



Технически Университет София
Факултет за германско инженерно обучение и
промишлен мениджмънт
Докторанско училище



ФаГИОПМ —

маг. инж. Филип Филипов Филипов

Изследване и имплементиране на технологии за навигация в затворени пространства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. електротехника, електроника и
автоматика

Научна специалност: Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление

Научни ръководители: проф. д-р. Себастиан Цуг, OvGU Магдебург
проф. д-р. Младен Милушев, ТУ - София

София, 2017

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на научния съвет на Докторантското училище към ФаГИОПМ при Технически университет – София, състояло се на 27.10.2016 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 27.02.2017 г. от 15.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-407/ 22.11.2016 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р Васил Гълъбов– председател
2. Доц. д-р Александър Ценов– научен секретар
3. Проф. д-р Себастиан Цуг
4. Проф. д.т.н. Идилия Бачкова
5. Проф. д.т.н. Христо Шехтов

Рецензенти:

1. Проф. д.т.н. Христо Шехтов
2. Доц. д-р Васил Гълъбов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ФаГИОПМ на ТУ-София, блок № 10, кабинет № 10213.

Дисертантът е редовен докторант към Докторантското училище на Факултет за германско инженерно обучение и промишлен мениджмънт. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Филип Филипов Филипов

Заглавие: Изследване и имплементиране на технологии за навигация в затворени пространства

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1.1. Актуалност на научните изследвания

Известните от литературата и научната практика методи за локализация и навигация на роботизирани платформи се основават на анализ на характеристиките за движение, като той се позовава винаги на качеството на движение, което може да бъде постигнато. Най-общо, тези научни изследвания са свързани с механиката и конструкцията на платформите, с предвидени и използвани сензори и със създаване на 2D- позиционни карти.

Особеностите на тези научни изследвания описани в дисертацията се пораждат от условието движението да бъде в затворено помещение, а при създаване на карта да се отчитат и използват налични магнитни аномалии, характеризиращи помещението. Хипотезата за използване на магнитни аномалии води до необходимостта от научни разсъждения и необходими знания за стабилност и повторимост на необходимите магнитни сензори, за измерване на земното магнитно поле, за характера на аномалиите. Комбинацията от една позиционно организирана XY – XYZ карта с магнитната карта довежда до използване на термина референтна карта, а в смисъла на по-горе въведените аномалии и на разглеждането и като топологична карта. За решаване на основния технологичен проблем на навигацията е необходим анализ и сравнение на методи за локализация в затворени помещения по отношение на точност, диапазон на възможни грешки, видове използвани сензори, сценарии, приложими алгоритми.

Траекториите в затвореното помещение могат да бъдат предимно праволинейни, като в коридори на обществени сгради или произволни със завъртане на определен ъгъл. Актуално е търсенето на решение за едновременно с движението, непрекъсната локализация, определяща условията за обработка на масивите от данни. Освен това интересни са изследвания за избор и подобряване в посока на търсене и определяне на сигурни за локализация зони в разглежданото помещение.

1.2 Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е изучаване, изследване и имплементиране на технологии за навигация в затворено помещение чрез отчитане на характерни за него магнитни аномалии. Локализацията, като основен технологичен способ на навигацията, е в центъра на изследванията. При избора на траектории могат да бъдат изследвани случаи на предварително зададени и на произволно избрани такива.

За постигане на тази цел чрез литературното проучване се определят научните приоритети за изследване и експериментиране и намиране на решения за следните задачи:

1.2.1.A/

Изучаване стабилността на земното магнитно поле и характера и причините на магнитните аномалии, напр. дали аномалиите са причинени от конструкцията на помещението, дали и в каква степен са постоянни, каква е тяхната динамика. В много случаи е съществено дали аномалиите са активни, т.е. породени от електрически уреди, силови проводници, мобилни телефони, асансьори, или пасивни, т.е. породени от железни обекти, арматурно желязо.

1.2.1.B/

Избор на сензори и познания за тях като предпоставка за разработване на методите за локализация. Необходимо е да се изгради представа как да изглежда конструкцията на сензорния модул, така че да позволява изследвания за прецизността на локализацията. Трябва да се уточни броят на необходимите сензори, изборът на разположението им, както и начинът за едновременната комуникация с голям брой сензори. Множеството от сензори трябва да бъде едновременно обработено, като група, чрез подходящ метод за калибриране. Тогава става възможна хипотеза за едновременно магнитно измерване по X,Y, Z осите на общата координатна система. Закупуването на магнитни сензори трябва да стане след анализирането им и избор по принцип на действие, по повторимост на измерените стойности, вкл. шумови особености.

1.2.2. Изследванията по отношение на избор и осензоряване на платформа стават в реална обстановка, т.е. движение по предварително определени или по произволни траектории. Конструкцията от сензори може да повлияе и на движещата се платформа, защото ориентацията(heading) на сензорите е зависима не само от аномалиите, но и от самата нея. Необходимо е изследване за осъществяване на прецизно движение на колелетата на платформата едно спрямо друго, за да се избегнат използваните в други случаи статистически методи за оценка на движението. Една FPGA конструкция на вградената система би позволила разширяване на възможностите на същата. Допълнителна полза може да има от факта, че платформите в София и Магдебург могат да бъдат различни. Необходими са допълнителни изследвания за влиянието на измервателната система върху подвижната платформа по отношение на енергийно снабдяване, електронна обработка на данните и прецизно управление на движението.

1.2.3. Една магнитна референтна карта е обединение на две карти – една, съдържаща измерените магнитни данни, и втора – съдържаща позиционно измерване спрямо обща координатна система. Създаването на такава карта е съществена предпоставка за случая на локализация във всяка точка на траекторията. Разпознаваемостта на характерните за помещението аномалии прави картата топологична, когато те, чрез подходяща визуализация, са «видяни», сравнени и подлежат на изследване. Решението на задачата за визуализация на магнитното поле изисква анализ и оценка на подобни случаи от научно-приложната практика, напр. с една обща, ясна палитра от цветове в RGB или HSL-пространството. Създаването на разширена реалност е една част от евентуалното решение на тази подзадача. Магнитното поле е невидимо за хората, но то може да бъде измерено и съответните му стойности да се покажат. В случая обаче, е необходимо, то да бъде видяно в момента на движението на платформата и измерването. Известен е методът на „Point cloud“, но е необходимо прецизно изследване за евентуално приложение на точките, в смисъл, позиционните данни се трансформират в пространствени координати, а избрани магнитни данни – в цветови стойности.

За втората част на тази карта могат да бъдат използвани и изследвани различни методи напр. лазерен скенер или инфрачервени камера и диоди.

1.2.4. Разработването на сценарий за локализация в затворени помещения по отношение на точност, диапазон на възможни грешки, приложими преработени алгоритми и анализ на качеството на локализация зависи пряко от разпознаваемостта на магнитните условия, в смисъл общото въздействие на аномалии и земно магнитно поле, в изследваното помещение. Съществена особеност е и зависимостта от качеството на магнитната информация. Например, изборът за осеверяване на създадените карти би могъл да е ефективен. Тази корекция също ще допринесе за точността на локализация, очаквано силно, за случая на произволни траектории на движение. Приоритет е изборът за анализ на създадените в електронен вариант карти, чрез сравнение на „шаблони“ от данни (Template matching). Примерно изпълнение на сценарий би било от типа на следната последователност: първоначално се „заснема“ обединената карта, след това започва движение по картата, на „стъпки“, като се заснемат само магнитни данни. Ако тези стъпки/данни се „търсят“ като образ/шаблон по избран математически метод, напр. автокорелация, или математическо подобие, може да се изследва влиянието на XYZ- конструкцията на измервателния модул върху точността на локализация. Дали една референтна карта съдържа в себе си достатъчно разлики за локализация и дали референтните карти от различните лайсни се различават помежду си, е също приоритет на тази главна подзадача.

Научна новост

Изхождайки от обсъжданите приложения в тази област на пакета Индустрия 4.0 или на кибер-физикалните системи, и необходимите за това стабилни и евтини локализационни системи, работата е насочена в една важна и актуална област на научни изследвания. Тя се насочва и към решаване на проблеми надграждащи актуалното състояние на познаването на проблема, като планира разширяване на научно-техническото решение в посока на 3D (размерно пространство).

Практическа приложимост

Известните механизми за локализация в затворени помещения притежават много недостатъци. За да може да се получи достатъчно добро ниво, чрез система от камери, трябва да бъдат осигурени

подходящи граници на осветлението. Конвенционалните системи от лазерни скенери позволяват само събирането на съответните данни в 2D стъпка, а инфраструктурно базираните BEACON – решения предполагат големи усилия при инсталация им. Ето защо тази дисертация, търси алтернативно решение за постигане на локализация, базирайки я на използването на магнитни карти.

Апробация

Основните резултати от проведените изследвания в дисертацията са докладвани и обсъдени на научни форуми, национални и международни конференции. Освен това междинни резултати и разсъждения са включени в две защитени дипломни работи – по една в Магдебург и в София.

Публикации

Основните резултати са публикувани в шест статии и доклади от конференции.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от шест глави, списък на основните приноси, списък на научните трудове по дисертацията, списък на фигурите, списък на таблиците, списък на литературните източници и две приложения. Текстът е написан на немски език на 171 страници, съдържа 214 фигури и 20 таблици. Списъкът на използваната литература включва 184 източника. Номерата на използваните в автореферата фигури, таблици и формули съвпадат с тези от дисертацията.

II. Съдържание на дисертационния труд

1. Мотивация

Известните от литературата и научната практика методи за локализация и навигация на роботизирани платформи се основават на анализ на характеристиките за движение, като той се позовава винаги на качеството на движение, което може да бъде постигнато. Най-общо, задачите на научните изследвания в тази работа са свързани с механиката и конструкцията на платформите, с предвидени и използвани сензори и със създаване на 2D и 3D референтни карти, както и на методи за визуализацията им.

Особеностите на тази дисертация се пораждат от условието движението да бъде в затворени помещения, а при създаване на референтните (обединени топологична и магнитна) карти да се използват евентуални магнитни аномалии. Хипотезата за използване на магнитни аномалии води до необходимостта от научни разсъждения за създаване на магнитни карти. Затова са необходими знания за магнитни сензори, за измерване на магнитно поле, включително земното магнитно поле. Комбинацията от една позиционно организирана XY – XYZ карта с магнитната карта довежда до използване на термина топологична карта в смисъла на по-горе въведеното понятие референтна карта. В работата са направени експерименти, които служат за решаване на основния технологичен проблем при навигация, чрез локализация. Това води до изследвания, базирани на траектории в затвореното помещение. Освен това са необходими изследвания за избор и подобряване на методите за локализация, например в посока на търсене и определяне на сигурни за локализация зони в разглежданото помещение.

Тази начална хипотеза предполага и изисква предварителни изследвания в областта на земното магнитно поле и неговото измерване чрез подходящи сензори и методи. Начални етапи могат да бъдат:

- Сравнение с други методи за локализация в затворени помещения по отношение на точност, диапазон на възможни грешки, видове сензори, сценарии, приложими алгоритми;
- Изучаване стабилността на земното магнитно поле и характера и причините на магнитните аномалии, напр. дали аномалиите са причинени от конструкцията на помещението, дали и в каква степен са постоянни, каква е тяхната динамика. В много случаи е съществено дали аномалиите са активни, т.е. породени от електрически проводници, мобилни телефони, асансьори, или пасивни, т.е. породени от арматурно желязо.
- Избор на сензори и познания за тях. Необходимо е да се изгради представа как да изглежда конструкцията на сензорния модул, така че да позволява изследвания за прецизността на локализацията. Трябва да се уточни броя на необходимите сензори, конструиране на разположението

им, както и начинът за едновременната комуникация с голям брой сензори. Трябва ли да се използва само XY конструкция, или да се премине към използване и на Z оста. Закупуването на магнитни сензори трябва да стане след анализирането им и избор по принцип на действие, по повторяемост на измерените стойности. Конструкцията от сензори може да повлияе и на движещата се платформа, защото процесът на ориентация на сензорите е зависим не само от аномалиите, но и от нея. Необходими са допълнителни изследвания за влиянието на измервателната система върху подвижната платформа, по отношение на енергийно снабдяване, електронна обработка на данните и прецизно управление на движението. Разпознаваемостта на характерните за помещението аномалии трябва да бъде, чрез подходяща визуализация, при референтните карти «видяно», сравнено и изследвано.

- Множеството от сензори трябва да бъде едновременно обработено, като група, чрез подходящ метод за калибриране. Тези изследвания са предпоставка за разработване на методите за локализация.

- Изследванията по отношение на платформата стават в реална обстановка, като могат да се извършват придвижвания, както по предварително определени (предимно праволинейни), така и по произволни траектории. Необходимо е изследване за осъществяване на прецизно движение на колелетата на платформата едно спрямо друго, за да се избегнат използваните в други случаи статистически методи за оценка на движението. Една Field-programmable gate array (FPGA) конструкция на вградената система би позволила разширяване на възможностите на същата. Допълнителна полза може да има от факта, че платформите в София и Магдебург могат да бъдат различни.

- Както беше посочено, създаването на референтната карта е съществена предпоставка за случая на локализация във всяка точка на траекторията. За позиционната част на тази карта могат да бъдат използвани методи, базиращи се на лазерен скенер или на инфрачервена камера и диоди. Визуализацията подпомага съществено добиването на знания за разпознаваемостта на магнитните условия, в смисъл аномалии, и земно магнитно поле в изследваното помещение. Визуализацията подпомага избора на сценарий за локализация и изработване на съответните алгоритми за това. Съществен елемент е и изборът за осеверяване* на създадените карти. Корекцията за това също принадлежи към електронната обработка на масивите от данни и допринася за точността на локализация, особено за случая на произволни траектории.

Глава2. Основи

В тази глава са разгледани събраните знания по отношение на земното магнитно поле и видовете сензори за неговото окачествяване. Тези предварителни сведения са необходими като основа за анализ на характеристиките на земното магнитно поле, което съществува навсякъде, заедно с аномалиите в изследваното помещение.

