

Българска академия на науките
Институт по информационни и комуникационни технологии
Секция: „Вградени интелигентни технологии“

ДИСЕРТАЦИЯ

за получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

автор: **маг. инж. Милена Филипова Груева**

**Тема: „Групово управление на роботизирани
средства за транспорт на товари“**

научна област:	5. Технически науки
професионално направление:	5.2. Електротехника, електроника и автоматика
научна специалност:	„Автоматизирани системи за обработка на информация и управление“

научен ръководител: **проф. д-р Димитър Неделчев Карастоянов**

Българска Академия на Науките – София, 2020

Благодарности

Благодаря на своя научен ръководител проф. д-р Димитър Карастоянов, за ползотворната съвместна работа, за всички съвети и градивните критики, които отпрати.

Благодаря на колегите от секция „Вградени интелигентни технологии“ за методологичната помощ, съветите и препоръките, без които настоящата дисертация не би се случила.

С ъ д ъ р ж а н и е :

№	Наименование на главата	Страница
	Увод	5
	Глава 1: Обзор, анализ и систематизация на видове мобилни работи	9
1.1.	Основни понятия и определения	9
1.2.	Мобилни работи	12
1.3.	Мобилни микророботи за изследователски цели	27
	Цел и задачи на дисертационния труд	37
	Глава 2: Обзор, анализ и систематизация на видове групово управление	38
	Въведение	38
2.1.	Формации и структури при управление на група работи	38
2.2.	Управление на нехолономни мобилни работи във формация следване на лидера	43
2.3.	Управление на нехолономни мобилни работи в разпределена формация	57
	Глава 3: Иновативен подход за групово управление на мобилни работи	72
	Въведение	72
3.1.	Подход/Алгоритъм за формация „следване на лидера“	74
3.2.	Комуникационна система за управление на група мобилни работи	81
3.3.	Система за управление на централизирана контролна структура	82
3.4.	Система за управление на разпределена контролна структура	84
3.5.	Комуникация и обмен на данни	85
3.6.	Симулационна среда Webots	87
3.7.	Моделиране на робот в Webotc	96

№	Наименование на главата	Страница
	Глава 4: Експериментални резултати	104
4.1.	Роботизиран носач на товари	104
4.2.	Безжично управление на група мобилни устройства	115
4.2.1.	Безжични комуникационни протоколи	115
4.2.2.	Сравнителни характеристики на безжичните протоколи	125
4.2.3.	Защита на данните – стандарти	127
4.3.	Симулативни експерименти и резултати	131
	Литература	142
	Заключение	150
	Приноси	152
	Списък с публикации по темата	153
	Декларация за оригиналност	154

У в о д

Думата “мехатроника” е създадена през 1969 г. от инженер във фирмата “Яскава” – Япония. През 1971 е направена търговска регистрация, от която фирмата се отказва през 1982 след широкото разпространение на термина. Първоначално, а и досега при по-повърхностно и консервативно тълкуване, терминът се е възприемал като устройство с механична и електронна част. Сред многото тълкувания е придобило гражданственост определението [1], че мехатрониката е интеграция на машинно инженерство с електроника и интелигентно компютърно управление при проектиране и производство на изделия и технологии.

Като първи етап в развитието можем да посочим седемдесетте години на 20 век – тогава мехатрониката основно се развива на базата на ползуването на сервотехнологиите, главно в роботиката (сервоуправляеми движения и позициониране) и фототехниката (фотоапарати с автоматично фокусиране). Следващият етап е през осемдесетте години и е свързан с развитието на информационните технологии и масовото ползуване на микропроцесори в управлението на механичните системи. Като трети етап можем да определим деветдесетте години и развитието на комуникационните технологии, довели до появата на устройства, свързани в мрежи. По същото време се появяват и миниатюрни сензори, задвижвания и други компоненти, с което започва да се говори и за микромехатроника.

Терминът “мехатроника” е с японски произход [2], като в Япония обикновено под него се разбират два аспекта [3]:

- механично проектиране, задвижване, приложение на сензори в сложни интелигентни системи, отчитайки равнището на технологията и пазарните условия;
- постоянно обучение по мехатроника на инженерни кадри.

През 80-те години микропроцесорните продукти завладяват пазара. Това е видно в най – голяма степен при персоналните компютри, които са с все по-увеличаващо се бързодействие и все по-ниска цена. За това не бива да ни изненадва

факта, че микрокомпютрите навлязоха във всяка област на машинното инженерство. Възможностите им за обработка на данни и лесното използване на микрокомпютрите и други микропроцесорни устройства ги правят незаменими при изграждането на системи за следене и контрол [4]. Това значи, че трябва да отпаднат ограниченията на машинните инженери върху чисто механичните аспекти на проектирането, тъй като по – важно е какво правят подсистемите, които те проектират, отколкото от какви детайли са изградени [5]. Тези подсистеми обединяват контролни функции, силови системи, комуникационен интерфейс и подходящ софтуер. Това е така наречената системна гледна точка при проектирането, която толкова печелившо се използва в Япония от 70-те години насам, а интеграцията на традиционно различните инженерни технологии става известна като мехатроника.

Терминът “робот” има славянски произход. Образуван е от чешката дума “robota”, която означава тежък и непосилен труд. С него чешкият писател К. Чапек през 1920 г. назовава в пиесата “R.U.R” (Росумски универсални роботи” [6] механичните работници, помагачи на човека. Роботите са обрисувани като инженерен продукт, сравним с човека в механично и интелектуално отношение.

Главните структурни компоненти на един робот са [7]:

- механична конструкция. При промишлените работи основно това е вид ръка, изпълнена като отворена кинематична верига или като затворена структура. При мобилните работи по-често става въпрос за тяло със средства за придвижване – колела, вериги, крака, криле и др.

- двигателна и изпълнителна система. Задвижванията преместват по определен закон отделните звена на ръката и/или целия робот, като доставят работния орган в зададена точка. Изпълнителните механизми биват хващачи, инструменти, технологично оборудване, сензори и др.

- информационно-управляваща система. В управлението на работа постъпват данни от човека-оператор, за състоянието на работа, от околната среда. На база на

заданието от човека се изработват управляващи въздействия за двигателните и изпълнителни механизми.

Като технически системи роботите се характеризират с:

- универсални (многофункционални) двигателни възможности,
- гъвкаво управление на двигателни и изпълнителни органи,
- ползване на информация от работната среда в управлението.

Според това, дали оперират с обекти или се придвижват спрямо основата, роботите биват манипулационни (вкл. технологични) и локомоционни (мобилни). Управляващите им системи могат да работят самостоятелно (автоматични) или чрез периодични команди от наблюдаващ оператор (дистанционно управляеми). При отчитане на изменения в работната среда и в манипулираните обекти имаме адаптивни роботи. В зависимост от областите на приложение можем да говорим за промишлени и изследователски работи. Специален клас са учебните роботи. Напоследък все повече се развива един смесен клас – обслужващи и битови работи.

Един съвременен робот представлява сложна система, състояща се от механична конструкция, елементи за предаване на движенията, захранвания и задвижвания, работни органи, компютърна електроника, програмно управление, средства за наблюдение и комуникация. В този смисъл **роботите са типични мехатронни системи** с пълен набор от съставлящите ги елементи.

Роботизирането на производствените процеси има много преимущества. То позволява да се намалят оперативните разходи и производствените рискове, да се повишат ефективността и производителността, нивата на контрол, управление и информационна безопасност. Роботизацията е най-целесъобразна, ако процесите, които искаме да роботизираме се отличават със следните особености:

- Основани на правила и изискват структурирано въвеждане на цифрови данни.
- Отличават се с повторемост.
- Изискват изпълнение на правила за качество.
- Работят стабилно.
- Имат висока честота на поява на грешки.
- Изпълняват се от голям брой хора
- Тежки, монотонни или опасни.

Един такъв процес в производството, който отговаря на много от тези критерии, е транспортът на товари. Тази дейност е характерна в складове - промишлени или търговски, на пристанища, летища, както и в минната, обогатителната, металургичната и строителната промишлености.

В тази дисертация са разгледани някои проблеми на груповото управление на роботизирани средства за транспортиране на товари. Тя е структурирана както следва:

Глава 1. Обзор, анализ и систематизация на мобилните роботи по размер, конструкция, предназначение и управление. Показани са примери за някои от тях и техните характеристики.

Глава 2. Обзор, анализ и систематизация на видове групово управление на мобилни роботи. Дадени са примери.

Глава 3. Анализира механиката, електрониката, софтуера и груповите функции при груповото управление на роботизирани транспортни средства.

Глава 4. Представя параметрично описание и експериментални резултати на система за разпределение на задачи, както и експерименти с множества от реални задачи, потребители и изпълнители.

Направени са заключения от експериментите и е приложена използваната литература.

Описани са научно-приложните приноси на докторантката.

Представен е списък с публикациите по темата.

Глава 1: Обзор, анализ и систематизация на видове мобилни роботи

1.1. Основни понятия и определения

Както беше отбелязано по-горе, роботите са типични мехатронни системи.

На фиг. 1.1 са представени различните компоненти на мехатрониката и връзките между тях [8].

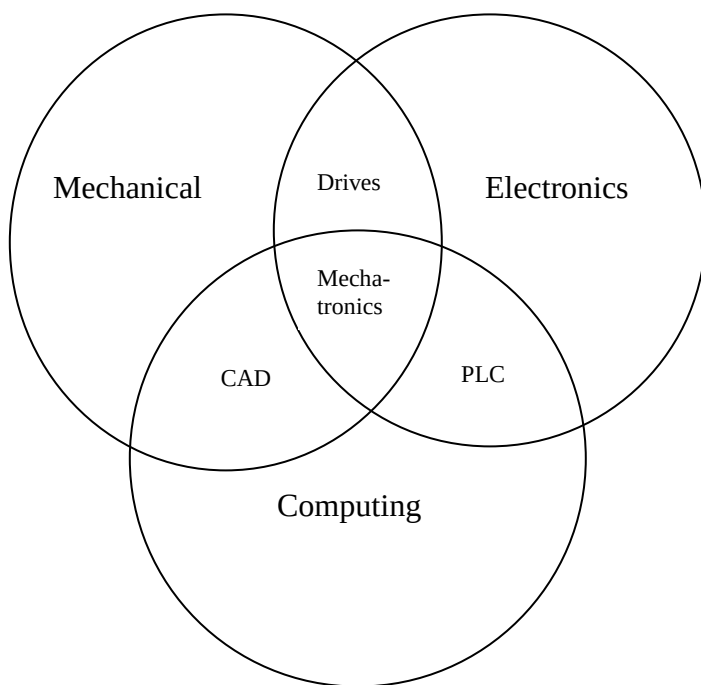


Фиг. 1.1. Елементи на мехатрониката

Някои автори свързват понятието “мехатроника” с 11 Международен симпозиум по индустриална роботика (ISIR) в Токио, Япония, в 1981 г. [9], а още през 1975 г. акад. Артоболевски съобщава за очакван мост (симбиоза) между Механиката на машините и механизмите с Теорията на автоматичното регулиране и управлението. Съгласно това виждане мехатрониката е синергетична (действаща съвместно) интеграция на машинното инженерство с електрониката и интелигентното компютърно управление. Това е специфична стратегия за намиране на оптимален път при интегрирането на МЕХА-никата (механизмите със

задвижванията им) и на елек-ТРОНИКАТА (хардуер като например контролери, сензори, пултове и други, заедно със софтуера, съдържащ принципите и законите за управление на механизмите, двигателите, сензорите, спирачките и други апаратни компоненти, както и по-високите нива на управление, включващи елементи на изкуствения интелект).

На фиг. 1.2. е представена опростена схемна композиция на научната област “мехатроника” [10]:



Фиг. 1.2. Схемна композиция на научната област “мехатроника”

Основните области на приложение на роботите са според извършваните от тях видове дейности, а именно:

- спомагателни – обслужване на други машини и оборудване, товаро-разтоварни работи;
- основни – заваряване, монтаж, нанасяне на покрития, рязане, шлифоване, лазерна обработка;

- транспортни – пренос между машини, в технологична линия, в рамките на цеха, извънцехов транспорт, поддръжане;
- изследователски, разузнавателни, аварийно-спасителни;
- медицински, битови, обслужващо-развлекателни.

Първи преки предшественици на съвременните роботи са разработените през 40-те и 50-те години манипулатори с ръчно дистанционно задвижване (телеоператори). Те се прилагат при работа с радиоактивни и химически отровни материали. Някои от тях се оборудват с двигатели и просто командно (бутонно) или копиращо управление. Съчетаването на традиционните гърбични автомати с електронни контролери и компютри пък води до внедряване на прости, автоматични манипулатори при автоматизация на производствени процеси в машиностроенето и технологиите.

Първите представители на роботите са автомати без възможности за препрограмиране, често вградени в основното оборудване (автооператори) [11]. През 59-60 г. американските фирми Planet и AMF внедряват програмируеми манипулатори с автоматично управление, които на пазара биват наречени промишлени роботи [12]. Движенията на тези устройства са прости и некоординирани, ограничават се между малък брой точки на позициониране, които се препрограмират чрез ръчна настройка.

Развитието на цифрово-програмното управление и на системите с обратна връзка довеждат до серийно производство на промишлени устройства с типични белези на роботи (60-61 г., Unimate). Следва снабдяване на работа с визуални, тактилни и други сензори за възприемане на работната сцена. С бурното развитие на компютърната техника в управленията на роботите се въвеждат и езици за програмиране от високо ниво, аналитично описание на целта, елементи на изкуствен интелект.

В България пръв серийно произвеждан робот е РБ 210 за нанасяне на бояджийски покрития (77-78 г.). Следват роботи за обслужване на металорежещи машини РБ 241, робот за дъгово заваряване РБ 251 и др. В областта на учебната роботика са известни роботите от серията Робко.

Едно световно разпространено определение за робот е, [13]:

“Роботът е препрограмируем, мултифункционален манипулатор, предназначен да пренася материали, детайли, инструменти или специални устройства чрез различни програмирани движения за извършване на разнообразни дейности”.

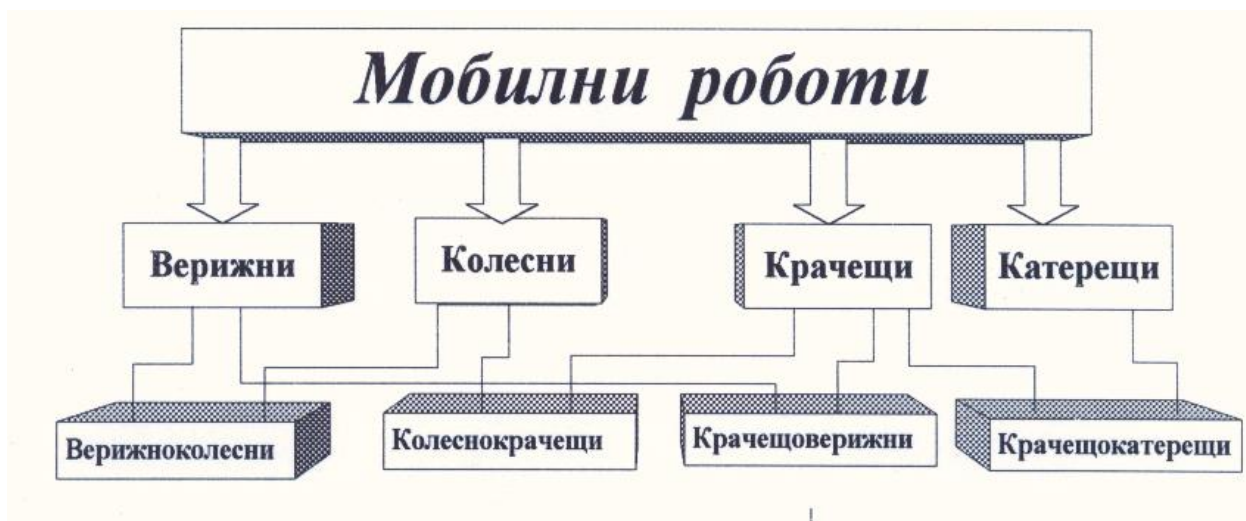
По експертни оценки, в 2014 г. в света са се използвали над 200000 промишлени робота. Това е с 15 % повишение спрямо 2013 г. В някои страни използването на промишлени роботи нараства и с по-големи темпове, например в Мексико и Канада, като трябва да се отбележи, че в Канада този процес се наблюдава последователно от 2010 година.

Световни лидери в производството на промишлени роботи са Япония (Yaskawa, Fanuc, Kawasaki), Германия (Kuka) и Швейцария (ABB). Обемите на производство на роботи в САЩ са значително по-малки - в заводите на Ford работят роботите на японската Fanuc. Китай стремително догонва световните лидери, а също така е купил водещата немска фирма Kuka. По данни на International Federation of Robotics (IFR) още от 2013 г. китайският пазар на промишлени роботи е най-големия в света. Прогнозите на експертите са, че от 2018 до 2020 година продажбите на промишлени роботи в Китай ще нарастват всяка година с 20 -25% годишно.

1.2. Мобилни роботи

Мобилната роботика е интересна област за изследвания на видове движения и възможностите им за използване при машини, които трябва да се придвижват автономно, при това често пъти без пътища, специално подготвен терен, при наличие на препятствия, тесни места и др. Един от възможните подходи за класификация на видовете мобилни роботи е според начина на придвижване. В този смисъл те са колесни, верижни и крачеши. Движението може да бъде непрекъснато или прекъснато. При роботите с прекъснато движение имаме и катерещ се тип. В практиката освен това се срещат специфични мобилни роботи, напр. летящи, както и

такива от смесен тип. Една примерна класификация на наземните мобилни роботи е дадена на фиг. 1.3.



Фиг. 1.3. Класификация според начина на придвижване

Мобилната роботика получава бурно развитие в края на миналия век.

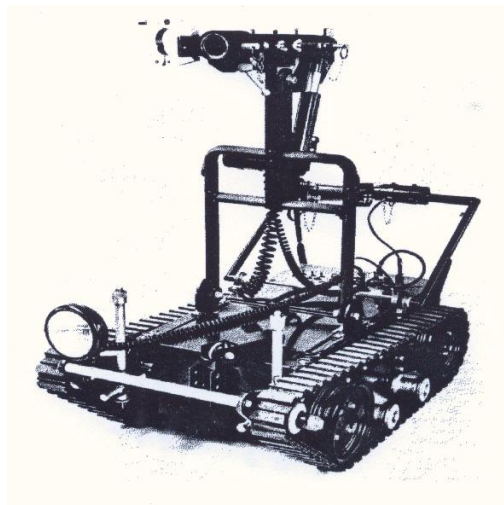
Някои първи примери за основните видове мобилни роботи са:

Роботът Нобо [14], [15], [16] от колесен тип е използван в много държави за борба с тероризма. Машината е оборудвана с мощен манипулатор и средства за наблюдение и контрол на терена. Захранването е електро, роботът се ползва и за военни цели – фиг. 1.4.



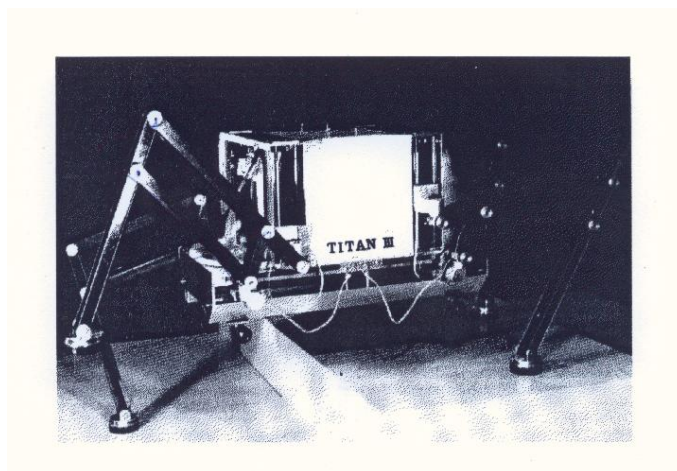
Фиг. 1.4. Робот Нобо, разработен от Kentree

Телеманипулаторът Wilbarrou на фирма Mofbah е предназначен за обезвреждане на бомби в градски условия – фиг. 1.5. Задвижването е верижно и може да преодолява стъпала и да се завърта в тесни коридори. Управлението е кабелно, от коменден тип.

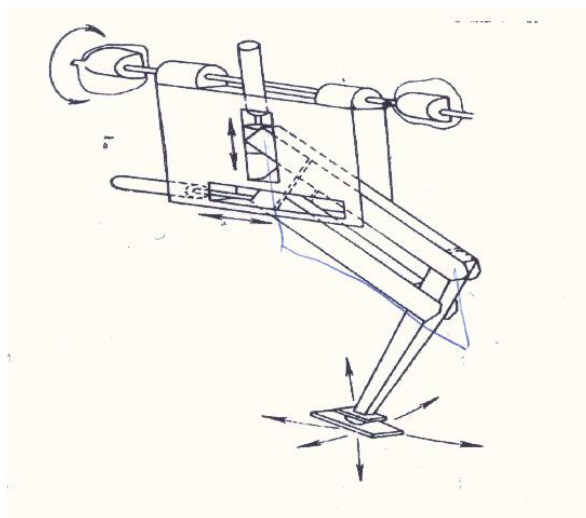


Фиг. 1.5. Телеманипулатор Wilbarrou

В Токийският университет (Хиросе, Уметани) е разработен четирикрак паякоподобен робот “TITAN III”, [17], [18], [19] – фиг. 1.6. Всеки крак представлява пантографичен механизъм, задвижван от 3 двигателя, разположени в тялото на паяка – фиг. 1.7. Захранването и управлението е кабелно. По стъпалата на краката има разположени контактни датчици. Роботът може да изкачва стълби, да прескача неравности и да преодолява препятствия. При наличие на вдлъбнатина, кракът се отпуска, докато докосне земята.

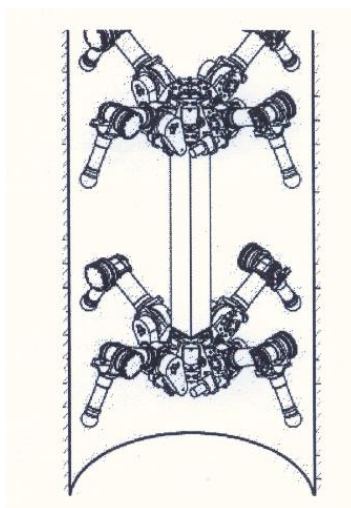


Фиг. 1.6. Четирикрак робот ТИТАН III



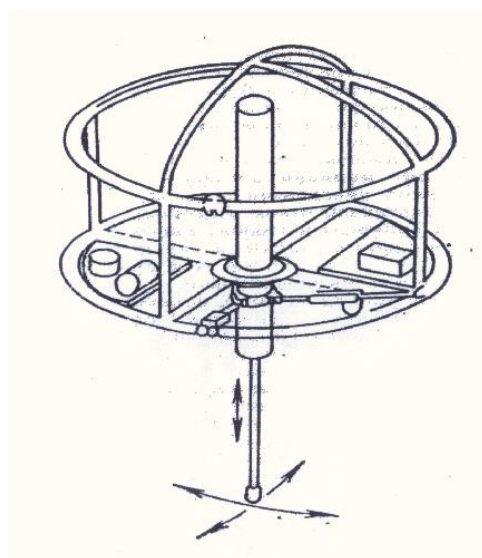
Фиг. 1.7. Пантографен тип крак

Един пример за мобилен робот, работещ в специфична среда, е катерещата се машина, разработена от Neubauer [20], [21]. Това е катереща се машина, предназначена за работа в тръбопроводи – фиг. 1.8.



Фиг. 1.8. Катереща се машина за работа в тръбопроводи

В Университета Карнеги-Мелон, с финансиране от DARPA, се изследва проблемът с динамичната устойчивост под ръководството на проф. Райберт [15], [22], [21]. За целта е създадена еднокрака подскачаща машина – фиг. 1.9.



Фиг. 1.9. Динамично устойчив скачащ еднокрак робот

Главните и части са отскачащ крак и тяло, свързани с връзка от карданен тип. Наклонът на крака се управлява от малки хидроприводи според датчици за равновесие по тялото. Отскачането е чрез пневмозадвижване [23]. Чрез управление

наклона на крака може да се пази равновесие на място или да се извършва придвижване, чиято скорост зависи от силата на отскока.

Освен като дистанционно управляеми средства за борба с тероризма, ранните мобилни роботи са създавани най-често за научно-изследователска дейност.

Според предназначението си, мобилните роботи се групират като промишлени, изследователски, сервизни (обслужващи, битови), развлекателни и транспортни.

Промишлените мобилни роботи са основна предпоставка за създаване на принципно нови технологии без пряко участие на човека и имат огромно социално значение - намаляват или премахват тежкия физически и монотонен труд. С тяхна помощ, при сравнително малки разходи се увеличава производителността на труда от два до три пъти.

Изследователските мобилни роботи се използват за проучване на недостъпни за човека места, за работа в неприятна, замърсена или опасна среда, отбрана и гражданска защита за научно-изследователска дейност, патрулиране, космически и планетарни изследвания, инспекция на машини и съоръжения, в медицината за дистанционно контролирани медицински процедури, изискващи голяма прецизност на изпълнение.

Сервизните мобилни роботи заместват рутинни човешки дейности, като почистване, градинарство, компания, обслужване и медицински грижи за болни, възрастни и самотни хора. Тук спадат и т.н. персонални роботи.

Транспортните мобилни роботи са превозни средства с автоматично насочване за товарене, превоз и разтоварване на товари без участието на човека. Използват се в минната промишленост, в космоса, в промишлени и търговски складове, болници, пристанища, летища, за разчистване на отломки в райони, пострадали от земетресения, срутвания и природни бедствия.

Развлекателните мобилни роботи се създават за игри и забавления. Освен елементарни играчки за деца, са разработени и цели отбори от роботи в някои спортове, с които се организират състезания.

Специален клас представляват учебните роботи. Приложението им е при подготовка на технически и инженерни кадри, за даване на познания по програмиране, конструиране и технически науки. При по-малките ученици, учебните роботи могат да играят ключова роля за повишаване на ефективността на неформалното обучение, което повечето деца по естествен път развиват при взаимодействието си с тях. Тези роботи са мощен алтернативен метод в помощ на обучителния процес за учащи със затруднения в ученето и лица с увреждания.

Според функционалните си възможности съвременните мобилни роботи (МР) могат да се определят още като, [24]:

- Транспортни
- Информационни
- Манипулационни
- Хибридни

Към групата на транспортните МР спадат автоматичните мобилни платформи (МП), използвани за транспортиране на обекти от най-различно естество. Те намират приложение в болнични заведения за транспортиране на храна, медицински и хирургически консумативи, чисто или замърсено бельо, медицински отпадъци, в складове и цехове за пренасяне и повдигане на материали, за теглене на композиции и тежкотоварни превози, (фиг. 1.10).

Информационни са тези роботи, които се използват за наблюдение и измерване параметрите на средата, патрулиране и охрана, автоматизирано обслужване на клиенти и мобилни автоматизирани гидове.

За да се определи един робот като манипулационен, той трябва да има способността активно да въздейства върху средата и/или обектите в нея [25]. Най-често това са функции, като взимане на проби и извършване на технологични

операции, асистиране на човек при пренасяне на тежки материали, прецизиране на движенията и т.н. Към тази група се причисляват не само мобилните роботи, които са с изграден многофункционален манипулатор или имат възможност за допълнително вграждане на такъв, но и роботизираните протези, чието развитие през последните години значително се усъвършенства (фиг. 1.11).

Последната група МР по показателя функционалност са хибридните. Както става ясно от наименованието им, то това са роботи, които по функционалност комбинират две или повече от изброените функции.

Другият показател по който могат да се класифицират МР е техният мащаб. Размерите на МР, както и на ходовете на възможните локомоционни движения естествено дефинират системите като: макро, мезо и мини.



Фигура 1.1. Тежкотоварен робот



Фигура 1.2. Роботизирана протеза

Развитието на МЕМС технологиите създаде предпоставки за изграждане на микророботи, а в перспектива и на наносистеми. Многообразието на мезосистемите (с антропоморфни габарити, ходове и обекти) изисква допълнително структуриране на малки, средни и големи МР.

Спецификата на работната среда е формирала следните основни структурни групи МР:

- летящи системи с 6 степени на свобода в атмосферата (многовитлови платформи (фиг. 1.12), аеростати, махачи (фиг. 1.13) и др.) и в космоса

(вкл. Многогоръки с възможности за придвижване чрез прехващане – пълзене) (фиг. 1.14);

- подводни – с 6 степени на свобода и специфични възможности за движение по дъно, по обекти и по водната повърхност (фиг. 1.15);
- наземни МР за придвижване по повърхност (до 3 степени на свобода) в условия на гравитация и триене.

Те използват естествени терени, пътища, улици, площадки, вкл. Тунели под земята, както и трасета в сгради и инженерни системи;

- специални – за движение в тръби, по електропроводи, придвижване чрез издърпване, прилепване към стени и тавани, ровене в рохкави структури, движение в организми (вкл. Човешки).



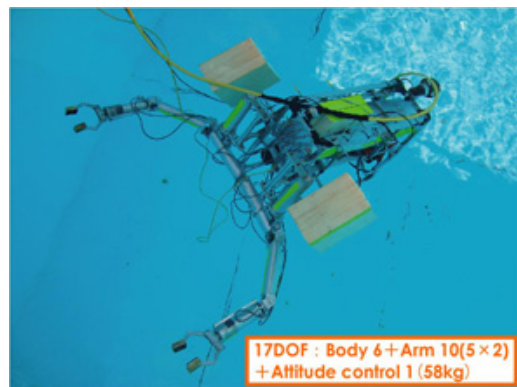
Фигура 1.3. Многовитлова платформа



Фигура 1.4. Аеростат



Фигура 1.5. Многогорък робот



Фигура 1.6. Подводен робот

Съвременните наземни мобилни роботи се делят на конвенционални и висококомобилни и са обособен клас универсални системи с приложение в редица дейности:

- междуцехов и вътрецехов и складов транспорт, информационни и транспортни задачи и чистене в производството и обслужването
- анализ и работа в опасни среди, при бедствия и аварии, при военни и охранителни дейности
- лабораторни изследвания и обучение

Докато първата група включва специализирани и относително евтини автоматични устройства, втората се състои от многофункционални, висококомобилни системи с дистанционно управление. В този случай сложността, разнообразието и динамиката на средата и задачите изискват участие на специализиран оператор или екип за наблюдение, анализ, вземане на решения и водене на МР.

Най-често работната сцена на апарата включва:

- сградни помещения и технически съоръжения (индустриални и транспортни)
- урбанизирани райони (сгради, дворове, канали, тунели, пътища, площадки и ж.п. линии)
- естествена среда при различен релеф и повърхност

Широкото разпространение на изкуствени, плоски, гладки и твърди основи (подове, улици и площадки), позволява бързо и ефективно придвижване чрез колесни МР с конвенционални конструкции:

- триколесни – диференциални (фиг. 1.16)
- класически четириколесни (фиг. 1.17)
- двуколесни балансиращи (фиг. 1.18)
- едноколесни балансиращи (фиг. 1.19)



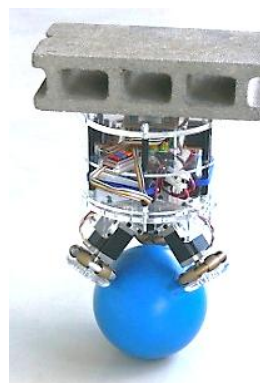
Фигура 1.7 Триколесен робот



Фигура 1.8 Четириколесен робот



Фигура 1.9 Двуколесен робот



Фигура 1.10 Едноколесен робот

Системите са прости, но позволяват само заобикаляне на препятствия в равнина. Разширяването на задачите, профила и вида на основата, както и многообразието от препятствия в пространството налага използването на високомобилни роботи.

Високата мобилност на многоколесните роботи (Фиг. 1.21, 1.22, 1.23) се дължи на индивидуалното управление на всяко колело и геометрично близкото разположение на осите на колелата, като по този начин всяка група колела може да се разглежда, като едно единствено с елипсовидна форма или верига.

Роботите използващи омниколела (Фиг. 1.24) имат подобрена подвижност и маневреност, дължаща се на свойствата на омниколелата. Характерното за тях е, че имат едновременно активна и пасивна посока на въртене. Посоката на движение се

управлява чрез посоката на въртене на отделните колела, като при еднаква скорост се наблюдава праволинейно движение. При променлива скорост на кое да е от колелата движението става вече по крива.



Фигура 1.11 Четириколесен робот



Фигура 1.12 Многоколесен робот



Фигура 1.13 Многоколесен робот



Фигура 1.14 Робот с омни колела

Крачещите мобилни роботи (Фиг. 1.25) се характеризират с голяма мобилност дължаща се най-вече на малкият брой контактни точки между робота и повърхността на движение. Те имат голяма адаптивност, маневреност и способност да преодоляват препятствия, каквито другите видове наземни роботи не могат. Основният недостатък на тези роботи са сложността на хранващите и механични конструкции на краката. Един крак трябва да може да поддържа самостоятелно голяма част от общото тегло на робота, а и в повечето случаи да го повдига или спуска.

Пионер при създаването на змиевидни роботи е професор Shigeo Hirose от Токийският технологичен институт. Високата мобилност на тези роботи се дължи на хипер-редундантни локомотори, които използват от една страна, и от друга на факта, че те имат подобно на змия тяло с функции на „крака“, когато се движат, с функции на „ръце“, когато се изкачват и на „пръсти“, когато носят нещо.

