


國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

自主分散式救援機器人與其合作策略之實現



Design and Realization of the Cooperative Strategy on
Autonomous Distributed Rescue Robots

研究生：施子強

指導教授：徐保羅 博士

中華民國九十八年七月

自主分散式救援機器人與其合作策略之實現
Design and Realization of the Cooperative Strategy on
Autonomous Distributed Rescue Robots

研 究 生：施子強

Student : Tzu-Chiang Shih

指導教授：徐保羅 教授

Advisor : Dr. Pau-Lo Hsu

國立交通大學

電機與控制工程學系



Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao-Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

自主分散式救援機器人與其合作策略之實現

研究生：施子強

指導教授：徐保羅 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

自主式救援機器人主要目的在於進行搜救任務，相較於傳統的搜救機器人，不需透過操作員的遙控，透過機器人本身對於環境的認知，就可以自主執行搜救的任務，同時經由無線網路，使監控端可以隨時觀測機器人的狀態。在機器人的行為控制方面，透過感測器對環境的感測，而設計個別行為，經由比較優先權的機制來產生最後的行為輸出，而無線網路方面，建立 ZigBee 網狀拓撲網路，結合遠端電腦的人機介面，達到網路化監控的功能。

本論文分別依照機器人對環境的認知來設計合作搜尋策略，在已知環境方面，設計虛擬區域劃分策略，由合作策略產生群體行為，機器人自主能力的個別行為，結合 ZigBee 無線通訊，設計基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，經由實驗結果，合作策略的使用將提升整體搜尋效率 38%。

在未知環境方面，另外設計動態區域劃分策略，經由實驗結果，合作策略的使用將提升整體搜尋效率 30%。

Design and Realization of the Cooperative Strategy on Autonomous Distributed Rescue Robots

Student : Tzu-Chiang Shih

Advisor : Dr. Pau-Lo Hsu

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The proposed autonomous rescue robot transmits information of its environment within a certain disaster area through the wireless network including the image and voice communication. Furthermore, they may also achieve the mission to bring materials to the victim. Therefore, a critical issue of the rescue robot is how they cooperate to search for victim more efficiently and effectively. In this thesis, the behavior-based motion cooperation is proposed for both the single robot and the multiple robots, separately. Then, the mesh topology network is adopted with the ZigBee wireless system and their integration can be further applied to the resultant final behavior output based on the assigned priority.

With both known and unknown environments, different behavior-based cooperative search strategies are also proposed for the multiple rescue robots. For the known environment, the strategy with virtually dividing approach is adopted and the group behavior is determined by both the cooperative strategy and the individually autonomy behavior. With the ZigBee communication, the framework of the behavior-based multi-robot cooperation is achieved and experimental results indicate that the searching efficiency is reliably improved 38%. For the unknown environment, the dynamic area dividing strategy is proposed and experimental results indicate that the searching efficiency is also improved 30%.

誌 謝

首先要感謝我的指導教授徐保羅老師兩年來對我的指導，讓我在研究上遇到瓶頸時，能夠適時地找到正確的出路，使得本論文能夠順利地完成。同時也要感謝口試委員翁慶昌老師、葉賜旭老師與李俊賢博士於本論文的建議與指導，讓本論文能夠更加的完善。

感謝實驗室的學長、同學與學弟們：李俊賢學長、謝鎮洲學長、幸琮政學長、黃煒生學長、賴建良學長、王安平學長、黃宗勝學長、李建龍學長、林也強學長、劉醇偉學長、哲維、孟哲、士文、子期、旻慶，在我的學業與研究中，互相勉勵，讓我能夠在遇到困境時，給予我意見，並且在做實驗時，給予我幫助，讓我能夠順利完成本論文。另外特別感謝煒智、任斌、正忠，在我的研究所生活中，帶給我歡樂，讓我能夠保持愉悅的心情來面對挑戰。

最後要感謝我的父母與兄弟們，長久以來在我生活上的支持，讓我能夠無後顧之憂、專心地讀書以及做研究，使我能夠順利完成碩士學位。

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究背景與發展現況.....	2
1.3 問題陳述	3
1.4 研究方法與步驟	4
1.5 論文架構	5
第二章 機器人硬體與系統架構	6
2.1 機器人平台運動模型.....	6
2.2 機器人平台硬體.....	7
2.2.1 系統架構.....	7
2.2.2 eZdsp™ F2812 DSK之功能介紹.....	9

2.2.3 SCI 串列傳輸	10
2.2.4 DAC 介面	11
2.2.5 Encoder 介面	13
2.2.6 馬達驅動器	16
2.2.7 Power 電路介面	17
2.3 感測器硬體	18
2.3.1 雷射掃描器	18
2.3.2 超音波感測器	22
2.3.3 電子羅盤	25
2.3.4 紅外線攝影機	26
2.4 感測器於機器人平台上之應用	26
2.4.1 雷射掃描器之避障	26
2.4.2 超音波感測器之避障	29
第三章 ZigBee 無線通訊	30
3.1 IEEE802.15.4 概述	30
3.2 ZigBee	32
3.3 ZigBee 硬體	33
3.4 機器人無線通訊	34
3.4.1 ZigBee 網路的形成	34

3.4.2	多機器人間無線通訊封包協定.....	37
3.4.3	ZigBee與Wi-Fi	40
第四章	多機器人合作策略與行為控制架構.....	41
4.1	團體合作方式分類.....	41
4.2	基於行為模式之機器人控制理論	42
4.3	已知環境合作搜尋策略	44
4.3.1	群體行為設計.....	49
4.3.2	個別行為設計.....	51
4.3.3	整合群體行為與個別行為之合作搜尋架構	53
4.4	未知環境合作搜尋策略.....	55
4.4.1	群體行為設計.....	57
4.4.2	個別行為設計.....	59
4.4.3	整合群體行為與個別行為之合作搜尋架構	59
4.5	策略架構特色及優點.....	61
第五章	模擬與實驗結果	63
5.1	已知環境策略.....	64
5.1.1	已知環境模擬A.....	64
5.1.2	已知環境模擬B.....	66

5.1.3 已知環境模擬C.....	69
5.2 未知環境策略.....	72
5.2.1 未知環境模擬A.....	72
5.2.2 未知環境模擬B.....	74
5.2.3 未知環境模擬C.....	77
5.3 模擬結果討論.....	80
5.3.1 已知環境策略.....	80
5.3.2 未知環境策略.....	81
5.4 小結.....	81
5.5 實驗結果.....	82
5.5.1 實驗場地說明與描述.....	82
5.5.2 無合作策略實驗結果.....	82
5.5.3 已知環境策略實驗結果.....	83
5.5.4 未知環境策略實驗結果.....	87
第六章 結論與未來發展.....	92
6.1 結論.....	92
6.2 未來發展.....	93
參考文獻.....	94

表 目 錄

表 2-1 雷射規格說明	19
表 3-1 訊息定義代碼	38
表 3-2 遙控動作命令代碼	38
表 3-3 遙控回傳資料命令代碼	39
表 5-1 策略比較之模擬時間紀錄	65
表 5-2 模擬場地A-1 之平均時間紀錄	67
表 5-3 模擬場地A-2 之平均時間紀錄	68
表 5-4 模擬場地A-3 之平均時間紀錄	69
表 5-5 暫存座標點數之平均時間紀錄(350cm X 350cm).....	73
表 5-6 暫存座標點數之平均時間紀錄(500cm X 500cm).....	74
表 5-7 模擬場地B-1 之平均時間紀錄	76
表 5-8 模擬場地B-2 之平均時間紀錄	76
表 5-9 模擬場地B-3 之平均時間紀錄	77
表 5-10 無合作策略實驗紀錄	83
表 5-11 有合作策略實驗紀錄(已知環境).....	84
表 5-12 平均時間實驗紀錄(已知環境)	86
表 5-13 有合作策略實驗紀錄(未知環境).....	88
表 5-14 平均時間實驗紀錄(未知環境)	89

圖 目 錄

圖 2-1 機器人運動模型	6
圖 2-2 硬體平台(第一代機器人)	7
圖 2-3 硬體平台(左邊、中間:第三代機器人，右邊:第二代機器人).....	8
圖 2-4 第二代機器人系統架構	8
圖 2-5 第三代機器人系統架構	8
圖 2-6 eZdsp 2812	9
圖 2-7 MAX3232 周邊電路	11
圖 2-8 MAX3232 電路模組	11
圖 2-9 DAC 7625 內部功能方塊圖	12
圖 2-10 四軸DAC介面電路	13
圖 2-11 QEP訊號示意圖	13
圖 2-12 四軸encoder介面電路	14
圖 2-13 馬達驅動電路板正面	15
圖 2-14 馬達驅動電路板背面	15
圖 2-15 馬達驅動電路板與DSP 2812 結合	15
圖 2-16 全橋式MOSFET	16
圖 2-17 馬達驅動器介面電路	16
圖 2-18 馬達驅動器	17
圖 2-19 POWER介面電路	17
圖 2-20 POWER電路實體模組	18
圖 2-21 URG-04L	18
圖 2-22 LMS URG-04LX 掃描範圍	20
圖 2-23 雷射感測值編碼	20
圖 2-24 雷射距離量測	21
圖 2-25 180 度全徑掃瞄	21
圖 2-26 180 度掃描(環境一)	21
圖 2-27 180 度掃描(環境二)	21
圖 2-28 雷射配置圖	21
圖 2-29 MaxSonar-EZ1 模組	22
圖 2-30 單晶片 8051 模組	23
圖 2-31 SN74LVTH245ADW	23
圖 2-32 波音波配置圖	23
圖 2-33 原始超音波值(100cm).....	24
圖 2-34 濾波後超音波值(100cm).....	24

圖 2-35 sonar不同距離量測.....	25
圖 2-36 2-Axis Compass Module(V2Xe).....	25
圖 2-37 紅外線攝影機.....	26
圖 2-38 雷射掃瞄人機介面.....	27
圖 2-39 雷射分區圖.....	28
圖 2-40 雷射避障流程.....	28
圖 2-41 laser scan(前方沒有障礙物).....	29
圖 2-42 laser scan(右方有障礙物).....	29
圖 2-43 laser scan(左方有障礙物).....	29
圖 2-44 laser scan(前方及左右方有障礙物).....	29
圖 3-1 IEEE 802.15.4 操作頻帶示意圖.....	30
圖 3-2 同步模式 (Beacon Mode) 資料傳送行為.....	31
圖 3-3 非同步模式 (Non-Beacon Mode) 資料傳送行為.....	31
圖 3-4 ZigBee網路拓撲架構.....	33
圖 3-5 Chipcon CC2430.....	33
圖 3-6 CC2430ZDK.....	33
圖 3-7 SmartRF04EB板.....	34
圖 3-8 CC2430DB板.....	34
圖 3-9 ZigBee網路位址分配.....	36
圖 3-10 多機器人無線通訊.....	36
圖 3-11 人機介面.....	37
圖 3-12 遙控動作命令訊息.....	38
圖 3-13 遙控回傳資料命令訊息.....	39
圖 3-14 機器人間訊息.....	39
圖 3-15 IEEE 802.15.4 和IEEE 802.11 頻道相互重疊圖.....	40
圖 4-1 Subsumption Architecture.....	43
圖 4-2 Schema-based Architecture.....	43
圖 4-3 機器人個人區域.....	45
圖 4-4 個人區域策略示意圖.....	46
圖 4-5 350cm X 350cm場地.....	48
圖 4-6 350cm X 350cm場地(虛擬劃分).....	48
圖 4-7 虛擬區域劃分策略示意圖.....	49
圖 4-8 inter-robot avoidance行為示意圖.....	50
圖 4-9 robot wander行為示意圖.....	51
圖 4-10 目標物.....	52
圖 4-11 雷射避障示意圖.....	52
圖 4-12 超音波避障示意圖.....	52
圖 4-13 基於行為模式之多機器人合作搜尋架構(虛擬區域劃分策略).....	54

圖 4-14 行為選擇範例(虛擬區域劃分策略)	55
圖 4-15 行為選擇範例說明(虛擬區域劃分策略)	55
圖 4-16 動態區域劃分策略	56
圖 4-17 dynamic robot wander行為示意圖	58
圖 4-18 dynamic inter-robot avoidance行為示意圖	58
圖 4-19 基於行為模式之多機器人合作搜尋架構(動態區域劃分策略)	60
圖 4-20 行為選擇範例(動態區域劃分策略)	61
圖 4-21 行為選擇範例說明(動態區域劃分策略)	61
圖 5-1 BCB模擬介面	63
圖 5-2 模擬場地 1	64
圖 5-3 模擬場地A-1	64
圖 5-4 個人區域策略和虛擬區域劃分策略模擬比較	65
圖 5-5 模擬場地A-2	66
圖 5-6 模擬場地A-3	66
圖 5-7 模擬場地A-1 之模擬結果	67
圖 5-8 模擬場地A-2 之模擬結果	68
圖 5-9 模擬場地A-3 之模擬結果	69
圖 5-10 3 robots 搜尋目標物軌跡圖(已知環境)	70
圖 5-11 Robot-1 行為狀態輸出(已知環境)	71
圖 5-12 Robot-2 行為狀態輸出(已知環境)	71
圖 5-13 Robot-3 行為狀態輸出(已知環境)	71
圖 5-14 模擬場地B-1	72
圖 5-15 暫存座標點數分析 (350cm X 350cm)	73
圖 5-16 暫存座標點數分析 (500cm X 500cm)	74
圖 5-17 模擬場地B-2	75
圖 5-18 模擬場地B-3	75
圖 5-19 模擬場地B-1 之模擬結果	75
圖 5-20 模擬場地B-2 之模擬結果	76
圖 5-21 模擬場地B-3 之模擬結果	77
圖 5-22 3 robots 搜尋目標物軌跡圖(未知環境)	78
圖 5-23 Robot-1 行為狀態輸出(未知環境)	79
圖 5-24 Robot-2 行為狀態輸出(未知環境)	79
圖 5-25 Robot-3 行為狀態輸出(未知環境)	79
圖 5-26 實驗場地	82
圖 5-27 無合作策略實驗結果	83
圖 5-28 有合作策略實驗結果(已知環境)	84
圖 5-29 比較時間變異量(已知環境)	85
圖 5-30 比較平均時間(已知環境)	85

圖 5-31 三台機器人之合作搜尋(虛擬區域劃分策略)	87
圖 5-32 有合作策略實驗結果(未知環境)	87
圖 5-33 比較時間變異量(未知環境)	89
圖 5-34 比較平均時間(未知環境).....	89
圖 5-35 三台機器人之合作搜尋(動態區域劃分策略)	91



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

相較於單一機器人系統，多機器人系統可藉由團體的合作協調能力，來補足單一機器人系統的缺點，例如擁有更多的錯誤容忍率、更多的彈性、更簡單的機器人設計及更好的性能展示等，所以多機器人系統的研究越來越受重視。

目前有許多與多機器人相關的研究主題，例如多機器人合作定位[1]、多機器人環境探索[2][3]、多機器人合作搬運[4]、多機器人足球[5]、多機器人清潔[6]等，以上相關任務需求都必須依靠多機器人間的協調合作來完成。

而近年來，多機器人系統也陸續被應用在執行危險的任務，其中以災區搜救應用最為廣泛，讓機器人團隊深入災區，在人類或大型器械無法進入的斷垣殘壁裡進行搜索的工作，特別一提的是，著名的日本機器人聯盟RoBoCup每年定期會舉辦各式不一樣的機器人競賽，其中還特別分出一個RoBoCup Rescue的比賽，其中包括真實現場的搜救，提供一個類似災難現場的環境，各參賽團隊使用自己所設計的機器人平台來執行救援任務，透過比賽將可考驗機器人合作的能力、機器人的環境感測能力、機器人定位能力、機器人機構設計能力等，其中最重要的就是多機器人合作部份，由於搜尋環境範圍很大以及環境中障礙物相當複雜，所以單一機器人並不能勝任，必須透過多機器人合作協調才能完成任務，這也是比賽最終的目的，期望各團隊往多機器人系統以及機器人自主去發展。

以上所介紹的皆仰賴多機器人間的互助合作來完成，因此只要機器人本身自主行為的選擇以及合作策略有良好的設計的話，不需要功能複雜的單一機器人，只要搭配一些配備單純且動作靈活的機器人，即可達成上述的實用功能，因此基於行為選擇以及合作策略的多機器人自主系統將有相當不錯的功能，這促使了本論文之研究動機。

1.2 研究背景與發展現況

有關多機器人合作應用在分散式機器人上，目前已經有相當多的研究成果，其中與救援機器人相關的主題乃屬於環境探索和搜尋，而近年來，在環境探索或搜尋研究領域中，主要區分為單機器人環境探索[7][8]，以及多機器人環境探索，並且分別針對已知環境和未知環境來做探討，其中透過多機器人間的合作搜尋最為大家所探討。有關利用群組機器人來對地形做探索[9]-[11]，主要解決機器人在探索中所產生的定位累積誤差問題，首先把環境區分為許多條狀，再透過機器人本身的感測，當其中一台機器人移動時，另一台機器人則保持靜止狀態並且觀察移動中的機器人，利用此關係來降低所造成的累積誤差問題以及執行探索任務，但缺點為各機器人間必須非常靠近彼此，如此才能透過視覺來感測對方。

在多機器人合作探索方面，Kong *et al.*[12]利用所設計的搜尋演算法，使群組式自主機器人在未知環境中隨機搜尋目標物，採用基於行為模式之控制方式，演算法由五個自行設計的行為組成，其中包含合作部份的行為以及機器人自主行為，透過此演算法使五台機器人在未知環境中做搜尋目標物的任務，缺點是並沒有去探討和比較所設計的演算法其改善搜尋效率的程度。Anderson and Papanikolopoulos [13]也是解決在未知環境中搜尋，並且有加入地圖建立的功能，同樣利用基於行為模式之控制方式來設計搜尋演算法。

目前也有許多研究專注於多機器人合作架構的設計，Grabowski *et al.*[14]考慮到單一機器人在感測的距離限制，因此利用領導者的架構來統整所有機器人的感測資訊，然後再分別引導其他機器人做閃避障礙物的動作和前往未搜尋過的區域。Jung and Zelinsky [15]設計基於行為模式之分散式行為控制架構，成功應用在多機器人合作清潔的任務。

而搜救機器人在遠端監控也扮演相當重要的角色[16]，機器人採取基於行為模式之控制方式達到自主搜尋的動作，同時回傳感測資訊和狀態給遠端監控人員，遇到特殊狀況時，則切換成操控者遙控，由實驗結果分析，利用人類半輔助

式的機器人自主搜尋也可以提高整體的搜尋效率。

1.3 問題陳述

1、機器人自主能力以及行為控制問題

有別於遙控機器人，沒有使用者來對機器人下達控制命令，機器人本身必須透過對環境的感測做出適當的行為動作，所以自主能力的好壞，決定於行為控制架構的設計以及感測器的應用，同時基於監控機器人的需要，在多機器人系統中必須依賴無線網路，回傳目前各機器人的狀態、感測資訊以及提供機器人之間的溝通，因此本論文第一部分的研究重點在於：

- (1) 機器人自主行為能力的建立。
- (2) 多機器人無線網路架構的設計。

2、合作策略與行為控制整合於目標物搜尋

單一機器人具備了自主能力後，將可以執行簡單的任務，但是當所要執行的任務比較複雜時，則必須透過多機器人來完成，以搜救機器人為例，機器人在複雜環境中找尋生還者，搜尋時間要越快越好，所以機器人間的合作協調將非常重要，必須透過完整的合作策略設計，使多機器人在搜尋過程中能夠互相資源分享，而主要目的是讓機器人可以有效的分散在環境中，最後使整體的搜尋效率提升，由以上的描述，本論文下一步探討的研究在於：

- (1) 如何設計合作策略來應付不一樣的搜尋環境，包含已知環境和未知環境。
- (2) 所設計的合作策略如何轉換成相對應的行為優先權控制架構，最後實現在多機器人搜尋目標物任務。

1.4 研究方法與步驟

1、機器人自主能力以及行為控制問題

- (1) 首先需建立硬體電路以及感測電路，以數位訊號處理器(digital signal processor, DSP)為控制核心，感測電路方面透過單晶片 8051、影像處理板和筆記型電腦接收感測值，最後提供給 DSP 上的決策系統作為判斷依據，機器人無線通訊方面，以 ZigBee 網路為基礎，建立網狀拓撲網路，配合遠端電腦的人機介面，達到遠端監控的功能。
- (2) 機器人的行為控制上採用基於行為模式的控制方法，透過環境感測產生不一樣的個別行為，最後使用優先權的比較機制，決定最後所要輸出的行為，讓機器人可以達到自主的功能。

2、合作策略與行為控制整合於目標物搜尋

- (1) 依造對環境的認知來設計合作搜尋的策略，分別為已知環境和未知環境，已知環境方面，因為事先可以得知環境大小，所以設計虛擬區域劃分策略，對所要搜尋的區域先做虛擬劃分，機器人互相交換此資訊，最終目的使機器人可以分散在環境中搜尋。
- (2) 未知環境方面，因為沒有環境資訊，所以另外設計動態區域劃分策略，透過短暫的座標記憶，再換算成單獨個別小區域，機器人互相交換此資訊，最終目的使機器人可以分散在環境中搜尋，。
- (3) 透過合作策略的設計產生群體行為，而機器人自主方面產生個別行為，不同類型的行為最後透過比較優先權的機制來決定最後行為的輸出，另外結合 ZigBee 無線網路，設計基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，讓多機器人可以透過此架構的運作，執行搜尋目標物的任務，並且改善搜尋效率。

1.5 論文架構

本論文共分為六章，第一章旨在簡述研究動機、目的、背景與發展，並陳述所要研究的問題、方法、步驟。第二章介紹機器人平台，並說明整體系統架構，包含使用的硬體元件規格、感測器元件、連接方式，以及感測器應用於機器人平台。第三章描述ZigBee無線網路，並且說明如何應用到機器人系統上。第四章說明合作策略以及行為控制的結合，分別依照已知環境和未知環境做策略設計，最後建構基於行為模式之多機器人合作搜尋架構。第五章為模擬和實驗結果，首先模擬第四章所設計的合作策略，分別透過不一樣的模擬場地來應證策略使用的可行性，最後透過實驗，把策略實現在機器人平台上，由實驗結果分析有、無使用合作策略對搜尋效率的影響。第六章對本論文做一個結論，並提出未來可以再發展之方向。



第二章 機器人硬體與系統架構

2.1 機器人平台運動模型

機器人平台為履帶式機器人，左、右兩邊各由一顆馬達帶動履帶，其平台運動模型如圖 2-1 所示。

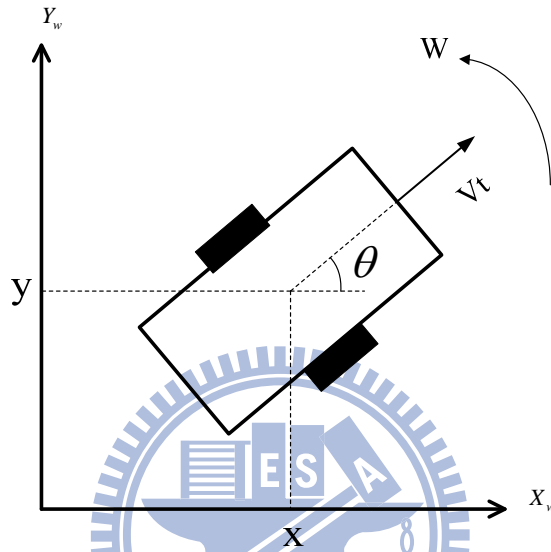


圖 2-1 機器人運動模型

機器人運動模型中的參數定義如下：

X_w 、 Y_w ：世界座標(world coordinate) X 、 Y

x 、 y ：平台座標(mobile coordinate) X 、 Y

θ ：機器人移動方向與 X 軸之夾角

V_t ：機器人移動速度

W ：機器人旋轉角速度

參考[17]，機器人的運動方程式(kinematics equation)如下式(2-1)，利用此運動方程式轉換成平台座標。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_t \\ w \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

因為機器人平台只依靠左、右兩輪來帶動履帶運轉，所以在輪軸的方向是沒有速度的，因此運動模型必須受到非全向性(nonholonomic)限制：

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (2-2)$$

2.2 機器人平台硬體

2.2.1 系統架構

本論文所使用的機器人平台如圖 2-2、圖 2-3 所示，第一代機器人以壓克力為主要結構，為機器人平台的最初設計，第二代機器人為改進第一代機器人結構所設計，第三代機器人為改進體積和履帶傳動的問題所設計，本論文在硬體平台上將使用第二、三代機器人(圖 2-3)，各平台的系統架構如圖 2-4、圖 2-5 所示，兩種機器人平台各搭配其適合的感測器，接下來將分別就硬體平台的不同，說明其系統運作。

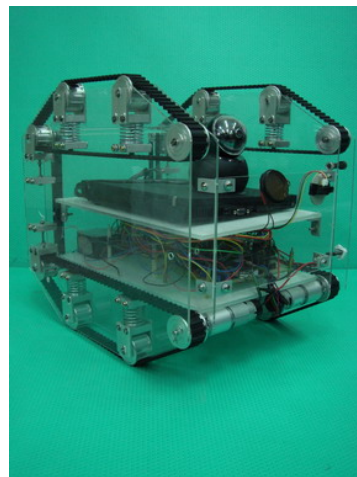


圖 2-2 硬體平台(第一代機器人)

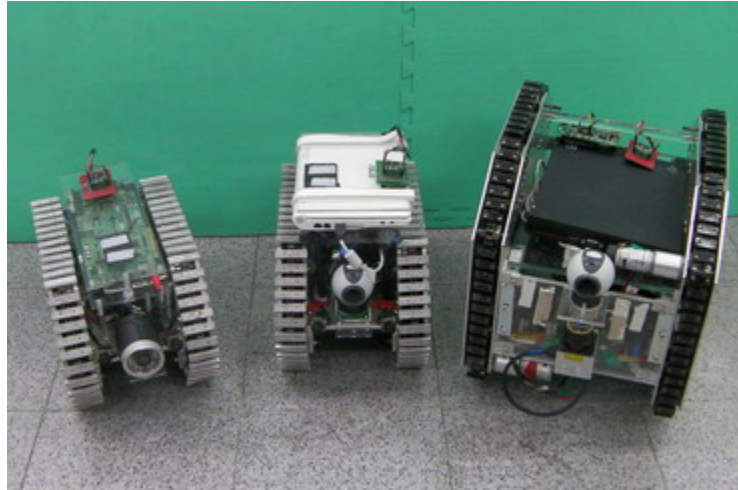


圖 2-3 硬體平台(左邊、中間:第三代機器人，右邊:第二代機器人)

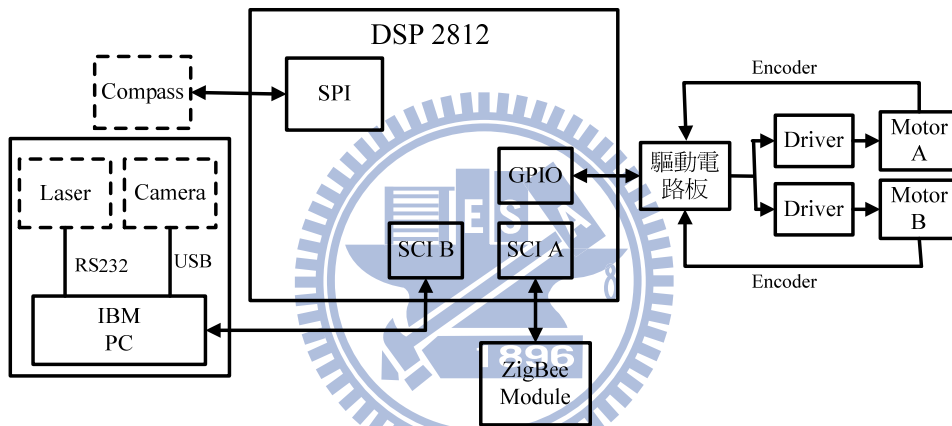


圖 2-4 第二代機器人系統架構

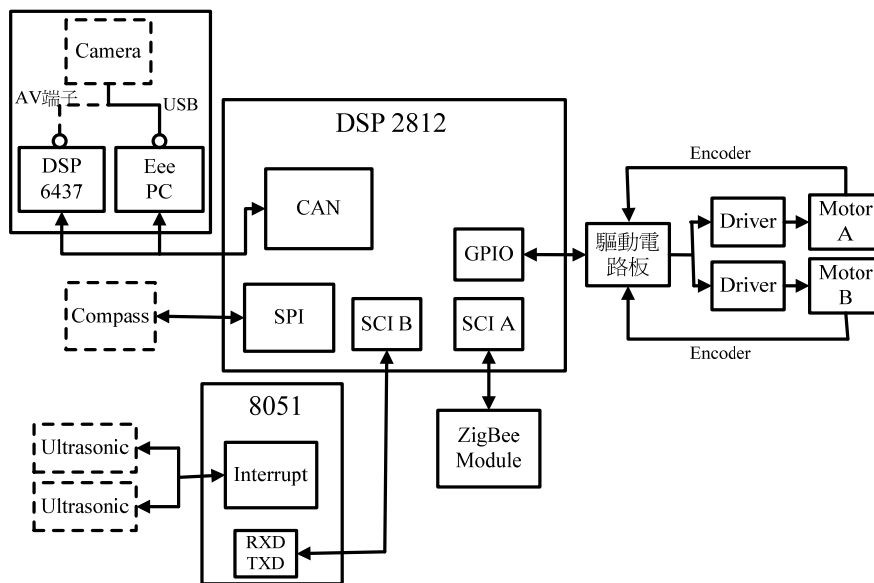


圖 2-5 第三代機器人系統架構

- 第二代機器人

體積寬度足以放置筆記型電腦，攝影機透過 USB 介面連接到筆記型電腦做目標物顏色的辨識，而雷射掃瞄器則是透過 RS232 的介面連接到筆記型電腦做環境偵測的資料收集，透過筆記型電腦上的人機介面來做行為決策，再透過 RS232 介面與底層 DSP 控制板來溝通，同時電子羅盤透過 SPI 介面連接到 DSP 控制板做角度的判別偵測，馬達控制方面以電壓訊號命令來控制馬達的轉速，此外 ZigBee 模組也透過 RS232 介面連接到 DSP。

