

# 5. 3D rekonstrukció

**Kató Zoltán**

**Képfeldolgozás és Számítógépes Grafika tanszék  
SZTE**

**(<http://www.inf.u-szeged.hu/~kato/teaching/>)**

# PASSZÍV SZTEREÓ

# Passzív sztereó

- 3D rekonstrukció egy sztereó kamera pár által rögzített képpárból
  - Stereo rig: rögzített kamera pár egymáshoz képest fix pozícióban
    - Mozgó objektum rekonstrukciója is lehetséges (nagyon gyors mozgás esetén a kamerák expozícióját szinkronizálni kell)
  - Mozgó kamera: egyetlen kamerával két különböző pozícióból készített kép alapján
    - Statikus objektum esetén használható
- Geometriailag mindkét konfiguráció azonos



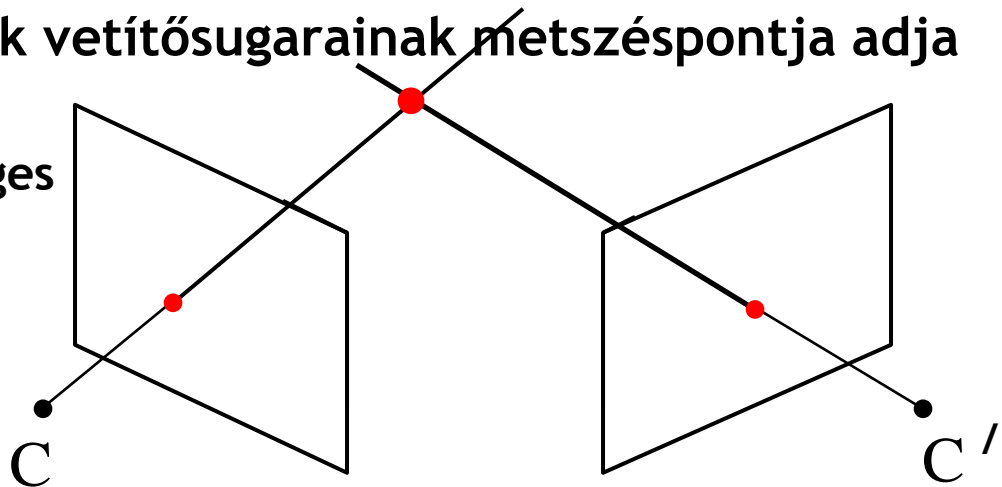
# Háromszögelés



- A rekonstrukció egyszerű háromszögeléssel oldható meg
  - Az egymásnak megfelelő képpontok ugyanazon 3D pont képei
  - a visszavetített képpontok vetítősugarainak metszéspontja adja a rekonstruált 3D pontot
    - kalibrált kamera szükséges

- **Algoritmus:**

1. Pontmegfeleltetés
2. háromszögelés

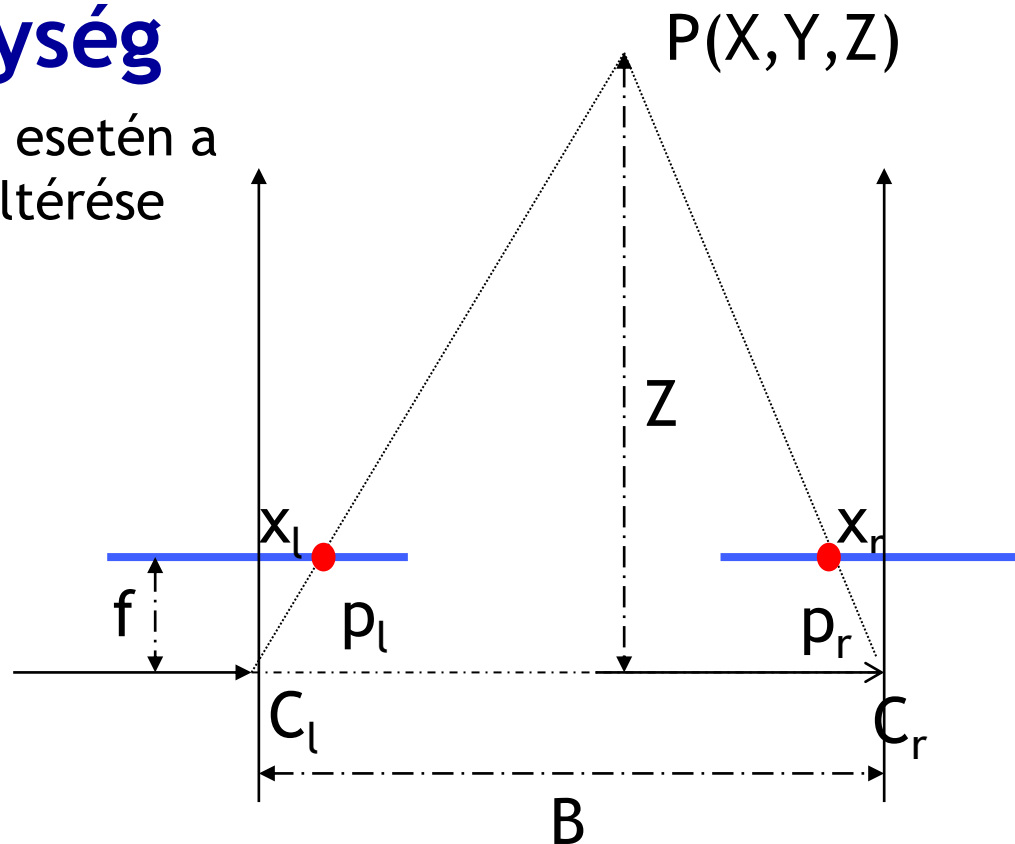


# Diszparitás és mélység

Standard szeteró konfiguráció esetén a diszparitás az x koordináták eltérése lesz:

$$\frac{B + x_r - x_l}{Z - f} = \frac{B}{Z}$$

$$Z = f \frac{B}{x_l - x_r}$$



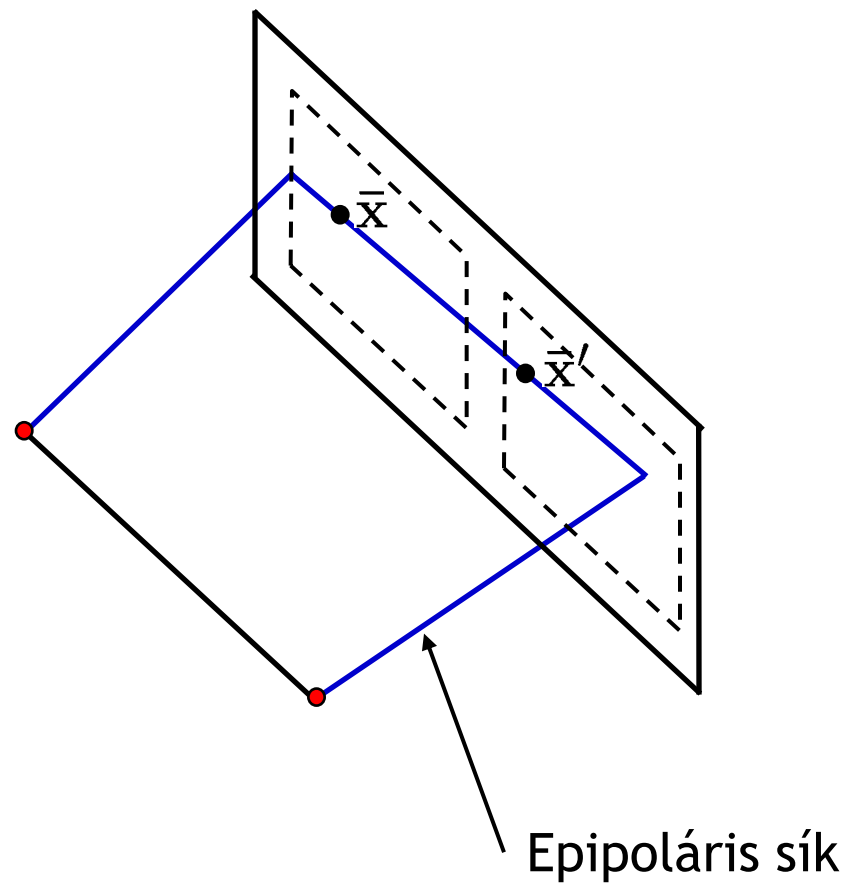
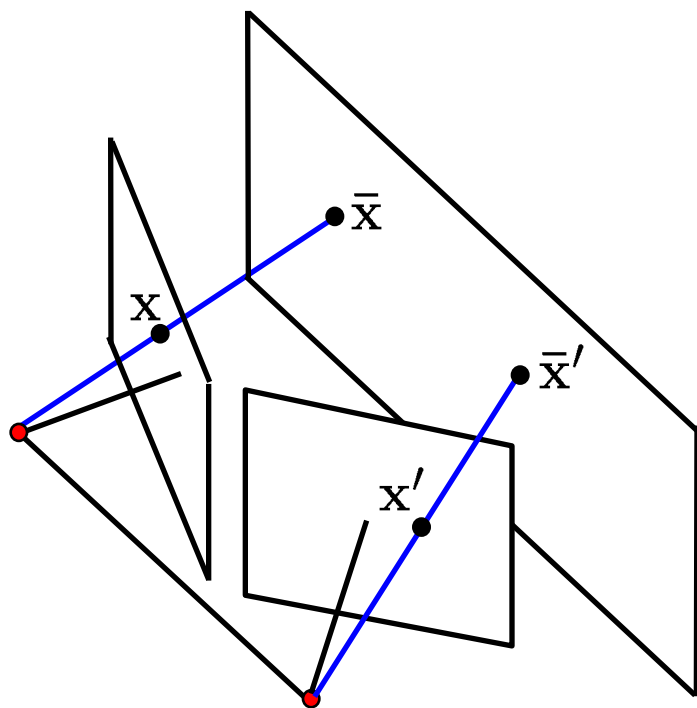
**Diszparitás:  $d = x_l - x_r$**

$$Z = f \frac{B}{d}$$

A diszparitás  $d$  és a mélység  $Z$  fordítottan arányosak és kalibrált kamera esetén egymásból számolhatók

