

## Luento 9. Stereokartoituskojeet

### AIHEITA

- [Analogiset stereokartoituskojeet](#)
- [Analyttiset stereokartoituskojeet](#)
- [Digitaalinen fotogrammetrinen stereotyöasema](#)
- [HUT Stereodrome](#)

Stereokartoituskojeessa kuvaparin stereoskooppinen tarkastelu ja tarkka 3-D koordinaattien mittaus on yhdistetty toisiaan tukeviksi toiminnoiksi. Kojeen käyttäjä eli stereo-operatööri tulkitsee stereomallia ja osoittaa kartoitettavia yksityiskohtia mallilla liikkuvan avaruusmittamerkin avulla. Stereomalli on kohteen muodoltaan tarkka rekonstruktio. Stereomalli saadaan aikaan siten, että kuvat projisioidaan tarkastelutilaan ja orientoidaan alkuperäistä kuvaustilannetta vastaavaan asemaan keskenään. Avaruusmittamerkki liitetään stereomalliin projisioimalla merkki erikseen kummallakin kuvalla kohtaan, joka vastaa senhetkistä 3-D sijaintia (**avaruusohjaus**). Kuvakoordinaatit lasketaan koordinaatistomuunnoksena kuvaparin orientointitiedoista.

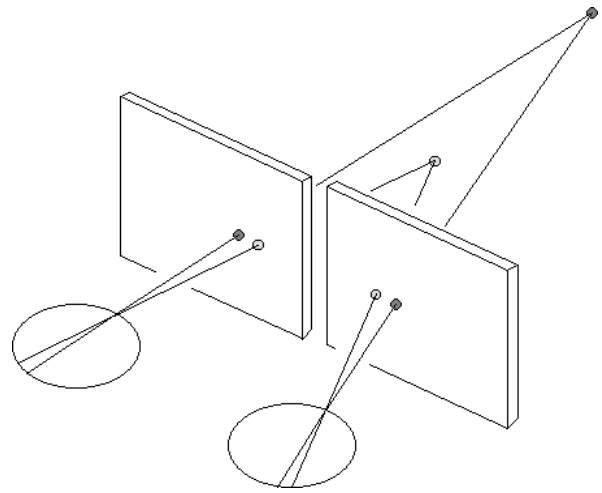
Stereokartoituskojeet on jaettu analogisiin ja analyttisiin sen mukaan, miten koordinaattien avaruusohjaus on toteutettu. Analogisissa kojeissa kohdekoordinaattien ja kuvakoordinaattien välinen muunnos ratkaistaan analogisesti, joko optiseen tai mekaaniseen projektiioon perustuen. Analyttisissä stereokartoituskojeissa muunnos lasketaan tietokoneella.

Perinteisten stereokartoituskojeiden merkitys on 1990-luvulla vähentymässä. Uusimmissa kartoitusjärjestelmissä fotogrammetriset kojeet on korvattu digitaalisilla kuvatyöasemilla. Niissä fotogrammetriset toiminnot sisältyvät digitaalisten kuvien geometriseen käsittelyyn ennen kuvien projisiointia kuvanäytölle. Kuvapari orientoidaan ja oikaistaan projektiivisesti siten, että se vastaa stereokuvauksen normaalitapausta. Stereoskooppinen tulkinta ja kartoitus tehdään 3-D kuvanäytöllä, eikä erillistä avaruusohjausta enään tarvita.

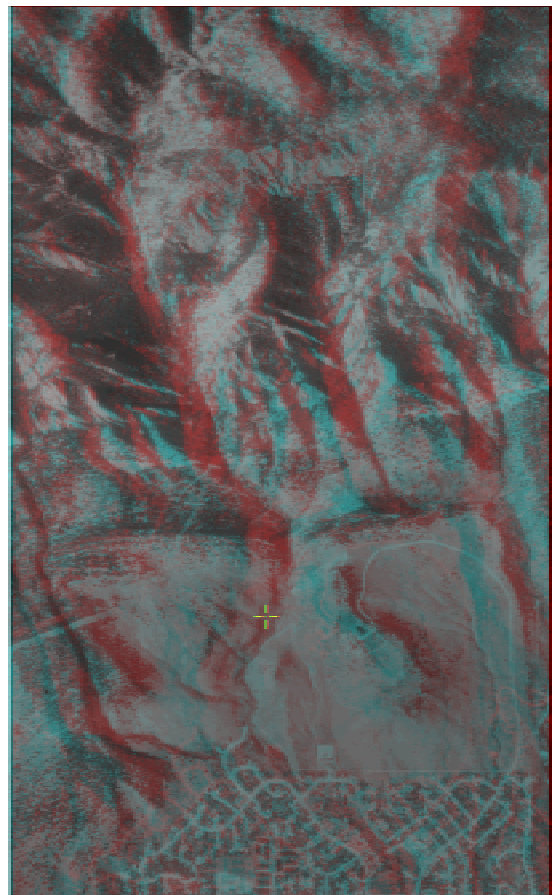
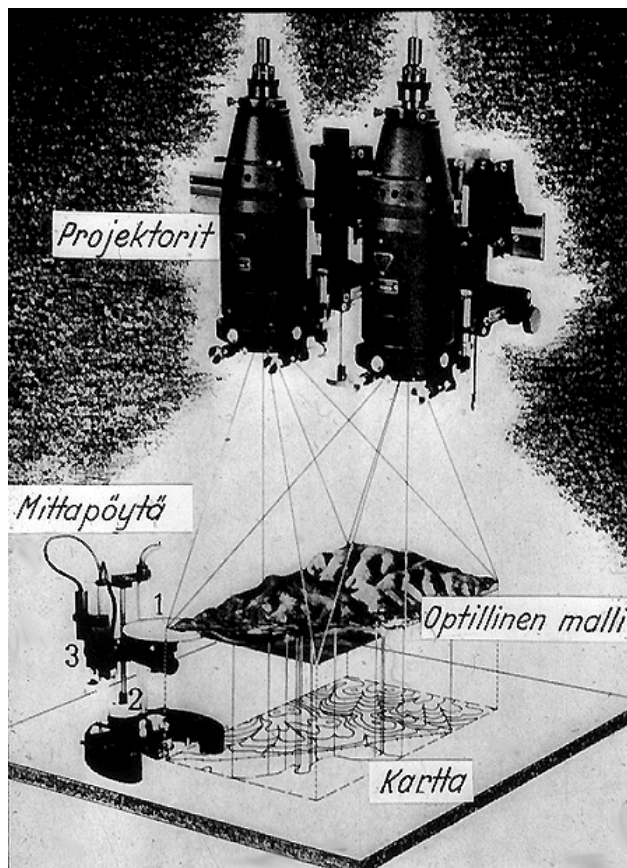
### Rakenne

- Rakenneosat
  - stereokuvapari
    - normaaliasentoinen, tai lähes normaaliasentoinen
      - vähäiset kallistukset sallittu ja voidaan korjata orientoinnin yhteydessä
    - digitoitu kuva, tai filmidiaposiivi tai paperikuva
  - stereonäyttö
    - kuvien projisointi
    - kuvien erottelu okulaari-, anaglyfi-, polarisaatio- tai vuorotteluperiaatteella
  - avaruusmittamerkki
  - laskinosa
    - kuva- ja kohdekoordinaattien väliset muunnokset
    - orientoinnit
      - keskinäinen orientointi normaaliasentoisuuden palauttamiseksi
      - absoluuttinen orientointi mallikoordinaatiston muuntamiseksi kohdekoordinaatistoon

