

Lauri Suomela

# KAMERAGEOMETRIAN VAIKUTUS PANORAAMAKUVAN LAATUUN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2019

# TIIVISTELMÄ

**LAURI SUOMELA:** Kamerageometrian vaikutus panoraamakuvan laatuun  
Tampereen yliopisto  
Kandidaatintyö, 32 sivua, 5 Liitteet sivua  
29.4.2019  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Pääaine: Signaalinkäsittely  
Tarkastaja: Joni Kämäräinen  
Avainsanat: Panoraamakuva, Kamerageometria, Parallaksi

Panoraamakamerat eli erittäin laajan kuvakulman kuvia ottavat kamerat ovat perinteisesti perustuneet erikoisvalmisteisiin peili- ja sensoriyhdistelmiin. Laskentatehon kasvu on kuitenkin mahdollistanut ohjelmallisen eri kameroiden kuvia yhdistelemällä toteutettavan panoraamakuvan muodostuksen. Menetelmissä kaksi tai useampi kamera asetetaan lähekkäin kuvaamaan hieman lomittaisia aloja kuvattavasta kohteesta.

Tässä työssä tutkittiin kamerageometrian vaikutusta kuvanlaatuun usean kameran kuvien yhdistämiseen perustuvissa panoraamakamerajärjestelmissä. Kamera-geometrialla tarkoitetaan yksittäisen kameran sijaintia ja kuvaussuuntaa suhteessa toisiin kameroihin, sekä kameran ominaisuuksia, jotka määrittävät miten kamera muodostaa kuvan ympäristöstä. Panoraamakameroita tarkasteltaessa kamerageometria laajennetaan käsittämään myös usean kameran sijainnit ja kuvaussuunnat suhteessa toisiinsa.

Kamerageometriaan pohjautuvan panoraamakuvanmuodostuksen teorian pohjalta tunnistettiin kuvanmuodostuksen lopputulokseen vaikuttavat kuvanlaadun tekijät. Näiden pohjalta johdettiin kuvanlaadun ja kamerageometrian suhdetta kuvaava malli. Mallin sopivuutta testattiin toteuttamalla panoraamakamerajärjestelmällä mittaussarjat, joissa järjestelmän kamerageometriaa vaihdeltiin yksittäisten mittausten välillä. Kehitetty teoreettinen malli selitti mittaustulokset 0,999 selitysasteella. Mallia on siis erittäin selitysvoimainen, joten sen pohjalta voidaan johtaa konkreettisia suuntaviivoja panoraamakamerasysteemien kamerageometrian suunnitteluun.

# SISÄLTÖ

1. Johdanto . . . . .	2
2. Kamerageometria ja perspektiivimuunnokset . . . . .	4
2.1 Kameramallit ja -parametrit . . . . .	4
2.1.1 Neulanreikämalli . . . . .	4
2.1.2 Kameran kalibrointi . . . . .	8
2.2 Perspektiivimuunnokset . . . . .	9
2.2.1 Epipolaarigeometria . . . . .	9
2.2.2 Homografia ja parallaksi . . . . .	11
2.3 Homografian arviointi kuvasta . . . . .	15
2.3.1 Kuvasta tunnistettavat piirteet . . . . .	16
2.3.2 Homografian määrittäminen . . . . .	17
3. Mallin johtaminen ja mittaukset . . . . .	19
3.1 Parallaksin ja kamerageometrian suhdetta kuvaavan mallin johtaminen	19
3.2 Kamerajärjestelmän toteutus . . . . .	21
3.3 Mittausjärjestely . . . . .	23
3.3.1 Optisten keskipisteiden etäisyys . . . . .	24
3.3.2 Kuvauskohteen rakenne . . . . .	24
4. Tulokset ja niiden tarkastelu . . . . .	26
5. Yhteenveto . . . . .	29
Lähteet . . . . .	30
A. Panoraamakuvan yksittäisistä kuvista muodostava Matlab-ohjelma . . . .	33
B. Esimerkkejä parallaksin mittausta varten otetuista kuvista . . . . .	36

# KUVALUETTELO

1.1	Panoraamakuva Chicagon keskustasta [12]. . . . .	2
2.1	Kamera- ja maailmakeskeisten koordinaatistojen suhde. [8, s.156] . . .	5
2.2	Kamerakeskeinen koordinaatisto ja sisäiset parametrit. [8, s.154] . . .	6
2.3	a) Kameroiden optiset keskipisteet $C$ ja $C'$ , kuvatasot sekä reaali- maailman piste $X$ ja sen projektiot kuvatasoihin, $\mathbf{x}$ ja $\mathbf{x}'$ virittävät epipo- laaritason. b) Kuvapisteen $\mathbf{x}$ takaisinprojektiio $C$ :n mukaan tuottaa säteen, jolla reaali maailman pisteen $\mathbf{X}$ on sijaittava. Säteen projektiio $C'$ :n kuvatasolle on epipolaarisuora $l'$ . $\mathbf{e}$ ja $\mathbf{e}'$ ovat kameroiden kuva- tasoihin projisoidut kuvat toisen kameran optisesta keskipisteestä. [8, s.240] . . . . .	10
2.4	Pisteen $\mathbf{X}$ sijainti maailmakeskeisessä koordinaatistossa voidaan mää- rittää sen kuvien $\mathbf{x}$ ja $\mathbf{x}'$ takaisinprojektiosäteiden leikkauspisteestä. [8, s.263] . . . . .	11
2.5	Reaali maailman piste $\mathbf{X}$ projisoidaan $C$ :n suhteen. Sen kuvat kahdel- la tasolla, $\mathbf{x}$ ja $\mathbf{x}'$ , liittyvät toisiinsa homografiaksi kutsutun projek- tiivisen suhteen mukaisesti.[8, s.203] . . . . .	12
2.6	Kolmen kuvan lomittaisten alueiden perusteella arvioituja homogra- fioita käyttäen voidaan oikea ja vasen kuva muuntaa keskimmäisen kuvan perspektiiviin, ja yhdistää tulos panoraamakuvaksi. [8, s.206] .	13
2.7	Taso $\pi$ . . . . .	14
2.8	Pisteen $\mathbf{x}$ projisointi $C'$ :lle $\pi$ :n indusoiman homografian kautta tuot- taa pisteen $\tilde{\mathbf{x}}'$ joka sijaitsee parallaksin verran sivussa pisteen $\mathbf{X}$ oi- keasta kuvasta $\mathbf{x}'$ . [8, s.335] . . . . .	14
2.9	Kuvan a projisointi b:n perspektiiviin käyttäen kirjoitusta sisältävää alustaa homografian indusoivana tasona tuottaa tulos- ja b:n kuvat päällekkäin asettaessa kahvimukin pisteiden parallaksista johtuvan haamukuva-efektin. Tasolla sijaitsevat pisteet projisoituvat kuitenkin oikein. [8, s.336] . . . . .	15



2.10 Kahdesta kuvasta tunnistetut SURF-kiinnostuspisteet, jotka on niitä kuvaavien piirrevektorien samankaltaisuuden perusteella määritelty samoiksi. Suurin osa vastaavuuksista on oikein määritetty, mutta osan pisteistä on arvioitu vastaavan toisessa kuvassa eri reaali maailman pistettä. . . . .	16
3.1 Termin ( 3.2 ) itseisarvo $d_{\pi}$ :n ja $d_2$ :n arvoilla $[0,100]$ . . . . .	20
3.2 Panoraamakuvanmuodostus algoritmi vuokaaviona esitettynä . . . . .	21
3.3 Mittauksia varten rakennetulla panoraamakamerajärjestelmällä otettu esimerkkikuva. . . . .	22
3.4 Paperille printatuista shakkiruudukoista koostuva mittaobjekti Mittausten kuvauskohde . . . . .	23
3.5 Optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksen mittausjärjestely Kuvauskohteen tasomaisuuden vaikutuksen mittausjärjestely . . . . .	25
4.1 Kuvatasoon projisoitu mittausdata ja siihen sovitettut mallit visualisoituna. Vasemmalla puolella parallaksin riippuvuus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyksistä, oikealla parallaksin riippuvuus mittaobjektin ja kuvauskohteen etäisyydestä. . . . .	27
B.1 Mittaus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksesta parallaksin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 8 cm, mittaobjektin etäisyys 75 cm. . . . .	36
B.2 Mittaus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksesta parallaksin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 96 cm, mittaobjektin etäisyys 75 cm. . . . .	37
B.3 Mittaus kuvattavan näkymän rakenteen vaikutuksesta kuvaan syntyvän parallaksin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 64 cm, mittaobjektin etäisyys 150 cm. . . . .	37

## TAULUKKOLUETTELO

4.1	Kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutus parallaksin suuruuteen. Sekä kuvasta mitatut arvot että näistä muunnoksella 2.1 saadut kuvatasoa vastaavat arvot on ilmaistu senttimetreissä. . . .	26
4.2	Vaikutus, joka mittaobjektin etäisyydellä homografian indusoivasta tasosta on parallaksin suuruuteen. Sekä kuvasta mitatut arvot että näistä muunnoksella 2.1 saadut kuvatasoa vastaavat arvot on ilmaistu senttimetreissä. . . . .	26
4.3	Mallien sopivuus selitysasteen avulla ilmaistuna . . . . .	28

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

DLT	Direct Linear Transform
MSAC	M-estimator Sample Consensus
NumPy	Numerical Python
RANSAC	Random Sample Consensus
SfM	Structure-from-Motion
SURF	Speeded Up Robust Features
$\alpha$	Kalibraatiomatriisin horisontaalinen skaalauskerroin
$\beta$	Kalibraatiomatriisin vertikaalinen skaalauskerroin
$\delta u^{(r)}$	Horisontaalinen radiaalivääristymä
$\delta u^{(t)}$	Horisontaalinen tangentiaalivääristymä
$\delta v^{(r)}$	Vertikaalinen radiaalivääristymä
$\delta v^{(t)}$	Vertikaalinen tangentiaalivääristymä
$a$	Lineaarisen mallin parametri
$b$	Työssä johdetun mallin skaalauskerroin
<b>C</b>	Kameran optinen keskipiste
$d$	Etäisyys reaali maailman koordinaatistossa
$D_{inv}$	Kahden maailmakoordinaatiston normalisoidun tason etäisyys
<b>F</b>	Kameran polttoväli
$f$	Kameran polttoväli
$H$	Homografiamatriisi
<b>K</b>	Kameran kalibraatiomatriisi
$k$	Radiaalivääristyskerroin
<b>l</b>	Epipolaarisuora
$m_x$	Horisontaalinen kameran pikselien ja reaali maailman koordinaatiston suhde
$m_y$	Vertikaalinen kameran pikselien ja reaali maailman koordinaatiston suhde
<b>n</b>	Reaali maailman koordinaatiston tason parametrisointi
<b>p</b>	Kameran pääpiste
<b>P</b>	Kameran projektio matriisi
$p$	Tangentiaalivääristyskerroin
<b>R</b>	Kameran pääpisteen rotaatio
$R^2$	Mallin selitysaste
$r$	Etäisyys kameran linssin keskipisteestä
<b>s</b>	Kameran pikselien sivunpituuksien epäsymmetria

$t$	Kameran pääpisteen translaatio
$u$	Pikseliarvoinen kuvatason koordinaatti $u$
$v$	Pikseliarvoinen kuvatason koordinaatti $v$
$X$	Koordinaatti $X$
$x$	Metrisen kuvatason koordinaatiston piste
$Y$	Koordinaatti $Y$
$Z$	Koordinaatti $Z$

# 1. JOHDANTO

Panoraamakuva tarkoittaa kuvaa, joka esittää yksittäisen kameran kuvaamaa näkymää laajemman alueen, kuten kuva 1.1. Panoraamakuva voidaan näyttää eri tavoin eri käyttötarkoituksissa. Esimerkiksi virtuaalitodellisuuslasit näyttävät vain tietyn osan suuresta, usein koko näkökentän kattavasta panoraamasta kerrallaan. Stereografisessa projektiossa taas koko näkökentän kattava kuva projisoidaan kaksiulotteiselle tasolle. Potentiaalisia panoraamakameroiden sovelluskohteita ovat esimerkiksi valvonta, virtuaalitodellisuussisältöjen tuottaminen sekä autonomiset liikennevälineet. [28], [24]



*Kuva 1.1 Panoraamakuva Chicagon keskustasta [12].*

Perinteisesti panoraamakuvia on tuotettu käyttämällä tähän tarkoitettuja erikoislinssi- ja sensorisysteemejä [3]. Näissä  $360^\circ$  (tai tätä laajuutta lähestyvä) panoraamakuva muodostetaan ohjaamalla eri suunnista saapuvat valonsäteet peilin avulla yksittäiseen sensoriin. Menetelmä vaatii erikoisvalmisteisia peilejä, joiden valmistaminen ja sovittaminen kamerajärjestelmään on monimutkainen prosessi [25].

Tietokoneiden laskentatehon ja konenäköalgoritmien kehittyminen on mahdollistanut useasta kameramoduulista koostuvat panoraamakamerat, jotka tuottavat panoraamakuvaa yksittäisten kameroiden kuvia ohjelmallisesti yhdistämällä [5]. Laajakulmaisen panoraamakameran koostaminen useista yksinkertaisista osista poistaa erityisten linssi- ja peilisysteemien tarpeen. Kuvien toisiinsa yhdistäminen perustuu samojen yksityiskohtien ohjelmalliseen tunnistamiseen eri kuvista. Samojen pisteiden tunnistaminen sekä kuvien perspektiivimuunnoksissa tarvittavat matriisiopeeraatiot ovat laskennallisesti raskaita. Tästä syystä tähän teknologiaan perustuvia kaupallisia kameroita on tullut markkinoille vasta viime vuosina. [7]

Kun panoraamakuva muodostetaan useiden eri paikoissa sijaitsevien ja/tai eri suunn-

tiin osoittavien kameroiden kuvista, kuvat pitää asettaa lomittain niin, että yhdistetty tuloskuva näyttää yhdellä erittäin laaja-objektiivisellä kameralla otetulta kuvalta. Kameran sijaintia ja kuvaussuuntaa suhteessa sen ympäristöön sekä kameran ominaisuuksia, jotka määrittävät, miten kamera muodostaa kuvan ympäristöstä, kutsutaan kamerageometriaksi [8]. Koska kameroiden kamerageometriassa on eroja, ne näkevät kuvattavat kohteet eri näkökulmista eli perspektiiveistä. Jos kahdella kameralla otetut kuvat asetetaan lomittain niin, että kuvissa toisiaan vastaavat pisteet ovat mahdollisimman päällekkäin, huomataan, että lopputulos vaikuttaa epäluonnolliselta [29]. Tämä johtuu siitä että kameroiden näkökulma kuvattaviin kohteisiin on eri, joten kohteiden mittasuhteet kuvien välillä eivät ole yhdenmukaiset. Esimerkiksi sama reaali maailman suora saattaa osoittaa panoraamakuvan eri osissa eri suuntiin. Tämä on suurin panoraamakuvien muodostukseen liittyvä haaste [5], [22].