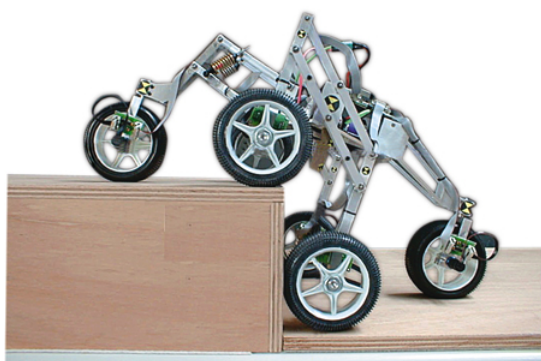
Локомоционната система на високомобилни хибридни роботи е съвкупност от два или повече начина за придвижване. На практика се срещат почти всички възможни конфигурации като: крачещо-колесни, крачещо-верижни, колесно-верижни и др.. Подобни роботи имат относително високо ниво на сложност, тъй като е необходимо да се използват специални окачващи механизми, изместване център на тежестта, асиметричен дизайн (фиг. 1.26, 1.27).



Фигура 1.15 Крачещ мобилен робот



Фигура 1.16 Хибриден робот



Фигура 1.17 Хибриден робот



Фигура 1.18 Хибриден робот

Последната категория високо мобилни роботи са верижните. Задвижването с вериги на практика прави задвижването на работа „некоректна“ диференциална система от най-прост тип. Тази категория се разделя на две суб-категории – верижни мобилни платформи и верижни мобилни роботи (фиг. 1.28). Последните се изграждат на базата на платформите, но с тази разлика, че могат и активно да въздействат върху средата.

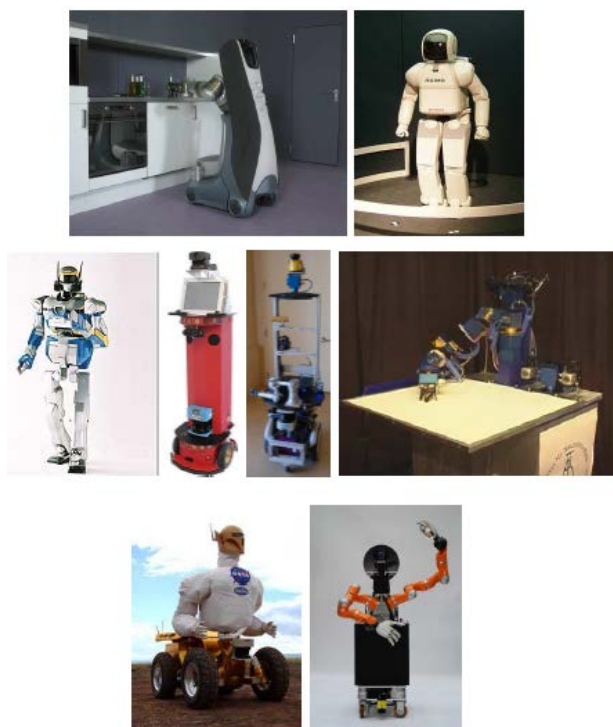
Специална група мобилни роботи са т.н. сервизни роботи, [24]. С нарастване на процента на възрастното население в Европа и по света, все по-гледно приложение намират мобилни роботи, предназначени за подпомагане и обслужване на стари, болни и самотни хора, [26].

Прогнозите са, че продажбите на всички видове роботи за домашни задачи, могат да достигнат почти 31 млн. единици за периода 2016-2019 г., с прогнозна стойност на продажбите от 13.2 милиарда долара, [27].

Доставчиците на сервизни роботи предвидиха силно увеличение на продажбите на роботи придружители/асистенти през 2010г. По обясними причини най-често те са хуманоиди. Сега се предвижда, че между 2016 и 2019г. ще се продадат около 8100 броя. Въпреки това, до сега все още няма значителни продажби на хуманоидни роботи като придружители за да изпълняват типичните ежедневни задачи в производството, офисите или домовете на хората.

През последните десетилетия са разработени много роботизирани платформи, повечето от които включват мобилност, някаква автономна навигация и - напоследък - и манипулационни способности. Някои видове обслужващи роботи с по-сложна функционалност са показани на фиг. 1.29.

Роботите предназначени за обществените сгради трябва да имат добра навигационна система, да общуват с хората и да работят безопасно и надеждно. Пример за успешен проект са роботите инсталирани в „Музея на Комуникациите Берлин“, където те автономно се движат сред посетителите, комуникират и взаимодействат с тях (фиг. 1.30). Роботите са създадени, за да общуват и да забавляват посетителите в музея. Техните задачи включват посрещане на посетители, водене на обиколка с екскурзовод през музея или игра с топка, [28].



Фигура 1.29. Обслужващи роботи със сложна функционалност.



Фигура 1.30. Роботи в Музея на Комуникациите Берлин

Проблемите, които трябва да се решат при управление на сервизни роботи, са:

- подобряване на локализация и навигация при мобилните роботи, [26];
- коригиране на систематичната и несистематичната грешки, [27];
- приложението на специализирани операционни системи за роботи, [28];
- управление чрез използване на компютърно зрение, [29];
- дистанционно управление на мобилен робот, [30].

Мобилните изследователски роботи, освен за разработка на иновативни методи за наблюдение, управление и комуникации, най-често се ползват за изследване в отдалечени, трудно достъпни и вредни/опасни места или среди. Такива са Космосът, подводни изследвания, вредни за човека среди (радиация, разрушения, химически агенти и др.). Често става дума за откриване и изследване на културно-исторически артефакти, Често става дума за откриване и изследване на културно-исторически артефакти, [31].

1.3. Мобилни микророботи за изследователски цели

Микророботите са резултат от нарастващата активност на изследвания на границата между роботиката и микротехнологиите. Днес могат да бъдат реализирани роботи с размери до няколко куб. милиметра. Както конвенционалните роботи, микророботите представляват комплексни системи, които съдържат множество различни сензори и изпълнителни механизми и се характеризират с, [1]:

- програмируемо поведение (като промишлените роботи),
- адаптивност към непредвидимо обкръжение (като съвременните изследователски и сервизни роботи),
- дистанционно управление (като телеуправляемите роботи).

Фактически основната разлика между макро- и микророботите освен размерите са обектите и областите на приложение. Микророботите повишават човешките възможности в микросвета.

Термините микро и нанороботи обикновено се отнасят до манипулационни системи в рамките на 10 куб см с много висока прецизност. Ту ще приемем, че микророботът е автономно или полуавтономно устройство с малки размери в рамките на няколко куб. см, което е способно да извършва манипулации в микронната област с резолюция в нанообластта [32]. По-специално мобилните микророботи са голяма група с разнообразни характеристики според предназначение, конструкция, задвижване, скорости, сензорика и др.

Някои класификации на микророботи биват според:

Класификация според размера

Според размера малките роботи биват три вида:

- миниатюрни роботи: размерите са до няколко куб. см; работното пространство и силите са сравними с манипулации на човешки пръсти; произвеждат се за сглобяване на конвенционални миниатюрни компоненти и микромашини; повечето от наличните днес микророботи са от този клас,
- микророботи: размерите са до няколко стотици куб. μm ; създават се като средство за микромашинни технологии (пространствени или равнинни микромашинни операции или литографски - LIGA технологии); съдържат микроманипулатори, сензори, вериги за “сигнал-процесинг”; примери за ползуване са сглобяване на нанороботи, работа с клетки,
- нанороботи: размерите са до няколко стотици nm, тоест с размерите на човешка клетка; конвенционалните механични принципи за задвижвания и манипулатори не са приложими тук, ползуват се електрохимически принципи (като при мимикриращи биологични микроорганизми); твърдотелните технологии за изграждане не са ползуваеми за нанопроизводство, решение могат да бъдат полимерните химични техники.

Функционална класификация

Според функционални и структурни особености говорим за:

- стационарни или мобилни микророботи,
- със собствен или с външен енергоизточник,
- работещи самостоятелно или в група,
- автономни или с дистанционно управление,
- с жична или безжична връзка с оператора,

Класификация според движенията

Според начина на придвижване микророботите биват:

- колесни,
- верижни,

- крачеши,
- катерещи,
- пълзящи,
- летящи,

Класификация според обсега и задачите

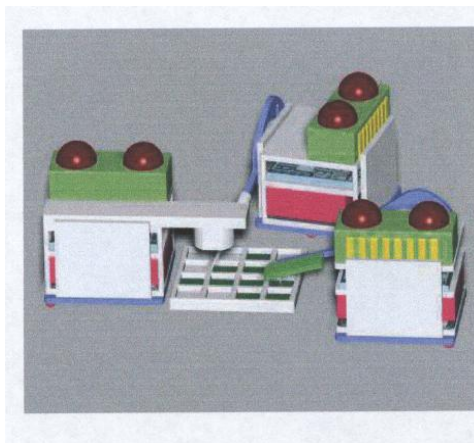
Някои автори ползват съотношението “С” между физическите размери на микроробота и работната му зона:

- $C \gg 1$: стационарни микроманипулационни системи,
- $C \ll 1$: микроскопични мобилни роботи.

Примери за видове микророботи

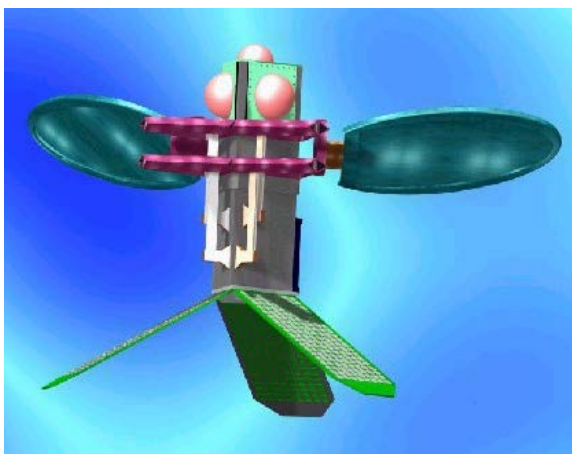
Проектът MiCRoN – Miniaturised Co-operative Robots advancing towards the Nano Range, представлява разработка на набор (5 до 10) микроробота с размери в областта на 1 куб. см с различни функции [32], опериращи в специална среда - енергиен под за захранване по индуктивен път, гладка повърхност за точно позициониране, глобална позиционираща система с главен компютър, IR-комуникация. Работното пространство е 50x50 см, при точност 1 микрон.

На фиг. 1.31. е показана груповата работа на 3 микроробота – съответно със сензор, иглен нож и инжекционна дюза.



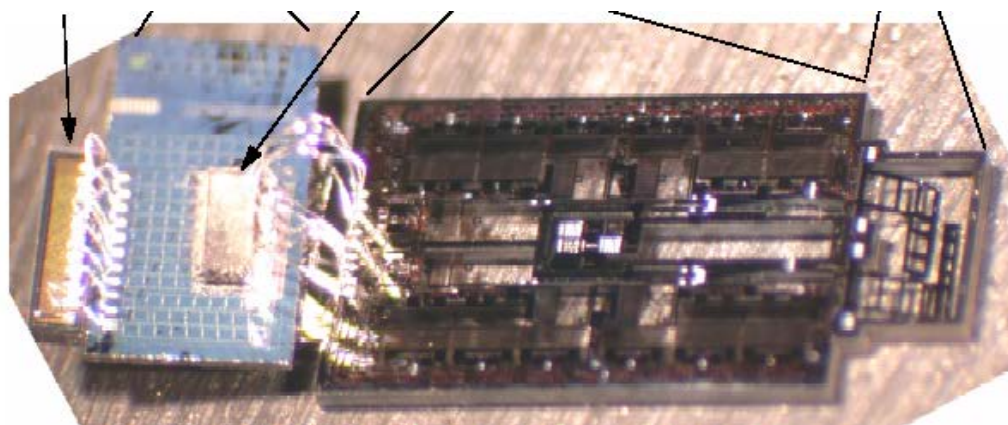
Фиг.1.31. Съвместна работа на 3 микроробота MiCRoN

Микромеханичен проект “Летящо насекомо” – Бъркли, САЩ, [33]. Американското правителство е инвестирало \$ 2.5 милиона в проекта на Университета в Бъркли за разработка на роботизирано насекомо с размери за летеж в помещение. Първата голяма стъпка при създаването на това микромеханично летящо насекомо (Micromechanical flying insect – MFI) е създаването на устройството Robofly (фиг. 1.32.), даващо на изследователите важна информация за механизма на летеж на насекомите.



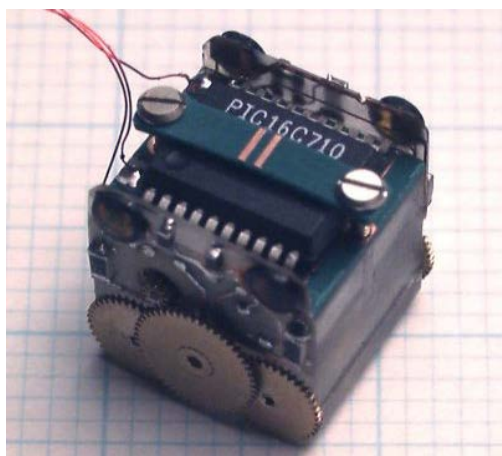
Фиг. 1.32. Летящо насекомо Robofly

Силициевият микроробот (фиг. 1.33.) е слънчево задвижван 10 милиграмов автономен микроробот, изграден на база на технологии за силициеви пластини и модули. Върху проекта работят [Seth Hollar](#) от [Pister's lab](#) и [Micropropulsion Corp](#) и позволява изграждане на голям брой микророботи при относително ниска цена. Силициевият микроробот е изграден от три отделни части, като цялостния процес на изграждане интегрира електроника и MEMS технология. Първата част представлява механиката на микромашината-крака, двигатели и тялото-рамка на робота. Втората част се състои от слънчеви батерии и буфери за напрежение , а третата част включва цифрова логика за управление на крачещото движение [34].



Фиг. 1.33. Силициев микроробот

Микророботът на LAMI (фиг. 1.34.) е пример как технологии като MEMS и VLSI дават нови, много по-малки компоненти за изпълнителните механизми и сензори. Вече се произвеждат електрически мотори и механични части с много малки размери, като непрекъснато се търсят иновационни решения за тяхното ефективно управление. За да бъде разрешен проблемът по отношение на взаимовръзките между компонентите, произтичащ от миниатюрните размери на управляващите сензори, задвижващите и предавателните механизми, се поставя микроконтролер, който да е близо до тях. Получава се така наречената интелигентна микросистема чрез обединение на микромеханика и микроконтролер, при което тя получава и изпълнява команди от високо ниво. LAMI разработват два модулни микроробота наречени Инчи - INCHY, базиращи се на концепцията за интелигентен микромеханизъм и доказват неговите възможности. Те са автономни мобилни колесни микромашини с размер около 1 куб.см., предназначени за изследователски и демо-цели. Такъв робот е победителят от международното състезание "Microrobot Maze Contest" 1997 г., в Нагоя (Япония) в категорията на 1 куб.см [35].



Фиг. 1.34. Микроробот на лаборатория LAMP

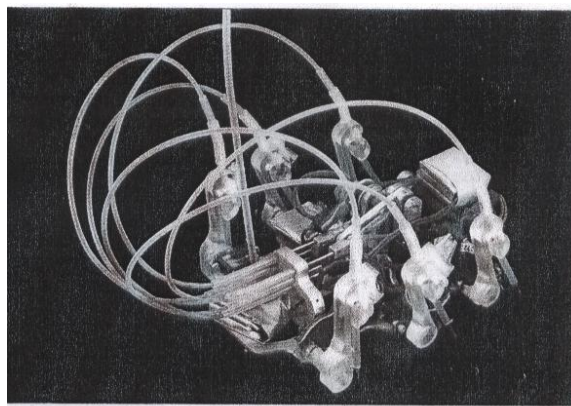
В Лаборатория по изкуствен интелект към Масачузетския технологичен институт (MIT) – САЩ, [36] се разработва проект, ориентиран към изследвания на автономни мобилни микророботи, наречени “мравки”, демонстриращи колективно поведение и интелект, предназначени за работа и приспособяване към непозната и неструктурирана околна среда. Предмет на изследвания са микророботи, предназначени за мултисензорно възприемане и изследване на околната среда, извършване на измервания и операции с малки обекти (вземане на проби, търсене на конкретни предмети и поставяне на маркери), както и взаимодействие с околната среда – транспортиране, вземане и оставяне на оборудване, предмети или други обекти (фиг. 1. 35.).



Фиг. 1. 35. Мобилен микроробот тип “мравка”

Други примери са микророботи са биоимитиращите изследователски микророботи [37]. Някои характеристики на хлебарките интригуват учените, включително скоростта и стабилността с която преодоляват неравностите по терена, например ходенето върху препятствията без да се забавят или отклоняват от курса.

В миналото крачещите роботи са били скъпи и изисквали сериозни изчисления и точни сензори за осъществяване на бързо движение.. За разлика от тях, пълзящите микророботи се осланят на обратното – резонантна механична система. Шесткраките системи за движение са в редуваща се трикрака походка и “пълзящ” дизайн като имитиращ хлебарковата биологична структура. Системата функционира, използвайки задвижване без обратна връзка като при часовник, плюс бордови процесор. Различните сензори, задвижвания и микропроцесор в микроробота са захванати здраво в полимерна черупка. Sprawl-робота – 11 см, се движи с 15 телесни дължини/сек (фиг. 1.36.).



Фиг. 1.36. Микроробот – хлебарка Sprawl

Мини и микророботи за специални цели

Тримерните сензори са многообещаващи за локализирането и навигацията на роботи. Въпреки това ограничения полезен товар на миниатюрните роботи прави почти невъзможно използването на тримерни зрителни сензори. Този проблем може да бъде преодолян, движейки робота наоколо с цел да се създаде панорамно изображение (панорамна картина). В добавка към основния проблем – да се построи картина, трябва също да се отчита шума на изображенията, заснети от миниатюрен

робот. Панорамните картини изискват скъпи лещи и специално създаден хардуер, който не може да бъде приспособен към някои роботи, особено към миниатюрните заради ограничението в размерите им. Една по-ефикасна алтернатива е роботът, изправен пред сложна сцена, да я възстанови, заснемайки множество снимки и опитвайки да ги свърже (да ги насложи). Този процес, наречен “мозайка от образи” (мозаично сканиране, заснемане), се опитва да пресъздаде непрекъсната картина от няколко застъпени снимки (образи) на една и съща сцена. Но резултатът от един такъв интуитивен подход би бил лош, заради изкривяването на перспективата, заради въртенето на камерата около осите ѝ [38].

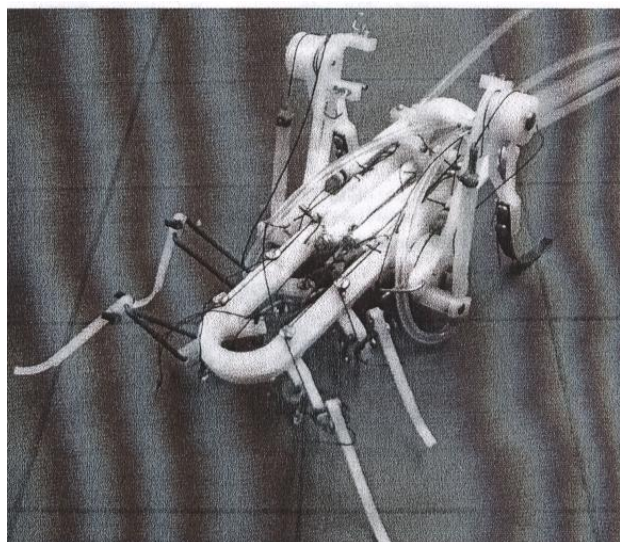
Спасителните мисии на заложенници и при бедствия са два примера, където използването на роботи е свързано със спасяването на човешки живот. За подобни случаи е разработен цилиндричният робот Скаут, дълъг 11 см, с диаметър 4 см и екипиран с видео камера (фиг. 1.37.). Движението се реализира чрез уникалната комбинация от търкаляне и подскачане.

Спасяването на човешки живот от разстояние изисква наличието на пълна картина на окръжаващата среда на робота Скаут с висока разделителна способност. Това се постига, използвайки видео камерата на робота Скаут като зрителен сензор за създаването на “мозайка от образи”. Малките размери на робота и ограничената му предавателна мощност усложнява създаването на мозайки поради шума в изображението. Ползват се две видео предавателни честоти. На 900 MHz сигналът преминава по-лесно през стени и предмети, отколкото на 2.4 GHz. Въпреки това по-високата честота осигурява по-ясен сигнал на линията на прицел.



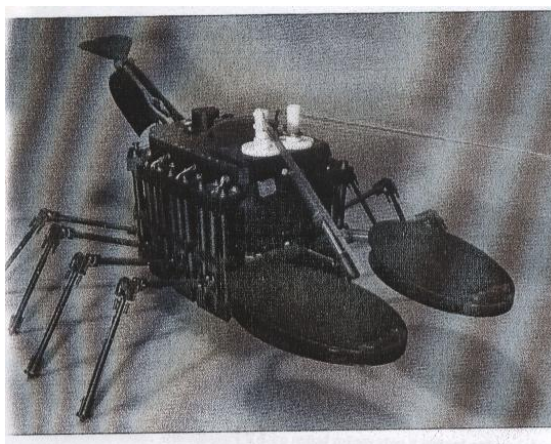
Фиг. 1.37. Роботът Скаут

Друг пример на микророботи за спасителни операции е разработването на роботи, наподобяващи щурци, наречени Whegs (колела плюс крака). На фиг. 1. 38. е показан вдъхновен от щурец робот с размери 2 инча, като дизайнът е двоен, вървящ и скачащ.. Щурецът използва звук за проследяване на потенциалните партньори. Този феномен е изследван за роботи, които биха могли да го използват в търсене при спасителни мисии. Идеята е да се разгръщат малки роботи вместо кучета, снабдени с модул за човешко търсене за откриване викове за помощ или дишане в ограничена околна среда като при земетресения или експлозии. Дизайнът е такъв, че микрофоните са близо един до друг като уши на щурец, така че роботът да използва ефекта на Doppler за да намира звук [39].



Фиг. 1.38. Робот-щурец – Cricket

Известни са две поколения от автономни подводни роботи Robolobster I и II (фиг. 1.39), които са с подобни размери и двигателни способности като биологичния им дубликат (роботи-омари) – до 0.1 м. Тези роботи позволяват изследователски тестове и проверка на хипотези за свръхчовешки способности, каквито са при омарите за засичане на обонятелна информация и вземане на решения, основани на нея [39].



Фиг. 1.39. Робот-омар - Robolobster

Проект MILLIBOT

Проектът Millibot е разработка на Carnegie Mellon University, Pittsburgh [40]. Целта на този проект е да конструира йерархичен отбор от роботи, състоящ се от роботи за проходимост в различни терени (ATV - до 100 мили пробег, напълно автономни), роботи “танкове” с дистанционно управление и микророботи с размери от 5 до 10 сантиметра. ATV транспортират по-малките роботи до отдалечени терени и осигуряват изчислителна поддръжка от високо ниво. Роботите танкове са със средни размери, автономни и с инфрачервени и сонарни сензори, камера и компютър 48600. Те изпълняват самостоятелни задачи или са лидери за Millibot. Millibot роботите (фиг. 1.40.), благодарение на малките си размери и тегло могат да извършват наблюдение в трудно достъпни или вражески области. Тази йерархична структура позволява да се комбинира автономността и изчислителната мощ на големите ATV роботи, маневреността на роботите-танкове и възможностите на големия брой разпределени, “скрито” работещи агенти Millibot.



Фиг. 1.40. Микророботи- разузнавачи.

При разработването на структурата на системата се използва комбинираната концепция на “специализация и сътрудничество“, т.е. вместо да се екипира всеки робот с всички необходими подсистеми – сензори, изчислителни и комуникационни модули, се извършва “специализация” на отделните членове за отделна задача или част от нея. За различните типове задачи са разработени различни типове микророботи, с различни сензорни и изчислителни възможности.

Цел и задачи на дисертационния труд:

Целта на дисертационния труд е да се изследват видовете групово управление на мобилни роботи и да се предложат иновативни подходи за групово управление на нехолономни мобилни роботи с приложение при роботизирани средства за транспорт на товари.

За изпълнение на тази цел следва да се решат следните задачи:

1. Да се направи обзор, анализ и систематизация на видове мобилни роботи и на методи и средства за групово управление.
2. Да се изследват известни подходи за групово управление на нехолономни мобилни роботи тип „следване на лидера“ и в разпределена формация.
3. Да се предложи структура, организация и състав на система за групово управление на нехолономни мобилни роботи.
5. Да се предложат иновативни подходи за изграждане на роботизирани средства за транспорт на товари с групово управление.
6. Да се проведат експерименти за групово управление на роботизирани средства за транспорт на товари в различни режими. Резултатите да бъдат анализирани.

Глава 2: Обзор, анализ и систематизация на видове групово управление

Въведение

Груповото управление на работи е много актуална и намираща все повече приложения област на изследвания. Основните проблеми описани и решавани в повечето статии са свързани с решаване на математическите уравнения за управление [41, 42], както и за създаване на алгоритми за управление [43,44].

Използването на група от мобилни работи намира приложение в различни области като спасителни операции, заснемане на големи площи, транспортиране на обекти, в космическите експедиции и други. Разбира се широкото приложени в напълно различни области определя редици проблеми при управлението на група от работи. Според целта и специфичните характеристики на конкретна задача се определят параметрите и критериите, на които да отговаря групата. Избира се подходяща структура, след това се определя формация и алгоритъм за контрол. Накрая се моделира желаното поведение на роботите.

2.1. Формации и структури при управление на група работи

2.1.1. Контролни структури

Добре известно е, че надеждността на множество мобилни роботизирани системи е строго свързана с контролната структура, използвана за организиране на роботите и за постигане на желаното поведение при формирането. В областта на управлението на образуването на мобилни работи, контролните структури могат да бъдат идентифицирани като централизирана контролна структура и разпределена контролна структура.

В централизираната контролна структура една единствена изчислителна единица обработва цялата информация, необходима за постигане на желаните цели на контрола. Обикновено предимствата на централизираната структура включват по-бърза конвергенция и повишена стабилност. Тези обезщетения идват с по-големи финансови разходи поради необходимите изчислителни и комуникационни ресурси, необходими на единичната изчислителна единица. Въпреки че те гарантират

цялостно решение, централизираните схеми за управление изискват по-висока изчислителна мощност и са по-малко стабилни поради силната зависимост от един контролер. Освен това, архитектури, включващи една изчислителна единица, обикновено не работят добре за големи системи, поради ограничения обхват на комуникация и ограничената мощност на обработване на единичната изчислителна единица. Поради това те в идеалния случай могат да постигнат превъзходни резултати и оптимални решения както за отделните членове, така и за формацията като цяло [45].

За едно и също целево управление на формация, контролът на формацията на множество мобилни роботи може да използва разпределена контролна структура [46]. Разпределената контролна структура е най-използваната структура за управление на мулти-агентни системи и може да се разглежда като противоположна на централизирания подход. В една мобилна роботизирана система с разпределена контролна структура всеки робот действа само въз основа на познания за състоянието на местните съотборници и на околната среда, които могат да задоволят някои практически изисквания, например ограничената комуникация между роботите, липсата на възможност за улавяне на роботи за получаване на глобална информация и необходимостта от увеличаване на формацията от роботи (произволно увеличаване на броя на роботите във формацията). Този подход обикновено има по-малки финансови разходи и работи по-добре за по-големи системи, отколкото за централизирана структура. Този подход обаче може да доведе до намалена стабилност и по-бавна конвергенция.

2.1.2. Контролни формации

Съществуват различни стратегии и подходи, които могат грубо да се категоризират като подход основан на поведението, подход на лидер-последовател, виртуална структура, изкуствен потенциал и теория на графите за управление на формацията на множество мобилни роботи.

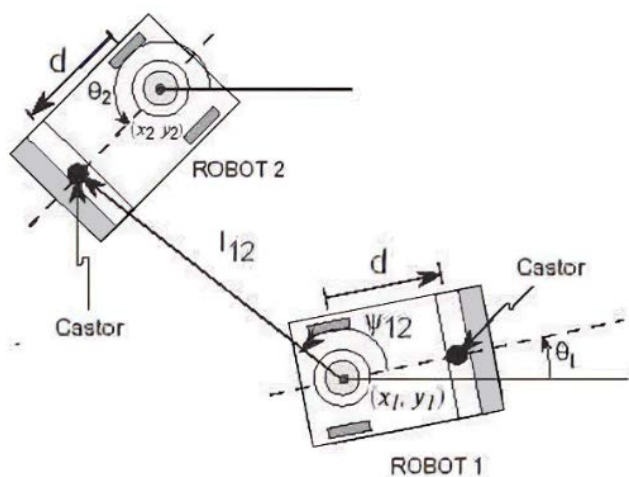
В подхода, базиран на поведението, на всеки робот се присвояват няколко желани поведения (например избягване на препятствия, избягване на сблъсъци, привличане

на прицел, да назовем само няколко) и окончателният контрол се получава от претеглянето на относителното значение на всяко поведение. В контролера, базиран на поведението, всяко индивидуално поведение всъщност е под-контролер за постигането на определена цел (обикновено на елементно ниво), например "форма към определен геометричен модел" може да бъде поведение и "избягване на препятствия" може да бъде друго поведение. Ако един робот работи по тези две поведения, в крайна сметка ще постигне комбинация от цели т.е. "формиране на определен геометричен модел, като същевременно се избягват препятствията". Този метод е подходящ за голяма група мобилни роботи [47]. Предимствата на този вид подход са негови паралелни, разпределени и реално времеви характеристики, както и по-малко информация трябва да се съобщава между роботите. Поради това е много полезно да се управлява многобройна мобилна система от роботи в неизвестна или динамично променяща се среда. Обаче може да е трудно да се опише динамиката на групата и да се гарантира стабилността на цялата система и е трудно да се анализира математически поведението ѝ.

В подхода лидер-последовател [48] един робот действа като лидер, който генерира референтна траектория за групата роботи, а останалите роботи в групата действат като последователи, които трябва да запазят желаното отделяне и относителното отстояние по отношение на лидера. Всъщност, след като е дадено предложението на лидера, желаното отделяне и желаното относително позициониране на последовател с лидера може да бъде постигнато чрез избиране на локален закон за контрол върху всеки последовател, основаващ се на неговата относителна динамика на позицията. Тогава стабилността на формацията също е гарантирана, т.е. цялата група може да постигне и поддържа желаната формация. Въз основа на горното наблюдение проблемът с контрола на формацията може по същество да се разглежда като естествено продължение на традиционния проблем за проследяване на траекторията.

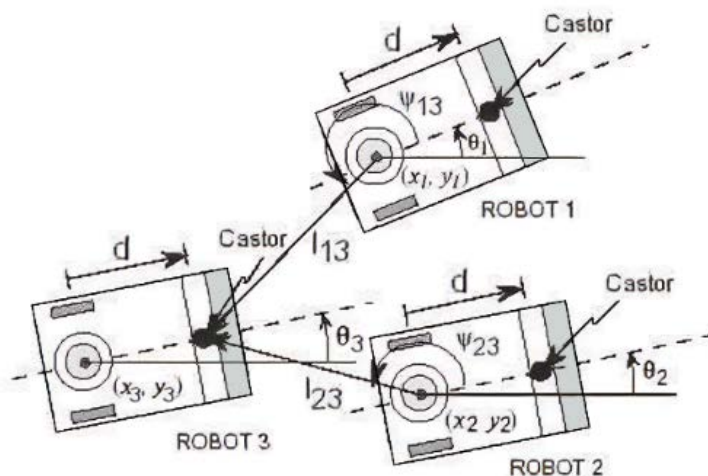
Малко са изследователите, които са разгледали проблема с проследяване на траекторията, когато говорим за управление на мулти-агентната формация. В [55, 56] е представен метод за управление по линейна обратна връзка за формация от

нехолономни мобилни роботи като се използва формация от типа следене на лидера и са представени два алгоритъма за управление: $l - \varphi$ управление и $l - l$ управление. $l - \varphi$ управлението има за цел да контролира и поддържа желаното разделяне l_{12}^d и относителното ориентирание φ_{12}^d , между лидера и следващия робот, както е показано на фигура 2.1. Управлението $l - l$ се отнася за относителното позициониране на три мобилни робота, два лидера и един последовател, като се поддържа желано разделение от двата лидера. Целта е да се контролира и поддържа желаното разделение l_{13}^d и l_{23}^d между следващия и двата лидера, както е показано на фигура 2.2.



Фиг 2.1. Групово управление с 1 лидер

При подхода на виртуалната структура [49] цялата формация се третира като едно цяло. Законите за контрол на роботите се извеждат на три стъпки. Първо, се определя динамиката на виртуалната структура. Тогава движението на виртуалната структура се превръща в желаното движение за всеки робот. И накрая, са извлечени отделните контролери за проследяване на роботите. Тъй като [50] предлага концепцията за виртуална структура, вече има много литературни източници за контрол на формирането, използвайки този подход.



Фиг 2.2. Управление с 2 лидера

При подхода на изкуствен потенциал препятствието в околната среда създава отблъскваща сила, която избутва робота далеч от препятствията, целевата точка създава атрактивна сила, която привлича робота към целевата точка. Отблъскващата сила и атрактивната сила са описани като функция на отблъскващ потенциал и атрактивна потенциална функция. По принцип тези два вида потенциални функции се използват заедно в практически приложения, за да се постигне конвергенция, без сблъсък и без препятствия [51]. В [52] се обмисля образуването на модел и преконфигуриране в множество мобилни роботи, използвайки бифуркационното поле за постигане на различни модели чрез проста свободна промяна на параметрите. Предимствата на този подход са, че той изисква по-малко изчисления и може да се използва за приложения за контрол в реално време. Недостатъците са, че е трудно да се проектират потенциални полски функции, отговарящи на местните минимални нива.

