



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 先進家用機器人系統研發—總計畫

Development of Advanced Home Robot System

計畫編號：NSC-92-2213-E-009-003

執行期限：92年08月01日至93年07月31日

主持人：宋開泰教授 國立交通大學電機與控制工程學系

### 摘要

本計畫完成兩台家用機器人雛型，包括安置於此機器人運動平台上之三自由度之機械手臂，可藉由視覺導引抓取環境中之特定物體。此機器人具有自主式閃避障礙物導航功能，透過無線網路(WLAN)可由一般個人電腦及PDA以無線網路遙控及監測，以機器人上攝影機可達成家庭成員之人臉辨識及追蹤，已具備實用性之個人助理功能。另外本計劃亦開發完成多項家用助理機器人核心技術，包含即時嵌入式Linux乙太網路伺服控制器、機器人遠端呈現與操控系統、機器人立體視覺技術、機器人路徑追蹤控制器、及基於DSP之雙軸伺服馬達控制器等等。本計畫五位教授及其博、碩士班學生組成之研究團隊，在三年計畫執行期間除在機器人學術理論方面之創見以論文型式發表外，亦完成各項實用性技術與硬體裝置，家用機器人曾參加多次展覽及示範，如資策會兒童資訊月活動、資策會機器人展覽，及威盛電子2004年技術研討會展覽等等，達到推動國內智慧型機器人實用技術之功能。在國科會工程中心之補助下，本計畫於93年5月28日在交通大學舉辦智慧型機器人產學研討會，吸引近300位學術研究與產學界人士參加，顯示本計劃已受到國內產學界之重視。

(關鍵字：智慧型機器人，電腦視覺，網路遙控，影像追蹤，遠端操控，伺服控制，即時控制，網路機器人)

## Abstract

In this project, two home robot prototypes have been designed and constructed. The robot is equipped with a 3 degree-of-freedom robot arm, which can grasp an object in environment using eye-in-hand techniques. This robot can navigate autonomously through an environment and avoid obstacles. Via wireless LAN, any personal computer or PDA can remote control the robot and monitor the environment using its onboard digital camera. The robot is able to recognize a specific member of a family using onboard camera and track the family member to interact with him/her. Moreover, several core technologies of home robotic systems have been developed in this project, e.g., a real-time embedded Ethernet-based controller for Linux, teleoperation and telepresence of robot manipulator, 3-D machine vision for robotic applications, path tracking controller design and DSP-based two-axis servo control board for low cost mobile robots. A robot research team consisting of five professors and their graduate students is formed in this project. In three years project execution period, this robot research team have achieved many theoretical studies in robotics, many technical papers have been published in journals and international conferences. Moreover, practical construction and experimental studies of intelligent robots have also been demonstrated in many occasions. The developed robot have demonstrated in robot fairs held by Institute for Information Industry in Taipei and also exhibits in the 2004 Via Technology Forum. In May 28, 2004, a workshop, sponsored by NSC Technology Center, on intelligent robots was held in National Chiao Tung University. About 300 participants jointed the discussion and exhibitions, which indicated the project had draw much attention of the robotic community in this country.

( Keyword: intelligent robots, computer vision, internet remote control, image tracking, teleoperation, servo control, real-time control, networked robotics. )

# 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
一、前言.....	1
二、研究目的.....	2
三、文獻探討.....	5
3.1 資訊與網路平台系統.....	5
3.2 遠端呈現與操控系統.....	7
3.3 電腦視覺系統.....	8
3.4 智慧型互動系統.....	10
3.4.1 家用機器人之構造與運動平台.....	11
3.4.2 家用機器人與環境互動之設計.....	15
3.4.3 智慧型影像感測器之研製.....	15
3.4.4 家用機器人與家庭成員之間的互動系統.....	16
3.4.5 機器人與其他機器人之間之互動與合作.....	17
3.5 影像追蹤控制系統.....	18
四、研究方法.....	22
4.1 家用機器人之智慧型互動系統研發.....	22
4.1.1 家用機器人本體機構設計.....	22
4.1.2 環境辨識感測模組設計與製作.....	23
4.1.3 網路互動控制.....	26
4.1.4 家用機器人語音及人臉辨識系統.....	27
4.1.5 多機器人定位融合及環境地圖建立實驗.....	33
4.2 家用機器人系統之資訊與網路平台研發.....	38
4.3 家用機器人之遠端呈現與操控系統研發.....	39
4.4 家用機器人之電腦視覺系統研發.....	44
4.4.1 影像特徵擷取與對應模組.....	44
4.4.2 相機參數計算與幾何重建.....	46
4.4.3 路徑規畫模組.....	47
4.4.4 人臉辨識模組.....	48
4.5 家用機器人之影像追蹤控制器設計.....	50

五、結果與討論.....	55
六、結論.....	57
參考文獻.....	58

## 一、前言

由於微電子、資訊技術(IT)及控制技術(CT)的進步，機器人從事更廣泛的工作正逐漸受到重視，如家庭用機器人、建築用的機器人、深海探勘的機器人、處理危險物品的機器人等等。近年來有多款擬人化的機器人發表，如日本本田發表的 Asmio 機器人，Sony 發表了會隨音樂跳舞的機器人 SDR-4X，日本政府和民間聯合成立的 ATR 智能影像通訊研究所發表能幫人處理日常生活事務的機器人。事實上，智慧型機器人的應用已引起科技界的注意，MIT Media Lab Prof. Negroponte 在其暢銷書『數位革命』中即提到這個價值百億美金的大市場不會被忽視太久。而其中最具有未來市場潛力的應該算是與網路連接的家用機器人。此處家用機器人可說是結合家庭夥伴(Robot mate)及家庭幫傭(Robot maid)的一種多用途機器人。這種家用機器人設備將可在一般家庭使用而成為一種資訊家電(Information appliance, IA)，重要的是它整合了多種有用的功能。

雖然移動式機器人，例如家用機器人，走入家庭似乎已經是一個重要趨勢，然而現階段具備高度智慧的移動式機器人大都屬於較龐大的設備。對於民生化、家庭化的需求仍有一段距離。一個家用機器人系統，所應有的要求應該是一個體積小、省電、運作速度快、網際網路資訊介面寬廣，具有影像與聲音系統的處理環境，擁有對外在環境之感測介面，以及互動性和家電系統有一定之整合能力的設備。甚至擁有一定程度的人工智慧與擴充能力。反觀現階段環境，要符合以上要求的彈性發展系統並不多。

現階段大部分與網路結合的機器人，以 tele-operation 或遠端控制居多。就一個具備網路能力的家用機器人而言，其所需具備的網路功能，應再加上現代化資訊平台如 Multi-agent 等技術，使家用機器人系統及可成為家用資訊與控制之出入口，由於其兼具移動式能力。其次，家用機器人結合網路代表虛擬世界(Virtual World)與實體世界(Real World)的整合。許多例子均顯示，這兩個世界的結合將延伸出無限的想像與應用的空間。近十年來在 Robotics 中熱門的研究題目之一為多機器人之間的合作問題，其相關的人工智慧研究稱為分散式人工智慧(Distributed Artificial Intelligence, DAI)。DAI 的進展目前以模擬居多，也就是大部份均在虛擬世界中進行。與實體結合時均礙於計算平台不足或系統架構過於侷限(如通訊協定不夠開放)而無法發揮。近年來網際網路的成長為這個合作的研究提供了愈來愈好的環境，而家用機器人則將因為這些研究的成果應用，對人類產生更大的價值。家用機器人由於其互動性高於其他電子裝置，將成為未來世界裡一個重要的 agent。雖然 multi-agent 這個觀念早已被提出並有大量的研究，但以家用機器人為主的技術研發並不多見。其中很明顯的是缺乏合適的軟硬體平台。

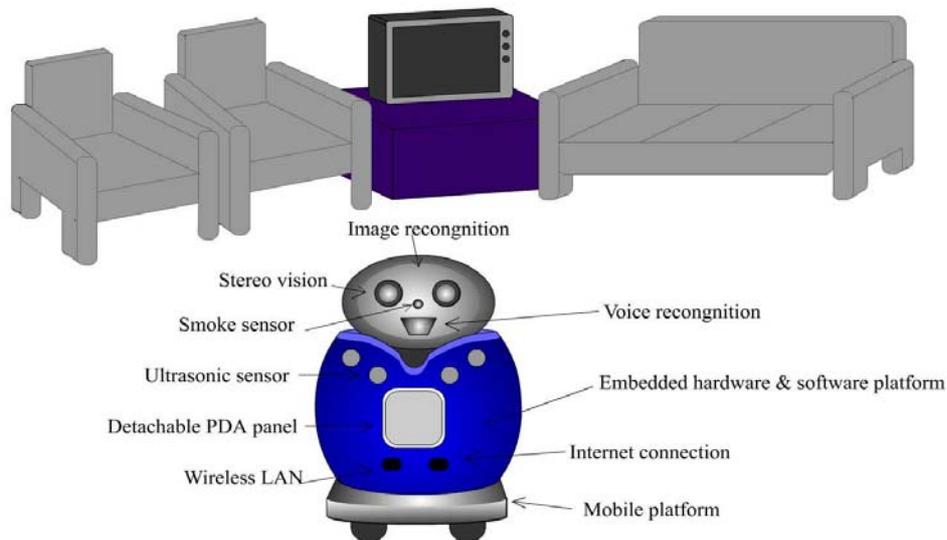
家用機器人雖然目前尚未成為成熟的商品，但在不久的未來機器人將走入辦公室及家庭，成為與人們共同相處的家電商品。這些家用機器人將具有人性化的操作介面與機器智慧，可以做服務性的工作，也將與其周圍環境中之人或物產生

交互作用以達成某些特定的工作。在機器人與家庭成員的互動方面，可以結合影像與語音的辨識系統，使機器人可以辨認家庭中每一成員，並且與成員間產生智慧型互動，使家用機器人的使用更為「自然」與「方便」，並且賦予機器人與使用者之間能夠產生溝通的能力。

## 二、 研究目的

本計畫之主要目的在發展家用機器人之智慧型互動系統。家用機器人與一般工業機器人的主要差別在於家用機器人必須和家庭裡的人互動，也就是必須要有足夠的智慧來應付家庭中的人員給予他的一些命令，然後採取正確適當的反應。由功能上來看，一個家用機器人兼具家庭夥伴(Robot mate)與家庭幫傭(Robot maid)的特性。一方面它具有容易使用的人機介面，可接受家庭中成員的命令，產生多媒體呈現的親善功能。另外一方面也可以被賦予清潔及安全防護方面的服務性工作。因此家用機器人在功能上將具有多樣性，但這些與日常家庭生活有關的操作或功能往往必須仰賴與家庭中成員的互動來完成。家用機器人也經常和環境中的物體產生互動，如電視機、電話、安全系統等等。另外在與其他機器人互動方面，我們可以預期機器人與機器人之間可以有某種通訊方式來協調合作，例如網路，將有助於它們完成較複雜的任務，增加了機器人的實用性。圖一顯示家用機器人之互動系統架構圖。在實體結構上，如圖一所示，家用機器人可分為下列幾個主要的模組：

