

Újszerű szenzorkalibrációs módszertan kidolgozása autonóm járművekhez és robotokhoz

Józsa Dávid¹

¹ Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Dr. Horváth Ernő, tudományos munkatárs,
Vállalati szakértő: Dr. Nyilas Krisztián, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

1 Rövid kutatási terv

A kutatási témám az automatikus, extrinsic szenzor kalibrációhoz köthető. Céлом egy autonóm járművön található szenzorok külső kalibrációjára használható metodológia kialakítása, amely segítségével target nélkül megvalósítható a kalibráció.

1.1 Motiváció

A járműveken elhelyezett szenzorok rendeltetésszerű használatához elengedhetetlen, hogy ezek elhelyezkedése minél pontosabban ismert legyen. Az extrinsic kalibráció során a célunk, hogy meghatározzuk a szenzor pozícióját és orientációját más szenzorhoz, vagy egy referenciaponthoz képest [1]. Egy jármű autonóm üzeme során, amennyiben egy szenzor rosszul van kalibrálva, az nagymértékben befolyásolja a feldolgozási lánc későbbi elemeit [2] (pl. lokalizáció, perception).

1.2 Kutatás jelenlegi helyzete

Jelenleg gyakori kalibrációs módszer a kézi mérés [1]. Ez azonban időigényes, emberi beavatkozást és szakértelmet igényel [3], ami csökkentheti az ismételhetőséget. Ennek elkerülése érdekében nagy hangsúly került olyan módszerek alkotására, amelyek által a különböző típusú szenzorok adatai alapján meg lehessen határozni a szenzorok közötti térbeli és időbeli eltérést. Ahhoz, hogy ez lehetséges legyen, szükséges a térben egy vagy több olyan célpont, amelyeket a kalibrációban használt szenzorok közül az összes képes észlelni [4], valamint pozícióját minél nagyobb pontossággal képes megállapítani. Ehhez sokszor különböző célpont elemeket használnak (target). Kamera esetén általában sakktábla mintázatú kalibrációs táblát, LiDAR esetén téglatest alakú objektumból kivágott kör alakzatokat alkalmaznak, míg radar esetében radar reflektort. Ezek a targetek minden szenzor esetén kihasználják a szenzorok sajátosságait, hogy minél pontosabb pozíciót adhassanak a célpontról. Hasonló módszerek segítségével megállapíthatóak a szenzorok elhelyezkedései, azonban ez nagyon speciális célpontokat, valamint a célpontok precíz elhelyezését igényli.

Ezzel szemben az újabb kutatási irány a targetless, célpont nélküli szenzorkalibrációs módszerek fejlesztése. [1] Ezek esetében nincsenek speciális targetek, a szenzorok a környezetükből vonnak ki geometriai struktúrákat. Ennek előnye, hogy nincs célponttól való függés, a kalibráció nincs helyhez és felszereléshez kötve, el lehet végezni akár mozgás közben is, valamint a módszerek kis változtatásával elérhető online ellenőrzése a szenzorok kalibrációjának. Ennek ellenére még mindig vannak hiányosságok a téren. A LiDAR és kamera

alapú kalibráció kifejezetten felkapott, és sok figyelmet kapott, míg a radar szenzorok kalibrációja kevésbé mutat aktivitást. Radar esetén a visszakapott adatok nagymértékben zajjal terheltek [5], valamint sok szenzor már nagymértékben szűrt adatokat ad vissza, amelyek növelik a kalibrációs bizonytalanságot, ezáltal csökkentve a bizalmat a target nélküli kalibrációban.

2 Kutatómunka

Rövidtávú célomnak a radar automatikus, targetless, extrinsic szenzor kalibrációt tűztem ki. Ennek érdekében az irodalomkutatás és a kutatási rés megállapítása után elkezdtem dolgozni radar szenzorok beüzemelésén. Ehhez 5 db autóiipari szenzort szereltünk fel az egyetemi tesztjárműre, majd ezekhez írtam számunkra használható drivert. A saját szoftver által lehetőségem van minden számomra fontos információ kinyerésére, megfelelő formában, ezáltal könnyítve a későbbi munkám. A radar szenzorokból pontfelhő típusú adatok érhetőek el, ezáltal elkezdtem feldolgozni pontfelhő kalibrációs megoldásokat. Kipróbáltam többféle megoldást is, amelyek főként LiDAR pontfelhőkre lettek tervezve, és a tapasztalatok alapján megállapítottam az első fő kutatási feladatom.