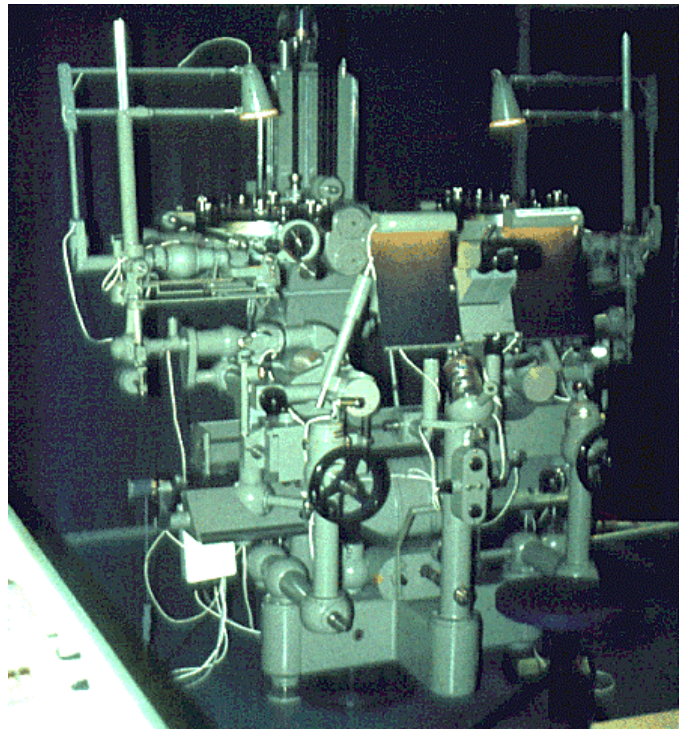
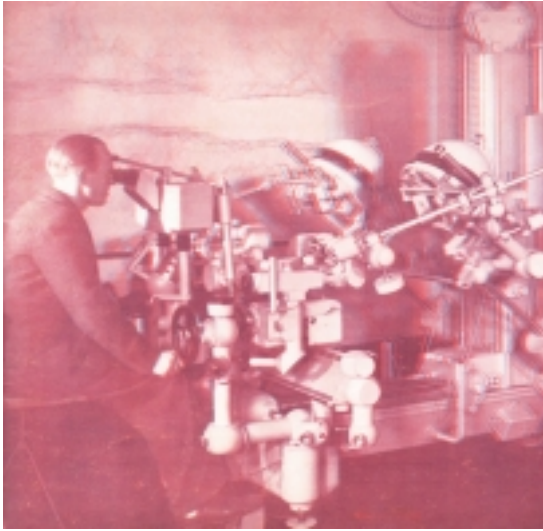
**Avaruusmittamerkki.** Kun kummankin kuvan päälle projisioidaan piste samaan kohtaan, piste sulautuu stereokuvan pinnalle mittamerkiksi. Mittamerkki voidaan siirtää lähemmäs katsojaa, kun parallaksikulmaa suurennetaan. Pystykuvia katsottaessa mittamerkki nousee ilmaan. Sama liike näkyy mittamerkin projisioitumisena kuvilla pitkin sydänsuoraa lähemmäs toisiaan. Jos katsojalle annetaan mahdollisuus siirtää kumpaakin mittamerkkiä yhdessä koko kuvan alueella ja erikseen pitkin vastinsydänsuoria, mittamerkki toimii avaruusmittamerkkinä eli 3D-kursorina.



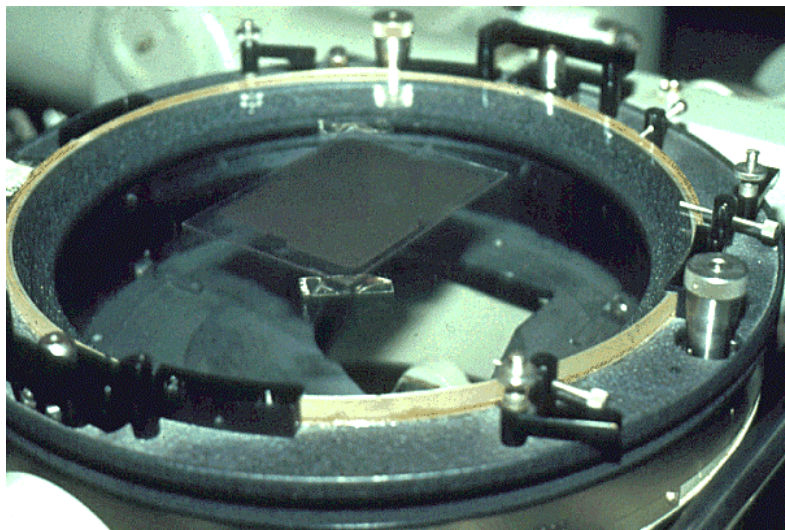
## Analogiset stereokartoituskojeet



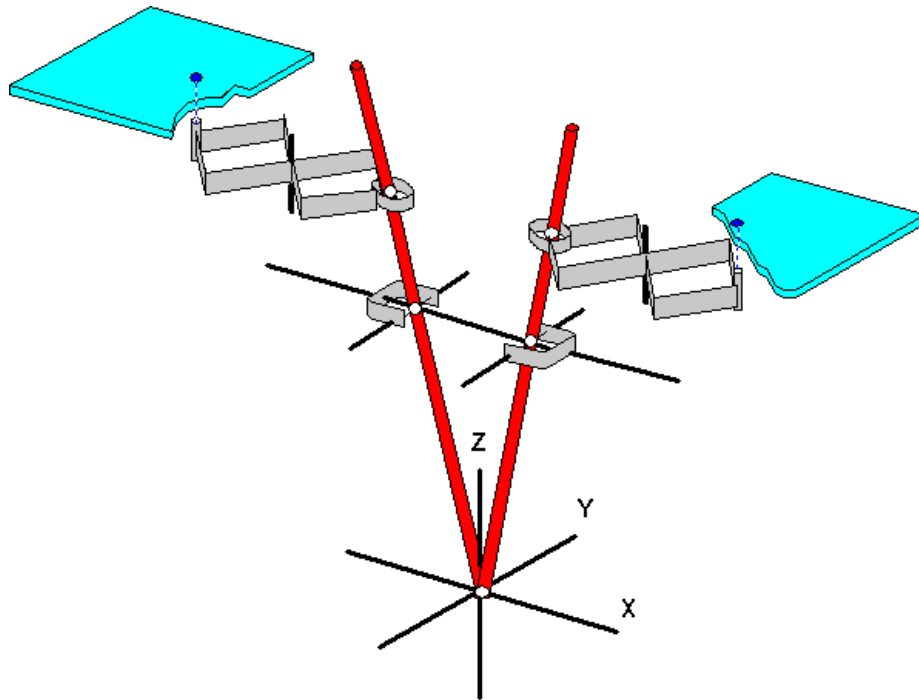
**Multiplex-stereokartoituskoje.** Kaikissa stereokartoituskojeissa alkuperäinen kuvaustilanne rekonstruoidaan mahdollisimman tarkasti. Tämä koje perustuu multiplex-periaatteella toimivaan optiseen rekonstruktioon ja stereonäyttöön (**optinen kaksoisprojektiio**). Projektoreilla heijastetaan kumpikin kuva sädekimpuna, jonka avauskulma ja keskisyys on sama kuin kuvauskameran optiikan muodostamalla sädekimpulla (**kuvan sisäinen orientointi**). Myös projektorit saatetaan keskenään samaan asentoon kuin ne olivat kuvaushetkellä (**kuvaparin keskinäinen orientointi**). Orientoidun kuvaparin sädekimpun yksittäiset kuvaussäteet leikkaavat toisensa stereomallin pinnassa (optinen malli). Stereomallin pinta muodostuu samaksi kuin mikä kohteen pinta oli kuvaushetkellä kuvauskameroiden suhteen. Mittapöydän keskellä on avaruusmittamerkki (1), jolla mallin yksityiskohtia osoitetaan. Mittamerkki on kirkas valopiste, jota voidaan siirtää mallilla ja nostaa tai laskea mallin pintaa seuraten. Se on mallin pinnalla kohdassa, jossa molemmista kuvista projisioituvat vastinvalonsäteet leikkaavat toisensa (optinen avaruusohjaus). Mittamerkin liikkeet rekisteröidään kartaksi. ([Esimerkki](#)) .



