

Vizuális helymeghatározás

Relatív helymeghatározás

Lukovszki Csaba¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

2015

Összefoglaló

- ▶ Bevezetés
 - ▶ Követelmények
 - ▶ Megvalósítási lehetőségek
- ▶ Szenzorok modellezése
 - ▶ Gyorsulásmérő
 - ▶ Giroszkóp
 - ▶ Kamera
- ▶ Inerciális, szűrő alapú relatív helymeghatározás
 - ▶ Propagáció
 - ▶ Update
 - ▶ MSCKF

Bevezetés

Relatív helymeghatározás képi alapon

Követelmények

- ▶ Quality: pontosság
- ▶ Consistency: az elért pontosság és a valós helyzet mennyire függ össze
- ▶ Scalability: hosszú távú használat (időben és térben)
- ▶ Accesibility: megvalósíthatóság, alacsony költségű, széles körű megvalósíthatóság
- ▶ Efficiency: hatékonyság, valós idejű felhasználás kiegészítő eszközök használata nélkül
- ▶ Robustness: különféle környezetekben, kültér, beltér, környezeti változások, mozgó objektumok

Relatív helymeghatározás képi alapon

Modell

- ▶ Mobil eszköz
 - ▶ 6DoF
 - ▶ Szenzorok
 - ▶ Kamera
 - ▶ Nagy számítási kapacitás
 - ▶ Nagy tárolási kapacitás
- ▶ Képi elemekben gazdag környezet

Relatív helymeghatározás képi alapon

Megvalósítási lehetőségek

- ▶ Térmaterületek
 - ▶ SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
 - ▶ VO (Visual Odometry)
- ▶ Megoldási lehetőségek
 - ▶ Geometriai megoldások
 - ▶ Képpárok között
 - ▶ Jellemző detekció, leírás, társítás, nyomon követés
 - ▶ Kulcs-kép alapú megoldások (a skálázhatóság és pontosság növelésének érdekében)
 - ▶ Epipoláris geometria felhasználása
 - ▶ Szűrő alapú megoldások
 - ▶ Mozgás modellezés a propagáció alatt
pl. EKF-SLAM, MonoSLAM
 - ▶ Inerciális szenzorok használata propagációhoz
pl. Inerciálisan támogatott EKF-SLAM, MSCKF

Szenzorok modellezése

Mobil szenzorok modellezése

▶ Szenzorok

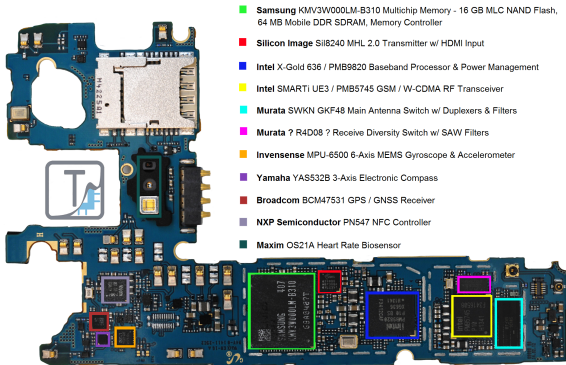
- ▶ Gyorsulásmérő
- ▶ Giroszkóp
- ▶ Kamera