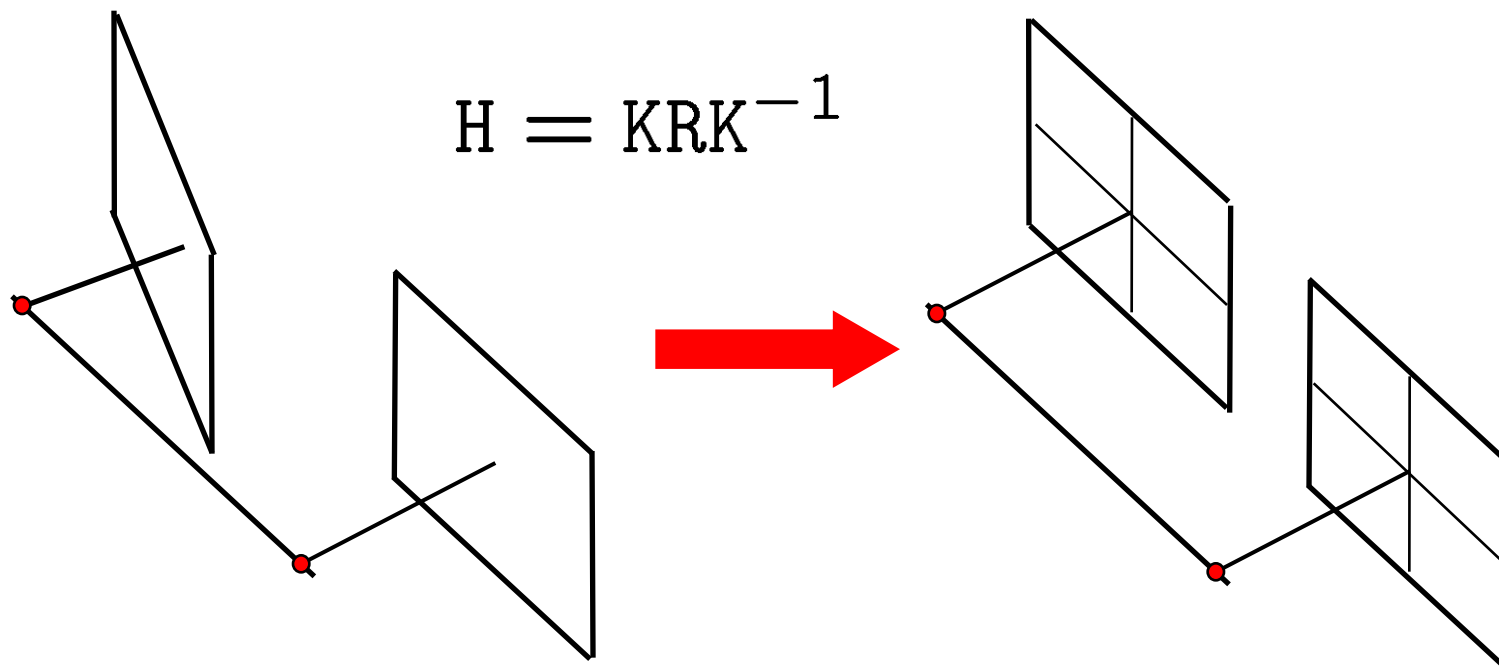
# Általános sztereó kamerák esete

- Rektifikálás: vetítsük le a képeket egy közös képsíkra



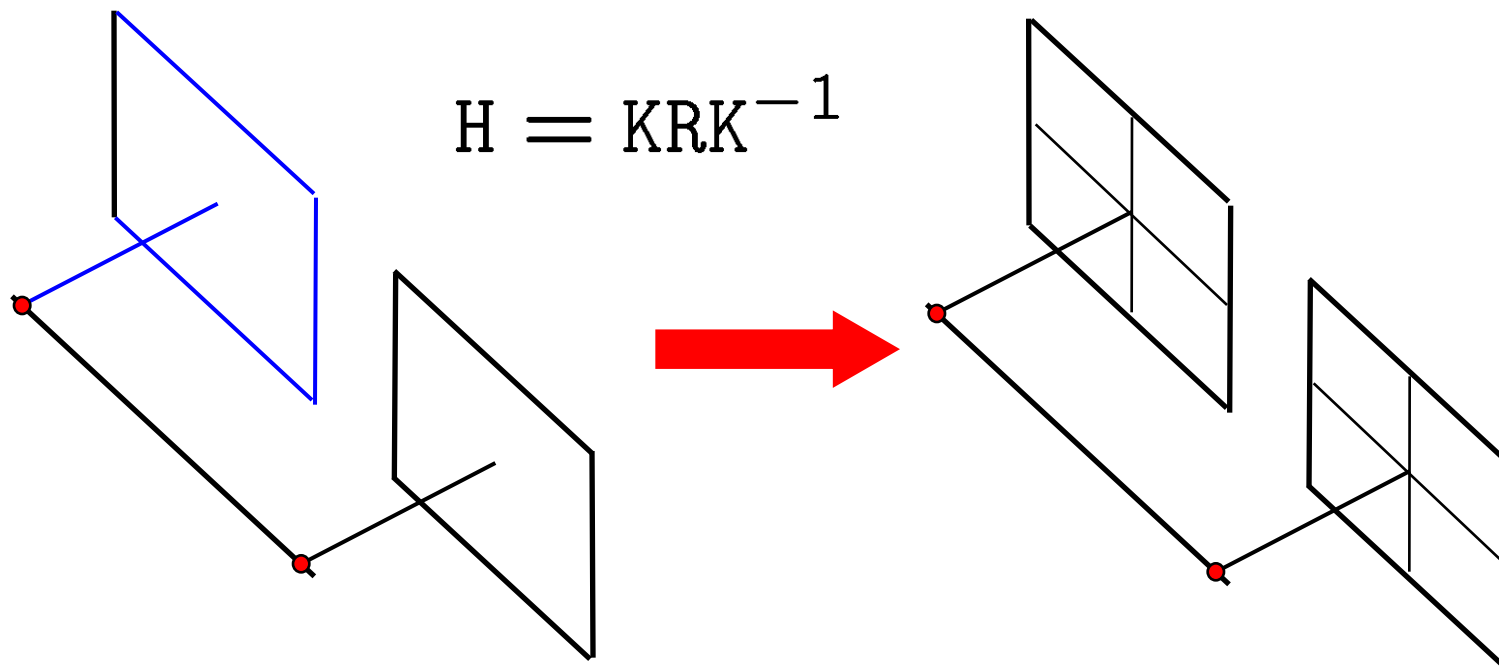
# Rektifikálás

- A vetítés egy  $H$  projektív transzformáció (síkhomográfia) lesz:



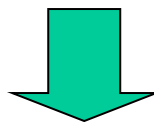
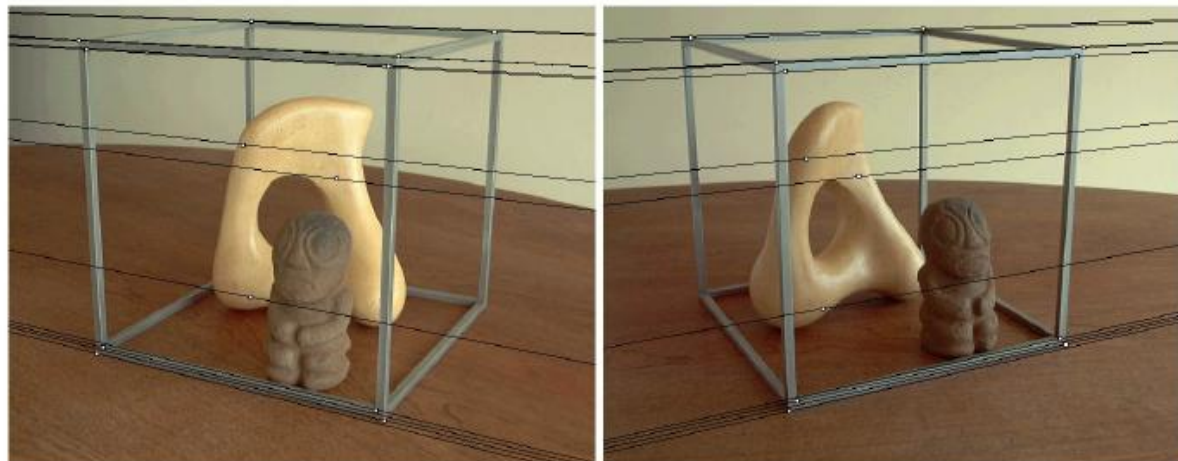
# Rektifikálás

- A vetítés egy  $H$  projektív transzformáció (síkhomográfia) lesz:





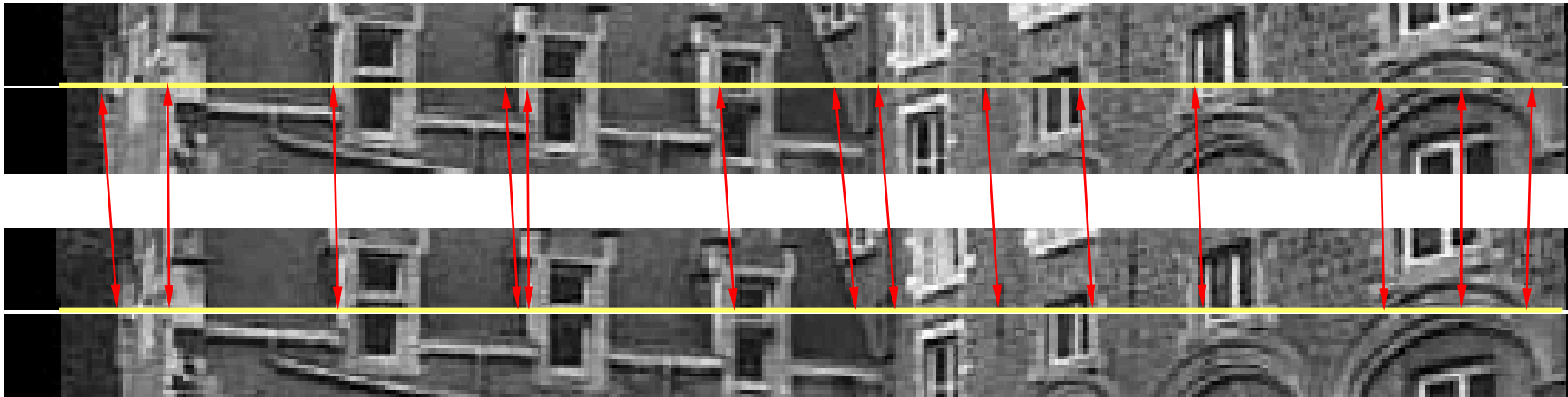
# Rektifikáció



Source: Alyosha Efros

# Sztereó megfeleltetés

- További megszorítások érvényesek egy sztereó képpár esetén:
  - Egy  $x$  pont  $x'$  párja az  $l'$  epipoláris egyenesen van  $\rightarrow$  1D keresés
    - Ha a képsíkok egy síkba esnek (standard sztereó konfiguráció)  $\rightarrow$  a megfelelő pontok a képek azonos rásztersorain helyezkednek el
  - Minden pontnak max. 1 párja lehet (takarás esetén nincs pár)
  - Mélységi korlát  $\rightarrow$  korlátozott diszparitás (az epipoláris egyenes egy rövidebb szakaszára megszorítható a keresés)