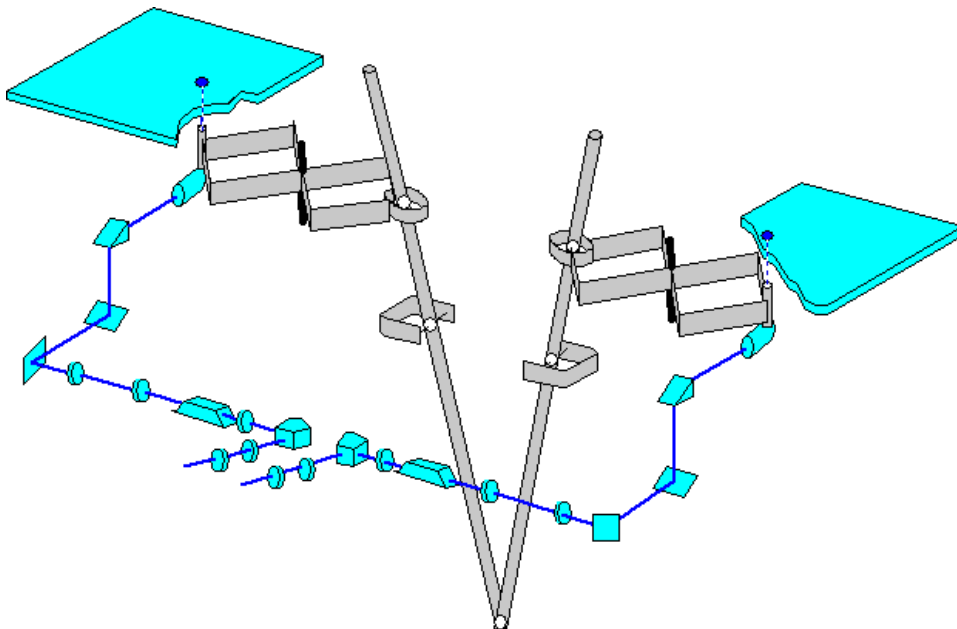
**Stereoplanigrafi Zeiss C5.** Ensimmäinen Suomessa käytetty stereokartoituskoje oli ns. stereoplanigrafi. Koje hankittiin 1940 ja samanlaista kojetta käytettiin vielä 1970-luvulla peruskartoituksen tehtävissä. Avaruusohjaus perustuu optiseen projektioon kuten multiplex-kojeissakin, mutta mitta-pöydän sijaan 3-D liikkeet on toteutettu käsipyörillä (X ja Y) ja jalkapyörällä (Z). Stereomallia tarkastellaan kahdesta okulaarista, joihin kuvat projisioidaan samoin kuin avaruusmittamerkki. Mittaustulos muunnetaan mekaanisin ohjaimin kojeen vieressä sijaitsevalle piirturille. Okulaarien käytön etuna on se, että kuvaa voidaan suurentaa enemmän kuin multiplex-kojeissa, joissa tarkasteltavan stereomallin suurennussuhde riippuu suoraan projektioetäisyydestä. Lisäksi okulaarien valoteho on hyvä, koska valistus voidaan kohdistaa suoraan siihen kohtaan kuvaa, jota tarkastellaan.



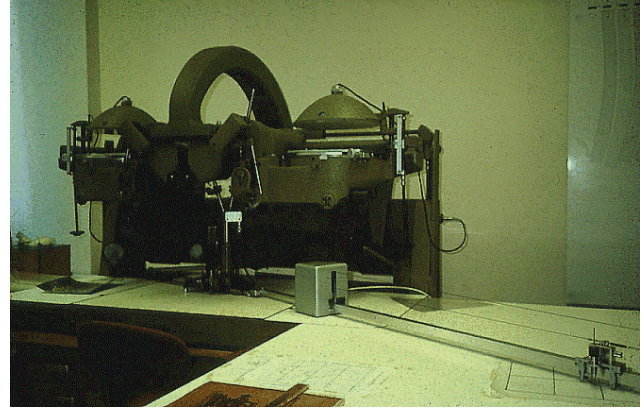
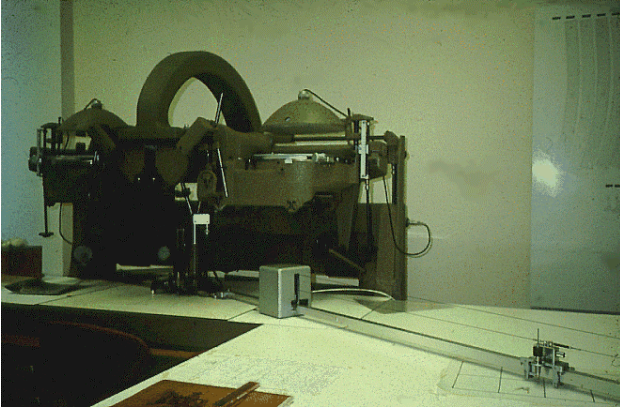
**Kuvakannatin.** Kuvat asetetaan stereokartoituskojeessa kuvakannattimille. Stereomallia muodostettaessa on tärkeää, että kuva projisioidaan mallille sädekimppuna, jonka muoto vastaa tarkasti alkuperäisen kuvan projektiota. Tämä toteutuu, jos projektioon käytetään samanlaista optiikkaa kuin kuvauskamerassa eli projektorin optiikan polttoväli on sama kuin kameran. Lisäksi kuva tulee keskittää kuvakannattimelle samoin kuin se oli kamerassa (**sisäinen orientointi**). Tämä tehdään kameran reunamerkkien avulla. Mikäli projektorin polttoväli on joku muu kuin kuvauskameran kameravakio, kuva tulee suurentaa tai pienentää samassa suhteessa.



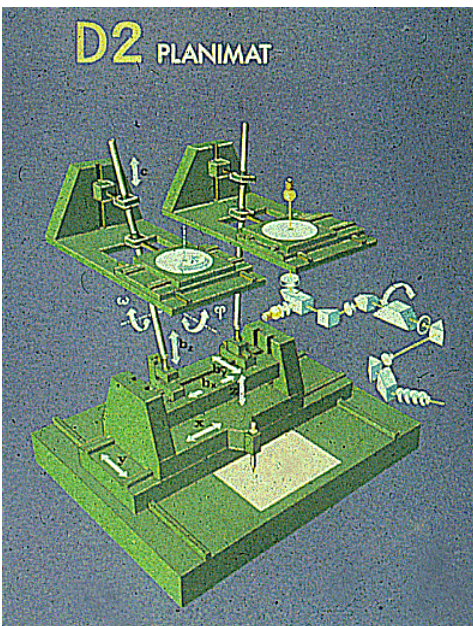
**Mekaaninen avaruushjaus.** Valtaosa maailmalla käytetyistä analogisista stereokartoituskojeista on perustunut mekaaniseen avaruushjaukseen. Mekaaniset avaruushjaimet kiinnittyvät toisiinsa stereomallilla, joka oheisessa kuvassa näkyy ohjainten leikkauspisteessä. Ohjaimet vastaavat avaruussuoria eli optisen projektion projektiosäteitä. Stereomallin 3-D liike kiertyy kiinteiden projektiokeskusten kautta ohjainten toisessa päässä kuvapisteiden liikkeiksi. Projektiokeskusten välimatka pidetään vakiona ja se vastaa kuvakantaa. Vastaavasti kuvapisteet voivat liikkua kumpikin ainoastaan sillä tasolla, joka vastaa kameran kuvatasoa. Kuvatasojen kallistus mallikoordinaatiston suhteen määritetään **orientoimalla (keskinäinen orientointi)**.



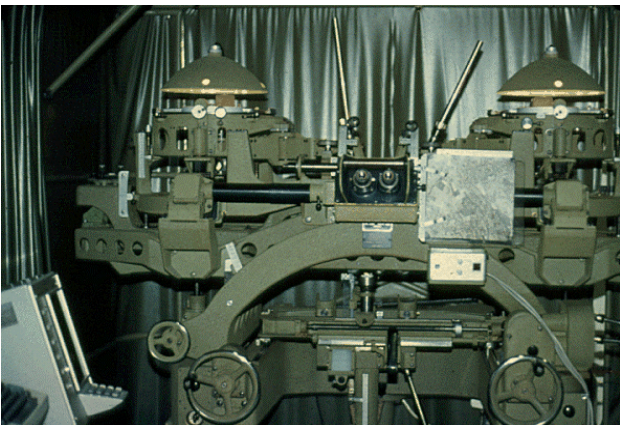
Mekaaniseen avaruushjaukseen perustuvissa stereokartoituskojeissa stereomallia ei voi havaita ohjainten leikkauspisteessä. Sen takia kuvapisteiden liike toistetaan kuvakannattimilla ja vastaavat kuvanosat projisoidaan okulaareihin, joiden kautta stereomalli nähdään.