В подхода на теорията на графите всеки робот се счита за възел и всяка комуникационна или сензорна информационна връзка между роботите се счита за край. Изследователският подход използва теорията на графиките, теорията на контрола и теорията на динамичните системи заедно, за да изучат регулатора на формата и неговата стабилност. [53] са направили връзка между теорията на

контрола и теорията на графиките, за да анализират стабилизирането на формирането. [54] показаха ранга на Лапласовия граф, който е свързан с връзката. Предимството на този подход е, че е лесно да се представи всяка формация, като се използва графика, която има добре развити теоретични резултати. Недостатъкът е, че е трудно да се разгледа ограничаването на конфигурацията на истинските роботи.

2.2. Управление на нехолономни мобилни роботи във формация следване на лидера

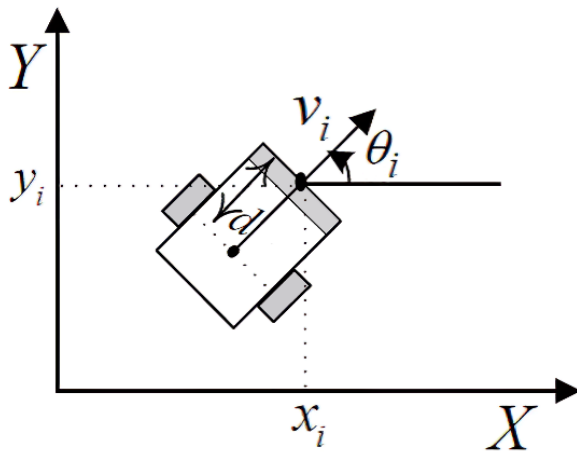
В литературата проблема за управление при следване на траектория за един мобилен робот е изследван през годините [58, 59, 60]. В [61] е предложен класически модел за следена базиран на грешката и е създаден устойчив проследяващ контролер за един нехолономен мобилен робот. В [62] е предложен бекстепинг подход за управление на проследяването на траектория и са разгледани проблеми при проследяването на локалната и глобалната траектории. В друг източник е представен иновативен контролер на въртящия момент за мобилен робот и се интегрират кинематичен контролер и контролер на въртящия момент от невронни мрежи за нехолономен мобилен робот.

Различни методи за управление на следването за мобилни роботи се споменават в литературата като плъзгащ режим, линеаризация, невронни мрежи, размити системи и бекстепинг. Сред всички тези методи, бекстепинг метода е избран като предпочитан. Използването на бекстепинг техниката позволява използване на опростени проследяващи контролери и гарантиране на стабилност на системата като се използва теорията на Лапунов за стабилност [63]. Нещо повече, някои от бекстепинг контролерите, могат да се справят с произволно големи първоначални грешки.

2.2.1. Математически модел на нехолономен мобилен робот

Разглеждаме група от n на брой нехолономни мобилни роботи. За опростяване приемаме, че всеки робот има еднаква механична структура, както на фигура 2.3.

Позицията на i -тият ($1 \leq i \leq n$) робот (отбелязан като робот R_i) в декартови координати OXY е определено от $p_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$, където x_i, y_i показва предните координати на робота R_i , а θ_i е ъгъла на завъртане.



Фиг 2.3. Механична структура на мобилния робот

Мобилният робот с две задвижвани колела, показан на фигура 2.3 е типичен пример за нехолономна механична система. Съгласно хипотезата относно идеалното търкаляне без плъзгане [17], кинематичното ограничение на нехолономен мобилен робот R_i е следното:

$$\dot{y}_i \cos \theta_i - \dot{x}_i \sin \theta_i = d \dot{\theta}_i, \quad (2.1)$$

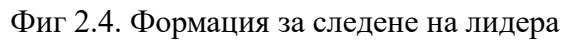
Където d е дистанцията между задната ос и предния край на робота.

От кинематичното ограничение (2.1), кинематичния модел на нехолономен мобилен робот R_i може да се представи като

$$\dot{p}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -d \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & d \cos \theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ w_i \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

Където v_i и w_i са съответно линейната скорост и ъгловата скорост.

2.2.2.1. Модел на формацията за следене на лидера



Поради геометричните зависимости между роботите е лесно да се изчисли, че желаната позиция p_j^d на робота преследвач е

$$p_j^d = [x_j^d, y_j^d, \theta_j^d]^T = \begin{bmatrix} x_i - d \cos \theta_i + L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ y_i - d \sin \theta_i + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ \theta_i \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

Действителната позиция p_j на робота преследвач R_j

$$p_j = [x_j, y_j, \theta_j]^T = \begin{bmatrix} x_i - d \cos \theta_i + L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_i) \\ y_i - d \sin \theta_i + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) \\ \theta_i \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

Проектирането на относителното разстояние L_{ij} по X и Y направленията на декартовите координати се представя като

$$L_{ij} = \sqrt{L_{ijx}^2 + L_{ijy}^2}, \quad (2.5)$$

Където $L_{ijx}(t)$ и $L_{ijy}(t)$ показват, че действителните относителни разделения между лидер и последовател се проектират по направление X и Y съответно чрез декартови координати и удовлетворяват

$$L_{ijx} = x_i - x_j - d \cos \theta_i = -L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_i), \quad (1.6)$$

$$L_{ijy} = y_i - y_j - d \sin \theta_i = -L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i).$$

Взимайки производната от уравнения 1.6 и 1.2 получаваме

$$\dot{L}_{ijx} = \dot{x}_i - \dot{x}_j + d\dot{\theta}_i \sin \theta_i = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j + dw_j \sin \theta_j,$$

$$\dot{L}_{ijy} = \dot{y}_i - \dot{y}_j - d\dot{\theta}_i \cos \theta_i = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j - dw_j \cos \theta_j,$$

Където v_i и w_i ни дават линейната скорост и ъгловата скорост на лидера R_i , v_j и w_j ни дават линейната скорост и ъгловата скорост на последователя R_j .

Взимайки производната от уравнения 2.5 и 2.2 получаваме

$$\begin{aligned}
\dot{L}_{ij} &= \frac{1}{\sqrt{L_{ijx}^2 + L_{ijy}^2}} (L_{ijx} \cdot \dot{L}_{ijx} + L_{ijy} \cdot \dot{L}_{ijy}) \\
&= \frac{1}{L_{ij}} \{v_i (L_{ijx} \cos \theta_i + L_{ijy} \sin \theta_i)\} \\
&\quad - \frac{1}{L_{ij}} \{v_j (L_{ijx} \cos \theta_j + L_{ijy} \sin \theta_j)\} \\
&\quad + \frac{1}{L_{ij}} \{-dw_j (-L_{ijx} \sin \theta_j + L_{ijy} \cos \theta_j)\} \\
&= -v_i \cos \psi_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} + dw_j \sin \gamma_{ij},
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Където $\gamma_{ij} = \psi_{ij} + \theta_i - \theta_j$.

От фигура 2.2 $\psi_{ij} = \arctan(L_{ijy}/L_{ijx}) - \theta_i + \pi$. След това пресмятаме производната на относителната позиция,

$$\begin{aligned}
\dot{\psi}_{ij} &= \left[\tan \left(\frac{L_{ijy}}{L_{ijx}} \right) - \theta_i + \pi \right]' \\
&= \frac{1}{L_{ij}} \{v_i \sin \psi_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} + dw_j \cos \gamma_{ij}\} - w_i.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Следователно, кинематичният модел на формацията лидер-последовател е

$$\dot{L}_{ij} = -v_i \cos \psi_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} + dw_j \sin \gamma_{ij}, \tag{2.9}$$

$$\dot{\psi}_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} \{v_i \sin \psi_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} + dw_j \cos \gamma_{ij}\} - w_i. \tag{2.10}$$

2.2.2.2. Цел на управлението на формацията

Целта е да се постигне и поддържа желаната формация на лидер-последовател, т.е. да поддържаме желаното разделяне и позициониране между водача и последователя. Поради това задачата на управлението е да се проектират управляващи входове v_j и w_j за робота последовател R_j ($1 \leq j \leq n$) такива като

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (L_{ij}^d - L_{ij}) = 0 \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\psi_{ij}^d - \psi_{ij}) = 0 \quad (2.11)$$

т.е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (p_j^d - p_j) = 0$$

Преди да продължим, са необходими следните хипотези.

Хипотеза 2.1 да предположим, че разделянето L_{ij} и позиционирането ψ_{ij} са известни. Също така са известни линейната и ъгловата скорости и ориентациите на всеки робот.

Хипотеза 2.2 ъгловата скорост на робота е ограничена за целия период t , и $-\omega_{max} \leq \omega_j \leq \omega_{max}$, където ω_{max} е положителна константа.

Хипотеза 2.3 идеалното проследяване на скоростта е постоянно.

2.2.3. Динамични грешки при формация следване на лидера

В подхода на лидер-последовател са дадени ъгловата и линейната скорост на лидера, ние ще трябва да контролираме ъгловата и линейна скорост на последователя, за да запазим относителното разделяне и относителното позициониране между тях, за да направим желаната формация правилно изпълнена. Затова управлението на формация от мобилни роботи базирано на подхода следване на лидера може да се разгледа като разширяване на проблема за проследяване на нехолономни мобилни роботи [64].

Използвайки уравнения (2.3), (2.4) и прилагайки тригонометрична тъждественост, грешката от следене за формация лидер-последовател се намира като

$$e_j = \begin{bmatrix} x_{js} \\ y_{js} \\ \theta_{js} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j & 0 \\ -\sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j^d & -x_j \\ y_j^d & -y_j \\ \theta_j^d & -\theta_j \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) & -L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) & -L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \theta_j^d & -\theta_j \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Където $\theta_{ij} = \theta_j - \theta_j$.

Приемаме че желаното разделение L_{ij}^d и желаната позиция ψ_{ij}^d са константи. От това следва че $\dot{L}_{ij}^d = 0, \dot{\psi}_{ij}^d = 0$. Взимайки времевата производна от (2.12) заедно с (2.3) и (2.4) имаме

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{j\theta} &= -L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \dot{\theta}_{ij} \\
&\quad - \dot{L}_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) (\dot{\psi}_{ij} + \dot{\theta}_i) \\
&= -L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) (\omega_i - \omega_j) \\
&\quad - \dot{L}_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) (\dot{\psi}_{ij} + \omega_i - \omega_j) \\
&= -L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) (\omega_i - \omega_j) \\
&\quad - \cos(\psi_{ij} + \theta_i) \{-v_i \cos \psi_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} + d\omega_j \sin \gamma_{ij}\} \\
&\quad + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{1}{L_{ij}} (v_i \sin \psi_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} + d\omega_j \cos \gamma_{ij}) - \omega_i \right\} \\
&= -L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + L_{ij}^d \omega_j \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\
&\quad + v_i \cos \psi_{ij} \cos \gamma_{ij} - v_j \cos^2 \gamma_{ij} - d\omega_j \cos \gamma_{ij} \sin \gamma_{ij} \\
&\quad + v_i \sin \psi_{ij} \sin \gamma_{ij} - v_j \sin^2 \gamma_{ij} - L_{ij} \omega_i \sin \gamma_{ij} \\
&\quad + d\omega_j \cos \gamma_{ij} \sin \gamma_{ij} + L_{ij} \sin \gamma_{ij} (\omega_i - \omega_j) \\
&= -v_j - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + v_i \cos \psi_{ij} v_j \cos \gamma_{ij} \\
&\quad + v_i \sin \psi_{ij} \sin \gamma_{ij} + L_{ij}^d \omega_j \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij} \sin \gamma_{ij} \\
&= v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j y_{j\theta} - v_j - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})
\end{aligned}$$

И

$$\begin{aligned}
\dot{y}_{j\mathcal{E}} &= L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \dot{\theta}_{ij} - \dot{L}_{ij} \sin \gamma_{ij} - L_{ij} \cos \gamma_{ij} (\dot{\psi}_{ij} + \omega_i - \omega_j) \\
&= L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) (\omega_i - \omega_j) \\
&\quad - \sin \gamma_{ij} \{ -v_i \cos \psi_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} + d \omega_j \sin \gamma_{ij} \} - L_{ij} \cos \gamma_{ij} \\
&\quad \cdot \left\{ \frac{1}{L_{ij}} (v_i \sin \psi_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} + d \omega_j \cos \gamma_{ij}) - \omega_i \right\} \\
&\quad + L_{ij} \cos \gamma_{ij} (\omega_i - \omega_j) \\
&= L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\
&\quad + v_i \cos \psi_{ij} v_j \sin \gamma_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} \cos \gamma_{ij} - d \omega_j \sin^2 \gamma_{ij} \\
&\quad - v_i \sin \psi_{ij} \cos \gamma_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} \sin \gamma_{ij} - d \omega_j \cos^2 \gamma_{ij} \\
&\quad + L_{ij} \omega_i \cos \gamma_{ij} - L_{ij} \cos \gamma_{ij} \omega_i + L_{ij} \cos \gamma_{ij} \omega_i \\
&= L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + v_i \cos \psi_{ij} v_j \sin \gamma_{ij} \\
&\quad - v_i \sin \psi_{ij} \cos \gamma_{ij} - d \omega_j - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\
&\quad + L_{ij} \omega_i \cos \gamma_{ij} \\
&= v_i \sin \theta_{ij} + \omega_j x_{j\mathcal{E}} - d \omega_j + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})
\end{aligned}$$

По този начин може да се получи динамичната грешка на мобилния робот, която може да бъде описана като

$$\dot{x}_{j\mathcal{E}} = v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j y_{j\mathcal{E}} - v_j - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}),$$

$$\dot{y}_{j\mathcal{E}} = v_i \sin \theta_{ij} - \omega_j x_{j\mathcal{E}} - d \omega_j + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}),$$

$$\dot{\theta}_{j\mathcal{E}} = \omega_j^d - \omega_j. \quad (2.13)$$

2.2.4. Бекстепинг алгоритъм за управление

Според характеристиките от грешката в динамичната система (1.13), не може да се използва управление по входно-изходната обратна връзка за справяне с този модел. Също така поради нехолономните ограничения на всеки робот и целта на управлението на формация лидер-последовател, ориентацията на всеки последовател няма да бъде еднаква докато формацията е в процес на завиване. и по този начин референтната ориентация не може да бъде избрана $\theta_j^d = \theta_i$. Тук избираме производната на референтната ориентация, както следва

$$\dot{\theta}_j^d = (v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + 2k_2 y_{j\epsilon})/d \quad (2.14)$$

Избирайки (1.14) може да се намери асимптотичната стабилност на всички грешки. Следователно динамичната система за грешки става

$$\begin{aligned} \dot{x}_{j\epsilon} &= v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j y_{j\epsilon} - v_j - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}), \\ \dot{y}_{j\epsilon} &= v_i \sin \theta_{ij} - \omega_j x_{j\epsilon} - d\omega_j + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}), \\ \dot{\theta}_{j\epsilon} &= (v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + 2k_2 y_{j\epsilon})/d \end{aligned} \quad (2.15)$$

Разглеждаме следните управляващи входове от бекстепинг управлението

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 x_{j\epsilon} + v_i \sin \theta_{ij} - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}), \\ \omega_j &= (v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 y_{j\epsilon} + k_3 \theta_{j\epsilon})/d \end{aligned} \quad (2.16)$$

Където $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$. Следователно динамичната кинематична грешка при затворена верига става

$$\dot{x}_{j\epsilon} = \omega_j y_{j\epsilon} - k_1 x_{j\epsilon},$$

$$\dot{y}_{je} = -\omega_j x_{je} - k_2 y_{je} - k_3 \theta_{je},$$

$$\dot{\theta}_{je} = (-k_3 \theta_{je} + k_2 y_{je})/d \quad (2.17)$$

За да се докаже, че системата за контрол на траекторията (2.17) по законите на контролера (2.16) е асимптотично стабилна и грешките на проследяване се приближават до нули, избираме следната кандидат-функция на Ляпунов:

$$V(t) = \frac{1}{2} (x_{je}^2 + y_{je}^2) + \frac{dk_3 \theta_{je}^2}{2k_2} \quad (2.18)$$

Очевидно е, че $V(t) \geq 0$, и $V(t) = 0$ ако и само ако $x_{je} = 0, y_{je} = 0, \theta_{je} = 0$. Производната на функцията на Ляпунов (2.18) е дадена от

$$\dot{V}(t) = x_{je} \dot{x}_{je} + y_{je} \dot{y}_{je} + \frac{dk_3 \theta_{je} \dot{\theta}_{je}}{k_2} \quad (2.19)$$

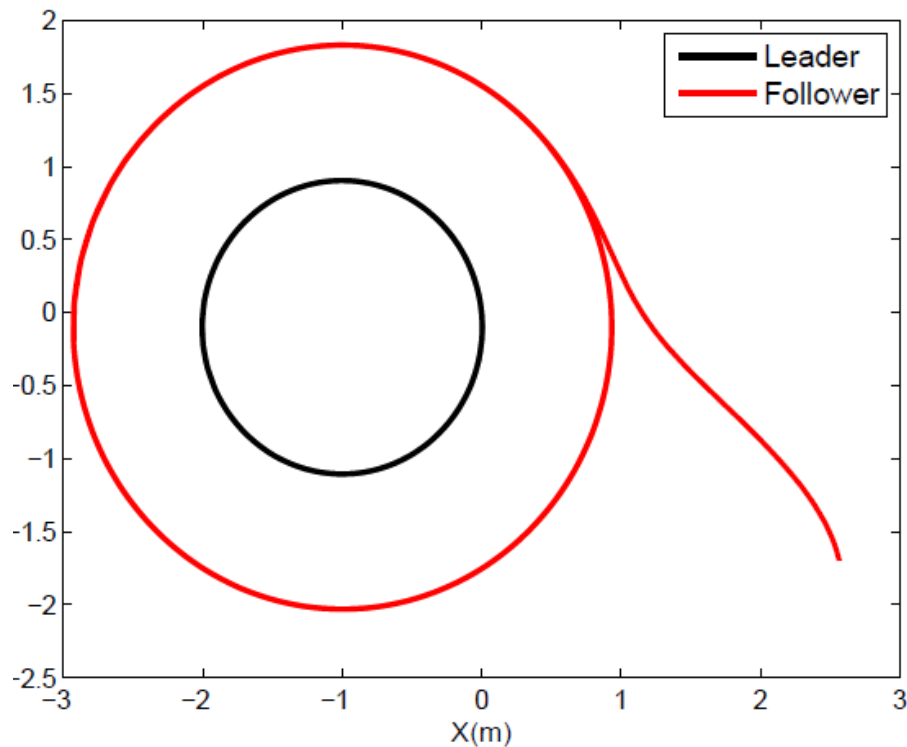
Замествайки (2.17) в (2.19), ние имаме

$$\dot{V}(t) = -k_1 x_{je}^2 - k_2 y_{je}^2 - \frac{k_3^2 \theta_{je}^2}{k_2} + k_3 \theta_{je} y_{je} = -k_1 x_{je}^2 - k_2 y_{je}^2 - k_3 \theta_{je}^2 \leq 0.$$

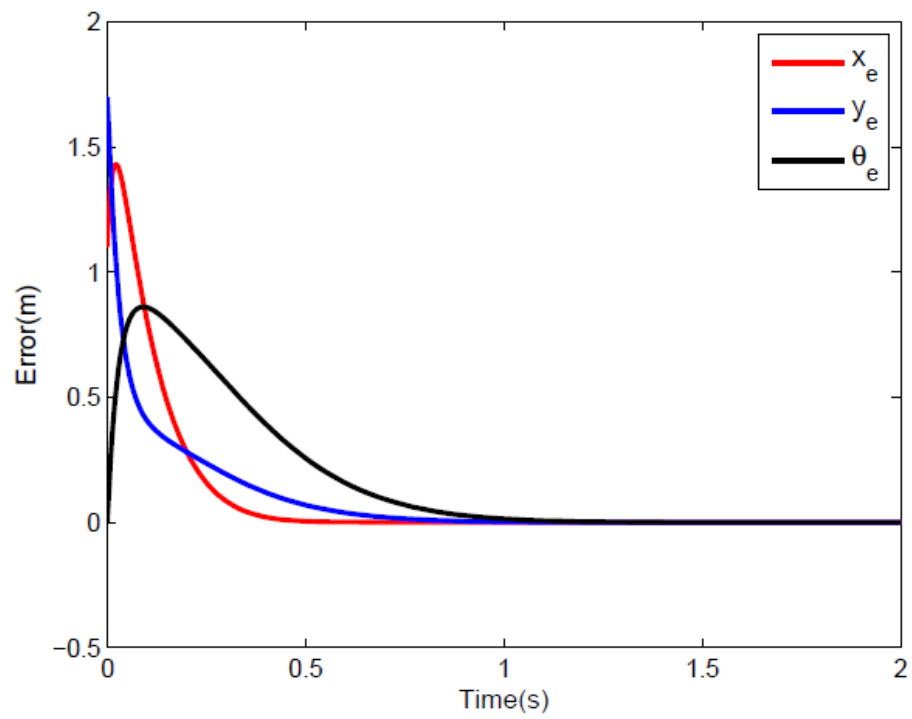
Докато е в сила $\dot{V}(t) \leq 0$ и $V(t) \geq 0$, проследяващия контролер (2.16) за преследвача R_j е стабилен. От това се подразбира, че x_{je} , y_{je} и θ_{je} са гранични. Затова получаваме $\|\dot{V}(t)\| < \infty$. От това следва, че $V(t)$ е равномерно непрекъснато. От $\dot{V}(t) \leq 0$ и $V(t) \geq 0$, също следва, че $V(t)$ не се увеличава, т.е. $V(t) \leq V(0)$. От лемата на Барбалат, $\dot{V} \rightarrow 0$, когато $t \rightarrow \infty$, можем да заключим $x_{je} \rightarrow 0$, $y_{je} \rightarrow 0$ и $\theta_{je} \rightarrow 0$, когато $t \rightarrow \infty$. Следователно, проследяващият контролер (2.16) може да гарантира, че динамичната система със затворена верига (2.17) е глобално асимптотично стабилна. Следователно, динамичната система с грешка при затворена верига е асимптотично стабилна и грешките на проследяване достигат до нула.

2.2.5. Симулационни резултати

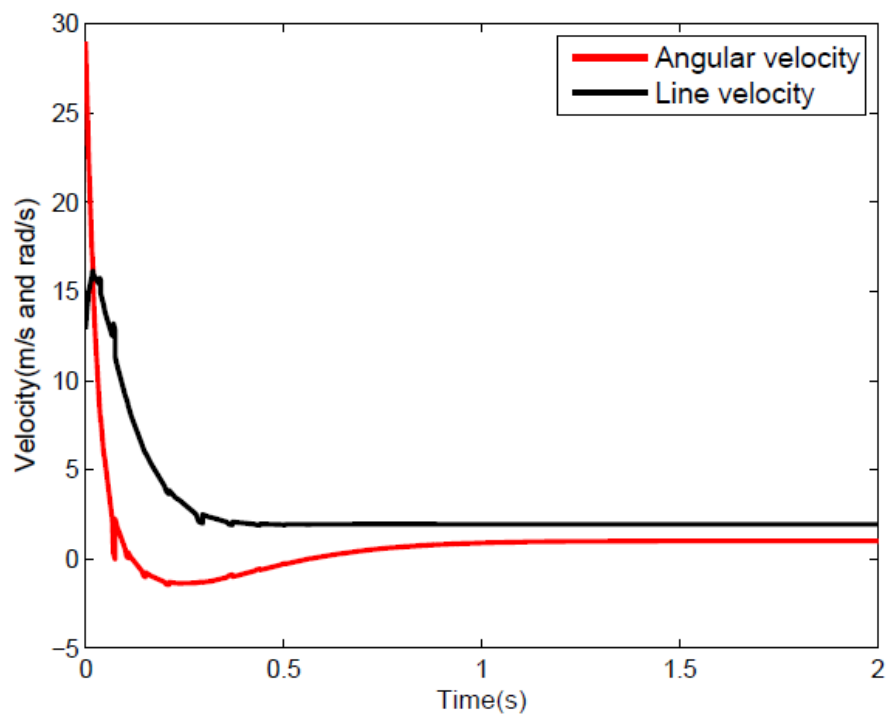
В симулацията се изследва ефективността на предложения проследяващ контролер (2.16). Разглеждаме случай с един лидер и един последовател. Приемаме, че дистанцията d между предната и задната ос на робота е 0.1, линейната скорост и ъгловата скорост съответно са 1 и първоначалната позиция на лидера е $(0, 0, \pi/2)$. За да се запази формацията лидер-последовател, последователя трябва да се придържа към желаното разделение $l_o = 1$ и желаното завъртане $\psi_{ij}^d = 4\pi/3$ спрямо своя лидер. След изчисление е лесно да се определя, че желаното разделение на последователя е $(0.866, -0.6, \pi/2)$. Приемаме, че първоначалната действителна позиция на последователя е $(2.566, -1.7, \pi/2)$. Тогава първоначалната грешка е $(1.1, 1.7, 0)$. Управляващите входове за робота са избрани както следва $k_1 = 10, k_2 = 2, k_3 = 1, A = 50$ и $B = D = 5$.



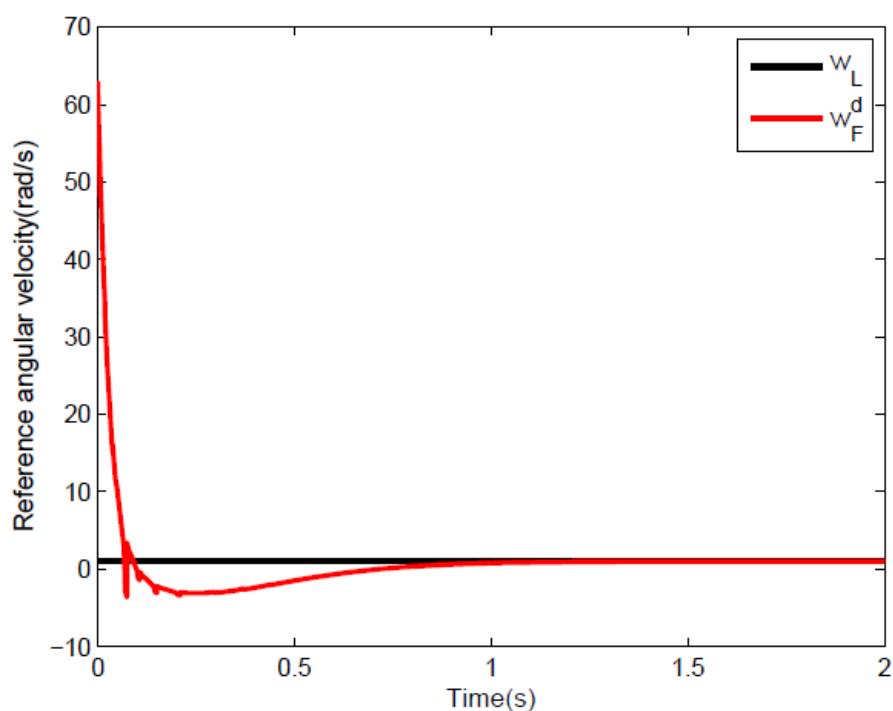
Фигура 2.5 траектории в реално време при използване на контролер (1.16)



Фигура 2.6 проследяващите грешки на последователя при използване на контролер (1.16)



Фигура 2.7 Линейната и ъгловата скорости на последователя при използване на контролер (1.16)



Фигура 2.8 Референтните ъглови скорости на последователя и ъгловите скорости на лидера при използване на контролер (2.16).

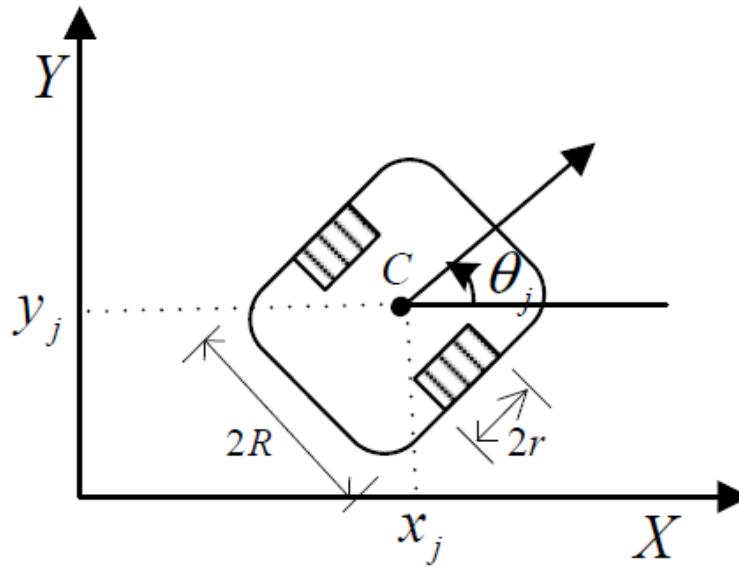
Фигура 2.5 показва, че последователят може добре да следи водача и да поддържа желаното разделяне и желаната посока с водача. Фиг. 2.6 показва, че грешките на проследяването на последователите започват да клонят към нула във времето. От фигура 2.6 последователят започва с голяма линейна скорост и голяма ъглова скорост и се променя внезапно. Това означава, че първоначалното линейно ускорение и ъгловото ускорение са много големи, т.е. силата и въртящият момент на последователя са много големи, което е непрактично. Фиг. 2.7 показва референтната ъглова скорост ψ_{ij}^d на последователя и ъглова скорост на лидера с помощта на контролерите (2.16). От Фиг. 2.8 се вижда, че определените референтни ъглови скорости за последователя могат да се приближат до ъгловата скорост на лидера във времето.

2.3. Управление на нехолономни мобилни роботи в разпределена формация

Многобройни предишни разработки приемат, че системите от множество мобилни роботи имат дървовидни структури. Дървовидните сензорни структури обикновено водят до каскадни взаимовръзки на затворените системи [65]. Някои изследователи са се опитали да се абстрахират от схващането за дървовидните сензорни структури за сметка на използването на измервания на глобалната позиция. Въпреки това, в някои сценарии на приложение, роботите могат да имат ограничена способност за комуникация. Като цяло е много трудно да се получи цялата глобална информация за всеки робот. Обикновено не се предполага, че съществува централизиран контролер. Проектирането на контролера за всеки робот трябва да се основава на местната информация. Следователно, от практическа гледна точка, използването на относителни местни позиции прави законите за контрол по-реалистични.

През последните години, благодарение на развитието на консенсусна теория в динамичната мрежова система, са приложени консенсусни стратегии за постигане на контрол върху формирането на множество мобилни роботи, които се фокусират върху задвижване на кинематиката на всички мобилни роботи до обща стойност. В [66], първо се представя официален математически анализ за консенсус. След това изследването на консенсусни проблеми за множество системи също беше разширено до случая на насочена топология [67, 68]. Моделите на роботизирани системи описани в тези статии обаче са линейни. На практика много модели на роботизирани системи са нелинейни и имат нехолономни ограничения. Поради тези проблеми е съвсем естествено да се изследва проблем за управление на формацията за нехолономни мобилни роботи. Някои закони за управление на формацията са представени в [69]. В [70] е изследван проблема за управлението на проследяването на нехолономен мобилен робот с лимитирана информация за желаната траектория. Обаче в статия [69] се предполага, че всеки робот познава желаната траектория.

2.3.1. Математически модел на нехолономен мобилен робот



Фиг. 2.9. Униколесен мобилен робот

Разглеждаме униколесен мобилен робот на фигура 2.9. Предполага се, че мобилният робот се движи без странично приплъзване, което означава, че мобилният робот удовлетворява нехолономното ограничение,

$$\dot{x}_j \sin \theta_j - \dot{y}_j \cos \theta_j = 0 \quad (2.20)$$

Следователно, кинематиката на j-тия робот може да бъде описана чрез

$$\dot{q}_j = \begin{bmatrix} \dot{x}_j \\ \dot{y}_j \\ \dot{\theta}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & 0 \\ \sin \theta_j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_j \\ w_j \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Където $q_j = (x_j, y_j, \theta_j)^T$ е позицията на j-тия робот в декартови координати, (x_j, y_j) е координатата C на центъра на масите, v_j, w_j и θ_j са линейната скорост, ъгловата скорост и ъгъла на ориентация на j-тия робот.

2.3.2. Разглеждане на проблема

Разглеждаме мулти-агентна система с m нехолономни мобилни роботи, обозначени като 1; 2; до m , движещи се по хоризонтална равнина. За простота приемаме, че всички роботи имат една и съща механична структура, показана на фиг. 2.5, а кинематиката на i -тия робот може да бъде описана с (2.21). Да предположим, че желаният геометричен модел F на m мобилни роботи се определя от ортогонални координати (p_{jx}, p_{jy}) , което удовлетворява

$$\sum_{j=1}^m p_{jx} = p_{0x}, \quad \sum_{j=1}^m p_{jy} = p_{0y} \quad (2.22)$$

Където (p_{0x}, p_{0y}) е център на геометричния модел F . Без да се отклоним от основния модел, можем да приемем че $p_{0x} = 0, p_{0y} = 0$.

В този раздел целта е да се проектират управляващи входове v_j и w_j за робота j , базирани на неговите състояния $(q_j, \dot{q}_j), (p_{jx}, p_{jy})$, и състоянията на неговите съседи $(q_i, \dot{q}_i)$ и (p_{ix}, p_{iy}) за $i \in N_j$, така че групата от мобилни роботи да клони към модела F на желаната формация, ориентацията на всеки робот да клони към желаната стойност на θ_0 , и геометричният център на формацията да се слива с желаната траектория (x_0, y_0) т.е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} x_j & -x_i \\ y_j & -y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{jx} & -p_{ix} \\ p_{jy} & -p_{iy} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_j - \theta_0) = 0 \quad (2.24)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\sum_{j=1}^m x_j/m - x_0) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\sum_{j=1}^m y_j/m - y_0) = 0 \quad (2.25)$$

Тук геометричният центроид (x_0, y_0) и желаната стойност θ_0 могат да се разглеждат като позицията на виртуален лидер 0, който не трябва да е действителен робот, а е определен от

$$\dot{x}_0 = v_0 \cos \theta_0, \dot{y}_0 = v_0 \sin \theta_0, \dot{\theta}_0 = w_0 \quad (2.26)$$

Следователно от сега нататък ще наричаме m роботите от системата (2.21) последователи.

