

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

移動式機器人之行為融合控制器設計

Design of a Behavior-Fusion Controller for
Mobile Robot Navigation



研究 生：林鎮源

指 導 教 授：宋開泰 博 士

中 華 民 國 九 十 四 年 七 月

移動式機器人之行為融合控制器設計

Design of a Behavior-Fusion Controller for Mobile Robot Navigation

研究 生：林鎮源

Student: Jean-Yuan Lin

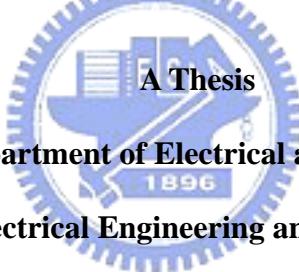
指導 教授：宋開泰 博士

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文



Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

July 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

移動式機器人之行為融合控制器設計

研究生：林 鎮 源

指導教授：宋 開 泰 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

本論文之主旨是以行為融合的方法設計機器人之導航控制系統。由於在週遭環境情況類似下，行為架構模式的機器人其輸出行為表現的融合比例應該也會類似；本論文提出以一啟發性模糊類神經網路設計行為融合比例，文中首先設計閃避障礙物、目標物追蹤、沿牆行走等三個行為。藉由超音波感測器收集周圍的環境資訊，作為個別行為模糊控制器的輸入，以決定在不同的環境資訊下，各行為的輸出表現。接着透過類神經網路設計一行為融合架構，來決定機器人在當時環境中之行為融合比重。由環境資訊與所建立之規則表中各典型環境的相似程度，能即時決定機器人導航的行為融合比例。經由電腦模擬與實際導航實驗，驗證本設計具有令人滿意的導航功效。

Design of a Behavior-Fusion Controller for Mobile Robot Navigation

Student : Jean-Yuan Lin

Advisor : Dr. Kai-Tai Song

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT



The thesis presents a design of behavior-fusion architecture for mobile robot navigation. We first design three behaviors for robot navigation, including obstacle avoidance, wall following, and goal seeking using fuzzy-logic control approach. Then, the fusion weight of each behavior is determined by using the proposed behavior-fusion neural network. The neural network maps the current environment sensor data to suitable fusion weights. Both computer simulation and practical experiments verify the effectiveness of the method.

致謝

謹向我的指導教授宋開泰博士致上感謝之意，感謝他兩年來在專業上的指導，以他豐富的學識與經驗，配合理論的應用，使得本論文得以順利完成。

感謝學長任詔、奇鎰、嘉豪及孟儒的指導，以及感謝與我共同奮鬥的同學松峙、柏秋、維祥及崇民的相互鼓勵及提攜，同時也感謝學弟忠憲、晉懷、宏宜、富全及鎮謙在生活上帶來的樂趣。

最後，特別感謝我的父母，由於他們辛苦栽培，在生活上給予我細心地關愛與照料，使得我才得以順利完成此論文；在此我願以此論文獻給我最感謝的老師、父母、學長、同學、學弟。

目錄

摘要	i
Abstract	ii
致謝	iii
目錄	iv
圖例	vi
表例	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 相關研究回顧	2
1.3 問題描述	6
1.4 章節說明	7
第二章 機器人導航行為設計	8
2.1 模糊控制在機器人導航之應用	8
2.2 閃避障礙物行為(Obstacle avoidance)的設計	10
2.3 沿牆行走行為(Wall following)的設計	14
2.4 目標物追蹤的設計	17
2.5 結論與討論	20
第三章 行為融合的設計	22
3.1 導航系統架構	22
3.2 導航行爲融合的設計	23
3.3 利用啟發式網路歸類環境以決定行爲融合權重	24
3.3.1 Kohonen 模糊分類網路	26
3.3.2 啓發性網路—結合 FKCN 與規則表	28
3.4 網路輸入：感測器與目標方向的量化	31
3.5 典型圖樣與規則表的建立	34
第四章 機器人硬體架構	40
4.1 機器人系統	40
4.2 機器人控制架構	41
4.2.1 馬達控制系統	42
4.2.2 超音波感測系統	43
4.3 超音波感測器的特性與設計原理	43
4.3.1 超音波測距模組：Polaroid 6500 Range Module	45
4.3.2 超音波感測器的配置與性能	47
4.4 機器人姿態估測系統	47
第五章 模擬與實驗結果	49
5.1 電腦模擬與實驗結果	49

5.2 環境一：狹長走廊進行閃避障礙物行為	49
5.2.1 環境一模擬結果	49
5.2.2 環境一實驗結果	52
5.3 環境二：在死巷子及狹長通道之導航	54
5.3.1 環境二模擬之結果	54
5.3.3 環境二之實驗結果	56
5.4 在實驗室複雜室內環境及通過窄門之導航	58
5.4.1 環境三模擬結果討論	58
5.4.3 環境三之實驗結果	60
5.5 實驗四：長直通道環境之實驗	62
第六章 結論與未來展望	64
6.1 結論	64
6.2 未來展望	65
參考文獻	67



圖例

圖 1.1 行為模式型控制系統	2
圖 1.2 障礙物位於機器人與目標之間	5
圖 2.1 超音波感測範圍	11
圖 2.2 閃避障礙物決策流程	11
圖 2.3 閃避障礙物的模糊控制器輸入與輸出歸屬函數	13
圖 2.4 閃避障礙物模糊控制器輸入與輸出關係圖	13
圖 2.5 沿牆行走行為設計示意圖	16
圖 2.6 沿牆行走行為設計輸入輸出流程	16
圖 2.7 沿牆行走行為模糊控制器的設計輸入與輸出歸屬函數	17
圖 2.8 沿牆行走行為模糊控制器輸入與輸出關係圖	17
圖 2.9 目標物追蹤行為設計示意圖	19
圖 2.10 目標物追蹤行為模糊控制器的設計輸入與輸出歸屬函數	20
圖 2.11 目標物追蹤型為模糊控制器輸入與輸出關係圖	20
圖 3.1 導航任務行為融合的設計	23
圖 3.2 FKCN 網路架構	23
圖 3.3 導航任務行為融合架構	25
圖 3.4 行為融合啟發性網路	29
圖 3.5 超音波偵測方向	29
圖 3.6 目標方向區分示意圖	34
圖 3.7 八種典型圖樣	36
圖 3.8 環境類型與行為表現可能關係	37
圖 4.1 實驗室自行研製之自走式機器人	41
圖 4.2 機器人控制系統架構圖	42

圖 4.3 超音波控制模組設計方塊圖	43
圖 4.4 Example of Single-Echo-Mode Cycle without Blanking Input.....	46
圖 4.5 超音波感測器配置圖	46
圖 5.1 環境一中的模擬結果	51
圖 5.2 環境一模擬中個別行為的融和比重紀錄	51
圖 5.3 環境一模擬中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	52
圖 5.4 環境一中的實驗結果	52
圖 5.5 環境一中的實驗結果的個別行為的融和比重紀錄	53
圖 5.6 環境一的實驗中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	53
圖 5.7 環境二中的模擬結果	55
圖 5.8 環境二模擬中個別行為的融和比重紀錄	55
圖 5.9 環境二模擬中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	56
圖 5.10 實驗二的機器人行走軌跡圖	57
圖 5.11 實驗二中個別行為的融和比重紀錄	57
圖 5.12 實驗二中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	58
圖 5.13 環境三中的模擬結果	59
圖 5.14 環境三中個別行為的融和比重紀錄	60
圖 5.15 環境三中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	60
圖 5.16 實驗三的機器人行走軌跡圖	61
圖 5.17 實驗三中個別行為的融和比重紀錄	61
圖 5.18 實驗三中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	61
圖 5.19 實驗四的機器人行走軌跡圖	62
圖 5.20 實驗四中個別行為的融和比重紀錄	63
圖 5.21 實驗四中左右輪速度紀錄(cm/sec).....	63

表例

表 3.1 典型圖樣行為融合規則 39



第一章 緒論

1.1 研究動機

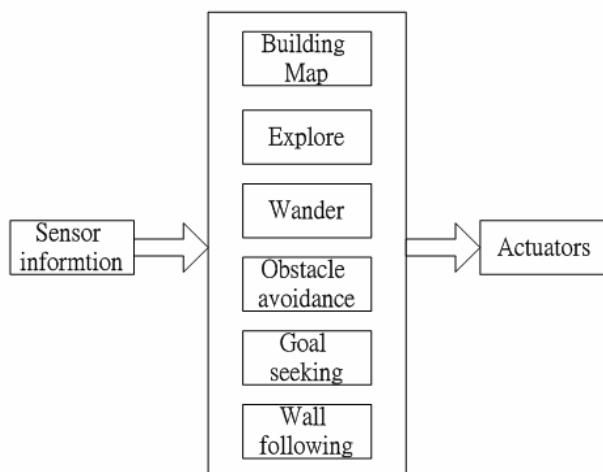
在近年來智慧型機器人的發展上，使機器人在家庭環境中具有自由移動的能力是一項重要的課題。倘若機器人在未知環境中具有自由移動的能力，則其功能便具有更大的運用空間，如此一來勢必能為人類提供更多服務，並且與人類之間能夠有更多的互動。例如日本 Honda 公司所推出的 ASIMO 機器人，其頭部裝設有兩台 CCD Camera，用以計算出自己與周圍物體之間的距離，藉以自動繞開障礙物行走，或是到達某一定點。吸塵器機器人 Roomba 能夠在無人監督的狀況下自動清潔家庭地板，這些都說明了走入到人類的生活的智慧型機器人已經成為一種趨勢。事實上，具有自動導航能力的機器人可被用來作保全、清潔甚或者是家庭看護等用途，在不久的將來，具有更多功能更強能力的機器人將存在於人類日常生活之中，而不再只是存在於實驗室或是科幻小說之中。

目前移動式機器人的發展趨勢已脫離早期的工廠中需要預先鋪設軌跡的設計，此一進展說明人們要求機器人在功能上具有更多便利性、更加的靈巧，能自行透過對於週遭環境的感測資訊判斷移動路徑的智慧型機器人已是一種發展上的需求。相對於早期的設計上，移動式的智慧型機器人必須對於較為複雜的環境具有應對能力，對於不同的環境下都能夠迅速反應。本篇論文的主旨在於研究基於行為概念的架構(behavior-based architecture)[1]上，透過對於環境的識別比較來決定機器人的個別行為的融合比重，使得機器人具有自動導航的能力，並且能夠在持續變化且無法預期的環境中也可以進行即時有效的移動，達成其所賦予的任

務。

1.2 相關研究回顧

關於移動式機器人的研究，自從 1986 年 Brooks 提出以行為為概念，『將一個完整但複雜的導航任務分解成數個較簡單的行為並且以平行並聯方式同時執行』[1]，來做為機器人導航設計，其架構如圖 1.1 所示。相對於早期機器人以功能作為區分的小模組，再將每個模組依其順序關係形成一個串聯式的流程設計 (sense-model-plan-act)，行為模式的架構使得環境感測器的輸入資訊跟機器人行為的輸出動作之間的結合更為緊密，整個感測器輸入到機器人動作輸出之間需要花費的時間減少了許多，並且因為平行執行的緣故，系統上計算量上的需求也降低了，使得反應較為迅速的行為模式架構的導航方法較為有利於將導航控制器置於移動式機器人上。由於 Brooks 的行為模式架構上功能區塊是以行為來加以劃分，且以平行並聯方式同時執行，因此，更能滿足即時反應的需求，所以在行為模式架構提出之後，有許多關於機器人導航的研究被提出跟討論 [2-10]。



1.1 行為模式型控制系統

總體而言，使用 behavior-based 架構有下列好處：

- A. 因為架構上將導航任務分解為數個較為簡單的行為，單一的行為由於較為單純，設計上變得較為簡單，同時計算量相較之下也顯得更少，所以機器人可以更快的產生動作。同時因為計算量的減少，使得機器人所搭載的微電腦或微控器便足以處理，導航控制器可直接建立於移動式機器人上。
- B. 由於機器人的輸出行為是由多個簡單行為的結合來決定最後輸出，個別的行為都是為了達成某一特定目的而設計[2]，所以當部分模組無法正常工作時，其他的行為依然可以正常工作，整個架構上具有較高的穩健度。並且可依不同任務或需求予以增減行為模組而不影響其他行為模組的運作，整個架構顯得更為有彈性。
- C. 以行為為概念的移動式機器人架構不需準確建立環境模型[3]。因為以行為為概念的移動式機器人是屬於由下而上(Physically grounded bottom-up reactive system)的設計，是由設計的行為模組平行進行計算最後並聯輸出，並非以環境模型來計算進行導航。其次，對於各個行為之間所需要與接收的感測器資訊不見得相同，換而言之，當感測器中有部份產生誤差時，受到影響的僅有以此感測器作為行為之功能輸入項，對於其他不需採用到該感測器資訊的行為自然不會受到影響。最後的輸出由所有的行為根據其仲裁或是融合方式加以決定，所以以行為為概念的移動式機器人並不需要建立精確的環境模型。

在行為模組架構中，由於將導航任務分解為數個行為來完

成，個別行為都是為了完成特定的導航目的而設計。例如：閃避障礙物(Obstacle avoidance)其主要目的在於使機器人在移動過程中能夠避開障礙物而不發生碰撞。沿牆行走(Wall following)的行為設計目的在於讓機器人能夠沿著環境的邊界行走。目標物追蹤(Goal seeking)行為設計上是為了使得機器人在移動期間能夠盡量往目標物方向移動。在此一規範下，因各行為的設計目的不同，所以各模組設計上是獨立分開的，最後再透過並聯的方式產生輸出行為。其中行為模式架構中，一些較簡單的行為是根據環境的感測輸入以類似映射的方式產生，如同人類的反射動作一般，因此行為模式也被稱為是一反射(Reactive)行為的控制系統。並且架構上各行為最後以並聯方式輸出，使得設計上各個行為能夠獨立分開而不需考慮承接的順序，所以計算上可以平行進行，其所需的時間亦大為縮短。另外，對於較為複雜的行為，亦存在有將一個行為在分割成數個動作來加以處理的方法[3]。因此行為架構(behavior based)的優點很多，所以自提出以來，許多建立在此架構上的機器人導航方法被提出來，像是結合模糊邏輯(Fuzzy Logic)[4-7]、類神經網路(ANN)[8-9]、基因演算法(GA)[10-11]等等來設計。

以行為模式架構所設計的機器人，因為各行為模組分開設計，讓單一行為的設計較為容易，使得移動式的機器人執行效率得以改進，但是也延伸出另外一個被需要解決的問題，那就是最終機器人的行為輸出部分該如何決定？依行為模式架構上而言，依導航任務分解出來的多個行為模組是同時平行計算處理的，但是各個行為模組設計上的目的都不相同，那麼最終輸出的行為表現又當如何協調，才能處理行為之間的衝突？舉例而言，

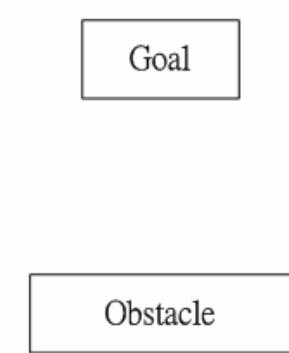


圖 1.2 障礙物位於機器人與目標之間

像是閃避障礙物與目標物追蹤行為，在如圖 1.2 的環境中，閃避障礙物的行為輸出會使機器人由左邊或是右邊繞開，但是繞開之後則未必往目標物所在處移動，另一方面，目標物追蹤的行為輸出則會使機器人調整行進方向，使其往目標物所在之處前進，則很可能會撞上路徑上的障礙物。就此例而言，明確顯示各行為之間的確可能發生衝突，會出現此一問題的原因在於所設計的行為都是為了達到其特定的導航目的，而各行為之間並不會考慮其他行為的輸出，因此有多個行為時，個別的行為輸出就有可能產生衝突的情況。這也是行為模式架構所需面對的一個重要的問題。

目前行為模式架構中，行為協調的方式可概略分為兩個類別：行為仲裁(Arbitration)[1]與行為融合(Fusion)[12-13]。兩者的區分在於：行為仲裁最後的輸出，通常是所有設計行為的其中一個；而行為融合對於最後的輸出，每個行為都有參與，只是其參與的程度有多有少。

以此兩種行為協調方式而言，各有其優缺點。行為仲裁部分因每次輸出的行為皆只有所有行為設計中其中的一個，所以當控制行為不停的切換改變時，機器人的動作顯得較不流暢，然而卻具有較好的強健度，同時行為模組增加時的協調方式亦較為簡單。行為融合則剛好相反，強健度上的表現較差，但是整個動作流程較為流暢。導致這個差異的主要原因在於個別的行為模組設計乃是為了達到特定的導航目的，所以對於相同環境之下，個別的行為其反應迥異，所以倘若當環境複雜導致以仲裁為行為協調方式的輸出不停切換，自然會有少許動作不流暢的現象；而以融合為行為協調方式，具體來講，當環境改變時，每個行為都會被表現出來，只是在時間上的前後行為表現出來的比例高低不同，而總輸出的導航表現合適與否，則與其融合方式是否有效率有關。



1.3 問題描述

在行為融合的方法上，已有許多報告提出，例如透過模糊邏輯來做行為的設計與行為融合[14-15]，大大地降低行為設計的計算量，使得行為設計更加的簡單易行，並且加速的反應的時間，並且在行為融合方面，透過模糊邏輯中將歸屬函數所對應的行為融合設計加以解模糊化，來得到行為融合比例；或是結合類神經網路[16-17]讓機器人學習感測與環境的關係，此類神經網路透過環境的輸入可以改變模糊控制器中的歸屬函數，因此行為融合時個別行為的融合比重可以隨著環境資訊更新。但是這種透過類神經網路加以訓練的方式，因為訓練過程中網路的鍵結值收斂的時間通常需要耗掉比較多的時間，訓練過程顯得較為耗時，在本

論文中提出一個想法，就是以圖形識別網路來判斷機器人所處的環境類型較為接近哪種情況，並以其相似程度作為行為融合的參考值，並建立應對於常發生的環境資訊與行為融和比重的規則表。透過兩者的結合，形成一啟發性網路，來決定面對各種環境類型下的行為融和比重。此一設計上的目的在於藉由規則表中典型圖樣的設定來減少類神經網路的鍵結值訓練時花費的時間，並且我們對典型圖樣的設計做一說明，並藉由電腦模擬與實驗證明其可行性。

1.4 章節說明

本論文共分為六章，第一章為緒論，介紹移動式機器人在設計上可能遭遇到的問題並就到目前為止相關的研究做一說明。第二章說明機器人導航行為上的設計，以及行為融合的方式。第三章則介紹本論文中所要使用的透過圖樣辨識做環境歸類來進行機器人行為融合的基本概念與規則表之建立。第四章介紹機器人硬體架構的組成，包含機器人探測環境資訊所使用的超音波感測模組與位置估測系統。第五章為電腦模擬與實際上測試的機器人導航實驗結果。第六章為結論與未來展望。

第二章 機器人導航行為設計

本章之重點在於陳述如何透過簡單模糊控制規則的使用，來設計機器人的導航行為，使得計算量可以有效的降低以加快處理的速度。導航行為的設計上，目前將導航任務分成三個行為來處理，分別是閃避障礙物、沿牆行走、目標物追蹤三個行為。機器人本身我們假設已經先給予一個線速度在前進，若三個行為都沒有輸出的話，機器人會不改變方向地往前行走，而三個行為的輸出其作用就在於改變移動式機器人的行進方向，來完成閃避障礙物、沿牆行走、目標物追蹤等工作。就三個行為模組設計的模糊控制器而言，閃避障礙物與沿牆行走輸入項都是超音波感測資訊，透過設計的模糊控制器得到兩輪的速度修正值，用以改變機器人行進的方向；目標物追蹤的輸入項則藉由馬達 encoder 每 50 ms 經由運動控制卡回傳的資料，不斷更新機器人所在位置與前進的方向，來決定與目標物的相對位置關係，並將之作為目標物追蹤的模糊控制器輸入；三個行為所需求的資訊各自從機器人上所裝置的 9 個超音波感測器與運動控制卡所傳回資訊取得，分別通過三個行為設計的模糊控制器來得到該行為的輸出，最後再透過第三章所設計的行為融合架構加以融合作為輸出。

2.1 模糊控制在機器人導航之應用

當機器人在未知環境中移動時，機器人需要利用本身所具有的感測能力，例如本論文所使用的為超音波(ultrasonic)感測器測距來探測周圍的環境資訊，做為導航系統的輸入，使其能安全行駛於未知環境當中，但是獲得的環境資訊正確與否依賴感測器的性能跟誤差大小，尤其是像超音波對於反射面的角度跟材質不

同，具有著某程度的感測誤差。換言之，當機器人在一個未知的環境移動時，感測器所得的環境資訊經常存在某些程度上的不確定性，尤其是對於使用距離感測器作為環境感測的機器人，其對環境感測的輸入時常會因環境的變化而有劇烈的變化。模糊控制針對具有不確定性的資訊有著相當好的處理能力，對於含有隱藏的不確定因素的資料也能夠有很好的效能，所以使用模糊邏輯控制(Fuzzy Logic Control, FLC)來設計控制器在機器人導航上被廣泛的使用。除此之外，在機器人導航設計上找出明確的環境模型不太容易，但是模糊邏輯控制透過其對於不確定的資料的良好處理能力，也能對此問題進行處理，使得不需透過精確的環境模型亦能進行導航。

