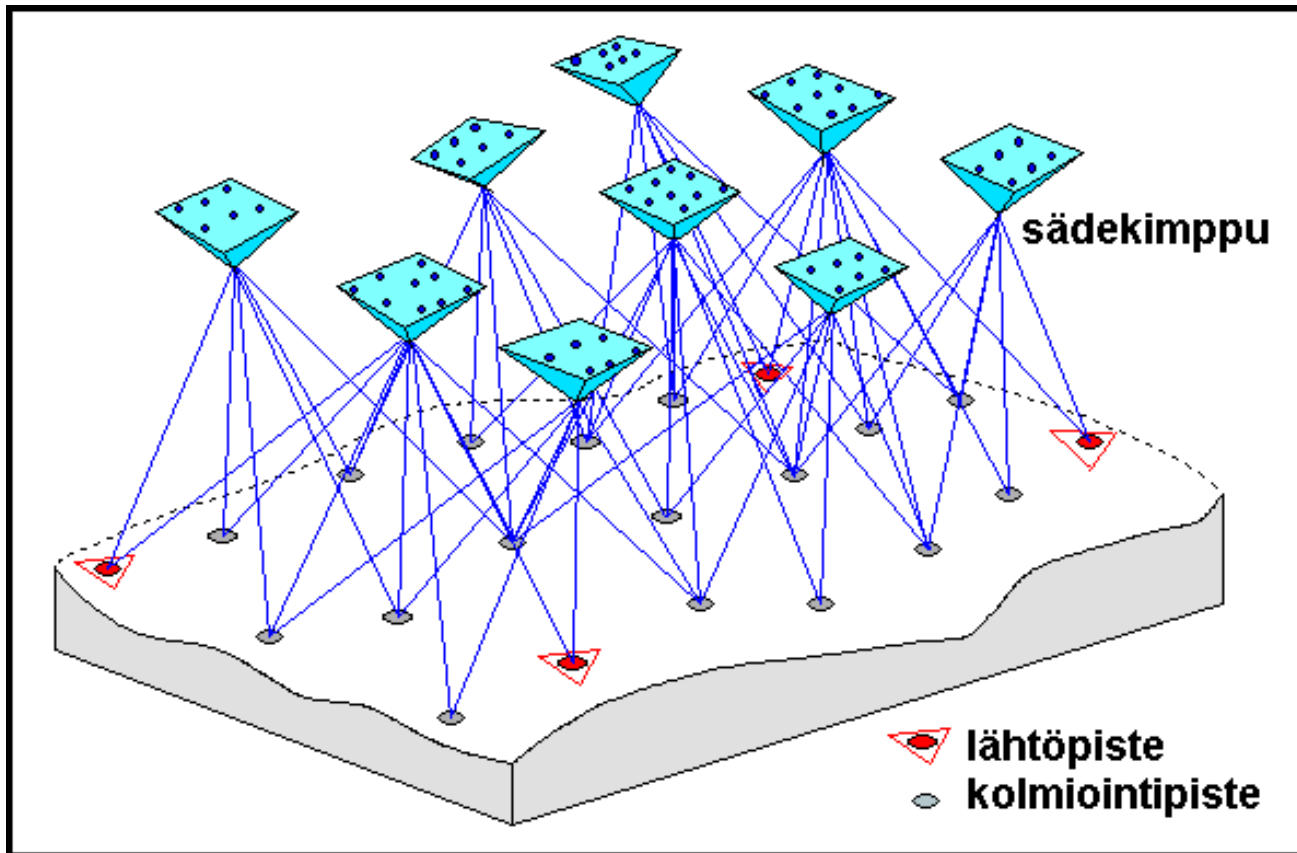


KARTOITUSILMAKUVIEN PROSESSOINTI



Pasi Laurila / Lapin AMK 15.9.2019

Johdattelua

Kartoitusilmakuvaukset

- Kartoitusilmakuvausten avulla tuotetaan ilmavalokuvia mittamalla digitaalisia karttoja, pistepilviaineistoja, maastomalleja, ortokuvia, kaupunkimalleja ja ympäristömalleja
- Laaja-alaiset kartoitusilmakuvaukset tehdään **suuriformaattisilla ilmakuvuskameroilla lentokoneesta**, esimerkiksi:
 - tiedonkeruu maanmittauslaitoksen maastotietokantaan: perusparannus ja ajantasaistus
 - suurikaavainen kartoitus: kaavan pohjakartta ja tiesuunnittelun kartat
- Pienialaisia kartoitusilmakuvauksia ja erityiskohteita mitataan lennökkikuvauksin (UAV, UAS, RPAS, drone, drooni)
- Lennökkikuvauksissa käytetään **pieniformaattisia kameroita**
- Valokuvilta tehtävät mittaukset ovat yleisnimityksenä **fotogrammetrisia mittauksia**

Fotogrammetrinen mittaus

Fotogrammetrinen mittaus on valokuvien perusteella tehtävää kolmiulotteista koordinaattien mittausta.

Kolmiulotteista mittausta sanotaan usein **stereomittaukseksi**.

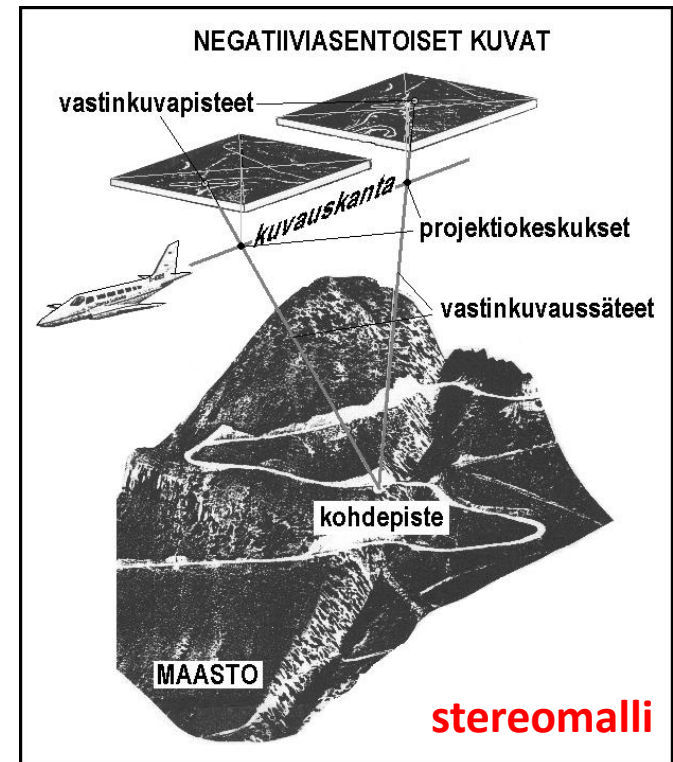
Mitattavien kohteiden tulee näkyä ainakin kahdella vierekkäisellä kuvalla.

Kuvien yhteistä peittoaluetta kutsutaan **stereomalliksi**.

Mittaus edellyttää kuvien **sisäistä, keskinäistä ja ulkoista orientointia**.

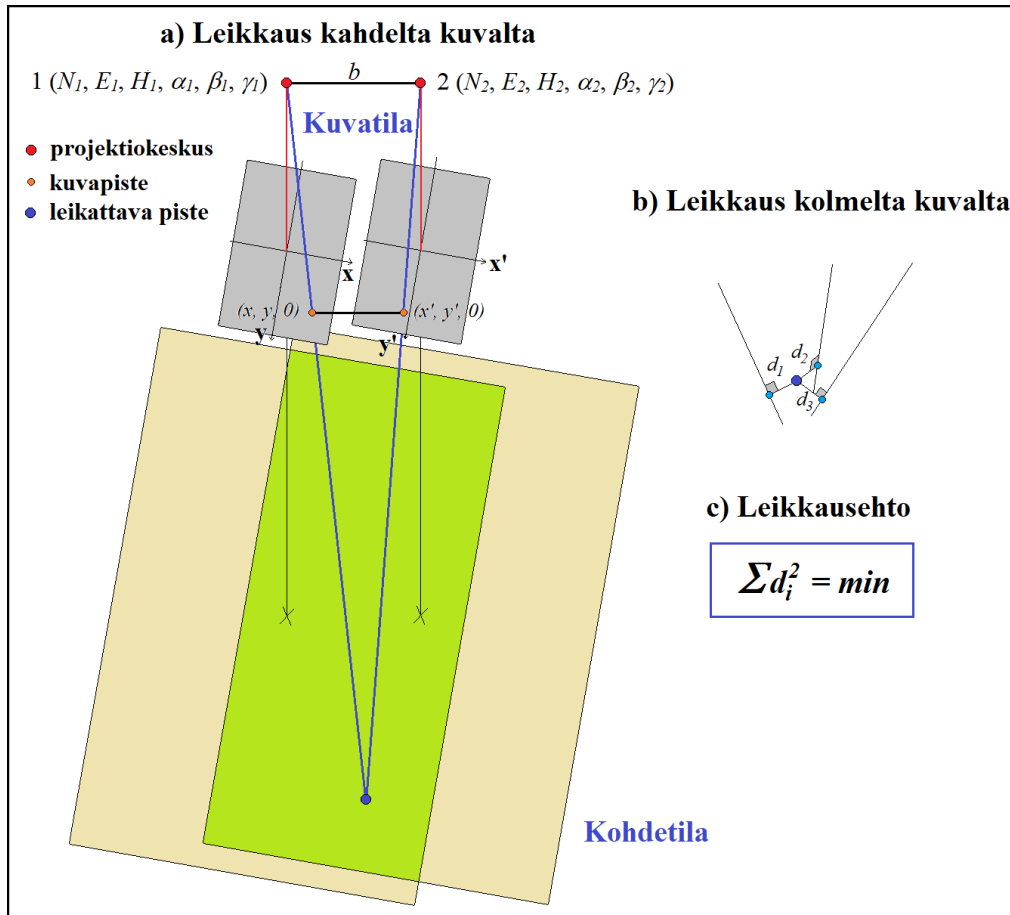
Orientointien jälkeen kohdepisteen koordinaatit saadaan **avaruuseteenpäinleikkauksella**.

