

# Vizuális helymeghatározás

## A vizuális helymeghatározás alapjai

Lukovszki Csaba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

2015

# Áttekintés

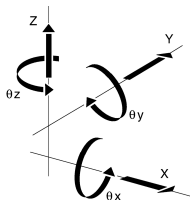
- ▶ Bevezető
  - ▶ Feladat megfogalmazása
  - ▶ Kapcsolódó tématerületek
  - ▶ A képi helymeghatározás modelljei
  - ▶ Funkcionális elemek
- ▶ Képek feldolgozása
  - ▶ Jellemző felismerés
  - ▶ Jellemző leírás
  - ▶ Jellemző párosítás
  - ▶ Jellemző követés
- ▶ A projektív geometria alapjai
  - ▶ Projekció
  - ▶ Lyukkamera vetítési modellje

# A feladat megfogalmazása

- ▶ Az alapvető feladat
  - ▶ Az abszolút, vagy relatív hely, valamint
  - ▶ Orientáció meghatározása
- ▶ Látott képi elemek alapján
  - ▶ Képi elemek felismerése
  - ▶ Leképzés modellezése
  - ▶ A modell alapján a hely és orientáció meghatározása

# Szabadsági fok

DoF (Degree of Freedom)



- ▶ Tetszőleges mozgás, 6 DoF
  - ▶ 3 transláció
  - ▶ 3 rotációs (Roll, Pitch, Yaw)
- ▶ Korlátozott mozgás

# Funkcionális elemek áttekintése

- ▶ Jellemző felismerés (Feature Detection)
- ▶ Jellemző kinyerés, leírás (Feature Extraction, Description)
- ▶ Jellemző párosítás, követés (Feature Matching, Tracking)
- ▶ Hely, helyzet meghatározás (Pose Estimation)
  - ▶ A meghatározás során használhatja a térkép adatbázist
- ▶ Térépítés (Map Building, Feature Registration)
  - ▶ Eredménye a térkép folyamatos fejlesztése
- ▶ Hurok keresés (Loop Closing)
- ▶ Optimalizáció (Optimization)

# Kapcsolódó tématerületek

## SfM

- ▶ SfM (Structure from Motion): adott képhalmaz alapján három dimenziós modell készítése egy tárgyról, helyszínről.

Főbb **szempontok**:

- ▶ 3D struktúra előállítása

A **modell** lehet:

- ▶ Ponthalmaz

- ▶ Fundamentális és esszenciális mátrixok alapján
- ▶ Globálisan, vagy lépésenként
- ▶ Bundle adjustment
- ▶ Eredménye a **térbeli pontok**, valamint a **nézőpontok** helyei és orientációi

- ▶ Poligonhálók, magasabb szintű felületek

- ▶ Megvalósítások

- ▶ Visual SFM
- ▶ Insight3d
- ▶ Bundler
- ▶ Theia
- ▶ ...

# Kapcsolódó tématerületek

## SLAM

- ▶ **SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)**: időben sorrendben érkező képek segítségével a kamera helyének meghatározása, valamint a környezet feltérképezése.

Főbb **szempontok**:

- ▶ Globálisan konzisztens térkép előállítása
- ▶ Hurkok detektálása
- ▶ Változatai
  - ▶ PTAM (Parallel Tracking and Mapping): a feladatok párhuzamosítása, jellemzően a relatív mozgás meghatározás és a térépítés különválasztásával.
  - ▶ DTAM (Dense Tracking and Mapping): térépítés és relatív mozgás meghatározás sűrű pontok hálójából.
- ▶ Megvalósításai
  - ▶ EKF SLAM
  - ▶ Monocular SLAM (MonoSLAM)
  - ▶ FastSLAM
  - ▶ ...