模糊邏輯是典型的多值邏輯，容許資料融合的不確定性直接在推論過程中表示，以 $[0, 1]$ 區間的數字表示資料的參與度(Membership)，模糊邏輯控制乃是根據模糊集合理論將人們的經驗與直覺表達為模糊語句(IF…THEN…)，並以計算機來執行這些模糊規則。與傳統控制不同的是，模糊控制並非單純將邏輯二分化，而是可以直接訴諸於人類的直覺或是操作者的經驗，將原本的只有 0 或 1 邏輯判斷，依照程度的高低給予 0 到 1 之間的數字來表示，特別是當控制系統較為複雜時，模糊邏輯控制更能有優良的表現，就此而言，使用行為模式為機器人導航方式的架構很適合採用模糊控制來處理行為的設計。簡言之，模糊邏輯控制具有下列特點：

1. 不需要知道控制對象的數學模型，FLC 為一種語言控制器。
2. 能實現對於非線性系統的控制。
3. 模糊控制對於參數的變化具有很強的適應性。

模糊控制器的設計上包含隸屬函數(Membership Function)

與推論法則 (Inference Rule) 兩大部分。

2.2 閃避障礙物行為 (Obstacle avoidance) 的設計

行為模式架構中每一個行為都是為了達到某一特定的導航目的。就此來講，我們先確認閃避障礙物行為設計上主要的目的在於能夠使機器人避開障礙物而不會發生碰撞。並針對此目的來設計此一行為的功能，我們希望此一行為設計上能夠帶領機器人尋找出即時且較好的閃避路徑來閃避機器人行進方向上的障礙物。閃避障礙物行為設計所使用之超音波感測距離資訊為前方 Sonar 與左右兩側 Sonar 共 5 個超音波距離資訊。超音波裝設位置如圖 2.1 所示，我們由前方超音波資訊 (圖 2.1 編號 3、4、5) 做為模糊控制器的輸入來決定機器人的兩輪輸出的速度修正值，亦即由障礙物與機器人的距離來決定機器人改變行進方向的程度。當在目前行進方向上的障礙物越近時，則閃避行為需要較大的動作才能閃開，此模糊控制器的設計將詳細敘述於後。而左前方與右前方的距離資訊透過 Sonar 2 及 Sonar 6 來取得，用以得知左側與右側哪邊的閃避空間較大，來判定機器人該往左邊或是右邊來避開目前行進方向上的障礙。其中我們透過比較 Sonar 2 及 6 的距離量測值之判斷的條件是：如果偵測結果左側大於右側 30 cm 以上，則旋轉方向向左，否則旋轉方向向右，如此設定的原因是為了提早確定旋轉的方向。當前方障礙物分布較為複雜時，可能機器人剛選擇右轉後，在右側的方向又偵測到障礙物，而左前方與右前方的回傳值所判斷的迴轉空間大小恰好與前一個命令相反，造成機器人會忽左忽右的擺盪，為了減少這種情況，所以設計上我們多給了 30 cm 的差距來增加閃避障礙物行為

表現的穩定度。當決定了機器人閃避障礙物的方向後，接下來討論閃避障礙物行為設計中之模糊控制器部分。

閃避障礙物的行為設計其流程可以用圖 2.2 來表示。首先將前方的感測器資訊加以分組對於左前方、右前方各使用一個感測器，以偵測左右兩側的空間，來決定機器人之迴轉的方向；而正前方的障礙物資訊為閃避障礙物行為設計的模糊控制器輸入，因為較為重要，所以使用三個感測器來加以量測，其後將三個感測器傳回的值取其最小值，做為閃避障礙物的行為控制器的輸入，以提高安全性，避免發生碰撞。因此，在本設計中 5 個感測器資訊只分成左前方、正前方、右前方，3 個群組，其中前方障礙物的距離資訊作為模糊控制器的輸入項，用以決定機器人行進方向應該改變的程度大小。

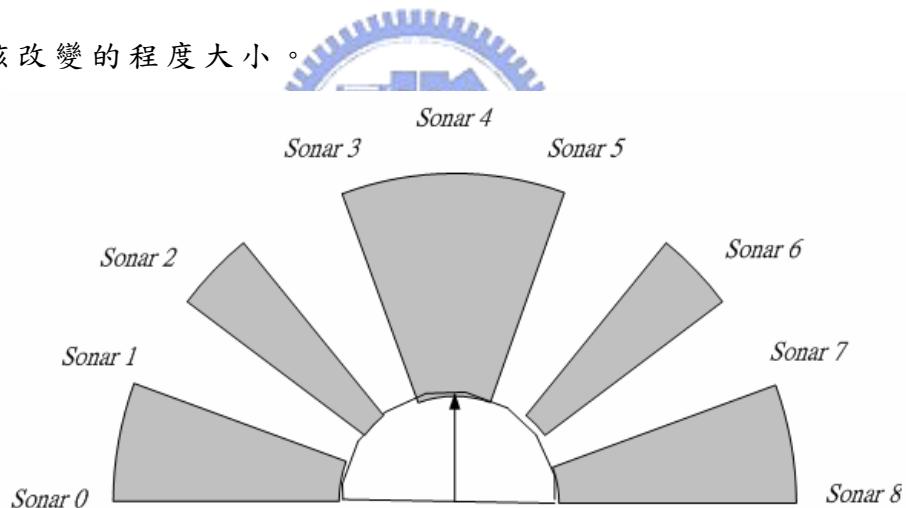


圖 2.1 超音波感測範圍

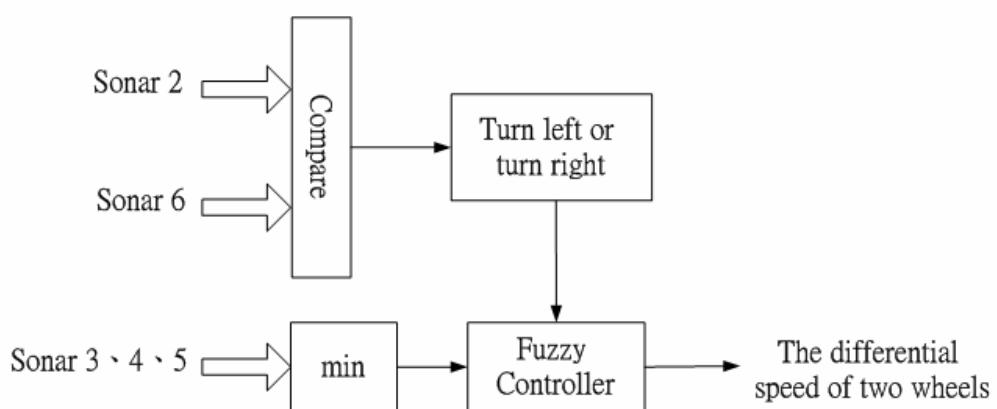


圖 2.2 閃避障礙物決策流程

對於前方輸入的超音波距離資訊作為模糊控制器的輸入，模糊控制器的輸出部分為兩輪的速度修正值，因為我們假設在直線前進時機器人具有一線速度 v_l ，設計的三個行為的輸出項目都只是為了改變機器人的行進方向，例如：當圖 2.2 中輸出的兩輪速度修正值為 v_{dif} 時，則左右兩輪速度一輪為 v_l+v_{dif} 、另一輪為 v_l-v_{dif} 。本章所設計模糊控制器使用的模糊規則可表示為圖 2.3。在此模糊控制器中，我們使用三條單一輸入的簡單模糊控制規則，這三條規則如下：其中 input 部分為前方輸入的超音波距離資訊，output 為左右兩輪與機器人本身直線前進時的線速度的差值。

1. If the distance from obstacle is close,
then the differential speed is big.
2. If the distance from obstacle is medium,
then differential speed is medium.
3. If the distance from obstacle is far,
then the differential speed is small.

當偵測到機器人目前行進方向上正前方的障礙物資訊距離較近時，為了閃避該障礙物，機器人應該採取較大的旋轉動作，也就是讓左右輪的速度差較大來得到較快的轉向，而左轉或是又轉來迴避，則透過左前方與右前方的感測器資訊來決定；反之當機器人偵測到的障礙物距離較遠時，機器人只需慢慢改變行進方向來進行閃避障礙物的動作即可。

上述閃避障礙物行為的設計規則，我們將其歸屬函數以圖 2.3 作一說明，規則一說明如下：當機器人行進方向的障礙物距離少於 50 cm 時(close)，兩輪的速度與直線前進時機器人的速度

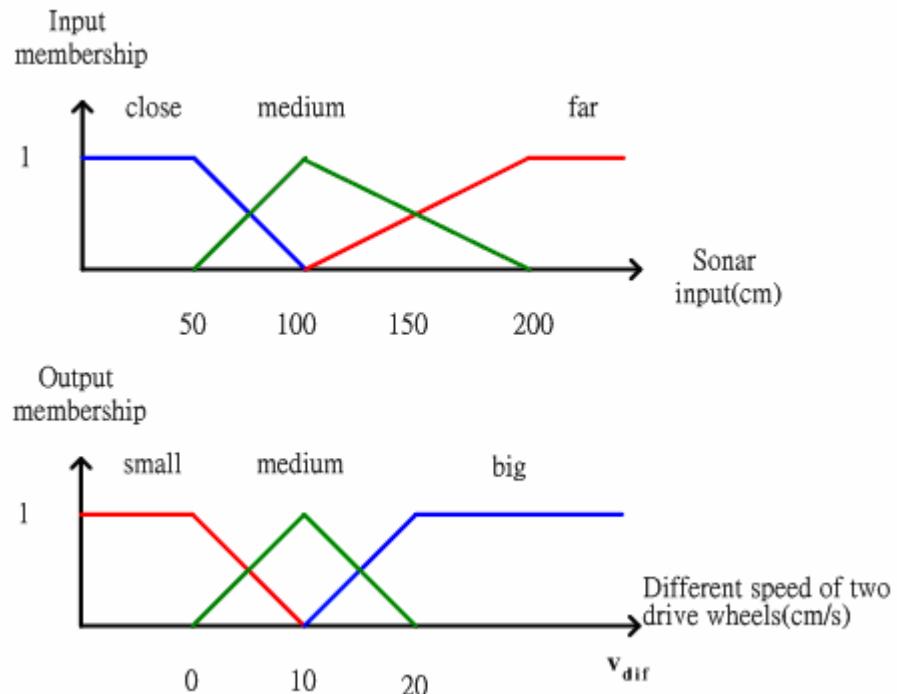


圖 2.3 閃避障礙物的模糊控制器輸入與輸出歸屬函數

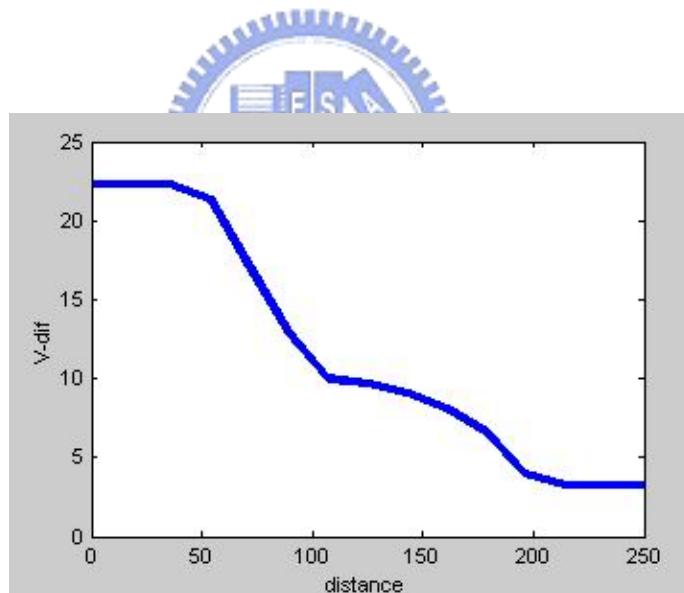


圖 2.4 閃避障礙物模糊控制器輸入與輸出關係圖

差為 20 cm/s(big)，藉此機器人取得較大的轉向；當障礙物距離介於 50~100 時，依照歸屬函數中 close 區段的程度值映射到 big 區段相同歸屬度所對應的速度差值。規則二、規則三同樣如圖樣 2.3 所示。

由歸屬函數中，透過簡單的模糊推論，我們獲得了機器人左右輪速度與直線前進時的線速度差的絕對值，並藉以改變機器人前進的方向，在圖 2.2 中，透過 Sensor 2、6 的比較來決定左輪與右輪的速度何者較高、何者較低，來達成左轉或右轉的閃避障礙物行為。

2.3 沿牆行走行為(Wall following)的設計

沿牆行走行為的設計的目的在於『當機器人行進時，可以沿著環境的邊界來前進』，這個命題可能包含更多動作，像是對於牆角轉角處的應對或是當環境更加不規則時，一樣能夠沿著邊界前進。在相關論文中，這個命題的處理，是將一個 behavior 再予以分解成多個 action 來加以完成。目前我們的主題的重點在於說明我們所提出的融合方式是否有效，我們簡單將之定義為『與較為鄰近的那一側的牆壁，保持相同的距離行走』，在這個目的下，我們需要的資訊包含有前個環境偵測週期中機器人的左側與右側的距離資訊與目前感測器所量測的距離資訊—經圖 2.1 所示的 Sonar 0、Sensor 1 跟 Sonar 7 及 Sensor 8 四個超音波感測器取得，來決定機器人目前的狀態較上個週期時是較為遠離側邊的牆壁或是更為靠近。如下圖 2.4 所示，當機器人在位置 A 原方向前進會使得左側距離牆壁較近的感測器前後兩次所偵測的距離值增加，當遠離牆壁的速度越快時，兩次偵測到的距離資訊其差值也相對應增加越多，以此為輸入，透過沿牆行走的模糊控制器調整方向，達成沿牆行走的目的，如圖 2.4 的位置 B 所示。

在沿牆行走行為的模糊控制器的設定上，我們將輸入項定義為兩次量測到的距離資訊的差值，使用的超音波感測器為圖 2.1

中的 Sonar 0 與 Sensor 1 跟 Sonar 7 及 Sensor 8 作為 wall sensor。設計上，左側與右側各有兩個超音波感測器讀值取其最小值，如此安排的原因在於我們希望當機器人在走廊上行走時，對於小小的走廊起伏，依然能夠有較高的容忍度。當兩次距離資訊的超音波感測器傳回的值相差越多時，表示機器人的路徑與前次相比偏離牆壁更加的嚴重，所以移動式機器人調整轉向的幅度也越大。而如果兩側傳回的感測器距離資訊相同，表示機器人目前正沿著牆壁行走，其流程我們以如圖 2.5 表示，當接收到兩側邊的超音波感測器資訊時，我們一邊各自取其最小值判斷目前機器人較為接近左側或是右側的牆壁，較為貼進的一側，即是我們沿牆行走行為輸出時所靠的牆壁，另一方面，比較兩側偵測週期中兩次障礙物距離的讀值，並計算其差值，作為沿牆行走模糊控制器的輸入。我們所設計的模糊控制器其規則如下：其輸入與輸出歸屬函數如圖 2.6 所示。input 定義為兩次超音波距離量測的差值，output 部分為左右兩輪與機器人本身直線前進時的線速度的差值。

- 1. If the difference between two periods of detection is big,
then the differential speed is big.**
- 2. If the difference between two periods of detection is
medium, then the differential speed is medium.**
- 3. If the difference between two periods of detection is
small, then the differential speed is zero.**

由歸屬函數中，透過簡單的模糊推論，我們獲得了機器人左右輪速度與直線前進時的線速度差的絕對值，並藉以改變機器人前進的方向，在圖 2.6 中我們對模糊控制器的做一說明，透過左側與右側兩組超音波在兩次偵測週期中回傳值的差值，來決定機

器人目前前進的方向改變的程度。當兩次偵測的距離差值越大時，表示目前機器人遠離牆壁的速度較快，所以機器人需要較大的轉向來與牆壁平行前進。

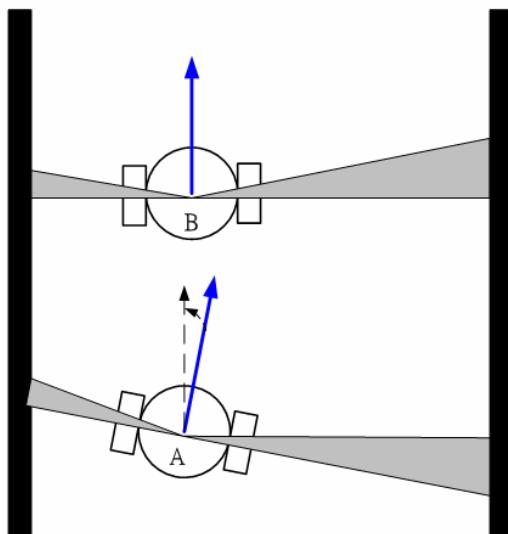


圖 2.5 沿牆行走行為設計示意圖

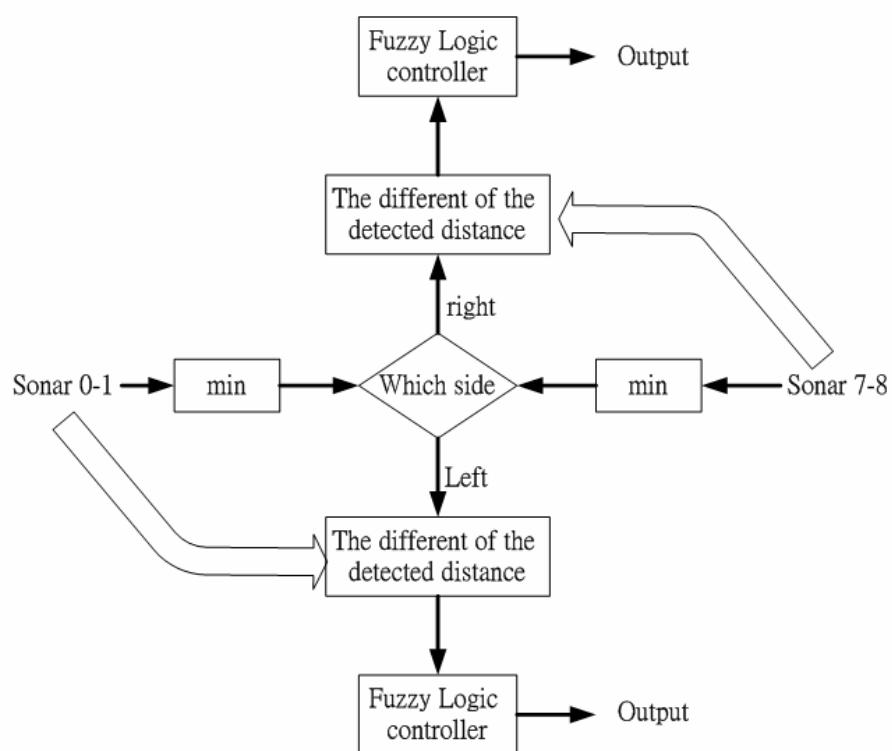


圖 2.6 沿牆行走行為設計輸入輸出流程

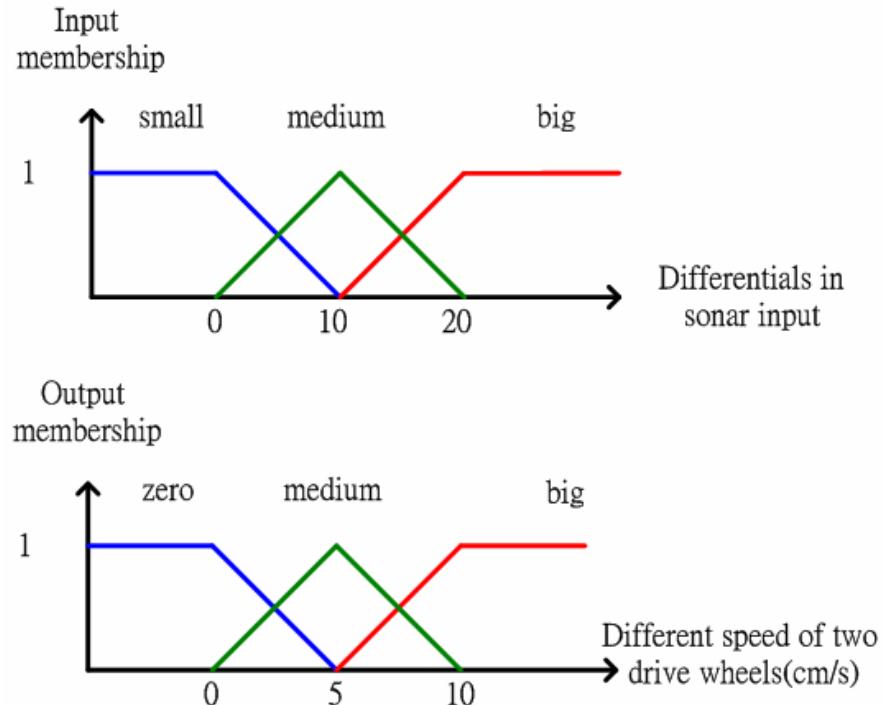


圖 2.7 沿牆行走行為模糊控制器的設計輸入與輸出歸屬函數

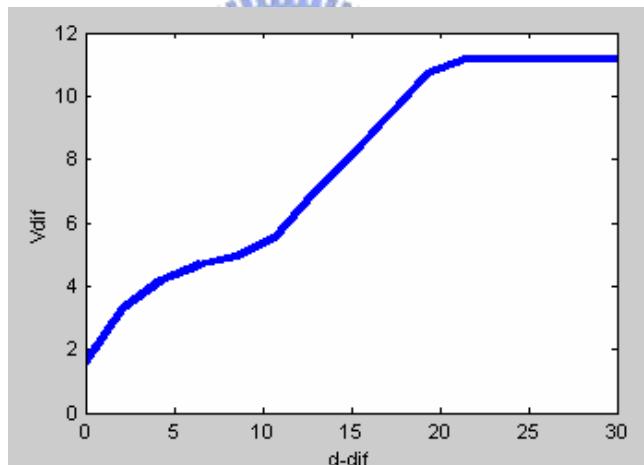


圖 2.8 沿牆行走模糊控制器輸入與輸出關係圖

2.4 目標物追蹤的設計

目標物追蹤的行為，我們將之定義為『調整機器人前進方向，使朝目標物所在方向前進』，作此定義的原因在於當我們機器人在環境中導航時，為了閃避障礙物或是沿牆走訪邊界時可能偏離目標物的方向，我們希望在偏離之後能夠讓機器人回到原本的方向上，使其朝向目標物所在位置前進，最後才能到達目的。

地。設計上其模糊控制器的輸入項為機器人行進方向與目標物的夾角 θ ，輸出項則為左右輪的速度修正值，用來改變機器人行進的方向，使其朝向目標物所在位置前進。因為機器人已先設定有一基本的線速度直線前進，目標物追蹤設計輸出為透過改變左右輪速度來使機器人行進方向朝向目標物的所在方向。由圖 2.7 可知，將機器人前進方向與目標物方向上的夾角作為目標物追蹤此一行為的輸入項，如果該夾角為零，表示機器人正朝向目標物所在的方向前進，若不是的話，則機器人前進方向與目標物方向間存在一個夾角 θ ，在此我們定義在機器人與目標物的連線與機器人目前行進方向之間，若目標物在目前機器人行進方向的右邊，則 θ 定義為正；反之則定義為負。模糊控制器的輸出為一絕對值，用以表示左右輪速度與機器人直線前進時的線速度差值，作為左輪與右輪速度增加或減少的值。如果 θ 越大，則表示偏離目標物方向越遠，所以機器人必須改變其前進方向幅度較大，才能使之朝向目的地。如圖 2.7 中所示，為目標物追蹤的行為表現圖形，當目標物追蹤行為發生時，目標位方向與機器人前進方向的夾角越來越小。對於此一行為，我們設計一模糊控制器其歸屬函數如下圖 2.8 所示。其規則如下，其中 input 為機器人前進方向與目標物方向上的夾角 θ ，output 為左右兩輪與機器人本身直線前進時的線速度的差值。

- 1. If the angle to the target is big,**
then the differential speed is big.
- 2. If the angle to the target is medium,**
then the differential speed is medium.
- 3. If the angle to the target is small,**
then the differential speed is zero.