Kartoitusilmakuvaukset tehdään **pystykuvauksina**: kameran kuvausakseli on pystysuorassa. Fotogrammetrisia mittauksia voidaan kuitenkin tehdä missä tahansa kamera-asennoissa.

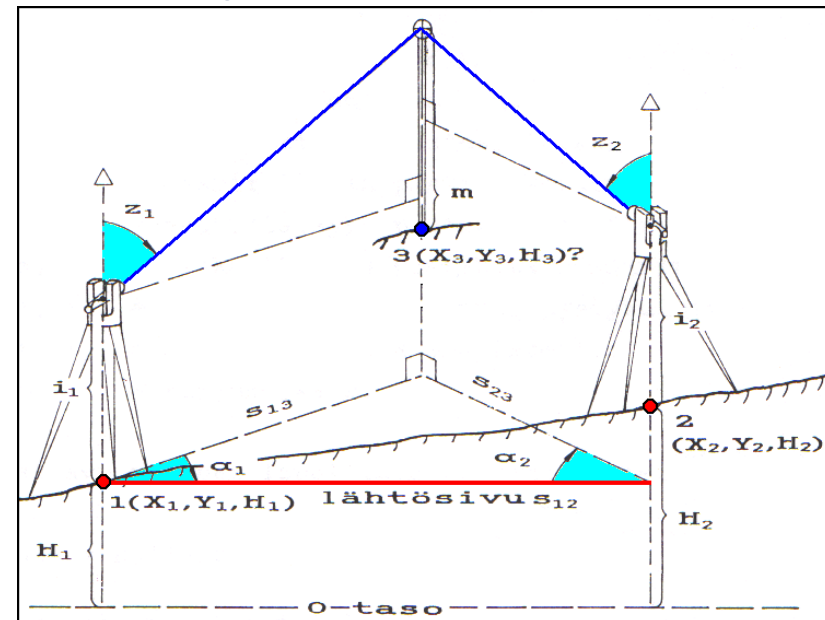


Avaruuseteenpäinleikkaus

Kun kuvat on orientoitu, kuvakoordinaattihavaintojen avulla saadaan muodostettua avaruussuorat, kuvaussäteet, joiden leikkauskohdasta kohdepiste (leikattava piste) löytyy. Leikkauspiste voidaan kahden tai useamman kuvan havainnoista.

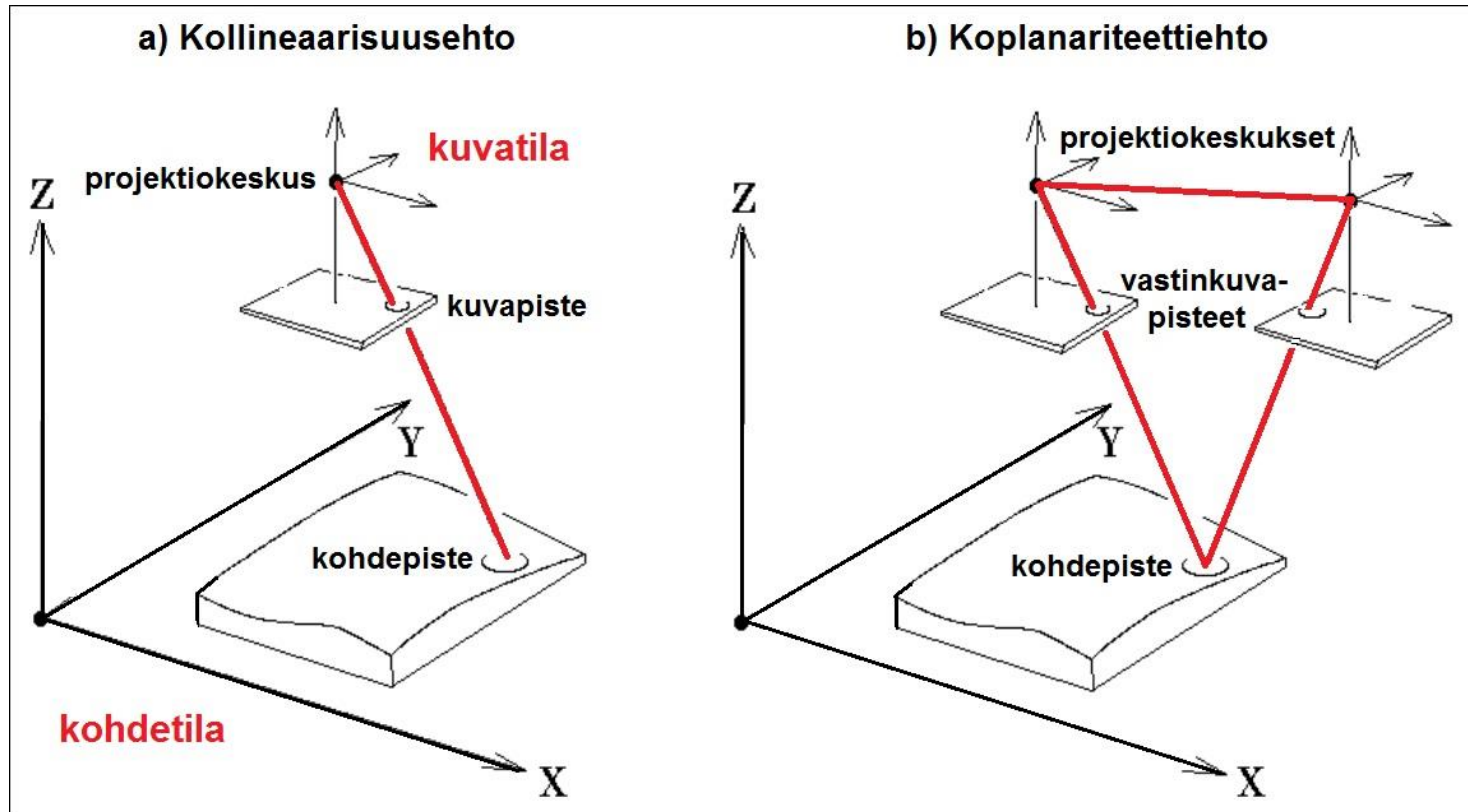


Kuvilta tehtävä avaruuseteenpäinleikkaus on analoginen takymetrillä tehtävän kolmiulotteisen eteenpäinleikkauksen kanssa.



Mittauksen geometriset ehdot

Valokuva on keskusprojektiio eli perspektiivikuva.



Fotogrammetria on matematiikkaa. Mittauksiin liittyy projektiivisiä muunnoksia, koordinaattimuunnoksia, vektoreita, matriiseja, differentiaalilaskentaa, tilastomatemattista estimointia ja tekoälyä.

Agisoft Photoscan/Metashape

- Valokuvien prosessointi mittaustarkoituksessa tapahtuu vähintään puoli-automaattisesti tietokoneohjelmien avulla
- Erityisesti UAV-kuvausten kuvamäärät ovat niin suuria, että automaatio on välttämätöntä
- Tämä esitys ei ole ohje minkään ohjelman käyttöön, kuitenkin esityksen osia on tehty venäläisellä Agisoft Photoscan –ohjelmalla
- Ohjelman uusin versio on Agisoft Metashape

Kuvien orientointi vaiheittain

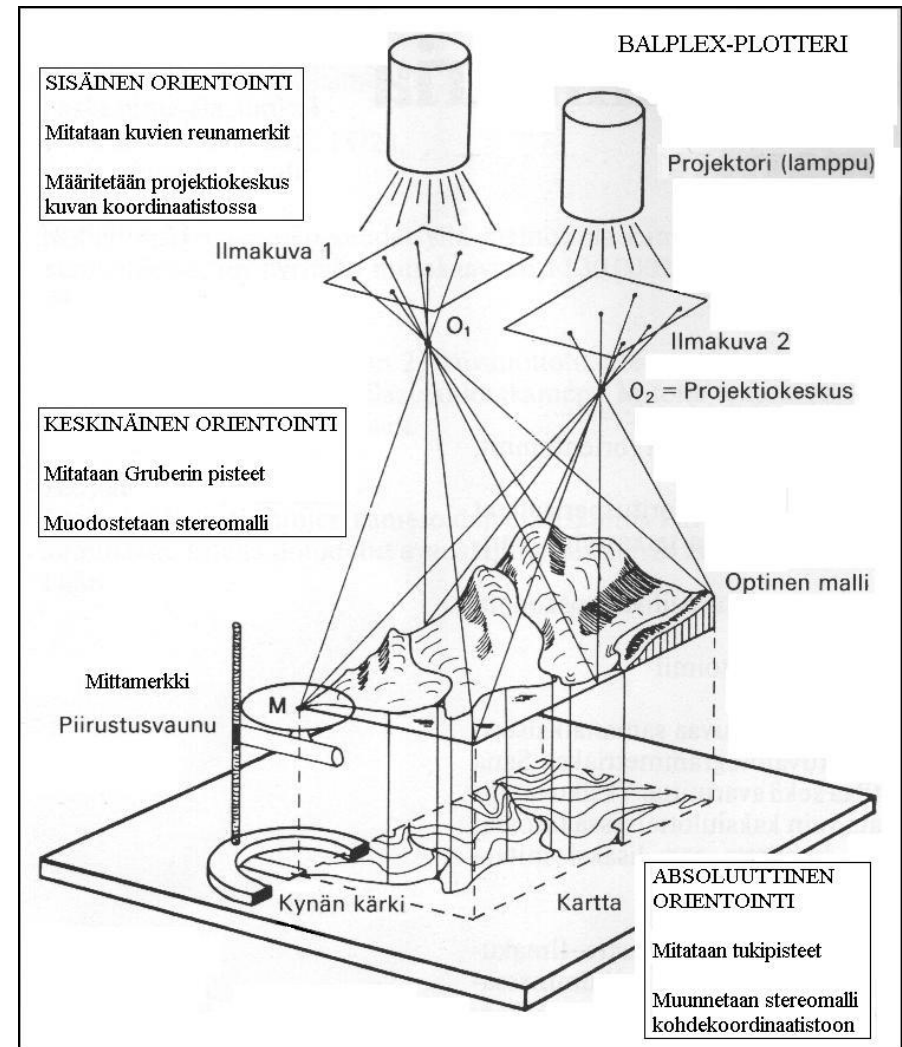
Kuvaparin orientoinnit

Orientoinneilla muodostetaan yhteys kuvakoordinaateista kohdekoordinaatteihin. Orientoinnit ovat edellytys kuvilla näkyvien kohteiden koordinaattien mittaamiselle.