▶ Modellezés

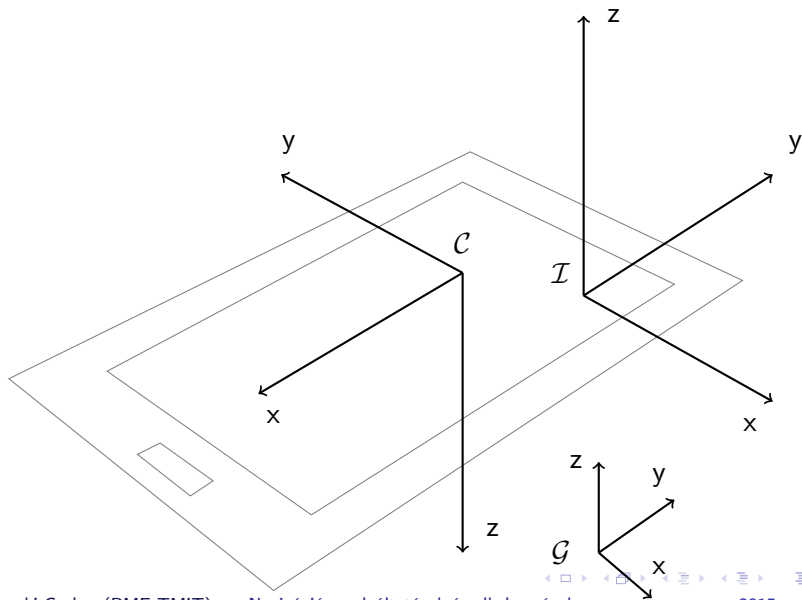
- ▶ A matematikai modellek csak közelítik a valós működést
- ▶ A pontos modell a működés megértésén alapul
- ▶ Minél pontosabb a modell, annál pontosabb a működés
- ▶ "A mérnök műzsája az empíria"

Inertial Measurement Unit

- ▶ Integrált megoldás (gyorsulás érzékelő, giroszkóp)
- ▶ Pontos, jól modellezhető
- ▶ Elterjedt megoldás



Vonatkoztatási rendszerek



Vonatkoztatási rendszerek

Jelölési és transzformációs konvenciók

- ▶ Pozíció:
 - ▶ $\mathbf{p}_G$: pozíció a globális koordináta rendszerben
 - ▶ $\mathbf{p}_{C,G}$: a C koordináta rendszer a globális koordináta rendszerben
- ▶ Orientáció:
 - ▶ $\mathbf{q}_I, \mathbf{R}_I$: az IMU koordináta rendszerében értelmezett orientáció, rotáció
 - ▶ $\mathbf{q}_{GC}, \mathbf{R}_{GC}$: passzív kvaternió, rotáció a kamera koordináta rendszerből a globális koordináta rendszerbe.
- ▶ Koordináta rendszerek közötti transzformáció:
 - ▶ $\mathbf{p}_G = \mathbf{R}_{GC}\mathbf{p}_C + \mathbf{p}_{C,G}$: a kamera koordináta rendszerben értelmezett helyvektor transzformációja a globális koordináta rendszerbe
- ▶ Az egyértelmű indexeket elhagyjuk

Gyorsulásmérő modellezése

- ▶ A gyorsulásmérő az IMU-hoz rögzített koordináta rendszerben az eszköz aktuális gyorsulását méri ($\mathbf{a}$, $\frac{m}{s^2}$):
 - ▶ Az eszköz relatív helyváltoztatásának mérésében van szerepe
- ▶ A mért érték hibákkal terhelt:
 - ▶ Zaj (*Noise*): modellezése fehér zajjal ($\mathbf{a}_n$), $\mathbf{a}_n \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_{a_n})$
 - ▶ Eltolódás (*Bias*): normális eloszlás szerinti véletlen bolyongás ($\mathbf{a}_b$), $\mathbf{a}_w \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_{a_w})$, ahol $\dot{\mathbf{a}}_b = \mathbf{a}_w$
 - ▶ Rossz helyzet és skála hiba (*Missalignment and scale errors*): modellezése átskálázással ($\mathbf{T}_a$), $\mathbf{T}_a = \mathbf{I} + \epsilon$

$$\mathbf{a}_{m,\mathcal{I}} = \mathbf{T}_a \mathbf{R}_{IG}(\mathbf{a}_G - \mathbf{g}_G) + \mathbf{a}_{b,\mathcal{I}} + \mathbf{a}_{n,\mathcal{I}} \quad (1)$$