- За разлика от навигацията с компас, при която локалните или глобалните характеристики са изследвани десетилетия и са моделирани в съответни магнитни карти, всяко помещение притежава такава „карта“ само за себе си. Всички конструкционни елементи в постройката могат да променят магнитното поле. Тези смущения могат да бъдат разделени на две – такива, които имат характер, определен от феромагнитни материали, използвани в постройката, и такива, които нямат такъв детерминиран характер. По същия начин, както при магнитната деклинация, локализацията по магнитните характеристики в изследваното помещение, може да се изследва по създаденото понятие референтна карта, която всъщност представлява магнитната „mediane“. Така по създадените топологични магнитно-референтни карти е възможно определяне на позиции, т.е. локализация, като част от навигационния процес.

- Магнитните полюси не са постоянни, те се придвижват всяка година с по 30 км. на север-северозапад.

- Съществуват два модела за описание на магнитното поле и на прогнозата за неговата промяна. И двата модела се актуализират на всеки 5 години. Единият модел е „World Magnetic Model“ [WMM], който е един стандартен модел и широко се използва. Моделираното поле се разпространява от един км под земната повърхност до 850 км над нея. Алтернатива на този метод е „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF), също много използван, но предимно от изследователи [Thebault2015].

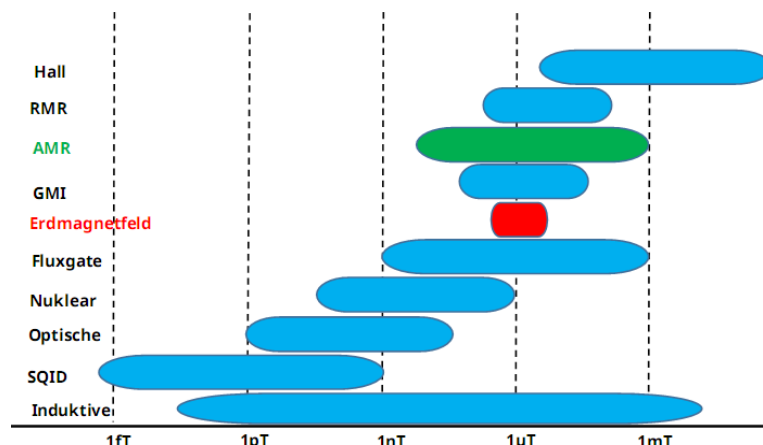
Съществуват слаби геомагнитни промени, чийто произход не е напълно обяснен и не може да бъде прогнозиран (виж фиг.2.14). Освен това, полето има малки промени за период от 24 часа, определящи

* При Осеверяване данните биват третираны, все едно са наблюдавани от конкретно зададена изходна точка (Einnorden), в глобалната координатна система.

се като зависими от активността на Слънцето. Този тип промени са в границите на десета от градуса, и в тази работа се счита, че не влияят на локализацията.

- Магнитни сензори

Магнитометрите се характеризират с различни параметри. Приложени са някои важни параметри, като : офсет и дълговременна стабилност, разрешаваща способност и шум, чувствителност, честотна лента, температурна стабилност, хистерезис и цена, които определят използването им. За окачествяване на земното магнитно поле са подходящи AMR (Анизотропни магнитно резистивни) и GMI сензори.



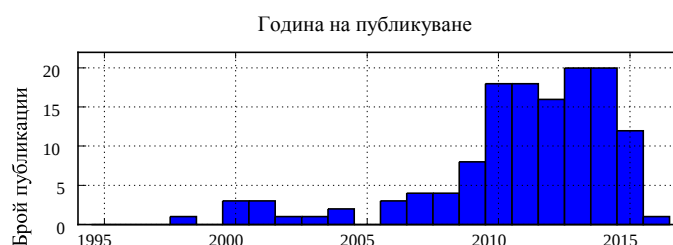
Фиг.2.22 Приложение на магнитометри в зависимост от тяхната разрешаваща способност [Tumanski2011]

Съществено значение има и параметъра PSD (Power Spectral Density), тъй като влияе силно на разрешаващата способност. Причината за шума на сензора е самия той, неговото съпротивление води до термичен шум (таблица. 2.1 в дисертацията).

- Предмет на измерване и сравнение между избраните магнитометри е сравнението на стабилността във времето на сензорите като група (фиг. 2.23 в дисертацията).

Глава 3. Преглед на методите за локализация по магнитни аномалии от литературната справка

Натрупаните знания и анализа на направените изследвания във втора глава позволяват да се проучи литература, специфична за направлението, избрано за дисертацията. В допълнение е направена литературна справка чрез Google Scholar запитвания със следните ключови думи: magnetic, {map, field, fingerprint, anomalies} robot indoor в различни комбинации. Отстранени са литературни източници, отнасящи се за – магнитни сетива при животни(напр. птици), геоложки феномени и ротации на базата на магнитни сензори. След премахването останаха 135 литературни източника. Фиг. 3.1. показва разпределението на тези източници по години. Видно е че тази тема е била най-актуална през 2010-2015г.(2016 не е приключила) .



Фиг. 3.1. Година на публикуване на литературните източници [FFilipov]

На базата на броя цитирания и значимостта или представена различна гледна точка, в глава 3 са разгледани в детайли 13 избрани литературни източника, а останалите фигурират в направените заключения, без да са детайлно описани в главата. Фиг. 3.2. показва цитиранията между тези 135 литературни източника. Колкото по голям е кръгът около номера на лит. източник толкова повече цитирания притежава той. С червено са показани в детайл разгледаните източници.

- Визуализацията подпомага избора на сценарий за локализация и изработване на съответните алгоритми за това. Съществен елемент е и изборът за осеверяване на създадените карти. Корекцията за това също принадлежи към електронната обработка на масивите от данни и допринася за точността на локализация. Подобряването на тази точност, и то при случайно избрани траектории, характеризиращи се с произволен брой завои, ще бъде новост, и съответно принос в дисертацията.

ГЛАВА 4. ПРЕДВАРИТЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

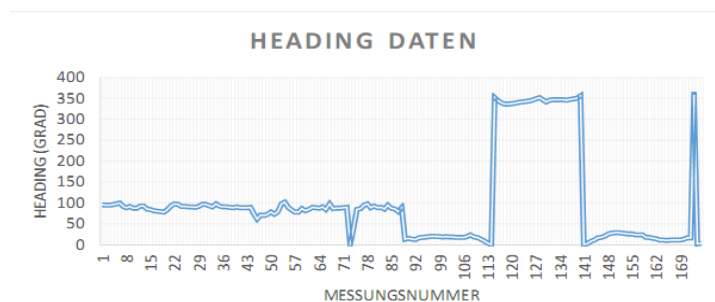
В тази глава се описват извършените седем експеримента, като всеки един от тях е разгледан като план, цел и резултати, които го характеризират.

Предварителни измервания

В този експеримент се изследват магнитни сензори по избрана методика. Тя обхваща бързината на измерване, като идеята е, че мобилната платформа се локализира активно по време на движение. Това означава, че скоростта на движение и скоростта на измерване трябва да са съобразени. Сензорните модули трябва да са в състояние да комуникират с вградената електронна система, т.е. изходящия сигнал да бъде предложен в аналогова или цифрова форма. Ако се използват сензори от друг вид, като жирокопи или измерители на ускорения, модулите трябва да са в състояние да изпращат едновременно изходящи данни. По отношение на шума на сензорите, както бе направено изследването в гл.2, характеристиките трябва да позволяват детектирането на магнитните аномалии, без смущения. Важен за сензорите е и параметъра тегло, понеже конструкцията се движи заедно с платформата.

Изследване на магнитното поле в коридор.

За избиране на магнитометър са разгледани каталожните характеристики. Направено е сравнение между няколко сензорни модула. За подробности (гл.4 на дисертацията). Така избраните за изследване магнитометри са изпробвани при експеримента при движение по линейни траектории в коридори на ТУ-София, блок4. Фигури 4.8 и 4.9 показват подхода при избора на траектории, съответно в коридора или в зала. Експериментът включва линейна траектория, като измерването става на всеки 20см. Магнитната индукция е измерена по трите сензорни оси X, Y и Z. Резултатите са дадени съответно на фиг. 4.1 до фиг. 4.4 В автореферата е показана фиг.4.4., която е резултат от пресметнат Heding (Хединг) по формула 2.3.

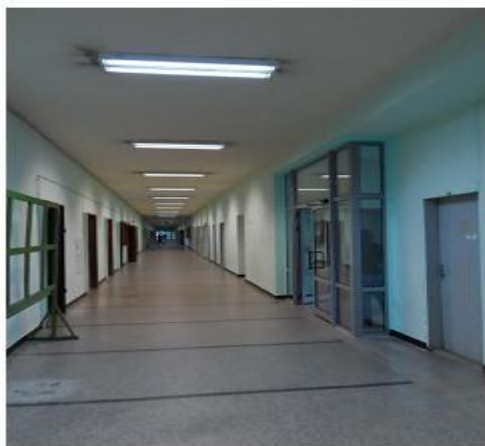


Фиг. 4.4 Heading CMPS10 [FFilipov]

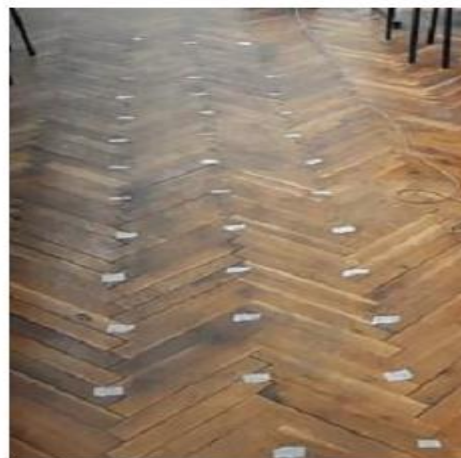
От тази фигура става видно, че при движение по права линия в коридора има промяна в магнитното поле, причинена от материали или обекти в помещението. При зададения мащаб за провеждане на измерване може да се направи оценка на магнитните характеристики на изследваното помещение. Фигури 4.1, 4.2, 4.3 от дисертацията и показаната тук фиг.4.4 показват еднозначно, че има промени в магнитното поле, породени от аномалии. Също така, при изследването, различните магнитометри бяха конфигурирани по един и същ начин, но получените от тях графики се различават значително.

Лабораторни коридорни магнитни измервания.

На фиг.4.8 са дадени пространствени характеристики на помещението, а на фиг.4.10 – резултати от измерванията по посочените там линейни траектории. Експеримента отново е направен с всички избрани за изследване сензори.

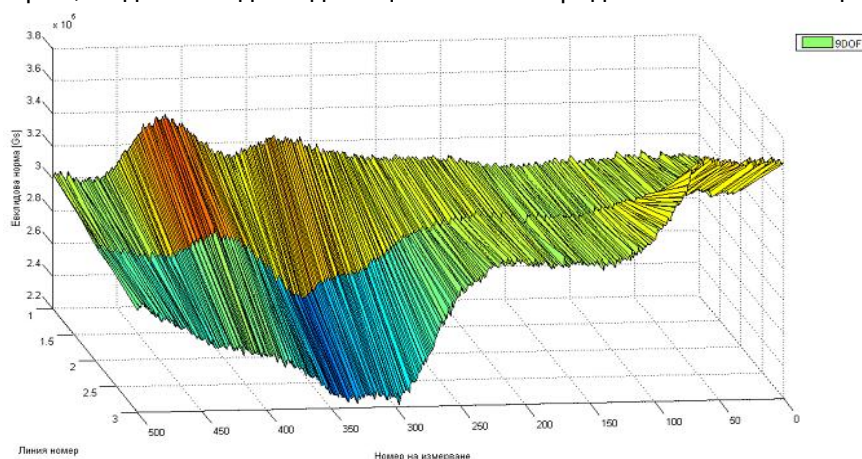


Фиг. 4.8 Коридор в блок 4 ТУ-София [FFilipov]



Фиг. 4.9 Трите изследвани линии [FFilipov]

На фиг. 4.10 и 4.11 са показани три-размерно, в цветова гама, резултати от измерване по използваните траектории от различните модули. Фиг. 4.10, например, показва промените в магнитното поле по време на движението. С използване на цветова гама е направен опит да се покажат промените в магнитното поле три-размерно, за да може да бъдат оценени като средство за локализация.



Фиг 4.10 Лаборатория - 9DOF-Module [FFilipov]

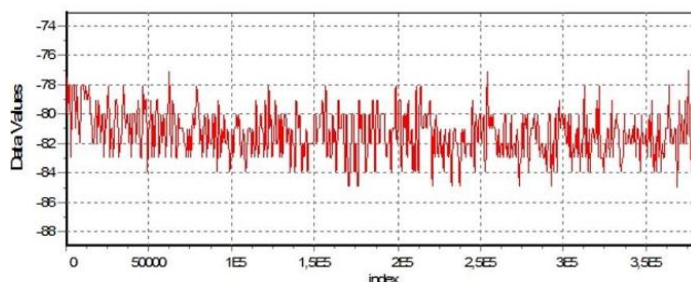
Между модули LSM303 и HMC5883L е направено и показано друго сравнение, по отношение на шумовите характеристики на фиг.4.11, 4.12 в дисертацията.

Разширени коридорни магнитни измервания.