Kuvaparin orientoinnissa on perinteisesti kolme vaihetta:

- 1. Sisäinen orientointi**
- 2. Keskinäinen orientointi**
- 3. Absoluuttinen orientointi**

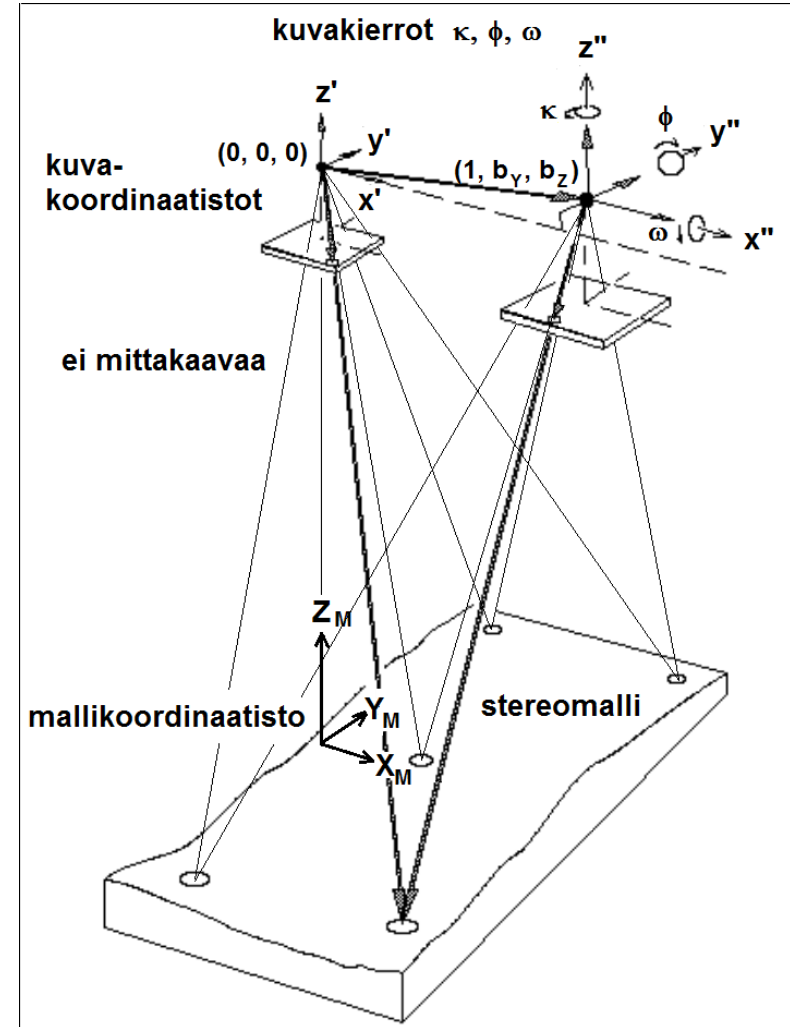
Filmikuvausten ja analogisen fotogrammetrien aikaan orientoinnit olivat “ruuvien vääntämistä”. Nyt ne ovat matematiikkaa ja tekoälyä.



Filmille ja digitaalisesti tallennettujen kuvien orientointi ei periaatteessa eroa toisistaan

Sisäinen ja keskinäinen orientointi

- **Sisäinen orientointi** määrittää projektio-keskuksen paikan kuvakoordinaatistossa ja kuvanmuodostuksen virheet
- Se perustuu kalibrointitietoihin ja/tai laskennalliseen itsekalibrointiin
- **Keskinäisen orientoinnin** tuloksena muodostuu kolmiulotteinen **stereomalli**
- Mittaajan tekemässä keskinäisessä orientoinnissa stereomalli muodostetaan mittaamalla vähintään viiden vastinkuvapisteen sijainti
- Vastinkuvapisteen ovat selväpiirteisiä yksityiskohtia kuvilla
- Mittaaja pyrkii valitsemaan ne tasaisesti stereomallin alueelta ($\rightarrow$ ns. Gruberin pisteet, yleensä kuusi pistettä)



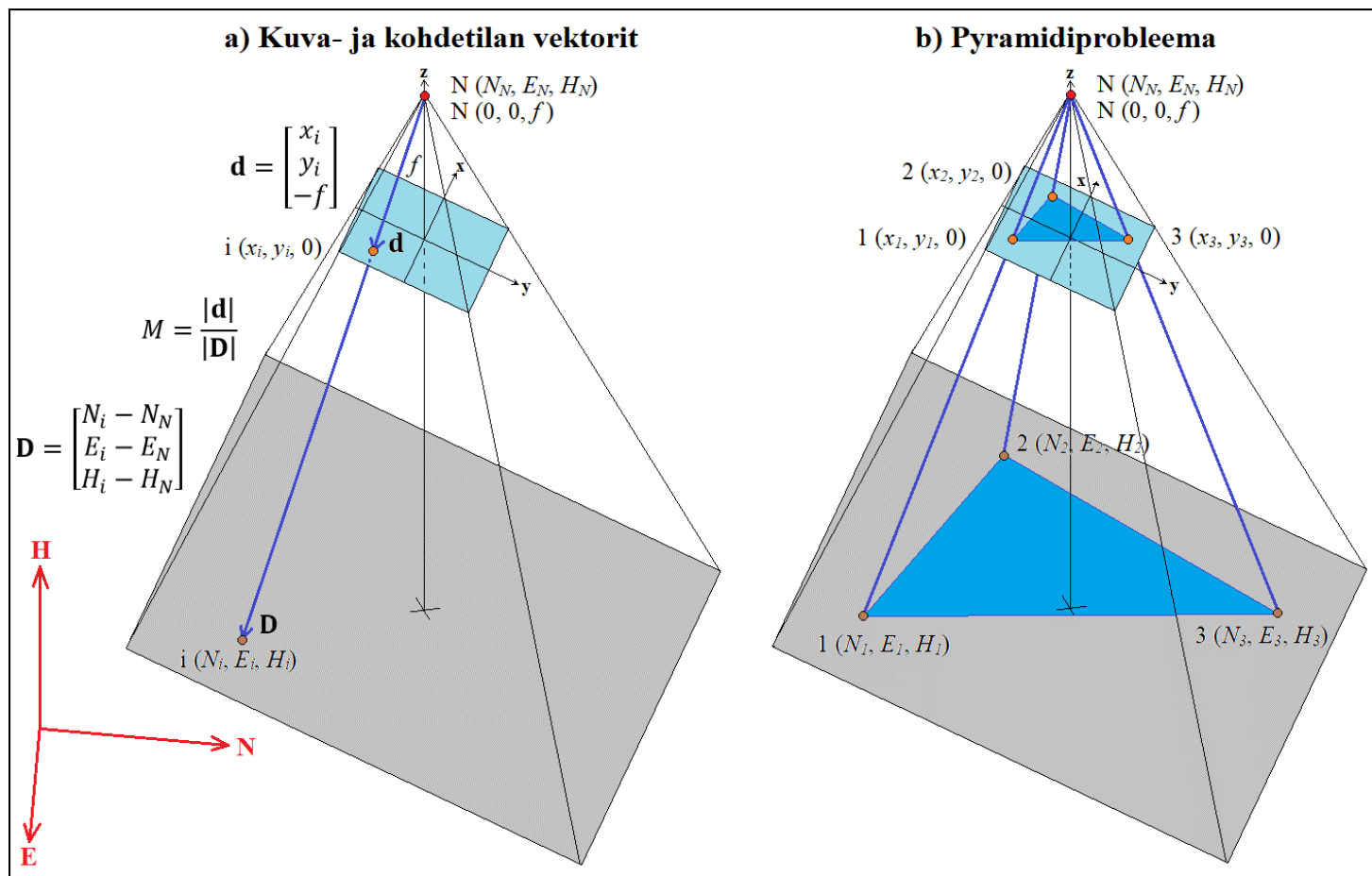
Automaattinen keskinäinen orientointi voi perustua tuhansiin pisteisiin.

