

# Hatékony módszerek zárt/szabadtéri helyszínek feltérképezésére

## Önálló projektmunka

Villányi Soma

Konzulensek:

Szirányi Tamás

Keszler Anita

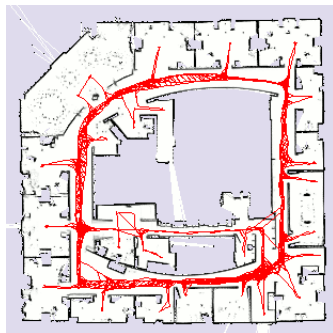
Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2021

# SLAM - Simultaneous Localization And Mapping

## Szimultán helymeghatározás és térképkészítés



ábra: KUKA omniRob



ábra: SLAM - robot által előállított térkép

# SLAM - Simultaneous Localization And Mapping

## Szimultán helymeghatározás és térképkészítés

### Frontend

Szenzorok adatainak feldolgozása (Odometrikus szenzorok, videókamera, LIDAR)

Adatillesztés

Rövid távú (Vizuális odometria)

Hosszú távú (Hurokzárás)

### Backend

Feladat: térképkészítés, térképtimalizálás

A térképet és a robot trajektóriáját a  $\mathcal{X}$  vektor írja le

Mérések formalizálása:  $z_k = h_k(\mathcal{X}_k) + \varepsilon_k$ , ahol  $\varepsilon_k$  zaj

A back-end formális feladata a maximum likelihood becslés meghatározása:

$$\mathcal{X}^* = \underset{\mathcal{X}}{\operatorname{argmax}} p(\mathcal{X}|Z)$$

# Gráf alapú SLAM

## Pozíció-gráf

Az  $x_{1:T}$  csúcshalmaz a robot becsült pozícióinak egy kulcsképekhez tartozó sorozatát reprezentálja, minden csúcs egy transzformációval írható le

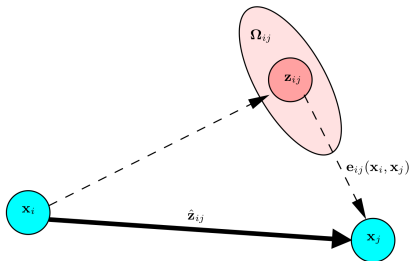
A front-end által előállított mérések az éleknek felelnek meg. Minden élhez tartozik egy becsült relatív transzformáció és egy információs mátrix

Hibafüggvény minimalizálása:

$$\sum_{(i,j) \in E} (z_{ij} - \bar{z}_{ij})^T \Omega_{ij} (z_{ij} - \bar{z}_{ij})$$

Megoldás iterációs algoritmussal (Gauss - Newton)

Szükséges egy kezdeti becslés (pl. MASAT algoritmus)



A pozíció gráf egy  $(x_i, x_j)$  éle és a hozzá tartozó adatok illusztrációja:

$\hat{z}_{ij}$ : relatív transzformáció a két csúcs között ( $x_j x_i^{-1}$ )

$z_{ij}$ : becsült relatív transzformáció a két csúcs között

$e_{ij}$ : hiba

$\Omega_{ij}$ : információs mátrix

Kép forrása: Jurić, Kendeš, Marković, Petrović: Comparison of Graph Optimization Approaches

## Gauss - Newton algoritmus

Cél:  $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \sum_{(i,j) \in E} \mathbf{e}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)^T \Omega_{ij} \mathbf{e}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$  minimumhelyének meghatározása, ahol  $\mathbf{e}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \mathbf{z}_{ij} - \mathbf{x}_j \mathbf{x}_i^{-1}$

Adva van az  $\mathbf{X}^{(0)}$  kezdeti becslés,  $\mathbf{X}^{(n+1)}$  meghatározása iterációval:

