

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET

Tihana Vidnjević

**MOGUĆNOSTI PRIMJENE
ISTOVREMENOG ODREĐIVANJA
POLOŽAJA I KARTIRANJA (SLAM) U
KARTOGRAFIJI**

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

Zahvala:

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Draženu Tutiću na svesrdnoj pomoći i savjetima koje mi je pružio tijekom definiranja teme te izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji koja mi je omogućila školovanje i u svakom trenutku me podržavala; trebalo je imati puno razumijevanja i strpljenja za to, i zbog toga im neizmjereno hvala!

Zahvaljujem se svojem dečku Mateju, koji mi je od prvog do zadnjeg dana bio veliki oslonac i motivator za napredovanje i postizanje uspjeha.

Zahvaljujem se i svim kolegama i prijateljima zbog kojih je studiranje bilo puno jednostavnije i zabavnije, i svima im želim da u životu ostvare sve što su naumili!

I. AUTOR

Ime i prezime: Tihana Vidnjević

II. DIPLOMSKI RAD

Naslov: Mogućnosti primjene istovremenog određivanja položaja i kartiranja (SLAM) u kartografiji

Mentor i voditelj: doc. dr. sc. Dražen Tutić

III. OCJENA I OBRANA

Datum zadavanja zadatka: 15.01.2017.

Datum obrane: 24.11.2017.

Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:

1. doc. dr. sc. Dražen Tutić
2. dr. sc. Ana Kuveždić Divjak
3. doc. dr. sc. Vesna Poslončec-Petrić

Sažetak

Istovremeno određivanje položaja i kartiranje (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) nova je tehnologija izmjere okoline koja najčešće rezultira oblakom točaka koji predstavlja mjerene objekte. S obzirom na to da su moguće različite konfiguracije senzora s pomoću kojih se izmjera obavlja, u okviru rada istražena su svojstva različitih senzora i njihovih kombinacija, kao i algoritama za generiranje oblaka točaka. Kako je tehnologija posebno pogodna za izmjeru manjih područja pri čemu je moguća i izmjera u stvarnom vremenu, istraženo je za koje kartografske zadatke je primjena te tehnologije izmjere najpogodnija, te koje su joj prednosti i nedostaci u takvoj primjeni.

Ključne riječi: simultano određivanje položaja i kartiranje, SLAM, senzori, računalni vid, oblak točaka

Abstract

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) is a new measurement technology which results in point cloud, which is representing observed objects. The settings and possible combinations of different sensor configurations were explored, as well as the algorithms for generating point cloud. Since this technology is especially suitable for measuring small areas in real time, cartographic tasks for which is this technology the most suitable were explored, along with their advantages and disadvantages.

Key words: simultaneous localization and mapping, SLAM, sensors, computer vision, point cloud

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Motivacija.....	1
3	Istovremeno određivanje položaja i kartiranje (SLAM).....	2
3.1	Povijest SLAM-a.....	3
3.2	Osnova SLAM-a	4
3.3	Proces SLAM-a	5
3.3.1	Prošireni Kalman filter.....	6
3.3.2	Grupna optimizacija.....	6
4	Vizualni SLAM	7
4.1	Pregled različitih vrsta vizualnog SLAM-a i pripadajućih algoritama	8
4.1.1	Monokularni SLAM.....	8
4.1.1.1	Large Scale Direct Monocular SLAM.....	9
4.1.2	ORB-SLAM: na značajkama utemeljeni monokularni SLAM.....	10
4.1.3	Rijetke/na značajkama utemeljene metode u usporedbi s gustim/direktnim metodama.....	11
4.1.4	RTAB-Map	12
4.1.5	ORB-SLAM2.....	14
5	ROS - Robotski operacijski sustav	17
5.1	Globalni i kotrljajući zatvarač	18
6	Praktična primjena obrađenih tehnologija.....	20
6.1	LSD-SLAM softver.....	20
6.1.1	UI-1221LE kamera	21
6.1.1.1	Kalibriranje kamere	21
6.1.2	Opažanje LSD-SLAM-om i UI kamerom.....	23
6.2	RTABMap aplikacija	25
6.2.1	Kinect kamera	27
6.2.2	Opažanje u jednoj sesiji	29
6.2.2.1	Konfiguracija aplikacije i postupak opažanja.....	29
6.2.3	Opažanje u više sesija	31

6.2.4	Prednosti i nedostaci kamere ArduCAM CMOS AR0134	34
7	Zaključak	35
8	Popis literature	36

1 Uvod

Simultano određivanje položaja i kartiranje (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) je tehnika dobivanja 3D-karte nepoznate okoline i položaja senzora u okolini. Ta tehnika je originalno namijenjena postizanju autonomne kontrole robota u robotici. Međutim, aplikacije utemeljene na SLAM-u postale su dosta raširene u 3D-modeliranju utemeljenom na računalnom vidu, vizualizaciji temeljenoj na proširenoj stvarnosti i samovozećim autima. U ranijim verzijama SLAM-algoritama, integrirane su različite vrste senzora - od laserskog i inercijalnog, do GPS-a i kamera. U današnje vrijeme, mnogo se govori o korištenju isključivo kamera jer je konfiguracija senzora jednostavna, ali s druge strane su i tehničke poteškoće veće nego kod drugih konfiguracija senzora. Kako je ulazni podatak takvog SLAM-a samo vizualna informacija, tehnika se naziva vizualni SLAM. Algoritmi za vizualni SLAM većinom dolaze iz područja računalnog vida, robotike i proširene stvarnosti. Posebno su pogodni za procjenjivanje položaja kamere u sustavima za proširenu stvarnost. Međutim, primjena vizualnog SLAM-a nije ograničena samo na ova područja, već se njihova primjena traži i u mnogim drugim područjima.

U ovom radu, obrađuje se nekoliko različitih vrsta vizualnog SLAM-a i istražuje se njihova potencijalna primjena u geodeziji, odnosno njezinom krajnjem proizvodu - karti. Kartografija je disciplina koja se bavi zasnivanjem, izradom, promicanjem, i proučavanjem karata (ICA). Objekt istraživanja kartografije je pretvorba prostorne stvarnosti u grafički prikaz u ravnini, a taj proces može poduprijeti i SLAM. Krajnji rezultat opažanja SLAM-om je oblak točaka koji predstavlja mjerene objekte i značajke na terenu. Taj oblak točaka je upravo prikaz prostorne stvarnosti u okolini kamere, a samim time što ne zahtjeva skupu opremu i mnogo ljudstva, ima potencijal postati jedna od metoda mjerenja u geodeziji.

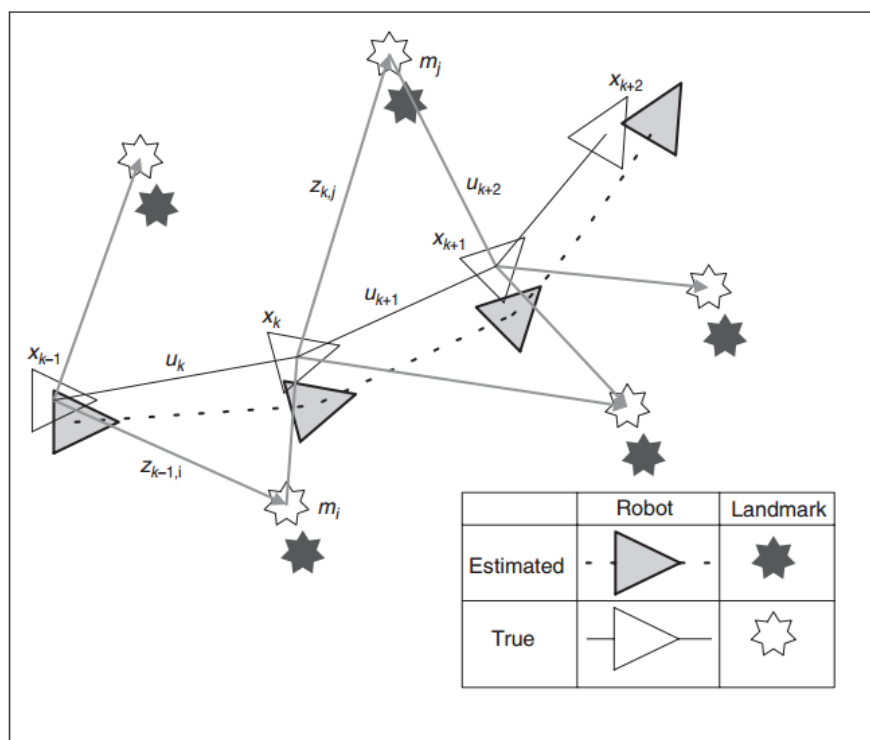
2 Motivacija

Cilj istraživanja bio je pronaći dovoljno dobar algoritam SLAM-a koji bi snimanjem u vanjskim uvjetima vjerodostojno prikazao snimljeni teren i zadovoljio kartografske potrebe i zahtjeve točnosti. SLAM kao tehnika mjerenja još uvijek nema pravu primjenu u geodeziji - što zbog upitne točnosti algoritama, što zbog nepoznavanja sustava kao takvog. Istraženi algoritmi SLAM-a su algoritmi otvorenog koda koji su svima dostupni za korištenje i prilagođavanje. Istraživanje je bilo usmjereno prema analizi algoritama i njihovom praktičnom primjenom u 3D-prikazu unutarnjeg, ali i vanjskog prostora, s obzirom na to da je krajnji cilj rada trebala biti karta vanjskog prostora površine do 1 km². Kada bi se ostvarilo takvo nešto, to bi bio veliki iskorak u području geodezije i kartiranja jer je SLAM u pogledu financija i jednostavnosti sustava dosta povoljnija opcija u odnosu na druge postojeće metode i opremu.

3 Istovremeno određivanje položaja i kartiranje (SLAM)

Simultano (istovremeno) određivanje položaja i kartiranje (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) je metoda kartiranja/izmjere nepoznatog područja uz istovremeno određivanje i položaja robota/senzora. Kartiranje, odnosno kreiranje 3D-karte okoline (u daljnjem tekstu karte) u kojoj se robot nalazi te određivanje položaja, odnosno navigacija kroz okolinu, događa se istovremeno koristeći trenutno određenu kartu relativne pozicije i orijentacije robota u toj okolini.

Zadatak SLAM-a je odrediti položaj robota i okoline, istovremeno, bez ikakvih dodatnih podataka. Pokazano je da je rješenje problema konvergirajuće, pri čemu se aproksimativno rješenje dobiva iterativno temeljem vjerojatnosti.



Slika 1: Ilustracija problema SLAM-a (Durrant-Whyte, H., Bailey, T., 2006)

Robot se kreće kroz okolinu te opaža objekte kojima određuje relativnu poziciju u odnosu na svoju; postupak je iterativan - svakim ponovnim opažanjem točaka okoline, njihova pozicija se popravljaju, a samim time i pozicija robota. Detaljnije o matematičkom modelu rješavanja ovog problema može se naći u Durrant-Whyte H. i Bailey T. (2006).

3.1 Povijest SLAM-a

SLAM se prvi puta spominje 1986. godine u San Franciscu na konferenciji IEEE-ja o robotici i automatici. U to vrijeme su se vjerojatnosne metode tek počele predstavljati u robotici i umjetnoj inteligenciji. Mnogi istraživači su pokušavali primijeniti vjerojatnosno-teoretske metode za probleme s kartiranjem i određivanjem položaja; uključujući Petera Cheesemana, Jima Crowleya i Hughu Durrant-Whytea.

Brojni radovi objavljeni su tijekom nekoliko sljedećih godina. Radovi Smitha i Cheesemana (Smith, R., Cheeseman, P., 1987), i Durrant-Whytea (Durrant-Whyte, H.F., 1988) utemeljili su statističku bazu za opisivanje veze između značajki okoline i nesigurnosti određivanja njihove geometrije. Ključan element ovog rada bio je pokazati da postoji visoki stupanj korelacije između procjene lokacija različitih značajki okoline na karti te da se te korelacije povećavaju s uzastopnim opažanjem.

Sljedeći važniji rad iz ovog doba je onaj Smitha i dr. (Smith R. et al., 1990), u kojem su pokazali da kako se mobilni robot kreće kroz nepoznato područje relativno opažajući značajke na terenu, procjene lokacija tih značajki korelirane su jedne s drugima zbog zajedničke pogreške u procjeni pozicije robota. Zaključak je da bi konzistentno cjelokupno rješenje kombiniranog problema određivanja položaja i kartiranja zahtjevalo udruženo stanje pozicije robota i pozicije značajke na terenu, koje bi se ažuriralo svakim sljedećim opažanjem. To bi zahtjevalo da se u procjenu uključi veliki broj vektora stanja.

Tadašnja pretpostavka je bila da procijenjene pogreške karte neće konvergirati i umjesto toga će se javljati ponašanje slučajnog uzorka s nepovezanim porastom pogreške. Prema tome, s postojećom računalnom kompleksnošću problema kartiranja i bez znanja o konvergiranom ponašanju karte, istraživači su se fokusirali na seriju procjena (aproksimacija) konzistentnog problema kartiranja koji pretpostavlja ili čak prisiljava da se korelacije između značajki na terenu smanje ili uklone.

Jednom kada je problem kombiniranog određivanja položaja i kartiranja formuliran kao jednostruki problem vjerojatnosti, te je uistinu postao konvergentan, dogodio se konceptualni proboj. Najvažnije, prepoznato je da su korelacije između značajki okoline, koje su mnogi istraživači pokušavali smanjiti, kritičan dio problema, i da je rješenje bolje što korelacije rastu. Na Međunarodnom simpoziju o istraživanju robotike 1995. godine u istraživačkom radu na temu mobilne robotike prvi je put predstavljena struktura problema SLAM-a, rezultat konvergiranja i formiranje akronima SLAM. Michael Csorba (Csorba, M., 1997) razvio je osnovnu teoriju konvergiranja i mnoge inicijalne rezultate.