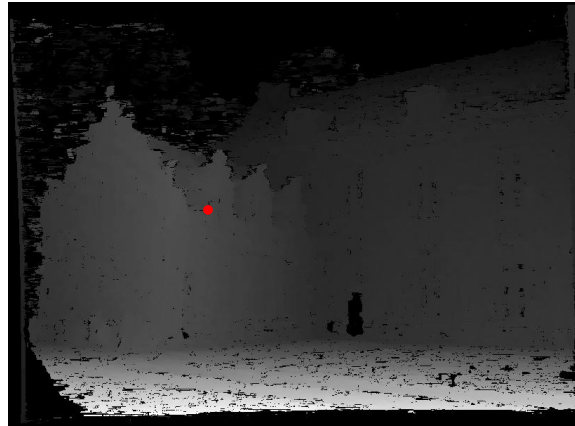


# Diszparitás térkép

Bal kép  $I(x,y)$



Diszparitás térkép  $D(x,y)$



Jobb kép  $I'(x',y')$

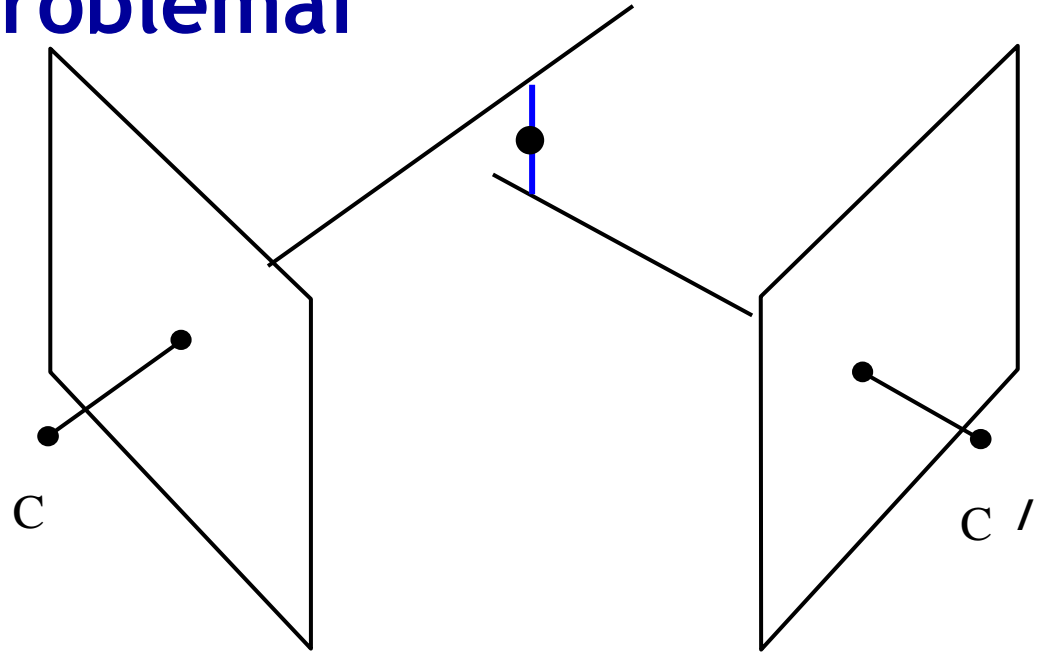


$$(x', y') = (x + D(x, y), y)$$

Diszparitás térkép egyúttal a relatív mélységet is megadja → mélységi térkép

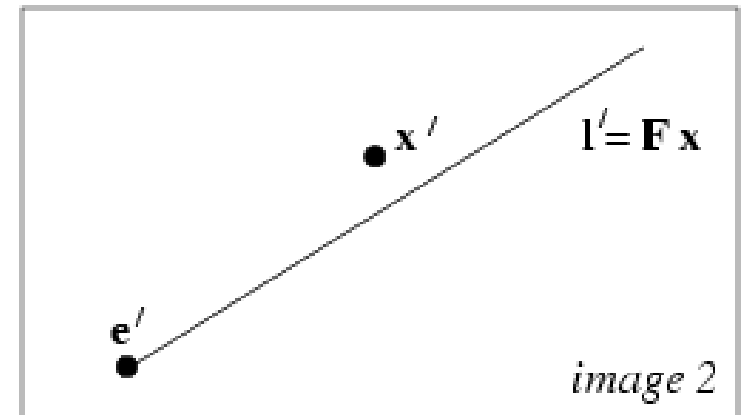
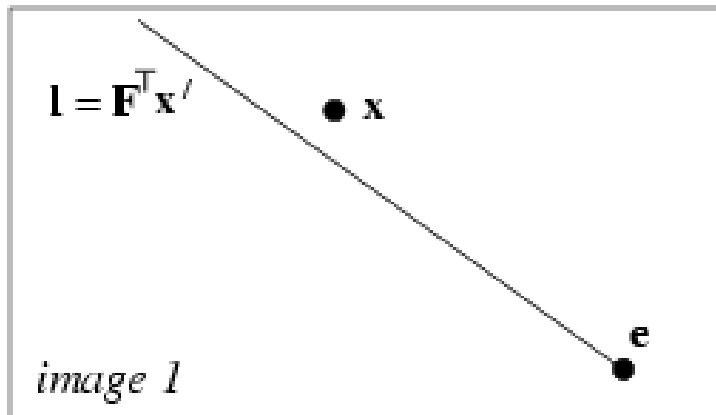
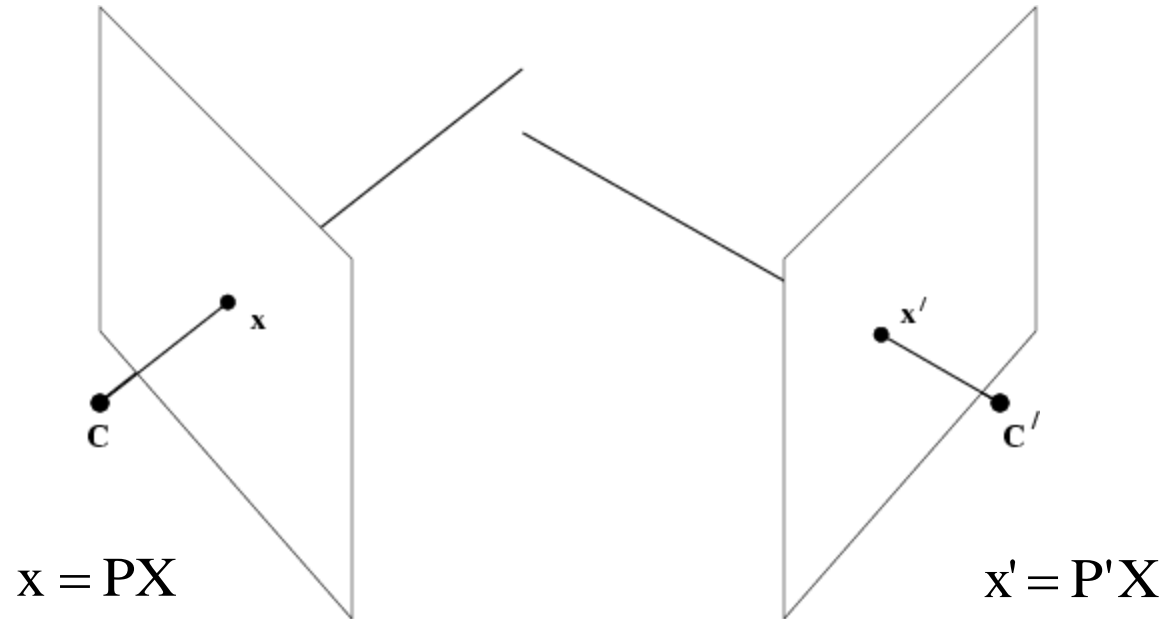
# HÁROMSZÖGELÉS

# Háromszögelés problémái



- A gyakorlatban a vetítő sugarak nem metszik egymást
  - Egyszerűen vehetjük a két egyenest összekötő legrövidebb szakasz felezőpontját
- Lehetséges hibaforrások (feltételezve a korrekt pontmegfeleltetést):
  - $x$ ,  $x'$  &  $F$  nem elégíti ki a  $x'^T F x = 0$  egyenletet
  - $X$  nem elégíti ki egyszerre az  $x = P X$  és  $x' = P' X$  egyenleteket

# Lehetséges hibák



# Algebrai megoldás

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad \mathbf{x}' = \mathbf{P}'\mathbf{X}$$

$$\mathbf{x} \times \mathbf{P}'\mathbf{X} = \mathbf{0}$$

$$x(\mathbf{p}^{3T}\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^{1T}\mathbf{X}) = 0$$

$$y(\mathbf{p}^{3T}\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^{2T}\mathbf{X}) = 0$$

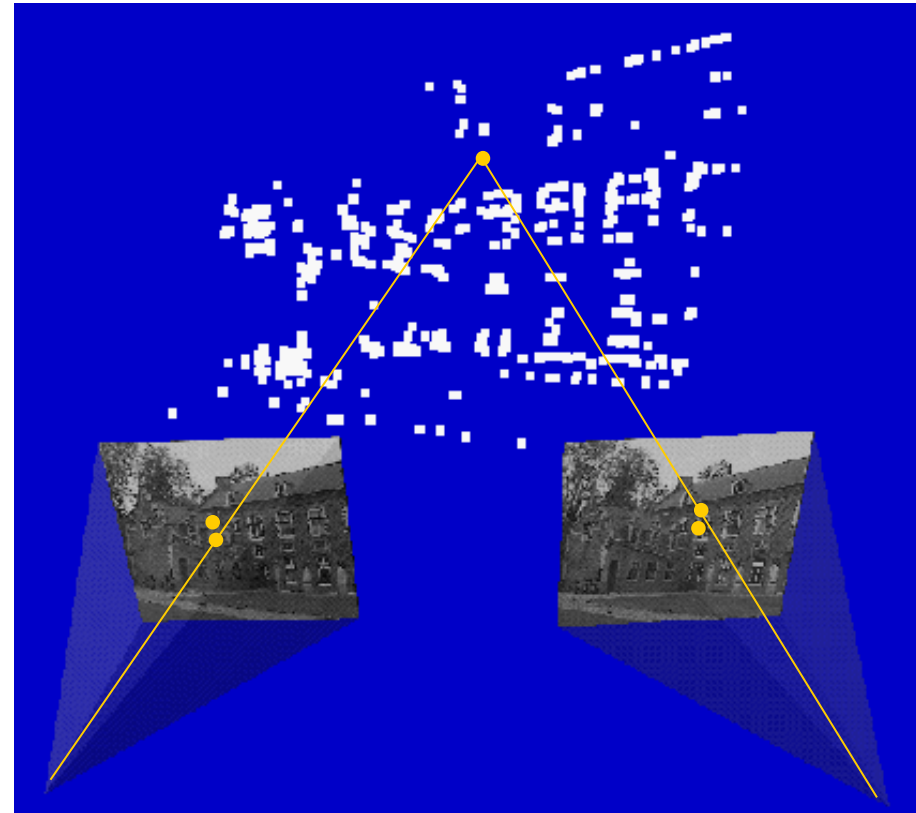
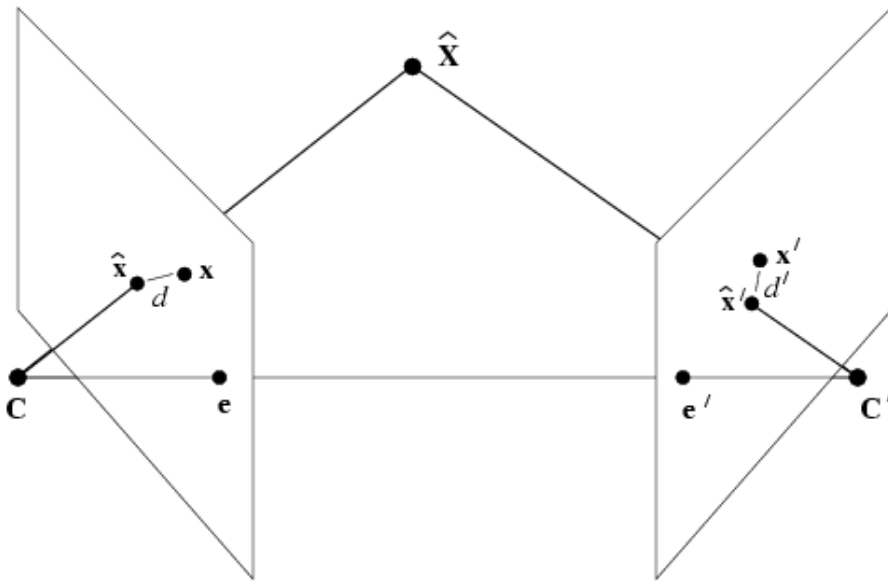
$$x(\mathbf{p}^{2T}\mathbf{X}) - y(\mathbf{p}^{1T}\mathbf{X}) = 0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} xp^{3T} & -p^{1T} \\ yp^{3T} & -p^{2T} \\ x'p^{3T} & -p^{1T} \\ y'p^{3T} & -p^{2T} \end{bmatrix}$$

- Az algebrai hiba minimalizálása nem garantálja a geometriai értelemben vett legjobb megoldást
- Előnye, hogy egyszerűen általánosítható több nézetre

# Geometriai hiba



- **Visszavetítési hiba minimalizálása geometriailag optimális megoldást ad**

- Nemlineáris optimalizálás költségfüggvényeként használható

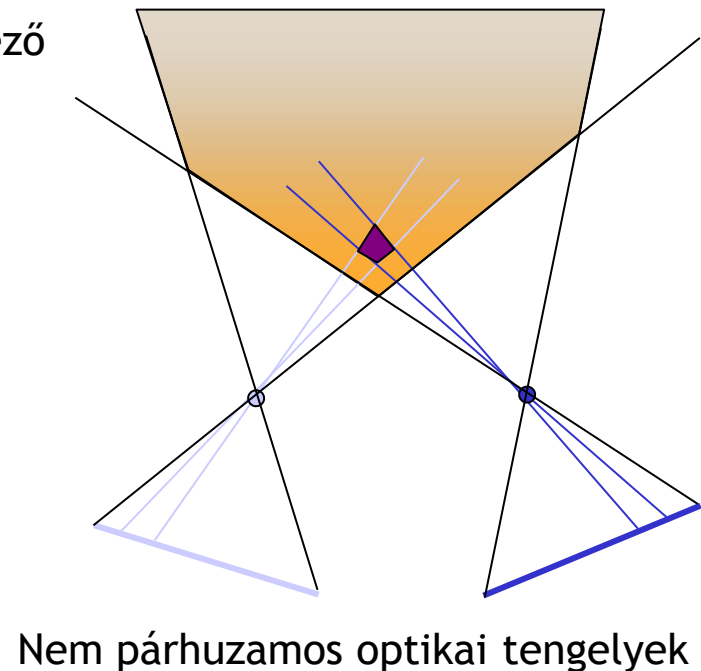
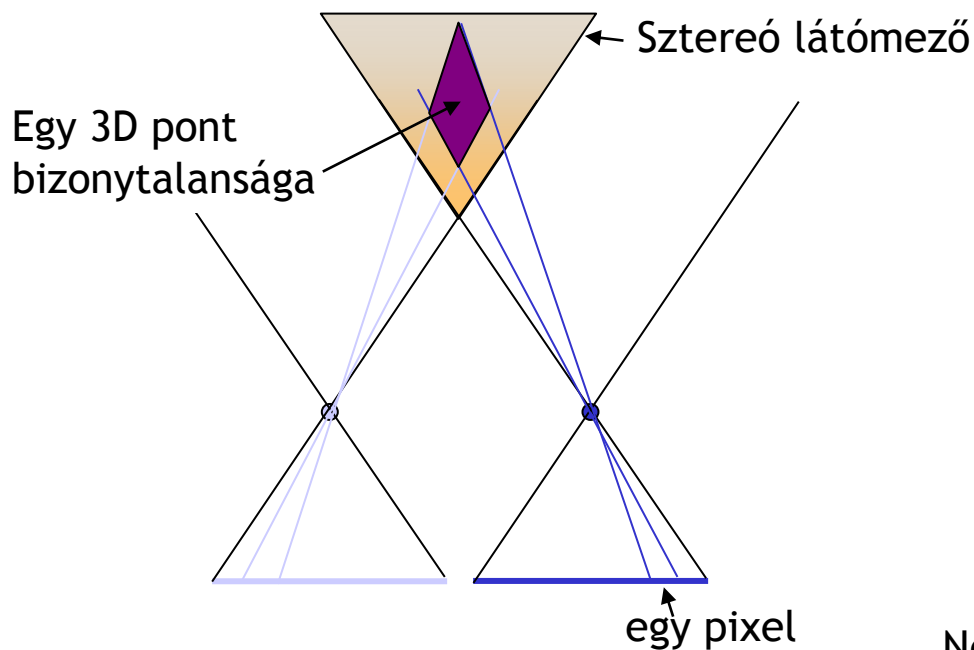
$$d(\mathbf{x}_1, P_1 X)^2 + d(\mathbf{x}_2, P_2 X)^2$$