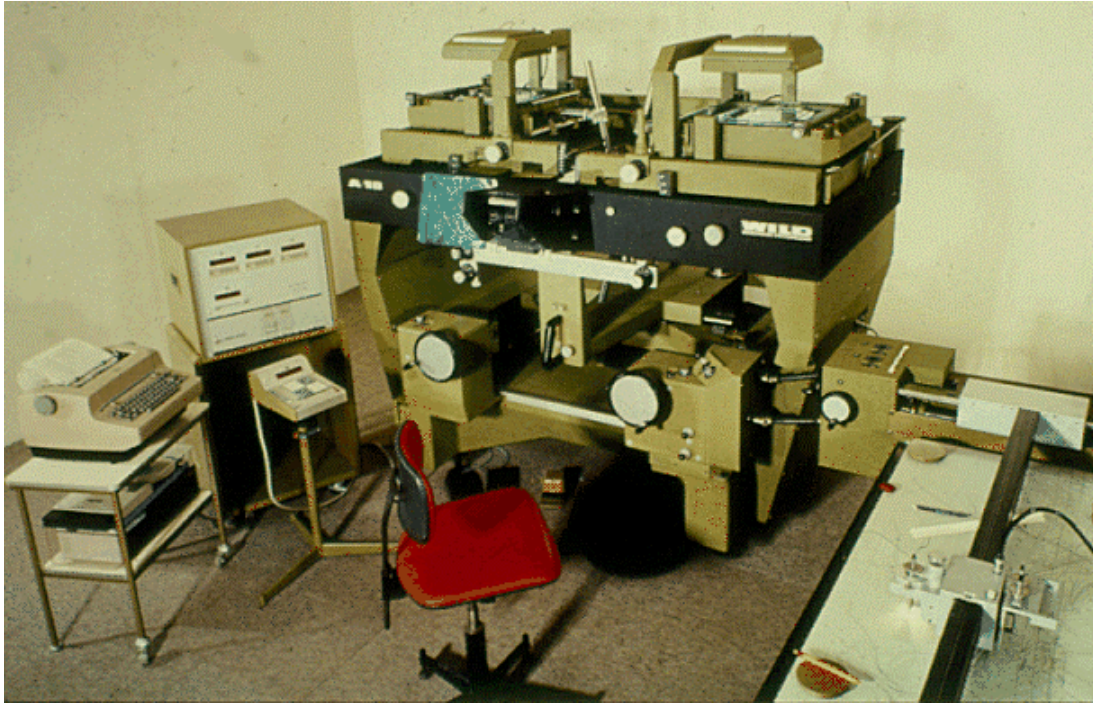
**Wild Aviograph B8.** Mekaaniseen projektioon perustuva stereokartoituskoje, jossa tulkittu liike siirretään mallilta kartalle pantografिन avulla. Stereomallin mittakaava määrittyy mekaanisissa kartoituskojeissa kuvakantaa muuttamalla. Lopullinen kartoitusmittakaava säädetään pantografिन suurennussuhdetta muuttamalla ja tarkistetaan piirustuspöydällä vertaamalla mitattua välimatkaa maastossa tunnettuun vertausetäisyyteen.



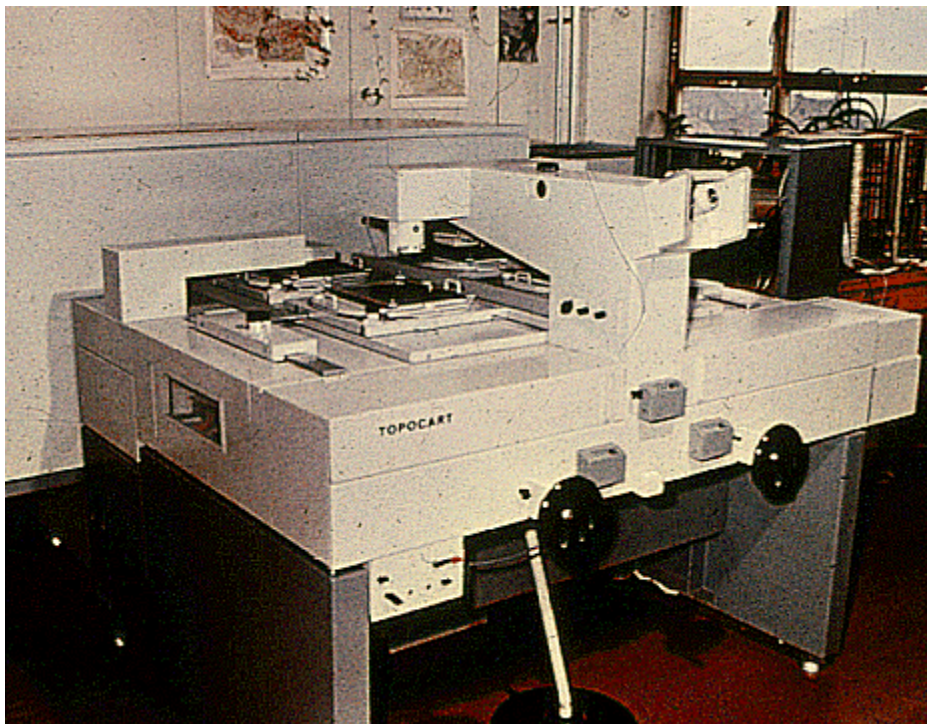
**Zeiss Planimat D2.** Tässä kojeessa kuvakannattimet on käännetty positiivasentoon eli projektiokeskukset sijaitsevat ylinnä. Tällä ratkaisulla on optista tietä kovalta okulaariin saatu lyhennettyä, mikä lisää valotehoa, koska valonsäteitä sirottavia lasipintoja on vähemmän.



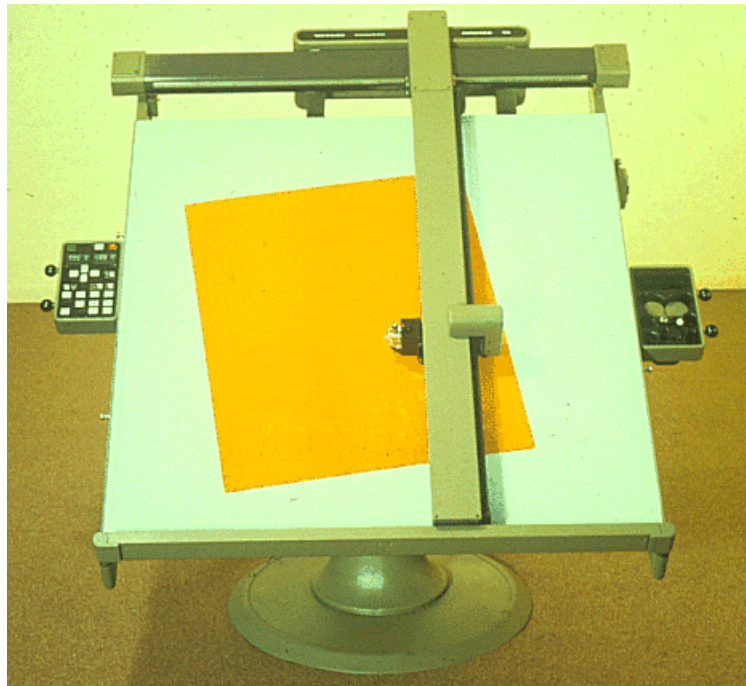
**Stereoautograph Wild A8.** Mekaaniseen avaruusohjaukseen perustuva stereokartoituskoje. Kuvassa näkyvät metallitangot ovat kojeen avaruusohjaimet. Stereotulkintaa ohjataan käsipyörin (X ja Y) sekä jalkapyörällä (Z). Nämä liikkeet välittyvät samanaikaisesti mittamerkin liikkeiksi stereomallilla ja kynän liikkeiksi koordinatografilla. Kojeeseen on myöhemmin liitetty kierto- ja kääntöliikkeitä XYZ-koordinaattien numeerisesta rekisteröimistä varten. Oikealla A8 tuotantokäytössä. Kyse on maanmittauslaitoksen numeerisen paikkatiedon keruusta. (Kuva: Antero Aaltonen, *Maankäyttö* 1/2001)



**Stereoautograph Wild A10.** Hyvän tulointatuloksen kannalta on tärkeätä, että tulkitsijalla on mahdollisuus saman tien verrata piirtämäänsä karttaa kuvalla näkemäänsä malliin. Stereokartoituskojeissa konseptikartta piirretään niihin kytketyillä koordinatografeilla. Kuviorajat piirretään kartan kuvausohjeiden mukaisiksi ja kuvioihin lisätään tunnuksset. Epävarmat kohteet tai kokonaan tulkitsematta jääneet alueet merkitään, jotta ne voidaan jälkeenpäin käydä maastossa tarkistamassa ja täydentämässä.