Giroszkóp modellezése

- ▶ A giroszkóp szögsebességet mér (ω , $\frac{rad}{sec}$) az eszközhöz rendelt saját koordináta rendszerében:
 - ▶ Az orientáció meghatározásában van szerepe
- ▶ A mért érték hibákkal terhelt:
 - ▶ Zaj (*Noise*): modellezése fehér zajjal (ω_n), $\omega_n \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_{\omega_n})$
 - ▶ Eltolódás (*Bias*): normális eloszlás szerinti véletlen bolyongás (ω_b), $\omega_w \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_{\omega_w})$, ahol $\dot{\omega}_b = \omega_w$
 - ▶ Rossz helyzet és skála hiba (*Missalignment and scale errors*): modellezése átskálázással ($\mathbf{T}_\omega$), $\mathbf{T}_\omega = \mathbf{I} + \epsilon$
 - ▶ Gyorsulás érzékenység (*g-sensitivity*): transzformáció ($\mathbf{T}_s$), $\mathbf{T}_s = \epsilon$

$$\omega_{m,\mathcal{I}} = \mathbf{T}_\omega \omega_{\mathcal{I}} + \mathbf{T}_s \mathbf{a}_{\mathcal{I}} + \omega_{n,\mathcal{I}} + \omega_{b,\mathcal{I}}$$

Mobil kamera modellezése

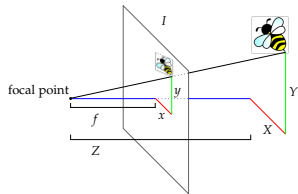
Egyszerű vetítési modell (az Euklidészi térben)

- ▶ A kamera vetítés modellje
 - ▶ Pont a $\mathcal{C}$ térben:
 $\mathbf{X}_C = [X, Y, Z]^T \in \mathbb{R}^3$
 - ▶ A vetített pont koordinátái:
 $\mathbf{x} = [x, y]^T \in \mathbb{R}^2$
 - ▶ Fókusz távolság: f
- ▶ Pixel mértékegységben
 - ▶ Fókusz: $f_u = \frac{f}{d_x}$, $f_v = \frac{f}{d_y}$
 - ▶ Központ: (o_u, o_v)

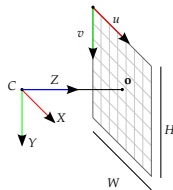
▶ Vetítés

$$u = f_u \frac{X}{Z} + o_u$$

$$v = f_v \frac{Y}{Z} + o_v$$



ábra: Egyszerű vetítés



ábra: Kamera középpont

Mobil kamera modellezése

Radiális és tangenciális torzítások

- ▶ A torzított projekció

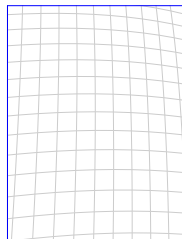
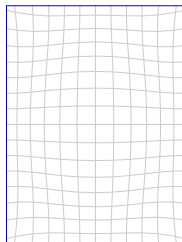
$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{h} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \left(d_r \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} \\ \frac{Y}{Z} \end{bmatrix} + d_t \right) + \begin{bmatrix} o_u \\ o_v \end{bmatrix}$$

- ▶ Radiális torzítás (k_1, k_2, k_3)

$$d_r = (1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3)$$

- ▶ Tangenciális torzítás (t_1, t_2)

$$d_t = \begin{bmatrix} 2\frac{X}{Z}\frac{Y}{Z}t_1 + (r + 2\frac{X^2}{Z^2})t_2 \\ 2\frac{X}{Z}\frac{Y}{Z}t_2 + (r + 2\frac{Y^2}{Z^2})t_1 \end{bmatrix}$$
$$r = \frac{X^2}{Z^2} + \frac{Y^2}{Z^2}$$



Mobil kamera modellezése

Idealizált koordináták

- ▶ A gyakorlatban a hasonló háromszögek arányát használjuk, melyet *idealizált koordinátáknak* nevezünk
- ▶ Koordinátánként

$$u' = \frac{X}{Z} = \frac{1}{f_u}(u - o_u)$$

$$v' = \frac{Y}{Z} = \frac{1}{f_v}(v - o_v)$$

- ▶ Mátrix alakban

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_u} & 0 \\ 0 & \frac{1}{f_v} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} o_u \\ o_v \end{bmatrix} \right)$$