- Kezdeti érték az algebrai megoldásból (mindkét kameramátrixot kielégítő  $X$ -ből indul az optimalizáló)



# Pontosság és sztereó látómező

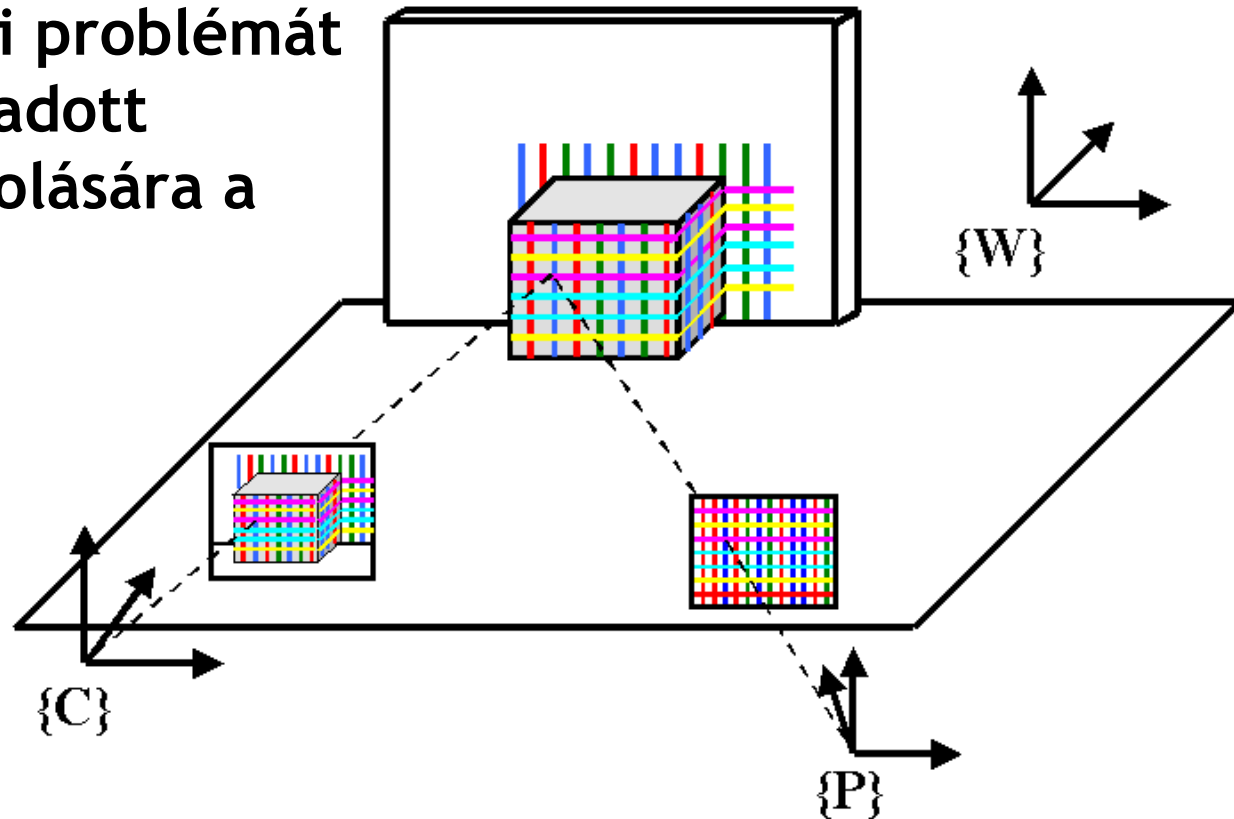
- Bázistávolság növekedésével
  - a látómező szűkül
  - 3D pontosság nő (összenéző kamerák esetén is)
- Bázistávolság csökkenésével megfeleltetések egyszerűbbek, de bizonytalanabb 3D rekonstrukció



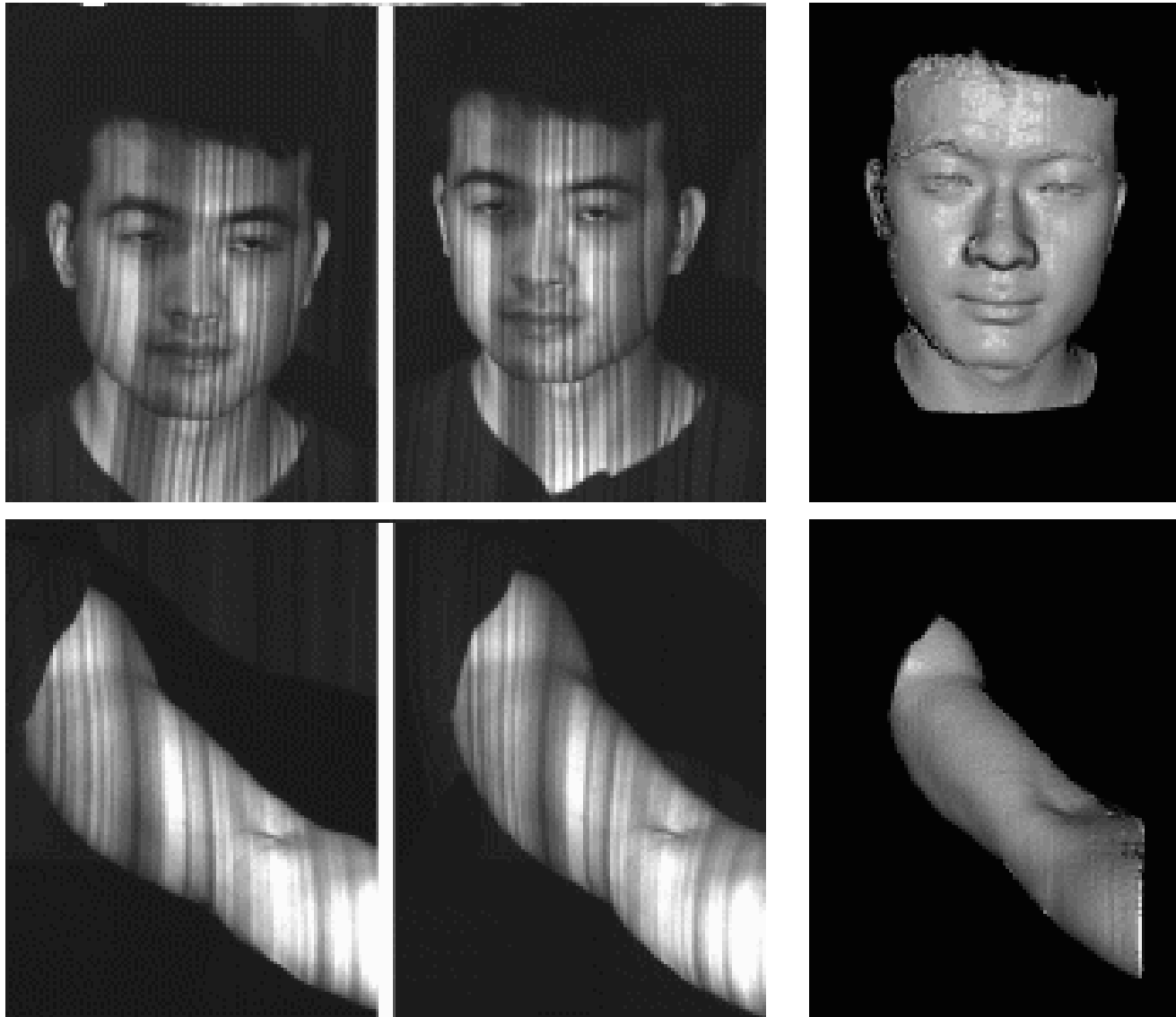
# AKTÍV SZTEREÓ

# Aktív rekonstrukció

- Passzív sztereó: két kamera, adott megvilágítás
- Aktív sztereó: az egyik kamerát cseréljük le egy speciális fényforrásra
  - Ismert mintázatot vetít
- A megfeleltetési problémát redukáljuk egy adott mintázat dekódolására a kamera képen

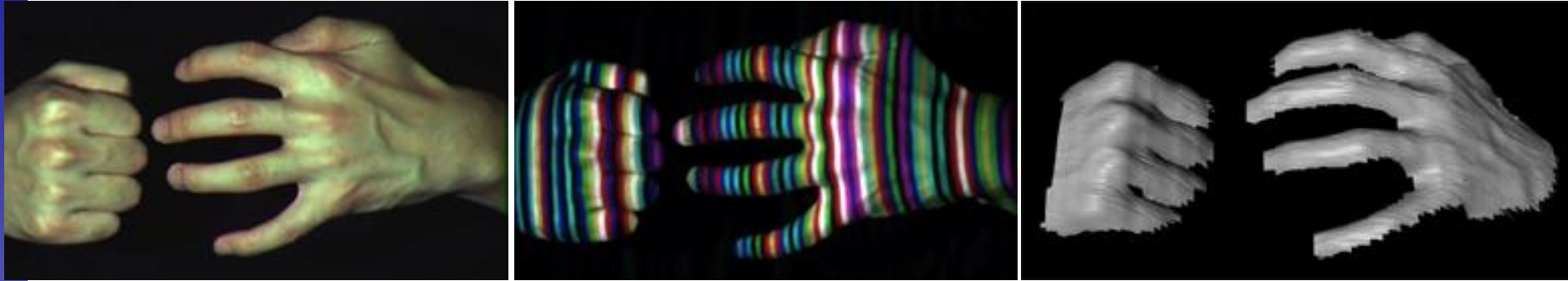


# 4D sztereó (tér-idő)

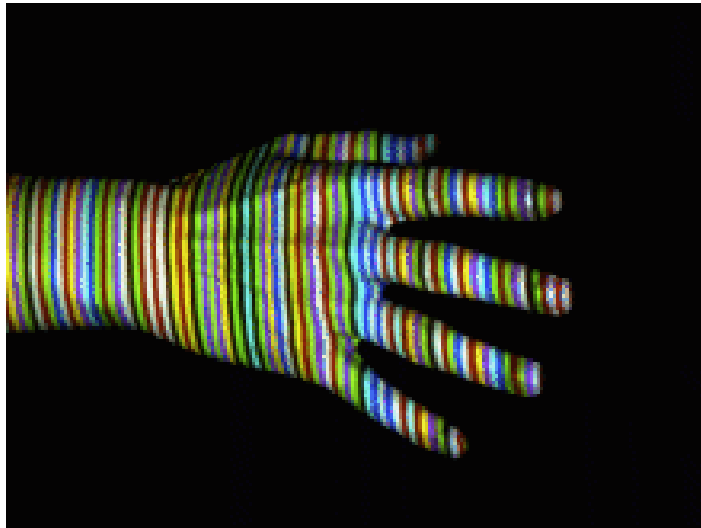


Zhang, Curless and Seitz, CVPR2003

# Real-time színekód

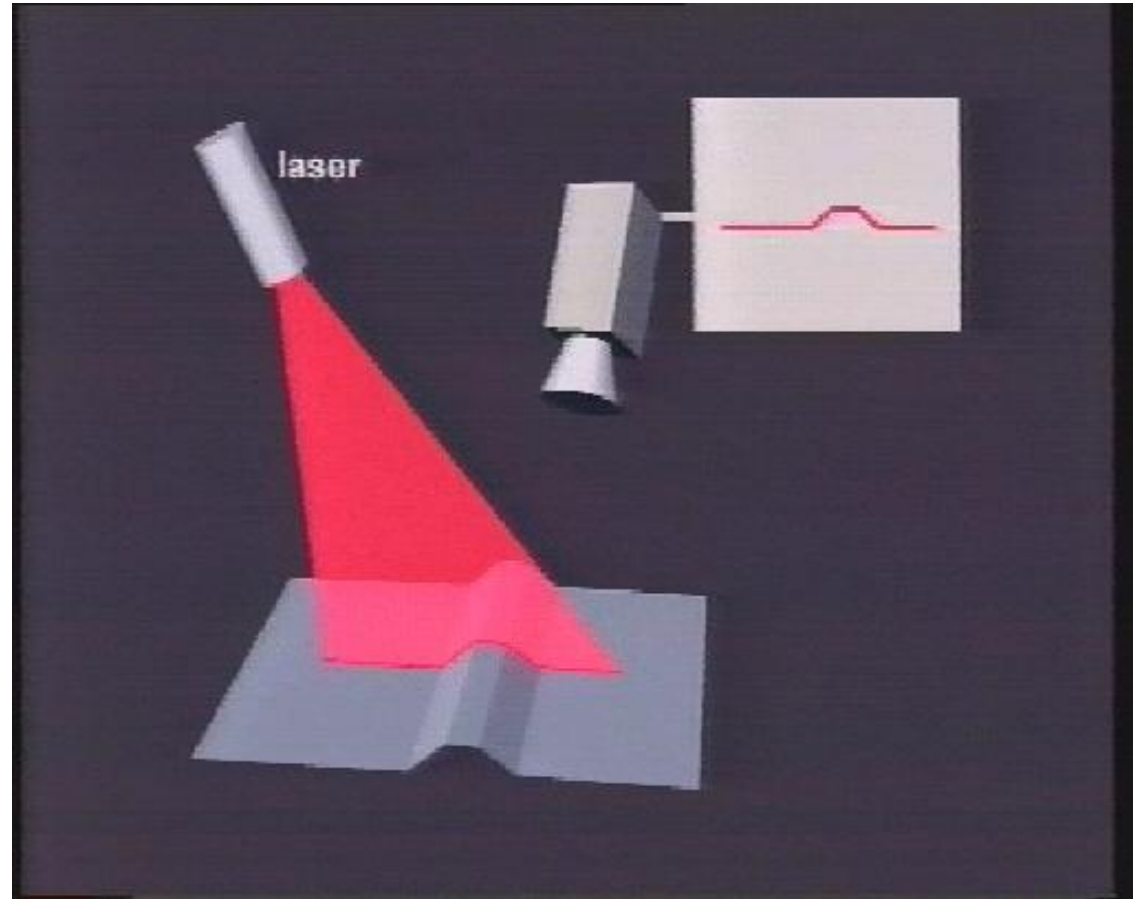


- Komplex alakzatokra is működik



- Valós időben dinamikus alakzatokra is működik

# Működési elv



- Adott fénymintát vetítünk az objektumra
- A kamera képen figyeljük meg a mintázat geometriai torzulását
- Ebből rekonstruáljuk a 3D objektumot