Kirjallisuudessa panoraamajärjestelmän kamerageometrian vaikutusta muodostetun panoraamakuvan laatuun on kuitenkin tutkittu tarkemmin vain muutamassa kamerageometrian erikoistilanteessa [8, s.325-327], tai yleisemmin käyttäen erittäin sovel-lusspesifiä muotoilua [13], joka tekee tulosten hyödyntämisestä hankalaa.

Tämä työ tutkii kamerageometrian merkitystä useista kameroista koostuvien panoraamakamerajärjestelmien suunnittelun kannalta. Hypoteesi on, että panoraamakuvan laatu riippuu panoraamakameran kamerageometriasta, joka määrittää kuinka hyvin kuvien yhdistäminen onnistuu. Hypoteesin todentamiseksi olemassaolevan panoraamakuvanmuodostuksen teorian pohjalta johdetaan yleisiin kamerageometrian merkintätapoihin perustuva kuvanlaadun ja kamerageometrian suhdetta kuvaava teoreettinen malli, jonka paikkaansapitävyys todennetaan empiirisiin mittauksiin. Kehitetyn mallin pohjalta johdetaan suuntaviivoja panoraamakamerasysteemien suunnitteluun.

Työn rakenne on seuraavanlainen: kappaleessa 2 käydään läpi kamerageometriaa ja perspektiivimuunnoksia. Kappale 3 esittää työssä johdetun mallin, mittauksia varten rakennetun panoraamakamerasysteemin sekä mittausjärjestelyn. Kappale 4 esittää mittaustulokset ja niiden analyysin ja kappale 5 sisältää työn yhteenvedon.

## 2. KAMERAGEOMETRIA JA PERSPEKTIIVIMUUNNOKSET

Kahden kameran näkökulmien välinen perspektiiviero voidaan mallintaa matemaattisesti perustuen kameroiden kuvanmuodostusparametreihin sekä sijainteihin ja kuvaussuuntaan toistensa suhteen. Kun ero tunnetaan, voidaan muodostaa perspektiivimuunnos, jonka avulla yhdellä kameralla otettu kuva voidaan esittää toisen kameran näkökulmasta [8]. Panoraamakuvan muodostukseen sovellettuna tätä muunnosta voidaan käyttää kameroiden perspektiivierosta panoraamakuvaan syntyvän epäjatkuvuuden poistamiseen [5]. Onnistuessaan muunnetuista kuvista muodostettu panoraama näyttää luonnolliselta, yhdellä kameralla kuvatulta otokselta.

Seuraavaksi esitellään teoreettinen tausta, jonka pohjalta voidaan kuvata tietyssä pisteessä tiettyyn suuntaan osoittavan kameran kuvanmuodostusta, sen perspektiiviä suhteessa kuvattaviin kohteisiin ja muihin kameroihin sekä kahden kameran välistä perspektiivimuunnosta.

### 2.1 Kameramallit ja -parametrit

Tietyssä pisteessä sijaitsevan ja tiettyyn suuntaan osoittavan kameran perspektiivi ja kuvanmuodostus voidaan mallintaa neulanreikäkameramallilla [8, s.153-158]. Neulanreikämalli kuvaa projektiota reaali maailman kolmiulotteisesta koordinaatistosta kameran kuvien kaksiulotteiseen koordinaatistoon. Projektio tehdään kameran optiseksi keskipisteeksi kutsutun projektiokeskipisteen kautta. Lineaarisen projektion oletettavaa neulanreikämallia voidaan tarkentaa ottamalla huomioon esimerkiksi linssistä aiheutuvia projektion epälineaarisuuksia [10]. Tietyn kameran linssin epälineaarisuudet voidaan määrittää kameran kalibroinnilla.

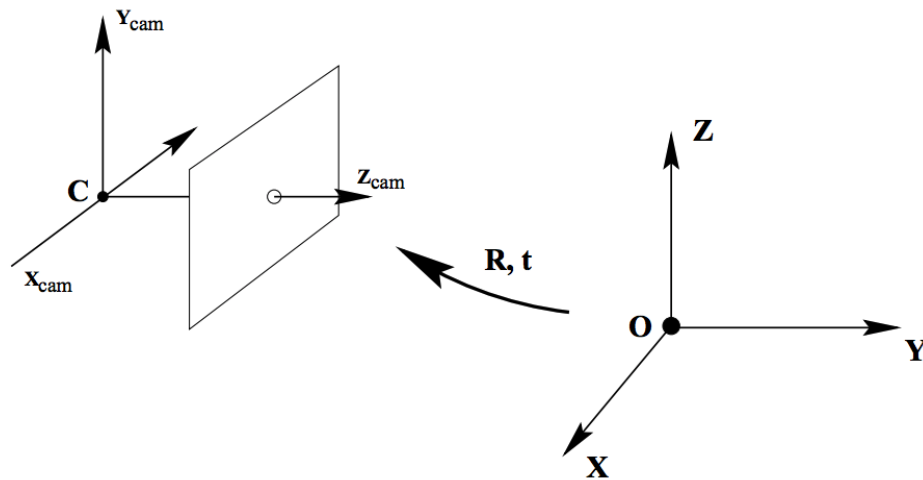
#### 2.1.1 Neulanreikämalli

Yksinkertaisimmillaan kameran kuvanotossa tapahtuva projektio reaali maailmasta kuvaan voidaan esittää yhtälöllä [8, s.154]

$$(X, Y, Z)^T \mapsto \left( \frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z} \right). \quad (2.1)$$

Tässä  $f$  on kameran polttoväli, ja  $X, Y$  ja  $Z$  ovat projisoitavan pisteen reaali maailman koordinaatit. Yhtälö esittää intuitiivisen tuloksen, jonka mukaan esineen suuruus kuvassa riippuu siitä, kuinka kaukana esine kamerasta sijaitsee. Tämä malli on kuitenkin yksinkertaistettu, eikä ota huomioon kaikkia kameroiden kuvanmuodostukseen vaikuttavia tekijöitä. Mallin pohjalta voidaan kuitenkin johtaa oikeiden kameroiden kuvanmuodostusta kuvaava malli, jota kutsutaan neulanreikämalliksi [8, s. 153-158].

Neulanreikämallin projektion eri vaiheiden tarkastelemiseksi määritellään joukko koordinaatistoja, jotka esitetään kuvassa 2.1. Maailmakeskeinen koordinaatisto on kolmiulotteisen avaruuden koordinaatisto, jonka origo sijaitsee jossain mielivaltaisessa reaali maailman pisteessä [8, s. 153-158].



**Kuva 2.1** Kamera- ja maailmakeskeisten koordinaatistojen suhde. [8, s.156]

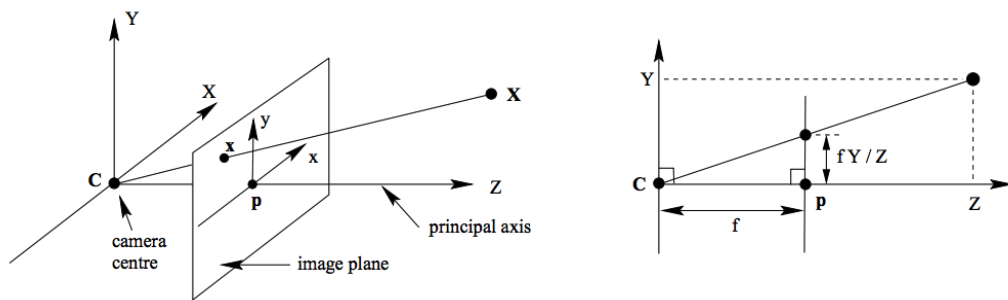
Kuva 2.2 esittelee kamerakeskeisen koordinaatiston. Sen origo sijaitsee kameran optisessa keskipisteessä  $C$ , ja se on kolmiulotteisen avaruuden koordinaatisto. Kamerakeskeisen koordinaatiston tarkoitus on kuvata reaali maailman pisteiden sijainnit kameran näkökulmasta. Sen  $Z$ -akselia kutsutaan kamerakeskeisen koordinaatiston optiseksi akseliksi eli pääakseliksi. Tässä koordinaatistossa sijaitsevaa tasoa  $Z = f$  kutsutaan kuvatasonksi, ja kuvanmuodostuksessa maailmakeskeisen koordinaatiston pisteet kuvataan keskeisprojektiolla optisen keskipisteen kautta tähän tasoon.  $f$  merkitsee kameran polttoväliä, joka kuvaa kamerasysteemin valonsäteitä kokoavaa vaikutusta. Kuvataso on kaksiulotteinen avaruus. Kuvatason koordinaatiston origo sijaitsee optisen akselin ja kuvatason leikkauspisteessä, jota kutsutaan pääpisteeksi  $p$ . Kun kamerakeskeisen koordinaatiston pisteen ja optisen keskipisteen välille



piirretään jana, pisteen projektiio kuvatasossa sijaitsee janan ja kuvatason leikkauspisteessä. Kuvatasossa koordinaattien arvoja voidaan käsitellä joko pikseleissä tai metrisissä yksiköissä ilmaistuna. [8, p.153-158]

Neulanreikämalli jaetaan kameran ulkoisiin ja sisäisiin parametreihin. Ulkoiset parametrit kuvaavat kameran sijainnin ja orientaation suhteessa reaali maailman koordinaatistoon. Ulkoisia parametreja käyttäen reaali maailman koordinaatiston piste voidaan muuntaa kolmiulotteiseen kamerakeskeiseen koordinaatistoon, jolloin pisteen sijaintia tarkastellaan kameran näkökulmasta. Sisäiset parametrit taas kuvaavat muunnosta kamerakeskeisestä koordinaatistosta sensorin pikseleissä määritettyyn kuvatason koordinaatistoon. [8, s. 153-158]

Sisäiset parametrit ovat polttoväli  $f$ , kuvatason origon poikkeama pääpisteestä  $u_0, v_0$ , ja kerroin  $s$  joka kuvaa kamerasensorin pikselien sivunpituuksien suhdetta. Ulkoiset parametrit ovat rotaatio  $\mathbf{R}$  ja translaatio  $\mathbf{t}$ , jotka yhdessä kuvaavat kameran optisen keskipisteen sijainnin ja pääakselin suunnan suhteessa reaali maailman pisteisiin kuten kuvassa 2.1. [8, s. 153-158]



**Kuva 2.2** Kamerakeskeinen koordinaatisto ja sisäiset parametrit. [8, s.154]

Projektiio maailmakeskeisestä koordinaatistosta pikseliarvoiselle kuvatasolle voidaan matemaattisesti esittää kameran sisäisten ja ulkoisten parametrien avulla [10, 8, s.153-158]. Linearisissa neulanreikämallissa homogeenisissa koordinaatistoissa esitettyjen maailmakeskeisen pisteen  $\mathbf{X} = (X, Y, Z, 1)$  ja kuvatason pikseliarvoisen pisteen  $\mathbf{x} = (u, v, 1)$  suhdetta kuvaa

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ jossa } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Tässä 3x3 rotaatiomatriisi  $\mathbf{R}$ :n alkiot kuvaavat koordinaatistojen välisen orientaation, ja 3x1 translaatiovektori  $\mathbf{t}$  kuvaa koordinaatistojen origojen sijaintien eron.  $\mathbf{R}$

ja  $\mathbf{t}$  ovat aiemmin mainitut kameran ulkoiset parametrit. Kalibraatiomatriisi  $\mathbf{K}$ :n alkiot  $\alpha = m_x f$  ja  $\beta = m_y f$  skaalaavat kamerakeskeiset  $X$ - ja  $Y$ -koordinaatit pikseliarvoiseen kuvatasoon. Näissä  $f$  liittyy muunnokseen kamerakeskeisen ja metrisillä arvoilla ilmaistun kuvatason koordinaatiston välillä, ja  $m_x$  ja  $m_y$  muuntavat metrisillä arvoilla ilmaistun kuvatason koordinaatin pikseliarvoiseksi koordinaatiksi.  $u_0$  ja  $v_0$  ovat pikseliarvoiset kuvatason pääpisteen koordinaatit. Ne lisätään yhtälöön, koska pikseliarvoisen kuvatason koordinaatiston origo sijaitsee sen vasemmassa yläkulmassa. Parametri  $s$  kuvaa pikselin sivunpituuksien mahdollista epäsymmetriaa. [8, s. 153-158]

Yhtälö 2.2 voidaan [8, s.155-156] saattaa muotoon

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x & \frac{s}{f} & u_0 \\ 0 & m_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{jossa} \quad \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ja  $\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}$  on piste metrisessä kuvatason koordinaatistossa. Yhtälö 2.3 siis kuvaa kokonaisuudessaan projektion maailmakeskeisestä koordinaatistosta pikseliarvoiseen kuvatason koordinaatistoon ottamatta huomioon esimerkiksi linssistä johtuvia projektion epälineaarisuuksia.

