

Válaszok bírálói kérdésekre

Tisztelt dr. Magyar Attila!

Először is szeretném ismét megköszönni, hogy elvállalta dolgozatom bírálatát. Köszönöm, hogy észrevételeivel és szakmai megjegyzéseivel hozzájárult dolgozatom formai és tartalmi minőségének fejlődéséhez.

A bírálatban feltett kérdésekre a következő válaszokat adom:

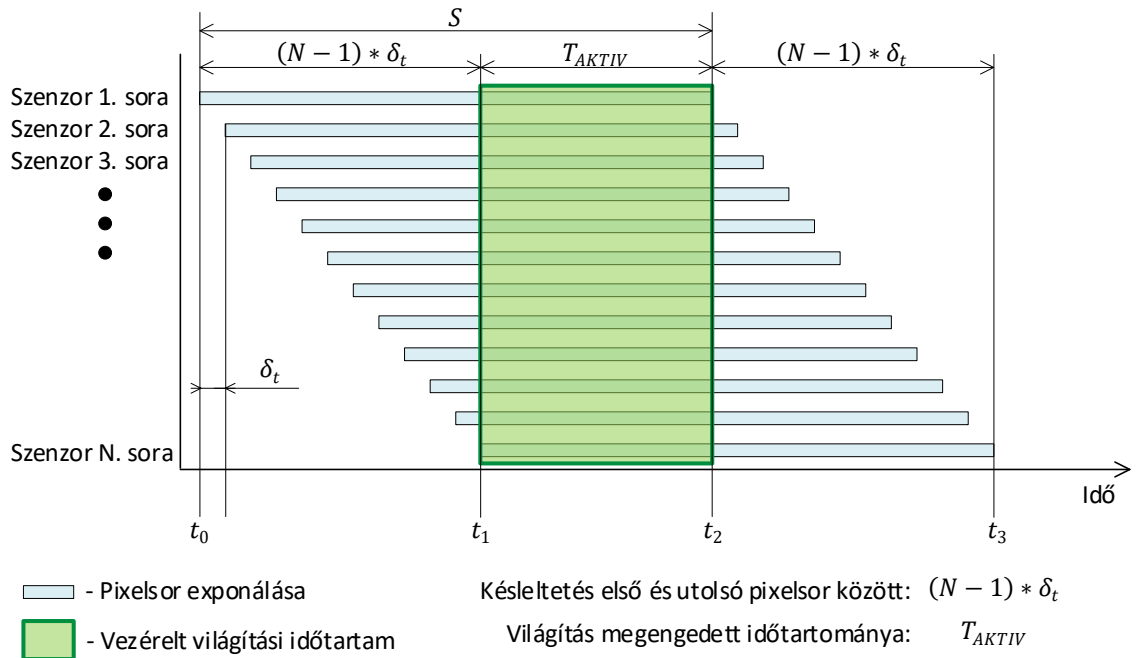
1. A dolgozatban több helyen is említi, hogy teljes zárvezérlésű (global shutter) kamerára dolgozta ki az eredményeit. Hogyan lehetne alkalmazni az kidolgozott módszereket, ha egyéb okok miatt a gördülő zárvezérlésű (rolling shutter) kamera alkalmazására van csak lehetőség?

A dolgozatban ismertetett eredmények egyik alappillére a teljes zárvezérlésű kamerák működési módja, miszerint a kamera szenzor minden egyes érzékelő pixele azonos időpontban (jelöljük t_0 -val) kezdi meg a mintavételezését egy képfelvétel elkészítése során. Ezzel szemben a gördülő zárvezérlést használó kamerák soronként (vagy oszloponként) haladnak végig a pixeleken. Ez azt eredményezi, hogy egy sor mintavételezése $t_0 + k * \delta_t$ időpillanatban következik be, ahol k a sorhoz tartozó (0-val kezdődő) egész számú index (N darab sor esetén $k = 0, 1, \dots, N - 1$); δ_t pedig a sorok mintavételezése közt eltelt idő. Tehát a szenzor sorai által mintavételezett jelek között δ_t időnek megfelelő fáziseltolódás van jelen. δ_t a szenzor típusától és beállításától is függhet.

