

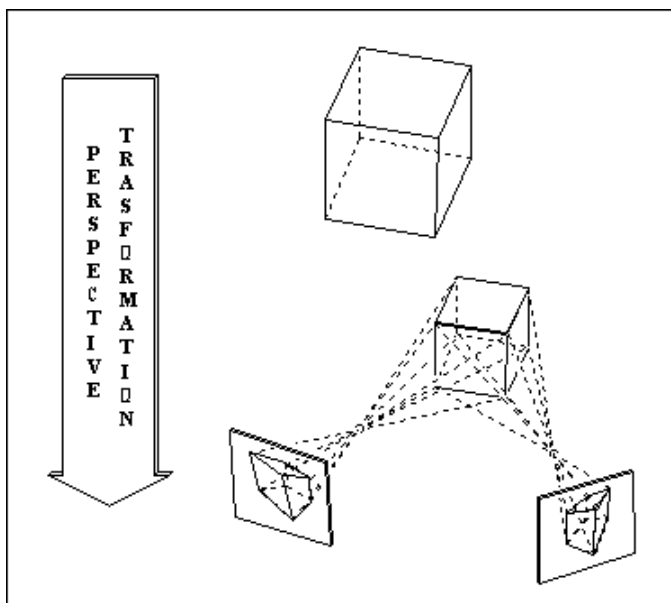
## Luento 4: Kuvien geometrinen tulkinta

### AIHEITA

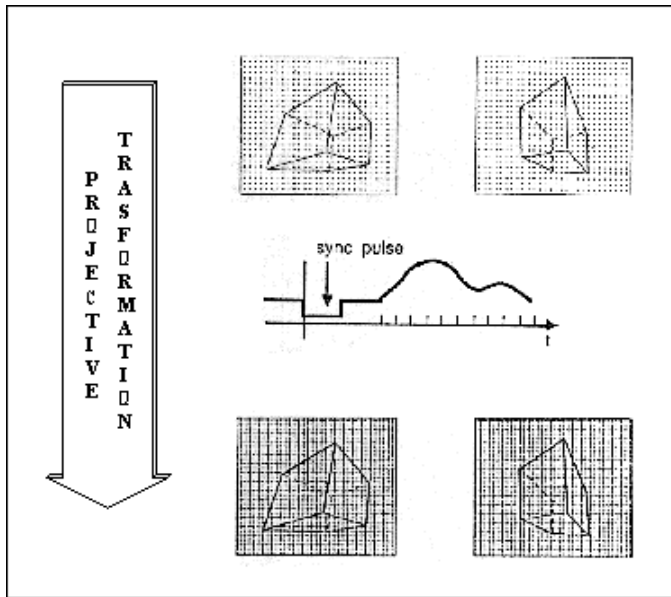
- [Muunnokset informaatiokanavassa](#)
- [Geometrisen tulkinnan vaihtoehdot](#)
- [Mittakaava ja mittakaavaluku](#)
- [Laskuesimerkki kuvamittakaavasta](#)
- [Säteettäissiirtymään perustuva yksikuvamittaus](#)
- [Kaksoissuhde](#)
- [Neljän pisteen menetelmä](#)
- [Kolmiulotteinen mittaaminen](#)
- [Keskusprojektion huomioiminen erityistapauksissa](#)
- [Tehtäviä](#)

### Muunnokset informaatiokanavassa

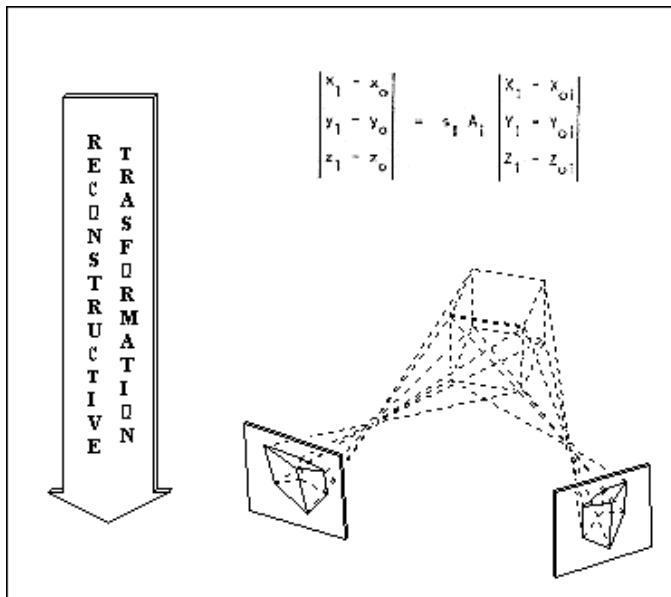
Kolmiulotteinen kohde voidaan dokumentoida esittämällä se 2-D kuvina tai 3-D malleina. Dokumentointi edellyttää kohteen 3-D geometrian havaitsemista ja mittaamista. Fotogrammetriassa tämä perustuu kohteen valokuvaamiseen ja sen rekonstruointiin näiltä valokuvilta. Rekonstruointi voidaan jakaa geometrisiin ja radiometrisiin muunnoksiin, jotka eivät suinkaan ole toisistaan riippumattomia. Tässä yhteydessä keskitytään kuitenkin tarkastelemaan lähinnä geometrisia muunnoksia kohteen ja mallin välisessä informaatiokanavassa. Vastaavasti voitaisiin käsitellä myös kohteen värejä ja pinnan tekstuuria. Kun kohteesta rekonstruoi tuun pintamalliin liitetään tekstuuri, puhutaan ortokuvasta tai fotorealisticesta 3-D mallista.



**Optinen muunnos.** 3-D kohde muunnetaan 2-D kuviksi. Muunnos tehdään optisesti keskusprojektiokuvauksena. Yhden kuvan kuvasisällön määrittää sen perspektiivi eli projektiokeskuksen sijainti kohteen suhteen. Perspektiivi talletetaan kuvaamalla se eli leikkaamalla projektiokeskuksen kautta kulkeva valonsädekimppu kuvatasolla. Saman valonsädekimppun uudet samanaikaiset tasoleikkaukset eivät voi sisältää kohteesta mitään geometrista lisätietoa. Fotogrammetrian yleisessä tapauksessa käytetäänkin vähintään kahta eri perspektiivistä talletettua kuvaa kohteesta.



**Projektiivinen muunnos.** 2-D kuva muunnetaan toiseksi 2-D kuvaksi. Muunnos voi käsittää latentin valokuvan kehittämisen näkyväksi kuvaksi - filmille, videolle, tietokoneen näytölle - ja sen perimmäisenä tarkoituksena on tehdä kuvasta tulkintakelpoinen. Muunnos voi olla projektiivinen, eli kuva voidaan projisoida vinolle tasolle, tai sen sivusuhteita voidaan muuntaa. Näillä muunnoksilla ei kuitenkaan voida muuttaa kuvan alkuperäistä perspektiiviä. Yleisin projektiivinen muunnos käsittää tätänykyä kuvan digitoimisen.