- 第三代機器人

體積更為縮小，影像視覺配置上分為兩種，一種是使用攝影機透過 USB 介面連接到 Eee PC，另外一種則是使用 DSP6437 影像處理板連接攝影機，兩者都是用來做目標物顏色的辨識，而超音波則是先透過 8051 模組做距離偵測的前處理，再透過 RS232 介面連接到 DSP 控制板，電子羅盤透過 SPI 介面連接到 DSP 控制板做角度的判別偵測，馬達控制方面一樣以電壓訊號命令來控制馬達的轉速，此外 ZigBee 模組也透過 RS232 介面連接到 DSP。

2.2.2 eZdsp™ F2812 DSK 之功能介紹

本論文採用德州儀器(Texas Instrument, TI)公司所研發的TMS320 F2812 DSP(簡稱F2812)作為控制核心，如圖 2-6所示。

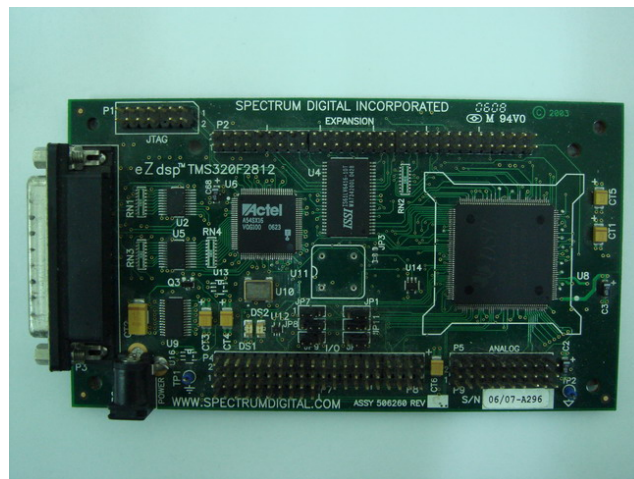


圖 2-6 eZdsp 2812

德州儀器公司所生產的DSP中，'C2000系列的硬體發展平台是專為控制應用最佳化而設計的，其中F2812晶片是此系列中目前最高等級的控制器，其特點在於擁有150 MHz(6.67 ns cycle time)的快速處理能力，比TI早期出產的DSP 'C240快7倍。在核心部分，算數邏輯單元(ALU)、累積器(ACC)均採用32位元定點運算，為了提升數位訊號運算效能，以硬體方式實現乘法器、乘積位移器，可在一個指令週期(instruction cycle)內完成乘加運算。在整數計算方面，為減少數值計算所衍生如溢位(overflow)等問題，也採用硬體式的輸出倍率位移器來提高軟體執行的精確度。

記憶體容量方面，F2812(on chip)主要擁有128K*16 Flash EEPROM、兩組4K*16 Single-Access RAM(SARAM)、一組8K*16 SARAM，並採用哈佛匯流排(Harvard bus)架構。較舊型的DSP大部分將程式、資料、I/O記憶體獨自分離(定址位址重複)，但F2812卻走向單獨的記憶體空間，裡頭包含上述三種記憶體，使用更為有彈性，也可減少不同記憶體之間搬動資料的指令集。

Spectrum Digital 公司則利用 F2812 晶片結合自行開發之周邊模組，發展出 eZdsp™ F2812 初學板(DSP Started Kit, DSK)，其週邊主要有 16 個通道的 12 位元類比數位轉換器(ADC)，串列傳輸支援了四種常用的型式：SPI (Serial Peripheral Interface)、SCIs (Serial Communications Interface)、eCAN (Enhanced Controller Area Network)、McBSP (Multi-channel Buffered Serial Port)，最高可支援 56 個 GPIO(General-Purpose I/O)。

2.2.3 SCI 串列傳輸

串列傳輸標準是美國電子工業協會在1969年所頒佈之RS-232-C，同時也是目前應用最廣的串列傳輸標準。RS232串列傳輸主要是利用RXD和TXD來做資料的接收和傳送線，由於RS232與TTL所判定的高電位和低電位的電壓值不同，所以必須做位準轉換的介面，才可以讓資料由RS-232的電壓準位轉換為TTL的電壓準位。

本論文使用 eZdsp™ F2812 DSK 上的 SCI 串列傳輸來和單晶片 8051、ZigBee 模組以及電腦做資料的溝通，首先透過 MAX3232 來做位準轉換，周邊電路如圖 2-7 所示，而實體模組如圖 2-8 所示，透過此模組將可以轉換 DSP 串列傳輸的 3.3V 變成 TTL 電壓準位。

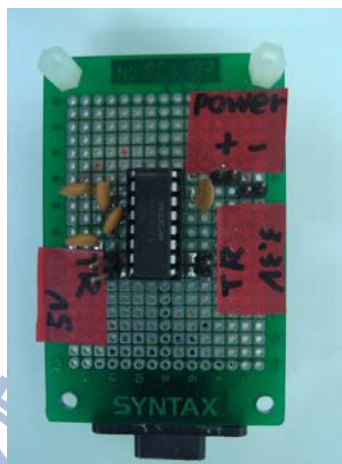
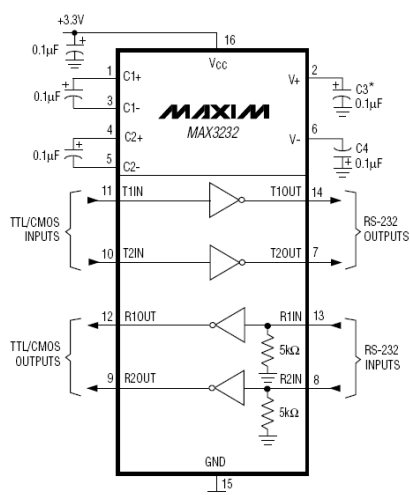


圖 2-7 MAX3232 周邊電路

圖 2-8 MAX3232 電路模組

2.2.4 DAC 介面

由於本論文所使用的馬達驅動器為全橋式 MOSFET，所以控制馬達輸入驅動器的速度命令為 0V~15V 的類比電壓，而 eZdsp™ F2812 DSK 的輸出僅有數位信號，因此需要用 DAC 進行轉換。在此使用 Burr-Brown 公司出產專用於馬達控制用途之 DAC 7625，將數位信號轉換為類比信號，圖 2-9 為內部功能方塊圖。其特色如下所示：

- 可選擇單極性(unipolar)與雙極性(bipolar)運作模式
- 穩定時間約為 10 us
- 12 位元的解析度
- 數位資料並列輸入
- 支援 4 通道(channel)且同步輸出

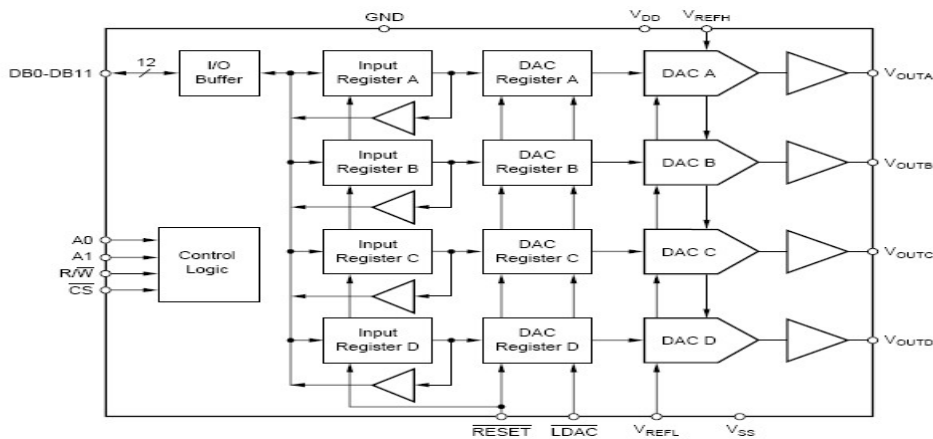


圖 2-9 DAC 7625 內部功能方塊圖

利用選擇通道接腳 A1、A0，依序將數位值由 DB11~DB0 寫入，四軸的數位值會存放於各自的暫存器中，當 LDAC 控制接腳變為低電位時，才一次同時轉換為類比訊號輸出，轉換公式如(2-3)式。

$$V_{out} = V_{REFL} + \frac{(V_{REFH} - V_{REFL}) \times D_{value}}{4096} \quad (2-3)$$

其中 V_{REFH} 與 V_{REFL} 各代表參考電壓的上下限值，設為+2.5V與 0V， D_{value} 是輸入的數位值， V_{out} 為輸出電壓值。由於馬達驅動器操作在 0V~15V之間，而DAC 7625 的VREFH僅能達到+2.5V(亦為輸出電壓上限)，為此，Vout必須經過五倍以上放大電路，才能匹配驅動器之需求。四軸DAC介面在Protel DXP裡的電路設計如圖 2-10所示，包括DAC7625 周邊以及兩個OP放大電路。

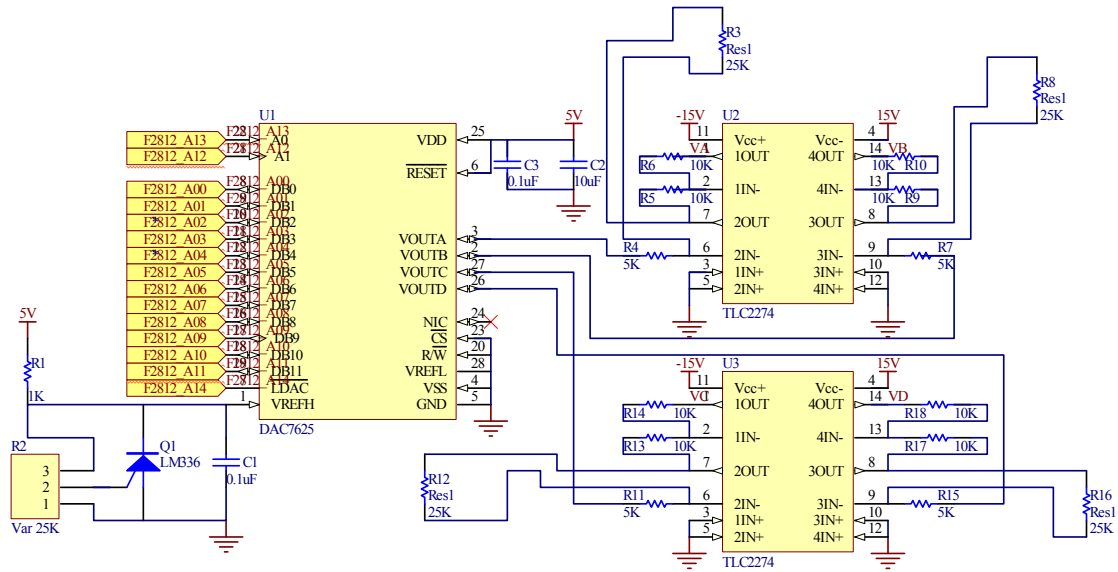


圖 2-10 四軸 DAC 介面電路

2.2.5 Encoder 介面

Encoder 回授由馬達內部輸出 QEP 訊號，A、B 相位(phase)會剛好相差 90 度，如圖 2-11 所示，因此產生了四種邏輯訊號組合(00、01、11、10)，除了可提升四倍的解析度之外，也可藉由四種邏輯訊號出現的先後順序得知輪軸轉動方向(direction)。

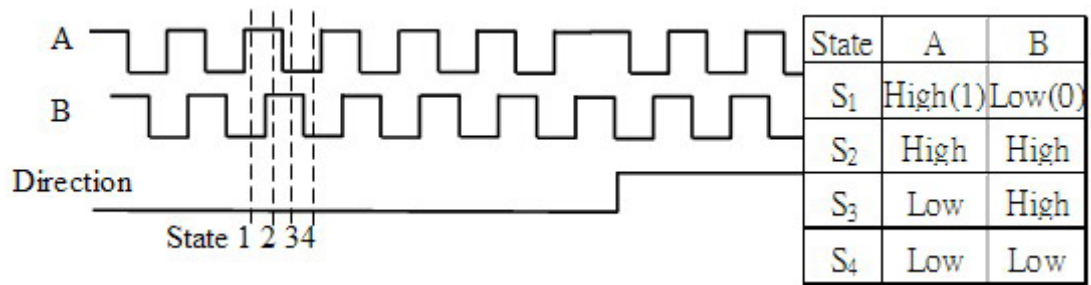


圖 2-11 QEP 訊號示意圖

Encoder 會由 QEP 計數的 HCTL 2032(簡稱 2032)將馬達所轉動的 pulse 個數算出，由馬達一轉的 pulse 數(E_{pulse})與 2032 所計算到的計數值(K)，可推算出輪軸轉動角度 ω_{angle} (rad.)，關係式為(2-4)式。

$$\omega_{angle} = \frac{2\pi K}{E_{pulse}} \quad (2-4)$$

HCTL 2032主要特色如下：

- 最高33 MHz的時脈頻率。
- 支援雙軸(Dual Axis)同時計數。
- 支援32位元上下計數。
- 高雜訊免疫性：史密特(Schmitt)觸發器、數位雜訊濾波器。
- 8位元並列式計數值輸出。

機器人平台為兩軸運動控制，故透過兩組 2032 作為輪軸轉動之計數器。又因輸出為 5V 訊號，必須轉換成F2812 可接受之 3.3V，故銜接位準轉換器(transceiver) LVTH 245，圖 2-12為四軸encoder介面在Protel DXP裡的電路設計。

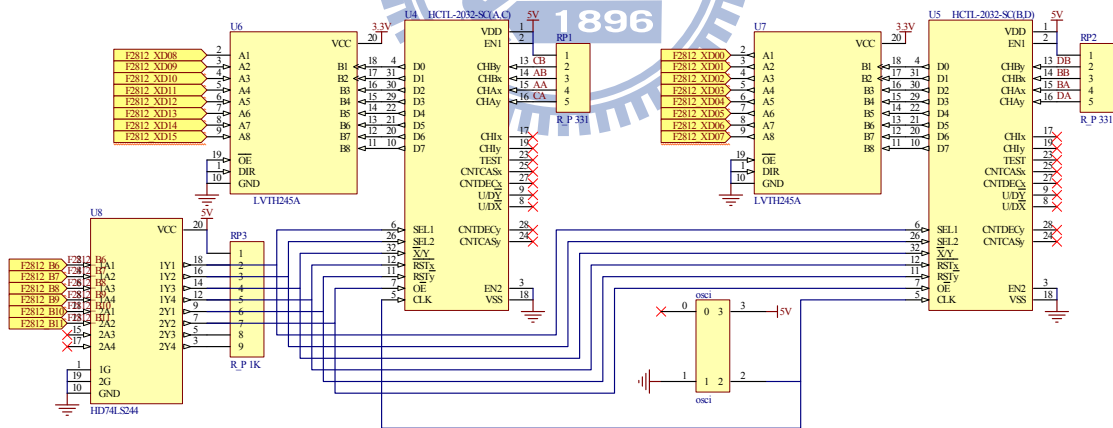


圖 2-12 四軸 encoder 介面電路

為了使前面章節2.2.4、章節2.2.5所介紹的DAC介面和Encoder介面可以廣泛的應用在全部的機器人平台上，以及跟DSP 2812 做相連接，所以特別另外設計一個馬達驅動電路板，整合DAC介面和Encoder介面，如圖 2-13、圖 2-14所示，而圖 2-15為此驅動電路板與DSP2812 相結合，DSP2812 直接插在驅動電路板的上層腳位，即可以使用其功能，相較於多台機器人平台應用，在電路的配置上、

使用上方便許多。

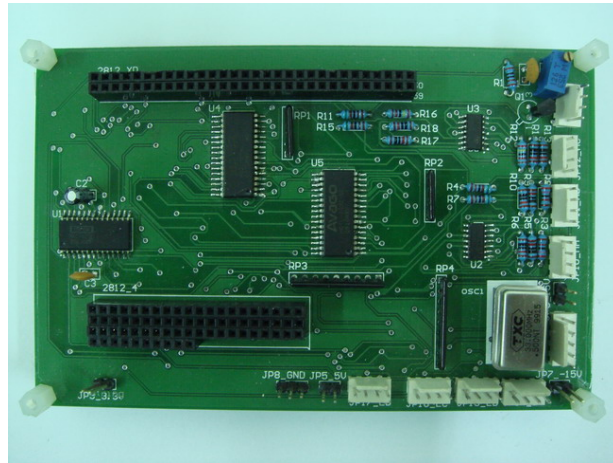


圖 2-13 馬達驅動電路板正面

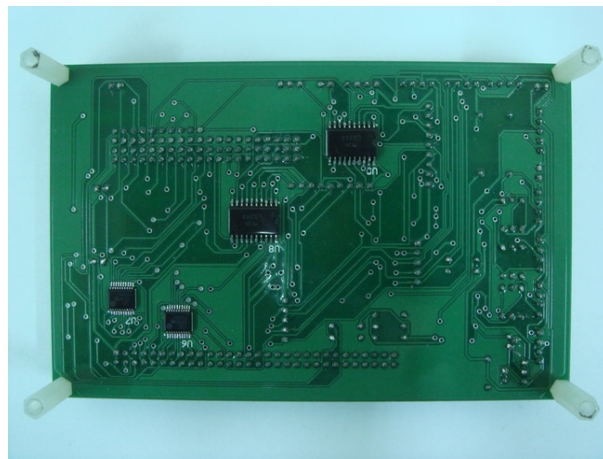


圖 2-14 馬達驅動電路板背面

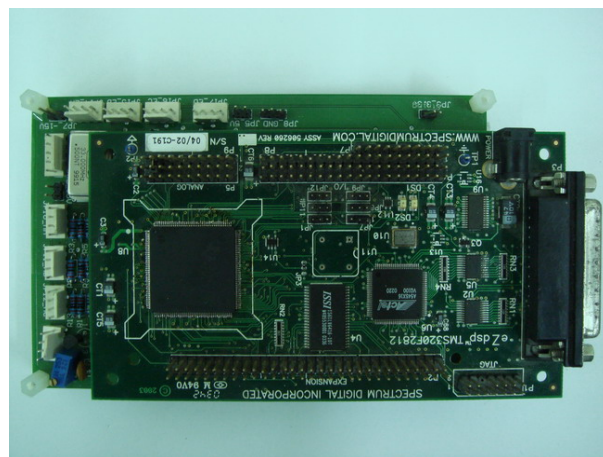


圖 2-15 馬達驅動電路板與 DSP 2812 結合

2.2.6 馬達驅動器

馬達驅動器為全橋式Power MOSFET，如圖 2-16所示，將四個MOSFET Q1,Q2,Q3,Q4 分成兩組，分別控制兩組切換開關之動作，而輸出電壓大小可依驅動電路板所輸入的類比電壓之大小，來決定輸出電壓有效的大小。

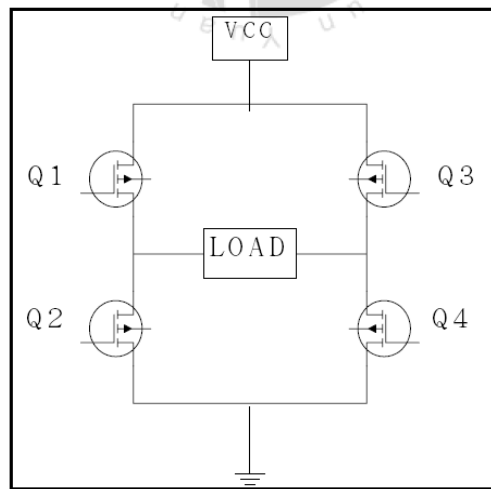


圖 2-16 全橋式 MOSFET

在Protel DXP的電路設計圖如圖 2-17所示，而圖 2-18為實際的馬達驅動器實體圖。馬達驅動器在運作過程中，因為大電流持續流動，產生MOSFET會有過熱的現象，為了解決散熱問題，特別增加風扇於電路中。

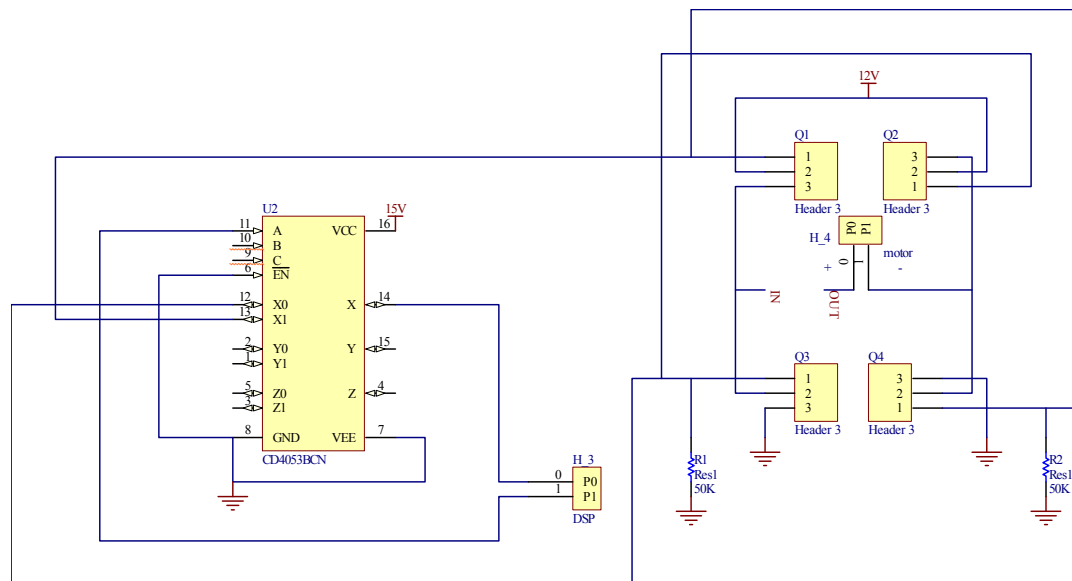


圖 2-17 馬達驅動器介面電路

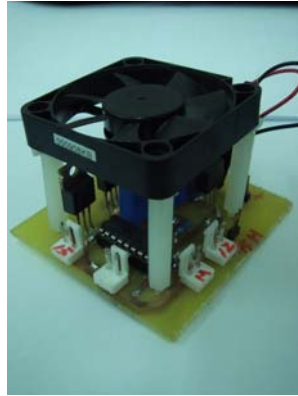


圖 2-18 馬達驅動器

2.2.7 Power 電路介面

前面小節已經有介紹馬達驅動電路板以及馬達驅動器，各個電路都有不一樣的IC以及所對應的工作電壓，為了可以提供所有不一樣的電壓供給，特別設計了POWER電路，裡面所包含的輸出電源共包括有:5V、15V、-15V以及全部的GND，透過一個 10A的保險絲來保護過電流的現象，而整個POWER電路由兩個獨立的12V鋰電池提供，在Protel DXP中設計電路圖如圖 2-19所示，而實體電路如圖 2-20所示。

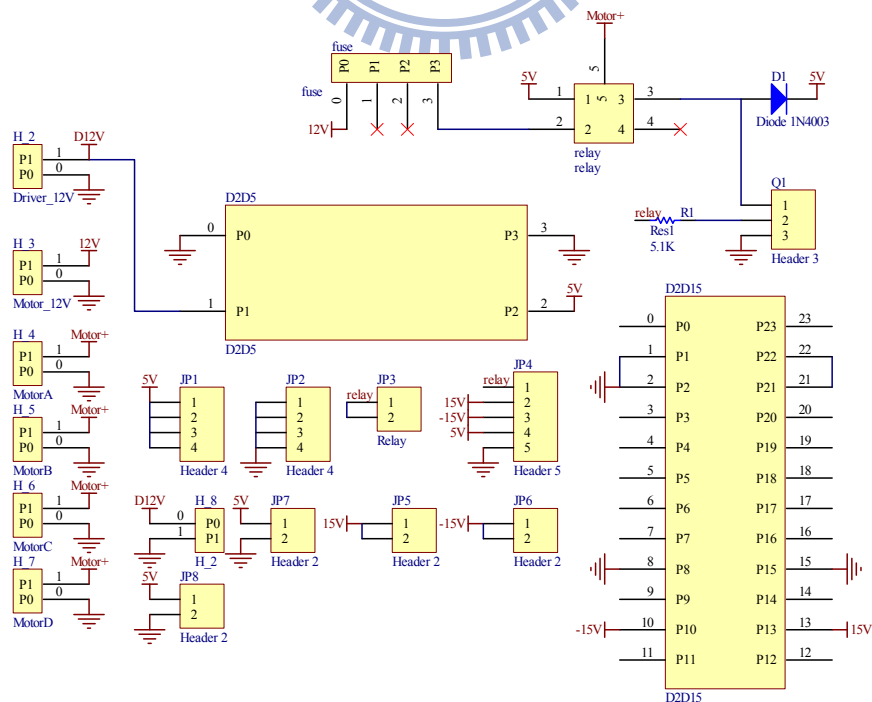


圖 2-19 POWER 介面電路

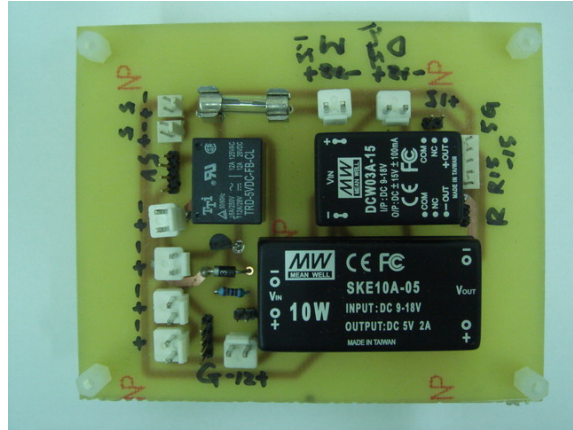


圖 2-20 POWER 電路實體模組

2.3 感測器硬體

2.3.1 雷射掃描器

此小節簡單敘述所使用的雷射測距系統(laser measurement system, LMS)，URG-04LX，如圖 2-21所示，此雷射掃描器為日本HOKUYO公司所製造，可量測的角度範圍最大為 240° ，最大量測的距離半徑為 4 公尺。



圖 2-21 URG-04L

此雷射具有高精度、高分辨率、低重量、低功耗，以及不受強光影響，在黑暗環境中依然可以工作，所以很適合用在自主導航機器人上，下表 2-1為此雷射的規格說明書。

表 2-1 雷射規格說明

Product Name	Scanning Laser Range Finder
Model	URG-04LX
Light source	Semiconductor laser diode ($\lambda=785\text{nm}$), Laser safety Class 1 (IEC60825-1)
Power source	5V DC $\pm 5\%$
Current consumption	500mA or less (Rush current 800mA)
Detection distance	20mm ~ 4000mm*
Accuracy	Distance 20 ~ 1000mm: $\pm 10\text{mm}$ * Distance 1000 ~ 4000mm: $\pm 1\%$ of measurement*
Resolution	1 mm
Scan Angle	240°
Angular Resolution	0.36°
Scan Time	100msec/scan
Interface	RS-232C (19.2, 57.6, 115.2 kbps) USB Version 2.0 FS mode (12Mbps)
Ambient (Temperature/Humidity)	-10 ~ 50°C / 85% or less (without dew and frost)
Preservation temperature	-25 ~ 75°C
Ambient Light Resistance	10000Lx or less
Vibration Resistance	Double amplitude 1.5mm 10 ~ 55Hz, 2 hours each in X, Y and Z direction, and 98m/s ² 55Hz ~ 150Hz in 2 minutes sweep, 1 hours each in X, Y and Z direction
Impact Resistance	196 m/s ² , 10 times each in X, Y and Z direction
Protective Structure	Optics : IP64 Case : IP40
Insulation Resistance	10M Ω for DC 500V megger
Weight	Approx. 160 g
Case	Polycarbonate
External dimension (W×D×H)	50×50×70mm (Reference design sheet No. C-40-3362)

● 雷射量測與編碼

雷射掃描器偵測範圍為 240°，其中再把角度範圍細分為 Step 44 到 Step 725，最遠可量測到的半徑為 4 公尺，所以每個 Step 的解析度為 0.36°，如下圖 2-22 所示。此雷射掃描器每一個 Step 掃描最短可以量測 20mm，最遠可以量測 4095mm 或 5600mm，在量測值的編碼上分為兩種，第一種為長度 12 bits，編碼後變成 2 個代表符號，適用於 4095mm 模式，另外一種為長度 18 bits，編碼後變成 3 個代表符號，適用於 5600mm 模式。為了減少資料大小，每 6 bits 轉換成 1 個代表符號。如圖 2-23 所示，為編碼過程的範例，每 12 bits 或 18 bits 分成 2 到 3 個群組，每 6 bits 再額外加上 30H。因此最後在解碼端，每個代表符號必須先減掉 30H 後，再把所有位元組合起來。

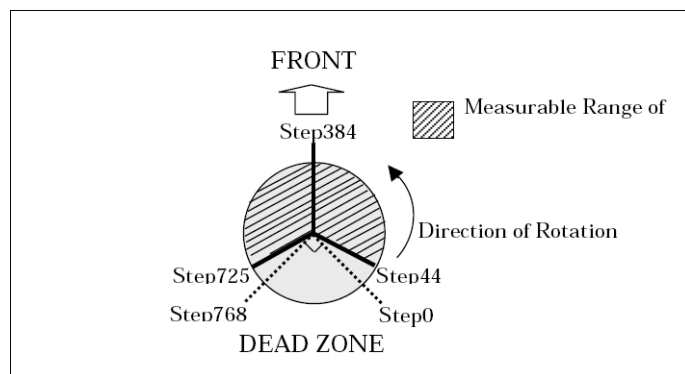


圖 2-22 LMS URG-04LX 掃描範圍

2- Character Coding Example:

$1234\text{mm} = 010011010010_2$
 ↓ Separation
 $(010011_2, 010010_2) = (13\text{H}, 12\text{H})$
 ↓ Add 30H
 $(43\text{H}, 42\text{H}) = (\text{C}, \text{D})$

3- Character Coding Example:

$5432\text{mm} = 1010100111000_2$
 ↓ Separation
 $(000001_2, 010100_2, 111000_2) = (1\text{h}, 28\text{h}, 38\text{h})$
 ↓ Add 30H
 $(31\text{h}, 58\text{h}, 68\text{h}) = (\text{1}, \text{X}, \text{h})$