Međunarodni simpozij o istraživanju robotike 1999. godine bilo je mjesto gdje je održana prva sesija SLAM-a i gdje je postignuto povezivanje između metoda SLAM-a utemeljenih na Kalman filteru i vjerojatnosnih metoda određivanja položaja i kartiranja. Radionica SLAM-a Međunarodne konferencije o robotici i automatici održana 2000. godine privukla je pažnju petnaest istraživača i usmjerila se na probleme s kompleksnosti algoritma.

Sljedeća radionica SLAM-a održana 2002. godine privukla je 150 istraživača sa širokim rasponom interesa i primjena. Kroz godine, interes za SLAM rastao je eksponencijalno, a nastavile su se održavati i radionice i ljetne škole na temu SLAM-a. (Durrant-Whyte, H. i Bailey, T., 2006)

3.2 Osnova SLAM-a

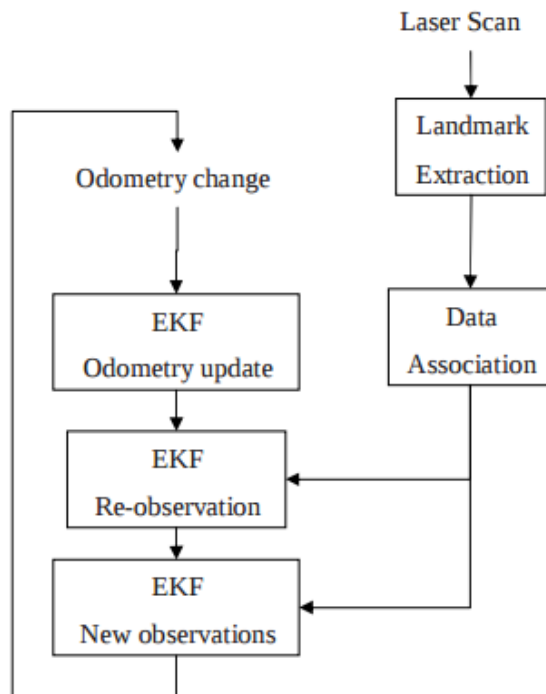
SLAM korijene pronalazi u okviru robotike, gdje se razvila disciplina računalnog vida. Računalni vid osnova je za razvoj područja robotiziranog kartiranja, tj. izmjere. Računalni vid je područje koje obuhvaća metode za prikupljanje, obradu, analiziranje i razumijevanje slike s ciljem dobivanja numeričkih ili simboličkih informacija. Što se tiče prikupljanja podataka - raniji sustavi SLAM-a nisu bili vezani uz vizualne podatke, odnosno kamere, već uz očitavanje podataka laserskim skenerima i kretnji robota kroz okolinu.

Smještanje robota na nepoznatu lokaciju u nepoznato područje problem je SLAM-a koji se rješava postupnom izgradnjom konzistentne karte područja dok se istovremeno određuje lokacija robota unutar karte. Rješenje problema SLAM-a se smatra vrlo važnim u mobilnoj robotici jer pruža mogućnost robotima da postanu sasvim autonomni.

Rješenje problema SLAM-a se smatra jednim od najvažnijih uspjeha u robotičkom svijetu zadnjeg desetljeća. SLAM je implementiran u brojnim domenama od unutarnjih robota do vanjskih, podvodnih i zračnih sustava. (Durrant-Whyte, H, Bailey, T., 2006)

3.3 Proces SLAM-a

Cilj SLAM-a je koristiti okolinu za ažuriranje pozicije robota. S obzirom na to da je odometrija robota (koja određuje položaj robota) često opterećena pogreškama, ne može se osloniti direktno na nju. Prošireni Kalman Filter (Extended Kalman Filter, EKF) je srce procesa SLAM-a. Odgovoran je za ažuriranje lokacije robota na temelju značajki i okoline. EKF održava procjenu nesigurnosti pozicije robota, kao i nesigurnost značajki koje vidi u okolini.



Slika 2: Prikaz procesa SLAM-a (Riisgaard, S., Blas, M. R., 2005)

Kako se robot kreće, odometrija se mijenja pa se nesigurnost koja dolazi zbog promjene pozicije robota ažurira kroz EKF. Značajke okoline se određuju iz nove pozicije robota. Robot tada pokušava povezati te značajke s opažanjima značajki koje je prethodno opažao. Ponovo opažane značajke se tada koriste za ažuriranje pozicije robota u proširenom Kalmanovom filteru. Značajke koje nisu prethodno opažane su dodane u EKF kao nova opažanja tako da kasnije mogu ponovno biti opažane (Riisgaard, S., Blas, M. R., 2005).

3.3.1 Prošireni Kalman filter

Kako je mnogo vanjskih faktora uključeno u mobilnu robotiku, neizbježne su pogreške u računanju položaja značajki i objekata na karti okoline. Pogreške su uzrokovane akumulacijom matematičkih pogrešaka, kvalitete analiziranih kadrova, poteškoće u preciznom identificiranju značajki i nesavršenosti kamere. U monokularnom (konfiguracija se sastoji od jedne kamere) SLAM-u, posebno značajan problem je procjena dubine što se rješava primjenom proširenog Kalmanovog filtera.

Algoritam proširenog Kalmanovog filtera prati nesigurnosti pozicije robota i pozicije objekata u okolini. Koristi kumulativne podatke za izračunavanje najbolje ažurirane pozicije robota i objekata. To znači da se pogreške između karte i okoline ne povećavaju. (Yap, M. et al., 2016)

3.3.2 Grupna optimizacija

Grupna optimizacija (eng. Bundle adjustment) pruža točne procjene pozicije kamere kao i gustu geometrijsku rekonstrukciju okoline, pod uvjetom da je prisutna čvrsta mreža podudaranja točaka te dobre inicijalne pretpostavke. U aplikacijama vizualnog SLAM-a, čiji je cilj u realnom vremenu procijeniti trajektoriju kamere dok se rekonstruira okolina, grupna optimizacija se dugo smatrala neefikasnom za takvu primjenu. U današnje vrijeme snažnih procesora, za postizanje točnih rezultata s razumnim udjelom računanja, aplikacije vizualnog SLAM-a moraju imati modul grupne optimizacije koji podrazumijeva (Mur-Artal, R, Montiel, J. M. M., Tardó, J. D., 2015):

- pripadajuća opažanja značajki okoline (točaka karte) među skupovima odabranih okvira (eng. frame) (ključni okviri),
- da se povećanjem broja ključnih okvira povećava i kompleksnost računanja što podrazumijeva izbjegavanje redundantnosti radi osiguravanja efikasnosti,
- da čvrsta mrežu konfiguracije ključnih okvira i točaka producira točnije rezultate, tj. dobro rašireni skup ključnih okvira sa značajnom paralaksom i s mnoštvom zatvorenih petlji,
- inicijalnu procjenu pozicija ključnih okvira i lokacija točaka za nelinearnu optimizaciju,
- lokalnu kartu gdje je optimizacija fokusirana na postizanje skalabilnosti,
- sposobnost izvođenja brzih globalnih optimizacija (npr. određivanje grafa pozicija) za zatvaranje petlji u realnom vremenu.

4 Vizualni SLAM

Sustavi SLAM-a koji se temelje na vizualnoj informaciji, odnosno koriste kameru za opažanje prostora nazivaju se vizualni SLAM. Svi algoritmi istraženi u okviru diplomskog rada pripadaju vizualnom SLAM-u, a razlog tome je jednostavnost opreme, odnosno kamere potrebne za takvo mjerenje. U nastavku je objašnjena osnova takvih sustava te kako se odvija proces dobivanja vizualne informacije i njezina obrada u algoritmima.

Proces vizualnog SLAM-a je prvenstveno sastavljen od sljedeća tri koraka:

1. Inicijalizacija
2. Praćenje
3. Kartiranje

Za pokretanje SLAM-a potrebno je postaviti određeni koordinatni sustav za procjenu pozicije kamere i 3D-rekonstrukciju nepoznatog područja. Taj koordinatni sustav je proizvoljan, a kasnije se uzastopnim opažanjem kamera i okolina smještaju na ispravne pozicije.

Nakon inicijalizacije, procesom praćenja i kartiranja se kontinuirano izračunavaju pozicije kamere. Kod praćenja se rekonstruirana karta prati na slici kako bi se procijenio položaj slike kamere u odnosu na kartu. Kod kartiranja, karta se proširuje izračunavanjem 3D-struktura okoline kada se kamerom opažaju dijelovi okoline u kojima se kartiranje nije prije izvršilo. Ta dva procesa su iterativna što znači da se svakim novim opažanjem točke njezina pozicija na karti popravljaju i dobiva se točniji rezultat.

Sljedeća dva dodatna koraka su također uključena u vizualni SLAM ovisno o namjeni:

1. Relokalizacija
2. Optimizacija globalne karte

Relokalizacija je obavezna kada je praćenje prekinuto zbog prebrzog pokreta kamere ili nekih drugih smetnji. Potrebno je ponovno izračunati poziciju kamere u odnosu na kartu pa se zato ovaj proces naziva relokalizacija. Ako relokalizacija nije implementirana u sustave vizualnog SLAM-a, nakon prekida praćenja oni više ne mogu raditi i takvi sustavi nisu praktično korisni.

Optimizacija globalne karte podrazumijeva da se pogreške procjene akumuliraju ovisno o prijedenoj udaljenosti kamere, te da se ta pogreška globalnom optimizacijom može odrediti. Kada se početna okolina ponovo opaža nakon što je obavljen niz opažanja, može se izračunati referentna informacija koja predstavlja akumuliranu pogrešku od početka do kraja opažanja u toj petlji. Tada se tako određena pogreška koristi za popravljavanje pogrešaka globalnom optimizacijom, tj. unatrag u cijelom prethodnom skupu opažanja te petlje.

Zatvaranje petlji je i tehnika dobivanja referentnih podataka. Zatvorena petlja se prvo traži uparivanjem trenutne slike s prethodno dobivenim slikama. Ako je petlja detektirana, znači da

kamera snima neki od prethodno opažanih kadrova. U tom slučaju, može se procijeniti akumulirana pogreška nastala tijekom snimanja. Važno je napomenuti da se procedura detekcije zatvaranja petlji odvija koristeći iste algoritme kao i relokalizacija. Relokalizacija se odvija kako bi se obnovila pozicija kamere, a zatvaranje petlji se odvija kako bi se dobila geometrijski konzistentna karta. (Taketomi, T., Uchiyama, H., Ikeda, S., 2017)

4.1 Pregled različitih vrsta vizualnog SLAM-a i pripadajućih algoritama

U narednim poglavljima bit će obrađeni različiti sustavi SLAM-a koji su svojim svojstvima i prethodnim istraživanjima pokazali potencijal za rješavanje problema opažanja i primjene rezultata opažanja u kartografiji.

4.1.1 Monokularni SLAM

Prva vrsta SLAM-a obrađena u radu je monokularni SLAM, a jedan od glavnih razloga zašto se koristi je zbog hardverske jednostavnosti, što je ujedno i razlog više da se istraže njegove mogućnosti. Prednost sustava je da je mnogo jeftiniji i fizički manji od ostalih sustava, kao što je npr. stereo SLAM jer zahtjeva samo jednu kameru, ali zbog koje ujedno ima i brojna ograničenja. Jedan od nedostataka je potreba za kompleksnim algoritmima pa je i softver za sustave monokularnog SLAM-a složeniji i zahtjevniji od ostalih. Razlog tome je što dubina nije neposredno mjerljiva monokularnom kamerom pa ni mjerilo karte ne može biti određeno. S obzirom na to da se dubina ne može inicijalizirati iz prvog okvira, sustav zahtjeva i umjetno kreiranje inicijalne karte.

Jedno rješenje tog problema je inicijalno praćenje strukture s poznatim dubinama, ali to nije praktično. Dubine mogu biti inicijalizirane i s visokom nesigurnošću (npr. slučajnim pridjeljivanjem) koristeći obrnutu parametrizaciju dubine, koja kasnije treba konvergirati u njihove prave pozicije. Nadalje, nakon inicijalizacije, dubina mora biti izračunata analizom više snimaka koristeći prošireni Kalmanov filter (EKF, vidi poglavlje Osnova SLAM-a). Čak i u sustavima SLAM-a koji obuhvaćaju više kamera, teško je direktno zaključiti koja je udaljenost dalekog objekta koristeći baznu udaljenost između kamera. Udaljenost između kamera je jako mala u usporedbi s procijenjenom udaljenosti pa se u opažanoj snimci svake kamere, objekti čine identični. (Yap, M. et al., 2016)

Problem određivanja dubine riješen je i filtriranjem - svaki okvir je procesiran filterom koji procjenjuje položaje značajki karte i pozicije kamere. Nedostatak filtriranja je gubitak informacija

u procesiranju uzastopnih okvira s malo novih značajki i akumulacija pogrešaka zbog linearizacije funkcijskog modela.

4.1.1.1 Large Scale Direct Monocular SLAM

Ovaj algoritam monokularnog SLAM-a, zvan Large Scale Direct Monocular SLAM, razvijen je na Tehničkom sveučilištu u Münchenu od strane Jakoba Engela te profesora Daniela Cremersa (Engel, J., Stuckler, J., Cremers, D., 2014). Large Scale Direct Monocular SLAM (LSD-SLAM) je vrsta monokularnog SLAM-a koji omogućuje kreiranje konzistentnih karata velikih područja. Umjesto korištenja kontrolnih točaka kao generalizacije ulaznih snimaka, radi direktno na snimkama koristeći intenzitet za praćenje i kartiranje objekata. Ova metoda je iznimno moćna jer omogućuje kartiranje velikih područja i ne zahtjeva posebne specijalizirane hardverske komponente - može se snimati običnim pametnim telefonom u realnom vremenu. Algoritam sadrži tri komponente - praćenje, procjenjivanje dubine karte i optimizacija iste.

