



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ**

Теодора Огнянова Митева

**Алгоритми за групово управление на работи при въздействие
на различни комуникационни връзки**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

по специалност 02.01.52 “Роботи и манипулатори”

в професионално направление 5.3. “Комуникационна и компютърна техника”

Научен ръководител: доц. д-р Димитър Карастоянов

София, 2012 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция “Вградени интелигентни технологии” на ИИКТ-БАН, състояло се на 19.03.2012 г.

Дисертацията съдържа 145 стр., 52 фигури, 9 таблици и 10 стр. литература, включваща 60 заглавия.

Защитата на дисертацията ще се състои на 2012 г. от часа в зала на на открито заседание на научно жури в състав:

Проф. д-р Тодор Нешков

Доц. д-р Пенчо Венков

Доц. д-р Любен Клочков

Доц. д-р Димитър Карастоянов

Доц. Михаил Михов

Материалите за защитата са на разположение на интересувашите се в на ИИКТ, ул. “Акад. Г.Бончев”, бл. 2

Теодора Огнянова Митева

Алгоритми за групово управление на работи при въздействие на различни комуникационни връзки

В предоставената работа са разгледани проблеми свързани с адаптивно управление на мобилни микро работи. Поставените цели в този труд е да се намерят оптимални алгоритми за обхождане на дадена площ и комуникация между отделните работи.

Поставени цели в разгледаната работа:

- Намиране на рационален алгоритъм за обхождане на пространство.
- Намиране на рационален алгоритъм за пълно и цялостно обхождане на пространство.
- Намиране на подходящ и рационален начин на комуникация между разгледаните вид мобилни микро работи.
- Валидиране на алгоритмите за пълно обхождане на пространство.
- Тестване на всички алгоритми в реална среда.

1.1.1 Групово управление на микророботи - подходи и проблеми

Реализацията на система от много работи е значително по-сложна по отношение на навигацията и управлението им, поради необходимостта от прецизна координация между членовете на групата. Основно съществуват два типа архитектури за групи от работи – централизирана и децентрализирана.

При централизираната архитектура всички задачи по планиране, контрол, наблюдение и изпълнение се осъществяват от едно общо управляващо устройство. Разбира се, изключително трудно е изграждането на напълно централизирана система за управление на множество работи, поради големия брой изчислителни операции, пропорционално нарастващи с броя на микророботите.

Този недостатък се избягва при децентрализираните (разпределени) архитектури, където отсъства централно управляващо устройства, а решенията се вземат от самите членове на групата. Тези архитектури се реализират на базата на отделни модули, всеки от които има специфична функция.

Един от проблемите при координацията и управлението на група от работи е локализацията на всеки от членовете на отбора, т.е. определянето на неговото пространствено положение и ориентация. Това налага да се разработват “рамки”, вътре в които се разполагат сензори за локализация, които подават надеждна и последователна информация за определяне на местоположението на микророботите. При децентрализираните архитектури, обработката и оценката на данните от тези сензори също е разпределена между отделните членове на екипа, с цел намаляване на изчислителната сложност и

съответно на времето за обработка на информацията

Друг важен проблем при изграждането на разпределена система от микророботи е тяхното координирано поведение, т.е. управлението им като група, така че да се използват ефективно техните сензорни и задвижващи системи. Напоследък особено популярен стана методът за управление, базиран на поведението на групата. Arkin и Balch описват инспириран от биологията метод за контрол и интегриране на роботите в групата – всеки робот локално се управлява от арбитрирана, реактивна система, която се стреми да балансира много поведения за достигане на локално определени цели, аналогично на някои системи в живите организми.

Тук се сблъскаме с парадигмата дали е възможно роботи с такива размери да бъдат достатъчно стабилни и в същото време да изпълняват точно зададените задачи. SWARM роботиката взема своето вдъхновение от природата. Следва поведението на пчелите, мравките, червейте.

SWARM роботиката има четири много важни предимства:

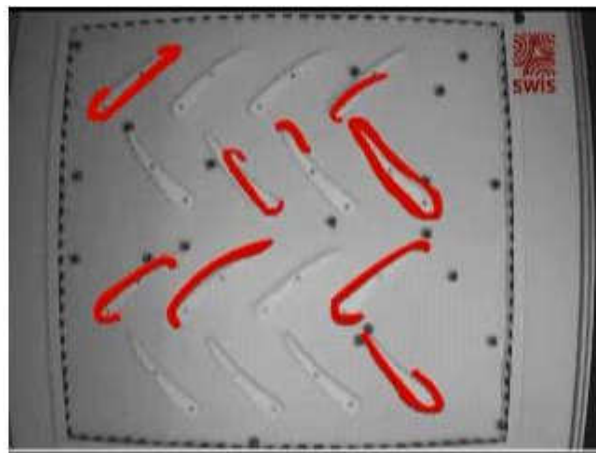
1. Архитектурата при управление може да се поддържа по същия начин както с няколко робота така и при наличието на хиляди роботи.
2. Роботите могат да бъдат прибавени или да се изтеглят от системата по начин по който не се получава противоречие със средата. Те имат способността да се прекоординират и разпределят самостоятелно.
3. Робустни – Въпреки малките си размери тези роботи както бе споменато взимат поведението си от природата. Добре позната структура имат мравките.