圖 2-23 雷射感測值編碼

● 實際量測

此雷射將放置在機器人平台的正前方，因此在角度範圍的偵測上只使用 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，首先對於雷射掃描器在不同的距離(0~400cm)上先做基本的距離量測，如圖 2-24所示，每隔 50 公分做 10 次量測，由量測結果可以發現誤差只有 1cm，僅在此雷射掃描器的精度範圍內，所以不需要再對雷射掃描器量測值作訊號處理等動作，而在不同環境上也做區域量測，如下圖 2-25、圖 2-26、圖 2-27 所示。而雷射掃描器裝置在機器人平台如圖 2-28所示，紅色圓圈為雷射掃描器，距離地上約為 15cm。

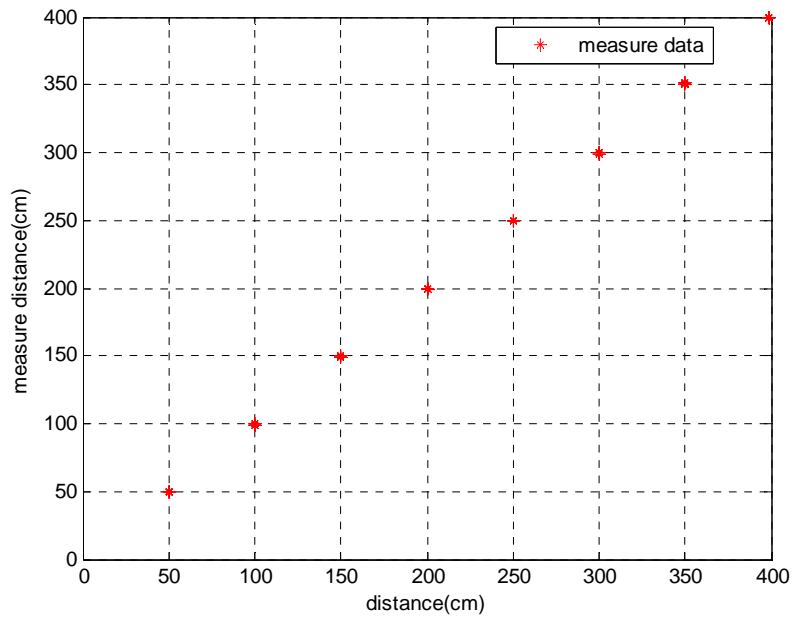


圖 2-24 雷射距離量測

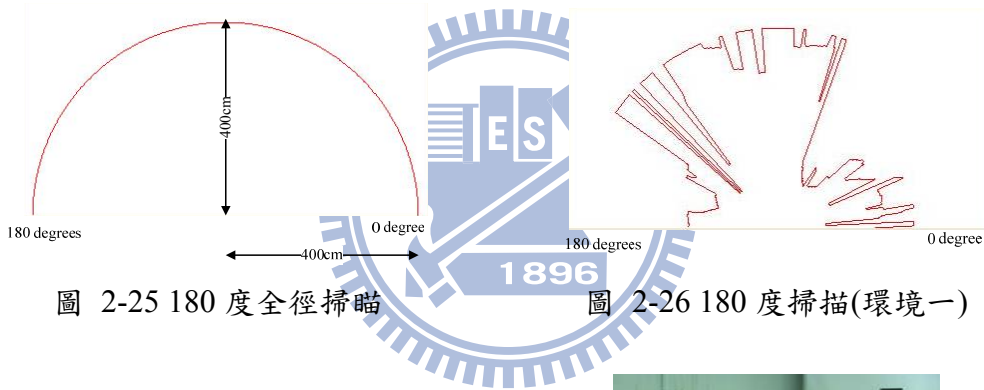


圖 2-25 180 度全徑掃瞄

圖 2-26 180 度掃描(環境一)

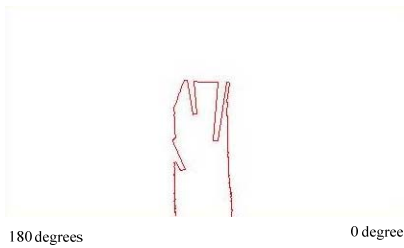


圖 2-27 180 度掃描(環境二)

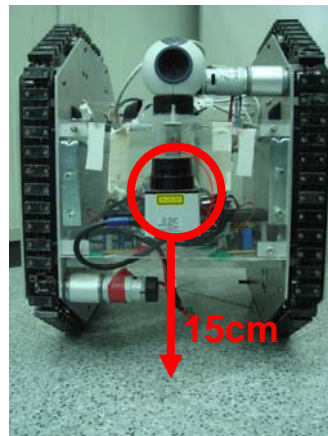


圖 2-28 雷射配置圖

2.3.2 超音波感測器

此小節將簡單介紹所使用的超音波感測器，MaxSonar-EZ1 如圖 2-29所示，此超音波可以檢測的範圍為 15.24 公分~6.45 公尺，超小尺寸以及超低的電流消耗，解析度為 2.54cm，當偵測物體介於 0~15.24cm，超音波只會回傳 15.24cm 的距離值，另外輸出的介面訊號，包括PWM(頻寬調變)、類比電壓、以及串列的數位資料(serial digital output)，在本論文中所使用的輸出介面為PWM，每 147us 的脈波寬度為 1 inch，每 49ms 週期，RX 被給入High 或Open 後，EZ1 的(PW) pin 被設定為High，然後送出七個 42KHz 波長。只要有物體被檢測出，PW 會變為”低”電位，若是一直沒有檢測到物體，PW pin 保持High 狀態持續到 37.5ms。

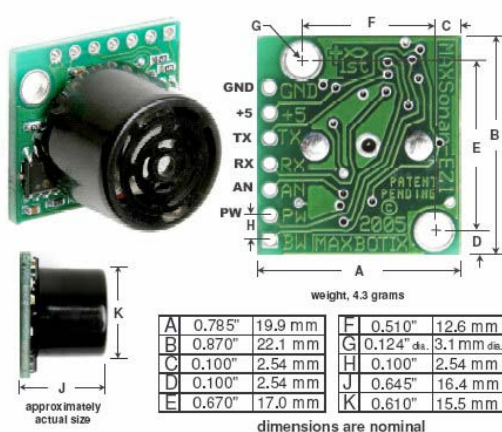


圖 2-29 MaxSonar-EZ1 模組

PWM(頻寬調變)的量測則透過單晶片 8051 來執行，如下圖 2-30所示。單晶片 5081 透過兩個外部中斷分別來計算所裝置的兩個超音波，每當一次量測循環後，就透過 8051 上的RS232 介面把兩個超音波距離量測值送回給DSP，特別的是因為單晶片 8051 的輸出訊號為 5V，但是DSP控制板上的腳位運作工作電壓為 3.3V，所以不能直接把單晶片 8051 的TXD和DSP的RXD直接相連接，必須先透過電壓轉換，利用SN74LVTH245ADW(具有三態輸出的 3.3V ABT 八路匯流排收發器)轉換成 3.3V，如下圖 2-31所示。

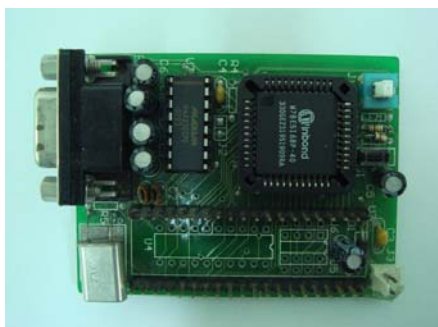


圖 2-30 單晶片 8051 模組

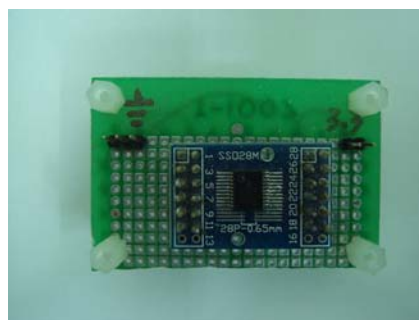


圖 2-31 SN74LVTH245ADW

因為超音波感測器量測方式是使用波形在空中傳遞的時間和速率計算與物體之間的距離，所以環境因素將會影響到真實的量測結果，所以針對超音波對不同距離來做真實量測，而超音波在機器人平台的設置如圖 2-32所示，紅色圓圈為超音波感測器，兩個超音波分別距離地上 15cm。

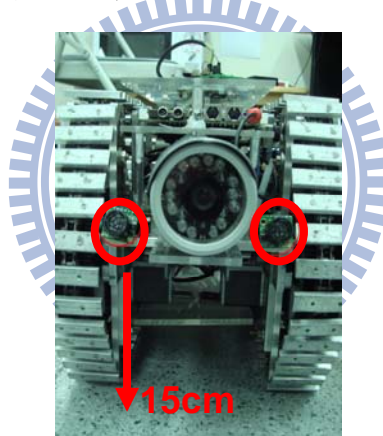


圖 2-32 波音波配置圖

首先針對特定距離 100cm處做量測，取樣 400 筆，如圖 2-33所示，由量測結果可以發現距離值會有誤差干擾的產生，原因為機器人平台比較低，相對的在超音波配置，距離地面只有 15cm，將會造成超音波的波形在空間上傳遞干擾比較嚴重，因此有時會造成量測上的錯誤，為了讓超音波在相同距離上保持一樣的距離值，將加入中值濾波器來濾掉雜訊所產生的誤差，每取樣十筆量測值後將濾波一次，濾波後的結果如下圖 2-34所示，經由濾波後，將可以得到穩定的感測值，而不會有雜訊的產生。

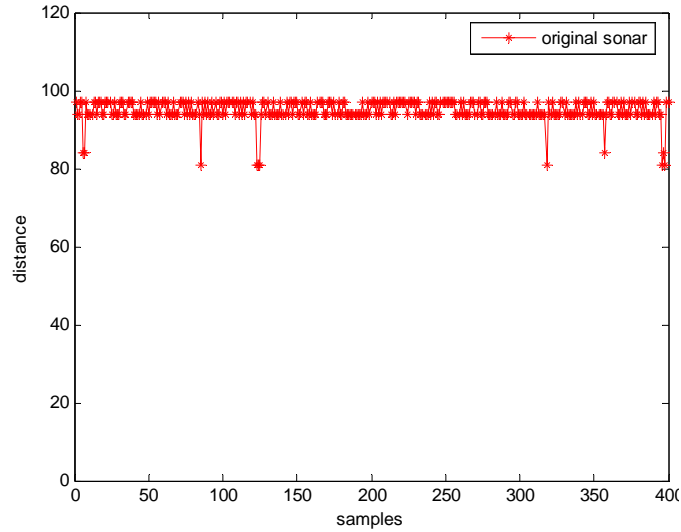


圖 2-33 原始超音波值(100cm)

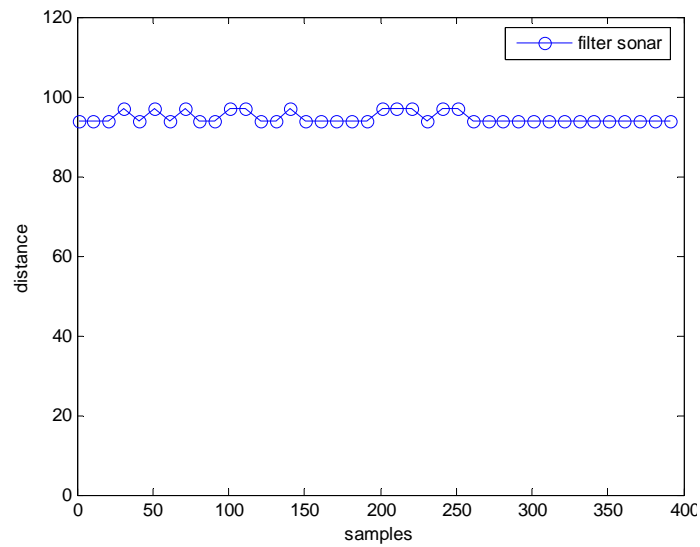


圖 2-34 濾波後超音波值(100cm)

透過中值濾波器前處理後，接下來分別針對不同距離來做實際量測，如圖 2-35所示，不同距離各取樣 500 筆資料，然後每 10 筆再經由濾波器，產生最後的距離輸出，由量測結果可以發現雖然經由此超音波可以量測到長距離但是隨著距離越長誤差將越大，不過在 60cm 以內的量測都相當準確。

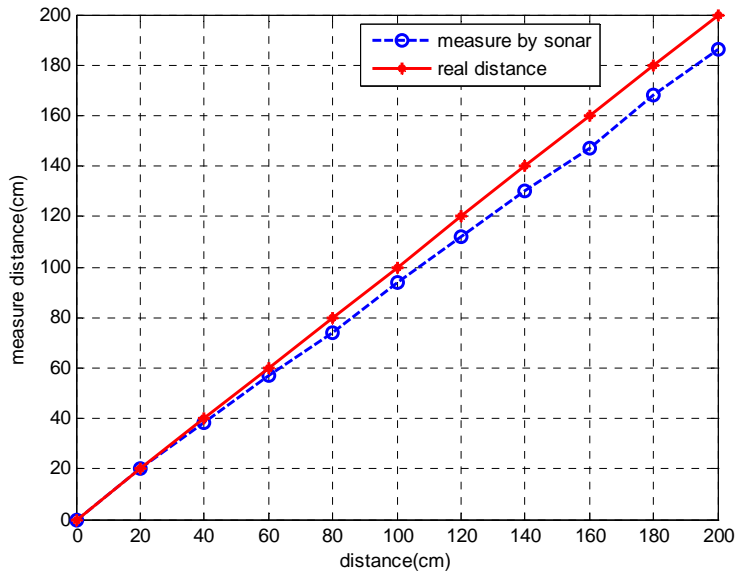


圖 2-35 sonar 不同距離量測

2.3.3 電子羅盤

機器人的轉向判斷上，使用電子羅盤感應磁場(地磁北極)大小與方向，進而推算出目前的角度變化，所使用的電子羅盤硬體，如圖 2-36所示，V2XE使用新型系統常用的 3V工作電源，具有功耗低、尺寸小、在各種條件下的抗噪聲能力強、較大的測量靈敏感應區等優點。V2XE結合了PNI公司專利的磁場感應傳感器和測量電路技術，不受補償漂移的影響，在不同溫度下的測量結果很穩定。V2XE通過簡單易行的標準SPI接口輸入，輸出數據。透過指令的讀取，電子羅盤輸出的角度範圍為 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。



圖 2-36 2-Axis Compass Module(V2Xe)

2.3.4 紅外線攝影機

紅外線攝影機是運用人類可見光與CCD可感應光源範圍不同的原理所設計。CCD 是電荷耦合元件(Charge Coupled Device)的簡寫，能將感測到的光轉換成電荷訊號，加以處理，這是目前以固態影像元件應用在攝影機最尖端的技術。如圖 2-37所示，為配置在機器人平台上的紅外線攝影機。



圖 2-37 紅外線攝影機

2.4 感測器於機器人平台上之應用

2.4.1 雷射掃描器之避障

經由前面章節2.3.1的介紹，雷射在距離的量測上相當精準，所以本論文把雷射當作機器人避障的應用，在掃描範圍上，設定為前方 180° 做環境的掃描，圖2-38所示，由Borland C++ Builder 軟體所撰寫的人機介面，透過雷射掃描值的讀取，把雷射感測值直接顯示在人機介面上，以下將詳細說明使用雷射避障的相關演算法以及範例說明。

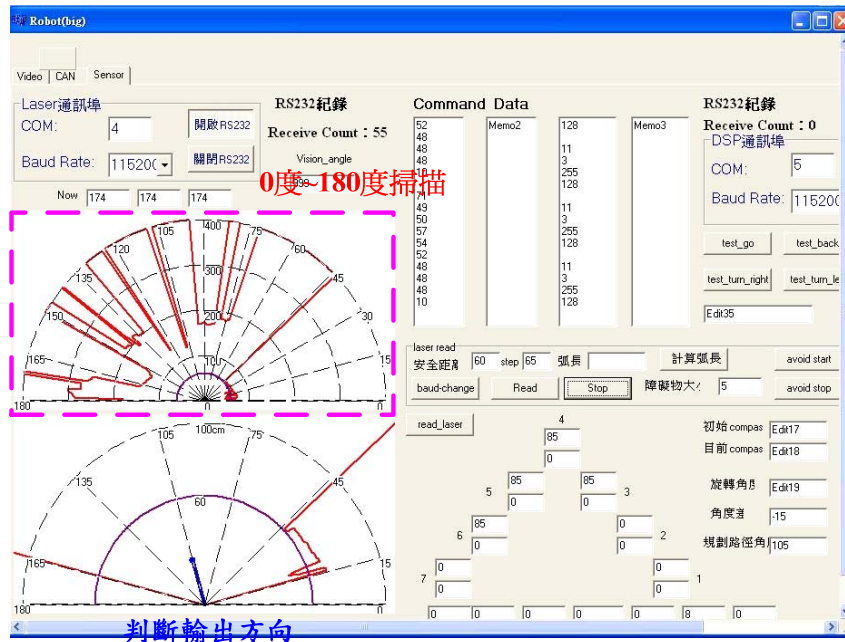


圖 2-38 雷射掃瞄人機介面

● 雷射避障演算法

首先把 0~180 度的區間分成七個區間，如圖 2-39 所示，總共有 0~15 度、15~45 度、45~75 度、75 度~105 度、105~135 度、135 度~165 度、165~180 度，人機介面上會先設定安全距離以及安全距離次數。所謂的安全距離為自我定義在多少距離以上，當成是機器人認為前方沒有障礙物的距離。安全距離次數則為大於此設定的安全距離的次數，由前面章節 2.3.1 所介紹的雷射掃描器，精細度為 0.36° ，如果所設定的安全距離次數為 30，則換算成掃描度數為 10.8° ，把此度數認定為障礙物的寬度。

每個區間會去計算此區間所量測到的距離是否大於所設定的安全距離次數，如果小於安全次數，則代表此區所量測到的距離都很近，意味著有障礙物，因此會放棄此區域，而如果大於所設定的安全距離次數時，則會比較同時也是大於安全次數的區間，然後選擇含有安全次數最多區間，當成是最空曠的區域，最後規劃為機器人的避障方向，運作的流程如圖 2-40 所示。

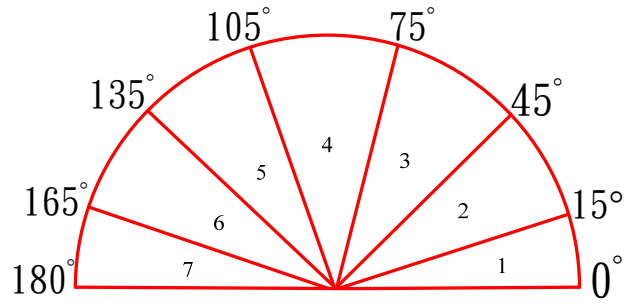


圖 2-39 雷射分區圖

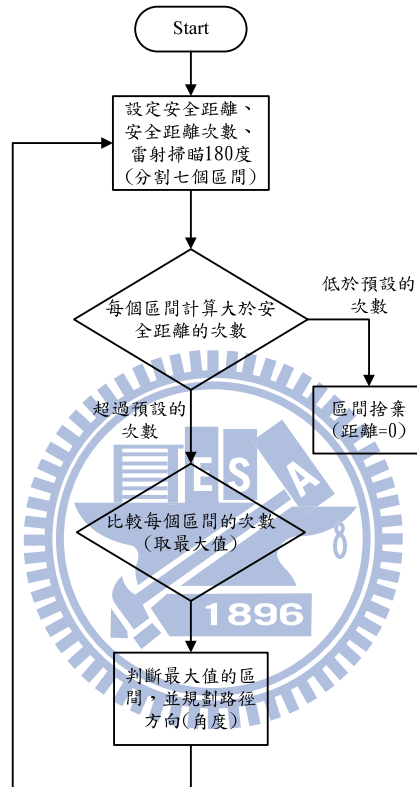


圖 2-40 雷射避障流程

● 雷射避障範例說明

以下將分別說明雷射掃瞄器在不同環境狀況下的避障方式，首先設定安全距離(80cm)及安全距離次數(60)。如圖 2-41所示，為當前方沒有障礙物時，雷射掃瞄以及所規劃的避障方向(向前)，如圖 2-42所示，為當右方有障礙物時，雷射掃瞄以及所規劃的避障方向(向左)，圖 2-43所示，為當左方有障礙物時，雷射掃瞄以及所規劃的避障方向(向右)，圖 2-44所示，為當前方以及左、右方都有障礙物時，雷射掃瞄後，規劃向後的避障方向。

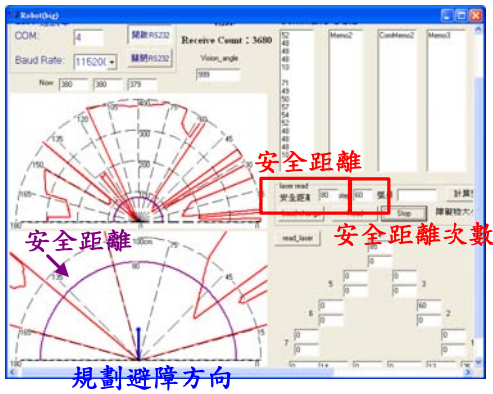


圖 2-41 laser scan(前方沒有障礙物)

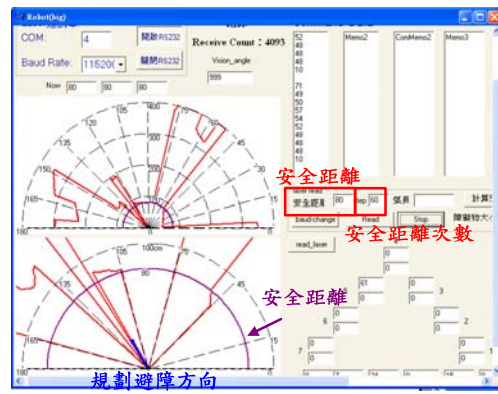


圖 2-42 laser scan(右方有障礙物)

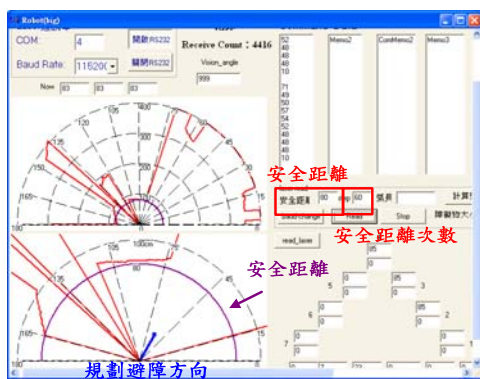


圖 2-43 laser scan(左方有障礙物)

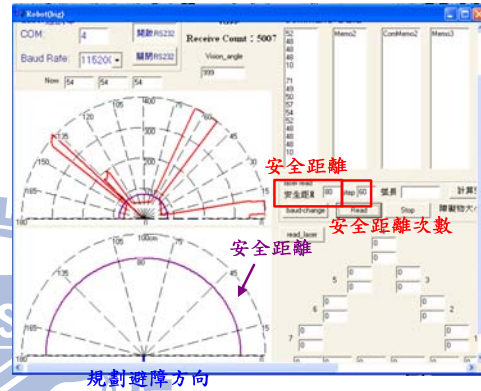


圖 2-44 laser scan(前方及左右方有障礙物)

2.4.2 超音波感測器之避障

由前面章節2.3.2的介紹，可以得知超音波的量測在 60cm以內可以很準確，所以在沒有配置雷射的機器人上，採用超音波感測器以實現避障功能，超音波各配置在機器人平台的左、右兩方，透過左、右邊超音波所量測到的距離值來做判斷，避障的演算法基本概念為：當兩邊超音波感測值同時都大於某設定好的數值時，則代表前方沒有障礙物，可以往前，當左邊超音波感測值大於右邊超音波感測值時，則代表左邊比較空曠，可以往左轉，而當右邊超音波感測值大於左邊超音波感測值時，則代表右邊比較空曠，可以往右轉，以此簡單的判斷機制來實現閃避障礙物的功能。

第三章 ZigBee 無線通訊

3.1 IEEE802.15.4 概述

IEEE 802.15.4/ZigBee 是一種相當先進新穎的短距離傳輸技術標準，從家用無線通訊規格 HomeRF 聯盟中所分出來的技術，許多人常拿 IEEE 802.15.4/ZigBee 與 RFID、Bluetooth 等技術互相比較，以技術層面來看，三者很顯然是完全不同的技術，不過就應用而言三者的確有些許多相似的地方。

IEEE802.15.4 所定義的低傳輸率無線個人區域網路，是一種網路結構簡單且低價格的通訊網路，適合在電力供應有限且只需簡單運算之應用的裝置中實現，其主要的特徵在於短距離傳輸、可靠的資料傳輸、低耗電量、極低的價格及容易安裝。

IEEE 802.15.4 實體層 (PHY) 採用 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) 技術，這 DSSS 技術主要的優點在於可以降低類比電路在開發上的複雜度與成本，其傳輸速率介於 250kbps 至 20kbps 之間，看所用頻段而決定，頻段的使用分別是 2.4GHz 的 ISM 頻段、美國開放的 915MHz 頻段，以及歐洲開放的 868MHz 頻段，而不同頻段可使用的通道分別是 16、10、1 個。圖 3-1 為 IEEE 802.15.4 操作頻帶示意圖。

IEEE 802.15.4 PHY Overview

Frequency	Band	Coverage	Data	# of Channels	Rx Sensitivity	Modulation
2.4GHz	ISM	Worldwide	250kbps	16	-85dBm	O-QPSK
868MHz		Europe	20kbps	1	-92dBm	BPSK
915MHz	ISM	Americas	40kbps	10	-92dBm	BPSK

圖 3-1 IEEE 802.15.4 操作頻帶示意圖

IEEE 802.15.4 的媒體存取層 (MAC)，定義了兩種傳輸協定，一種是同步模式 (Beacon Mode)，另外一種則是非同步模式 (Non-Beacon Mode)。

同步模式則是IEEE 802.15.4 比較特別的規格，圖 3-2為同步模式 (Beacon Mode) 資料傳送行為，利用信標的星型拓撲網路中，為於中心的父節點可以和其從屬的多個子節點間進行資料交換，但是子節點和子節點間不能進行資料交換。

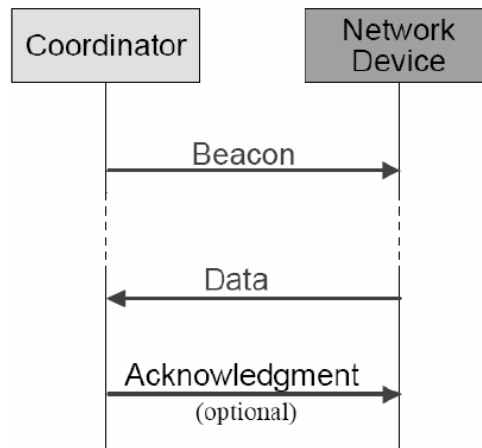


圖 3-2 同步模式 (Beacon Mode) 資料傳送行為

非同步模式簡單來說就是直接使用Unslotted CSMA-CA協定，避免傳輸碰撞。圖 3-3為非同步模式 (Non-Beacon Mode) 資料傳送行為，本論文所使用的資料傳輸方式為非同步模式。

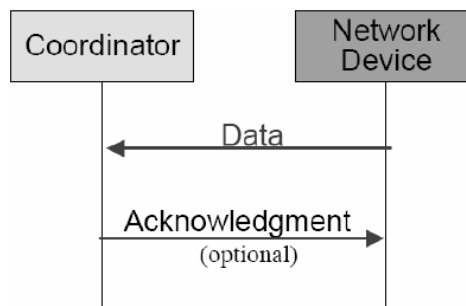


圖 3-3 非同步模式 (Non-Beacon Mode) 資料傳送行為

3.2 ZigBee

基於IEEE 802.15.4 的規格，ZigBee Alliance定義了網路層（NWK）、應用層（AP）與安全層（Security）。網路層最重要的工作，在於負責網路機制的建立與管理，同時具有自我組態路由路徑（Self Configure），以及自我修復路由路徑（Self Healing）的功能。在網路層中，ZigBee定義了三種角色，第一個是網路協調者(WPAN Coordinator)，負責網路的建立以及網路位置的分配；第二個是路由器(Router)，主要負責找尋、建立、以及修復資料封包路由路徑，並負責轉送資料封包，同時也具有網路位置的分配的能力；最後一個是末端裝置，只能選擇加入別人已經形成的網路，可以收送資料，但不能幫忙轉送封包。網路功能是ZigBee最重要的一個特點，也是與其他WPAN標準最不一樣的地方；以規格來說，網路層以 16bits的資料長度來管理網路位置，理想上在同一個WPAN，可以存在 65536 個ZigBee裝置，彼此透過多重跳點(Multi Hop)的方式，傳遞資訊，圖 3-4為ZigBee網路拓撲架構。為了在省電、複雜度、穩定性與實現難易度等因素取得一個平衡點，網路層的路由演算法，使用了下列三種方式：

- AODV 演算法：建立隨易網路的拓撲架構，在 ZigBee 規格中稱為 Table Routing。
- Motorola Cluster-tree 演算法：建立樹狀的拓撲架構，在 ZigBee 規格中稱為 Tree Routing。
- 利用廣播的方式傳遞資料