Kao direktna metoda, LSD-SLAM koristi sve informacije na slici, dok metode diskretnih točaka mogu koristiti samo male dijelove slike. To omogućuje veću točnost i robusnost u slabije teksturiranim okruženjima (npr. unutarnji prostor) i 3D-rekonstrukcijama s gustim točkama. Nadalje, s obzirom na to da se kod ove metode filtriranja dubina, izvodi mnogo manjih stereo usporedbi umjesto samo nekoliko ključnih okvira (scena), postoji mnogo manje grubih pogrešaka.

LSD-SLAM kreira graf pozicija okvira, a svaki sadrži polugustu procjenu dubine karte. Koristeći novu direktnu formulaciju usporedbe slika, direktno se prate uvjeti između okvira (npr. gibanje krutog tijela + mjerilo), koji se koriste za izradu grafa pozicija koji se potom optimizira. Takva formulacija dopušta detektiranje i ispravljanje znatnih promjena mjerila nakon zatvaranja petlji, te dopušta velike varijacije mjerila unutar iste karte.

4.1.2 ORB-SLAM: na značajkama utemeljeni monokularni SLAM

ORB-SLAM je na značajkama utemeljeni sustav SLAM-a u realnom vremenu. Značajke koje se koriste za ovu metodu su tzv. značajke ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF). Riječ je o vrsti monokularnog SLAM-a koji u realnom vremenu izračunava trajektoriju kamere i generira 3D-rekonstrukciju okoline s prorijeđenim točkama, a funkcionalan je u širokom rasponu okolina. Omogućuje zatvaranje velikih petlji i globalnu relokalizaciju u realnom vremenu iz širokih baznih linija. Zadovoljavajuće rezultate daje na velikim i malim, kao i unutarnjim i vanjskim prostorima. Na velikim prostorima, zahvaljujući grafu vidljivosti, tijekom praćenja i kartiranja fokus je na lokalnom vidljivom području, nezavisno od veličine područja (karte).

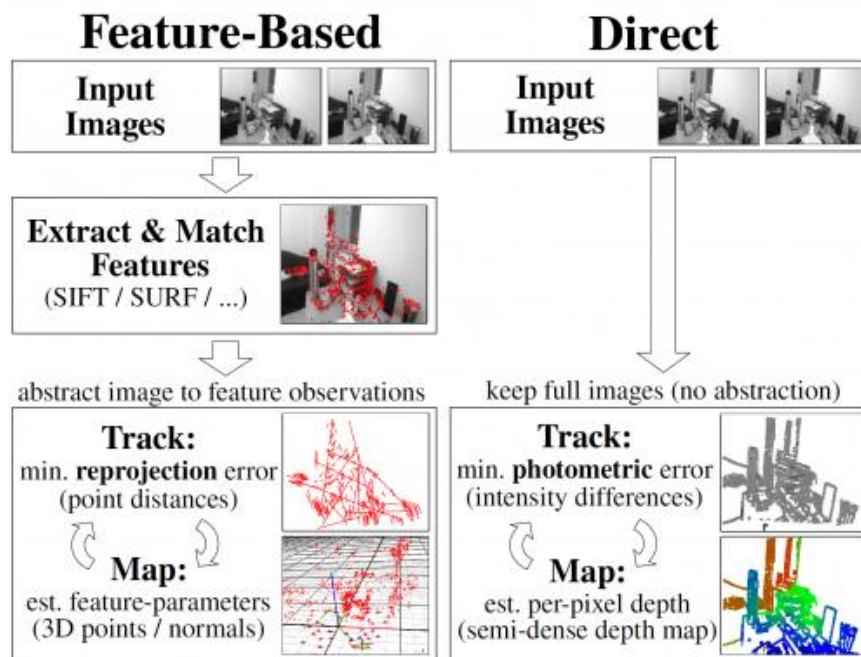
Omogućuje detekciju zatvaranja petlji sa širokim baznim linijama kamere, relokalizaciju te potpuno automatsku inicijalizaciju. ORB-SLAM koristi iste značajke za sve SLAM zadatke: praćenje, kartiranje, relokalizacija i zatvaranje petlji. Strategija kojom se označavaju točke i ključni okviri u rekonstrukciji omogućuje robustnost i generira kompaktnu kartu koja se nadograđuje ako se okolina mijenja. ORB-SLAM pozicionira kameru i ključne okvire s pomoću grupne optimizacije (eng. bundle adjustment). Zatvaranje petlji odvija se optimizacijom grafa pozicija sa sedam stupnjeva slobode. Korekcija se inverzno propagira na karte dubine.

ORB-SLAM podržava opsežnu evaluaciju u popularnim javnim skupovima podataka vanjskih i unutarnjih područja, uključujući niz ručnih uređaja, automobila i robota. Postiže se bolja točnost pozicioniranja kamere nego kod direktnih metoda, koje optimizaciju vrše direktno preko intenziteta piksela umjesto upotrebom pogrešaka položaja značajki. (Mur-Artal, R. et al., 2015)

Kako je ORB-SLAM ograničen korištenjem monokularne kamere, krajem 2016. godine objavljen je ORB-SLAM2 koji podržava i stereo i RGB-D kamere. Karakteristike tog sustava opisane su u poglavlju ORB-SLAM2.

4.1.3 Rijetke/na značajkama utemeljene metode u usporedbi s gustim/direktnim metodama

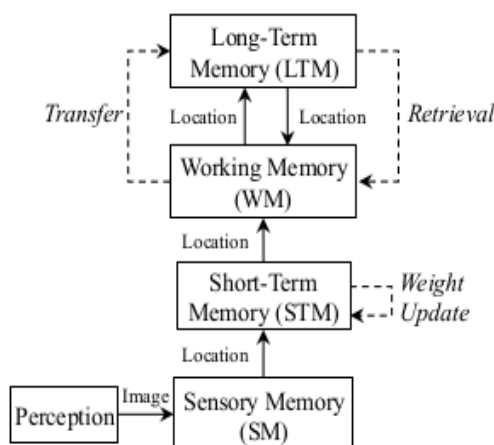
Algoritmi monokularnog SLAM-a u realnom vremenu, kao što je prethodno spomenuti LSD-SLAM, omogućuju guste ili poluguste rekonstrukcije okoline, a kamera je pozicionirana optimiziranjem direktno preko funkcija intenziteta piksela. Ovakvi direktni pristupi ne trebaju izdvajati značajke i mogu izbjeći pripadajuće artefakte (tehnički artefakti = umjetno stvoreni objekti za obavljanje neke praktične funkcije). Također su mnogo više robusni za zamagljene, slabo teksturirane, kao i visoko teksturirane površine kao npr. asfalt. Na slici 3 može se vidjeti kako se, kod na značajkama utemeljenog sustava, na temelju izdvajanja i spajanja značajki dobiva apstraktni prikaz prostora, odnosno karte. Optimizacija se vrši ponovnom projekcijom pogrešaka značajki koja se dobiva iz udaljenosti između točaka. U direktnoj metodi se, s druge strane, optimizacija vrši preko razlika u intenzitetima slike, a konačan produkt je karta dubine, za raliku od 3D-točaka koje se dobivaju na temelju izdvajanja značajki. (Mur-Artal, R. et al., 2015)



Slika 3: Usporedba na značajkama utemeljenog i direktnog pristupa dobivanja prikaza okoline (Engel, J., Stuckler, J., Cremers, D. 2014)

4.1.4 RTAB-Map

RTAB-Map (eng. Real-Time Appearance-Based Mapping) je vizualni pristup istovremenog određivanja položaja i kartiranja utemeljen na mehanizmu upravljanja memorijom opažanja. Razvili su ga Mathieu Labbe i Francois Michaud, a u svom radu (Labbe, M. i Michaud F., 2014) opisuju ga kao pristup u kojem se detekcijom zatvaranja petlji određuje dolazi li opažanje iz prethodno ili trenutno opažane okoline. RTAB-Map je neovisan o veličini područja opažanja, unatoč tome što je vrijeme potrebno za zatvaranje petlji i optimizaciju grafa pozicija ograničeno veličinom područja. Upravo zbog toga se koristi pristup upravljanja memorijom kojim se ograničava veličina karte što omogućuje da se zatvaranje petlji i optimizacija grafa izvrši u ograničenom vremenskom periodu, čime se zadovoljavaju zahtjevi kartiranja tijekom dužeg vremenskog perioda i u područjima velikih razmjera. Memorija je sastavljena od kratkotrajne, radne i dugotrajne memorije, kako je prikazano na slici 4.



Slika 4. Proces upravljanja memorijom u RTAB-Mapu (Labbe, M., Michaud, F., 2014)

Proces upravljanja memorijom unutar RTABMap pristupa odvija se na sljedeći način: Percepcijom se dobiva slika koja se šalje u memoriju senzora (Sensor Memory, SM), u kojoj se smanjuje dimenzionalnost podataka i izdvajaju značajke korisne za zatvaranje petlji. Tada memorija senzora stvara novu poziciju koju šalje u kratkotrajnu memoriju (Short-Term Memory, STM). Kratkotrajna memorija određuje težine nedavno zaprimljenih pozicija i ažurira poziciju ukoliko smatra da je nova pozicija slična prethodnoj poziciji te ih spaja u potpuno novu poziciju, kojoj onda povećava težinu. Kratkotrajna memorija se koristi za promatranje sličnosti između uzastopnih slika kroz vrijeme s ciljem ažuriranja težine pozicije. Uloga radne memorije (Working Memory, WM) je da otkriva zatvaranje petlji između pozicija u prostoru. Veličina kratkotrajne memorije je ovisna o brzini robota i brzini dobivanja pozicija. Kada broj pozicija dosegne zadanu veličinu, najstarija pozicija se iz kratkotrajne memorije prebacuje u radnu memoriju. RTAB-Map procjenjuje zatvaranje petlji diskretnim Bayesovim filterom uspoređujući novu poziciju s

pozicijama iz radne memorije (tzv. „bag-of-words“ pristup). Petlja je zatvorena i pozicije su povezane u trenutku kada je vjerojatnost za zatvaranje petlje između nove i stare pozicije u radnoj memoriji visoka. Sljedeća dva koraka su ključna za održavanje radne memorije unutar ograničene veličine. Prvi korak je povrat (Retrieval) u kojem se one susjedne pozicije koje imaju najveću vjerojatnost zatvaranja petlje vraćaju natrag iz dugotrajne u radnu memoriju, povećavajući vjerojatnost zatvorenih petlji budućih bliskih pozicija. Drugi korak se naziva prijenos (Transfer) u kojem ako je vrijeme potrebno za zatvaranje petlje duže od vremenskog praga T , najstarija od zadnje posjećених lokacija (npr. najstarija lokacija s najmanjom težinom) se prebacuje u dugotrajnu memoriju. Broj prebačenih pozicija ovisi o broju pozicija dodanih u radnu memoriju tijekom trenutnog ciklusa.

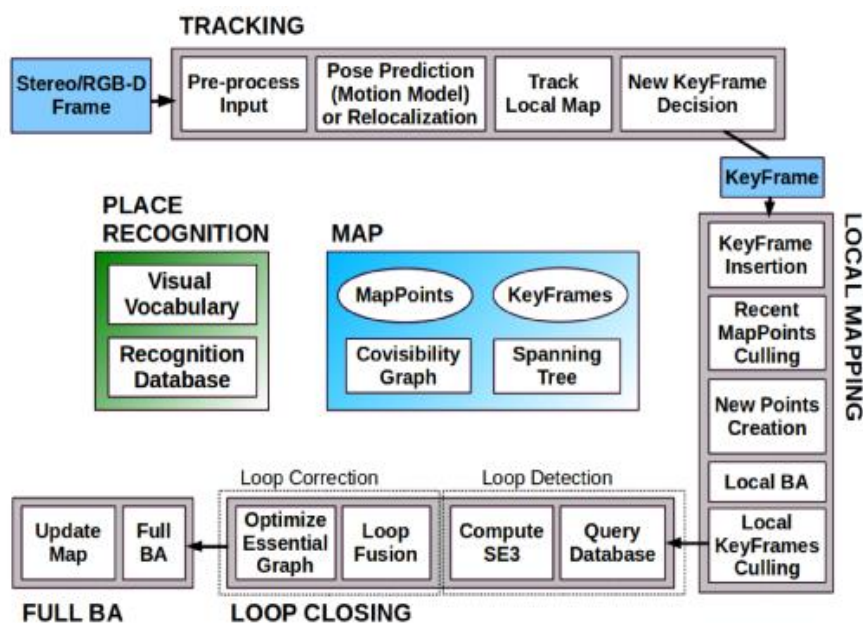
Princip zatvaranja petlji

Detekcija zatvaranja petlji je proces uparivanja trenutne pozicije i prethodno opažanih pozicija, a kada je petlja zatvorena smatra se da se početna i zadnja snimljena točka okoline podudaraju te sve točke okoline sada čine jednu konzistentnu cjelinu. Za razliku od drugih pristupa kod kojih se zatvaranje petlji temelji na značajkama okoline ili intenzitetima snimke, kod RTAB-Mapa se prepoznavanje zatvaranja petlji izvršava usporedbom svih prethodnih snimki s novom snimkom, odnosno usporedbom pozicija točaka po principu „bag-of-words“. Zatvaranje petlji je neovisno od položaja robota i rješava problem određivanja položaja u trenutku kada se robot vrati u već opažano područje koristeći različitu referencu. Kada je petlja zatvorena, kreira se graf pozicija, a njegovom optimizacijom smanjuju se pogreške pozicija na karti. Kod snimanja u više sesija iz svake se sesije uzima graf i kreira se jedan globalni. (Labbe, M., Michaud, F., 2014)

4.1.5 ORB-SLAM2

ORB-SLAM2 je sustav SLAM-a koji u realnom vremenu osim za monokularne, izračunava poziciju kamere i 3D-kartu okoline i za stereo i RGB-D kamere (u pravom mjerilu). Detektira petlje i relokalizira kameru u realnom vremenu. Skup podataka potreban za rad sustava ovisan je o vrsti kamere. Za stereo i monokularnu koristi se KITTI (Tehničko sveučilište u Karlsruheu) i EuRoC set podataka, a za RGB-D i monokularnu kameru koristi se skup podataka TUM-a (Tehničko sveučilište u Munchenu). U okviru ROS-a, moguće je uživo procesirati snimke monokularnih, stereo i RGB-D kamera. Sustav se može koristiti i izvan ROS-a. ORB-SLAM2 pruža sučelje za navigaciju između modula SLAM-a i modula za određivanje položaja.