4. Опростяване – намаляване на общите разходи и минимизиране на единицата

При моделиране на такива системи се взима също предвид и размерите на роботите. SWARM роботите ни позволяват мобилност и с тяхна помощ може да се проникне на трудно достъпни места

1.1.2 Принос към дисертацията: Разработване на алгоритми за проследяване на повърхност

За управлението на мобилни микро роботи една от важните характеристиките е да се определят правилните алгоритми. С настоящата работа разглеждам алгоритми за групово управление и разработвам такива с цел цялостно и пълно обхождане на повърхност с препятствия, които трябва да бъдат обиколени изцяло (например самолетна турбина с перки) – фиг. 1.



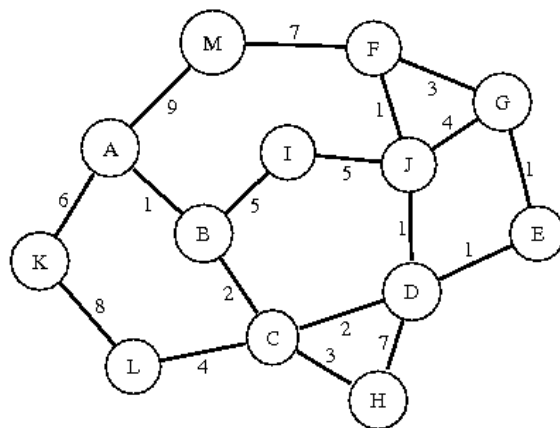
Фигура 1

С помощта на теория на графите разглеждам проблема като проблем на китайският пощальон. Направена е симулация и алгоритмите са тествани в реално време с работи тип – e-Puck. Направени са анализи и са приложени резултати.

1.2 Граф алгоритъм за обхождане на повърхност

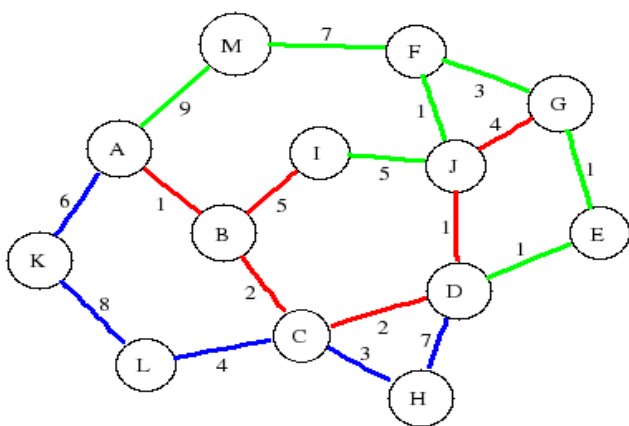
Алгоръмът е направен с цел да се намери най-краткия път от дадена стартова позиция до всички останали точки от дадената среда за обхождане, където дължината на всеки път, който трябва да се обходи е различна. Имаме директен граф със зададени стойности на всяка линия, която представлява всеки път, който роботът трябва да измине.

На фиг. 2 е показан графът G, който е съставен за средата, която трябва да бъде обходена.



Фигура 2 Прилагане на GraphViz приложение за конструиране на граф във работна среда

Стойността на пътя между два върха е сума от стойностите на пътищата между тези два върха.



| | | |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| AA Distances 1: 0 | MA Distances 2: 9 Sum: 9 | LA Distances 3: 9 Sum: 18 |
| AB Distances 1: 1 | MB Distances 2: 10 Sum: 11 | LB Distances 3: 11 Sum: 22 |
| AC Distances 1: 3 | MC Distances 2: 11 Sum: 14 | LC Distances 3: 14 Sum: 28 |
| AD Distances 1: 5 | MD Distances 2: 9 Sum: 14 | LD Distances 3: 14 Sum: 28 |
| AE Distances 1: 6 | ME Distances 2: 10 Sum: 16 | LE Distances 3: 16 Sum: 32 |
| AF Distances 1: 7 | MF Distances 2: 7 Sum: 14 | LF Distances 3: 14 Sum: 28 |
| AG Distances 1: 7 | MG Distances 2: 10 Sum: 17 | LG Distances 3: 17 Sum: 34 |
| AH Distances 1: 6 | MH Distances 2: 14 Sum: 20 | LH Distances 3: 20 Sum: 40 |
| AI Distances 1: 6 | MI Distances 2: 13 Sum: 19 | LI Distances 3: 19 Sum: 38 |
| AJ Distances 1: 6 | MJ Distances 2: 8 Sum: 14 | LJ Distances 3: 14 Sum: 28 |

1.3 Резултати

Всеки робот има свой локален граф за обхождане. Всяка точка има четири върха, по които да мине роботът, за да сме сигурни че пространството ще бъде обходено изцяло. На следващата таблица са показани върховете, линиите и върхове и линии които всеки един робот трябва да обходи.