Теглото на връзката между робота $j(1 \leq j \leq m)$ и виртуалния лидер 0 е представена от B , където $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m)$ такива че

$$b_j = \begin{cases} b_j > 0, & \text{ако робота } j \text{ може да получи информация за виртуалния водач } 0 \\ 0 & \text{в останалите случаи.} \end{cases}$$

За да може обективността на контрола да бъде разрешима, са дадени следните предположения и предварителни условия.

Хипотеза 2.4 θ_j за $(0 \leq j \leq m)$ е ограничено. w_j за $(0 \leq j \leq m)$ е постоянно активен и $|w_j| \leq w_{\max}$.

Коментар 2.5 w_j е постоянно активен, което означава че w_j не се доближава до 0. Това предположение се право поради факта, че колесната система на мобилен робот е нехолономна.

Хипотеза 2.6 Съществува поне един последовател, който може да получи информация от виртуалния лидер.

Коментар 2.7 От предположението 2.6 не се изисква всеки робот да знае информацията за виртуалния лидер, тоест, желаната траектория не се изисква за всеки робот.

2.3.3. Алгоритъм за разпределено управление

Нека дефинираме следните трансформации

$$z_{1j} = \theta_j,$$

$$z_{2j} = (x_j - p_{jx}) \cos \theta_j + (y_j - p_{jy}) \sin \theta_j + k_0 \text{sign}(u_{1j}) z_{3j},$$

$$z_{3j} = (x_j - p_{jx}) \sin \theta_j - (y_j - p_{jy}) \cos \theta_j,$$

$$u_{1j} = w_j,$$

$$u_{2j} = v_j - (1 + k_0^2) u_{1j} z_{3j} \quad (2.27)$$

с входове u_{1j} и u_{2j} , където $0 \leq j \leq m$, $k_0 > 0$ и $\text{sign}(\cdot)$ е знаковата функция.

Следователно динамичната система от (2.27) е дадена както следва

$$\dot{z}_{1j} = u_{1j} \quad (2.28)$$

$$\dot{z}_{2j} = u_{2j} + k_0 |u_{1j}| z_{2j} \quad (2.29)$$

$$\dot{z}_{3j} = u_{1j} z_{2j} - k_0 |u_{1j}| z_{3j} \quad (2.30)$$

Като приложим уравнения от (2.27) до (2.30), управляващите цели (2.23)-(2.25) стават

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (z_{1j} - z_{10}) = 0 \quad (2.31)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (z_{2j} - z_{20}) = 0 \quad (2.32)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (z_{3j} - z_{30}) = 0 \quad (2.33)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (u_{1j} - u_{10}) = 0 \quad (2.34)$$

Лема 2.8 Ако уравнения (2.31)-(2.34) са в границите $0 \leq j \leq m$, тогава m мобилни роботи могат да се доближат до модела на формацията F , т.е. уравнения (2.23)-(2.25) ще бъдат удовлетворени.

Доказателство: от (2.27) може лесно да се изчисли, че

$$\begin{bmatrix} x_j & -x_i \\ y_j & -y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j \\ \sin \theta_j & -\cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{2j} - k_0 \text{sign}(u_{1j}) z_{3j} \\ z_{3j} \end{bmatrix}$$

Докато уравнения (2.31)-(2.34) са удовлетворени, следва че

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} x_j & -x_i \\ y_j & -y_i \end{bmatrix} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j \\ \sin \theta_j & -\cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{2j} - k_0 \text{sign}(u_{1j}) z_{3j} \\ z_{3j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & -\cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{20} - k_0 \text{sign}(u_{10}) z_{30} \\ z_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Това доказателство е завършено.

Коментар 2.9 Въз основа на предложената трансформация (2.27) и горе-описаното доказателство, проблема с управлението на формация от група мобилни роботи се трансформира в консенсусен проблем. В следващата част от тази точка ще предложим протоколи за разпределено управление основани на консенсусната теория. Ще бъде предложен контролер за управление на мобилен робот според комуникационния граф G .

Според информацията на съседите, базирана на комуникационния граф G , контролерът за мобилния робот j , ($0 \leq j \leq m$) може да бъде изразен като

$$\begin{aligned} u_{1j} &= u_{10} - \alpha \sum_{i \in N_j} a_{ji} (z_{1j} - z_{1i}) - ab_j (z_{1j} - z_{10}) - \beta \text{sign}(\sum_{i \in N_j} a_{ji} (z_{1j} - z_{1i}) + \\ &b_j (z_{1j} - z_{10})) \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} u_{2j} &= -\alpha \sum_{i \in N_j} a_{ji} (z_{2j} - z_{2i}) - ab_j (z_{2j} - z_{20}) - \beta \text{sign}(\sum_{i \in N_j} a_{ji} (z_{2j} - z_{2i}) + \\ &b_j (z_{2j} - z_{20})) - k_0 |u_{1j}| z_{2j} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Където $j = 1, \dots, m$, b_j е положителна константа ако позицията на виртуалния лидер и е достъпна за последователя j , а в противен случай $b_j = 0$, $\dot{z}_{20} \leq k$, k е

положителна константа, α е неотрицателна константа, β е положителна константа и удовлетворява условието $\beta > k$.

Докато не насочения граф G е свързан, следва че $L + B = L + \text{diag}\{b_1, \dots, b_m\}$ е симетрична положително определена матрица, където $B = \text{diag}\{b_1, \dots, b_m\}$ и $b_j > 0$, ($j = 1, \dots, m$). Освен това, е лесно да се потвърди, че матрицата $M = \text{diag}\{L + B, L + B\}$ също е положително определена матрица.

Замествайки (2.35) и (2.36) в уравнения (2.28) и (2.29) получаваме

$$\begin{aligned}\dot{z}_{1*} &= -\alpha(L + B)z_{1*} + \alpha B 1_m z_{10} - \beta \text{sign}((L + B)z_{1*} - B 1_m z_{10}) + 1_m u_{10}, \\ \dot{z}_{2*} &= -\alpha(L + B)z_{2*} + \alpha B 1_m z_{20} - \beta \text{sign}((L + B)z_{2*} - B 1_m z_{20}),\end{aligned}\quad (2.37)$$

Където $\dot{z}_{1*} = [z_{11}, \dots, z_{1m}]^T$ и $\dot{z}_{2*} = [z_{21}, \dots, z_{2m}]^T$. Нека $\tilde{z}_{1*} = z_{1*} - 1_m z_{10}$ и $\tilde{z}_{2*} = z_{2*} - 1_m z_{20}$. От уравненията (2.37) грешката на динамичната система за затворен контур може да бъде получена като

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{z}}_{1*} &= -\alpha(L + B)\tilde{z}_{1*} - \beta \text{sign}((L + B)\tilde{z}_{1*}), \\ \dot{\tilde{z}}_{2*} &= -\alpha(L + B)\tilde{z}_{2*} - \beta \text{sign}((L + B)\tilde{z}_{2*}) - 1_m \dot{z}_{20}\end{aligned}\quad (2.38)$$

Нека $Z = [z_{1*}, z_{2*}]^T = [Z_1, \dots, Z_{2m}]^T$, $\tilde{Z} = [\tilde{z}_{1*}, \tilde{z}_{2*}]^T = [\tilde{Z}_1, \dots, \tilde{Z}_{2m}]$ и

$$f_0 = \left[\underbrace{0, \dots, 0}_m, \underbrace{z_{20}, \dots, z_{20}}_m \right]^T.$$

Следователно динамичната система за грешки може да бъде пренаписана във векторна форма като

$$\dot{\tilde{Z}} = -\alpha M \tilde{Z} - \beta \text{sign}(M \tilde{Z}) - \dot{f}_0 \quad (2.39)$$

Трябва да се отбележи, че дясната страна на уравнение (2.39) е с прекъсвания. Следователно, стабилността на (2.39) ще бъде анализирана с помощта на диференциални включвания и негладък анализ [71]. Понеже знаковата функция е измерима и локално ограничена в основата си, съществува решение на Филипов за (2.39). Това уравнение може да се пренапише според условията за диференциалните включвания като

$$\dot{\tilde{Z}} \in {}^{\text{a.e.}} K[-\alpha M\tilde{Z} - \beta \text{sign}(M\tilde{Z}) - \dot{f}_0] \quad (2.40)$$

Теорема 2.10 За системите (2.28) и (2.29) ако комуникационния граф G е свързан и хипотеза 2.6 е удовлетворена, тогава

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (z_{1j} - z_{10}) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} (z_{2j} - z_{20}) = 0 \text{ и } \lim_{t \rightarrow \infty} (u_{1j} - u_{10}) = 0$$

в ограничено време съгласно законите за контрол (2.35) и (2.36), по-специално $z_{1j} = z_{10}, u_{1j} = u_{10}, z_{2j} = z_{20}$ за всяко $t \geq T$, където

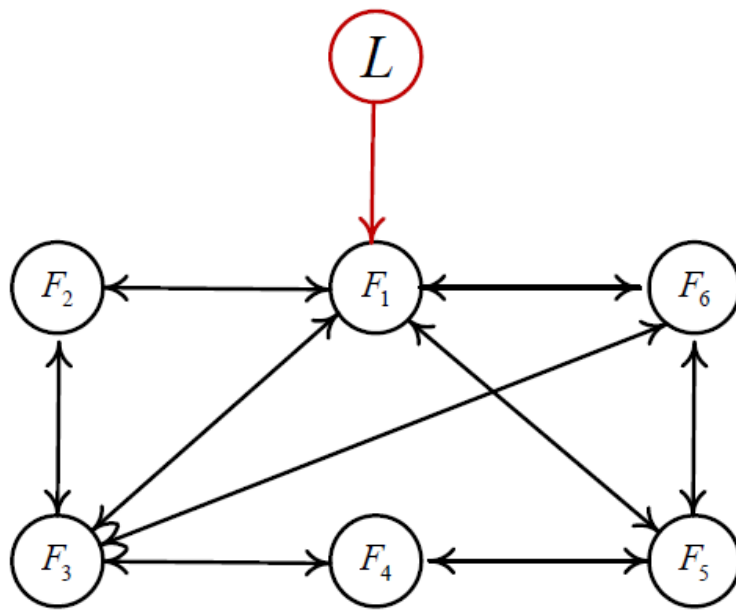
$$T = \frac{\sqrt{\tilde{Z}^T(0)M\tilde{Z}(0)}\sqrt{\lambda_{\max}(M)}}{(\beta-k)\lambda_{\max}(M)} \quad (2.41)$$

Коментар 2.11 От теорема 2.10 доказахме, че променливите $z_{1j}(1 \leq j \leq m), z_{2j}(1 \leq j \leq m)$ и u_{1j} съответно се доближават до z_{10}, z_{20} и u_{10} в ограничено време съгласно предложените закони за контрол (2.35) и (2.36). в теорема 2.12 ще докажем, че z_{3j} експоненциално се приближава до z_{30} съгласно законите за контрол (2.35) и (2.36).

Теорема 2.12 За системата (2.30) ако комуникационния граф е свързан и е удовлетворена хипотеза 2.6, тогава z_{3j} експоненциално се приближава до z_{30} съгласно законите за контрол (2.35) и (2.36).

2.3.4. Симулационни резултати

В този раздел са представени някои симулационни резултати за да се демонстрира ефективността на теоретичните резултати постигнати в горния раздел. Нека разгледаме система с множество мобилни роботи с шест последователи, обозначени с F_1 - F_6 и един виртуален лидер, обозначени съответно с L . Комуникационната графика на системата с множество мобилни роботи е показана на Фигура 2.10.



Фигура 2.10. Комуникационен граф на група от шест последователи и един виртуален лидер.

За опростяване да предположим, че $A = (a_{ij})_{6 \times 6}$, $a_{ij} = 1$ ако робота i може да получи информация от робота j , иначе $a_{ij} = 0$; $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_6\}$, $b_j = 1$ ако информацията от виртуалния лидер е достъпна за последовател j , в противен случай $b_j = 0$, където $i \in \{1, \dots, 6\}$ и $j \in \{1, \dots, 6\}$. Тогава матрицата на съседство A , матрицата на степента D и Лапласовата матрица на графа от фигура 2.10 могат да се запишат като:

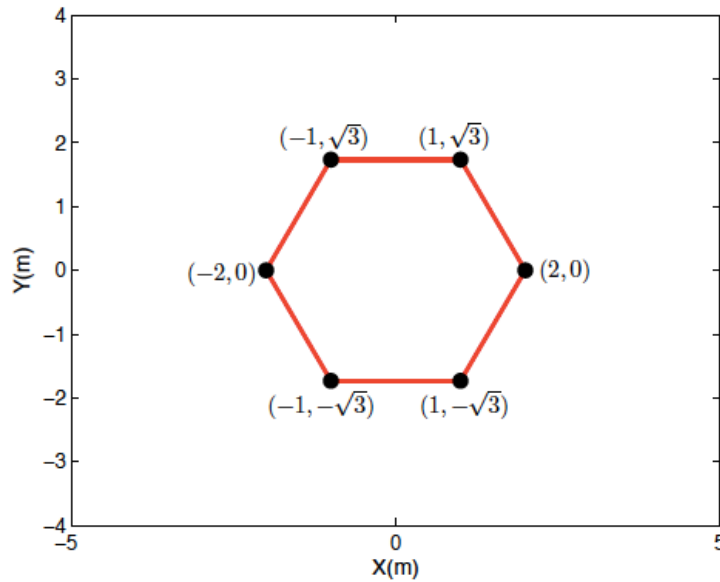
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 4 & & & & & \\ & 2 & & & & \\ & & 4 & & & \\ & & & 2 & & \\ & & & & 2 & \\ & & & & & 2 \end{bmatrix},$$

$$L = D - A = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

и $B = \text{diag}\{1, 0, 0, 0, 0, 0\}$. Зато̀ва,

$$L + B = \begin{bmatrix} 5 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} L + B & 0 \\ 0 & L + B \end{bmatrix}.$$

Желаният геометричен патерн на формацията F се дефинира от ортогонални координати като $(p_{1x}, p_{1y}) = (2, 0)$, $(p_{2x}, p_{2y}) = (1, \sqrt{3})$, $(p_{3x}, p_{3y}) = (1, -\sqrt{3})$, $(p_{4x}, p_{4y}) = (-2, 0)$, $(p_{5x}, p_{5y}) = (-1, -\sqrt{3})$ и $(p_{6x}, p_{6y}) = (1, \sqrt{3})$, както е показано на Фиг. 2.11. Траекторията на виртуалния лидер е избрана като $x_0 = 12 \sin(t/3)$; $y_0 = -12 \cos(t/3)$.



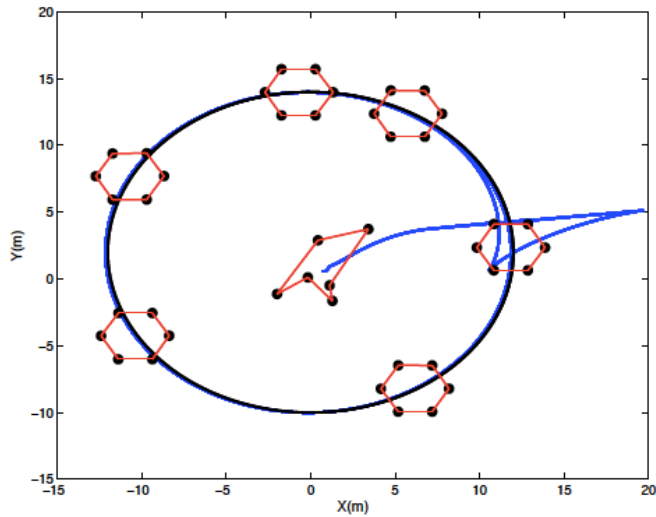
Фигура 2.11. Геометричен патерн на формацията

От трансформацията на координатите, може да се получи, че $z_{20} = 12k_0$, зтова, $z_{20} = 0 < k$. Параметрите за всеки робот са избрани като $\alpha = 23$, $\beta = 0,65 \geq k$ и $k_0 = 2$. Лесно е да се потвърди, че тези параметри удовлетворяват Теорема 2.10.

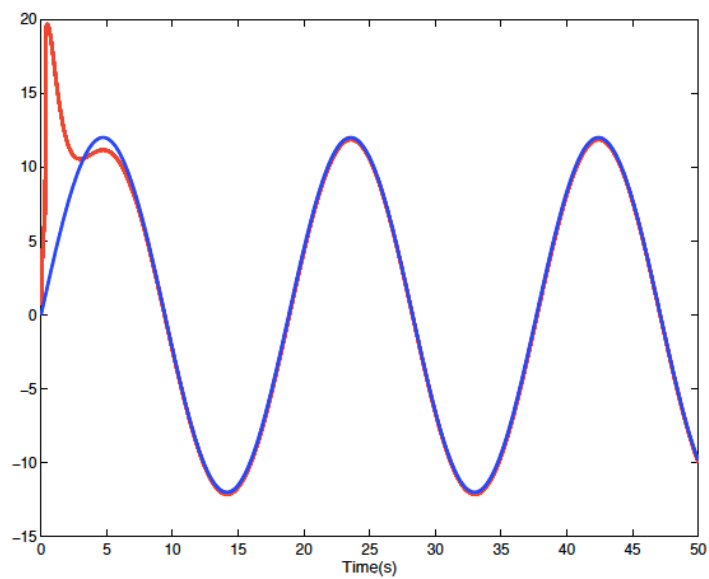
На фиг. 2.12 е показан патернът на формация от шест последователи в даден момент, траекторията на виртуален лидер (задна линия) и траекторията на шестте последователя (синя линия). Фиг. 2.13 изобразява траектоиите на x_0 (синя линия) и на медицентъра x_i ($1 \leq i \leq 6$) (червена линия); и грешката в позиционирането между x_0 и медицентъра x_i . Фиг. 2.14 изобразява траектоиите на y_0 (синя линия) и на медицентъра y_i ($1 \leq i \leq 6$) (червена линия); и грешката в позиционирането между y_0 и медицентъра y_i . Фиг. 2.15 (a) изобразява грешките в пътя между ориентацията w_i на виртуалния лидер, последователите F_i ($1 \leq i \leq 6$) и ориентацията w_0 на виртуалния лидер. Фиг. 2.15 (b) изобразява грешките в пътя между ориентацията θ_i на последователите F_i ($1 \leq i \leq 6$) и ориентацията θ_0 на виртуалния лидер.

На фиг. 2.12 е показано, че желаният геометричен патерн на шестте робота е формиран с помощта на предложените контрлери (1.35) и (1.36), с което и уравнението (2.23) е доказано. От Фиг. 2.13 и Фиг. 2.14, медиценърът на формацията

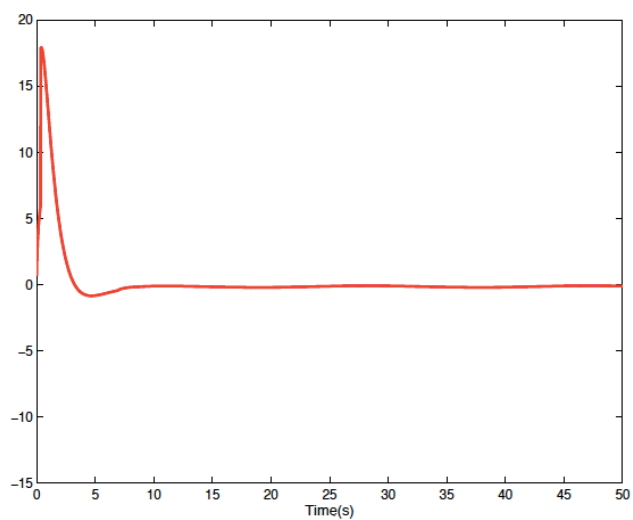
клони към траекторията на виртуалния лидер, с което може да се потвърди уравнение (1.25). От Фиг. 2.15 ъгловото ускорение и ориентацията на всеки последовател клони към ъгловото ускорение и ориентацията на виртуалния лидер, т.е уравненията (2.24) и (2.34) се доказват.



Фигура 2.12. Патерн на формация от шест последователи в даден момент, траектория на виртуален лидер (задна линия) и траектория на шестте последователя (синя линия).

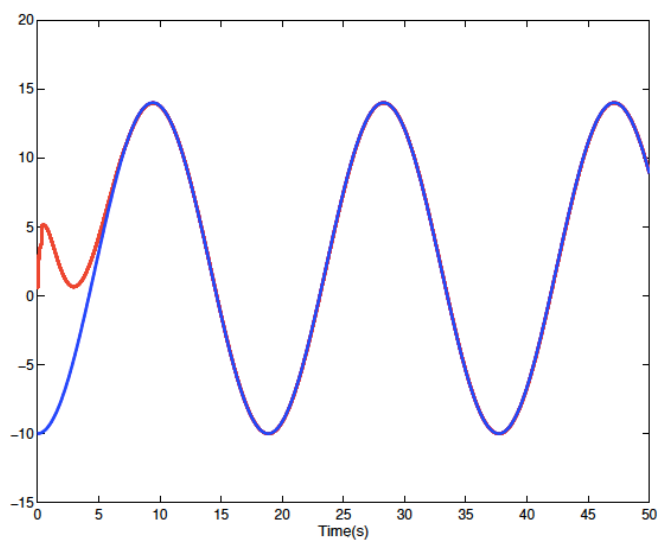


(a)

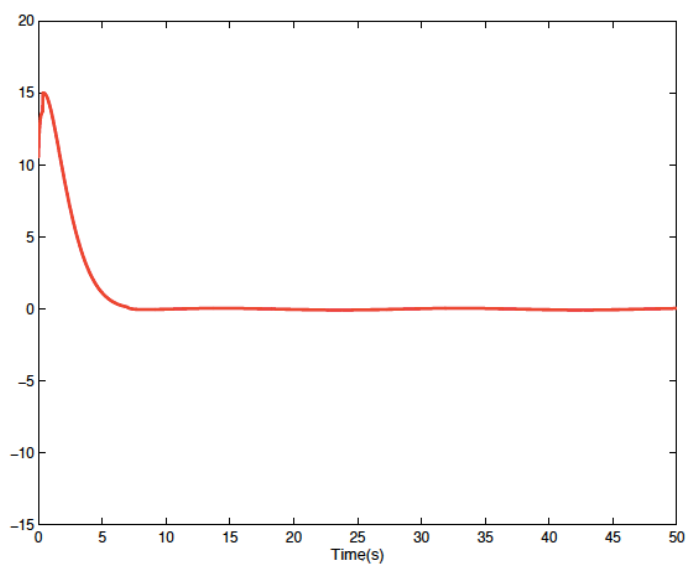


(b)

Фигура 2.13. (a) траектории на x_0 (синя линия) и на медицентъра x_i ($1 \leq i \leq 6$) (червена линия); (b) Грешка в позиционирането между x_0 и медицентъра x_i .

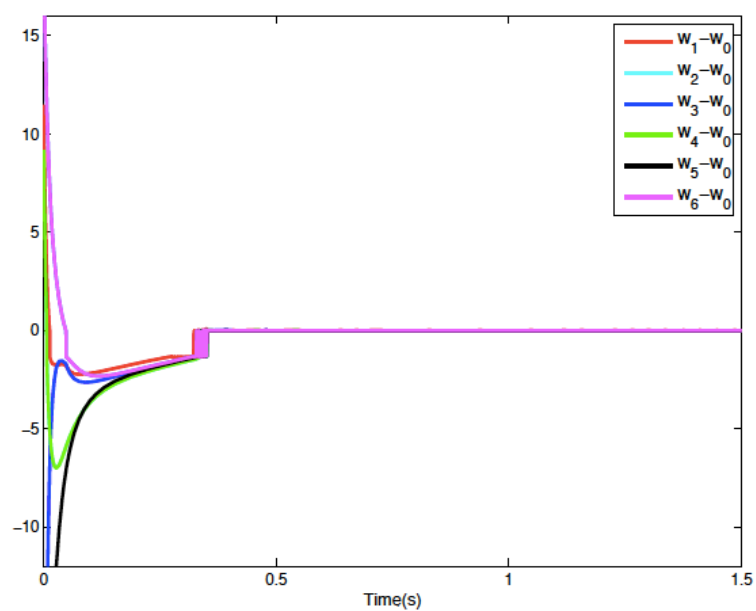


(a)

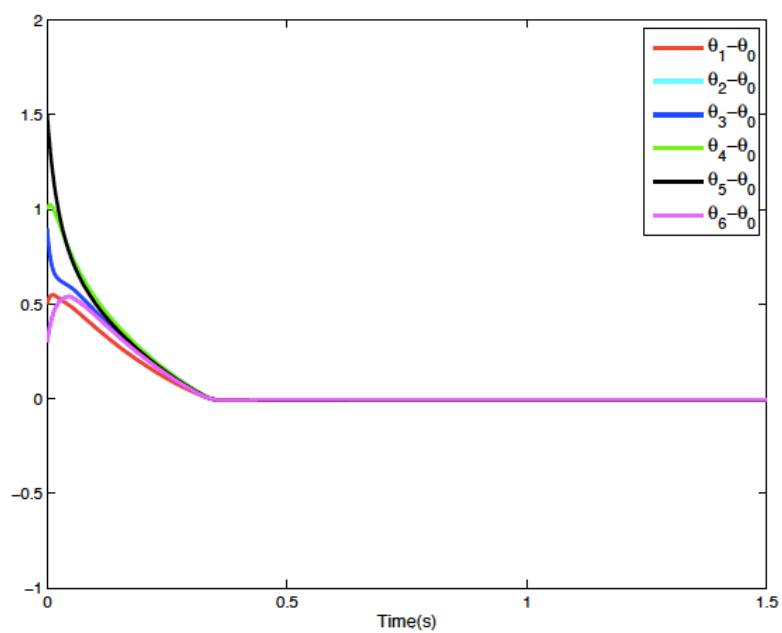


(b)

Фигура 2.14. (a) траектории на y_0 (синя линия) и на медицентъра y_i ($1 \leq i \leq 6$) (червена линия); (b) Грешка в позиционирането между y_0 и медицентъра y_i .



(a)



(b)

Фигура 2.15. Грешки в пътя (a) между w_i ($1 \leq i \leq 6$) и w_0 ; (b) между θ_i ($1 \leq i \leq 6$) и θ_0 .

Глава 3. Иновативен подход за групово управление на мобилни роботи

Въведение

Координацията на множество мобилни роботи получи значително внимание през последното десетилетие. Добре известно е, че множество мобилни роботи, ако работят съвместно под високоефективни организации и принципи, могат да се държат като цяло, с отказоустойчивост и надеждни свойства, [72]. Робо екипа може да изпълнява задачи, които са трудни за един робот.

Някои примери са:

- Групов лов, [73].
- Проучване на големи площи, [74].
- Наблюдение, [75].
- Транспортиране на обекти, [76],
- Задачи за интерферометрия на космически кораби, [77] и много други.

Груповото управление на роботи е получило много внимание през последните години. В литературата са предложени няколко подхода за управление на група роботи, като поведенчески методи, методи на лидер-последовател и методи за виртуална структура, ще назовем само няколко. В поведенческа базирана групова формация, груповото поведение (или мисия) включва някои действия на ниско ниво (или подзадачи) и е конструирано за постигане на глобалната цел, където отделният робот трябва да изпълнява действия на ниско ниво, за да изпълни груповата цел, [76]. При лидер-последовател формация, един робот е определен за лидер, чието движение определя движението на групата, а другите роботи се контролират, за да следват своите лидери с дадените разделяния и лагери, [78]. При формирането на виртуалната структура роботи се държат като частици, вградени в твърда виртуална структура, [79]. Предложени са и други методи, основаващи се на изкуствени потенциали, [80] и теория на графите, [81]. Наскоро беше разработен подход на нова формация, [82], където задачата за формиране е формулирана като линейно-квадратична диференциална игра на Неш чрез използването на графични теории. [83]

прехвърлиха проблема за формиране към проблема за синхронизиращ контрол и беше разработен синхронен контролер, който да конвергира както грешките на позицията, така и синхронизацията (образуването) към нулата при превключване на задачите. Методът на оттеглящ се хоризонт (RH), който също е известен като модерен предсказуем контрол (MPC), има за цел да разреши оптимизационни проблеми на прогнозен хоризонт за управление с входни и ограничения. Основен проблем при използването на прогнозен хоризонт е, че дали такъв openloop контрол може да гарантира стабилност на системата. Беше показано, че инфинитивният прогностичен хоризонт за управление може да гарантира стабилност на системата, но инфинитивният прогнозен хоризонт може да не е осъществим за нелинейна система на практика. Стабилността може също да бъде осигурена чрез добавяне на ограничение на крайното състояние към системата, например, придвижване на крайното състояние до нула, но този подход е отнемащ време, [84]. По-нататъшни изследвания показаха, че в рамките на терминалния регион системата е стабилна, ако функцията на наказателното състояние на терминала е по-голяма от функцията на разходите на линейния контролер за обратна връзка. Последните разработки предполагат, че контролерът за обратна връзка в региона на крайното състояние не е непременно линеен, и следователно предположението, че оптималният контрол трябва да бъде непрекъснат, вече не е необходимо. Беше направен извод, че системата може да бъде стабилна, докато комбинацията от функцията на разходите и първата производна на функцията на наказателното състояние на терминала е по-малка или равна на нула, което дава възможност за контрол на оттеглящия се хоризонт при решаване на неголономни проблемите на стабилизиране по точка, [84].

В подхода на лидер-последовател роботът на формацията, проектиран като водач, се движи по предварително определена траектория, докато другите роботи, последователите, трябва да поддържат желаната поза (разстояние и ориентация) на лидера. Основната критика към подхода на лидер-последовател е, че формацията не толерира недостатъците на лидерите и показва бедни характеристики на отхвърляне на смущения. Въпреки тези недостатъци, подходът „последовател на лидерите” е особено ценен поради своята простота и мащабируемост. Основното предимство на

подхода е, че той редуцира задачата за управление на формацията до проследяващ проблем, при който стабилността на грешката при проследяване може да бъде получена чрез стандартни теоретични техники за контрол.

3.1. Подход/Алгоритъм за формация „следване на лидера“

Първо, ние изучаваме новата управляваща рамка на лидер-последовател с разглеждане на отделянето, носенето и ориентацията между лидери и последователи заедно. С предположението, че всички отклонения на сепарацията, групите и ориентацията са изброени предварително, ние предлагаме две схеми за управление за два робота и три образувания на работи:

- Схема за разделяне-лагерна ориентация (SBOS).
- Схема за разделяне-разделяне-ориентиране (SSOS).

[85] изследва проблема с формирането на лидер-последовател с теорията на графите и предлага две основни схеми за лидер-последовател:

- Контрол на разделянето (SBC).
- Контрол на разделяне-разделяне (SSC).

Основната разлика между нашите схеми и тези на [85] е, че ориентацията ще бъде изрично контролирана в SBOS и SSOS, докато в SBC и SSC ориентацията между лидерите и последователите се контролира имплицитно с помощта на линеаризация на обратната връзка, базирана на определена референтна рамка.

Използването на изричен контрол на ориентацията в SBOS и SSOS ни помага да постигнем по-ефективни дейности по формиране на група от няколко робота. Например, много от съществуващите методи на лидер-последовател не могат да се справят с проблема при формирането, когато роботите се движат назад заедно, което се нарича „проблем на обратното формиране“. Използвайки нашата нова рамка лидер-последовател, този обратен проблем може да бъде решен успешно благодарение на добавянето на изричен контрол на ориентацията към роботите.

Представете си, че роботите са диференциални мобилни работи с не холономни ограничения. Позата на робота, обозначена с

$$p_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$$

е описана с модел на едноцикличен модел, както следва

$$\dot{p}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{bmatrix} v_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_i$$

където x_i и y_i са координати на робота в x-y равнина, θ_i е ъгъл (или ориентация) на робота, а v_i и ω_i са линейни и ъглови скорости на робота.

По-долу ние предлагаме нова рамка за лидер-последовател, за да се справим с проблема за контрол на формирането на нехолономни мобилни роботи, както е определено по-горе. Рамката ще съдържа генериране на желаните позиции на последователите на базата на необходимите взаимоотношения между лидер и последовател, дизайн на управлението на движението с отчитане на холономните ограничения на роботите и включването на схемата за отдалечаване на хоризонта към роботския контролер, за да се постигне бързо процент на конвергенция при грешки при проследяването на формирането.

Генериране на желана позиция на последователите

За да се гарантира, че последователите поддържат желаното отклонение на разделянето, носенето и ориентацията по отношение на лидерите, ние предлагаме две контролни схеми за извличане на желаните позиции на последователите.