當機器人目前行進的方向與目標物的所在方位差距在 31° 以上，機器人旋轉改變行進方向的程度也隨之提升，兩輪的速度與機器人直線前進時的線速度差值為 5 cm/s ，當目標物在行進方向的左方時，機器人須向左轉，才能朝目標物前進，所以右輪速度增加 5 cm/s ，左輪速度減少 5 cm/s ；當 θ 介於 16° 到 31° 之間，依照圖 2.8 輸入歸屬函數中的模糊推論，big 區段的程度值，映射到輸出歸屬函數中 big 區段相同歸屬度所對應的速度差值。規則二、規則三同樣如圖樣 2.8 所示。

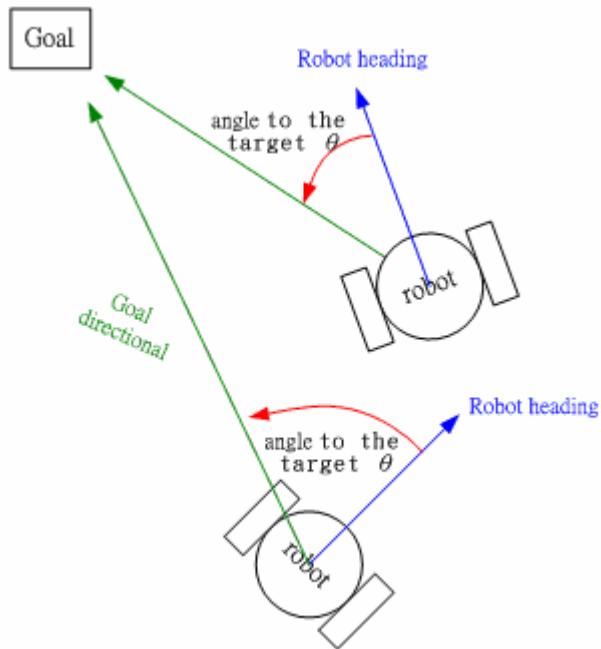


圖 2.9 目標物追蹤行為設計示意圖

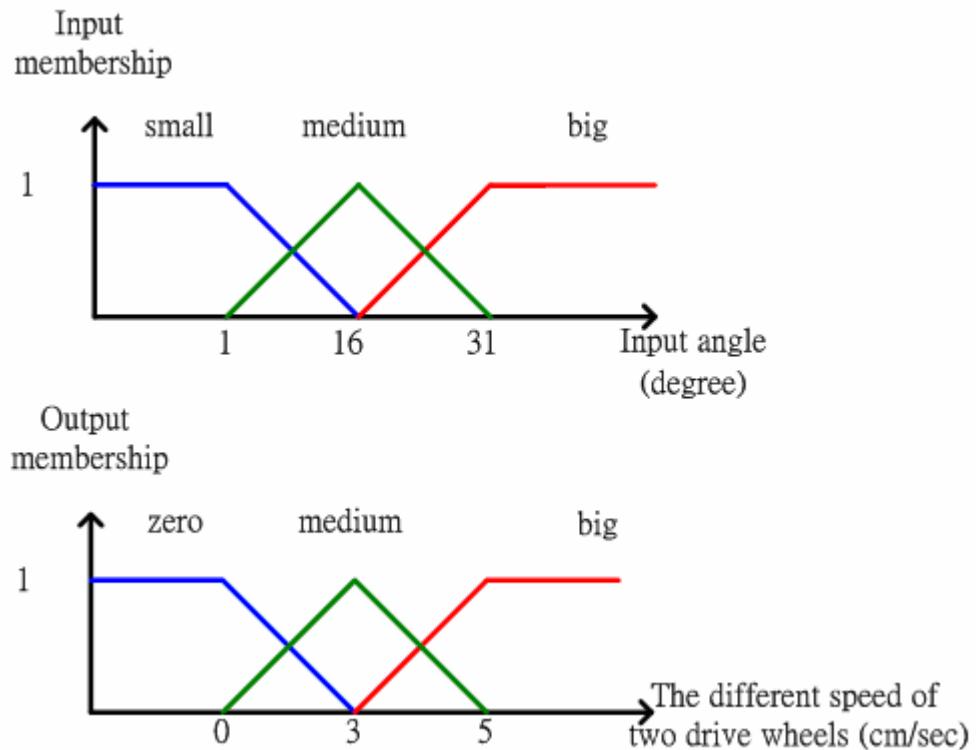


圖 2.10 目標物追蹤行為模糊控制器的設計輸入與輸出歸屬函數

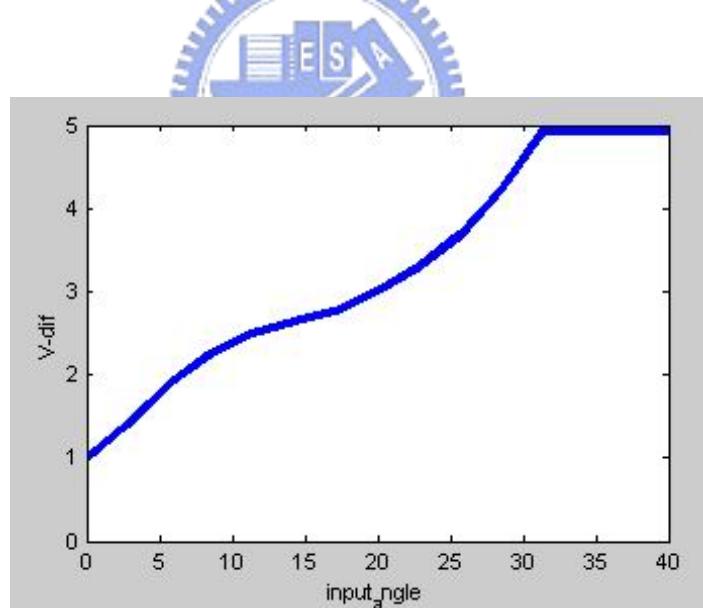


圖 2.11 目標物追蹤型為模糊控制器輸入與輸出關係圖

2.5 結論與討論

目前設計的三個行為模式都較為簡單，僅是為達成所預設的導航目的而設計，所以模糊控制器的輸入輸出項都很快可以計算

出來，我們的重點在於我們設計的這三個行為，是否可以透過下一章的方法加以融合，使得總輸出結果符合我們所需要的導航行為。



第三章 行為融合的設計

以行為架構來進行的機器人在導航的設計上，如果有相似的環境感測輸入，那麼同樣根據環境資訊來進行動作的個別行為在類似環境之下行為融合輸出方面應該也具有相似的輸出比例。根據這個假設之下，我們將超音波所測得的環境資訊依據偵測方向與距離加以量化，使其成為一個有序的數列，來代表一個環境資訊的圖樣。透過類神經網路對環境圖樣進行比較，當環境資訊的圖樣相似時，那麼機器人的行為融合比應該具有相似的輸出。

3.1 導航系統架構

導航的設計上，目前將之分成三個行為來處理，分別是閃避障礙物(obstacle avoidance)，沿牆行走(wall following)及目標物追蹤(goal seeking)。三個行為輸入項分別是超音波感測資訊與機器人自我位置估測的資訊，輸出部分都定義成左右輪的速度與機器人直線前進時的線速度差距，目的在於改變機器人前進的方向。機器人本身已經先給予一個線速度(10 cm/sec)在，若三個行為都沒有輸出的話，機器人會直接地往前行走，而三個行為作用就在於改變移動式機器人的行進方向，來完成閃避障礙物、沿牆行走、目標物追蹤等工作。三個行為依其需求各自從機器人前半部的 9 個超音波感測器與自我位置估測的資訊取得所需要的訊息，而後通過模糊控制來得到該行為的輸出。最後由本章所設計的融合機制針對該時刻所得的環境資訊求得三個行為的融合比例，如圖 3.1、3.2 所示。

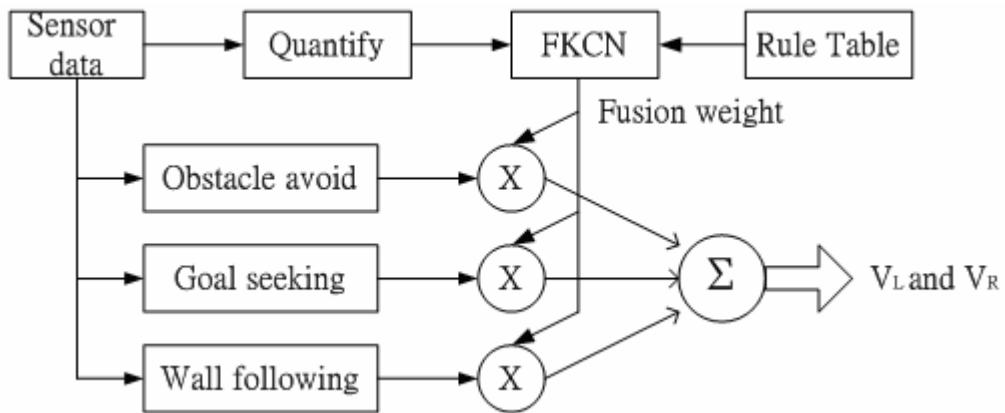


圖 3.1 導航任務行為融合的設計

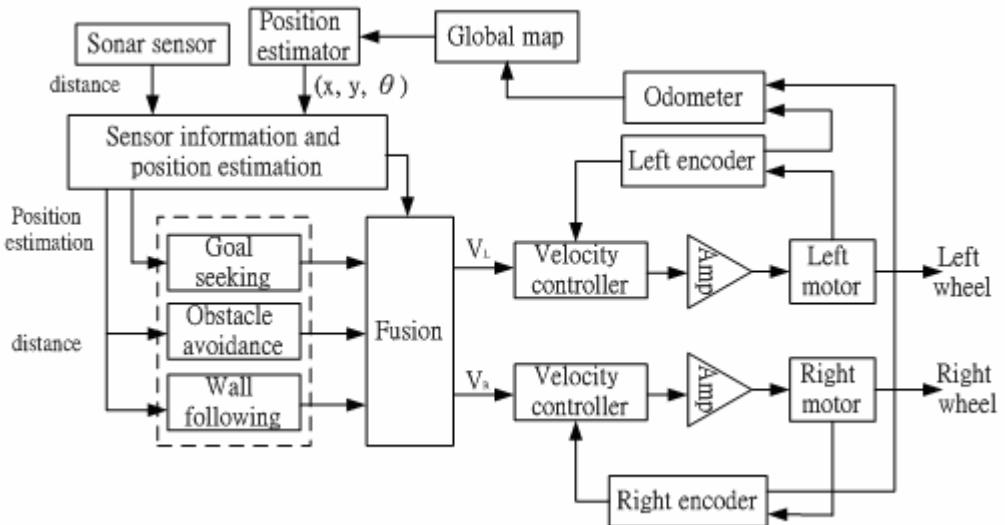


圖 3.2 導航任務行為融合架構

3.2 導航行為融合的設計

依據『相似環境之下，機器人的行為融合比重應該接近』的假設，我們將設計一個機制來比較輸入的環境感測數列(代表此時機器人所處的環境)與預先已給定行為融合比例的環境圖樣的相似程度—預設的環境圖樣，稱為典型圖樣，用來表示機器人在導航過程中遭遇某些較為容易處理的環境狀況時，其融合比例亦較為容易決定。典型圖樣的設定乃是因為在機器人導航前進時所面對的環境狀況隨時在變化，具有許多可能的環境類型可能發

生，所以我們難以對每種情形都定義其行為融合比例，於是我們選出其中幾種較有明顯特性且易於決定其行為融合比例的環境類型做為典型圖樣。

我們將預設的環境典型圖樣作為模糊分類網路(Fuzzy Kohonen Clustering Network, FKCN)[18]架構中 input layer 到 distinct layer 的鍵結值，另以所設定之融合比例做為該典型圖樣所對應的行為融合值，FKCN 的架構將在下一節中加以描述。在實際導航行進時，透過 FKCN 網路，我們在網路的最末端獲得了由輸入的環境資訊轉換成的圖樣與典型圖樣之間的相似程度，當與某一典型圖樣相似程度越高時，表示輸入的環境資訊與該典型圖樣所表示的環境越接近，則輸出的行為融合比重也越加的相似。網路中最後輸出的融合比例即是透過對於各典型圖樣相似程度乘上該典型圖樣的輸出比例，將之加總而得到在該環境之下行為融合比例，見圖 3.1。如此一來，融合比例便可直接由環境感測資訊所轉換成圖樣而產生。在此我們注意到網路中的鍵結值並非經由 FKCN 網路的訓練方式得到，對此我們做一說明：當輸入環境向量到 FKCN 網路時，首先會計算輸入向量到每一個典型圖樣之間的距離(2-norm)，當輸入向量與典型圖樣差異越大時，距離層輸出的值增加極快，所以對於輸入的環境向量與典型圖樣差異越大，會明顯表現出越低的相似程度，且作為典型圖樣的向量彼此之間具有相當的差異程度。所以當一般化的環境向量輸入時，透過 FKCN 依然能夠加以分類。

單一行為的設計上，採用第二章之三個模糊邏輯控制器來決定該行為的輸出，包含閃避障礙物、沿牆行走、目標物追蹤三個行為，最後透過由 FKCN 網路輸出的相似程度計算而來的三個行為的融合比例作為三個行為最後輸出行為的融合比例。

3.3 利用啟發式網路歸類環境以決定行為融合權重

由於週遭環境影響機器人運動行為，所以此處利用 FKCN

對於環境加以辨識分類，並輸出針對此時環境所應採取的輸出行為融合比例。以下對於 FKCN 的網路架構我們將作一說明：FKCN 原本是應用於圖樣分類與辨識的一種類神經網路[18]，如圖 3.2 所示。沈良寰[19]跟黃信益[20]曾利用到該架構來設計其自走式機器人的導航系統，他們以 FKCN 直接控制機器人的速度，本文利用 FKCN 的架構並建立一規則表，將兩者結合成一個啟發性網路，透過這個網路來執行計算出三個行為表現出來的融合比例。此啟發性網路的輸入項是經過我們將得到的超音波感測器資訊予以量化後所產生的數列，輸出部分則經過各典型圖樣的相似程度乘上在各典型圖樣下其預設的融合比例得到該環境資訊下所推測的應有融合比例。細節部份我們將在下兩小節予以說明。

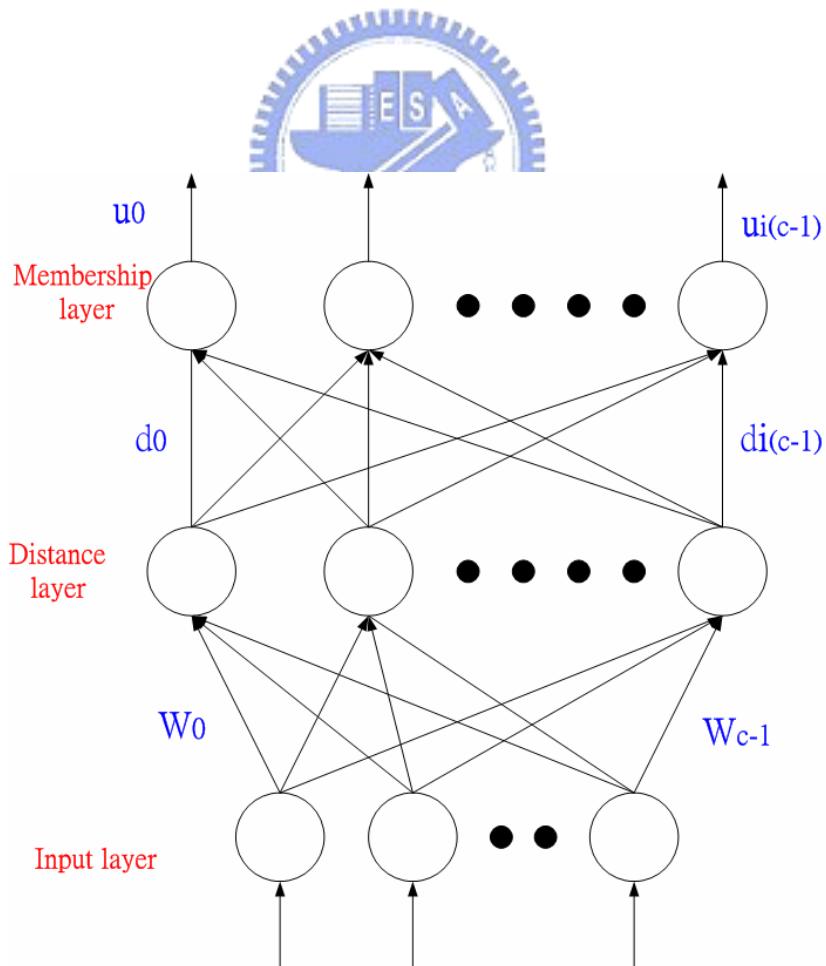


圖 3.3 FKCN 網路架構

3.3.1 Kohonen 模糊分類網路

如圖 3.3 所示，FKCN 是一種非監督式學習(unsupervised learning)的類神經網路，原本的用途是作為圖樣分類與辨識。圖 3.3 中 FKCN 的架構中，一共分成三層，不同層之間的神經元(neuron)的鏈結(linker)是完全連結的(fully connected)。架構圖中，最下面的一層是輸入層，待辨識的圖樣由此輸入；第二層是距離層，負責計算輸入的圖樣 X_i 與典型圖樣 W_j 之間的距離，也就是相異程度 d_{ij} ；第三層是歸屬層，負責計算輸入圖樣相對於典型圖樣的歸屬度 u_{ij} ，亦即用以表示相似程度有多高，歸屬度的值介於 0 到 1 之間，若為 1 的話，則表示輸入圖樣與某典型圖樣完全一致。其中對於輸入圖樣 X_i 與典型圖樣 W_j 我們皆用有序向量加以表示。

典型圖樣是透過學習法則不斷訓練得到的，以下是 FKCN 的學習法則：

步驟一：隨機地設定初始鍵結值 W_j ；設定鄰域大小(NE)為 $c/2$ ， c 是輸出神經元的數目；設定鍵結值更新量 ΔW_j 為 0；設定學習速率 η 介於 0 到 1 之間的值。

步驟二：輸入訓練圖樣 X_j ，計算每一個距離 d_{ij} ， d_{ij} 的定義如式(3-1)：

$$d_{ij} = \|X_i - W_j\|^2 = (X_i - W_j)^T (X_i - W_j) \quad (3-1)$$

再計算每一個歸屬度 u_{ij} ， u_{ij} 的定義如式(3-2)跟式(3-3)