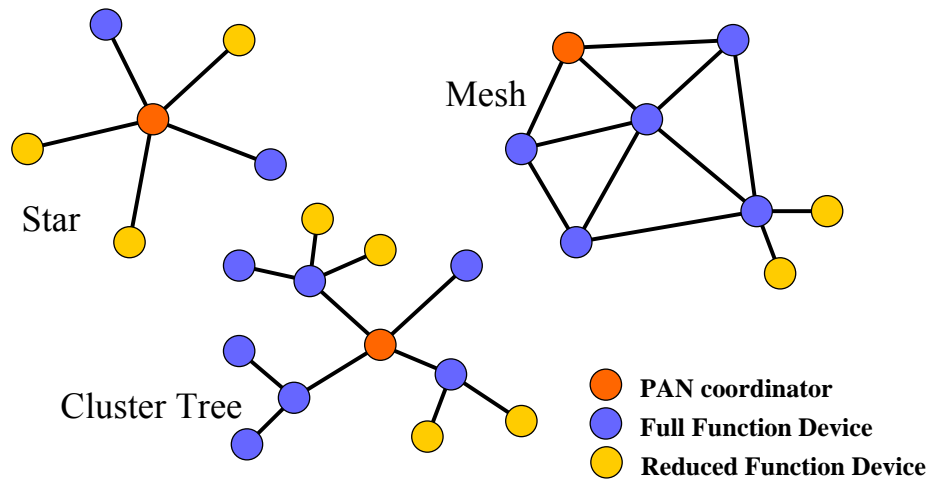


圖 3-4 ZigBee 網路拓撲架構

3.3 ZigBee 硬體

以RF晶片為代表性，現今 2.4G Hz的RF晶片以國外的Chipcon市場佔有率較高，其RF晶片CC2420 搭配Atmel AVR 8 bits微處理器的平台，是大多數人接觸到 ZigBee的第一個開發平台，而且CC2420 在市面上已經銷售了百萬顆了。而最近也開始推出一顆CC2430 型號的系統晶片，它主要是將CC2420 和 8051 結合為一，有 128KB、64KB和 32KB三種版本的快閃記憶體空間，以及 8KB的記憶體，可以供客戶依據需求的選擇，大大降低了ZigBee相關產品的成本。圖 3-5為 Chipcon CC2430。



圖 3-5 Chipcon CC2430



圖 3-6 CC2430ZDK

本論文所使用的ZigBee硬體是採用美國德州儀器公司(Texas Instrument, TI)

的CC2430ZDK模組，如圖 3-6所示，硬體上共有SmartRF04 和CC2430DB兩種，如圖 3-7、圖 3-8所示，主要核心為CC2430 System-on-Chip裡面包括CC2420 發送器、8051 控制器、FLASH記憶體以及相關的周邊電路。

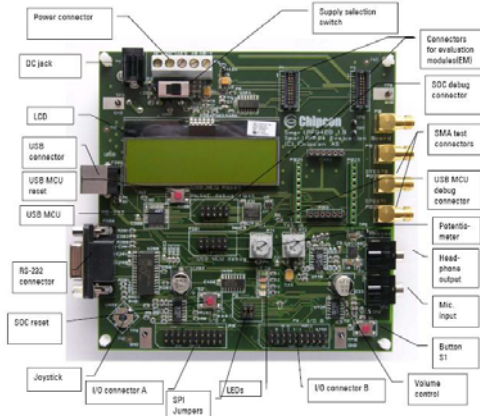


圖 3-7 SmartRF04EB 板

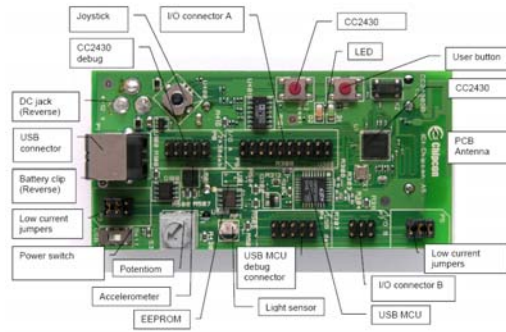


圖 3-8 CC2430DB 板

3.4 機器人無線通訊

經由以上對於 IEEE 802.15.4 的簡介，可以得知 ZigBee 相當適合應用在多節點以及短距離傳輸上，以下將詳細介紹 ZigBee 如何應用在分散式多機器人通訊上，包括網路的拓撲以及機器人間的通訊封包協定。

3.4.1 ZigBee 網路的形成

- ZigBee 網路位址分配演算法

當網路形成時，ZigBee 的協調者(Coordinator)必須要先定義 ZigBee 路由器最多可容許連線之裝置個數(C_m)，以及最多的子 ZigBee 路由器數量(R_m)以及網路的深度(L_m)，ZigBee 規定 $C_m \geq R_m$ ，因此一 ZigBee 路由器至少可供 $(C_m - R_m)$ ZigBee 終端設備連結上它。裝置的網路位址是由其父節點(Parent router)所給定的，對於 ZigBee 協調者，整個網路的位址空間被劃分成 $R_m + 1$ 塊，前 R_m 塊位址空間將分配給其 R_m 個子路由器，而最後一部份則保留給與之連線之 $(C_m - R_m)$ 個 ZigBee 終端設備。ZigBee 路由器利用 C_m 、 R_m 、 L_m 來計算一個稱為 C_{skip} 的參數，然後再利用 C_{skip} 來計算其子路由器以及終端設備的網路位址，

假定一路由器位於網路的第 d 層， C_{skip} 的數值由下式可得：

$$C_{skip}(d) = \begin{cases} 1 + Cm \cdot (Lm - d - 1), & \text{if } Rm=1 \\ \frac{1 + Cm - Rm - Cm \cdot Rm^{Lm-d-1}}{1 - Rm}, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3-1)$$

位址的分配是由 ZigBee 協調者開始，會先將自己的位址指定為 0，以及深度指定為 0，假設一個在深度 d 的父節點的位址以被指定為 A_{parent} ，該父節點將指定他的第 n 個子路由器的位址為 $A_{parent} + (n-1) \times C_{skip}(d) + 1$ ，並且指定他的第 n 個子終端設備的位址為 $A_{parent} + Rm \times C_{skip}(d) + n$ 。

● 無線區域網路建構

多機器人合作主要就是可以透過彼此機器人間的無線通訊做資料交換，以達到資源分享的目的，最後提升整體的工作效率，同時為了讓傳輸端和接收端有即時的交換訊息，所以在無線通訊上比須使用到點對點的直接通訊方式。

在 ZigBee 的網路拓撲決定使用 Mesh 的方式，也就是全部節點都扮演 router 的角色，在協調者 (coordinator) 上設定 $Cm=4$ 、 $Rm=4$ 、 $Lm=5$ ，可容許底下加入 4 個子節點，而最多可以有 4 個 router，深度為 5 層，位址分配如圖 3-9 所示，協調者的第一個到第四個子路由器的位址將分別被指定為 1、342、683、1024，而真實多機器人系統的網路架構如圖 3-10 所示，虛線部分代表 ZigBee 無線定位所走的傳輸路徑以及監控端的傳輸路徑，而棕色實線部份代表機器人間的無線通訊。在網路角色的硬體使用上，扮演與監控端連接的 Coordinator 和扮演 Router 之一的都採用 SmartRF04EB，另外各機器人上考量到體積問題所以都採用 CC2430DB。

在網路的形成順序方面，首先透過 Coordinator 建立一個 PAN (Personal Area Network)，然後所有的 Router 在陸續加入此網路中，同時經由 bind 的程序來完成傳輸路徑連結的動作，包括 Coordinator 和 Router 之間的連結，以及 Router 和 Router 之間的連結。

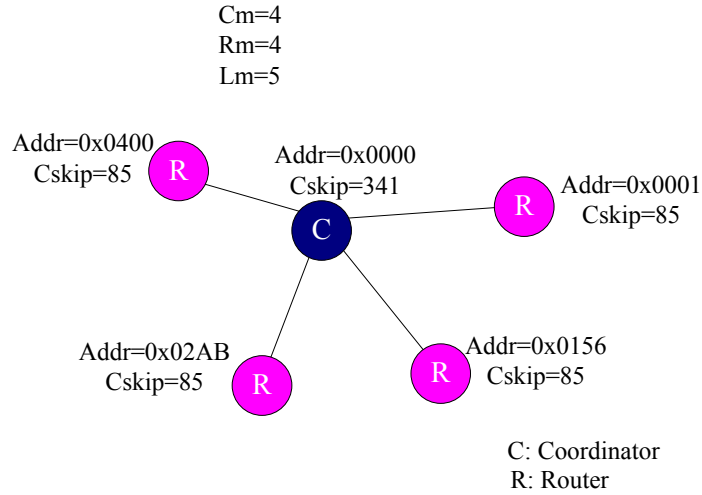


圖 3-9 ZigBee 網路位址分配

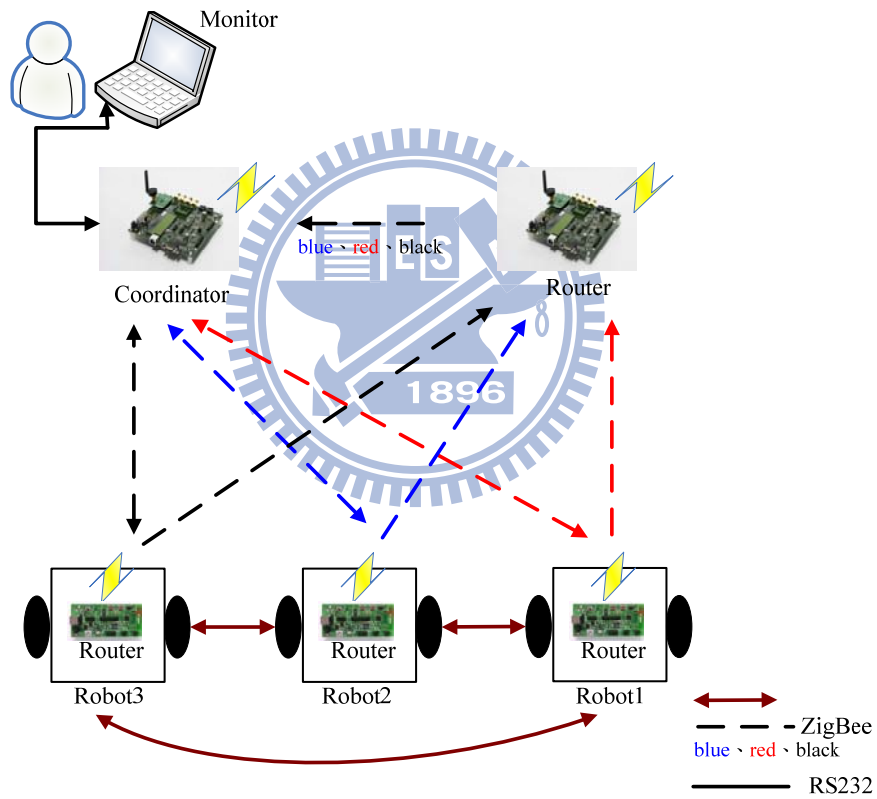


圖 3-10 多機器人無線通訊

利用 Borland C++ Builder 軟體，撰寫遠端電腦的監控人機介面，如圖 3-11 所示，搭配多機器人無線通訊架構的使用，即可同時觀測機器人資訊以及遠端遙控多機器人。

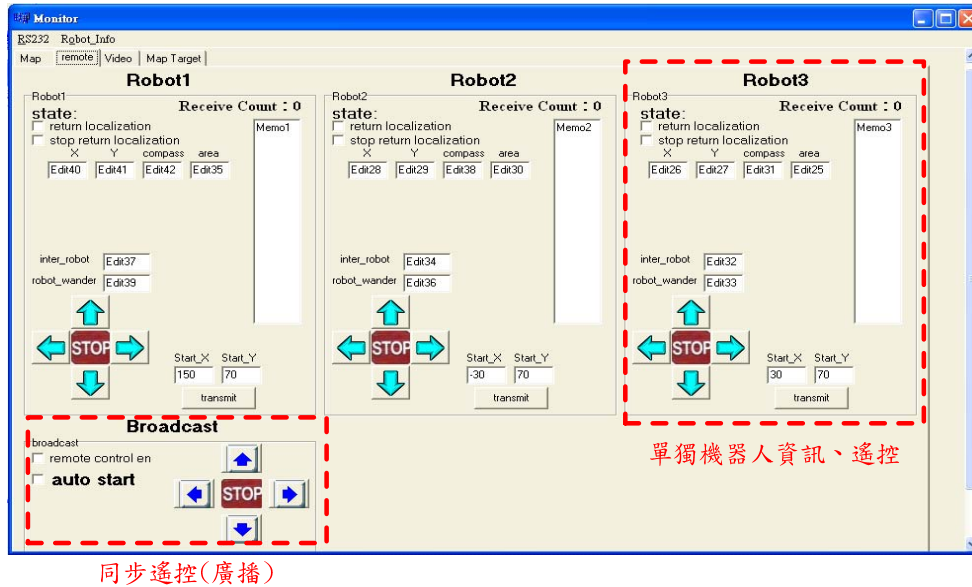


圖 3-11 人機介面

3.4.2 多機器人間無線通訊封包協定

在多機器人的無線通訊傳輸上，各機器人都有搭配 ZigBee 模組，所以在傳輸上不僅可以當成發送端也可以當成接收端，而當機器人數目越多，代表所要傳的訊息封包種類越多，所以必須要定義訊息封包的種類，讓機器人可以分辨目前所收的訊息為何和目前所要送的訊息為何，而所要傳輸的封包為監控端對機器人端以及機器人端對機器人端。

對於訊息的種類分辨上，使用不同的開頭封包代表不同的訊息，如下表 3-1 所示，Header 表示開頭封包，各 ZigBee 節點接收端透過此封包判斷訊息種類為何以及下一步是否還要傳送至另一 ZigBee 節點，Length 代表訊息的封包長度，開頭封包為第一層的判斷程序，主要是區隔各種不一樣功能的訊息，第二層則是判斷此訊息要傳給網路中的哪一台機器人，以 Header 為 0x0B、0xEF、0xFA 為例說明。

表 3-1 訊息定義代碼

Header	Length	Type	Information meaning
0x0B	4 Bytes	Monitor command	remote robot's motion
0xEF	4 Bytes	Monitor command	return localization information
0xFD	4 Bytes	RSSI packet	Robot1 RSSI
0xFB	4 Bytes	RSSI packet	Robot2 RSSI
0xFF	4 Bytes	RSSI packet	Robot3 RSSI
0xFE	14 Bytes	Localization packet	information for Robot1
0xF1	14 Bytes	Localization packet	information for Robot2
0xF2	14 Bytes	Localization packet	information for Robot3
0xFA	14 Bytes	Inter-robot packet	message exchange between each Robot

開頭封包為 0x0B，代表此訊息為監控端所下的命令，主要目的為遠端遙控各別機器人的動作，例如前進、後退、左轉、右轉等等，至於如何告知Coordinator要送此命令到哪台機器人上則判斷開頭封包的後一個封包，如圖 3-12所示。相對應的第二、三、四封包，如表 3-2所示。

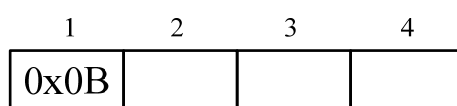


圖 3-12 遙控動作命令訊息

表 3-2 遙控動作命令代碼

封包2	封包3	封包4	Information meaning
11	Robot velocity	angular velocity	Transmit to Robot1
22	Robot velocity	angular velocity	Transmit to Robot2
33	Robot velocity	angular velocity	Transmit to Robot3
3	Robot velocity	angular velocity	broadcast

開頭封包為 0xEF，代表此訊息為監控端所下的命令，主要目的為讓機器人

開始回傳自己本身的感測資訊以及定位，以第二封包和第三封包為判斷依據，分別代表開始回傳Robot資訊和停止回傳Robot資訊，以及開始自主搜尋的命令，如圖 3-13所示，相對應的第二和第三封包，如表 3-3所示。

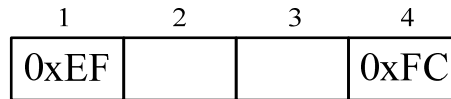


圖 3-13 遙控回傳資料命令訊息

表 3-3 遙控回傳資料命令代碼

封包2	封包3	封包4	Information meaning
11	22	0xFC	Robot1 start to return information
22	11	0xFC	Robot1 stop to return information
55	66	0xFC	Robot2 start to return information
66	55	0xFC	Robot2 stop to return information
77	88	0xFC	Robot3 start to return information
88	77	0xFC	Robot3 stop to return information
33	44	0xFC	All Robot start to auto-search

開頭封包為 0xFA，代表此訊息為機器人間的資料傳遞，為了分辨是哪台機器人傳送到哪台機器人，由封包 2 和封包 3 來判斷，封包 4 到封包 13 則為所要傳輸的感測資料。封包 2 代表發送端，封包 3 代表所要傳送的目的地，例如以 Robot1 要送訊息給Robot2 為例，第 2 封包則為 1，第 3 封包則為 2，以此類推，如圖 3-14所示。

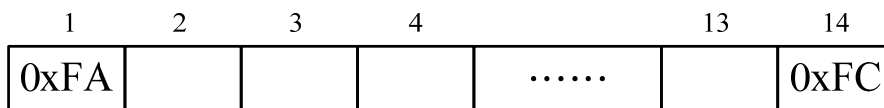


圖 3-14 機器人間訊息

3.4.3 ZigBee 與 Wi-Fi

由於本論文在無線網路的使用上還包括802.11b (Wi-Fi)，用來傳輸資料量比較大的影像資訊，在機器人系統中ZigBee和Wi-Fi將會同時使用到，所以必須考量到兩者之間是否有干擾的產生，以下將做簡單的分析 and 探討。

IEEE 802.15.4 (ZigBee)在2.4GHz (2400Hz~2483.5Hz)的頻段上訂定有16個頻道，分別是頻道11到頻道26，每個頻道頻寬2MHz，頻道與頻道之間沒有頻譜重疊，各頻道中心頻率相間隔5MHz，而本論文中所使用的另一個無線網路IEEE 802.11 (Wi-Fi)的工作頻帶也是在2.4GHz，其頻段上訂定11個頻道，分別是頻道1到頻道11，每個頻道頻寬為22MHz，各頻道中心頻率相間隔10MHz，因此IEEE 802.11在頻道的使用上通常最多以3組不重疊的頻道為主，分別為頻道1、頻道6、頻道11。

如圖 3-15所示，我們將IEEE 802.15.4 和IEEE 802.11 所佔用的頻道相互比較後，可以看出IEEE 802.15.4 和IEEE 802.11 之間無衝突的頻道分別為頻道 15、頻道 20、頻道 25、頻道 26，，因此理論上在這些頻道下使用建立 ZigBee無線網路，比較不會與 802.11 相互干擾。但是在實際的環境裡，IEEE 802.11 在頻道的使用上會有所漂移，所以在IEEE 802.15.4 的頻道中，只有頻道 25 和頻道 26 會跟IEEE 802.11 的頻道比較少干擾，所以本論文中的ZigBee網路將設定在頻道 26，以減少和IEEE 802.11 頻道上的重疊，避免在無線封包上的碰撞和延遲等等。

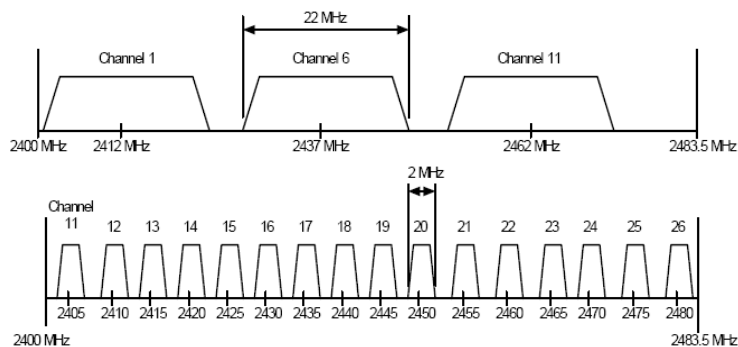


圖 3-15 IEEE 802.15.4 和 IEEE 802.11 頻道相互重疊圖

第四章 多機器人合作策略與行為控制架構

關於多機器人，好處在於提升整體團隊的工作效率，藉由不同的合作策略將可以明確的指示機器人間要如何互動，本章將詳細的敘述多機器人間如何透過所設計的合作策略以及配合機器人本身的行為控制來達到多機器人合作搜尋目標物的目的。

4.1 團體合作方式分類

不同的工作性質，將有不一樣的團體合作方法，例如簡單的工作性質就不太需要團體間訊息的溝通就可以完成，相對的遇到複雜的工作性質時，則需要團體間大量的溝通協調，互相交換訊息才能完成工作，另外在某些情況，則必須要有一個領導者來協調整個團體，大家透過溝通來完成工作。因此團體合作的方式大致分為以下三類：

(1) 沒有溝通

團體間沒有所謂的訊息交換，各自完成自己的工作，這也是最基本的合作，但是做沒有效率的合作。

(2) 單一領導者

單一領導者的合作是指，在這個團隊中有一位領導者，這個領導者會指派任務給下面的執行者來執行。相較於沒有溝通的合作方式，有一領導者的合作方式有可能會有較好的效率，但是若是領導者能力不夠好或是任務過多就會造成整個工作的停滯。

(3) 多人討論

在多人討論的模式下，每個個體都會提出意見，經由一些事先設定的條件來做判斷之後，決定最後的行動，相較於單一領導者的情況，在這種模式之下

就比較不會有工作停滯的情況發生。

經由以上的說明，多機器人在執行搜尋任務時，必須要互相分享搜尋的資訊以及討論下一步該往哪個地方搜尋，所以在合作的方式，本論文將採用多人討論的團體合作方法。有了初步的團體行動概念，接下來將探討關於機器人行為控制和團體間如何透過所設計的合作策略來提升整體工作效率。

4.2 基於行為模式之機器人控制理論

在機器人的自主行動控制上，將使用基於行為模式的方法來控制機器人的行動，到目前為止有關基於行為模式的機器人控制架構，以其行為輸出的選擇方式大致上可分為以下三類：

(1) Subsumption Architecture — 行為優先權

Subsumption 控制架構如圖 4-1所示，首先由MIT 之Rodney Brooks 在1986年所提出[18]，其為一個階層式的系統架構。對一個以達成任務為目的的行為來說 Subsumption 架構可以表示成許多單獨的行為層，而每一個行為層皆有其個別的目的及行為輸出，且這些所有的行為層是同時地在運作的。至於整個系統的最後行為輸出，由於各行為擁有不同的優先權，因此低階的行為在某些情況條件下會被高層的行為所抑制，造成最終系統輸出只會有其中某一個單一行為，而最終輸出是哪個行為則要看當時的情況條件而定。

Subsumption 架構的優點在於增加高層行為並不會需要修改已經設計好的低階行為，因為最後仍能夠透過抑制的效果來控制最後的輸出，對於系統未來的擴充性有很大的優勢。

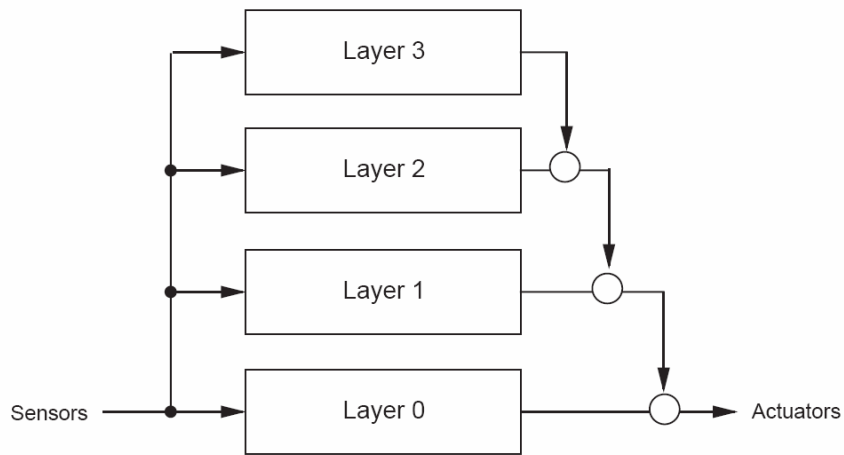


圖 4-1 Subsumption Architecture

(2) Schema-based Architecture — 行為融合

Schema-based 控制架構，如圖 4-2所示，首先由Georgia Tech 之Ronald Arkin 在 1980 年代末期所提出[19]，其為一個行為並行式的系統架構。每一個行為皆可表示成一個單獨的Motor Schema，擁有自己的目的及輸出(如控制馬達前進之速度大小與方向)，其輸出即可表示為一個速度向量。在系統的輸出方面，採用的是向量總和的方式，即每一單獨行為之輸出會乘上一個屬於自己的行為權重後再加總起來(所有行為之權重數總和為 1)，做為最後馬達驅動的輸出。因此在行為融合架構下的整體行為輸出並不是其中某一單獨行為，而是多個行為融合後所得到的結果。

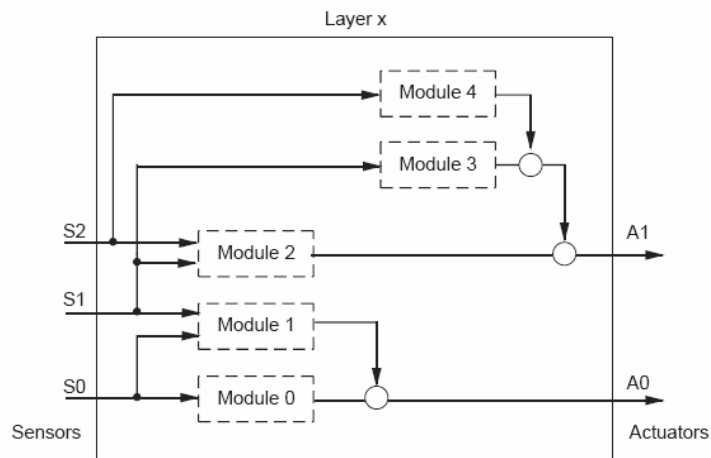


圖 4-2 Schema-based Architecture

(3) Action Selection — 行為競爭

Action Selection 之行為架構最早由 Pattie Maes 在 1980 年代末期所提出 [20]，其為一個行為競爭的系統架構。與 Subsumption 架構類似的是其最後的系統行為輸出為其中的某一個單獨行為；但不同的是，在 Subsumption 架構各行為有不同的優先權，但在 Action Selection 架構裡所有行為是平等競爭的，其每個行為皆有其屬於自己的動機，而根據當時的環境情況會影響各行為的動機大小，最後由動機最大的那個行為做為最後的系統行為輸出。

為提昇機器人團隊在執行合作搜尋任務上的工作效率及提高各機器人的自主能力，本論文將分別就已知環境和未知環境的條件來設計相對應的合作策略，同時轉換成基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，其設計理念如下：

- (1) 為了提昇各機器人間之互動性，因此採用基於行為模式 (Behavior-based) 為基礎之控制方式，使用優先權的比較 (Subsumption Architecture)，其中機器人之行為設計乃經由不一樣的合作策略所產生。
- (2) 在機器人的行為選擇方面，由其自身感測器對環境的感測，產生其個別行為，另外透過合作策略，與其他機器人間之溝通、分享，產生其群體行為，最後透過系統架構的運作，促其選擇適當的行為輸出。

4.3 已知環境合作搜尋策略

首先針對所要搜尋的場地環境來做定義，可歸分成以下兩種：

- (1) 已知環境: 只知道所要搜尋的場地面積大小，但是並不知道場地裡面的環境擺設，當然也不知道目標物的位置。
- (2) 未知環境: 對所要搜尋的場地完全不知道，如場地大小、目標物位置、環境擺設等等。

以上兩種環境都必須要依靠機器人本身自主的搜尋和感測，有了對場地的基本定義後，將分別提出一套合作策略以及所相對應的行為模式架構，使多機器人

可以自主性的達到合作搜尋目標物的任務。

對於搜救者而言，知道越多災難現場的資訊，相對來說，在執行搜救任務上會更有幫助，同樣的，如果事先可以知道場地的一些資訊，將可以有效的提升機器人自主搜尋的能力。在本論文中，已知環境對於機器人而言，得到的資訊就是知道所要搜尋的場地大小，以下將詳細的介紹針對已知環境而設計的合作搜尋策略。

仿照吸塵器機器人的概念，利用一次可感測的範圍來規劃下一步該往哪裡走以及走多少距離，相對於本論文的機器人，主要感測環境的感測器為超音波感測器和雷射掃瞄器，透過前面章節2.3的感測器硬體討論，可以得知：

- (1) 雷射掃瞄器在 400cm 以內的範圍都可以偵測到很精確的距離資訊。
- (2) 超音波感測器則在 60cm 範圍內的感測可以偵測到比較精確的距離資訊。
- (3) 機器人的尺寸為長 40cm、寬 20cm。

所以首先對於各機器人本身定義一個個人的區域範圍，如圖 4-3所示。

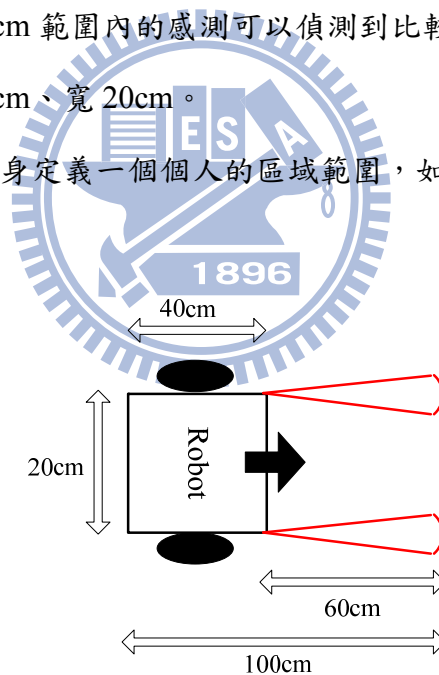


圖 4-3 機器人個人區域

利用機器人個人區域為判斷依據，首先設計一合作策略，本論文在此定義為個人區域策略(簡稱algorithm1)，以一個350cm X 350cm的場地為例，如圖 4-4所示，對於每台機器人都定義其個人的區域範圍，如圖上圓圈所示，每個圓圈大小為直徑100cm。

各機器人本身具備自主搜尋的能力，每隔一段時間後將透過ZigBee無線通訊來進行資訊的交換，分享目前每台機器人的個人區域是否有重疊到，透過此機制來達到分散的動作，如圖 4-4所示，當Robot1和Robot2的區域範圍互相重疊到時，另外Robot2則做出避開此區域的動作，透過此方法將可以達到初步的分散動作，整體的運作模式如下：

自主能力：

- (1) 具備自主的隨機環境探索行為。
- (2) 機器人透過超音波感測器或雷射掃瞄器來達到避開環境中的障礙物。
- (3) 透過攝影機來判別是否有發現目標物，如果有就停止搜尋。