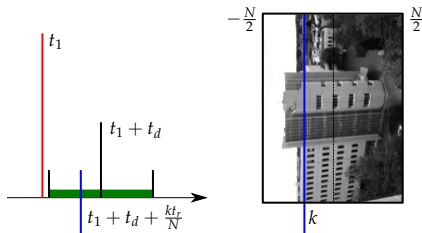
Mobil kamera modellezése

Rolling shutter

- ▶ Mobil CCD szenzorok kiolvasása
 - ▶ Soronkénti kiolvasás
 - ▶ Gyakorlatban $n \cdot 10ms$ ideig is eltart
 - ▶ Jelentős torzítást okoz
- ▶ Modellezése
 - ▶ A kamera koordináta rendszer transzformációja adott időpontra



ábra: RS jelenség



◀ ábra: RS modell ▶

Inerciálisan segített képi alapú helymeghatározás hiba-állapot kiterjesztett Kálmán szűrő segítségével

Inerciális relatív helymeghatározás EKF segítségével

- ▶ A vezérlő jelek
 - ▶ IMU mérésekből
 - ▶ Mintha "zajos vezérlés" lenne
- ▶ Mérés
 - ▶ Képi feldolgozás segítségével
 - ▶ "Feature" pontok vetített képéből
- ▶ Megvalósítás
 - ▶ Inertial EKF
 - ▶ Térbeli jellemző pontok az EKF állapotvektorban
 - ▶ MSCKF (Multi-State Constrained Kalman Filter)
 - ▶ Kamera hely és helyzet az EKF állapotvektorban

Állapottér

	valós	nom.	hiba	összefüggés	mért érték	zaj
teljes áll.	$\mathbf{x}_t$	$\mathbf{x}$	$\delta \mathbf{x}$	...		
pozíció	$\mathbf{p}_t$	$\mathbf{p}$	$\delta \mathbf{p}$	...		
sebesség	$\mathbf{v}_t$	$\mathbf{v}$	$\delta \mathbf{v}$	...		
kvaternió	$\mathbf{q}_t$	$\mathbf{q}$	$\delta \mathbf{q}$	$\mathbf{q}_t = \mathbf{q} \otimes \delta \mathbf{q}$		
rotáció m.	$\mathbf{R}_t$	$\mathbf{R}$	$\delta \mathbf{R}$	$\mathbf{R}_t = \mathbf{R} \delta \mathbf{R}$		
rotáció v.			$\delta \theta$	$\delta \mathbf{q} \approx [1, \delta \theta / 2]^T$ $\mathbf{R} \approx \mathbf{I} + [\delta \theta_x]_x$		
acc. bias	$\mathbf{a}_{bt}$	$\mathbf{a}_b$	$\delta \mathbf{a}_b$	...		$\mathbf{a}_w$
gyro. bias	ω_{bt}	ω_b	$\delta \omega$	...		ω_w
gyorsulás	$\mathbf{a}_t$				$\mathbf{a}_m$	$\mathbf{a}_n$
szöggy.	ω_t				ω_m	ω_n

Kinematika leírása

Nominális állapot (ld. Sola)

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \otimes (\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_b)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{R}_{GI}(\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_b) + \mathbf{q}$$

$$\dot{\mathbf{a}}_b = \mathbf{0}$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_b = \mathbf{0}$$

Hiba állapot (ld. Sola)

$$\delta \dot{\boldsymbol{\theta}} = -[\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_b]_x \delta \boldsymbol{\theta} - \delta \boldsymbol{\omega}_b - \boldsymbol{\omega}_n$$

$$\delta \dot{\mathbf{p}} = \delta \mathbf{v}$$

$$\delta \dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{R}[\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_b]_x \delta \boldsymbol{\theta} - \mathbf{R} \delta \mathbf{a}_b - \mathbf{R} \mathbf{a}_n$$

$$\delta \dot{\mathbf{a}}_b = \mathbf{a}_w$$

$$\delta \dot{\boldsymbol{\omega}}_b = \boldsymbol{\omega}_w$$

Az $\mathbf{A}$ mátrix a fenti összefüggésekből írható fel.