Absoluuttinen orientointi

- **Absoluuttisessa orientoinnissa** (ulkoisessa orientoinnissa) keskinäisen orientoinnin stereomalli muunnetaan kohdekoordinaatistoon
- Muunnos tehdään **lähtöpisteiden** avulla
- Stereomallilla pitää olla vähintään **kaksi taso- ja kolme korkeuslähtöpistettä**
- Jos riittävä määrä keskinäisessä orientoinnissa käytetyistä vastinkuvapisteistä on lähtöpisteitä, voidaan ulkoinen orientointi laskea keskinäisen orientoinnin mittauksista
- Näin tehtäessä puhutaan **yhdistetystä ulkoisesta orientoinnista**

Yhden kuvan ulkoinen orientointi

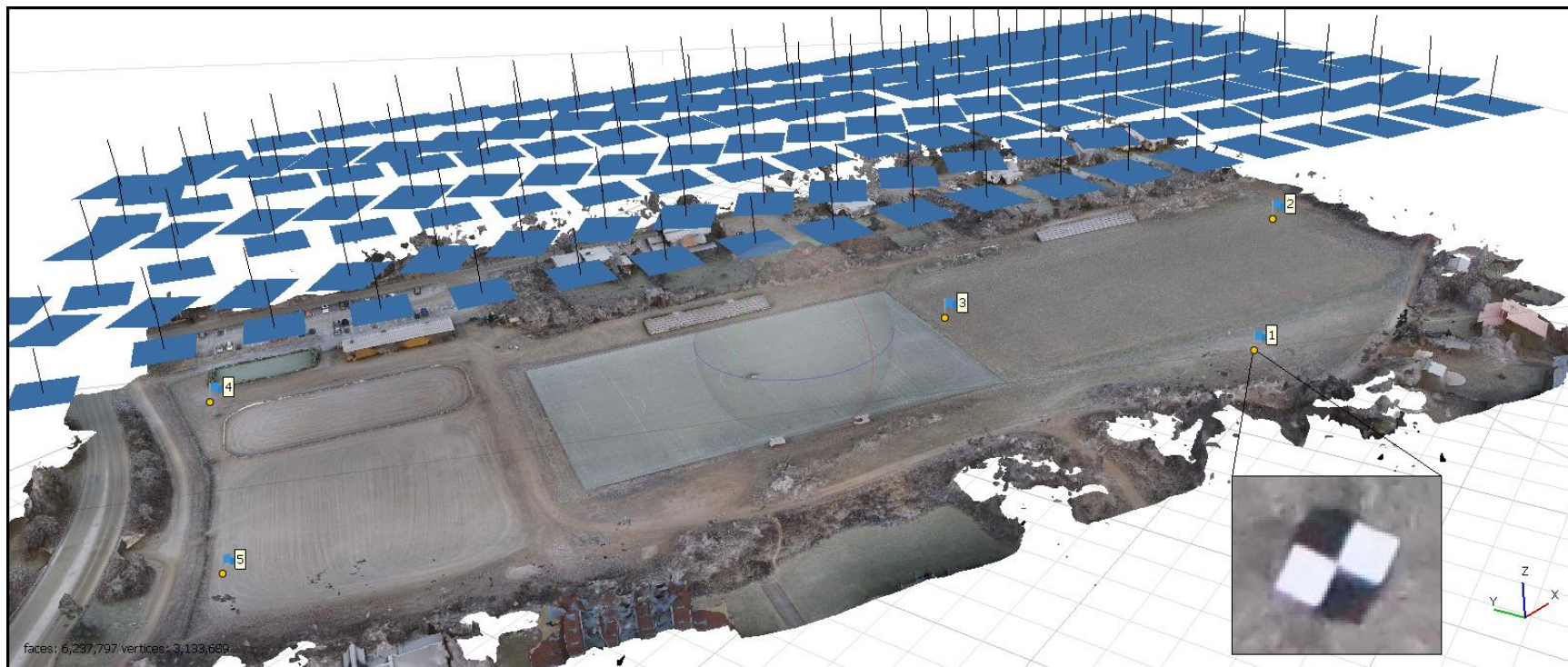
Yksittäisen kuvan ulkoinen orientointi voidaan laskea, kun kuvalla näkyy kolme yhdistettyä lähtöpistettä (**pyramidiprobleema**). Yleensä näin ei tehdä, koska lähtöpisteitä ei ole kovin tiheästi ja stereomallien laatu kärsisi tällaisesta menettelystä.



Kuvablokin orientointi

Kartoitusilmakuvaus tuottaa mahdollisimman säännöllisistä kuvausjonoista muodostuvan kuvablokin, johon voi kuulua tuhansia kuvia. Nykyisin kaikki kuvat prosessoidaan samassa laskennassa, jonka tuloksena saadaan **orientoidut yksittäiskuvat**.

Kuvablokin orientointia kutsutaan **fotogrammetriseksi pistetihennykseksi**.



Syksyllä 2018 kuvattu Susivoudin kuvablokki. Oikeassa reunassa signaloitu lähtöpiste.

Fotogrammetrinen pistetiennys

Analogisen fotogrammetrian aikaan

- Ilmakuvia on käytetty kartoitustöissä yli sata vuotta
- Kuvat on aina pitänyt saada liitettyä yhteen ja kartta-koordinaatistoon
- Näihin tarkoituksiin kehitettiin erilaisia **ilmakolmiointi-menetelmiä**
- Pitkään, 1960-luvulle asti, toimittiin leikkaa ja liimaa – periaatteella: karttalehden kuvat liimattiin pahville, ja sovitettiin lähtöpisteiden avulla koordinaatistoon
- Toisen maailmasodan jälkeen kehitettiin analogisia stereo-kartoituskojeita hyödyntäviä jonokolmiointimenetelmiä
- 1970-luvulla, kun tietotekniikka alkoi yleistyä, siirryttiin analyyttisiin ilmakolmiointimenetelmiin
- Alettiin puhua fotog**rammetrisesta pistetihennyksestä**

Perinteinen ja nykyinen pistetihennys

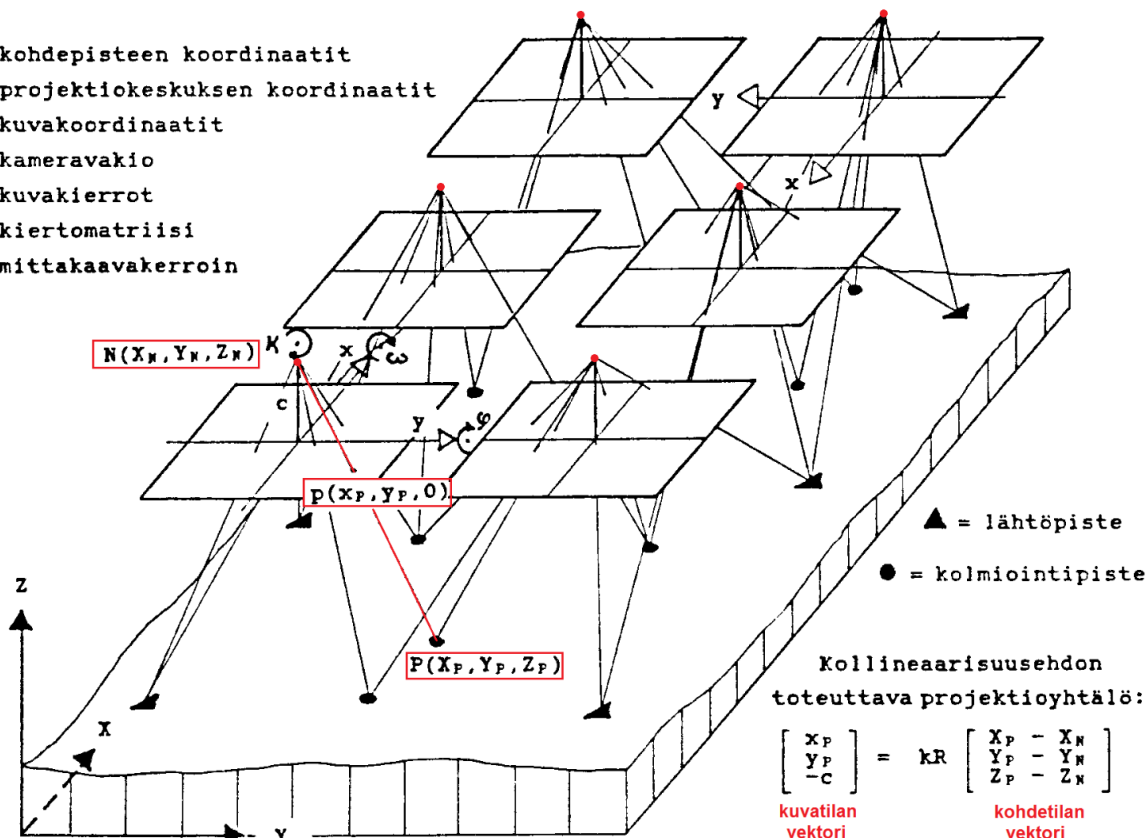
- **Fotogrammetrinen pistetihennys eli ilmakolmiointi**
- Perinteinen fotogrammetrinen pistetihennys tarkoitti menetelmiä, joiden avulla ilmakuviin perustuen määritettiin kuvatun kohteen yksityiskohtien koordinaatit ja korkeudet
- Sen **päätarkoitus** oli määrittää **tukipisteitä** kuvapareittain tehtävää stereomallien absoluutista orientointia varten: filmikuvausten aikaan kartoitusmittaukset tehtiin analogisilla tai analyyttisillä stereokartoituskojeilla kuvapareittain
- Maaston yksityiskohtien, kuten rajamerkkien koordinaattien, määrittäminen saattoi myös olla pistetihennyksen tarkoituksena
- **Digitaalisiin kuviin** perustuvissa, puoliautomaattisissa tai automaattisissa mittauksissa, pistetihennyksen päätarkoitus on määrittää kuvablokin **kuvien ulkoinen orientointi**

Sädekimppumenetelmä

Fotogrammetrinen pistetihennys lasketaan nykyisin **sädekimppumenetelmällä**, jossa kuvakoordinaattihavainnot mallinnetaan suoraan kollineaarisuusehdon mukaisesti. Menetelmä tuli käyttöön jo 1970-luvulla.