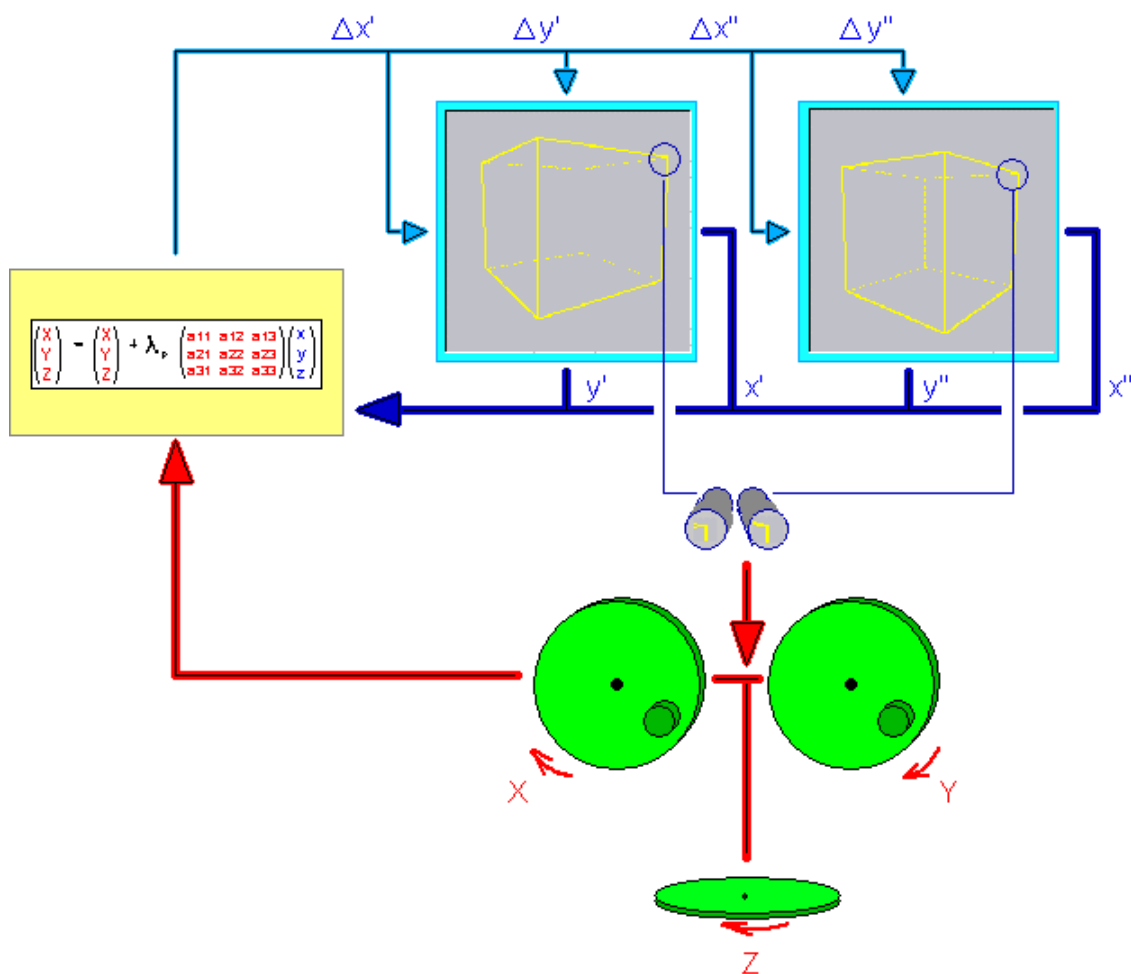


Zeiss Topocart.



**Wild Aviotab TA1.** Numeerisesti rekisteröity kartta voidaan viimeistellä myös kuvaputkella ja tulostaa erillisellä piirustuspöydällä.

### Analyttiset stereokartoituskojeet

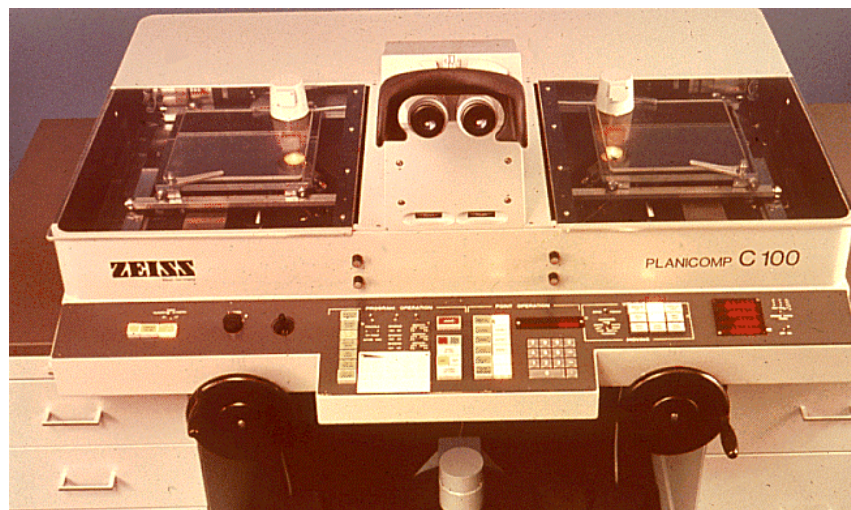


**Analyttinen stereokartoituskoje.** Analyttisessä stereokartoituskojeessa avaruusohjaus eli koordinaattimuunnos stereomallin 3-D koordinaateista kummankin kuvan 2-D koordinaateiksi

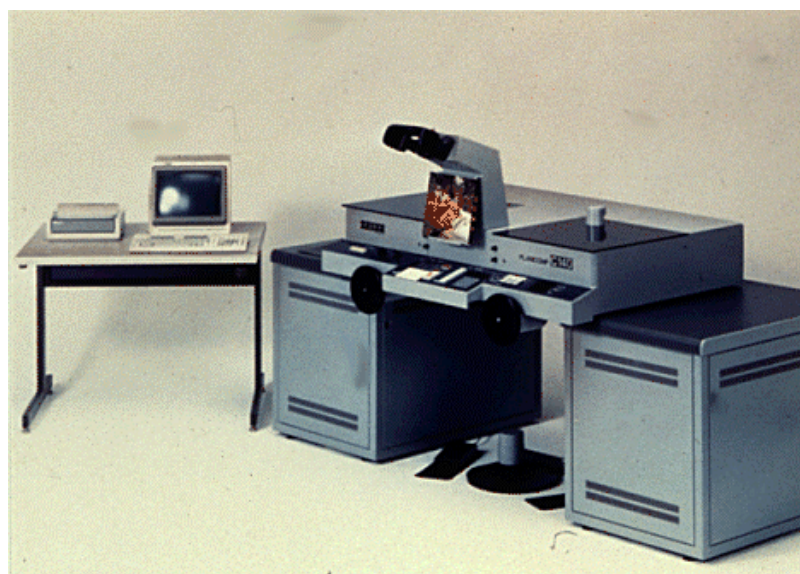
lasketaan tietokoneella. Kun stereo-operatööri siirtää avaruusmittamerkkiä, kuvia siirretään vastaava matka sähköisesti servo-ohjaimilla. Liikkeen rekisteröidään kuvakannattimien liikeantureilla. Tietokoneen tehtävänä on huolehtia siitä, että mittamerkin osoittamat kuvakoordinaatit  $x$  ja  $y$  vastaavat jatkuvasti mallikoordinaatteja  $X$ ,  $Y$ , ja  $Z$  (suljettu takaisinkytkentä). Kun tämä toistetaan riittävän suurella taajuudella (30 Hz), mittamerkin viivettä ei voi havaita ja avaruusohjaus tuntuu todelliselta.



Zeiss Planicomp P3. From: [P3.exe](#)



Zeiss Planicomp C100.



Zeiss Planicomp C140.

