

Hatékony módszerek zárt/szabadtéri helyszínek feltérképezésére

Önálló projektmunka

Villányi Soma

Alkalmazott matematikus MSc

Konzulensek:

Szirányi Tamás

Számítástechnikai és Automatizálási
Kutatóintézet

Keszler Anita

Számítástechnikai és Automatizálási
Kutatóintézet



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

2021

Bevezetés

A szimultán helymeghatározás és térképezés (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) az a folyamat, amelynek során a mozgó robot térképet készít a környezetéről és megbecsüli a saját pozícióját a térképen. Ehhez a robot az odometrikus szenzorok adatait, videókamerát és lézer alapú távolságmérőt (LIDAR) használhat.

SLAM-rendszerek felépítése

Egy SLAM-rendszer architektúrája általában két fő részre osztható, a back-endre és a front-endre [2]. A front-end a beérkező adatokat (kamera képe, LIDAR, odometrikus szenzorok) feldolgozza, a lényeges információkat kiszűri, és a különböző időpontokban mért adatokat egymáshoz illeszti (Data Association - DA). Ez utóbbi feladat kettős: egyrészt becslést ad az egymást követő mérések viszonylagos helyzetére (vizuális odometria); másrészt megpróbálja detektálni, ha a robot olyan helyre érkezik, ahol korábban már járt, ez a hurokzárás (loop closure). A back-end az így feldolgozott adatokat optimalizálja, és elkészíti a globális térképet, ami a továbbiakban a front-end munkáját is segíti.

Tegyük fel, hogy a környezetre jellemző térképet és a térképen belül a robot mozgását egy statisztikai mező paraméterterének ismeretlen \mathcal{X} vektora írja le. Ekkor a DA során kiszámított mindegyik z_k mérés egy $z_k = h_k(\mathcal{X}_k) + \varepsilon_k$ alakú egyenletként formalizálható, ahol \mathcal{X}_k az \mathcal{X} néhány változójából áll, ε_k pedig valamilyen véletlen (általában normális eloszlásúnak tekinthető) zaj. A back-end feladata \mathcal{X} minél jobb közelítése a mérések alapján, formálisan a maximum likelihood becslés meghatározása:

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

Gráf alapú SLAM

A robot mozgásának egyik népszerű modellje az ún. pozíció-gráf [5]. A pozíció-gráf $x_{1:T}$ csúcshalmaza a robot becsült pozícióinak egy (kulcsképekhez (keyframes) tartozó) sorozatát reprezentálja, ahol minden csúcs pozíciója egy kettő vagy egy három dimenziós transzformációval írható le. A gráf élei a DA során számított méréseknek felelnek meg. Minden \mathbf{z}_k mérést egy kettő vagy három dimenziójú közelítőleges transzformáció ír le, ami az él kiindulási csúcsának megfelelő pozíciót az érkezési csúcsnak megfelelő pozícióba transzformálja. A transzformáció hibáját normálisnak tekintjük, és eltároljuk a hibához tartozó Ω_k információs mátrixot is. A mérések egy része az időben egymást követő csúcsokat köti össze, míg egy másik része időben távoli, hurokzárásokból származó csúcspárok között teremt kapcsolatot. Megmutatható, hogy a maximum likelihood becslés megegyezik a

$$\sum_k (\mathbf{z}_k - \bar{\mathbf{z}}_k)^T \Omega_k (\mathbf{z}_k - \bar{\mathbf{z}}_k)$$

hibafüggvény minimumhelyével [6], ahol $\bar{\mathbf{z}}_k$ a \mathbf{z}_k mérés valódi értéke. Ez a minimumhely vagy a Gauss-Newton, vagy a Levenberg-Marquardt iterációs algoritmus segítségével határozható meg. Az iterációs algoritmus elindításához szükséges egy előzetes becslés a pozíciókról, ennek a generálásához egy lehetséges eszköz a MASAT algoritmus [7].

Gráf alapú SLAM feladatok megvalósításához számos keretrendszer létezik, a legismertebbek a g²o, a Ceres és a GTSAM [8]. A félév során megismerkedtem a g²o nyílt

forráskódú C++ könyvtárral, és a [10] útmutató alapján, felhasználva a könyvtár beépített algoritmusait, implementáltam a fenti algoritmus egy egyszerű, kétdimenziós változatát*.