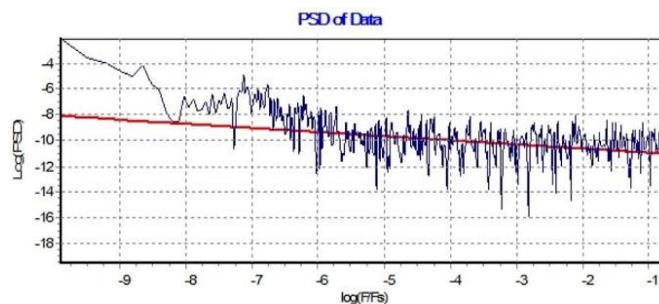
Това е допълнение към досега извършваните измервания, тъй като се провеждат същите магнитни измервания, отново в три линии, разположени на едно и също разстояние една от друга, показани на фиг.4.9 но в коридора на блок 4. За да се види промяната на магнитното поле във всички посоки, платформата, след достигане на края на линията, се завърта на 180° (градуса) и се връща по същата линия. Резултатите се виждат на фиг.4.16 и 4.17, а на фиг.4.15 са показани данните преди завъртането. От направените анализи се вижда, че има забележими промени по оста Y, което показва, че в ляво и в дясно от оста има различни аномалии.

Шумови характеристики на използваните сензори

От изучените зависимости и поведения на магнитните сензори в глава 2 стана ясно, че те шумят. Изследването на вида на този шум е необходимо по отношение на крайната цел за локализация. В глава 4 се предлага частичен експеримент, за определено време (3 часа), позволяващ събирането на данни за анализ на тези шумови характеристики. На фигури 4.18 са показани събраните за експеримента данни по сензорната ос X. А на фигура 4.19 тяхната изчислена спектрална плътност. Фиг. 4.21 до фиг.4.29 показват графиките от другите оси (в дисертацията). Шумът на всички сензорни оси отговаря на бял шум.

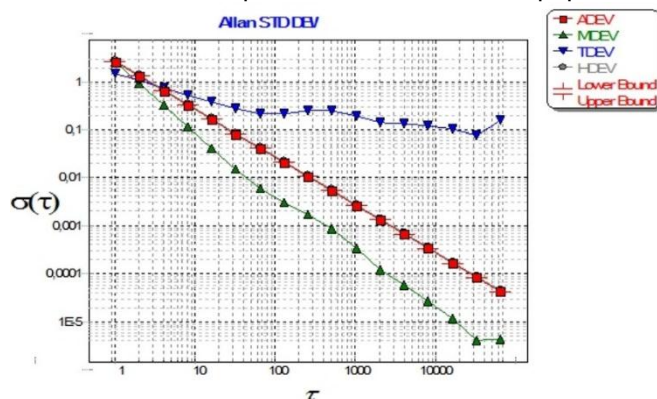


Фиг. 4.18 Данни от сензорна ос X [FFilipov]



Фиг. 4.19 Данни от сензорна ос X PSD [FFilipov]

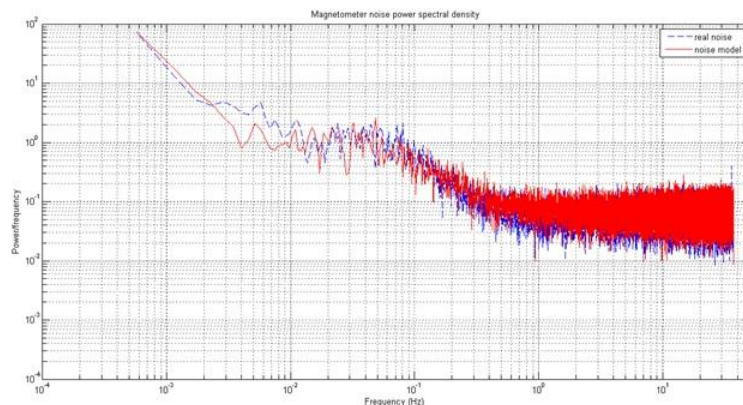
За пресмятане на големината на шума са използвани четири вида Allan вариации с изчислена достоверност на интервалите. Показани на фиг. 4.20 за оста X под формата на $\sigma(\tau)$ Сигма-Тау диаграма.



Фиг. 4.20 Allan-Вариации за сензорна ос X [FFilipov]

Стойността на шума на X оста е 260 μT , на оста Y е 321 μT и на оста Z е 301 μT . (в дисертацията)

За евентуално следващо използване на статистическите модели, чрез метода на най-малките квадрати, бе направен модел на шума за всяка от осите. Фиг.4.30 показва сравнението между моделираните и реални шумови характеристики.



Фиг. 4.30 Сравнение между моделирания(в червено) и реалния шум за ос X [FFilipov]

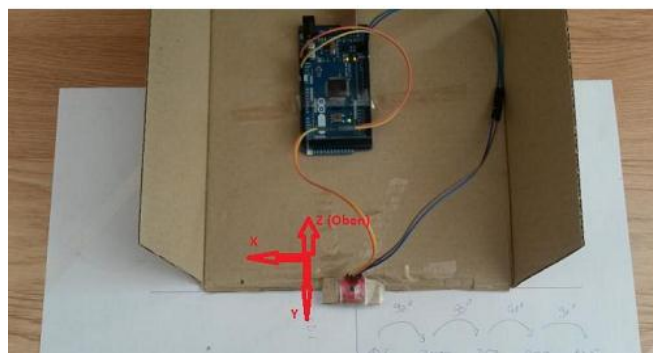
Обобщено може да се заключи, избрания HCM5883L сензор притежава изискуемите параметри, за да може да бъде използван в сценариите за локализация.

Влияние на околната среда

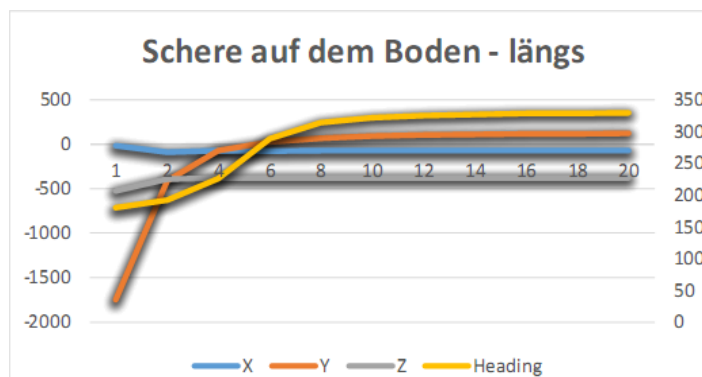
Описаните в глава 2 изследвания сочат, че земното магнитно поле може да бъде съществено променено от присъствието на железни обекти или от напр. електромоторите на мобилната платформа. Като основание за определяне на зони, сигурни за навигация, трябва да се проучи влиянието на пасивни и активни смущения.

Пасивни смущения

Въвеждането на понятията пасивни смущения е онагледено на фиг.4.31. Като железен обект са използвани стол и ножица, която може да се постави надлъжно или напречно спрямо сензора. На фиг. 4.32 е показано влиянието на смущението върху трите магнитни оси и изчисления от тях четвърти параметър – Heading, когато ножицата се отдалечава с по един сантиметър на стъпка (X оста в фиг.)



Фиг. 4.31 Позиция на сензора при изследванията [FFilipov]

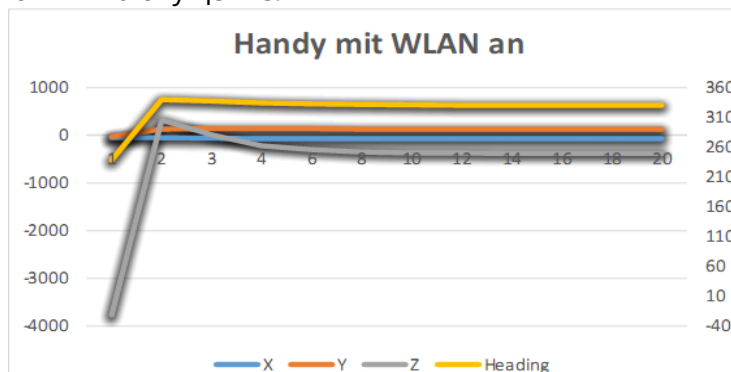


Фиг. 4.32 Комбинирана графика от стойностите на трите сензорни оси и пресметнатия Heading (чийто мащаб е показан в дясно-У ос). Ножица е поставена по дължина [FFilipov]

Сравнението на фиг.4.32 и фиг.4.33 (в дисертацията) показва, че стойността на Heading-a се стабилизира дори на отстояние 2см, докато за У оста това не е така. Фиг. 4.34 (в дисертацията) показва същия експеримент с подобна ножица. Влиянието върху Heading-a се елиминира на разстояние 8см, което води до заключение, че материала на ножиците е различен. Влиянието на тези пасивни смущения по оста Z (пространствена) дава също интересни резултати в посочения линеен обхват фиг. 4.36 – 4.39. Тези експерименти показват, че при използване на магнитометрите в една сграда, височината спрямо пода играе съществена роля. Значение има и при калибрирането на магнитометрите, където близостта на железни обекти е причина за появяващия се офсет.

Активни смущения

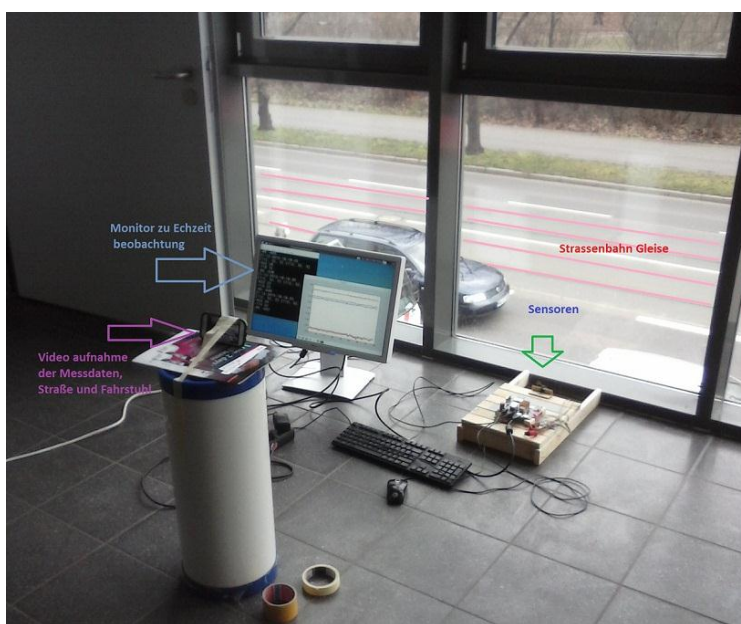
За активен тип смущение е използван мобилен телефон с включен интернет. Характеристиките са дадени на фиг.4.40. Изследването показва, че само 2см разстояние от сензора са нужни, за да не представлява телефона източник на смущение.



Фиг. 4.40 Комбинирана графика – мобилен телефон [FFilipov]

Активни и пасивни смущения

При следващо изследване е акцентувано върху ситуация, създадена от присъствие на двата типа смущения. Този експеримент беше проведен в блок 29 в Университета в Магдебург. Част от опитната постановка е показана на фиг.4.41 и 4.42. По средата на стълбището се намира асансьора на сградата. Една от стените е цялостно остъклена, като тротоара от тази страна е доста тесен. По силно натовареното платното на улицата се движат леки и тежки автомобили, както и трамваи. И асансьора, и трамвая са комбинация от активни и пасивни смущения.



Фиг. 4.41 Постановка на експеримента [FFilipov]



Фиг. 4.42 Постановка на експеримента [FFilipov]

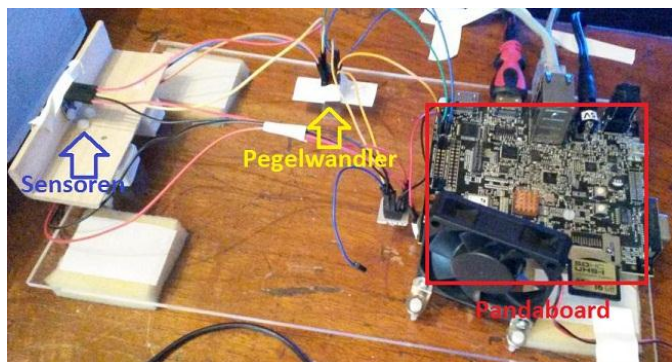
В Таблица 4.5 са събрани отклоненията по всяка от осите и изчисленият шум. Нивото на смущенията по стълбището на блок29 (в рамките на 1 час) , включително с изчислените Allan вариациите е около 1 градус т.е. минимално.