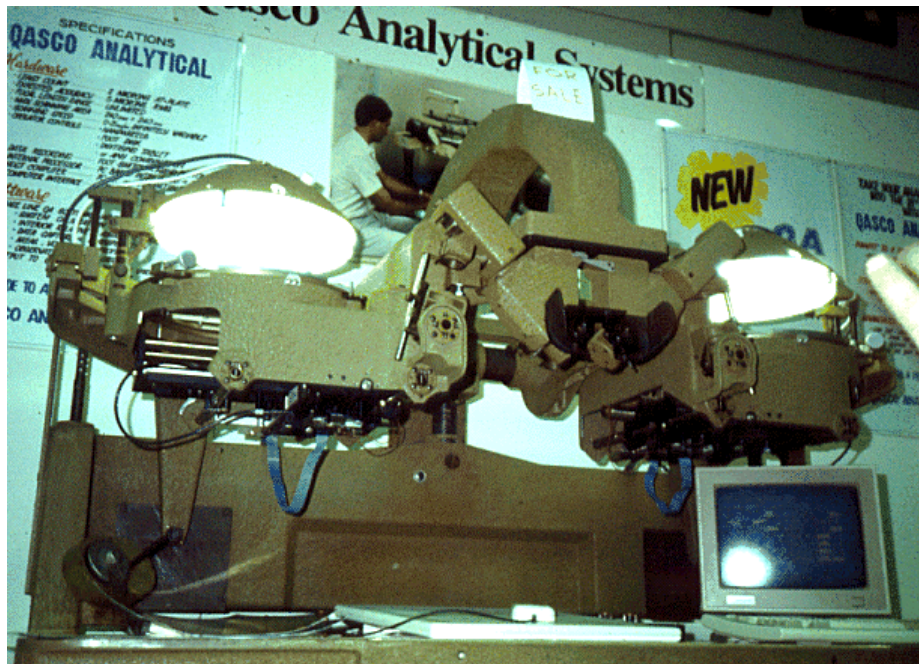




**Wild Aviolyt AC3.** Analyttiset stereokartoituskojeet ovat olleet parhaimmillaan tarkoissa kartoitustehtävissä, ilmakolmioinnissa ja pistetihennyksessä, korkeus- ja maastomallien tiedonkeruussa. Kojeen erityiset edut perustuvat numeeriseen avaruusohjaukseen. Mallin ja kuvien väliseen koordinaattimuunnokseen sisällytetään korjauksia, jotka aiheutuvat siitä, että kuvaus poikkeaa suorasta keskusprojektiokuvauksesta. Tämä parantaa merkittävästi mitattujen koordinaattien tarkkuutta. Näitä korjauksia aiheuttavat mm. karttaprojektiot, ilmakehän tai muun väliaineen refraktio, kameran optiikan piirtovirheet ja filmin muodonmuutokset. Tarkkaa koordinaattiohjausta tarvitaan myös tulkin kohdistamiseksi suunnitellulle tielinjalle ja sen poikkileikkaukselle tai ylipäätään maastomallin ruutuverkolle.



Wild Aviolyt AC1.



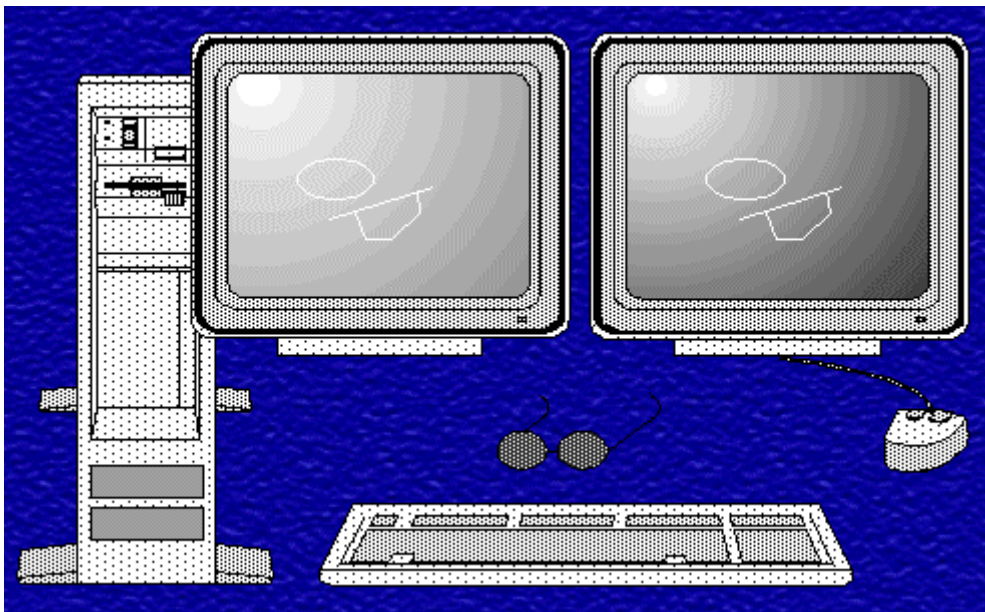
**Analogiakojeen muuttaminen analyttiseksi kojeeksi.** Numeeriseen tiedonkeruuseen siirryttäessä valtaosa nykyisin käytössä olevista analogiakojeista on muunnettu analyttisiksi. Tämä on ratkaistu siten, että kojeen mekaaniset avaruusohjaimet on poistettu ja kuvakannattimiin lisätty servo-ohjaimet ja koordinaattianturit. Vanhasta kojeesta on käytetty hyväksi koneen runko, kuvakannattimet ja stereotarkastelun kannalta välttämätön optinen osa. Mittapöytä on korvattu digitointi-tabletilla ja mallin **XYZ**-liikkeitä ohjataan tietokoneen hiirellä.



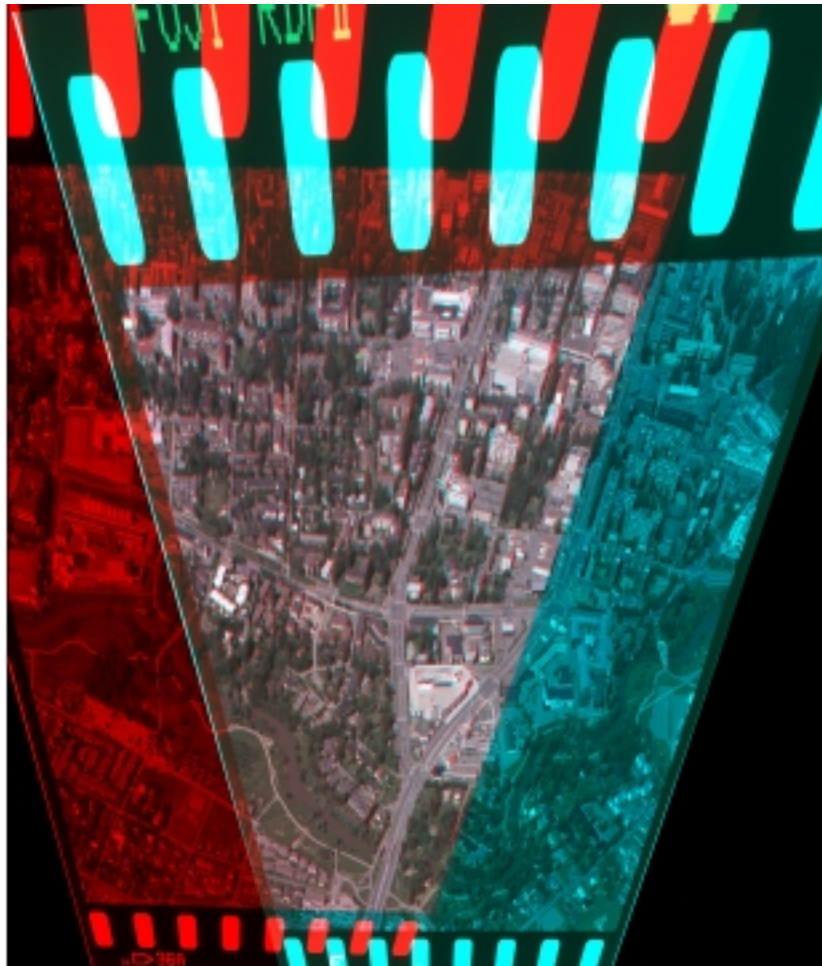
**Matra Traster.** Analyttinen stereokartoituskoje eli analyttinen plotteri (**analytical plotter**) perustuu suomalaisen fotogrammetrian tutkijan Uki Helavan keksintöön ja patentiin 1950-luvulta. Varsinaisen läpimurtonsa tavanomaisessa kartoituskäytössä kojeet tekivät 1980-luvulla. Ranskalainen Matra esitteli Helsingissä 1976 pidetyssä fotogrammetrian maailmankongressissa Trasterin, jossa stereonäyttö oli toteutettu muista valmistajista poikkeavasti optisella kaksoisprojektiolla. Kuvien erottelu perustui valon polarisaatioon. Kaksoisprojektion etuja ovat stereonäytössä esitettävän mallin laaja alueellinen ulottuvuus ja se, että mallia voi samaan aikaan tarkastella useampi kuin yksi henkilö. Nyt, tultaessa 2000-luvulle, kaikissa uusissa stereokartoituksen työasemissa stereonäyttö on toteutettu kaksoisprojektiolla ja filmien sijaan käytetään digitoituja kuvia.