合作能力：

- (1) 各機器人透過ZigBee無線通訊來交換訊息，包括機器人的位置資訊(由馬達 Encoder得知)以及機器人狀態(是否找到目標物)。
- (2) 透過位置資訊可以得知是否有重疊到其他機器人的個人區域，如果有重疊到就進行避開的動作，以此來達到分散在環境中。

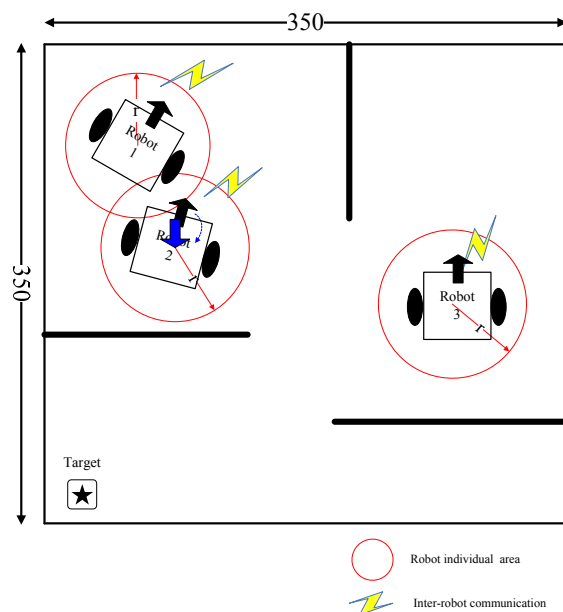


圖 4-4 個人區域策略示意圖

使用個人區域策略(簡稱 algorithm1)將會出現一個疑問,也就是機器人間的分散與搜尋場地間是否有直接的對應關係,因此為了讓分散程度跟搜尋場地有直接的關係,所以延伸出另外一個策略,本論文在此定義為虛擬區域劃分策略(簡稱 algorithm2)。

接下來將詳細說明其策略的設計概念以及運作流程,經由使用虛擬區域劃分策略,將可以改善其個人區域策略的缺點,在本論文的第五章,首先會透過模擬來分析、比較個人區域策略和虛擬區域劃分策略,經由模擬結果,在已知環境中,本論文將採用虛擬區域劃分策略。

虛擬區域劃分策略的設計概念,來自多機器人的地圖建立,目前就地圖建立的方法,大部分都會對所感測過的範圍以一個範圍表示在地圖上,所以如果整個地圖完成後,相對於機器人內部而言,環境將變成許多大小一樣的方形範圍,以方塊的多少來表示場地的大小。先對場地做虛擬的區域劃分,再以劃分好的區塊為判斷依據,目的使多機器人有效的分散在環境中。

● 策略說明

首先針對所要搜尋的場地進行虛擬的區域劃分,至於多大範圍畫分一個區塊則視機器人的感測能力,如同前面章節2.3說明:

- (1) 超音波感測器在 60cm 內量測都很精準。
- (2) 機器人長度 40cm。

所以在區塊的劃分上採用以 100cm X 100 cm 為大小當成一個區塊,如圖 4-5 所示,為一個原本長度 350cm、寬度 350 cm 的場地,經由使用虛擬區域劃分後,如圖 4-6 所示,整個場地被劃分成九個區塊。

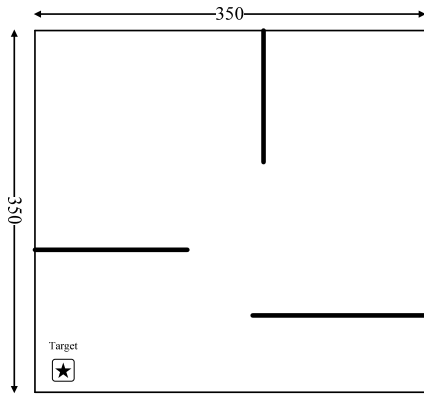


圖 4-5 350cm X 350cm 場地

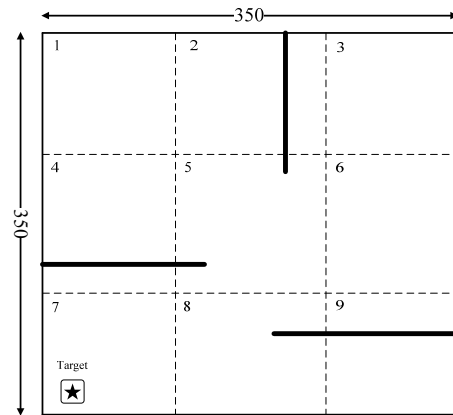


圖 4-6 350cm X 350cm 場地(虛擬劃

分)

自主能力:

- (1) 具備自主的隨機環境探索行為。
- (2) 機器人透過超音波感測器或雷射掃瞄器來達到避開環境中的障礙物
- (3) 透過攝影機判別是否有發現目標物，如果有就停止搜尋動作，沒有的話就在環境中隨機搜尋，而本論文把機器人自主能力所產生的行為歸類為個別行為。

合作能力:

- (1) 各機器人透過 ZigBee 無線通訊進行資訊交換，所交換的資訊包括目前各機器人本身所在的區塊編號，以及位置座標(由馬達 Encoder 取得)。
- (2) 各機器人本身具備自我決策系統，判斷其他機器人的區塊編號以及位置資訊，當機器人本身的區塊如果有跟其他機器人的區塊重疊到時，將進行避開的動作，而如果目前所在的區塊都沒有跟其他機器人所在區塊重疊到時，機器人下一步將會避開有機器人在的區塊搜尋，以此機制來讓多機器人分散在環境中，如圖 4-7所示，在此把透過 ZigBee 無線通訊產生合作的行為歸類為群體行為，下面將分別詳細介紹個別行為以及群體行為的設計。

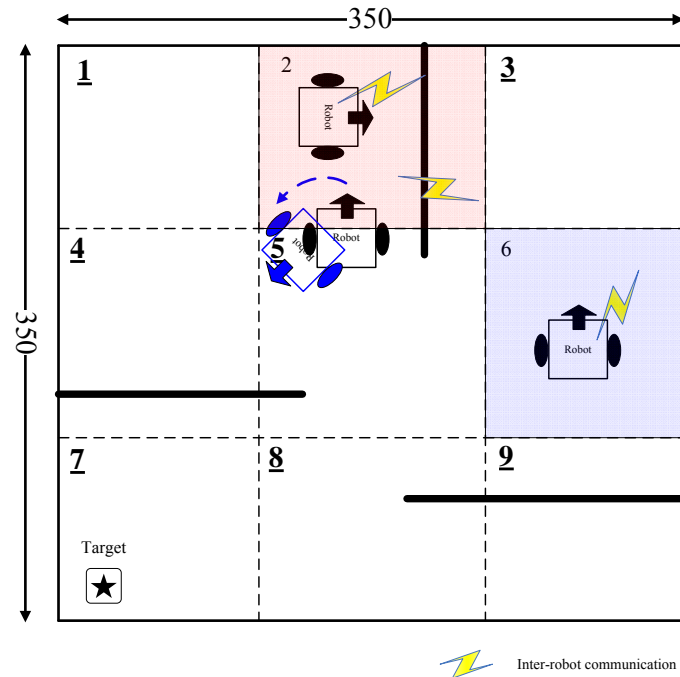


圖 4-7 虛擬區域劃分策略示意圖

4.3.1 群體行為設計

使用虛擬區域劃分策略時，在機器人之間的合作溝通、協調上，預計會遇到兩種狀況，分別為：

- (1) 如果有兩台以上的機器人在同一區塊，將設計 inter-robot avoidance 行為來處理此種狀況。
- (2) 各機器人都處在不一樣的區塊，將設計 robot wander 行為來處理此種狀況。

● inter-robot avoidance 行為

在搜尋環境上共劃分許多區塊，而各機器人分別會處在不同的區塊上，但是避免不了兩台以上的機器人同時存在同一區塊，為了解決此問題的發生，設計一個避開的動作來讓機器人離開相同的區塊，如圖 4-8所示，當兩台機器人同時知道有另外一台機器人處在同一區塊時，將會進行轉向避開的動作，透過此行為將可以使雙方都離開此區塊。

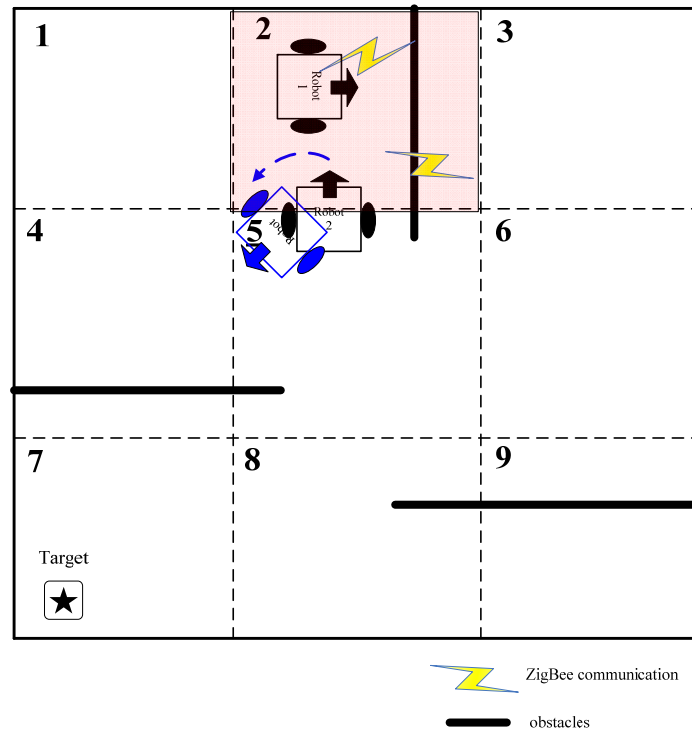


圖 4-8 inter-robot avoidance 行為示意圖

- robot wander 行為

對於原本就各分散在環境中的狀況，當然會希望一直保持著這種分散的程度，透過無線通訊知道其他機器人處在哪些區塊後，機器人下一步將會避免朝向有機器人在的區塊，概念為把有機器人在的區塊也當成障礙物，如果快接近其他機器人的所在區塊時，將進行避開轉向的動作，如圖 4-9 所示，透過此行為期待可以達到維持各機器人都分散在不同區塊的狀態。而如何避開有機器人在的區塊，概念就像先前所提到的個人區域策略，透過定位知道機器人本身的位置後，虛擬產生一個區域範圍，利用判斷此虛擬的範圍是否重疊到區塊，如果有的話就做避開的動作。

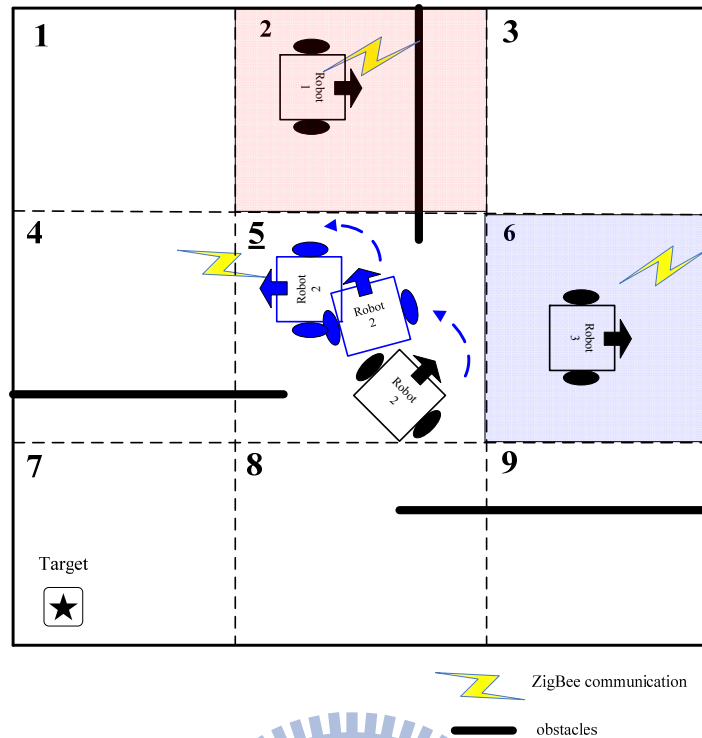


圖 4-9 robot wander 行為示意圖

4.3.2 個別行為設計

個別行為在本論文中定義為自主機器人本身所具備的基本功能，所以個別行為同樣適用在沒有合作機制下的自主搜尋，在行為的設計上以機器人所要執行的任務為參考，以本論文的搜救機器人應用議題來說，機器人必須具備：

- (1) 有找尋目標物的能力，設計 find target 行為。
- (2) 環境中避障的能力，設計 obstacle avoidance 行為。
- (3) 環境中隨機探索的能力，設計 wander 行為。

● find target 行為

找尋目標物為搜尋任務的最終目的，所以首先對於目標物做定義，在本論文中目標物為一個具有特定顏色的物體，如圖 4-10所示，透過配置在機器人上的攝影機來進行顏色的辨識，如果有發現目標物時，將會即時反應出此行為，目前此行為所做的動作為機器人將會停止搜尋任務。



圖 4-10 目標物

● obstacle avoidance 行為

搜尋的場地為有擺設障礙物的密閉空間，所以機器人本身必須要具備可以閃開障礙物的行為，如同前面章節2.4所介紹的，不同感測器有其相對應的避障演算法，第二代機器人配置雷射掃瞄器，可做 180 度的環境掃描，如圖 4-11所示，而第三代機器人左、右邊各配置一個超音波，如圖 4-12所示。透過避障演算法，將可以使機器人免於接觸到障礙物。

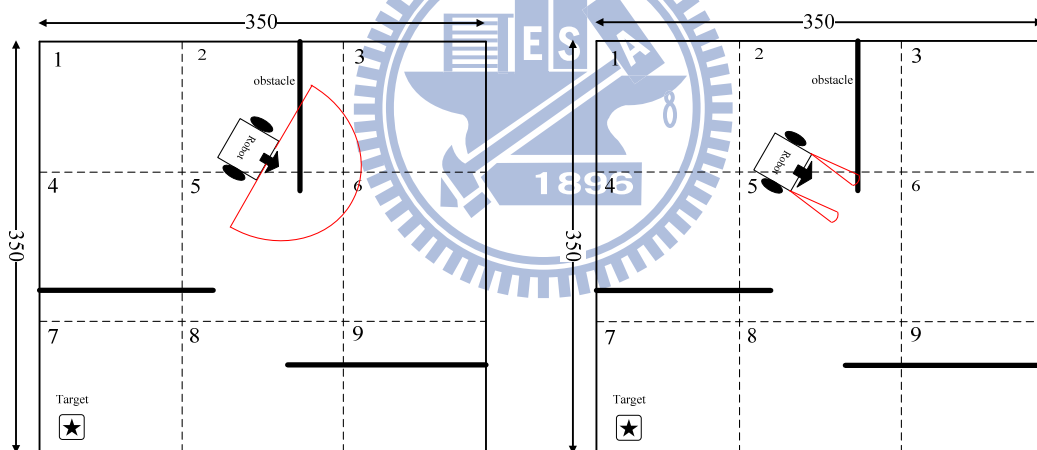


圖 4-11 雷射避障示意圖

圖 4-12 超音波避障示意圖

● wander 行為

隨機探索功能讓機器人於環境空間中能四處自由移動並探索是否有目標物的存在。其做法在於讓機器人在一段固定的時間週期內隨機選取一預設範圍內之角速度 ω (rad/s)，再輸出到馬達中，如此機器人便會在環境中四處移動，以達到環境探索之目的。

4.3.3 整合群體行為與個別行為之合作搜尋架構

如圖 4-13所示，為虛擬區域劃分策略所相對應的基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，首先透過機器人間通訊可以得知目前為執行搜救任務(exploring)，同時可能產生兩個群體行為(inter-robot avoidance、robot wander)，而機器人本身則透過環境感測可能產生三個個別行為(find target、obstacle avoidance、wander)，最後同時出現的行為透過優先權(priority)的比較來產生最後的行為輸出(v、w)，而圖中priority1代表最高優先權，priority5代表最低優先權。

● 行為輸出說明

這邊將透過例子來介紹經由優先權的選擇來輸出行為，如圖 4-14所示，Robot3在環境中探索，此時透過ZigBee無線通訊交換訊息後，產生對Robot1做robot wander的行為，以及對Robot2做inter-robot avoidance的行為，同時Robot3自己本身則透過超音波感測得之前方有障礙物因而產生obstacle avoidance的行為，對於Robot3本身，目前有三個不同的行為產生，比對各行為的優先權高低，最後由優先權最高的obstacle avoidance行為輸出，當成是機器人目前所要執行的動作，如圖 4-15所示，高層行為具有比較高的優先權。

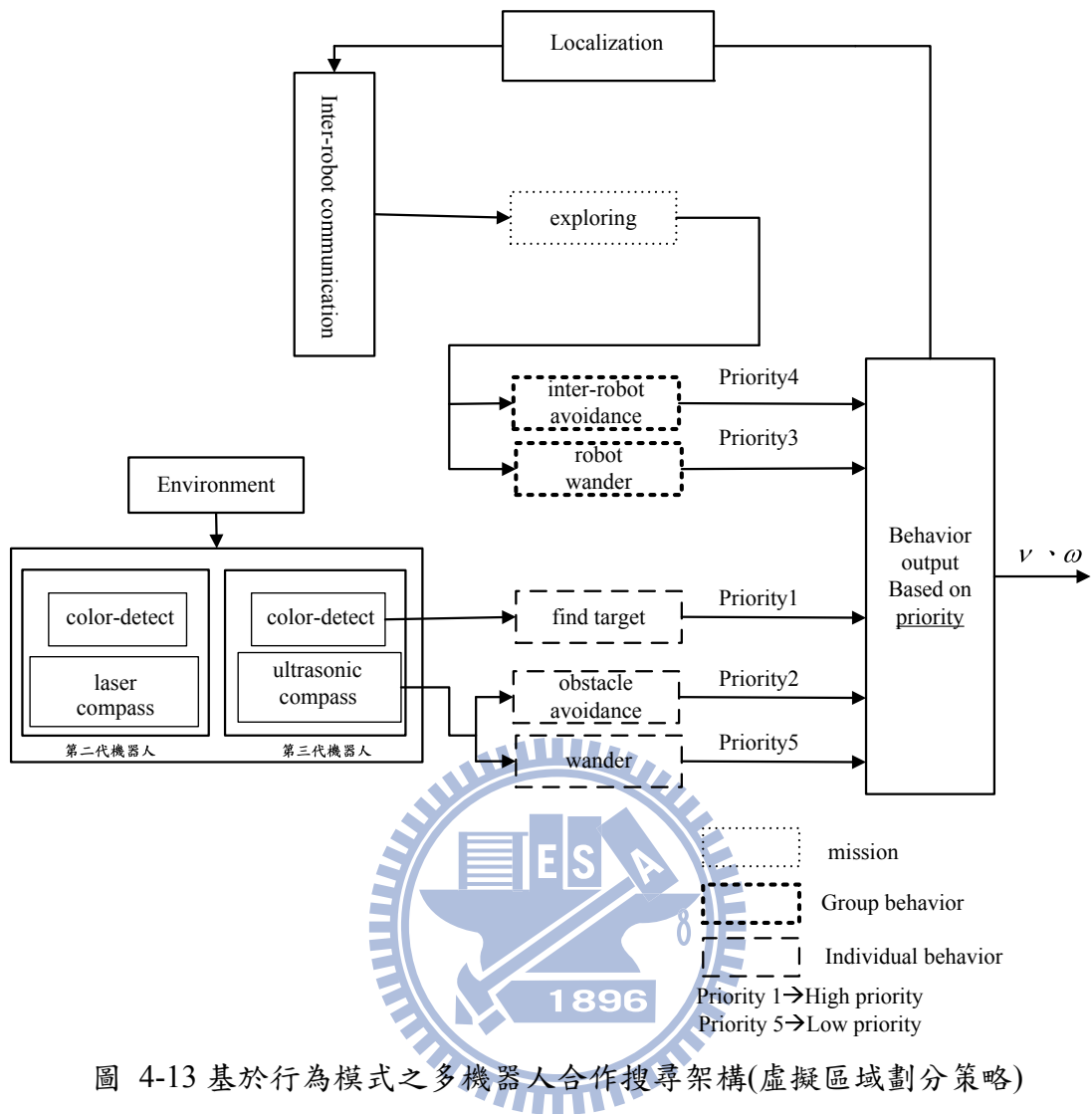


圖 4-13 基於行為模式之多機器人合作搜尋架構(虛擬區域劃分策略)

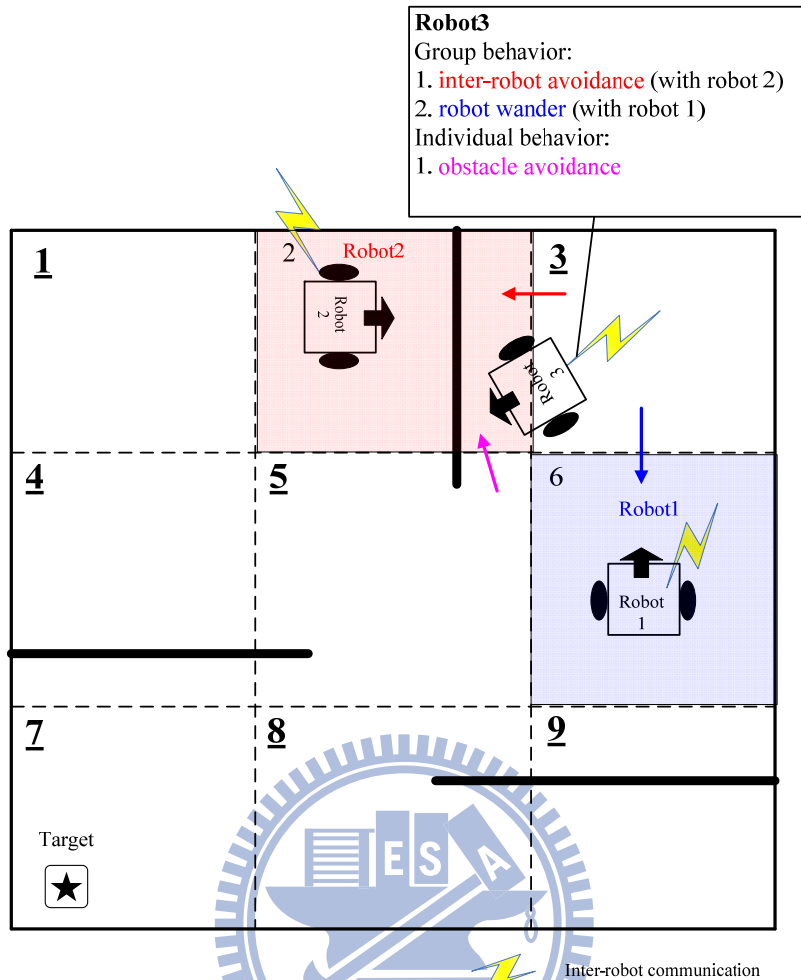


圖 4-14 行為選擇範例(虛擬區域劃分策略)

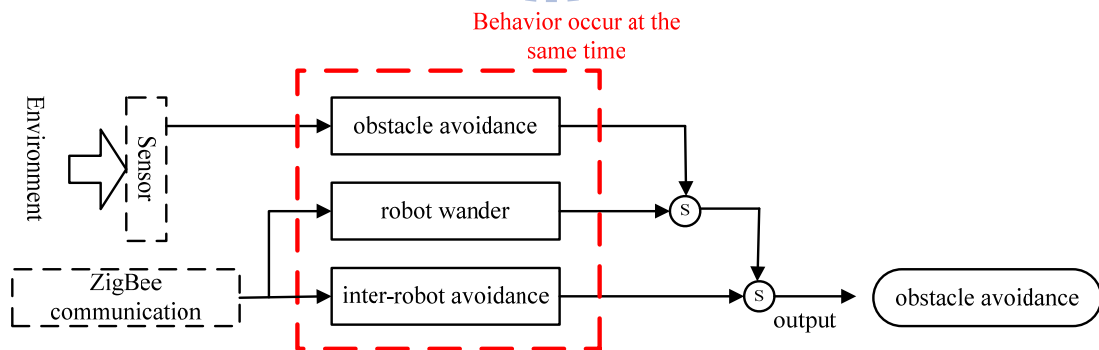


圖 4-15 行為選擇範例說明(虛擬區域劃分策略)

4.4 未知環境合作搜尋策略

先前章節的介紹，虛擬區域劃分策略主要適用於預先知道場地大小，然後才能對場地做虛擬的劃分，但是如果預先並不能知道場地的大小，虛擬區域劃分策

略將無法使用，所以本小節另外提出一個合作策略來提供未知環境的使用。

概念等同於先前所提的對場地做虛擬的區域劃分，把原本固定不動的劃分區域變成可變動的區域，而可變動的區域將由各機器人所走過的座標換算而成，短暫的紀錄幾個走過的座標，就可以轉換成一個小區域，然後各機器人比對彼此的所在區域是否重疊，來達到分散開搜尋的動作，本論文把此策略稱為動態區域劃分策略，如圖 4-16所示，圓圈代表各機器人走過的座標所換算而成的區域範圍。

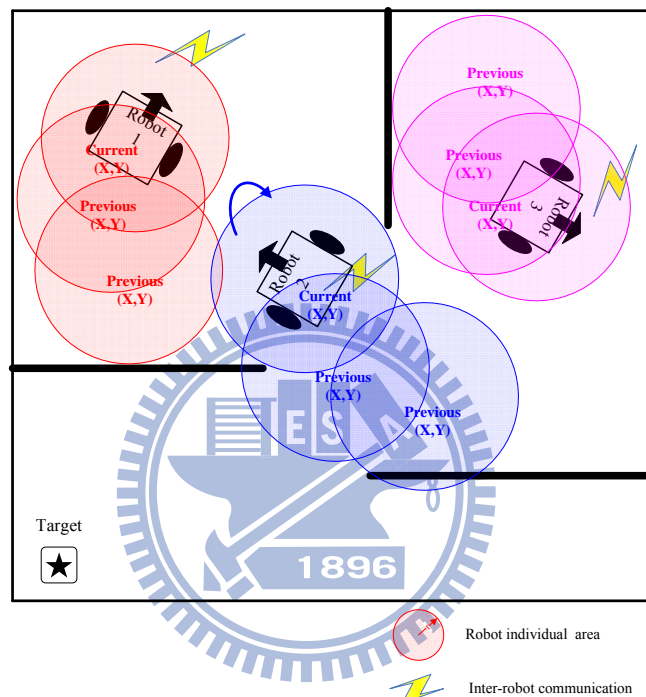


圖 4-16 動態區域劃分策略

● 策略說明

自主能力:

- (1) 具備自主的隨機環境探索行為。
- (2) 各機器人透過超音波感測器或雷射掃瞄器來達到避開環境中的障礙物。
- (3) 透過攝影機來判別是否有發現目標物，若有發現則停止搜尋動作，機器人自主能力同樣歸類為個別行為。

合作能力:

- (1) 各機器人透過ZigBee無線通訊進行資訊交換，訊息內容為各機器人的座標(由

馬達Encoder取得)和狀態(是否發現目標物)，然後短暫的儲存幾筆其他機器人的座標資訊，再把座標各換算成單獨區域，相對於幾筆暫存的座標就可以顯示成一個小區域(暫存座標的點數選擇將在下小節5.2.1做詳細的說明)。

- (2) 各機器人透過比對此小區域是否和其他機器人有相重疊到，若有重疊到就進行避開的動作。而座標換算成單獨區域的大小，則使用先前章節4.3所介紹的機器人個人區域 100cm，暫存座標經過一段時間後將會更新一次。在此把透過ZigBee無線通訊產生合作的行為歸類為群體行為。

4.4.1 群體行為設計

使用動態區域劃分策略時，在機器人之間的合作溝通、協調上，預計會遇到兩種狀況，分別為：

- (1) 如果有兩台以上機器人的短暫座標區域，互相重疊到，將設計 dynamic inter-robot avoidance 行為來處理此種狀況。
- (2) 各機器人的短暫座標區域都處於不同位置，將設計 dynamic robot wander 行為來處理此種狀況。

- dynamic robot wander 行為

如圖 4-17所示，圓圈代表機器人對其他機器人短暫紀錄的座標資訊所換算的單獨區域，而每台機器人按照所記錄的座標點數將會有相對應的小區域，Robot2 透過通訊得知Robot1 走過的座標，經由內部換算得到一小區域，Robot2 下一刻將避免往Robot1 目前的區域行進，會進行轉向的動作，透過此群體行為將可以使原本已分散在環境中的機器人持續維持分散的狀態。

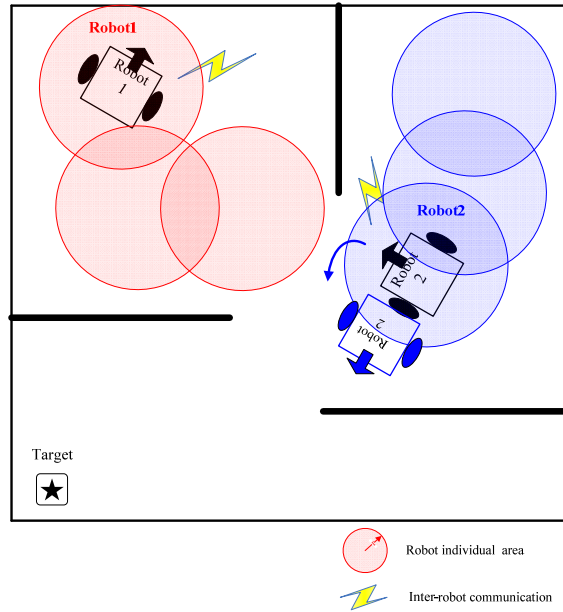


圖 4-17 dynamic robot wander 行為示意圖

- dynamic inter-robot avoidance 行為

如圖 4-18所示，圓圈代表機器人對其他機器人短暫紀錄的座標資訊所換算的單獨區域，而每個機器人按照所記錄的座標點數將會有相對應的小區域，Robot2 比對自己目前的座標和Robot1 走過的小區域，發現有重疊到，此時將進行轉向的動作，以避開Robot1 的區域，透過此群體行為將可以解決當雙方機器人再區域有所重疊時的狀況。