Mur-Artal, R. i Tardos, J.D. u svojem istraživanju iz 2016. godine tvrde da rezultati snimanja RGB-D kamerom pokazuju da se procesom grupne optimizacije postiže veća točnost određivanja položaja značajki okoline nego kod sustava utemeljenih na metodi najbližih točaka ili smanjivanju pogreške određivanja dubine. Koristeći bliže i dalje stereo točke i opažanja jednom kamerom rezultati stereo sustavom su točniji od direktnog stereo SLAM-a. Pojednostavljenim načinom određivanja položaja može se efikasno ponovno iskoristiti karta s isključenim kartiranjem. Slika 5 pokazuje procese i nizove ORB-SLAM2 sustava.



Slika 5: Prikaz procesa i nizova (Mur-Artal, R. i Tardos, J.D., 2016)

Sustav ima tri glavna procesa koji se odvijaju paralelno:

1. Praćenje - služi za određivanje pozicije kamere svakim opažanim okvirom, i to uparivanjem značajki na lokalnoj karti i smanjivanjem pogreške reprojekcije pritom provodeći proces grupne optimizacije samo za kretanju robota kroz okolinu.
2. Lokalno kartiranje - služi za upravljanje lokalnom kartom i optimiziranje pozicija točaka karte, izvedeći lokalnu grupnu optimizaciju.
3. Zatvaranje petlji - služi za detektiranje velikih petlji i smanjivanje utjecaja akumuliranih naglih pokreta koristeći optimizaciju grafa pozicija. Taj proces pokreće četvrti proces koji nakon optimizacije grafa pozicija obavlja potpunu grupnu optimizaciju za izračunavanje najoptimalnije strukture i rješenja za kretanju robota kroz okolinu.

Sustav ima ugrađen modul za prepoznavanje okoline utemeljen na DBoW2, knjižnici za ponovno određivanje položaja (za slučaj da proces praćenja ne uspije ili ako se dogodi ponovna inicijalizacija u već opažanoj okolini) ili za detekciju petlji. Sustav kreira graf vidljivosti koji povezuje bilo koja dva ključna okvira uz uvjet da imaju zajedničke točke i minimalnu rasprostranjenost grafa koji povezuje sve ključne okvire. Takvom strukturom grafa dohvaćaju se lokalni ključni, funkcionirajući u velikim područjima, a prri zatvaranju petlje služe kao strukture za optimizaciju grafa pozicija.

Sustav koristi ORB značajke za praćenje, kartiranje i prepoznavanje mjesta. Robusne su za određivanje rotacije i mjerila karte te su nepromijenjive prilikom automatskog dobivanja kamere, automatske ekspozicije kamere te promjene iluminacije. ORB značajke su efikasne za izdvajanje i spajanje značajki u realnom vremenu i poprilično su precizne u prepoznavanju mjesta na temelju „bag-of-words“ pristupa.

Karakteristike opisane u istraživanju od Mur-Artal et al., potkrijepljene su rezultatima opažanja RGB-D kamerom, što se može vidjeti na slici 6.



Slika 6: Prikaz rezultata opažanja RGB-D kamerom (Mur-Artal, R. i Tardos, J.D., 2016)

Vizualni rezultati opažanja pokazuju ključne okvire i gusti oblak točaka opažane prostorije s jednom zatvorenom petljom. Rubovi su vrlo vjerno prikazani i dubina je dobro procijenjena. Oblak točaka je renderiran povratnim projektiranjem karata dubine iz procijenjenih pozicija ključnih okvira.

Sustav pokazuje najbolji potencijal za zadovoljavanje kartografskih potreba od svih dosad istraženih tehnologija. Međutim, ORB-SLAM2 nije praktično isproban pa nije poznato u kojoj mjeri bi zadovoljio točnost kartografskih zadataka, ali njegove specifikacije nadmašuju sve ostale sustave pa se može pretpostaviti da bi dao najbolje rezultate.

5 ROS - Robotski operacijski sustav

Robotski operacijski sustav (Robot Operating System, ROS) je netipični operacijski sustav koji pruža brojne servise za heterogene računalne klastere (skupine usko povezanih računala koja mogu djelovati kao jedno), kao što su hardverska apstrakcija, kontrola uređaja na niskoj razini, implementacija često korištenih funkcionalnosti, slanje poruka između procesa i upravljanje paketima. ROS je prvotno osmišljen radi prevladavanja izazova prilikom razvoja servisnih robota na projektu STAIR na Sveučilištu u Stanfordu i Programu osobnih robota (<http://stair.stanford.edu/>, STAIR: STanford Artificial Intelligence Robot). U konačnici, njegov razvoj rezultirao je arhitekturom koja obuhvaća mnogo više područja od samog servisnog robota i domene upravljanja robotom.

Karakteristike ROS-a su sljedeće:

- Umrežavanje iste razine (bez poslužitelja)
- Utemeljen na alatima
- Neovisan o programskom jeziku
- Besplatan i otvorenog koda

Osnovni koncept ROS-a sastoji se od čvorova, poruka, tema (eng. topic) i servisa. Čvorovi su procesi koji obavljaju računanje. ROS je sustav modula koji se sastoji od mnogo čvorova pa se u tom kontekstu, pojam čvor odnosi na softverski modul. Čvorovi međusobno komuniciraju putem razmjenjivanja poruka. Poruka je struktura podataka u pisanom obliku, koja podržava primitivne tipove podataka kao što su *integer*, *float*, *boolean*, itd., kao i liste primitivnih tipova podataka i konstanti. Poruke mogu biti sastavljene i od drugih poruka i lista poruka. Čvor šalje poruku objavljujući je zadanoj temi, koja se sastoji od jednostavnog niza znakova kao što je „odometrija“ ili „karta“. Čvor koji je zainteresiran za neki tip podataka će se i pretplatiti na odgovarajuću temu. Jedan čvor može objaviti ili pretplatiti se na više tema.

ROS pruža alat zvan *roslaunch*, koji uz pomoć XML datoteke (s ekstenzijom *.launch*) specificira parametre za konfiguriranje i pokretanje čvorova, kao i uređaj na kojem bi čvorovi trebali obavljati računanje.

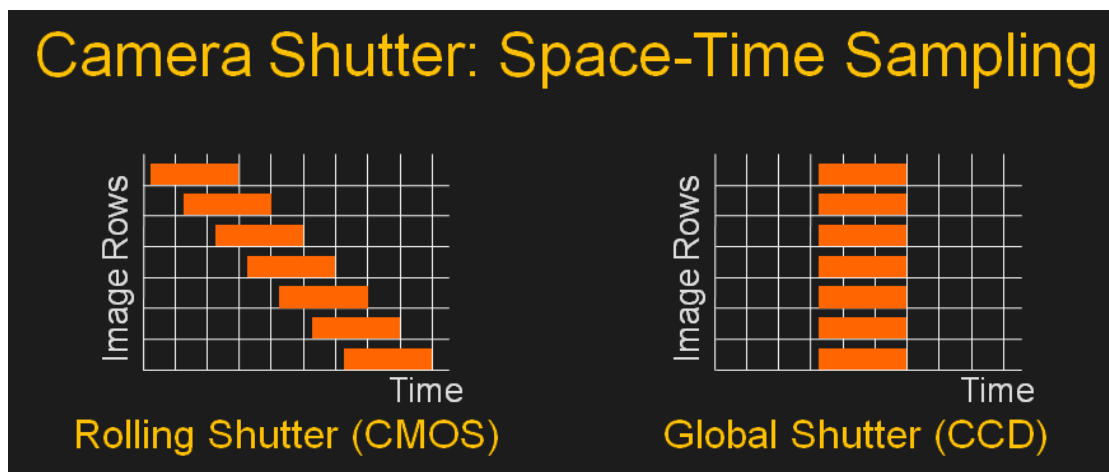
U programskom jeziku Python napisan je *rostopic* koji služi za filtriranje poruka koristeći komandnu liniju, a rezultira prilagodljivom porukom koja može pretvoriti bilo koji dio nekog toka (eng. stream) podataka u tekstualni tok.

ROS distribuira i *rviz*, vizualizacijski program koji za vizualizaciju koristi arhitekturu podataka. *Rviz* može prikazati različite vrste podataka, kao što su slike, oblaci točaka, geometrijske likove (rezultati prepoznavanja objekata), pozicije i putanje robota/senzora itd. (Quinley, M. et al., 2009)

5.1 Globalni i kotrljajući zatvarač

Specijalizirani senzori kao što su laserski senzori vrlo su efikasni, ali su često vrlo skupi i veliki su potrošači energije. Snimke današnjih kamera sadrže mnoštvo informacija, što je korisno u aplikacijama računalnog vida kao što je 3D-rekonstrukcija. U takvim aplikacijama važne su kamere s globalnim zatvaračem. Kamere s globalnim zatvaračem snimaju scenu izlaganjem cijelog senzora (svih redova senzora) svjetlu scene u tom trenutku (u ekspoziciji). To stvara približnu sliku scene ispred kamere. Nedostatak kamere s globalnim zatvaračem je da su skuplje u usporedbi s kamerama s kotrljajućim zatvaračem koji se nalazi u gotovo svakom elektroničkom uređaju koji sadrži kameru, npr. pametni telefon.

Kamere s kotrljajućim zatvaračem svaki red piksela senzora kamere izlažu u ekspoziciji u različitim trenucima. To stvara jednaku sliku kao i kamera s globalnim zatvaračem, ali samo u slučaju da je kamera statična i da se scena ne mijenja tijekom ekspozicije. Međutim, ako dođe do promjena ili pokreta tijekom ekspozicije, nastat će distorzija koja će stvoriti neispravnu, iskrivljenu snimku. Distorzija stvara probleme u aplikacijama računalnog vida jer nije konstantna, nego ovisi o promjenama scene i pokretu kamere.



Slika 7: Prikaz odnosa redova piksela i vremena ekspozicije u kameri s kotrljajućim zatvaračem u usporedbi s globalnim (Gu. J. et al., 2010)

Najučestaliji tip danas u potrošačkoj elektronici su kamere s kotrljajućim zatvaračima, najviše zato jer su cjenovno povoljnije od kamere s globalnim zatvaračima. Kamere s kotrljajućim zatvaračem sklone su distorzijama zbog promjena u okolini i pokreta kamere te je svaki red zasebna slika. Distorzija koja nastaje usred ekspozicije kod kotrljajućeg zatvarača može se vidjeti na slici 8. (Tallund, L., 2016)



Slika 8: Slika iste scene snimana kamerom s kotrljajućim zatvaračem (lijevo) i globalnim (desno) (Andor)

Kod kamere s globalnim zatvaračem, svi pikseli okvira su snimljeni u isto vrijeme, a to je neophodno za sustave SLAM-a u realnom vremenu za usporedbu uzastopnih okvira slike u svrhu procjenjivanja dubine.

6 Praktična primjena obrađenih tehnologija

U narednim poglavljima opisana je konfiguracija algoritama teorijski obrađenih sustava SLAM-a i rezultati opažanja istima. Sva opažanja obavljena su u unutarnjem prostoru pa iz rezultata nije moguće zaključiti koja bi konfiguracija senzora odgovarala opažanju u vanjskom prostoru.

6.1 LSD-SLAM softver

Instalacija algoritma LSD-SLAM-a i ROS Indigo – Robotskog operacijskog sustava zahtjeva operacijski sustav Ubuntu (verzija 14.04). Također, potrebno je instalirati i CMake i OpenCV dodatke, a koji su opisani u nastavku.

ROS - verzija Indigo

Robotski operacijski sustav (ROS) okvir je za pisanje robotskog softvera. Sastoji se od mnoštva alata, knjižnica i sporazuma koje omogućuju pojednostavljenje kreiranja kompleksnog i robusnog robotskog ponašanja u širokom spektru robotskih platformi. ROS Indigo Igloo je osma verzija ROS-a objavljena 2014. godine. Najprikladniji je za operacijski sustav Ubuntu 14.04., a podupire i nove verzije, te dokumentiranje i integracijsko testiranje paketa utemeljenih samo na Catkinu (sustav za izgradnju ROS-a). ROS podržava i izgradnju paketa iz izvora opažanja, utemeljenih na rosbuidu.

CMake

Cmake je open-source platforma koja se sastoji od alata za prevođenje, testiranje i pakiranje softvera. Cmake se koristi za kontrolu procesa prevođenja softvera koristeći jednostavnu platformu i o prevoditelju neovisne konfiguracijske datoteke. Također, koristi se za generiranje izvornih datoteka i radnih prostora s mogućnošću korištenja vlastitog prevoditelja.

OpenCV

OpenCV (eng. Open Source Computer Vision Library) je knjižnica koja omogućuje efikasna računanja s fokusom na aplikacije u realnom vremenu, a iskorištava višejezgreno procesiranje.