- (1) 運動平台，含驅動、機構、電源供應管理及控制
- (2) 智慧型互動系統，含與家庭成員的互動、與家中智慧型電器的互動、及與其他機器人的互動等等
- (3) 內嵌式資訊系統
- (4) 網路連線模組、可進行遠端操控
- (5) 無線通訊模組、可分離之 PDA 面板
- (6) 影像辨識系統
- (7) 語音辨識系統
- (8) 環境感測系統，含 CCD 攝影機、超音波感測器、煙霧感測器、防火偵測器
- (9) 運動控制系統
- (10) 靈巧操作機械手



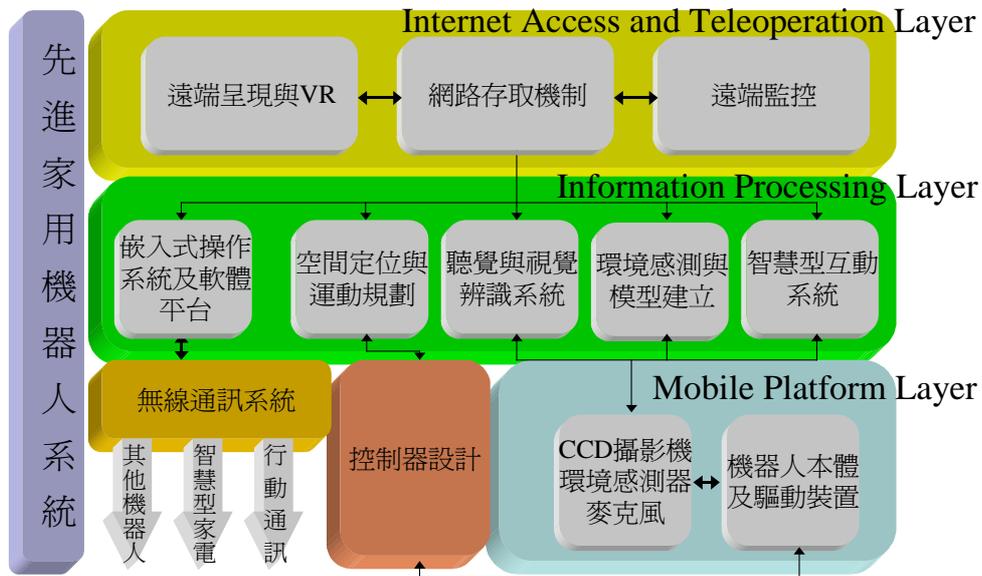
Advanced Home Robot 示意圖

圖一：家用機器人主要模組圖示

在研發的技術層面而言，先進家用機器人系統可以被分成三個階層，即最下層的移動式平臺層(Mobile platform layer)，中間的資訊處理層(Information processing layer)，及上面的網路連線與遠端操作層(Internet access and teleoperation layer)。圖二顯示此三層式之家用機器人系統之技術整合圖，圖中並表示出各層之關鍵技術或模組。為了達到此龐大的及複雜的家用機器人系統，我們決定分成以下五個系統個別研究及發展：

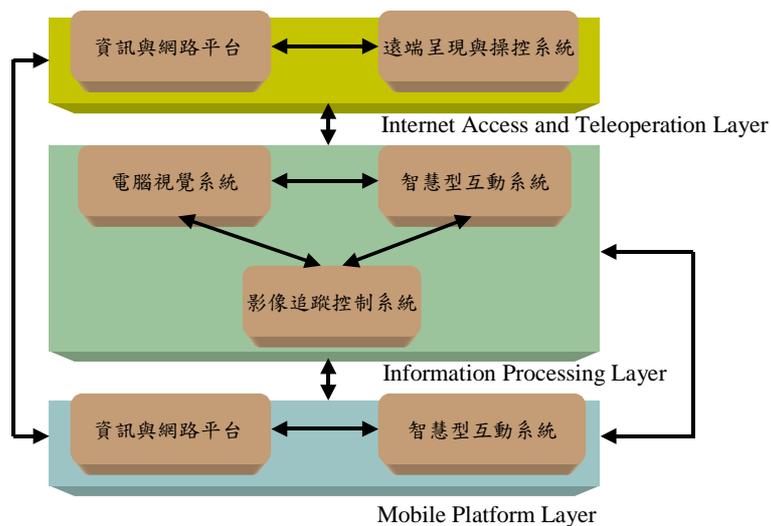
- 系統一：家用機器人之資訊與網路平台系統
- 系統二：家用機器人之遠端呈現與操控系統
- 系統三：家用機器人之電腦視覺系統
- 系統四：家用機器人之智慧型互動系統
- 系統五：家用機器人之影像追蹤控制系統

各系統間的整合與合作關係如圖三所示，可以看出各系統之間的關聯性十分密切，其中系統一與系統二分別負責網路連線與遠端操作的技術開發，是屬於最上層，系統一建構網路存取機制，系統二將借助此平台研發遠端呈現與操作，這兩個系統間有密切的關聯性。系統二同時也將運用資訊處理層的系統三所提供的影像資訊。系統三負責影像資訊的擷取與處理，其處理結果將提供給系統四作智慧型互動的設計，與系統五進行基於影像的追蹤控制器設計，而這兩個系統之執行



Advanced Home Robot 研發架構圖

圖二：家用機器人系統之技術整合圖



各系統間關聯圖

圖三：各系統間關聯圖

亦影響影像資訊之擷取，這三個系統皆屬於資訊處理層。另外系統四負責機器人本體與驅動系統之的研製，系統一負責嵌入式系統硬體與軟體的開發，是屬於最下層的移動式平臺的部分。

所以本計畫之主要目的在發展家用機器人系統及其關鍵技術，並希望能達成以下幾個重要項目：

1. 家用機器人系統之資訊與網路平台。發展運用嵌入式 DSP 以及新興的 Embedded Ethernet 技術，整合出一個擁有靈活彈性且低成本之機器人發展系統。
2. 家用機器人之遠端呈現與操控系統。發展機器人之遠端呈現、虛擬實境與遠端操控。
3. 家用機器人之電腦視覺系統。發展家用機器人的視覺模組。藉由此視覺模組，機器人可以建立三維場景的模型，並推估自身與所處環境間的幾何相對關係，期使行進過程中不致與環障礙物發生碰撞。
4. 家用機器人之智慧型互動系統。探討與設計機器人透過視覺及聽覺系統與家庭成員之互動、機器人與環境中物體如智慧型家電間之互動、及機器人與其他機器人之間之互動。
5. 家用機器人之影像追蹤控制系統。研究機器人之影像追蹤控制器設計。
6. 結合一簡單之機械手臂，並研發出一套設計，讓機器人能依照我們的指示到家庭中的某個地方代替我們抓取或操作某些家庭用品，替家庭成員完成特定的任務。

經由本計畫之執行，我們希望提出機器人控制方面的新架構與理論，研發出具體之機器人與外界互動之資訊處理法則及硬體設備，並且可以落實資訊、控制、電機機械與系統整合的問題，讓人工智慧與學習理論相關學術研究擁有一個很好的橋樑。更可進一步驗證多層式即時多工控制理論架構的可行性，並能夠給予產業學術界注入一股新的契機與力量，對機器人學術界產生具體的貢獻。

### 三、 文獻探討

由於家用機器人是結合資訊與網路平台、遠端呈現與操控、電腦視覺、智慧型互動與影像追蹤控制五大領域之高科技產物，故以下我們將個別探討其相關的研究，有助於我們對個別領域的了解與研究發展。

#### 3.1 資訊與網路平台系統

複雜人形機器人的成功開發代表機器人機電與控制技術的極致展現，也意味著這些技術日趨成熟，可以幫助人類完成更多工作。日本本田汽車公司於 1996 年底開發完成的人形機器人[1]。早稻田大學最早於 1970 年代開始研究二足步行機器人、1992 年成立人形機器人研究中心，研究重點在於了解人類科學、復健

工程、運動科學、及創造人類的助手。另一方面他們開發的 Handaly-2 機器人同時進行模仿人類頭部與雙眼方面的研究[2]。日本的一些大公司也正如火如荼的展開人形機器人原型商品化產品的開發。除了本田公司的本田機器人外，SONY 公司已完成商品化產品 AIBO 犬型寵物機器人，並可用來參加 ROBOCUP 機器人足球競賽。NEC 公司開發的 R100 移動機器人原型裝有可旋轉的頭，而至今已完成十多具二足式步行機器人原型機及步行實驗。其他學術機構或公司所提供的人型機器人更是所在多有[3-8]。同時機器人的研究，也逐漸與資訊網路結合，不再侷限於單純的控制問題[9]。

近年來在資訊家電與網際網路的潮流下，各種型式的電子產品紛紛以家電的型式出籠，然而取代傳統家電的概念畢竟過於狹隘。以 SONY 的 AIBO 為例，其觀念則大膽的以 Robotics 出發，創造出另一種資訊家電，以目前電子技術的發達，AIBO 再加上網路能力即可成為兼具資訊自動化的平台。如 NEC 的 R100 已具備收取與告知 e-mail 的能力等。在家庭機器人上架設網路資訊功能，較之其他載具如 Home Gateway 與 Set top box 等，又增加了移動、感測與高度互動的能力[10-12]，在未來成本降低後，極有可能成為最普遍的資訊家電。

基於上述分析，可移動式的機器人走入家庭似乎已經是一個重要趨勢，然而現階段具備高度智慧的移動式機器人大都屬於較龐大的設備。對於民生化，家庭化的需求仍有一段距離。一個家庭化家用機器人系統，所應有的要求應該是一個體積小，省電，運作速度快，網際網路資訊介面寬廣，具有影像與聲音系統的處理環境，擁有對外在環境之感測介面，以及互動性和家電系統有一定之整合能力的設備。甚至擁有一定程度的人工智慧與擴充能力。反觀現階段環境，要符合以上要求的彈性發展系統並不多。其次，大部分與網路結合的機器人，以 tele-operation 或遠端控制居多[13-17]。就一個具備網路能力的家用機器人而言，其所需具備的網路功能，似乎應再加上現代化資訊平台如 Multi-agent 等技術[18]。

