2. Omnidirekcionális kamera

Kató Zoltán

Képfeldolgozás és Számítógépes Grafika tanszék
SZTE
(http://www.inf.u-szeged.hu/~kato/teaching/)

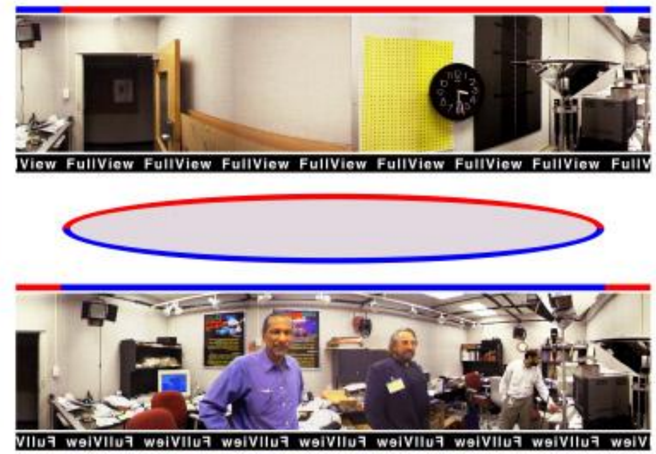
Omnidirekcionális kamerák típusai

- Omnidirekcionális, körbelátó, panoramikus kamerák
  - Nagy látószögű leképezés
  - Dioptrikus (csak optika) → halszemoptika
  - Katadioptrikus (tükör+ optika)
- Lehet középpontos, de nem feltétlenül az (konstrukció függő)

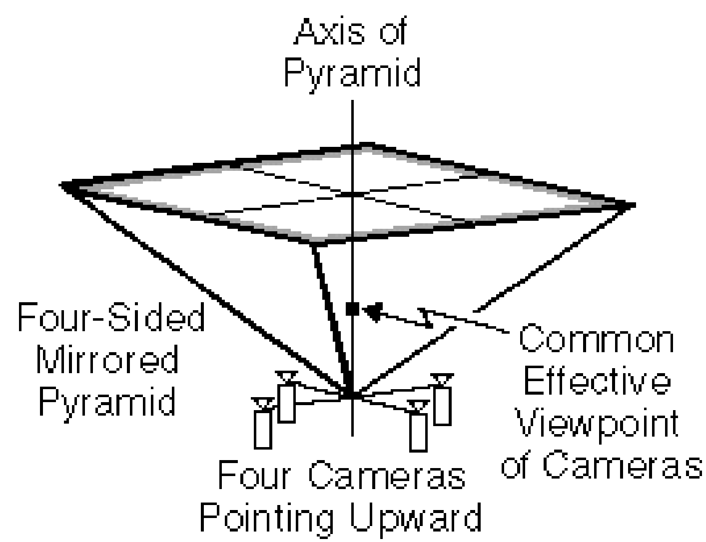
Több kamera síktükrökkel

Tükör piramis

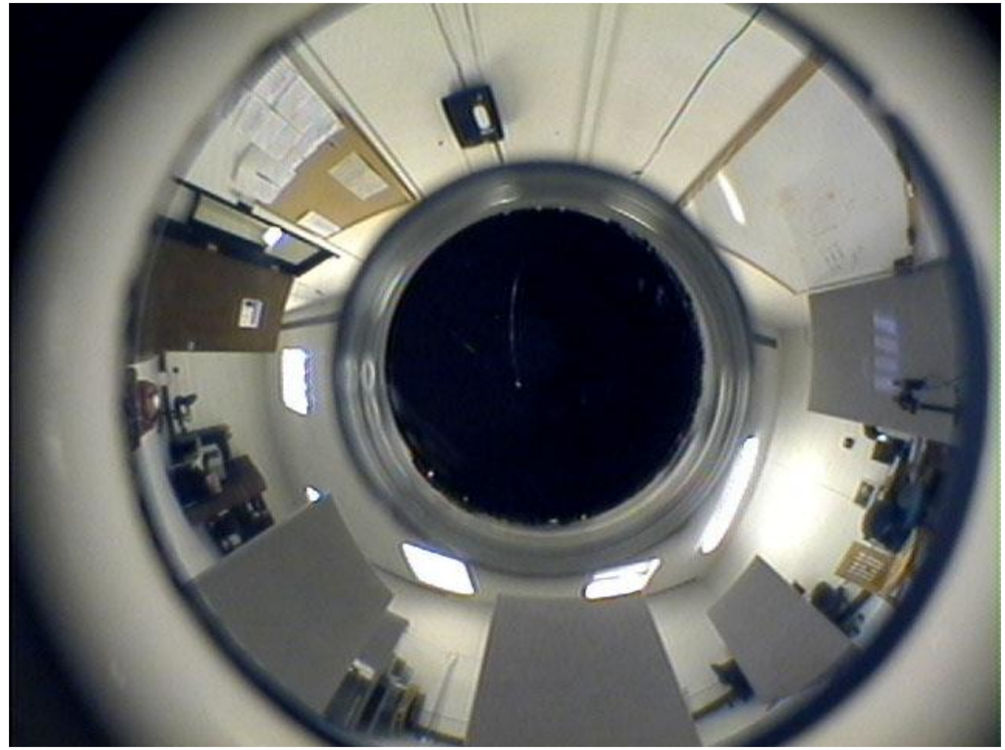
6 kamera



- **4-6 kamera+tükör rendszer**
  - **Nagy felbontás (kamera függő)**
  - **Közös vetítési középpont**
  - FullView - Lucent Technology http://www.fullview.com/



PAL optika



- **Panoramikus gyűrű optika**
  - **Greguss Pál (BME, SZTE)**
  - **Horizontálisan 360^{o} , vertikálisan +/- 15^{o}**
  - **Centrális vetítés**
  - **Panoráma egyetlen képen (nem egyenletes felbontás)**

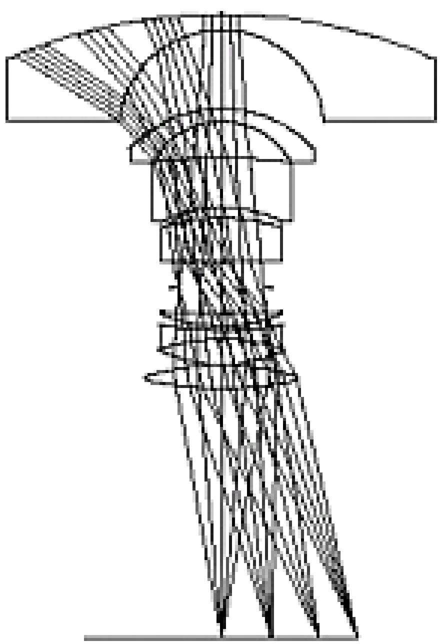
Hiberbolikus/szferikus tükör + kamera

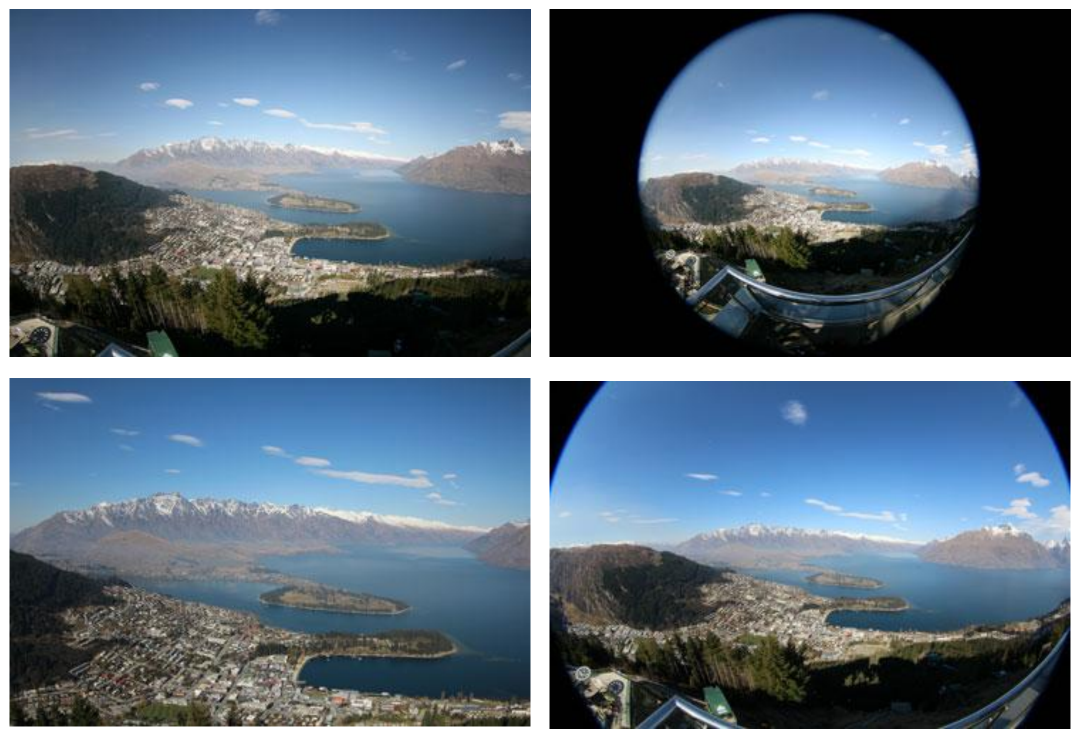
- ACCOWLE Co., LTD, A Spin-off at Kyoto University
  - http://www.accowle.com/english/
- Szferikus tükör
- Hiperbolikus tükör