6.1.1 UI-1221LE kamera

Kamera UI-1221LE širokokutna je kamera korištena za LSD-SLAM te opremljena monokromatskim senzorom. Ima globalni zatvarač koji omogućuje kvalitetno snimanje pri bržim pokretima kamerom. Zahvaljujući visoko-dinamičnom rasponu (HDR), senzor CMOS radi odlične snimke čak i u visokodinamičnim okolinama velikog kontrasta. Format senzora 1/3" čini kameru idealnom zamjenom za standardne analogne video kamere, s vrlo malim troškovima. Nedostatak je što kao monokularna kamera ne može mjeriti dubinu pa je to ograničenje dosta utjecalo na mjerenja, što će biti vidljivo iz rezultata praktične primjene kamere. (IDS GmbH, 2014)



Slika 9: Prikaz UI-1221LE kamere (IDS GmbH, 2014)

6.1.1.1 Kalibriranje kamere

Kameru je prije korištenja unutar LSD-SLAM-a potrebno kalibrirati, a sustav korišten za kalibriranje je PTAM.

PTAM

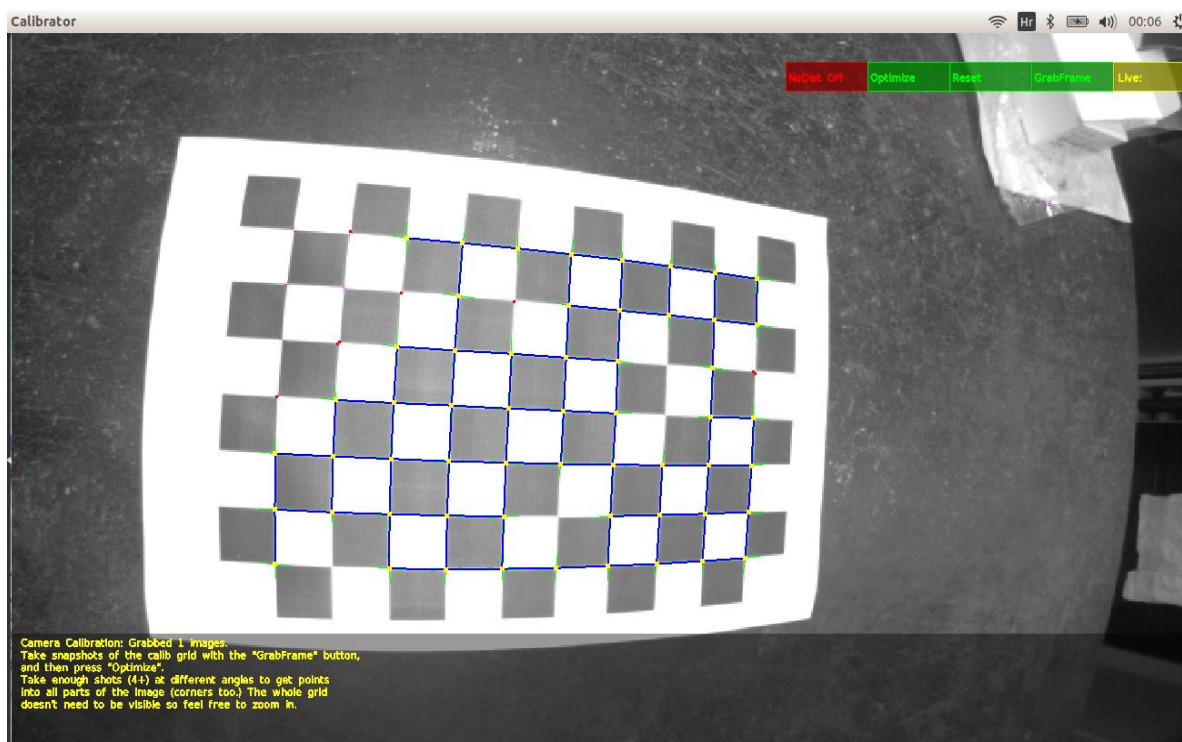
PTAM (eng. Parallel Tracking and Mapping) je sustav koji omogućuje istovremeno praćenje kamere i kartiranje, a koristi se za proširenu stvarnost. Ne zahtjeva kontrolne točke, postojeće karte okoline, predloške ili inercijalne senzore. PTAM je i alat za kalibriranje unutarnjih parametara kamere sa širokokutnim lećama.

PTAM se pokreće uz pomoć Catkina. Catkin je službeni sustav za izgradnju ROS-a i nasljednik originalnog sustava ROS-a za izgradnju - rosbuila. Catkin kombinira CMake i Python skripte za pružanje funkcionalnosti povrh osnovnog tijeka rada CMakea. Catkin je konvencionalniji od rosbuila, dopušta bolju distribuciju paketa, bolju podršku za prevođenje, i

bolju pokretnost. Catkin omogućuje automatsko traženje paketa i izgradnju više međusobno ovisnih projekata u isto vrijeme.

Proces kalibriranja

Za kalibraciju kamere potrebno je na ravnoj površini pripremiti crno-bijelo kvadratno polje za kalibraciju. Kalibrator kamere se otvara putem komandne linije i kamera se izoštri tako da se što bolje vide polja kako bi softver prepoznao rubove. Zatim se izvrši snimanje minimalno četiri slike predloška u različitim položajima (naredbom *GrabFrame*) te se pokrene optimizacija (naredbom *Optimize*). Parametri transformacije ne bi trebali biti veći od 0,3 s obzirom da se radi o širokokutnoj kameri. U datoteku *ueye_calib.cfg* kopiraju se parametri transformacije *Cam_fx*, *Cam_fy*, *Cam_cx*, *Cam_cy*, *Cam_s* i tada se smatra da je kamera kalibrirana. Prikaz kalibracije vidljiv je na slici 10.



Slika 10: Kalibracija kamere u alatu za kalibriranje PTAM

6.1.2 Opažanje LSD-SLAM-om i UI kamerom

LSD-SLAM pokreće se iz komandne linije sljedećim redoslijedom naredbi:

1. Pokretanje ROS operacijskog sustava

```
sudo roscore
```

2. U drugom prozoru komandne linije se pokrene `lsd_slam_viewer` koji predstavlja kartu okoline

```
roslaunch lsd_slam_viewer viewer
```

3. Pokrene se i ROS čvor LSD-SLAM-a

```
roslaunch lsd_slam_core live_slam /image:=image_raw
```

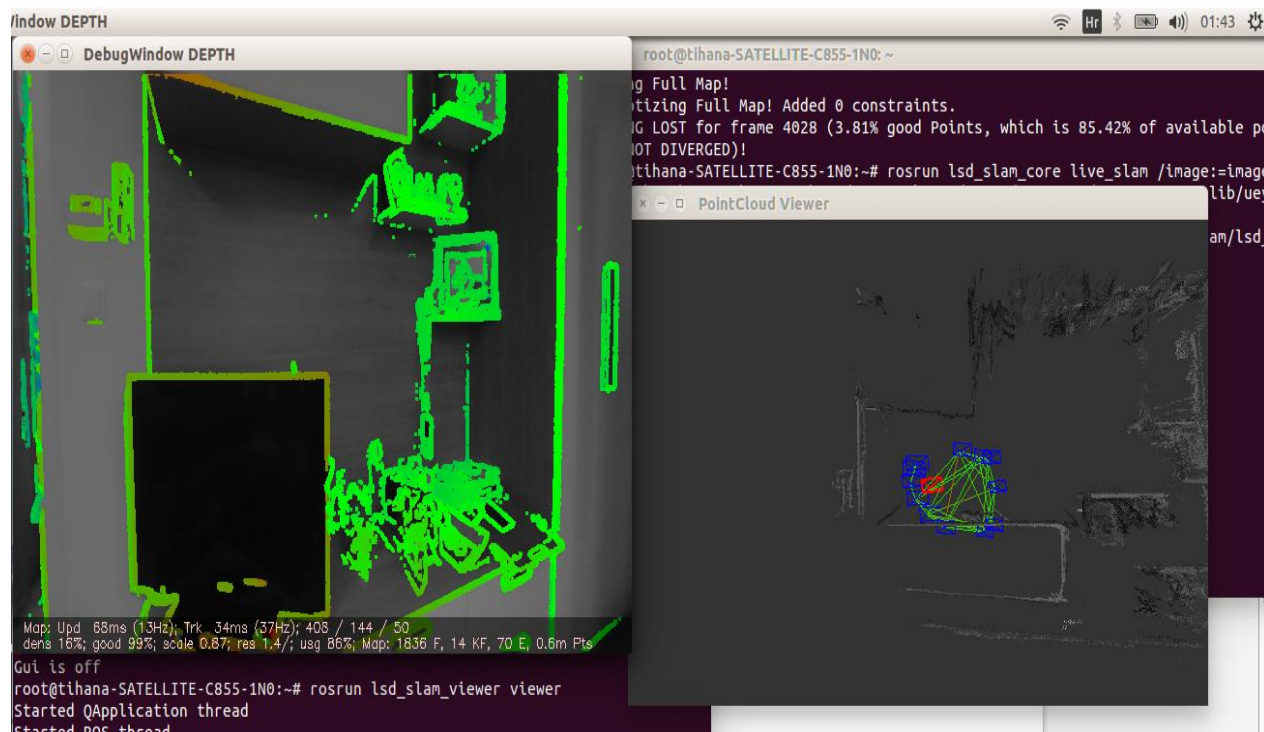
```
_calib:=/home/tvidnjevic/rosbuild_ws/package_dir/lsd_slam/lsd_slam_core/calib/ueyeCalib.cfg
```

4. U trećem prozoru komandne linije pokrene se i kamera unutar ROS-a naredbom `roslaunch`

```
roslaunch ueye nodelets.launch pixel_clock:=20 frame_rate:=40
```

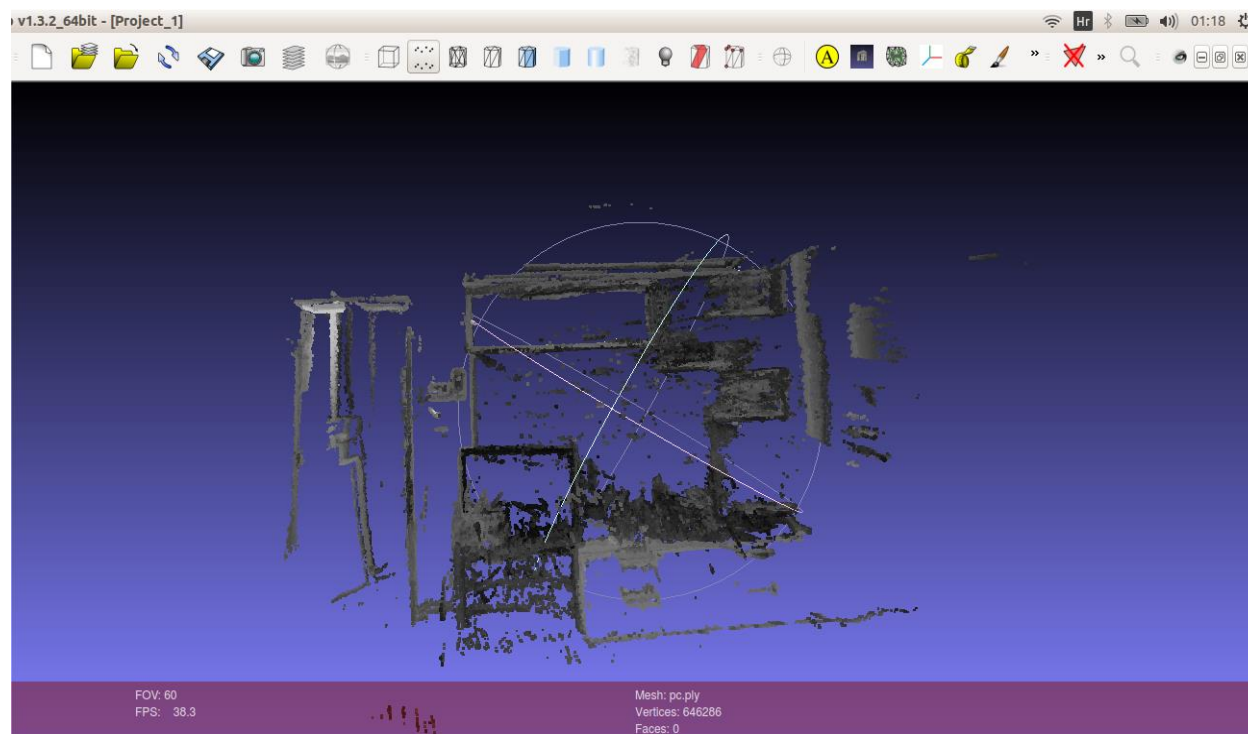
Objašnjenje: uz naredbu `roslaunch`, potrebno je definirati naziv kamere, `.launch` datoteku koja pokreće snimanje okvira, zatim `'pixel_clock'` koji smanjuje utjecaj kotrljajućeg zatvarača, u ovom slučaju postavljen na vrijednost od 20 Hz. Za kraj se još definira brzina opažanja okvira od 40 Hz.

Na slici 11 je prikazan prozor koji pokazuje trenutni okvir s dubinom prikazanom različitim nijansama boje (pokrenut `live_slam` čvorom), i drugi prozor koji prikazuje kartu okoline (iz `lsd_slam_viewer`).



Slika 11: Prikaz prozora s dubinom i 3D-kartom

Rezultati mjerenja vizualizirani u MeshLab softveru prikazani su na slici 12.