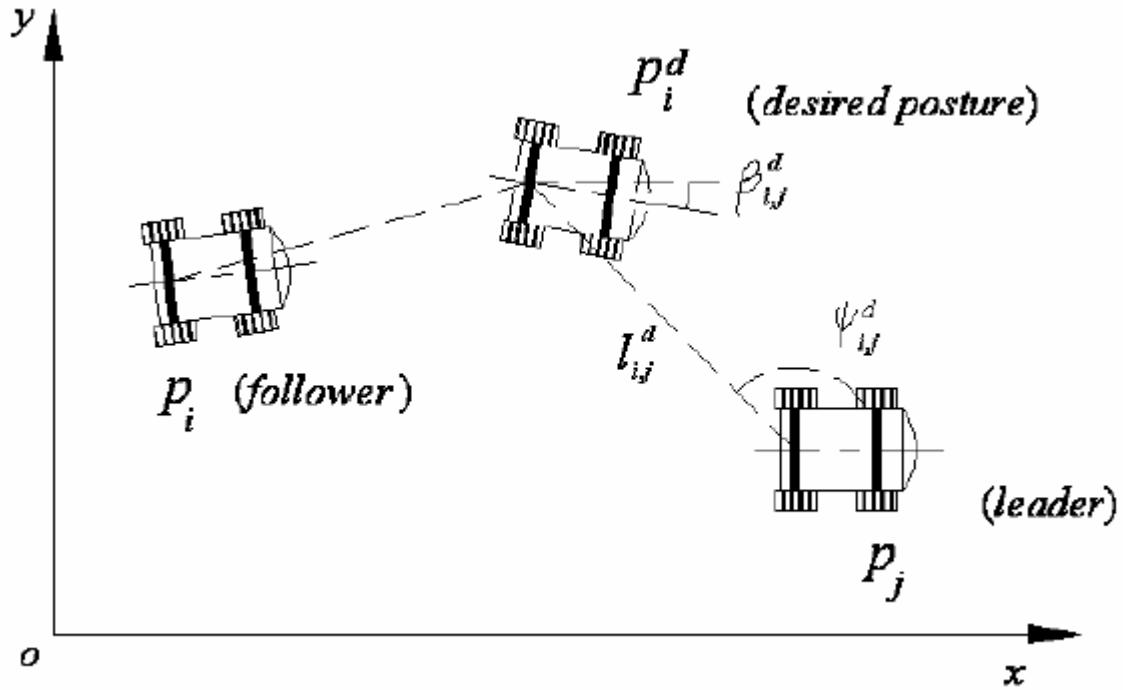
Двете схеми са:

- SBOS за дву-роботни формации.
- SSOS за три-роботни формирования.

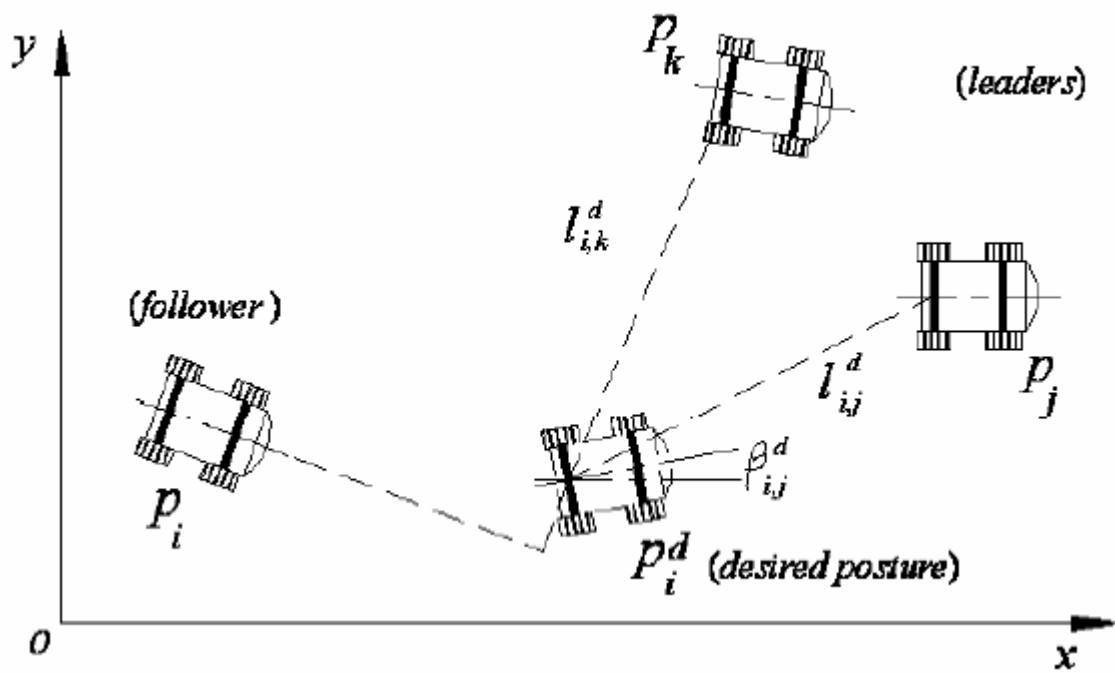
SBOS

Представете си дву-роботна конфигурация с определени лидер-последователи връзки $G_i = LF(R_j \leftarrow R_i)$, както е показано на фиг. 3.1. По схемата “лидер-последовател“ SBOS, R_i следва R_j с дадено отклонение $l_{i,j}^d$, ъгъл $\psi_{i,j}^d$ и отклонение в ориентацията $\beta_{i,j}^d$. Ge.dkdjd mfpr[rs $p_i^d = [x_i^d \ y_i^d \ \theta_i^d]$ на последователя R_i се дава с

$$p_i^d = \begin{bmatrix} x_i^d \\ y_i^d \\ \theta_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j + l_{i,j}^d \cos \psi_{i,j}^d \\ y_j + l_{i,j}^d \sin \psi_{i,j}^d \\ \theta_j + \beta_{i,j}^d \end{bmatrix}$$



Фиг. 3.1. Дву-роботна конфигурация



Фиг. 3.2. Три-роботна конфигурация

SSOS

Представете си три-роботна конфигурация, както е показано на фиг. 3.2,

където $G_i = LF((R_j R_k) \leftarrow R_i)$.

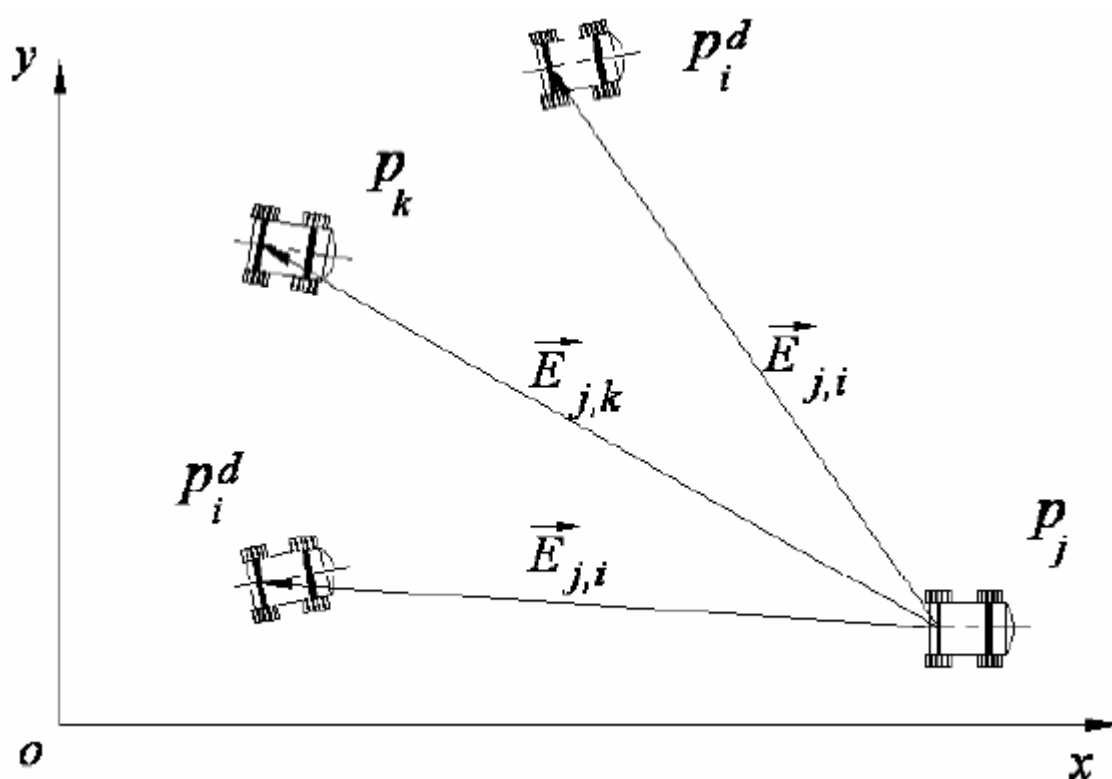
По схемата „лидер-последовател“ SSOS, R_i трябва да заеме позиции $l_{i,j}^d$ и $l_{i,k}^d$ с насока към R_j и R_k , съответно, и междувременно да поддържа отклонение в ориентацията $\beta_{i,j}^d$ с насока към R_j . Желаната позиция на R_i се определя от

$$p_i^d = \begin{bmatrix} x_i^d \\ y_i^d \\ \theta_i^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b_i \pm (b_i^2 - 4a_i c_i))/a_i \\ (M_i - \Delta x_i x_i^d)/\Delta y_i \\ \theta_j + \beta_{i,j}^d \end{bmatrix}$$

където $M_i = 1/2[(x_j^2 - x_k^2) + (y_j^2 - y_k^2) - (l_{i,j}^d)^2 + (l_{i,k}^d)^2]$,

$$\Delta x_i = x_j - x_k, \Delta y_i = y_j - y_k \text{ и}$$

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2) \\ 2(M_i \Delta x_i - \Delta y_i (\Delta x_i y_j - \Delta x_j y_i)) \\ (M_i - \Delta y_i y_j)^2 - (\Delta x_j y_i)^2 - (\Delta y_i l_{i,j}^d)^2 \end{bmatrix}$$



Фиг. 3.3. Посоки на вектори

Тук желаната позиция зависи едновременно от $l_{i,j}^d$ и $l_{i,k}^d$.

За да се определи решение p_i^d , трябва да се сравнят посоките на двата вектора $\vec{E}_{j,i}$ и $\vec{E}_{j,k}$, както е показано на фиг. 3.3, които са дефинирани с

$$\begin{cases} \overrightarrow{E_{j,i}} = ((x_i^d - x_j), (y_i^d - y_j)) \\ \overrightarrow{E_{j,k}} = ((x_k - x_j), (y_k - y_j)) \end{cases}$$

Това дава критерий

$$N = (x_i^d - x_j)(y_k - y_j) - (x_k - x_j)(y_i^d - y_j).$$

Когато R_i^d е вляво от $\overrightarrow{E_{j,k}}$, се избира x_i^d от двете възможни решения, тъй като $N > 0$. Само едно решение от x_i^d води до $N > 0$.) Когато R_i^d е вдясно от $\overrightarrow{E_{j,k}}$, се определя x_i^d при $N < 0$.

За да се гарантира, че последователите поддържат желаното положение, отклонение и ориентация по отношение на лидерите, ние предлагаме два контролни режима .

Двете схеми са:

- SBOS за дву-роботни формации и
- SSOS за три-роботни формирания.

Предложения подход комбинира метод за автономна навигация и локализация съвместно с метод за управление на последователите, чрез разработените контролери в Глава 2.

Функциите на системата за навигация и локализация са:

- определяне позициите на лидера и последователите.
- генериране на управляващи команди към лидера.
- намиране на оптимален път и избягване на препятствия.

Функциите на системата за управление на последователите са:

- Прочитане на данните за местоположението на всеки от роботите
- Изпълнение на разработените контролери за управление на последователите

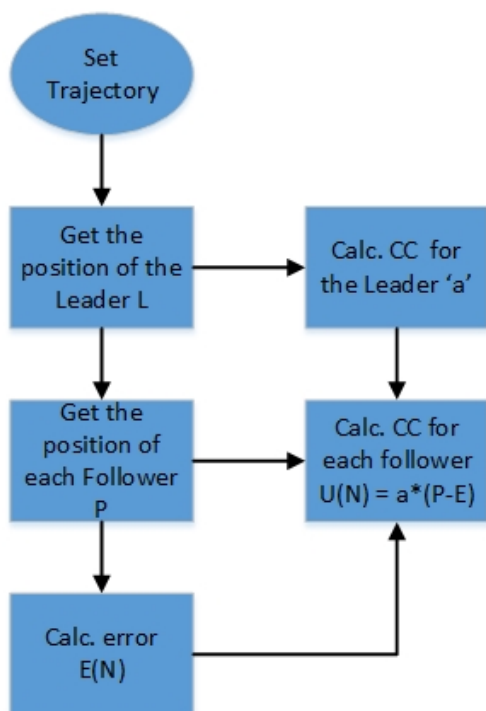
Предложеният алгоритъм има за цел да установи последователността на процеса на групов контрол, както и да подобри движението на мобилните роботи. Разбира се, за да се приложи такъв алгоритъм, трябва да бъдат изпълнени определени предварително определени критерии.

Критериите са както следва:

- Трябва да има математическия модел на роботите;
- Трябва да се определят грешките на одометрията;
- Трябва да се настрои контролери за управление на всеки робот;

Ако приемем, че всички роботи, които използваме, ще имат еднакви мобилни платформи, съответно, те ще бъдат контролирани по същия начин, ще трябва да се изчислят съответните параметри само за един робот и да бъдат използвани за всички. Това ще намали необходимостта от голяма изчислителна мощност, което е недостатък на този тип групов контрол. Предложеният алгоритъм е показан на фигура 3.4.

Всички роботи са свързани в една и съща Wi-Fi мрежа, за да могат да комуникират помежду си. Водещият робот получава данни от сензорите на другите роботи и след това изпраща обратно контролна команда. За реализиране на предложения алгоритъм използваме Robot Operating System (ROS). В ROS можем да използваме Web socket протоколи за изпращане и получаване на данни. Всеки робот е представен като ROS „възел“. Това означава, че лидерът ще изчисли контролните параметри за всеки последовател и ще ги изпрати за изпълнение. Всеки последовател ще бъде номериран. Номерирането е както следва: четните числа ще бъдат от дясната страна, а нечетните - от лявата страна.



Фиг. 3.4. Алгоритъм „лидер-последовател“

За автономната навигация използваме ROS Navigation Stack. Той осигурява функции и алгоритми за картографиране и автономна навигация. Когато разполагаме с роботизирани модели и контролери, ние ги поставяме в навигационните алгоритми, които навигацията е готова за използване. Лидерът ще следва траекторията от навигационния стек и другите агенти ще следват същата траектория, като добавят съответното отместване. Грешката ще бъде изчислена чрез определяне на локализацията на всеки робот според локализацията на лидера. В случай на откриване на препятствие, формацията ще следва траекторията на лидера без отместване и номерацията ще извърши последователността.

3.2. Комуникационна система за управление на група мобилни роботи

В повечето статии са засегнати проблемите при реализиране на алгоритмите за изпълнение на дадена формация. Предлагат се математически модели на изпълнение,

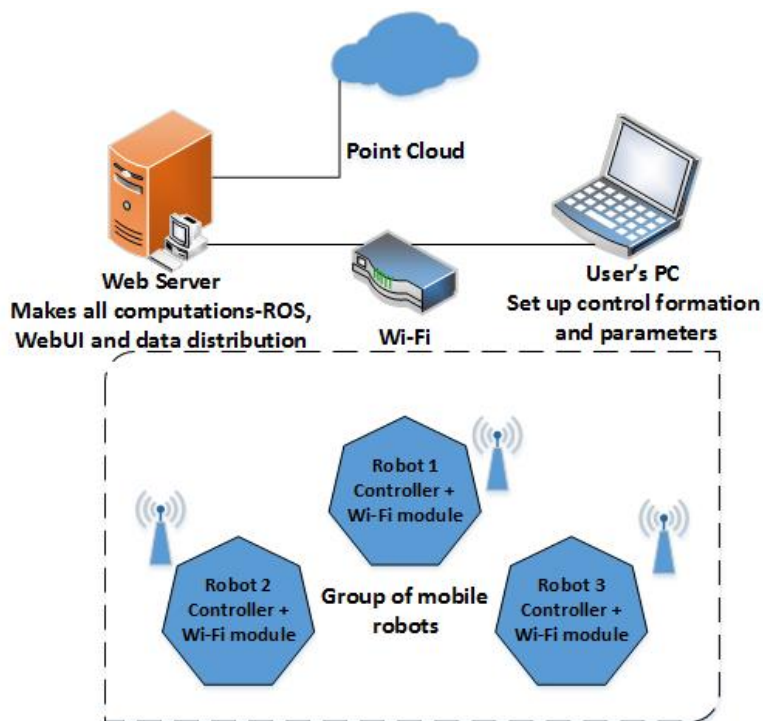
но липсва информация и модели на физическото изпълнение – хардуерните системи, комуникацията, обработването, разпределението и изпълнението на разработените алгоритми и модели. Предложените в статията системи за управление имат за цел да задоволят изпълнението на двата основни вида структури за групово управление описани по-горе. Тези системи, както и комуникационната система трябва да осигурят приложение на различните методи и алгоритми за групово управление.

3.3. Система за управление на централизирана контролна структура

Този тип система трябва да може да удовлетвори критериите за изпълнение на централизирана структура за управление на група от мобилни роботи. Разработената система се базира на принципа на безжичната комуникация чрез Wi-Fi мрежа. На фигура 3.5 е показана блок схема на системата за управление при централизирана структура.

Предлаганата система има следния принцип на работа. Компютъра на лидера е изнесен под формата на външен сървър, който да притежава достатъчно изчислителна мощ за голям обем от изчисления. А самия лидер може да бъде всеки от групата роботи. Лидера се превръща в символичен лидер, който да бъде следван. Всички роботи се свързват към безжичния рутер и така си комуникират с главния компютър-сървър. На този компютър се стартира локален сървър, който да се грижи за разпределението на данните и за осигуряване на потребителски интерфейс за дистанционно управление. Това дава възможност за дистанционно управление и наблюдение на поведението на роботите от външен компютър.

Относно хардуера на роботите, те трябва да са оборудвани с контролер, модул за безжична комуникация и съответните сензори и изпълнителни механизми. Всеки робот се управлява от сървъра и може да се движи независимо от останалите. Номерацията и подредбата може да бъде направена според желанията на потребителя.



Фигура 3.5. Система за управление на централизирана структура от мобилни роботи

Софтуерното осигуряване е базирано на операционната система Ubuntu и операционната система за управление на роботи ROS. Операционните системи за инсталирани на сървърния компютър. За изчисление на поведението и управлението на всеки робот се изпълнява по един самостоятелен възел в ROS. За управление на мобилните роботи се използва софтуер според техните контролери.

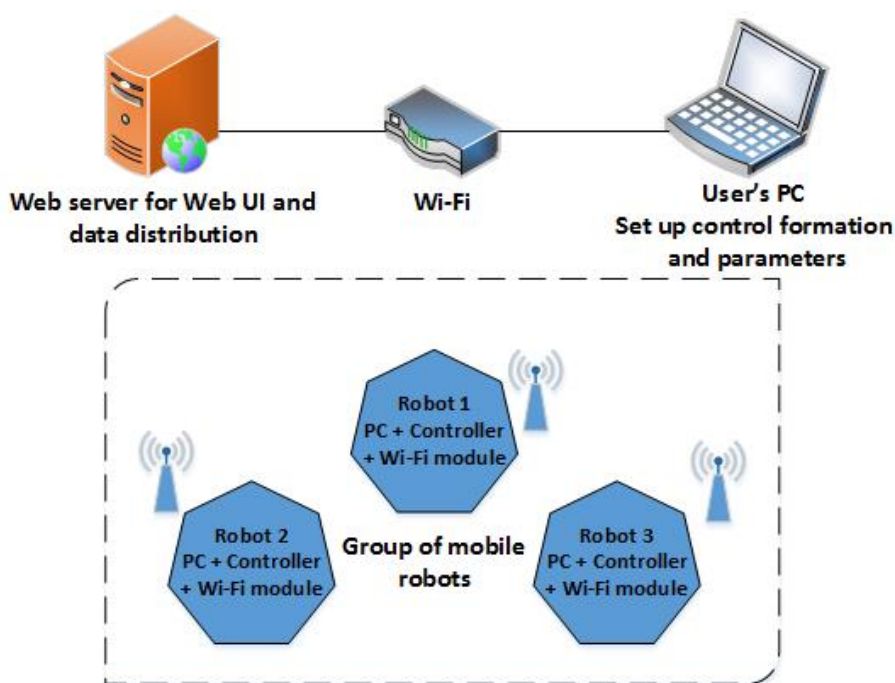
В конкретния случай се използва контролер Arduino и Wi-Fi модул предназначен специално за контролера. Софтуера е програма на езика на Arduino, която приема получените пакети от сървъра, изпраща обратно пакети от сензорните данни на робота и управлява моторите.

При необходимост, сървъра и рутера могат да бъдат поставени на един от мобилните роботи. Разбира се ако той е достатъчно голям и мощен за да ги носи.

Така тази система може да бъде напълно мобилна и да позволи дори работа на открито.

3.4. Система за управление на разпределена контролна структура

При тази система всеки робот трябва да изчислява сам своята локация и управление. Представената система на фигура 3.6 реализира връзката между мобилните роботи и оператор. Като допълнение е добавен Уеб сървър, който се грижи за реализиране на комуникацията и са разпределяне на данните през потребителски интерфейс.



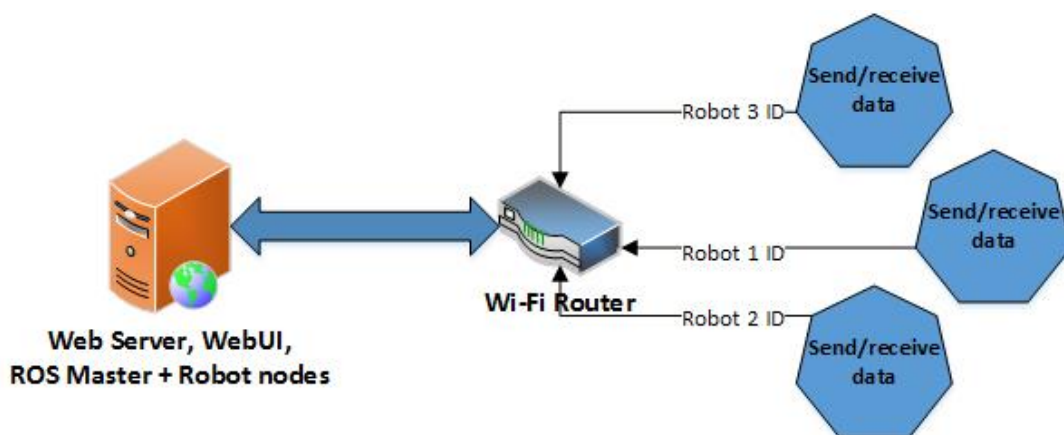
Фигура 3.6. Система за управление на разпределена структура от мобилни роботи.

Така изпълнена системата позволява роботите да комуникират помежду си. Така може да се подобряват алгоритми и да се добавят допълнителни връзки за по-добро позициониране и управление. Освен това данните от роботите могат да се записват директно на сървър, в слушай например на заснемане на големи обекти или местности. Така няма опасност да се изгубят важни данни или информация.

Всеки робот е оборудван със собствен компютър или контролер (може да се използва мощен контролер като Raspberry Pi), на който да се изпълнява Ubuntu и ROS. Други важни модули са Wi-Fi модул, контролер, сензори и изпълнителни механизми. Тук всеки робот се управлява от собствен ROS Master. Това разбира се значително намалява изчислителните изисквания. Тази система позволява и свързване на голям брой роботи, ограничението идва от характеристиките и възможностите на използвания рутер.

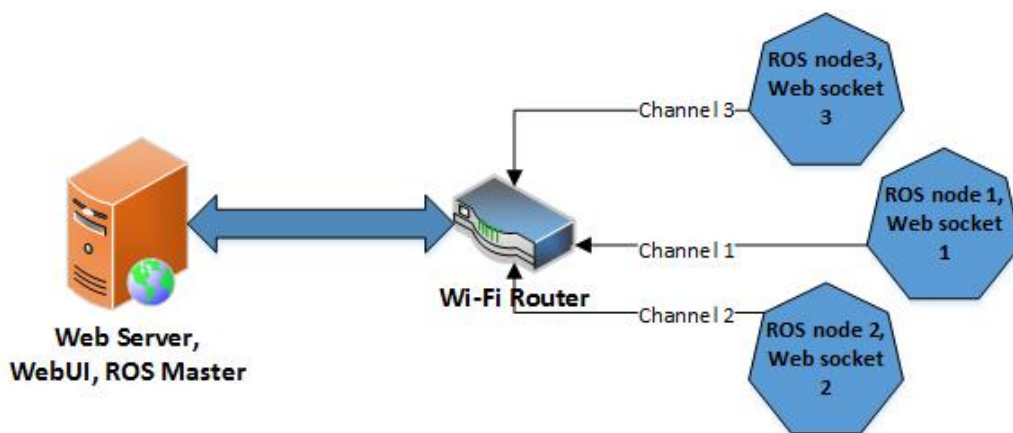
3.5. Комуникация и обмен на данни

Комуникацията и при двете системи се реализира на принципа на Wi-Fi мрежа. Всички роботи се свързват в локална безжична мрежа. При централизираната система готовите команди от сървър се формират като пакети и се изпращат към всеки от роботите. За всеки робот се използва идентификация според конкретен номер. Така данните се разпределят според получателя. Също така изпратените данни от роботите също са с съответния номер за да се разпределят в конкретния възел за обработка – фиг. 3.7.



Фигура 3.7. Комуникация при централизирана система за управление.

При тази схема на комуникация всеки робот се абонира към сървъра чрез уеб сокет. Всеки уеб сокет е на различен канал, така че да се получи много поточност. За подобряване на разпределението и управлението на сървъра може да се стартира ROS Master. Така може да се добавят допълнителни функции и свойства към управлението (фигура 3.8).



Фигура 3.8. Комуникация при разпределена система за управление.

3.6. Симулационна среда Webots.

Webots е основен симулационен софтуер, използван за изследователска дейност и е особено популярен за мобилни роботи. Симулационната му среда е изцяло базирана на езика за виртуално моделиране Virtual Reality Modeling Language (VRML). Поради тази причина потребителите намират с VRML допирни точки при оформяне на сценарии. В тях се съдържа цялата необходима информация и симулация на 3D. Съставен е от списъци с ключови възли, съдържащи стойности или информация. Възлите могат да бъдат лесно управлявани чрез контролерите от интерфейса на Webots. Ако сценарият се изменя, кодовете от файл тип '.wbt', които са генерирани от Webots респективно се променят. Тези кодове, са всъщност VRML кодове с малки разлики. С други думи, софтуера позволява на потребителя да използва VRML кодове. Симулационният робот и средата трябва да бъдат изградени от самото начало. Основният темплейт се състои от навигационен възел и шахматобразна повърхност.

Гъвкав симулатор Khepera II е бил разработен от Webots за да поддържа разследването на контролерите Q-Learning. На основа на Webots, който след това е комбиниран с Managed C++ във Visual Studio 2002 и Matlab 7.1, е разработен симулатор изцяло с контролери GUI, който притежава следните характеристики:

- Гъвкавост в промяната на позицията и ъгъла на ориентация на сензорите.
- Следене на позицията в симулацията в реално време
- Създаване на дефиниран от потребителя лабиринт, който се обвързва с робота чрез натискане и привличане.
- Възможност за избор на текстурата на пода и стените, което е полезно за роботи с визуални способности.
- Дисплей показващ изходните данни от IR сензорите и енкодерите на колелата в реално време .
- Запис на траекторията на робота.

- Възможност за добавяне на камера и захващащи пособия към мобилния робот.

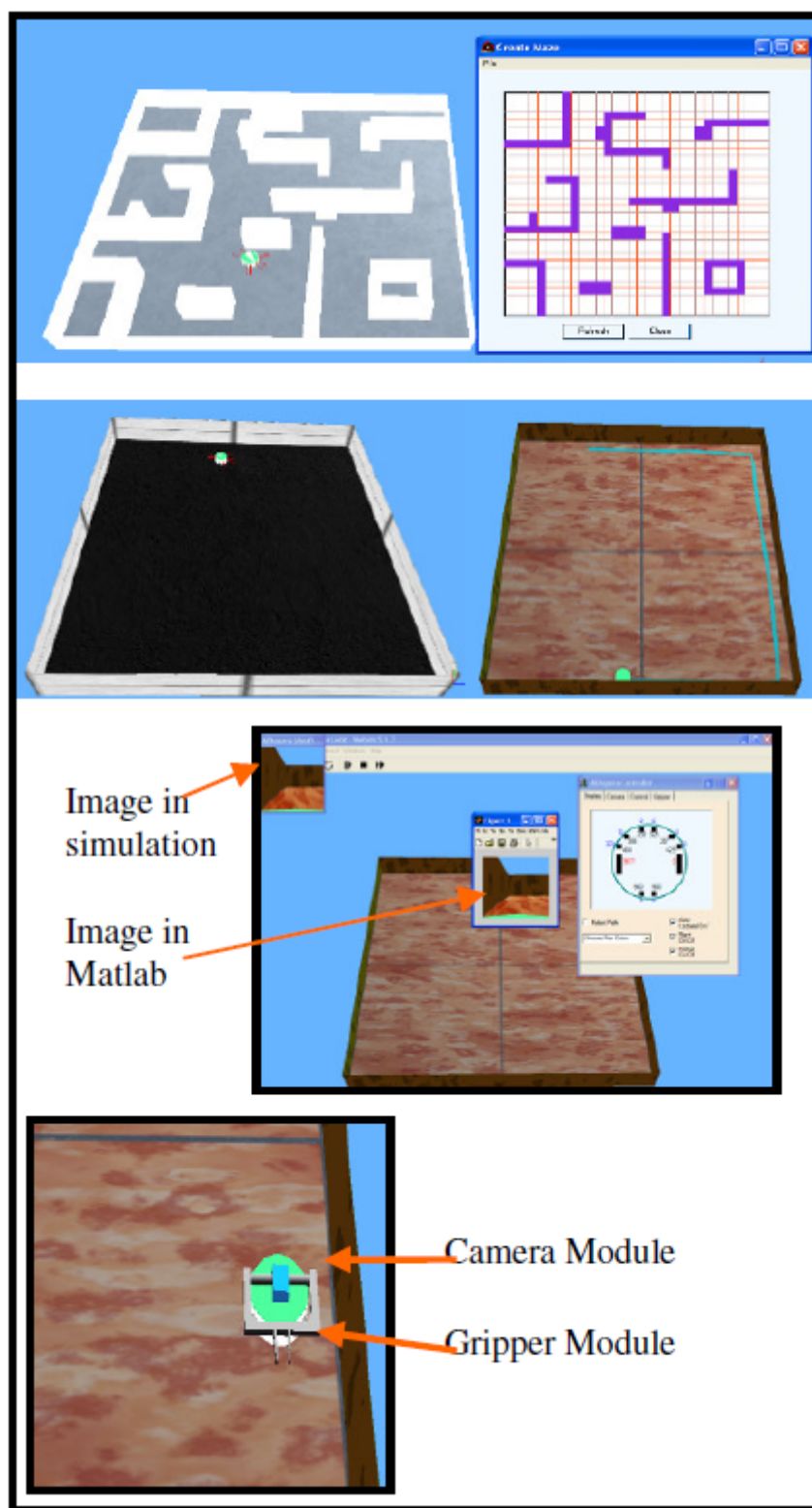
Фиг. 3.9. илюстрира някои от гореспоменатите способности на симулатора. Той е единствено полезен за тестване на контролерите по време на разработката и в крайна сметка тези контролери трябва да се валидират на истинския робот, за да се докаже че реално работят. Най-често използвания метод е чрез кръстова компилация. Въпреки, че тези прорами позволяват на робота да се движи самостоятелно и използват пълната изчислителна мощност на процесора, могат да се компилират само със C програми. Тъй като системата не е разработена изцяло на C, през Webots се възмущства дистанционният контрол. В този режим, вместо да се контролира роботът в симулацията, Webots контролира истинския робот превеждайки командите според протокола Khepera. За да бъдат направени експериментите по-удобни, комуникационният кабел е заменен с безжична комуникация спрямо разширение на Khepera II чрез безжичен модул.

При настроен симулатор е много лесно да се тестват различни видове алгоритми за контролерите за робота, за да се осигури правилното му поведение в реална ситуация.

Webots Симулация

Webots Симулацията се състои от следните елементи

1. Webots *world* файл (.wbt) който дефинира един или няколко робота и тяхната среда. Файлът понякога зависи от външен файл PROTO (.proto).
2. Една или няколко програми за робота (C/C++/Java/Python/MATLAB).
3. Опционален плъгин, който се използва за промяна на обичайното поведение на Webots (C/C++)



Фиг. 3.9. Възможности на симулатора

Какво е World?

World (Свят) във Webots, е 3D описание на характеристиките на робота и тяхната среда. Съдържа описанието на всеки обект: позиция, ориентация, геометрия, външен вид (като цвят и осветеност), физично описание, вид и др. Worlds са организирани като йерархични структури където обектите могат да са съвкупност от други обекти (както при VRML97). Например роботът може да притежава две колела, сензор за разстояние и приставка с камера. World файлът не съдържа кодът на контролерите за робота, а само уточнява името на контролера, който се отнася към този робот. Файловете са с разширение ".wbt" и се съхраняват в поддиректория "worlds" на Webots проект

Какво е Контролер?

Контролерът е компютърна програма, която управлява определения в world файл робот. Контролерите могат да бъдат написани на всички програмни езици, които софтуерът Webots поддържа (C, C++, Java, Python or MATLAB). Когато симулацията започне, Webots стартира съответните контролери, всеки като отделен процес и асоциира процесите от контролерите към симулационните роботи. Няколко робота могат да приемат еднакъв контролен код, но за всеки от тях ще стартира отделен процес.

Някои програмни езици, трябва да бъдат компилирани (C и C++) а други трябва да бъдат интерпретирани (Python и MATLAB), в Java се налагат и двете. Например в C и C++ контролерите са компилирани като зависими от платформата, бинарно изпълними (като ".exe" в Windows). Python и MATLAB контролерите се интерпретират от съответни системи по време на изпълнение (които допълнително се инсталират). Java контролерът трябва да се компилира в битов код controller (".class" или ".jar" файл) и след това да се интерпретира от Java Virtual Machine.