Yhtälöä 2.3 voidaan laajentaa ottamaan huomioon linssivääristymät. Ne ovat kameran linssin ominaisuuksien aiheuttamia kuvan geometrian vääristymiä, joita voidaan mallintaa radiaali- ja tangentiaalivääristyminä kuvatasossa [10]. Radiaalivääristymä tarkoittaa pisteiden siirtymää todellisesta sijainnista akselin suunnassa, joka kulkee kuvatason pääpisteen ja kuvatason reunan välillä. Tangentiaalivääristymä tarkoittaa siirtymää tämän "säteen" normaalin suunnassa. Radiaalivääristymä voidaan esittää polynomina

$$\begin{bmatrix} \delta u^{(r)} \\ \delta v^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ \tilde{v}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

jossa  $k_1, k_2, \dots$  ovat radiaalivääristyskertoimia ja  $r = \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}$ . Yleensä yksi tai kaksi vääristyskerrointa tuottaa riittävän tarkan tuloksen. Erot kameran linssielementtien optisten keskipisteiden välillä aiheuttavat tangentiaalista vääristymää jota voidaan kuvata polynomilla

$$\begin{bmatrix} \delta u^{(t)} \\ \delta v^{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 \tilde{u} \tilde{v} + p_2 (r^2 + 2\tilde{u}^2) \\ p_1 (r^2 + 2\tilde{v}^2) + 2\tilde{u} \tilde{v} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

jossa  $p_1$  ja  $p_2$  ovat tangentialivääristyskertoimia. Kun vääristysmallit 2.4 ja 2.5 yhdistetään neulanreikäkameran malliin 2.3, saadaan korjattu neulanreikämalli

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x & \frac{s}{f} & u_0 \\ 0 & m_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} + \delta u^{(r)} + \delta u^{(t)} \\ \tilde{v} + \delta v^{(r)} + \delta v^{(t)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

joka kuvaa kamerakoordinaatiston pisteen kuvatasolle ottaen huomioon linssivääristymät. [10]

### 2.1.2 Kameran kalibrointi

Kameroiden perspektiivierojen lisäksi virhettä panoraamakuvanmuodostuksessa syntyy kameroiden linssivääristymistä, jotka johtuvat linssien epätäydellisyyksistä. Tarkan lopputuloksen saavuttamiseksi linssivääristymien epälineaariset vaikutukset pyritään poistamaan kuvista ennen varsinaisen perspektiivieron määrittystä. [11]

Tietylle kameralle on sopivaa kalibraatiojärjestelyä käyttäen mahdollista arvioida sisäisten parametrien ja linssivääristysparametrien arvot sekä kuvanottotilanteen ulkoiset parametrit. Linssivääristysparametreista johdetulla korjausmuunnoksella voidaan korjata vääristymien vaikutuksia myöhemmissäkin kuvanottotilanteissa, kuten ennen panoraamakuvan muodostamista käyttämällä perspektiivimuunnosta. Tätä neulanreikämallin mukaista kameran sisäisten, ulkoisten ja linssivääristysparametrien selvitystä kutsutaan kameran kalibroinniksi. [10]

Tavallisen neulanreikämallin parametrien ratkaisu on lineaarinen ongelma. Yksi siihen sopiva algoritmi on suora lineaaritransformaatio, DLT-algoritmi [8, s. 88-93]. Käytännössä kalibrointi toteutetaan ottamalla useita kuvia tunnetusta kalibraatiokuviosta, esimerkiksi shakkilautakuviosta. Shakkilautakuviosta tunnistetaan neliöiden kulmat, ja neulanreikämallin parametreille määritetään arvot, jotka minimoivat tunnistettujen pisteiden takaisinprojektion virheen. Takaisinprojektion virhettä arvioidaan projisoimalla tunnettu maailmakeskeisen koordinaatiston piste kuvatasolle käyttäen arvioituja kameraparametreja. Tätä projisoidun pisteen sijaintia kuvataason koordinaatistossa verrataan saman maailmakeskeisen koordinaatiston pisteen sijaintiin kalibraatiokuviosta otetussa kuvassa. Takaisinprojektion virhe on näiden kahden

pisteen etäisyys. Nollavirheellä kameraparametrit olisi määritetty niin tarkasti, että reaali maailman objektista otettu kuva ja objektin matemaattinen projektio kuvatasoon sijaitsisivat täsmälleen kohdakkain. [10]

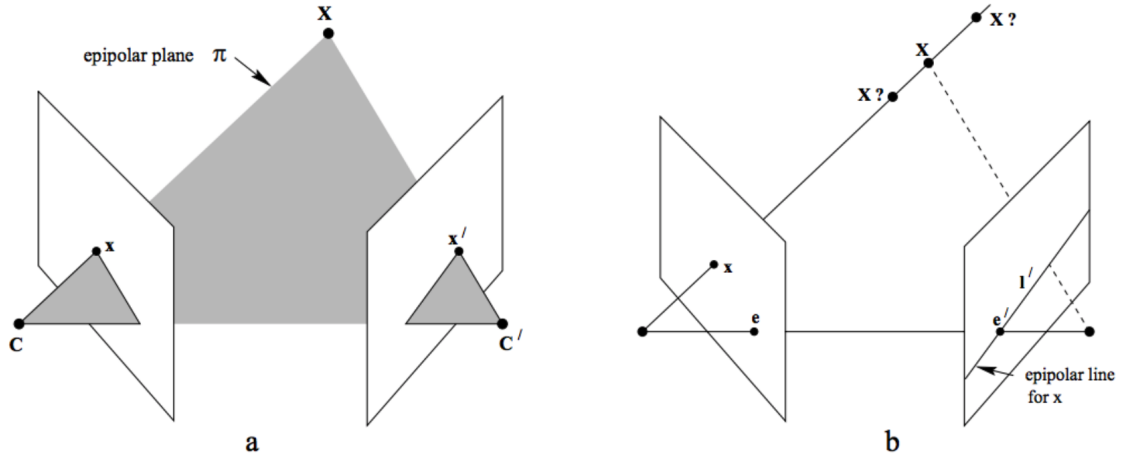
Jos linssivääristysparametrit otetaan huomioon kuten korjatussa neulanreikämallissa 2.6, ongelman ratkaisu muuttuu epälineaariseksi. Ratkaisu voidaan löytää minimoimalla kuvapisteen uudelleenprojektion neliövirhe linssivääristysparametrien suhteen esimerkiksi Levenberg-Marquardt –optimointimenetelmää [14] käyttäen. Levenberg-Marquardt tarvitsee kohtuullisen hyvän arvauksen optimoitavien parametrien lähtöarvoiksi, jota ilman se herkästi johtaa lokaaliin minimiin päätymiseen. Tyydyttävä arvaus on mahdollista tuottaa esimerkiksi arvioimalla parametrien lähtöarvot DLT-algoritmillä. [30]

## 2.2 Perspektiivimuunnokset

Kahden kameran näkökulmien välinen projektio geometria voidaan esittää käyttäen epipolaarigeometriaa [8, s.239-260], joka kuvaa kameroiden kuvaussuuntia ja sijaintia toistensa suhteen sekä kameroiden sisäisten parametrien eroa. Epipolaarigeometria kuvaa panoraamakuvien muodostuksessa tarvittavan perspektiivimuunnoksen yleisen tapauksen, josta voidaan johtaa käytännön menetelmiä kuvien perspektiivimuunnokseen. Käytännön menetelmät pohjautuvat homografiaksi kutsuttuun epipolaarigeometrian erikoistapaukseen [8, s.325-340], jossa projisoitavan pisteen syvyysinformaation puute jätetään huomioimatta. Syvyysinformaation puute johtaa epävarmuuteen homografiaan perustuvissa projektioissa. Epävarmuudesta aiheutuvaa projektion virhettä kutsutaan parallaksiksi [8, s.335-336].

### 2.2.1 Epipolaarigeometria

Epipolaarigeometria voidaan formalisoida fundamentaalimatriisiksi kutsutulla matriisilla  $\mathbf{F}$ , joka määrittää projektion yhden kameran kuvatasosta toiseen. Kuvatason koordinaatit ovat kaksiulotteisia, sillä neulanreikämallin projektio hävittää kuvanmuodostuksessa pisteisiin liittyvän syvyysinformaation. Tarkka kuvapisteen perspektiivimuunnos kuitenkin edellyttää, että kuvan pisteiden syvyys kameran pääakselin suunnassa on tiedossa. Puuttuvan syvyysinformaation vuoksi epipolaarigeometriassa tarkastellaan kameroiden pisteiden projektioita toisten kameroiden näkökulmien suoriksi ja kameroiden suorien projektioita toisten kameroiden näkökulmien tasoiksi. Tämä tarkoittaa, että  $\mathbf{F}$  on  $3 \times 3$ -matriisi, jonka aste on 2.  $\mathbf{F}$ :llä suoritettava muunnos ei määrittele tuloksen alkuperäisen kuvan syvyysinformaatiota vastaavaa



**Kuva 2.3**

a) Kameraiden optiset keskipisteet  $C$  ja  $C'$ , kuvatasot sekä reaali maailman piste  $X$  ja sen projektiot kuvatasoihin,  $x$  ja  $x'$  virittävät epipolaaritason.

b) Kuvapisteen  $x$  takaisinprojektiio  $C$ :n mukaan tuottaa säteen, jolla reaali maailman pisteen  $X$  on sijaittava. Säteen projektiio  $C'$ :n kuvatasolle on epipolaarisuora  $l'$ .  $e$  ja  $e'$  ovat kameraiden kuvatasoihin projisoidut kuvat toisen kameran optisesta keskipisteestä. [8, s.240]

ulottuvuutta tarkasti, vaan sen mahdolliset arvot ovat kahden määritellyn ulottuvuuden lineaarikombinaatioita. [8, s.239-260]

Kuva 2.3 esittää puuttuvan syvyysinformaation vaikutuksen fundamentaalimatriisilla suoritettavaan perspektiivimuunnokseen.  $C$ :n kuvatason pisteen pääakselin suuntaista etäisyyttä kuvatasosta ei tiedetä, joten  $x'$ :n, siis  $x$ :n projektion  $C'$ :n kuvatasolle, sijaintia epipolaarisuoralla  $l'$  ei ole määritelty. Epipolaarisuora  $l'$  on kuva säteestä, joka syntyy, kun  $x$  takaisinprojisoidaan reaali maailman kolmiavaruuteen  $C$ :n suhteen. Säte kuvaa kaikkia niitä pisteitä, joiden projektiio  $C$ :n kuvatasoon on  $x$ , ja kääntäen pisteen  $x$  reaali maailman vastineen on sijaittava säteen määrittämällä suoralla. Ominaisuuksien seurauksena fundamentaalimatriisi toteuttaa yhtälöt [8, s.243-245]

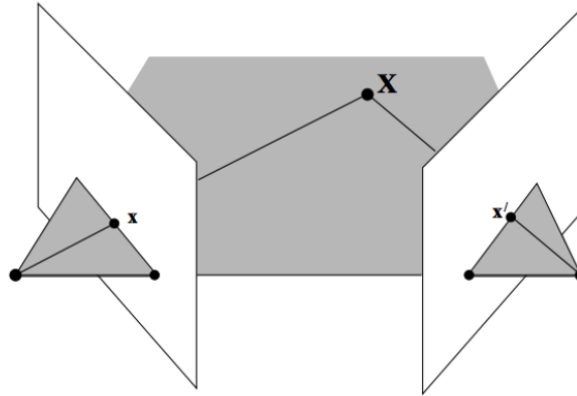
$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \quad (2.7)$$

ja

$$l' = \mathbf{F} \mathbf{x}. \quad (2.8)$$

Fundamentaalimatriisia käyttäen ei siis suoraan voida tehdä panoraamakuvan muodostuksessa tarvittavaa pisteet pisteiksi projisoivaa perspektiivimuunnosta.

Toisaalta, jos samasta näkymästä on kaksi tunnetuilla kameroilla eri perspektiiveistä otettua kuvaa, voidaan käyttää Structure-from-Motion -tekniikoita [18], joissa ku-

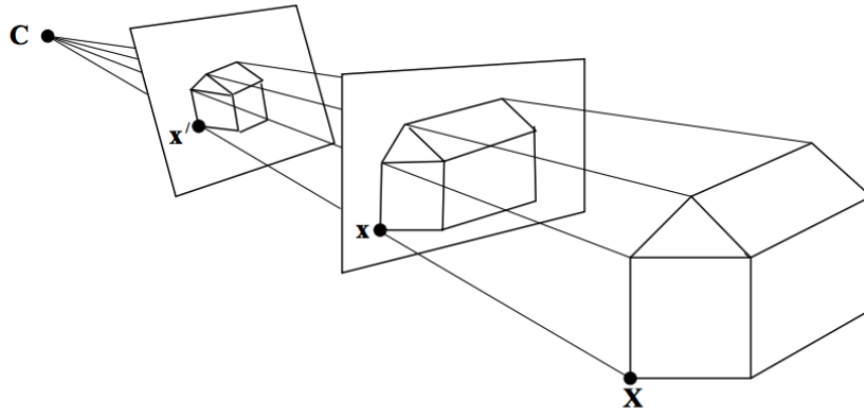


**Kuva 2.4** Piste  $X$  sijainti maailmakeskeisessä koordinaatistossa voidaan määrittää sen kuvien  $x$  ja  $x'$  takaisinprojektiosäteiden leikkauspisteestä. [8, s.263]

vatason pisteiden takaisinprojektiosäteiden leikkauspisteen perusteella määritetään kuvatason pisteiden reaali maailman koordinaatit. Kuva 2.4 havainnollistaa menetelmän perusajatusta. Kun kuvapisteen reaali maailman koordinaatit tunnetaan, voidaan kuvien näkymän kolmiulotteinen rakenne rekonstruoida. Kolmiulotteisen rakenteen perusteella voidaan tuottaa kuvia eri näkökulmista käyttämällä synteettistä perspektiiviä ja kameraa. Synteettinen perspektiivi voidaankin valita niin, että tuotetut kuvat muodostavat yhdistettäessä saumattoman panoraamakuvan. Kiinnostava SfM-tekniikoita soveltava tutkimuskohde on stereopanoraamakamerat, jossa kaikki reaali maailman pisteet kuvataan kahdesta näkökulmasta ja näin täydelliseen näkymän rekonstruktioon perustuva virtuaalikameralla kuvattu panoraama on mahdollinen [2], [22].