Az első célom megalkotni egy olyan radar pontfelhő előfeldolgozási módszert, amely segítségével a zajjal terhelt radar pontfelhő feldolgozható olyan módon, hogy a szűrt pontok a környezetben releváns, erős struktúrákat jelképezzenek, zajtól mentesen. Ehhez elemeztem a szakirodalomban előforduló adat feldolgozási módszereket, valamint az iparban használt feldolgozási módszereket. Az iparból átvettem gyakran alkalmazott előfeldolgozási módszereket, majd implementáltam ezeket a saját rendszerünkben.

Az első ilyen módszer a radar érzékelések sebesség kompenzációja, az ego mozgása alapján. A radar detekciókból kinyerhető az egyes pontok relatív radiális sebessége a Doppler-effektus alapján, azonban ezek a sebességek a radarhoz, illetve az ego járműhöz viszonyított értékek lesznek. [6] A doppler kompenzáció által a jármű mozgásával korrigálom a sebesség értékeket, hogy a tényleges, abszolút sebesség értékek legyenek elérhetőek. A második módszer az adatok időbeli aggregációja. Mivel a radar pontfelhők ritkák, főként egy LiDAR-hoz hasonlítva, ezért gyakori módszer az adatok sűrítésére, hogy egy időben nem csak a legfrissebb adatok vannak figyelembe véve, hanem egy adott időablakon belül vannak összegyűjtve az adatok. Ehhez létrehoztam egy szoftvercsomagot, amely az adatokat összegyűjti egy megadott időablakon

belül, és a korábbi pontfelhőket a legfrissebb adathoz transzformálja. A transzformáció által mindig a jármű legutolsó helyzetéhez képest lesznek az adatok publikálva.

A már létező előfeldolgozási megoldások implementálása után elkezdtem dolgozni az adatok szűrésén. A nagymértékű zaj terheltség, valamint a radar működéséből adódó különféle bizonytalanságok miatt elkezdtem létrehozni egy bizonytalanság alapú osztályozó rendszert. A célom, hogy különböző paraméterek alapján minden kapott lokációhoz hozzárendeljek egy megbízhatósági értéket, amely egy könnyen kiértékelhető módon megadja, hogy az adott pont mennyire erős érzékelés. Ezt az alábbi metrikák alapján számítom:

1. **Időbeli stabilitás:** az időablakon belül mennyire stabil a pont, hány alkalommal fordul elő adat abban a lokációban.
2. **Doppler konzisztencia:** egy pont körül a többi érzékelés sebessége mennyire tér el. Minél nagyobb az eltérés a környezethez képest, annál kisebb lesz a megbízhatósága a vizsgált pontnak.
3. **Sűrűség:** az érzékelés környezetében lévő további érzékelések száma alapján pontsűrűség súlyozása
4. **Távolság és szögalapú szűrés:** radar esetében egy adat minél jobban a látószög széléhez közeledik, annál pontatlanabbak lesznek az értékei, kifejezetten a doppler sebesség.
5. **Kor:** érzékelés idejével arányos súlyozás

A felsorolt módszerek alapján minden egyes pontnak számítok egy megbízhatósági értéket 0 és 1 között. A végső érték ezen eredmények szorzata lesz, amit utána hozzátársítok a pontokhoz. A módszert jelenleg még csak szűrésre használom, azonban tervben van egy megbízhatósággal súlyozott optimalizációs függvény alkalmazása kalibrációra. A módszert különböző pontfelhő kalibrációs megoldásokkal tesztelek, és összehasonlítom a nyers, aggregált és a megbízhatóság alapon szűrt pontfelhőt. A célom, hogy bebizonyítsam, hogy a LiDAR pontfelhő alapú kalibrációs módszereket az előfeldolgozásom által lehet használni LiDAR-radar kalibrációra is, amely a LiDAR hatalmas figyelmet élvező kutatási irányai által nagy lépés lehet a radar kalibrációs térben.