# Kapcsolódó tématerületek

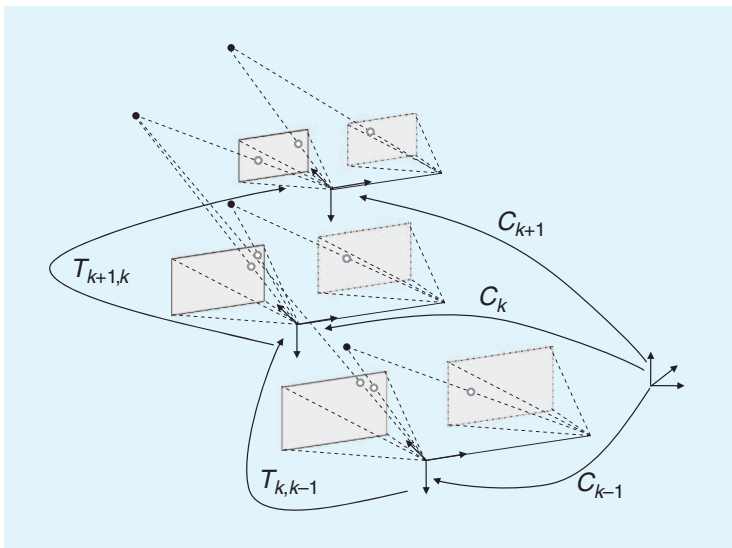
VO

- ▶ **Visual Odometry**: a kamera pontos elmozdulásának meghatározása
- ▶ Odometria: legkorábbi felhasználási területük a marsjárók mozgásának pontos becslése Főbb **szempontok**:
  - ▶ Nagyon pontos elmozdulás
  - ▶ Valósídejűség
- ▶ Megvalósításai
  - ▶ MSCKF (Multi State Constrained Kalman Filter)
  - ▶ SWF (Sliding Window Filter)



# A képi helymeghatározás modelljei

## Modell



# Modell

- ▶ A kamera
  - ▶  $\mathbf{C}_k$ : A kamera pozíciója és orientációja a  $k$ -dik helyen
  - ▶  $\mathbf{T}_{k,l}$ : A  $k$  és  $l$  pozíciók közötti transzformáció (amennyiben  $l = k - 1$  a képek egymást követik időben)

$$\mathbf{C}_n = \mathbf{C}_0 \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_i$$

- ▶ A tér pontjaira
  - ▶  $\mathbf{X}_j$ : a tér egy 3D pontjának koordinátái
  - ▶  $\mathbf{x}_j$ : a tér 3D pontjának leképzése a 2D képsíkra

# A képi helymeghatározás modelljei

## 2D-2D

Különböző nézőpontokból készített képek ( $\mathbf{x}_{k,j}$ ) alapján kell megbecsülnünk a kamerák közötti transzformációt ( $\mathbf{T}_{k,l}$ -t)

- ▶ Fundamentális, vagy esszenciális mátrixok becslése alapján
- ▶ Folyamata
  - ▶ Kép kinyerése ( $\mathbf{I}_j$ )
  - ▶ Jellemzők kinyerése és párosítása ( $\mathbf{x}_{k,j} \leftrightarrow \mathbf{x}_{l,j}$ )
  - ▶ Esszenciális, vagy fundamentális mátrix számítása
  - ▶ Elforgatás ( $\mathbf{R}_{k,l}$ ), valamint a transláció ( $\mathbf{t}_{k,l}$ ) meghatározása, majd ezekből  $\mathbf{T}_{k,l}$ .
- ▶ Probléma
  - ▶ A skála meghatározása

# A képi helymeghatározás modelljei

## 3D-3D

Minden egyes nézőpontban rendelkezésünkre áll a kép jellemző pontjainak 3D koordinátái ( $\mathbf{X}_{k,j}$ ), a kamerák közötti transzformáció ( $\mathbf{T}_{k,l}$ ) meghatározása ezek alapján történik.

- ▶ A mélység meghatározásának lehetőségei
  - ▶ Sztereó kamera segítségével
  - ▶ Mélységérzékelővel
  - ▶ Mono kamera segítségével (ez csak elméleti)
- ▶ A transzformáció meghatározása

$$\mathbf{T}_k = \arg \min_{\mathbf{T}_k} \sum_i \|\mathbf{X}_{k,j} - \mathbf{X}_{l,j}\|$$

# A képi helymeghatározás modelljei

## 3D-2D

Az elmozdulás meghatározása a képi 2D jellemzők ( $\mathbf{x}_{k,j}$ ), valamint a rendelkezésre álló 3D jellemző pontok ( $\mathbf{X}$ ) alapján történik.