考量未來整合應用的趨勢，一個家用機器人及可能成為家用資訊與控制之出入口，由於其兼具移動式能力，為目前所有方案(如一般 Gateway)等所不能及的。其次，家用機器人結合網路代表虛擬世界(Virtual World)與實體世界(Real World)的整合。許多例子均顯示，這兩個世界的結合將延伸出無限的想像與應用的空間。近十年來在 Robotics 中熱門的研究題目之一為多機器人之間的合作問題，其相關的人工智慧研究稱為分散式人工智慧(DAI)。DAI 的進展目前以模擬居多，也就是大部份均在虛擬世界中進行。與實體結合時均礙於計算平台不足或系統架構過於侷限(如通訊協定不夠開放)而無法發揮。近年來網際網路的成長為這個合作的研究提供了愈來愈好的環境，而家用機器人則將因為這些研究的成果應用，對人類產生更大的價值。在現階段，本計劃並非意指未來家用機器人透過網際網路合作，或如 DAI 的某些研究，使一群機器人達到 Collective Intelligent Behavior。而是家用機器人必然成為如印表機般為人類提供服務的工具，也就是它必將與其他電子資訊裝置合作來完成各項工作，這個概念也就是資訊領域中 multi-agent

的問題，家用機器人由於其互動性高於其他電子裝置，將成為未來世界裡一個重要的 agent。雖然 multi-agent 這個觀念早已被提出並有大量的研究，但以家用機器人為主的技術研發並不多見。其中很明顯的是缺乏合適的軟硬體平台。

就硬體而言，大部分智慧型機器人研究為了解決資訊處理的頻寬問題，大都以 x86 系統與 PC-BASE 來達到此目的。但 PC-BASE 終究不是一個最完美的辦法，windows 作業系統的負載大與成本高，作業系統的底層之透明度不夠大，讓程式開發者研發，實作過程中將會遇到許多不確定性和成本龐大。因此一個針對家用機器人智慧型計算平台與介面之設計便有其必要性。其次，x86 晶片之耗電量仍然可觀，在如機器人等移動式平台上便侷限了其實用範圍。因此卡內基美隆 (Carnegie Mellon) 大學，便率先發表了一款以 Palm PDA 之嵌入式系統為核心的機器人系統。驗證了以 RISC 晶片為核心取代傳統 x86 之 PC-BASE 為基礎的可行性。

以 RISC 架構為行動計算核心晶片在 PDA 與行動電話的推波助瀾下，已經具備相當實力。其中以 ARM(Advanced RISC Machine)的架構最為普遍。在 1999 年，Intel 公司發表了新一款 StrongARM 晶片，改進了傳統的架構使速度由過去的 ARM 的 20Mhz 增加到 206Mhz 整整加快 10 多倍。而 TI 也陸續推出了一款 ARM+DSP 的晶片組，行動式網路通訊裝置公司 Axis 近日推出一套低價嵌入式系統平台。該平台的核心 ETRAX 100LX 是一顆系統整合型晶片，32 位元的 100MHz RISC 中央處理器，內建 10/100 Ethernet、USB、ATA、serial、parallel 和 SCSI 等介面。ETRAX 100LX 還具備記憶體管理單元 (MMU)，能搭配標準 Linux 核心程式的功能。將使整個嵌入式系統的硬體環境更加活潑。

### 3.2 遠端呈現與操控系統

在這方面主要研究乃在於建立整合計劃所提先進家用機器人系統的遠端呈現 (telepresence) 與操控系統，由於虛擬實境在遠端呈現的實踐上已有許多不錯的成果 [19-23]，而其在教育、訓練、模擬、娛樂等領域，也有越來越廣泛的應用 [24-26]。基本上，虛擬實境是以電腦繪圖技術為主製造出令人有身歷其境感覺的模擬場景，通常是以三度空間動態形式呈現，而其也可透過頭盔顯示器 (head mounted display)、手套 (data glove) 與力回饋搖桿 (force-reflection joystick) 等裝置與外界溝通 [27]，並與使用者產生即時互動。

由於機器人無可避免地會與家中的物件接觸、碰撞，所以力資訊的量測、描寫、與處理對操控系統的發展是相當重要的，因此力感測系統的建立是不可或缺的 [28]，而如何有效地將力資訊表現於上述的虛擬場景中，也是需著力之處 [29-32]；另一方面，系統中的操控器也應擁有力回饋功能，讓使用者能感受到來自遠方環境的接觸力 [28,33]，力回饋操控器的開發在國內外均日漸受到重視 [27,34-35]，國內多所大學也有研究團隊投入，目前高精度的商業產品價格均相當高，也因此提供了研發的空間與誘因。

在操控系統的發展中，我們希望機器人能同時處理位置與力的控制策略，亦即順應性控制策略[36-40]，讓機器人能即時面對其與環境互動時所產生的位置與力的變化，因為如果這些變化均需經網路傳給使用者再加以處理，由於回饋、控制訊號延遲現象的影響，將緩不濟急[23,41-42]，計畫發展的順應性控制策略將著重於上述訊號延遲的處理以及其在實際機器人系統上可行、快速的實踐[43-46]；除了在機器人端發展順應性控制策略外，也將在使用者端發展輔助操控的工具，例如自動進行避障路徑導引、以多種視角顯示遠方環境，以及根據工作性質輔助使用者操作力回饋操控器等[30,47]。

由於使用者是以遙控方式操作機器人，因此必須面對作為操作者的人與受控者的機器人在智慧、機構、以及工作方式上的差異，也需對人與機器人本身的控制架構與策略有所了解，讓彼此發揮各自的優點，並且能有一人性化的人機介面作為彼此溝通的橋樑[48-50]；我們發展一人機介面的智慧型學習系統，可以在多次操作之後，逐漸掌握使用者的技巧[48,51]，以輔助使用者的操控，並進行工作執行成效的評估，提供使用者改善之參考；另一方面，在遙控操作的過程中，會同時接收到視訊與觸感兩種回饋，此二者具有不同的形式與傳輸的速度，而它們對使用者也有不同層次的影響[52-53]，將進行分析與調整，讓使用者能獲得較同步、真實的感受。

### 3.3 電腦視覺系統

如何直接由影像而不用已知三維目標物作照相機之內外部參數校準，以達成三維空間的重建一直是電腦視覺中最重要的議題之一，其重要性可由工程上之廣泛應用可見一斑。特別在機器人的設計應用上，以往經常需要借助已知物體之三維資訊，作事先的照相機校準方能得到空間之三維重建，進而完成路徑規劃，目標物擷取等等重要任務。然而，在真實的應用上，行動中的機器人通常無法事先獲得所處環境之資訊，使得原本的校準的方法之應用受到相當的限制。反觀直接由影像中推得所在空間之三維座標的自我校準方法，它能有效地降低離線工作的需要並且大量提升即時三維資訊獲取的可能性，為目前最具實際應用價值的方法之一。

關於照相機的自我校準方法，在早期的研究[54-55]中指出，投射幾何之重建可簡單地由兩張或多張投射影像即可求得。然而，近來的研究目標主要放在如何將三維重建由投射空間提升到歐式空間，以得到物體在真實空間上之三維資訊。最近，由於 Faugeras 等人在[56]提出了利用 Kruppa 公式解出照相機內部參數為固定時之自我校準問題，許多植基於此的類似研究跟著紛紛出籠[57-59]。然而，在[60-62]的研究中，有別於 Kruppa 公式的解法也相繼出現。而這類以所謂 Absolute dual quadric 為解決基礎的方法突破了原本 Kruppa 公式要求照相機內部參數為固定之限制，允許這些內部參數在一連串影像中改變其值。

此外，階層式自我校準方法，將三維重建的結果由最初的投射空間，提升至

仿射空間，最後到歐式空間的校準技術，也被大家廣為接受[63-65]。而進一步，結合以上這些技術的校準方法亦被一些學者提出[61,66]。特別是在[61]，Pollefeys 等人提到了如何在允許改變焦距的狀況下，建構一組線性方程組以求得照相機參數，然而，如果只有兩張影像，基本上此方程組只能得到一個解家族(family of solutions)。故此，原作者在[66]中增加消失點為額外的場景限制來獲得唯一解。

基本上，路徑規劃的目的是在將一自由空間中的物體從初始的狀態（包含位置及角度）移動到最後的狀態，其中的過程必須避免與任何的障礙物發生碰撞。此一領域已經有許多的論文加以探討，而其不同的研究方向包括：物體跟障礙物可能是剛體或可以變形的，障礙物可以是靜止不動或動態的，物體移動的方式可能是任意的或受某些限制（如機械手臂）。路徑規劃的研究可以利用位能場觀念來實現，在這方面也有相當多的研究成果。在[67]中，作者曾探討了利用移動物體跟障礙物間最短距離來計算人工排斥場的方法被拿來做線段間的 local planning。類似的工作在[68]是利用 Yukawa 函數[69]來計算人工位能場，Harmonic 函數在[70]中被用來尋找狀態空間中的物體軌跡。以位能場為基礎的方法，其主要的優點是自由空間的描述比較簡單，排斥力場可以引導物體的移動以達到避碰的效果，而將其應用到更高維度的路徑規劃問題也比較直接。

在[71]中，作者發展了一個位能場模型，並推導出兩線段間的排斥效應（包括排斥力場與排斥轉矩）之解析式。在該論文中並進一步利用上述排斥效應之解析式來發展與智慧型機器人的路徑規劃相關的演算法。在[72]，作者更進一步將二維位能場模型推廣到三維空間中的體，並說明此一位能場模型確實能夠被應用到路徑規劃中，且保證能達到避碰的效果，如此一來與日常家庭實際運作的情況更相符合。

在家用機器人的應用上，若以輪動式的移動而言，其運動大致是可以由二維空間的角度來描述。然而若考慮機械手臂的動作，則三維空間之運動與避障功能，則必須確實建立。目前的參考文獻中，對於三維的剛體以及機械手臂路徑規劃的研究仍是十分缺乏，原因在於資料量跟複雜度的大幅增加，使得一些演算法不能順利地應用到三維空間中。例如：在 1983 年，Schwartz 和 Sharir 提出一個將狀態空間做代數分解為基礎的一般用途的路徑規劃方法，稱為 Collins decomposition [73]，但其計算時間是隨兩倍自由度的維度成指數成長；Canny 將其改善計算時間為一倍自由度的維度成指數成長[74]，但因為過於大量的計算成本，所以這兩個方法在後來都沒被實現在三維空間的機械手臂上。自此，以狀態空間方法的研究都只在二維空間多關節機械手臂為主，如[75]及[76]。