| Робот | Точки | Линии | Върхове и линии за обхождане |
|---------|-------|-------|------------------------------------|
| Робот 1 | 6 | 5 | 20 |
| Робот 2 | 7 | 6 | 19 |
| Робот 3 | 8 | 7 | 29 |

Таблица 1 Описание на роботи със съответните точки за обхождане

Роботите които са използвани за целите на това задание, са роботи от тип e-Ruck. Използваният симулатор е Webots. На следващата таблица са показани времето и процента на обхождане при три случая:

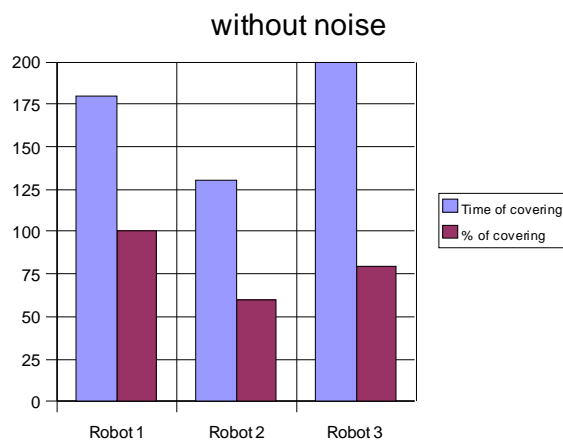
- ако имаме само един робот, който обхожда даденото пространство
- ако имаме два робота, които обхождат даденото пространство
- ако имаме три робота, които обхождат даденото пространство

Всички направени симулации, които са показани като резултати на таблица 2 са направени при идеални условия без наличие на шум.

| | Time of covering | % of covering |
|---------|------------------|---------------|
| Robot 1 | 180 | 100 |
| Robot 2 | 130 | 60 |
| Robot 3 | 200 | 80 |

Таблица 2 Време и процент на обхождане

Таблица 3 Време и процент на обхождане



При наличие на шум времето, за което се изпълнява задачата, се увеличава.

Понякога дори и само с един робот не се получава цялостно обхождане. На

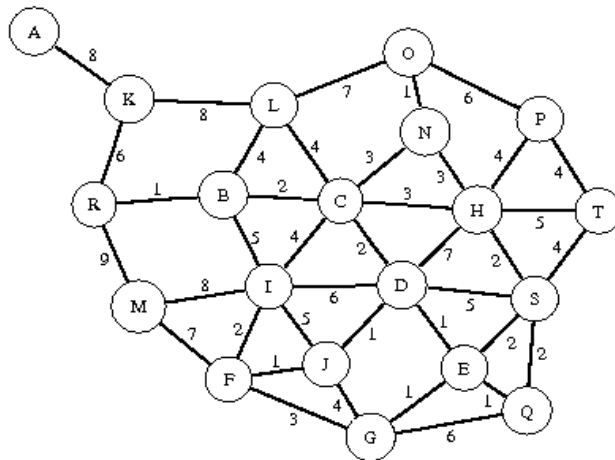
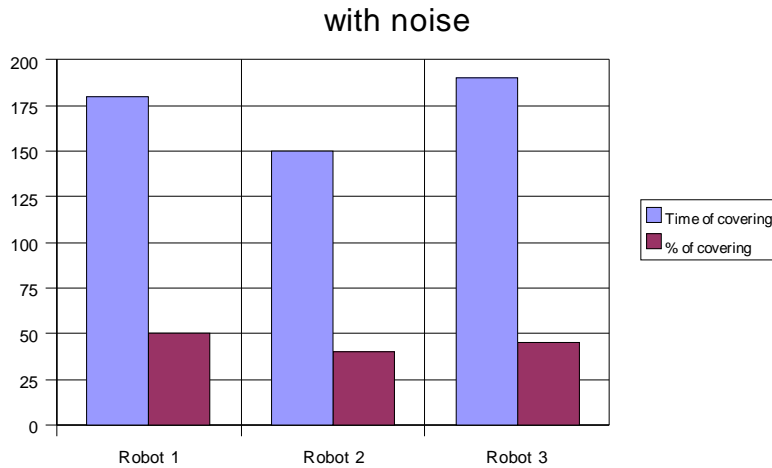
таблица 4. са показани резултати при наличие на шум.

Таблица 4 Време и процент на обхождане

| | Time of covering | % of covering |
|---------|------------------|---------------|
| Robot 1 | 180 | 50 |
| Robot 2 | 150 | 40 |
| Robot 3 | 190 | 45 |

Получените резултати чрез блок диаграми са показани на таблица 5.

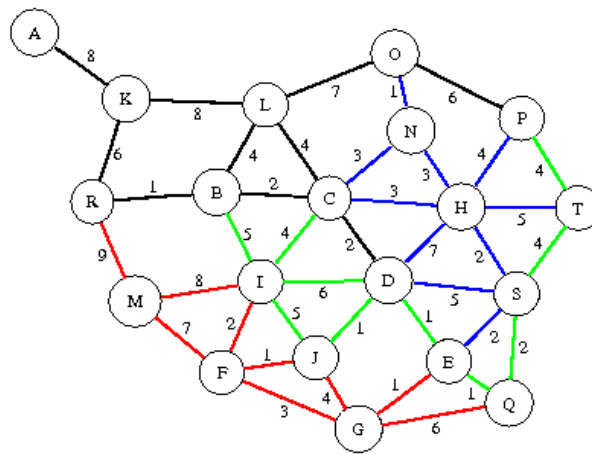
Таблица 5 Време и процент на обхождане



Фигура4 Разграфяване на граф при наличие на 4 робота

В случай на четири робота имаме общо 20 възела и 38 линии (фиг. 4). Всеки възел има четири точки, които да бъдат покрити. На фиг. 5. е показан граф, разпределен за четири робота.