Таблица 4.5 Големина на смущенията [FFilipov]

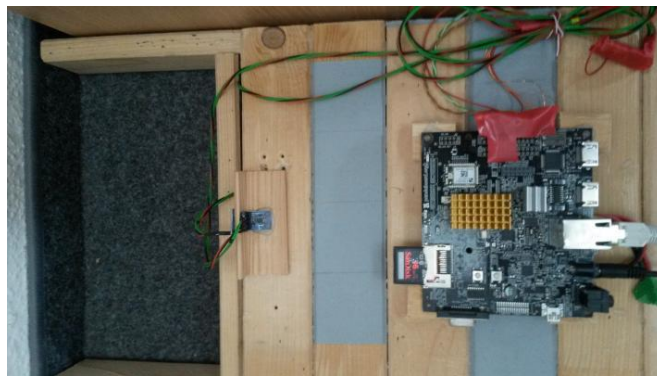
Средна стойност на данните	Allan-вариации
Sensor 1 X – 660 μ T	Sensor 1 X – 930 μ T
Sensor 1 Y – 400 μ T	Sensor 1 Y – 370 μ T
Sensor 1 Z – 390 μ T	Sensor 1 Z – 550 μ T
Sensor 2 X – 360 μ T	Sensor 2 X – 340 μ T
Sensor 2 Y – 500 μ T	Sensor 2 Y – 690 μ T
Sensor 2 Z – 600 μ T	Sensor 2 Z – 850 μ T

Дълготрайна стабилност на земното магнитно поле

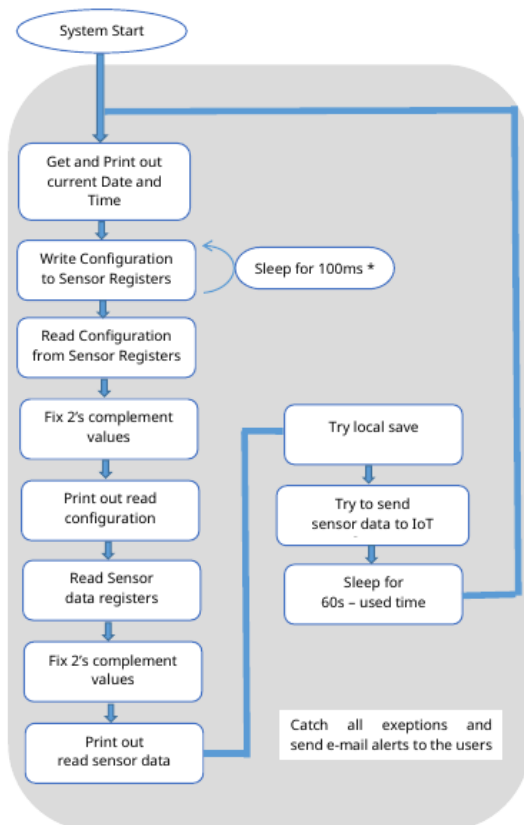
Към досегашните експерименти в глава 4 относно шумовите характеристики на избраните сензори и размера на влиянието на активни и пасивни смущения, се прибавя и изследване на стабилността на земното магнитно поле. Това са също предварителни изследвания като подзадача за постигане на главната цел. Общо взето нещата изглеждат така: може ли да бъде използвано едно измерване 10 дена по-късно, за сравнение? Същият въпрос се поставя и за по-голяма времева разлика, напр. 6 месеца. За решаването на тези въпроси е необходимо да се конструира измервателно устройство. За по-голяма достоверност на изследването са конструирани две устройства - едно в Магдебург и едно София. Допълнително, за обогатяване с информация те са монтирани на различна височини спрямо Земната повърхност и спрямо пода на помещението. Изискванията към измервателното устройство са описани в текста на дисертацията. Устройствата трябва да измерват поне период от една година, като всяка минута правят едно измерване. Резултатите се записват както локално така и се изпращат до Matlab базиран IoT сървър където допълнително се визуализират данните. На фиг.4.43 и 4.44 са показани двете устройства. А на фиг. 4.47 е показан алгоритъма на програмата написана на Python. При възникване на проблеми автоматично биват изпращани е-мейли до потребителя.



Фиг. 4.43 Измервателно устройство - София
[FFilipov]



Фиг. 4.44 Измервателно устройство - Магдебург
[FFilipov]



Фиг. 4.47 Алгоритъма на програмата, работеща на Pandaboard-а. [FFilipov]

Таблица 4.6 Обобщение на шума при Heading от дългосрочното изследване [FFilipov]

Средна стойност на данните	Allan-вариации при $\tau = 1$
Magdeburg Sensor 1 - 0.655 Grad	Magdeburg Sensor 1 - 0.13 Grad
Magdeburg Sensor 2 - 0.959 Grad	Magdeburg Sensor 2 - 0.64 Grad
Sofia Sensor 1 - 0.191 Grad	Sofia Sensor 1 - 0.27 Grad
Sofia Sensor 2 - 0.773 Grad	Sofia Sensor 2 - 0.35 Grad

Енергийна ефективност на мобилните платформи

За успешното изпълнение на задачите на тази дисертация са необходими реализации на мобилни платформи. Изискванията към тях са зададени в глава 4.4. от дисертацията. Основното от тях е енергийната им ефективност при движение. Затова бяха направени изследвания с два вида мотори и два вида колела (нормални и месаним) по различни траектории. Показани на фиг. 4.50 и 4.51. В резултат може да бъде заключено, че нормалните колела са по подходящи при движения по прави линии, а при траектории с повече завои - месаним колела. (4.54 в дисертацията)



Фиг. 4.50 Мобилна платформа с нормални колела [EnergyEf]



Фиг. 4.51 Мобилна платформа с тесанит колела [EnergyEf]

ГЛАВА 5. Концепции и техните реализации

Изхождайки от предишните експериментални изследвания за създаването на една 2D или 3D референтна карта са необходими разсъждения и анализи относно структурата на измервателния уред.

Модул „Лайсна“

Целите и задачите на тази дисертация предвиждат създаването и записването на магнитни референтни карти на затворени помещения. Изхождайки от предишните експерименти и факта, че при използването на един сензор ще е необходимо много време за заснемането на 2D или 3D референтна карта, се разработи измервателния модул „Лайсна“. Модулът се състои от едно Arduino, един мултиплексор и 10 сензора, които са разположени на една дървена лайсна. Сензорите са позиционирани на един ред, на 5cm разстояние един от друг.

При I2C- протокола всеки член (сензор) притежава един собствен адрес, чрез който се идентифицира. За съжаление магнитометъра HMC883L притежава ограничена вградена възможност за смяна на този адрес. Затова ако човек иска да използва 10 такива сензора в паралелна комуникация, са му необходими 5 I2C шини. Но, ако човек използва свойствата на протокола, че има една тактова линия и една линия за данни, чрез мултиплексиране (5.1. от дисертацията), е възможно да бъде използвана само една шина.

Прочетените от Arduino-то данни се формират в пакети, като за да се избегне объркване на пакетния идентификатор с данните, те предварително се кодират със собствено зададена шестнадесетична азбука, в която идентификатора не присъства. По този начин е възможно и откриване на трансферни грешки.

Калибриране

Една основна подзадача на дисертацията се състои в калибрирането както на един, така и на система от сензори с цел отстраняване на систематични грешки, като т. наречените Hard Iron и Soft Iron и инструментални грешки от типа на скалиране и офсет. Магнитометърът дава три стойности, по една за всяка измерена посока (сензорна ос) X, Y и Z.



Фиг. 5.4 Измерени магнитни данни, показани в 3D пространството [FFilipov]

Тези стойности, ако се разгледат в 3D пространството би трябвало да лежат на един елипсоид (виж фиг.5.4), който е топологично идентичен с една сфера.

При калибрирането на AMR магнитен сензор центъра на елипсоида се измества, така че да съвпада с началото на координатната система и "елипсоидът" се разтяга, свива или завърта, докато приеме сферична форма.

При използване на създадения от мен метод (формули 5.1 до 5.3) за калибриране, човек трябва да се намира в една хомогенна среда на земното магнитно поле, напр. в един парк.

$$X_{sensoroffset} = \frac{(X_{min} + X_{max})}{2} \quad (5.1)$$

$$X_{range} = X_{max} - X_{sensoroffset} \quad (5.2)$$

$$X_{rangeoffset} = X_{global} - X_{range} \quad (5.3)$$

За да бъде изпробвана и коригирана чувствителността на осите, на всеки сензор беше разработена една Self-test програма, която използва вградената в сензора бобина.

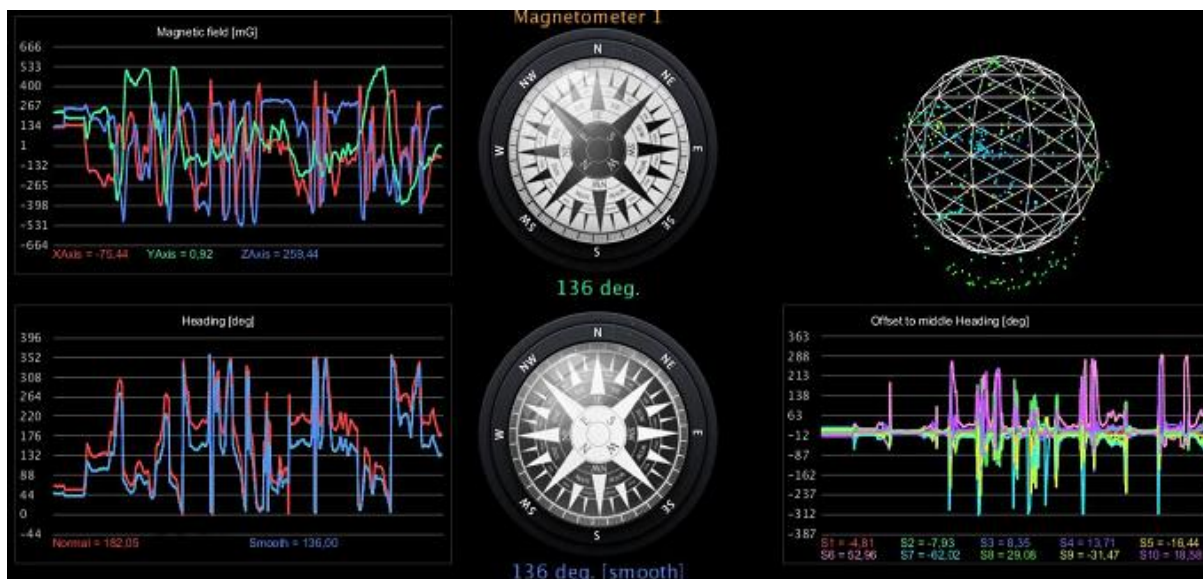
Като част от метода за калибриране беше изработена една Helmholtz бобина с 44 намотки и радиус от 5.6 см. Чрез задаване на определени настройки е възможно генерирането на точно определено магнитно поле в средата на бобината. Фиг.5.7 показва част от процеса на калибриране, при която една лайсна преминава през бобината. По този начин веднъж се изпробват коефициентите на калибриране на всеки сензор поединично, и се изчислява калибриращия коефициент на всеки сензор спрямо останалите.



Фиг. 5.7 Helmholtz бобина при процеса на калибриране [FFilipov]

За да се улесни използването на създадения метод за калибриране, е създадена програма, чиито изисквания са описани в т.5.2.4. Понеже тази програма се базира силно на множество графични изображения, беше използван програмния език Processing.

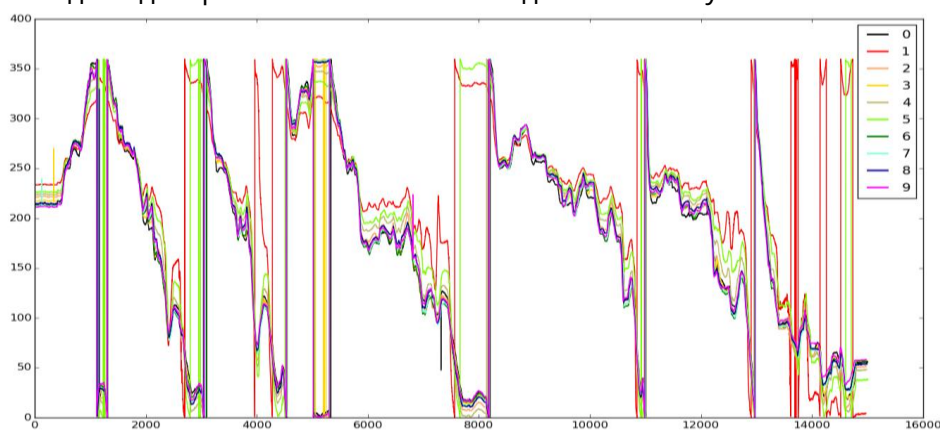
Комуникацията ѝ с Arduino-то се осъществява чрез USB UART връзка. Фигура 5.8 показва отделните части на тази програма. На нея се виждат няколко движещи се графа (Moving Graph) , сферата с 3D



Фиг.5.8 Част от функционалността на калибращата програма [FFilipov]

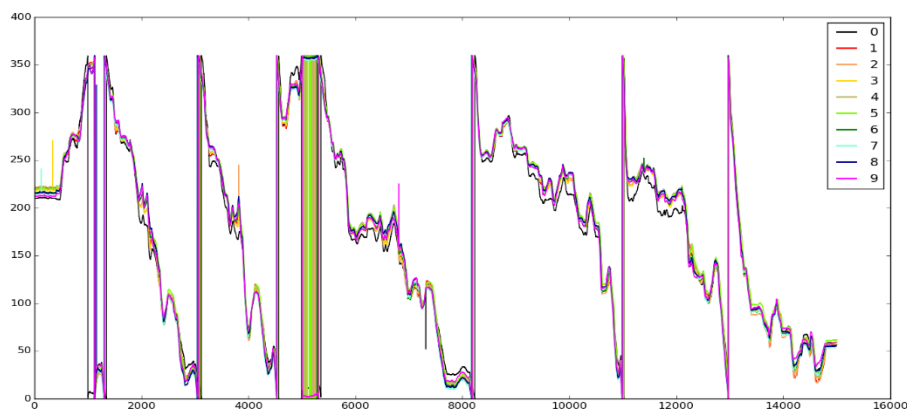
разположението на данните от сензора, както и Heading, под формата на два компаса. В таблица 5.3 (виж дисертацията) са показани различните клавишни комбинации, с които може да се превключи между различните опции на програмата. Елипсоида не може динамично да бъде въртян, но това не е и необходимо, защото точките представляващи измерените данни, които се намират зад елипсоида, им се присвоява един студен цвят. Колкото са по-близо до предната (лицева) страна на елипсоида, толкова са по-топли. Фигура 5.10 показва последователно калибрирани сензорни данни.

В нея се забелязват, на някои места, разлики между сензорните данни от около 50 градуса. Причината за това е, че AMR сензора от време на време допуска единични отскоци по време на събиране на данни за калибрирането му. За да могат да бъдат идентифицирани и премахнати тези данни, беше добавена още една стъпка към метода за калибриране. А именно новите данни от трите сензорни оси, се сравняват в 3D пространството с предишните, защото само там те имат информативно значение, на базата на което те могат да бъдат сравнени. Написаният код за това на Python е показан в Таблица 5.5.



Фиг 5.10 Пресметнатия Heading от вече калибрирани сензори [FFilipov]

На фиг.5.13 са показани данните след прилагане на разширения метод за калибриране. Видно е едно голямо подобрене, като не трябва да се забравя, че самите сензори са монтирани на 5см един от друг и не се намират в хомогенно магнитно поле, следователно те никога не биха имали точно едни и същи стойности.