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } d_{ij} = 0 \\ 0, & \text{if } d_{ik} = 0, \quad (k \neq 0, k \geq 0, j \leq c-1) \end{cases} \quad (3-2)$$

c 等於典型圖樣的數目。

否則

$$u_{ij} = \left(\sum_{l=0}^{c-1} \left(\frac{d_{ij}}{d_{il}} \right) \right)^{-1} \quad (3-3)$$

步驟三：對於每一個輸入圖樣，選擇一個輸出神經元 j^* ，($0 \leq j^* \leq c-1$)，使得 $d_{ij^*} = \min(d_{i1}, d_{i2}, d_{i(c-1)})$ ，再根據式 3-4 跟 3-5 更新鍵結值 W_j 。

$$W_j(k) = W_j(k-1) + \eta \times \Delta W_j, \quad k : \text{the } k\text{th state} \quad (3-4)$$

$$\Delta W_j(k) = \Delta W_j(k-1) + u_{ij^*} \times (X_i - W_j) \quad (3-5)$$

在此， j 包含輸出神經元 j^* 與其鄰域(NE)中的每一神經元。
重複步驟二跟步驟三，直到 W_j 不改變。

步驟四：如果 $NE=0$ ，那即表示訓練過程完成，否則 $NE=NE-1$ ，

回到步驟二繼續訓練。

此學習法則的目的，就是要將所有被訓練的圖樣加以分類，當訓練完成後，鍵結值 W_j 則代表第 j 類的典型圖樣。典型圖樣決定之後便可以進行圖樣辨識的工作，辨識的方法就是執行學習法則的步驟二。

式子 3-3 源自於 Bezdek 所發展的疊代法則，式中的總和等於 1，其簡要證明如下：

$$\sum_{j=0}^{c-1} \left(\sum_{l=0}^{c-1} \frac{d_{ij}}{d_{il}} \right)^{-1} \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\frac{d_{i0}}{d_{i0}} + \frac{d_{i0}}{d_{i1}} + \dots + \frac{d_{i0}}{d_{il}}} + \frac{1}{\frac{d_{i1}}{d_{i0}} + \frac{d_{i1}}{d_{i1}} + \dots + \frac{d_{i1}}{d_{il}}} + \dots + \frac{1}{\frac{d_{il}}{d_{i0}} + \frac{d_{il}}{d_{i1}} + \dots + \frac{d_{il}}{d_{il}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{d_{i0}} + \frac{1}{d_{i1}} + \dots + \frac{1}{d_{il}}} \times \left(\frac{1}{d_{i0}} + \frac{1}{d_{i1}} + \dots + \frac{1}{d_{il}} \right) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (3-7)$$

利用此點，我們使三個行為在任何環境下輸出的融合比例總和都是 1。經過相似度乘上各典型圖樣的預設行為融合比例之後，其輸出的總行為融合比例依然等於 1。所以融合比例相對之間的數值等於存在有正規化的意義。

3.3.2 啟發性網路—結合 FKCN 與規則表

圖 3.4 是我們利用 FKCN 網路所設計出來的行為融合啟發性網路架構。圖中的下半部結構就是我們前一小節所講的 FKCN 的架構，用以作圖樣的辨識，計算輸入圖樣與典型圖樣的相似程度；上半部則包含我們所設計的規則表跟定義出來的目標方位，用以計算對應於輸入的環境訊息所應產生的行為融合比重。

在本論文中，我們所使用來探測環境資訊的是超音波感測器，用以量測環繞機器人運動時周遭的距離資訊，超音波感測器在機器人上共裝置了 12 個，前半部 9 個，後半部由 3 個負責，根據我們的需求只使用前方的 9 個超音波感測器資訊，其分布如圖 3.5 所示。

對於我們所使用的正前方 9 個感測器資訊，設計上我們將之分成 5 組，分別表示左右兩側，左前跟右前方還有正前方的資訊，如圖 3.5 所示。我們依照超音波感測器偵測而得的資訊按照由左至右的順序寫成一個有序的向量，此一向量內包含的元素總共有 5 個，依序為左側、左前方、正前方、右側、右前方，藉以表示此時的環境資訊，尤其要說明的是我們收到的超音波共有 9 個，在分組的過程中，同一組只取其最小值，要如此做的原因在於我們希望在同一個方向內我們所得的距離能夠有一個較安全的讀值，以免機器人在反應時發生危險。

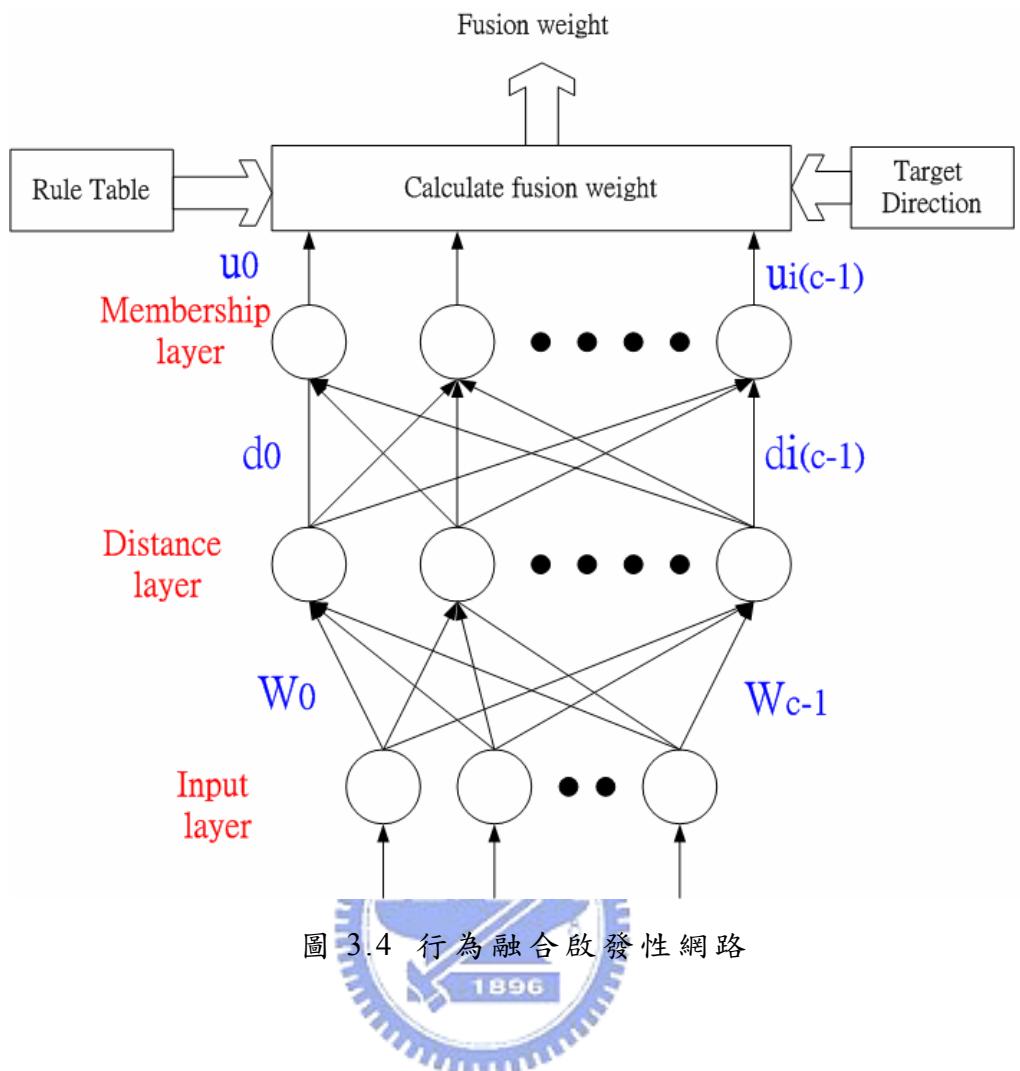


圖 3.4 行為融合啟發性網路

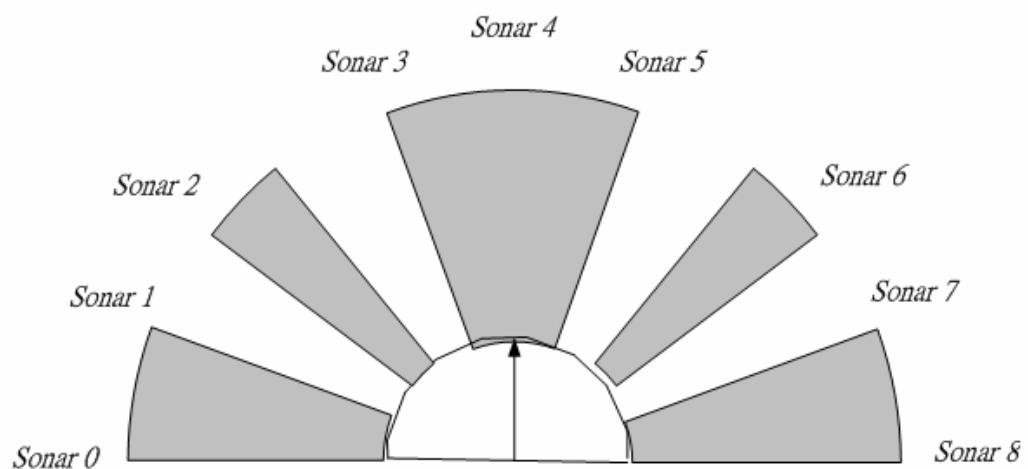


圖 3.5 超音波偵測方向

$$\text{Front-Sonar} : \min(\text{Sensor}[3,4,5])$$

$$\text{Front-left} : \text{Sonar}[2] ; \text{Front-right} : \text{Sonar}[6]$$

$$\text{Left-side} : \min(\text{Sonar}[0,1]) ; \text{Right-side} : \min(\text{Sonar}[7,8])$$

依上述設定，超音波在不同的環境下都可以取得一組不同的感測向量：

$$l_j = \{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\} \quad (3-8)$$

g_i 為第 i 組感測器的讀值，而 l_j 則為我們網路中的輸入向量，代表此時我們的環境資訊，根據環境辨識的概念，我們將每一個感測向量都視為一個圖樣。因此在不同的特定環境中我們便可以得到不同的特定圖樣，以一個有序向量加以表示；此外針對某些具有較有明顯特性且易於決定其行為融合比例的環境類型做為典型圖樣。此特定圖樣就是指對應於特定環境類型的典型圖樣，亦即我們在 FKCN 網路中所指定的鍵結值 W_j ，相對於原本 FKCN 的設計，在此我們的鍵結值改由以指定方式得到，而非透過其訓練法則，理由說明如下。

就 FKCN 的訓練法則而言，前提是需要有大量的資料來完成整個訓練，且在訓練過程中需要計算測試點與典型圖樣的距離，然後再計算典型圖樣的變動以做為訓練停止的條件。就此而言，與我們需求有部分的不同，因為我們只是需要 FKCN 這樣的網路架構來幫助我們做辨識的工作，對於典型圖樣的分類樣式與數目並不需要對所有可能的結果做分析。所以我們直接用指定的方式，透過我們對於較具有代表性的環境類型跟行為融合的結果明顯的環境資訊將其列為主要的類別，作為我們典型圖樣的設定即可。所指定的典型圖樣內其行為融合比例的設定值是由我們先予以設定初值，再經由不斷的模擬去修改其值使其能表現良好，最後在實驗過程中加以驗證來產生。

當典型圖樣設定完成後，我們將之指定為 FKCN 架構中第一層輸入層到第二層距離層的鍵結值，在距離層我們利用(3-1)

式來計算輸入的圖樣 X_i 和每一個典型圖樣 W_j 之間的差距 d_{ij} 。

(3-1) 式是一個 2-範數(2-Norm)的方程式，當差異越大時， d_{ij} 會快速增加。如果 d_{ij} 等於零，表示輸入圖樣與典型圖樣完全相同。在 FKCN 架構中最上層的歸屬層部份，我們利用(3-2)與(3-3) 式將輸入圖樣 X_i 跟每個典型圖樣 W_j 之間的距離映射成歸屬度 u_{ij} 。歸屬度以到之間的值表示，當其值越大表示相似程度越高。

每一個典型圖樣都代表某一環境類型，根據此一環境類型，我們給予配置當此之時的行為融合權重，也就是說，事先我們要建立一規則表。每一條規則的 IF-PART 是典型圖樣與目標方位；THEN-PART 是參考的行為融合比例。規則的數目等於典型圖樣的個數。

歸屬度 u_{ij} 代表輸入圖樣 X_i 與典型圖樣 W_j 的相似度，由(3-7)式的證明，可知全部規則的總激發量等於 1。最後決定行為輸出融合比例的，恰等於每一個典型圖樣的激發量乘上其參考的典型圖樣所屬的行為融合比例，其總和也等於 1。

3.4 網路輸入：感測器與目標方向的量化

依前所述，我們將正前方的超音波資訊分為 5 組，得到一個有序向量作為啟發性網路的輸入，機器人前半部環境的 9 個超音波感測器被分為 5 組如圖 3.4 所示，其中第 2 組跟第 4 組分別負責左前方跟右前方各有一個超音波感測器來偵測；為於兩側部份的第 1、第 5 組則各有兩個，當偵測時兩側的超音波資訊取其最小值，避免感測器誤差的發生；正前方部份的偵測則由三個超音波來負責，傳回的距離訊息一樣取其最小值作為環境向量的輸入項。如此一來已知各組之內的超音波感測器都會取其最小感測

值作為該組的代表值，得到的這 5 個數據分別表示移動式機器人的左側、左前、正前方、右前、右側這五個方向的障礙物距離資訊。這五個值在轉為一有序向量輸入啟發性網路前，我們使其先經一量化的處理。第 1、2、4、5 組的值根據下面(3-9)式作量化，在量化之時，我們對於障礙物距離小於 90 cm 跟障礙物距離大於 270 cm 的部分，分別都視作極近與極遠，當傳回資訊介於這兩種範圍內時，都只以 1 跟 4 來表示。至於障礙物距離資訊在兩者之間的，我們分別以 1 到 4 之間的數來表示。

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq d_i \leq 90 \\ 1 + (d_i - 90) / 60 & \text{for } 90 < d_i \leq 150 \\ 2 + (d_i - 150) / 60 & \text{for } 150 < d_i \leq 210 \\ 3 + (d_i - 210) / 60 & \text{for } 210 < d_i \leq 270 \\ 4 & \text{for } d_i > 270 \end{cases} \quad (3-9)$$

d_i 表示第 i 組的感測值， i 等於 1、2、4、5



第 3 組中代表正前方的障礙物距離，由於正好在機器人的前進方向上，為了可以即時閃避障礙物，所以對於歸類為較近的距離部份有必要拉長，於是我們視障礙物距離 120 cm 以內的都當距離 1 處理，而障礙物距離 300 cm 以上的都當作 4。兩者之間的距離輸入則以 1 到 4 之間的數字表示。第三組感測數值根據(3-10)式作量化。

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq d_i \leq 120 \\ 1 + (d_i - 120) / 60 & \text{for } 120 < d_i \leq 180 \\ 2 + (d_i - 180) / 60 & \text{for } 180 < d_i \leq 240 \\ 3 + (d_i - 240) / 60 & \text{for } 240 < d_i \leq 300 \\ 4 & \text{for } d_i > 300 \end{cases} \quad (3-10)$$

d_i 表示第 i 組的感測值， i 等於 3

在量化的等級上，如果量化的等級太多會增加規則表上構建的困難度，反之，若量化的等級太小，則無法明確表達出環境類型。所以我們在量化等級上只有區分成 1 到 4 級，分別表示極近、稍近、稍遠、極遠，而處於極近跟極遠之間我們使用介於 1 到 4 之間的數字，包含小數來代表，是為了增加解析度，使得在計算差異度與相似程度時能較為仔細。

同時，規則表中另一輸入—目標方向也要予以量化。量化的理由說明如下：我們考慮的是 FKCN 的環境圖樣的典型圖樣中對於目標所在方向是否與行為具有相關性：舉例如下：就障礙物迴避而言，如果障礙物在右側，而目標位於正前方的方向，此時障礙物迴避的動作實屬多餘，那這個時候，障礙物迴避應如何表現行為的輸出呢。這麼說好了，『假設目標物的方向與我們如何迴避此一障礙物的方式有關』。所以在建立 FKCN 的典型圖樣時將目標物所在的方向列為參數之一。所謂目標方向，我們將之定義成目標點的位置相對於目前移動式機器人的正前方的方向。我們將目標方向分割成五個範圍，如圖 3.6 所示。以方程式(3-11)表示於下：式中 ϕ 是目標方向值與機器人目前行進方向上的夾角。

$$dir = \begin{cases} 1 & \text{for } 90 \leq \phi \leq 180 \\ 2 & \text{for } 30 \leq \phi < 90 \\ 3 & \text{for } -30 \leq \phi < 30 \\ 4 & \text{for } 30 \leq \phi < -90 \\ 5 & \text{for } -90 \leq \phi < -180 \end{cases} \quad (3-11)$$

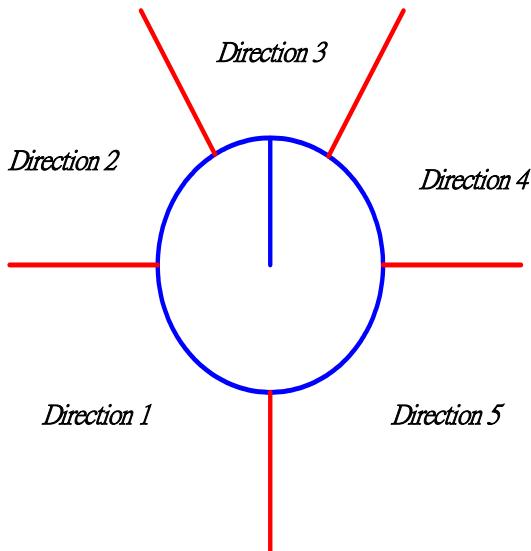


圖 3.6 目標方向區分示意圖

3.5 典型圖樣與規則表的建立

FKCN 網路中典型圖樣的設定即是我們將較具有明顯特性且易於決定其行為融合比例的環境資訊所對應的行為融和比重加以列入，依據可能的數種情況分別預估出在該環境下移動式機器人行為融和比重，並將之建成一張規則表。規則表是依據移動式機器人所在的環境類型而設計的。我們考慮的規則表中，共含有八種環境類型，如圖 3.7 所示。當然，在機器人實際在環境中移動時所面對的環境類型絕對不止這八種，然而只要我們將這八種環境圖樣加以模糊化就可以用來應付其他我們未予考慮的環境類型，也就是說將我們的設計做一般化的處理，便可適應更多的環境類型，因此透過 FKCN 的架構我們只需建立少數的典型圖樣跟規則即可。針對圖 3.7 作為典型圖樣的設定，並利用啟發性網路比較環境資訊與典型圖樣的相似度，我們將其流程說明如下：在圖 3.4 下半部分的 FKCN 的架構圖，一共可分成三層，不同層之間透過鍵結加以連接而成。當我們將 5 個方向的感測資訊作為

一組『感測向量』作為 FKCN 的輸入項。尤其要說明的是，第一層到第二層之間的鍵結值我們以指定的方式來決定，即是將我們典型圖樣的 8 組向量作為鍵結值。透過 FKCN 的網路架構，我們可以得到感測到的環境資訊與我們原本設定的典型圖樣那個圖形較為接近，同時依照—“對於相似的環境感測結果，應有相似的行為輸出表現”—這一推論得到三個行為之間的融合比例。FKCN 網路最後輸出的部份，是輸入的環境類型相對於典型圖樣的相似程度，如果相似程度越高，則我們推論三個行為的輸出應該越接近原本最相似的典型圖樣的輸出。當然，如果分類出來的環境群組構多的話，可以明顯對應到所發生的各個環境輸出，更能寫實地反映週遭環境與當時應採取的行為融合比例的應對關係。

關於典型圖樣如何被定義出來的問題，目前定義是以考慮三種行為在什麼樣的環境資訊會必須要完全被激發的狀態，藉由較為偏向某一單一行為被激發到最高融合比例時，作為移動式機器人融合的基本典型圖樣，如此一來對於其他較為不明顯哪個動作應該被完全輸出的環境類型，將之視為由典型圖樣為基底所構成的圖樣，參考圖 3.8，其表示了面對一些簡單環境時移動式機器人的行為輸出。當我們在建構規則表時，將目標方向也考慮進去，因為目標所在方向與行為具有相關性，透過對於目標方向的量化，我們得到了表 3.1 五個目標方向上之典型圖樣行為融合規則表。