Propagáció

- ▶ Nominális állapot változása

$$\dot{\mathbf{x}}_t = f(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}, \mathbf{w})$$

- ▶ A propagáció elemei

állapot vektor

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_t \\ \mathbf{p}_t \\ \mathbf{v}_t \\ \mathbf{a}_{bt} \\ \boldsymbol{\omega}_{bt} \end{bmatrix}$$

vezérlés

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_m - \mathbf{a}_n \\ \boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_n \end{bmatrix}$$

zaj

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_w \\ \boldsymbol{\omega}_w \end{bmatrix}$$

- ▶ Hiba állapot változása

$$\dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \mathbf{w}$$

- ▶ Diszkrét időben

$$\delta \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{F}_x \delta \mathbf{x}_n + \mathbf{F}_u \tilde{\mathbf{u}}_n + \mathbf{F}_w \mathbf{w}_n$$
$$\mathbf{F}_x = \Phi = e^{\mathbf{A} \Delta t}, \mathbf{F}_u = \mathbf{B} \Delta t, \mathbf{F}_w = \mathbf{C}$$

Állapotok propagálása

- ▶ A propagálás a mért adatok alapján Δt idővel hogy változik meg az állapottér
 - ▶ A nominális állapotok a kinematikai egyenletek alapján változnak

$$\mathbf{q} \leftarrow \mathbf{q} \otimes \mathbf{q}\{(\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_b)\Delta t\}$$

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \mathbf{v}\Delta t + \frac{1}{2}(\mathbf{R}(\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_b) + \mathbf{g})\Delta t^2$$

$$\mathbf{v} \leftarrow \mathbf{v} + (\mathbf{R}(\mathbf{a}_m - \mathbf{a}_b) + \mathbf{g})\Delta t$$

$$\mathbf{a}_b \leftarrow \mathbf{a}_b$$

$$\boldsymbol{\omega}_b \leftarrow \boldsymbol{\omega}_b$$

- ▶ A hiba növekszik
 - ▶ A $\mathbf{P}$ kovariancia mátrix elemei folyamatosan növekednek

$$\begin{aligned}\mathbf{P} &\leftarrow \mathbf{F}_x \mathbf{P} \mathbf{F}_x^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q} &= \Delta t^2 \mathbf{B} \mathbf{U}^c \mathbf{B}^T + \Delta t \mathbf{C} \mathbf{W}^c \mathbf{C}^T\end{aligned}$$

Update

- ▶ Valós mérésekből származó információk
 - ▶ IMU + GPS
 - ▶ IMU + monokuláris képi információk
 - ▶ IMU + sztereó képi információk
 - ▶ IMU + (bármilyen helymeghatározás)

- ▶ Hiba állapot megfigyelése a méréseken keresztül

$$\mathbf{z} = h(\mathbf{x}) + \mathbf{n}, \mathbf{n} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$$

- ▶ A hiba figyelembe vétele, az állapot módosításával

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\delta\tilde{\mathbf{x}} \leftarrow \mathbf{K}(\mathbf{z} - h(\tilde{\mathbf{x}}))$$

$$\mathbf{P} \leftarrow (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{P}$$

- ▶ A hiba nullázása

$$\hat{\delta\mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

MSCKF megvalósítás

Áttekintés

- ▶ Az állapottér kiegészül a kamera hely és helyzet értékekkel
 - ▶ M hosszú kamera hely és helyzet puffér
$$\mathbf{x}_{MSCKF} = [\mathbf{x}, \{\mathbf{q}_{\mathcal{G}C_i}, \mathbf{p}_{C_i, \mathcal{G}}\}], i \in [1 \dots M]$$
- ▶ A működés
 - ▶ Új kép esetében "Feature track" menedzment
 - ▶ Egy "feature track" egy térbeli ponthoz tartozik
 - ▶ Egy "feature track" akkor ér véget, ha
 - ▶ a "feature" már nem látható
 - ▶ a "feature track" hossza nagyobb, mint M
 - ▶ "Measurement update" minden befejezett "feature track"-re
 - ▶ Kamera állapot kiterjesztés
 - ▶ "Feature point" trianguláció
 - ▶ Mérési modell alkalmazása