Фиг. 5.13 Пресметнатия Heading след калибриране сензорите с премахване на отскоци [FFilipov]

Мобилни Платформи

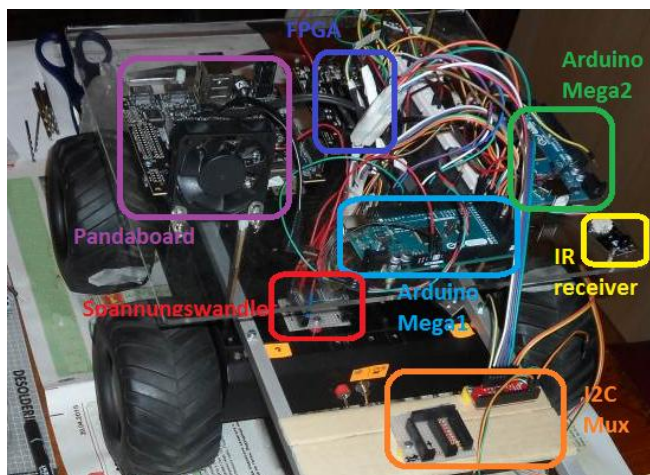
Поради двойното ръководство за тази дисертация, се наложи използването на две мобилни платформи – една в София, и една в Магдебург. За да бъдат изпълнени целите на тази дисертация, платформите бяха конструирани, изследвани и съответно осензорени.

Платформа София

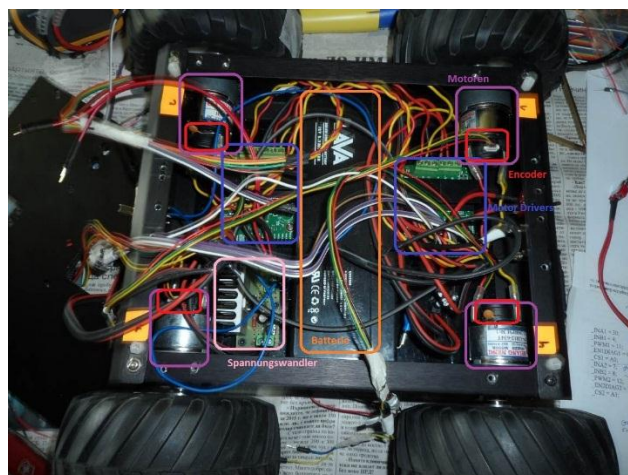
На фиг. 5.14 е показано шасито A4WD1, а на фиг. 5.16 (отвън) и 5.17 (отвътре) осензорената от мен версия.



Фиг. 5.14 Шасито A4WD1 [A4WD1]



Фиг. 5.16 Осензоряване отвън [FFilipov]



Фиг. 5.17 Осензоряване отвътре [FFilipov]

За управлението на всяко колело бяха поставени два двуканални моторни драйвера, вместо единичен двуканален. По този начин се създаде възможността скоростта и посоката на въртене, на всяко колело, поединично да бъдат управлявани. BOArduino-то беше заменено с две Arduino Мeга платки, за да могат да се управляват драйверите, а те впоследствие бяха пък заменени с едно FPGA. Освен това, на мобилната платформа беше поставен инфрачервен приемник, за да може тя да приема команди от дистанционно управление.

Началната задача на платформата беше да се движи, по права линия, в коридор на сграда 4 на ТУ-София. Тогава се установи следния проблем – че коридора не е равен и съответно се налага

непрекъснато коригиране на скоростта на всяко едно колело. За целта бяха използвани двуканални енкодери, поставени на всеки мотор. За декодиране на техните сигнали, обаче, са необходими 48000 прекъсвания по време на едно 360-градусово завъртане на колелата (виж формула 5.6). Теоретично погледнато, Arduino Мeга може да се справи с този брой прекъсвания, но понеже могат да се появят няколко прекъсвания едновременно, и съответно да не бъдат обработени, или да бъдат късно обработени, това води до грешки в измерване на скоростта на колелата и изминатия път. Освен това, микроконтролера на Arduino Мeга има само 6 входни пина с прекъсвания, т.е. две прекъсвания трябва да се зададат софтуерно. Също така, широчинно-импулсната модулация за управление на драйверите на моторите, също използва прекъсвания.

Едно много по-удобно и лесно решение представлява използването на една FPGA. Затова беше написан един модул за квадратично декодиране на езика VHDL (Very High Hardware Description Language). Този модул може едновременно да декодира всички сигнали от всичките енкодери. Освен това, беше написан още един модул, пак на езика VHDL, за широчинно-импулсната модулация. В таблица 5.6 са показани резултатите от двете решения.

Таблица 5.6 Сравнение на решенията [FFilipov]

Изследвано решение	Път [m]	Отклонение от правата линия [Градуси]	Разлика спрямо изминатия път спрямо енкодерите [mm]
Arduino 1 и 2	5	5,6	∞
FPGA	5	почти 0	+8
FPGA и Arduino 2	5	почти 0	+23
Arduino 1 и 2	15	∞	∞
FPGA	15	почти 0	+8
FPGA и Arduino 2	15	почти 1	+64

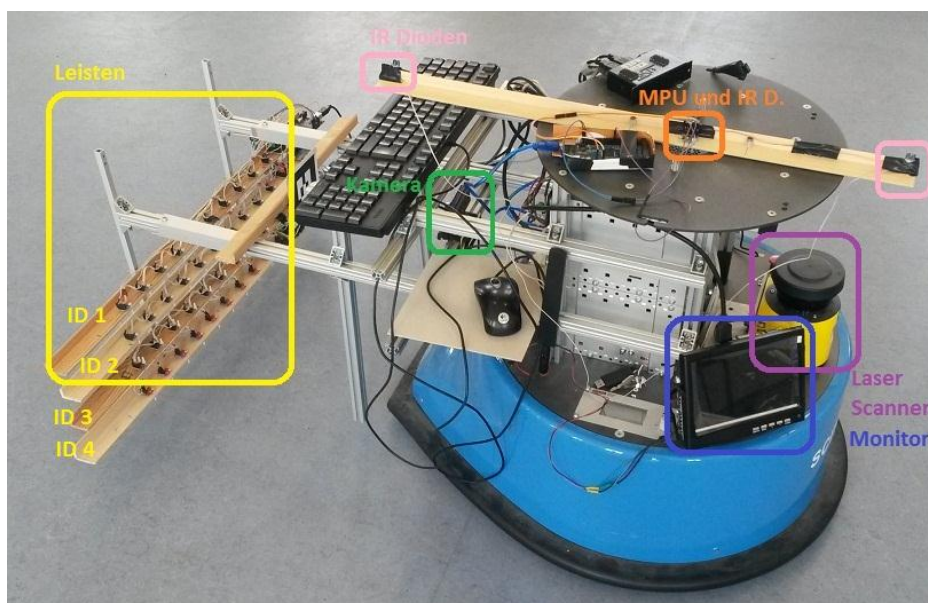
Видно е, че Ардуино решението не дава добри резултати, защото декодирането на сигналите от енкодера допуска грешки и по този начин обърква ПИД-регулаторите. Това може да се види най-добре в показаното трето решение, където декодирането на сигналите се извършва само от FPGA - я. Въпреки това, изследванията показват, че използването на FPGA за имплементиране за една използвана периферия, е ключът към решението на такъв тип задачи.

Платформа Магдебург

В Магдебург беше използвана мобилната платформа Scitos G5. На фиг. 5.23 е дадена платформата в началния ѝ вид, а на фиг. 5.24 – след като същата е осензорена със сензорните лайсни, една камера, два маркера, дисплей и др.



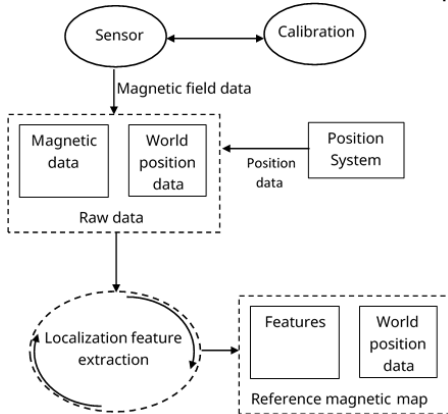
Фиг. 5.23 Мобилна платформа Scitos G5 [G5]



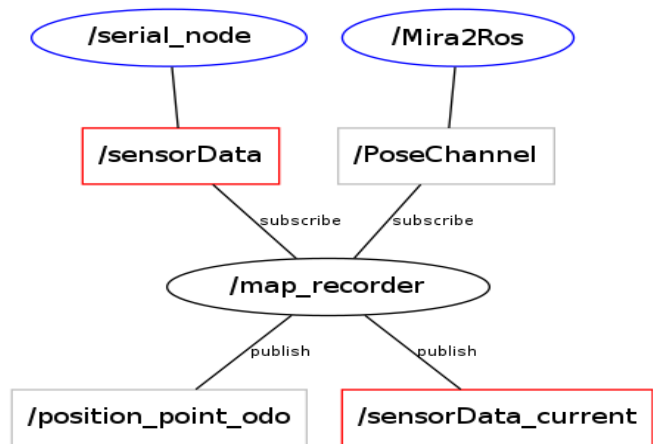
Фиг. 5.24 Осензорената Scitos G5 [FFilipov]

Референтни Карти

От целите и задачите на тази дисертация, и от получените знания в раздел 3 е известно, че една магнитна референтна карта е обединение на две други карти – една, съдържаща измерените магнитни данни, и втора – съдържаща позициите на измерване спрямо една обща координатна система. Процесът на обединение е показан на фиг. 5.25.



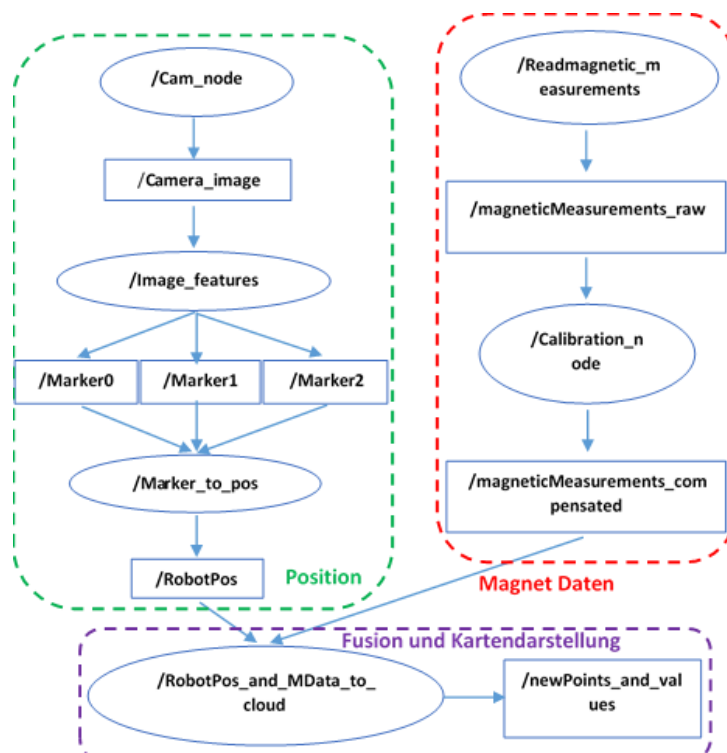
Фиг. 5.25 Процесът на обединяване на две карти [FFilipov]



Фиг. 5.27 Написани ROS Модули при процеса на обединяване при Mira [FFilipov]

За целта бяха изследвани два метода за получаване на позиционните данни. Първият се базира на Mira Middleware Framework. Понеже при изследванията за локализация се използва основно Roboter Operating System (ROS), създадох „мост (връзка)“ между тях, чиито основни модули може да се видят на фиг.5.27, на която е показан и процеса на обединение.

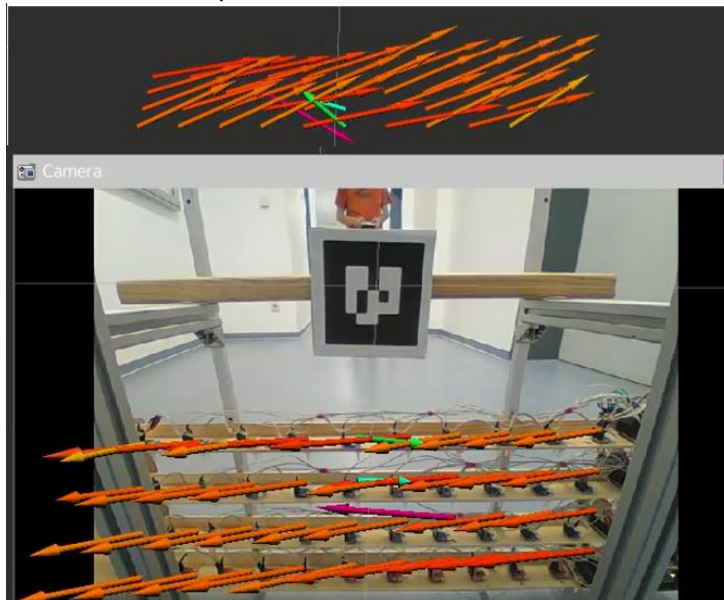
Вторият метод се основава на една разширена, от мен за целите и задачите на дисертацията, разработка на Otto car OVGU отборът. При този метод се използва инфрачервена камера, която се поставя на покрива на помещението, а на платформата – инфрачервени диоди. Обработвайки полученото видео, в реално време, с методи, касаещи видеоизображенията, и чрез формула 5.7 (зададена спрямо обща координатна система – виж дисертацията), се изчисляват позициите на диодите, и спрямо тях пък, позицията на робота в помещението. На фиг.5.28 са показани съответните ROS модули за обединение на така получените карти.