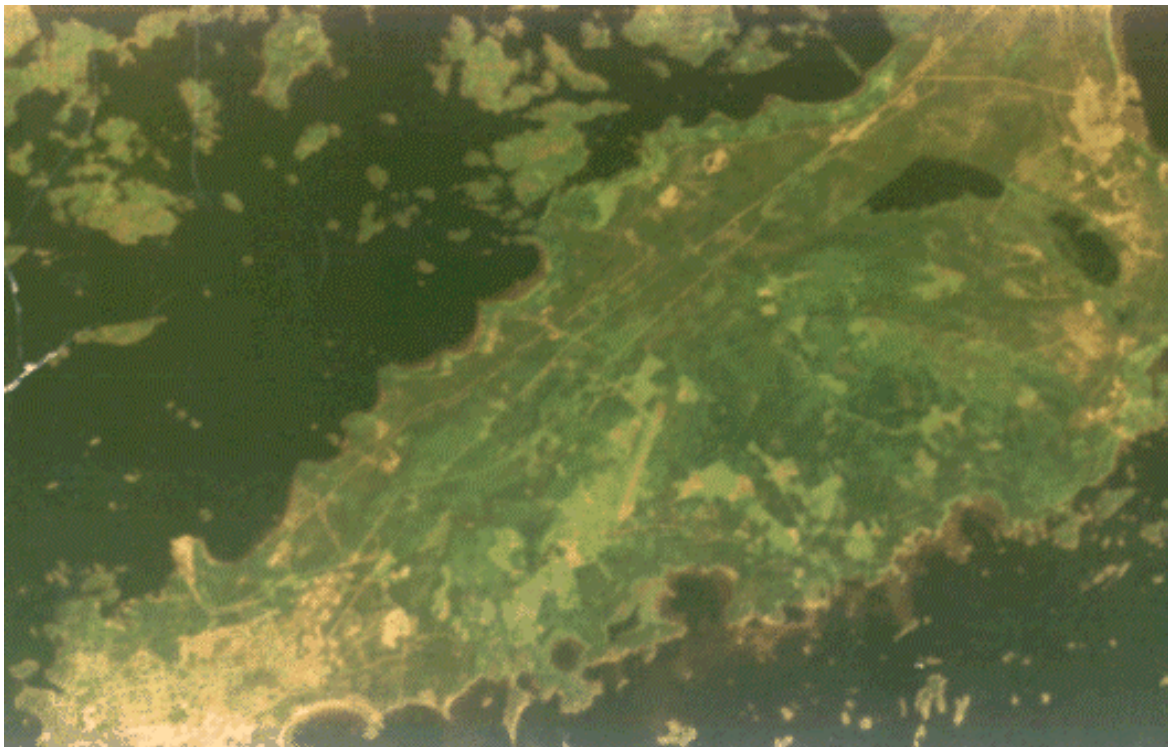
**Rekonstruktivinen muunnos.** 2-D kuvat muunnetaan kohteeksi 3-D kuvaksi. Muunnos ratkaistaan matemaattisesti. Jos kuvat on digitoitu, kohdemalli on useimmiten digitaalinen. Digitaalisesta kohdemallista voidaan tuottaa myös analoginen malli, valokuva - tai kuva uudesta perspektiivistä. Matemaattinen muunnos 2-D kuvista 3-D kohdemalliksi toteutettiin aiemmin optisesti tai mekaanisesti erityisesti tähän tarkoitukseen kehitetyillä stereokartoituskojeilla.

## Geometrisen tulkinnan vaihtoehdot

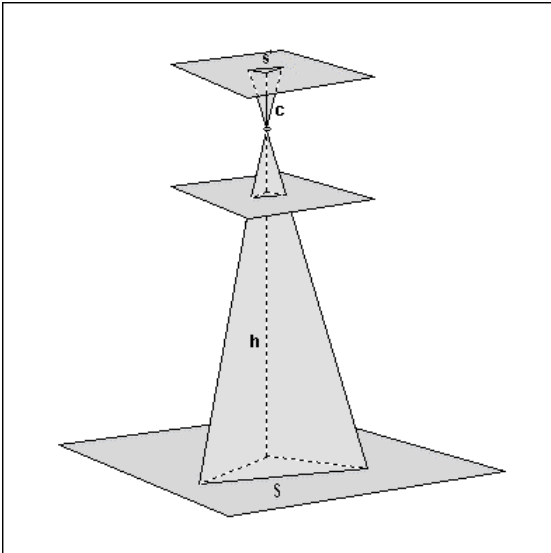
- Yksinkertaisin tulkintatilanne on silloin, kun kohde on taso ja tämä taso on yhdensuuntainen kuvatason kanssa. Tällöin kuva ja kohde ovat yhdenmuotoiset. Kohteen geometriset suhteet muuntuvat kuvauksesta toiseen lineaarisesti. Vastaavasti kuvalle voidaan määrittää yksi **mittakaavaluku**, jolla kerrottuna kaikki kuvahavainnot voidaan muuntaa kohteen geometrisia suhteita vastaaviksi. Mittakaavaluvun määrittämiseen riittää yksi kovalta havaittu etäisyys, jonka pituus on tunnettu myös kohteessa.
- Jos kohde on taso, mutta kuvan suhteen vino, kohteen ja sen kuvauksen projektiivinen suhde on murtolineaarinen. Suoralla olevien janojen suhteiden suhde säilyy (**kaksoissuhde**). Tasolla havaittujen kohteiden muoto voidaan muuntaa kohteen geometrisia suhteita vastaavaksi, mikäli kaksoissuhde on määritetty kahden erisuuntaisen suoran suunnassa. Projektiivinen muunnos määritetään havaitsemalla kovalta vähintään neljä pistettä, joiden koordinaatit tunnetaan kohteessa.