# Egyetlen fénypont, 2D

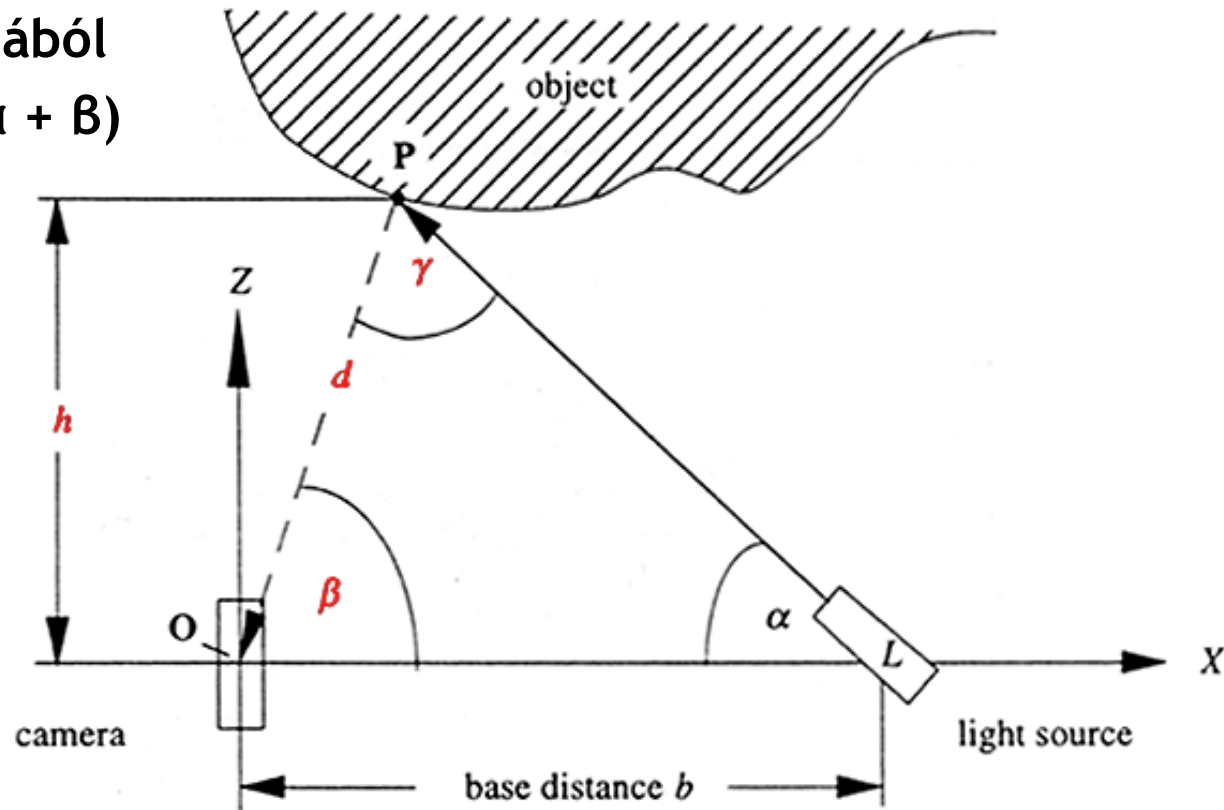
- Koordináták meghatározása:

- $\beta$  meghatározható a vetítési geometriából
- $d = b \cdot \sin(\alpha) / \sin(\alpha + \beta)$
- $X_0 = d \cdot \cos(\beta)$
- $Z_0 = h = d \cdot \sin(\beta)$

- Ismert  $b$  és  $\alpha$

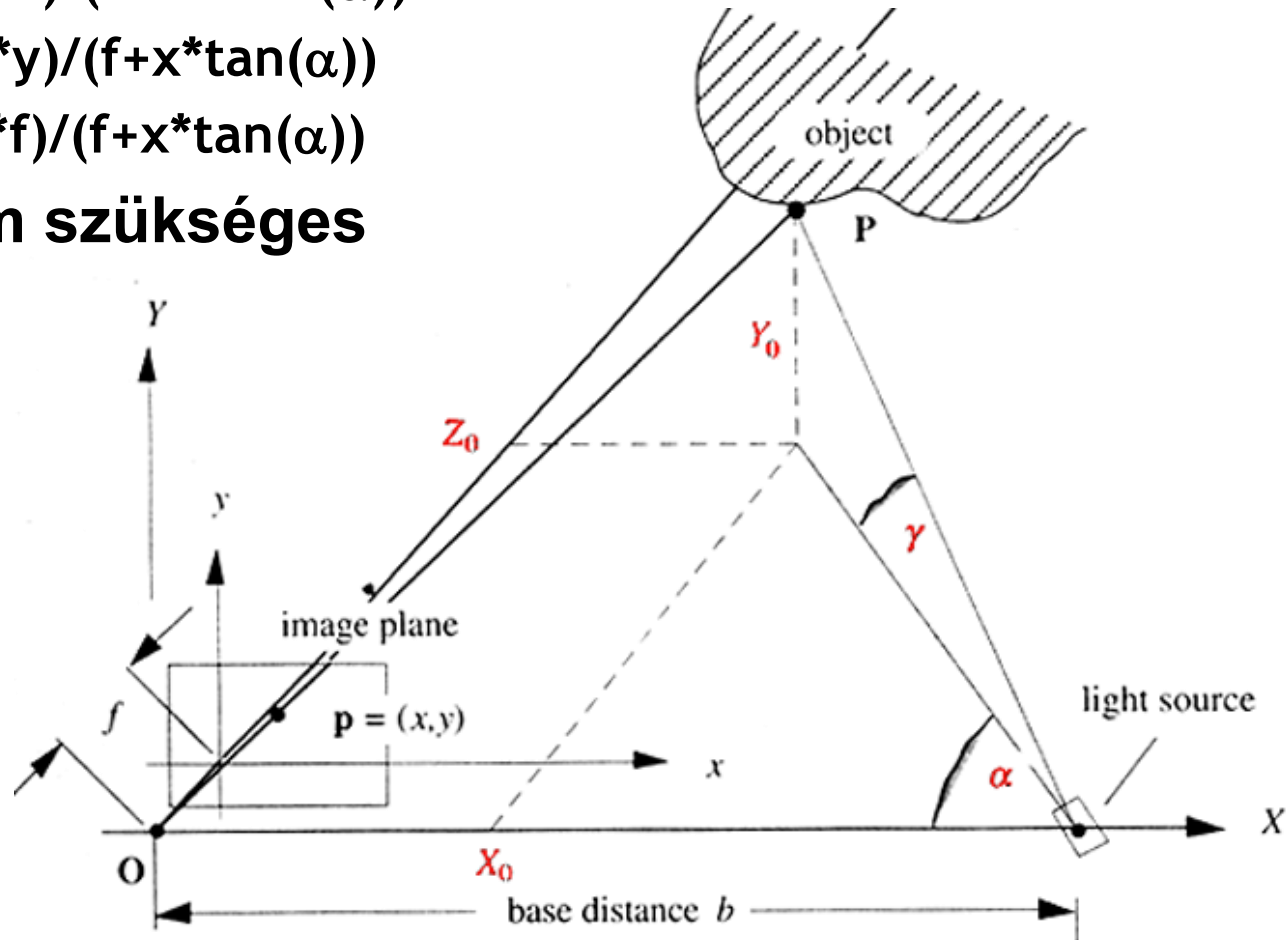
- Adott kép koordináta  $u$  és fókusztáv  $f \rightarrow \beta$  számolható

- Ismert  $b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta \rightarrow d$  számolható



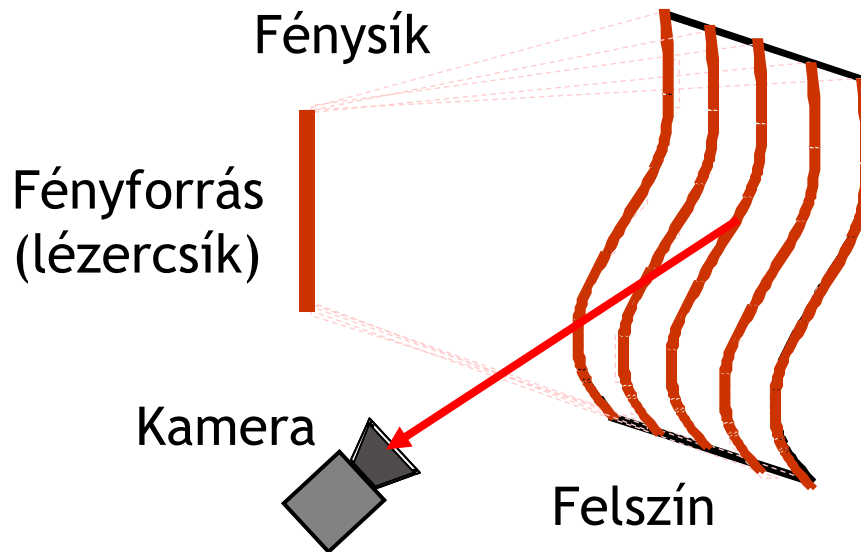
# Egyetlen fénypont, 3D

- Koordináták meghatározhatók  $b$ ,  $\alpha$ ,  $(x,y)$  kép koordináta és  $f$  fókuszs ismeretében:
  - $X_0 = (\tan(\alpha) * b * x) / (f + x * \tan(\alpha))$
  - $Y_0 = (\tan(\alpha) * b * y) / (f + x * \tan(\alpha))$
  - $Z_0 = (\tan(\alpha) * b * f) / (f + x * \tan(\alpha))$
- $\gamma$  ismerete nem szükséges