- ▶ A transzformáció meghatározása
  - ▶ Az ( $\mathbf{x}_{k,j} \leftrightarrow \mathbf{X}_{l,j}$ ) párok megkeresése
  - ▶ A 3D jellemzők visszavetítése  $\mathbf{T}_k$  transzformáció alapján ( $\mathbf{x}_{l,j} \leftarrow \mathbf{X}_{l,j}$ )

$$\mathbf{T}_k = \arg \min_{\mathbf{T}_k} \sum_i \|\mathbf{x}_{k,j} - \mathbf{x}_{l,j}\|^2$$

## Képek feldolgozása

Az egyes képek azonosítása helyhez rendelhető információi alapján. A képek feldolgozásának **célja** többféle lehet:

- ▶ A kép azonosítása
- ▶ A képen szereplő területek, objektumok azonosítása
- ▶ Képek, vagy képeken szereplő területek, illetve objektumok összehasonlítása

A képeket a jellemzőik alapján vizsgáljuk:

- ▶ Globális jellemzők
  - ▶ Világosság
  - ▶ Elmosódottság
  - ▶ Színesség, ...
- ▶ Lokális jellemzők
  - ▶ Sarok (Corner)
  - ▶ Folt (Blob)
  - ▶ Él (Edge), ...

# Jellemzők detektálása

## Feature Detection

A jellemzők detektálása során a (lokális) jellemzőket derítjük fel, majd azon jellemzők helyét határozzuk meg.

Jellemzők detektorok:

- ▶ Sarkok detektor (Corner detector)
- ▶ Folt detektor (Blob detector)
- ▶ Él detektor (Edge detector)

## Harris detektor

A legrégebbi jellemző detektor.

Az elv a kép autokorrelációján alapul ( $w(x, y)$  Gauss súlyfüggvény):

$$E_{AC}(\Delta u) = \sum_i w(x_i) [I_0(x_i + \Delta u) - I_0(x_i)]^2 \quad (1)$$

Alkalmazva a Taylor sorfejtést:

$$E_{AC}(\Delta u) \approx \Delta u^T \mathbf{A} \Delta u \quad (2)$$

Ahol az  $\mathbf{A}$  az  $x$  ponthoz tartozó autokorrelációs mátrix:

$$\mathbf{A}(x) = w * \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$



# Harris detektor

A jellemző jósága:

- ▶ Elméletben az  $\mathbf{A}$  mátrix inverze
- ▶ Gyakorlatban minél nagyobb a legkisebb sajátérték, a pont annál jellemzőbb
- ▶ Sarkossági mérték (Harris és Stephens eredeti javaslata):

$$R = \det(A) - \alpha * \text{trace}(A)^2 = \lambda_0 * \lambda_1 - \alpha(\lambda_0 + \lambda_1)$$

$$\alpha = 0.06$$

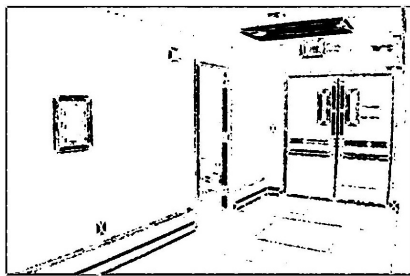
- ▶  $R \approx 0 (\lambda_1 \approx \lambda_2)$ : egy lapos régiót találtunk
- ▶  $R < 0 (\lambda_1 \gg 0 \text{ vagy } \lambda_2 \gg 0)$ : egy élet találtunk
- ▶  $R > 0 (\lambda_1 \gg 0 \text{ s } \lambda_2 \gg 0)$ : egy sarkot találtunk
- ▶ Egy küszöböt elérő jellemzőket választjuk ki.

# Harris detektor

## Példa



(a) Tesztkép



(b) Élek kiemelése a sajátértékekből

## SIFT detektor

A SIFT (Scalable Invariant Feature Transform) első olyan jellemző felismerő algoritmus, mely jellemzői invariánsak a

- ▶ skálázásra,
- ▶ forgatásra,
- ▶ fényviszonyok változására.

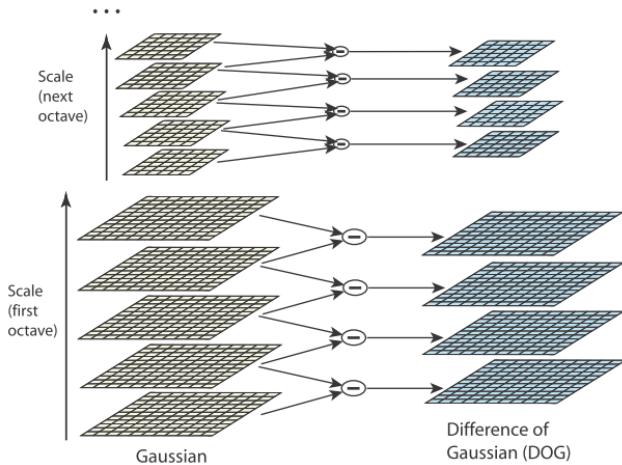
A megoldás alapja a relatív skála-térhez képest megvalósított mintavételezés.