### 2.2.2 Homografia ja parallaksi

Edellisessä kappaleessa kuvatut SfM-tekniikat ovat laskennallisesti intensiivisiä ja tuottavat paljon dataa. Tästä syystä tutkimusta on kohdistettu erityisesti tilanteisiin, joissa panoraamakamerasysteemin yksittäisten kameroiden näkymien välinen leikkaus on pieni, ja suurin osa kamerasysteemin näkökentästä on vain yhden yksittäisen kameran näkymässä [7]. Tällöin yksittäisten kameroiden väliset perspektiivimuunnokset arvioidaan kameroiden näkymien leikkaavien alueiden kuvageometrioiden eroista. Perspektiivimuunnoksen arviointi perustuu planaarihomografian [8, s.325-340] konseptiin, joka on epipolaarigeometrian erikoistapaus. Ominaisuuksiensa perusteella homografiaa voidaan käyttää panoraamakuvan muodostuksessa tarvittavan perspektiivimuunnoksen suorittamiseen. Kahden kuvan lomittaisten alueiden perusteella voidaan arvioida kuvien välinen homografia, jota voidaan käyttää yhden kuvan muuntamiseen toisen kuvan perspektiiviin. Homografia on kahden tason vä-



**Kuva 2.5** Reaalimaailman piste  $\mathbf{X}$  projisoidaan  $\mathbf{C}$ :n suhteen. Sen kuvat kahdella tasolla,  $\mathbf{x}$  ja  $\mathbf{x}'$ , liittyvät toisiinsa homografiaksi kutsutun projekttiivisen suhteen mukaisesti. [8, s.203]

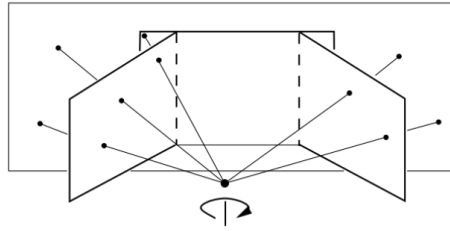
lille määritelty projekttiivinen suhde, joka projisoi pisteet yhdeltä tasolta pisteiksi toiselle tasolle. Vastaavasti homografiamatriisi on  $3 \times 3$ -matriisi  $\mathbf{H}$ , jonka aste on 3. Se projisoi pisteet pisteiksi, joten [8, s.32-33]

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x}. \quad (2.9)$$

Kuva 2.5 esittää homografian intuitiivisen geometrisen tulkinnan. Tilanteissa, joissa homografia on määritelty, projektio reaalimaailmasta yhden näkymän kuvatason sisältää kaiken informaation, joka tarvitaan saman näkymän tarkasteluun toisesta perspektiivistä. Tietoa kuvapisteisiin liittyvien reaalimaailman pisteiden sijainnista syvyys suunnassa ei siis tarvita projektion suorittamiseen. Kahden eri optisen keskipisteen  $\mathbf{C}$  ja  $\mathbf{C}'$  kameroiden kuvatason välillä pisteitä siirretään takaisinprojisoidalla kuvatason piste  $\mathbf{x}$  maailmakoordinaatiston tason  $\pi$  pisteeseen  $\mathbf{x}_\pi$ , ja projisoidalla tämä  $\mathbf{C}'$ :n kuvatason pisteeseen  $\mathbf{x}'$ . Projektio  $\mathbf{x}_\pi$ :ltä  $\mathbf{x}$ :lle ja  $\mathbf{x}'$ :lle noudattaa homografioita  $\mathbf{H}_{1\pi}$  ja  $\mathbf{H}_{2\pi}$  yhtälön 2.10 mukaisesti. Kuvatason välinen homografia  $\pi$ :n suhteen on [8, s.325]

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_{2\pi}\mathbf{H}_{1\pi}^{-1}\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{x}. \quad (2.10)$$

Aloitetaan homografian tekijöiden analysointi kahden kamerageometrian erikoistapauksen kautta. Näissä kuvien puuttuvasta syvyysinformaatiosta huolimatta pisteet pisteiksi projisoiva muunnos on mahdollinen. Ensimmäisessä tapauksessa [8, s.338-339] kameroiden optiset keskipisteet ovat samat, ja erot kameroiden näkymien välillä johtuvat ainoastaan kameroiden sisäisten parametrien ja kameroiden pääakselien



**Kuva 2.6** Kolmen kuvan lomittaisten alueiden perusteella arvioituja homografioita käyttäen voidaan oikea ja vasen kuva muuntaa keskimmäisen kuvan perspektiiviin, ja yhdistää tulos panoraamakuvaksi. [8, s.206]

suuntien  $\mathbf{R}$  eroista. Ero tämän ja optisten keskipisteiden traslaatiota sisältäneen epipolaarigeometrisen yleisen tapauksen välillä on, että kahdessa eri näkymässä samaa reaali maailman pistettä esittävien kuvatason pisteiden takaisinprojektiosäteet ovat yhdensuuntaisia. Reaali maailman koordinaatistossa tarkasteltuna säteet ovat täsmälleen samat, säteen virittävät pisteet eivät muutu. Tämä vastaa kuvan 2.5 tilannetta. Tässä tapauksessa homografian kahden eri näkymän kuvatason välille induoi  $\pi_{\text{inf}}$ , projektiivisen avaruuden äärettömyyden taso. Äärettömyyden taso on projektiivisen geometrian työkalu, jonka virittävät pisteet ja suorat jotka ovat avaruuden yhdensuuntaisten suorien ja tasojen leikkauksia [8, s.79-81].

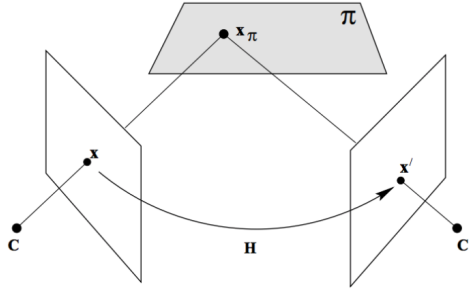
Koska kuvapisteen takaisinprojektiosäteet ovat yhdensuuntaisia, niiden leikkauspiste sijaitsee  $\pi_{\text{inf}}$ :llä, joka myös induoi kahden kuvapisteen välisen homografian. Indusointi  $\pi_{\text{inf}}$ :n kautta tarkoittaa, että homografia ei riipu näkymän reaali maailman 3D-rakenteesta, vaan se projisoi kuvatason pisteet oikein niiden reaali maailman vastineen pääakselin suuntaisesta sijainnista riippumatta. Tällaista homografi-aa kutsutaan äärettömäksi homografiaksi  $\mathbf{H}_{\text{inf}}$ . Koska  $\mathbf{H}_{\text{inf}}$  riippuu ainoastaan siihen liittyvien kameroiden sisäisistä parametreista ja keskinäisistä asennoista [8, s.339],

$$\mathbf{H}_{\text{inf}} = \mathbf{K}'\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}, \quad (2.11)$$

jossa  $\mathbf{K}'$  ja  $\mathbf{K}$  ovat kameroiden kalibraatiomatriisit ja  $\mathbf{R}$  on kameroiden välinen rotaatio. Käytännössä kyseessä on ääretön homografia, kun kamera on sijoitettu jalustalle ja sitä käännellään ottamaan kuvia eri suunnista. Näistä voidaan muodostaa panoraamakuva kuvan 2.6 mukaisesti. [8, s.338-339]

Toisessa kamerageometrian erikoistapauksessa [8, s.326-327] kaksi eri optisiin keskipisteisiin projisoivaa kameraa kuvaavat samaa kolmiulotteiselta rakenteeltaan tasomaista näkymää, kuten kuvassa 2.7. Kutsutaan kuvattavaa tasoa tasoksi  $\pi$ . Asetelma on identtinen kahden kameran epipolaarigeometrian yleisen tapauksen kanssa, mutta kuvattavan kohteen tasomainen rakenne mahdollistaa pisteet pisteiksi proj-





**Kuva 2.7** Taso  $\pi$   
indusoi pisteiden  $\mathbf{x}$  ja  $\mathbf{x}'$  välisen homografian  $\mathbf{H}$ . [8, s.325]

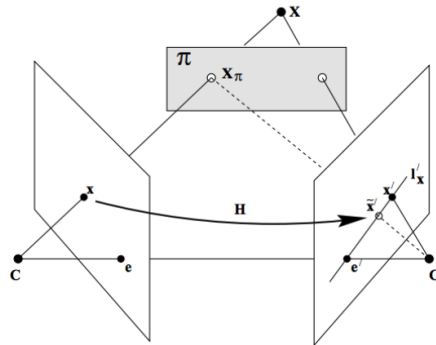
soivien operaatioiden käyttämisen pisteet suoriksi projisoivien operaatioiden sijaan. Kaksiulotteisen rakenteen oikeaan projisointiin ei tarvita tietoa etäisyydestä, jolla kohde kamerasta sijaitsee [8, s.326]. Toisin kuin äärettömän homografian tapauksessa näkymän kolmiulotteinen rakenne siis vaikuttaa näkymien väliseen perspektiivimuunnokseen. Merkitään kameran ulkoisten ja sisäisten parametrien yhdistelmää projektiomatriisilla  $\mathbf{P}$ . Kahden kameran, joiden projektiomatriisit ovat

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{I}|\mathbf{0}] \quad \text{ja} \quad \mathbf{P}' = \mathbf{K}'[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \quad (2.12)$$

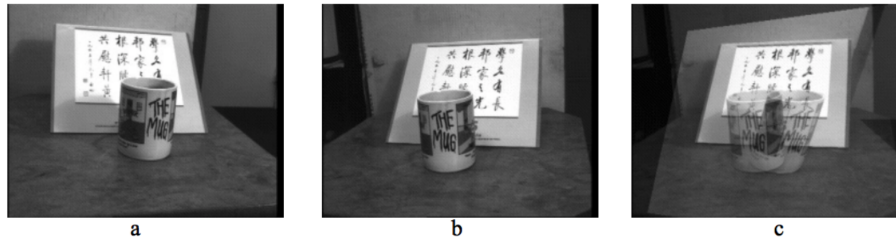
homografia tason  $\pi = (\mathbf{n}^T, d)^T$ , jossa  $\mathbf{n}$  parametrizoi maailmakoordinaatiston tason ja  $d$  on tason etäisyys kamerasta jonka pisteitä projisoidaan, suhteen on [8, s.326-327]

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}'(\mathbf{R} - \mathbf{t}\mathbf{n}^T/d)\mathbf{K}^{-1}. \quad (2.13)$$

Ainoa ero kaavojen 2.13:n ja 2.11:n välillä on termi  $\mathbf{t}\mathbf{n}^T/d$ , joka kompensoi optisten



**Kuva 2.8** Pisteiden  $\mathbf{x}$  projisointi  $\mathbf{C}'$ :lle  $\pi$ :n indusoiman homografian kautta tuottaa pisteen  $\tilde{\mathbf{x}}'$  joka sijaitsee parallaksin verran sivussa pisteen  $\mathbf{X}$  oikeasta kuvasta  $\mathbf{x}'$ . [8, s.335]



**Kuva 2.9** Kuvan a projisointi b:n perspektiiviin käyttäen kirjoitusta sisältävää alustaa homografian indusoivana tasona tuottaa tulos- ja b:n kuvat päällekkäin asettaessa kahvimukin pisteiden parallaksista johtuvan haamukuva-efektin. Tasolla sijaitsevat pisteet projisoituvat kuitenkin oikein. [8, s.336]

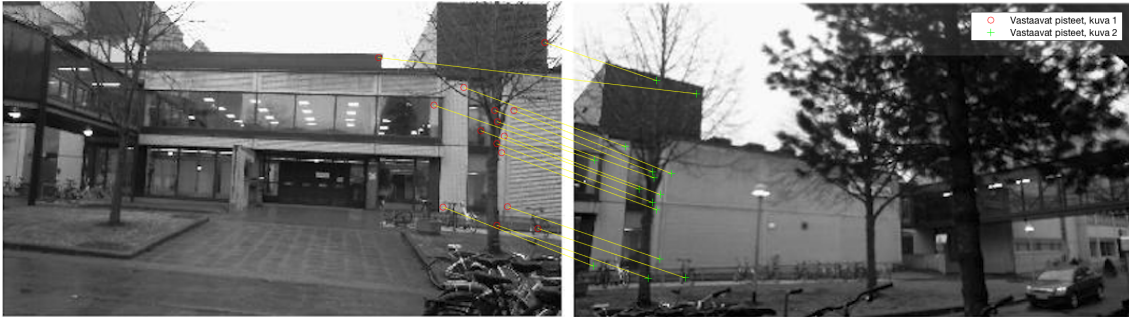
keskipisteiden välisen translaation vaikutusta projektioon. Kun kaikki kuvattavan kohteen pisteet sijaitsevat tasolla  $\pi$ , niiden projektio kuvatasolta toiselle onnistuu ilman syvyysinformaation puutteesta johtuvaa projektiovirhettä.