Сорс и бинарните файлове на всеки контролер се съхраняват заедно в директория с контролери. Тя се намира в поддиректория "controllers" на всеки Webots проект.

Какво е Супервайзър Контролер?

Супервайзър контролерът е контролерът на робот, на който полето `supervisor` е зададено като `TRUE`, той може да извършва операции, които обикновено се извършват от човек, а не от истински робот. Той може да бъде написан на всеки от гореспоменатите програмни езици. Въпреки това, се различава от обикновения контролер на робота, защото има достъп до привилегировани операции, които включват контрол на симулацията. Например придвижване на роботите на произволна позиция, заснемане на видео по време на симулацията и др.

Webots характеристики

Точна физическа симулация — реалистичната симулация разчита на калибрани модели.

Webots се базира на разширената версия на физическия двигател ODE който е подобрен в няколко аспекта:

Подобрено е изчислението на контактните точки за да се осигури по-точни взаимодействия и да се увеличи стабилността.

Основната цилиндрична геометрия е преработена от начало за да се избегнат сблъсъци и проблеми в стабилността.

Добавени са прости характеристики свързани с динамика на течностите, за да се улесни симулацията на дроните и подводните роботи.

Вкарани са различни оптимизации, включително multi-threading.

Различни симулационни модели са предоставени в Webots и калибрани

срещу дублиране. Това включва различни обекти, сензори и роботи. Процесът на калибриране се състои в настройване на физичните параметри на обектите и устройствата за да действат като физичните си двойници. Тези физични параметри включват разпределение на масите, коефициенти на триене, гранични стойности, пружинни коефициенти и др. Потребителите могат да калибрират свои собствени модели, за да си осигурят реалистични симулационни резултати.

Webots позволява бързото построяване на различни механични особености на робота, включително:

- Артикулирани роботи (с крака, ръце)
- Роботи на колела (Ackermann коли, диференциално шофиране)
- Летящи роботи (квадрокоптери, хеликоптери, самолети)
- Плуващи роботи (лодки, подводници)
- Модулни роботи (базирани на механичен конекторни устройства, които се отключват и заключват)

Съществува възможност за симулации с различен тип роботи в една и съща симулационна ситуация.

Библиотеки от роботи, сензори, задвижващи устройства и обекти — построяване на блокове в симулационна среда

Webots съдържа библиотеки с калибрирани модели, които могат да се използват в собствени симулации или да се използват за обогатяване на лични такива:

Роботи:

- NAO,
- PR2,
- Atlas,
- Pioneer 3-DX,
- Robotis OP2,

- e-puck,
- Thymio II,
- Aibo и др.

Сензори:

- Камера,
- Лидар,
- Сензори за разстояние,
- Радар,
- GPS,
- Акселометър,
- Жироскоп,
- Радиоприемник и други.

Задвижващи устройства:

- Ротационни и линейни мотори,
- Серво,
- Хващач,
- Радиопредавател,
- LED,
- Дисплей и др.

Обекти:

- Стена,
- Врата,
- Кутия,
- Стол,
- Диван.
- Халдилник.
- Растения.
- Камъни.
- Футболно игрище и др.

Import / Export — CAD модели, OpenStreetMap, филми, уеб.

За да бъде отворен към реалния свят, Webots предлага няколко вградени функционалности:

Импорт на 3D модели чрез VRML97 от популярни софтуери за моделиране (SolidWorks, AutoCAD, Blender, etc.).

Импорт на карти от OpenStreetMap, GoogleMaps, включително данни за терена.

Импорт на снимки за персонализиране на моделите чрез файлове в JPEG или PNG формат.

Функционалностите за експорт включват:

Експорт на филми във формат MP4 за разпространение на симулационните резултати и качването им в youtube.

Експорт на екранни снимки в JPEG или PNG формат.

Експорт на 3D анимации чрез X3D модели, които се изобразяват на уебстраница с 3D навигация.

Експорт на 3D симулации в интернет пространството, като Webots работи като бекенд, robotbenchmark.net.

API и Плъгини — програмни езици, интегрирана среда за разработка, редактор

Webots предлага различни програмни допълнения за управление на робота:

C: API функции

C++: API документация

Python: API документация

Java: API документация

MATLAB: API документация

ROS: API документация

TCP/IP: интерфейс на всеки контролер на робота, който работи дистанционно

Подобно на програмирането на робота, потребителят може да програмира симулационния супервайзър който да управлява дейностите по време на симулацията, като да мести обекти, задава позиции на роботите, запазва траекторията на робота и пр.

Също е възможно да се програмира Физически Плъгин, за персонализиране на физичната част от симулацията, като например да добавя допълнителни външни сили или да управлява възможния контакт с външни обекти,

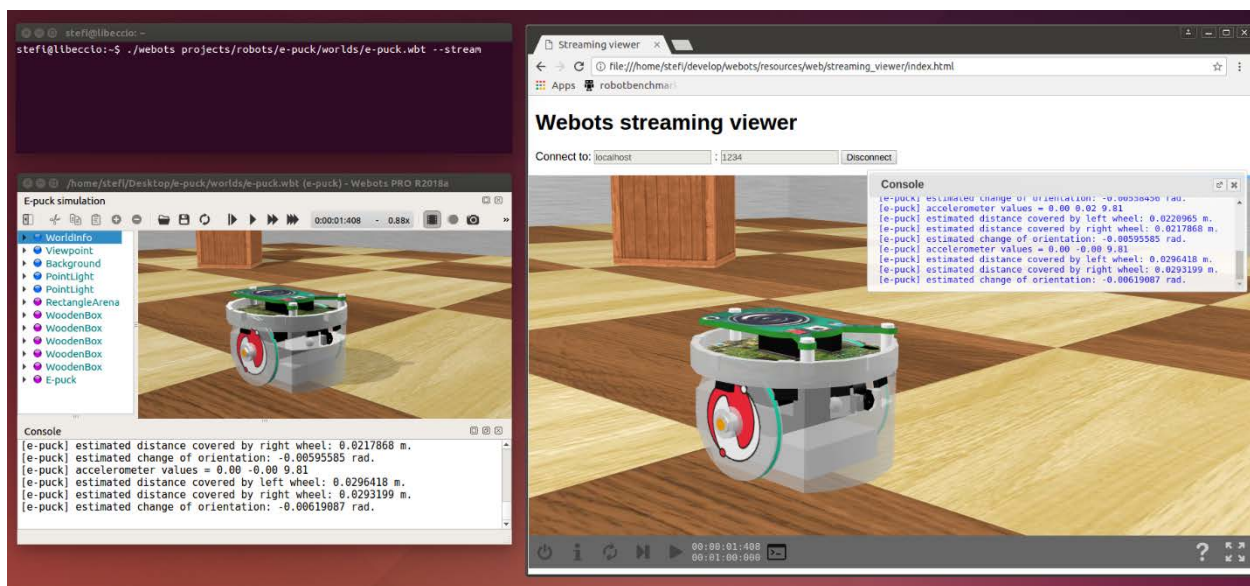
Всички тези интерфейси са достъпни през интегрираната работна среда на Webots (IDE) която включва и сорс-код и сценариен редактор.

Различни платформи — Windows, Linux, macOS (и други)

Webots е приложим за Windows, Ubuntu Linux и macOS.

Работи доста добре на стандартен лаптоп, но пълните му способности се проявяват на настолна машина, оборудвана с модерна графична карта. Нужните характеристики на машината са описани в Системните Изисквания на Webots.

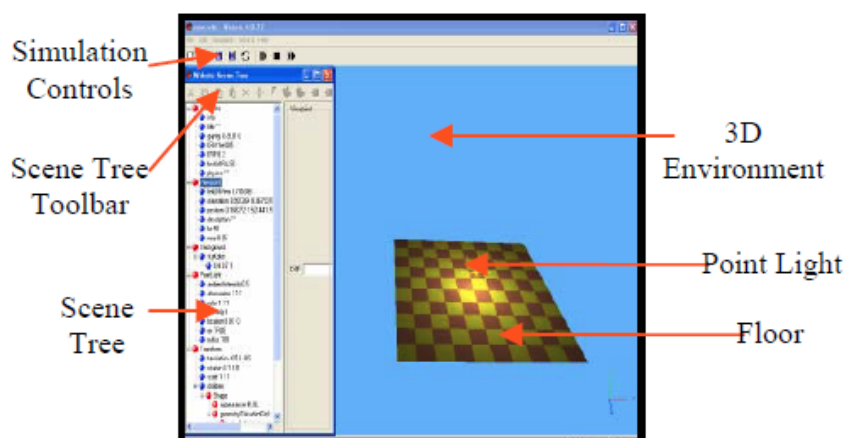
Уеб интерфейса на Webots за 3D модели, 3D анимации и 3D симулации работи при всички нови iOS и Android таблети и телефони – фиг. 3.10.



Фиг. 3.10. Уеб интерфейс, моделиране и симулация

3.7. Моделиране на робот в webots

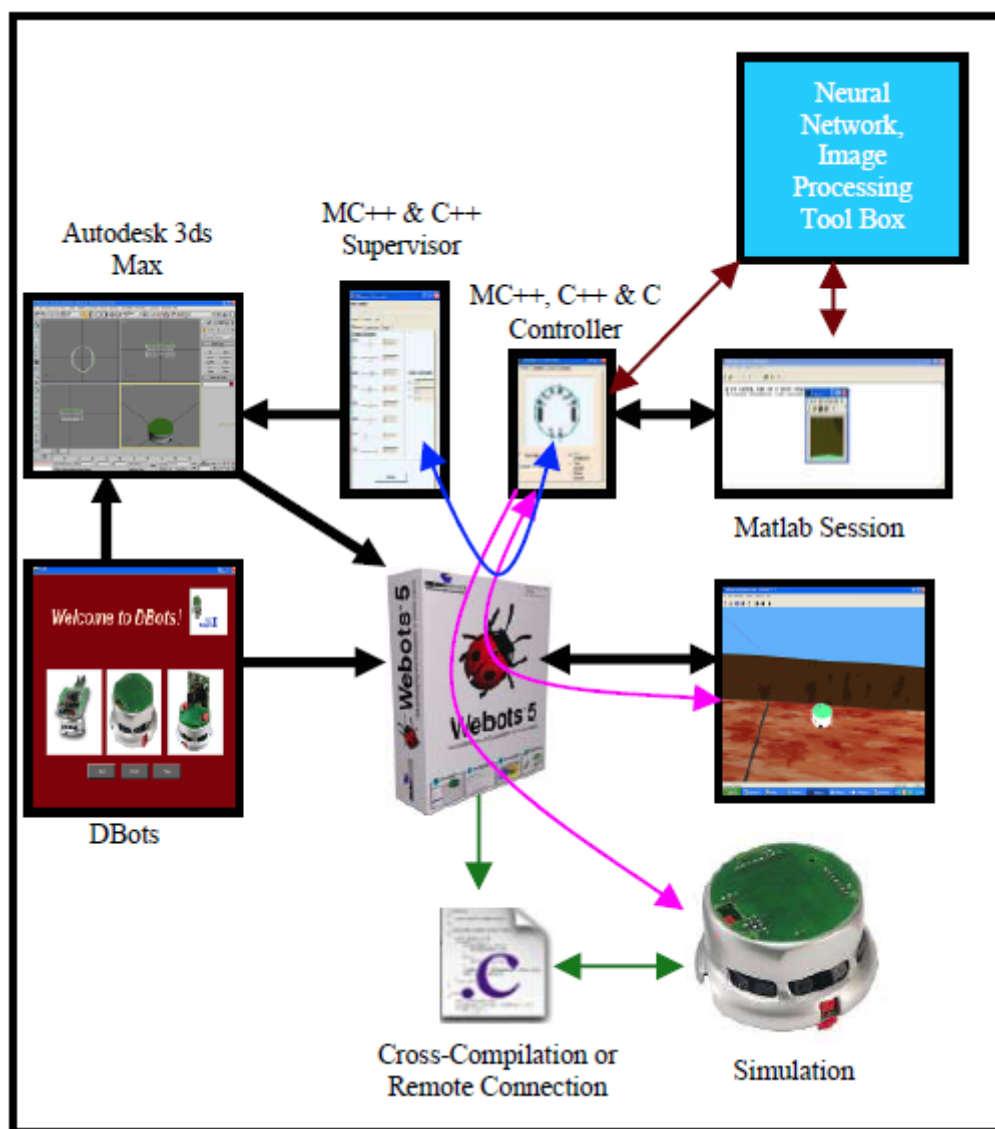
Симулационната среда в Webots е изцяло базирана на Virtual Reality Modeling Language (VRML). Като такава, съществуват многобройни приложения подобни на VRML възлите. По точно, те са същите приложения, но представени в дървовидна структура, по-известна като “scene tree”. Съдържа всичката информация необходима да се опише графична презентация и симулация на 3D. Представява списък с възли, всеки от който съдържа полета със стойности или други възли. Възлите могат да бъдат добавяни, изваждани или обработвани много лесни чрез контролерите. Тъй като “дървото” се променя, съответно кодовете в ‘.wbt’ файла, които се генерират от Webots се сменят. Кодовете в ‘.wbt’ файл са всъщност VRML кодове с малки разлики. С други думи, Webots позволява на потребителя да пише с VRML кодове при конструирането на алгоритъма. При началното отваряне на файл в Webots, се зарежда основен темплейт съдържащ навигиращ възел и шахматна повърхност. Фиг 3.11 показва развитието на средата, а Фиг 3.12 показва развитата система.



Фиг. 3.11. Развитие на средата

Моделиране на робот Khepera II Mobile

В този проект е симулиран Khepera II. Така крос-компилирането и дистанционният контрол ще бъдат директно внедрени. Още повече, че Khepera II е много популярен инструмент, тъй като е проектиран като изследователско и обучително средство в рамките на Swiss Research Priority Program. Въпреки че Webots поддържа дизайна на сложни обекти чрез гъвкав набор от възли под формата на точки, линии и повърхнини, задачата е изключително времеемка. За това 3DS Max е авторизиран с дизайна на Khepera II, както е показано на фигура 3.12. Други 3D системи за моделиране също могат да бъдат използвани, стига да притежават способността да експортират моделите във VRML97 формат. Само прости обекти, които могат да се генерират директно от Webots. Figure 5 изобразява модела Khepera II моделиран чрез 3ds Max.



Фиг. 3.12. Развита система

След като роботът е моделиран, бива експортиран във формат VRML97 и импортиран в Webots към възела DifferentialWheels. За да бъде завършен Khepera II в Webots, 8 инфрачервени и светлинни сензори се поставят около робота.

Моделиране на симулационната среда

След успешното завършване на модела Khepera II, се построяват стените, така че той да не избяга в 3D пространството. Всички четири страни се построяват чрез кутии. Въпреки че могат да бъдат графично изобразени на екрана, това не значи, че роботът не може да избяга. За да се избегне това, трябва да се дефинират гранични обекти за всеки подвижен обект, включително Khepera II. Оформлението на тези обекти е сведено до прости форми като кутия, цилиндър и сфера. На този етап една проста среда е построена и роботът е въведен в нея. Всички обекти са статични, освен роботът, въпреки че той не може да се движи без контролната програма. Статичната среда не е желателна, за това се развиват гъвкавостта на симулацията, супервайзър и контролерите на робота.

Програма за Супервайзър Контролер

Супервайзър контролерът има изпълнителни права, които се ограничават единствено от симулационната среда. Възможно е да притежава повече задължения от колкото робота. Супервайзърът може да премества или завърта всеки обект от симулацията, да приема и изпраща съобщения чрез приемник и предавател и да следи координатите на определен обект. Най-общо, той отговаря за цялата симулация с някои изключения. Като допълнение, той може да прави заснемания по време на симулацията, които се съхраняват във формат '.jpg' или '.png'. Всичко това може да се постигне ако програмата за супервайзър контролера е написана за конкретната симулация.

Използване на ROS

ROS (Robot Operating System) е структура за разработване на софтуер за роботи, осигуряваща функционалност на операционна система като завършек на хетерогенен компютърен клъстер. ROS оригинално е създаден през 2007 от Stanford Artificial Intelligence Laboratory. От 2008, доработките се поемат от Willow Garage.

ROS предава подобни на стандартна операционна система услуги като хардуерна абстракция, нискочестотно управление, въвеждане на често използвани функционалности, предаване на съобщения между процесите и мениджмънт на пакетите. Базира се на графичната архитектура, където процесирането се случва във възлите, които могат да получават съобщения. Библиотеката е построена сходно на система Unix и се поддържа от Linux, доработва за macOS и има частична функционалност за Windows.

ROS има две основни "страни": От страна на операционната система, `ros`, са вградени функционалности като локализация, планиране и др. за удобство на потребителя под формата на пакети.

ROS е въведено на пазара под лиценз BSD и е софтуер с отворен достъп. Безплатен е за комерсиална или изследователска дейност. Допълнителните потребителски пакети са лицензирани от множество други организации.

ROS за Webots

Съществуват два начина да се използва ROS за Webots. Първото и по-лесното решение е да се използва стандартен ROS контролер. Той е част от контролерите по подразбиране в Webots и е достъпен за всеки проект. Може да се използва за всеки робот и функционира като ROS възел, като превежда функциите от Webots като команди или съобщения до ROS възлите. Второто и по-сложно решение е да се построи собствен Webots контролер, който също да е ROS възел използващ Webots и ROS библиотеки. Това решение трябва да бъде използвано само за специфични приложения, които не могат да бъдат реализирани със стандартен контролер.

Стандартен Контролер

Този контролер използва библиотека `"libCppController"` и предлага достъпните Webots функционалности на мрежата ROS в зависимост от

конфигурацията на робота. Чрез библиотеката "roscpp" той трансформира тези функционалности най-вече като ROS услуги и използва стандартни съобщения за да избегне зависимостта от трети пакети.

По време на симулацията, може да съществуват много роботи или устройства, както и други Webots приложения на ROS мрежата. За това, контролерът използва специфичен синтаксис за да декларира услугите или командите

`[robot_unique_name]/[device_name]/[service/topic_name].`

`[robot_unique_name]`: за да се избегне неразбиране между различните инстанции на един и същи робот, името на робота се съпътства с ID на процеса и IP адреса на компютъра.

`[device_name]`: тъй като една и съща функция може да се отнася за различни устройства, полето посочва за кое устройства се отнася.

`[service/topic_name]`: полето е идентично или близко до Webots функцията с която кореспондира. За заглавия, то е съпроводено от периода на пробата. За услуги, също е и името на кореспондния srv файл.

Използване на стандартния контролер

Контролерът с името `ros`, е прекомпилиран и не бива да се редактира. Само трябва да се добави към `controller` полето на робота; може да бъде открит в зададения списък с контролери. За да се използва, трябва да се построи ROS възел, който да комуникира с робота чрез различните достъпни услуги. Добър пример за такъв възел може да бъде намерен в ["WEBOTS_HOME/projects/languages/ros/webots_ros"](http://WEBOTS_HOME/projects/languages/ros/webots_ros).

В таблица 3.1 са поместени различни `ros` аргументи за контролера.

<i>Аргумент</i>	<i>Описание</i>
<code>--ROS_MASTER_URI=<address></code>	Уточнява URI адреса на машината където работи roscore.
<code>--name=<robot_unique_name></code>	Уточнява предефиниран <code>[robot_unique_name]</code> за да се използва да услуги и заглавия. Трябва да се внимава с избора на име за да се избягват дублиране и несъответствие в имената на различните роботни контролери.
<code>--synchronize</code>	По подразбиране ros контролерът не блокира симулацията дори да не е свързан с ROS възел. За да се синхронизира симулацията с възела се специфицира аргумента <code>--synchronize</code> за да може симулацията да не продължава след като е извикана функцията <code>time_step</code> .
<code>--clock</code>	Добавя времето на работа на Webots.
<code>--use-sim-time</code>	Уточнява, че времето в Webots трябва да се разбира като време в ROS. За да работи правилно трябва да се въведе и предния аргумент и да се дефинира ROS параметърът <code>use_sim_time</code> да бъде true.

Таблица 3.1 Аргументи ROS контролер

Ако е необходим достъп до контролера от друга машина и `roscore` не работи на същата машина, на която работи Webots, трябва да се промени променливата `ROS_MASTER_URI`. Това може да стане с промяна в променливите на средата чрез настройка на `--ROS_MASTER_URI=<address>` в контролерния аргумент или чрез файла `runtime.ini` в директорията на контролера. Също е възможно да се свържат компютрите с `ssh` от двете страни. Тъй като ROS използва хост име за да намери други компютри в мрежата, тези имена трябва да бъдат добавени както и техните IP адреси. Този списък се намира във файл "hosts". В Linux може да бъде директно намерено в `/etc/hosts`; на macOS, `/private/etc/hosts`; на Windows, `C:\Windows\System32\drivers\etc\hosts`. На Windows и macOS, това е скрит път и трябва да се претърсят директориите за да бъде намерен и ще е необходим администратор за да бъде редактиран.

Персонализиран Контролер

Стандартния контролер е разработен за да работи на всеки робот и за основни цели. Понякога не може да изпълни определени цели или би бил твърде сложно функциониращ. В такъв случай може да се създаде собствен персонализиран контролер и ROS възел.

Възможно е да се създаде такъв възел в C++ чрез библиотека "roscpp", но в такъв случай, трябва да се настрои конфигурацията за да си кореспондират "catkin_make" от ROS и "Makefile" от Webots за да са бинарно свързани с Webots "libController" и библиотеката "roscpp".

Този контролер също може да бъде създаден в Python чрез използване на библиотеки ROS (roslib, rospy) и Webots (controller) от Webots робота или супервайзър контролера.

Глава 4 Експериментални резултати

4.1. Роботизиран носач на товари.

За целите на експеримента е разработена роботизирана количка – носач на товари (багаж и др.). Целта е при автономно действие носачът да обслужва единичен пътник – оператор, като го следва и носи неговият багаж. Роботизираният автономен носач, наречен “The Stalker” е hands-free система за носене на товар, която поддържа безопасно разстояние, докато следва своя оператор, така позволявайки неговата пълна свобода на движение, фиг. 4.1. Целта е да се автоматизира преместването на голям и/или тежък багаж, действие, срещано при всяко пътуване.

The Stalker ще може да спира и тръгва самостоятелно в натоварено движение. Освен това, ще може да следва оператора до далечни местоположения с променлива скорост. Освен предложеното приложение за помощник в летище, the stalker може също така да бъде използван за много други цели: пренасяне на медицинска апаратура в болници, носене на багаж в пристанища, помощник в складове, и всякакви лични приложения. Устройството също така може да бъде използвано от стари хора, или хора инвалиди, които ще могат да пренасят багаж без чужда помощ. Работници и строители на които се налага да пренасят инструменти и материали също биха могли да се възползват от този уред.

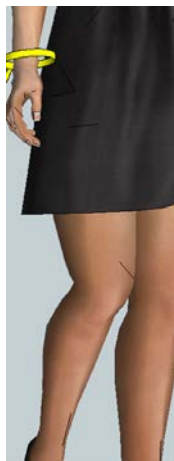
Главният дизайн на The Stalker включва безжична връзка със собственика чрез браслет със сензори на ръката му, и съответни сензори на Stalker. Този механизъм е програмиран да следва човек и да спазва безопасно разстояние (1-2 метра). Устройството ще има вградена презареждаща се батерия, която ще се включва в контакт за зареждане, фиг. 4.2, [1].

На Stalker се прилага и функция за сигурност - алармена система, която ще звучи, ако багажът е паднал или ако устройството за следване изостане твърде далеч зад потребителя. Светодиодът ще светне на гривната, за да предупреди оператора за ниска мощност на батерията. Мигаща светлина, монтирана на Stalker, ще предупреди другите минувачи за наличието на движещо се устройство. Бутонът за аварийно спиране също е прикрепен към гривна в случай на неизправност.

Устройството е оборудвано с вградено зарядно устройство, което се включва в стенния контакт за презареждане. Това вероятно ще се прави през нощта преди употреба, за да се осигури напълно заредена батерия за непрекъсната употреба. Револвираща светлина, монтирана на стойката, предупреждава други пешеходци за движещо се устройство. Това ще спомогне за минимизиране или елиминиране на други хора при ходене по пътя между оператора и устройството.



Фиг. 4.1. Stalker



Фиг. 4.2. Браслетът

4.1.1. Основни компоненти

Избраните компоненти за роботизирания носач са описани по-долу.

- 18 V DC Мотор /фиг. 4.3./

Предназначение- За движението на количката



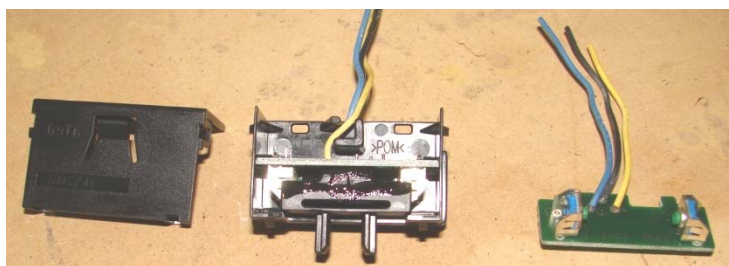
Фиг. 4.3. 18 V DC Мотор

- Батерия и Зареждач за Батерията /фиг4.4./
110 V AC
Зарежда 18 VDC батерия
Предлагаме да се използват три броя 18V батерии, свързани в паралел,
за по-дълга работа пр и едно зареждане.



Фиг. 4.4. Батерия и Зареждач за Батерията

- Ключове /фиг. 4.5./
Предназначение - За детекция на положението на кормилото от микроконтролера.



Фиг. 4.5. Ключове

- Мигаща LED Светлина и Сирена /фиг. 4.6./

Предназначение - Да съобщят на оператора, ако количката изостане на по-дълго от разрешеното разстояние.



Фиг. 4.6. Мигаща LED Светлина и Сирена

- Общ вид на напълно сглобен роботизиран носач /фиг. 4.7./

Вместо две предни колелета е избрано решението с едно голямо колело за по-лесно придвижване.



Фиг. 4.7. Общ вид на напълно сглобен роботизиран носач

- Clutched 12v DC мотор /фиг.4.8./

Предназначение - За управление



Фиг.4.8. Clutched 12v DC мотор

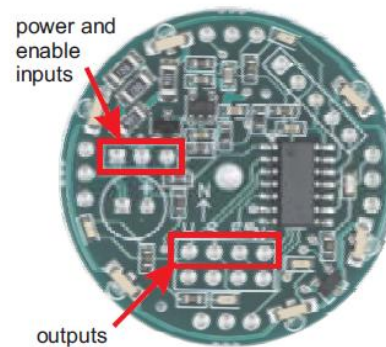
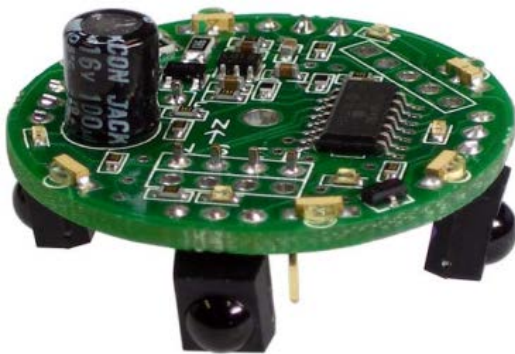
- Pololu IR Beacon сензор /фиг. 4.9./

Сензор за посока и разстояние

Големина: 1.35 инча радиус

Дистанция : 6 инча до 20 фута

Захранване : 6 – 16 v



Фиг. 4.9. Pololu IR Beacon сензор

- SyRep 10 Моторен Контролер /фиг. 4.10./

Захранване : 6-24V номинално, 30V максимално

До 10A непрекъснато. До 15A за няколко секунди

Синхронен регеративен мотор

Връща захранване в батерията, когато се намалява скоростта или се реверсира двигателят. Съхранява енергия чрез връщане в батерията на индуктивна енергия,



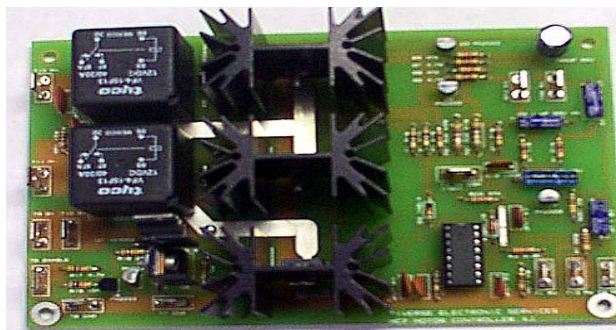
натрупана в мотора, при всеки цикъл на преавключване ШИМ - честота 32kHz

Фиг. 4.10. SyRen 10 Моторен Контролер

- MC7 Силов моторен контролер, фиг. 4.11

Захранване 12V – 36 V

- Служи за управляващо устройство на мотора
- 35 A непрекъснато (с охлаждане)
- ШИМ изход
- Ръчно контролиране на скоростта чрез потенциометър
- Управление – чрез управление на ШИМ
- Скоростно ускоряване напред и назад



Фиг. 4.11. MC7 Силов моторен контролер

- Ping Сензор за Разстояние /фиг. 4.12./

Захранване – 5 VDC

Захранващ ток – 30 mA типично; 35 mA максимално

Range – 2 cm to 3 m (0.8 in to 3.3 yds)

Обхват – от 2 cm до 3 m

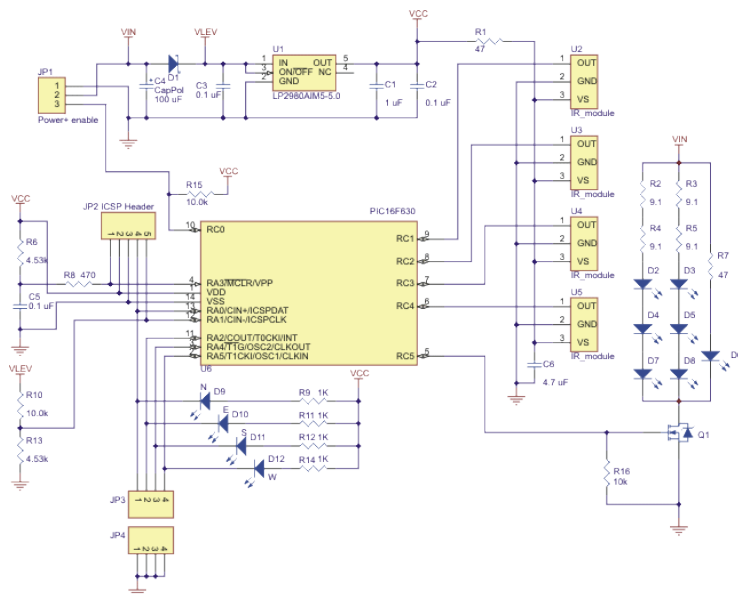


Фиг. 4.12. Ping Сензор за Разстояние

Главната логика за управление на количката е предоставена от двойка инфрачервени лъчо-предавателни сензора. Тези устройства са transceivers, направени да се използват по двойки, които дават лесен начин на два робота да знаят къде се намират спрямо един-друг. Сензорите работят като предават и приемат инфрачервена светлина, подобно на телевизорно дистанционно. Всеки сензор има четири IR предавателя и четири IR приемателя. Сензорите алтерират между предаване и приемане, и така те не се “объркват” от собствено предаване на светлина.

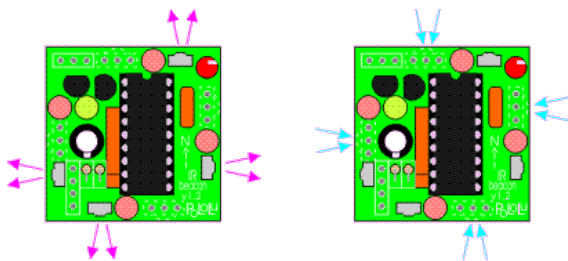
- Сензорни Връзки /фиг. 4.13./

Показана е схема на вътрешната логика на IR Beacon.

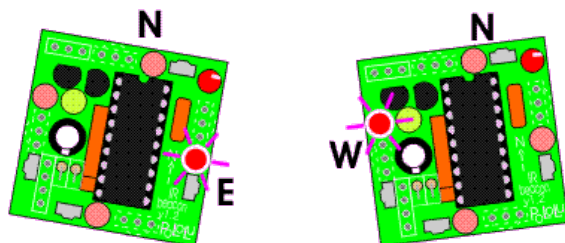


Фиг. 4.13. Сензорни Връзки

- Операция на Сензорите фиг. 4.14.



Фиг. 4.14. Операция на Сензорите



Фиг. 4.15. Ориентация на сензорите

Главната логика за управление на количката е предоставена от двойка инфрачервени лъчо-предавателни сензора. Тези устройства са transceivers, направени да се използват по двойки, които дават лесен начин на два робота да знаят къде се

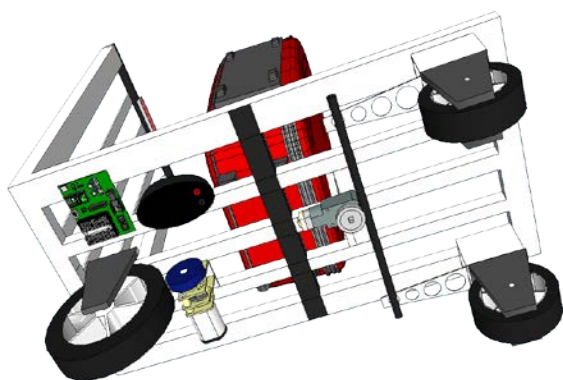
намират спрямо един-друг. Сензорите работят като предават и приемат инфрачервена светлина, подобно на телевизорно дистанционно. Всеки сензор има четири IR предавателя и четири IR приемателя. Сензорите алтерират между предаване и приемане, и така те не се “объркват” от собствено предаване на светлина.