- Jos kohde on kolmiulotteinen, sen muotoa ei voi määrittää yksinomaan yhden kuvan havainnoin. Fotogrammetrian yleinen ratkaisu on käyttää kolmiulotteisen kohteen rekonstruointiin kahta tai useampaa kuvaa (**stereokartoitus, pistetihennys, kolmiomittaus, kolmiointi**). Rekonstruointi perustuu kuvien yht'aikaiseen projisioimiseen. Projisiointia varten kuvat orientoidaan kohteen suhteen ja kohde rekonstruoidaan kuvilta tehdyistä suuntahavainnoista ns. eteenpäinleikkauksena avaruudessa. Rekonstruoitu kohde on avaruusmalli 3-D koordinaatistossa. Kahden tai useamman kuvan havaintoihin perustuva rekonstruointi on tarkka, koska jokaisen havaitun pisteen 3-D sijainnin määrittämiseen käytetään (  $n \times 2 - 3$  ) ylimääräistä havaintoa, missä (  $n > 1$  ).
- Jos kuvia on vain yksi, kohteen kolmiulotteisuuden ratkaisemisen täytyy perustua joko "ilmi-selviin" oletuksiin tai muihin täydentäviin havaintoihin (**yksikuvamittaus**). Rakennuksesta voidaan olettaa, että se on suorakulmainen, jolloin sen seinät voidaan kartoittaa projisioimalla ne särmiön pinnalle yhdeltäkin kovalta (**oikaistu kuva**). Vastaavasti täydennyskartoitus ja maastotietokannan ajantasaistus voidaan perustaa aiemmin mitattuun maanpinnan korkeusmalliin. Tällöin kartoitus tehdään projisioimalla kuva tälle pintamallille (**ortokuva**). Kuva voi olla myös etäisyyskuva. Yksikuvamittauksessa ylimääräisiä havaintoja ei ole ja täydentävän havainnon virhe vaikuttaa sellaisenaan kovalta havaitun pisteen 3-D koordinaatteihin.
- Kolmiulotteisen mittaamisen muita vaihtoehtoja ovat geodeettiset mittaukset, erilaiset optiset ja mekaaniset 3-D koordinaattimittaukset, ja uusimpana etäisyyskuvaukset (**laserskannaus**)

## Mittakaava ja mittakaavaluku



Satelliittikuva Hangosta. Kuva on otettu venäläisellä monikaistakameralla KFA-1000 ( $f = 1011$  mm) näkyvän valon ja lähi-infrapunaisen kaistalla, joka kattaa aallonpituudet välillä 570-800 nm. Alkuperäisen kuvan erotuskyky on 6 m 235 km:n ratakorkeudella. Kuva on pystykuva ja sitä voidaan sellaisenaan käyttää yksinkertaisiin mittaus- ja kartoitustarkoituksiin.



$$m = \frac{h}{c} = \frac{S \text{ kohteessa}}{s' \text{ kuvalla}}$$

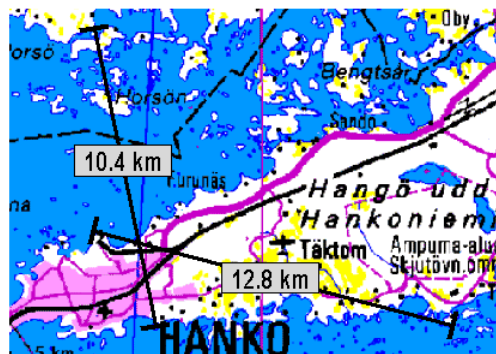
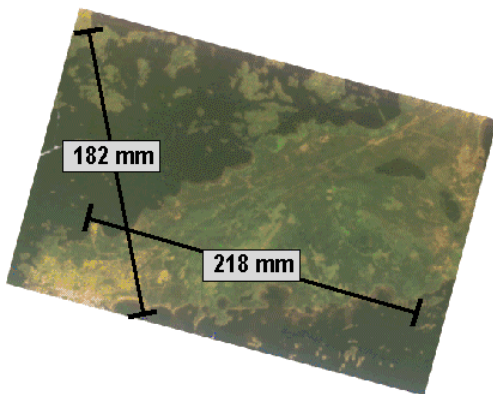
$$M = \frac{1}{m}$$

$$S \text{ kohteessa} = m \cdot s'$$

Yksinkertainen tapa kartoittaa uusia maastonkohteita on havaita näistä etäisyyksiä kartalla jo tunnettuihin kohteisiin. Jos havainnot tehdään ilma- tai satelliittikuvalla, etäisyydet tulee muuntaa kartan tai kohteen mittakaavaan. Mittakaavaluku  $m$  määritetään vertaamalla jotain kohteessa havaittua välimatkaa  $S$  vastaavaan kuvalla havaittuun välimatkaan  $s'$ . Ilmakuvalla, joka on keskusprojektio, mittakaavaluku voidaan määrittää myös kuvauskorkeuden  $h$  ja kameran polttovälin  $c$  suhdelukuna. Mittakaavaluku on kaikilla kuvapisteillä likimäärin sama. Tämä perustuu kahteen oletukseen, eli siihen, että maasto on taso, ja siihen, että kuvaus on kohtisuora, jolloin kuvataso ja maasto ovat yhdensuuntaiset. Viistokuvauksissa ja kuvauksissa, joissa kohde on kolmiulotteinen, mittakaava "vääristyy". Perspektiivisessä kuvautumisessa mittakaava riippuukin paikasta ja suunnasta eli jokaisella kuvapisteellä on oma mittakaavalukunsa.

- [Tehtävä.](#)

### Laskuesimerkki kuvamittakaavasta

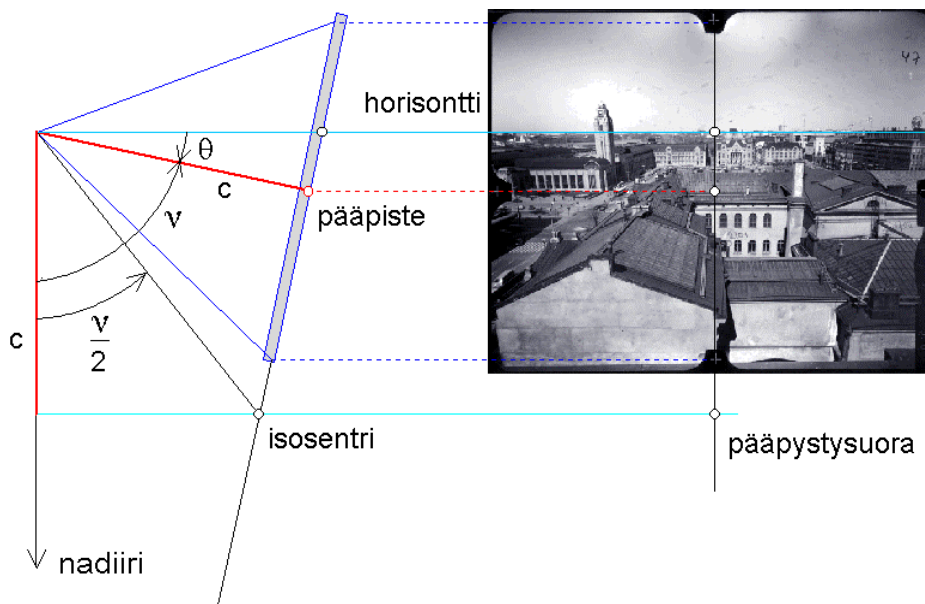


Kuvalla näkyvistä saarista on valittu kaksi mittakaavajanaa. Samoilte janoille on mitattu vertausetäisyydet kartalta. Näistä on laskettu kuvan mittakaava. Kun mittakaava tunnetaan, voidaan kuvalta näkyviä yksityiskohtia siirtää kartalle ja päinvastoin, piirtää karttaa kuvan päällä. Kartta löytyy maanmittauslaitoksen [karttapaikalta](http://www.kartta.nls.fi/kp). (URL: <http://www.kartta.nls.fi/kp>)

Mittakaavoluku:	Mittakaava:
$\frac{12800 \text{ m}}{0.218 \text{ m}} = 58700$	1 : 58'700
$\frac{10400 \text{ m}}{0.182 \text{ m}} = 57100$	1 : 57'100

Mittakaavan määrittämiseen pelkkien mittakaavajanojen avulla sisältyy epävarmuutta, joka aiheutuu enimmäkseen siitä, että kuva ja kartta eivät esitä kohdetta samassa projektiossa. Tällöin erisuuntaisista mittakaavajanoista saadaan mittakaavalle hieman toisistaan poikkeavia arvoja. Myös kartalla ja kuvalla näkyvien kohteiden tulkintaan sisältyy epävarmuutta, joka vaikuttaa mittakaavan määräytymiseen.