Разпределянето на графа за четирите робота е дадено на фиг. 5:



Фигура 5 Приложен алгоритъм на Дийстра

В таблица 6 е показано по колко върхове и линии трябва да обходи всеки един робот.

Таблица 6 Разпределение на върхове и линии на обхождане при 4 робота

| Робот | Върхове | Линии | Върхове и линии за обхождане |
|---------|---------|-------|------------------------------|
| Робот 1 | 9 | 10 | 30 |
| Робот 2 | 8 | 9 | 30 |
| Робот 3 | 9 | 10 | 25 |
| Робот 4 | 10 | 10 | 20 |

Процентът на покритие на повърхността за всеки един робот е даден в таблица

Таблица 7 Време и процент на обхождане

| Robot | % of covering |
|---------|---------------|
| Robot 1 | 33 |
| Robot 2 | 50 |
| Robot 3 | 55 |
| Robot 4 | 30 |

Данните от таблица 7 като блок диаграми са показани на таблица 8.

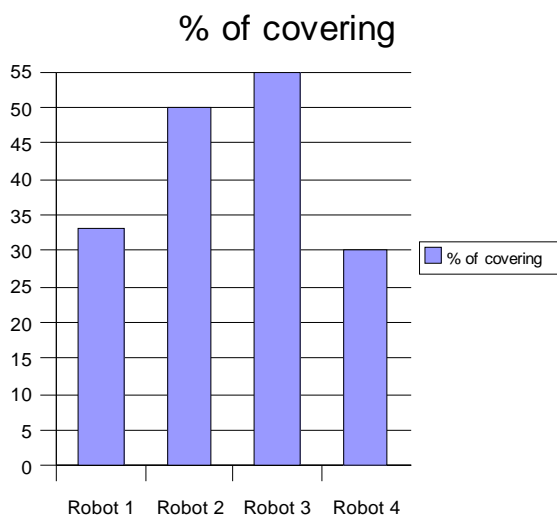


Таблица 8 Време и процент на обхождане

1.3.1 Wireless управление на група от микро роботи в реално време

До скоро безжичните комуникации се свързваха само с приложение в мобилните телефони. Но има и други области, където удобството на безжичните комуникации ги е изтласкало на върха на комуникационната вълна. 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 радиоканалите за връзка между устройствата, макар че не е ново като изобретение, едва напоследък еволюира значително, особено благодарение на широкото разпространение на Internet, локалните и WAN мрежи, свързващи много хора, позволяващи да си разменят глас, видео и данни помежду си, и то 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 - потребността на съвременния човек от модерни бързодействащи и високоскоростни комуникации. Според изчисленията на аналитиците, през следващата година в света ще 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.

По-подробно са разгледани протоколите Bluetooth и ZigBee.

1.4 Проблеми възникващи при работа в реално време

Зрението е най-важния компонент, помагач в природата на организмите да съгласуват движенията си с тези на съседите им. Например ято птици и пасаж