Фиг. 5.28 Написани ROS Модули при процесът на обединяване при инфрачервена камера [FFilipov]

Разширена реалност

Създадената в тази дисертация разширена реалност е една част от решението на подзадачата за визуализация на магнитното поле. Тъй като магнитното поле е невидимо за хората, то може да бъде измерено и съответните му стойности да се покажат на диаграма. При изследване, обаче, на аномалии в земното магнитно поле в затворени помещения, е необходимо то да бъде видяно в момента на измерването. На фиг.5.29 е показана създадената разширена реалност, а на нея се вижда и измерения и пресметнат Heading от магнитните данни, показани със стрелки, като ъгъла и цвета им, а векторната норма е показана чрез дължината на стрелките.

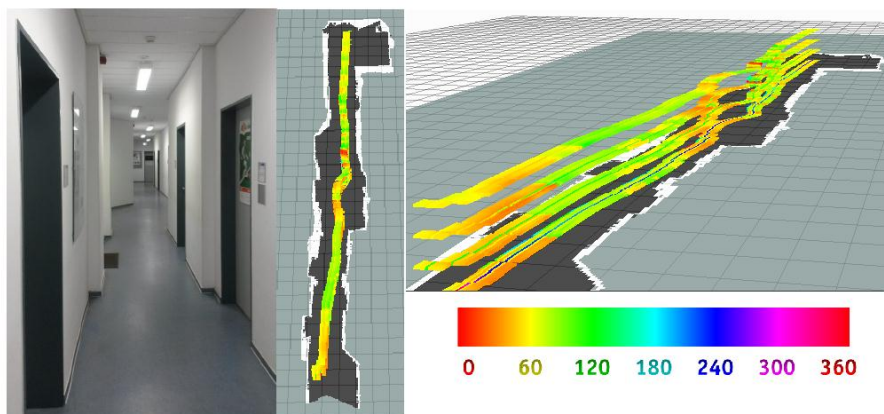


Фиг.5.29 Създадената разширена реалност [FFilipov]

Разширената реалност се пресмята в един, за тази цел написан ROS модул, чиито резултати се добавят към видеото от камерата. В него координатната система на сензорните данни, координатната система на камерата и координатната система на маркера, са обединени в една обща координатна система. Желаните данни се пресмятат спрямо тази система. По този начин, по време на движение на платформата, е възможно да се гледа видеото от камерата и ясно и точно да се види къде има аномалии. Решението на задачата за визуализация на магнитното поле изисква то да бъде винаги визуализирано с една обща, ясна палитра от цветове. В днешно време, стандартно при работа с цветове се работи в RGB пространство, чиято декартова репрезентация е куб. RGB цветовете се задават с три стойности в обхват от 0 до 255. Използваните магнитни данни, обаче, често се използват в обхват от 0 до 360. Поради тази причина HSL цветовото пространство приляга много добре, тъй като е полярна цилиндрична репрезентация на RGB пространството.

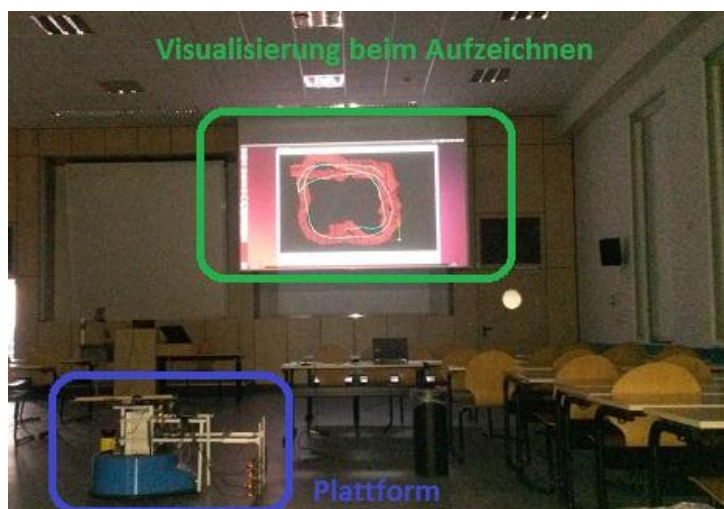
Облаци от точки

Друга под част на решението на тази задача са така наречените облаци от точки „Point cloud“. Този облак се състои от точки, всяка от които има свои собствено зададени координати в пространството и цветови опции. При визуализацията на една референтна магнитна карта позиционните ѝ данни се трансформират в пространствени координати, а магнитните данни – в цветови стойности. По този начин пространствените координати отговарят на използваната обща координатна система. Това позволява по време на записване на обединената карта, тя да бъде визуализирана. Това е много важно, понеже по този начин е известно коя част от пространството е вече картографирана. На фиг.5.32 са показани четири облака от точки в 3D пространството, като за получаването им е използван написания за това ROS модул.

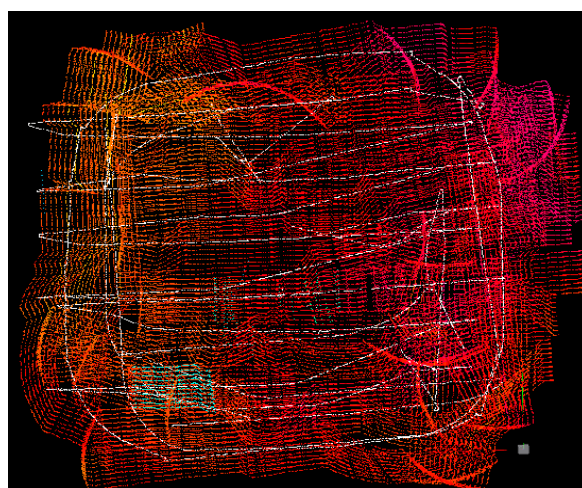


Фиг.5.32 Облак от точки от една коридорна референтна карта [FFilipov]

Фигури 5.33 и 5.34 показват облак от точки само от една лайсна. Погледа върху облака е отгоре му, за да може да се възприеме по-лесно, понеже е от референтна карта на цяло помещение. С бяло е означено откъде вече е минал робота.



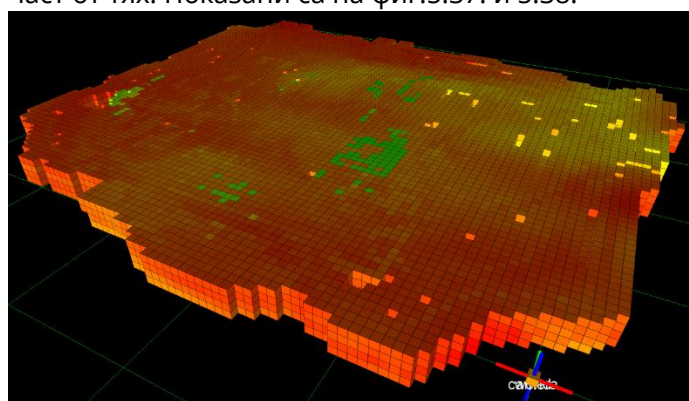
Фиг. 5.33 Визуализация на референтна карта по време на заснемането и [FFilipov]



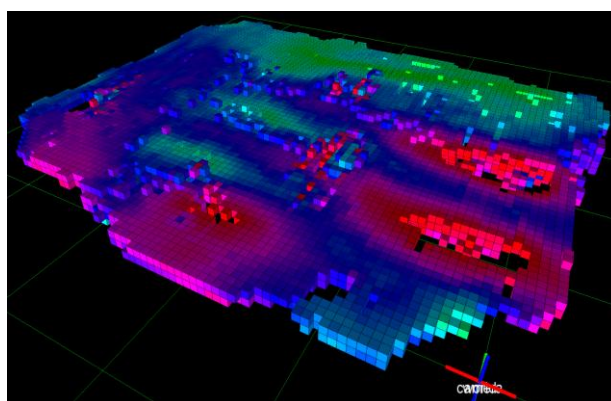
Фиг. 5.34 Облак от точки само от една лайсна. С бяло е показан изминатия от робота път. [FFilipov]

Октокарти

Друг използван метод за визуализация са октокарти (Octomaps). Те представляват дървовидна структура на данните и съответно са много удобни за търсене в данните или изобразяване само на част от тях. Показани са на фиг.5.37. и 5.38.



Фиг. 5.37 3D-Octomap. Показан е Heading-а в едно помещение [FFilipov]



Фиг. 5.38 3D-Octomap. Показан е резултат от стъпка на локационния алгоритъм. [FFilipov]

В зелено на фиг. 5.38 са показани позиции, които в следващата локализационна стъпка ще бъдат разглеждани като евентуална локализирана позиция. Места които са били отхвърлени от предишни стъпки биват и премахнати от дървовидната структура- в фиг. 5.38 две от нивата в сравнение с фиг. 5.37 ги няма.

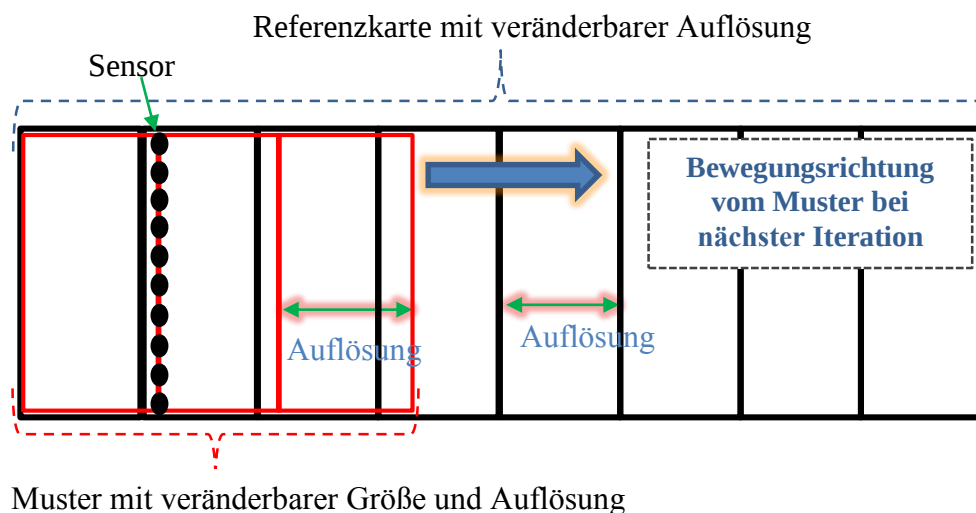
ГЛАВА 6.

Тази глава се основава на концепциите и реализациите в глава 5. Разглеждат се различните локализационни сценарии и съответните алгоритми за локализация, като подзадачи. Алгоритмите са изследвани за точност, отново като подзадача. Преди локализационните изследвания да бъдат реализирани, референтните карти бяха предварително изследвани по отношение на тяхната самостоятелност. Целта на тези изследвания беше проверка на хипотезата, че аномалиите в земното магнитно поле, в затворени помещения, генерират достатъчно разлики в референтните карти, така че те да могат да се използват от локализационен алгоритъм. Също така се изследват различни траектории на движение и за случайните траектории локализационните алгоритми се разширяват с възможности за позиционно(Tracking) слеждане.

Описание на сценариите.

Изводите от глава 3 показват, че досега извършваните изследвания за локализация са били на базата на зададени траектории на движение. Голяма част от използваните локализационни алгоритми при това, се базират на статистически модели, като Partikel filter или на базата на генетични алгоритми. За да се разгранича от тези изследвания, в тази дисертация са използвани Хединг(Heading) и векторна норма, като данни за локализация. Също така не се изследват локализационно само зададени траектории на движение, а и случайни такива. Друга съществена разлика е, че изследваните тук алгоритми на локализация се базират на сравнение на шаблони (Template matching).

Сравнението на шаблони е част от компютърното зрение или още наричано „разбиране на изображения“. Целта при шаблонното сравнение е да се намери най-доброто съответствие на последните (най-новите) сензорни данни – шаблона, спрямо референтната карта. За тази цел първоначално се „заснема“ референтната карта. На следващата стъпка се заснемат само магнитни данни, от които се състои шаблона. Този принцип на изпълнение е даден на фиг.6.1. За може да бъде направено заключение относно важността на използвания мащаб веднъж при референтната карта, и още веднъж при шаблона, бяха направени изследвания с различна големина на мащаба.

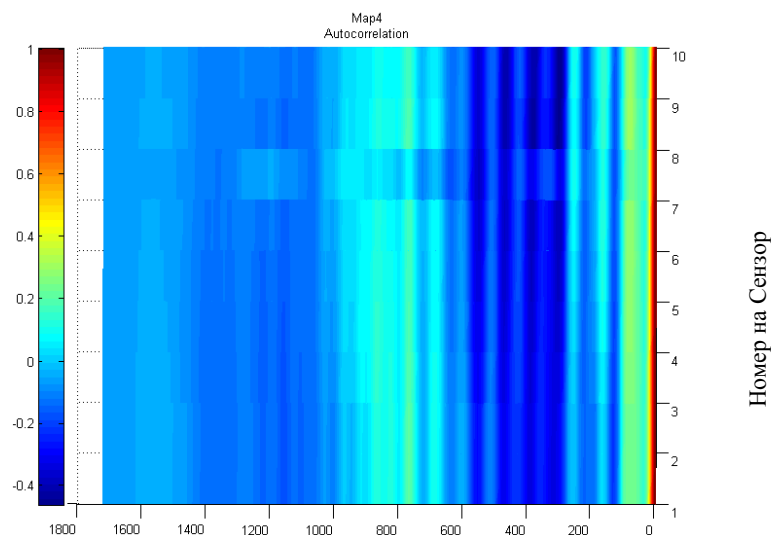


Фиг. 6.1 Template Matching принцип [FFilipov]

Анализ на референтните карти

При тази подзадача беше изследвано дали една референтна карта съдържа в себе си достатъчно разлики за локализация, и дали референтните карти от различните лайсни се различават помежду си.