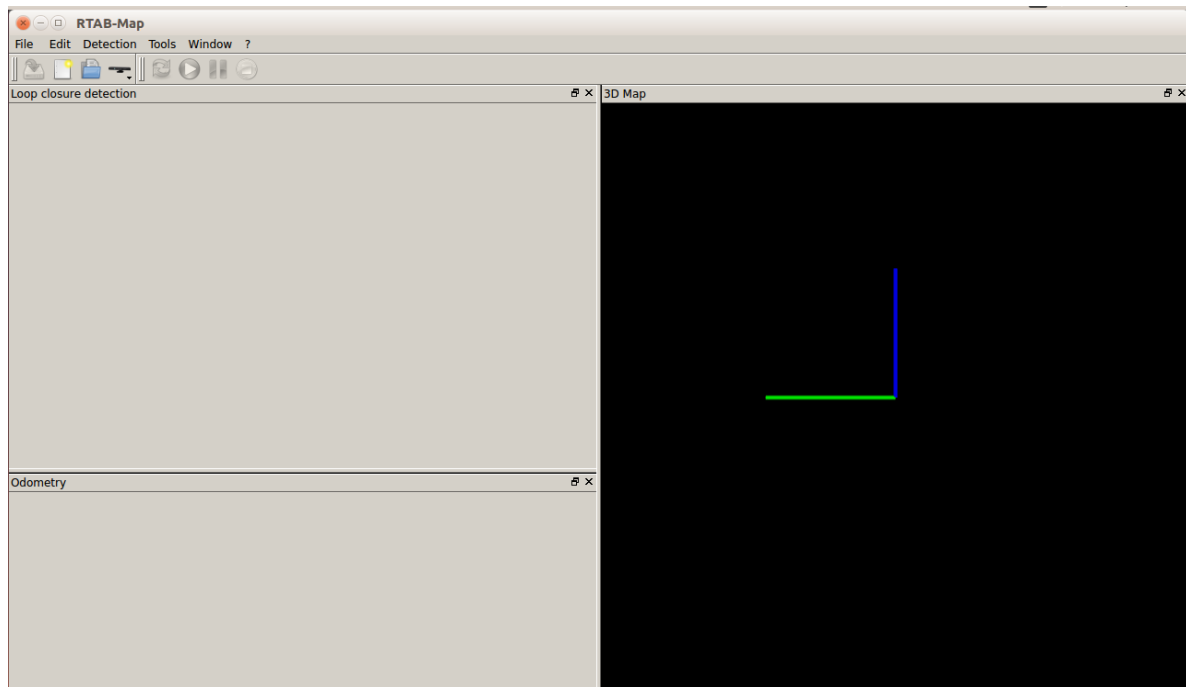
Slika 12: Vizualizacija rezultata mjerenja u MeshLab softveru

LSD-SLAM u kombinaciji s monokularnom kamerom UI nije zadovoljio kao vrsta SLAM-a za kartografske potrebe. Nedostatak su svakako ograničene mogućnosti kamere jer kako se i vidi iz vizualnih rezultata, algoritam nije uspio dobro procijeniti dubine na snimci. Algoritam je uspio detektirati samo rubove, dok su plohe vrlo površno prikazane ili mjestimično nisu uopće prikazane. Opažano je isto područje kao i s Kinect kamerom i RTABMap aplikacijom (rezultati prikazani u sljedećem poglavlju), ali u ovom slučaju ne mogu se razabrati objekti koji se nalaze na tom području. Rezultati opažanja u unutarnjem prostoru ne daju naslutiti da bi opažanje u vanjskom prostoru dalo bolje rezultate jer je tamo izloženo uvjetima koji su znatno teži od onih u unutarnjem prostoru.

6.2 RTABMap aplikacija

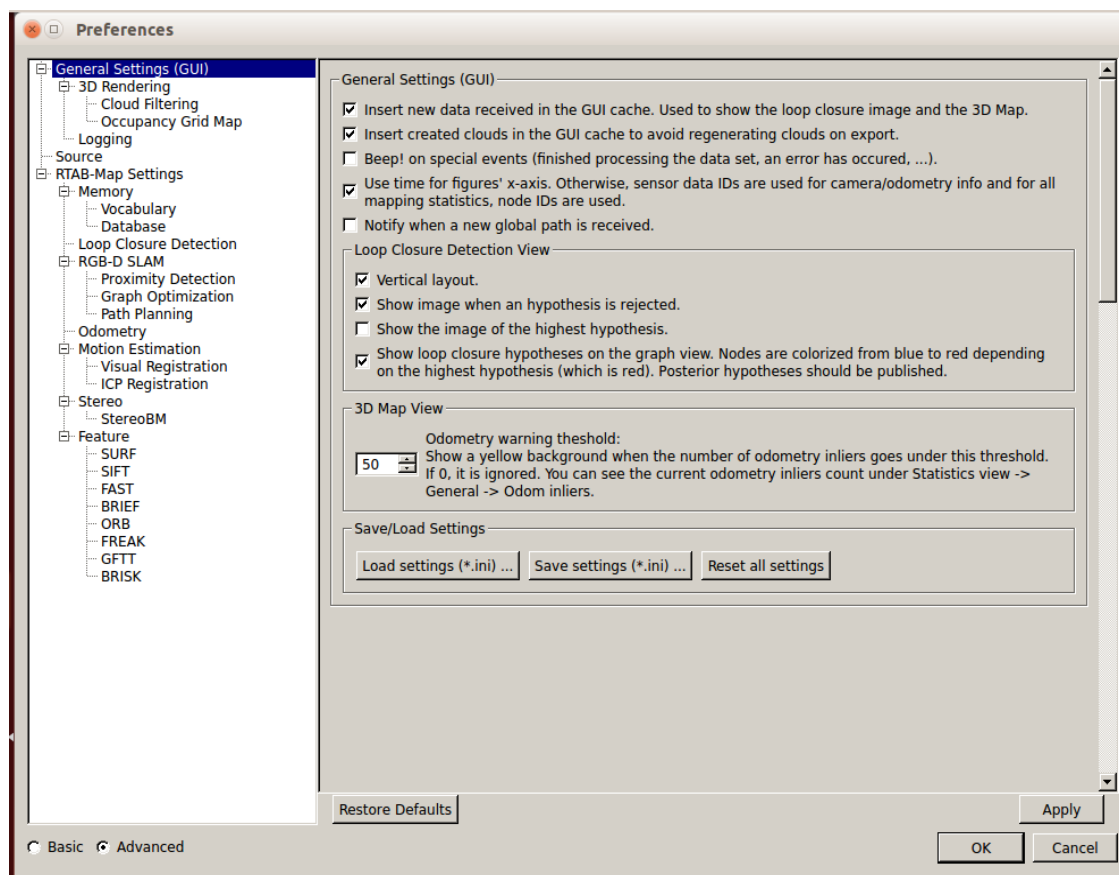
RTABMap je aplikacija razvijena na Sveučilištu u Sherbrookeu u kanadskoj pokrajini Quebec u sklopu robotskog laboratorija IntRoLab (https://introlab.3it.usherbrooke.ca/mediawiki-introlab/index.php/Main_Page, IntRoLab). Aplikacija se može koristiti samostalno s ručnom Kinect kamerom ili stereo kamerom za RGB-D kartiranje sa šest stupnjeva slobode, ili na robotu/senzoru s laserskim daljinomjerom za kartiranje s tri stupnja slobode. RTABMap je knjižnica i samostalna aplikacija koja pri opažanju nudi brojne mogućnosti podešavanja. Kamere koje podržava RTABMap su RGB, RGB-D i stereo kamere, a opažanje je moguće pokrenuti u realnom vremenu ili iz baze podataka koja sadrži već opažane snimke. Ima osnovne i napredne postavke. Postoje razne kategorije postavki, od namještanja izvora podataka (i brzine preuzimanja ulaznih podataka), procesa iscrtavanja (tzv. renderiranja), određivanje brzine detekcije zatvorenih petlji, memorije i vizualne registracije značajki (zadana kombinacija GFTT+BRIEF), izdvajanje značajki (zadane su ORB značajke) itd.

RTABMap se pokreće preko komandne linije jednostavnom naredbom *rtabmap*, a sučelje je prikazano na slici 13.



Slika 13: Prikaz sučelja s tri osnova prikaza: Odometrija, Detekcija zatvaranja petlji i 3D-karta

Nakon otvaranja, potrebno je izabrati vrstu kamere s kojom će se opažanje izvoditi i otvoriti novu praznu bazu podataka. Nakon toga, potrebno je konfigurirati aplikaciju. Sve kategorije parametara u postavkama vidljive su na slici 14.



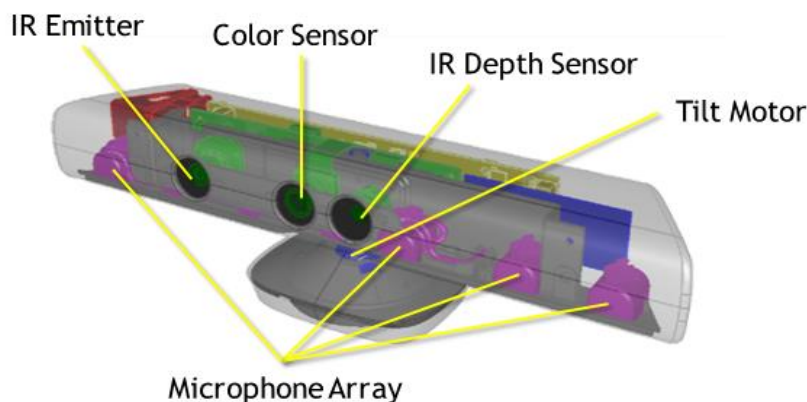
Slika 14: Prikaz mogućnosti podešavanja u RTABMapu

Praktični dio izvodio se Kinect kamerom pa u nastavku slijede njezine karakteristike te prednosti i nedostaci za ovu metodu.

6.2.1 Kinect kamera

Proizvođač Kinect kamere Microsoft namijenio je tu kameru prvenstveno za Xbox 360 i Xbox One igraće konzole. Međutim, koristi se i u algoritmima vizualnog SLAM-a jer se 3D-podaci mogu dobiti u realnom vremenu. Za opažanje SLAM-om, Kinect je koristan zbog svojeg senzora dubine koji može izračunati udaljenost od objekta na isti način kao što to čini laserski dubinski senzor. S time je riješen problem mjerila kod opažanja SLAM-om. Kinect se koristi i kao mobilni robot. Kinect kamera je RGB-D kamera kod koje je mjerilo koordinatnog sustava poznato jer se 3D-struktura može dobiti iz metričkog prostora. Unutar RTABMap-a, Kinect ima svoj gotovi modul pa je njegovo korištenje u sklopu tog softvera vrlo jednostavno. Nedostatak Kinecta je to što za dubinu koristi vlastiti izvor infracrvenog zračenja, koje u osunčanom vanjskom prostoru postaje preslabo u odnosu na sunčevo infracrveno zračenje, te je njegovo korištenje u vanjskom

prostoru vrlo upitno. Drugi nedostatak je domet mjerenja koji u njegovom slučaju iznosi do 4 metra, točnije njegov standardni radni raspon je od 1,2 do 3,5 metara. To je vrlo ograničavajući faktor s obzirom da se u vanjskom prostoru očekuje domet od barem 30 metara.



Slika 15: Dijelovi Kinect kamere (Microsoft, 2010)

Dijelovi Kinect kamere:

1. RGB kamera koja pohranjuje podatke s tri kanala u rezoluciji 1280x960, što omogućuje snimanje kolor snimki.
2. Infracrveni (IR) odašiljač i infracrveni (IR) senzor dubine. Odašiljač odašilje poznati uzorak zraka infracrvene svjetlosti i senzor dubine čita IR zrake koje se reflektiraju natrag do senzora. Veličina uzorka reflektiranih zraka se pretvara u informacije o dubini, tj. udaljenost od objekta do senzora.
3. Širokopojasni mikrofoni, koji sadrži 4 mikrofona za hvatanje zvuka. Četiri mikrofona omogućuju snimanje zvuka kao i pronalaženje lokacije izvora zvuka i smjera zvučnog vala. Troosni akcelerometar konfiguriran je za 2G raspon, gdje je G akceleracija zbog utjecaja gravitacije. Akcelerometar je moguće koristiti i za određivanje trenutne orijentacije kamere. (Microsoft, 2010)

6.2.2 Opažanje u jednoj sesiji

Opažanje u jednoj sesiji bilo je probno opažanje za testiranje kamere i sustava. U praksi je opažanje u jednoj sesiji poželjno izbjeći jer zbog mogućnosti prekida snimanja (konfiguracija terena ili prestanak rada kamere) nije moguće ponovno inicijalizirati u opažanom terenu već snimanje treba pokrenuti ispočetka.