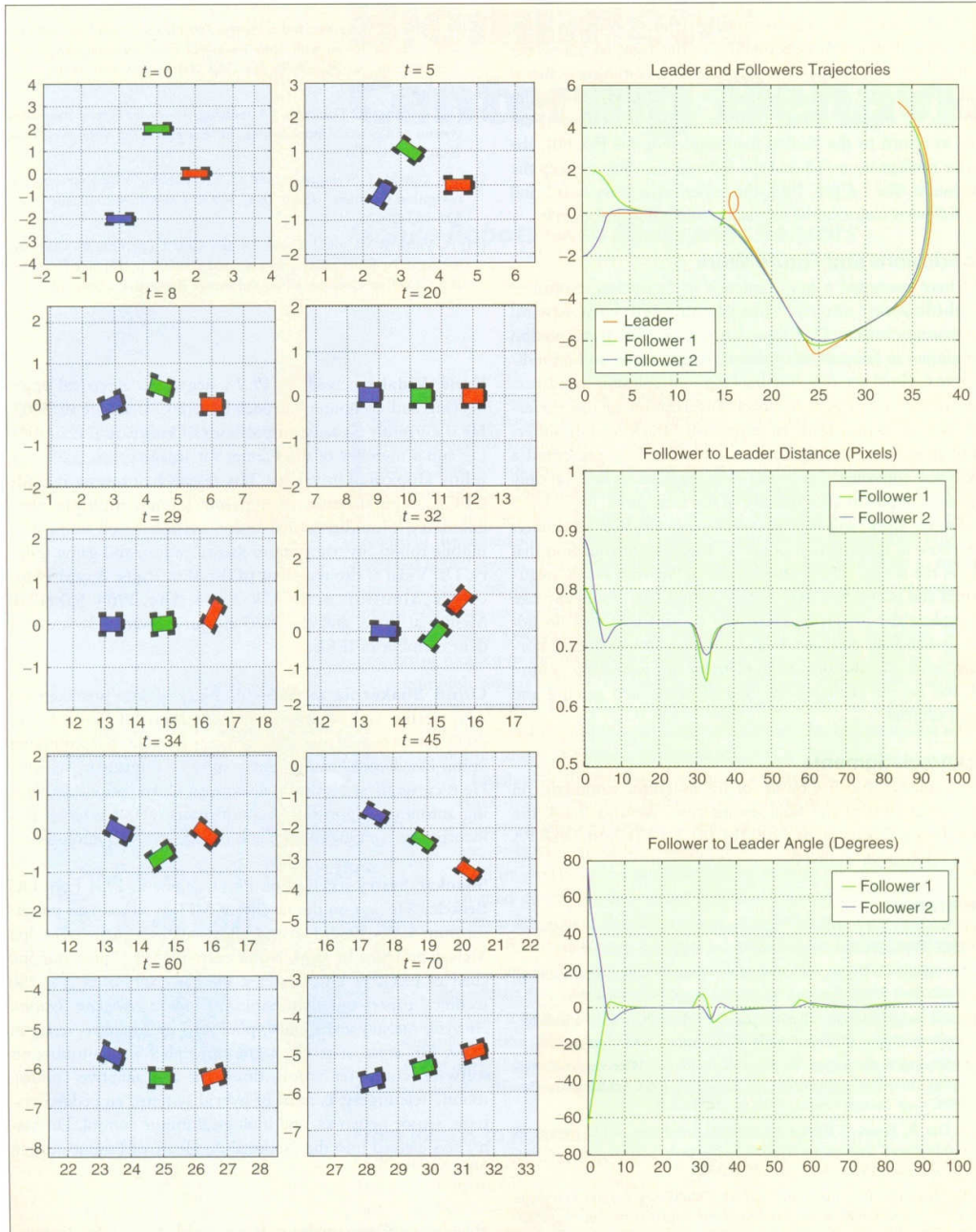
риби могат да поддържат съгласувано разположение без явна комуникация между индивидите. Дългосрочна задача в този аспект е тази, която да позволява на група мобилни роботи да поддържат визуално дадено разположение в пространството в отсъствието на комуникация. За да се постигне това, се разглежда сценарий, при който следящият робот използва сегментация (разделяне) на движението, за да оцени позицията на другия робот в групата и 3D зрение за следене и избягване на препятствия.

При предходни изследвания, посветени на съгласуващо управление на група роботи се е допускало, че комуникацията между роботите е възможна и вниманието е било концентрирано върху устойчивостта и синтеза на контролер. Предложено е понятието “линия на устойчивост” и са изведени достатъчни условия за устойчивост при разположение по тази линия. Устойчивостта на разположението е представена чрез произволни графи и е предложен критерий за устойчивост, подобен на този на Найкуист, който може да се изведе на базата на спектралните свойства на графа на Лаплас. Изведени са децентрализирани закони за управление, които водят до устойчиво разположение, при условие че желаната скорост на работа водач (лидер) е известна.

1.4.1 Принос към дисертацията: Разработване на алгоритми за комуникация между мобилни микро роботи

При среда в която два работа трябва да комуникират по между си от изключително значение е да се зададат правилните алгоритми, както и да се

направят правилните конфигурации при комуникацията на роботите, така и на самите работи.



В тази работа разработвам алгоритми за комуникация между два робота. От значение е също така и валидацията на алгоритмите. Системата е тествана в Лаболаторията по Автоматика и Контрол в Университета в Гренобъл, Франция.

Двата робота зависят един от друг и поради тази причина моделът които е направен е следният:

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{F}^* \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) = \mathbf{u}_1 \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{F}^* \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) = \mathbf{u}_2 \quad (2)$$

1.4.2 Заключение

В разработената дисертация са приложени алгоритми за групово управление на мобилни микро работи както в реално време така и офлайн. Разработени са алгоритми за обхождане на повърхност, разгледани са случаи при които група от работи изпълняват поставени задачи, синхронизация на работи в реално време и комуникацията помежду им.

В разработената дисертация са разгледани алгоритми за групово управление на мобилни микро работи. Разгледана е както симулационна среда, така и прилагането на алгоритмите в реално време с работи от тип e-Puck. В Глава 2 е описан математичен модел за реализацията на алгоритмите за обхождане на повърхност. В Глава 3 е разгледано различно поведение на два робота пренасящи товар. При обхождане на повърхност винаги биха могли да изникнат проблеми от счупено колело до грешка при пренасянето на данни, поради тази причина също така са разгледани и ситуации при които такива ситуации биха могли да се случат.