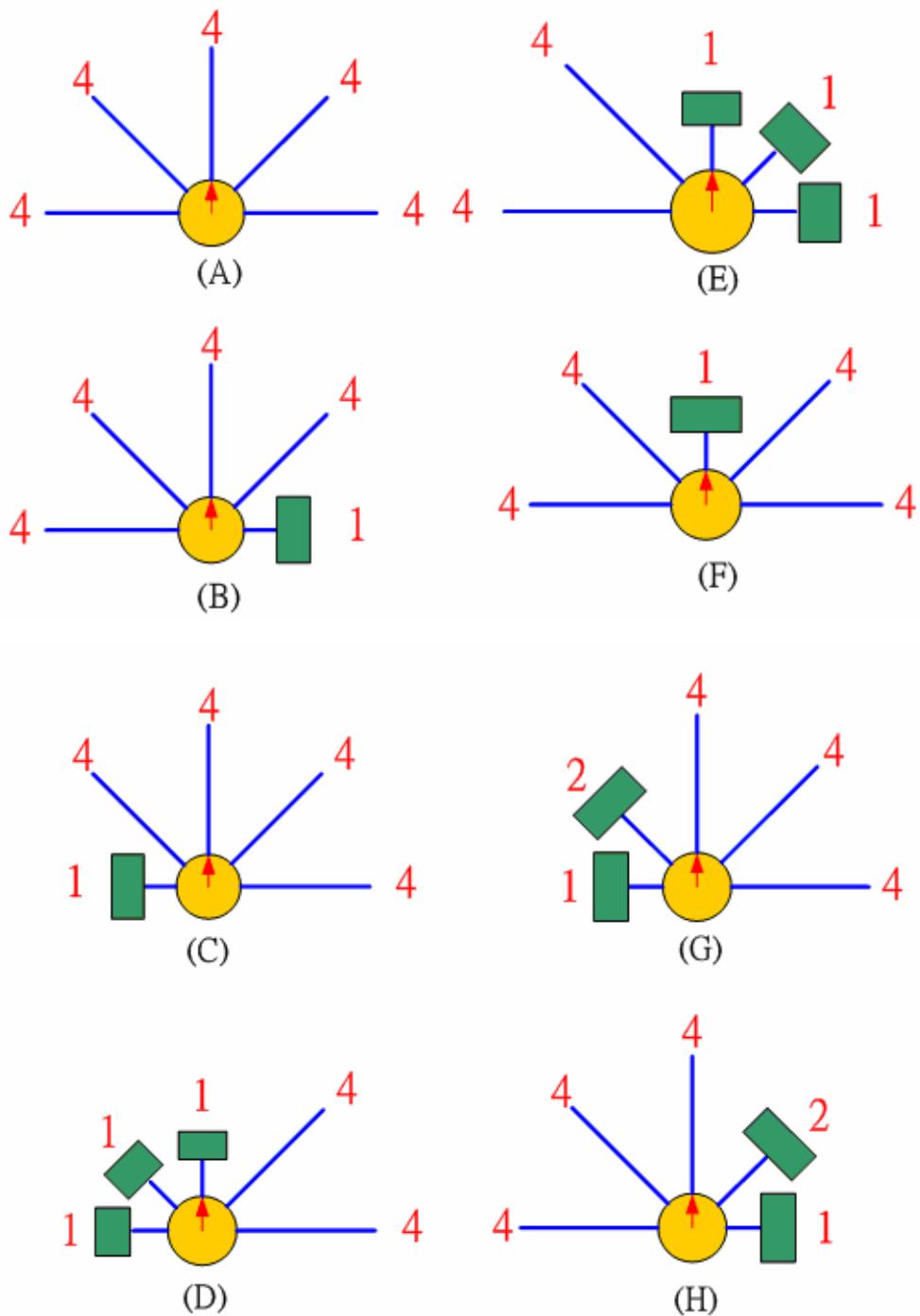


圖 3.7 八種典型圖樣

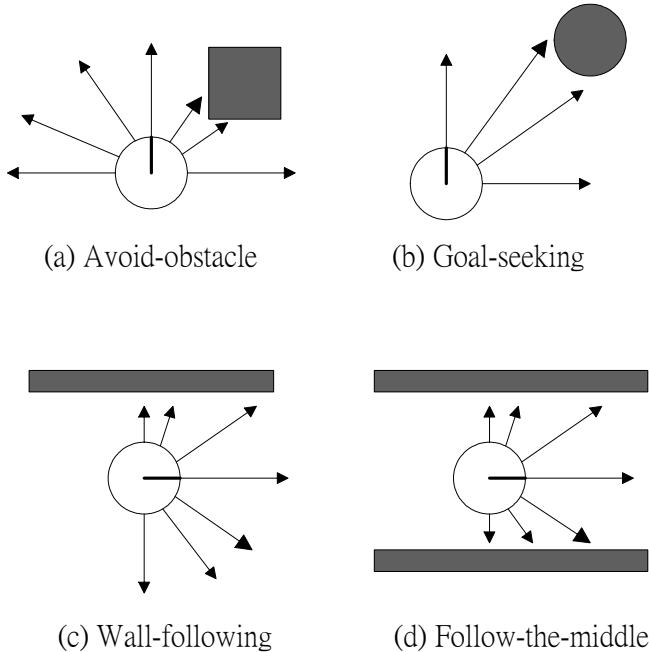


圖 3.8 環境類型與行為表現可能關係

對於規則，我們先回顧量化距離(3-9)與(3-10)式。了解有序向量中，數字 1 跟 4 分別代表的距離遠近，就圖 3.7 之 A 為例，由圖 A 所示，移動式機器人前半部的五個方向上所偵測到的障礙物距離皆為 4，這表示移動式機器人的周圍，至少前方半圓 270 cm 內沒有障礙物的存在，因此對於我們在該典型圖樣所示的環境類型 A 中，目標物追蹤行為的輸出比重佔有率的比例為 1。因其沒有障礙物需要迴避。亦無牆壁可供沿牆行走的行為來作用，在我們所建立的規則表中表格 3.1，佔有的比例依序為：目標物追蹤(簡寫為 W_g)，障礙物迴避(簡寫為 W_o)，沿牆行走(簡寫為 W_w)。

由圖樣 B 與 C 表示的是分別為左側與右側存在障礙物的情況，在這種情形下，我們依據目標物所在的方向不同，所採取的融合比重也隨之改變。對於圖 B 來講，機器人的右側具有障礙物，在這種情況下假設目標物在左側的情況，則對於右側的障礙

物並不在機器人目標物追蹤行為設計輸出所要前進的目標方向上，所以沒有閃避障礙物的必要，因此在表格中該環境向量下的目標物追蹤的行為融合輸出比重為 1，而當目標物在與所偵測到的障礙物在同一個方向時($dir = 4$ or 5)，該障礙物對我們前進到目標物為止的路徑上造成阻礙，依據方向 4 跟 5 的不同，我們將行為融合的比重分給目標物追蹤跟沿牆行走兩個行為。對於圖 C，反之亦然。

接下來說明圖 D 跟圖 E，這兩個圖形表示的分別是右半邊跟左半邊被障礙物擋住的情況，對於這兩種情形，我們將如果目標物在障礙物同方向時，發現閃避障礙物的行為融和輸出比例會極遽升高，同時假設目標物在另外沒有障礙物阻擋的方向上時由於移動式機器人的正前方， $dir = 3$ 的地方也具有障礙物，所以閃避障礙物的行為融和輸出比例雖然降低，但是依然維持一個比重之上。



圖 F 的部份則是機器人的正前方有障礙物的情況，此時依據目標物所在的方向不同，對於我們行為輸出的融和比例有很大的影響。如果目標物在 $dir = 3$ 的方向上，那麼閃避障礙物的行為融和輸出的比重會升高，如果目標物不在正前方的方向的話，那麼目標物追蹤的比重會慢慢佔去閃避障礙物行為設計的部分比重。

圖 G 跟圖 H 部分，則是表示原本圖二到圖六的中間情形，對於不屬於二到六的情況加以定義其行為融合比例。

表3.1 典型圖樣行為融合規則表

THEN-Part(behavior fusion weight)												dir=3				dir=4			
IF-Part			dir=1				dir=2				dir=3		dir=4				dir=5		
prototype pattern	W _g	W _o	W _w	W _g	W _o	W _w	W _g	W _o	W _w	W _g	W _o	W _w	W _g	W _o	W _w	W _g	W _o	W _w	
4 4 4 4	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
4 4 4 1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	
1 4 4 4	0.5	0.5	0	0.7	0.3	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	
4 4 1 1	0.2	0.8	0	0.4	0.6	0	0	0.7	0.3	0	0.7	0.3	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	
1 1 1 4	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0	0	0.7	0.3	0.4	0.6	0	0.2	0.8	0	0	0	
4 4 1 4	0.4	0.6	0	0.2	0.8	0	0	1	0	0.2	0.8	0	0.4	0.6	0	0.4	0.6	0	
1 2 4 4	0.4	0.6	0	0.5	0.5	0	0	0	1	0.3	0	0.7	0.7	0	0.3	0	0.7	0	
4 4 4 2	0.3	0.3	0.7	0	0.3	0.3	0.7	0	0	1	0.5	0.5	0	0.4	0.6	0	0.4	0.6	0

第四章 機器人硬體架構

4.1 機器人系統

本論文以實驗室自行研發之自走式機器人作為實驗的平臺，如圖 4.1 所示。此機器人第一層(最底層)為驅動部，由兩個直徑 12.5 cm 的膠輪加上前後兩個輔助輪保持平衡，驅動馬達為兩顆 Pittman 所生產的直流伺服馬達，工作電壓為 12 Volts，齒輪比為 19.7：1，無載最大轉速為 4916 rpm，經過減速後為 250 rpm，最大轉矩為 67.1×10^{-3} N·m，每組 DC 馬達都附有一組 500 pulse per revolution 的軸編碼器(Encoder)。另外在底盤的位置，裝置有鉛酸電池，可讓機器人以獨立電源的方式在室內運作。

第二層為主控部，負責機器人的資料處理、運算以及控制與通訊的核心，主控電腦是採用的威盛的嵌入式電腦 EPIA-TC10000，CPU 為 1 GHz，記憶體大小 126 MB；使用串列傳輸埠連接運動控制卡及接收超音波發射接收模組所傳回來的資訊；無線網路通訊方面採用無線區域網路 IEEE802.11b 傳輸，使用 Gembird 公司生產的 PCMCIA wireless LAN card，並配合一張 PCI 的轉接卡，最大傳輸速率可達 11 Mbps。

第三層為電源部，負責供給機器人所需的電源。這層包含一組 DC/CD Converter：12V/5V(10A)，負責將鉛酸電池的 DC 12V 轉為 DC 5V 供給工業電腦使用，另外還有兩組 DC 馬達的 Servo Driver：L298，用來驅動 DC 馬達以帶動機器人行進。

第四層(最上層)為感測部份，裝有一組由實驗室研發的超音波控制模組與 12 個超音波感測器。超音波控制模組用單晶片 8051 來控制 12 個超音波感測器的發射時序以及負責接收反射回來的超音波，並計算在這之間的時間差，再透過 RS-232 傳輸線，

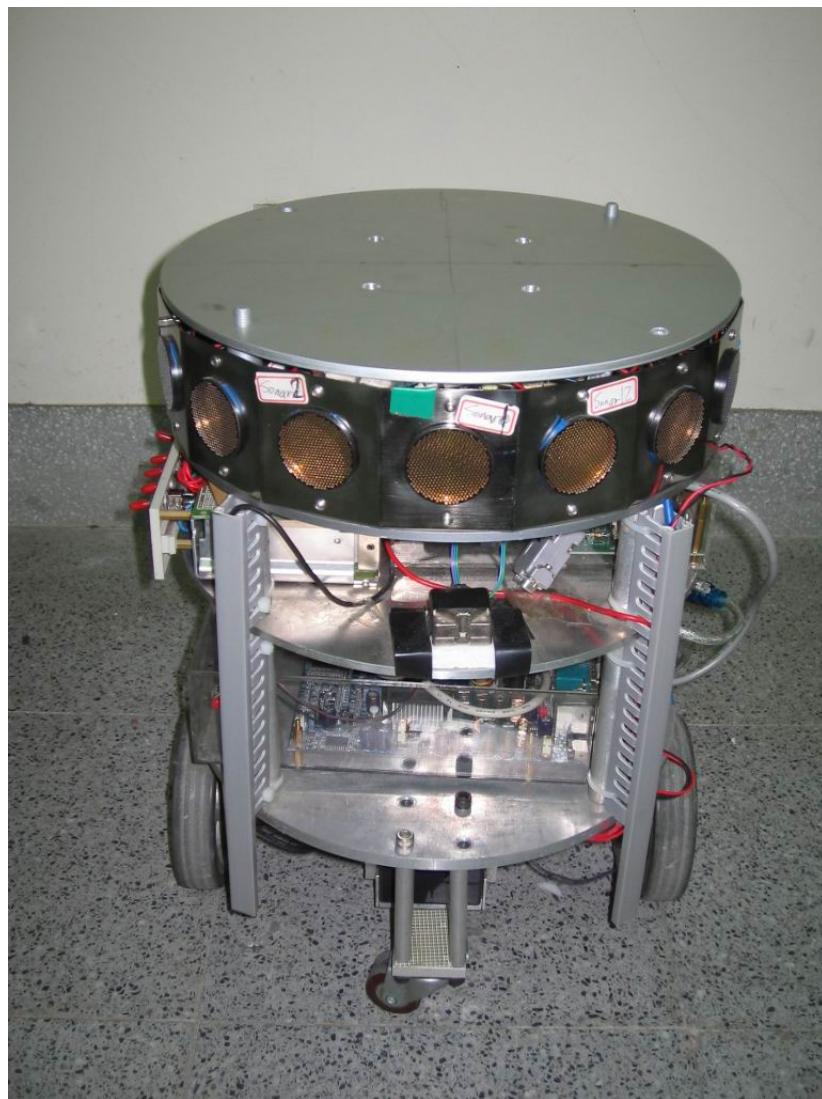


圖 4.1 實驗室自行研製之自走式機器人

將 12 個超音波感測器的資料傳回到工業電腦的 Com-1 埠。

4.2 機器人控制架構

機器人的控制架構如圖 4.2 所示，架構中以嵌入式電腦為中心，負責連結所有周邊系統，下方為馬達控制系統，上方為超音波感測系統，另外還有無線網路系統以作為我們遠端操控使用。

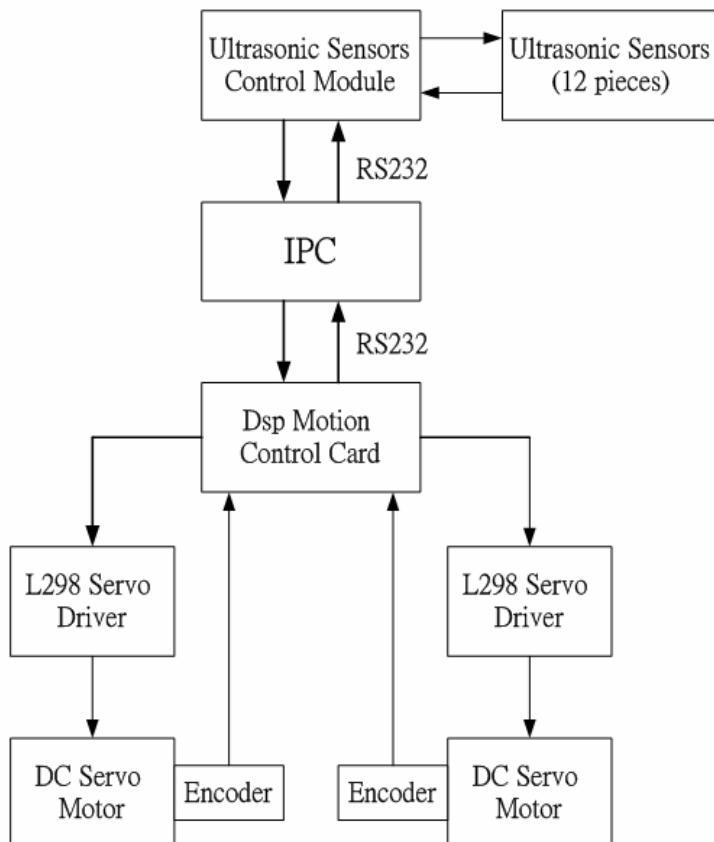


圖 4.2 機器人控制系統架構圖



4.2.1 馬達控制系統

本論文使用的是實驗室所開發的 DSP Base 雙軸運動控制卡能同時控制兩個馬達，此運動控制卡除一般 PID 同服控制外，亦包含了路徑追蹤控制器，用以追蹤路徑產生器所下的命令，驅動電路也是使用實驗室研發的 L298 Servo Driver 模組。當 IPC 接收到超音波所傳回來的環境資訊後，同時進行啟發性網路找出行為之間的融合比例並執行三個行為模組的模糊控制器產生各行為的輸出(左輪與右輪的速度值)，用以決定輸出的機器人移動方向與速度並透過 DSP 運動控制卡將速度命令(cm/s)分別送到左右兩輪的馬達。設經過啟發性網路的計算，我們得到三個行為的輸出融合比例：目標物追蹤(W_g)、閃避障礙物(W_o)、沿牆行走(W_w)，且各行為輸出的左右兩輪行進速度的調整值分別為 V_{dif-g} 、 V_{dif-o} 、

v_{dif-w} ，則機器人輸出的左右輪速度可表示為(4-1)式，其中 v_l 為機器人本身直線前進時的線速度。

$$\begin{cases} V_L = v_l + W_g \times v_{dif-gL} + W_o \times v_{dif-oL} + W_w \times v_{dif-wL} \\ V_R = v_l + W_g \times v_{dif-gR} + W_o \times v_{dif-oR} + W_w \times v_{dif-wR} \end{cases} \quad (4-1)$$

4.2.2 超音波感測系統

機器人所使用的超音波控制模組如圖 4.3 所示，此模組以單晶片 8051 為主控 IC，負責 12 組超音波感測器的發射與接收程序，使得 12 個超音波分為 3 個發射群組，以超音波每 0.25 sec 偵測周圍環境區域一周，在此一週期內再與以分開成三個小週期使得同一時間發射的超音波感測器在裝置上的發射角約略相差 90° ，以免超音波感測器之間互相感擾，並利用 8051 內建的 Timer 功能來計算超音波發射與接收的時間差，並將此時間差透過 RS-232 傳輸給主控電腦以計算障礙物的距離。超音波偵測完周圍環境一圈後，回傳的資料為 24 Bytes，每兩 Bytes 表示某一方向上的超音波發射與接收的時間差，及該方向與障礙物的距離。

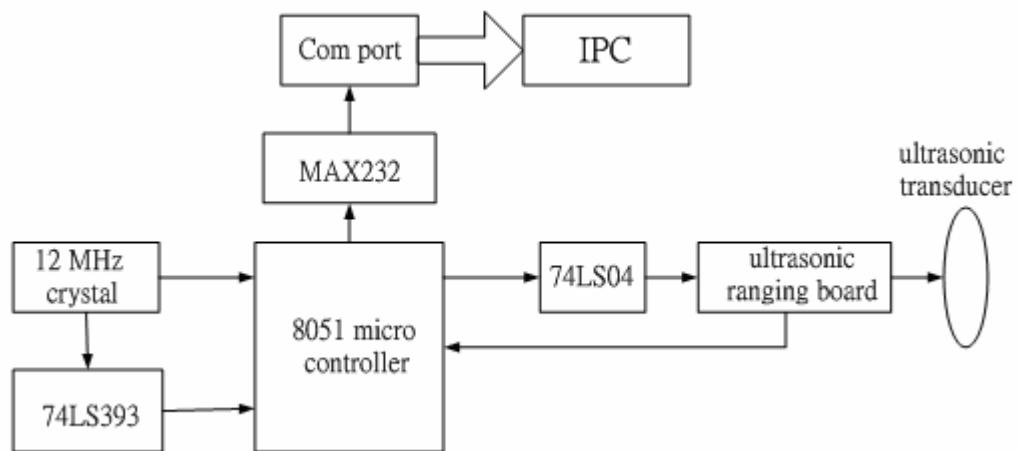


圖 4.3 超音波控制模組設計方塊圖

4.3 超音波感測器的特性與設計原理

由於超音波行進時遇到障礙物的反應跟一般音波一樣會反射，除非障礙物的表面是海棉等會吸收超音波的物質，因此可以利用計算超音波發射和接收到反射波之間的時間差，換算出障礙物和超音波感測器之間的距離。音波於空氣中的傳播速度，受到環境影響，其關係式如(4-2)式，其中 T 代表攝氏溫度($^{\circ}\text{C}$)， V_s 為音波傳播速度。超音波的傳播速度如果以室溫 25°C 來計算，音速的理想值為每秒 346 公尺。因此以超音波來量測距離時，就可以利用先量測超音波發射跟接收到反射波的時間差之後再乘上超音波的傳送速度，就可以得到被測物的距離。而因為此距離為音波來回的長度，所以實際上的距離為此距離的一半，如式子(4-3)所示。式中 D 為障礙物與超音波感測器之間的距離， Δt 為超音波發射和接收到反射波的時間差， V_s 為音波在空氣中的傳播速度。

$$V_s = 331 + 0.6 \times T \quad (\text{m/s}) \quad (4-2)$$

$$D = V_s \times (\Delta t / 2) \quad (4-3)$$

超音波感測器的優點包括：測量面較寬、不受光線影響、表面量測準確、提供簡單直接而易於處理的距離資料、對人體安全無害…等等。而其缺點為：易受感測物的反射面、反射角度影響、角度解析度差。在機器人的運用上一般用於在建構環境地圖(Map building)、避障(Obstacle avoidance)等方面。