A mintavételezett jelek pixelsoronként eltérő fázisai miatt gördülő zárvezérlésű kamerákkal csak korlátozott módon alkalmazhatóak a dolgozatban ismertetett módszerek:

- a) Elengedjük a VLC (Visible Light Communication) protokollok mozgás közbeni működésének követelményét, tehát lokalizáció során sem a kamera, sem a LED jeladók nem mozoghatnak. A VLC protokollok dekódolásához a képfelveleken egy rögzített pixelhalmazt használunk a LED-ek állapotának megállapításához: ehhez például megvizsgálhatjuk az első néhány képfelvétel alapján, hogy mely pixelek villognak (célszerű jeladónként egyetlen pixelt, vagy egy pixelsor jeladó által lefedett pixel-intervallumát használni). Az így kapott megközelítéssel elkerülhető, hogy két mintavétel között megváltozzon (pixelsorok alapján) a fáziseltolódás az adó és a vevő között, a dolgozatban ismertetett módszerek ilyenkor további módosítás nélkül alkalmazhatóak.
- b) A gördülő zárvezérlésű kameráknál alkalmazott VLC protokolloknál egy másik közkedvelt megközelítés a soronkénti fáziseltolódás tulajdonságainak felhasználása. Ilyenkor a modulált LED jeladóknál az adatátvitel nem egy összefüggő pixelhalmaz villogásaként (időbeli adatátvitel – több képfelvételt igényelve) valósul meg, hanem a hozzá tartozó pixelhalmaz (sötét-világos) soronkénti sávvezérlését eredményezi (térbeli adatátvitel – egyetlen képfelvételt igényel). A sikeres dekódoláshoz úgy kell megválasztani a jeladó méretét és a VLC protokoll villogási frekvenciáját, hogy a kívánt működési távolságnál mindig legalább egyszer beleférjen a jeladó képének pixelhalmazába egy átküldeni kívánt adatcsomag, melyből a jeladó egyértelműen azonosítható. Lokalizációs szempontból ennél a módszernél is követelmény a kamera, illetve jeladók mozdulatlansága, hiszen az átküldeni kívánt adat immár térben van kódolva a kamera szenzor szemszögéből. Egy másik hátránya a módszernek a drasztikusan kisebb látótávolság, vagy fordított esetben a jeladók lényegesen megnövekedett mérete. Előnye az *a)* pontban ismertetett megközelítéssel szemben, hogy csupán egyetlen képfelvétel szükséges a lokalizációhoz.
- c) Végezetül érdekességként érdemes még megemlíteni a pseudo-teljes zárvezérlést (pseudo-global shutter), amelyet gördülő zárvezérlés és jól időzített megvilágítás ötvözésével érhetünk el. Ehhez a megközelítéshez az adó és a vevő közötti idősinkronizáció-hiány követelményét kell elengednünk.

Megfelelően időzített, szinkronizált világítás mellett egy gördülő zárvezérlésű kamera is használható teljes zárvezérlésüként viselkedve. A módszer működését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra Pseudo-teljes zárvezérlés (pseudo-global shutter) működése gördülő zárvezérlésű szenzor és vezérelt megvilágítás felhasználásával. A képfelvétel készítése, és ezáltal az 1. sor exponálása t_0 időpillanatban kezdődik. Az exponálás S ideig tart, tehát az első pixelsor t_2 időpillanatig integrálja, gyűjti a beérkező fényt. t_1 időpillanatban kezdődik a szenzor utolsó sorának exponálása, amely t_3 időpillanatig tart, mely szintén S hosszú. Ha a szenzort csak T_{AKTIV} időtartomány alatt éri fény, akkor teljes zárvezérlésüként viselkedik.

A módszer egyik sajátossága, hogy az eredeti S exponálási idő T_{AKTIV} időre csökken. A lokalizációs rendszerben történő alkalmazásához elengedhetetlen a LED jeladók és a kamera szenzor közötti időszinkronizáció, több kamera esetén pedig a kamerák beállításainak és az exponálás időzítésének szinkronizálása. A dolgozatban ismertetett VLC protokollok esetén elegendő a LED jeladók vezérlését oly módon korlátozni (például egy logikai ÉS kapuval), hogy a jeladók csupán T_{AKTIV} időben világíthassanak. Természetesen időszinkronizáció megléte mellett már kevésbé kényszerülünk a dolgozatban javasolt némileg lassabb RUPSOOK VLC protokoll használatára és biztonságosan használható a szakirodalomban is fellelhető, gyorsabb adatátvitelt eredményező UPSOOK VLC protokoll is.