Változó felbontású

Halszem optika

- **Canon EF 8-15mm Fisheye**
  - **180°-os látószög**
  - **Fókusztávolság a szenzorra vetített kép méretét szabályozza**
  - **A kép lehet teljesen kitöltött (ekkor nem látszik minden irányban 180°), vagy a teljes látótér a kép közepére vetített körben**





Full frame

APS-C (EOS 50D)

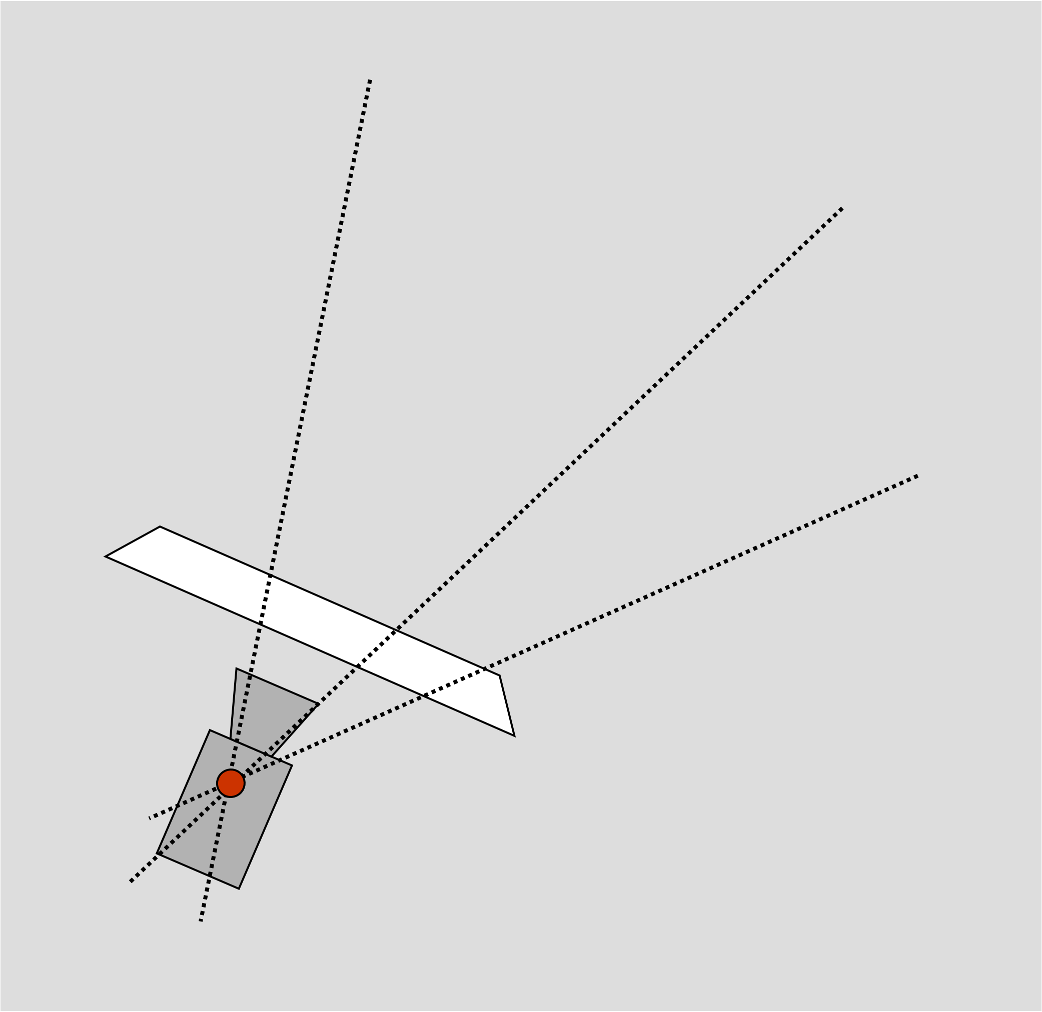
8-15mm @15mm

8-15mm @ 8mm

KAMERA GEOMETRIA

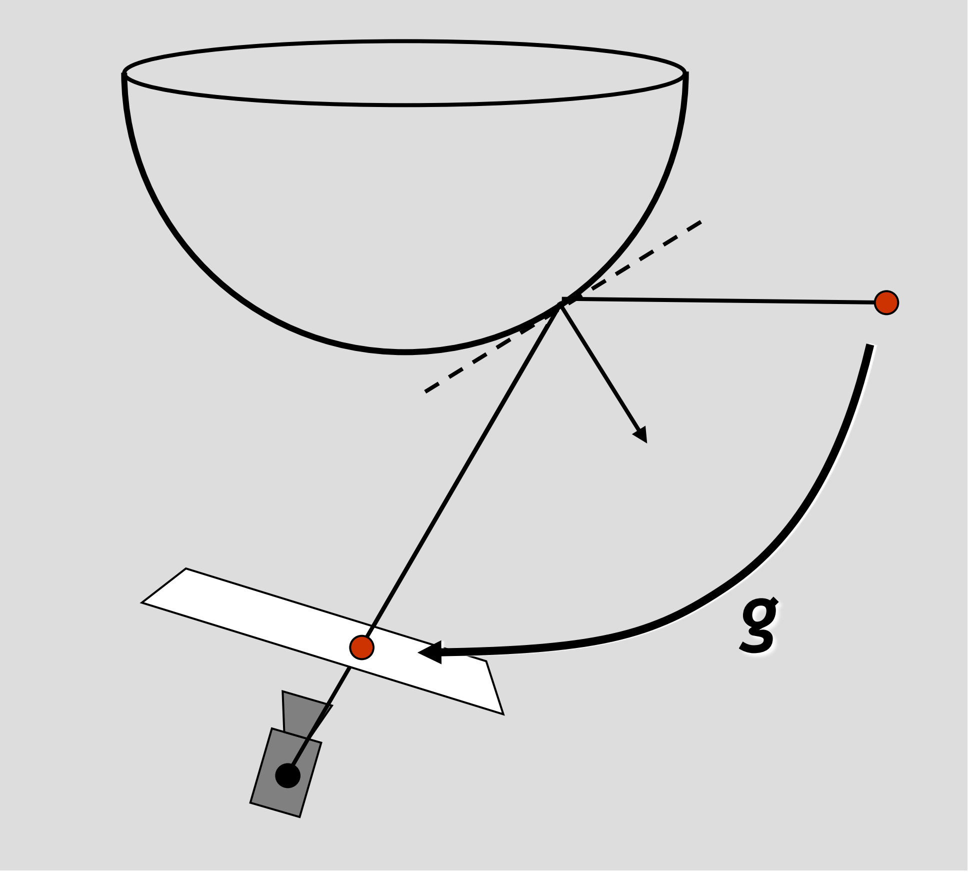
Kató Zoltán: Ipari Képfeldolgozás

Középpontos vetítés



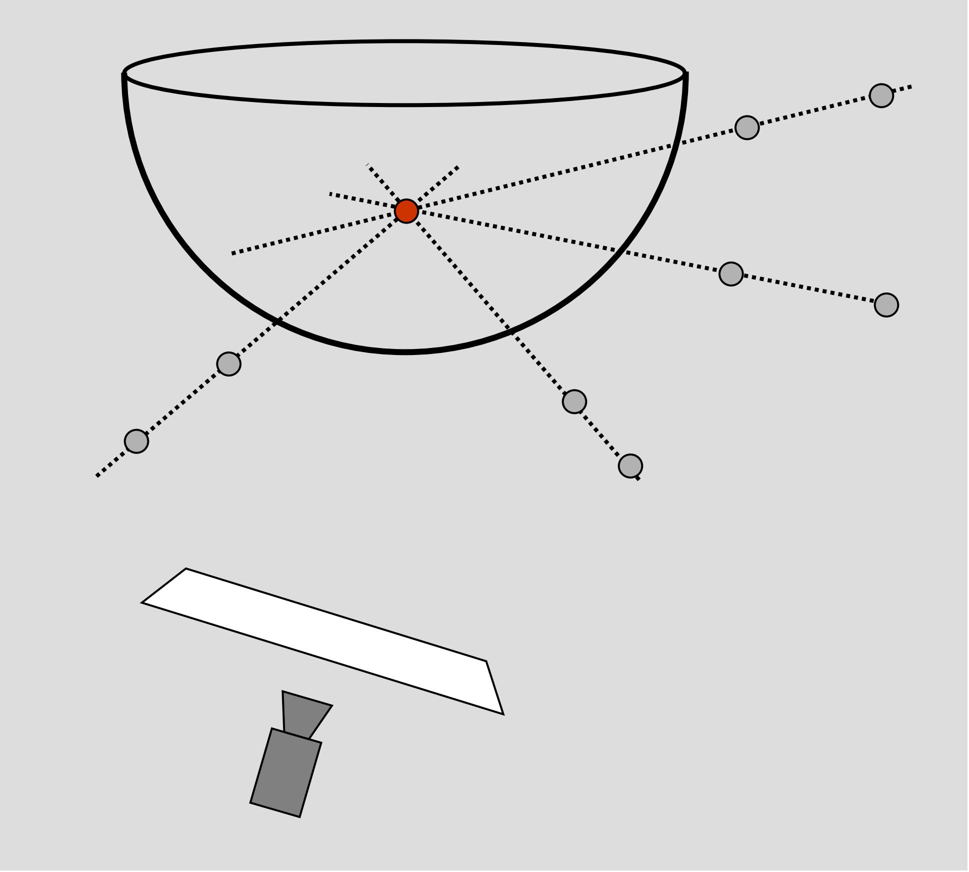
- **Valamennyi vetítősugár egy pontban metszi egymást**
  - vetítési középpont
- **Projektív kamera**
- **Más kamera??**

Katadioptrikus kamera



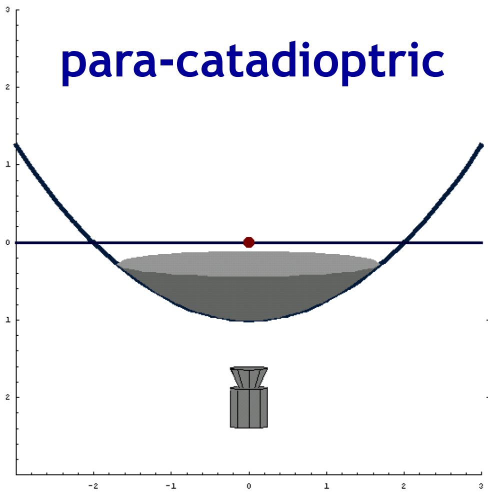
- **Tükör+projektív kamera**
  - A vetítősugarak a tükörről visszaverődve jutnak a kamerába