實驗室使用的超音波感測器模組即是使用單晶片 8051 來控制超音波的發射時序，在藉由 8051 的 I/O port 讀取超音波的 Echo 訊號，透過 8051 內建的 Timer 來計算從超音波發射到接收到 Echo 的時間間隔 Δt ，再透過 8051 的 RS-232 傳輸埠將所得的 Δt 傳送給工業電腦來計算出障礙物的距離。

4.3.1 超音波測距模組：Polaroid 6500 Range Module

本論文所採用的超音波感測器模組為 Polaroid 6500 Range Module。此超音波有效的量測距離約從 40 公分到 10 公尺，誤差為 1%，此超音波的頻率反應(frequency response)在 50 kHz 附近最佳，因此在其電路設計上是採用當接收到 INIT 上升的訊號後，測距模組(Ranging Board)就產生 16 個 400 Volts、49.4 kHz 的脈波推動感應器，如圖 4.4 所示，在發射 16 個 49.4 kHz 的脈波之後，Transducer 上仍維持 200 Volts 的直流偏壓。當超音波碰到環境中的障礙物時，一樣會反射回來，其中由於聲波在空氣中傳輸時強度會衰減，尤其以越偏離超音波感測器發射角度越遠的衰減的越厲害，所以當位於超音波感測器正前方方向的障礙物反射回來超音波後，一樣會以大概 49.4 kHz 的速度傳到感測器上，由於壓電效應的關係，超音波感測器的接收端，會產生一個 49.4 kHz 的脈波，由超音波感測器的測距模組加以感知，在送回一 Echo 信號給予 8051，通知 Timer 停止計數。

圖 4.4 為此測距模組的單一回波模式的時序圖，為了避免感測器上發射信號之後所產生的震盪(Ring)被當作返回信號而造成錯誤動作，在激發信號之後測距電路內部會產生一段內部空白(Internal blanking)訊號來禁能測距 IC，使其在這段時間內不動作，在此種情況下，可量測的最小距離約為 40 cm，如果待測物體小於此值，也可以藉由外部空白禁能(BINH)來降低內部空白時間。在此單一回映模式之下，我們只能偵測出最近的障礙物距離，當偵測的目標多於一個以上時，超音波發射一次會有多個反射信號傳送回來，此時就需使用另一種多重回映模式(multiple-echo mode)來重置 Echo 輸出，以便接收下一個反射回

來的訊號。我們的系統不考慮多重反映的情況，所以接收採用單一回映模式來作為測距模組的操作模式。

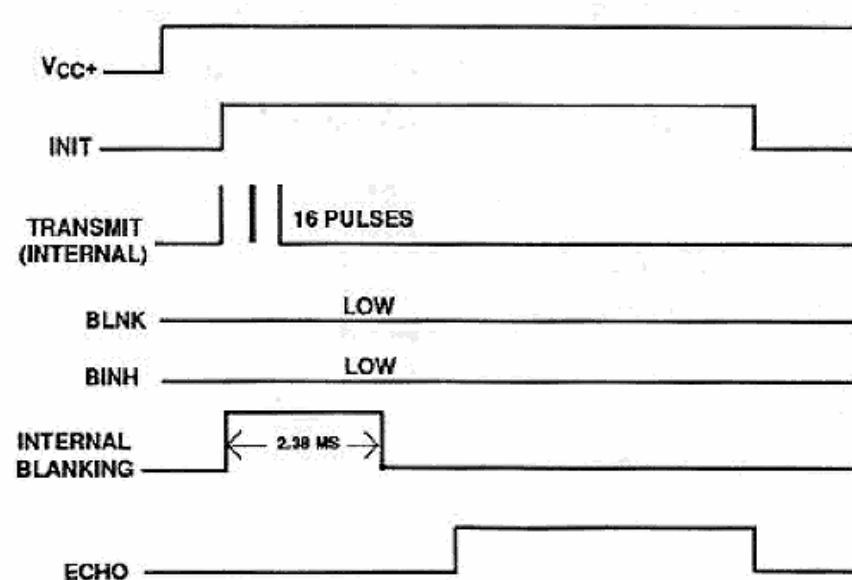


圖 4.4 Example of Single-Echo-Mode Cycle without Blanking Input

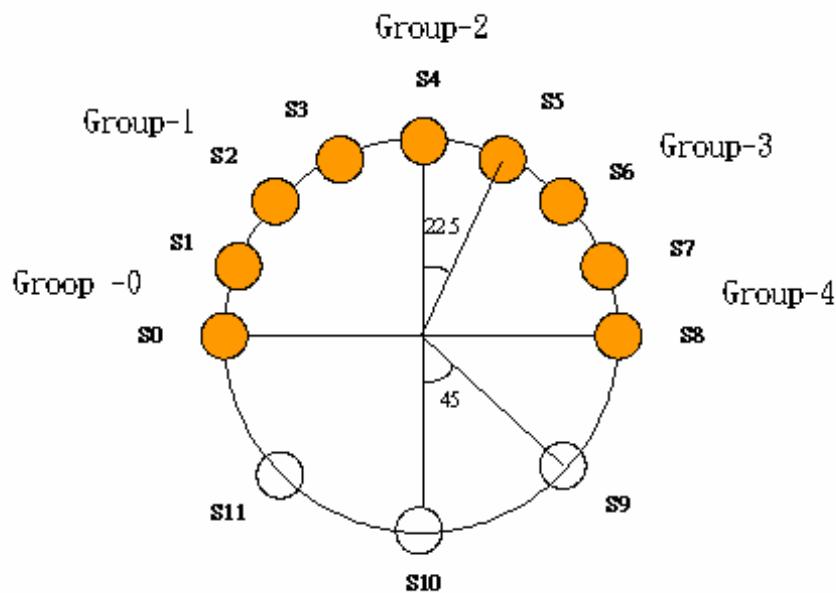
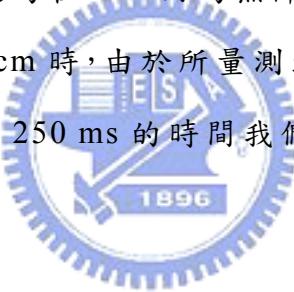


圖 4.5 超音波感測器配置圖

4.3.2 超音波感測器的配置與性能

由於超音波感測器具有指向性，在面對感測器 Transducer 大約 $\pm 15^\circ$ 時能量就衰減到 -15db，所以我們在超音波模組的配置規劃上，採取每個 Module 相隔 $22.5^\circ (\pm 11.25^\circ)$ ，如此就可涵蓋超音波感測器主要的感測範圍；而要圍繞機器人一圈共需要 16 個 Module， $16 \times 22.5^\circ = 360^\circ$ ；不過，由於機器人背後的資訊我們比較不需要，所以我們採取機器人的後方感測器模組的配置相隔 45° 的方式；所以總共使用了 12 個超音波感測器。配置方式如圖 4.5 所示。由於在一般室內環境中，所要量測的距離應該都會在 5 m 以內，所以我們就將所得的感測資料先判斷是否在 5 m 以內，若超過 5 m 則視為在 5 m 內為無障礙物的空間。另一方面，當距離近到小於 50 cm 時，由於所量測到的資料都會在 40~50 cm 之間。此外大約每隔 250 ms 的時間我們可以得到新的 12 個超音波感測器讀值。



4.4 機器人姿態估測系統

自我定位是智慧型機器人導航的重要資訊，機器人對本身位置的估測，直接影響到其各項判斷，當移動式機器人行駛時，必須隨時能得到最新的姿態訊息，包含位置以及指向的資訊，根據當時的姿態訊息，才能採取適當的控制命令，使移動式機器人以正確的速度與方向往我們想要去的方向移動，最後才能達到預定的目的地。機器人在平面上運動可以位置與朝向角來加以描述。此一指標是一個三自由度空間(x, y, θ)。

在本論文中，移動式機器人的行駛與定位完全依賴移動式機器人本身的里程表(odometer)[21]資訊來行駛與定位。里程表的

資訊與實際環境越能符合，則移動式機器人的行駛與定位越準確。里程表提供的移動式機器人的姿態資訊包含有 (x, y, θ) , (x, y) 為移動式機器人在整體座標系上的位置， θ 則用以表示目前移動式機器人的指向。最基本的里程表建立方式，首先必須先知道移動式機器人初始的姿態，再利用驅動馬達的編碼器(encoder)所累積的脈波(pulse)數來反推行駛距離及改變的角度，加上已知的初始狀態，即可知道目前的狀態。基於馬達編碼器的姿態估測，里程表的計算方式如下：

$$d\theta_e(k) = \frac{1}{W}(ds_r(k) - ds_l(k)) \quad (4-4)$$

$$ds(k) = \frac{1}{2}(ds_r(k) + ds_l(k)) \quad (4-5)$$

$$x(k) = x(k-1) + ds(k) \times \cos\left(\frac{\theta_e(k) + \theta_e(k-1)}{2}\right) \quad (4-6)$$

$$y(k) = y(k-1) + ds(k) \times \sin\left(\frac{\theta_e(k) + \theta_e(k-1)}{2}\right) \quad (4-7)$$

$$\theta_e(k) = \theta_e(k-1) + d\theta_e(k) \quad (4-8)$$

其中，

$x(k)$ 、 $y(k)$ ： k 時刻移動式機器人的座標位置。

W ：兩驅動輪間的距離。

$\theta_e(k)$ 、 $ds(k)$ ：移動式機器人在 $(k, k-1)$ 時間內的指向與距離差值。

$ds_r(d)$ 、 $ds_l(k)$ ：左右輪在 $(k, k-1)$ 時間內的移動距離。

此種方式雖然簡易，但是其精確度容易受到兩驅動輪打滑造成誤差、不平的路面造成的誤差、輪胎的磨損及載重不均造成輪胎半徑的改變等因素影響，因此在移動較遠的距離之後，容易造成不小的位置誤差。

第五章 模擬與實驗結果

為驗證本論文中所提出的行為融合架構是否能在各環境下依然能夠有效的發生作用，我們分別在電腦上模擬跟真實環境中來執行，以進行行為融合架構的驗證。

5.1 電腦模擬與實驗結果

為了驗證本論文中所提架構是否能有效導航，我們設計了一個模擬的程式，在該程式中，超音波配置的位置依照實際架設的位置來設定，如同我們在閃避障礙物、沿牆行走行為模糊控制器的設計，位於機器人前方的 9 個超音波感測器將各自將行為控制器所需的資訊分別送至模糊控制的輸入端；此外對於感測值的取樣週期，我們每 250 ms 就會送回一次超音波距離資訊，與實際上 8051 的程式規劃中相同。此外我們假設速度命令在下達後可以被完全執行，同時也不考慮實際上運作時機器人可能產生的運動誤差。因為此一模擬的目的在於驗證我們所設計的導航架構的可行性，因此實際存在的位置估測誤差與運動誤差暫予忽略。

以下，針對幾個環境類型做模擬，模擬軌跡圖中，機器人的比例大小依照實際大小為直徑 30 cm 的圓來表示，地圖中，每一小格的邊長為 50 cm。

5.2 環境一：狹長走廊進行閃避障礙物行為

5.2.1 環境一模擬結果

此實驗目的在於測試我們的導航方法是否能在一狹窄通道上執行閃躲障礙物的任務。通道環境左右寬度為 2 m，障礙物大小為邊長為 50 cm 的正方形物體。

圖 5.1 為電腦模擬之結果。討論實驗一模擬，參見圖 5.2，剛開始我們的行為融合架構判斷到達目的地前，障礙物還在妨礙我們目標物追蹤的範圍外，所以三個行為個別的融合比例上，在取樣點 21 前，目標物追蹤約占 0.6 的行為融合輸出比重；沿牆行走與障礙物迴避的行為則各佔 0.2；圖 5.3 顯示左右輪之速度在取樣點 29 前都為 10 cm/sec，也就是說機器人到取樣點 29 前是以直線前進地，尚未改變移動的方向。討論取樣點 21 到 29 之間，雖然此時機器人的動向依然是直接往前行進，但是在圖 5.2 中顯示此段時間閃避障礙物的比重正逐漸上升，當到達取樣點 29 時，右輪的速度相較於左輪提高，於是機器人開始左轉選擇避開障礙物。當避過障礙物後，因為障礙物與牆之間的通道並不算太寬，此時機器人的行進方向剛好為左側的牆壁所阻，閃避障礙物的行為融合比重一時還不能降下，於是在取樣點 35 到 45 之間，機器人行進方向偏右，慢慢回到走道的中央；圖 5.2 取樣點 45 到 65 之間因為剛好離右側牆壁約 50 cm 左右，此時沿牆行走佔輸出較大比重，約 0.6，與此同時，目標物追蹤也逐漸影響機器人的輸出行為，佔有 0.3 以上的比重，使得機器人朝向目標物移動。當取樣點 64 之後，機器人此時已因目標物追蹤的行為輸出，較遠離左側牆壁，所以目標物追蹤較為提高。

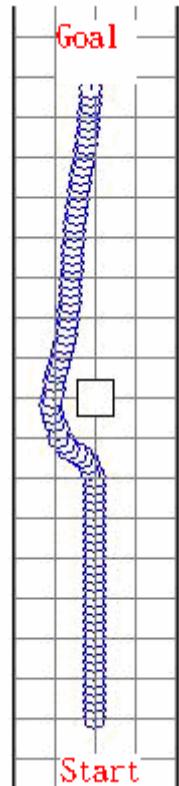


圖 5.1 環境一中的模擬結果

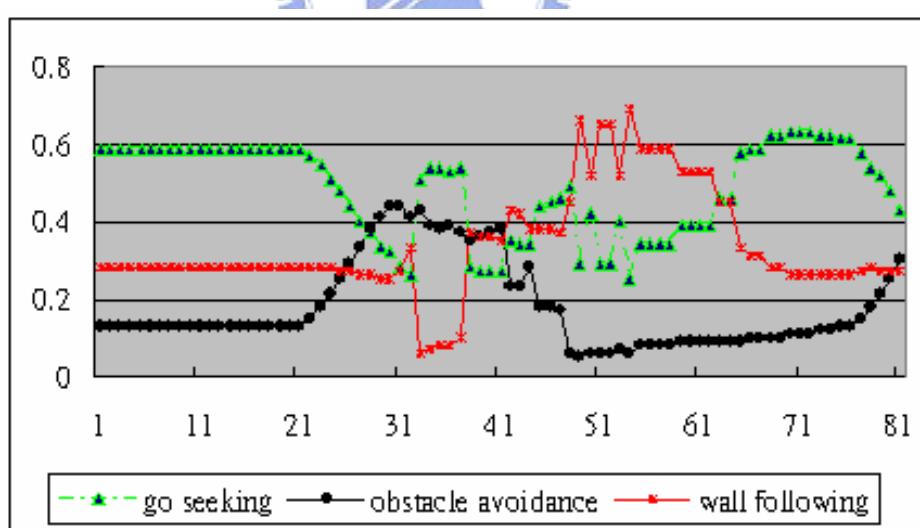


圖 5.2 環境一模擬中個別行為的融合比重紀錄

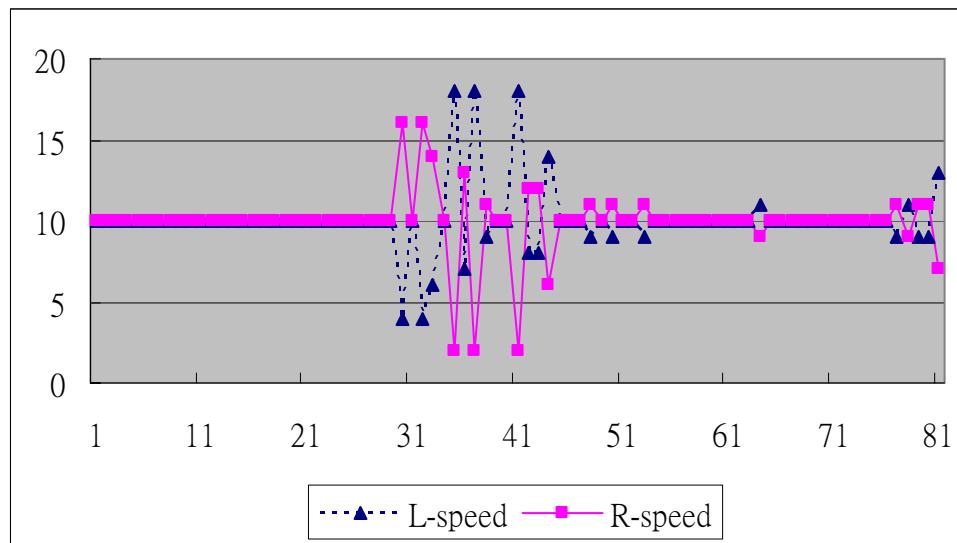


圖 5.3 環境一模擬中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.2.2 環境一實驗結果

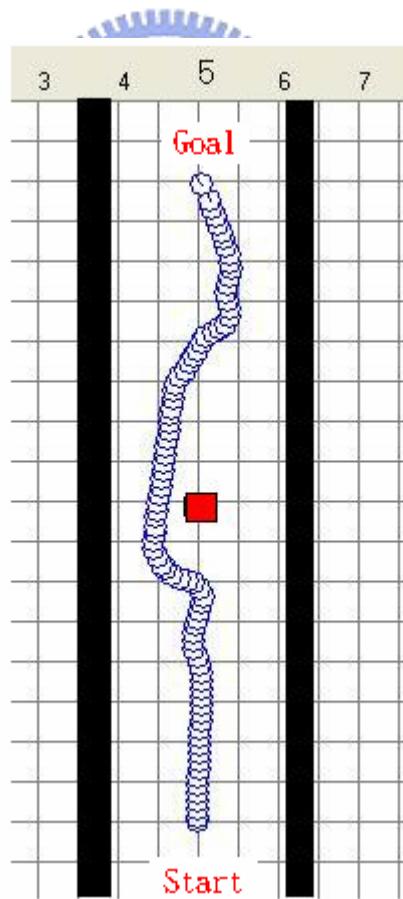


圖 5.4 環境一中的實驗結果

左圖為在環境一的情況下，我們的導航架構於走廊上實驗的結果，其軌跡與圖 5.1 相比較，兩者對於避開障礙物往目標前進的行為表現大致良好。特別注意的一點是圖 5.5 中與圖 5.2 的比較，兩張圖顯示在導航過程中，三個行為的融合比重變化情況，在趨勢上，兩張圖相類似，但圖 5.5 中的融合比例改變有時較為忽然，應該是由感測器所導致的誤差。

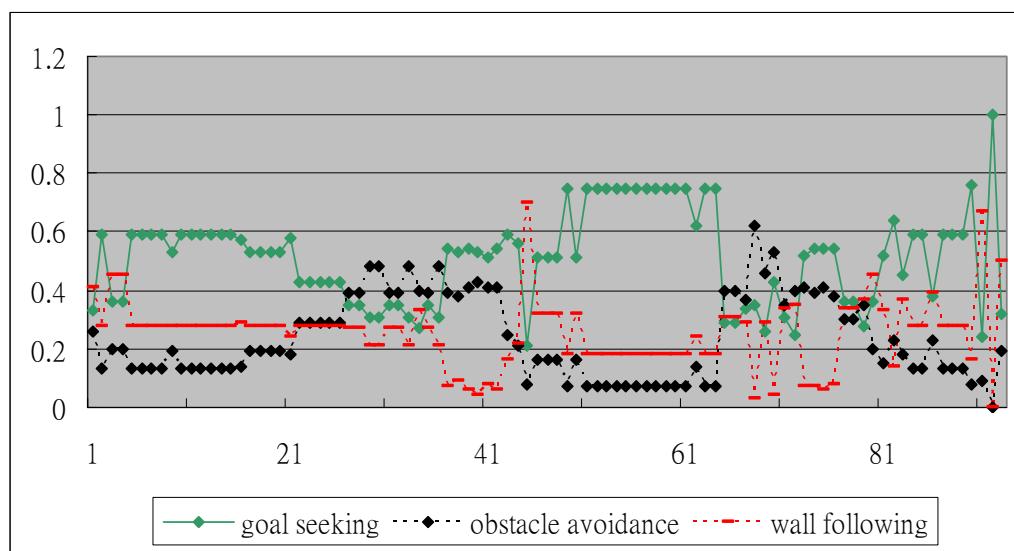


圖 5.5 環境一中的實驗結果的個別行為的融合比重紀錄

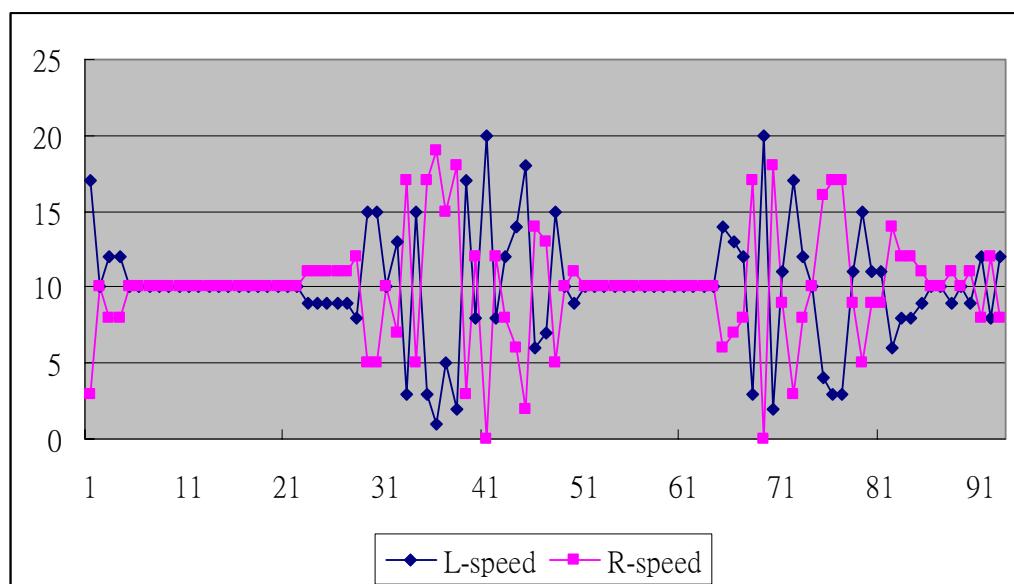


圖 5.6 環境一的實驗中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.3 環境二：在死巷子及狹長通道之導航

