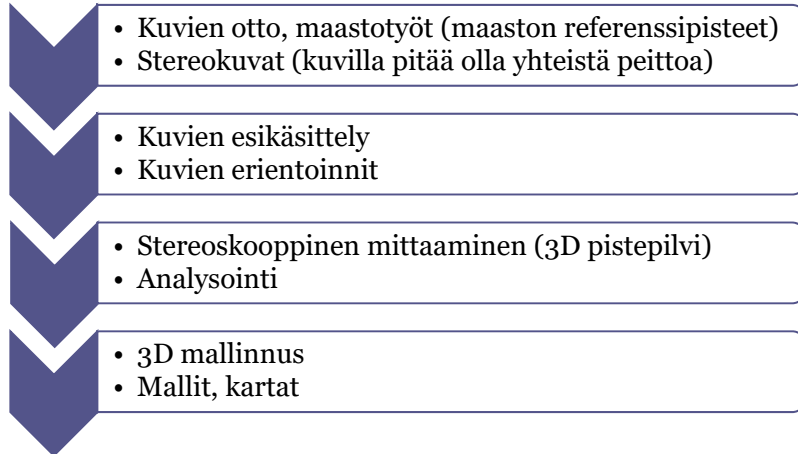


## Tiheä yhteensovitus

- 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 vastinpiirteiden etsintäavaruutta s
- Algoritmeja (esim.)
  - Semi global matching
  - Global matching
  - Patch-based Multi-View Stereo
  - MicMac
  - Non Maximum Disparity
  - Jne.

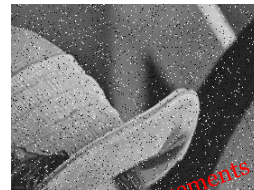
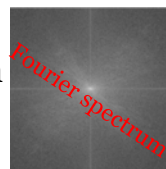


## Tyypillinen stereofotogrammetrinen prosessi

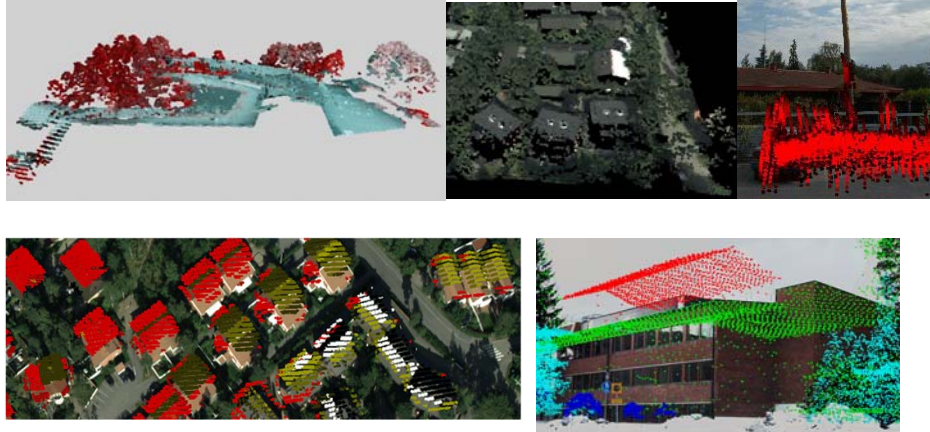


## Digitaalinen kuvankäsittely

- 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 automaattisia mittauksia varten



## Rekisteröinti ja integrointi laserkeilausten kanssa



© Petri Rönnholm, Aalto-University

32

## Kuinka tulla fotogrammetrian ammattilaiseksi? 4 askelta

1. Valitse “Geoinformatics” maisterivaiheen pääaineeksi
2. Valitse valinnaisista kursseista fotogrammetriaan, laserkeilaukseen ja kaukokartoitukseen liittyviä kursseja kuten
  - Digital Image Processing and Feature Extraction
  - Least-Squares Methods in Geosciences
  - Advanced Photogrammetry
  - Advanced Laser Scanning
  - Advanced Remote Sensing
3. Valitse fotogrammetriaan liittyvä aihe kurssilla “Project Work” (10 op)
4. Valitse fotogrammetrinen aihe diplomityösi aiheeksi



## 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)