При микророботите трябва да се вземат предвид размерите, сложността на

работната среда, автономно захранване за ефекторната система, ограничеността на датчици и двигатели, поради тази причина е направена оптимизация на разгледаните алгоритми

Описаните дотук стратегии и дадените примери очертават насоките в развитието на методите за групово управление на мобилни микророботи. С тяхното развитие се преминава от научни изследвания и игрови ситуации към ползуването на групи мобилни микророботи, управлявани синхронизирано с обща цел в реалния свят, например за изследване на околната среда, наблюдения във вредни условия или недостъпни места, при откриване на пострадали от природни бедствия или спасяване на заложници на терористи и др.

Имайки предвид нарастващата технология разработените алгоритми могат да бъдат доразвити и адаптирани за необходимите цели.

Описаните стратегии за поведение при различни ситуации са аргументирани и са приложени примери.

Публикации

o Hvala N., Aller F., **Miteva T.**, Kukanja D. “Modelling, simulation and control of an industrial semi-batch emulsion polymerization reactor”, “**Computers & Chemical Engineering**” [Print ed.], 2011, vol.35, no.10, str. 2066-2080, doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.05.016. [COBISS.SI-ID 24978727]

o Hvala N., **Miteva T.**, Kukanja D. “Modelling, simulation and control of a semi-batch industrial polymerization reactor”. V: BHUSAN DAS, Diganta (ur.), NASSEHI, Vahid (ur.), DEKA, Lipika (ur.). *7th International Industrial Simulation Conference 2009, ISC'09, June 1-3, 2009, Loughborough, United Kingdom*. Ostend: EUROSIS-ETI, 2009, str. 318-324. [COBISS.SI-ID [22718759](#)]

o **Miteva T.**, Hvala N. “Optimization and control of a semi-batch polymerization reactor”. V: GAŠPERIN, Matej (ur.), PREGELJ, Boštjan (ur.). *Proceedings of the 9th International PhD Workshop on Systems and Control, October 1-3, 2008, Izola, Simonov zaliv, Slovenia : young generation viewpoint*. Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 2008, 6 str. [COBISS.SI-ID [22247207](#)]

o Karastoyanov D., **Miteva T.**, Sokolov B., Stoenchev S., “Methods for Group Control of Mobile Microrobots”, September 2008, 18th International Conference on Robotics and Mechatronics, Varna, Bulgaria , 17-20 september, 2008 г., pp. 47 - 51

o **Miteva T.**, Hvala N., Alvarez R., Kukanja D. “Model-based optimization of a semi-batch industrial polymerization process”. V: FERREIRO, Eugenio C. (ur.), MOTA, Manuel M. (ur.). *Proceedings of the 10th International chemical and biological engineering conference : Braga, Portugal, 4-6 September 2008 : ChemPor 2008*. [S.l.: s.n.], 2008, 6 str. [COBISS.SI-ID [21981223](#)]

- o **Miteva T.**, Alvarez R., Hvala N., Kukanja D. “Modeling of polyvinyl acetate polymerization processes for control purposes”. V: BRAUNSCHWEIG, Bertrand (ur.), JOULIA, Xavier (ur.). 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, June 1-4, 2008, Lyon, France : selected papers, (Computer-aided chemical engineering, 25). Amsterdam [etc.]: Elsevier Science, 2008, 6 str. [COBISS.SI-ID 21925415]
- o **Miteva T.**, “CERN – Gas Control Systems, SCADA Systems and PVSS”, October 2005, National Conference on Robotics, Dryanovo 2005, Bulgarian Academy of Sciences, 12-14 october, 2005, pp. 1.8-1.11
- o **Miteva T.**, Karastoyanov D., “Behavior based mobile robots and movements”, October 2005, National Conference on Robotics, Dryanovo 2005, Bulgarian Academy of Sciences, 12-14 october, 2005, pp. 1.12-1.16
- o **Miteva T.**, Karastoyanov D., “Group control of mobile microrobots”, 12-15 June, 2005, National Conference Practro 2005, Bulgarian Academy of Sciences, Varna, Bulgaria, pp. 215-220.
- o Georgiev Y., Dimitrov D., **Miteva T.**, “Lego Robots for Educational Purposes”, 12-15 June, 2005, National Conference Practro 2005, Bulgarian Academy of Sciences, Varna, Bulgaria, pp. 38-43
- o Miteva T., Karastoyanov D., Full surface tracking by mobile robots., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 65, Sofia, 2012 (accepted)\
- o Miteva T., Karastoyanov D., Graph algorithm for surface tracking., International Conference BIONICS, BIOMECHANICS AND MECHATRONICS – ICBBM 2012, June 4-8, 2012, Varna, Bulgaria (accepted)

Благодарности

Имах честта да работя под ръководството на доц. д-р Димитър Карастоянов, който ме подкрепяше и помагаше през годините - сърдечно благодаря за помощта.

Също така искам да благодаря на екипа на проф. Мартиноли, който ме прие в лабораторията си и ми помогна в работата ми. Благодаря Ви Николаус, Крис, Джим ! Без вас нямаше да се справя.

Разбира се бих искала да изкажа благодарности и на екипа в лабораторията по Автоматика и Контрол в Гренобъл, без които работата ми нямаше да е завършена.