- ▶ Gauss elmosás: dimenzióként alkalmazzuk a szomszédos intenzitásokra a Gauss függvényt.

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (4)$$

- ▶ DoG (Difference of Gaussian): Simított képi szomszédok ( $\sigma = \sqrt{2}, 2, 2\sqrt{2} \dots$ ) különbsége
- ▶ Oktávok: képek újra mintavételezése 1.5 pixelközönként (4 szomszédos minta lineáris kombinációja)

## SIFT detektor



## SIFT detektor

A skála-tér függvények minimum és maximum meghatározása:

- ▶ 8 szomszéddal való összehasonlítás
- ▶ Amennyiben minimális (maximális) megismételjük a piramis alacsonyabb szintjén
- ▶ Ha a szomszédhoz képest alacsonyabb, vagy magasabb, akkor a következő szinten megismételjük

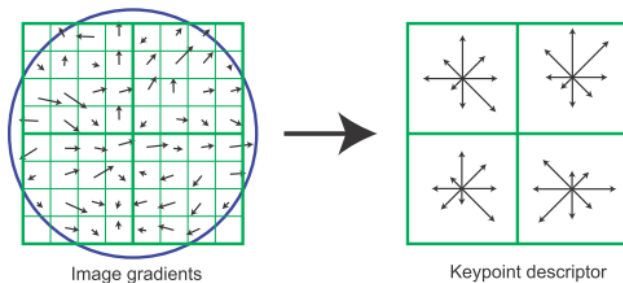
A megtalált jellemző pontokra meghatározzuk a gradiens mértékét és orientációját

$$M_{ij} = \sqrt{(A_{ij} - A_{i+1,j})^2 + (A_{ij} - A_{i,j+1})^2} \quad (5)$$

$$R_{i,j} = \arctan^2(A_{ij} - A_{i+1,j}, A_{i,j+1} - A_{ij}) \quad (6)$$

Az eredmény az adott skálában meghatározott képi gradiens.

## SIFT detektor



ábra: SIFT leíró

## SIFT detektor példa

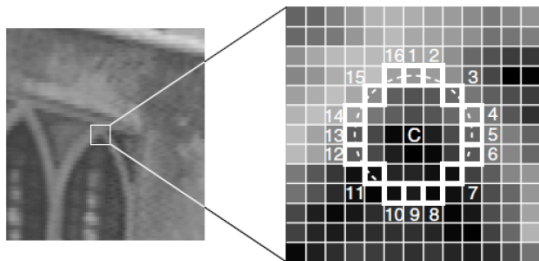


ábra: SIFT példa

## FAST detektor

A FAST (Features from Accelerated Segment Test) az egyszerűsége és gyorsasága emeli ki a lokális jellemző detektorok közül.

- ▶ 16 pixelből álló kör vizsgálata a vizsgált pixel körül
- ▶ Amennyiben legalább 12 egymást követőnek jelentősen (egy küszöbérték felett) eltér az intenzitása a középponttól, akkor a középső pixel kulcspontnak lesz kijelölve.
- ▶ Gyorsítási lehetőségek: először csak az 1,9,5,13 sorszámú pontok vizsgálata





# ORB detektor

Az ORB (Oriented FAST and Rotated Brief) a FAST továbbfejlesztett változata.

FAST hátrányai:

- ▶ Nem veszi figyelembe az orientációt
- ▶ Nemcsak sarkot, de éleket is megtalál

Működése:

- ▶ FAST futtatása
- ▶ Harris alapján sorba rendezés, majd a kevésbé sarokszerűek eldobása

# Jellemzők detektálása

Követelmények, tulajdonságok

	Corner Detector	Blob Detector	Rotation Invariant	Scale Invariant	Affine Invariant	Repeatability	Localization Accuracy	Robustness	Efficiency
Haris	x		x			+++	+++	++	++
Shi-Tomasi	x		x			+++	+++	++	++
FAST	x		x	x		++	++	++	++++
SIFT		x	x	x	x	+++	++	+++	+
SURF		x	x	x	x	+++	++	++	++
CENSURE		x	x	x	x	+++	++	+++	+++