SYMBOLIT:

X_P, Y_P, Z_P = kohdepisteen koordinaatit
 X_N, Y_N, Z_N = projektiokeskuksen koordinaatit
 x_P, y_P = kuvakoordinaatit
 c = kameravakio
 κ, ω, φ = kuvakierrot
 R = kiertomatriisi
 k = mittakaavakerroin



Menetelmästä saatetaan käyttää myös nimitystä **sädekimppu-alueasoitus**.

Kolmiointipiste on pistetihennyksellä määritettävä piste.

Laskennan lähtötiedot

- Pistetihennyksen laskennassa **tunnettuja suureita** ovat lähtöpisteiden koordinaatit
- Tärkeimmät **havainnot** ovat laskentaan valittujen pisteiden kuvakoordinaatit
- **Lisähavaintoina** voi olla muun muassa GNSS- ja INS-havaintoja
- **Tuntemattomia** eli **parametreja** ovat kolmiointipisteiden koordinaatit ja kuvien ulkoinen orientointi (projektiokeskusten koordinaatit ja kuvakierrot)
- **Lisätuntemattomina** voi olla kuvien sisäistä orientointia ja geometrisia kuvautumisvirheitä kuvaavia **lisäparametreja**
- **Lisäparametrien luotettava määrittäminen edellyttää suurten kuvapeittojen käyttöä: pituuspeiton tuli olla 80 % ja sivupeiton 60 %, mitä enemmän kuvia, sen parempi**

Laskennan tulokset

- Pistetihennyksen laskentatuloksia ovat kuvien **ulkoinen orientointi**, kolmiointi- ja tarkastuspisteiden **koordinaatit** ja kameran sisäisen orientoinnin **lisäparametrit**
- Laskennan yhteydessä paikannetaan karkeat havainto- ja lähtöpistevirheet
- Mittauksen **tarkkuuden kuvaamiseksi** lasketaan:
 - kuvakoordinaattihavaintojen jäännösvirheet ja niiden keskihajonta (painoyksikön keskivirhe)
 - lähtöpisteiden ja tarkastuspisteiden tunnettujen ja fotogrammetristen koordinaattien erot ja erojen keskihajonnat
 - kolmiointipisteiden koordinaattien keskihajonnat ja virhe-ellipsoidit
- **Automatisoiduissa mittauksissa lasketaan pistetihennys jopa useita sadoista tuhansista havainnoista, tällöin laskennan tulokset esitellään pääosin graafisesti**

Puoliautomaattinen pistetiennysprosessi

Likiarvojen laskenta

- Prosessi käynnistyy sarjalla menettelyjä, joiden tavoitteena on löytää likiarvot kaikille laskennan tuntemattomille
- Ja tärkeää: **prosessi tuottaa kuvakoordinaattihavainnot**
- Menettelyinä ovat:
 - GNSS- ja INS-havainnot
 - koordinaattimuunnokset
 - keskinäiset ja ulkoiset orientoinnit
 - avaruuseteenpäinleikkaukset
- Taustalla toimivat erilaiset **tekoäly- ja konenäkösovellukset**

Kuvakoordinaattihavainnot

Kuvassa on Agisoft-ohjelman automaattisesti hakemat vastinkuvapisteet kuvaparilla DSC00018 ja DSC00019.

Kaikki riittävän luotettavasti paikannetut vastinkuvapisteet käytetään hyväksi laskennassa.

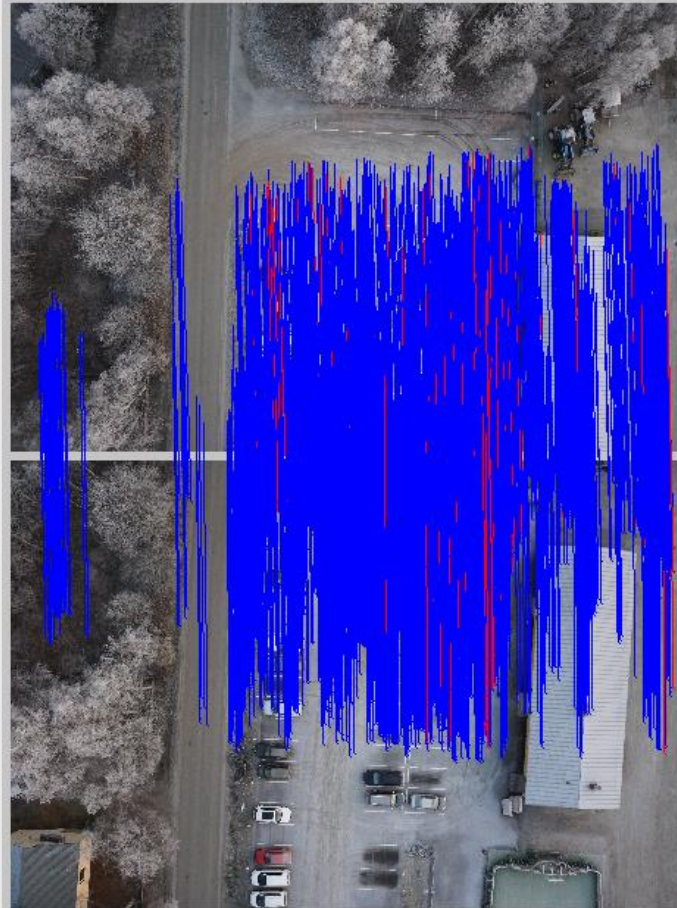
Näistä pisteistä muodostuu **harva pistepilvi**.

Karkeita virheitä voidaan havaita ja poistaa, kun samoja vastinkuvapisteitä löytyy useammalta kuin kahdelta kuvalta.

Matches

DSC00019

Photo	Total	Valid	Invalid
DSC00018	2272	2160	112
DSC00020	1715	1620	95
DSC00049	541	483	58
DSC00062	512	426	86
DSC00051	301	250	51
DSC00050	272	227	45
DSC00063	245	204	41
DSC00061	236	190	46
DSC00052	204	158	46
DSC00021	145	134	11
DSC00060	81	62	19
DSC00053	73	47	26
DSC00017	72	47	25
DSC00054	66	64	2
DSC00064	20	19	1
DSC00094	19	13	6
DSC00093	11	9	2
DSC00095	3	1	2
DSC00048	3	3	0
DSC00092	1	1	0



Lähtöpisteet puoliautomaattisesti

- Jos mittauksessa on lähtöpisteitä, ne tunnistetaan puoliautomaattisesti tai laskijan toimesta
- Laskija liittää lähtöpisteisiin pistenumerot koordinaatteineen
- Jos lähtöpisteitä ei ole, laskennat tehdään likiarvo-laskennan yhteydessä muodostetussa **vapaassa erilliskoordinaatistossa**
- Mahdolliset GNSS- ja INS-havainnot liittävät erilliskoordinaatiston mittaustarkkuuden rajoissa WGS84-järjestelmään

Optimointi

- Kun alkuarvot ja havainnot ovat olemassa, tehdään fotogrammetrinen pistetihennys sädekimppumenetelmällä
- Tuntemattomien arvot optimoidaan **pienimmän neliösumman menetelmällä**
- Optimoinnissa **minimoidaan** kuvakoordinaattihavaintojen **jäännösvirheiden neliösumma**
- Tuloksena saadaan kuvien ulkoiset orientoinnit, kolmiointipisteiden koordinaatit (= harva pistepilvi), kamerakalibroinnin lisäparametrit ja erilaisia tarkkuusarvioita

Sisäisen orientoinnin tiedot

Lennokkikuvausten kamera on lähes aina kalibroimaton. Kalibrointi tehdään lisäparametrien avulla pistetihennyksen yhteydessä. Puhutaan **itsekalibroinnista**. Kuvassa on Agisoft-ohjelman laskemat kalibrointitiedot kameralle Sony Alpha 6000.

a) Kamera

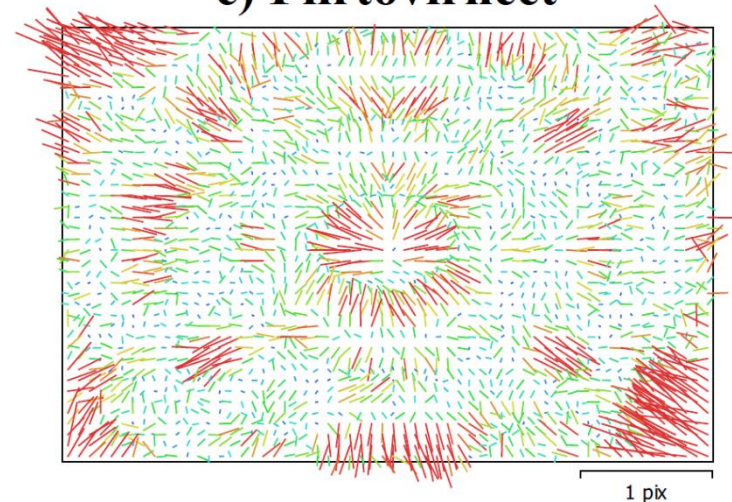


Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-6000 (20mm)	6000 x 4000	20 mm	4 x 4 μm	No