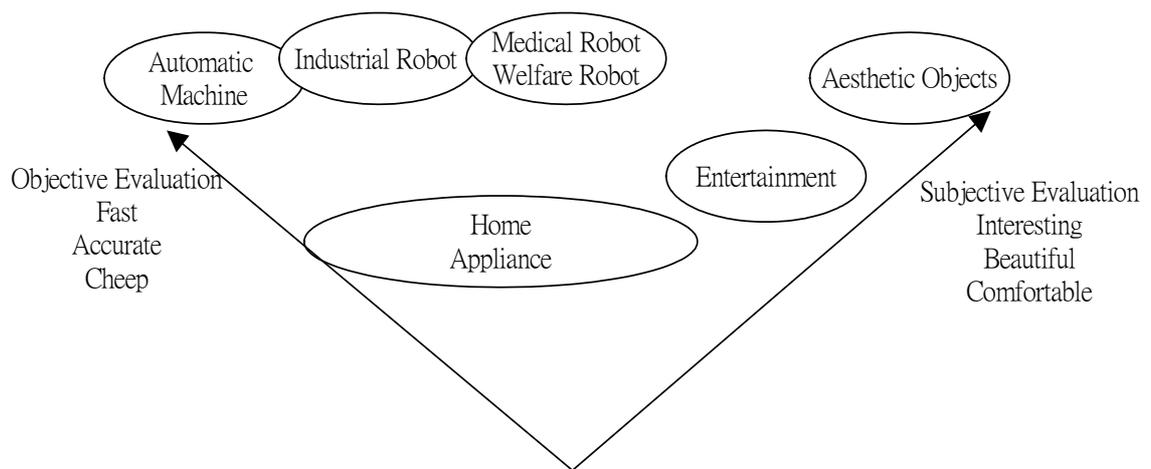
此外，多個機械手臂同時在工作環境中運動的路徑規劃問題，亦將是我們在第二個年度中可能嘗試探討的主題，這種問題除了要考慮手臂與障礙物之間的避碰原則外，還須考慮手臂與手臂間的相互關係（限制亦或合作），其困難度更是提高了。在現有的研究中，多個機械手臂合作的研究並不多見，如 Alami 於 1995 年所提[77]，Koga 所提[78]及 Yeo 所提出[79]，但他們的研究假設都有一定的限制環境，並不能廣泛運用。

臉部辨識相關的研究已進行了超過二十年，迄今已有許多的方法曾被提出，例如，有以比對臉部特徵向量為主[80]，藉由可變形的模板 (deformable template) [81]或是 HMM (Hidden Markov Models) [82]等等辨識方法。此外，Eigenface[83]和 Fisherface[84]，利用特徵向量的轉換空間關係來做臉部辨識的，亦為重要方法之一。基本上，這些方法可歸納分為以組成要素為基礎 (constituent-based) 和以臉部為基礎 (face-based) 兩種。以上這兩種方法的研究都是以單張影像所能獲得的二維資訊為基礎。然而，實際上，人臉具有豐富的三維資訊，僅利用二維之影像資訊，極可能失去了許多可能辨識之可能性。在[85]的研究中，從人臉上挑選取三個特徵點當作參考平面，並求出其他各點相對於此平面的關聯仿射結構，由於此種結構具有投影幾何上之不變性，故其值可作為個人辨識之基礎。在家用環境的考量下，我們希望能夠不嚴格限制人臉正面的朝向，而允許某範圍內之角度改變。

### 3.4 智慧型互動系統

本部份以研發家用機器人的智慧型互動介面為目的，家用機器人與傳統機器人的差別在於家用機器人必須和家庭裡的人互動，所以必須要有類似人的思想機制，也就是他必須要有足夠的智慧來應付家庭中的人員給予他的一些命令甚至能夠辨別其喜怒哀樂，然後採取正確適當的反應。圖四是 Prof. Tanie 所提出對機器人的分類[86]，其分類的方式是按照機器人的功能。傳統機器人如自動化機器或是工業機器人都是基於客觀評估 (Objective evaluation) 為考量來設計，講求高速度、高精度、價格便宜等等；而供人類娛樂的機器人或是具有美感的機器人，他們卻需要有主觀評估 (Subjective Evaluation) 的價值，例如人們會判斷機器人的美醜、給人們的感覺好奇等等主觀意識。從圖四可知，屬於 Home Appliance 的家用機器人必須要包含 Objective Evaluation 和 Subjective Evaluation 的功能，也就是說家用機器人必須能夠有些功能是 Objective，如幫忙家裡一些反覆或繁重的事務、看家、防火救火等等，另外一方面，他們也要能經由訓練學習來和家裡的人互動，讓家人不再覺得他只是一台機器，而是活生生的一位夥伴。因此關於家用機器人與人互動的介面必須要有機器智慧的，也就是具備有學習的能力，能夠應付動態環境的變化和學習新工作 (Task) 的能力。因此我們根據上面的討論，本計畫提出幾個觀點來說明家用機器人的研究方向：

- (1) 互動方面：不同於傳統機器人，家用機器人必須要與人互動，建立更深厚的關係。與家人互動包含認得家人、能夠辨識家人聲音、甚至記得家人的喜好、有自己的情感等等，這些都可以透過學習而產生。
- (2) 環境方面：傳統機器人大多在干擾少且規畫好的工作環境內，但是家用機器人所處環境常常變動如家庭擺設的變化、家人的走動等等。不再是



圖四：機器人的分類[86]

預先可以規畫好的。如果機器人可以像人類一樣有學習的能力，那麼他應當可以應付動態環境所帶給他的挑戰。

- (3) 功能方面：傳統機器人的功能通常是設計者早就規畫好了，所以要增加功能，就必須要重新推出新型機器人來。若機器人本身有學習的功能的話，那麼我們只需要賦予它基本的能力，複雜的能力就可以經由訓練來達成。

因此，本計畫之目的在研發一套具有學習機制的智慧型互動介面，於是我們做了以下的文獻回顧：

### 3.4.1 家用機器人之構造與運動平台

家用機器人運動平台的設計上可關連到自走式機器人(Mobile robots)的研究發展上，因為兩者所強調的都是如何讓機器人在環境中安全的移動。自走機器人的發展歷史上已具有相當多的研究成果，並結合各種不同的感測器，以使機器人能在環境中安全的移動。在移動平台的技術發展方面，早期技術是利用地標[87](Land mark)來達到在環境中對機器人做定位的目的，這種方式對於一環境變化性較低的情況下較有效率。近來之系統多採取利用影像[88-90]和輔助的感測器（如：超音波[91][92]）、紅外線[87]、等）進行對環境的探測，以達到對環境資訊的了解，並進行動線規畫來增加移動之機動性和安全性。而機器人在移動時，所面臨的問題不只是靜止不動的障礙物（如：家具...等），而必須包括移動性的障礙物（如：家人、動物....等），因此如何安全地移動或避免碰撞，或者是當碰撞無可避免時如何盡量減少傷害，都是我們在設計家用式運動平台所必需考量的重點，所以如何設計一智慧型機器人系統[93]和友善（Human-Friendly）的軟硬體系統設計將會是我們所關心的問題。

由其他人的研究結果我們可以發現家用機器人目前的設計趨勢，並比較其優缺點。在移動機器人方面，東京大學教授 Tamio Arai 實驗室的 Fujirobo 主要是著重再智慧型移動平台之設計[94]。日本 Tohoku 大學 Prof. Yuta 實驗室的 Yamabico2 在平台上加入機器手臂[94]，以達到跟外界環境之互動功能。另外 Univ. of Western Australia 之 Prof. Thomas Braunl 實驗室所設計之移動式機器人[95]，主要是以 PDA 當作主控制器，並結和影相技術和模組化之機構設計，以提高穩定性，其設計如圖五所示。

在現今之家用機器人(Home robot)之發展上，最成功的可算是近日本 Sony 推出機器狗愛寶，NEC 也推出一款家用機器人 Robot100[96]，其功能不同於愛寶之寵物功能，而著重在與人之溝通和服務等。此外基於 MIT 研發團隊之 I-Robot 公司亦推出一款已商品化之智慧型機器人 I-robot[97]，因此可見家用機器人在未來是充滿發展性的。



圖五：EyeBot, Prof. Thomas Braunl, Mobile Robot Lab 所設計之移動式機器人



圖六：NEC Robot100 [96]

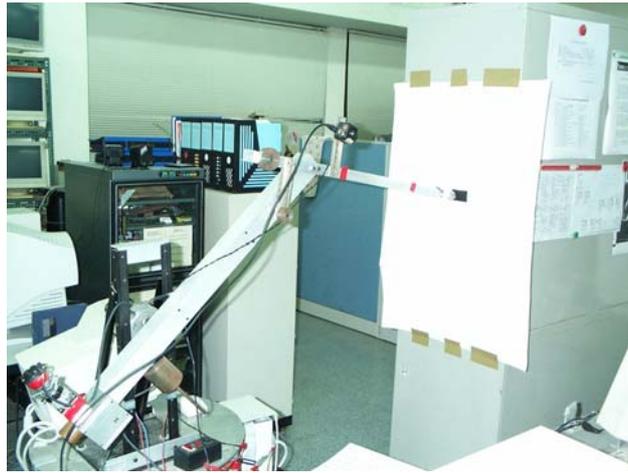


圖七：I-robot [97]

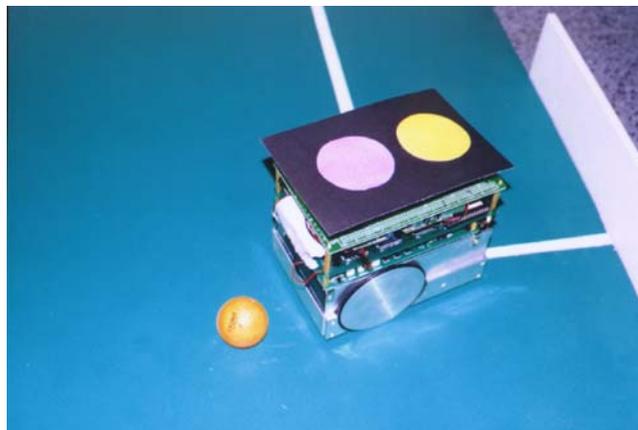
基於整合性的考量，因此日本早稻田大學的 Tetsuya Ogata 和 Shigeki Sugano 提出一整合性之設計，其中包含運動平台、機器手背、超音波、CCD、麥克風和頭部機構，所以可說是相當完整之設計[98]。計畫主持人在過去所執行的計畫中先後完成了結合超音波及影像導引的自走式機器人[98](圖八)、移動式機械臂 [99](圖九)、足球機器人[100](圖十)、導盲機器人[101](圖十一)。本計畫將結合累積的硬體與軟體經驗朝向更實用化之先進家用機器人研發。



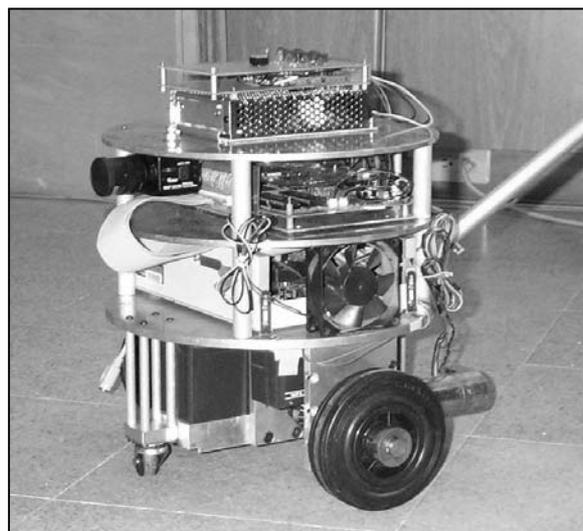
圖八：實驗室所研製之自走式機器人



圖九：實驗室所研製之移動式機械臂



圖十：實驗室所研製之足球機器人



圖十一：實驗室所研製之導盲機器人

### 3.4.2 家用機器人與環境互動之設計

文獻上已有許多智慧型機器人與環境互動方面的研究成果[102-109]，可了解到一個機器人頭部及其具備影像追蹤功能的必要性。基於本家用機器人的影像追蹤功能，機器人之頭部機構將會設計成二軸機構，一軸為控制左右方向，一軸控制 CCD Camera 之上下方向，而二軸機構則有以下優點：