### Viistokuvan mittakaava

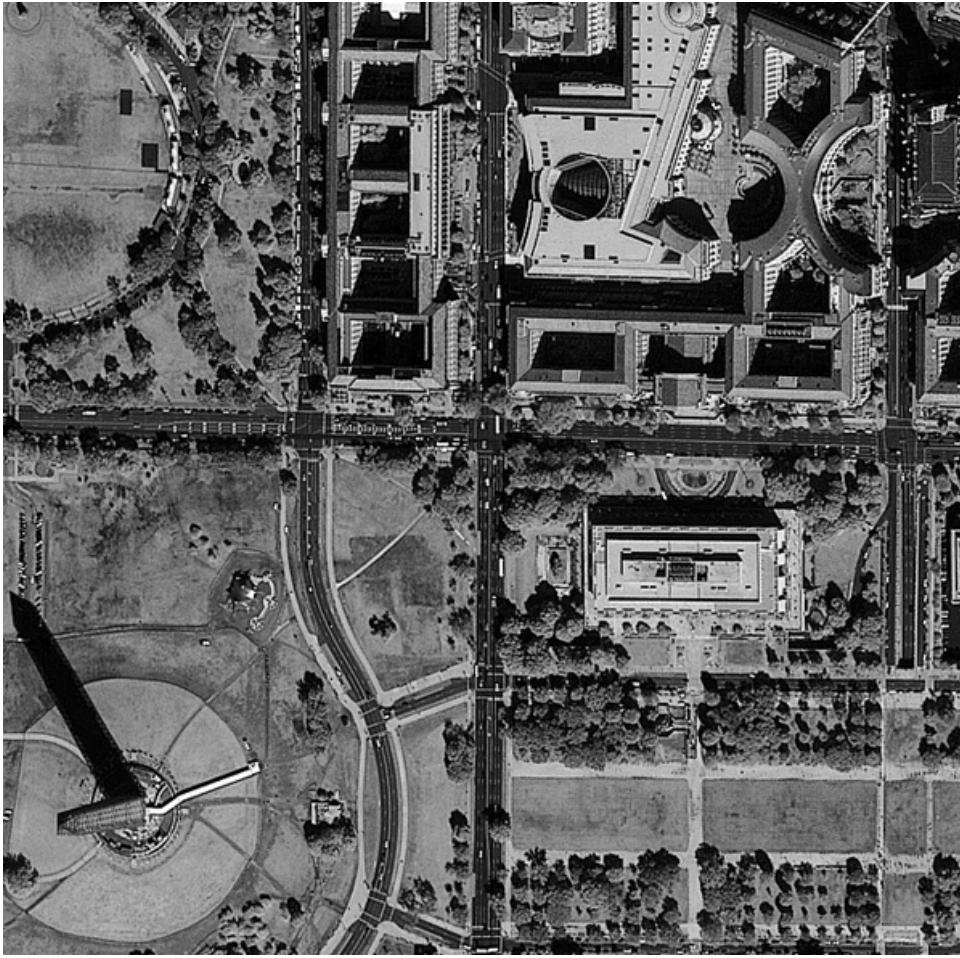


### Säteettäissiirtymään perustuva yksikuvamittaus

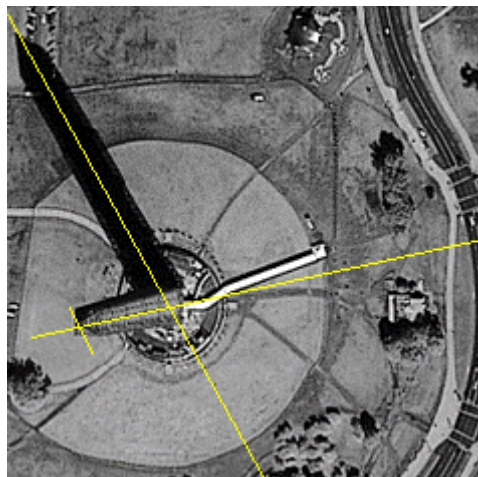


Esimerkki: Washington Monument

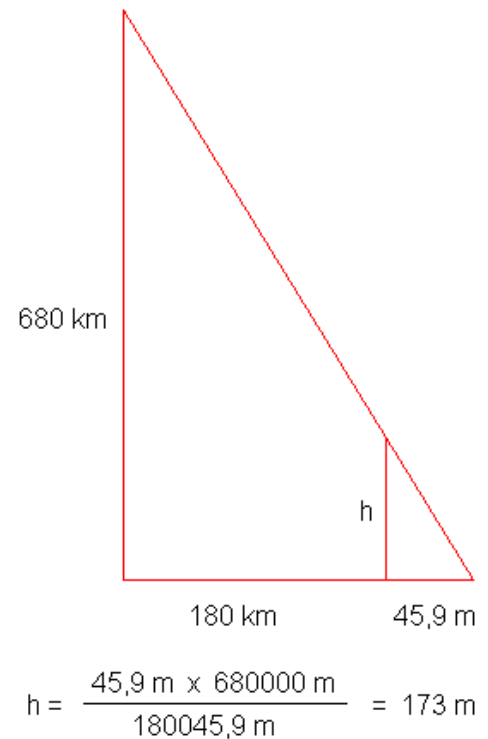
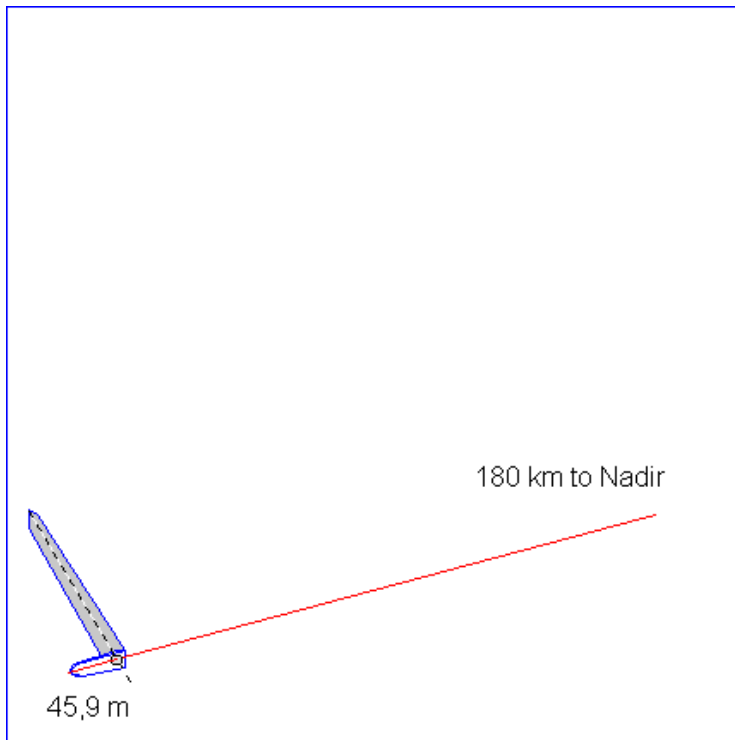
Washington-monumentti pystytettiin 1800-luvulla USA:n ensimmäisen presidentin George Washingtonin muistomeriksi. Määritämme muistomerkin korkeuden mittaamalla sen Ikonos-satelliitin kuvalta.