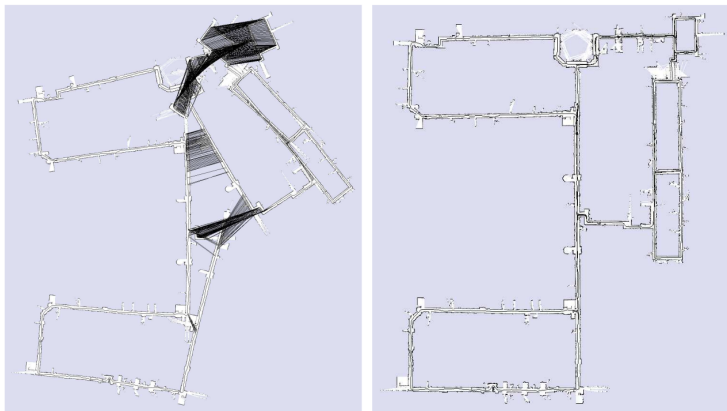
$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{ij}(\mathbf{X}^{(n)} + \Delta \mathbf{X}) &= \\ &= \mathbf{e}_{ij}(\mathbf{X}^{(n)} + \Delta \mathbf{X})^T \Omega_{ij} \mathbf{e}_{ij}(\mathbf{X}^{(n)} + \Delta \mathbf{X}) \\ &\approx (\mathbf{e}_{ij}(\mathbf{X}^{(n)}) + \mathbf{J}_{ij} \Delta \mathbf{X})^T \Omega_{ij} (\mathbf{e}_{ij}(\mathbf{X}^{(n)}) + \mathbf{J}_{ij} \Delta \mathbf{X}) \\ &= \widetilde{\mathbf{F}}_{ij}\end{aligned}$$

$$\widetilde{\mathbf{F}} = \sum_{ij \in E} \widetilde{\mathbf{F}}_{ij}$$

$\mathbf{X}^{(n+1)}$  az  $\widetilde{\mathbf{F}}$  kvadratikus függvény minimumhelye. Lineáris egyenletrendszer megoldása (Cholesky-felbontás)

Létezik általánosabb, magas dimenziós sokaságokon értelmezett változat

## Gráf alapú SLAM



ábra: SLAM-robot által készített térkép a pozíció-gráf optimalizálása előtt és után (MIT Killian Court)

## Multi-ágens rendszerek

Név	Év	Ágensfeladatok	Szerverfeladatok	Térkép	Ágensek száma	Ágensek típusa
MOAR-SLAM	2016	Vizuális-inerciális SLAM, hurokzárás	Helyfelismerés, kulcsképek kezelése, illesztése	Relatív kapcsolatok az ágensek pozíció között	3	Tango phone a Google-től
TSLAM	2016	Vizuális-inerciális SLAM, képek előfeldolgozása	Helyfelismerés, gráfoptimalizáció, ágensek relatív helyzetének meghatározása	Globális térkép	3	Távirányított földi robotok
CCM-SLAM	2018	Vizuális odometria	Helyfelismerés, térképillesztés	Lokális térképek	3	Videókamerával felszerelt AsTec UAV
CVI-SLAM	2018	Vizuális-inerciális odometria	Hurokzárás, térképillesztés, térképoptimalizáció	Lokális térképek	4	EuRoc adatbázisok adatai
COVINS	2021	Vizuális-inerciális odometria	Helyfelismerés, térkép-egyesítés, térképoptimalizáció	Globális térkép	12	Videókamerával felszerelt UAV

Név	Év	Ágensfeladatok	Megosztott feladatok	Térkép	Ágensek száma	Ágensek típusa
dataeff	2018	Vizuális odometria	Hurokzárás, térképoptimalizálás	Relatív kapcsolatok az ágensek pozíció-gráfja között	Akárhány	KITTI adatbázis (sztereokamera)
DOOR-SLAM	2019	Vizuális odometria / Vizuális SLAM	Kiugró értékek észlelése, hurokzárás, térképoptimalizálás	Relatív kapcsolatok az ágensek pozíció-gráfja között	Akárhány (tesztek során 2)	KITTI adatbázis; Kamerákkal felszerelt quadcopter

Taigo Maria Bonanni, Bartolomeo Della Corte és Giorgio Grisetti. "3-D Map Merging on Pose Graphs". *IEEE Robotics and Automation Letters* 2.2 (2017), 1031–1038. old. DOI: 10.1109/LRA.2017.2655139.