b) Lisäparametrit ja niiden korrelaatiot

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	5139.35	2.1	1.00	0.10	0.09	-0.27	0.18	-0.06	-0.01	0.01
Cx	-31.6727	0.2		1.00	-0.05	-0.00	-0.00	0.01	0.20	0.02
Cy	-18.3251	0.15			1.00	-0.04	0.04	-0.03	0.07	0.32
K1	-0.0270847	7.5e-005				1.00	-0.94	0.87	0.00	-0.00
K2	0.0444581	0.00038					1.00	-0.98	-0.00	0.01
K3	-0.0168913	0.00057						1.00	-0.00	-0.01
P1	-0.00069779	4.1e-006							1.00	0.09
P2	0.000708843	3.6e-006								1.00

c) Piirtovirheet

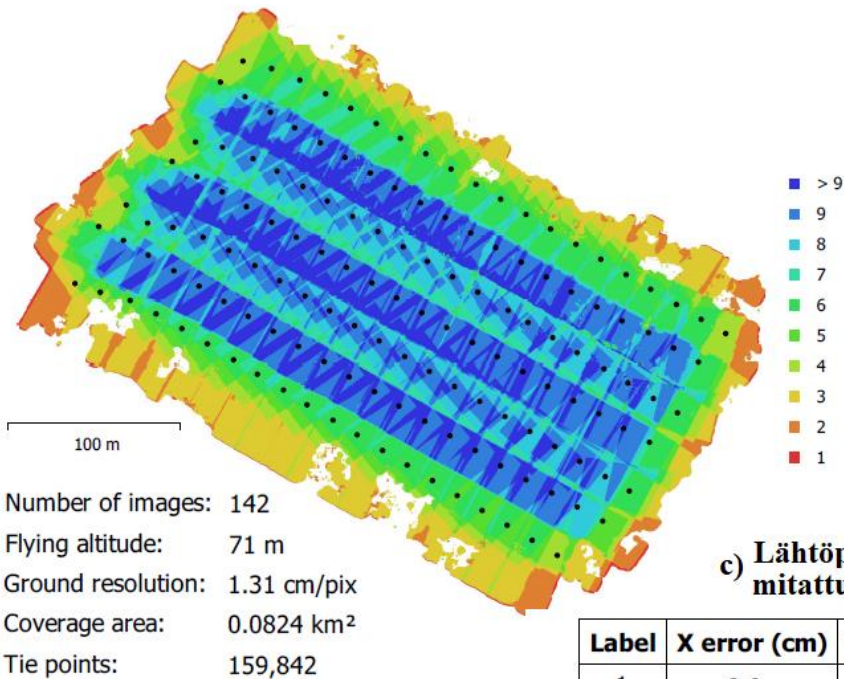


Piirtovirheet ovat tyypillisesti säteittäissymmetrisiä

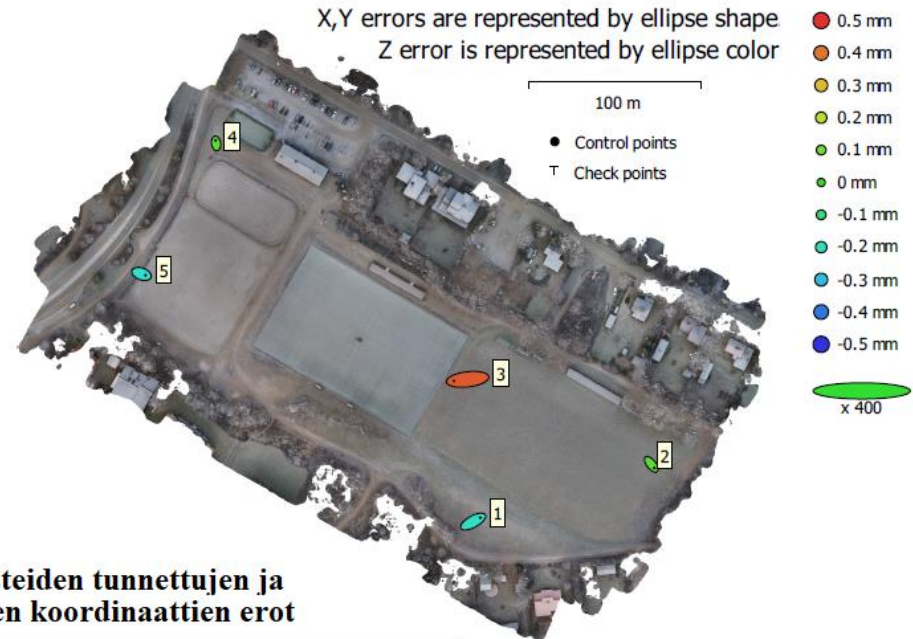
Laatu- ja tarkkuusarvioita

Syksyllä 2018 tehdyn Susivoudin kentän kuvauksen laaturaportin tietoja.
Agisoft-ohjelman tulosteita.

a) Kohteiden näkyminen kuvilla



b) Absoluuttisen orientoinnin tarkkuus



c) Lähtöpisteiden tunnettujen ja mitattujen koordinaattien erot

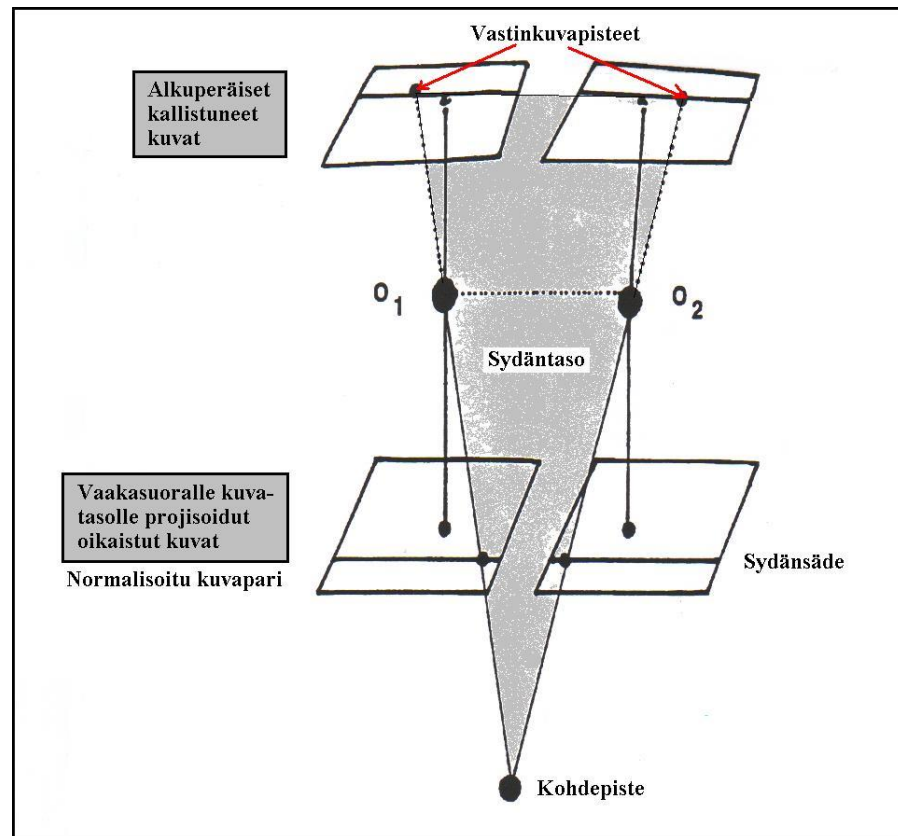
Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)
1	2.0	1.1	-0.0	2.3
2	0.8	-1.1	0.0	1.4
3	-3.9	-0.4	0.0	4.0
4	-0.1	0.8	0.0	0.8
5	1.1	-0.4	-0.0	1.2
Total	2.1	0.8	0.0	2.2

Tiheä pistepilvi

- Yleensä pistetihennyksessä syntynyt harva pistepilvi halutaan tihentää tiheäksi **fotogrammetriseksi pistepilveksi**
- Tihennettäessä jokaiselle riittävän luotettavasti määritettävälle vastinkuvapisteparille lasketaan koordinaatit avaruusesteenpäinleikkauksella
- Usein vastinkuvapisteteet haetaan kuvasovituksella **normalisoiduilta**, vaakatasoon oikaistuilta, **kuvilta sydänsäteitä** pitkin
- **Pistepilven siistimisen jälkeen kohteesta muodostetaan korkeusmalli ortokuvien laskentaa varten**

Normalisoitu kuva ja kuvapari

- **Normalisoitu kuva** on vaakatasoon oikaistu kuva eli **täydellinen pystykuva**
- Normalisoidut kuvat muodostetaan keskinäisessä orientoinnissa, niin että vastinkuvapisteen löytyvät samalta **sydäntasossa** olevalta kuva-alkioriviltä
- Normalisointi edellyttää kuvien uudelleen projisointia ja uusien kuvamatriisien tekoa: tämä voidaan tehdä niin sanotusti ”lennossa”
- **Normalisointi helpottaa mittausten automatisointia, koska vastinkuvapisteen hakuavaruus muodostuu normalisoinnissa yksiulotteiseksi**