- (1)兩軸的配合將可以組合成一三度空間之工作區，進而達到靈活追蹤物件與環境資料搜尋之目的。
- (2)比一軸機構靈活，可運動空間大，自由度高，可完成一軸機構所無法達成之動作。
- (3)在機構方面又比三軸(含)以上之機構簡易，且頭部之動作使用二軸即已足夠。
- (4)機構簡單容易實現與維護。

而在視覺方面，將由單一個攝影機來達成任務，使用單一 Camera 原因有以下幾點：

- (1)影像追蹤功能由單一 Camera 即可實現，可節省成本。
- (2)使用立體視覺追蹤時，Camera 需要經過精密校正，否則會有極大誤差產生，而單一 Camera 可避免此問題。
- (3)Camera 數量增加代表重量也增加，相對要推動的馬達力量也需要更高，馬達瓦數增加體積重量隨之增加，會減低靈活度。

### 3.4.3 智慧型影像感測器之研製

近年來，CMOS sensor 之相關領域被廣泛的研究。1995 年，E. R. Fossum, A. Dickinson, B. Ackland, E. Eid & D. Inglis 提出典型 CMOS APS 的結構[110]，主要包含了感光部份 (Pixels Arrays)、時序與控制部份 (Timing & Control)、類比信號處理部份 (Analog Signal Processors) 以及類比／數位轉換器 (A/D Converters)。至於應當選擇何種處理的電路來搭配感測電路呢？由於對一個家用機器人來說，除了特定要求外，環境中大部份的資訊對其而言毫無意義，如亮度、表面紋路等。此外，於單一影像中，亦可分為動態與靜態兩個部份，其中靜態部份亦即靜態環境部份，而動態部份則為影像中之動態物件，對於一連續的環境影像來說，靜態環境部份是不變的，而產生變動的是影像場景中的動態物件；此外，於單一影像中，亦可分為動態與靜態兩個部份，其中靜態部份亦即靜態環境部份，而動態部份則為影像中之動態物件，對於一連續的環境影像來說，靜態環境部份是不變的，而產生變動的是影像場景中的動態物件；然而在影像資料的傳輸時，卻是將整張影像進行傳輸，對於靜態部分的重覆傳輸，實是沒有必要且費時的，因此，若能將影像的動靜態分離，只在一開始傳送靜態影像資訊 (亦可稱之為環境資訊)，而後則只傳送動態的影像部份，相信可符合之前所考慮到傳輸資

料量與傳遞距離的考量，並且更直接的取得我們所想要用於控制系統上的資訊，達到 On-chip 的處理，則可以大幅減少處理對於系統無用之資訊時所花費的時間。此外，由於本部份之計畫主要目的在於完成家用機器人於防火、防盜及即時監控之功能，其主要目標物都同屬於動影像中之動態物件，故以上就動態及靜態分離與擷取上的立意來說是正確的。

再就防火功能上來說，傳統的 Smoke sensor (Fire sensor) 通常都是以 Trend detection method 來實現[111]，然而由於其利用 Bi-trend criterion 的方式並不止以充分的辨別出火災的發生與否，導至誤判率的增加，故進而有了 Exclusive trend detection method 的提出[112]，以修正原先 Trend detection method 的不足，然而其算式太過繁複，不易於晶片中以電路實現，故通常是利用電腦來進行後級的訊號處理，此一步驟將大幅的降低即時系統的操作頻寬，就家用機器人於即時應用上的需求來說，並不適用。再就 smoke sensor 的種類來討論，smoke sensor 主要可分為二大類：一是 Photoelectric smoke sensor，另一則是 Ionization type smoke sensor。就應用上來說，一方面 Photoelectric smoke sensor 的整合性較高，且應用面較廣，不局限於單一 Fire detection 上的應用而已，另一方面則是可透過 chip-level 電路的整合來減少系統於訊號處理傳輸上所需花費的時間，故就家用機器人的應用上來說，前者 (Photoelectric smoke sensor) 優於後者。

#### 3.4.4 家用機器人與家庭成員之間之互動系統

除了影像辨識以外最重要的機器人與人之間之互動管道應該是語音辨識系統了。基於需要用到語音的技術來達到機器人與使用者溝通的目的，因此需要了解今日語音技術發展的現況，整體上看來，語音技術已普遍的商業化，顯示語音的技術已到達某一種成熟的階段，語音運用成功的例子也是越來越多，有些甚至已經普遍的存在於我們的日常生活中，例如有很多單位採用的「自動語音查詢系統」就是一個很典型的例子，最早最成功的例子是 1983 年在日本的金融界利用與日本電信公司 (NTC) 結合，製作出語音客戶查詢系統 [113]；而在國內，為了使電腦及資訊家電產品能夠更容易的使用，對於智慧型人機界面的發展也很積極，像是工研院就有發展所謂「消費性語音處理技術」、「智慧型人機交談技術」……等等，產品有像是大哥大的免持聽筒撥號系統……等等，因此，我們可以很清楚地知道，語音技術可以使用的範圍十分寬廣，其中利用「聲音控制」對發展具人性化家用機器人是一項關鍵的技術，因此，我們可以很清楚地發現，為了使機器人具備與使用者溝通的能力，將語音技術加之於上是一個很自然的選擇與必然的趨勢，目前在國內外也有著相當多的研究將注意力投注於這一方面之上。

基於考慮我們所訴求的是對於「中文語句」的辨識能力，我們知道在中文語句的辨識技術上，利用以 HMM-base(隱藏馬可夫模型 Hidden Markov Model)或者是其變形的模型等多種語音辨識方法發展下的系統，在特定語者 (Speaker-Dependent) 的使用模式下，辨識成功率可以達到 8 成以上 [114]，甚至都可以

超過9成，另外，像是國內工研院電通所在1995年的資訊月成功展出「PC版非特定語者中文語音辨識系統」，該系統無需經任何認音訓練即可使用，可實時辨識任意指定的多音節中文詞，最多可達一千詞，在586個人電腦辨識一個詞的時間約為一秒，一百詞基本詞庫的辨識率在百分之九十五以上，一千詞詞庫時仍可達百分之九十以上，使用者可以連續自然發音，沒有一般系統逐字斷開發音的限制，並可現場加詞，可隨時加入要辨識的新詞。該系統在一般個人電腦配備標準音效卡及麥克風即可使用，使用之作業系統為Windows 95中文版，祇需佔用額外的1M位元組系統記憶體。

而在真正實現、發表的機器人系統中，某些已經具有高度的成熟性與複雜性，不管在外型、功能上都較為接近真人，代表性的例子是MIT AI實驗室發展的機器人—COG [115]，為一高度擬人化的系統，而其子系統分工到了非常細密的程度是這個機器人的一大特色，最重要的是其發展已經到達具有所謂「思考」的能力，系統的特殊設計賦予它能夠有類似人類嬰兒的思考、行為模式，這一點是我們認為它具有高度擬人化的原因之一 [116]。另外有些設計是強調機器人與人的之間所謂一種「感情表達」的能力，一例是MIT AI實驗室發展的機器人—KISMET [117]，這種機器人強調的能夠與人之間的互動，具有特定的臉部表情、肢體動作與聲音表達，而在處理所謂感情表達的過程中，是以訂定某幾種較為基本的表情動作（例如讚美、生氣……等等）來分析，仍具有其限制性，而在前端訊號處理的過程仍是類似的以訂定特徵參數、特徵粹取、特徵加強、分析特徵、比對特徵等方式來做，甚至用到類似一種統計方式來進行辨識誤差的分析。某些例子的機器人其對話系統（Dialogue System）具有所謂的「學習性」，可使機器人在特定環境的使用中，透過不斷的與使用者進行溝通來得到新的資訊，以利於機器人判斷下一步的動作，這使它們更能與使用者做互相的溝通、對話及對環境的適應更好，一例是Stanford University發展的辦公室機器人（Office Robot）-- Jijo-2 [118]。除了利用語音來達到操控機器人之外，也有利用語音加上「手勢辨別」來互相搭配[119-120]，除了直接利用語音做為命令的控制外，再加上用手勢的方向辨別來加強對於任務目的地方向的確定性，或者是搭配特定手勢來下達對機器人的命令。藉由以上的分析，我們可以知道，智慧型、擬人化的機器人在與使用者的互動上可以有很多方面的設計考量，很多方向可以發展，因此，將具有實用功能的家庭用機器人搭配上智慧型的介面，令其可以充分的發揮與使用者溝通的能力是我們將要努力的方向。

#### 3.4.5 機器人與其他機器人之間之互動與合作

當任務複雜時，我們會考慮機器人合作方式來完成任務。因為服務用機器人處於極複雜的環境，不易預先對所有的可能做規劃。最好的方式就是放棄集中的思考方式，將決定的權利下放，讓機器人彼此交談、自我分派任務。這種思維方式已被運用在許多場合。美國聯邦航空總署讓飛機彼此通訊並選擇自己的航道，以增進飛航安全、舒緩空中交通瓶頸；日本人把鐵路交通的調度交由各地區進

行，來替他們準的不可思議的子彈列車排定班次[121]，機器人亦可循同樣的思考邏輯，因此分散式的機器人合作系統就成為了一個相當熱門的研究領域。日本的學者 Arai 提出了一個即時的任務指派架構，利用任務樣板的觀念來處理時變的工作目標及可能改變的機器人成員數目[122]。Alami 等也提出 M+協定讓機器人來自行分派工作[123]。這個部分牽涉了機器人的決策機制及資源衝突或死鎖（dead-lock）情況的避免，有相當多的理論被提出來解決這種問題，如 Game theory[124-125]、Fuzzy logic[126]、Petri Net[127]等。不過這方面的研究目前大部分仍限制在某一理想的環境下，因此需要一個標準的實驗平台作測試，機器人足球就是其中最知名的一個[128-131]。然而這種群體的思考方式仍需要某些程度的管制，倘若沒有任何的約束，下層的機器人群體將因選擇過多而癱瘓。MARTHA 計劃的目標在於讓自走車群在機場或碼頭等地協助搬運物品，將路口的衝突或相互閃避的行為交由自走車自行判斷，但是路徑的選擇仍交由一中央控制站來處理[132]。因此如何將資訊及處理能力有效的分配在每一隻機器人身上，將是一個重要的研究課題。