Литература

- [1] R. Beckers, O. E. Holland, and J.-L. Deneubourg, —From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics, □ in Fourth Workshop on Artificial Life, B. R. and M. P., Eds. Boston, MA, USA: The MIT Press, 1994, pp. 181–189.
- [2] A. Martinoli, A. J. Ijspeert, and F. Mondada, —Understanding collective aggregation mechanisms: From probabilistic modelling to experiments with real robots, □ Robotics and Autonomous Systems, vol. 29, pp. 51–63, 1999.
- [3] A. Martinoli, A. J. Ijspeert, and L. M. Gambardella, —A probabilistic model for understanding and comparing collective aggregation mechanisms, □ in Fifth European Conf. on Artificial Life, ser. Lectures Notes in Computer Science, D. Floreano, F. Mondada, and J.-D. Nicoud, Eds., Lausanne, Switzerland, 1999, pp. 575–584.
- [4] O. Holland and C. Melhuish, —Stigmergy, self-organisation, and sorting in collective robotics, □ Artificial Life, vol. 5, pp. 173–202, 1999.
- [5] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowoski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, —A vision-based formation control framework, □ IEEE Trans. on Robotics and Automation (Special Issue on Advances in Multi-Robot Systems), vol. 18, no. 5, pp. 813–825, 2002.
- [6] B. P. Gerkey and M. J. Matarić, —Sold!: Auction methods for multirobot coordination, IEEE Trans. on Robotics and Automation (Special Issue on Advances in Multi-Robot Systems), vol. 18, no. 5, pp. 758–768, 2002.

- [7] C. R. Kube and E. Bonabeau, —Cooperative transport by ants and robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 1–2, pp. 85–101, 2000.
- [8] L. E. Parker, —Lifelong adaptation in heterogeneous multi-robot teams: Response to continual variation in individual robot performance, *Autonomous Robots*, vol. 8, pp. 239–267, 2000.
- [9] M. J. Matarić, —Interaction and intelligent behavior, *Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Cambridge, MA*, *Doctoral Dissertation*, 1994.
- [10] J. Fredslund and M. J. Matarić, —General algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication, *IEEE Trans. on Robotics and Automation (Special Issue on Advances in Multi-Robot Systems)*, vol. 18, no. 5, pp. 837–846, 2002.
- [11] I. D. Kelly and D. A. Keating, —Flocking by the fusion of sonar and active infrared sensors on physical autonomous mobile robots, *in Third Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, vol. 1, Gaimardes, Portugal, 1996, pp. 1–4.
- [12] A. T. Hayes, A. Martinoli, R. M. Goodman, H. T. Nagle, J. W. Gardner, and K. Per-saud, —Distributed odor source localization, *IEEE Sensors (Special Issue on Artificial Olfaction)*, vol. 2, no. 3, pp. 260–271, 2002.
- [13] A. T. Hayes, A. Martinoli, and R. M. Goodman, —Swarm robotic odor localization: Off-line optimization and validation with real robots, *Robotica (Special Issue on Bio-Inspired Robotics)*, vol. 21, pp. 427–441, 2003.

- [14] A. Billard, A. J. Ijspeert, and A. Martinoli, —A multi-robot system for adaptive exploration of a fast changing environment: Probabilistic modelling and experimental study, □ Connection Science (Special Issue on Adaptive Robots), vol. 11, no. 3/4, pp. 359–379, 1999.
- [15] B. Yamauchi, —Decentralized coordination for multi-robot exploration, □ Robotics and Autonomous Systems, vol. 29, no. 1, pp. 111–118, 1999.
- [16] I. Wagner, M. Lindenbaum, and A. Bruckstein, —Distributed covering by ant-robots using evaporating traces, □ IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 5, pp. 918–933, 1999.
- [17] T. Weigel, J.-S. Gutmann, M. Dietl, A. Kleiner, and B. Nebel, —Cs freiburg: Coordinating robots for successful soccer playing, □ IEEE Trans. on Robotics and Automation (Special Issue on Advances in Multi-Robot Systems), vol. 18, no. 5, pp. 685–699, 2002.
- [18] G. Beni and J. Wang, —Swarm intelligence, □ in Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan, Tokyo, Japan, 1989, pp. 425–428.
- [19] A. Martinoli, G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg, —Quand les robots imitent la nature, □ La Recherche, vol. 358, pp. 56–62, 2002.
- [20] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, ser. SFI Studies in the Science of Complexity. New York, NY: Oxford University Press, 1999.
- [21] W. Agassounon, A. Martinoli, and R. M. Goodman, —A scalable, distributed algorithm for allocating workers in embedded systems, □ in IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics SMC-01, Tuscon, AZ, USA, 2001, pp. 3367–3373.