## Digitaalinen fotogrammetrinen stereotyöasema

- **EspaCity**
  - EspaCity on digitaalinen fotogrammetrinen kartoitussovellus, joka toimii Windows NT 4- ja 2000-ympäristöissä. Sovelluksen 3D-käyttö perustuu joko operatöörin stereotulkintaan tai piirteiden automaattiseen 3D-yhteensovitukseen kohdetilassa. Sovellukseen sisältyvät mm. automaattinen maastomallin mittaus, maastomallin editointi, korkeuskäyrien laskenta, vektoriaineiston päälleäyttö, 2D-vektoriaineiston muunnos 3D-aineistoksi, käyttäjän luokitus kohdepiirteille, valmius kuvia lomittavaan tai anaglyfikuvien stereonäyttöön. Sovellusta valmistaa suomalainen [Espa Systems](#).
  - Espa Systems'in tukemia muita fotogrammetrisia sovelluksia ovat mm. ilmakolmiointi (EspaBlock/EspaBundle) ja ortokuvaus (EspaOrtho).
    - | [EspaKernel](#) | [EspaBlock](#) | [EspaBundle](#) | [EspaOrtho](#) | [EspaCity](#) | [EspaGate](#) |
  - Anaglyfinäyttö



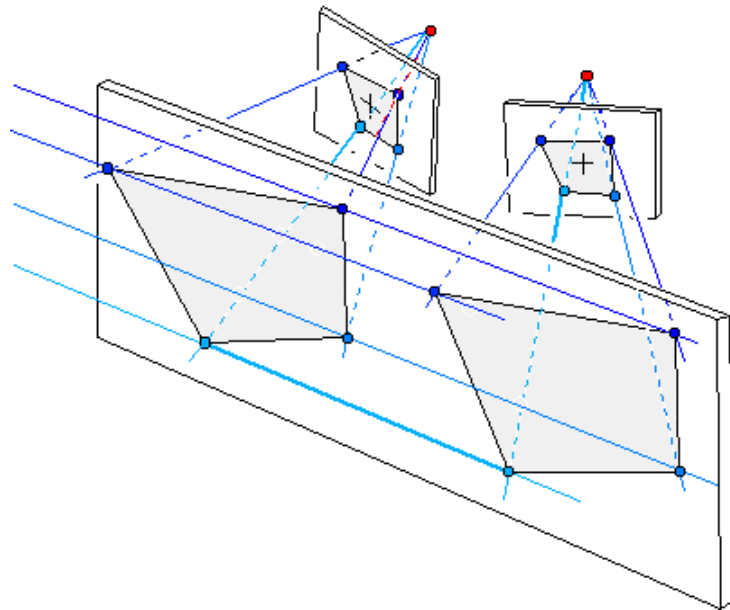
Maanmittauslaitoksen ylläpitämän valtakunnallisen maastotietokannan tiedonkeruussa siirryttiin vuonna 2001 käyttämään EspaCity-sovellusta. Työasemalla tulkitaan digitaalisia stereo-ortokuvia ja editoidaan suoraan Smallworldin maastotietokantaa. (Kuvat: [Tella, 2000](#), ja [Mäkinen, 2001](#)).



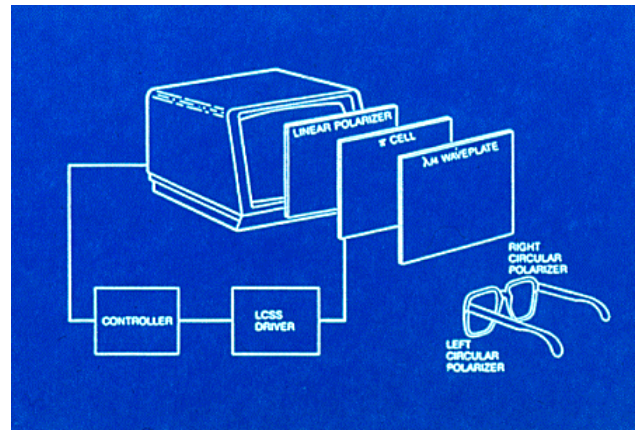
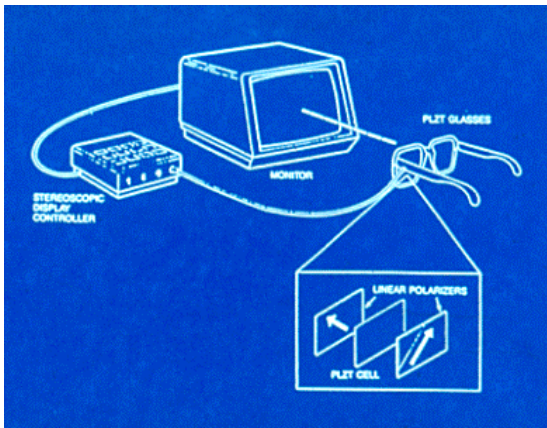
EspaCityn anaglyfinäyttö. Esimerkkikuva on Vantaalta ja kyse on viistoilmakuvista. (Kimmo Nurminen, 2002)



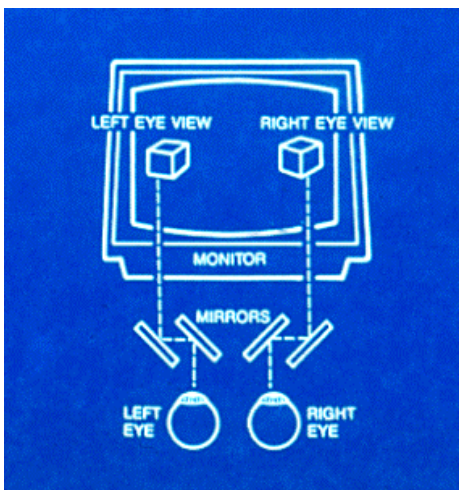
**Helava DSW.** Digitaalisissa stereofotogrammetrian työasemissa analogiset kuvakannattimet on korvattu tietokoneen kuvamuisteilla. Vaikka stereoskooppinen tulkinta ja kartoitus tehdään 3-D kuvanäytöllä, ei varsinaista avaruusohjausta enään tarvita. Fotogrammetriset toiminnot sisältyvät digitaalisten kuvien geometriseen käsittelyyn ennen stereonäyttöä. Kuvien orientoinnit ratkaistaan erillisellä ilmakolmioinnilla ja kuvat oikaistaan pareittain projektiivisesti siten, että kuvanäytöllä esitettäessä mallit vastaavat stereokuvauksen normaalitapausta (epipolaarioikaisu).



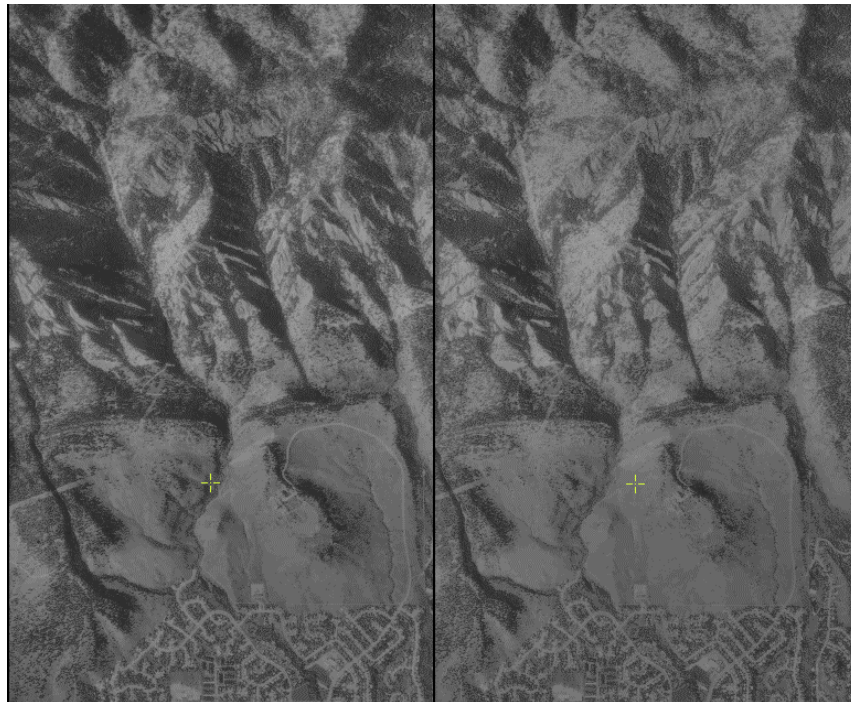
**Epipolaarioikaisu.** Kuvat projisioidaan stereonäytölle normaaliasentoisina ja yhdensuuntaiset sydänsuorat kuvautuvat kuvien rivisuunnassa.