另外一個值得探討的課題是與網際網路的整合。目前已具網際網路整合遠端監控的機器人系統可概分為兩大類，第一種是對固定式機器人（基座固定不動）的遠端監控，另一種則是對移動式機器人的遠端監控。固定式機器人的遠端監控系統主要用於天文望遠鏡，或是環境影像監看；這種系統主要訴求是利用網際網路的普遍及便利性，讓全球各地的人可以隨時隨地獲取伺服端的天文或工作場景資訊。也有用於機械臂的操作，這種系統不只可以獲得影像資訊，使用者也可以利用機械臂來操作遠端的物體或執行某種任務，此類系統為了增進操控性，常與虛擬實境技術或感知回饋感測器結合。然而對於固定式機器人遠端監控系統而言，由於機器人本身沒有移動的能力，因此可以執行的任務及收集的資訊就受到了限制，因此越來越多研究人員將焦點放在移動式機器人的遠端監控系統[133-137]。這種系統特別適合用在保全、危險物品搬運或清理以及危險環境（如核電廠）和不可及環境（深海或外太空）的工作上，也有用於娛樂及一般性服務。不過根據 Engwirda 等的調查[138]，目前的網際網路監控機器人的控制模式皆為由操作員直接控制，並無合作式機器人系統與網際網路整合的研究。事實上與合作式機器人系統整合應是發展的重點[139]，使用者只需要指定工作目標（例如清除某一區域的垃圾），執行的細節由機器人群自行決定，才是智慧型的遠端監控，同時免除因網路壅塞造成的操控延遲，如此更能應用於實際環境。

### 3.5 影像追蹤控制系統

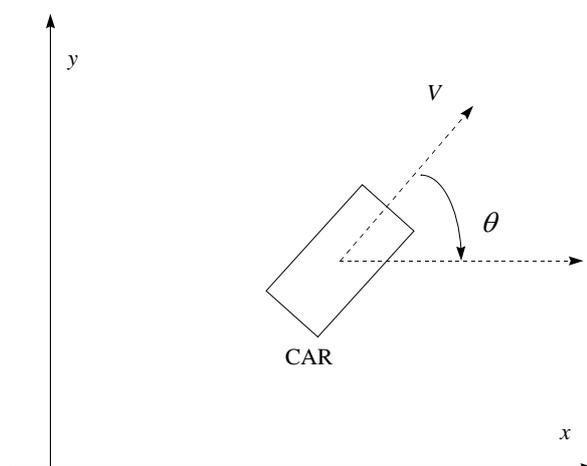
移動控制是整個家用機器人研製計畫中不可或缺的一環。事實上，家用機器人要成為人的幫手與夥伴，沒有移動能力是很難辦到的；試想我們所飼養的寵物，即可得知其重要性。本部分首先將著重在快速的定位與追蹤控制器設計上，以符合家用機器人移動控制的實際需求。完成前面設計之後將結合影像的資訊來

加強移動控制的功能;一方面應用應影像處理來避障及規劃路徑的成果以取得期望的追蹤軌跡,另一方面也希望由影像的資訊來校正家用機器人的實際位置,最後更希望藉由直接研究家用機器人移動控制在影像空間的動態模型,以精確控制家用機器人。如此一來,使用者將可直接以影像設備(如螢幕)控制家用機器人的動作,大大提高了家用機器人的實用價值。

家用機器人的移動機構將由兩輪的自走車組成,因此就移動控制而言,我們可將討論限制在國內外對自走車的相關研究上。自走車控制之理論研究起點始於1990年左右,其最簡化的動態模型為以下之三階微分方程式:

$$\begin{aligned}x' &= v \cos \theta \\y' &= v \sin \theta \\ \theta' &= w\end{aligned}\tag{1}$$

其中  $x, y$  為平面座標,  $\theta$  為水平夾角,  $v$  為向前速度,  $w$  為角速度。



圖十二：自走車動態模型圖示

即使像系統(1)如此簡單的模型,依然存在許多控制上的困難。例如系統(1)之線性化系統為一不可控制系統,故無法使用線性回授來控制之,等等都顯出控制此系統之困難度。更甚的是系統(1)違反 Brockett [140] 所提出之穩定性必要條件,因此無法找到  $v = \alpha(x, y, \theta)$  及  $w = \beta(x, y, \theta)$  型態的連續控制器使之穩定。但也因為這種特性引發了許多學者的研究與注意。為了克服上述的困難,在這方面的發展,目前有兩個主要的方向,一為不連續控制器,一為使用時變之控制器,兩者各有其特色與限制。在時變之控制器設計上,主要有平滑(smooth)

控制器設計與為了改善收斂速度而引進的指數收斂(exponential convergence)控制器等(參考[141-146])。前者之控制器簡單、平滑，然而收斂速度太慢，而後者之控制器收斂速度快，但控制訊號並不平滑且設計方法複雜，導致實際設計上之困難。因此，如何設計一簡單、平滑且收斂速度快的控制器，將是非常有意義而且重要的。另一方面，除了前述之定位控制外；在應用上，經常是以一軌跡來導引自動車，因此追蹤控制之重要性，自不在話下。

目前在這方面的文獻很少(參考[147-148])，其中又僅有三階簡化模型(系統(1))及特殊的追蹤軌跡(如直線、圓)被討論到，一般的情形則仍然未知。由以上可知，自走車的追蹤控制仍然存在許多值得研究的課題。在大部份的文獻中，皆利用適當的座標轉換將系統(1)化為以下型式(chained-form)再行處理：

$$\begin{aligned}x_0' &= u_0 \\x_1' &= x_2 u_0 \\x_2' &= u_1\end{aligned}\tag{2}$$

詳細的討論與發展請參考[149]。不管系統(1)或(2)皆為所謂的 driftless 系統。在 1990 年代左右，Coron [150] 提出了一個理論證明一般可控制之 driftless 系統，皆存在一個時變的控制器使閉迴路有穩定性。可惜的是，他無法給出一個“確實(explicit)的控制器”。因此後續便有 Pomet[151-152]接續他的工作，提出一些 explicit 的平滑時變控制器。Pomet 所提出控制器的缺點是收斂速度相當慢，我們曾做過的模擬顯示，使用 Pomet 之控制器在一段很長的時間內，閉迴路系統仍然會有相當的殘餘值存在。Pomet 之後的發展，便是性能的改進，近來在這方面有長足的進步。在改進系統的強健性(robustness)或適應性(adaptive)方面有 Jiang [147,153-156] 的文章，使用動態回授、輸入微分、backstepping 等非線性控制的技巧，Jiang 等人解決了一部份適應性控制問題。在改善閉迴路收斂速度上，有 M'Closkey[141-142]乃至最近的 Samson [151,157-158]等提出的指數收斂控制器(exponential convergence)。大體上他們皆使用 homogeneous of degree zero 之微分方程式的特性來達到指數收斂，然而由於系統(2)之先天限制，所得到的控制器為非平滑的(形如  $(x_1^2 + x_2^2)^{1/4}$ )。

明顯的，設計一個收斂速度夠大，而且又是平滑的控制器，將更符合家用機器人的實際需要。但是從上述文獻看來，存在許多先天的困難需要克服；這一點正是本計畫打算解決的問題之一。另一個最近的發展，則是自動車之追蹤控制器設計問題，這方面的研究，早期有 Samson 的研究[148]，最近則由 Jiang 與 Nijmeijer [147]所提出，他們的研究成果主要之限制是所要追蹤的函數不能趨近於零(即車子一定要動)，這樣的作法大大限制了可應用的範圍，例如若要車子以指數速度歸位至零，前者的控制方法即無法辦到。會有這些限制，主要在於車子動與不動牽涉到整個控制結構問題，請參考和計畫相關文章[159]上之討論。

綜觀上述，目前在自走車的追蹤控制上，存在以下幾個主要的問題：

- (1) 收斂速度不夠快。
- (2) 控制器太複雜，不易實現。
- (3) 在追蹤控制上，一些重要的 case 無法控制等。

另一方面在國內自走車控制之研究上，已有多位專家學者投入也已獲得不錯的結果([160-162])。不過，這些研究工作的主要方向乃在於 Sensor 之研製(紅外線、超音波、衛星定位、陀螺儀等)，動態軌跡規畫及使用智慧型控制等。智慧型控制當然有其優點。例如，不用很詳盡地探討論物理 Model 之特性，即可獲得不錯的控制效果等。然而必須反覆幾次的學習方能有好的追蹤效果及很難有嚴密的理論證明為其弱點。假若可以從另一個角度來研究並相互比較之，將有助於國內自走車控制的發展。

相對於上述 2D(平面)空間之自走車移動控制之研究，最近亦有學者提出影像空間的移動控制問題[163]。主要的考量在於影像設備可協助自走車避障與決定位置等，未來更可方便使用者直接在影像空間上規劃軌跡，使自走車的移動控制更具人性化等。然而該篇文章的研究範圍僅限制於定位問題，追蹤問題則尚未被觸及。另一方面，自走車的影像空間動態模型仍有許多討論與研究空間，不同的動態模型各有其不同的意義。

## 四、 研究方法

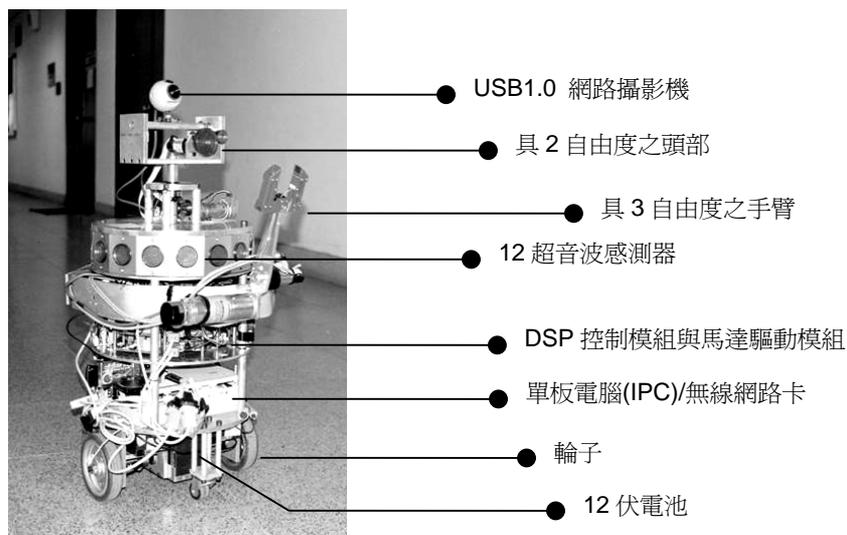
### 4.1 家用機器人之智慧型互動系統研發

此部分主要目的在設計一個可以在家庭中和家人相處的家用機器人與家庭成員之間智慧型互動系統與其介面。由於是要與人類共處的機器人，因此它的外型動作及人機介面都將與傳統的工業機器人有非常明顯的差異，所以我們研究及發展一適合家庭用途的自走式機器人移動平台，研製其馬達控制驅動及本體設計。其次，我們也會說明機器人與環境的互動、機器人與家庭成員的互動、及機器人與機器人之間的互動。