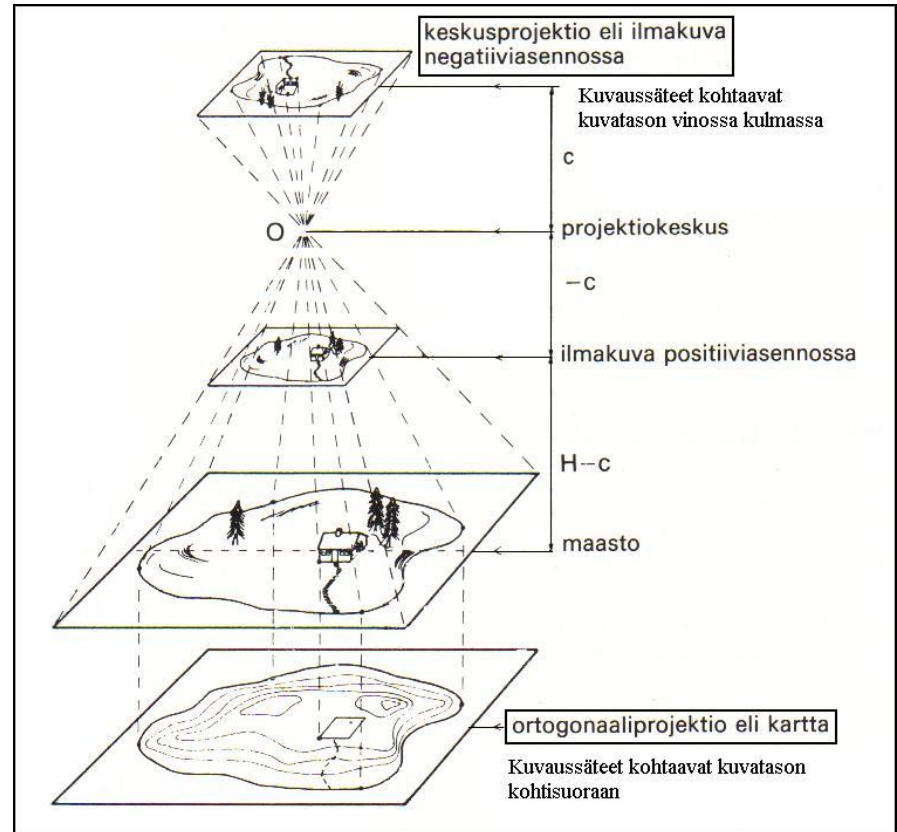


sydäntaso = epipolaaritaso
sydänsäde = epipolaarisuora

Ortokuvan valmistus

Ortokuva

- **Ortokuva on karttaprojektioon oikaistu ilmakeku tai ilmakeva-mosaikki**
- Sen tuottamisen yhteydessä ilmakevan kuvataso oikaistaan vaakatasoon, kuvalta poistetaan **maastovirheen** vaikutukset ja kuva orientoidaan haluttuun koordinaatistoon
- Ortokuvia tuotetaan sekä ilmakevettä satelliittikuvilta
- **Nykyisin ortokuva on ilmakevauksen vakiotuote**



Ortokuvalla jokaista kuvan kohdetta katsotaan suoraan ylhäältä

ortogonaaliprojektiio → ortokuva

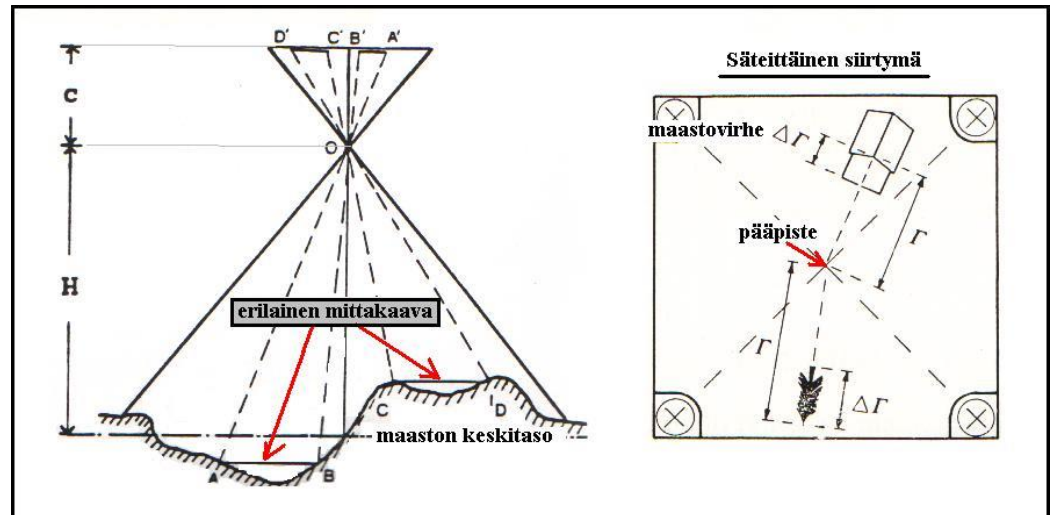
Ortokuvien käyttö

- Ortokuvalta voidaan mitata kohteiden koordinaatteja, joten niitä voidaan käyttää esimerkiksi maastokarttojen ajantasaistukseen
- Ortokuvia käytetään ilmakuvapohjaisten karttojen valmistuksessa
- Esimerkiksi kaavan pohjakartta voi olla ortokuvan ja viivapiirroksen yhdistelmä
- Ortokuvia voidaan lisätä omana tasonaan paikkatietojärjestelmiin ja yhdistää muihin aineistoihin erilaisia analyyyseja ja visualisointeja varten
- Ortokuvia käytetään Internetin paikkatietopalveluissa maaston havainnollistamiseen

Maastovirhe

- Ilmakuvan maastovirhe on **keskusprojektion ominaisuus**
- Kyse on perspektiivistä
- Maaston kohteiden kuvapisteen siirtyvät korkeustasonsa perusteella kuvan pääpisteeseen päin tai siitä poispäin
- **Tämä säteittäinen siirtymä on maastovirhe**
- Siirtymiä verrataan ortogonaaliprojektion mukaiseen kuvautumiseen

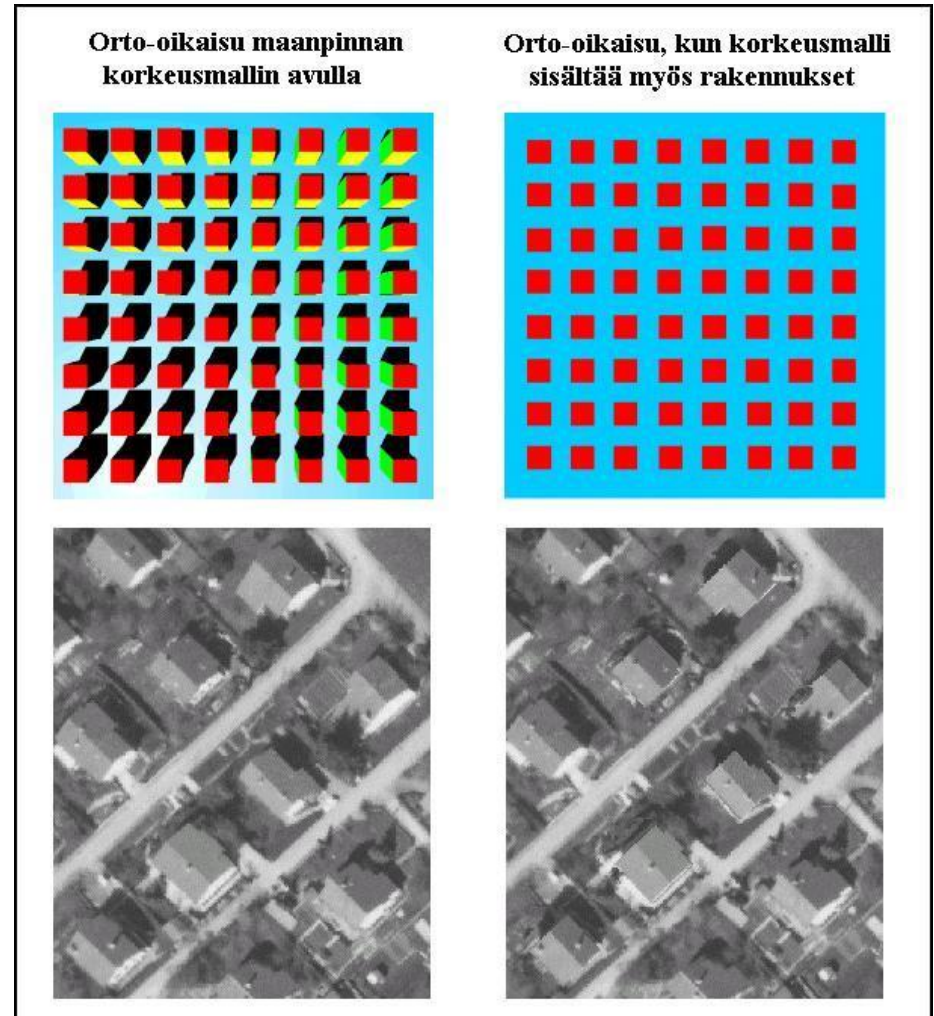
Maastovirhe on helppo havaita pystysuoran kohteen kuvalta, mutta se vaikuttaa aina myös maastopinnoilla. Tällöin sitä ei kuitenkaan voi havaita ja mitata yhdeltä kuvalta, vaan mittauksia varten tarvitaan kohteen stereokuvapari



Kun kahdella kohteella on sama tasosijainti, mutta eri korkeussijainti, kohteet kuvautuvat perspektiivikuvalla eri paikkoihin, jotka sijaitsevat kuvan pääpisteestä lähtevällä säteellä