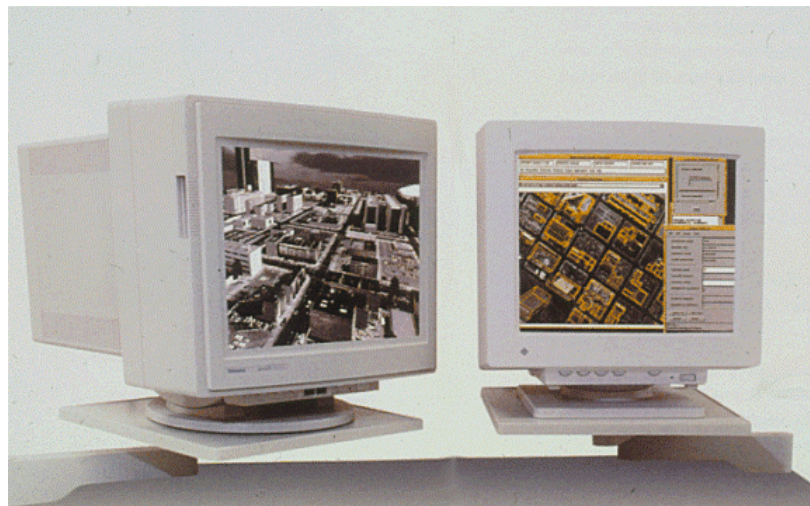
Osakuvat projisioidaan joko rinnakkain kumpikin omalle puoliruudulle tai kaksoisprojektiona hyvin nopeasti vuorotellen (120 Hz) koko kuvaruudulle. Kuvat voidaan projisioida myös lomittain videosignaalin osakuvina eli jakaa toinen parittomille, toinen parillisille juoville. Tällöin kuitenkin stereokuvan erotuskyky puolittuu pystysuunnassa. Kaksoisprojektiossa kuvien erottelu perustetaan varsin yleisesti osakuvien polarisaatioon. Polarisointi toteutetaan sähköisin kaihtimin, jotka voidaan sijoittaa joko silmälaseihin tai näyttöruudun eteen.



Kun kuvaruutu jaetaan puoliksi kummallekin kuvalle, kuvaparia tarkastellaan stereoskoopilla. Kuvanäytön käyttö ei ole yhtä tehokasta kuin kaksoisprojektiossa, koska stereomalli nähdään puolen kuvaruudun levyisenä. Stereotarkastelu on kuitenkin mahdollista myös ilman apuvälineitä. Oikella Leican DVP Digital Video Plotter, jonka kuvapari on jaettu stereonäytölle.



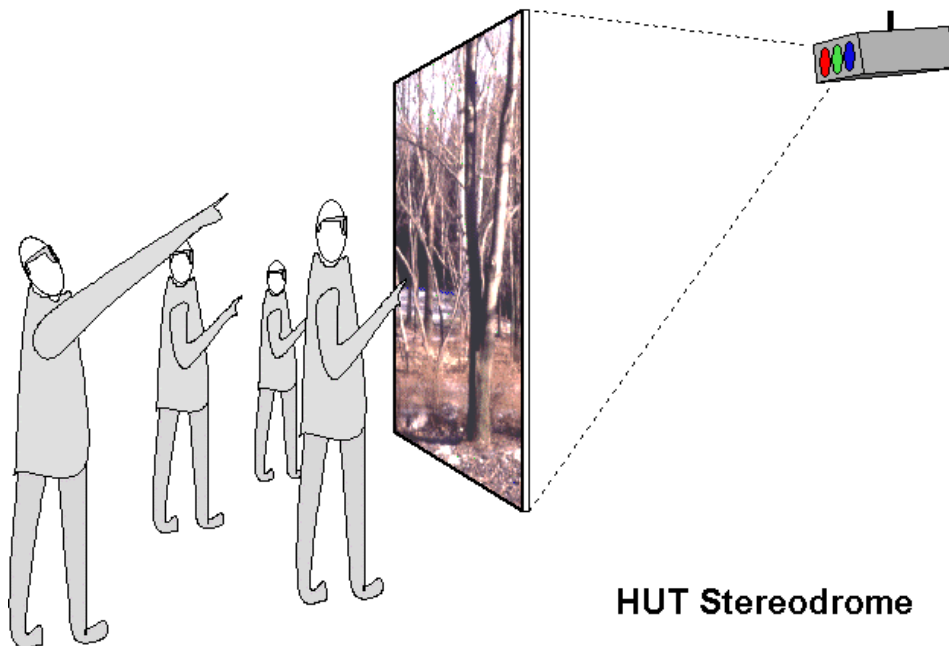
**Leica Helava SocetSet.** Projektiivisesti oikaistu kuvapari, joka vastaa stereokuvauksen normaali-tapausta. Pystyparallaksi on poistettu koko mallin alueelta. Avaruusmittamerkki muodostuu kursori-parista, joka liikkuu X- ja Y-koordinattisuunnissa toisiinsa kytkettyinä. Stereomallin Z-koordinaatin suuntainen liike näkyy kursorien liikkeenä toistensa eli vaakaparallaksin suuntaan. Tämä kuvapari on tarkasteltavissa ristikkäisin silmänakselein.



**Leica Helava SocetSet.** Digitaalisten fotogrammetristen kuvatyöasemien uusia tuotteita ovat orto-kuvat ja 3-D mallit. Vasemman puoleinen kaupunkimalli on tuotettu ilmakuvilta siten, että kuvilta on ensin mitattu maanpinta ja rakennukset, minkä jälkeen näistä on tehty pintamalli ja tämä on pinnoitettu ilmakuvilta leikatuin tekstuurein. Kaupunkimalli havainnollistetaan animaationa, joka lasketaan kuvitellun lentoreitin ja katselusuunnan mukaan. Digitaaliset kartoitustyöasemat sovel-tuvat eityisesti georeferoitujen aineistojen yhdistelyyn. Oikean puoleisessa kuvassa kaupungin 3-D rautalankamalli on piirretty ilmakuvan päälle. Kun molemmat esitetään samassa projektiossa, kartan virheet ja puutteet näkyvät selvästi.



**Zeiss Phodis ST.** Tässä fotogrammetrisessa stereotyöasemassa kuvanäytön kaksoisprojektio perustuu kuvaparin polarisointiin. Polarisaatiokaihtimet on sijoitettu silmälaseihin, joiden toiminta synkronoidaan kuvanäytön kaksoisprojektion mukaan. Avaruusohjaimena toimii 3-D hiiri, jonka käyttöliittymä on suunniteltu vaativan stereotulkinnan tarpeisiin. Avaruusohjaimen avulla tulkinta voidaan kohdistaa tarkasti stereomallin yksityiskohtiin, kohdistusliikkeen nopeutta ja suuntaa muuntaa joustavasti, ja jokaiseen mittaushavaintoon voidaan liittää sijaintitietojen lisäksi kohteen ominaisuustietoja.



**HUT Stereodrome.** TKK:ssa stereotyöasemaan on liitetty videoprojektori, jolla stereonäytön kuvat heijastetaan valkokankaalle. Projektori heijastaa vuorotellen vasenta ja oikeaa kuvaa 120 Hz virkistystaajuudella. Näkymää tarkastellaan synkronoiduin stereolasein. Valkokangas on läpikuultava. Kun kuva projisoidaan kankaalle takaapäin, katselijat eivät varjosta kuvaa. Tällä on erityistä merkitystä silloin, kun halutaan tarkastella luonnollisia stereonäkymiä. Luonnollisen stereonäkymän [kokonaisplastikka](#)  $p = 1$ .