- 2. A hatodik fejezetben bemutatott HIAL módszer detekciós hibaanalízisével foglalkozó fejezetben az olvasható, hogy minél több jeladót használ a HIAL módszer, annál pontosabb eredményt ad. Ehhez képest a 6.6 ábrán a (3,-3) pontban rosszabbul teljesít a 6 jeladót alkalmazó HIAL-6 módszer, mint a következő ábrán a 4 jeladót alkalmazó HIAL-4. Említi a 6.1.2 fejezet elején a lokációfüggő pontosságot, de ez látszólag csak a HIAL-6 esetében van jelen. Ennek mi lehet az oka?**

Általános esetben igaz az állítás, miszerint a jeladószám növelésével, és ezáltal a rendelkezésre álló metszéspontok növelésével pontosabb pozícióbecslés érhető el. Ugyanakkor ehhez az is szükséges, hogy az újonnan bevont jeladók közt legyenek olyanok, amelyek: vagy kisebb hibával rendelkeznek; vagy olyan metszéspontokat eredményeznek a meglévő jeladókkal, amelyek jó irányba mozdítják,

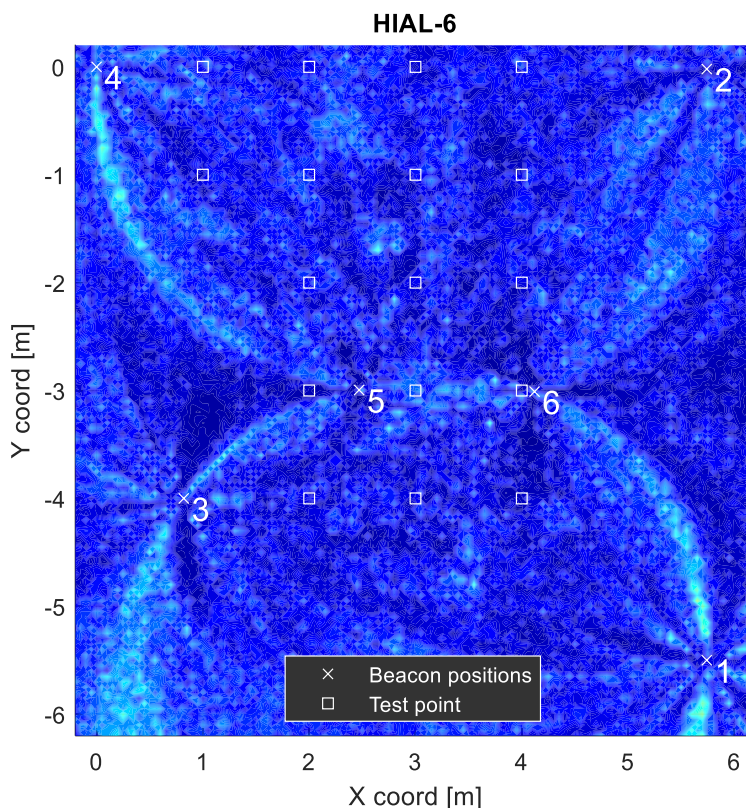
korrigálják a becslőt. Például, tegyük fel, hogy a (0;0) pozícióban található a kamera, és a lokalizációhoz felhasznált jeladóhalmazhoz olyan hibákkal társulnak mérések, hogy sok metszéspont a (0.1;0.1) pont körül található. Szerencsés esetben előfordulhat, hogy egy vagy két új jeladó bevonásával az újonnan keletkező metszéspontok a (-0.1;-0.1) pont környékén jönnek létre, ezáltal a helyes irányba mozdítva a becslőt. Ez természetesen nem törvényszerű: nagyban függ a jeladók elhelyezkedésétől, a HIAL módszer paraméterezésétől, a mérési hibák nagyságától és természetétől. Ugyanakkor a minták (jelen vonatkozásban a generált metszéspontok) számának növelése általában csökkenti a becslő szórását, amely ezáltal közelebb kerül a valós pozícióhoz.