Oheisen osakuvaan koko on  $600 \times 593$  pikseliä (leveys  $\times$  korkeus). Ikonos-satelliitin keilaimen kuvaalkio (pikseli) on kooltaan maan pinnalla  $1 \text{ m}$ . Satelliitin ratakorkeus on  $680 \text{ km}$  ja muistomerkin etäisyys satelliitin kuvanadiiriin  $180 \text{ km}$ . Kuva on pystykuva ja maanpinta oletetaan tasoksi. Huomattakoon, että kuvanadiiri on tässä tapauksessa kuvan ulkopuolella.



Koska voidaan olettaa, että muistomerkki on pystysuorassa, sen korkeus voidaan laskea edellä esitettyjen kuvaustietojen perusteella. Tulkitaan ensin muistomerkin pääpystysuora eli keskiakseli ja piirretään se kuvalle sekä muistomerkin suunnassa että sen varjon suunnassa. Näiden suorien leikkauspiste on pääpystysuoran päätepiste maan pinnalla. Toinen päätepiste on muistomerkin kärjessä.

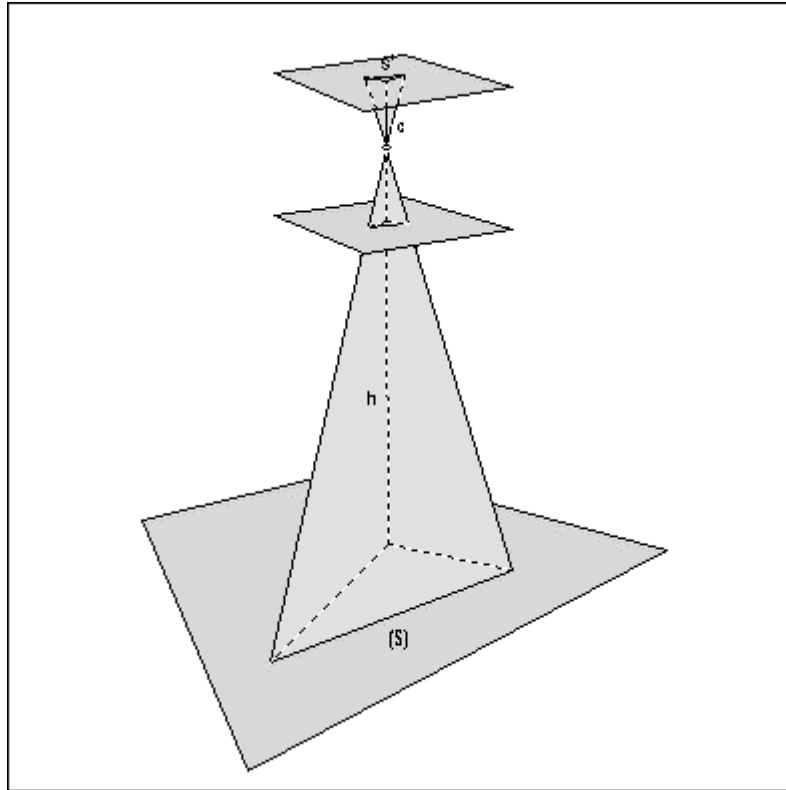


Muistomerkin pituus (**säteettäissiirtymä**) on kuvalta mitattuna 45,9 pikseliä, mikä vastaa kohteella 45,9 m. Havainnosta lasketaan muistomerkin korkeudeksi 173 m. Todellinen korkeus on 169 m, jota vastaava säteettäissiirtymä olisi 44,8 m. Ero johtuu sekä oletusten että havaintojen epätarkkuuksista. Hyvä arvio kuvahavainnon epätarkkuudesta tässä esimerkissä olisi  $\pm 0,5$  pikseliä, mikä vastaa korkeudessa  $\pm 2$  m. Kuvanadiirissa säteettäissiirtymää ei ole ja säteettäissirtymään perustuva korkeudenmittaus onkin mahdollista vain etäällä kuvanadiirista.

### Kaksoissuhde (*cross ratio*)

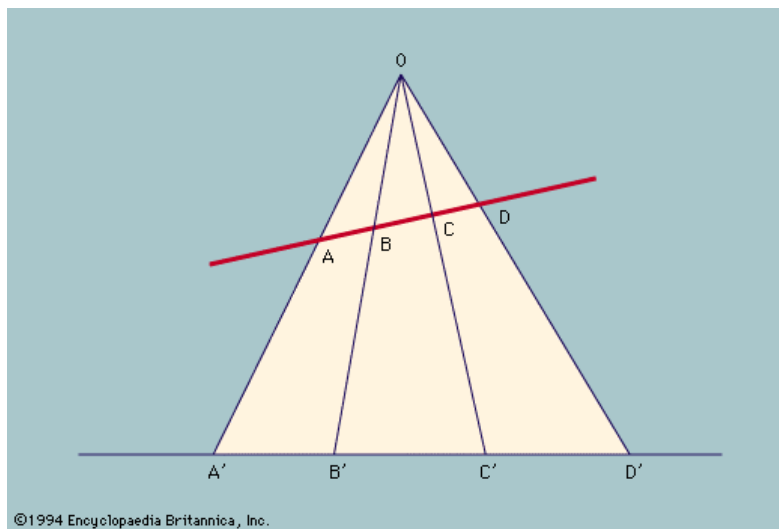


Viistoilmaku TKK:n päärakennuksesta. Kaikilla kuvassa näkyvillä maastokohteilla on oma mittakaavansa. Niinpä kuvalta mitattujen välimatkojen muuntaminen välimatkoiksi maastossa edellyttää mittauksen suorittamista 3-D koordinaatteina.