# Jellemzők leírása, kinyerése

## Feature Description, Extraction

pont és környezetének kinyerése egyszerű, de pontos leíró jelleggel az azonosíthatóság és az összehasonlíthatóság érdekében

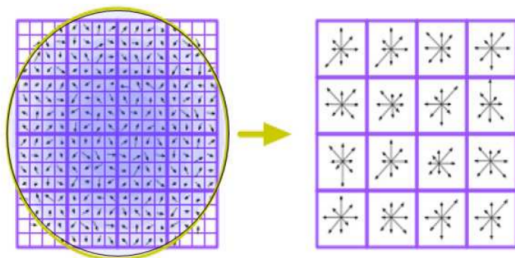
- ▶ Felmerülő probléma: két kép nem ugyanolyan:
  - ▶ Távolság
  - ▶ Képrögzítés tulajdonsága (pl. felbontás)
  - ▶ Eltérő nézőpont, orientáció
  - ▶ Eltérő környezeti hatások (pl. megvilágítás)
  - ▶ Zaj
  - ▶ ...
- ▶ A leírónak invariánsnak kell lennie
  - ▶ Eltolás
  - ▶ Forgatás
  - ▶ Skálázás
  - ▶ Egyéb affin transzformációk
  - ▶ Megvilágítási viszonyok
  - ▶ Egyéb zajok

# Jellemzők leírása, kinyerése

- ▶ Többféle leíró lehetséges
  - ▶ intenzitás
  - ▶ Korreláció
  - ▶ Bináris leírók
  - ▶ Skálázott leírók
  - ▶ ...
- ▶ Legjellemzőbb leírók
  - ▶ SSD (Sum of Squared Differences)
  - ▶ NCC (Normalized Cross Correlation)
  - ▶ ORB (Oriented FAST and Rotated Brief)
  - ▶ BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features)
  - ▶ BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoint)
  - ▶ FREAK (Fast Retina Keypoint)
  - ▶ SIFT (Scale Invariant Feature Transform)

## SIFT leíró

ábra: Szöghisztogram



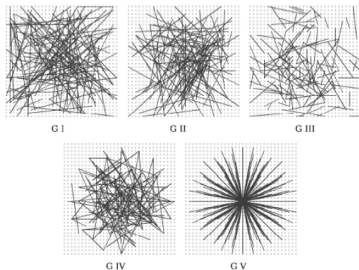
Minden jellemző ponthoz:

- ▶ 4x4 darab hisztogram
- ▶ 8-8 értékkel
- ▶ Összesen 128 elemű vektor

## BRIEF leíró

- ▶ Bináris leíró (256, vagy 128 bites leíró)
- ▶ A jellemző körül választott pontpárokra intenzitás vizsgálat

$$\tau(p; x; y) := f(x) = \begin{cases} 1 & \text{ha } p(x) < p(y) \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (7)$$



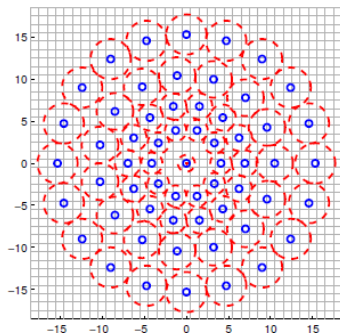
A BRIEF érzékeny a zajokra → simítás

# ORB leíró

- ▶ Az ORB a BRIEF továbbfejlesztett változata
  - ▶ Forgatásra invariáns leíró készítése
- ▶ Megoldás
  - ▶ A vizsgálatot 12 fokként elvégezzük és lementjük
  - ▶ A hatékony működéshez olyan detektor szükséges, ami visszaadja az orientációt is

## BRISK leíró

- ▶ Az ORB és a BRIEF továbbfejlesztett változata
  - ▶ Forgatás invariancia általánosítása
- ▶ Megoldás
  - ▶ Hosszú párok a sablonból: orientáció automatikus meghatározása
  - ▶ Rövid párok a sablonból: a jellemző leírása





# Társítás (Feature Matching)

Két kép jellemző pontjai között a párok megtalálása az adott jellemző leíró alapján.