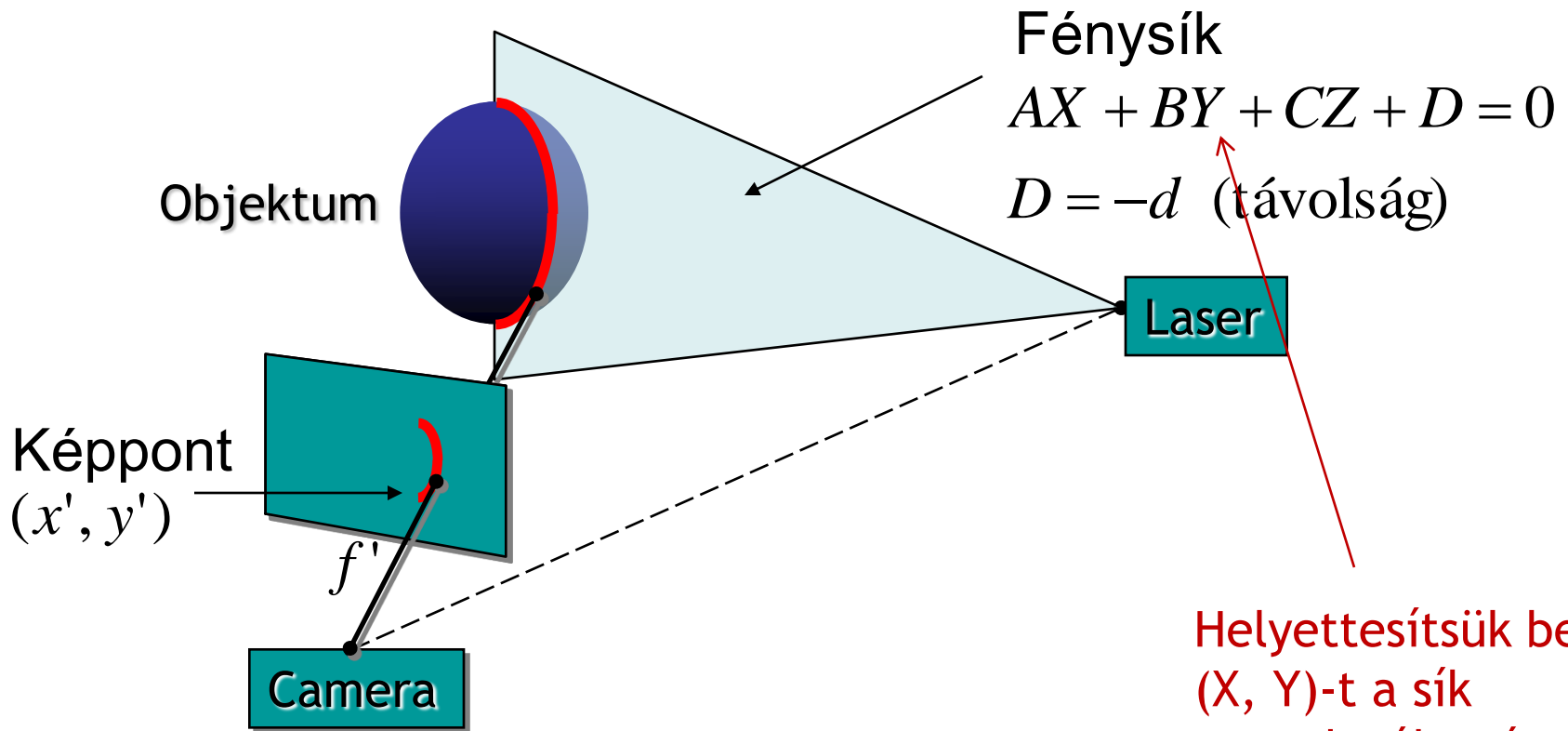


# Fénycsík szkennerek



- **Fénycsík mozgásával a felszín letapogatható**
  - Igen nagy pontosságú 3D rekonstrukció (akár 0,01 mm), de
  - Sok képet kell készíteni → időigényes
  - Nem alkalmas mozgó objektumok leképezésére

# Fénycsík szkennerek háromszögelés



- Mélység a fénycsík-vetítő sugar metszéspontjából:

$$\begin{aligned} X &= x'Z / f' \\ Y &= y'Z / f' \end{aligned} \quad Z = \frac{-Df'}{Ax' + By' + Cf'}$$

Helyettesítsük be  
( $X, Y$ )-t a sík  
egyenletébe és  
így megkapjuk  $Z$ -t

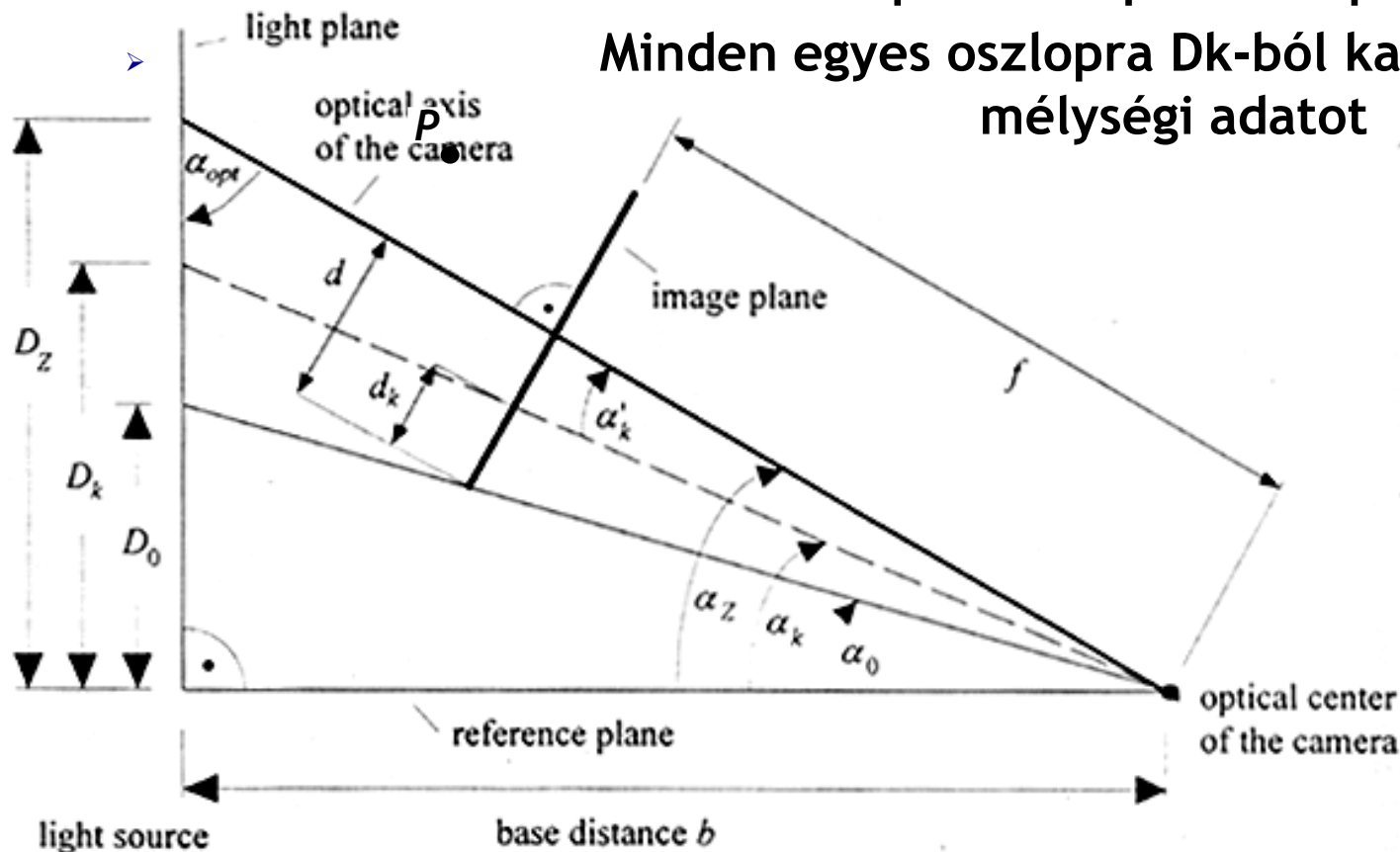
# (mélységi) Kalibráció

- Rögzített fénysík és kamera esetén egy kalibrációs síkot mozgatunk a fénysík mentén

➤ D<sub>0</sub>-ban a képsík bal oldali oszlopát világítjuk meg...

➤ D<sub>z</sub>-ben a képsík középső oszlopát...

➤ Minden egyes oszlopra D<sub>k</sub>-ból kapjuk a 3D mélységi adatot

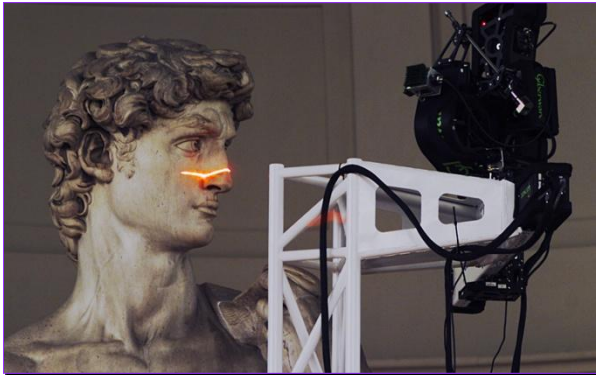


# 3D lézer szkennер



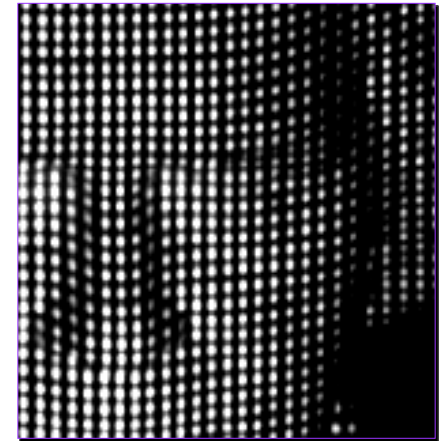
# Hogyan gyorsítható a letapogatás

- Kevesebb képet készítsünk
  - Statikus mintázat
  - Kódolt mintázat (szürkeárnyalat/szín/idő)