$$(S) = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

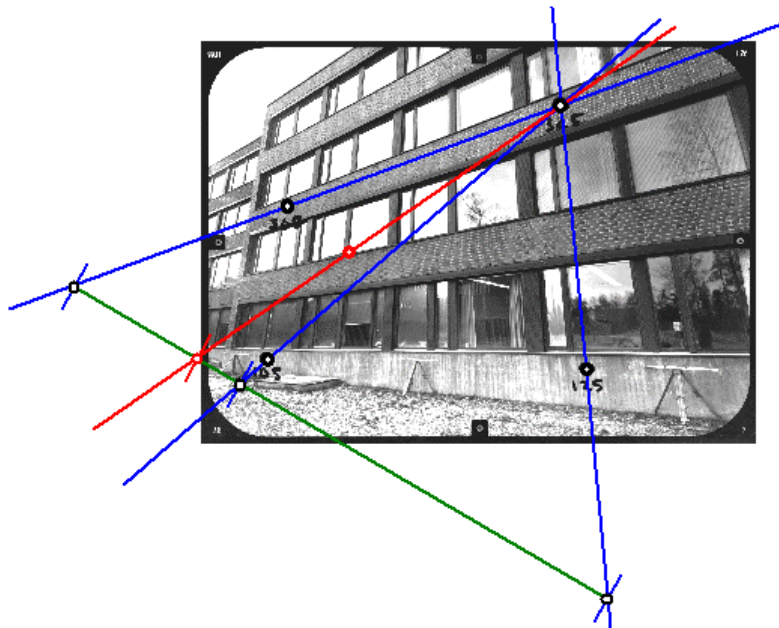
Keskusprojektion mittakaavajana vinolle tasolle. Tässä tapauksessa janojen  $s'$  ja  $(S)$  välille ei voi määrittää lineaarista mittakaavaa ja välimatka  $(S)$  lasketaan koordinaattieroista. Sen sijaan projektiivisessä kuvauksessa säilyy janojen suhteiden suhde, jota kutsutaan kaksoissuhteeksi (**cross ratio**).



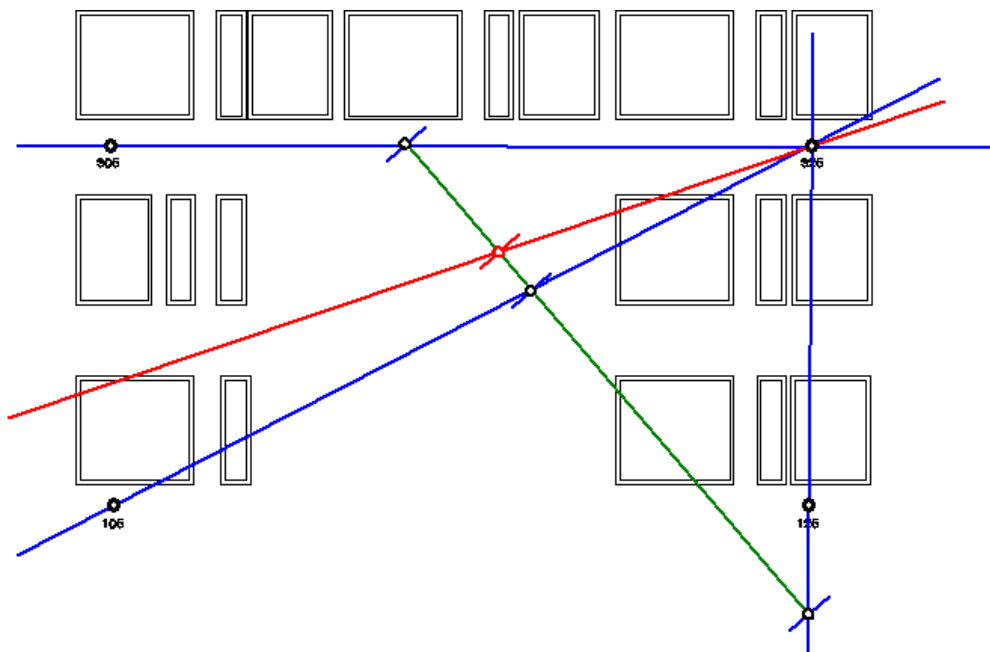
**Kaksoissuhde.** Kaksoissuhde on esimerkiksi  $(AB:BC) / (BC:CD)$ . Tämä suhde säilyy kaikissa projektiivisen sädekimpun tasoleikkauksissa, esimerkiksi  $(A'B':B'C') / (B'C':C'D') = (AB:BC) / (BC:CD)$ .