Jos kahden näkymän välinen homografia indusoidaan tason  $\pi$  kautta, homografia projisoi tällä tasolla sijaitsevat pisteet oikein, mutta pisteet, jotka eivät sisälly tasoon projisoidaan ohi niiden oikeasta sijainnista kuvatasolla kuvan 2.8 havainnollistamalla tavalla. Jos tässä tapauksessa kuvatason piste  $\mathbf{x}$  projisoidaan  $\mathbf{C}'$ :n kuvatasoon käyttämällä tason  $\pi$  indusoimaa homografiaa, huomataan, että koska reaali maailman piste  $\mathbf{X}$  ei sisälly tasoon  $\pi$ ,  $\mathbf{x}$  projisoidaan epipolaarilinjalle  $l'_x$  pisteeseen  $\tilde{\mathbf{x}}'$ , joka poikkeaa kuvatasoon  $\mathbf{C}'$ :n suhteen projisoidusta  $\mathbf{X}$ :än kuvasta  $\mathbf{x}'$ . Vektoria  $\rho \mathbf{x}'$ :stä  $\tilde{\mathbf{x}}'$ :ään kutsutaan pisteen  $\tilde{\mathbf{x}}'$  parallaksiksi  $\pi$ :n suhteen [8, s.335-336]. Panoraamakuvan muodostuksessa parallaksi havaitaan kuten kuvassa 2.9. Homografian indusoivan tason pisteet projisoituvat oikein, mutta pisteet, jotka eivät sijaitse tasolla, projisoituvat epipolaarisuoralle parallaksin verran oikeasta pisteestä ohi. Parallaksia sisältävien kuvien lomittain asettaminen johtaa siihen, että tuloksessa parallaksia sisältävät pisteet eivät sijaitse samassa kohdin niiden toisen kuvan vastineen kanssa. Ilmiön vaikutusta kutsutaan haamukuva-efekti ja siis kuvapisteen parallaksi homografian arviointiin käytetyn tason suhteen halutaan minimoida. [8, s.337]

## 2.3 Homografian arviointi kuvasta

Tarkastelemalla tietyn objektin geometriaa kahdessa eri näkökulmista otetussa kuvassa voidaan geometrioiden erojen perusteella määrittää näkymien välinen perspektiiviero ja tätä kuvaava homografia.

Jos tietylle objektille arvioidun homografian oletetaan pätevän koko kuvalle, voidaan sen perusteella suorittaa panoraamakuvanmuodostuksessa tarvittava perspektiivimuunnos. Käytännössä tämä siis tarkoittaa, että verrattavista kuvista pitää joko



***Kuva 2.10** Kahdesta kuvasta tunnistetut SURF-kiinnostuspisteet, jotka on niitä kuvaavien piirvektorien samankaltaisuuden perusteella määritelty samoiksi. Suurin osa vastaavuuksista on oikein määritetty, mutta osan pisteistä on arvioitu vastaavan toisessa kuvassa eri reaali maailman pistettä.*

käsin tai automatisoidusti määrittää samoja reaali maailman koordinaatiston pisteitä vastaavien kuvapisteen sijainteja. Panoraamakuvan tuottoa ajatellen pisteiden manuaalisesti suoritettu valinta ei ole tarkoituksenmukaista, joten kuvista siis pitää tunnistaa vastaavat pisteet ohjelmallisia menetelmiä käyttäen.

Tässä työssä päädyttiin tarkastelemaan piirreperusteista kuvien yhtensovittamista. Menetelmässä kuvasta lasketaan sen kiinnostavien pisteiden ympäristöä kuvaavia piirvektoreita, jotka ovat kahden kuvan välillä vertailukelpoisia. Piirteitä vertailemalla määritetään, mitkä niistä kuvaavat samoja reaali maailman pisteitä. Vastavuuksien perusteella voidaan määrittää kuvien näkymien välinen homografia, siis kuvien objektien geometrian muunnos, sekä alueet, jotka kuvissa pitää asettaa päällekkäin, jotta näin muodostetun panoraaman sauma olisi mahdollisimman huomioon otamaton. [8, s.123-127]

### 2.3.1 Kuvasta tunnistettavat piirteet

Paikallisiin piirteisiin perustuva vastaavien pisteiden ja alueiden määrittäminen kuvista jakautuu yleisesti kolmeen osaan. Ensimmäisessä vaiheessa kuvasta tunnistetaan halutunlaisten kiinnostuspisteiden kuten kulmien, reunojen tai läiskien sijainnit. Toisessa vaiheessa muodostetaan jokaiselle löydetylle kiinnostuspisteelle sen ympäristöä kuvaava piirvektori. Kolmannessa vaiheessa määritetään kuvien välillä samaa kiinnostuspistettä esittävät piirvektorit laskemalla niiden väliset etäisyydet jotakin etäisyysmetriikka käyttäen. Jos aiemmat vaiheet ovat onnistuneet, valitun metriikan mukaan samanlaiset piirvektorit voidaan olettaa samaa kiinnostuspistettä kuvaaviksi. Näin siis saadaan tunnistettua samat kiinnostuspisteet useasta kuvasta. Kuva 2.10 antaa esimerkin tunnistettavista kiinnostuspisteistä. [9]

Menetelmä tuottaa samankaltaisia piirteitä kahden eri ulkoisilla ja sisäisillä para-

metreilla toimivien kameroiden ottamissa kuvissa esiintyville samoille reaali maailman pisteille. Jos kahdesta eri kuvasta on tunnistettu samat pisteet, voidaan pisteiden muodostamien kuvioiden geometrista vääristymää arvioimalla selvittää kahden kameraselityksessä tilanteessa otettujen kuvien välinen perspektiivimuunnos. Jotta lopputulos olisi mahdollisimman tarkka, pitää kiinnostuspisteiden tunnistuksen olla toistettavaa. Eri kuvaustilanteissa otetuista samaa sisältöä esittävistä kuvista pitäisi tunnistaa samat kiinnostuspisteet riippumatta skaalauksen, sijainnin, valaistuksen ja näkökulman vaihteluista. Itse piirrevektorien pitää olla mahdollisimman invariantteja niiden kuvaamalla alueella esiintyvän kohinan sekä geometrinen ja fotomeristen vääristymien suhteen. Sovellettaessa menetelmää panoraamakuvien muodostukseen affiini-invariantti on erityisen tärkeää, sillä kuvista halutaan tunnistaa samat kiinnostuspisteet ja tuottaa niille samanlaiset piirrevektorit kameroiden eri näkökulmista huolimatta. [9]

### 2.3.2 Homografian määrittäminen

Kahden näkymän välinen homografia voidaan laskea kuvista neljän tunnistetun pistevastinparin perusteella esimerkiksi normalisoitua DLT-algoritmia käyttäen [8, s.87-109]. Jos vastinparit on tunnistettu oikein ja homografia, joka kuvaa näiden pisteiden muunnosta kuvasta toiseen, on validi myös muille kuvan osille, neljästä pisteestä laskettua homografiaa voidaan käyttää perspektiivimuunnoksen tekemiseen. Jos menetelmää sovelletaan kuvan 2.10 tilanteeseen, törmätään kahteen ongelmaan: kuvista on tunnistettu vastinpareja enemmän kuin neljä, eri vastinparit liittyvät eri syvyyksillä sijaitseviin objekteihin ja osa vastinpareista on virheellisesti määritettyjä. Kuvan 2.10 tapauksessa piirrevektorien samankaltaisuutta mitattiin niiden euklidiseen etäisyyteen perustuen kuten artikkelissa [4]. Kuvaparin perusteella on selvää, että piirteiden toisiinsa yhdistäminen saattaa epäonnistua. Tällöin kaksi reaali maailman eri pistettä on siis piirrevektorien perusteella virheellisesti tunnistettu samoiksi, tai samaa pistettä kuvaavia piirrevektoreita ei ole tunnistettu samaa pistettä kuvaaviksi.

Pisteistä pitäisi sopivan homografian määrittämiseksi valita ne, jotka vastaavat näkymän hallitsevaa syvyytensä sekä karsia virheelliset vastinparit. Homografian määrittäminen väärän tason mukaan aiheuttaisi panoraamakuvaan parallaxia, ja virheellisistä vastinpareista määritetty homografia yleisiä geometrisiä vääristymiä. Vakiintuneita menetelmiä virheellisten vastinparien karsintaan ovat RANdom SAMple Consensus (RANSAC), [1] ja sen modernit variantit [16].

Näissä perusajatus on seuraava: tunnistettujen pisteparien joukosta tehdään neljän parin satunnaisotos, jolle määritetään parien väliset suhteet kuvaava homografia

esimerkiksi DLT-algoritmia käyttäen. Tämän jälkeen tarkastellaan satunnaisotoksen ulkopuolelle jääneiden pisteparien homografiamuunnoksen jälkeistä uudelleenprojektiovirhettä. Tiettyä virhemarginaalia pienemmän virheen tuottavat pisteparit luokitellaan sisäpuolisiksi arvoiksi, ja ulkopuolelle jäävät ulkopuolisiksi arvoiksi. Tätä satunnaisotoksen homografian perusteella tehtyä jakoa sisä- ja ulkopuolisiin arvoihin toistetaan eri satunnaisotoksilla tietty määrä. Oikeiden pisteparien perusteella lasketuksi homografiaksi katsotaan se, joka tuottaa suurimman määrän sisäpuolisia arvoja. Lopullinen homografia määritetään käyttämällä koko sisäpuolisten arvojen joukkoa. Menetelmä karsii tehokkaasti sekä virheellisesti tunnistettuja pistepareja että pistepareja, jotka eivät sijaitse kuvan hallitsevalla syvyystasolla, olettaen että pistepareja on tunnistettu tasaisesti kuvan eri osista. [1]

### 3. MALLIN JOHTAMINEN JA MITTAUKSET

Kappaleessa 2.2.2 tutkitun homografian kamerageometriaan perustuvan esityksen pohjalta johdettiin parallaksin ja kamerageometrian suhdetta kuvaava malli. Mallin paikkaansapitävyyden testaamista varten kehitettiin panoraamakamerasysteemi, jolla mitattiin todellisuudessa kuvaan syntyvän parallaksin suuruuden riippuvuutta kamerageometriasta.

#### 3.1 Parallaksin ja kamerageometrian suhdetta kuvaavan mallin johtaminen

Tutkimuskirjallisuudessa on pääsääntöisesti käsitelty parallaksin suuruutta vain kappaleen 2.2.2 kahdessa kamerageometrian erikoistapauksessa [8, s.325-340], ja parallaksin suuruus näiden väliin jäävissä yleisissä tapauksissa jätetään täysin huomiotta. Joissain artikkeleissa myös yleisempiä tapauksia on käsitelty, mutta niissä matemaattiset esitystavat eivät ole olleet kamerageometriassa vakiintuneita, joten tämä rajoittaa niiden hyödyllisyyttä [13]. Näiden puutteiden korjaamiseksi seuraavaksi johdetaan tähän mennessä esitellyn teorian pohjalta parallaksin suuruutta eri kamerageometrioilla kuvaava malli.

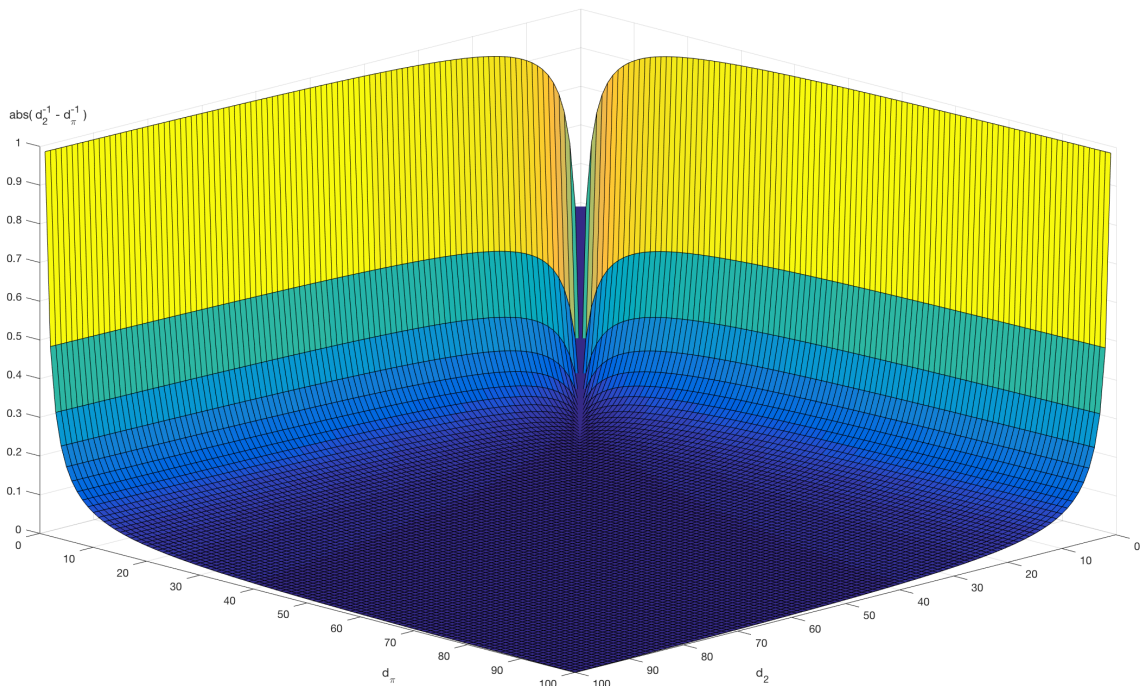
Tarkastellaan tilannetta, jossa kameran kuvatason piste  $\mathbf{x}$  projisoidaan toisen kameran kuvatasoon kahta eri homografiaa  $\mathbf{H}_\pi$  ja  $\mathbf{H}_2$  käyttäen niin, että  $\mathbf{H}_\pi$ :n indusoiva taso sisältää  $\mathbf{x}$ :n reaali maailman vastineen  $\mathbf{X}$  ja  $\mathbf{H}_2$ :n taso ei, kuten kuvassa 2.8.  $\mathbf{H}_\pi$  ja  $\mathbf{H}_2$  projisoivat  $\mathbf{x}$ :n toisen kameran kuvatasoon pisteiksi  $\mathbf{x}'_\pi$  ja  $\mathbf{x}'_2$ . Koska  $\mathbf{H}_\pi$ :n indusoiva taso sisältää  $\mathbf{X}$ :n,  $\mathbf{x}'_\pi$  vastaa kuvatason pistettä, johon toisen kameran optinen keskipiste projisoi  $\mathbf{X}$ :n kuvan, eli se on siis oikea projektio.  $\mathbf{x}'_2$  taas sijaitsee kuvatasossa  $\mathbf{x}$ :n takaisinprojektiosäteiden määrittämällä epipolaarisuoralla parallaksin määräämällä etäisyydellä  $\mathbf{x}'_\pi$ :stä. Parallaksi on siis pisteiden  $\mathbf{x}'_\pi$  ja  $\mathbf{x}'_2$  etäisyys epipolaarisuoralla, joka saadaan 2.13 mukaan

$$\Delta \mathbf{x}' = \mathbf{H}_\pi \mathbf{x} - \mathbf{H}_2 \mathbf{x} = \mathbf{K}' \mathbf{t} \left( \frac{\mathbf{n}_\pi^T}{d_\pi} - \frac{\mathbf{n}_2^T}{d_2} \right) \mathbf{x}. \quad (3.1)$$

$H_2$ :n indusoivan tason kautta suoritetun projektion parallaksi on siis suoraan verrannollinen kahden kameran keskipisteiden väliseen translaatioon  $\mathbf{t}$  sekä termin

$$D_{inv} = \frac{\mathbf{n}_\pi^T}{d_\pi} - \frac{\mathbf{n}_2^T}{d_2} \quad (3.2)$$

suuruuteen. Termin 3.2 arvo poikkeaa merkittävästi nollasta, kun vähintään toisen muuttujista  $d$  arvo on pieni, ja muuttujien arvot poikkeavat toisistaan. Kuvassa 3.1 esitetään graafisesti  $d_\pi$ :n ja  $d_2$ :n arvojen vaikutus termin 3.2 arvoon, kun tasojen parametrisoinnit  $\mathbf{n}$  oletetaan etäisyydestä  $d$  riippumattomiksi. Kalibraatiomatriisi  $\mathbf{K}'$  ei varsinaisesti vaikuta parallaksin suuruuteen [8, s.155], sillä sen tehtävä on projisoida ensimmäisen kameran optinen keskipiste (jota kuvaa  $\mathbf{t}$ ) toisen kameran kuvatasolle eli muodostaa epipooli.