Az említett 6.6 ábrán HIAL-4 esetén a 4 jeladó a mérési terület körül helyezkedik el. HIAL-6 esetén pedig a két új jeladó a mérési terület középső részére kerül, ráadásul az említett (3;-3)-as teszt pont épp a két új jeladó között helyezkedik el. Ezek mind olyan tényezők, amelyek kedvezőtlen hatással lehetnek a mérési pontosságra, mert felerősíthetik a jeladók szögméréséből származó lokalizációs hibát, különösen a szóban forgó mérési pont környékén.

A HIAL módszer nagy számítási igénye mellett egy másik hátránya, hogy nehézkes az ϵ_1 , ϵ_2 szűrőparamétereket megfelelően beállítani. Ha túlságosan engedékenyre állítjuk őket, több hibás metszéspontot (esetenként kiugró mérési hibákból származókat) is bevonhatunk a pozícióbecslő számításába. A túl szigorú paraméterezés sem feltétlen kifizetődő, ugyanis értékes, javító hatású metszéspontoktól eshetünk el. A megfelelő értékeket legkönnyebben kísérleti úton határozhatjuk meg, szimulációk segítségével. Célszerű a környezetre és rendszerparaméterekre jellemző szűrőparaméterek ideális értékeinél minimálisan engedékenyebbre állítani azokat, ezáltal elkerülve azokat az eseteket, amikor a hibákból és a geometriai elhelyezkedésből kifolyólag pont a szűrési határ környékére kerülnek a generált metszéspont-metszéspont és metszéspont-körív távolságok, amelyek időnként megjelenő kiugró hibákat eredményezhetnek a becslőben, főként az erre érzékeny területeken. Az említett ábrán látható jelenség főként a módszer ezen hátrányos tulajdonságával és a lokációfüggő pontossággal indokolható.

Fontos megemlíteni azt is, miként került az 1-3 pixelnyi hiba hozzáadásra a szimulált, hibátlan szögmérésekhez. A jeladókhöz tartozó, kamerától kiinduló hibátlan irányvektorok először (a későbbi valós méréseknél is használt kalibrált kameramodell segítségével) átranzformálásra kerültek a 2D-s „képfelvételi” koordinátarendszerbe, ahol hozzáadásra kerül a vizsgált hiba, szimulálva a jeladó hibás középponti koordinátájának becslését. Az így kapott képbéli jeladó-középpontokat végül visszatranzformáljuk a kamera lokális, 3D-s koordinátarendszerébe, egységnyi hosszúságú irányvektorokká. Ezek az irányvektorok – kihasználva a feltételt, miszerint a kamera normálvektora párhuzamos a világi koordinátarendszer felfelé mutató bázisvektorával – leképezésre kerülnek a világi koordinátarendszer 2D-s alap síkjára, ahol kiszámításra kerülnek a hozzájuk tartozó irányszögek, melyekkel a lokalizációs módszer operál. A szimuláció során a későbbi valós méréseknél is használt elrendezést használtam, ahol a kamera 2 cm-es magasságban, a jeladók pedig 304 cm-es magasságban helyezkedtek el. Mivel a jeladók nem a kamera lencse horizontján találhatóak, a kamera jeladókhöz képesti pozíciója azt is befolyásolja, mekkora felbontással tudunk irányszögeket mérni, tehát mekkora szögmérési hibát okoz a hozzáadott képbéli középpontbecslési hiba. Azok a jeladók, amelyek egy adott pozíciónál közelebb vannak a kamera horizontjához, a képfelvételeken nagyobb sugarú körön helyezkednek el, jobb szögmérési felbontást eredményezve, így ezeknél a jeladóknál kisebb szögmérési hiba képződik. Ezzel szemben azok a jeladók, amelyek a képfelvételen közelebb találhatóak a kép középpontjához (pl. a kamera felett találhatóak), kisebb sugarú körvonalon helyezkednek el, és az ő esetükben jóval nagyobb szögmérési hibát eredményezhet néhány pixelnyi eltérés. A 2. ábra egy olyan hibafelületet szemléltet, amely közel identikus jeladóelrendezés és paraméterezés mellett készült (itt ϵ_1 ,

ϵ_2 paramétereket 12 cm-re állítottam a szemléltetés kedvéért). Az ábra jól mutatja, hogy az 5-ös és 6-os jeladók közt található (3;-3)-as teszt pont kedvezőtlen pozícióban található. A HIAL-4-es esetet olyan hibafelülettel képzelhetjük el, ahol a világosabb, hibára érzékenyebb részek az ábra szélein, a 4 jeladót körbeölelve helyezkednek el.