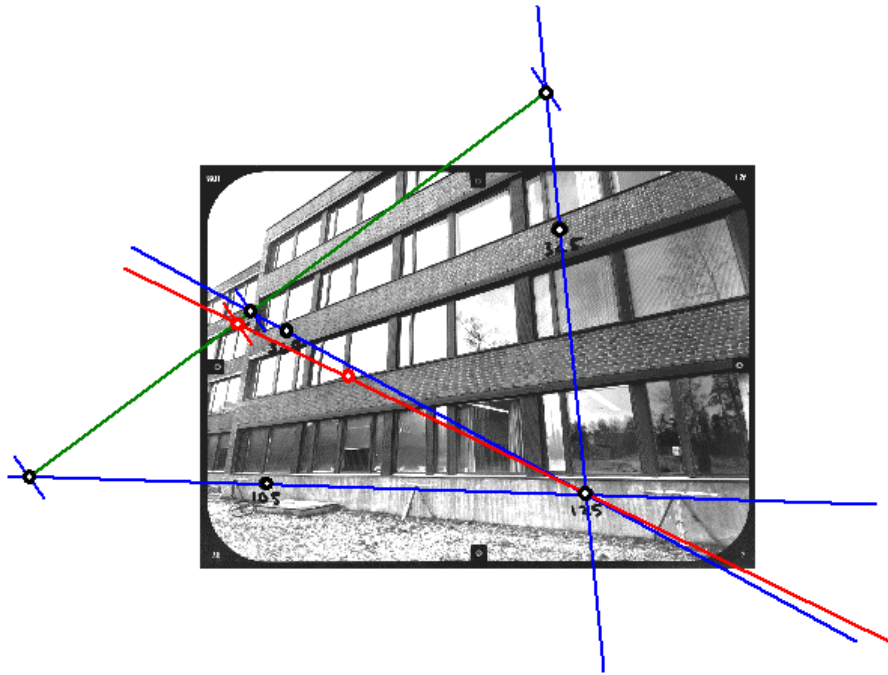
## Neljän pisteen menetelmä



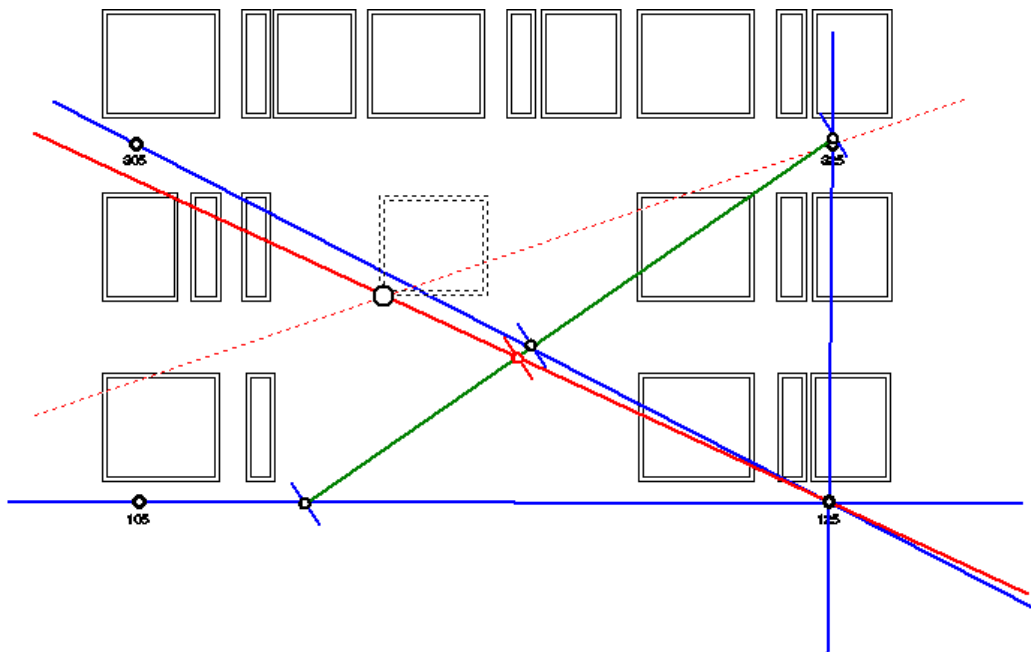
Kaksoissuhdetta voidaan käyttää hyväksi tasomaisten kohteiden kartoituksessa. Tässä esimerkissä pisteet 105, 125, 305 ja 325 ovat tukipisteitä, joiden kohdekoordinaatit tunnetaan. Pisteet on signaloitu eli merkitty tähyksin, jotka voidaan havaita kuvilta. Projektiivinen sädekimppu piirretään yhteen näistä pisteistä, tässä pisteeseen 325. Samaan sädekimppuun voidaan lisätä kartoitettavien uusien yksityiskohtien kuvaussäteet, tässä toisen kerroksen ikkuna ja sen vasen alanurkka. Projektiivisuus tallennetaan suoralla, joka leikkaa sädekimppua. Suoran sijoitus voi olla mielivaltaisen, koska projektiivisuus sisältyy kaksoissuhteeseen.



Edellisessä kuvassa määritetty sädekimppu siirretään karttapohjalle. Kaksoisuhteen tallentava leikkaussuora sovitetaan ensin tukipisteisiin piirrettyihin kuvaussäteisiin, minkä jälkeen uuden ikkunapisteen kuvaussuora voidaan piirtää oikeaan suuntaansa.

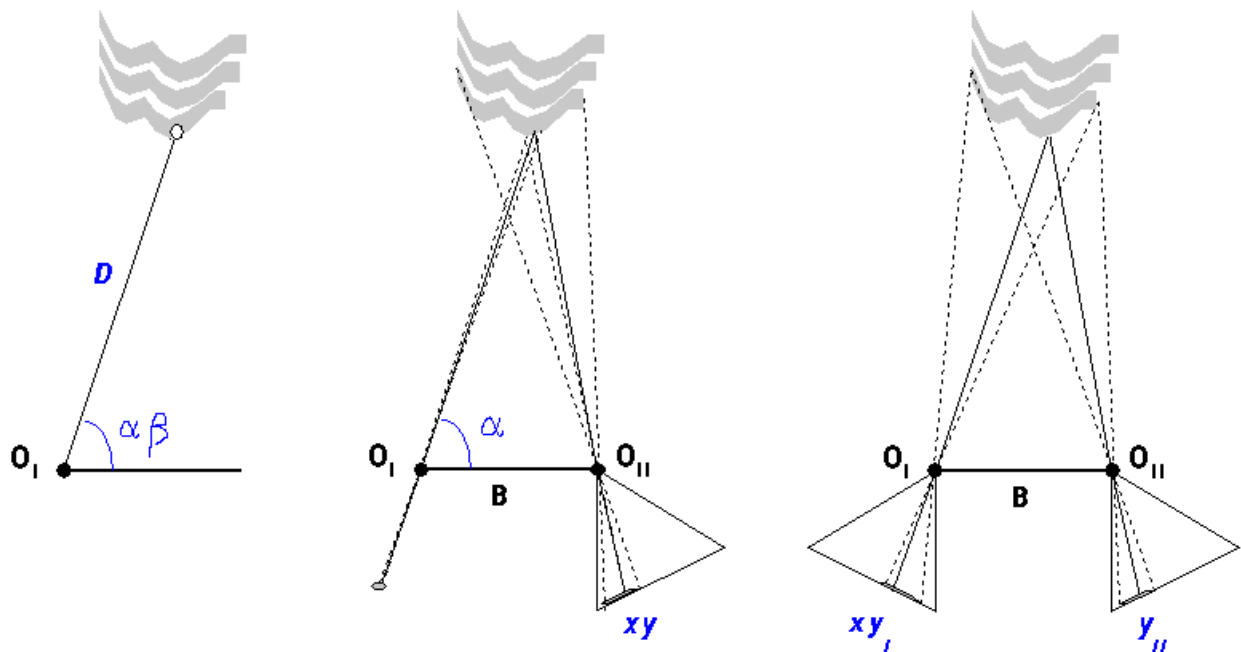


Sama kuvaus voidaan toistaa kaikilla tukipisteillä. Tässä se on tehty pisteellä 125



Kun pisteen 125 kaksoisuhteen avulla ikkunanurkan kuvaussuora on piirretty karttapohjalle, nurkan paikka löytyy tämän ja aiemmin pisteestä 325 piirretyn suoran leikkauspisteessä.