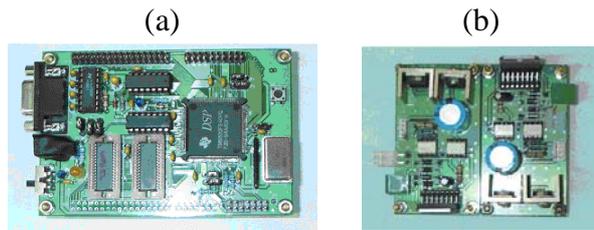
#### 4.1.1 家用機器人本體機構設計

本計畫所設計的家用機器人外型是屬於移動式機器人的架構，分為兩個部分：本體與頭部。本體底部有兩輪驅動並由兩個輔助輪保持平衡。家用機器人的設計目的為走入家庭並提供娛樂與生活輔助用途，為避免給人壓迫感並增加親合力故其體積不能太大，本計畫設計之機器人本體與頭部高度共 610 mm，寬度為 300 mm，圖十三顯示家用機器人之照片。其不但具有網路操控與影像監測功能外，同時也裝配了具 3 自由度的機器手臂，以提供機器人與環境中的物體互動之功能。

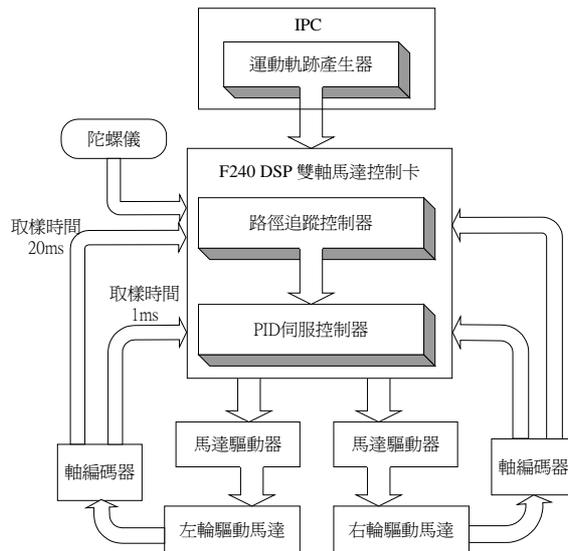
在家用機器人的移動方面，車上控制電腦(IPC)只要下達運動的命令，剩下的就交由運動控制卡來處理，使其能在在規劃好的路徑上達成精確的運動控制。路徑追蹤控制需要路徑追蹤演算法與車體運動模型來交互參考運算，此運動控制卡是獨立模組，所有的運算都不消耗 PC 的資源，我們以德州儀器所出產的 TMS 320C240 數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)[36-38]為核心，來發展雙軸耦合路徑追蹤運動控制卡。圖十四(a)為運動控制卡及馬達驅動電路實體圖。



圖十三 家用機器人之照片



圖十四(a)控制卡實體圖(b)驅動電路實體圖



圖十五 運動控制系統架構圖

機器人之運動控制模組可分三部份，如圖十五所示：

1. PC 端：將控制命令經由 RS-232 傳給運動控制卡。
2. DSP 控制卡本體：接收 PC 端的命令以路徑追蹤控制器 PID 控制法則來控制雙軸馬達。
3. 驅動電路：將控制訊號與驅動訊號隔離,接收控制訊號驅動馬達，實體圖如圖十四(b)所示。

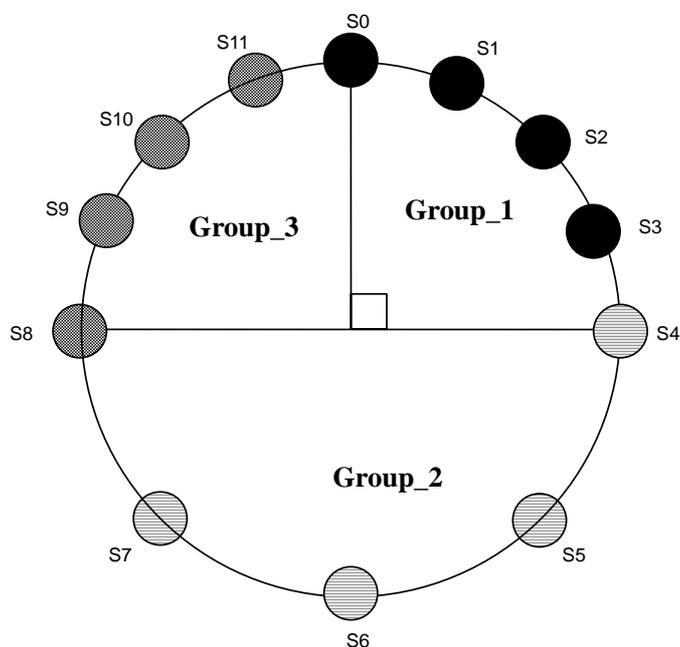
#### 4.1.2 環境辨識感測模組設計與製作

我們採用超音波感測器來當機器人的環境感測器。利用超音波感測器量測環境資訊，用以躲避障礙物、並建立環境地圖。我們利用單晶片 8051 為主控 IC 控制 12 組超音波 Module 的發射，再藉由 8051 的 I/O 埠讀取超音波的 Echo 訊號，以 8051 內建的 Timer 來計算從超音波發射到接收到 Echo 的時間間隔： $\Delta t$ ；再透過 8051 的 RS-232 埠將所得到的  $\Delta t$  傳送給主控電腦計算出障礙物的距離。下面圖十六為超音波模組電路模組實體圖。在超音波模組的配置規劃上，採取每個 Module 相隔  $22.5^\circ (\pm 11.25^\circ)$ ，如此就可以涵蓋到超音波主要的感測範圍，Robot 背後的 Module 相隔  $45^\circ$  配置的方式；所以總共用了 12 個超音波 Module。配置方式如圖十七。為了增加超音波感測模組之掃描角度，我們採用 Borenstein 之

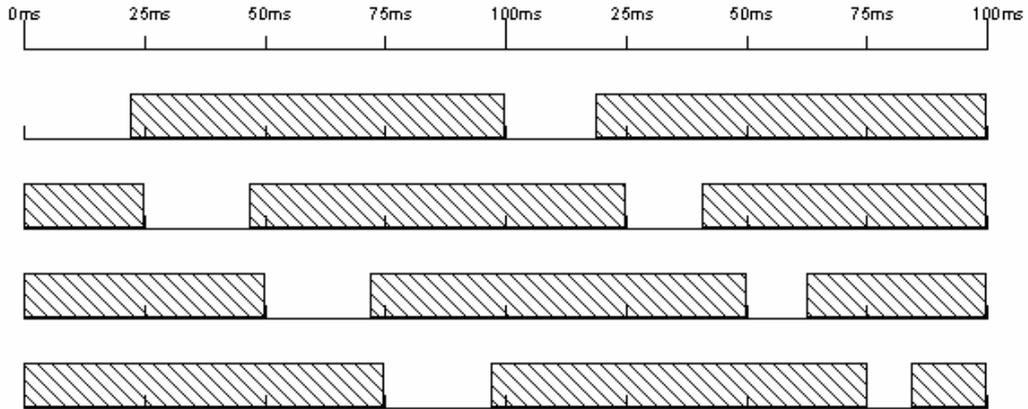
EERUF 的超音波發射方法，設計超音波發射順序電路。藉由事先規劃的時序，如圖十八，將 12 個 Sonar 分成 4 個一組共 3 組，每一組的時序相同。表一所示為此超音波感測器模組之發射時序表；再經由 8051 分別讀取各個超音波感測器收到 Echo 訊號的時間，並將這 12 組時間資料透過 RS-232 傳回給 IPC，IPC 再將這些時間資料轉換為距離資料。圖十九為實際量測 12 個超音波感測器的情況。



圖十六 超音波模組電路模組實體圖



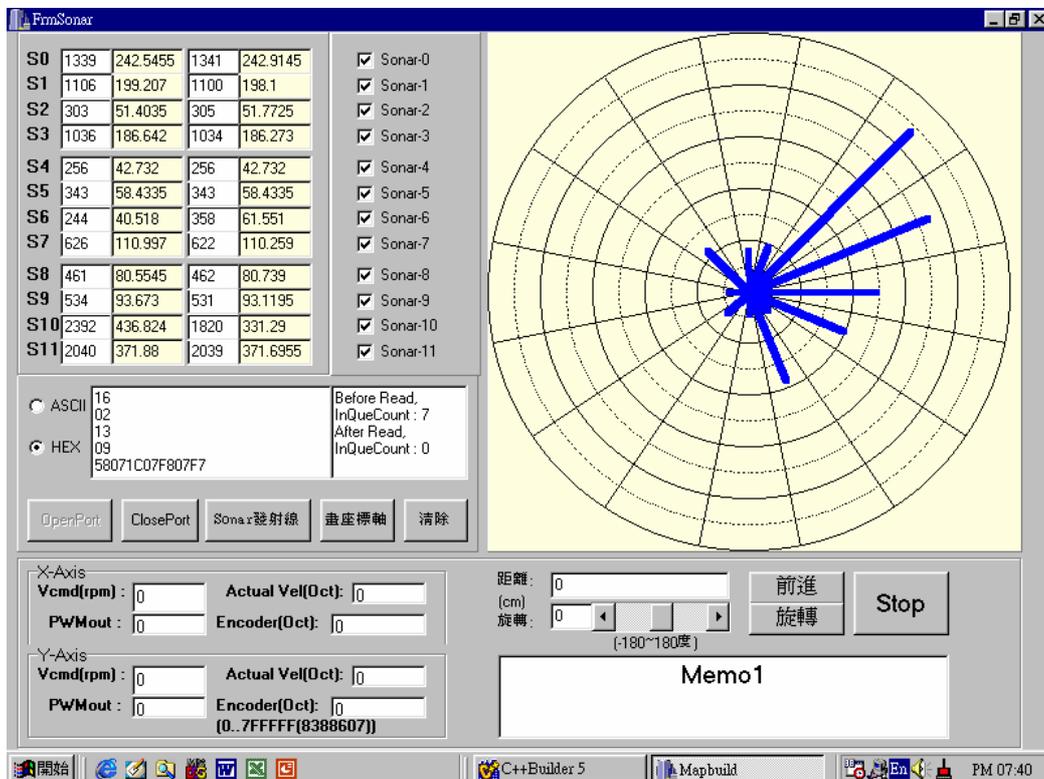
圖十七 超音波 Module 配置圖



圖十八 超音波發射時序

Sonar	S0,4,8	S1,5,9	S2,6,10	S3,7,11
<b>T-lag(ms)</b>	0	25	50	75
<b>T-wait,a(ms)</b>	24	24	24	24
<b>T-wait,b(ms)</b>	22	16	10	4
<b>T-fire,a(ms)</b>	24	49	74	99
<b>T-fire,b(ms)</b>	22	41	60	79