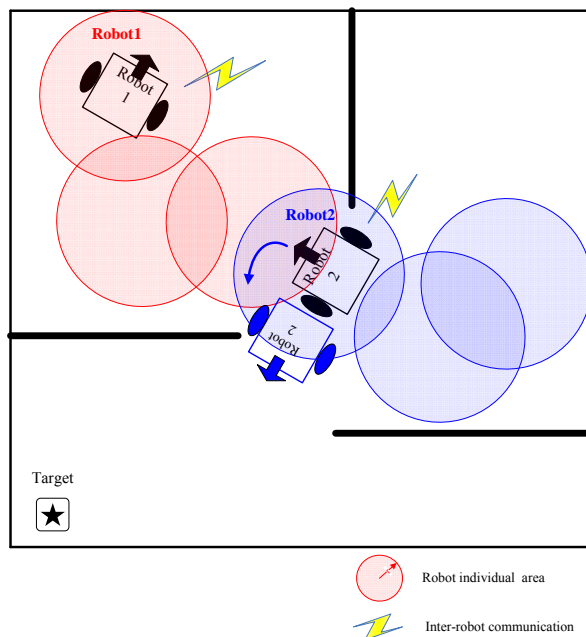


圖 4-18 dynamic inter-robot avoidance 行為示意圖

4.4.2 個別行為設計

個別行為的設計如同先前章節4.3.2虛擬區域劃分策略的介紹，機器人具備有找尋目標物的能力、環境避障的能力，以及在環境中探索的能力，而分別設計有find target、obstacle avoidance、wander等個別行為，在此將不再詳細介紹。

4.4.3 整合群體行為與個別行為之合作搜尋架構

如圖 4-19所示，為動態區域劃分策略所相對應的基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，首先透過機器人間通訊可以得知目前為執行搜救任務(exploring)，同時可能產生群體行為(dynamic robot wander、dynamic inter-robot avoidance)，而機器人本身則透過環境感測可能產生三個個別行為(find target、obstacle avoidance、wander)，最後同時出現的行為，透過優先權(priority)的比較來產生最後的行為輸出(v、w)，而圖中priority1代表最高優先權，priority5代表最低優先權。

● 行為輸出說明

透過範例來說明合作搜尋架構的行為選擇輸出，如圖 4-20所示，透過 ZigBee通訊交換訊息後，Robot2 座標跟Robot1 短暫記憶的區域重疊到，所以對 Robot1 產生dynamic inter-robot avoidance的群體行為，而Robot2 本身正前方感測到障礙物，產生obstacle avoidance的個別行為，目前有兩個不同的行為產生，比對各行為的優先權高低，最後由優先權最高的obstacle avoidance行為輸出，當成是機器人目前所要執行的動作，如圖 4-21所示。

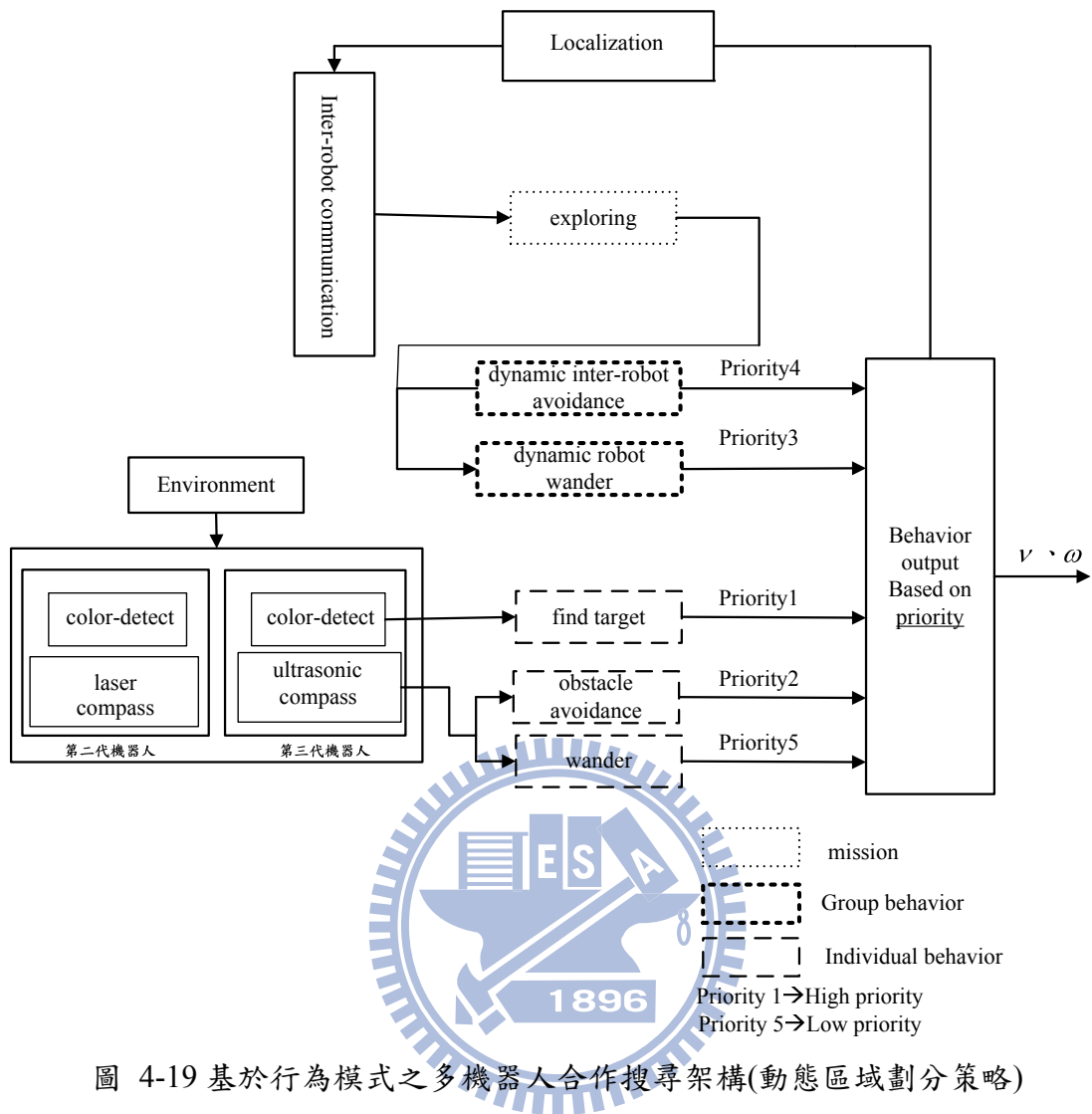


圖 4-19 基於行為模式之多機器人合作搜尋架構(動態區域劃分策略)

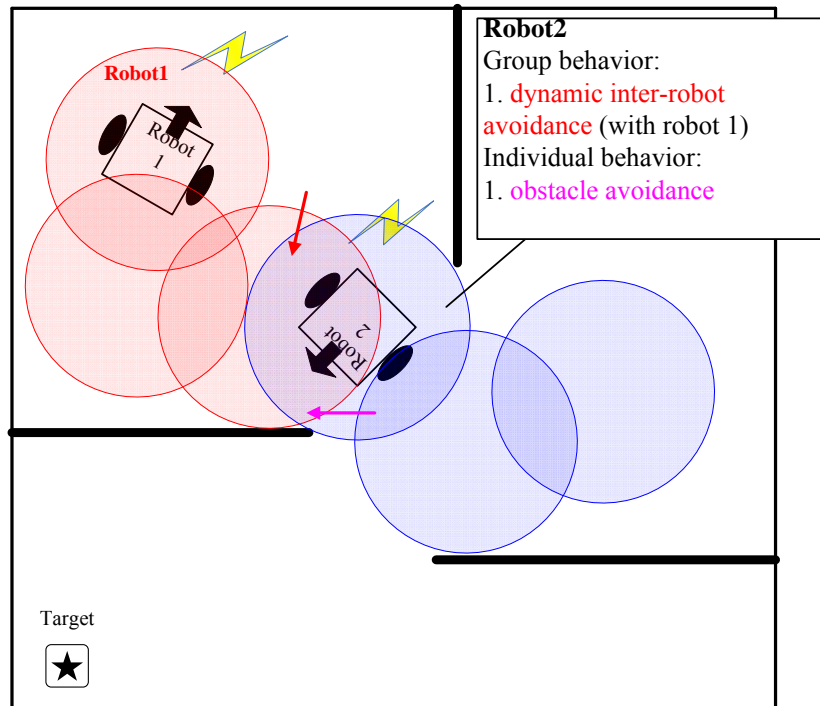


圖 4-20 行為選擇範例(動態區域劃分策略)

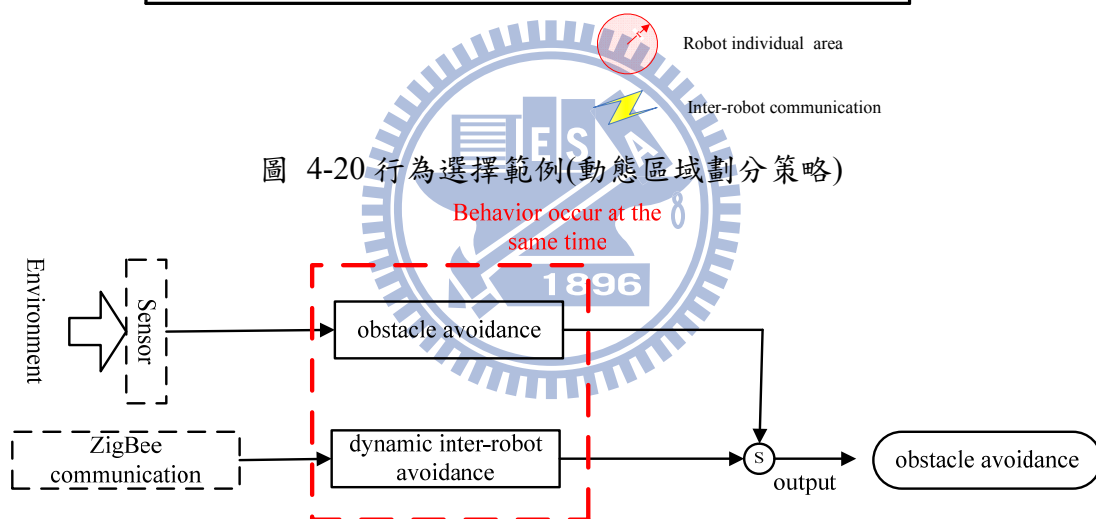


圖 4-21 行為選擇範例說明(動態區域劃分策略)

4.5 策略架構特色及優點

總結本章所提出之合作搜尋策略，分別依已知環境和未知環境做設計，而各合作策略都有其相對應的基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，兩者都具有以下之特色：

- (1) 透過ZigBee無線通訊的溝通，機器人間可以互相分享彼此的狀態以及感測資訊，藉此可以得知群體行為，因而達成合作協調的目的，最後透過策略的運

作，使機器人分散在環境中搜尋，提高搜尋的效率。

- (2) 對於不同的任務需求只需改變對應的群體行為就可，整體概念架構不需更改，此架構可適用在含不同任務種類之多機器人團隊上。
- (3) 策略架構設計之一般性可套用在數量龐大的多機器人系統上，隨著機器人數量的增加，整體系統之複雜度並不會隨之提升。



第五章 模擬與實驗結果

本小節將以軟體模擬，驗證章節4.3、章節4.4所提出之基於行為模式之多機器人合作搜尋架構的可行性。在下面的小節裡將分別以不同模擬環境場景來實現六台機器人(Robot 1 – Robot 6)之合作搜尋任務，首先比較先前章節4.3所提到的個人區域策略和虛擬區域劃分策略，使用相同的模擬環境和條件來分析比較，然後把虛擬區域劃分策略再透過三個不一樣的模擬場地來證明其可行性、強健性，動態區域劃分策略同樣透過三個不一樣的模擬場地來驗證。所使用之模擬環境為利用Borland C++ Builder 軟體所撰寫之多機器人合作搜尋模擬程式，由即時的圖形介面輸出可以觀察到各個機器人的動向及其狀態，對於使用者在調整參數及偵錯方面有相當大的幫助性，如圖 5-1所示。

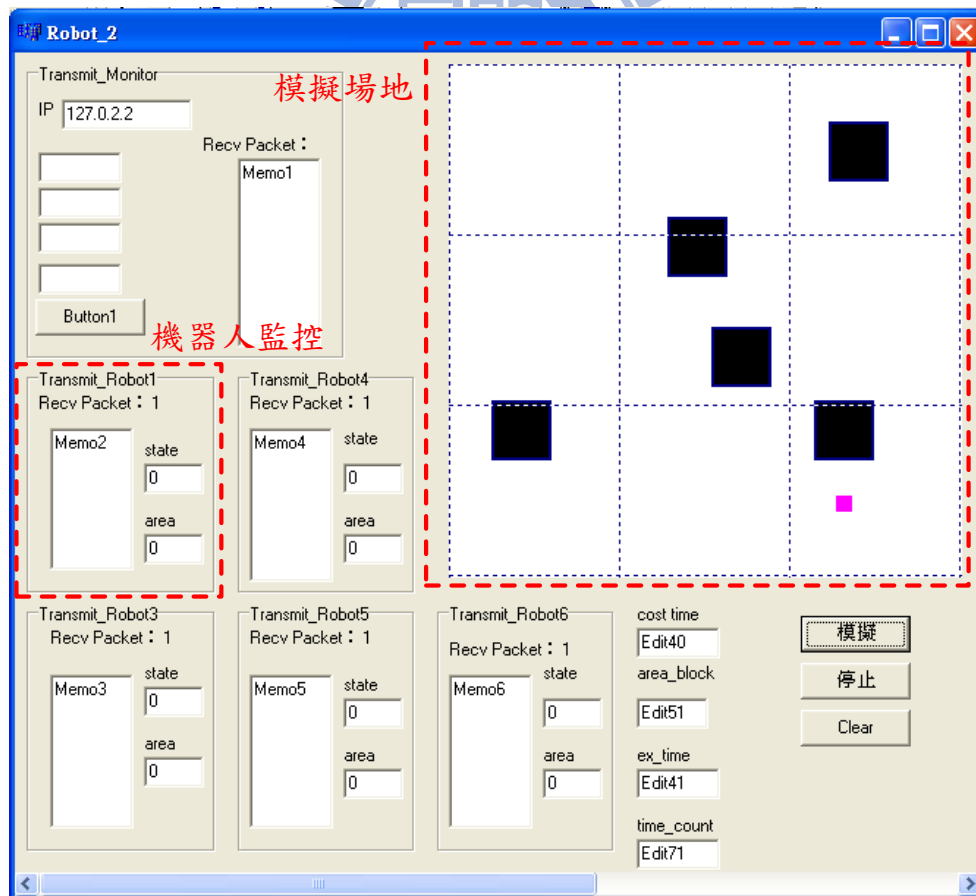


圖 5-1 BCB 模擬介面

5.1 已知環境策略

5.1.1 已知環境模擬 A

● 模擬環境說明

模擬場地大小為 350cm x 350cm 之封閉環境，如圖 5-2 所示，四周邊界可視為障礙物(旁邊灰色框為邊界，黑色實心方形為障礙物，紫色小方形為目標物)，而以虛擬劃分來講，共可以劃分為九格(虛線為虛擬劃分線)，如圖 5-3 所示。模擬不同機器人數目(1~6 台機器人)，不一樣的機器人數目分別各模擬 20 次，然後取平均，當為搜尋所花的時間，而模擬機器人的速度為 3cm/sec。

模擬先前章節 4.3 所提到的個人區域策略(algorithm1)和虛擬區域劃分策略(algorithm2)，最後兩者再和沒有使用策略的來做比較。

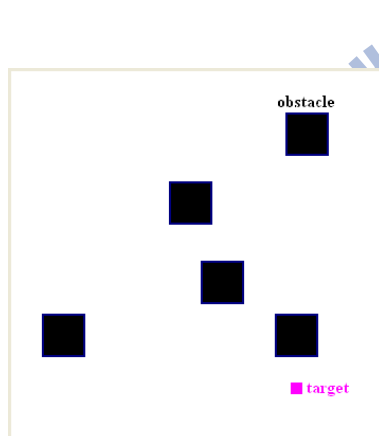


圖 5-2 模擬場地 1

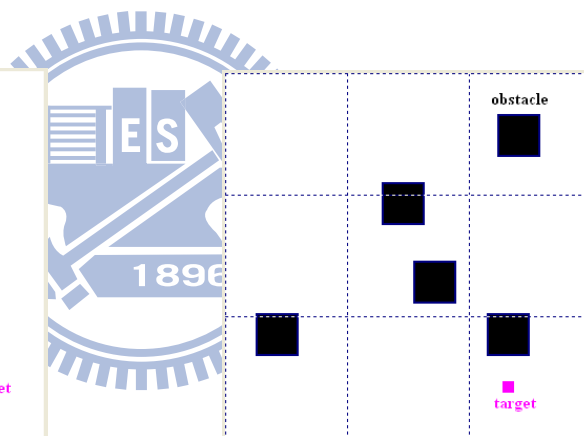


圖 5-3 模擬場地 A-1

● 模擬結果分析

圖 5-4 為模擬的結果曲線圖，表 5-1 為時間紀錄，圖中 algorithm1 代表使用個人區域策略，algorithm2 代表使用虛擬區域劃分策略，在此模擬結果中，可以觀察到以下兩點：

- (1) 當機器人數目增多時，搜尋時間也會慢慢的降低，同時如果到達某一數量的機器人個數後，搜尋時間將會趨於平緩，透過此跡象可以決定所要使用的機器人數目多寡。
- (2) 模擬結果可以發現虛擬區域劃分策略(algorithm2)和個人區域策略(algorithm1)

在搜尋時間上，與沒有合作策略(uncooperative)時比較，algorithm2 會有比較大的改善，原因為虛擬區域劃分策略會比個人區域策略在環境中分散程度更有效果，也就是各機器人比較能在不同區塊中搜尋，因此已知環境中的搜尋策略將採用於虛擬區域劃分策略。

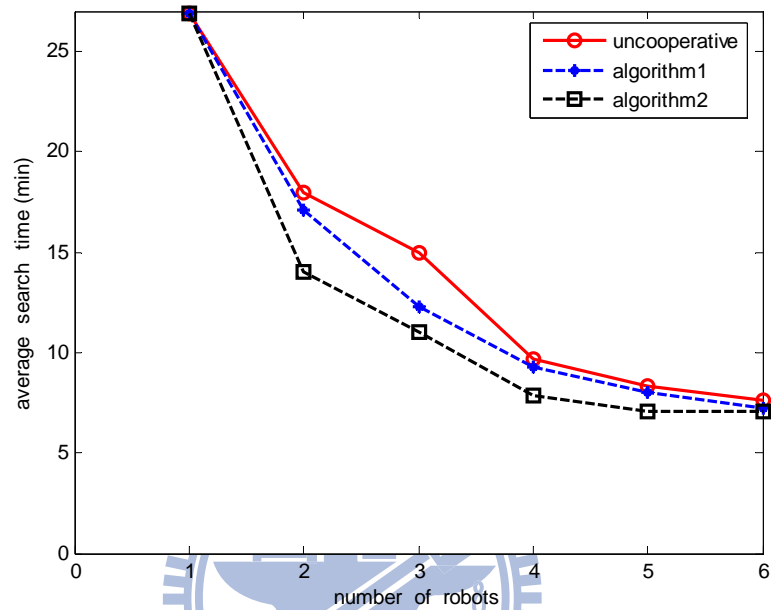


圖 5-4 個人區域策略和虛擬區域劃分策略模擬比較

表 5-1 策略比較之模擬時間紀錄

平均時間 (單位:min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	26.9	18.0	15.0	9.7	8.4	7.6
algorithm1 (個人區域策略)	---	17.1	12.3	9.3	8.0	7.3
algorithm2 (虛擬區域劃分 策略)	---	14.0	11.0	7.9	7.1	7.1

5.1.2 已知環境模擬 B

● 模擬環境說明

經由上面已知環境模擬A可以得知在已知環境中將採用虛擬區域劃分策略，為了證明此策略的強健性以及可行性，所以分別把此策略應用在三個不一樣的場地，同樣讓多機器人執行合作搜尋的任務，場地大小同樣為 350cm X 350cm，如圖 5-3所示，為環境中擺設五個障礙物(黑色實心方形為障礙物，紫色小方形為目標物)，圖 5-5為模擬房間式的環境(黑色實心長條形為障礙物，紫色小方形為目標物)，圖 5-6為環境中擺設不一樣的障礙物(黑色實心圓形和方形為障礙物，紫色小方形為目標物)，模擬機器人速度 3cm/sec，模擬不同機器人數目(1~6 台機器人)，不一樣的機器人數目分別各模擬 20 次，然後取平均值當成搜尋時間，都使用虛擬區域劃分策略，最後再和沒有使用合作策略的來做比較。

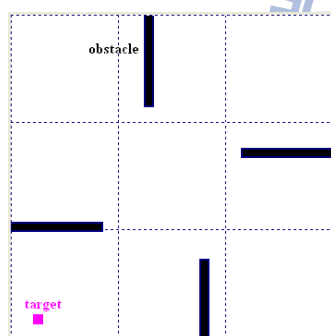


圖 5-5 模擬場地 A-2

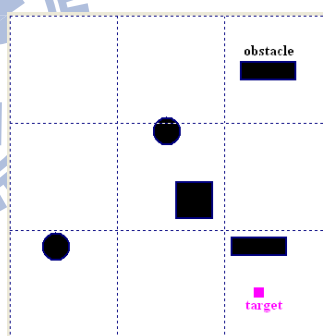


圖 5-6 模擬場地 A-3

● 模擬結果分析

圖 5-7為模擬場地A-1 的模擬結果曲線圖，表 5-2為平均時間紀錄，紅色為沒有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，藍色為有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，由圖中可以得知當機器人數目慢慢增多時，有、無使用合作策略，標準差都會降低，但是有合作策略時，標準差上會明顯的降低，顯示在搜尋時間上比較集中，同時有合作策略在平均搜尋時間上也會有相對的改善，透過合作策略的使用，提升搜尋效率。

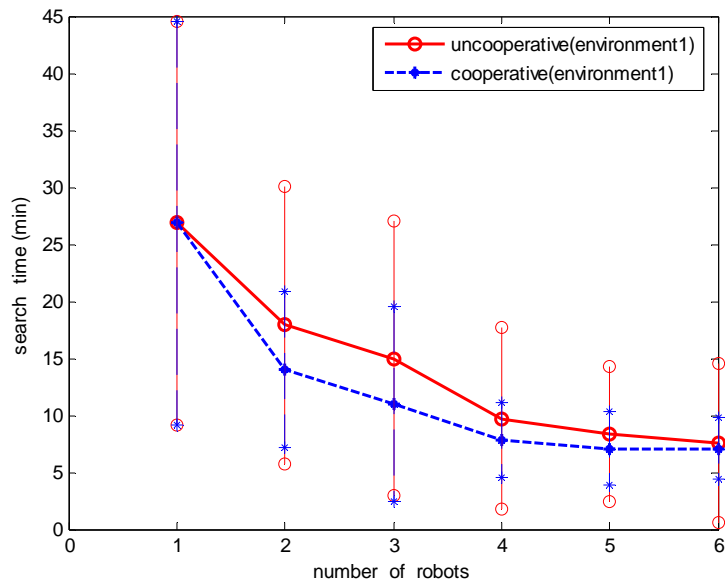


圖 5-7 模擬場地 A-1 之模擬結果

表 5-2 模擬場地 A-1 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	26.9	18.0	15.0	9.7	8.4	7.6
cooperative	---	14.0	11.0	7.9	7.1	7.1

圖 5-8 為模擬場地 A-2 的模擬結果曲線圖，表 5-3 為平均時間紀錄，紅色為沒有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，藍色為有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，由圖中可以得知當機器人數目增多時，有使用合作策略時，會降低標準差，而且在機器人數目 2~3 時，平均搜尋時間的改善比較明顯，透過合作策略的使用，一樣可以提升搜尋效率。

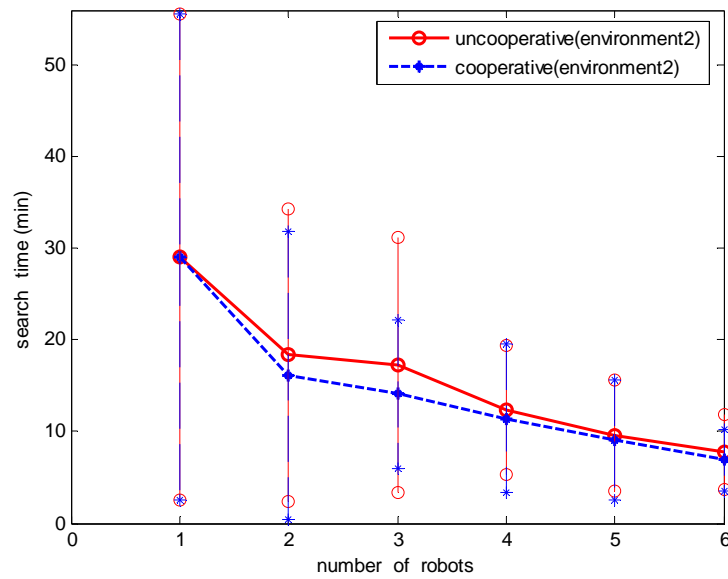


圖 5-8 模擬場地 A-2 之模擬結果

表 5-3 模擬場地 A-2 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	29.1	18.4	17.3	12.4	9.6	7.8
cooperative	---	16.1	14.1	11.5	9.1	6.9

圖 5-9 為模擬場地 A-3 的模擬結果曲線圖，表 5-4 為平均時間紀錄，紅色為沒有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，藍色為有使用合作策略時的平均搜尋時間以及標準差，由圖中可以觀察到，當機器人數目增加時，在搜尋平均時間以及標準差都有降低的趨勢，並且在機器人數目 2~4 時，相對於沒有使用合作策略的搜尋，改善的幅度最大。

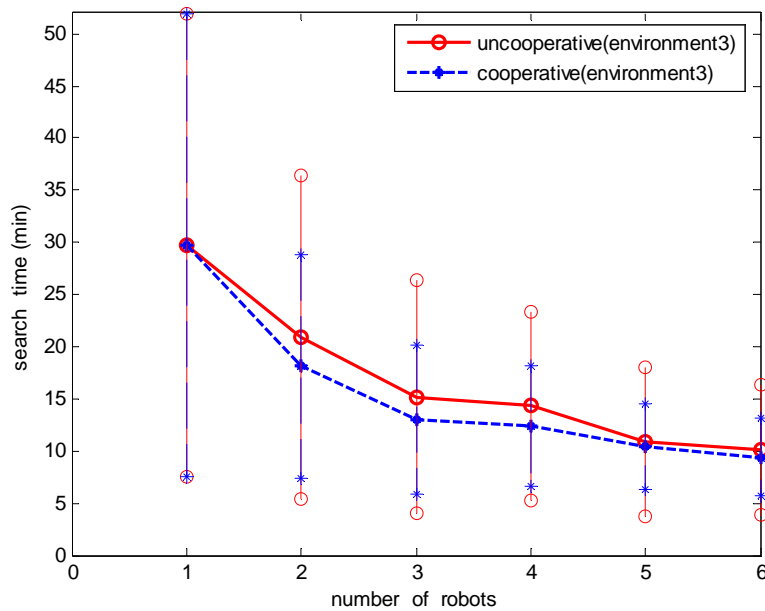


圖 5-9 模擬場地 A-3 之模擬結果

表 5-4 模擬場地 A-3 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2robots	3robots	4robots	5robots	6robots
uncooperative	29.7	20.9	15.2	14.3	10.9	10.1
cooperative	---	18.1	13.0	12.4	10.4	9.4

5.1.3 已知環境模擬 C

這邊將以三台機器人搜尋目標物的例子，說明機器人在執行任務時，透過先前章節4.3.3介紹的合作策略以及基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，觀察不同時間，各機器人所做的行為選擇輸出。

● 模擬環境說明

模擬場地與已知環境模擬 A 的模擬場地 A-1 相同，在一個 350cm X 350cm 有邊界的範圍內，黑色實心方形為障礙物，紫色實心小方形為目標物，紅色、海軍藍色、淺藍色各代表 Robot-1、Robot-2、Robot-3，左上方空心圓圈為各機器人的初始位置，虛線、實線為機器人路徑軌跡，當其中一台機器人找到目標物後，

全部機器人停止搜尋任務，最後顯示各機器人的平台方向(口字型)以及影像視線(藍色實線)。

● 模擬結果

在時間 $t=0$ 時，系統開始運作，此時三台機器人分別由不同之起始位置出發，由圖 5-10可看出各機器人在時間下的軌跡變化，圖 5-11、圖 5-12、圖 5-13可看出各機器人在時間下的行為變化。在時間 $t=30$ ，由於Robot-2 與Robot-1 在同一區域，所以執行inter-robot avoidance行為，時間 $t=60$ ，Robot-1 和Robot-2 彼此太靠近在不同區域，所以執行robot wander行為，在時間 $t=90、210$ ，Robot-2 執行robot wander行為，避免朝向Robot-3 的所在區域，時間 $t=120、270、330$ ，Robot-3 執行robot wander行為，避免朝向Robot-2 的所在區域，時間 $t=300$ ，Robot-2 和Robot-3 同樣處於相同區域，同時執行inter-robot avoidance行為，其他時間各機器人則執行obstacle avoidance和wander行為，最後再時間 $t=339$ ，Robot-2 發現目標物，執行find target行為，隨之停止搜尋任務。

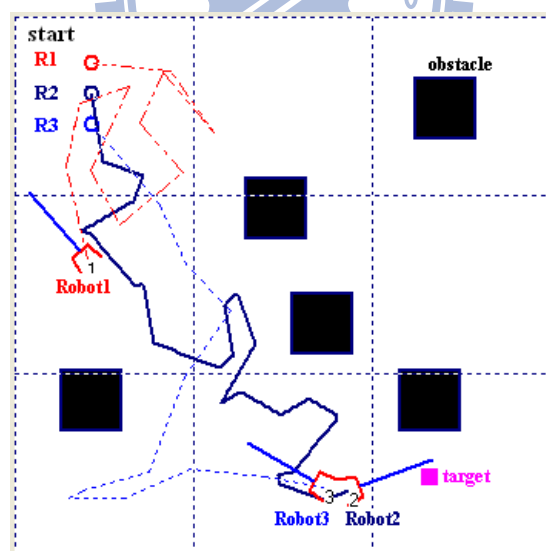


圖 5-10 3 robots 搜尋目標物軌跡圖(已知環境)