  - A tükrön kialakult képet fényképezzük le egy projektív kamerárval

Katadioptrikus kamera

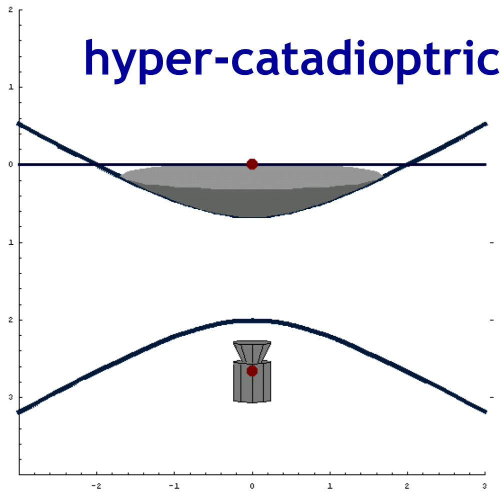


- Tükör+projektív kamera
- Megfelelő kombináció esetén középpontos vetítés lesz
  - Effektív vetítési középpont a tükörben
- Melyek ezek a kombinációk?

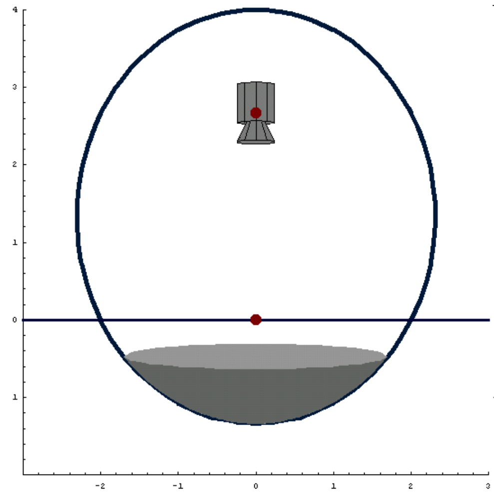
Katadioptrikus középpontos kamera



Parabola tükör + telecentrikus kamera



Hiperbola tükör + perspektív kamera

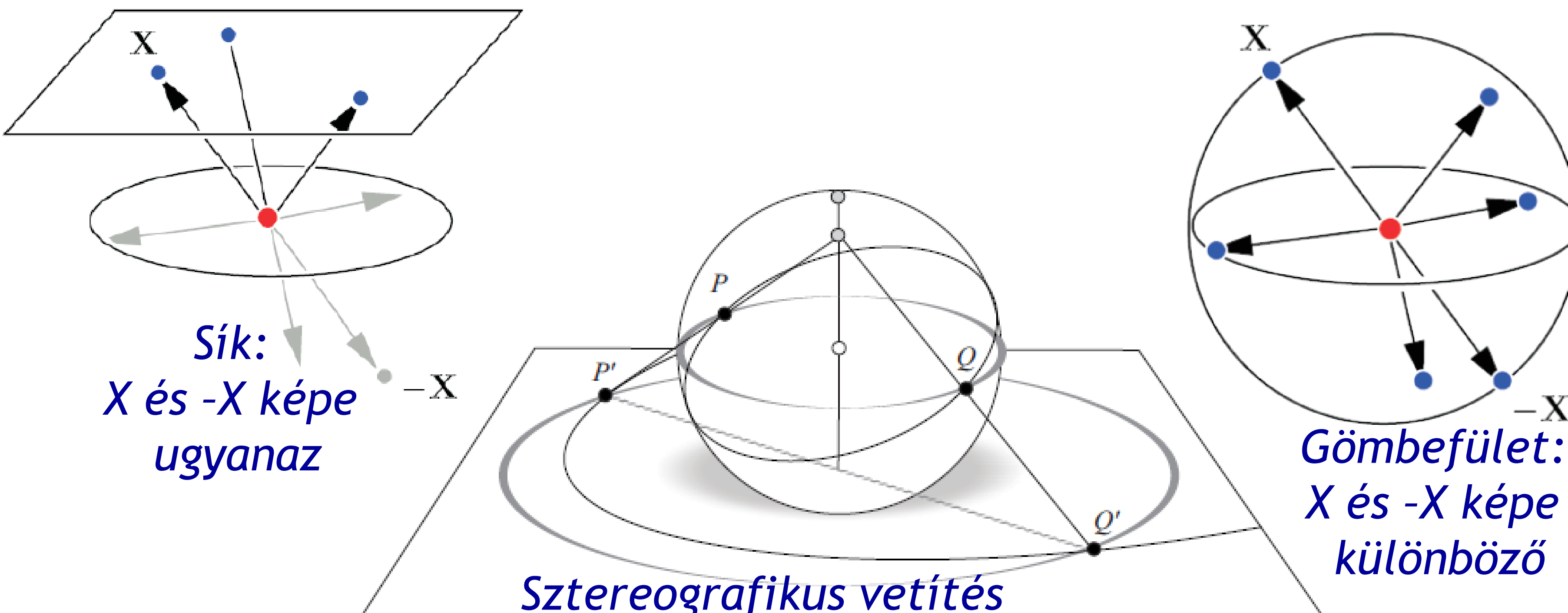


Elliptikus tükör + perspektív kamera

- **Kizárólag akkor lesz középpontos vetítés, ha**
  - **a tükör keresztmetszete kúpszelet**
  - **a felület a kúpszelet szimmetriatengelye körüli forgatása**
  - **A perspektív kamera a tükör egyik fókuszában van**
    - **A másik fókusz lesz a katadioptrikus kamera effektív középpontja**