此環境類型之設定在於想驗證當機器人進入死巷時，是否有能力繞出來。死巷的深度為兩公尺。

5.3.1 環境二模擬之結果

剛開始自圖 5.7 中機器人出發時，因為前半部的環境偵測下都無障礙物存在，所以一開始目標物追蹤的行為融合比重等於 1，完全佔有行為融合的輸出，機器人調整方向往目標物前進。在圖 5.8 的取樣點 45 開始，閃避障礙物的行為比重慢慢地上升，而目標物追蹤的行為融合比重亦從此時開始下降，但此時左右輪的速度還是各以 10 cm/s 前進，直到圖 5.9 的取樣點 65 左右，到取樣點 110 之間，機器人的左輪速度大於右輪，使得機器人在死巷子的底端，繞了一圈出來。之後在環境二的情況下，當機器人繞出死巷時，為何沒有直接沿著右側的牆壁脫出，分析圖 5.8 與圖 5.9，此時大約在取樣點 96 前後，此時目標物追蹤行為的輸出融合比重提高，使得機器人的旋轉方向拉回朝向目標物的方向，於是機器人避開死巷右側的牆壁，而往右側前進；當前進到接近死巷左側的牆壁時，大約在取樣點 120 時，閃避障礙物與目標物追蹤的行為輸出融合比重幾乎各占 0.5，在兩者協調下，機器人選擇朝向死巷外行走，脫離了死巷的區域。

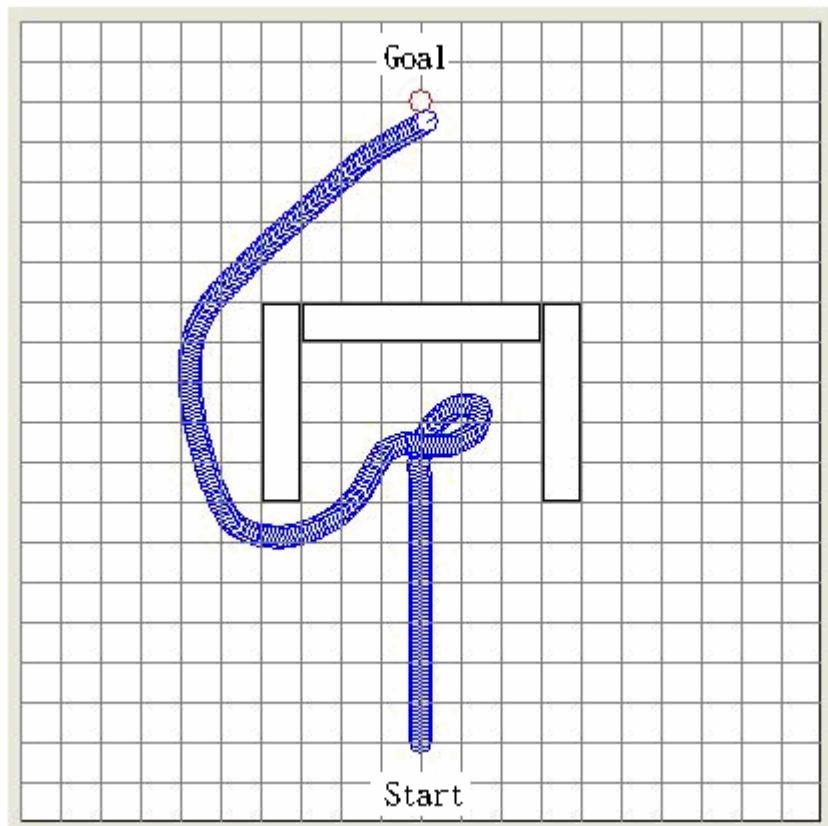


圖 5.7 環境二中的模擬結果

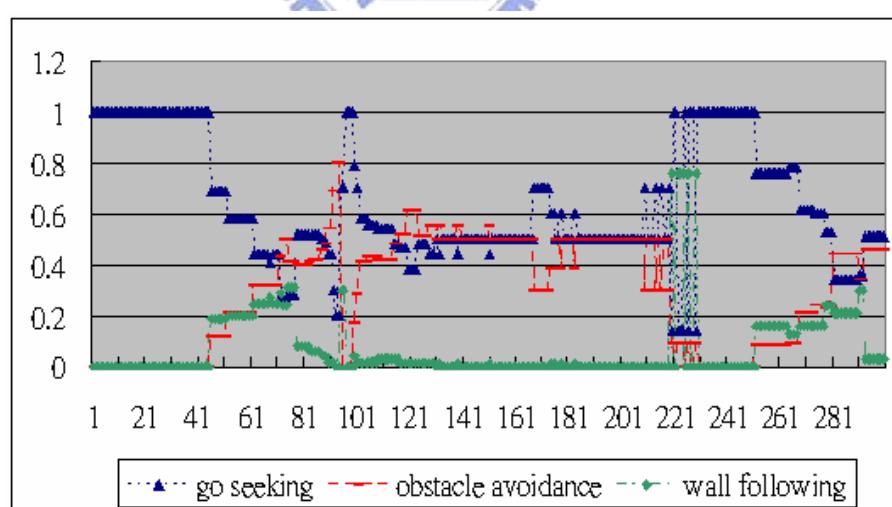


圖 5.8 環境二模擬中個別行為的融合比重紀錄

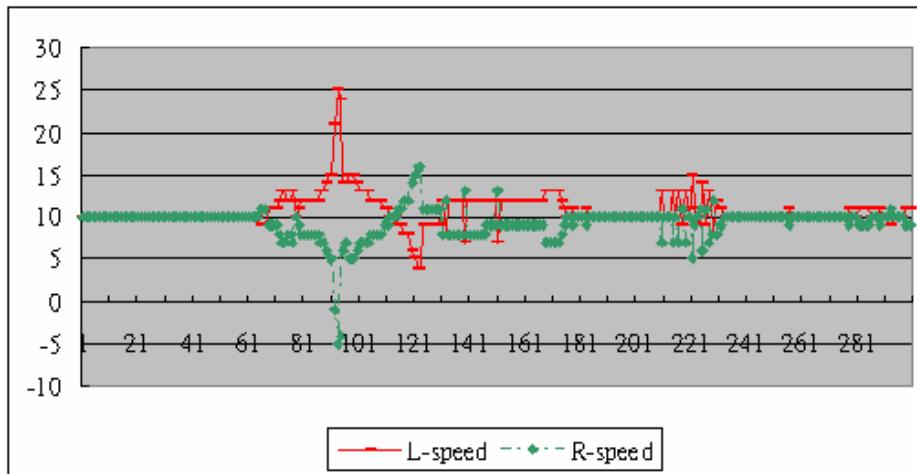


圖 5.9 環境二模擬中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.3.3 環境二之實驗結果

本實驗目的在測試機器人實際在導航時，對於死巷子是否能有效應對，相對於模擬二，我們在走廊上架設出實驗的空間，透過在走廊上以紙箱作為障礙物，圍成一個ㄇ字型的死巷子，深度為 75 cm 左右，看看機器人是否能繞出巷子並繼續其導航任務，目的地在機器人正前方 100 公尺處。

討論：觀察圖 5.10 可知剛開始機器人的偵測範圍內，其偵測結果為無障礙物的空間，所以一開始目標物追蹤占行為融合輸出的最高比例。直至機器人在朝向目標物所在的移動路徑上偵測到了死巷子的存在，於是在圖 5.11、5.12 中取樣點 10 到 30 之間，機器人在ㄇ字型中進行迴轉，終於繞出去，並在取樣點 61 前後，受到目標物追蹤的輸出影響，朝向目標物方向前進。

對於環境二的實驗與模擬，我們作一個比較，雖然受限於場地關係，環境有部分的差異，但是我們所提出的導航方法乃是在說明『當環境相類似時，輸出的融合比例亦有相類似的情況』。比較圖 5.8、5.9、5.11、5.12 發現，當繞過死巷子時，在輸出的

行為融合比例部分在機器人繞出死巷子的過程中，確實有相類似
的行為融合比例輸出之情形。

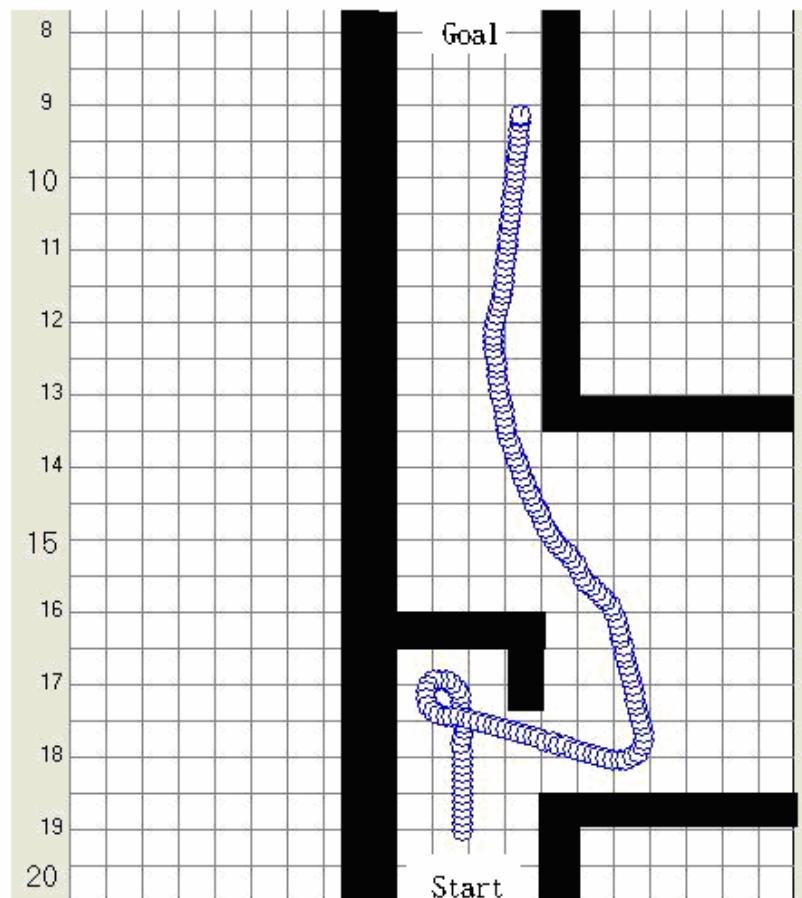


圖 5.10 實驗二的機器人行走軌跡圖

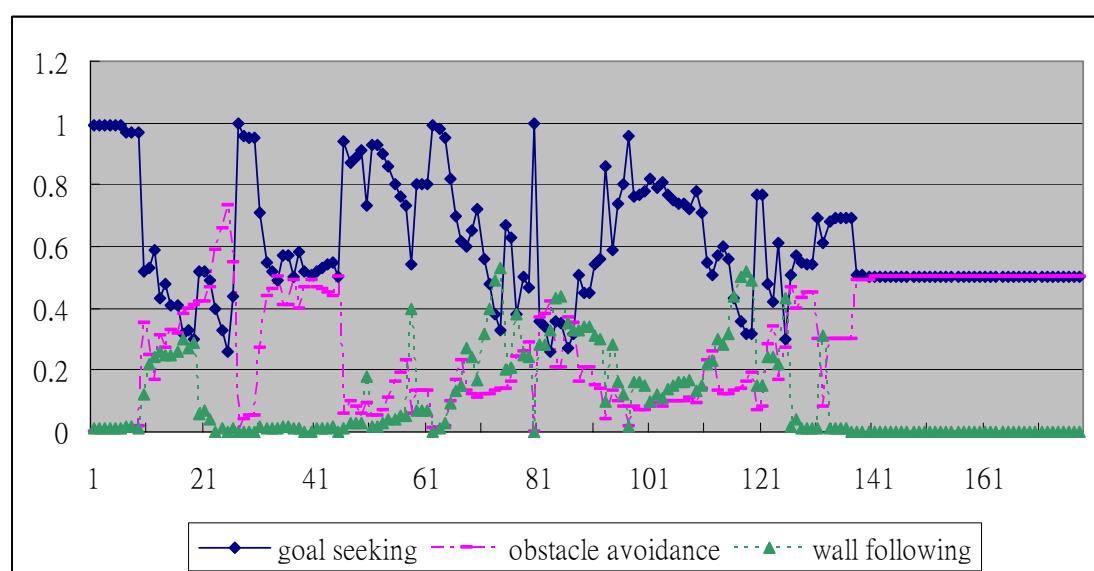


圖 5.11 實驗二中個別行為的融和比重紀錄

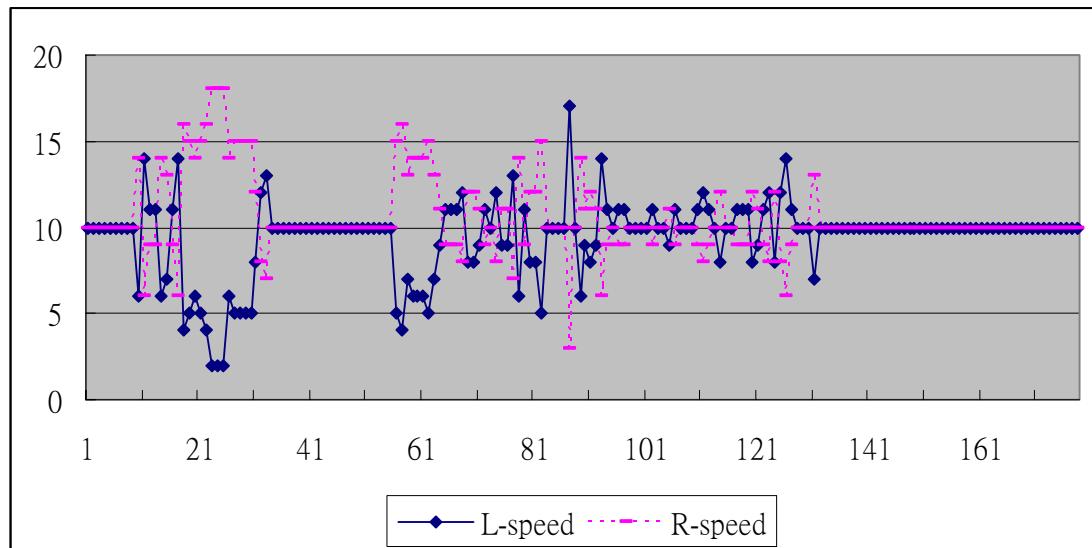


圖 5.12 實驗二中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.4 在實驗室複雜室內環境及通過窄門之導航

圖 5.13 為機器人在實驗室中的環境進行導航的模擬圖，此模擬的主要目的，在於驗證我們所設計的導航架構在環境變化較為劇烈的情況下是否依然能夠發揮作用，並與其後實際上實驗時的數據與路徑做比較。

5.4.1 環境三模擬結果討論

已知目標物方向在由前方，第圖上的每一格邊長為 50 cm，當機器人剛開始行進時，從出發點到取樣點 31 時，機器人都未變更原本的行進方向，此時行為融合比例中，目標物追蹤與閃避障礙物的行為輸出融合比例都大概為 0.5 左右，亦即兩個行為的協調下，機器人的行進方向維持固定，變得像是只有沿牆行走的行為完全佔據輸出行為融合比例時產生的路徑一般，此時機器人與右方的障礙物概略都維持在 35 cm。當機器人行進到圖 5.14 中取樣點 31~41，在閃避障礙物跟目標物追蹤兩行為的協調下，機

器人通過了第一個區塊的出口。之後目標物的方向概略在此時機器人的右方，而閃避障礙物跟目標物追蹤的輸出比重佔據行為融合比例的大部分，在取樣點 51~71 時，因為閃避障礙物行為控制器所輸入的超音波距離資訊判斷左側有較大的閃避空間，所以機器人沒有往右方前進，即使此時看來若往右方前進則可以較快走出實驗室的門口；機器人往右走之後，因為右方為一死巷，所以機器人轉了一個圈後，在取樣點 100~110 朝向門口前進。

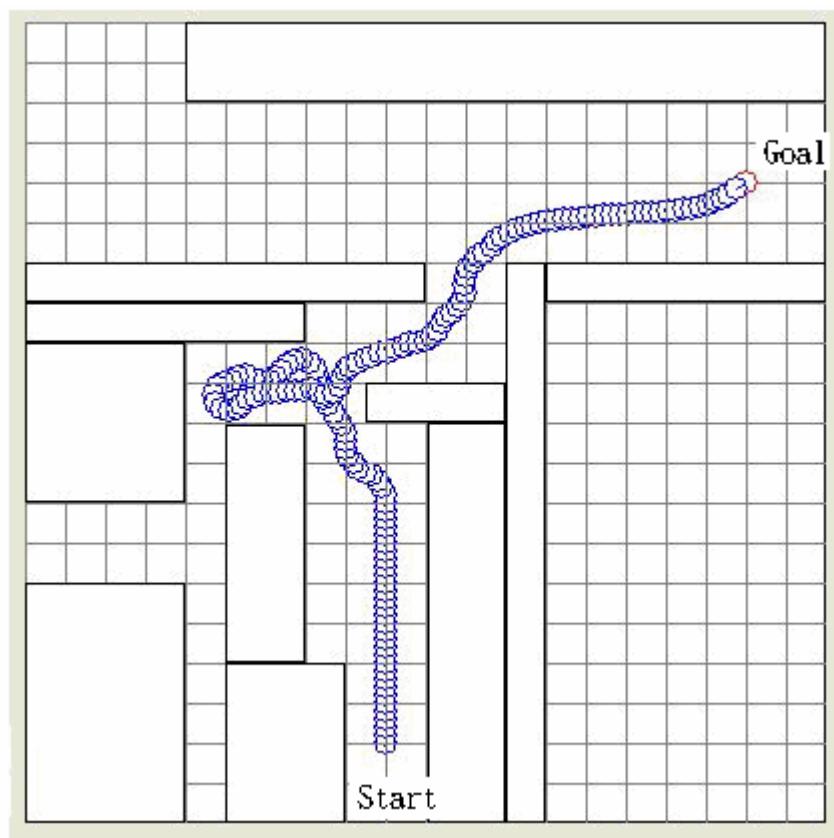


圖 5.13 環境三中的模擬結果

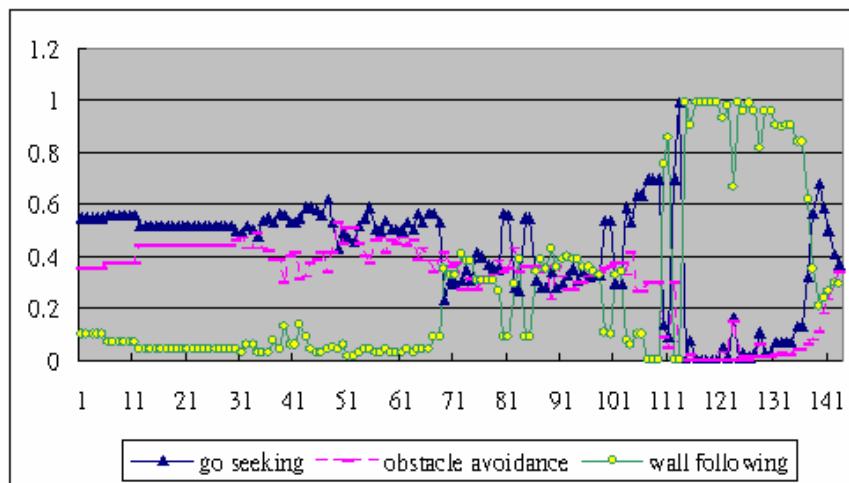


圖 5.14 環境三中個別行為的融合和比重紀錄

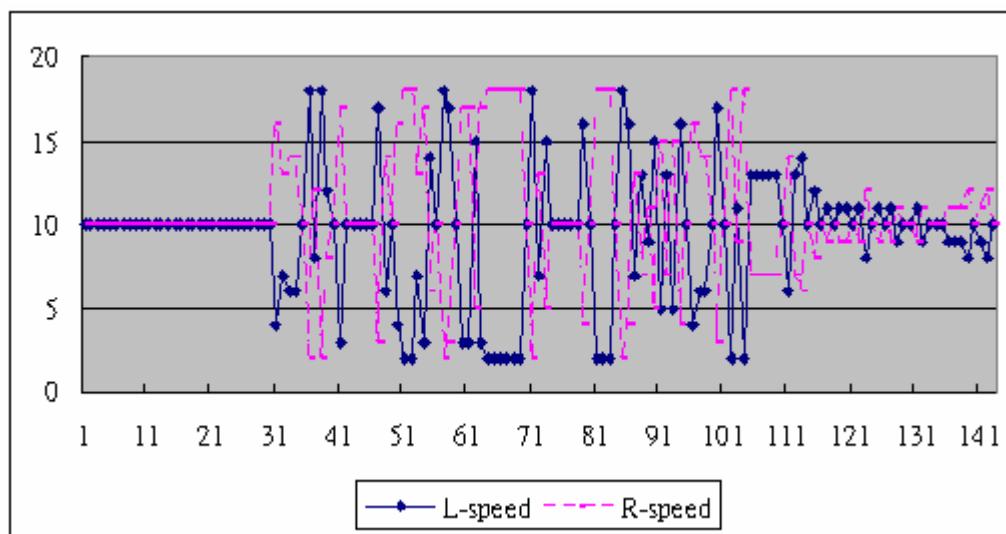


圖 5.15 環境三中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.4.3 環境三之實驗結果

對應於之前環境三模擬中所述，此次實驗環境與模擬三相同，唯一的差別在於我們將目的地設在走廊上右方極遠之處，與前次模擬較為不同的是，真實環境中存在的誤差比模擬中多很多，所以觀察圖 5.17、5.18 中會發現機器人行為融合的比例或是左右兩輪的速度都不停地在改變。