Излъчвателите имат и четири дигитални изхода, които показват коя от четирите страни приема най-силна светлина, фиг. 4.15.

4.1.2. Разположение на Компонентите

Изглед отдолу – фиг. 4.16

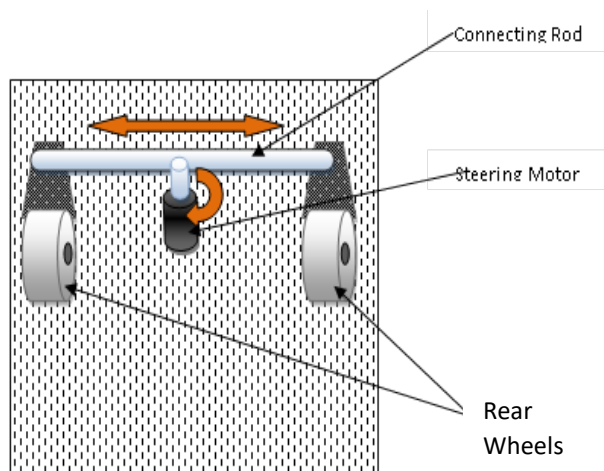
- Един DC мотор управлява посоката на задните колелета.
- Движещият мотор подава въртене към голямото предно колело чрез фрикция от по-малко колело монтирано към движещият мотор.
- Презераждаща 18 V батерия е монтирана под количката, така че да има лесен достъп за включване на зареждащ кабел.
- Микроконтролера и другите платки са монтирани към плексиглас, закачен за дъното на количката.



Фиг. 4.16. Изглед отдолу

Завиване – фиг. 4.17.

- Кормилото се инициализира като първо завива изцяло на ляво(докато стигне левият ключ) и после напълно на дясно. Така се определя средната точка и кормилото се връща в средата.
- Завиването се определя от посоката подадена от инфрачервения сензор. (изток, север, запад, юг)
- Ако се получи сигнал изток или запад, тогава кормилото се завърта в правилната посока и моторът за движение се включва. Системата чака да получи сигнал север и тогава кормилото се връща в средата.
- Капаците на северният сензор са поставени, за да се намали “периферното зрение”.

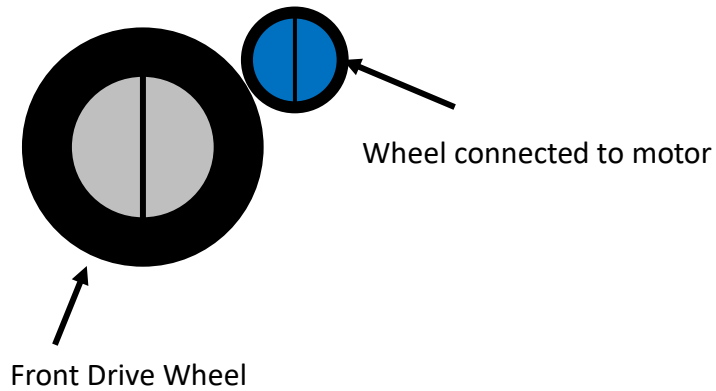


Фиг. 4.17. Завиване

Движение – фиг. 4.18.

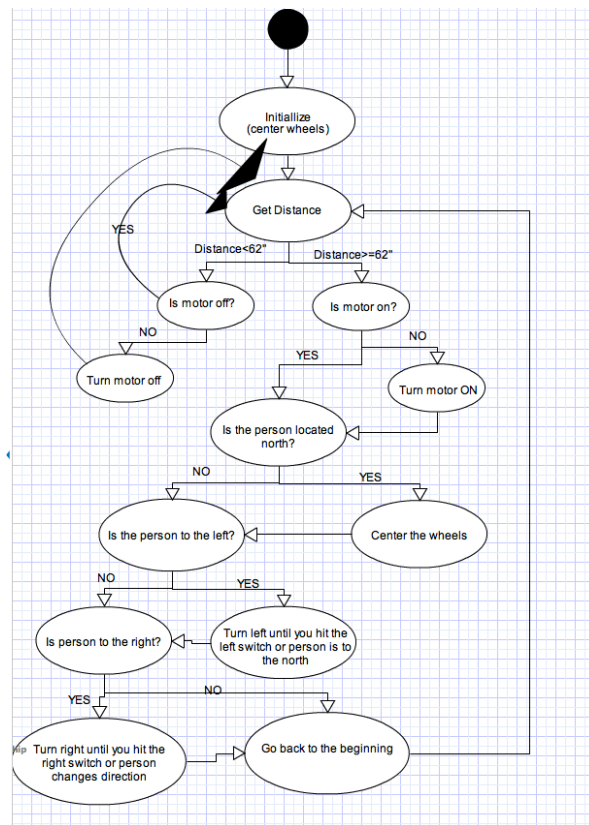
- Движещият мотор е 18 VDC Motor с 2A-10A операция.
- Моторът се контролира от информацията за разстояние получена от сонарният ring сензор.
- Ако разстоянието е по-дълго от метър, микроконтролерът включва мотора.
- Когато разстоянието е по-късо от метър, тогава моторът спира.

- Скоростта се определя от потенциометър достъпен от едната страна на количката.



Фиг. 4.18. Движение

Програмиране – фиг. 4.19



Фиг. 4.19. Програмиране

Програматично, всички компоненти са тествани отделно и след това събрани в цяла програма която управлява количката. Сенсорите за разстояние и движещият мотор работят заедно, докато завиването зависи главно от информацията предоставена от Pololu предавателите.

Поради вида на сенсора за разстояние(Parallax PING sonar sensor), който е много точен за големи и равни повърхности, но не е точен за неравни такива(като човек, например), програмирах buffer за разстоянието. Програмата чете разстоянието три пъти и само ако и трите разстояния са по-големи/по-малки тогава моторът се включва/изключва.

4.2. Безжично управление на група мобилни устройства

4.2.1. Безжични комуникационни протоколи

До скоро безжичните комуникации имаха ограничено приложение, свързано предимно с мобилните телефони, но в последните 10-15 години удобството им ги изтласка на върха на комуникационните приложения. Безжични мрежи, връзка със специализирани сензори, предаване на данни, свързани с експлоатационни параметри и още много са областите в които напоследък безжичните комуникации намират приложение. Използването на радиоканали за връзка между устройствата, макар че не е ново като изобретение, също еволюира значително, особено благодарение на широкото разпространение на Internet, локалните и WAN мрежи, свързващи много хора и позволяващи да се разменят глас, видео и данни с осезаемо високи скорости. Тласък за развитието именно на безжичните устройства е дала необходимостта от по-голяма свобода и удобство при изграждането на мрежи, необходимостта от лесното включване на все по-бързо увеличаващия се брой на мобилни абонати, не желаещи да търсят специални точки за включване към мрежата, а глобално погледнато от потребността на съвременния човек от модерни бързодействащи и високоскоростни комуникации. В момента в света има над 1 милиард мобилни устройства, оборудвани с безжична връзка. Поради тази причина и много от фирмите производители

съсредоточават своите усилия в тази област и се разработват (напоследък едночипови) устройства, ползващи един или друг протокол за предаване на данни.

При жичните мрежи най-голямо разпространение е получил стандартът Ethernet поради лесната и евтината си реализация. Този стандарт предоставя обща високоскоростна среда за пренос на данни, която може да се ползва от всички абонати в мрежата, но не едновременно. Заради съвместимост с кабелния Ethernet, протоколът при безжичните мрежи е подобен и се нарича Radio-Ethernet. Този стандарт е приет от IEEE под номер 802.11.

Стандарт IEEE 802.11

Комитетът по стандарти на организацията IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), IEEE 802, сформира работната група за изработването на стандарт за безжични локално мрежи 802.11 през 1990 г. Задачата на тази работна група е била да разработи всеобщ стандарт за радиопредаване и за безжични локални мрежи, които ще работят на честота 2.4 GHz със скорост на предаване на данни 1 и 2 Mbps (Megabits-per-second) [86].

Работата по създаването на стандарта е завършена през 1997 година, когато през юни месец е ратифицирана първата официална спецификация на 802.11. Стандартът IEEE 802.11 е първият стандарт за безжични мрежи [2] (WLAN, Wireless Local Area Network), приет от независима международна стандартизираща организация, разработила, освен него и множество други спецификации и стандарти за мрежовите връзки по кабел.

Междувременно технологиите за предаване на данни се развиват с нарастващо темпо, така че първоначално заложените в стандарта скорости за предаване на данни от 1 и 2 Mbps вече са малки за големите обеми информация, която се обменят по съществуващите мрежи и са станали безинтересни за потребителите. Това подтиква разработчиците на стандарта IEEE 802.11 към създаване на нови стандарти - **IEEE 802.11b**, които де-факто се явяват разширения на основния, 802.11, но скоростта на обмен е повишена до 11 Mbps скорост на обмен на

данни между безжичните устройства, което в идеалния случай означава над 1.4 МВ/сек. трансфер между устройствата.

Стандартът IEEE 802.11 работи в съответствие с двете долни нива на модела OSI (Open System Interconnection) - физическо и канално ниво [2]. Всяко едно мрежово приложение, протокол или операционна система могат да работят при това положение в една безжична мрежа не по-лошо, отколкото това става в обикновена Ethernet мрежа. Основната архитектура, особености, протоколи и служби са определени в стандарта 802.11, а спецификацията 802.11b засяга физическото ниво, променяйки скоростта на обмен и достъп към по-висока [86].

На физическо ниво са отделени общо три метода за предаване на данни, единият от които е в инфрачервеният диапазон, а другите два са радиочастотни, работещи в интервала между 2.4 GHz и 2.483 GHz. Двата широколентови канала могат да използват различни методи за организиране на предаването - метод на пряка последователност (DSSS-Direct Sequence Spread Spectrum), или метода на честотните подскоци (FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum).

При метода **DSSS** честотната лента се разделя на 11 канала, като един бит се превръща в 11 бита, които се предават едновременно и паралелно.

При **FHSS** честотната лента се разделя на 79 канала, като в определен момент се използва само един канал. Данните се предават по един канал, като по псевдослучаен закон се "скача" в друг канал и по него се предават другите данни.

Поради своята простота технологията FHSS се развива по-рано.

Стандартът 802.11 фиксира два вида безжично мрежово оборудване - *клиент*, ролята на който обикновено се поема от компютър с инсталирана безжична мрежова интерфейсна платка (Network Interface Card, NIC), и *точка за достъп* (Access point, AP), която служи за връзка между безжична и кабелна мрежа.

Клиентът е окомплектован с мрежова карта 802.11, която може да бъде с интерфейс ISA, PCI или PC Card, както и във вид на вградено решение. Точката за достъп обикновено е оборудвана с приемо-предавател, интерфейс към кабелна мрежа (802.3) и специализирано програмно осигуряване.

Стандартът IEEE 802.11 определя два режима на работа на безжичната мрежа [86] - режим точка-точка (*Ad-hoc*) и режим клиент/сървър, наричан още режим на инфраструктурата (*infrastructure mode*). Първият режим, точка-точка, наричан още IBSS - *независим набор от служби*, както личи и от заглавието, представлява елементарна като структура мрежа, в която отделните станции се свързват една със друга пряко, без да е необходима точка за достъп. Разбира се, при това положение съществуват някои ограничения от типа на максималния брой устройства, които могат да изграждат такава мрежа, което зависи от типа на безжичното мрежово оборудване и от спецификациите на 802.11.

Режимът клиент/сървър предполага използването на поне една точка за достъп, представляваща специализирано устройство, която да е включена към кабелна Ethernet мрежа, и определен, често ограничен брой крайни безжични работни станции. Този тип конфигурация се нарича *основен набор от служби* (BSS - Basic Service Set), като при наличието на два или повече BSS се формира *разширен набор от служби* (ESS - Extended Service Set). Очевидно е предимството на режима клиент/сървър, когато безжичната мрежова станция може да получи достъп до локално мрежово устройство или специфична функция, свързано към стационарната мрежа (например към мрежов принтер, скенер или Интернет).

Bluetooth протокол

Консорциумът Bluetooth (IEEE 802.15.1), основан през 1998 г. от IBM, Intel, Toshiba и компаниите за безжични телефонни комуникации Ericsson и Nokia, е разработил стандарта, който създава безжична мрежа, осигуряваща скорост на трансфер 1 Mbit/s [87]. Сега консорциумът включва над 1,500 компании, в това число Microsoft, Dell, Lucent Technologies, Motorola и 3Com. Bluetooth комуникациите се осъществяват в честотния диапазон 2400-2483.5 MHz. Както при IP комуникациите, при Bluetooth данните се изпращат под формата на пакети, контролирани от специални блокове. В зависимост от състоянието на трафика, предаващите и получаващите устройства могат да сменят честотните канали до 1600 пъти в секунда. Освен адреса на получателя, контролните блокове съдържат и честотата на

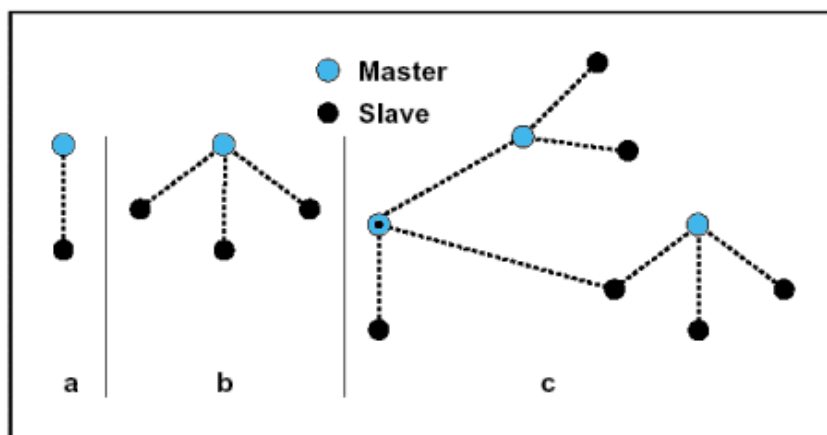
следващия пакет. Нуждата от постоянен контрол обяснява разликата между теоретичната скорост от 1 Mbit/s и действителната, която обикновено не надвишава 864 Kbit/s [87]. Bluetooth мрежите са проектирани да поемат едновременно до осем устройства. На всяко устройство се присвоява статус *slave* или *master*. *Master*-ите са отговорни за организирането и управлението на комуникациите, включително и тези между *slave* устройствата. Съществуват и 20 различни профила [88] и три типа връзки, което допринася за високата цена на Bluetooth чиповете. Профилите контролират поведението на Bluetooth устройствата, а връзките определят режимите на предаване между комуникиращите модули.

Разстояние, на което могат да се отдалечат две устройства е около 20-30 метра (типичното разстояние обикновено не надвишава 10 метра), но се работи по удължаването му. В замяна на това, няколко Bluetooth устройства могат да се свържат в мрежа и през стена (стени) или на няколко етажа в една сграда, без да има необходимост от пряка видимост или външна антена, по същия начин, по който могат да се свързват IEEE 802.11. Широчината на канала е 723,2 Kb/sec. за устройства, работещи в асинхронен режим, и 433,9 Kb/sec. за работещите в синхронен режим [89]. Bluetooth има и друга, отличаваща го от останалите технологии особеност: различните Bluetooth устройства влизат в контакт едно с друго автоматично, веднага след като попаднат в обсега на приемо-предавателя, а за установяването на връзката, автентификацията и др. се грижи програмното осигуряване.

Едно от големите предимства на Bluetooth е, че устройството, поддържащо стандарта, влизайки в обхват може да установи връзка не с едно, а с множество други, поддържащи тази технология, като не е задължително те да си взаимодействат активно [89].

Устройство, обменящо активно информация с други устройства, според терминологията на Bluetooth се нарича *master*, а устройствата, с които то комуникира активно се наричат *slave*, като максималния брой *slave* устройства може да бъде 7 [89]. Освен това може да съществуват още неограничен брой неактивни *slave* устройства, които са установили връзка с него, макар, че са синхронизирани с *master*,

не обменят данни с последния, очаквайки освобождаване на свободно място, за да осъществят преноса на данни. Такъв тип връзка между устройствата се нарича *piconet* [87,88]. В рамките на една *piconet* връзка може да има само едно master устройство, но когато е необходимо, свързаното с него slave може да смени статуса си на master, образувайки своя *piconet* структура. Този тип сложна съставна структура носи наименованието *scatternet* [3, 4], в която всяко едно устройство може да бъде едновременно и master и slave, в зависимост от конкретната ситуация и мястото му в структурата. На фиг. 4.20 е показан начина на свързване в *piconet* с едно устройство slave (a) и с няколко (b) и свързване от типа *scatternet* (c).



Фиг. 4.20. Връзки между Bluetooth устройства в piconet с едно устройство slave (a), няколко устройства slave (b) и свързване от типа scatternet

Разбира се, за да се избегне дублирането на устройствата и други нежелани отклонения, всяко устройство, освен уникалното си име, взаимодейства с другите, използвайки различен канал за връзка, на различна честота и с различен от другите параметър hopping [88], характеризиращ hopping channel (хопинг-канал). Хопинг (hopping)-това е периодична промяна на честотата, определяна от параметъра hopping sequence.

Недостатъци [87,90] на интерфейса Bluetooth са:

- висока (засега) производствена цена на необходимата за функционирането на интерфейса елементна база

- липса на добра поддръжка на ниво операционна система (може да бъде решено с написване на драйвери)
- липса на интерес от страна на производителите да предлагат устройства с Bluetooth интерфейс
- нерешени проблеми със запазването на неприкосновеността на обменяните между устройствата данни (лесно се прихващат и декодират от разстояние)
- ниска скорост на предаване на данни
- малък обхват на устройствата

От друга страна, има предимства, които може би ще помогнат на тази технология да си изгради добро бъдеще (на Bluetooth в сегашния му вид или на негов наследник, изчистен от недостатъците на предшественика).

Основни предимства [87, 90] са:

- добре обмислена структура
- неотклонно намаляваща цена на хардуерния модул (едночипово решение)
- поддръжка от страна на консорциум, основан през 1998 г, със свободно безплатно членство, в който членуват над 2000 компании, между които IBM, Intel, Nokia, Erricson, Toshiba, 3COM, Lucent, Microsoft.
- Bluetooth позволява икономически изгодно, непрекъснато предаване на глас и информация по безжичен път в късовълновия радиодиапазон, което ще даде на потребителите възможност за лесно и бързо свързване на голям брой устройства без необходимост от кабелна мрежа, разширявайки комуникационните възможности на преносимите компютри, мобилни телефони и други приложения вариращи от детски играчки до автоматизирани битови уреди.

Протокол ZigBee

Съществува множество от стандарти, като Bluetooth и WiFi, които са насочени към високоскоростното предаване на данни за глас и звук, безжични мрежи и т.н. До момента, обаче, няма стандарт за безжични мрежи, който да е в полза на

специализираните нужди на сензори и управляващи устройства. Сензорите и управляващите устройства не се нуждаят от голяма широчина на предавателния канал, но имат нужда от латентни и много нискотокови източници, дълъг живот на батериите и батерии за широка гама от устройства. Именно поради тази причина е разработен стандартът IEEE 802.15.4, съвместно със сдружението “The ZigBee Alliance”. Формирано през октомври 2002 г. [91,92], сдружението е асоциация от компании, работещи съвместно по създаването на евтини, двупосочни безжична стандарти. Прогресивно нараства броят на компаниите, които работят върху решения и продукти, базирани на ZigBee технологията. В момента група компании активно работят върху дефинирането на общ стандарт ZigBee, като Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola and Philips (които са петте фирми, основатели на сдружението “The ZigBee Alliance”) и още около 30 компании участнички, производители на безжични устройства [91,92].

ZigBee технологията е разработена основно за нуждите от евтино решение, базирано на стандарта за безжични мрежи, което да поддържа малки потоци от данни, ниска консумация и надеждност. Това е единствената до момента стандартизирана технология, адресирана към уникалните нужди на мрежови приложения, свързани с дистанционно наблюдение и контрол на различни сензори [93].

ZigBee технологията е подходяща за широк клас от приложения в много области. Естествено, тези приложения, които могат да ползват характеристиките на стандарта IEEE 802.15.4, могат да се ползват от решения, базирани на ZigBee технологията.

Като примери за областите на приложения, могат да се посочат [90,91]:

- Безжични решения за домашна охрана;
- Дистанционни термостати за климатици;
- Дистанционни осветление и контрол на затъмнеността;
- Бутон за повикване за нуждите на болни и инвалиди;
- Универсални дистанционни за радио и телевизионни приемници;
- Безжични мишки, клавиатури, джойстици;

- Безжични датчици за дим, кислород и др.

Едно от основните предимства на устройствата, ползващи ZigBee технологията е ниската консумация, което от своя страна, дава възможност за многократно увеличаване живота на батериите. Очаква се батериите да удължат живота си до няколко години при използване на стандартни батерии в приложения за наблюдение. Устройствата, ползващи батерии, като захранващ източник, могат да се установят в неактивен режим (sleep) за минути, дори и за часове [91,87].

Друга съществена особеност на тази технология, е че ZigBee е в зависимост от това коя честота е селектирана и колко често даденото устройство се нуждае да комуникира. Схемата на адресиране поддържа до 255 възела. При поддържане на 16 канала при 2.4GHz честота, ZigBee мрежата може да съдържа около 4000 отделни възела в единична мрежа с висока надежност на системата [93, 94].

“The ZigBee Alliance” предлага стандартизирана база от решения за сензори и управляващи системи. Целта е да се установи глобален управляващ/сензорен мрежови стандарт.

За разлика от Bluetooth, който има различни режими и състояния, ZigBee/IEEE 802.15.4 има два основни режима – активен (изпраща/приема) и пасивен (“sleep”). Приложният софтуер е необходимо да се фокусира върху самото приложение, а не върху избора на оптимален захранващ режим за всеки различен случай.

Основните технически характеристики на протокол 802.15.04/ZigBee са, [91]:

- Потокът от данни 250Kbs, може да се постигне при 2.4GHz (10 канала), 40Kbs при 915Mhz (16 канала) и 20Kbs при 868Mhz (1 канал);
- Разстоянието за предаване е от 10 до 75 м в зависимост от мощността на захранването и особеностите на терена.;
- Връзката между възлите може да бъде тип “звезда” или “точка до точка” (Peer-to-Peer);
- Много ниска консумация (под 1 mV);
- Поддръжка на устройства с ниска латентност;

- Динамична адресация на устройствата;
- Изключително кратък работен цикъл (под 0,1 %).
- Подобно на WiFi и Bluetooth и стандартът 802.15.4 също работи в долните две нива (физическо и канално) на общия модел за междусистемни връзки (OSI – Open System Interconnection).

Стандартът IEEE дефинира два типа устройства. Това са :

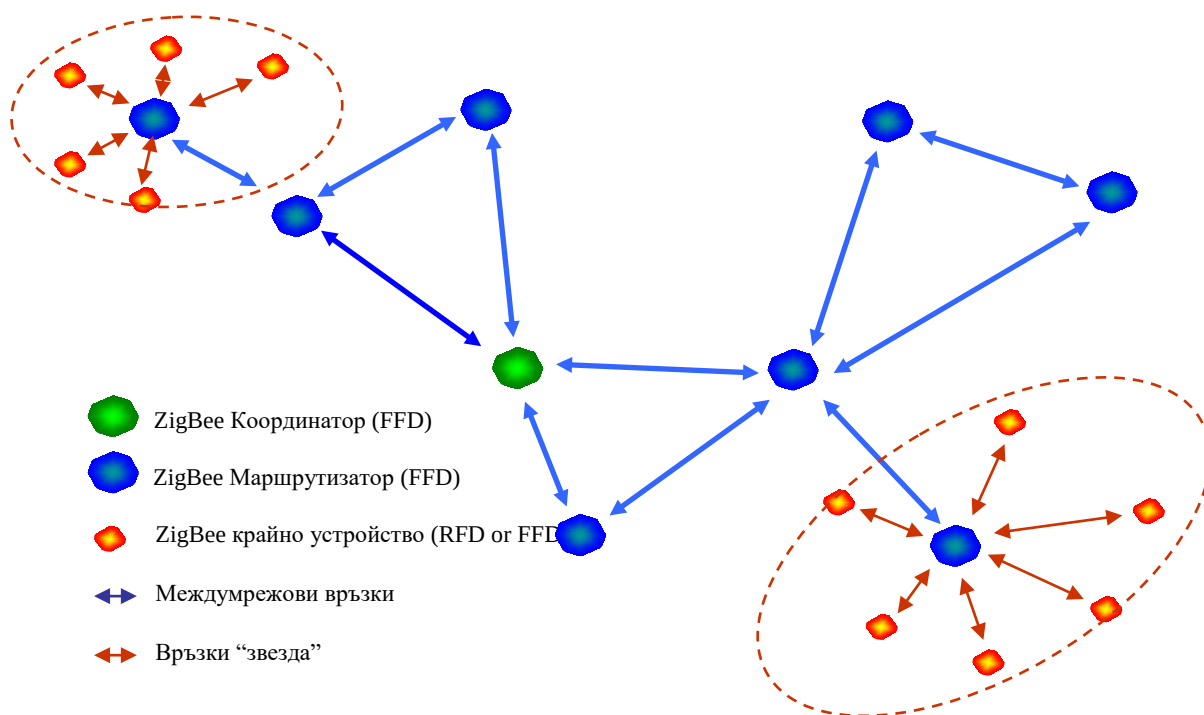
- Устройства с пълни функции - Full function device (FFD);
 - могат да работят при всяка топология;
 - могат да работят като координатор на мрежата;
 - могат да бъдат само координатор;
 - могат да установяват връзка с всяко от устройствата в мрежата.
- Устройства редуцирани функции - Reduced function device (RFD);
 - могат да работят само при свързване “звезда”;
 - не могат да работят като координатор на мрежата;
 - могат да установяват връзка само с координатора на мрежата;
 - много лесна имплементация.

Мрежата IEEE 802.15.4/ZigBee изисква най –малко едно устройство от типа FFD като координатор на мрежата, но крайните устройства могат да бъдат от типа RFD [91,92].

Основни изисквания към една ZigBee мрежа са :

- Всички устройства трябва да имат 16 битови адреси;
- Кратки (16 – битови) адреси могат да се допускат за намаление размера на пакета
- Методи на адресация
 - за топология “звезда”: адрес на мрежата+ идентификатор на устройство;
 - за топология “peer-peer” – идентификатор на източник/предназначение.

На фиг. 4.21. е представен примерен модел на ZigBee мрежа [93].



Фиг. 4.21. Връзки между Bluetooth устройства в piconet с едно устройство slave

(a), няколко устройства slave (b) и свързване от muna scatternet

4.2.2. Сравнителни характеристики на безжичните протоколи.

Сравнение между безжичните протоколи, в буквалния смисъл на думата, не може да бъде направено, но може да се даде класификация, според спецификата на съответния използван протокол. Също така не може да се направи разграничението кой протокол е по-добър, заради различната им насоченост. Може да се направи, обаче паралел, според който да се определи кой протокол в коя област е най-подходящо да се използва.

Технологии, базирани на протокол ZigBee се използват там, където има мрежи от сензори, контрол на данни и апаратура и където се налага консумацията да е

минимална. Тъй като това е най- новия протокол, все още се правят предположения за развитието му и насоките за използване. Много от фирмите предлагат решения за вграждане в бита и развитие на т.нар. “умно жилище”, където интерфейсът се използва за връзка с всички уреди и до централен команден център.

Bluetooth е протокол, който масово се използва при мобилните телефони, а напоследък и при компютърните системи, когато е необходимо да се премахнат кабелите – безжични клавиатури, мишки и др. Правят се и разработки за вграждането на тази технология в битовата техника.

Протоколът 802.11 или наричан още Wi-Fi основно се прилага за изграждане на безжични компютърни мрежи. Най – простия начин за свързване на два компютъра в безжична мрежа е да се включи във всеки един от тях по една WLAN карта, да се инсталират драйверите и да се настройат необходимите параметри на връзка. Операционните системи от ново поколение, след инсталиране на необходимите драйвери разпознават устройствата и позволяват “общуването” с тях.

В таблица 4.1. е дадена сравнителна характеристика на стандарти и някои безжични протоколи.

Таблица 4.1. Сравнителна характеристика на протоколи

Протокол > Характеристика	ZigBee™ 802.15.4	Bluetooth™ 802.15.1	Wi-Fi™ 802.11b
Приложение	Наблюдение и контрол	Заместване на кабелите	Web, Video, Email
Системни ресурси	4KB-32KB	250KB	1MB
Живот на батерията (дни)	100-1000+	1-7	1-5
Възли в мрежа	255/65K+	7	30
Честотна лента(kbps)	20-250	720	11,000+
Обхват (метри)	1-75+	1-10+	1-100
Ключови характеристики	Стабилност, Ниска консумация, Евтино	Цена, Удобство	Скорост, Гъвкавост

4.2.3. Защита на данните - стандарти.

Всички технологии за безжични комуникации използват един или друг вариант на кодиране на данните с цел тяхна защита.

Мрежите, отговарящи на стандарта IEEE 802.11, използват функции за криптиране WEP за кодиране на информацията, като, в зависимост от класа на устройството криптирането може да бъде 64- или 128- битово.

При Bluetooth има три режима на защита, като най-защитеният Security mode 3 (link level enforced security) оперира с сеансови ключове (Bond), които се генерират в процеса на свързване на две устройства, и се използват в процеса на свързване, идентификация и предаване на данни между две устройства.

При всички положения, проблемът със защитата на данните при безжичните комуникационни устройства е открит - все още е сравнително лесно да бъде уловен сигнала от ефира и той да бъде декодиран.

Стандартът 802.11b осигурява контрол на данните на MAC ниво MAC (второ ниво в модела OSI), и механизми на криптиране, известни като Wired Equivalent Privacy (WEP), които могат да бъдат включени или изключени.

Когато WEP е включен, той защитава само пакета с данни, но не и заглавието му, така че всички свързани в мрежата устройства могат да "преглеждат" преминаващите данни. За контрол на достъпа във всяка точка на достъп се разполага ESSID (или WLAN Service Area ID), без информация за който станцията не може да се включи към точката за достъп.

Освен това, при нея може да се съхранява списък от "разрешени" MAC адреси на упълномощените устройства, по този начин разрешавайки към мрежата да се включват само тези устройства, които се намират в списъка.

Криптирането на данни се извършва спомощта на алгоритъма RC4 с 40-битов ключ, но има и по-прости начини на криптиране.

Стандарт WirelessHART

Появата на WirelessHART е следствие на нуждата от опростена, сигурна и надеждна безжична комуникация в процесната индустрия. Стандартът е специално проектиран за приложения, свързани с мониторинг на полевите устройства. Разработването на спецификациите на протокола от членовете на Фондацията HART и водещи в световен мащаб доставчици на безжични технологии, се извършва на основата на стандарти като HART протокола (IEC 61158), EDDL (IEC 61804-3) и стандарта за безжични комуникации IEEE 802.15.4. Разработен за първи път в края на 1980 г., HART протоколът е актуализиран няколко пъти, като при обновяването му се спазва правилото за съвместимост с предишните версии. Текущата версия на HART протокола е 7.2, която осигурява много нови възможности за WirelessHART комуникациите с интелигентни полеве устройства и дава възможност на производителите на контролно-измервателни прибори да внедряват нови функции в техните продукти и технологични решения.

Технологията на WirelessHART се базира на разпределени мрежи и функционира в 2400 - 2483.5 MHz честотната лента ISM, със скорост на информационния обмен 250 kbps. За избягването на радиосмущения от други мрежи или устройства, WirelessHART "прескача" през 16 честотни канала, дефинирани от IEEE 802.15.4. Тази техника е добила популярност с наименованието FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum - честотно превключване в разпределен спектър). FHSS техниката представлява доказал се в практиката метод за ефективно избягване на конфликти в резултат от смесването на честоти. Методът не залага на по-голяма сила на излъчването, а на смяна на канала. Освен това, използването на радиостандарт като IEEE 802.15.4 осигурява DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum - последователен в разпределен спектър) съвместим радиообмен с междуканален преход на основата на пакет по пакет. Към характеристиките на мрежата се отнася и дефинираната номинална мощност на излъчване от 10 dBm, като е възможна

промяната и на дискретни стъпки, например 0 dBm и др. Максималната дължина на информационния блок в едно съобщение е 127 байта. При излъчване на номинална мощност, максималната дистанция между две устройства на мрежата е 200 метра.

ISA 100 стандарти

Стандартите ISA 100 се отнасят до изграждането на безжични системи в среда, използвана за контрол и автоматизация, като основният им фокус е полевото йерархично ниво. Създадени са по инициатива на комитета ISA 100 като част от ISA (International Society of Automation), в сътрудничество с близо 400 професионалисти от областта на автоматизацията, представители на над 250 компании производители на оборудване, потребители от химическата, нефтопреработвателната индустрия и други.

Пакетът стандарти ISA 100 включва:

ISA 100.11a - стандарти, дефиниращи безжична свързаност, с основен фокус (но не и ограниченост) върху нуждите на приложенията за управление, т. е. всичко от отворен контур с ръчно управление до затворена система за регулиране. Като типични приложения могат да се посочат автоматично управление в процесната индустрия на параметри като температура, разход, ниво и налягане. Други приложения са управление на скоростта на въртящо се оборудване и мобилни оператори, които могат да въздействат дистанционно чрез преносими, безжични устройства.

ISA 100.12 - стандарти, имащи за цел реализацията на мрежова инфраструктура, в която едновременно да могат да оперират ISA 100.11a и безжичен HART, и да се гарантира оперативната съвместимост на полевите устройства. ISA 100.14 - стандарти, определящи безжична свързаност за специализирано използване и индустриални приложения като мониторинг, събиране на информация и алармиране. Към тях могат да се добавят и управление, което не е критично, параметри на околната среда, управление на активи и други подобни.