Egyetlen csík, több kép

Több csík  
több kép



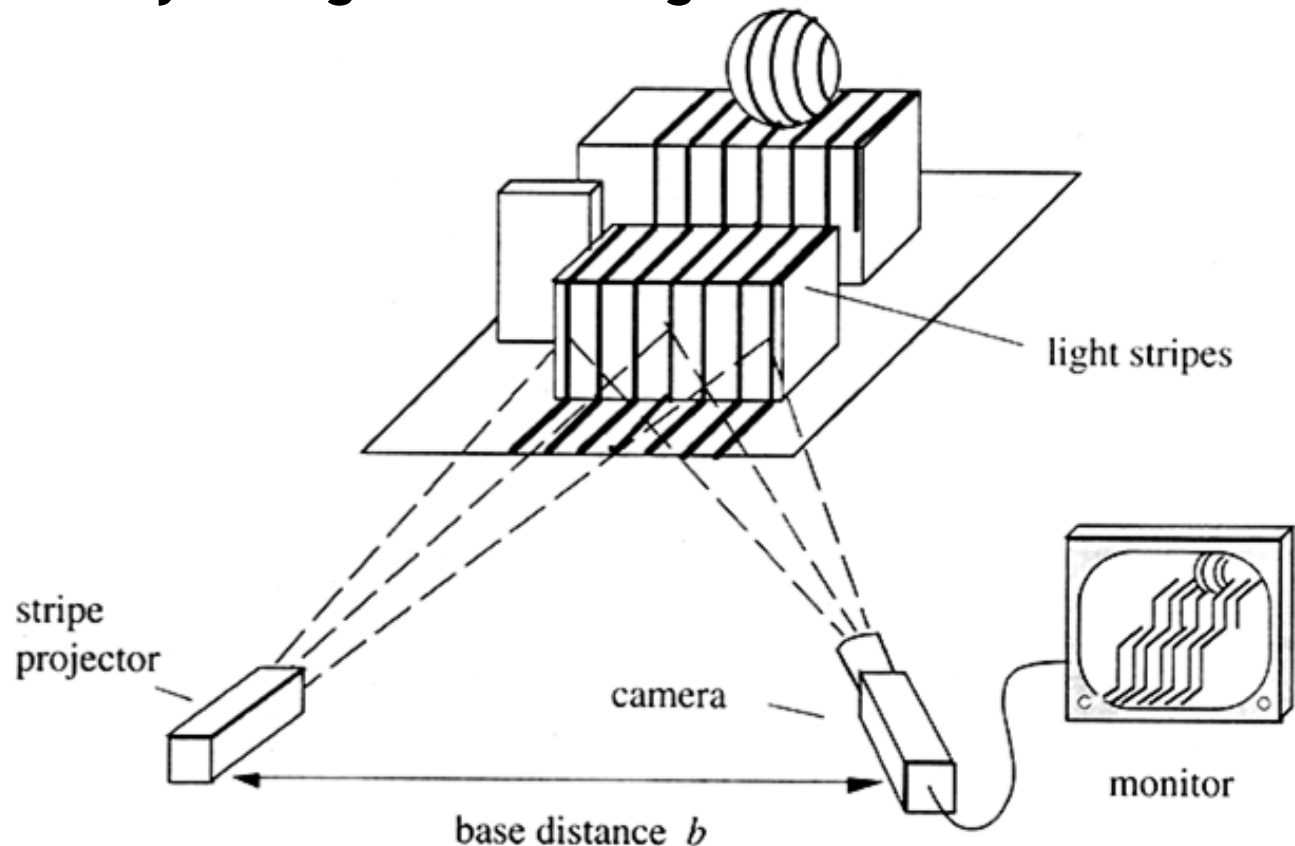
Egyetlen kép

Lassú de robosztus

Gyors de nem robosztus

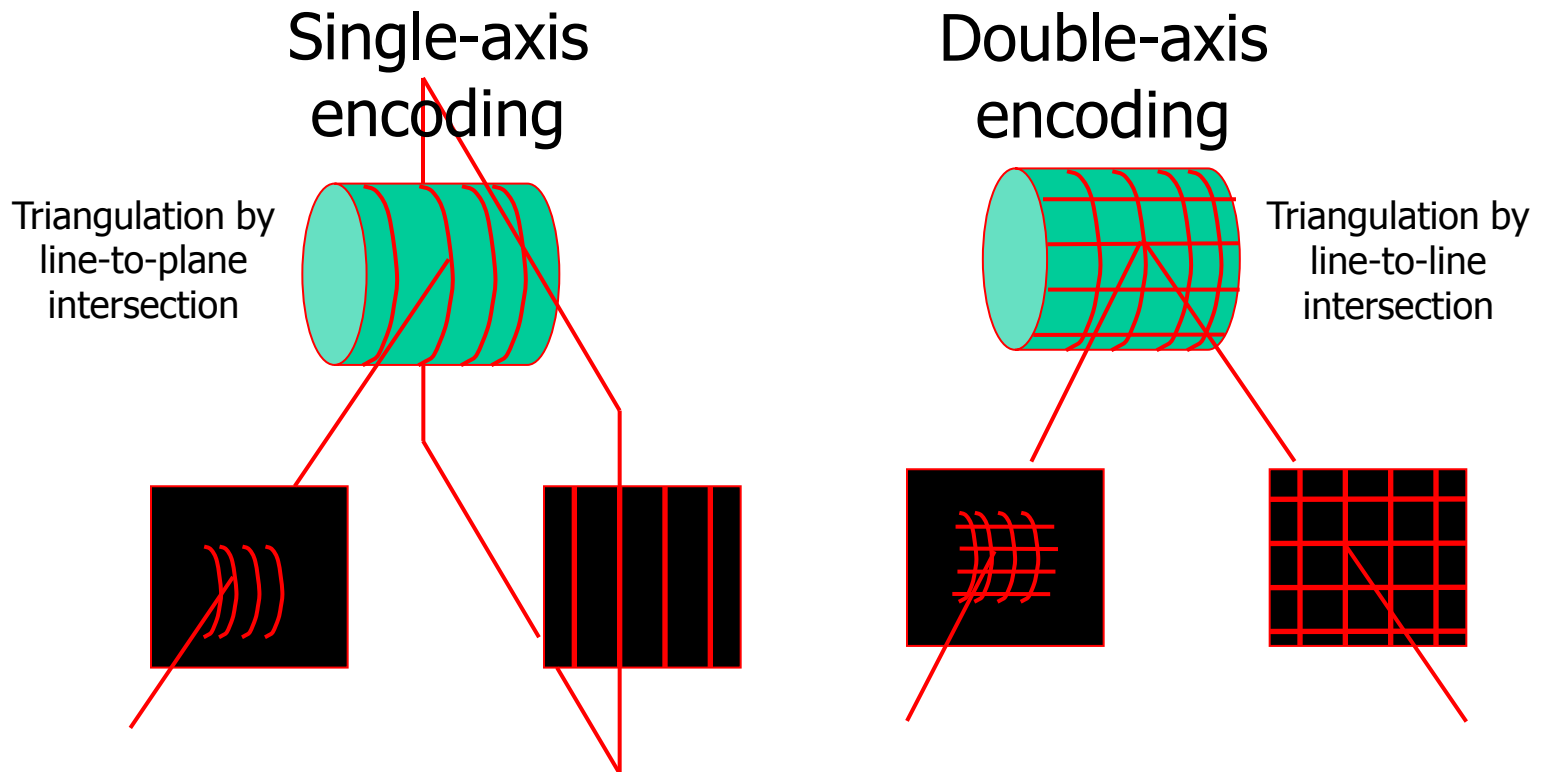
# Több csíkból álló mintázat

- Egyszerre több fénysík, mindegyik egy adott  $\alpha$  szögnek felel meg
  - Kevesebb kép szükséges
  - De melyik csík melyik szögnek felel meg?



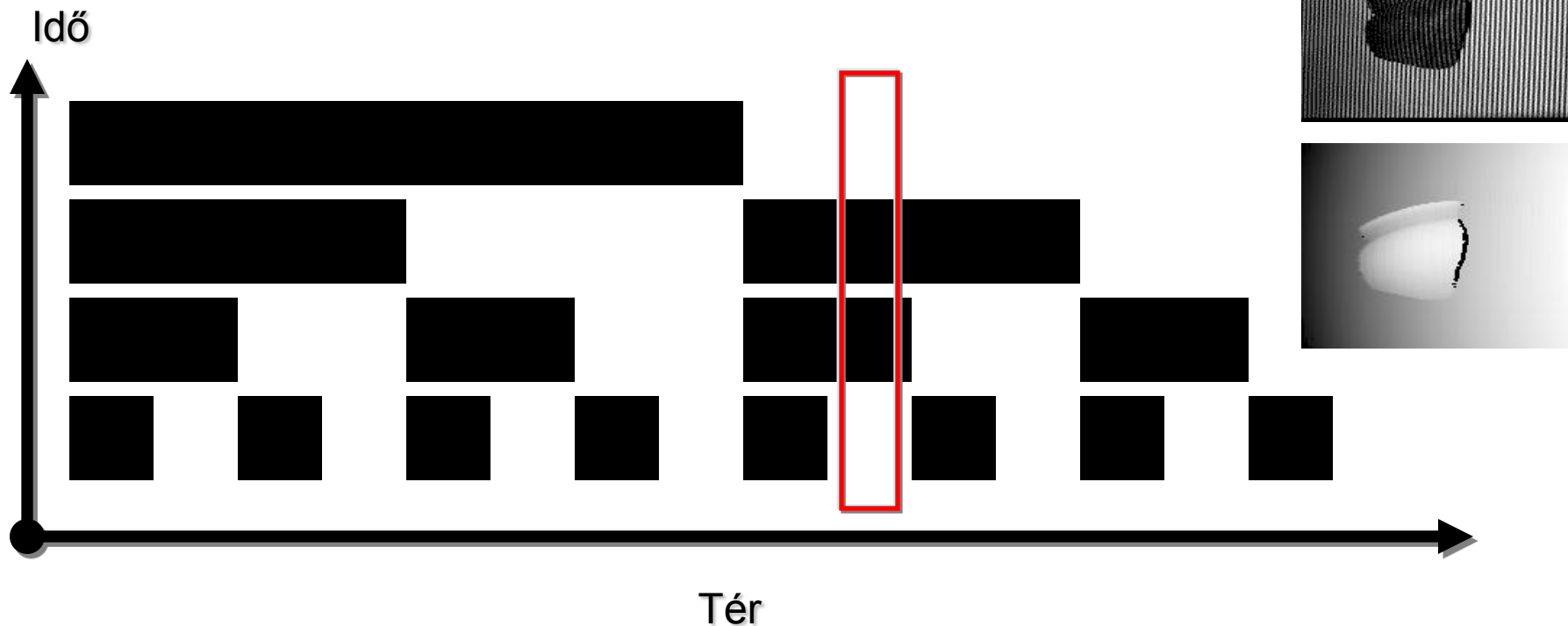
# Mintázat kódolás

- Egy (vonalak) és két (rács) tengely mentén kódolhatunk, ami meghatározza a rekonstrukciót is
  - Dekódolás: a képpontoknak megfelelő mintázatbeli pontok beazonosítása (vagyis a megfeleltetés)



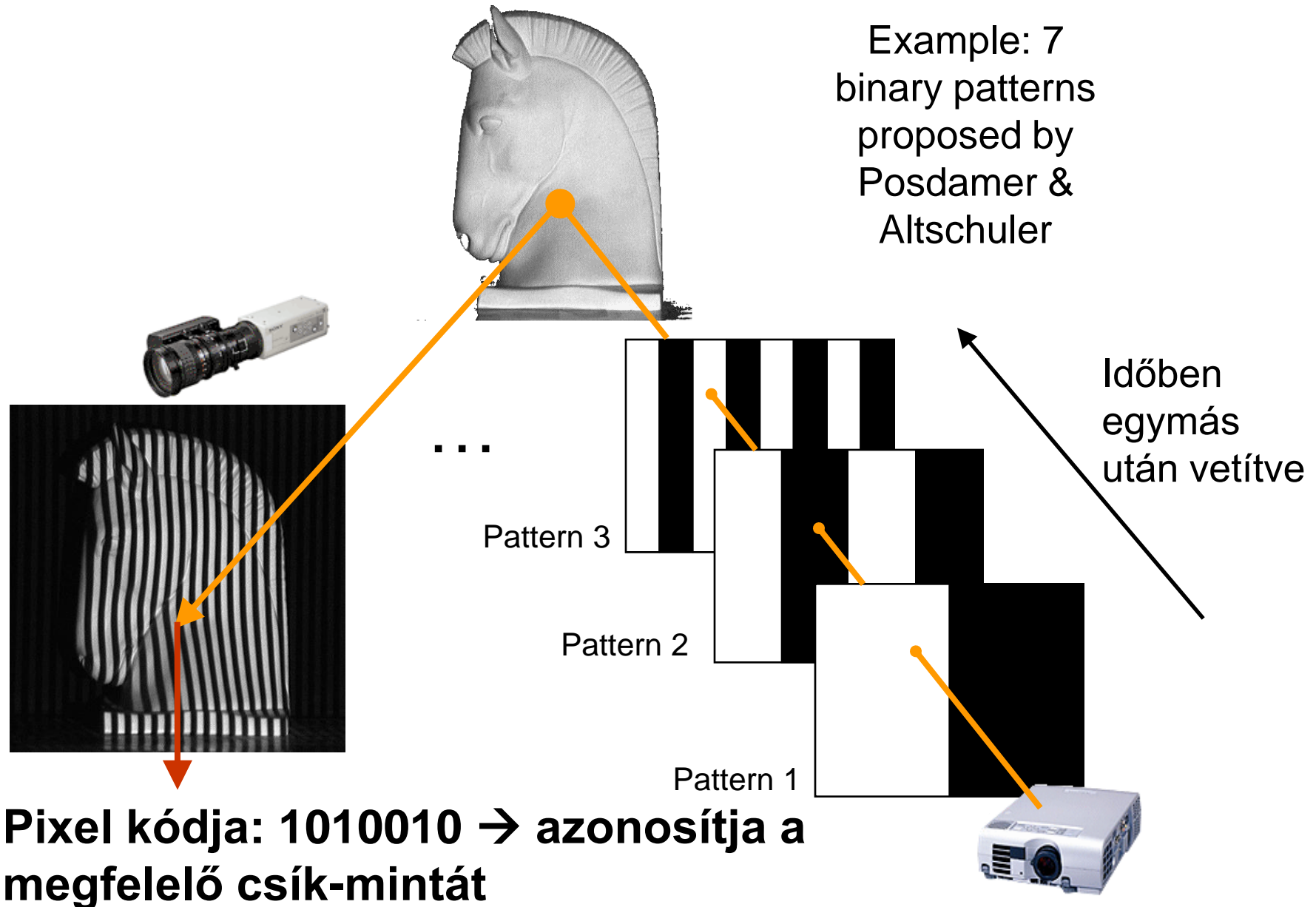
# Időkódolt fénycsíkok

- Minden fénycsíkhoz rendeljünk egy egyedi megvilágítási kódot [Posdamer 82]
- Csíkok száma =  $m^n$  :  $m$  szürkeérték,  $n$  kép