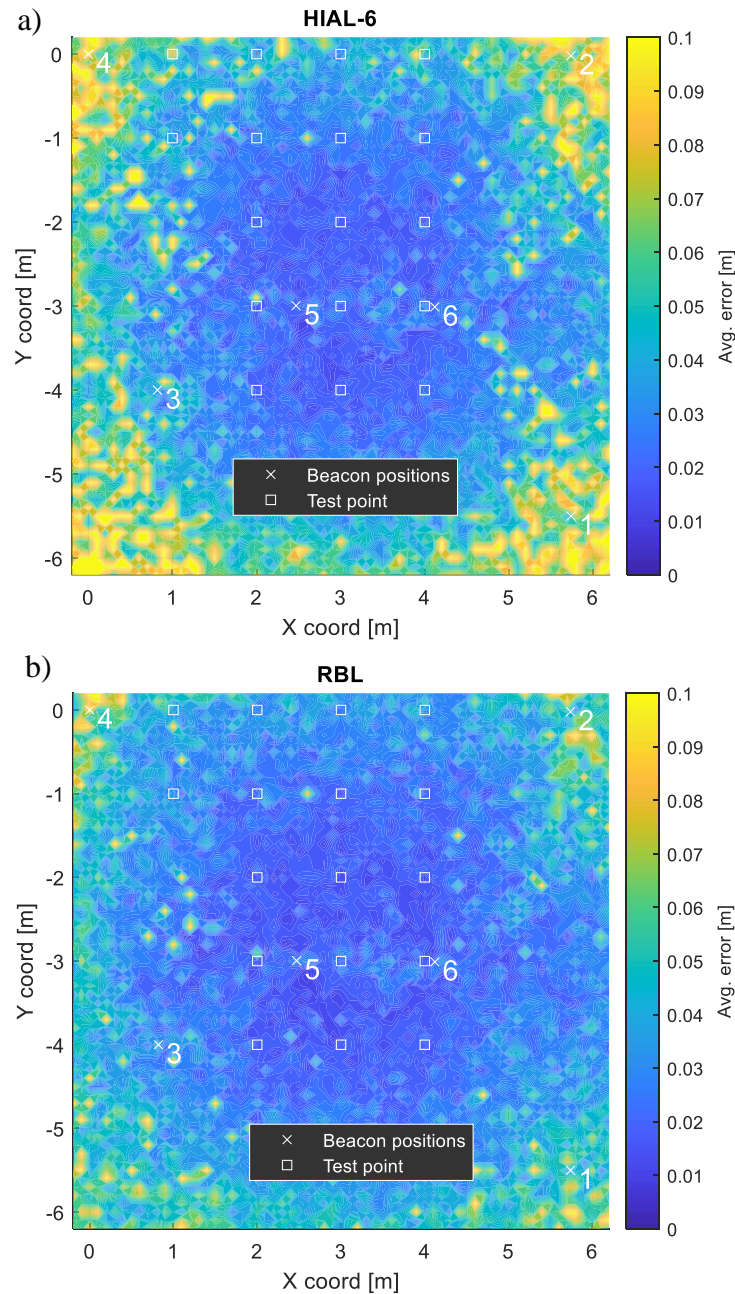
2. ábra Középpont-detekciós hiba lokációfüggőségét szemléltető hibafelület, HIAL-6 esetén. A fehér X szimbólumok a jeladók pozícióit, a fehér négyzetek a dolgozatban használt mérési pontokat jelölik. Az ábra 5 cm-es felbontással, pontonként 20 darab szimulált mérés felhasználásával készült. A világosabb területek érzékenyebbek a mérési hibákra.