További céljaim közé tartozik a radar-radar kalibráció vizsgálata, kifejezetten a radar sajátosságait (pl. doppler sebességet) kihasználó kalibrációs folyamatok kutatása, alacsony szenzor átfedettség mellett, valamint a radar pontfelhő Z irányú pontatlanságának javítása. Ezen

kívül tervben van egy kalibrációs módszer létrehozása LiDAR és radar szenzorok között, amely egy saját tér-reprezentációt használva képes 3DoF kalibrációra.

3 Publikációk

Első publikációmban bemutattam a CRP [7] rendszert, amely a saját fejlesztésű önvezető funkciók implementálását és tesztelését támogató szoftveres keretrendszerünk, amelybe a radar szenzorok is integrálva lettek. Ez a cikk a jövőben bemutatandó megoldásaim alapját fogják képezni, mivel minden kalibrációs tevékenységem ezen rendszer része lesz, valamint az adatfelvételeket is ennek segítségével hajtom végre.

További munkám a korábban kifejtett megbízhatóság alapú radar pontfelhő előfeldolgozási rendszerem, amely az első tézisem alátámasztására szolgál, miszerint az előfeldolgozás által feljavíthatóak a már létező pontfelhő kalibrációs módszerek radar szenzor esetén. Ezen kívül folyamatban van egy Gaussian process alapú pontfelhő szűrési megoldás, valamint egy online miscalibration detektáló módszer kidolgozása.

4 Összefoglalás

Az első félévem fókuszában a szakirodalom áttekintése, valamint a szenzorok beüzemelése volt. A kutatási rés meghatározása után elkezdtem kutatási tevékenységem a radar adatok előfeldolgozása útján. Sikerült egy megoldást terveznem és megvalósítanom, amely által előzetes eredmények alapján sikeresen feljavult a radar pontfelhő olyan szintre, hogy a környezetből a strukturális elemek megmaradjanak, míg a zaj kiszűrésre kerüljön, ezáltal a kalibrációs módszerek is többször sikerrel járnak. Jelenleg a rövidtávú fókuszom az eddig elért eredmények publikálása, a folyamatban lévő megoldások véghezvitele, valamint a radar-radar közti kalibráció kutatásának megkezdése.

5 Referenciák

- [1] Li, X., Xiao, Y., Wang, B., Ren, H., Zhang, Y., & Ji, J. (2023). Automatic targetless lidar–camera calibration: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 56(9), 9949-9987.
- [2] Peng, P., Pi, D., Yin, G., Wang, Y., Xu, L., & Feng, J. (2024). Automatic miscalibration detection and correction of LiDAR and camera using motion cues. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(1), 50.
- [3] Wang, Q., Yan, C., Tan, R., Feng, Y., Sun, Y., & Liu, Y. (2022). 3D-CALI: Automatic calibration for camera and LiDAR using 3D checkerboard. *Measurement*, 203, 111971.
- [4] Lyu, X., Liu, S., Qiao, R., Jiang, S., & Wang, Y. (2025). Camera, LiDAR, and IMU Spatiotemporal Calibration: Methodological Review and Research Perspectives. *Sensors*, 25(17), 5409.
- [5] Liu, X., Deng, Z., & Zhang, G. (2025). Targetless radar–camera extrinsic parameter calibration using track-to-track association. *Sensors*, 25(3), 949.
- [6] Kahlert, M., Fei, T., Wang, Y., Tebruegge, C., & Gardill, M. (2025). Unified model and survey on modulation schemes for next-generation automotive radar systems. *Remote Sensing*, 17(8), 1355.
- [7] Józsa, D., Ignéeczi, G., Mesics, M., & Horváth, E. (2025, November). Cooperative Research Platform-Modular Automated Driving System for Prototypical Research Activities. In *2025 IEEE 25th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)* (pp. 000461-000466). IEEE.