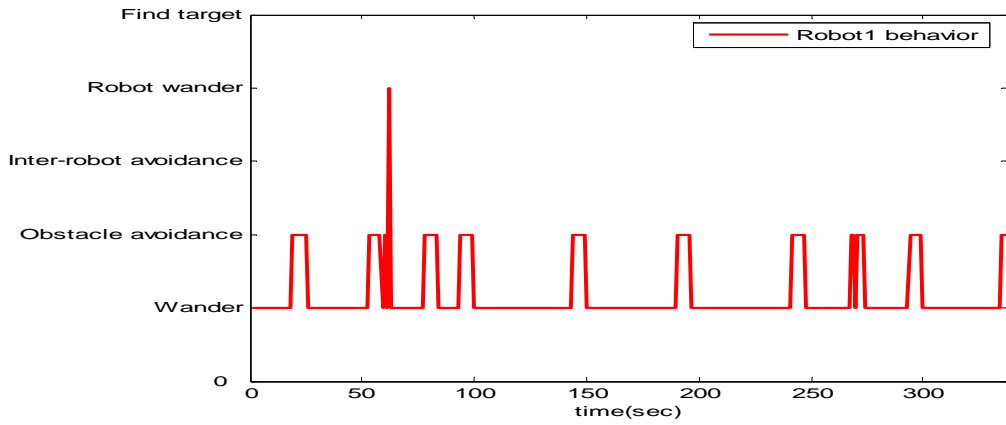


圖 5-11 Robot-1 行為狀態輸出(已知環境)

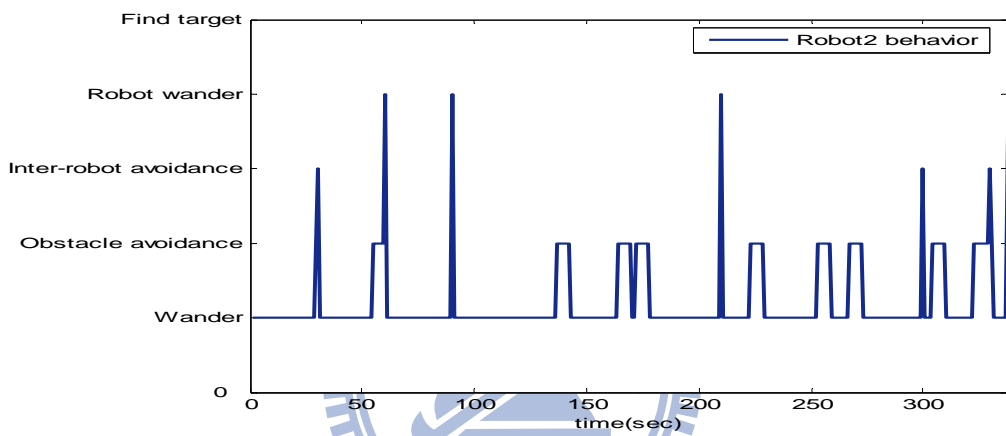


圖 5-12 Robot-2 行為狀態輸出(已知環境)

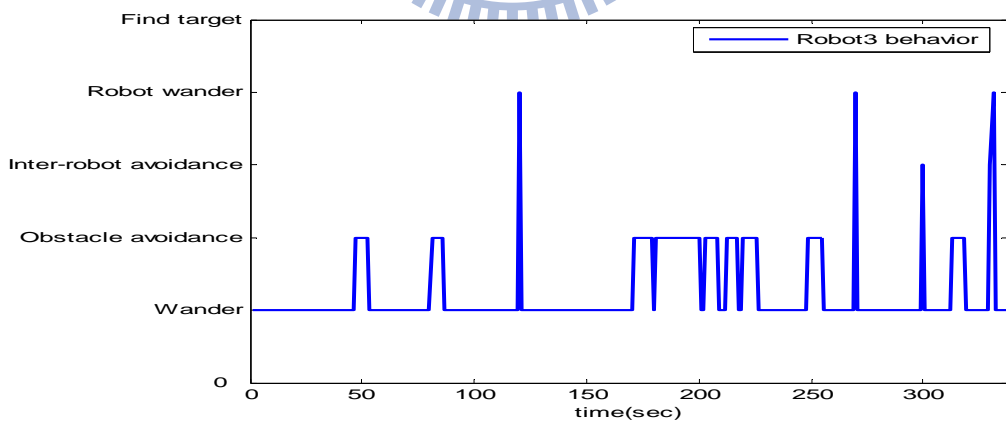


圖 5-13 Robot-3 行為狀態輸出(已知環境)

5.2 未知環境策略

5.2.1 未知環境模擬 A

由前面章節4.4的介紹，動態區域劃分策略在群體行為的產生，主要透過暫存其他機器人所走過的座標，然後換算成區域，最後再比對自己本身有無和其他機器人的區域相重疊，而暫存的座標一段時間後經透過ZigBee通訊再重新更新一次，此小節將針對所要暫存的座標點數目來做模擬分析，使用動態區域劃分策略，以相同模擬場地大小，分別模擬不一樣暫存的座標點數對搜尋時間上的影響。

● 模擬環境說明

模擬場地大小為 350cm x 350cm和 500cm x 500cm之封閉環境，如圖 5-14所示，四周邊界可視為障礙物(旁邊灰色框框為邊界，黑色實心方形為障礙物，紫色小方形為目標物)，機器人本身不知道場地資訊，包括場地大小，不同數目的機器人數目(2~3 台機器人)各模擬 20 次，然後取平均當為搜尋時間，分別針對暫存 1 點座標、3 點座標、5 點座標、7 點座標來做模擬，最後依照各搜尋時間來決定最後所要選擇的暫存座標點數。

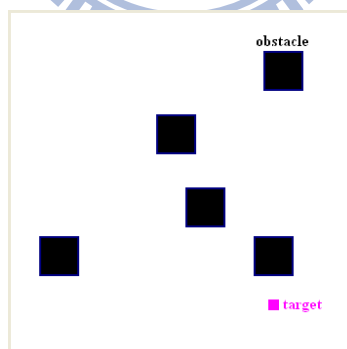


圖 5-14 模擬場地 B-1

● 模擬結果分析

首先對於場地大小 350cm X 350cm做模擬，圖 5-15為模擬結果，由圖中可以觀察到當使用暫存一點座標時，在搜尋時間上是最差的，而使用暫存三點座標時，相對於暫存一點時有很大的改善，而當暫存座標點數在五點以及七點時，最

後所呈現的改善幅度與暫存三點時是差不多的，透過模擬結果分析，當暫存座標點數在 3 的時候，為最合適策略之點數，表 5-5 為各暫存點數的平均搜尋時間。

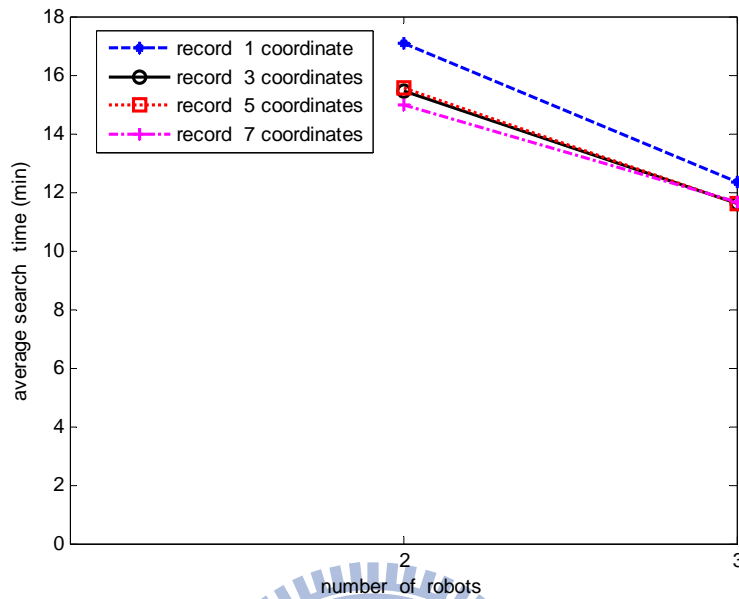


圖 5-15 暫存座標點數分析 (350cm X 350cm)

表 5-5 暫存座標點數之平均時間紀錄(350cm X 350cm)

Average(單位:min)	2 robots	3 robots
Record 1 coordinate	17.1	12.4
Record 3 coordinates	15.4	11.6
Record 5 coordinates	15.6	11.6
Record 7 coordinates	15.0	11.7

接下來以相同的場景擺設，場地大小擴大 (500cm X 500cm)，同樣分別就暫存座標點數 (1、3、5、7) 做模擬分析，圖 5-16 為模擬結果，表 5-6 為各暫存點數的平均搜尋時間，由圖中同樣可以觀察到，當暫存座標點數為一點時，在搜尋時間上效果最差，而當暫存座標點數在 3、5、7，雖然在不同機器人數目時的搜尋時間會有些微不同，但是整體來講並沒有相差太多，點數超過三點後，所呈現的改善搜尋效率有限。經由上面兩個的分析結果(如圖 5-15、圖 5-16)，可

以得知暫存座標點數在 3 點時可以得到和 5 點、7 點相同的效果，所以最後在座標點數的選擇上，決定採用 3 點暫存座標為最適合本合作策略(動態區域劃分策略)。

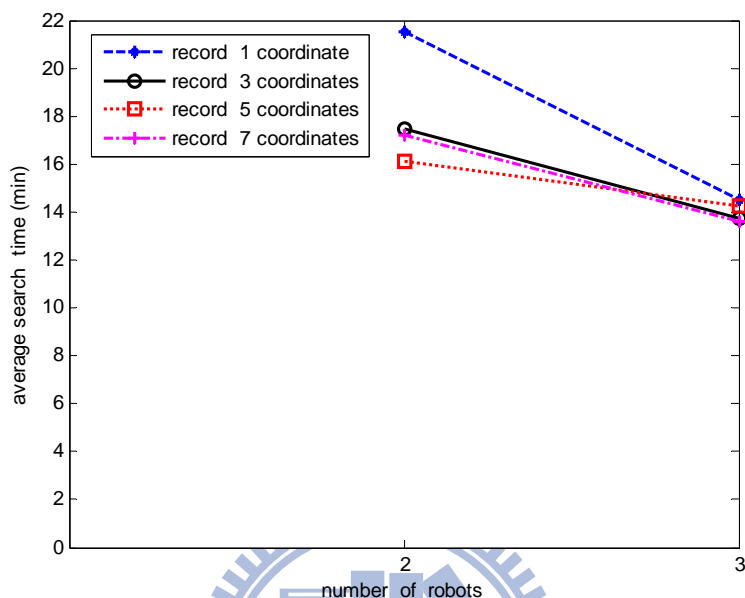


圖 5-16 暫存座標點數分析 (500cm X 500cm)

表 5-6 暫存座標點數之平均時間紀錄(500cm X 500cm)

Average(單位:min)	2 robots	3 robots
Record 1 coordinate	21.5	14.5
Record 3 coordinates	17.5	13.8
Record 5 coordinates	16.1	14.3
Record 7 coordinates	17.2	13.6

5.2.2 未知環境模擬 B

● 模擬環境說明

經由未知環境模擬A的分析結果，動態區域劃分策略將採用暫存 3 點座標的方式，各機器人彼此之間暫存其他機器人短暫走過的三點座標，而此座標一段時間後會透過無線通訊，重新全部更新一次，下面將透過不一樣的模擬場地來測試

策略的強健性以及可行性。模擬場地分為模擬場地B-1(如圖 5-14)、模擬場地B-2(如圖 5-17)、模擬場地B-3(如圖 5-18)，圖中黑色實心為障礙物，紫色實心方形為目標物，各場地大小為 350cm X 350cm，模擬不同機器人數目(1~6 台機器人)，不一樣的機器人數目分別各模擬 20 次，然後取平均值當成搜尋時間，都使用動態區域劃分策略，最後再和沒有使用合作策略的來做比較。

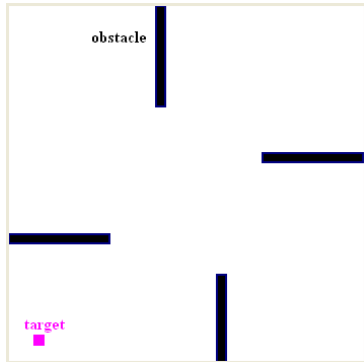


圖 5-17 模擬場地 B-2

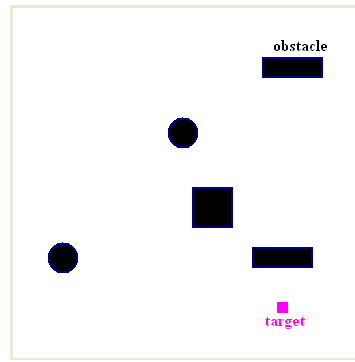


圖 5-18 模擬場地 B-3

● 模擬結果分析

圖 5-19為模擬場地B-1 的模擬結果曲線圖，表 5-7為平均搜尋時間紀錄，由圖中可以得知隨著機器人數目的增多，有、無使用合作策略，都會使平均搜尋時間和標準差降低，並且慢慢趨於平緩，但是有使用合作策略時，改善的幅度更大，特別的是在機器人數目 2~3，提升的搜尋效率最好。

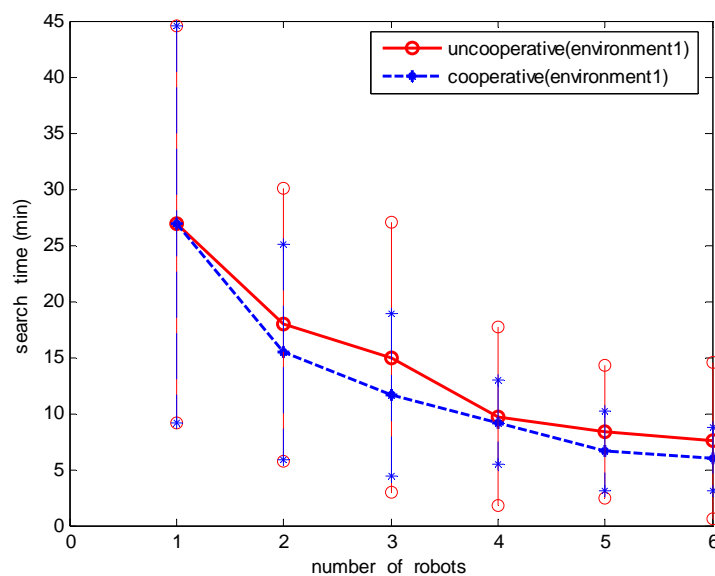


圖 5-19 模擬場地 B-1 之模擬結果

表 5-7 模擬場地 B-1 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	26.9	18.0	15.0	9.7	8.4	7.6
cooperative	---	15.4	11.6	9.2	6.6	5.9

圖 5-20為模擬場地B-2 的模擬結果曲線圖，表 5-8為平均搜尋時間紀錄，由圖中可觀察到，合作策略的使用，在平均搜尋時間和標準差會有改善的趨勢，而當機器人數目在 2~4，改善的幅度最大。

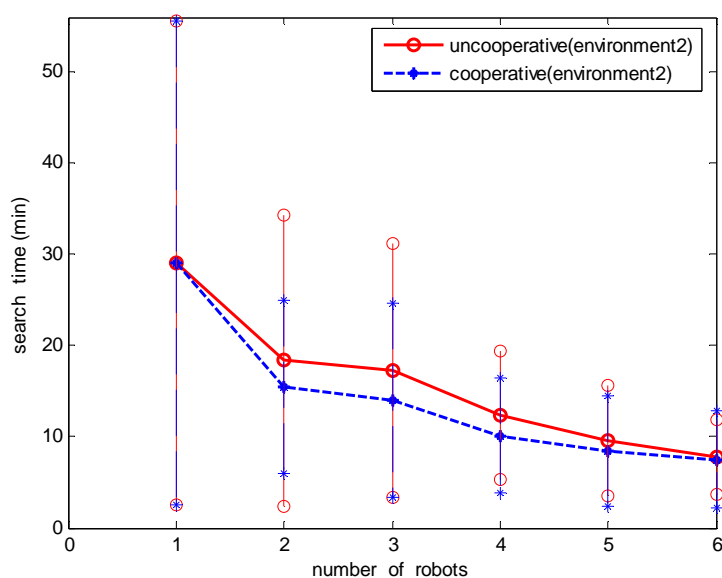


圖 5-20 模擬場地 B-2 之模擬結果

表 5-8 模擬場地 B-2 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	29.1	18.4	17.3	12.4	9.6	7.8
cooperative	---	15.5	14.0	10.2	8.5	7.5

圖 5-21為模擬場地B-3 的模擬結果曲線圖，表 5-9為平均搜尋時間紀錄，圖中顯示隨著機器人數目增多，平均搜尋時間和標準差都會有下降的趨勢，有合

作策略的使用，再機器人數目 2~3，相對於沒有使用合作策略，會有比較大的改善幅度。

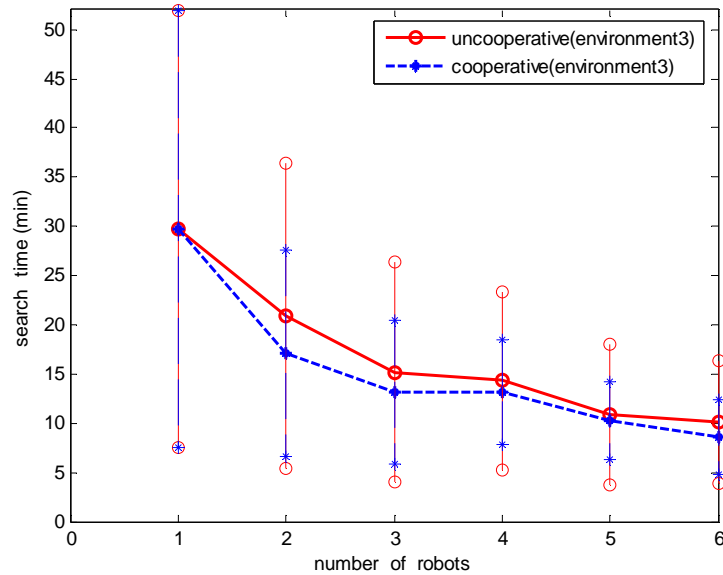


圖 5-21 模擬場地 B-3 之模擬結果

表 5-9 模擬場地 B-3 之平均時間紀錄

Average(min)	1 robot	2 robots	3 robots	4 robots	5 robots	6 robots
uncooperative	29.7	20.9	15.2	14.3	10.9	10.1
cooperative	---	17.1	13.2	13.2	10.3	8.6

5.2.3 未知環境模擬 C

這邊將以三台機器人搜尋目標物的例子，說明機器人在執行任務時，透過先前章節4.4介紹的合作策略以及基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，觀察不同時間時，各機器人所做的行為選擇輸出。

● 模擬環境說明

模擬場地與未知環境模擬 A 的模擬場地 B-1 相同，在一個 350cm X 350cm 有邊界的範圍內，黑色實心方形為障礙物，紫色實心小方形為目標物，紅色、海軍藍色、淺藍色各代表 Robot-1、Robot-2、Robot-3，左上方空心圓圈為各機器人

的初始位置，虛線、實線為機器人所走的路徑軌跡，當其中一台機器人找到目標物後，全部機器人停止搜尋任務，最後顯示各機器人的平台方向(門字型)以及影像視線(藍色實線)。

● 模擬結果

在時間 $t=0$ 時，系統開始運作，此時三台機器人分別由不同之起始位置出發，由圖 5-22可看出各機器人在時間下的軌跡變化，圖 5-23、圖 5-24、圖 5-25可看出各機器人在時間下的行為變化。在時間 $t=53、119、186$ ，Robot-2 太接近Robot-1 的區域，所以執行dynamic robot wander行為，時間 $t=70、236$ ，Robot-1 太靠近Robot-2 的區域，因此執行dynamic robot wander行為，時間 $t=154、317$ ，Robot-1 和Robot-2 彼此太靠近，所以有重疊到Robot-2 的區域，執行dynamic inter-robot avoidance行為，時間 $t=321$ ，Robot-3 太接近Robot-2 的區域，執行dynamic robot wander行為，同樣的，時間 $t=325$ ，Robot-2 執行dynamic robot wander行為，以避開Robot-3 區域，其他時間各機器人則執行obstacle avoidance和wander行為，最後再時間 $t=393$ ，Robot-2 找到目標物，執行find target行為，隨之停止搜尋任務。

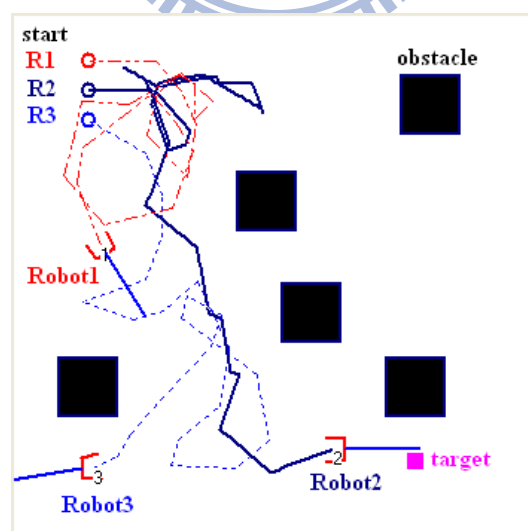


圖 5-22 3 robots 搜尋目標物軌跡圖(未知環境)

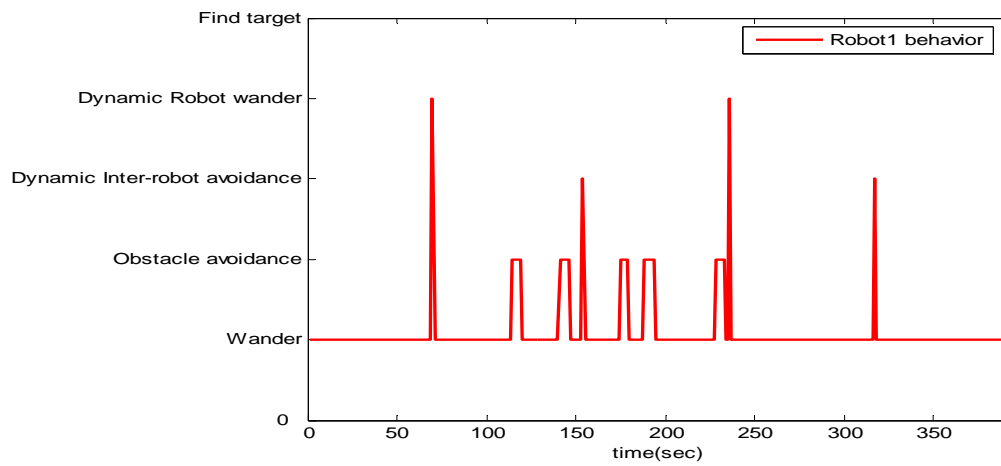


圖 5-23 Robot-1 行為狀態輸出(未知環境)

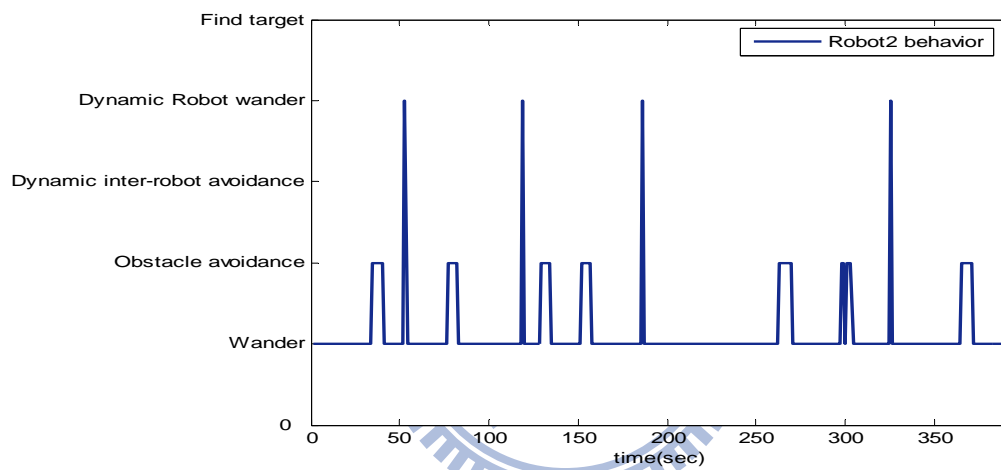


圖 5-24 Robot-2 行為狀態輸出(未知環境)

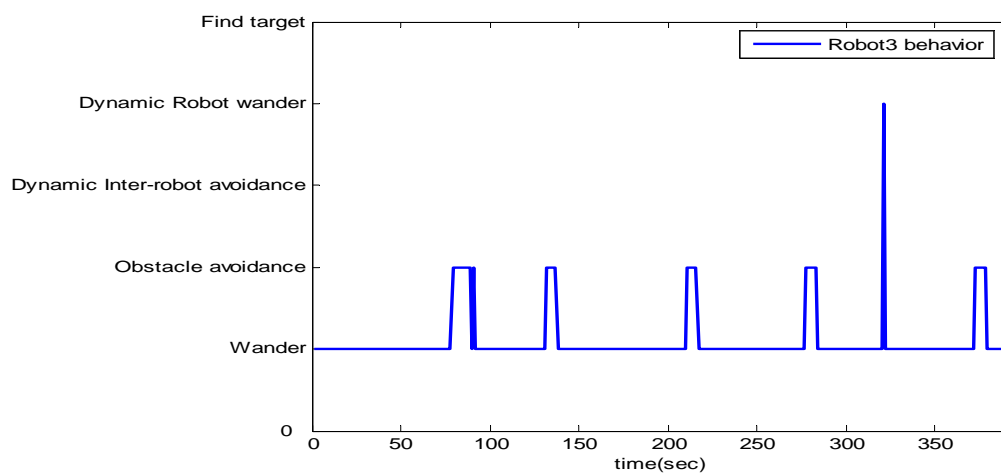


圖 5-25 Robot-3 行為狀態輸出(未知環境)

5.3 模擬結果討論

5.3.1 已知環境策略

經由上面章節5.1，對於已知環境策略的模擬結果，歸納成兩點重點，以下將詳細說明：

- 合作策略對搜尋時間的影響

分別透過三個不一樣的場地模擬，如圖 5-7、圖 5-8、圖 5-9所示，當機器人數目慢慢增多時(1~6)，在平均搜尋時間上會降低，同時是以一個趨於平緩的趨勢降低，而有使用合作策略(虛擬區域劃分策略)時會比沒有合作策略時降低更多，同時觀察搜尋時間的標準差，有使用合作策略時，標準差的下降還比沒有合作策略時明顯，這代表著搜尋效率的提升，經由模擬結果，可以證實所設計的虛擬區域劃分策略的可行性。

- 合作策略與機器人數目的關係

比較有、無合作策略時的模擬結果，可以觀察到當機器人數目在 2~3 時改善的幅度比較明顯，也就是對於平均搜尋時間的降低比較多，而機器人數目多(大於 4)的時候反而改善幅度比較小，原因為：

(1) 當機器人數目越多，就類似採取人海戰術，越多人工作，則工作越快完成，

最後相對起來，有使用合作策略反而改善的幅度並不明顯

(2) 機器人數目多，代表重複走過的路徑會增加，導致會花比較多時間在走同樣

走過的路徑，對於整體搜尋效率的提升比較有限。

經由模擬結果，當機器人數目在 2~3 時，對於本論文所設計之虛擬區域劃分策略，比較能發揮其改善的效果，因此當成實際實驗時，選擇機器人數目的重要指標。

5.3.2 未知環境策略

經由上面章節5.2，對於未知環境策略的模擬結果，同樣歸納成兩點重點，以下將詳細說明：

- 合作策略對搜尋時間的影響

分別透過三個不一樣的場地模擬，如圖 5-19、圖 5-20、圖 5-21所示，當機器人數目增多時(1~6)，在平均搜尋時間上會降低，同樣是以一個趨於平緩的趨勢降低，如同上面對已知環境的模擬結果分析一樣，使用合作策略時會比沒有合作策略時降低更多，搜尋時間的標準差也降低許多，這代表著搜尋效率的提升，經由模擬結果，可以證實所設計的動態區域劃分策略的可行性。

- 合作策略與機器人數目的關係

觀察模擬結果，比較有、無合作策略，在機器人數目 2~4 時，對於平均搜尋時間的改善比較明顯，而當機器人數目多的時候，會發生跟已知環境策略一樣的情形，對於搜尋時間改善幅度比較小，原因如同已知環境策略所分析的(1)人海戰術(2)重複路徑問題。

經由模擬結果，當機器人數目在 2~4 時，對於本論文所設計之動態區域劃分策略，比較能發揮其改善的效果，因此當成實際實驗時，選擇機器人數目的重要指標。

5.4 小結

針對本論文分別依照已知環境和未知環境所設計之合作搜尋策略，以及所相對應的基於行為模式之架構，在上述不同場地的模擬結果中，我們由各機器人之行為狀態變化的時間對應關係中，發現當機器人在執行搜尋任務時，的確會因為環境感測和策略的使用選擇所相對應的行為輸出，由這部份的結果可以顯示出透過機器人間的無線通訊能力，可促使機器人個體執行其最適當之行為，以增加團體任務完成的可能性，而同樣驗證了本論文所提出的合作搜尋策略，確實在任務

執行上擁有相當大的彈性，即便因為環境的不同也不會影響任務執行的困難。

5.5 實驗結果

本小節將以三台機器人來進行合作搜尋目標物之實驗，驗證超音波感測、雷射掃描器感測和 ZigBee 無線模組應用在多機器人無線通訊功能是否發揮其預定之功效，同時也將驗證所提出之基於行為模式之多機器人合作搜尋架構在實際任務執行之可行性。