Egy másik hatékony módszert ad a pozíció-gráfok optimalizására az SE-Sync algoritmus [13], ami a fenti maximum likelihood feladatot egy szemidefinit optimalizálási feladatra vezeti vissza. A módszer előnye, hogy generál egy tanúsítványt is, ami a posteriori igazolja az eredmény optimalitását.

Multi-ágens rendszerek

Egyes SLAM rendszerekben egynél több ágens egymással együttműködve készít térképet, ezeket kollaboratív rendszereknek hívjuk. A létező kollaboratív vizuális rendszerek egy része centralizált, azaz amíg a front-end feladatokat az egyes ágensek maguk végzik, a back-end feladatokért egy közös szerver felel. A rendszerek másik része decentralizált, és a back-end feladatokat is az ágensek végzik [16]. A centralizáltság előnye, hogy az egyes ágenseknek nem kell nagy számítási kapacitással rendelkezniük, hátránya, hogy külön egységet kell fenntartani a szervernek, és hogy a kommunikációs kapacitás gátat szabhat a rendszer méretének. A könnyebb megépíthetőség miatt a korai multi-ágens rendszerek többnyire centralizáltak voltak, de az eszközök fejlődésével egyre inkább lehetővé vált decentralizált rendszerek működtetése is. Az alábbi táblázat rövid összefoglalót nyújt azokról az elmúlt években készült kollaboratív vizuális rendszerekről, amiknek a működési elvét a félév során megismertem.

1. táblázat. **Centralizált (fent) és decentralizált (lent) kollaboratív vizuális SLAM rendszerek az elmúlt évekből**

Név	Év	Ágensfeladatok	Szerverfeladatok	Térkép	Ágensek száma	Ágensek típusa
MOAR-SLAM [12]	2016	Vizuális-inerciális SLAM, hurokzárás	Helyfelismerés, kulcsképek kezelése, illesztése	Relatív kapcsolatok az ágensek pozíció között	3	Tango phone a Google-től
TSLAM [4]	2016	Vizuális-inerciális SLAM, képek előfeldolgozása	Helyfelismerés, gráfoptimalizáció, ágensek relatív helyzetének meghatározása	Globális térkép	3	Távírányított földi robotok
CCM-SLAM [14]	2018	Vizuális odometria	Helyfelismerés, térkép-illesztés	Lokális térképek	3	Videókamerával felszerelt AsTec UAV
CVI-SLAM [9]	2018	Vizuális-inerciális odometria	Hurokzárás, térképillesztés, térképoptimalizáció	Lokális térképek	4	EuRoc adatbázisok adatai
COVINS [14]	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 [3]	2018	Vizuális odometria	Hurokzárás, térképoptimalizálás	Relatív kapcsolatok az ágensek pozíció-gráfja között	Akárhány	KITTI adatbázis (sztereokamera)
DOOR-SLAM [11]	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

[16] alapján

*forráskód:

https://drive.google.com/drive/folders/1gbRFY4cY4gjU5EHmxCQXtpd_ZOE2CjPC?usp=sharing

Célkitűzés

Kollaboratív SLAM rendszerekben lényeges feladat az egyes ágensek által elkészített térképek hatékony egyesítése. Ennek a feladatnak a megoldására az elmúlt évtizedekben számos algoritmust publikáltak [1][15]. A következő félévben tervezem áttekinteni ezeket az algoritmusokat, különös tekintettel a gráf alapú vizuális SLAM problémákra. Néhány algoritmust szeretnék számítógépen implementálni és nyilvánosan elérhető adatbázisokon tesztelni.

Hivatkozások

- [1] 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.
- [2] 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>.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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>.
- [7] 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>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Rainer Kümmerle és tsai. “G2o: A general framework for graph optimization”. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2011), 3607–3613. old.
- [11] 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>.

- [12] 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.
- [13] 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](https://doi.org/10.1177/0278364918784361). eprint: <https://doi.org/10.1177/0278364918784361>. URL: <https://doi.org/10.1177/0278364918784361>.
- [14] 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>.
- [15] 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](https://doi.org/10.3390/s20236988). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6988>.
- [16] 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.