- ▶ Metrika definiálása
- ▶ A társítás működése
  - ▶ jellemző leírók kinyerése
  - ▶ leírók párosítása adott metrika alapján
  - ▶ hibás párok szűrése

# Brute-force párosítás

- ▶ Távolság két leíró között
  - ▶ Valós vektor alapján: Többdimenziós térben távolság
  - ▶ Bináris leíró esetében: Hamming távolság
- ▶ Működés
  - ▶ Minden az egyik képen minden jellemzőt a másik kép minden jellemzőjével, majd az lesz pár ahol a legnagyobb
    - ▶ Egyirányú
    - ▶ Kölcsönös

# FLANN párosítás

Fast Library for Approximate Nearest Neighbours

Sok dimenziós térben való gyors keresés

- ▶ Lehetőségek
  - ▶ Hierarchikus K-közép fa, prioritásos keresés
  - ▶ Többszörös sztochasztikus K-d fa
- ▶ Nincs egyértelműen jó megoldás
- ▶ FLANN:
  - ▶ a jellemző vektorok egy részéből megállapítjuk a használandó algoritmust
  - ▶ a jellemzők párosítását a kiválasztott algoritmussal végezzük

# Párok szűrése

- ▶ Leíró távolságok aránya alapján, NDDR (Nearest Neighbour Distance Ratio)
  - ▶ A két legközelebbi szomszéd választása
  - ▶ Akkor pár, amennyiben a távolságokra igaz  $\frac{d_1}{d_2} < \lambda$ .
- ▶ Geometria párszűrés
  - ▶ A két kép geometriai összefüggése alapján egyáltalán lehetnek-e párok.
- ▶ Elmozdulás alapján
  - ▶ Időben közeli képek esetében a párok közötti távolság maximalizálása.
- ▶ Homográfia alapján
- ▶ Epipoláris megkötés alapján

# Jellemző pontok nyomonkövetése

- ▶ Egymás utáni képek esetében
  - ▶ Relatív kis elmozdulás
  - ▶ A környezet jelentéktelen megváltozása
- ▶ Hatékonyság növelése
  - ▶ Jellemző képpontok keresése
  - ▶ Párosítás
  - ▶ Geometriai megkötések kiaknázása
- ▶ Megoldások
  - ▶ Optical-flow (Optikai áramlás)
  - ▶ Lucas-Canade módszer

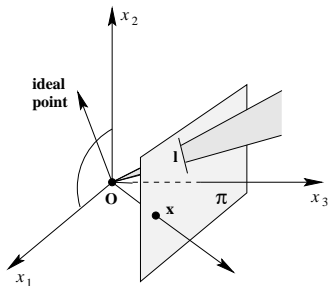
# A projektív geometria alapjai

Az  $n$  dimenziós projektív geometria  $n$  dimenziós pontokat  $n + 1$  dimenzióban ír le.

## ▶ Pont leírása

- ▶  $\pi : x_3 = 1$  sík
- ▶ Tetszőleges  $x$  pont: az  $O$  és  $x$  pontokon átmenő egyenes egyenlete:

$$ax + by + c = 0$$



## Pont homogén koordinátái

- ▶ Egyenes leírása:

$$(a, b, c) \leftrightarrow (ka, kb, kc), k \neq 0$$

- ▶ Pont az egyenesen:

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = 0$$

- ▶ A pont homogén koordinátás alakja:

$$(kx, ky, kz)$$

# Projektív geometria tulajdonságai

- ▶ Két egyenes  $l, l'$  metszéspontja
  - ▶  $\mathbf{x} = l \times l'$ , hiszen
  - ▶  $l(l \times l') = l'(l \times l') = 0$
- ▶ Két párhuzamos egyenes
  - ▶  $l : (a, b, c), l' : (a, b, c')$
  - ▶ Metszéspontjuk:  $(b, -a, 0)$
  - ▶ A párhuzamosak a végtelenben találkoznak!

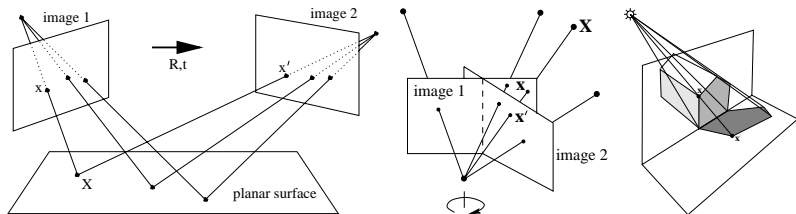


# Sík projektív transzformációja

A projektív transzformáció (homográfia) egyeneseket egyenesekbe visz át.

$$\mathbf{x}' = h(\mathbf{x}) = \mathbf{H}\mathbf{x}$$

A középpontos vetítés homográfiát valósít meg.