5.5.1 實驗場地說明與描述

實驗場地為 400cm X 600cm 的密閉空間，如圖 5-26 所示，環境中隨機擺設 8 個障礙物，另外有一顏色目標物隱藏在障礙物後面。使用第二章所介紹之實體機器人來做實驗，為第二代機器人以及第三代機器人，分別實驗在無合作策略條件和有合作策略條件下，1~3 台機器人執行搜尋目標物任務，不一樣的機器人數目各做六次實驗，最後將透過實驗結果(搜尋時間分布以及平均搜尋時間)來比較有、無合作策略時的差異。

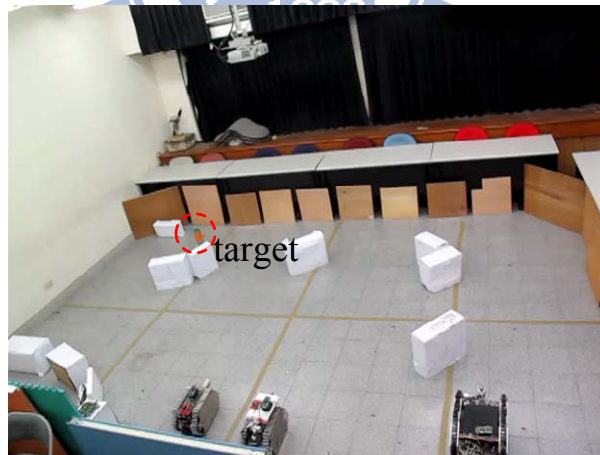


圖 5-26 實驗場地

5.5.2 無合作策略實驗結果

因為沒有使用合作策略，所以各機器人只透過對環境的感測達到自主搜尋的功能，如圖 5-27 所示，為數目一到三台機器人的搜尋時間紀錄，以及平均搜尋時間曲線，由圖可以發現當機器人數目增多時，在時間的變異量上會有減少的趨

勢，同時平均搜尋時間也會降低，表 5-10為六次實驗中的時間紀錄。

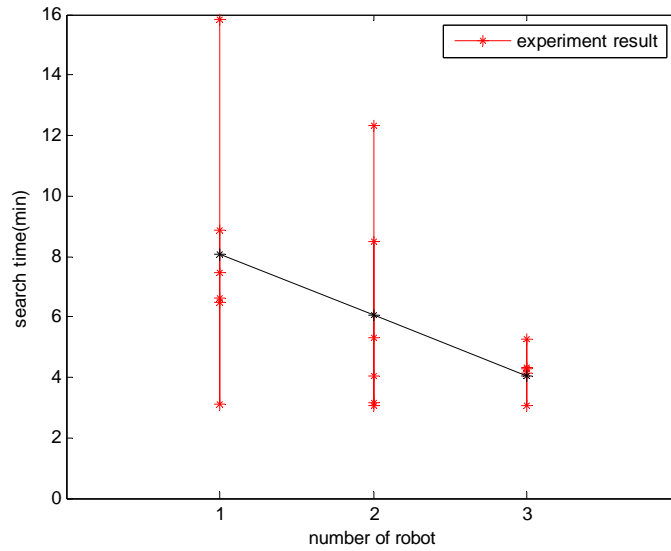


圖 5-27 無合作策略實驗結果

表 5-10 無合作策略實驗紀錄

單位:min	Rec_1	Rec_2	Rec_3	Rec_4	Rec_5	Rec_6	Average
1 robot	8.9	7.5	6.5	6.6	3.1	15.8	8.1
2 robots	8.5	5.3	3.1	3.2	4.1	12.3	6.1
3 robots	4.1	5.3	4.3	3.1	3.1	4.4	4.0

5.5.3 已知環境策略實驗結果

本小節實驗多機器人在有使用虛擬區域劃分策略下，執行合作搜尋的任務，實驗結果如圖 5-28所示，分別為 1~3 台機器人搜尋時間紀錄，以及平均時間曲線，表 5-11為六次實驗中的時間紀錄。

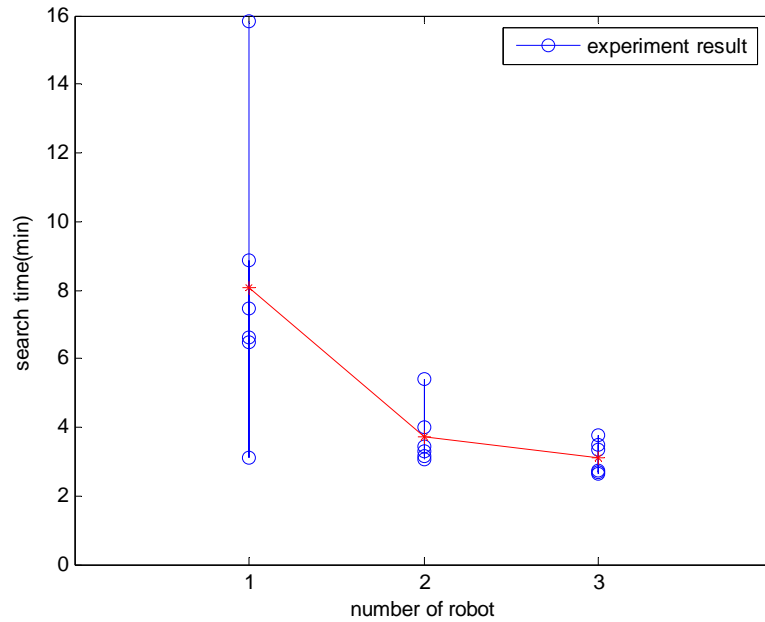


圖 5-28 有合作策略實驗結果(已知環境)

表 5-11 有合作策略實驗紀錄(已知環境)

單位:min	Rec_1	Rec_2	Rec_3	Rec_4	Rec_5	Rec_6	Average
1 robot	8.9	7.5	6.5	6.6	3.1	15.8	8.1
2 robots	3.1	4.0	5.4	3.3	3.2	3.4	3.7
3 robots	2.7	2.6	3.8	3.3	2.7	3.5	3.1

比較無合作策略和有合作策略的搜尋實驗結果，分別把實驗時間紀錄放在一起，如圖 5-29，另外把平均搜尋時間放在一起，如圖 5-30所示，而表 5-12為平均搜尋時間紀錄，由實驗結果可歸納成以下幾點：

- (1) 當使用的機器人數目增多時，在搜尋時間上，同樣地都會有下降的趨勢，原理如同人海戰術，人越多，代表著可以更快完成工作，但是有使用合作策略時，改善平均搜尋時間的幅度會比沒有合作策略時明顯。
- (2) 觀察圖 5-29，有使用合作策略時，在時間的變異量上也比沒有合作策略時明顯降低，由於時間變異量降低，顯示機器人在搜尋時，明顯提升工作效率。經由實驗結果，在已知環境下，透過本論文所設計之虛擬區域劃分策略，最

大可提升整體搜尋效率 38%。

- (3) 由實驗結果分析，可以證實經由設計之虛擬區域劃分策略，使多機器人可以自主執行合作搜尋任務，並且提升搜尋效率，同時驗證先前章節5.1的模擬結果。

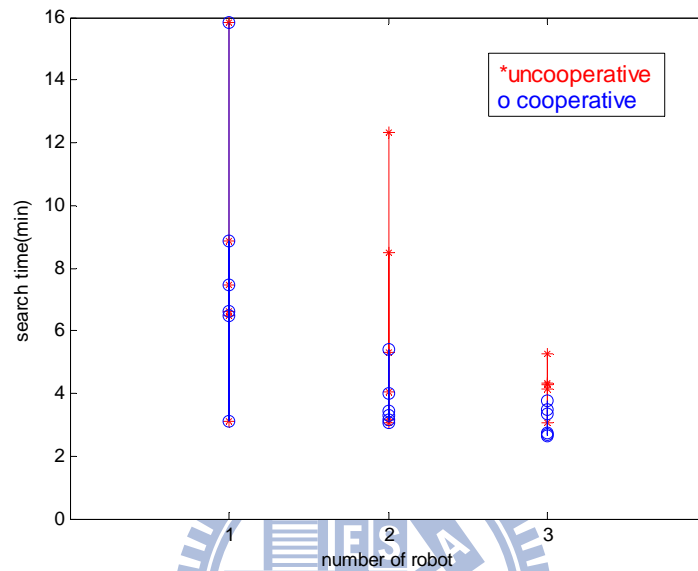


圖 5-29 比較時間變異量(已知環境)

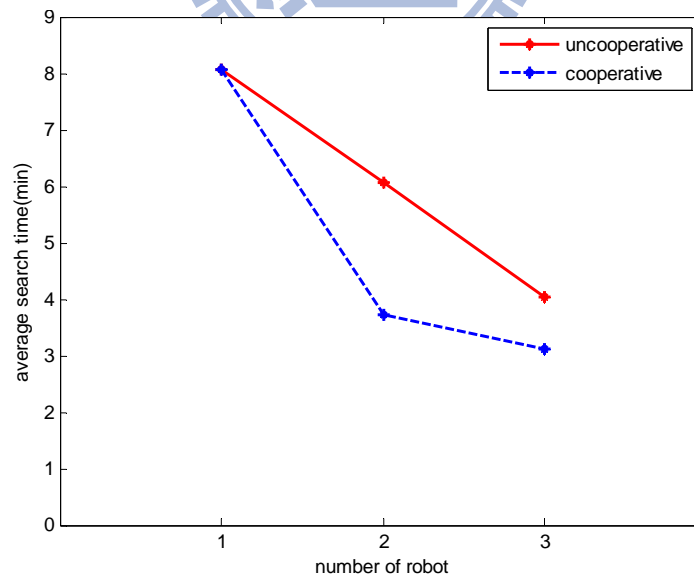
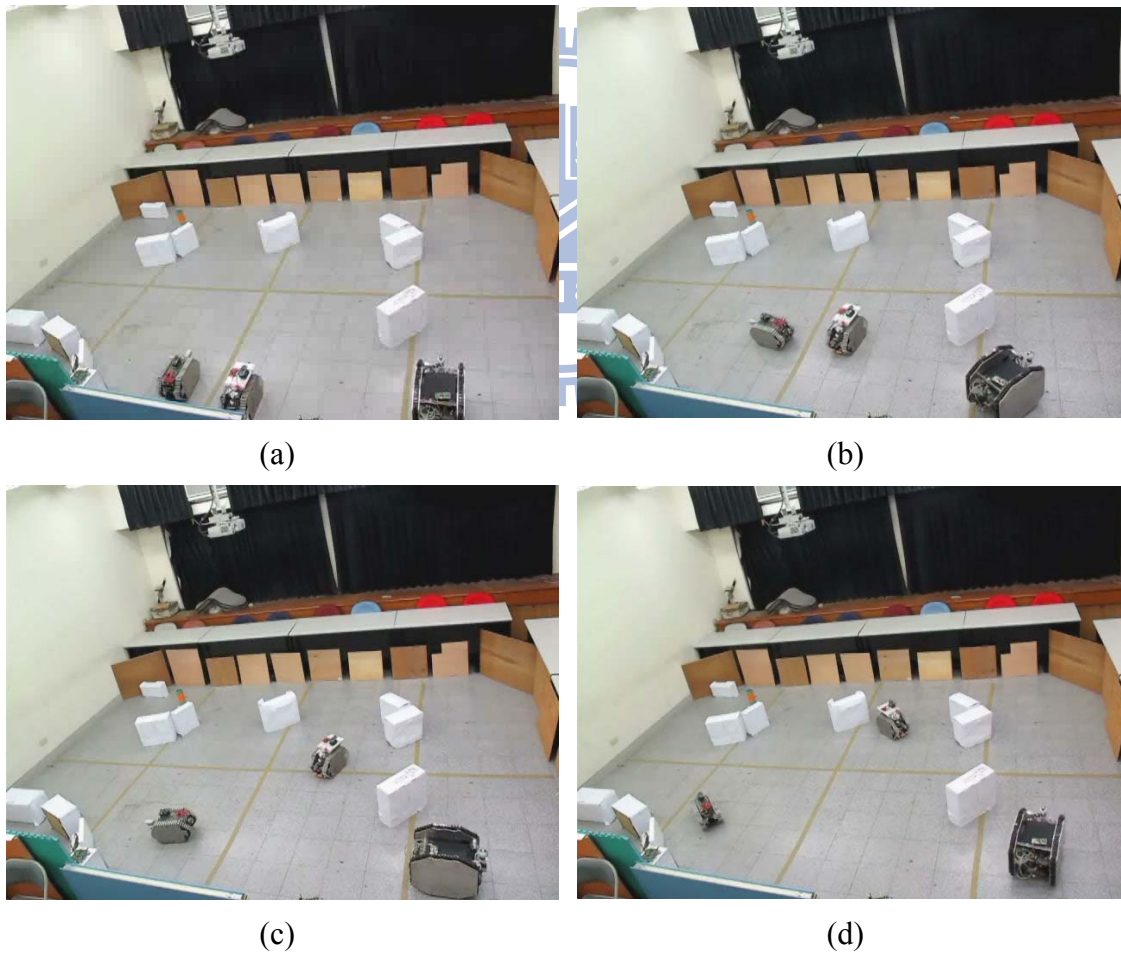


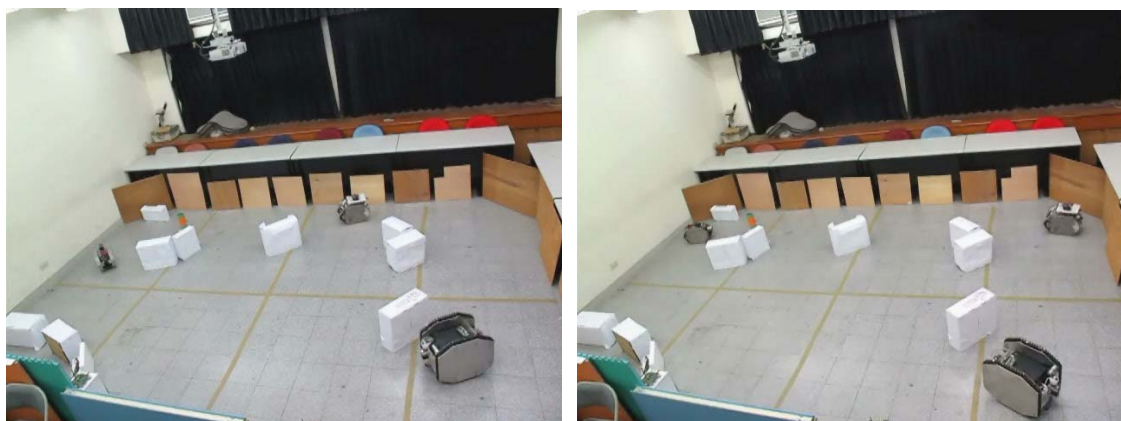
圖 5-30 比較平均時間(已知環境)

表 5-12 平均時間實驗紀錄(已知環境)

Average(單位:min)	1 robot	2 robots	3 robots
uncooperative	8.1	6.1	4.0
cooperative	---	3.7	3.1

圖 5-31為實驗中的一個紀錄，三台機器人使用虛擬區域劃分策略，執行合作搜尋任務，圖中(a)由左而右順序為Robot1、Robot2、Robot3，此次實驗搜尋時間為 2 分 36 秒，最後由Robot1 發現目標物(如圖中(f))，首先各機器人放置在不同初始位置(如圖中(a))，任務開始後，依據策略的運作而執行合作搜尋目標物(如圖中(b)~(e))。





(e)

(f)

圖 5-31 三台機器人之合作搜尋(虛擬區域劃分策略)

5.5.4 未知環境策略實驗結果

本小節實驗多機器人在有使用動態區域劃分策略下，執行合作搜尋的任務，實驗結果如圖 5-32所示，分別為 1~3 台機器人搜尋時間紀錄，以及平均時間曲線，表 5-13為六次實驗中的時間紀錄。

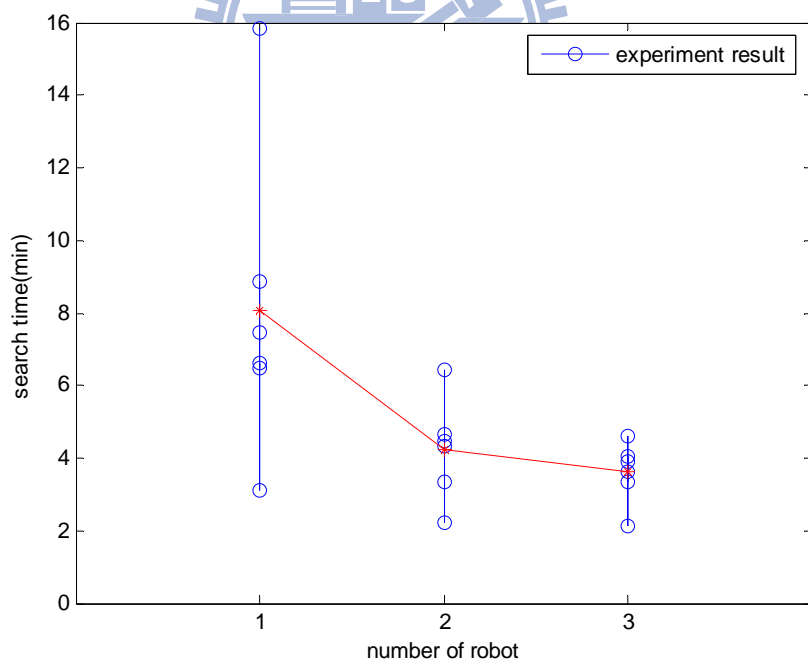


圖 5-32 有合作策略實驗結果(未知環境)

表 5-13 有合作策略實驗紀錄(未知環境)

單位:min	Rec_1	Rec_2	Rec_3	Rec_4	Rec_5	Rec_6	Average
1 robot	8.9	7.5	6.5	6.6	3.1	15.8	8.1
2 robots	4.7	4.3	6.5	2.2	3.3	4.5	4.2
3 robots	3.3	3.9	4.6	3.6	2.2	4.1	3.6

比較無合作策略和有合作策略的搜尋實驗結果，分別把實驗時間紀錄放在一起，如圖 5-33，另外把平均搜尋時間放在一起，如圖 5-34所示，而表 5-14為平均搜尋時間紀錄，由實驗結果可歸納成以下幾點：

- (1) 當使用的機器人數目增多時，在搜尋時間上，同樣地都會有下降的趨勢，而有使用合作策略時，改善平均搜尋時間的幅度會比沒有合作策略時明顯。
- (2) 觀察圖 5-33，有使用合作策略時，在時間的變異量上也比沒有合作策略時降低許多，顯示機器人在搜尋時，明顯提升工作效率。經由實驗結果，在未知環境下，透過本論文所設計的動態區域劃分策略，最大可提升搜尋效率 30%。
- (3) 由實驗結果分析，可以證實經由設計之動態區域劃分策略，使多機器人可以自主執行合作搜尋任務，並且提升搜尋效率，同時驗證先前章節5.2的模擬結果。

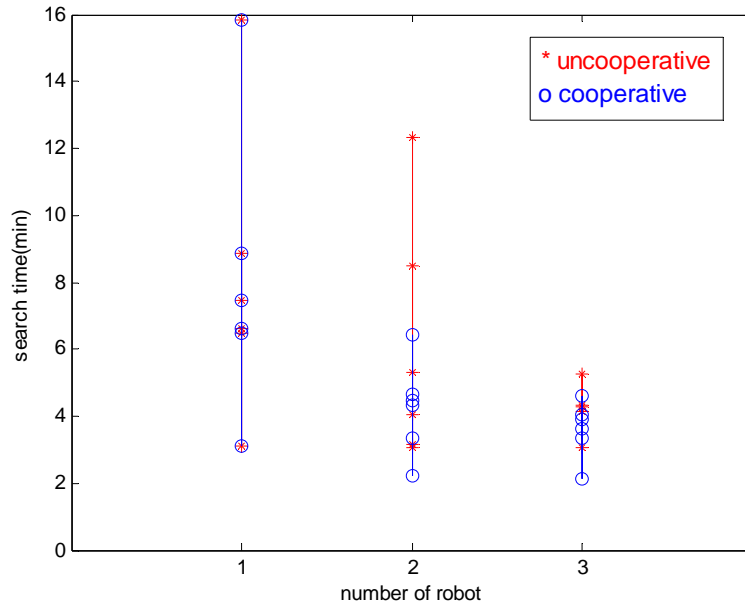


圖 5-33 比較時間變異量(未知環境)

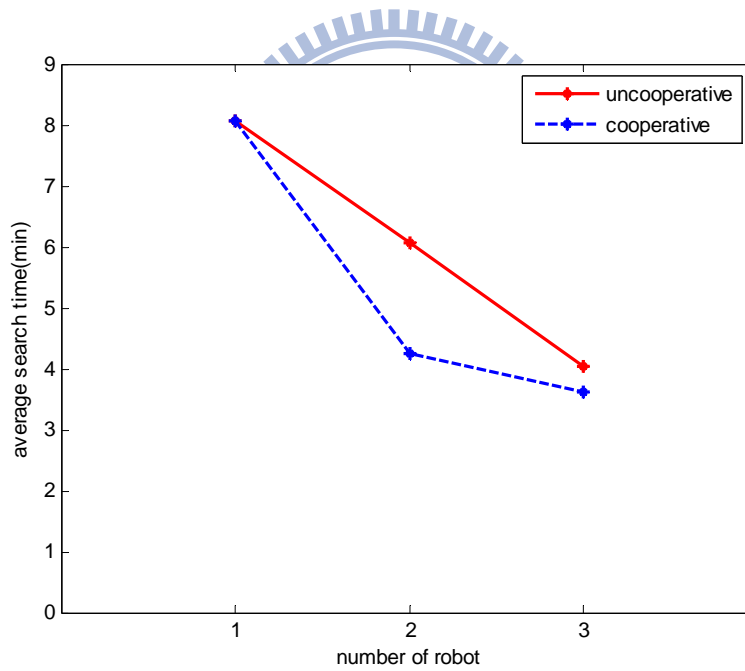


圖 5-34 比較平均時間(未知環境)

表 5-14 平均時間實驗紀錄(未知環境)

Average(單位:min)	1 robot	2 robots	3 robots
uncooperative	8.1	6.1	4.0
cooperative	---	4.2	3.6

圖 5-35為實驗中的一個紀錄，三台機器人使用動態區域劃分策略，執行合作搜尋任務，圖中(a)由左而右順序為Robot1、Robot2、Robot3，此次實驗搜尋時間為 2 分 10 秒，最後由Robot1 發現目標物(如圖中(f))，首先各機器人放置在不同初始位置(如圖中(a))，任務開始後，依據策略的運作而執行合作搜尋目標物(如圖中(b)~(e))。



(a)

(b)



(c)

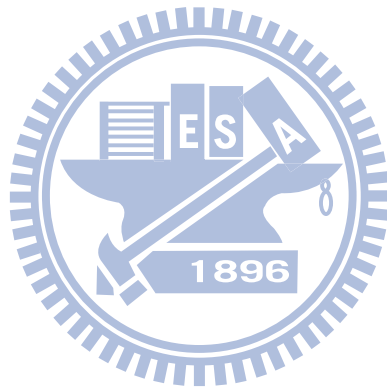
(d)



(e)

(f)

圖 5-35 三台機器人之合作搜尋(動態區域劃分策略)



第六章 結論與未來發展

6.1 結論

根據以上的模擬結果和實驗結果，在此為本論文做出以下幾點結論：

1、機器人自主能力以及行為控制問題

首先依照不同的機器人平台裝置適合的感測器，並且設計其適合的個別行為，如避障行為(超音波感測器、雷射掃瞄器)、找尋目標物行為(攝影機)以及隨機探索行為，使用優先權比較的機制來決定最後機器人行為輸出，經由實驗結果，透過此方法將可以使機器人具有自主搜尋的能力。在多機器人無線通訊上，建立ZigBee網狀拓撲網路，搭配遠端電腦的人機介面，將可以回傳各機器人的狀態以及感測資訊，操作者亦可傳送機器人平台命令來操控機器人平台，進而實現平台網路化控制。

2、合作策略與行為控制整合於目標物搜尋

- (1) 已知環境方面，由於知道環境大小，所以設計虛擬區域劃分策略，首先對於所要搜尋的場大做虛擬的區域劃分，透過此資訊的分享，讓機器人達到合作協調的目的，合作策略的使用將產生出2個群體行為，機器人本身自主能力將產生3個個別行為，最後透過優先權比較機制，結合ZigBee無線通訊，設計出基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，經由實驗結果，使用此策略，相較於沒有使用合作策略，將可以提高整體搜尋效率38%。
- (2) 未知環境方面，因為沒有環境資訊，不能對場地做虛擬劃分，所以另外設計動態區域劃分策略，對機器人座標作短暫三點座標記憶，然後轉換成相對應大小的個人區域，透過此資訊分享，讓機器人達到合作協調的目的，合作策

略同樣會產生2個群體行為，機器人自主能力產生3個個別行為，最後透過優先權比較機制，結合ZigBee無線通訊，設計出基於行為模式之多機器人合作搜尋架構，經由實驗結果，使用此策略，相較於沒有使用合作策略，將可以提高整體搜尋效率30%。

6.2 未來發展

本論文為多機器人平台建立了基礎的架構，包含機器人自主部份以及合作協調部分，未來還有許多地方可以繼續研究發展下去，在此列出數點未來發展的方向：

(1) 機器人自主方面

由於目前於第三代機器人平台上只安裝兩個超音波感測器來完成避障功能，但是不能應付比較複雜的地形，未來可以加裝雷射掃瞄器或多個超音波來提升平台的避障能力。

(2) 合作協調方面

本論文所設計之合作策略雖可以提升整體的搜尋效率，但是當機器人數目增多時，反而改善的幅度並不明顯，原因為重複走過的路徑增加，所以未來可以考慮在機器人合作方面增加地圖建立的功能，如此才能解決機器人走重複路徑的問題。另外本論文在機器人定位方面，使用 Encoder 搭配電子羅盤來計算機器人位置，但是當搜尋時間越長，則 Encoder 誤差會越大，導致定位錯誤，同時也會影響策略的運作，所以未來在機器人定位上，可以考慮採取不一樣的定位方式如 ZigBee 定位等，來改善 Encoder 累積誤差的問題。

参考文献

- [1] I. Rekleitis, G. Dudek, and E. Miliotis, "Experiments in Free-Space Triangulation Using Cooperative Localization," *Proceedings of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.2, pp. 1777-1782, 2003.
- [2] G. Shuzhi Sam and C. Fua, "Complete Multi-Robot Coverage of Unknown Environments with Minimum Repeated Coverage," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 715-720, 2005.
- [3] A. Solanas and M. A. Garcia, "Coordinated Multi-Robot Exploration Through Unsupervised Clustering of Unknown Space," *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.1, pp. 717-721, 2004.
- [4] K. Kosuge, T. Oosumi, and K. Chiba, "Load Sharing of Decentralized-Controlled Multiple Mobile Robots Handling A Single Object," *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.4, pp. 3373-3378, 1997.
- [5] H. Kose, U. Tatlidede, C. Mericli, K. Kaplan, and H. L. Akin, "Q-learning Based Market-Driven Multi-Agent Collaboration in Robot Soccer," in *Proc. Turkish Symp. Artif. Intell. Neural Netw.*, Izmir, Turkey, pp. 219–228, 2004.
- [6] H. Subramanian, and C. H. Dagli, "Cooperative Cleaning for Distributed Autonomous Robot systems using Fuzzy Cognitive Maps," *Proceedings of the 22nd International Conference on North American Fuzzy Information Processing Society*, pp. 287-290, July 2003.
- [7] B. Kuipers and Y.-T. Byun, "A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations," *J. Robot. Autonomous Syst.*, vol. 8, pp. 47–63, 1991.

- [8] S. J. Moorehead, R. Simmons, and W. L. Whittaker, "Autonomous Exploration Using Multiple Sources of Information," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 3098-3103, 2001.
- [9] I. Rekleitis, G. Dudek, and E. Miliotis. "Multi-Robot Exploration of An Unknown Environment, Efficiently Reducing the Odometry Error." *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'97)*, pp. 1340-1345, Japan, August 1997.
- [10] I. Rekleitis, G. Dudek, and E. Miliotis. "Accurate Mapping of an Unknown World and Online Landmark Positioning." In *Proc. Vision Interface (VI)*, pp. 455-461, Nagoya Japan, 1998.
- [11] I. Rekleitis, R. Sim, G. Dudek, and E. Miliotis, "Collaborative Exploration for the Construction of Visual Maps," *Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1269-1274, 2001.
- [12] C. Chee Kong and G. Leng, "Cooperative Search Algorithm for Distributed Autonomous Robots," *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 394-399, 2004.
- [13] M. Anderson and N. Papanikolopoulos, "Improving Multirobot, Cooperative Search via Local Target Queues," *Proceedings of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2590-2595, 2007.
- [14] R. Grabowski, L. Navarro-Serment, C. Paredis, and P. Khosla, "Heterogeneous Teams of Modular Robots for Mapping and Exploration," *J. Autonomous Robot.*, vol. 8, pp. 293-308, 2000.
- [15] D. Jung and A. Zelinsky, "An Architecture for Distributed Cooperative Planning in A Behavior-Based Multi-Robot System," *J. Robot. Autonomous Syst.*, vol. 26, pp. 149-174, 1999.

- [16] Y. Nevatia, T. Stoyanov, R. Rathnam, M. Pfingsthorn, S. Markov, R. Ambrus, and A. Birk, "Augmented Autonomy: Improving human-robot team performance in Urban Search and Rescue," *Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2103-2108, 2008.
- [17] M. Ghaffari, S. Ali, V. Murthy, X. Liao, J. Gaylor, and E. Hall, "Design of an Unmanned Ground Vehicle, Bearcat III, Theory and Practice," *Journal of Robotic Systems*, vol. 21, pp. 471-480, 2004.
- [18] R. Brooks, "A Robust Layered Control System for A Mobile Robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 14-23, 1986.
- [19] R. Arkin and T. Balch, "AuRA: Principles and Practice in Review," *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 9, pp. 175-189, 1997.
- [20] P. Maes. "The Dynamics of Action Selection." *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 991-997, 1989.