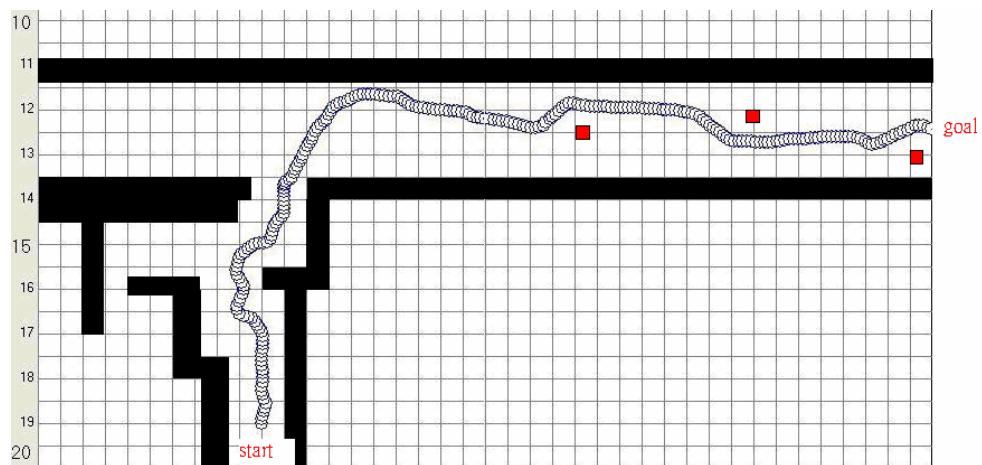


圖 5.16 實驗三的機器人行走軌跡圖

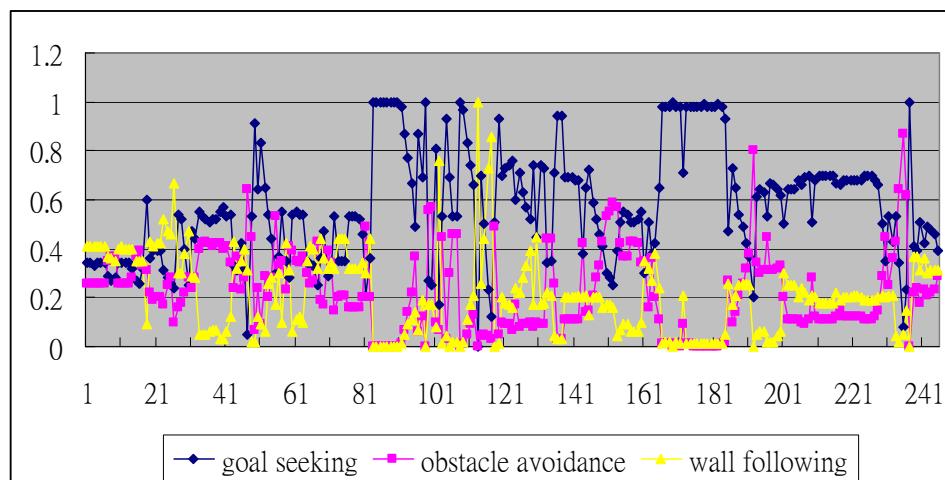


圖 5.17 實驗三中個別行為的融和比重紀錄

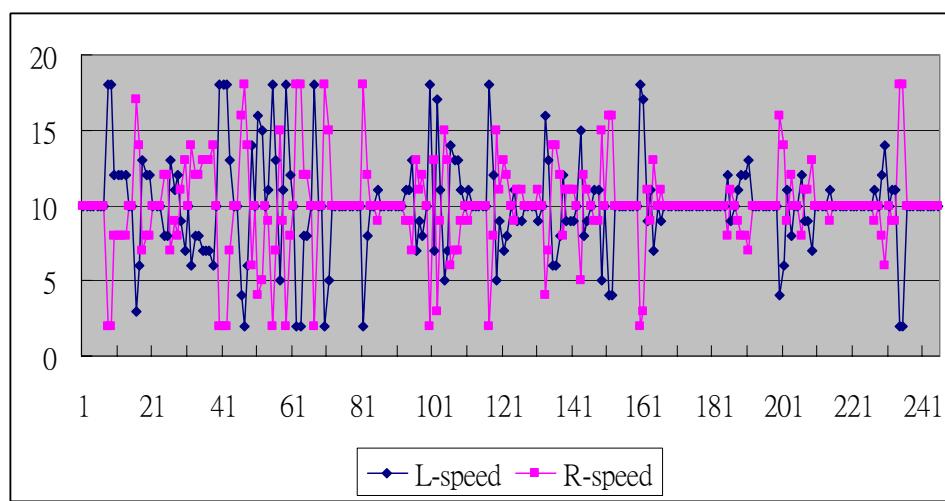


圖 5.18 實驗三中左右輪速度紀錄(cm/sec)

5.5 實驗四：長直通道環境之實驗

通道環境：通道寬度約為 2.5 m，我們讓機器人在走廊上行走，並且在行進路途中，不斷地予以阻攔，觀察機器人在走廊長通道上閃避障礙物之行為表現是否良好，用以驗證我們所提出的導航架構。右側刻度單位為一公尺，每小格邊長為 50 cm。

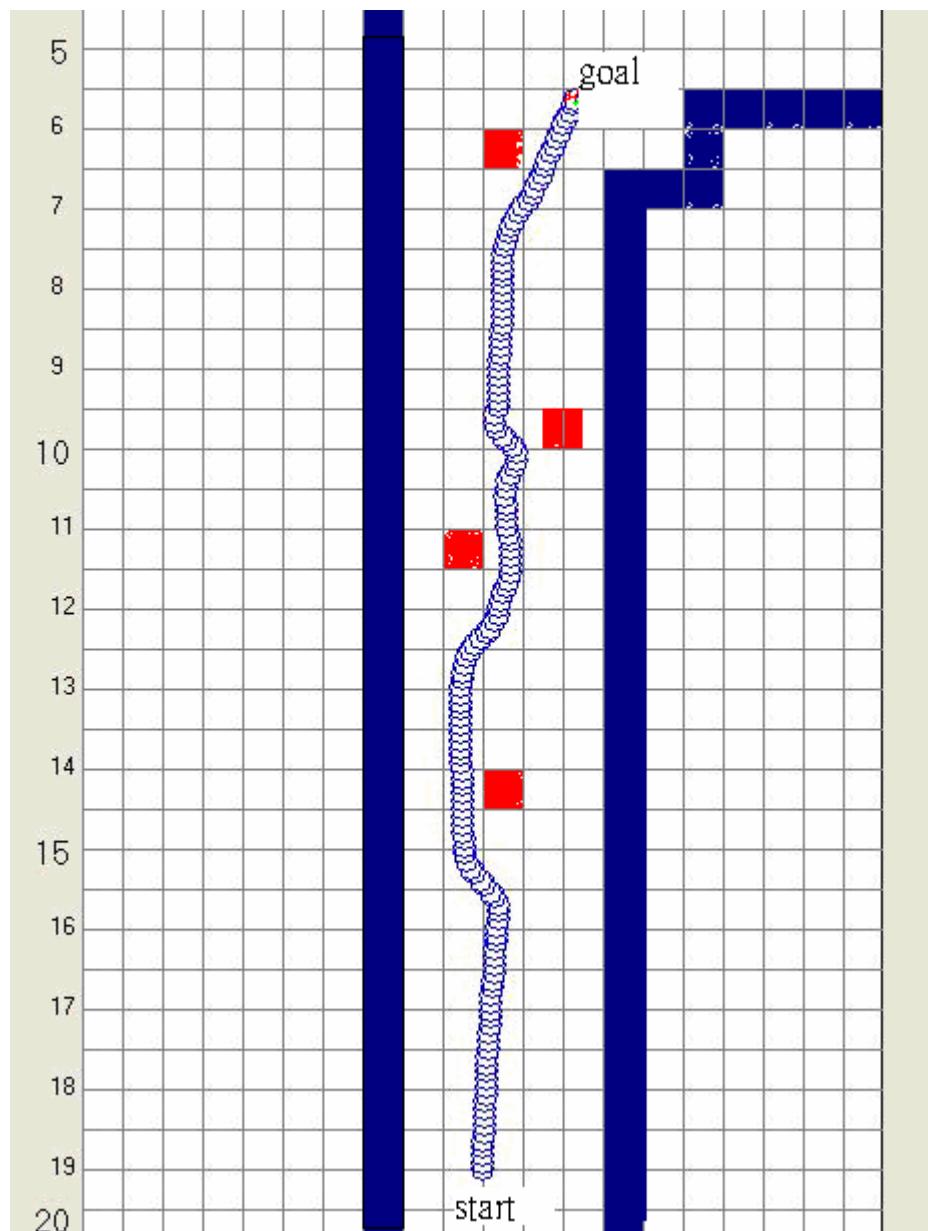


圖 5.19 實驗四的機器人行走軌跡圖

實驗四討論：參考圖 5.19、5.20、5.21，在取樣點 50、140、180、240 左右，概略是我們阻擋機器人行進的時刻，在取樣點 50、180、240 這三個時間上，圖 5.20 閃避障礙物的行為融合比重都有提高的紀錄，以增加閃避障礙物行為控制器輸出在總輸出表現的比重。但在取樣點 140 的時間上，雖然閃避障礙物的行為融合比例沒有增加，但是就機器人行走的軌跡來看，依然閃過第二次的阻擋，原因可能在於目標物的方向並沒有剛好被此次障礙物擋到，所以在取樣點 140 時，目標物追蹤占輸出行為比重較高的比例也能避開這個障礙物。

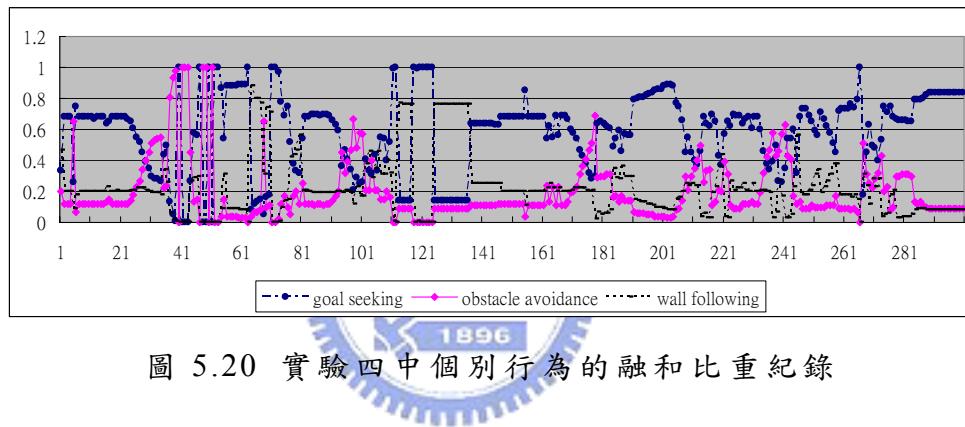


圖 5.20 實驗四中個別行為的融合和比重紀錄

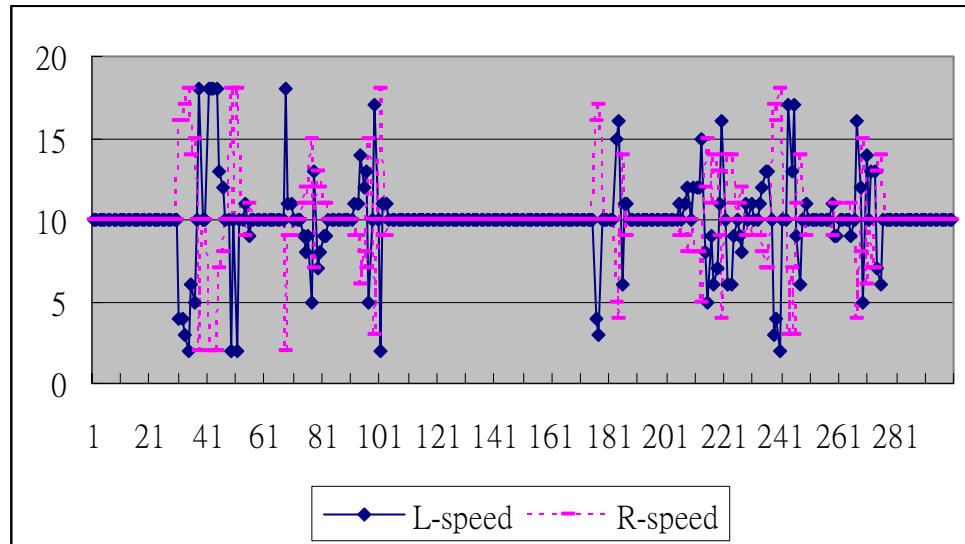


圖 5.21 實驗四中左右輪速度紀錄(cm/sec)

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本論文之目的在設計一適應環境變化之行為融合方法，並應用在機器人導航上，透過模擬與實驗的結果，我們證明了此一方能有效地完成機器人導航的任務。在行為設計方面，我們使用模糊邏輯控制器分別完成閃避障礙物、目標物追蹤、沿牆行走三個行為模組的設計；再來透過 FKCN 與規則表相結合的啟發性網路，讓環境資訊轉換為一有序向量輸入網路之中，求得當下環境資訊所對應的行為融合比例。透過此一行為融合的機制，我們藉以處理個別行為之間的衝突。在設計上，此一結構對於環境的變化具有調適性，能夠反映在不同情況下，應該有的行為融和比重，同時，透過規則表的檢視，我們可以知道規則表的設計上也具有相當的彈性，當行為模組增加之時，規則表的改寫並不困難，且對於規則表中所預設的行為融合比例，也具有相當的適應性。

相對於同樣屬於 behavior-based 架構的 subsumption 與 motor schemas[22]，在架構上本論文所提的方法是較偏向 motor schemas。就兩種架構上的差異而言，subsumption 在行為架構上的設定，雖然機器人導航任務的功能區塊一樣是以行為來分割設計，但各行為之間存在有 Priority Level，較高 level 會壓抑較低 level 行為的輸出；而 motor schemas 部分，其行為沒有 priority 高低的區分。本論文中與 motor schemas 較大的差異在基於”相似環境下，機器人的導航行為表現應該類似”的假設，提出以圖形識別網路計算各個行為之間該有的融合比例，而非直接以機器人行進速度作為融合架構的輸出，這個做法優點在於當我們增加行

為模組時，容易對規則表中的行為融合比例加以修改，並且由於將行為融合架構的輸出與行為模組的輸出分開來，兩者在設計時可以較為獨立，缺點則在於，由於規則表的設定是透過不斷的模擬來加以決定，所以當對應於環境變化時，我們機器人的行進路徑未必能產生最佳解，但是依然可以產生能夠處理當時環境的輸出表現。

6.2 未來展望

目前發展的此一架構，仍然有許多可以加以改進的地方，使機器人的導航表現上可以更加完善。

A. 環境感測器的改進：目前我們是以超音波作為環境中障礙物距離資訊的感測器，就現在機器人上所裝備的 12 個超音波感測器而言，為了避免之間互相感擾，所以角度相近的超音波感測器其發射時間都相互錯開來，完成機器人周圍一圈的偵測需要 250 ms，就此時間而言依然稍微長了一點，我們需要加以改善以期能更快取得環境資訊的方式。

B. 增加位置估測的能力：目前我們的位置估測方法是透過里程表，里程表形式的估測方法，雖然簡單易行但是由於無法消除誤差累積，因此在較長距離的導航時，誤差會越來越大，而導航機器人的位置估測影響到機器人的導航行為，在誤差之下又導致了新的誤差產生，所以我們有必要發展一可以修正誤差的全域定位法，才能使機器人具有較強的導航能力。

C. 規則表的產生方法：目前產生規則表的方式是透過不斷

的模擬來加以決定，然而我們需要尋找一個方法，能夠更有效且合理的來決定出典型圖樣與對應該典型圖樣的行為融合輸出比例。



參考文獻

- [1] R. A. Brooks. "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol.2, no.7, pp.14-23, 1986.
- [2] M. J. Mataric, "Behavior-based control: Examples from navigation, learning and group behavior," *Journal of Experimental Theoretical Artificial Intelligence, Special Issue: Software Architecture Phys. Agents*, vol. 9, pp.46-54., 1997.
- [3] P. Rusu, E. M. Petriu, T. E. Whalen, and A. Cornell, and H. J.W. Spoelder, "Behavior-based neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, Issue 4, Aug. 2003, pp.1335 - 1340
- [4] Simon X. Yang, Hao Li and Max Meng. "Fuzzy control of a behavior-based mobile robot," *The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 1, 25-28 May 2003, pp.319 - 324
- [5] X. Yang, M. Moallem, and R.V. Patel, "An improved fuzzy logic based navigation system for mobile robots," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2003, pp.1709 - 1717
- [6] Simon X Yang, Hao Li, and Peter X. Liu, "An embedded fuzzy controller for a behavior-based mobile robot with guaranteed performance," *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 12, no.4, August 2004, pp. 436 - 446
- [7] X. Yang, M. Moallem, and R.V. Patel, "A novel intelligent technique for mobile robot navigation," *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications*, vol.1, 23-25 June 2003 pp.674 - 679
- [8] S. Khatoon, "Behavior coordination of autonomous mobile robot navigation by neuro-fuzzy system," *Proceedings of the IEEE 31st Annual Northeast Bioengineering Conference*, April 2-3, 2005, pp.58 – 62
- [9] K. Pulasinghe, K. Watanabe, K. Kiguchi, K. Izumi, "A novel modular neuro-fuzzy controller driven by natural language commands" *Proceedings of the 40th SICE Annual Conference. International Session Papers*, 25-27 July 2001, pp.335 - 338
- [10] Dongbing Gu, Huosheng Hu, Jeff Reynolds, and Edward Tsang, "GA-based learning in behavior based robotics," *Proceeding 2003 IEEE International Sysposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Kobe., Japan, July 16-20, 2003, pp.1521 - 1526
- [11] N. Kubota, T. Morioka, F. Kojima, and T. Fukuda," Perception-based genetic algorithm for a mobile robot with fuzzy controllers," *Evolutionary*

- Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on* vol 1,
 6-9 July 1999, pp.397-404
- [12] Ye. C., Yung, N.H.C., Ye, C. "Avoidance of moving obstacles through behavior fusion and motion prediction," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, pp.3424-3429, 1998
- [13] Cang Ye, Danwei Wang, "A novel behavior fusion method for the navigation of mobile robots," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 5, pp.3526-3531, 2000
- [14] P. Vadakkepat, Ooi Chia Miin, Xiao Peng, and Tong Heng Lee, "Fuzzy behavior-based control of mobile robots," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.12, Issue 4, Aug. 2004, pp.559 - 565
- [15] S. Parasuraman, .V. Ganapathy, B. Shirinzadeh, "Behaviour based mobile robot navigation technique for real world environments using fuzzy logic systems," *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol 4, 10-13 Oct. 2004, pp.3359 - 3364
- [16] S. Parasuraman, V. Ganapathy, and B. Shirinzadeh, " Fuzzy decision mechanism combined with neuro-fuzzy controller for behavior based robot navigation," *2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol.3, 2-6 Nov. 2003 pp.2410 - 2416
- [17] Shou-Tao Li; Yuan-Chun Li, "Neuro fuzzy behavior-based control of a mobile robot in unknown environments," *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol 2, 26-29 Aug. 2004
- [18] T. Huntsberger and P. Ajjimarangsee, "Parallel self-organizing feature maps for unsupervised pattern recognition," *Int'l. J. General Systems*, vol. 16, no.4, pp.357-372, 1990.
- [19] Liang-Hwang Sheen, "A fast path-planning method for a mobile robot in an unknown environment," M.S. Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, Republic of China, June, 1994.
- [20] Shin-Yi Huang, "Behavior-based home robot navigation design," M.S. Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, Republic of China, July, 2003.
- [21] K.T. Song, "Planning and Control of a Mobile Robot Based on an Ultrasonic Sensor," Ph.D. Thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium, 1989
- [22] Ronald C. Arkin, *Behavior-Based Robotics*, Cambridge, MA: MIT Press, 1998.