Egységes leképezési modell

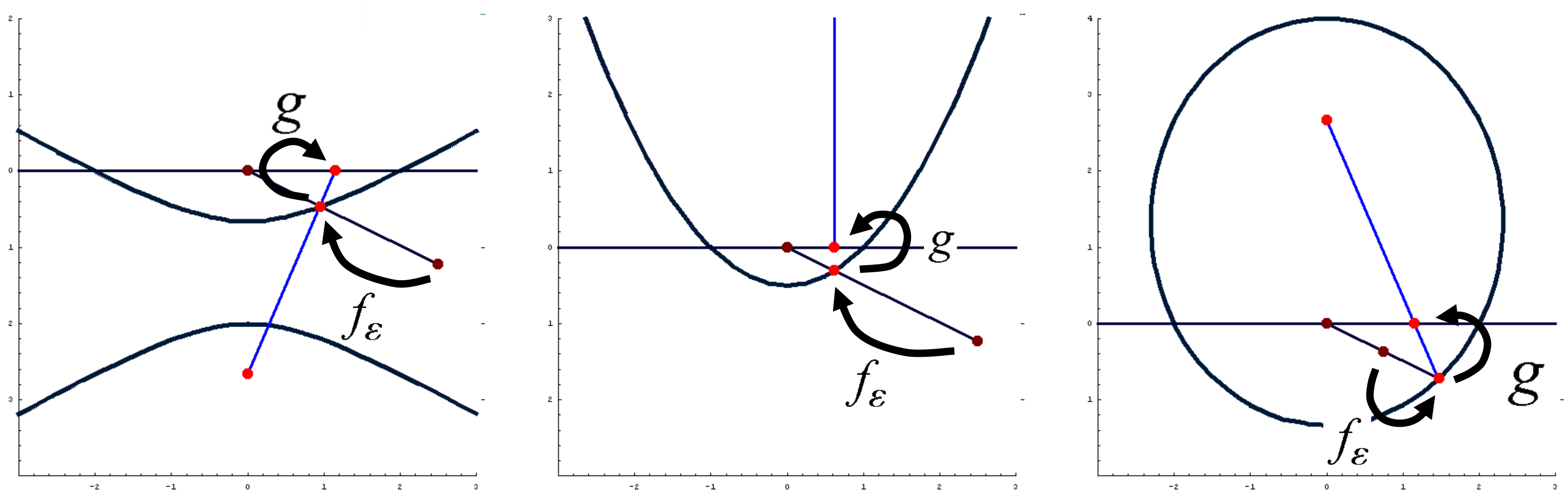
- Centrális katadioptrikus kamerák egységes elmélete [Geyer & Daniilidis ECCV 2000]:
  - Minden katadioptrikus (para-, hiper-, elliptikus-) és standard projektív vetítés izomorf egy olyan gömb→sík leképezéssel, ahol a gömb közzéppontja az effektív középpontban van, a síkvetítés középpontja pedig a síkra merőleges tengelyen.



Centrális katadioptrikus leképezés

- **A leképezés két transzformációból áll:** $g \circ f_\varepsilon$
- **f_ε : nemlineáris leképezés egy másodrendű felszínre**
  - **ε - tükör paraméter (excentricitás): lapultságára jellemző 0 és 1 közé eső szám. A 0 érték kört jelent (ekkor perspektív vetítés)**
- **g : lineáris leképezés egy síkra**

$$(g \circ f_\varepsilon)(x, y, z) = \left(\begin{array}{c} \dfrac{x}{-(1+\varepsilon^2)\, z - 2\, \varepsilon \sqrt{x^2+y^2+z^2}} \\ \dfrac{y}{-(1+\varepsilon^2)\, z - 2\, \varepsilon \sqrt{x^2+y^2+z^2}} \end{array} \right)$$



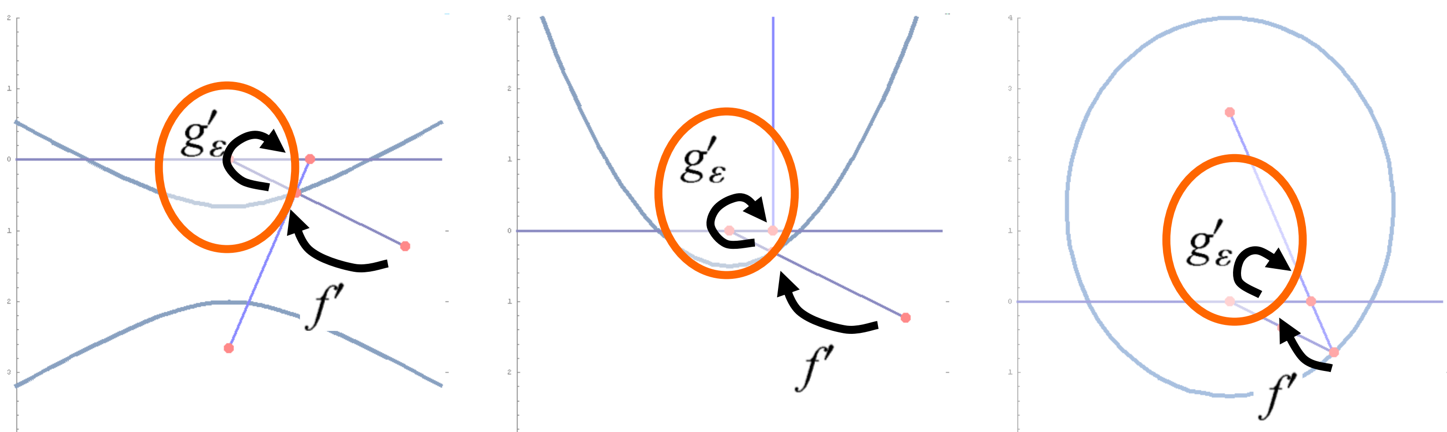
Ekvivalens vetítési modell

- **A tükör paramétert áthelyezhetjük a lineáris leképezésbe**

$$g \circ f_\varepsilon = g_\varepsilon \circ f$$

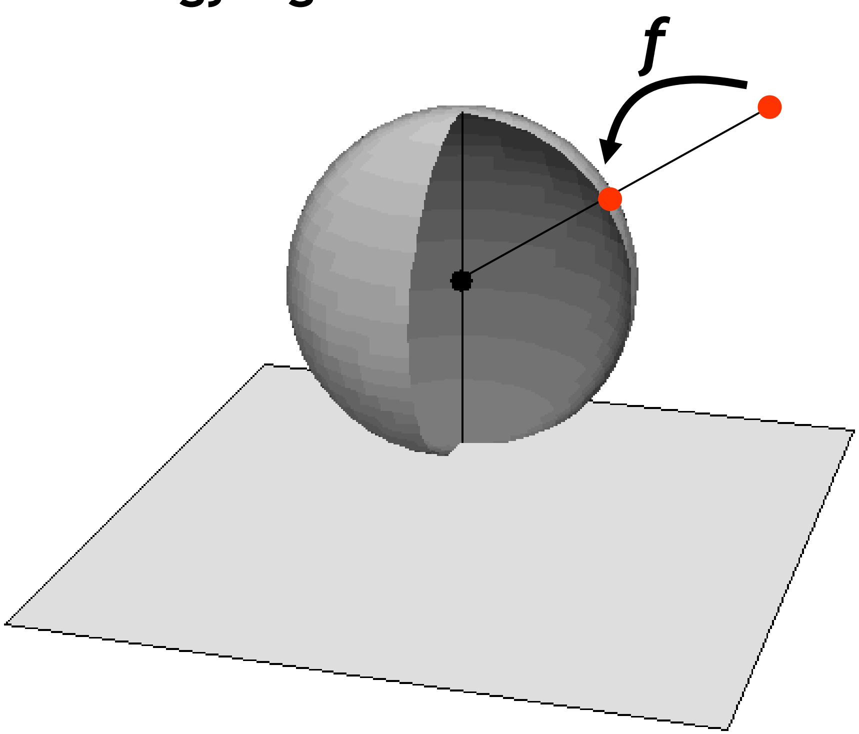
  - **Homogén koordinátákkal:**

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ -(1+\varepsilon^2)\,z - 2\,\varepsilon\sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{pmatrix}}_{\text{Homogén koordináták}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 2\,\varepsilon & & & \\ & 2\,\varepsilon & & \\ & & -(1+\varepsilon^2) & -2\,\varepsilon \end{pmatrix}}_{\text{Lineáris vetítés}} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{pmatrix}}_{\text{Nem lineáris, paraméter-mentes alak}}$$