ISA 100.21 и ISA 100.22 - това са стандарти, насочени към RFID и управление на складове.

Както се вижда от краткото описание на групите стандарти, ISA 100.11a е пряко свързан с промишлената автоматизация. Специален акцент се поставя върху разработването на устройства с ниска консумация на енергия, работещи съвместно в големи инсталации. Стандартите дефинират изискване безжичната инфраструктура да може да се кооперира със съществуващата и да е съвместима с други безжични устройства.

Стандарт ISA100.11a

ISA100.11a е многофункционален стандарт за индустриални измервания, който осигурява безжичен пренос за множество приложения - от обикновено наблюдение на процесни променливи до управление с обратна връзка. Стандартът дефинира безжична преносна среда за едновременно интегриране на различни протоколи, полеве мрежи и приложения към съществуващи и нови безжични мрежи. Реализацията на ISA100.11a включва стек за безжична комуникация, системно управление, входна точка към контролната система и дефиниции за сигурност, позволяващи надеждна и защитена безжична свързаност със стационарни, преносими и движещи се полеве измервателни устройства.

Стандартът поддържа основни и тунелирани нива на потребителските приложения. Те също са стандартизирани с възможност за прикачване на разширения. Предлагат се множество транспортни услуги, като мрежовото и транспортното ниво са базирани на TCP или UDP/Iv6. Безжичният пренос е базиран на DSSS технология, като физическото ниво и MAC поднивото са дефинирани в зависимост от изискванията на IEEE 802.15.4.

Обхватът на ISA100.11a включва: разрешени мрежи (радио пренос, Ethernet и полеве мрежи); архитектура (звездообразна, дървовидна, всеки със всеки, алтернативно рутиране); организация и специфициране на сигурността; точки за

връзка към контролната мрежа и маршрутизатори; управляващи системни функции; поддръжка на масови протоколи като FieldBus, ProfiBus, HART и т. н.

Използваните технологии Mapping и Tunneling позволяват в рамките на една универсална безжична инфраструктура да се обслужват всички полеви мрежи и протоколи. Не се налага изграждане на отделни мрежи с отделни изходи и преносна среда в ограничен честотен ресурс, както и наемане на различни специалисти по поддръжката им.

Посредством стандартна ISA100.11a опорна мрежа е възможно свързването на който и да е сензор, към който ѝ да е взел от мрежата. Стандартът позволява използването на ценово атрактивни нерутиращи устройства в безжичната мрежа, за случаите в които е възможна реализация за комуникация директно с рутерите на опорната мрежа. Включените технологии: Radio Agnostic, Subnets, Variable Time Slots и Peer to Peer Communications предоставят широки възможности и устойчива във времето концепция.

4.3. Симулативни експерименти и резултати.

Тъй като изграждането на няколко мобилни роботизирани колички за пренасяне на товари с по-голям габарит и по-голямо тегло, както е описано в т. 4.1. е твърде скъпо, за целите на групово управление са използвани симулации в среда Webot.

Проведените експерименти са в стимулационната среда Webots, която е описана в Глава 3. Самите експерименти са разделени на три варианта. Първия тип експерименти е с три робота във формация следване на лидера. Втория тип експерименти е със седем робота отново във формация следене на лидера, а третия тип експерименти е със седем робота и формация следване на трима лидери. Принудителните промени по време на изпълнение на формациите правим като с курсора на мишката преместваме даден робот на различни позиции с различна ориентация.

Всички експерименти са върху формация следване на лидера, като експеримент 3 представлява формация от тип следване на виртуален лидер. Контролната структура при всички експерименти е от тип централизирана – всеки робот се управлява на база позицията и ориентацията на един лидер.

Условията за хардуерните характеристики и някои спецификации за провеждане на експериментите са описани в следващите редове.

За да се определят ориентацията и позицията на всеки от роботите, всеки от тях е оборудван с компас, от който взимаме данни. Допълнително за изпълнение на зададени траектории лидера е оборудван с лазерен скенер – Lidar, който служи за локализиране, навигация и разпознаване на препятствия. Тези съображения и условия са необходими, понеже трябва да знаем каква е позицията на всеки робот в пространството. Друго важно съображение е всеки робот да си знае кой му е лидера и да знае къде трябва да застане спрямо него.

Автономната навигация се управлява само от лидера, като от нея можем да четем данни за позицията и ориентацията на лидера, планиран път и наличие на препятствия. Информацията за наличие на препятствия е много важна, ако зададената формация не може да запази желаната форма. В такъв случай се активира алгоритъма за последователни подреждане в линия един зад друг, докато се преодолява този проблем. След това роботите се връщат в определената формация, ако терена е свободен.

Управлението - при него целта е роботът максимално бързо да достигне до точката си на задание. Понеже роботите са с диференциално задвижване, се прави разделение на линейната и ъгловата скорост, и първата да зависи от дистанцията до точка на заданието, а ъгловата да зависи от разликата в текущата ориентация и необходимата, за да му застане точката точно по права линия и за двете неща е логично да се управляват, чрез обратна връзка, т.е. PID. Разработените контролери от глава 2, както и контролерите за управление на моторите са описани в програмния код за управление на роботите на програмния език C++. Принципа на коригиране на отместването и ориентацията и движението на последователите е чрез намиране на най-кратък път.

Управлението на последователите се изразява в подаване на команди към двата мотора на всеки от роботите. За постигане на относително добра точност е приложен PID контролер за управление на моторите на роботите по ъгъл и по дистанция. Автономната навигация управлява лидера, а по приложените контролери и чрез определяне на локацията на последователите, управляваме самите тях.

Експеримент 1

Формацията се състои от три робота – един лидер и двама последователи. Типа управление е централизирано. Параметрите, които са зададени за последователите са: за първи робот ъгъл от 0.6 rad и дистанция 0.3m, за втори робот ъгъл 0.6 rad, дистанция 0.8m. Лидера се движи в траектория описваща окръжност, а последователите трябва да спазват зададените параметри, така че да не се отклоняват от формацията. По подразбиране първоначалните позиции на роботите са зададени да бъдат случайни. Така при стартиране на програмата се определят позициите и ориентациите на всеки от роботите, след което последователите предприемат насочено движение към лидера докато не достигнат зададените отстояние и ориентация спрямо него. Допълнително са зададени ограничения на максималните скорости на всички роботи с цел да се постигне реалистична възстановка на процеса. При достигане на зададените цели последователите започват да следят лидера и да се придържат към заданията си. На фигура 4.22 е показана първоначалната позиция и ориентация на всеки от роботите. На фигура 4.23 е показана желаната формация с достигнатите задания на всеки последовател. Тук лидера вече е изминал някакъв път от своето задание да се движи по окръжност, а последователите го следват успешно.



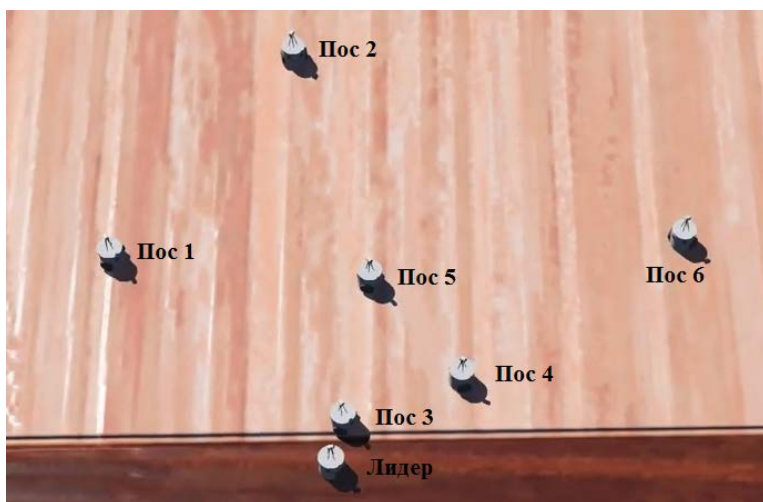
Фиг. 4.22. Първоначална позиция и ориентация



Фиг. 4.23. Желана формация с достигнати задания

Експеримент 2

Целта на този експеримент е да се провери стабилността и поведението на контролерите за по-голяма група от роботи с един лидер. В експеримента се проверява и реакцията на контролерите при спонтанно изменение на позицията и/или ориентацията на лидера или промяна на позицията/ориентацията на някой от последователите. Експеримента включва един лидер и шест последователи, които трябва да се движат във формата на ято птици или стрелка. Отстоянието и ориентацията на всеки от последователите са зададени пропорционално по редове и номера. На фигура 4.24 е показана първоначалната позиция на всеки от роботите. След стартиране на програмата последователите се подреждат в зададената подредба на формацията, според номера си (фигура 4.25). При следващите тестове преместваме лидера на нова позиция. При непосредствена промяна на позицията и ориентацията на лидера, всички последователи предприемат движение за коригиране на тяхната позиция и ориентация до достигане на заданието за форма на формацията (фигура 4.26). При изместване на някой от последователите, цялостната форма се запазва, като той моментално предприема коригиране на позицията си до достигане на заданието си (фигура 4.27).



Фиг. 4.24. Първоначална позиция



Фиг. 4.25. Зададена подредба на формация според номера



Фиг. 4.26. Коригиране на позиция на последователите при преместване на лидера

При тест 1 връщаме назад лидера с 3m и го завъртаме на 6 rad. В резултат групата от последователи веднага започва движение по посока на лидера докато не възстанови желаната подредба на формацията.



Фиг. 4.27. Коририране на позиция при преместване на един последовател

При тест 2 измества се последовател 1 с 0.6m наляво и го завъртаме на 2 rad. В този случай преместеният робот веднага установява грешката в новата си позиция и я коригира, докато формацията продължава да следи лидера.

Експеримент 3

Във втория експеримент вече конфигурацията е друга и всеки робот си има свой си лидер, съответно пак се проследява, какво се случва, когато някой от роботите бъде изместен в друга посока или на друга позиция. В този случай отново имаме един лидер и шест последователи. Обаче сега тук сред последователите имаме още двама лидери (фигура 4.28). Лидер 2 е последовател за Лидер 1, а останалите роботи са последователи на Лидер 2. По подобен начин Лидер 3 е последовател на Лидер 2, а негов последовател е робот 3.1. В този експеримент проверяваме поведението на формацията при промяна на позицията на всеки един от лидерите.



Фиг. 4.28. Конфигурация с три лидера

При първия тест променяме позицията и ориентацията на Лидер 3 (фигура 4.29, а). В резултат наблюдаваме, че след като той бива изместен неговия Последовател 3.1 започва да си коригира позицията спрямо Лидер 3. В това време Лидер 3 предприема корекция на своята позиция спрямо Лидер 2, а Последовател 3.1 не спира да се наглася докато Лидер 3 не стабилизира позицията си във формацията (фигура 4.29, б). Останалата част от групата не променят своите динамични характеристики, а продължават устойчиво да следват Лидер 1.



Фиг. 4.29 а) Преместване на Лидер 3



Фиг. 4.29 б) Корекции на Лидер 3 и Последовател 3.1

При втория тест променяме позицията на Лидер 2 и наблюдаваме поведението на цялата група последователи на Лидер 2 (фигура 4.30, а). В този случай всички роботи се явяват последователи на Лидер 2. Резултата от тази промяна показва, че Лидер 2 веднага след промяната започва да се връща на зададената си позиция спрямо Лидер 1, а останалите последователи веднага започват да коригират движението си спрямо Лидер 2.



Фиг. 4.30 а) Преместване на Лидер 2

Динамиката в движението на цялата формация е ускорена докато всеки робот не заеме правилната си позиция спрямо своя лидер (фигура 4.30, б).

Тук Лидер 2 е последовател на Лидер 1. Лидер 2 има 3 собствени последователя, а освен това негов последовател е Лидер 3, който има свой последовател 3.1, който също е последовател на Лидер 2.



Фиг. 4.30 б) Корекции на Лидер 2 и последователите му

При третия тест променяме позицията на Лидер 1 и наблюдаваме поведението на цялата група работи (фигура 4.31, а). В резултат на сменената позиция на Лидер 1, Лидер 2, който в случая е последовател за Лидер 1 моментално се насочва към новата си позиция спрямо него, при което цялата формация започва да се движи по посока на Лидер 2. Ускорението на динамиката на последователите се наблюдава докато те се стремят да застанат в правилните позиции спрямо техните лидери (фигура 4.31, б).



Фиг . 4.31 а) Промяна позицията на Лидер 1



Фиг . 4.31 б) Корекции в позициите на всички последователи

Литература:

1. Карастоянов Д., Управление на работи и на други мехатронни системи., София, Академично Издателство „Проф. Марин Дринов“, 2010, ISBN 987-954-322-415-9
2. Нешков Т., Състояние и тенденции на обучението по мехатроника., 15 Национална конференция с международно участие “Роботика и мехатроника”, 10-12 октомври, 2005 г., Дряново, стр. 2.40-2.56
3. "Training of Technicians for the Mechatronic Age" (Translation from Japanese), APSDEP, Islamabad, Pakistan, 1988.
4. Willgoss R. A., A Taxonomy for Mechatronic Education, Int. Conference on Recent Advances in Mechatronics, Istanbul, Turkey, August 14-16, 1995.
5. Bradbeer R., "Advances in Mechatronic education using the micromouse as a teaching tool", M2VIP Conf., Toowoomba, Australia, Sept. 13-15, 58-63, 1994.
6. Чапек К., Росумски универсални роботи., С., Народна култура, 1973
7. Заманов В., Карастоянов Д., Сотиров З., Механика и управление на роботите., С., Литера принт, 1993
8. Drews P., W. Trier, "Mechatronics systems for industrial use", Int. L. Intell. Mechatronics, Des.&Prod., Vol. 1, No. 1, 56-60, 1994.
9. Константинов М., Основи на мехатрониката., сп. «Теоретична и приложна механика, БАН, София, бр. 2, 1988, стр. 59-66
10. Минков К., Аврамов И, Гълъбов В., Ролята на проф. Михаил Спиров Константинов за развитието на мехатрониката и роботиката., 7 Межд. конференция “ПРАКТРО”, 10-14 юни 2003 г., Варна, стр. 9-30
11. Худский Г., Титов А., Своятский Д., Щукин А., Промышленные роботы в действии., Минск, Высшая школа, 1986
12. Эйрис Р., Миллер С., Перспективы развития робототехники., Москва, Мир, 1986
13. Ullrich R., The Robotics Primer., New Jersey, Prentice-Hall, 1983
14. Dilman R., Brens K., Ilg W., Architecture and Components for Autonomous Mobile Multi Joint System., European Advanced Robotics Development Mobile Robotics, Leiria, Portugal, 1998, pp 19.1-19.6

15. Marsh P., Robotics, London, Salamabder, 1985
16. Burrows M., Yeomands D., Magnetically attached vehicles for a reactor pressure vessel inspection., Proceedings of Conference on Remote Techniques for Nuclear Plant, British Nuclear Energy Society, Stanford-upon-Avon, England, May, 1993, pp 152-156
17. Девянин Е., Гурфинкел В., Ленский С., Изследвания на система за управление на крачеши роботи, Москва, Машиностроение, 1998
18. Карастоянов Д., Управление на мехатронни системи, София, Академично издателство „Проф. Марин Дринова“, 2006, ISBN-10: 954-322-169-3, ISBN-13: 978-954-322-169-1
19. Карастоянов Д., Харачерева Г., Преглед на съществуващи крачеши мобилни роботи., Проблеми на техническата кибернетика и роботиката, бр. 33, С, 1991, стр. 42-48
20. Virk G., Berns K., Baudoin Y., Lauridsen K., von Puttkamer E., CLAWAR Exploratory Phase Report., EC Brite EuRam Th. Network BETN-0031, 1997
21. Virk G., CLAWAR Mashines in Europe., European Advanced Robotics Development Mobile Robotics, Leiria, Portugal, 1998, pp 4.1-4.7
22. Berns K., Walking and climbing mashines catalogue., www.fzi.de/division/ipt/WMV/preface/preface.html
23. Накано Е., Введение в робототехнику., Москва, Мир, 1988
24. Чикуртев Денис., Изследване и управление на сервизни роботи за подпомагане на човека., Дисертация, София, 2017
25. Bräunl, Thomas (2008). EMBEDDED ROBOTICS- Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
26. D. Chikurtev, Service Mobile Robots – Localization And Recognition of Rooms And Buildings, Using Pre-Made Maps, International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'16 RAM 2016, Byaga, Bulgaria, October 3-4, 2016, стр. 33-38, ISSN 1314-4634.
27. Denis Chikurtev – CORRECTION OF ODOMETRY ERRORS IN SERVICE MOBILE ROBOTS, International Conference on Tribology BULTRIB'16, 27- 29 October 2016, Sofia, Bulgaria, p. 352-358, ISSN: 1313-9878.

28. D. Chikurtev - Optimizing the Navigation for Mobile Robot for Inspection by Using Robot Operating System, PROBLEMS OF ENGINEERING CYBERNETICS AND ROBOTICS, Vol. 66, Sofia – 2015, ISSN 0204-9848, Online ISSN: 1314-409X p. 63-74
29. D. Chikurtev, K. Yovchev, E. Chikurtev, Design and functionality of Web User interface for control of service mobile robot through the Internet, PROBLEMS OF ENGINEERING CYBERNETICS AND ROBOTICS, Vol 67, Sofia, 2016, p. 51-60, ISSN 0204-9848
30. D. Chikurtev, Vision system for recognizing objects using Open Source Computer Vision (OpenCV) and Robot Operating System (ROS), PROBLEMS OF ENGINEERING CYBERNETICS AND ROBOTICS, Vol 68, Sofia, 2017, ISSN 0204-9848
31. Karastoyanov D., Groueva M., Yosifova V.. MOBILE ROBOTS FOR INVESTIGATION IN SPECIFIC AREAS. International Journal of Systems Applications, Engineering & Development (IJSUED), 12, 2018, ISSN:2074-1308, 126-130
32. Bergander A. and other., Mobile cm3-microrobots with tools for nanoscale imaging and micromanipulation., <http://www.microrobotics.epfl.ch/pdf>
33. <http://www.epfl.ch>
34. <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/archive/users/hollar-seth/>
35. <http://diwww.epfl.ch/lami/mirobots/>
36. <http://www.ai.mit.edu>
37. Paulson L. D., Biomimetic Robots., IEEE Computer, Sept. 2004, pp 48-53
38. Santos C., and other., Mosaicking Images., Robotics & Automation, vol. 11, No 4, December 2004, pp 62-68
39. Paulson L. D., Biomimetic Robots., IEEE Computer, Sep. 2004, pp 48-53
40. http://www.contrib.andrew.cmu.edu/~rjg/millibots/millibot_project.html
41. Kanjanawanishkul, K. (2009). Formation control of omnidirectional mobile robots using distributed model predictive control. In Robot Communication and Coordination, 2009. ROBOCOMM '09. Second International Conference on, 1 –7.
42. Zuo, G., Han, J. & Han, G. (2010). Multi-robot formation control using reinforcement learning method. In Y. Tan, Y. Shi & K. Tan, eds., Advances in Swarm Intelligence, vol. 6145 of Lecture Notes in Computer Science, 667–674, Springer Berlin Heidelberg.

43. McClintock, J. & Fierro, R. (2008). A hybrid system approach to formation reconfiguration in cluttered environments. In 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 83 –88.
44. Ying-Hao Yu, N.M. Kwok, Q.P. Ha, Color tracking for multiple robot control using a system-on-programmable-chip, *Automation in Construction*, Volume 20, Issue 6, 2011, Pages 669-676, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.013>.
45. Kanjanawanishkul, K. (2005). Formation control of mobile robots: Survey. *eng.ubu.ac.th*, 50–64.
46. Chen, J., Sun, D., Yang, J. & Chen, H. (2010). Leader-follower formation control of multiple non-holonomic mobile robots incorporating a recedinghorizon scheme. *The International Journal of Robotics Research*, 29, 727–747.
47. Brunete, A., Hernando, M., Gambao, E. & Torres, J.E. (2012). A behaviour-based control architecture for heterogeneous modular, multiconfigurable, chained micro-robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 1607–1624.
48. Mariottini, G.L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., Pappas, G.J. & Daniilidis, K. (2007). Leader-follower formations: Uncalibrated vision-based localization and control. In 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2403–2408.
49. Chen, Y. & Wang, Z. (2005). Formation control: a review and a new consideration. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 3181–3186.
50. Tan, K. & Lewis, M. (1996). Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In *Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1, 132–139.
51. Sabattini, L., Secchi, C. & Fantuzzi, C. (2009). Potential based control strategy for arbitrary shape formations of mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 3762–3767.
52. Bennet, D. & McInnes, C. (2010). Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields. *Robotics and Autonomous Systems*, 58, 256 – 264.
53. Godsil, C. & Royle, G., eds. (2001). *Algebraic Graph Theory*. Springer-Verlag, Heidelberg.

54. Gazi, V. & Passino, K. (2003). Stability analysis of swarms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48, 692–697.
55. Desai, J., Ostrowski, J. & Kumar, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 4, 2864 –2869 vol.4.
56. Desai, J.P., Ostrowski, J.P. & Kumar, V. (2001). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 905–908.
57. Fierro, R. & Lewis, F. (1998). Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9, 589–600.
58. Blažic, S. (2011). A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 59, 1001–1007.
59. Boukattaya, M., Jallouli, M. & Damak, T. (2012). On trajectory tracking control for nonholonomic mobile manipulators with dynamic uncertainties and external torque disturbances. *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 1640–1647.
60. Gu, D. & Hu, H. (2006). Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14, 743–749.
61. Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F. & Noguchi, T. (1990). A stable tracking control method for an autonomous mobile robot. *Robotics and Automation*, 1, 384–389.
62. Jiang, Z. & Nijmeijer, H. (1997). Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping. *Automatica*, 33, 1393–1399.
63. Shevitz, D. & Paden, B. (1994). Lyapunov stability theory of nonsmooth systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39, 1910–1914.
64. Li, X., Xiao, J. & Cai, Z. (2005). Backstepping based multiple mobile robots formation control. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 887 – 892.
65. Desai, J., Ostrowski, J. & Kumar, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 4, 2864 –2869 vol.4.

66. Jadbabaie, A., Lin, J. & Morse, A. (2003). Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 48, 988–1001.
- 67.. Lu, W. & Chen, T. (2009). Synchronisation in complex networks of coupled systems with directed topologies. *International Journal of Systems Science*, 40, 909–921.
68. Wu, Q., Zhou, J. & Xiang, L. (2012). Impulsive consensus seeking in directed networks of multi-agent systems with communication time delays. *International Journal of Systems Science*, 43, 1479–1491.
69. Dong, W. & Farrell, J. (2008). Cooperative control of multiple nonholonomic mobile agents. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 53, 1434 –1448.
70. Dong, W. (2012). Tracking control of multiple-wheeled mobile robots with limited information of a desired trajectory. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28, 262 – 268.
71. Paden, B.E. & Sastry, S.S. (1987). A calculus for computing filippov's differential inclusion with application to the variable structure control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 34, 73–82.
72. Liu, J. and Wu, J. (2001). *Multi-agent Robotic Systems*. CRC, Boca Raton, FL
73. Cao, Z., Tan, M., Li, L., Gu, N. and Wang, S. (2006). Cooperative hunting by distributed mobile robots based on local in-teraction. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(2): 403–407.
74. Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C. and Schneider, F. E. (2005). Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Trans- actions on Robotics*, 21(3): 376–386.
75. Tang, Z. and Ozguner, U. (2005). Motion planning for multi-target surveillance with mobile sensor agents. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5): 898–908.
76. Berman, S., Edan, Y. and Hamshidi, M. (2004). Navigation of decentralized autonomous automatic guided vehicles in material handling. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(4): 743–749.
77. Beard, R. W., Lawton, J. and Hadaegh, F. Y. (2001). A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 9(6): 777–790.

78. Huang, J., Farritor, S. M., Ala' Qadi and Goddard, S. (2006). Localization and follow-the-leader control of a heterogeneous group of mobile robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(2): 205–215.
79. Ren, W. and Beard, R. W. (2004). Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures. *IEEE Proceedings—Control Theory Application*, 151(3): 357–368.
80. Sepulchre, R., Paley, D. and Leonard, N. E. (2007). Stabilization of planar collective motion: all-to-all communication. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(5): 811–824.
81. Olfati-Saber, R. and Murray, R. M. (2004). Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9): 101–115.
82. Gu, D. (2008). A differential game approach to formation control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(1): 85–93.
83. Sun, D. and Wang, C. (2007). Controlling swarms of mobile robots for switching between formations using synchronization concept. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, pp. 2300–2305.
84. Gu, D. and Hu, H. (2005). A stabilizing receding horizon regulator for nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 21(5): 1022–1028.
85. Das, K., Fierro, R., Kumar, V., Ostrowski, J. P., Spletzer and Taylor, C. J. (2002). A vision-based formation control framework. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5): 813–825.
96. Миланов С. Мрежи: Wireless LAN (безжични комуникационни устройства), http://www.comexgroup.com/communications/lan_all/wlan.htm, 02/24/2004.
87. Миланов С. Интерфейс Bluetooth, www.comexgroup.com/communications/bluetooth.htm, 02/24/2004.
88. Atmel Corporation, The Bluetooth Wireless Technology, White paper, http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2205, 2000.
89. M. J. Matarić, —Interaction and intelligent behavior, || Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Cambridge, MA, || Doctoral Dissertation, 1994.
90. Atmel Corporation, Bluetooth General Information, White paper, http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2205, 2000.

91. Kinney P., ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, Home Toys Article, [http://hometoys.com/htinews/oct03/articles/kinney/zigbee .htm](http://hometoys.com/htinews/oct03/articles/kinney/zigbee.htm), October 2003
92. ZigBee Alliance, ZigBee Overview, <http://www.zigbee.org/documents/ZigBeeOverview4.pdf>, September 2003.
93. ZigBee Alliance ,The ZigBee Buzz Is Growing: New Low-Power Wireless Standard Opens PowerfulPossibilities, http://www.zigbee.org/ documents /ZigBee_CES_January_2004_FINAL.pdf, January 2004.
94. ZigBee Alliance, FAQ's, <http://www.zigbee.org/about/faqs/index.asp>, October, 2003.
95. Halme A., Jakubik P., Schönberg T., Vainio M.: The concept of robot society and its utilization, Proceedings of the 1993 IEEE International Workshop on Advanced Robotics, Tsukuba, Japan, pp. 29-35, 1993.
96. Arkin, R.C. and Balch, T.R. 1998. Cooperative Multiagent Robotic Systems AI-based Mobile Robots: Case Studies of Successful Robot Systems. Kortenkamp, D., Bonasso, R.P. and Murphy, R. (eds). MIT Press.
97. Parker L.E.: Multi-Robot Team Design for Real-World Applications, Distributed Autonomous Robotic Systems 2, Asama H., Fukuda T., Arai T., Endo I., Asama, (Eds.), Springer-Verlag, Tokyo, pp. 91 - 103, 1996.
98. Parker, L.E. 1999. Adaptive Heterogeneous Multi-Robot Teams, Neurocomputing, special issue of NEURAP '98: Neural Networks and Their Applications 1999, vol. 28, pp. 75-92.
99. W. Agassounon, —Modeling artificial, mobile swarm systems,|| Doctoral Dissertation, California Institute of Technology, 2003.
100. Козлов В., Макарычев В., Тимофеев А., Юревич Е., Динамика управления роботами., Москва, Наука, 1984.
101. Hunt V., Industrial Robotics Handbook., New York, Industrial Press, 1986
102. Vertut J., Coiffet P., Teleoperation and Robots: Evolution and Development., London, Kogan Page, 1986.

Заклучение:

Груповото управление на роботи намира все повече приложения. Предложените системи за управление според вида на структурата на мобилните роботи дават възможност за разширяване на функциите и възможностите на групите от роботи. Това води до увеличаване на областите на приложение на този тип роботи, както и до по-лесно практическо приложение и използване на група от мобилни роботи.

Като бъдещи изследвания се планира да се направят сравнения при използване на двете разгледани системи (централизирана и разпределена), както и да се предложат методи за тяхното усъвършенстване.

Очаквани области на приложение на роботизирани носачи на товари с групово управление могат да са:

- Летища
 - Възможно наемане от пътуващи хора
- Хотели и Курорти
 - За използване от гости, вместо портиери.
- Болници
 - За пренасяне на уреди и екипировка
- Домове за хора с увреждания
- Промислени предприятия
- Складове
- Магазини
- Ремонтни работилници
- Домове за стари хора
- Лично използване

За по-широко навлизане на мобилни роботи с групово управление в индустрията, услугите и бита (извън симулациите и игрите между групи мобилни роботи) следва да се решат следните задачи (или да си подобрят съществуващи решения):

1. Най-бързо се развива миниатюризацията и повишавата на изчислителната мощност на хардуера – цифрова и силова електроника, задвижвания.
2. С висок темп върви и създаването на нови софтуерни приложения – бази данни, диалогови системи, комуникационни протоколи, интелигентна и автономна сензорика.

Други възможни решения:

3. Подобряване на пространствената ориентация в 3Д среда с цел не само по-добра ориентация, но и по-добра манипулация с обекти. За целта се ползват повече камери, Кинект сензори, различни репери в работната среда.
4. Подобряване на комуникацията между робот и оператор с цел по-добро възприемане и изпълняване на команди и данни. За целта се развиват методи за лицево и гласово разпознаване, вкл. на различни езици и диалекти.
5. Усъвършенстване на методи и средства с приложение в мобилната роботика за подаване на задания и целеви точки чрез координати от карта, адреси и др., вкл. и в 3Д вариант (многоетажни сгради, складове и др.).
6. Усъвършенстване на методи и средства с приложение в мобилната роботика за самообучение на мобилните роботи в статична или слабо променяща се среда. За целта се ползват размита логика, невронни мрежи и методи на изкуствения интелект.

ПРИНОСИ

В съответствие с целта на дисертационния труд - да се изследват видовете групово управление на мобилни роботи и да се предложат иновативни подходи за групово управление на нехолономни мобилни роботи с приложение при роботизирани средства за транспорт на товари, са извършени научни изследвания и научно-приложни разработки, в резултат на което са решени следните задачи:

1. Направени са обзори, анализи и систематизации на видове мобилни роботи и видове методи и средства за групово управление на мобилни роботи.
2. Изследвани са известни подходи за групово управление на мобилни роботи тип „следване на лидера“ и в разпределена формация.

Постигнати са следните приноси, които имат основно научно-приложен характер:

3. Предложена е структура, организация и състав на система за централизирано/разпределено групово управление на нехолономни мобилни роботи.
4. Предложен е иновативен подход за изграждане на управляваща система за групово управление с използване на операционна система ROS и симулационна среда Webots.
5. Предложен е иновативен подход за изграждане на роботизирано средство за транспорт на товари с големи габарити и тегло.
6. Проведени са експерименти и симулации с иновативните подход и структура за групово управление на роботизирани средства за транспорт на товари с един лидер в различни режими. Резултатите са анализирани.
7. Проведени са експерименти и симулации с иновативните подход и структура за групово управление на роботизирани средства за транспорт на товари с няколко съподчинени лидери в различни режими. Резултатите са анализирани.

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ

О в бълг. научно сп. или темат. сборник

1. D. Karastoyanov, M. Grouev., Wireless Controlled Luggage Carrier., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 64, Sofia, 2011, pp 68-77, ISSN 0204-9848,
2. D. Chikurtev, M. Grueva., Leader-follower formation control of multiple mobile robots., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 70, Sofia, 2018, pp 12-20, ISSN 0204-9848

О в чужд. сп., чужд. темат. сборник, бълг. сп. с межд. статут

3. Karastoyanov D., Groueva M., Yosifova V.. Mobile robots for investigation in specific areas., 2nd International Conference on Applied Mathematics And Computer Science (AMACS 2018), Rome, Italy, May 26-28, 2018, published in: International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, 12, 2018, ISSN:2074-1308, 126-130

О доклад в пълен текст в материали на бълг. научно мероприятие

4. D. Karastoyanov, M. Grouev., Wireless Controlled Autonomous Luggage Carrier., John Atanasoff Celebration Days, International Conference “Robotics, Automation And Mechatronics” RAM 2011, Sofia, 3-7 October 2011, pp m-9 – m-12, ISSN 1314-4634
5. Д. Чикуртев, М. Груева, Д. Карастоянов., Интелигентни сервизни работи – локализация, навигация и наблюдение с IR термокамера., Нац. Конференция АДП 2016, 23-26 юни 2016, Научни известия на НТСМ, бр. 14/200, юни 2016, ISSN 1310-3946, стр. 200-2017
6. D. Karastoyanov, D. Chikurtev, M. Grouev., Robot control and modern ict for energy efficiency and better quality of innovative technological processes using SMART LAB, equipment, Int. Conf. MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS. 14-17.9. 2016, Varna Bulgaria, Volume 23/209 SEPTEMBER 2016,ISSN 1310-3946, pp 35-38
7. Груева М., Карастоянов Д., Стоименов Н., Обзор на методи (следване на лидера) за групово управление на мобилни работи., 25 МНТК „АДП 2017“, Созопол, България, 22-24 юни, 2017, ISSN 1310-3946, стр. 165-170

8. Д. Чикуртев, М. Груева, Н. Стоименов., Разпределено групово управление на мобилни роботи., Международна конференция „Automatics and Informatics“, София, България, 4-6 октомври 2017, ISSN 1313-1850, стр. 65-68
9. Д. Чикуртев, М. Груева., Система за управление на група роботизирани агенти., John Atanasoff Celebration Days, International Conference “Robotics, Automation And Mechatronics” RAM 2018, Sofia, 24-26 July 2018, pp 5 – 11, ISSN 1314-4634

ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени, при проведени от мен, научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител.

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са цитирани, където е възможно, в изложените референции.

Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:.....

/инж. Милена Груева/