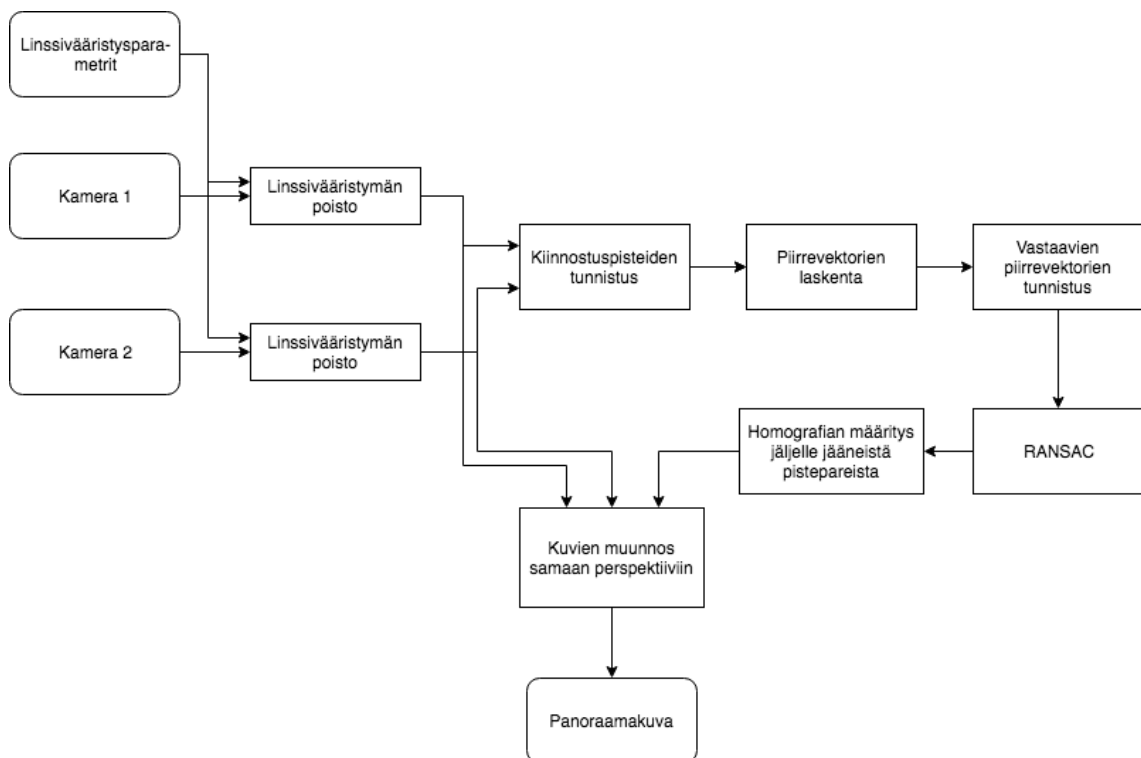
**Kuva 3.1** Termin ( 3.2 ) itseisarvo  $d_\pi$ :n ja  $d_2$ :n arvoilla  $[0,100]$ .

Nollaparallaksi saavutetaan, kun projisoitavaa kuvatason pistettä vastaava reaali-maailman piste sijaitsee homografian indusoivalla tasolla eli  $d_\pi = d_2$ , kun kumman-kin muuttujan  $d_\pi$  ja  $d_2$  arvo lähestyy äärettömyyttä tai kameroiden optisten keskipisteiden välinen translaatio on nolla. Kahdessa viimeisessä tapauksessa homografia palaa takaisin äärettömäksi homografiaksi  $\mathbf{H}_{inf}$ , jolloin äärettömyyden taso indusoi homografian [8, s.339]. Nämä tilanteet vastaavat kappaleessa 2.2.2 esiteltyjä kamera-geometrian erikoistapauksia, joita kirjallisuudessa on tyydytty käsittelemään. Tässä

johdettu malli kuitenkin kuvaa homografian suuruutta myös kaikilla erikoistapausten ulkopuolellekin jäävillä kamerageometrioilla, jolloin panoraamakuvaan syntyvä parallaksi poikkeaa nolasta.

## 3.2 Kamerajärjestelmän toteutus

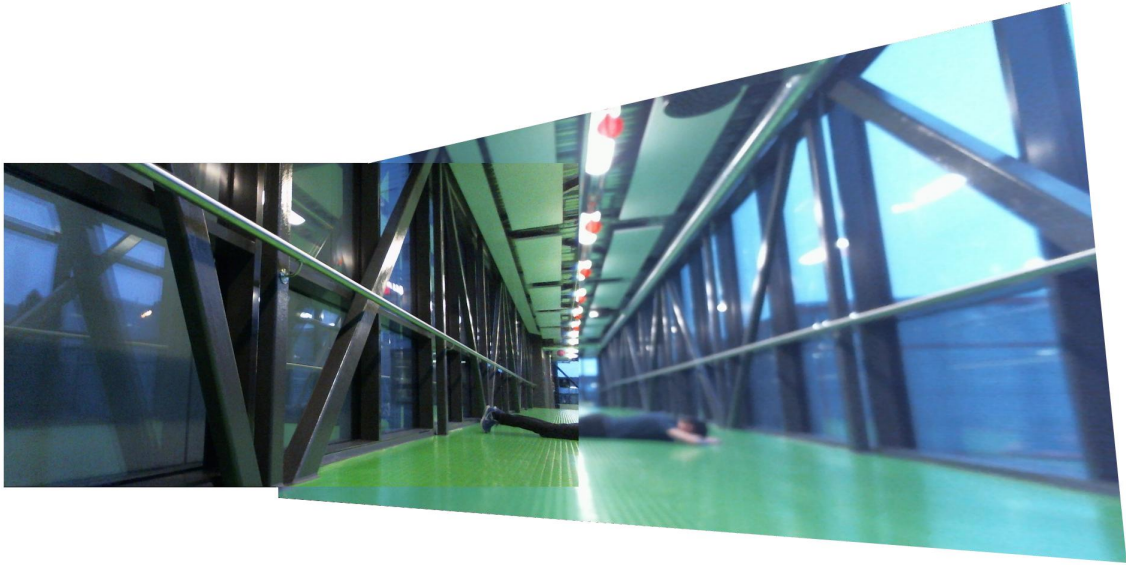
Panoraamakuvien laadun arvioimiseksi toteutettiin kahden kameras panoraamakamerajärjestelmä, jolla otettu esimerkkikuva esitetään kuvassa 3.3. Järjestelmä rakennettiin käyttäen usb-kameroita (Logitech HD Webcam C615, Logitech HD Webcam C525) sekä Matlab-ohjelmistoa [15] (versio 2016b). Kuva 3.2 esittää vuokaavion muodossa, kuinka kameroiden kuvat panoraamaksi yhdistävä Matlab-ohjelma toimii. Varsinainen ohjelmakoodi on esitetty liitteessä A.



*Kuva 3.2 Panoraamakuvanmuodostus algoritmi vuokaaviona esitettynä*

Järjestelmän rakentamiseen käytetyt usb-kamerat eivät olleet erityisen korkealaatuisia, joten niiden oletettiin tuottavan linssivääristymiä määrissä, jotka korjaamattomina vaikuttavat muodostetun panoraamakuvan laatuun. Vaikutusten minimoimiseksi kameroiden kuvat otettiin ennen varsinaista panoraamakuvan muodostusta Matlab-ohjelmiston Camera calibrator app -kirjaston [26] avulla määritettyjä linssivääristysparametreja käyttäen. Kalibraatiossa kummallakin kameralla otettiin 20 kuvaa paperille printatusta shakkiruudukosta. Kuvien perusteella ohjelma laski linssivääristysparametrit kummallekin kameralle.





*Kuva 3.3 Mittauksia varten rakennetulla panoraamakamerajärjestelmällä otettu esimerkkikuva.*

Tässä työssä päädyttiin käyttämään SURF-piirteitä. Ne ovat kuvien vastaavuuksien määrittämisen tarkkuuden sekä laskentanopeuden huomioon ottaen ongelmaan hyvin sopivia [4]. SURF-piirteiden laskenta on nopeaa, ja ne ovat skaalaus- ja rotaatioinvariantteja sekä osittain affiini-invariantteja. Panoraamakamerajärjestelmän yksittäisten kameroiden kuvien välillä suurimmat erot johtuvat kuvien eri skaaloista sekä kameroiden näkökulmien eroista eli pääakseleiden välisestä rotaatiosta. SURF-piirteet eivät ole täysin affiini-invariantteja, mutta pystyvät suorittamaan vastaavuuksien määrittämisen kuvien välillä noin  $80^\circ$  kuvien väliseen näkökulmaeroon asti [19]. Käytettyjen kameroiden näkökulmien laajuudet jäävät tämän alle, joten affiini-invarianssin puute olla ongelma. SURF-piirteet eivät ole täysin invariantteja myöskään värinvalintaan vaikuttavien fotometrinen vaihtelujen suhteen. Eri kameroiden välillä fotometriset ominaisuudet voivat vaihdella suuresti kameroiden välillä eroavista sensorivasteista ja kuvanmuodostusalgoritmeista johtuen. SURF-piirteiden fotometrinen invarianssia on mahdollista kasvattaa menetelmillä kuten LSAC-SURF [20]. Näitä ei kuitenkaan käsitellä tämän työn laajuudessa.

Piirrevektorien vastaavuuksien tunnistamiseen käytettiin vektorikomponentittain laskettua jäännöseliösummaa. Samaa pistettä kuvaavien vektorien jäännöseliösumman ylärajaksi määritettiin arvo 1.0.

Virheellisesti tunnistettujen vektorien karsintaan käytettiin RANSAC:in M-estimator Sample Consensus (MSAC) -varianttia [27]. Matlabin dokumentaatiosta ei käy ilmi varsinaiseen homografian määrittämiseen käytetty algoritmi (oletettavasti DLT tai muu vastaava).

### 3.3 Mittausjärjestely

Mittauksissa tutkittiin, miten kamerageometria vaikuttaa panoraamakuvaan syntyvän parallaksin suuruuteen. Ensimmäisessä mittaussarjassa tutkittiin kameroiden optisten keskipisteiden välisen etäisyyden vaikutusta parallaksin suuruuteen. Toisessa mittaussarjassa tutkittiin kuinka paljon kuvattavan kohteen eri osien kameran pääakselin suuntainen etäisyys vaikuttaa parallaksin suuruuteen. Parallaksin suuruuden arviointi päätettiin tehdä kuvattavaan näkymään asetetun mittaobjektin kohdalle kuvaan syntyvää epäjatkuvuutta mittaamalla. Myös algoritmillisia, automaattisia laadunmittaustapoja on mainittu tutkimuskirjallisuudessa [21], [6], mutta valmiina saatavia ratkaisuja ei ole. Automaattisen laadunmittauksen itse toteuttamisen päätettiin olevan liian työlästä kandidaattityössä.



**Kuva 3.4**

- a) Paperille printatuista shakkiruudukoista koostuva mittaobjekti  
 b) Mittausten kuvauskohde

Mittaobjektina parallaksin arvioinnissa käytettiin paperille tulostettua shakkiruutukuvia (kuva 3.4 a), jossa ruutujen sivunpituus oli 3,3cm. Kuvauskohdeena oli seinä (kuva 3.4 b), jolle kiinnitettiin julisteita ja muuta sisältöä lisätekstuurin tuomiseksi kiinnostuspisteiden tunnistukseen. Mittaobjekti aseteltiin kuvausalaan niin, että varsinainen kuvattava kohde eli seinä täytti kuvasta valtaosan ja mittaobjekti oli sivuroolissa. Näin luotiin tilanne, jossa homografia arvioitiin seinän perusteella, ja eri etäisyyksillä seinästä sijaitsevan mittaobjektin kohdalle panoraamakuvan muodostavien yksittäisten kuvien saumaan syntyi parallaksi. Parallaksin suuruus voitiin kvantifioida mittaamalla, kuinka monen shakkiruutuneliön epäjatkuvuus mittaobjektin shakkiruutukuvioon syntyi. Koska neliön koko on tunnettu, epäjatkuvuus ja näin parallaksin suuruus voidaan määrittää senttimetreissä. Parallaksin suuruudet mitattiin erikseen vaaka- ja pystysuunnissa. Epäjatkuvuus shakkiruuduissa mitattuna laskettiin kuvista ImageJ-ohjelmistoa [23] käyttäen.