f

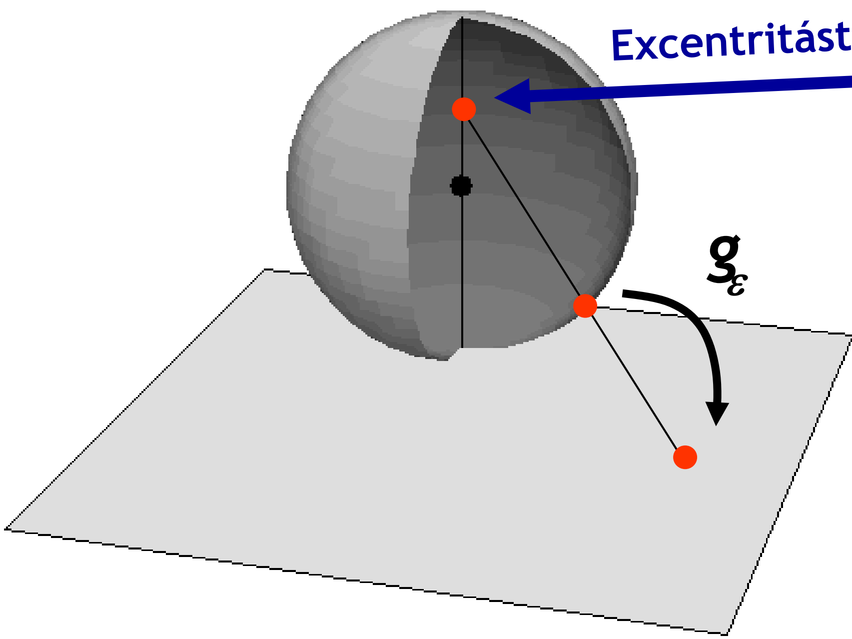
- **f az egységgömb felszínére vetít**
  - A vetítési középpont a gömb középpontja
  - A vetítés eredménye egy olyan homogén pont, melynek 4. koordinátája a vetített pont távolsága lesz.
  - A megfelelő inhomogén vektor a vetített pont irányába mutató egységvektor lesz.



$$f(x, y, z) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{g}_\varepsilon$

- $\mathbf{g}_\varepsilon$ **középpontos vetítés**
  - A gömb tengelyének egy (excentricitás által meghatározott) pontjából
  - A gömb tengelyére merőleges képsíkra
  - Vegyük észre: az f által adott pontot az alsó félgömbre tükrözi!



Excentritástól függő vetítési középpont koordináták

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 2\varepsilon & & \\ & 2\varepsilon & \\ & & -(1+\varepsilon^2)-2\varepsilon \end{pmatrix}}_{\mathbf{g}_\varepsilon} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{2\varepsilon}{1+\varepsilon^2} \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

Egységes leképezési modell

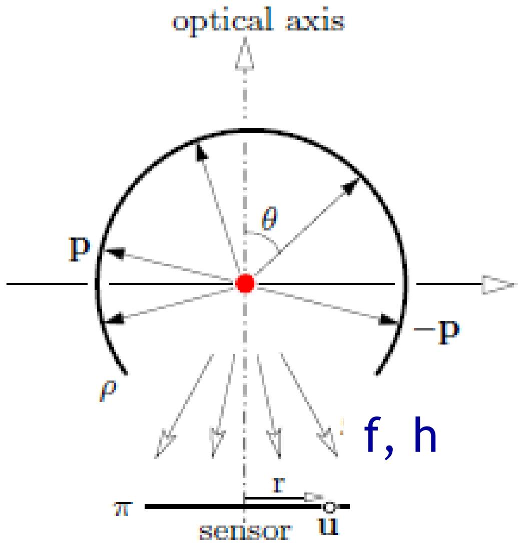
- Középpontos katadioptrikus és perspektív vetítés tehát:

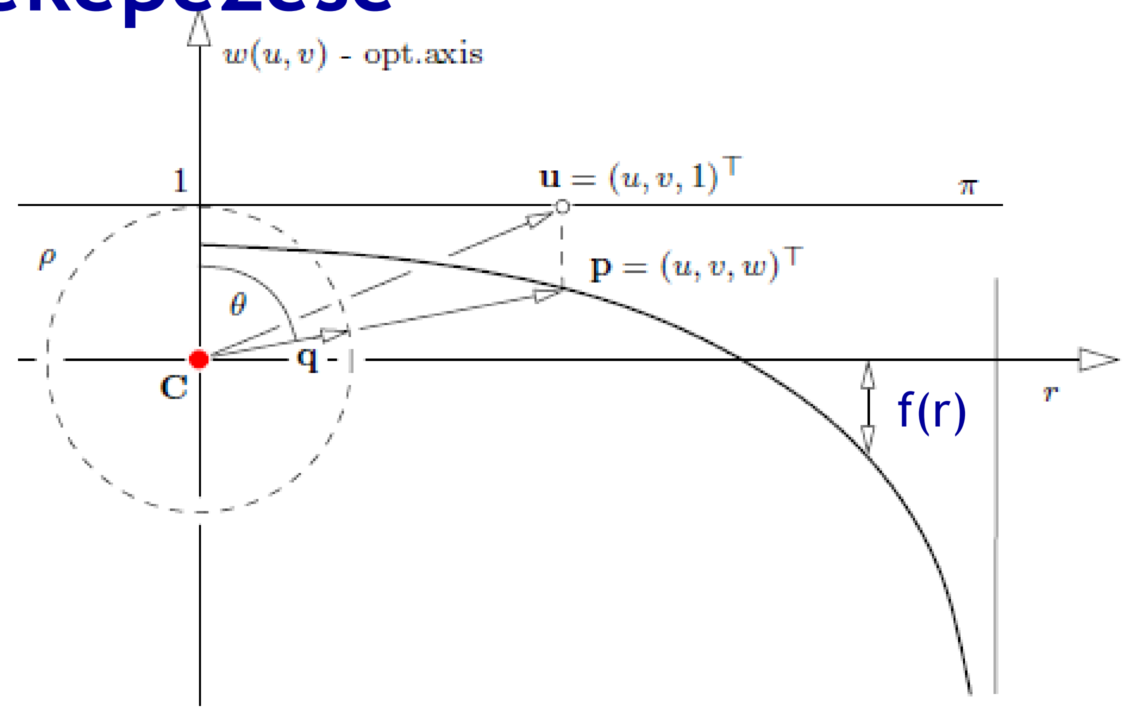
$$(g \circ f_\varepsilon)(x, y, z) = \begin{pmatrix} \dfrac{x}{-(1+\varepsilon^2)z - 2\varepsilon\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \\ \dfrac{y}{-(1+\varepsilon^2)z - 2\varepsilon\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \end{pmatrix}$$

- Homogén koordinátákkal felírva:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ -(1+\varepsilon^2)z - 2\varepsilon\sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{pmatrix}}_{\text{Homogén koordináták}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 2\varepsilon & & & \\ & 2\varepsilon & & \\ & & -(1+\varepsilon^2) & -2\varepsilon \end{pmatrix}}_{\text{Lineáris vetítés}} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{pmatrix}}_{\text{Nem lineáris, de paraméter nélküli alak}}$$