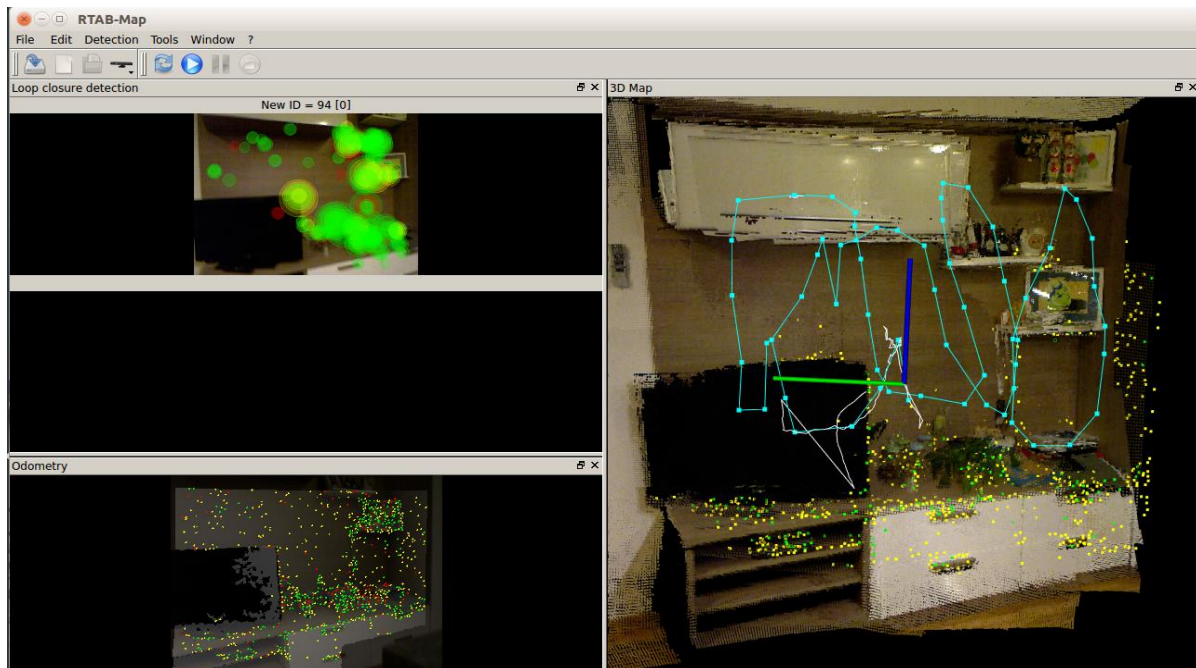
6.2.2.1 Konfiguracija aplikacije i postupak opažanja

Nakon otvaranja sučelja potrebno je u postavkama konfigurirati aplikaciju. Najvažnije je na početku odabrati izvor snimanja - u ovom slučaju RGB-D kamera, a vrsta je upravljački program kamere *Freenect* koji obuhvaća i Microsoft Kinect. Datoteka s podacima kalibracije nije potrebna jer je Kinect već kalibriran. Brzina kojom se opažaju okviri, odnosno snimke je unaprijed postavljena na 0 Hz što znači najbržu moguću brzinu kojom se ta detekcija može odvijati. Od ostalih postavki važan je detektor značajki GFTT + BRIEF (kombinacija GFTT i BRIEF značajki).

GFTT (Good Features to Track) metoda izdvaja najistaknutije uglove na slici gdje se mjera kvalitete ugla mjeri na svakom pikselu. Uglovi s kvalitetom manjom od određenog praga se odbijaju, a ostatak uglova je sortiran silaznim redom - od najkvalitetnijeg do najmanje kvalitetnog. Svaki ugao za kojeg postoji bolji ugao u udaljenosti manjoj od praga se odbija. GFTT su zapravo točno one značajke koje omogućuju da praćenje postigne najbolje moguće rezultate. (Awad, A.I., Hassaballah M., 2016)

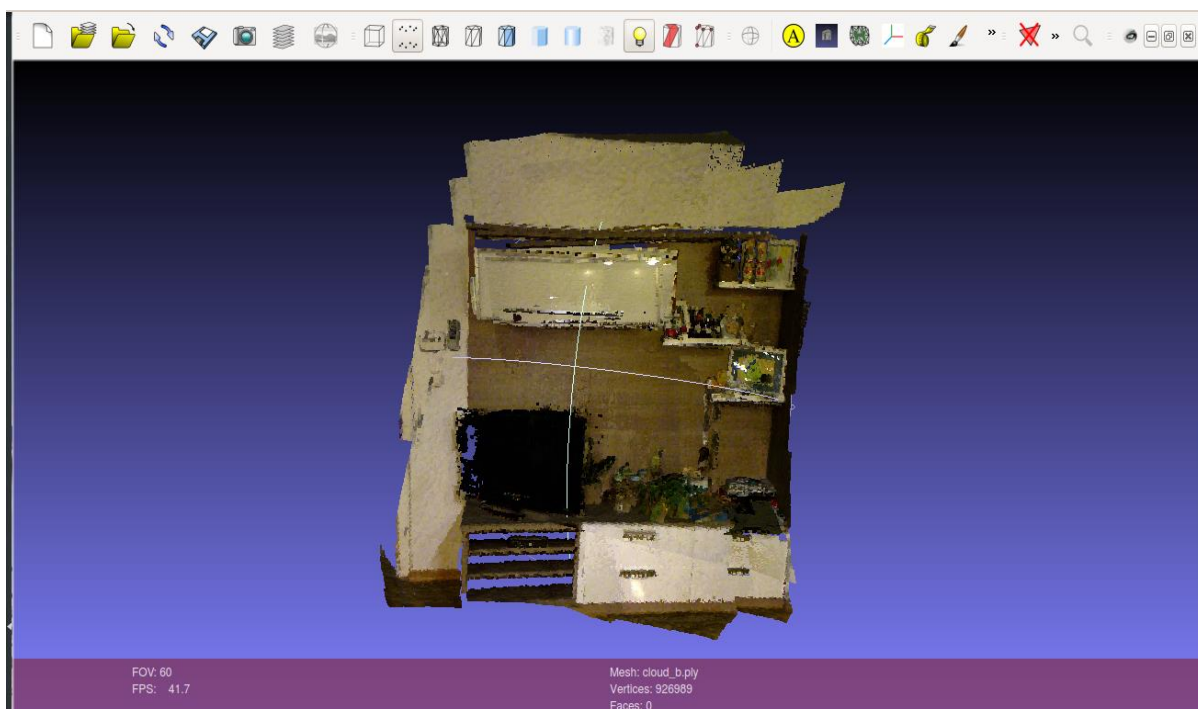
BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) je brza metoda opisivanja značajki računanjem i uparivanjem. Pruža visoku stopu prepoznavanja objekata u okolini osim u slučaju da postoji velika rotacija u ravnini. (Calonder, M. et al., 2010)

Nakon postavljanja parametara, potrebno je otvoriti novu praznu bazu u koju će se spremati podaci opažanja. Zatim se počinje s opažanjem. Na sučelju je prilikom opažanja prikazana 3D-karta, odometrija i zatvaranje petlji, a korisnik ima mogućnost dodati još prikaza različitih drugih parametara koji se mogu pratiti tijekom snimanja. Na prikazu zatvaranja petlji vide se čvorovi koji predstavljaju zatvorene petlje na mjestima koja su snimana više puta. Odometrija prati pozicije točaka u okolini i daje uvid u njihovu dubinu. Na 3D-karti su vizualizirane opažane točke s detektiranim petljama, a prikazuje se i trajektorija kamere.



Slika 16: Prikaz opažanja na RTAB-Map sučelju

Vizualizacija rezultata opažanja prikazana je na slici 17.



Slika 17: Vizualizacija rezultata mjerenja RTAB-Map softverom

U usporedbi s LSD-SLAM-om i UI kamerom, kombinacija ove metode i kamere ipak daje bolje rezultate što se vidi već tijekom samog opažanja. Većina rubova je dosta loše prikazana, što je djelomično posljedica nepažnje pri rukovanju kamerom, ali i sjena zbog kojih se onda rubovi teže detektiraju (naglašeno u donjem lijevom kutu slike). Važno je napomenuti da Kinect opaža veliki broj točaka zbog kojih je oblak točaka dosta gust što uzrokuje kasnije teže procesiranje točaka, a samim time je i teže filtrirati točke od značaja za prikaz okoline.

Na kraju, nedostatak Kinect kamere je što je osjetljiva na jači intenzitet svjetlosti, te joj domet mjerenja (4 m) nije zadovoljavajući pa mjerenje u vanjskom prostoru nije moguće. Mjerenje u vanjskom prostoru zahtjeva domet od minimalno 30 metara.

6.2.3 Opažanje u više sesija

Kod opažanja u više sesija, opažanje se unaprijed obavlja putem Data Recordera, modula unutar RTABMap-a, kojeg je onda moguće kasnije procesirati u samoj aplikaciji. Svako opažanje, odnosno sesija sprema se u posebnu datoteku u kojoj je sadržana baza podataka tog opažanja.

Pokretanjem naredbe `/usr/local/bin/rtabmap-dataRecorder` dobivaju se informacije o konfiguraciji Data Recordera.

```
Usage:
dataRecorder [options] output.db
Options:
  -hide           Don't display the current cloud recorded.
  -debug          Set debug level for the logger.
  -rate #.#       Input rate Hz (default 0=inf)
  -driver         Driver number to use:
                  0=OpenNI-PCL (Kinect)
                  1=OpenNI2   (Kinect and Xtion PRO Live)
                  2=Freenect   (Kinect)
                  3=OpenNI-CV  (Kinect)
                  4=OpenNI-CV-ASUS (Xtion PRO Live)
                  5=Freenect2   (Kinect v2)
                  6=DC1394     (Bumblebee2)
                  7=FlyCapture2 (Bumblebee2)
  -device         Device ID (default "")
```

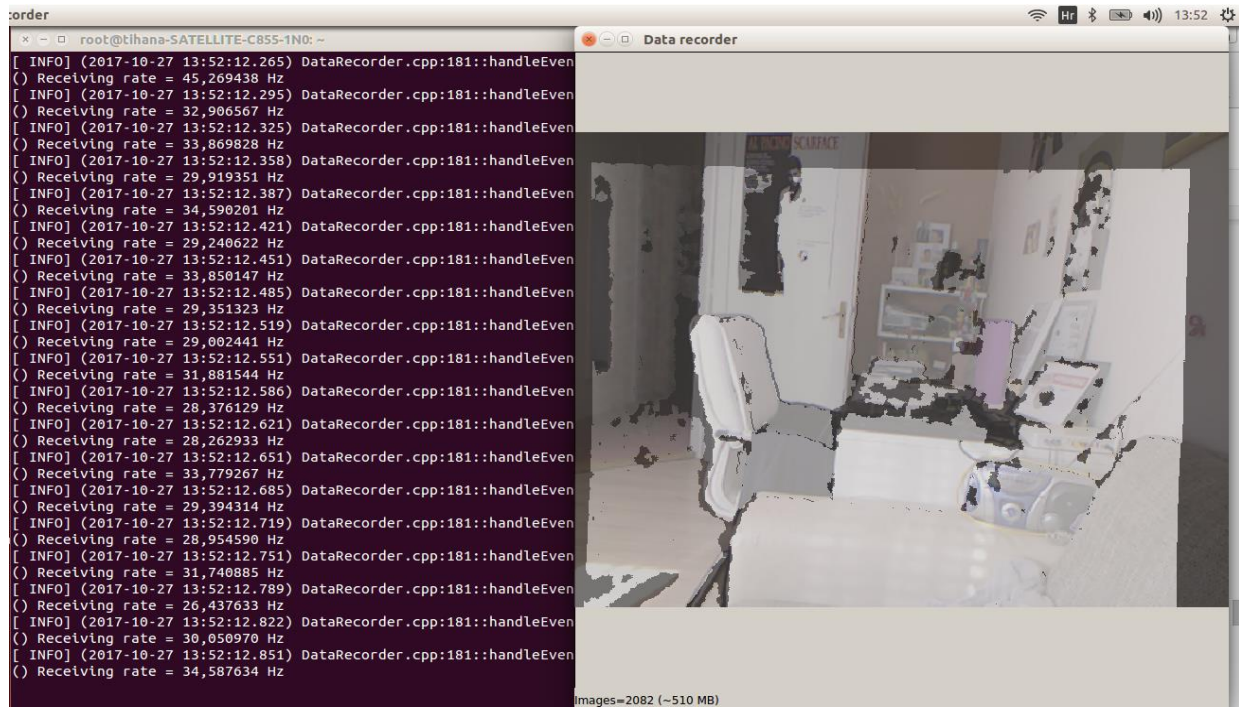
Slika 18: Prikaz informacija o korištenju Data recorder modula

Moguće je namjestiti vizualno skrivanje opažanog oblaka točaka, postavljanje razine otklanjanja neispravnosti u procjenjivanju pozicije objekata, postavljanje brzine opažanja okvira - koja je u ovom slučaju ostavljena na zadanoj brzini od 0 Hz, što znači najbrže moguće opažanje okvira. Potrebno je odabrati i indeks upravljačkog programa kamere za koju želimo da obavi opažanje te ID uređaja koji je u ovom slučaju zadan. Za kraj je važno postaviti naziv datoteke u koju želimo da se spremi podaci opažanja sesije, a njezina ekstenzija mora biti .db.

Data Recorder pokreće se iz komandne linije naredbom:

```
/usr/local/bin/rtabmap-dataRecorder -driver 2 /home/tihana/Documents/multi_session/sesija1.db
```

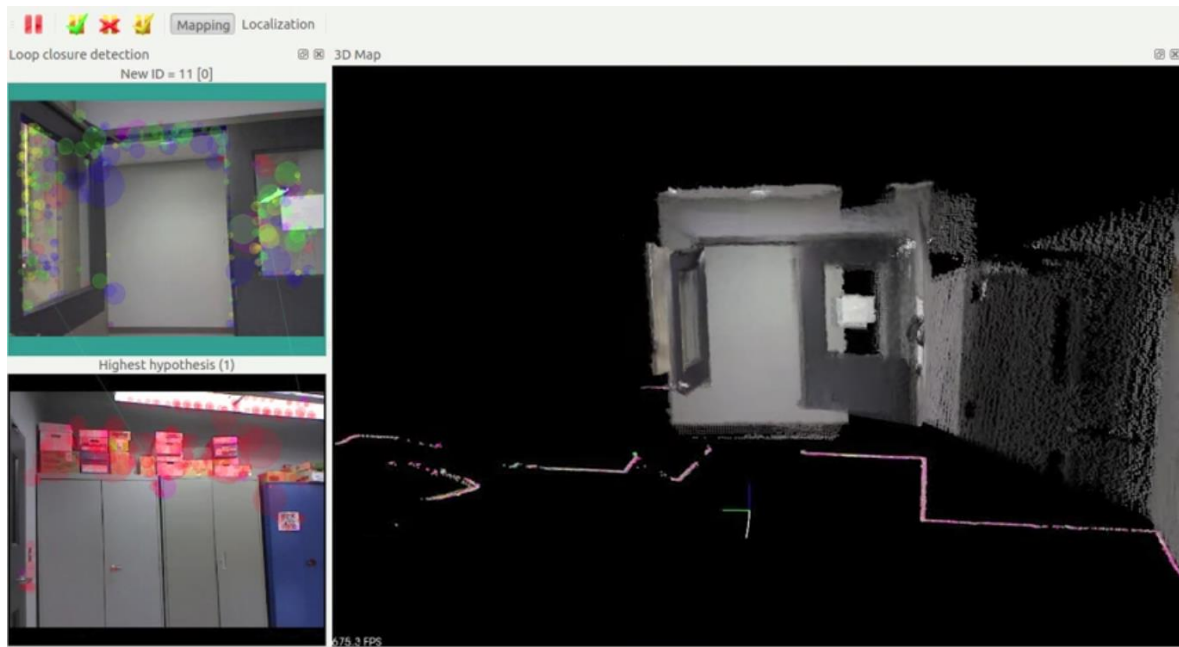
Unutar komandne linije mogu se pratiti informacije o detektiranju okvira, a za vizualizaciju opažanja otvara se poseban prozor, što se može vidjeti na slici 19.