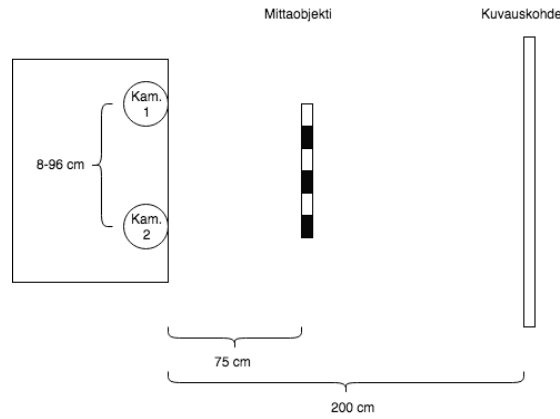
Metrisissä yksiköissä esitetty parallaxin suuruus ilmaisee parallaxin suuruuden reaali maailman koordinaatistossa. Olemme kuitenkin kiinnostuneita kameran kuvatasolla havaitun parallaxin suuruudesta, joten on huomioitava se, että saman kokoiset mutta eri etäisyyksillä kamerasta sijaitsevat esineet havaitaan kuvassa eri suuruisina. Tuloksen 2.2 mukaan [8, s.155] esineiden kuvatasossa havaittu koko on kääntäen verrannollinen niiden etäisyyteen kamerasta. Jotta mittaustuloksia voitaisiin verrata teoreettisiin tuloksiin 3.1, reaali maailman koordinaatistossa mitatut parallaxien suuruudet on siis muunnettava kameratasoissa havaittavia suuruuksia vastaaviksi. Tämä voidaan tehdä käyttäen kaavaa 2.1, joka esittää kuinka kuvattavan esineen suuruus kuvassa riippuu sen etäisyydestä kameraan. Muunnoksen  $f$ :n arvoksi valittiin  $10\frac{1}{m}$ , jota käyttäen mittaustulokset saadaan käytännölliseen suuruusluokkaan. Muunnos siis esittää parallaxin suuruuden simuloidun kameran kuvatason metrisessä koordinaatistossa. Koska alkuperäiset mittaukset on ilmoitettu senttimetreissä, se on myös muunnettujen arvojen yksikkö.

### 3.3.1 Optisten keskipisteiden etäisyys

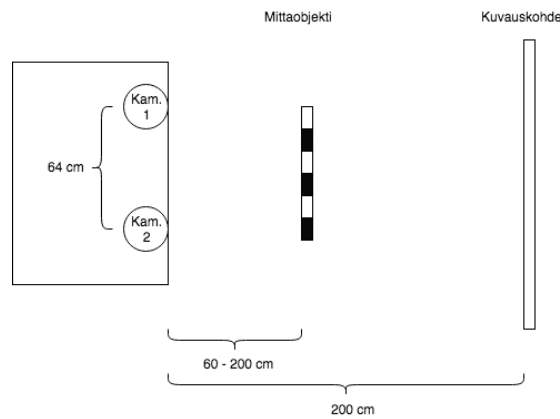
Kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutusta kuvaan syntyvän parallaxin suuruuteen tutkittiin toteuttamalla mittausjärjestely, jossa kaksi kameraa asetettiin pöydälle 200 cm etäisyydelle varsinaisesta kuvauskohteesta eli seinästä. Mittaobjekti parallaxin arviointia varten asetettiin kameroiden ja seinän väliin, 75 cm etäisyydelle kameroista. Kameroiden pääakselit olivat kohtisuorassa kuvauskohteeseen. Kohteesta otettiin 12 kuvaa, joissa kameran optisten keskipisteiden etäisyys vaihteli 8 cm välein välillä 8-96cm. Otetuista kuvista mitattiin mittaobjektin kohdalle muodostunut parallaxi. Kuva 3.5 a) havainnollistaa mittausjärjestelyn. Mittauksessa siis tutkittiin kaavan 3.1 termin  $t$  vaikutusta. Hypoteesi oli, että parallaxin suuruus riippuu tekijästä  $t$  lineaarisesti, joten mittaustuloksiin 4.1 sovitettiin yksinkertainen lineaarinen malli  $f(x) = ax$  käyttäen NumPy-kirjaston Linalg-pakettia [17].

### 3.3.2 Kuvauskohteen rakenne

Kuvattavan näkymän rakenteen vaikutusta kuvaan syntyvän parallaxin suuruuteen tutkittiin pääpiirteittäin samanlaisella järjestelyllä kuin optisten keskipisteiden vaikutusta selvittäessä. Kuva 3.5 b) havainnollistaa mittausjärjestelyn. Kamerat asetettiin kiinteälle etäisyydelle toisistaan niin, että niiden optisten keskipisteiden välinen etäisyys oli 64 cm. Testinäkömystä otettiin 7 kuvaa, joissa mittaobjektin etäisyyttä kameroista vaihdeltiin 60 ja 200 cm välillä 25 cm välein. Kuvauskohde, jonka tasosta



(a)



(b)

**Kuva 3.5**

- a) Optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksen mittausjärjestely  
 b) Kuvauskohteen tasomaisuuden vaikutuksen mittausjärjestely

panoraamanmuodostuksen homografia indusoituu, pidettiin kuitenkin kiinteällä 200 cm etäisyydellä kameroista. Näin voidaan määrittää, kuinka suuri vaikutus kuvatavan objektin etäisyydellä homografian indusoivasta tasosta on parallaksiin, joka syntyy objektin kuvan projektiossa kuvatasolta toiselle. Mittauksessa siis tutkitaan kaavan 3.1 termin 3.2 vaikutusta parallaksin suuruuteen. Mittaustuloksiin sovitettiin termin 3.2 mukainen malli

$$p_{kt}(d_2) = b \left| \frac{1}{200} - \frac{1}{d_2} \right|. \quad (3.3)$$

Tässä termin 3.2 parametrin  $d_\pi$  arvo asetettiin kuvauskohteen etäisyydeksi (200 cm) ja parametrin  $d_\pi$ :n arvoa vaihdeltiin mittaobjektin etäisyyden mukaisesti. Mallin parametri  $b$  on skaalauskerroin, joka sovitettiin mittausdataan pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen.

## 4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

Mittaustulokset kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksesta parallaxin suuruuteen on koottu taulukkoon 4.1. Mittaustulosten vaihteluvälit olivat pystysuuntaiselle parallaxille 0,3-1,7 cm (mitattu) ja 0,0-0,1 (muunnos). Vaakasuuntaiselle parallaxille vaihteluvälit olivat 6,2-61,1 cm (mitattu) ja 0,8-8,1 cm (muunnos).

Toisessa mittauksessa tutkittiin vaikutusta, joka mittaobjektin etäisyydellä homografian indusoivasta tasosta on parallaxin suuruuteen. Mittaustulokset on koottu taulukkoon 4.2. Mittaustulosten pystysuuntaisen parallaxin vaihteluvälit olivat 0,9-1,7 cm (mitattu) ja 0,0-0,2 cm (muunnos). Vaakasuuntaiselle parallaxille vaihteluvälit olivat 0,7-45,7 cm (mitattu) ja 0,0-7,6 cm (muunnos).

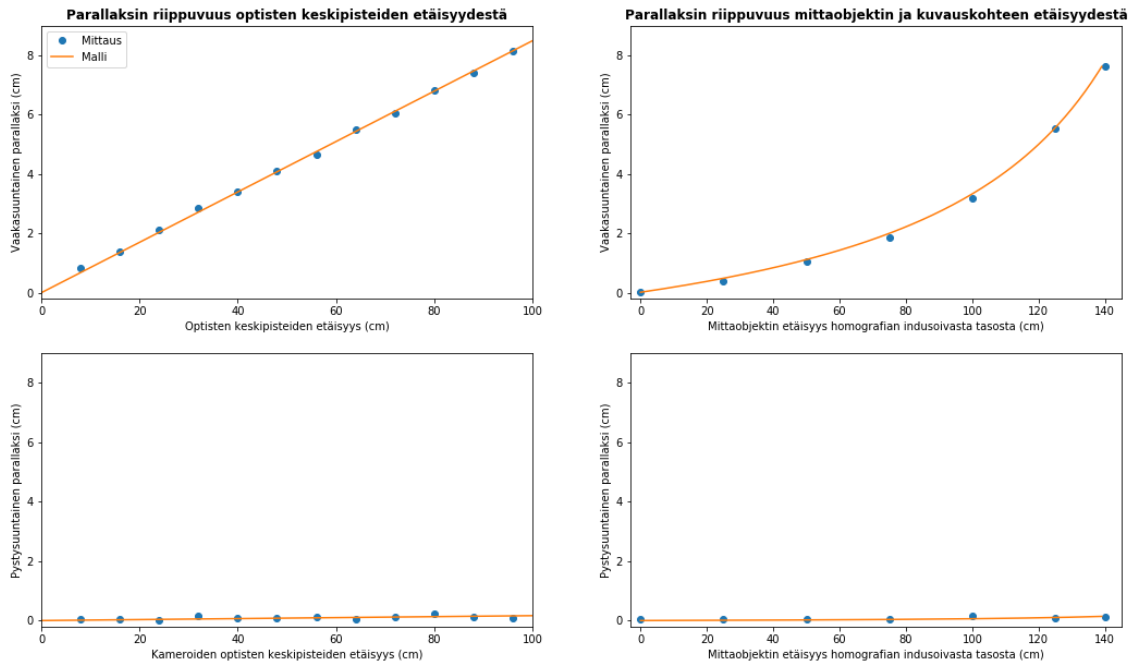
**Taulukko 4.1** Kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutus parallaxin suuruuteen. Sekä kuvasta mitatut arvot että näistä muunnoksella 2.1 saadut kuvatasoa vastaavat arvot on ilmaistu senttimetreissä.

Etäisyys (cm)		8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
Pystysuuntainen parallaxi (cm)	mitattu	0,3	0,3	0,0	1,1	0,6	0,7	1,0	0,4	0,9	1,7	0,8	0,6
	muunnos	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
Vaakasuuntainen parallaxi (cm)	mitattu	6,2	10,4	15,8	21,5	25,4	30,7	34,9	41,3	45,4	51,0	55,5	61,1
	muunnos	0,8	1,4	2,1	2,9	3,4	4,1	4,7	5,5	6,1	6,8	7,4	8,1

**Taulukko 4.2** Vaikutus, joka mittaobjektin etäisyydellä homografian indusoivasta tasosta on parallaxin suuruuteen. Sekä kuvasta mitatut arvot että näistä muunnoksella 2.1 saadut kuvatasoa vastaavat arvot on ilmaistu senttimetreissä.

Etäisyys (cm)		0	25	50	75	100	125	140
Pystysuuntainen parallaxi (cm)	mitattu	0,9	1,0	0,8	0,4	1,7	0,5	0,6
	muunnos	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0
Vaakasuuntainen parallaxi (cm)	mitattu	0,7	7,1	15,7	23,3	31,9	41,4	45,7
	muunnos	0,0	0,4	1,0	1,9	3,2	5,5	7,6

Mittaustulokset sekä niihin sovitettut mallit on visualisoitu kuvassa 4.1. Kuvaajista nähdään, että vaakasuuntainen parallaxi on vahvasti riippuvainen sekä kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyksistä että mittaobjektin etäisyydestä kuvauskohteeseen, eli siis kuvattavan kohteen tasomaisuudesta. Mallien sopivuudet mitattiin selitysasteella  $R^2$ . Tuloksista (taulukko 4.3) nähdään, että vaakasuuntaisen parallaxin riippuvuus kummastakin tutkitusta tekijästä on erittäin vahva, kuten  $R^2$ -arvot (kummassakin tapauksessa 0,999) osoittavat. Tämä tukee vahvasti kamerageometrian teorian pohjalta johdettua tulosta 3.1.



**Kuva 4.1** Kuvatasoon projisoitu mittausdata ja siihen sovitetut mallit visualisoituna. Vasemmalla puolella parallaksin riippuvuus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyksistä, oikealla parallaksin riippuvuus mittaobjektin ja kuvauskohteen etäisyydestä.

Sen sijaan pystysuuntainen parallaksi näyttää olevan kummastakin tekijästä riippumaton. Kuvatasossa mitattuna pystysuuntaisen parallaksin vaihteluvälin suuruus on kummassakin mittauksessa vain 0,2 cm luokkaa, joka on huomattavasti pienempi kuin vaakasuuuntaisen parallaksin 8 cm suuruinen vaihteluväli. Pystysuuntainen parallaksi ei näytä riippuvan mitatuista kamerageometrian tekijöistä. Tämä selittyy sillä, että kameroiden optisten keskipisteiden välinen etäisyysero on käytännössä kokonaan vaakasuuuntaista. Eri mittauspisteissä kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyksissä on ollut pystysuunnassa lähinnä pientä satunnaisvaihtelua. Vaikutus, joka mittaobjektin etäisyydellä kuvauskohteesta on pystysuuntaiseen parallaksiin, kumoutuu erittäin pienen pystysuuntaisen etäisyyseron seurauksena. Jos kameroiden pystysuuntainen etäisyys olisi suurempi, myös tässä suunnassa havaittaisiin parallaksia. Nyt pystysuuntaisessa parallaksissa havaitut erot johtuvat kuitenkin lähinnä mittauskohinasta. Mallien sopivuudet mittauksiin selitysasteella  $R^2$  mitattuna (taulukosta 4.3) ovat -0,33 (keskipisteiden etäisyys) ja -0,26 (kohteen tasomaisuus), joka tukee mittauskohinahypoteesia.