Halszemoptika leképezése

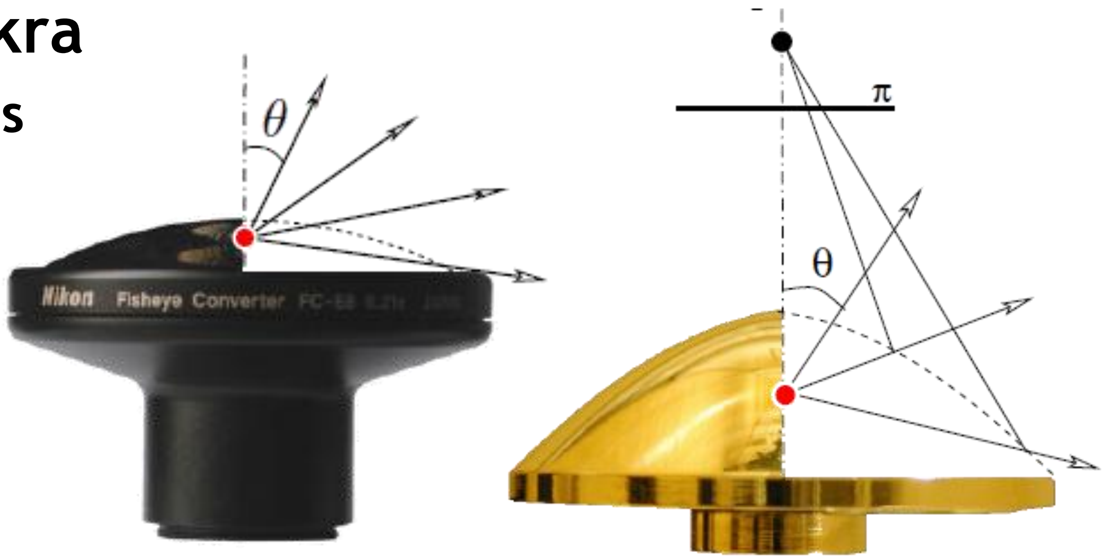


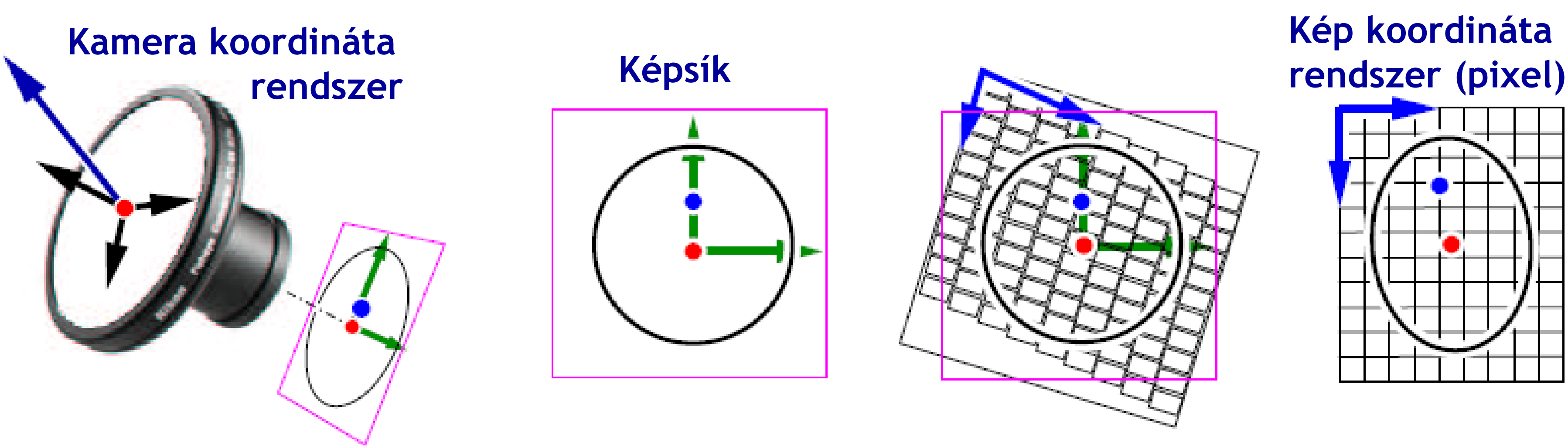


- **A képsík egy pontját reprezentálhatjuk mint a pontból húzott vetítősugár metszéspontját egy ρ egységgömb retinán: q=PX, ahol P 3X4 vetítőmátrix, X valós pont.**
- **Egy q szferikus pontnak megfelelő u képpontot egy f(r) nemlineáris leképezéssel kapjuk (q→p→u)**
  - **Tipikus leképezés: equidistant (equiangular)**
    - **képpont radiális távolsága arányos a szöggel**

Katadioptrikus és halszem optika modellje

- **Micusik & Pajdla 2004: egységes modell katadioptrikus és halszem optikákra**
  - Centrális leképezés
  - Tengelyesen szimmetrikus
  - Képsík merőleges a tengelyre

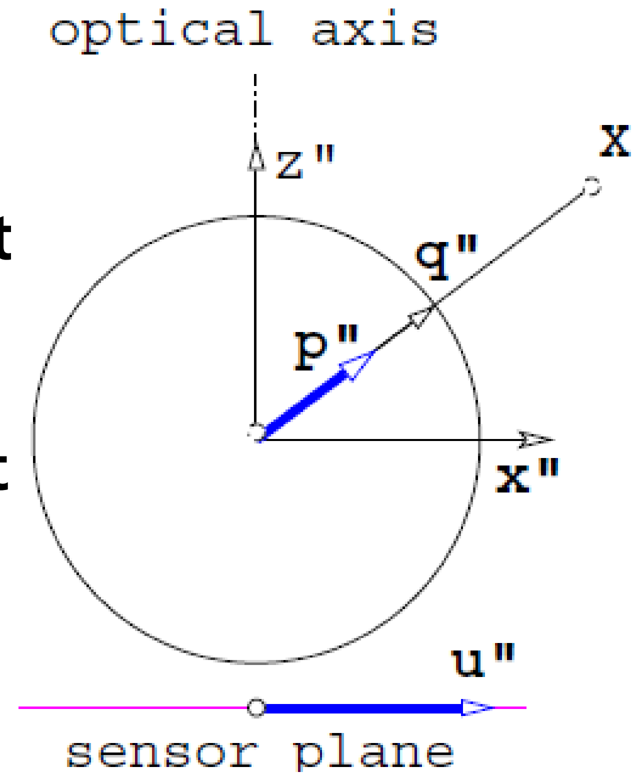




Kamera → képsík leképezés

- Egy szferikus q” képpontot, amelyet vetítősugarának p” (nem feltétlenül egységnyi) irányvektorával reprezentálunk, egy u” pontba vetít a képsíkon:

$$\mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} h(\mathbf{u}'')\mathbf{u}'' \\ f(\mathbf{u}'') \end{pmatrix}$$



- *f* és *h* forgásszimmetrikus függvények, azaz tetszőleges R forgatásra:
  - h a perspektív vetítést írja le
    - Halszemoptikákra: h=1 (ortografikus vetítésnek felel meg)
  - f pedig a tükör alakjától függ
  - Perspektív vetítés: h=f=1.

$$h(\mathbf{R}\mathbf{u}'') = h(\mathbf{u}'')$$

$$f(\mathbf{R}\mathbf{u}'') = f(\mathbf{u}'')$$

Kató Zoltán: Ipari Képfeldolgozás

Kamera → képsík leképezés

- **Néhány konkrét példa (Micusik & Pajdla 2004):**

Parabola tükör — hiperbola tükör — Nikon FC-E8 halszem — Sigma halszem

$$\mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} 1\mathbf{u}'' \\ \frac{a''^2 - \|\mathbf{u}''\|^2}{2a''} \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} h(\mathbf{u}'')\,\mathbf{u}'' \\ f(\mathbf{u}'') \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} 1\mathbf{u}'' \\ \frac{\|\mathbf{u}''\|}{\tan \frac{a''\|\mathbf{u}''\|}{1+b''\|\mathbf{u}''\|}} \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} 1\mathbf{u}'' \\ \frac{\|\mathbf{u}''\|}{\tan\left(\frac{1}{b''}\operatorname{asin}\frac{b''\|\mathbf{u}''\|}{a''}\right)} \end{pmatrix}$$

$$\downarrow$$

$$h(\mathbf{u}'') = \frac{b''^2\left(F''^2\sqrt{a''^2+b''^2} + F''a''\sqrt{\|\mathbf{u}''\|^2 + F''^2}\right)}{F''^2 b''^2 - a''^2\|\mathbf{u}''\|^2}$$

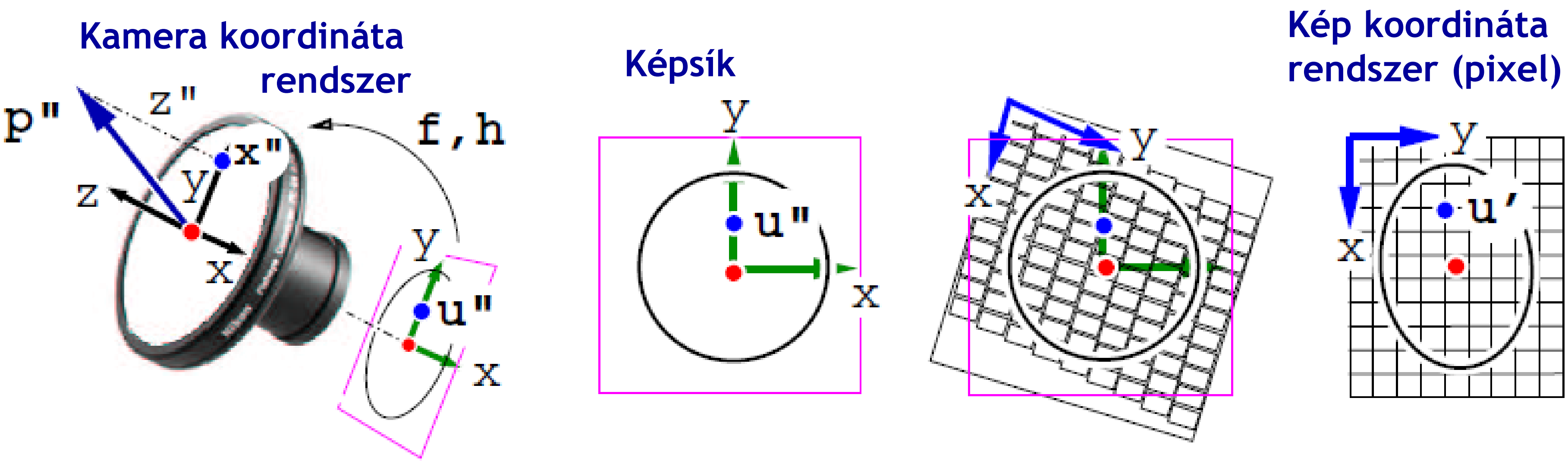
$$f(\mathbf{u}'') = h(\mathbf{u}'')F'' - 2\sqrt{a''^2 + b''^2}$$