- [22] K. Lerman, A. Galstyan, A. Martinoli, and A. J. Ijspeert, —A macroscopic analytical model of collaboration in distributed robotic systems, □ *Artificial Life*, vol. 7, no. 4, pp. 375–393, 2001.
- [23] A. Martinoli and K. Easton, —Modeling swarm robotic systems, □ in *Eighth International Symp. on Experimental Robotics ISER-02*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics (2003), B. Siciliano and P. Dario, Eds., Sant’Angelo d’Ischia, Italy, 2002, pp. 297–306.
- [24] —, —Optimization of swarm robotic systems via macroscopic models, □ in *Second International Workshop on Multi-Robot Systems*, A. C. Schultz, L. E. Parker, and F. E. Schneider, Eds., Washington, DC, USA, 2003, pp. 181–192.
- [25] W. Agassounon, —Modeling artificial, mobile swarm systems, □ *Doctoral Dissertation*, California Institute of Technology, 2003.
- [26] A. Martinoli, K. Easton, and W. Agassounon, —Modeling of swarm robotic systems: A case study in collaborative distributed manipulation, □ *International Journal of Robotics Research (Special Issue on Experimental Robotics)*, vol. 23, no. 4, pp. 415–436, 2004.
- [27] W. Agassounon, A. Martinoli, and K. Easton, —Macroscopic modeling of aggregation experiments using embodied agents in teams of constant and time-varying sizes, □ *Autonomous Robots (Special Issue on Swarm Robotics)*, vol. 17, no. 2–3, pp. 163–191, 2004.
- [28] K. Easton and J. Burdick, —A coverage algorithm for multi-robot boundary inspection, □ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA-05*, Barcelona, Spain, 2005.

- [29] C. S. Orloff, —A fundamental problem in vehicle routing, □ Networks, vol. 4, pp. 35–64, 1974.
- [30] K. Williams: Multi Robot Systems: Modeling Swarm Dynamics and Designing Inspection Planning Algorithms. 2006 California University of Technology.
- [31] D. Ahr and G. Reinelt, —New heuristics and lower bounds for the min–max k–chinese postman problem, □ in Algorithms–Esa 2002, Proceedings, ser. Lecture Notes in Com–puter Science, 2002, vol. 2461, pp. 64–74.
- [32] G. N. Frederickson, M. S. Hecht, and C. E. Kim, —Approximation algorithms for some routing problems, □ SIAM Journal on Computing, vol. 7, no. 2, pp. 178–193, 1978.
- [33] GraphViz Visualization Software.
- [34] Webots real time robot environment .
- [35] Т. Митева, Д. Карастоянов: Групово Управление на Мобилни Микророботи, ПРАКТРО 2005, Варна, България.
- [36] Карастоянов Д. Н. и др., Мобилни роботизирани системи за работа във вредни среди., Договор с НФНИ-МОН № ТН-801/98 г., доклади на Национална конференция —Роботика и мехатроника 1999 □, 23-25 юни 1999, Известия на НТСМ, бр. 5, 1999
- [37] Т. Митева, Д. Карастоянов: Behavior based mobile robots and movements, October 2005, National Conference on Robotics, Dryanovo.

- [38] Д. Карастоянов, Т. Митева, Б. Соколов, С. Стоенчев: Методи за групово управление на Мобилни Микро роботи, Септември 2008, 18та Национална Конференция по Роботика и Мехатроника, Варна, България.
- [39] R. Buechi, State Space Control, LQR and Observer.
- [40] B. Anderson, J. Moore: Optimal Control: Linear Quadratic Methods.
- [41] H. Bode: Analyze and Simulation of dynamic systems
- [42] LUND University: TrueTime: Simulation of networked and Embedded Control Systems.
- [43] Заманов В., Карастоянов Д., Сотиров З., Механика и управление на роботите, С, Литера принот, 1993
- [44] Карастоянов Д., Харачерева Г., Преглед на съществуващи крачеши мобилни роботи., Проблеми на техническата кибернетика и роботиката, бр. 33, С, 1991, стр. 42-48
- [45] Карастоянов Д. Н., Захариев Р. З., Мобилна роботизирана система с манипулационни възможности за работа във вредни и опасни среди., X Национална конференция с международно участие “Автоматизация на дискретното производство – АДП 2000”, май 2000 г., стр. 245-251
- [46] 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
- [47] Bergander A. an other., Mobile cm^3 -microrobots with tools for nanoscale imaging and micromanipulation., <http://www.microrobotics.epfl.ch/pdf>

[48] <http://www.epfl.ch>

[49] 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

[50] 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.

[51] 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.

[52] 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.

[53] Миланов С. Мрежи: Wireless LAN (безжични комуникационни устройства), http://www.comexgroup.com/communications/lan_all/wlan.htm, 02/24/2004

[54] Миланов С. Интерфейс Bluetooth, www.comexgroup.com/communications/bluetooth.htm, 02/24/2004

[55] Atmel Corporation, The Bluetooth Wireless Technology, White paper, http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2205, 2000

[56] Atmel Corporation, Bluetooth General Information, White paper, http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2205, 2000

[57] Kinney P., ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, Home Toys Article, <http://hometoys.com/htinews/oct03/articles/kinney/zigbee> .htm, October 2003

[58] ZigBee Alliance, ZigBee Overview, <http://www.zigbee.org/documents/ZigBeeOverview4.pdf>, September 2003

[59] 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](http://www.zigbee.org/documents/ZigBee_CES_January_2004_FINAL.pdf), January 2004

[60] ZigBee Alliance, FAQ's, <http://www.zigbee.org/about/faqs/index.asp>, October, 2003