Mittaukset siis vahvistavat kappaleen 2.2.2 mallin sopivuuden parallaksin ennustamiseen panoraamakameran kamerageometrian pohjalta. Taulukon 4.3 selityksistä nähdään, että mittauksissa syntyneet virheet ovat erittäin pieniä. Parallaksin suuruuden määrittäminen kuvasta toteutettiin manuaalisesti, ja mittaukseen käytettyjen shakkiruutujen reunojen sijainnit piti valita kuvista käsin. Tämä on po-

**Taulukko 4.3** Mallien sopivuus selityksasteen avulla ilmaistuna

Sovitettava mittaus	Parallaksin suunta	$R^2$
Keskipisteiden etäisyys	pysty	-0,329
	vaaka	0,999
Mittaobjektin etäisyys kuvauskohteesta	pysty	-0,260
	vaaka	0,999

tentiaalinen virhelähde, mutta tulosten toistettavuus osoittaa, että mittausvirhe on erittäin pieni. Optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksen mittauksen ja mitaobjektin etäisyyden vaikutuksen mittauksen välillä oli yksi mittauspiste, jossa kamerageometrian tekijät olivat samat. Kameroiden optisten keskipisteiden etäisyydet toisistaan olivat kummassakin 64 cm, ja mitaobjektin etäisyys kuvauskohteesta oli kummassakin 125 cm. Optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksen mittauksessa parallaksin suuruudeksi saatiin näillä arvoilla 41,3 cm, ja mitaobjektin etäisyyden vaikutuksen mittauksessa 41,4 cm. Ero kahden mittauksen välillä on siis vain 0,1 cm, joten suuret mittausvirheet ovat tämänkin perusteella erittäin epätodennäköisiä. Tämän vuoksi mittauksia ei nähty tarpeelliseksi toistaa useampaan kertaan.

## 5. YHTEENVETO

Työssä tehtiin laaja katsaus olemassaolevaan panoraamakuvanmuodostuksen teoriaan. Teorian pohjalta johdettiin uusi, kamerageometrian ja panoraamakuvaan muodostuvan parallaksin suhdetta kuvaava malli. Mallin paikkaansapitävyys varmistettiin empiirisin mittauksin. Mallin havaittiin selittävän mittaustulokset selitysasteella 0,999.

Suoritettut mittaukset siis vahvistavat teoreettisesta tuloksesta 3.1 johdetut hypoteesit kamerageometrian vaikutuksesta panoraamakuvan laatuun. Näiden pohjalta voidaan siis johtaa konkreettisia suuntaviivoja panoraamakamerasysteemien suunnitteluun. Kameroiden optiset keskipisteet kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle toisiaan, jolloin kuvattavan kohteen rakenne ei vaikuta kuvanlaatuun. Jos tämä ei syystä tai toisesta ole mahdollista, kamerasysteemin etäisyys kuvauskohteesta kannattaa asettaa suureksi suhteessa optisten keskipisteiden väliseen etäisyyteen. Kamerasysteemin etäisyyden ja kuvauskohteen välisen etäisyyden vaikutus korostuu varsinkin, jos kuvauskohteen rakenteessa esiintyy huomattavaa kamerasysteemin pääakselin suuntaista vaihtelua. Jos kuvauskohteen rakenne voidaan katsoa pääakseliin nähden kohtisuoraksi tasoksi, kameroiden keskipisteiden etäisyydellä toisistaan tai kuvauskohteesta ei ole suurta merkitystä.

Tutkimuksen tulokset keskittyvät suhteellisen yksinkertaisten kameramallien ja panoraamakuvanmuodostusalgoritmien analysointiin. Tulevaisuudessa kiinnostava tutkimuskohde on kuvanmuodostusalgoritmit, jotka hyödyntävät eri homografioita yhdistettävien kuvien eri osissa. Tällaisissa tilanteissa tässä tutkimuksessa havaittu kamerageometrian ja parallaksin suuruuden yhteys ei enää päde ainakaan yhtä suoraviivaisesti. Tutkimuksen päätelmät liittyvät kuitenkin perustavanlaatuisella tavalla kamerageometrian ja panoraamakuvanmuodostuksen teoriaan, ja niitä voidaan hyödyntää mitä tahansa edistyneempääkin kuvanmuodostusalgoritmia analyoitaessa. Ne ovat siis arvokasta tietoa, vaikka koskevatkin jo suhteellisen hyvin läpikäytyä sovellusaluetta.



## LÄHTEET

- [1] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381–395, 06 1981.
- [2] A. Agarwala, M. Agrawala, M. Cohen, D. Salesin, and R. Szeliski, “Photographing long scenes with multi-viewpoint panoramas,” in *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, ser. SIGGRAPH '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 853–861. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1179352.1141966>
- [3] S. Baker and S. K. Nayar, “A theory of single-viewpoint catadioptric image formation,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 35, no. 2, pp. 175–196, Nov 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1023/A:1008128724364>
- [4] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, “Speeded-up robust features (surf),” *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 110, no. 3, pp. 346–359, June 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
- [5] M. Brown and D. G. Lowe, “Automatic panoramic image stitching using invariant features,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 74, no. 1, pp. 59–73, Aug 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11263-006-0002-3>
- [6] G. Cheung, L. Yang, Z. Tan, and Z. Huang, “A content-aware metric for stitched panoramic image quality assessment,” in *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, Oct 2017, pp. 2487–2494.
- [7] K. Choi and K. Jun, “Real-time panorama video system using networked multiple cameras,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 64, pp. 110 – 121, 2016, real-Time Signal Processing in Embedded Systems. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762115001496>
- [8] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003.
- [9] M. Hassaballah, A. A. Abdelmgeid, and H. A. Alshazly, *Image Features Detection, Description and Matching*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 11–45. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28854-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28854-3_2)

- [10] J. Heikkila and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” in *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun 1997, pp. 1106–1112.
- [11] M.-H. Ju and H.-B. Kang, “Stitching images with arbitrary lens distortions,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, no. 1, p. 2, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/57160>
- [12] M. Klapczynski. (2004) Chicago downtown panorama. [accessed 29.04.2019]. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chicago\\_Downtown\\_Panorama.jpg?uselang=fi](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chicago_Downtown_Panorama.jpg?uselang=fi)
- [13] Y. Li, H.-Y. Shum, C.-K. Tang, and R. Szeliski, “Stereo reconstruction from multiperspective panoramas,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 45–62, Feb. 2004.
- [14] D. Marquardt, “An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1137/0111030>
- [15] MATLAB, *version 9.1.0 (R2016b)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2016.
- [16] R. Myllymäki, “A comparative study of robust RANSAC techniques,” *International Journal of Statistics and Analysis*, vol. 2, pp. 227–232, 05 2012.
- [17] T. Oliphant, “NumPy: A guide to NumPy,” USA: Trelgol Publishing, 2006–, [accessed 29.04.2019]. [Online]. Available: <http://www.numpy.org/>
- [18] O. Özyesil, V. Voroninski, R. Basri, and A. Singer, “A survey on structure from motion,” *CoRR*, vol. abs/1701.08493, 2017. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1701.08493>
- [19] Y. Pang, W. Li, Y. Yuan, and J. Pan, “Fully affine invariant surf for image matching,” *Neurocomputing*, vol. 85, no. Supplement C, pp. 6 – 10, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231211006977>
- [20] M. R. Petry, A. P. Moreira, and L. P. Reisinst, *Increasing Illumination Invariance of SURF Feature Detector through Color Constancy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 259–270. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40669-0\\_23](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40669-0_23)

- [21] H. S. Qureshi, M. M. Khan, R. Hafiz, Y. Cho, and J. Cha, “Quantitative quality assessment of stitched panoramic images,” *IET Image Processing*, vol. 6, no. 9, pp. 1348–1358, December 2012.
- [22] C. Richardt, Y. Pritch, H. Zimmer, and A. Sorkine-Hornung, “Megastereo: Constructing high-resolution stereo panoramas,” in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2013, pp. 1256–1263. [Online]. Available: <http://richardt.name/megastereo/>
- [23] C. A. Schneider, W. S. Rasband, and K. W. Eliceiri, “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis,” *Nat Meth*, vol. 9, no. 7, pp. 671–675, July 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- [24] M. Schönbein, *Omnidirectional Stereo Vision for Autonomous Vehicles*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2014, vol. 032.
- [25] R. Swaminathan, S. K. Nayar, and M. Grossberg, “Designing mirrors for catadioptric systems that minimize image errors,” *Proceedings of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS)*, Jan. 2004.
- [26] I. The MathWorks, “Matlab and computer vision toolbox release 2016b,” <https://se.mathworks.com/help/vision/camera-calibration.html>, Mar. 2016.
- [27] P. H. S. Torr and A. Zisserman, “MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 78, pp. 138–156, 2000.
- [28] Y. Yagi, “Omnidirectional sensing and its applications,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E82-D, Mar. 1999.
- [29] F. Zhang and F. Liu, “Parallax-tolerant image stitching,” in *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, ser. CVPR ’14. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2014, pp. 3262–3269. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.423>
- [30] Z. Zhang, “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations,” in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 1, Sep. 1999, pp. 666–673 vol.1.

# A. PANORAAMAKUVAN YKSITTÄISISTÄ KUVISTA MUODOSTAVA MATLAB-OHJELMA

Liite A esittää panoraamakuvanmuodostuksen toteuttavan Matlab-ohjelmakoodin.

```
clear

im_name = '200cm.png';
im_savedir = '/Users/Lauri/Documents/Kandi/Mittaukset/planedist/';

load('/Users/Lauri/Documents/MATLAB/Kandi/cameraParams.mat');
load('/Users/Lauri/Documents/MATLAB/Kandi/cameraParamsvasen.mat');

cam1 = videoinput('macvideo', 1, 'YCbCr422_1920x1080');
src1 = getselectedsource(cam1);
cam1.FramesPerTrigger = 1;
cam1.ReturnedColorspace = 'rgb';

cam2 = videoinput('macvideo', 2, 'YCbCr422_1920x1080');
src2 = getselectedsource(cam2);
cam2.FramesPerTrigger = 1;
cam2.ReturnedColorspace = 'rgb';

set(cam1, 'FramesPerTrigger', 1); set(cam2, 'FramesPerTrigger', 1);
set(cam1, 'FrameGrabInterval', 2); set(cam2, 'FrameGrabInterval', 2);

start(cam1); start(cam2);

pause(3.5)

n=1;
r=true;
while cam1.FramesAvailable
    [framesrgb timeStamp] = getdata(cam1,1);
    [frames2rgb timeStamp2] = getdata(cam2,1);

    [framesrgb, ~] = undistortImage(framesrgb, cameraParams);
    [frames2rgb, ~] = undistortImage(frames2rgb, cameraParamsvasen);

    if n==1
        frames=rgb2gray(framesrgb);
        frames2=rgb2gray(frames2rgb);

        'features'
        tfeatures = tic;
        points1 = detectSURFFeatures(frames);
        points2 = detectSURFFeatures(frames2);

        [f1,vpts1] = extractFeatures(frames,points1);
        [f2,vpts2] = extractFeatures(frames2,points2);

        toc(tfeatures)
        'ransac'
        transac = tic;
        indexPairs = matchFeatures(f1,f2);

        toc(transac)

        matchedPoints1 = vpts1(indexPairs(:,1));
        matchedPoints2 = vpts2(indexPairs(:,2));
```

```

tforms(2) = projective2d(eye(3));
'estimate transform'
ttransform = tic;
tforms(1) = estimateGeometricTransform(matchedPoints1, matchedPoints2,...
    'projective', 'Confidence', 99.9, 'MaxNumTrials', 2000, 'MaxDistance', 100);
toc(ttransform)

tforms(1).T=tforms(1).T*tforms(2).T;
tforms(1)=tforms(1).T;

imageSize = size(frames); % all the images are the same size

% Compute the output limits for each transform
for i=1:2
    [xlim(i,:), ylim(i,:)] = outputLimits(tforms(i), [1 imageSize(2)], ...
        [1 imageSize(1)]);
end

% Find the minimum and maximum output limits
xMin = min([1; xlim(:)]);
xMax = max([imageSize(2); xlim(:)]);

yMin = min([1; ylim(:)]);
yMax = max([imageSize(1); ylim(:)]);

% Width and height of panorama.
width = round(xMax - xMin);
height = round(yMax - yMin);

% Initialize the "empty" panorama.
panorama = zeros([height width 3], 'like', frames);

blender = vision.AlphaBlender('Operation', 'Binary mask', ...
    'MaskSource', 'Input port');

% Create a 2-D spatial reference object defining the size of the panorama.
xLimits = [xMin xMax];
yLimits = [yMin yMax];
panoramaView = imref2d([height width], xLimits, yLimits);
end

panorama = zeros([height width 3], 'like', frames(:,:,1));

% Create the panorama.
images(:,:,1) = framesrgb;
images(:,:,2) = frames2rgb;

tpano = tic;
for i= 1:2
    I = images(:,:,i);

    % Transform I into the panorama.
    warpedImage = imwarp(I, tforms(i), 'OutputView', panoramaView);

    % Generate a binary mask.
    mask = imwarp(true(size(I,1),size(I,2)), tforms(i), 'OutputView',...
        panoramaView);

    % Overlay the warpedImage onto the panorama.
    panorama = step(blender, panorama, warpedImage, mask);
    %imshow(panorama);

```

```
end
toc(tpano)

tulokuva(:,:,n)=panorama;
n=n+1;
r=false;
end

stop(cam1);stop(cam2);
delete(cam1);delete(cam2);

for i=1:size(tulokuva,4)
    imshow(tulokuva(:,:,i));
    pause(0.025)
end

imwrite(tulokuva(:,:,1), [im_savedir im_name])
```

## B. ESIMERKKEJÄ PARALLAKSIN MITTAUSTA VARTEN OTETUISTA KUVISTA

Liite B esittää esimerkkejä parallaxin suuruuden mittauksia varten otetuista kuvista.



*Kuva B.1 Mittaus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksesta parallaxin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 8 cm, mittaobjektin etäisyys 75 cm.*



*Kuva B.2 Mittaus kameroiden optisten keskipisteiden etäisyyden vaikutuksesta parallaksin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 96 cm, mittaobjektin etäisyys 75 cm.*



*Kuva B.3 Mittaus kuvattavan näkymän rakenteen vaikutuksesta kuvaan syntyvän parallaksin suuruuteen. Optisten keskipisteiden etäisyys 64 cm, mittaobjektin etäisyys 150 cm.*