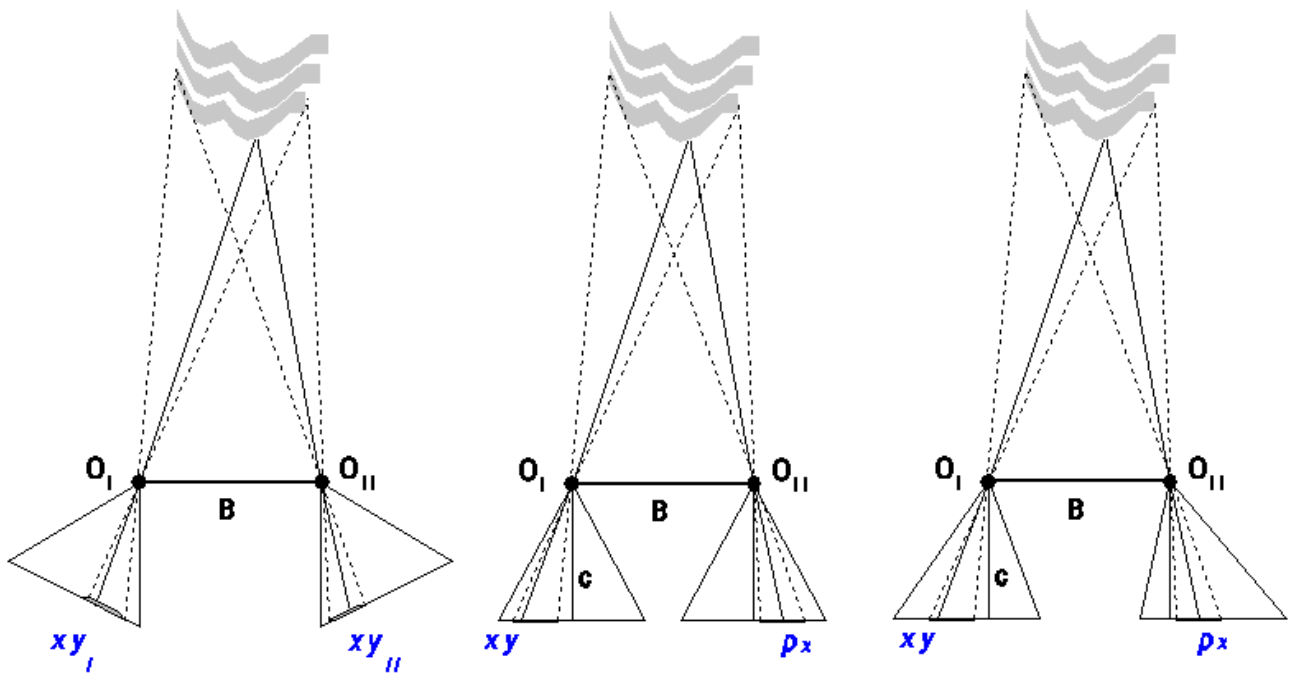
## Kolmiulotteinen mittaaminen



Kolmiulotteisten koordinaattien mittaaminen edellyttää aina vähintään kolmen toisistaan riippumattoman suureen havaitsemista. Optisissa koordinaattimittausjärjestelmissä suureet ovat joko etäisyyshavaintoja tai kulmahavaintoja. Etäisyyksiä voidaan havaita suoraan kohteen pintaan esimerkiksi takymetrillä tai lasertutkalla, tai parallaktisesti kahden tai useamman havaintopaikan kautta. Stereonäköön perustuva mittaus on parallaktista. Oheisessa kuvassa on vasemmalla esitetty takymetrinen suoran koordinaattimittauksen periaate. Siinä mittaukset tehdään polaarisesti yhdeltä havaintopaikalta. Havainnot muodostuvat yhdestä etäisyyshavainnosta ( $D$ ) ja kahdesta kulmahavainnosta ( $\alpha$  ja  $\beta$ ). Suorakulmaiset 3-D koordinaatit voidaan laskea näistä kolmesta havainnosta. Stereonäössä kohdetta tarkastellaan kahden projektio- eli kuvanottopisteen ( $O_I$  ja  $O_{II}$ ) kautta ja etäisyyshavainnot tehdään kivilta. Kohteella tehtävät etäisyyshavainnot korvataan yhdellä kohteen sivuun sijoitetulla kiinteällä kannalla ( $B$ ), jonka pituus tunnetaan. Yksinkertaisinta on mitata kannaksi tämä kuvanottopisteiden välinen jana. Kuvassa keskellä on esimerkki parallaktisesta kolmiomittauksesta, jossa pisteen koordinaatit lasketaan yhdestä kohteeseen tehdystä kulmahavainnosta ( $\alpha$ ) ja kahdesta kivilta tehdystä koordinaattihavainnosta ( $x_j$  ja  $y_j$ ). Jos alfa-kulma on kiinteä, kolmas havainto saadaan siirtämällä kohdetta. Tällöin siirron suuruus vastaa etäisyyshavaintoa. Oikean puoleinen esimerkki on stereomittauksesta, jossa kaikki kohteeseen tehdyt mittaushavainnot on korvattu mittaamalla kivilta koordinaatteja. Kuvahavaintojen vähimmäismäärä on nykyin kolme ja ne saadaan kahdelta kivilta. Neljäs kuvahavainto on ylimääräinen ja sitä voidaan käyttää mittausvarmuuden parantamiseen. Jos kuvia on useampia kuin kaksi, mittaus muuttuu monikuvamittaukseksi. Mittausperiaate on edelleen sama, mittausalue kasvaa, ja ylimääräiset havainnot lisäävät mittausvarmuutta.

Kun takymetriä käytetään 3-D koordinaattien mittaamiseen, kohdepiste osoitetaan prismalla. Prisma-sauva tasataan ja takymetrillä mitataan 3-D koordinaatit prismaan. Varsinainen mittauspiste sijaitsee prisma-sauvan päässä. Prismat korkeus otetaan huomioon mittauspisteen koordinaatteja laskettaessa. Takymetri suunnataan prismaan. Laite rekisteröi vaaka- ja pystykulmat sekä etäisyyden.





Stereonäön kuvaustekniikasta voidaan esittää kolme vaihtoehtoa: **yleinen tapaus**, **normaalitapaus** ja **suunnattu normaalitapaus**. Yleisessä tapauksessa (kuvassa vasemmalla) kamerat suunnataan vapaasti kohteeseen, kun taas normaalitapauksessa kamerat suunnataan keskenään yhdensuuntaisesti kohteeseen (kuvassa keskellä ja oikealla). Normaalitapaus on kehitetty yleisestä tapauksesta lähinnä laskutekniikan yksinkertaistamiseksi siten, että kaikki ylimääräiset kuvahavainnot on pyritty eliminoimaan jo kuvaushetkellä. Yleisessä tapauksessa käsitellään kuvajoukkoa ja sen kaikkia kuvahavaintoja  $(x, y)$ . Ylimääräisiä havaintoja on kahden kuvan tapauksessa yksi ja jokainen uusi kuva lisää ylimääräisten havaintojen määrää kahdella. Normaalitapauksessa laskennan perusjoukko on kuvapari, josta ylimääräinen havainto on eliminoitu ja pisteen 3-D koordinaatit lasketaan kolmesta havainnosta  $(x, y, p_x)$ .

## Keskusprojektion huomioiminen erityistapauksissa

- Saksittua
  1. Esimerkki siitä, mitä voi tapahtua asiantuntijalle, joka ei ota huomioon keskusprojektion vaikutusta kuvaperspektiiviin silloin, kun kohde ei ole yhdensuuntainen kuvatason kanssa.  
[Tuomari Mickey Goldschmidt grillaa todistaja Jack White'a](#)