A 6.7 ábrán a jeladók koordinátáinak pontatlan méréséből fakadó hibahatás kerül elemzésre, amely ugyan az eredeti elrendezéshez hasonló, de az aktuális hibaértékektől függően kissé más elrendezésű hibafelületet eredményez. Ezeket a hibákat nem lehet közvetlen szöghibákra visszavezetni, ugyanis a jeladók referenciapozíciói változnak, némileg módosítva a hibára érzékeny területek elhelyezkedését, méretét, és az általuk képviselt érzékenységet.

3. Hasonlítsa össze a javasolt HIAL és a RANSAC-alapú lokalizációs eljárásokat, melyiket milyen esetben célszerű alkalmazni!

A dolgozatban javasolt HIAL lokalizációs eljárás főként a kiugró mérési hibák kiszűrésének problémáját célozza a módszer működése közben generált metszéspontok konfidenciaszintjének számszerűsítéséhez használt ϵ_1 , ϵ_2 paraméterek segítségével. Jó magaviseletű jeladóelrendezés esetén, (például amikor csupán a lokalizációs terület szélén találhatóak a jeladók), a RANSAC-alapú, RBL lokalizációs módszerhez hasonló eredményeket képes elérni a HIAL módszer. Több tulajdonsága azonban kedvezőtlen az RBL-éhez képest. A HIAL módszer számításigényesebb ($\approx n^8$ nagyságrend a $\approx n^2$ nagyságrendhez képest, ahol n a jeladók száma). Az ϵ_1 és ϵ_2 paraméterek meghatározásához előzetes mérések, szimulációk szükségesek, emiatt beállításuk nehézkes. A kiugró mérési hibák

kiszűrése HIAL esetén a generált metszéspontok és körívek közti távolságok alapján történik, a beállított ϵ_1 , ϵ_2 paraméterek egy adott (lokációfüggő) hibaérzékenység mellett biztosítanak megbízható eredményeket, jelentésük visszavezetése a jeladók megbízhatóságának meghatározásához nehézkes. Ezzel szemben az RBL módszer szög-alapú kritérium alapján identifikálja a kiugró mérési hibákat, a pozicionálásból pedig teljes mértékben kihagyja a megbízhatatlannak ítélt jeladókat, ezáltal egy könnyebben értelmezhető és beállítható szűrési paramétert eredményezve. A módszerek által szolgáltatott hibafelületeket a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra a) HIAL-6 és b) RBL módszerek hibafelületei azonos bemenő adatok esetén. 10 cm-es felbontással, 0.4° szórású szögmérési hibával, 1 cm-es szórású referenciapont hibával.

A módszerek összehasonlításához elvégeztem egy több hibaforrásra is kiterjedő szimulációt a dolgozatban HIAL-nál használt szimulációs környezetben. A szimuláció során 10 cm-es felbontást használtam, pontonként 10 szimulált mérésel, a jeladók irányvektoraihoz 0.4° szórású szögmérési hiba került hozzáadásra. A referenciapontok koordinátái 1 cm-es szórással tartalmaztak hibát. A hibák generálása során normál eloszlást használtam, 0 várható érték mellett. A HIAL módszer ϵ_1 és ϵ_2 paramétereikhez rendre 2 cm és 6 cm-es értéket használtam, az RBL módszer $\Delta\alpha_d$ paraméteréhez 0.4° -ot állítottam be, a jeladó feltételezett mérete 6 cm volt. Minden egyes mérés során (pontonként 10) a 6 darab jeladó közül egy jeladó kiugró mérési hibát kapott (10° és 170° között, egyenletes eloszlással). A 3. ábrán alapján jól látható, hogy a HIAL-6 módszer némileg alulmarad az RLB-hez képest, ugyanakkor nem válik teljesen használhatatlanná a kiugró mérési hibával rendelkező jeladó jelenlétében sem. Az eredményeket összesítve a HIAL-6 módszer átlagos hibája 5.1 cm volt, az RBL módszeré pedig 3.4 cm volt a szimulált lokalizáció során.

Az említett tulajdonságok és eredmények alapján elmondható, hogy az RBL módszer messzemenően jobb teljesítményt és használhatóságot biztosít a gyakorlatban, mint a HIAL módszer.

Végezetül szeretném még egyszer megköszönni az elgondolkodtató kérdéseket és az értékes szakmai bírálatot.

Veszprém, 2024.07.09.



Rátosi Márk