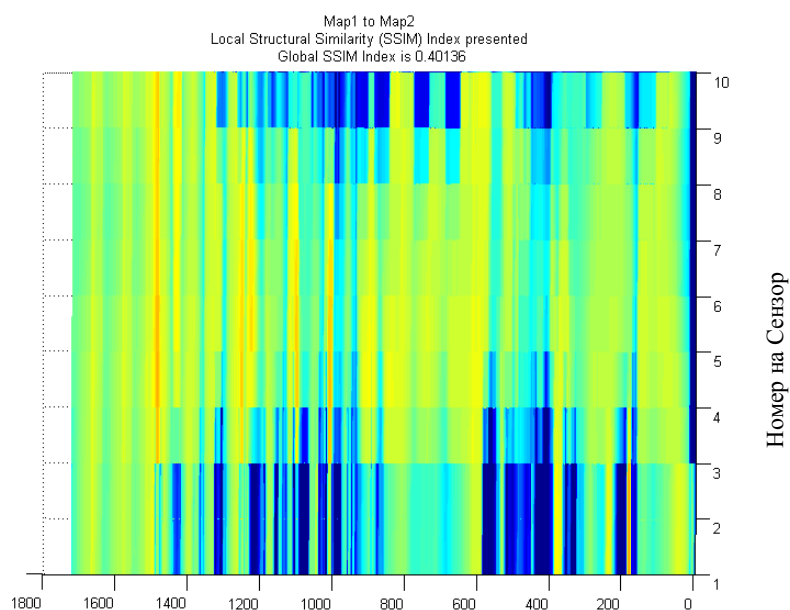
Чрез изчисляване на автокорелацията на всяка карта от всяка лайсна, поотделно, се формира заключение относно съществуването на достатъчни разлики, във всяка карта поотделно. Изследвани бяха обобщени карти както при зададени, така и при случайни траектории. Фигура 6.6 показва резултата от автокорелацията на една референтна карта. По оста X е указан поредния номер на измерването, а по оста Y – номера на сензора. Тъмноревеният цвят, съответстващ на 1 показва идентичност, 0 – показва неидентичност, а отрицателните стойности – идентичност в обратна посока. Изводът от тези изследвания е, че с височината разликите се намаляват, независимо от траекторията на движение.



Фиг. 6.6 Автокорелацията на референтната карта от лайсна 4 при зададена траектория на движение [FFilipov]

Структурното подобие

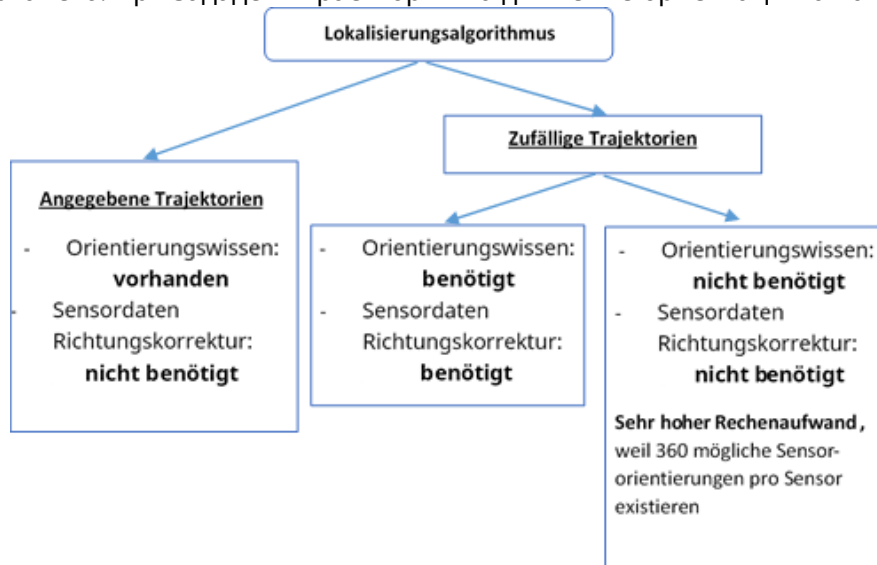
За определяне на структурното подобие между две карти се използва т.нар. индекс на структурно подобие. Този индекс е едно подобрение спрямо други известни методи от този тип методи заради съответствието му с човешкото визуално възприятие. Осите на фигурите, както и обхвата на резултатите е същия, както при автокорелацията. Индексът беше изчислен за всяка референтна карта спрямо всяка друга, както при зададени, така и при случайни траектории. Фиг.6.12 показва резултата от сравнение на карта 1 с карта 2. Следва заключението, че във височина разликите между картите се увеличават.



Фиг. 6.12 SSIM от референтните карти от лайсни 1 и 2 при зададени траектории на [FFilipov]

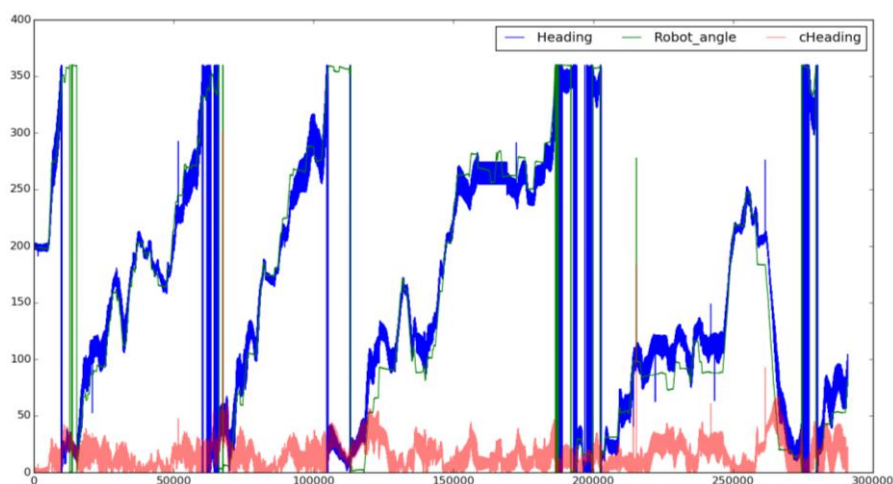
Осеверяване на Карти

Един специфичен случай на движение по траектории е този по случайни такива, показано е на фиг.6.2. Сензорните данни могат да показват посока само спрямо ориентацията на сензора в моментната позиция на измерването. При зададени траектории на движение ориентацията на сензорите е



Фиг. 6.2 Разлики между зададени и случайни траектории по отношение на необходимата информация [FFilipov]

зададена т.е. известна, даже при движение по повече от една траектория. При случайни траектории това не е така, и трябва да се направи корекция в посоката, получена от сензорните данни. Ако тази корекция не бъде направена, трябва ориентацията на сензора да бъде намерена спрямо общата координатна система. За един сензор, обаче съществуват 360 възможни ориентации. Затова полето на търсене е много голямо, и съответно изисква голяма изчислителна мощност, и то само за пресмятане ориентацията на сензорите при една измерване. Затова в тази дисертация ориентацията не се търси по този начин, а се пресмята или от изчисления ъгъл от FPGA решението в гл.5, или от един Motion-Processing-Unit(MPU), който се използва като допълнителен сензор. За да може обаче една референтна карта, заснета при случайни траектории, да се използва, тя трябва да бъде осеверена. Това означава, че в нея ориентационните зависимости на сензорите, спрямо позицията им, са премахнати. По този начин, въпреки, че платформата се движи по случайни траектории, от гледна точка на локализационния алгоритъм, тя се движи по зададени такива. Формираното тук решение за осеверяването е реализирано чрез изваждането на ъгъла на робота от ъгъла на сензорите, показано на фиг. 6.33.



Фиг. 6.33 Коригиран Heading (червен цвят) [FFilipov]

Локализационни алгоритми

Използването на шаблонни методи, като основа на локализационните алгоритми, създава няколко предизвикателства. По принцип, цялото “референтно” изображение(карта) е площта за търсене при шаблонното търсене. Също така, по принцип, това търсене се извършва на настолен компютър, а не на платформен кит. По този начин първото предизвикателство е изчислителната мощност, която може да се намали, ако се търси само в част от референтната карта (изображение). Тогава обаче, при стартиране на локализацията трябва стартовата точка в пространството, т.е. в референтната карта, да бъде известна. При зададени траектории е лесно да се зададе полето на търсене, но при случайни траектории това не е така, защото траекторията не е известна. Поради тази причина, в направените изследвания са използвани целите референтни карти като поле на търсене, и локализационните алгоритми са оптимизирани, по отношение на необходима изчислителна мощност.

Като подзадача са изследвани, сравнени, последователно разширени и оптимизирани 8 (осем) шаблонни метода, с цел да бъде определено дали някой от тях е по-подходящ за база на разработения локализационен алгоритъм.

- **Сума на абсолютните разлики**

Сумата на абсолютните разлики (SAD) е използвана като първа база на локализационния алгоритъм – виж формула 6.1. При този метод се пресмята разликата между пикселите на обединената снимка

$$SAD = \sum_{x=0}^{b-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B(x, y) - T(x, y)| \quad (6.1)$$

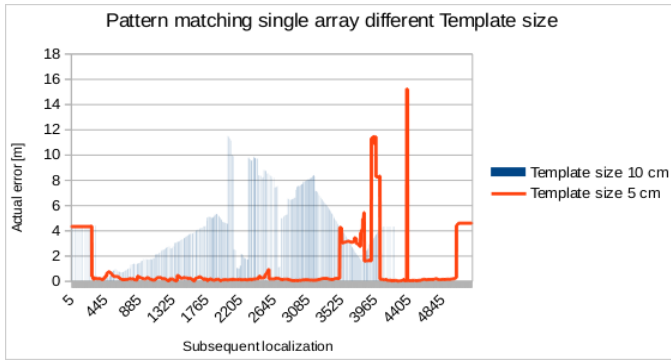
където B е изображението, T е шаблона, b е широчината и h височината на шаблона.

(карта), и пикселите на шаблона. При това, шаблонът се премества пиксел по пиксел по цялата карта. При всяка стъпка на преместване, пресметнатата стойност се записва в матрица. Позицията в матрицата, чиято стойност е минимална, е позицията където според метода, шаблона пасва най-добре в картата. Поради първоначални лоши резултати, получени от този алгоритъм, се наложи да бъде направено разширяване на SAD-метода с възможност за подобие на следене. Не добрите резултати се дължаха на това, че метода допускаше подскоци в локализацията, които не са реални, напр. платформата да се е преместила един метър между две локализационни запитвания, направени през една секунда. Затова, направеното в дисертацията, разширение използва експоненциална функция, дадена в таблица 6.1, чрез която SAD изчислените

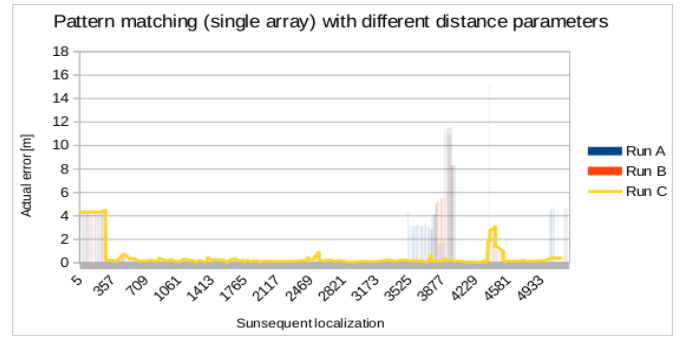
Таблица 6.1 SAD разширение [FFilipov]

```
419 dist = last_localized.getDist>(*this)[x + actual_rows].position);
420 //((e^x)-1)*4
421 float punishment = (pow(M_E,dist)-1)*SAD_FACTOR;
422 if (punishment > SAD_CAP)
423     punishment = SAD_CAP;
424 SAD += punishment;
```

стойности за дадена позиция, автоматично се влошават спрямо дистанцията им спрямо последната локализирана позиция. По този начин се създава и възможност за всяка референтна карта да бъдат итеративно пресметнати SAD коефициенти, чрез които да се подобри локализацията. Това се вижда на фигура 6.35, където са показани резултати от три локализации, с три различни коефициента. Понеже една от подзадачите на локализацията е изследване на значението на различни резолюции, при локализацията, фиг. 6.34 показва каква голяма разлика има при различните резолюции.



Фиг. 6.34 SAD при зададени траектории, различни резолюции [FFilipov]



Фиг. 6.35 SAD при зададени траектории [FFilipov]

- **OpenCV базирани**

Други шаблонни методи са тези, които са имплементирани в свободната програмна библиотека OpenCV. Първата версия на тази библиотека съдържа само един шаблонен метод – нормираната крос корелация. В следващите версии, библиотеката съдържа общо шест шаблонни метода. Два от тях са корелационно базирани, а един се базира на разлики. Към тези три метода може да се използва и техния нормиран вариант. Всички те са показани с формули 6.2 до 6.7. Направеното от мен разширение на тези OpenCV шаблонни методи се основава на приложените идеи, при разширението на SAD метода. Разликата е, че тук не се разглежда всяко изчисление, преди шаблона да бъде преместен по картата, а накрая само една предварително зададена област, която се претърсва за невъзможни дистанции. Предимството на това е, че се премахва необходимостта от специфичните за всяка карта коефициенти и от допълнителна итеративна структура.