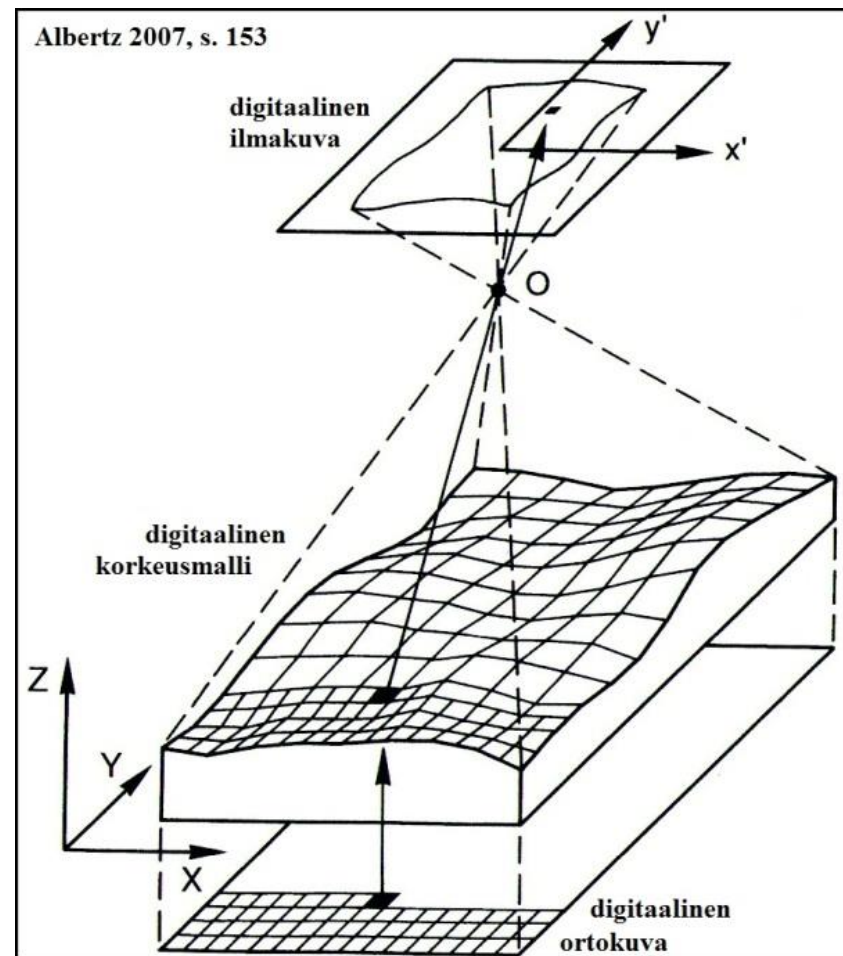
Perusortokuva ja tosiortokuva

- **Perusortokuvalla** rakennuksia ja muita rakenteita ei orto-oikaista
- Näin on, kun korkeusmalli ei sisällä rakennuksia
- Jos rakennukset sisältyvät korkeusmalliin, voidaan nekin orto-oikaista
- Tuloksena on **tosioortokuva**, jossa ei näy rakennusten julkisivuja



Digitaalinen ortokuva

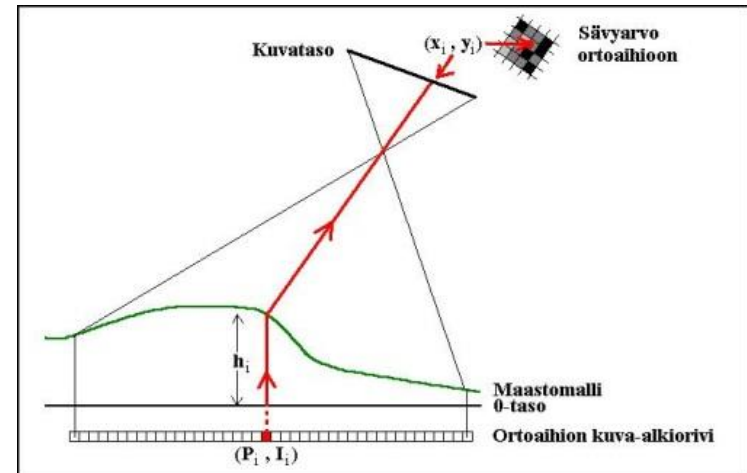
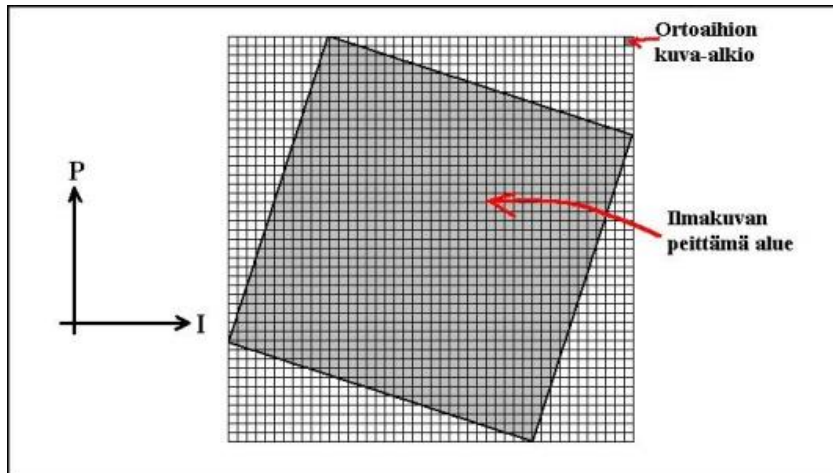
- Digitaalinen ortokuva on yksinkertainen tuottaa
- **Tarvitaan digitaaliset ilmakuvat, niiden orientitiedot ja maaston korkeusmalli**
- Ortokuva tuotetaan laskennallisesti



Ortokuvan laskenta

Ulkoisen orientoinnin perusteella lasketaan likimäärin kuvan maastossa kattama alue. Sen ympärille määritellään koordinaatiston mukaan suunnattu **ortoaihio**.

Kullekin ortoaihion kuva-alkiolle lasketaan maastomallin ja orientointitietojen perusteella sitä vastaava alkuperäisen kuvan kuva-alkio.

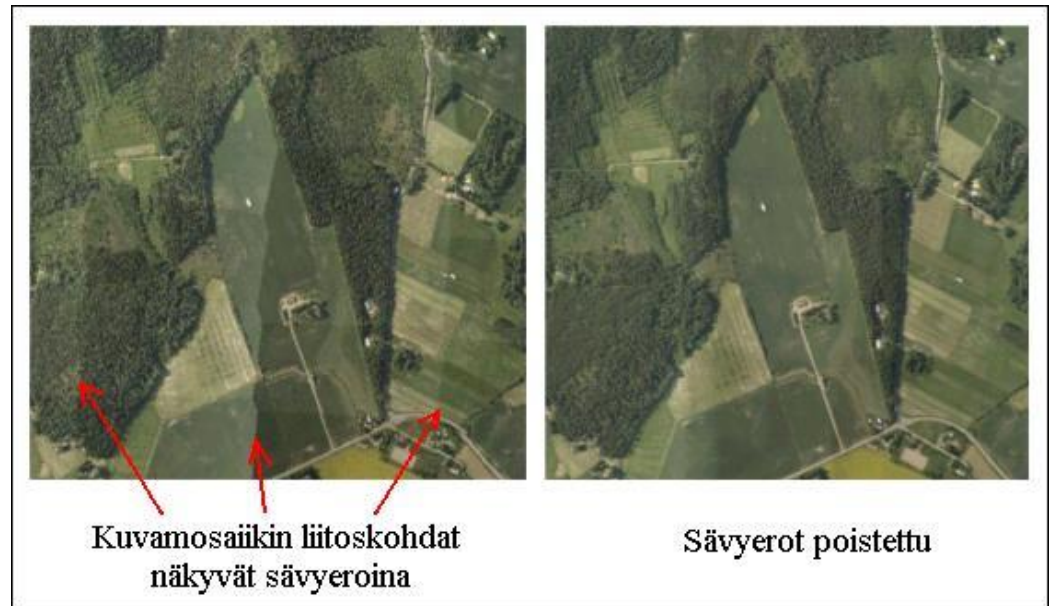


Ortoaihion kuva-alkiolle määritetään alkuperäiseltä kuvalta sävyarvo. Yksinkertaisin menettelytapa on ottaa sama sävyarvo kuin alkuperäisellä kuvalla. Yleensä kuitenkin käytetään alkuperäisen kuvan sävyarvoista jollakin tekniikalla laskettua painotettua sävyarvoa.

Kuvamosaiikin muodostaminen

- Yhdeltä ilmakuvalta voidaan tuottaa vain hyvin pienialainen ortokuva
- Niinpä useampia kuvia yhdistetään kuvamosaiikeiksi
- Osakuvien reunoille syntyy sekä geometriaan että sävyihin liittyviä epäjatkuvuuskohtia, jotka tulee poistaa

Esimerkiksi saman alueen puut ovat sävyiltä erilaisia kun niitä katsotaan auringon valaisemalta puolelta tai varjon puolelta.



Käytännössä tekoäly ja automatiikka hoitavat ortokuvien tuotannon.

Puuttuva kuvainformaatio

Erityisesti tosiortokuvien tuotannossa voi käydä, että ortokuvaan ei löydy kuvainformaatiota. Ongelmaan auttaa, kun ilmakuvauus tehdään mahdollisimman suurilla kuvapeitoilla ja pitkäpolttovälisellä kameralla



Kuva Tampereelta

Lähteet

Kirjat ja lehdet

- Aber, J. S., Marzolff, I. ja Ries, J. B. 2010. Small-format aerial photography – Principles, techniques and geoscience applications. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Armenakis, C. ja Patias, P. 2019. Unmanned vehicle systems for geomatics – Towards robotic mapping. Whittles Publishing, Dunbeath, UK.
- Hepke, C. (Hrsg.) 2017. Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer-Spektrum, Berlin, Deutschland.
- Laurila, Pasi. 1990. Fotogrammetrisen pistetihennyksen laadunvalvonta laskennallisin menetelmin. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Luhmann, T. 2019. A measurement Technology in transition – Recent Developments in close-range photogrammetry. GIM International, Business Guide 2019, 14-19.