- **Katadioptrikus modell (Geyer & Daniilidis 2000):**

$$h(\mathbf{u}'') = \frac{l(l+m) + \sqrt{\|\mathbf{u}''\|^2(1-l^2) + (l+m)^2}}{\|\mathbf{u}''\|^2 + (l+m)^2}$$

$$f(\mathbf{u}'') = h(\mathbf{u}'')\,(l+m) - l$$

Képsík → szenzor leképezés

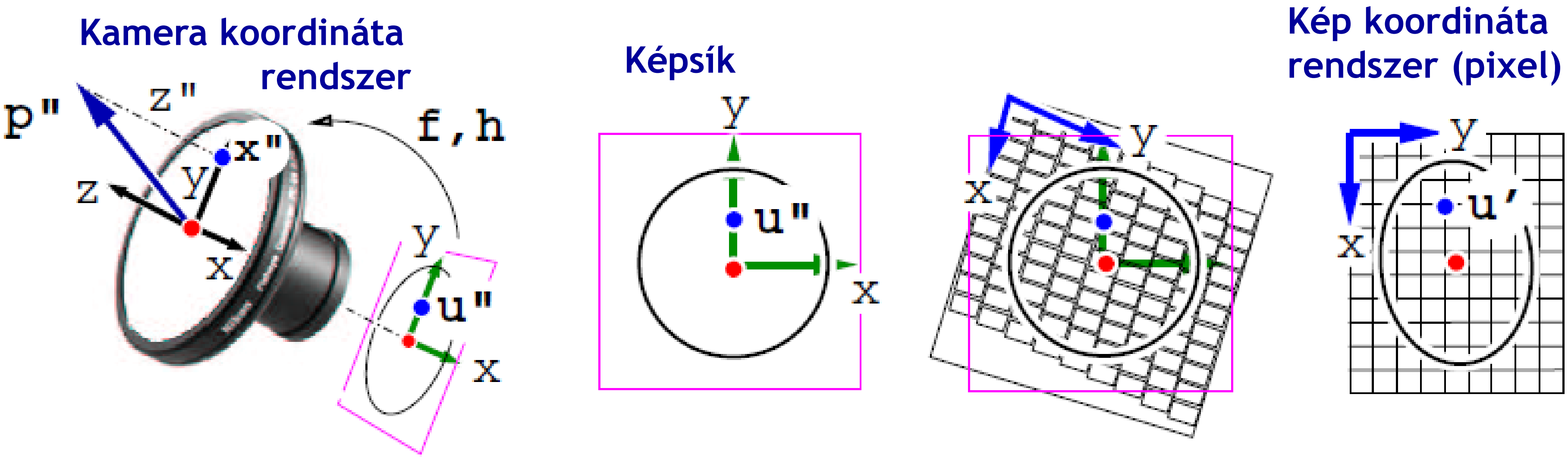


- **A képsík koordináta rendszerből a szenzor pixel koordináta rendszerébe egy affin leképezés hat:**

$$\mathbf{u}'' = \mathbf{A}'\mathbf{u}' + \mathbf{t}'$$

$$\mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} h(\mathbf{u}'')\mathbf{u}'' \\ f(\mathbf{u}'') \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(\mathbf{A}'\mathbf{u}' + \mathbf{t}')(\mathbf{A}'\mathbf{u}' + \mathbf{t}') \\ f(\mathbf{A}'\mathbf{u}' + \mathbf{t}') \end{pmatrix}$$

Teljes leképezés



- Összességében tehát egy X valós pont
  - P középpontos vetítéssel az egységgömb q” pontjára képeződik
  - a q” ponthoz van olyan α”>0, amire teljesül:

$$\frac{1}{\alpha''}\mathbf{PX} = \mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} h(\mathbf{u}'')\mathbf{u}'' \\ f(\mathbf{u}'') \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(\mathbf{A}'\mathbf{u}'+\mathbf{t}')(\mathbf{A}'\mathbf{u}'+\mathbf{t}') \\ f(\mathbf{A}'\mathbf{u}'+\mathbf{t}') \end{pmatrix}$$

  - A’,t’ affin paraméterek,
  - f,h forgásszimmetrikus valós függvények a”, b”,… paraméterrel

Kató Zoltán: Ipari Képfeldolgozás

Taylor modell

- Davide Scaramuzza (2008)
  - OCamCalib Matlab Toolbox omni kamera kalibrációhoz
- Két függvény helyett egyet használ: g=f/h

$$\mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} h(\mathbf{u}'')\mathbf{u}'' \\ f(\mathbf{u}'') \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}'' \\ g(\mathbf{u}'') \end{pmatrix}$$

- Szenzorspecifikus g() helyett egy általános polinom
  - Szenzorfüggetlen álatlános modell
  - Közelítő modell akkor is, ha nem tökéletesen középpontos vetítés

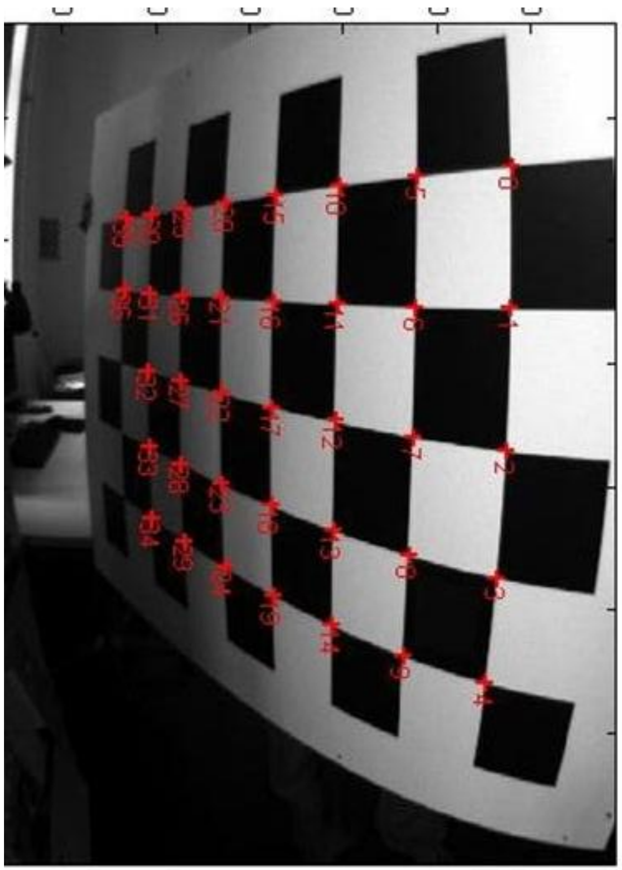
$$g(\mathbf{u}'') = a_0 + a_1\|\mathbf{u}''\| + a_2\|\mathbf{u}''\|^2 + \ldots + a_n\|\mathbf{u}''\|^n$$

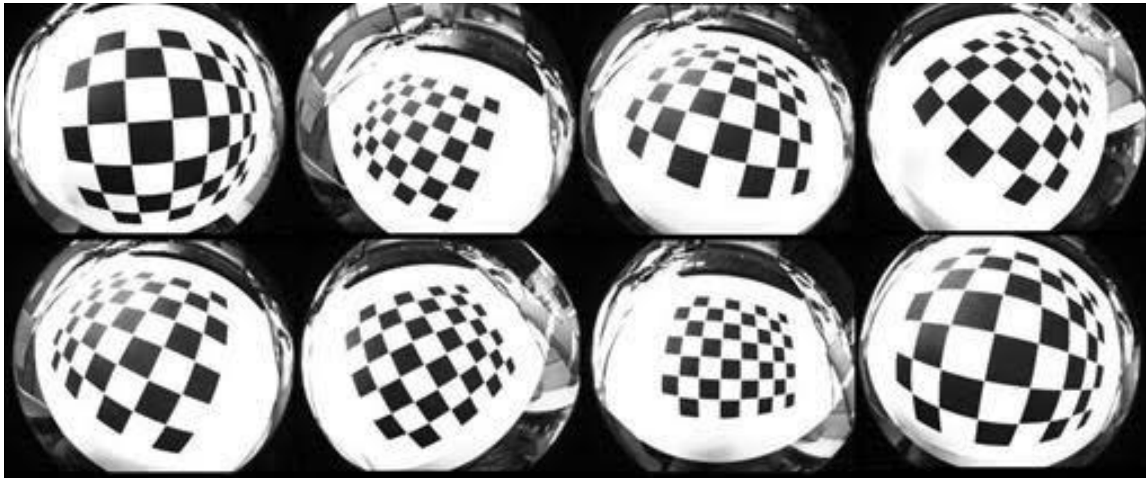
  - Tapasztalatok alapján minden középpontos omni vetítésre feltehető, hogy a_1=0. Így tehát a kalibrációs paraméterek:
    - n (polinom fokszáma)
    - a_0, a_2, … a_n