MSCKF megvalósítás

Mérési modell

- ▶ Alap összefüggés

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n}$$

- ▶ , ahol

- ▶ $\mathbf{r}$ a reziduál, minden j "feature point"-ra, $\mathbf{r}_i^{(j)} = \mathbf{z}_i^{(j)} - \hat{\mathbf{z}}_i^{(j)}$, ahol
 - ▶ $\mathbf{z}_i^{(j)}$, az i -dik képen a "feature" koordinátái a vetítési síkon
 - ▶ $\hat{\mathbf{z}}_i^{(j)}$, a j -dik triangulált "feature point" visszavetítése
- ▶ $\mathbf{H}$ a mérés Jakobi mátrixa
- ▶ $\tilde{\mathbf{x}}$ az állapot hibája
- ▶ $\mathbf{n}$ zaj

$$\mathbf{r}_i^{(j)} = \mathbf{H}_{\mathbf{x}_i}^{(j)} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{H}_{\mathbf{f}_i}^{(j)} \tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{f}_i, \mathcal{G}} + \mathbf{n}_i^{(j)}$$

- ▶ , a hol

- ▶ $\mathbf{H}_{\mathbf{x}_i}^{(j)}$ a mérés Jakobi mátrixa az állapot hibájára vonatkozóan
- ▶ $\mathbf{H}_{\mathbf{f}_i}^{(j)}$ a mérés Jakobi mátrixa a "feature" térbeli helyére vonatkozóan

MSCKF megvalósítás

Mérési modell

- ▶ Egyszerűsítés

- ▶ $\mathbf{A}$ a $\mathbf{H}_f$ mátrix jobboldali nulltere

$$\mathbf{r}_0^{(j)} = \mathbf{A}^T (\mathbf{z}^{(j)} - \hat{\mathbf{z}}^{(j)}) \simeq \mathbf{A}^T \mathbf{H}_x^{(j)} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{A}^T \mathbf{n}^{(j)} = \mathbf{H}_0^{(j)} \tilde{\mathbf{x}}^{(j)} + \mathbf{n}_0^{(j)}$$

- ▶ Megoldás

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{H}_x \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n}_0$$

- ▶ $\mathbf{H}_x$ felbontása

$$\begin{aligned}\mathbf{H}_x &= [\mathbf{Q}_1 \ \mathbf{Q}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{T}_H \\ \mathbf{0}^T \end{bmatrix} \\ \mathbf{r}_n &= \mathbf{Q}_1^T \mathbf{r}_0 = \mathbf{T}_H \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{Q}_1^T \mathbf{n}_0 \\ \mathbf{R}_n &= \mathbf{Q}_1^T \mathbf{R}_0 \mathbf{Q}_1\end{aligned}$$

- ▶ A Kálmán nyereség

$$\mathbf{K} = \mathbf{P} \mathbf{T}_H^T (\mathbf{T}_H \mathbf{P} \mathbf{T}_H^T + \mathbf{R}_n)^{-1}$$

- ▶ Az állapot korrekció

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K} \mathbf{r}_n$$

- ▶ Kovariancia mátrix változás

$$\mathbf{P} \leftarrow (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{T}_H) \mathbf{P} (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{T}_H)^{-1} + \mathbf{K} \mathbf{R}_n \mathbf{K}^T$$

Felhasznált irodalom

- ▶ A. I. Mourikis, ..., *"A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation"*, In Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation
- ▶ Michael Andrew Shelley, *"Monocular Visual Odometry on a Mobile Device"*, M.Sc. Theses, University of München, 2014
- ▶ Joan Sola, *"Quaternion kinematics for the error-state KF"*, March 11, 2015
Etc...