- CV2_TM_SQDIFF

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T(x', y') - B(x + x', y + y'))^2 \quad (6.2)$$

- CV2_TM_SQDIFF_NORMED

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') - B(x + x', y + y'))^2}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} B(x + x', y + y')^2}} \quad (6.3)$$

- CV2_TM_CCORR

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot B(x + x', y + y')) \quad (6.4)$$

- CV2_TM_CCORR_NORMED

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot B(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} B(x + x', y + y')^2}} \quad (6.5)$$

- CV2_TM_CCOEFF

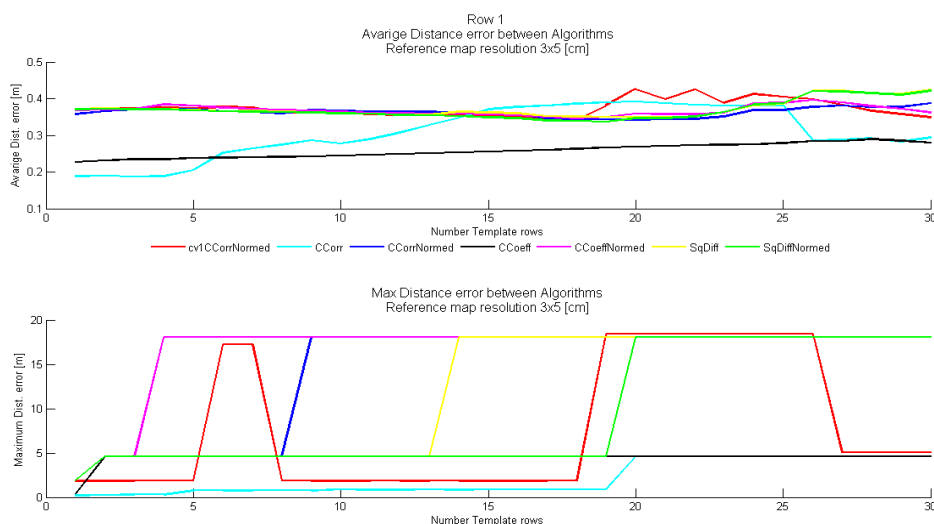
$$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T'(x', y') \cdot B'(x + x', y + y')) \quad (6.6)$$

- CV2_TM_CCOEFF_NORMED

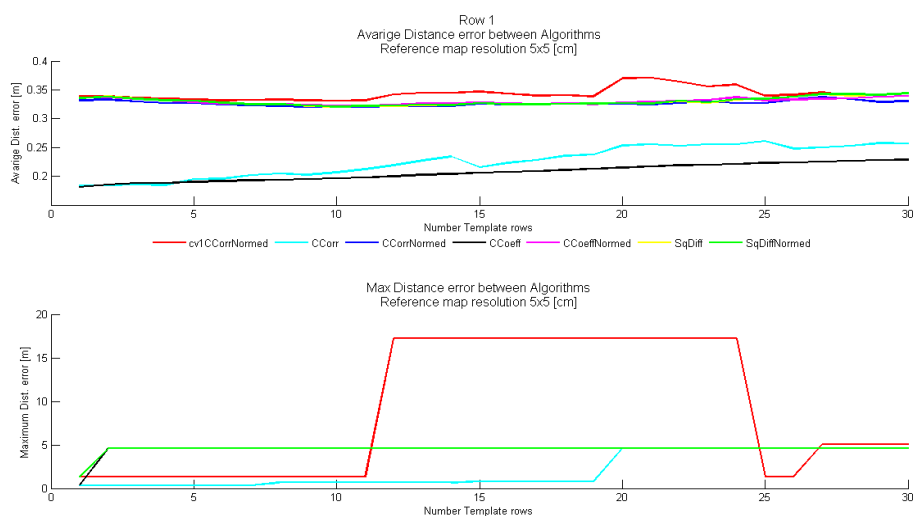
$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T'(x', y') \cdot B'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} B'(x + x', y + y')^2}} \quad (6.7)$$

Където $\underline{R}$ е резултата, $\underline{B}$ е изображението с големина $W \times H$, $\underline{I}$ е шаблона с големина $w \times h$, $x' = 0 \dots w - 1$ и $y' = 0 \dots h - 1$.

Фиг. 6.38 и 6.39 (до 6.57 в дисертацията) показват резултати от изследвания на постигнатата точност при различните локализационни алгоритми спрямо резолюцията (различна на всяка фигура) на референтната карта. Както и при различна шаблонна резолюция изобразена чрез X оста. В фигурите Y оста показва постигната локализационна грешка – веднъж като средна стойност и веднъж като максимална стойност. Извода от изследванията е че резолюцията на референтните карти независимо от резолюцията на шаблона играе основна роля за точността на локализацията.



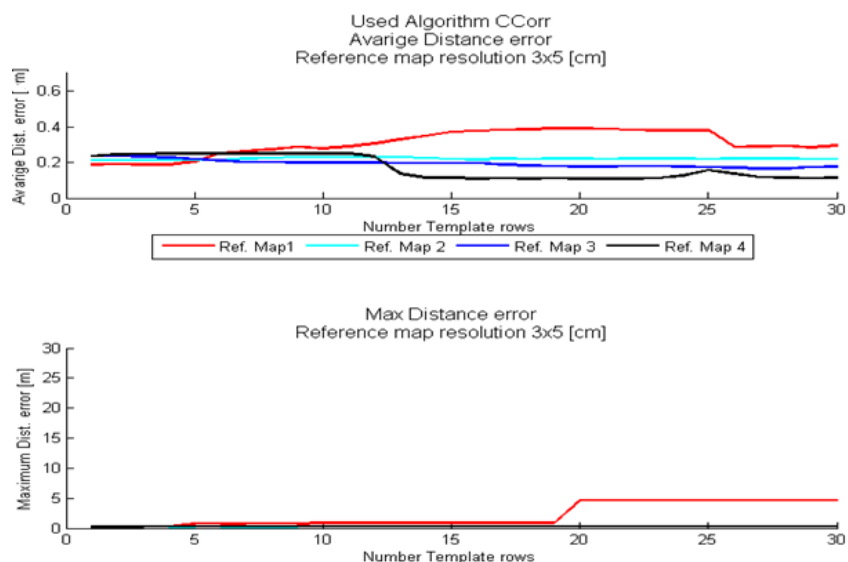
Фиг. 6.38 Методи спрямо Лайсна. Резолюция 3x5cm [FFilipov]



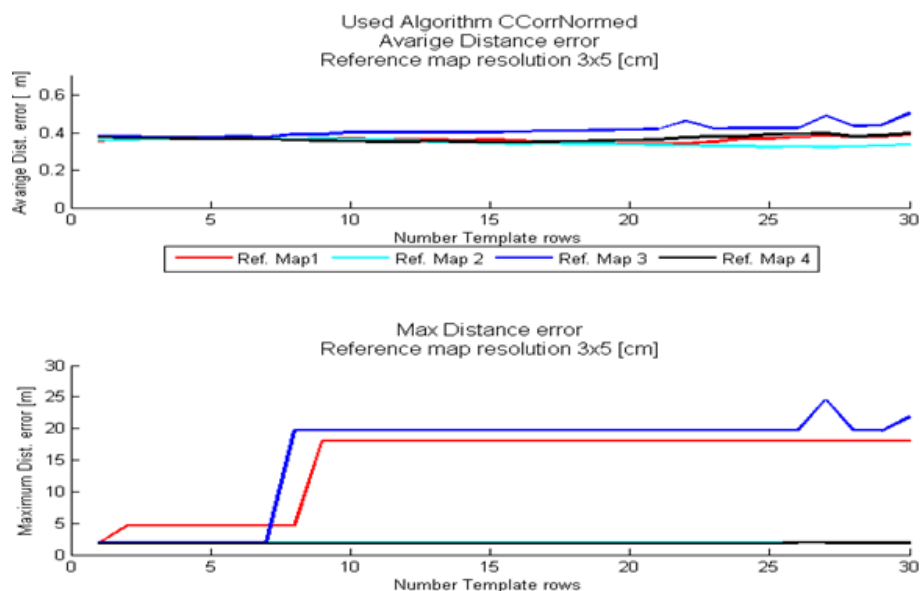
Фиг. 6.39 Методи спрямо Лайсна. Резолюция 5x5cm [FFilipov]

Разгледани са резолюции на референтните карти от 3 до 20x5cm.

Фиг. 6.60 и 6.61 (от фиг. 6.58 до 6.90 в дисертацията) показват локализационни резултати от изследвания относно ролята на резолюцията на референтната карта във височина т.е. по оста Z. Също така беше изследвано дали един метод (затова фигурите са спрямо един метод) би дал особено добри резултати в височина. Като резултат е видно, че резолюцията на референтната карта отново играе основна роля, но не може да се каже, че някой метод се отличава особено от останалите. Различава се обаче точността между методите спрямо височината.



Фиг. 6.60 сравнение във височина(лайсни) спрямо метод и резолюция на референтната карта [FFilipov]



Фиг. 6.61 сравнение във височина(лайсни) спрямо метод и резолюция на референтната карта [FFilipov]

- Сравнение на резултатите

В сравнение с други локализационни алгоритми, създадените в тази дисертация, притежават по-добра локализационна точност и могат да се използват дори при случайни траектории на движение. Резултатите са показани в Табл.6.2, където със син цвят са отбелязани тези получени след разширение на използваните от мен методи.

Таблица 6.2 Сравнение на резултатите – обобщение. Със синьо са указани разширените версии на методите от мен.

Използван шаблонен метод	Постигната точност при задени траектории на движение		Постигната точност при случайни траектории на движение	
	2D [m]	3D [m]	2D [m]	3D [m]
SAD	0.4	0.6	-	-
CV1_TM_CCORR_NORMED	0.4	0.3	-	-
CV2_TM_SQDIFF	0.2	-	5	0.37
CV2_TM_SQDIFF_NORMED	0.4	-	5	0.37
CV2_TM_CCORR	0.2	-	3	0.08
CV2_TM_CCORR_NORMED	0.4	-	-	1.10
CV2_TM_CCOEFF	0.4	-	-	0.09
CV2_TM_CCOEFF_NORMED	0.4	-	-	0.11

Приноси

Научни

1. Научно обоснован и изследван е автоматизиран метод за калибриране на магнитни сензори в индивидуален и колективен режим на действие.
2. Дефинирана е зависимостта на магнитните измервания от магнитните аномалии в изследваното помещение.
3. Изследвано е влиянието върху ползването на избрано магнитно измерване върху концепция за създаване на 2D- и 3D- магнитни карти за движение по произволни траектории. Формулирани са работни принципи и избор на критерии за оценка и анализиране на визуализацията чрез сравнение на карти.
4. Доказана е зависимостта на качеството на локализацията от визуализацията на референтните карти. Изследвани са и сравнени избрани математически описания в анализа на приложимостта на създадените референтни карти, включително по посока Z. Те са разширени с допълнителни критерии за бързина и увеличаване на точността на обработка. Чрез анализ на Heading-a и векторната норма е обосновано осеверяването на работната карта.

Научно приложни

1. Направена е визуализация на магнитните данните при калибриране и е конструиран измервателен стенд от тип Helmholtzspule.
2. Направено е допълнително изследване на земното магнитното поле в затворено помещение при променяща се стойност по координатата Z
3. Извършено е изследване на стабилността във времето на земното магнитно поле.
4. Реализирана е подвижна платформа и е направено изследване по алгоритъм, отчитащ особеностите на движение на колелата, като допълнение към Heading процеса.
5. Формирани са критерии при изработването на елементите на разширената реалност при визуализация на магнитното поле по време на движение на платформите
6. Създаден е и изграден алгоритъм, отчитащ особеностите при локализиране по магнитни карти при произволни траектории и изпълнението му чрез ROS на опитната платформа.
7. Изработен е модел за сравняване на референтни карти помежду им и визуализация на разликите.

Приложни

1. Разработени са измервателни модули Leisten
2. Конструиран е и използван измервателен стенд за изследване на стабилността на земното магнитно поле във времето.
3. Извършено е осензоряване на мобилни платформи София и Магдебург, съобразно целите и задачите, които се поставят при тяхното движение

4. Изградена е вградена система от типа на FPGA и е приложена за управление на движението на колелата на Платформа- София
5. Реализирана е възможност за окачествяване на работни референтни карти в условията на променлива разрешаваща способност.

Публикации по дисертационния труд

1. Filipov, Filip F. „FPGA Based Quadrature Decoders for Close-Loop Position Tracking in Mobile Robotic Applications.“ *25 Jahre FDIBA*, TU-Sofia, 2015.
2. Filipov, Filip F., и Sebastian Zug. „Erfassung, Aufbereitung und Anwendung dreidimensionaler, magnetischer Karten für die Innenraum-Lokalisierung von mobilem Systemen.“ *17. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF*, 2015.
3. Filipov, Filip F., и Sebastian Zug. „Evaluation of a Multi-Layer Localization Approach Based on Magnetic Maps.“ *25 Jahre FDIBA*, TU-Sofia, 2015.
4. Hinkov, Andrey, Mladen Milushev, и Filip Filipov. „Analyzing opportunities for optimizing the energy efficiency of mobile robots.“ *28-th International Conference on Information Technologies*, 2014.
5. Milushev, Mladen, и Filip F. Filipov. „Технологии и практика за навигация на мобилни платформи в затворени помещения. В книга Комплексна Автоматизация на Дискретното Производство.“ Глава 4, 74-93. TU-Sofia, 2015.
6. Zug, Sebastian, и Filip F. Filipov. „Survey on Indoor Localization based on Magnetic Maps.“ *IEEE Robotics & Automation Magazine*, to be published.

Научно изследователски проекти свързани с дисертационния труд

Резултати от дисертационния труд са използвани в следните проекти:

1. 2014- 2015, Научноизследователски проект в помощ на докторант 142ПД0061-06 на тема „Изследване и имплементиране на технологии за навигация в затворени пространства“ с ръководител проф. д-р Младен Милушев.
2. 2014, Научноизследователски проект Design of complex Systems (DOCS), DAAD Програма „Academic Rebuilding of South-eastern Europe“ с ръководител проф. д-р. Volker Zerbe.

Summary.

The magnetic field inside buildings is effected by local anomalies due to ferromagnetic objects embedded in the building structure or caused by objects placed in the environment. Their existence deflect the field and by that generate a magnetic fingerprint of the building and of the current location. A number of publications exist that describe the application of these individual patterns for indoor localization or navigation tasks. The approach implements a number of benefits: there is no need for additional infrastructure, magnetic sensors have a small size and energy consumption, most of today's phones and tablets contain magnetic sensors and there are no range restrictions. This PhD thesis "Research and implementation of technologies for indoor navigation" from Filip Flipov Filipov differs from the literature because it focuses on template matching as the localization algorithm base, 3D reference maps and random trajectories, magnetometer calibration as a group and the reached localization precision.