Cesar Cadena és tsai. "Simultaneous Localization And Mapping: Present, Future, and the Robust-Perception Age". *CoRR* abs/1606.05830 (2016). arXiv: 1606.05830. URL: <http://arxiv.org/abs/1606.05830>.

Titus Cieslewski, Siddharth Choudhary és Davide Scaramuzza. "Data-Efficient Decentralized Visual SLAM". *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2018, 2466–2473. old. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461155.

Isaac Deutsch, Ming Liu és Roland Siegwart. "A framework for multi-robot pose graph SLAM". *2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. 2016, 567–572. old. DOI: 10.1109/RCAR.2016.7784092.

Giorgio Grisetti és tsai. "A Tutorial on Graph-Based SLAM". *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 2.4 (2010), 31–43. old. DOI: 10.1109/MITS.2010.939925.

Giorgio Grisetti és tsai. "Least Squares Optimization: from Theory to Practice". *CoRR* abs/2002.11051 (2020). arXiv: 2002.11051. URL: <https://arxiv.org/abs/2002.11051>.

Károly Harsányi és tsai. "MASAT: A fast and robust algorithm for pose-graph initialization". *Pattern Recognition Letters* 129 (2020), 131–136. old. ISSN: 0167-8655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.11.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865519303241>.

Anđela Jurić és tsai. "A Comparison of Graph Optimization Approaches for Pose Estimation in SLAM". *2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. 2021, 1113–1118. old. DOI: 10.23919/MIPRO52101.2021.9596721.

Marco Karrer, Patrik Schmuck és Margarita Chli. "CVI-SLAM—Collaborative Visual-Inertial SLAM". *IEEE Robotics and Automation Letters* 3.4 (2018), 2762–2769. old. DOI: 10.1109/LRA.2018.2837226.

Rainer Kümmerle és tsai. "G2o: A general framework for graph optimization". *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2011), 3607–3613. old.



Pierre-Yves Lajoie és tsai. "DOOR-SLAM: Distributed, Online, and Outlier Resilient SLAM for Robotic Teams". *CoRR* abs/1909.12198 (2019). arXiv: 1909.12198. URL: <http://arxiv.org/abs/1909.12198>.

John G. Morrison, Dorian Gálvez-López és Gabe Sibley. "MOARSLAM: Multiple Operator Augmented RSLAM". *Distributed Autonomous Robotic Systems*. Szerk. Nak-Young Chong és Young-Jo Cho. Tokyo: Springer Japan, 2016, 119–132. old. ISBN: 978-4-431-55879-8.

David M Rosen és tsai. "SE-Sync: A certifiably correct algorithm for synchronization over the special Euclidean group". *The International Journal of Robotics Research* 38.2-3 (2019), 95–125. old. DOI: 10.1177/0278364918784361. eprint: <https://doi.org/10.1177/0278364918784361>. URL: <https://doi.org/10.1177/0278364918784361>.

Patrik Schmuck és Margarita Chli. "CCM-SLAM: Robust and efficient centralized collaborative monocular simultaneous localization and mapping for robotic teams". *Journal of Field Robotics* 36.4 (2019), 763–781. old. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21854>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.21854>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21854>.

Shuien Yu és tsai. "A Review on Map-Merging Methods for Typical Map Types in Multiple-Ground-Robot SLAM Solutions". *Sensors* 20.23 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20236988. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6988>.

Danping Zou, Ping Tan és Wenxian Yu. "Collaborative visual SLAM for multiple agents: A brief survey". *Virtual Real. Intell. Hardw.* 1 (2019), 461–482. old.