KAMERA KALIBRÁCIÓ

Kalibráció minta alapján

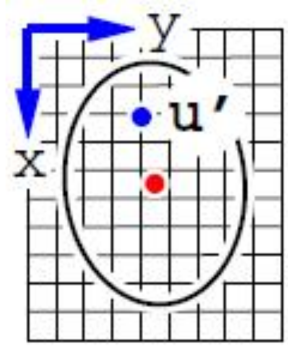
- Hasonlóan a perspektív kamera kalibrációhoz, egy kalibrációs mintáról készítünk képeket
  - A mintát közelről fényképezzük, különben túl kicsi lesz a képe
  - Lehetőleg minden oldalról készítsünk képet
    - Ha a kalibrációs minta dobozként körbeveszi a kamerát, akkor ez automatikusan teljesül
  - A kontrolpontok detektálása sarokdetektorral történik (egyenes képe nem egyenes)





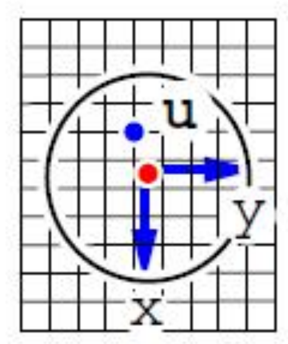
Kép koordináta rendszer

- Ellipszis alakú omni kép detektálása (háttér fekete)



- Kontúrra ellipszis illesztése, majd középpont meghatározása

- Középpont eltolása a kép közepére ➔ t' eltolásvektor
- Az ellipszist körré transzformájuk ➔ A' mátrix



Kalibráció Taylor modell alapján: [R|T]

- Feltételezhetjük, hogy A=I, t=0 ➔ u”=u’
- A kalibrációs minta pontjai: $M_i=(X_i,Y_i,0)$
  - Mivel egy síkba esnek, feltehetjük, hogy $Z_i=0$
  - $P=[R|T]$, r_i: R i. oszlopa

$$\mathbf{PM}_i = \begin{pmatrix}\mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{T}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X_i \\ Y_i \\ 0 \\ 1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{T}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X_i \\ Y_i \\ 1\end{pmatrix}$$

- A megfelelő képpontok pedig $m_i=(u_i,v_i)$, és
  $m_i x PM_i = 0$

$$\begin{pmatrix}u_i \\ v_i \\ g(\mathbf{m}_i)\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{T}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X_i \\ Y_i \\ 1\end{pmatrix} = 0$$

Kalibráció Taylor modell alapján : [R|T]

- **Kifejtve minden pontra kapunk 3 egyenletet, amiből egy lesz lineáris az ismeretlen R,T paraméterekben, konkrétan:**

$$H=[r_{11},r_{12},r_{21},r_{22},t_1,t_2]$$

- **Ezeket minden pontra felírva és megfelelően rendezve kapunk egy lineáris túlhatározott egyenletrendszert:**

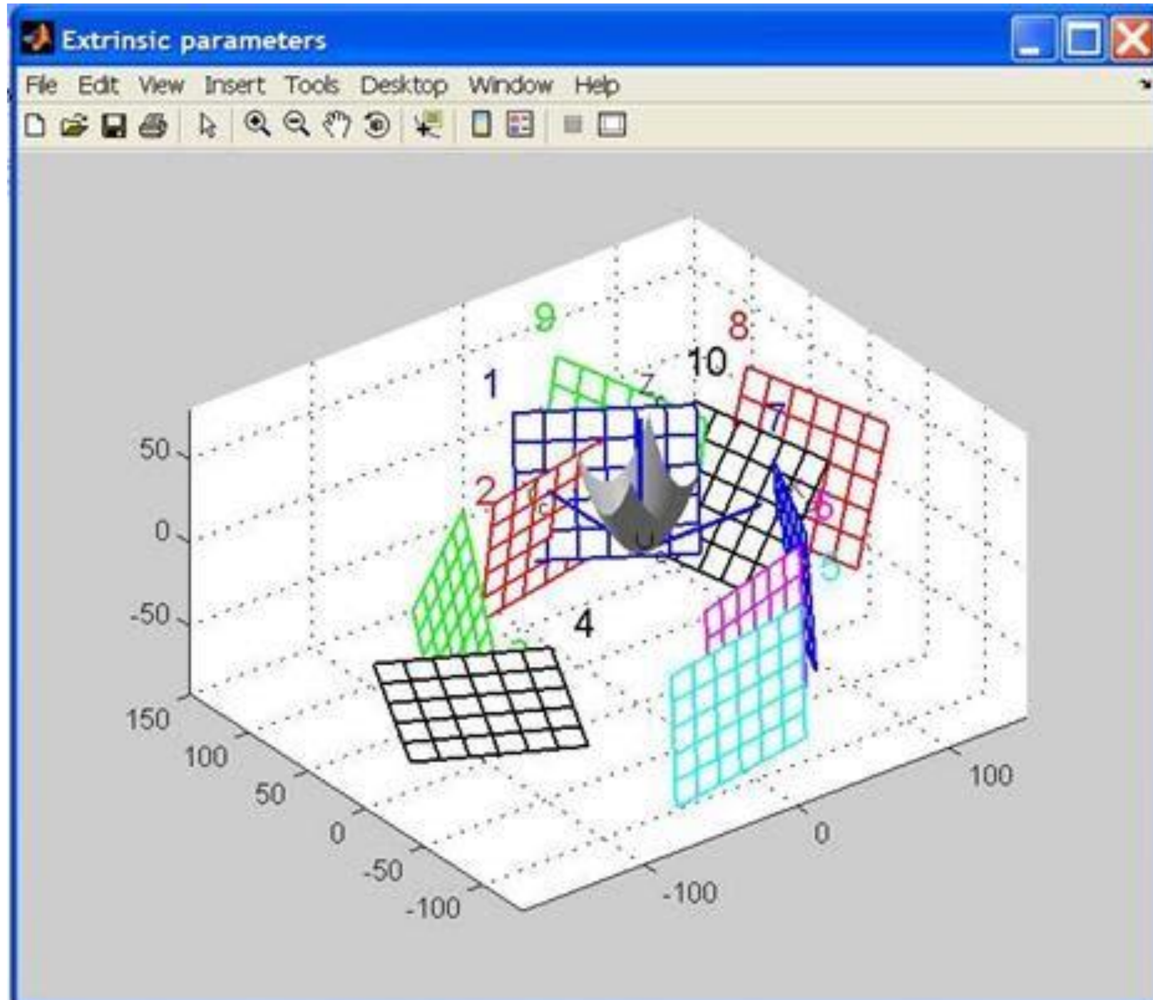
$$MH=0$$

  - Ahol M csak az ismert 3D-2D pontoktól függő mátrix

- **M SVD felbontásával oldjuk meg**
  - R ortonormált, ezért r_{31},r_{32}, is egyértelműen meghatározható
  - t_3 meghatározása a belső paraméterekkel együtt történik

Kalibráció Taylor modell alapján : [R|T]

- **Ezen eljárással valamennyi képre meghatározhatjuk az [R|T] külső paramétereket**
  - **Megjegyezzük, hogy a modellünk szerint P= [R|T], és valamennyi belső paramétert a g() függvény reprezentál**



Kalibráció Taylor modell alapján : g()

- Az előzőekben pontonként egy egyenletet használtunk fel
  - Amelyik nem tartalmazta g()-t

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ g(\mathbf{m}_i) \end{pmatrix} \times (\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{T}) \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

- A meghatározott külső paramétereket behelyettesítve a maradék két egyenletbe
  - Az összes kép összes pontpárjára kapott egyenleteket megfelelően rendezve
  - felírhatunk egy újabb lineáris egyenletrendszert, melynek ismeretlenei:
    - a_0, a_2, … a_n
    - és t_3 képenkénti értéke
    - Gyakorlatban n=4 válsztjuk, ez általában elegendően pontos
  - A megoldást ismét SVD felbontással kapjuk
- Ezzel csak egy algebrai megoldást kapunk a kalibrációra
  - Visszavetítési hibával nem-lineárisan finomítható

Felhasznált anyagok

- **Christopher Geyer, Tomáš Pajdla, Kostas Daniilidis: Short Course on Omnidirectional Vision. ICCV2003.**
  - *http://www.cis.upenn.edu/~kostas/omni/geyer03tutorial.ppt*
  - http://cmp.felk.cvut.cz/˜pajdla/Pajdla-Omni-Vision-ICCV-2003/
- Davide Scaramuzza
  - OCamCalib Matlab Toolbox