# A sík projektív geometriája

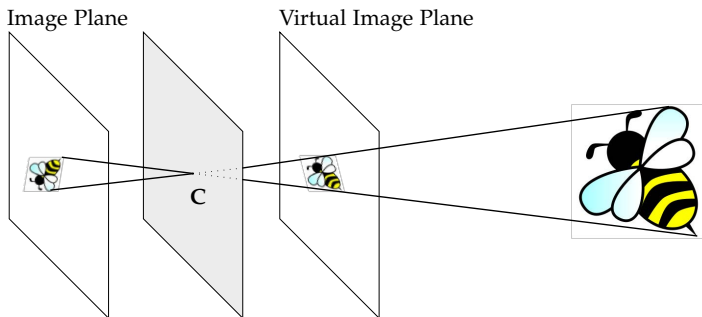
- ▶ Síkbéli pont homogén koordinátái
  - ▶  $\mathbf{x} = (x, y) \in \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3) \in \mathbb{P}^2$
  - ▶  $x = \frac{X_1}{X_3}, y = \frac{X_2}{X_3}$
- ▶ Transzformációk
  - ▶ **Azonossági transzformáció**, 3 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ Hasonlósági, 4 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} s\mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ Affin, 6 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ **Projektív transzformáció**, 8 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{v}^T & v \end{bmatrix}$

# A tér projektív geometriája

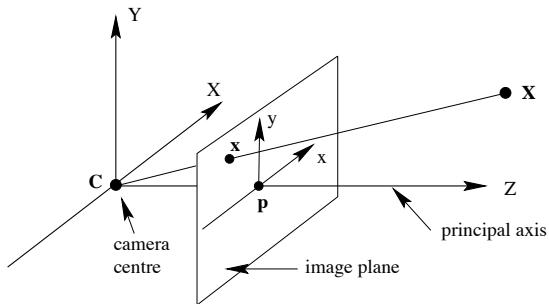
- ▶ Térbeli pont homogén koordinátái
  - ▶  $\mathbf{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4) \in \mathbb{P}^3$
  - ▶  $x = \frac{X_1}{X_4}, y = \frac{X_2}{X_4}, z = \frac{X_3}{X_4}$
- ▶ Transzformációk
  - ▶ **Azonossági transzformáció**, 6 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ Hasonlósági, 7 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} s\mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ Affin, 12 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$
  - ▶ **Projektív transzformáció**, 15 szabadsági fok,  $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{v}^T & v \end{bmatrix}$

# Kamera modell

- ▶ Napjainkban elterjedt egyszerű CCD kamera modellje: [Lyukkamera](#)
  - ▶ CCD: Vetítési sík
  - ▶ Kamera lencse: egyszerű pont
- ▶ Közepontos vetítés



## Középpontos vetítés



A kamera által megvalósított leképezés (projekció):

$$x = PX$$

# Kamera projekciós mátrix

- ▶ A projekció  $\mathbb{P}^3 \mathbb{P}^2$  leképzést valósít meg
- ▶ A projekciós mátrix ( $\mathbf{P}$ ) egy  $3 \times 4$  méretű

$$\mathbf{P} = \mathbf{KR} [\mathbf{I} | -\mathbf{C}] \quad (8)$$

- ▶  $\mathbf{C}$ : Kamera középpontjának helye (transzláció)
- ▶  $\mathbf{R}$ : Kamera helyzete (rotáció)
- ▶  $\mathbf{K}$ : Kamera kalibrációs mátrix

# Kamera kalibrációs mátrix

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f\alpha_x & s & x_0 \\ 0 & f\alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ▶  $f$ : fókusz távolság
  - ▶ A kamera középpontjának és a vetítő sík távolsága
- ▶  $\alpha_x, \alpha_y$ : pixel arány
  - ▶ A kamera pixelek oldalának aránya  $\frac{\alpha_y}{\alpha_x}$
- ▶  $x_0, y_0$ : Főpont eltolás
  - ▶ A pixel koordináta-rendszer origója nem a kép középpontjához van rögzítve.
- ▶  $s$ : ferdeség
  - ▶ A pixelek nem feltétlenül derékszögűek