# Bináris kódolás



# Bináris kódolás

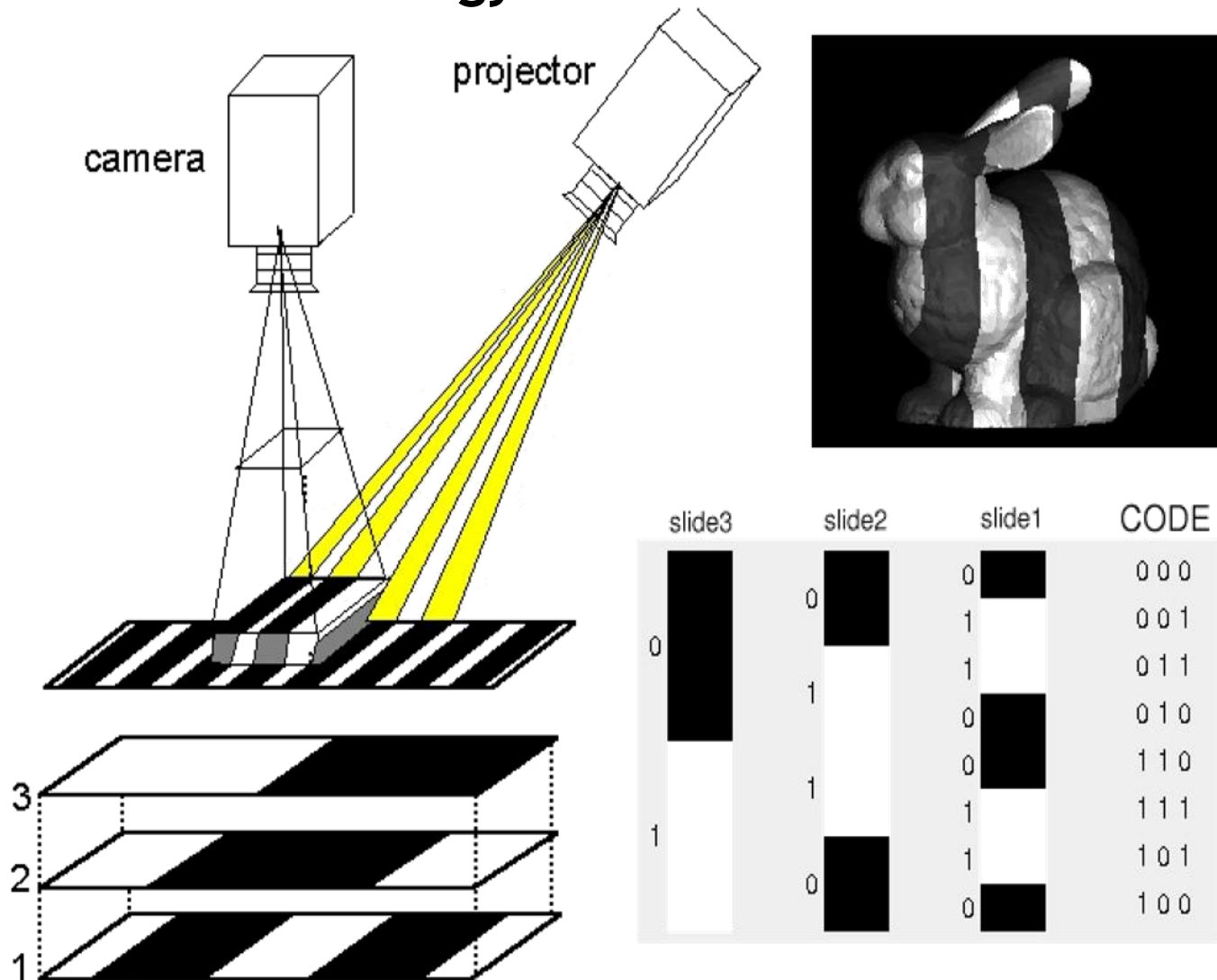
- Csak két megvilágítási szint (fekete=0, fehér=1)
- Minden képpontot az általa észlelt időbeli intenzitás-sorozat azonosít
  - Gray kód használható a robosztussághoz: szomszédos csíkoknak csak 1 bitben kell különbözniük → hibakorrekció lehetséges
- n minta szükséges  $2^n$  csík kódolásához
- Általánosan használt mintázat: időben szélesedő (vagy keskenyedő) csíkok:



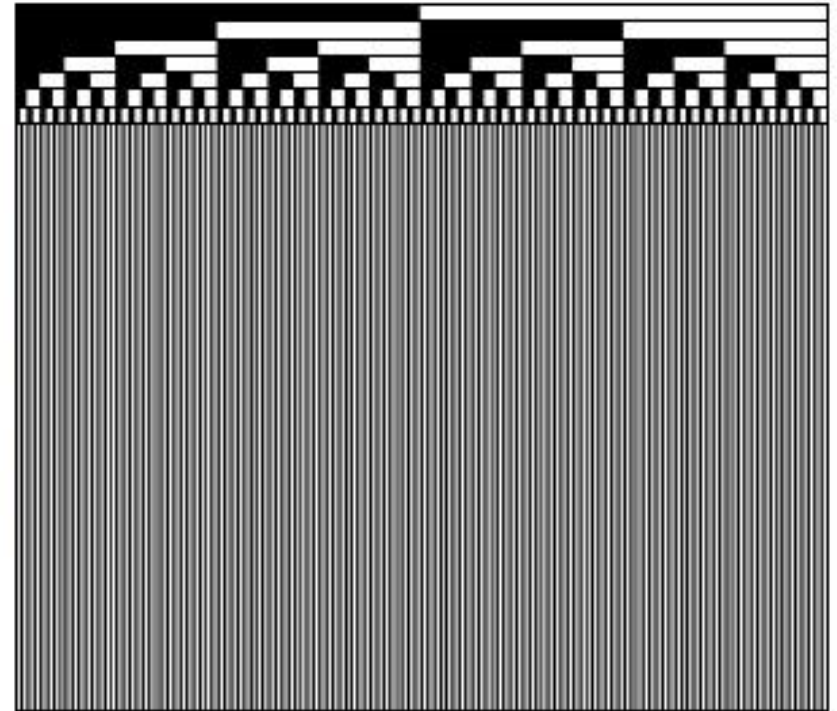
- A mintázatokat könnyű szegmentálni (nagy kontraszt)
- De sok mintázatot kell kivetíteni → csak statikus objektumra használható

# Gray kód

- Szomszédos csíkok egyetlen bitben különböznek



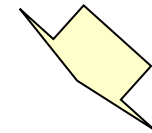
# Bináris kódolás példa



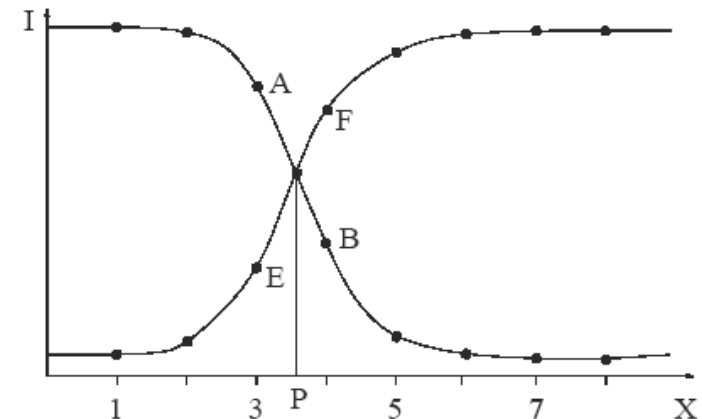
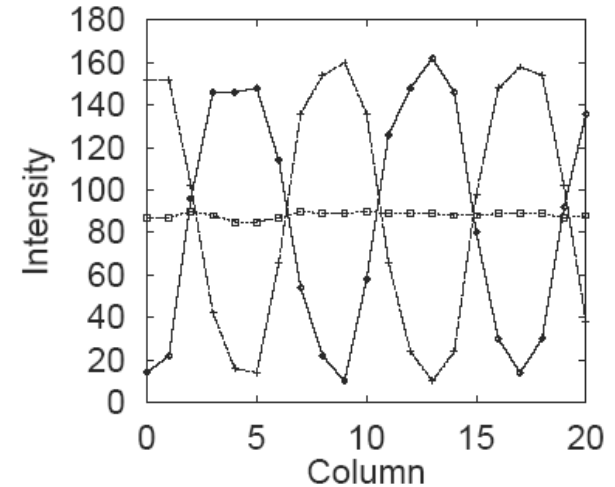
## Binary Image Sequence

- Each image is a bit-plane of the binary code for each projector row/column
- Minimum of 10 images to encode 1024 columns or 768 rows
- In practice, 20 images are used to encode 1024 columns or 768 rows
- Projector/camera(s) must be roughly synchronized

# Csíkok precíz szegmentálása



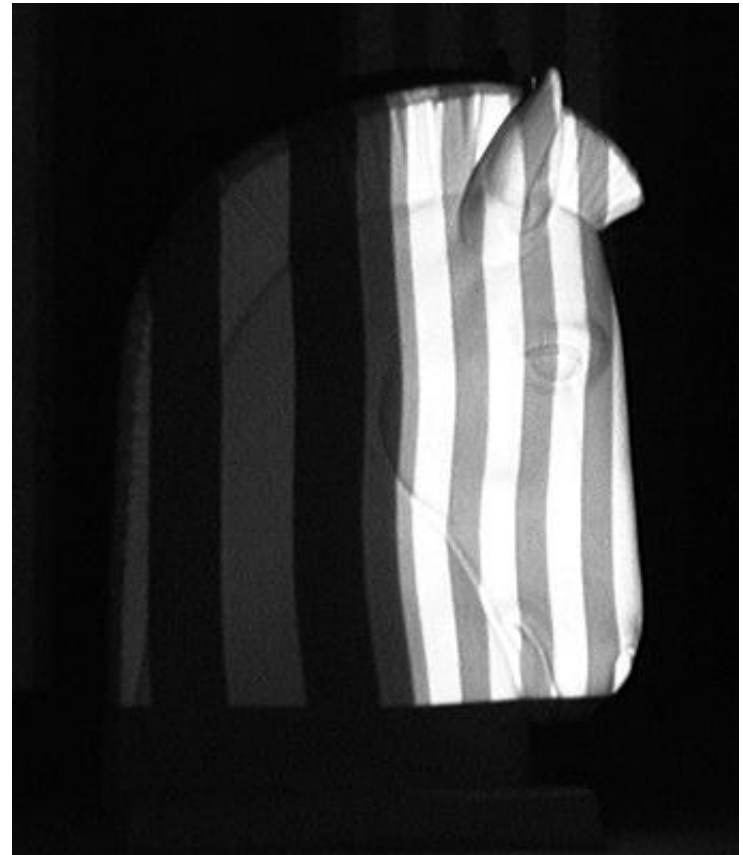
- Szubpixeles pontosság hogyan érhető el?
  - Inverz csíkok vetítése
  - Intenzitásprofilok metszéspontja adja a csíkok szubpixeles határát



# Több szintű kódolás

- Több intenzitásérték használatával csökkenthető a képek száma
  - Azonban a detektálás nehezebb

3 patterns based on a n-ary code  
of 4 grey levels (Horn & Kiryati)  
→ 64 encoded stripes

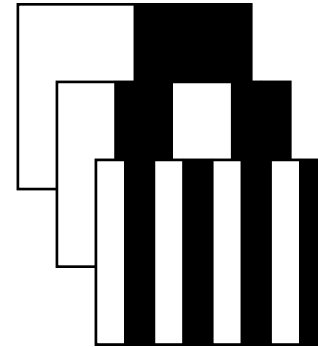


# Gray kód + fázis eltolás

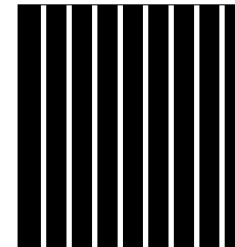
- Egy Gray kódsorozatot vetítünk az objektumra (3 kód – 8 régió)

- Egy periódikus mintázatot (csíkok) vetítünk

- A periódikus mintázatot többször kivetítjük, mindig eltolva egy irányba → shasonlóan egy lézer szkenerhez



3 mintázat – 8 régió



A régiók nélkül nem tudnánk megkülönböztetni az egyes csíkokat



Gühring's line-shift technique



Minden csík mindig ugyanabba a régióba esik

# Struktúrált fény alapú eszközök: 3D szenner

- 3D lézerszkennerek

- 3D laborban található Nextengine 2020i modell
- Makró módban 1mm pontosság kb. 3 perc szkennelési idő
- Forgóasztal+befogogó → komplett 3D modell
- RGB kamera → 3D felszín ÉS textúra.





# Struktúrált fény alapú eszközök: Kinect

- Microsoft Kinect szenzor

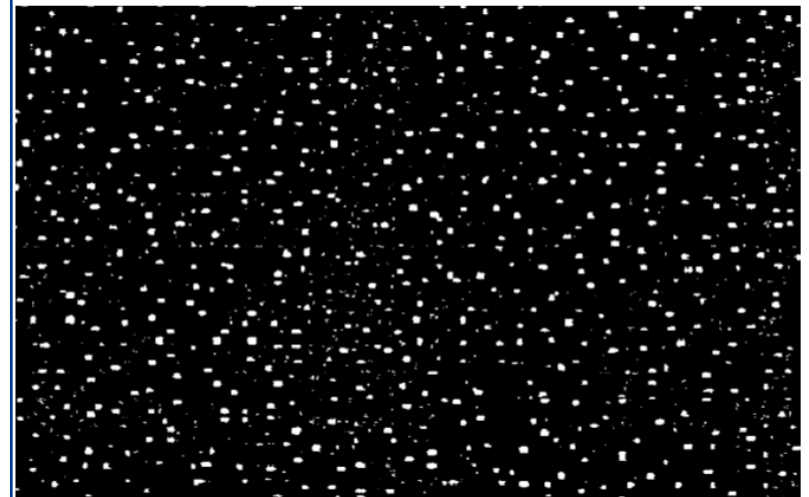


Mélységi térkép



The Kinect uses infrared laser light, with a speckle pattern

Stage 1: The depth map is constructed by analyzing a speckle pattern of infrared laser light



Shpunt et al, PrimeSense patent application  
US 2008/0106746

# Felhasznált anyagok

- Guido Gerig, CS 6320, 3D Computer Vision
  - <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15385-s06/lectures/ppts/lec-17.ppt>
- S. Narasimhan CMU
- Marc Pollefeys UNC
- További források az egyes diákon megjelölve