Slika 19: Prikaz snimanja u Data Recorderu

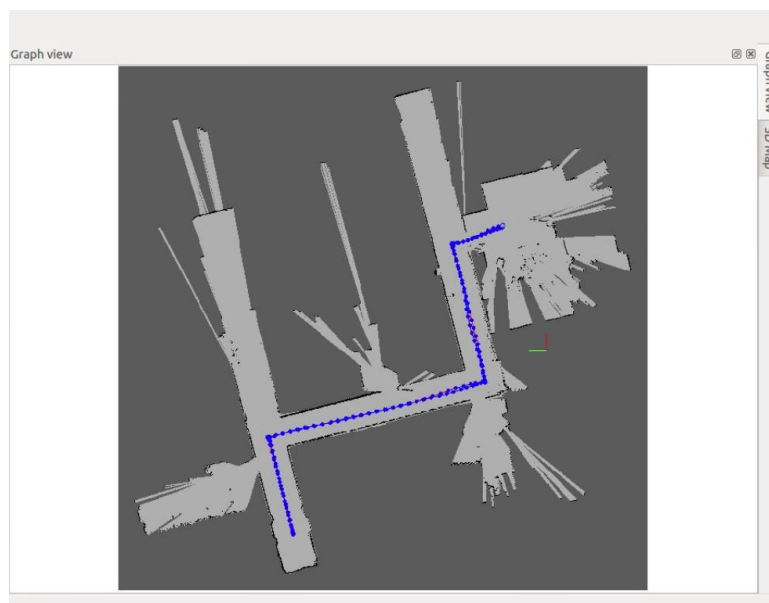
Zatim se uz pomoć komandne linije otvara RTABMap i u postavkama za vrstu izvora odabire baza podataka, te se učitava datoteka sa postavkama s ekstenzijom .ini - *multi-session1Hz.ini*, u ovom slučaju preuzeta s internetske stranice <https://github.com/introlab/rtabmap/wiki/Multi-session>, ujedno i primjer prikazan niže.

Na glavnom sučelju otvori se nova prazna baza podataka i pokrene se opažanje. Tada RTABMap iz baze podataka prve sesije čita snimljene točke i prikazuje snimku. Po završetku snimke potrebno je vratiti se u postavke i odabrati datoteku druge sesije te ponovo pokrenuti opažanje. Sada se ne otvara nova prazna baza podataka, već se sve sprema u onu prethodnu. Isti postupak se ponavlja sve do zadnje sesije.



Slika 20: Opažanje RTABMap-om s učitanim bazom podataka

Kada sve sesije snimanja završe, za vizualizaciju je potrebno otvoriti Prikaz grafa i skinuti datoteku s grafom.



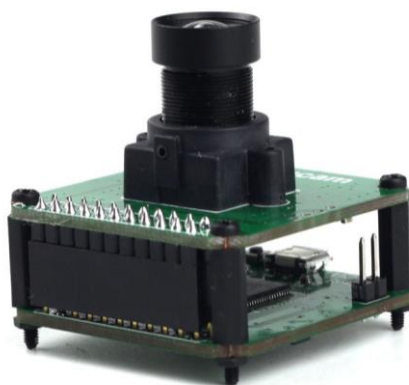
Slika 21: Prikaz grafa snimljenog područja

Ovakav način opažanja je vrlo koristan u situacijama kada je potrebno prekinuti snimanje zbog nekih vanjskih faktora ili je došlo do nenadanog gašenja kamere. Također i kod snimanja većih područja kako bi se napravila pauza između sesija.

6.2.4 Prednosti i nedostaci kamere ArduCAM CMOS AR0134

RTABMap i ORB-SLAM2 omogućuju opažanje stereo kamerom. Prednost snimanja stereo kamerom je mogućnost jednoznačnog određivanja mjerila zbog postojanja dvije kamere na poznatom razmaku (lijeve i desne), dok je kod monokularnih kamera mjerilo nepoznato i može se tijekom snimanja mijenjati. U nastavku su opisana svojstva kamere ArduCAM te prednosti i nedostaci koji proizlaze iz njih. Dvije ArduCAM kamere su nabavljene za potrebe rada, ali nisu konfigurirane kako bi činile sustav stereo kamera pa su sve pretpostavke utemeljene na njihovim općim specifikacijama.

ArduCAM kamera modela AR0134 je 1.2 megapikselsna kamera u boji s globalnim zatvaračem koja se može koristiti u svom zadanom načinu ili se može isprogramirati za određenu veličinu okvira, ekspoziciju i druge parametre. Globalni zatvarač je važna karakteristika koja omogućuje da se svi pikseli kadra u isto vrijeme izlažu za vrijeme ekspozicije čime se postiže točnija pozicija značajki prilikom opažanja. Krajnji rezultat zadanog načina korištenja kamere je slika u punoj rezoluciji sa visokom stopom opažanja okvira od 54 okvira po sekundi. Daje 12-bitne podatke za svaki piksel. Kamera može raditi u video (master) načinu ili u načinu snimanja pojedinačnih slika. Kamera ima visoko dinamični raspon snimanja i dobru osjetljivost na strojni vid s vanjskim okidačem. Ove karakteristike važne su kod opažanja SLAM-om, a od izuzetne je važnosti njezin veliki domet koji pogoduje snimanju u vanjskom prostoru. (Uctronics, 2016)



Slika 22: ArduCam AR0134 kamera s pripadajućim postoljem (Uctronics. 2016)

Opažanje ovom kamerom trebalo bi isprobati unutar RTABMap-a i ORB-SLAM2, usporediti njihove međusobne rezultate te vidjeti koji bi rezultirao točnijim mjerenjima.

7 Zaključak

Istraženo je nekoliko vrsta SLAM-a i svaki ima različiti skup svojstava i mogućnosti. Iako je njihova praktična primjena u vanjskom prostoru u stvarnim uvjetima izostala, već samim istraživanjem su utvrđene neke potencijalne prednosti i nedostaci svakog od njih.

Najveći potencijal pokazao je ORB-SLAM2, najnovija metoda koja omogućuje snimanje ne samo monokularnom kao što je to slučaj kod prve verzije ORB-SLAM, već i stereo te RGB-D kamerom. Karakteristike ovog sustava koje ga ističu iznad ostalih su korištenje grupne optimizacije u četiri paralelna procesa koji daju točnije rezultate određivanja položaja kamere i procjene dubine od ostalih sustava, kao i korištenje metode bližih i daljih stereo točaka te modula za raspoznavanje okoline. Određivanje pozicije je dosta unaprijeđeno u odnosu na druge sustave, i čini problem ponovnog određivanja položaja (relokalizacije) u već snimljenom području lakšim zadatkom. Za izdvajanje značajki koristi vrlo brze ORB značajke, pri čemu dobro odrađuju i spajanje značajki.

Nadalje, RTAB-Map također ima zavidne specifikacije i solidne rezultate zahvaljujući dobrom sustavu zatvaranja globalnih petlji, a moguće je opažanje u više sesija. Iz zatvorenih petlji stvara grafove, ali javlja se ograničenje kod veličine grafa koje utječe na vrijeme potrebno za detekciju zatvaranja petlji i optimizaciju grafa. Za prevladavanje tog ograničenja koristi se vrlo vješti sustav upravljanja memorijom pa je u tom slučaju sustav neovisan o veličini područja. Ipak, primjenom mjerenja u unutarnjem prostoru, u kombinaciji sa stereo kamerom, primjećena su određena ograničenja u prikazivanju objekata.

LSD-SLAM je pokazao najmanje kvalitetno rješenje, ograničeno korištenjem samo jedne kamere, za razliku od gornja dva sustava koja imaju mogućnost opažanja i stereo i RGB-D kamerama. LSD-SLAM je direktna metoda koja se oslanja na intenzitet snimki za prepoznavanje dubine, a konačan rezultat je karta dubine, u usporedbi s na značajkama utemeljenim sustavima koji kao produkt daju 3D-kartu točaka.

Ipak, budući da nije obavljeno niti jedno mjerenje u vanjskom prostoru niti je napravljena analiza točnosti odrađenih mjerenja, teško je samo na temelju karakteristika pojedinih sustava procijeniti može li se SLAM u kombinaciji s dostupnim kamerama koristiti u kartografske svrhe.

8 Popis literature

Andor, Oxford Instruments Company. Rolling and Global Shutter. [Andor], raspoloživo na: <http://www.andor.com/learning-academy/rolling-and-global-shutter-exposure-flexibility>

Awad, A.I. i Hassaballah, M., (2016), Image Feature Detectors and Descriptors, Švicarska: Springer International Publishing

Calonder, M. et al. (2010), BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features, 11. European Conference on Computer Vision (eng. ECCV), Heraklion, Kreta. Dostupno na: https://www.cs.ubc.ca/~lowe/525/papers/calonder_eccv10.pdf

Csorba, M., (1997), Simultaneous Localization and Map Building, doktorska disertacija, Sveučilište u Oxfordu, Velika Britanija. Dostupno na: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.206.443&rep=rep1&type=pdf>

Durrant-Whyte, H. (1988)., Uncertain Geometry in Robotics, objavljeno u IEEE Transactions on Robotic Automation. Dostupno na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/768/>

Durrant-Whyte, H. i Bailey, T., (2006). Simultaneous Localization and Mapping: Part I [online], IEEE Robotics & Automation Magazine. Dostupno na: <https://www.doc.ic.ac.uk/~ajd/Robotics/RoboticsResources/SLAMTutorial1.pdf>

Engel, J., Stuckler, J. i Cremers, D., (2014). LSD-SLAM: Large Scale Direct Monocular SLAM, za International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Dostupno na: <https://vision.in.tum.de/research/vslam/lsdslam>

Gu, J., Hitomi, Y., Mitsunaga, T. i Nayar, S.K., (2010), Coded Rolling Shutter Photography: Flexible Space-Time Sampling, za IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). Dostupno na: http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/publications/pdfs/Gu_ICCP10.pdf

IDS Imaging Development Systems GmbH, (2014). UI-1221LE [online]. Dostupno na: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-1221le.html>

Labbe, M. i Michaud, F., (2014). Online Global Loop Closure Detection for Large-Scale Multi- Session Graph-Based SLAM. Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation [online]. Dostupno na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6942926/>

Microsoft, (2010). Kinect for Windows Sensor Components and Specifications [online]. Dostupno na: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>

Mur-Artal, R, Montiel, J. M. M., Tardo J. D., (2015) ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, članak iz IEEE Transactions on Robotics, 31. izdanje, 5. broj. Dostupno na: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7219438>

Mur-Artal, R. i D. Tardos, J. (2016), ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras, objavljeno u IEEE Transactions on Robotics. Dostupno na: <https://arxiv.org/pdf/1610.06475.pdf>

Quinley, M. et al., (2009), ROS: an Open-Source Robot Operating System, Stanford, Kalifornija, SAD. Dostupno na: <http://www.willowgarage.com/sites/default/files/icraoss09-ROS.pdf>

Riisgaard, S. i Rufus, B. M, (2005). SLAM for Dummies [online]. Dostupno na: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-412j-cognitive-robotics-spring-2005/projects/1aslam_blas_repo.pdf

Smith, R. i Cheeseman, P. (1987), On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty, objavljeno u The International Journal of Robotics Research. Dostupno na: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498600500404>

Smith, R. et al. (1990), Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics, Autonomous Robot Vehicles. Dostupno na: <https://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/reference.file/Smith,Self&Cheeseman.pdf>

Tallund, L, (2016), Handling of Rolling Shutter Effects in Monocular Semi-Dense SLAM Algorithms, Diplomski rad, Sveučilište u Linköpingu, Švedska. Dostupno na: <https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1058367/FULLTEXT01.pdf>

Taketomi, T., Uchiyama, H. i Ikeda, S., (2017). IPSJ Transactions on Computer Vision and Application, Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016, istraživački rad, Japan. Dostupno na: <https://ipsjcva.springeropen.com/articles/10.1186/s41074-017-0027-2>

Uctronics, (2016). Arducam CMOS AR0134 [online]. Dostupno na:

<http://www.uctronics.com/arducam-cmos-ar0134-1-3-inch-1-2mp-color-camera-module.html>

Yap, M. et al. (2016), Monocular Simultaneous Localization and Mapping [online]. Dostupno na:

https://www.doc.ic.ac.uk/~mly15/c2359z/computing_topics_website/introductiontomonocular.html