表一 超音波感測器發射時序表

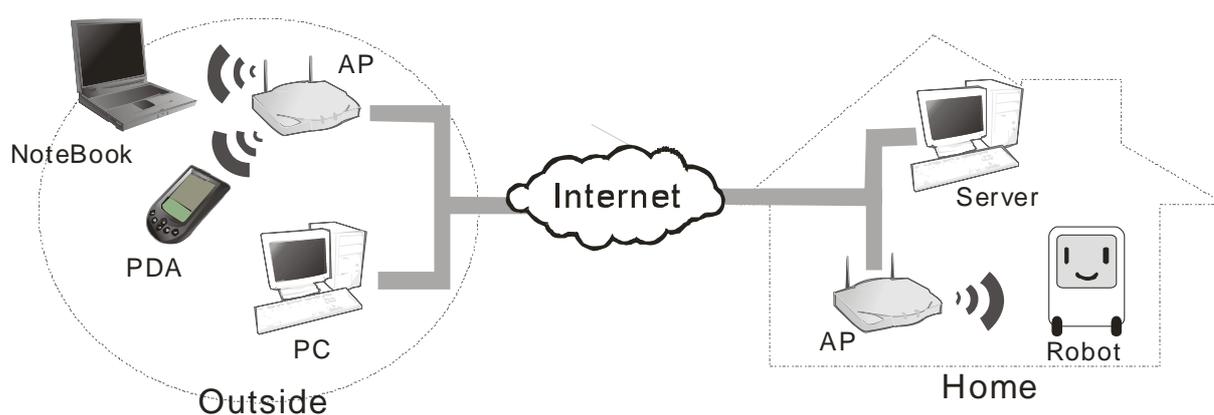


圖十九 十二組超音波感測實驗畫面

### 4.1.3 網路互動控制

本計劃也發展一網際網路遠端操控機器人系統，可以讓我們在世界任何一個角落，透過 internet 遙控家裡的機器人，不但能夠直接控制機器人的移動、安排它巡邏的路徑，監控機器人所在的位置狀況，還可以看到機器人所在的環境影像。使用者不需要作任何安裝的動作，只要輕鬆上網瀏覽即可。使用者可以隨時隨地透過網路操控機器人，更換巡邏路線，取代固定式的監視器的有監視死角的缺點，達到居家看護與安全監控的效用，如圖二十所示。圖二十一為影像監控操作實例圖，機器人能利用攝影機將觀測畫面透過網路即時的傳送至使用者端，透過電腦或 PDA 來觀看。搭配電腦使用可以獲得更清楚的影像，提供更充分的資訊；而 PDA 則提供外出時使用的便利性。如有需要的時機器人也可以錄製畫面提供使用者參考。

在機器人端，我們架構一個精簡之 Linux 系統，使用 CF 卡為儲存媒介增加系統之強韌性。透過無線網路可即時將 camera 抓取之家中影像壓縮並透過無線網路傳回 Server。另外也回傳機器人的狀態與位置提供使用者參考。在 Server 端，替使用者端以及機器人端交換資訊，包括使用者的命令、機械人的狀態以及機器人所抓取之影像。透過 Server 管理連線可減輕機器人的負擔，並且按照用戶端的狀況調整影像品質，維持最佳操縱狀態。在使用者端，利用 JAVA 跨平台之特性製作操作介面程式。使用者可透過 PDA 或者任意平台電腦上的網頁瀏覽器操控家中之機器人，檢視家中狀態，安排巡邏路徑或者自由行走皆可。操作介面以簡單為主，只要 click 即可輕鬆操作。未來再配合上醫療儀器或警報系統，將可使家用機器人擁有更多與人互動的應用，可達成家庭看護及家庭保全的功能。



圖二十 網際網路遠端操控個人機器人系統



PC 端監控



PDA 監控



PDA 監控畫面

圖二十一 影像監控操作實例

#### 4.1.4 家用機器人語音及人臉辨識系統

在家用機器人與家庭成員之互動系統設計方面，我們的目標是整合家庭成員辨識系統及語音辨識系統，以提高家用機器人與人的互動性及使家用機器人能提供使用者更多的幫助。目前已有許多機器人配有語音辨識系統，本計畫需求的是一能獨立運算的語音辨識平台，因此我們採用了德州儀器公司生產之 TMSVC5402 DSKBoard 來作為整體系統的核心，並利用 RS232 串傳輸介面將語音辨識結果回傳給主控電腦。這樣的設計模式一大優點是大幅減少主控電腦的負擔，主控電腦只要負責接收運算處理完成的結果，並對於接收到的結果作出適合的判斷和發出控制命令。如此一來資源可以分配運用到更適合的地方，以正確的控制家用機器人的各個反應動作。在系統整體辨識率的表現上，中文平均辨識成功率可達 90% 左右，英文則可以到達 94% 左右。辨識時間在 8 組的字彙量實驗設定下，維持平均所需辨識時間 0.76 秒左右，如表二及表三所示。目前已在家用機器人本體上完成運動控制的實驗測試，可以用符合一般說話方式對家用機器人發出運動控制的命令，讓家用機器人在使用者的指導下，作特定路徑的移動。

運動控制	功能說明
Robot (作為呼叫之用)	下命令之前的呼叫
停止 (Stop)	停止
前進 (Go)	等速前進
後退 (Back)	等速後退
左轉 (Left)	左轉
右轉 (Right)	右轉
加速 (Accelerate)	提升一個速度等級
減速 (Decelerate)	減少一個速度等級

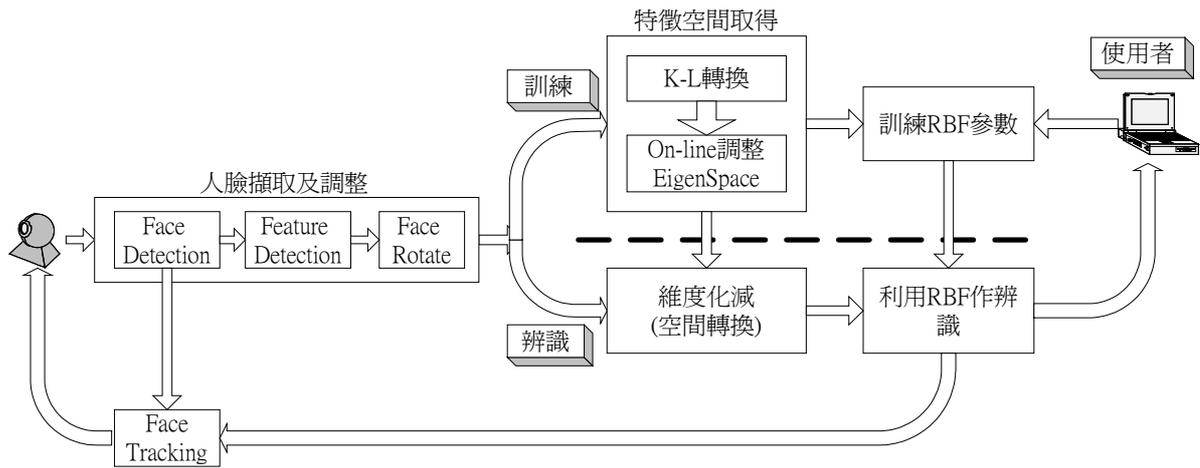
表二 運動控制命令設計

控制命令	辨識成功率
Robot	98%
前進	78%
後退	100%
右轉	88%
左轉	96%
停止	76%
加速	100%
減速	78%
<b>平均</b>	<b>89.25%</b>
測試控制命令	平均辨識時間
8組	0.7625秒

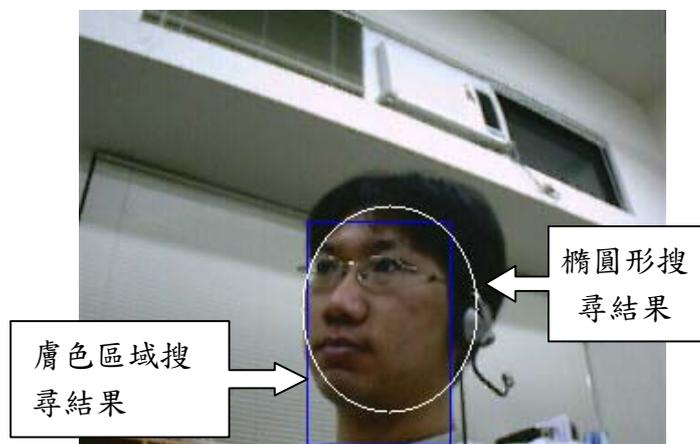
表三 語音辨識成功率及時間分析

除了用語音之外，為了使家用機器能夠對不同的家庭成員提供適當的服務與互動，使家用機器人能更人性化，我們發展一種家庭成員的辨識方法，使家用機器人能夠辨識不同的家庭成員。人臉辨識屬於主動式辨識方法，不需高解析度的攝影機或近距離拍攝，只需要家庭成員距離攝影機某一範圍內就可進行辨識，再配合家用機器人的運動控制，家用機器人將可以主動的去進行人臉的搜尋與辨識，不需家庭成員自己走到機器人面前等待進行辨識。要完成家庭成員辨識系統，除了要能夠辨別出不同的家庭成員之外，在進行辨識之前，我們還需要能夠從影像中找出人臉在影像位置及大小。圖二十二顯示家庭成員辨識系統及互動的主要架構。其主要分為三部分：(1)人臉偵測、(2)人臉辨識、(3)人臉追蹤。本系統主要藉由家用機器人上之 Web Camera 作為影像輸入設備，將其擷取到的影像傳到機器人上的主電腦進行人臉搜尋、臉部調整及人臉辨識。使用者可藉由網路要求機器人對特定家庭成員進行搜尋，並且整合人臉追蹤系統，使其能對搜尋到的目標進行持續的追蹤，以等待使用者的下一步要求，例如，與特定家庭成員進行視訊交談。

在家用機器人進行人臉辨識之前，我們必須求得經由 Web Camera 所擷取到的影像中的人臉位置與大小，所以我們需在影像中對人臉進行搜尋。在人臉搜尋方法，一般常利用人臉的某些特徵進行人臉的判別。其中膚色是利用於識別人臉的主要特徵之一。我們經由 Web Camera 所得到的影像資料為紅、綠、藍(RGB)三原色，RGB 三原色的色彩形成與光的照度、物體表面、攝影機的特性都有關。RGB 三原色所構成的色彩空間(color space)很容易受到光線的影響，會隨光線的變化有很大的變動，所以 RGB 三色並不適合直接使用於膚色區域分割，必須要做色彩空間的轉換以減少 RGB 三原色對光之靈敏度。我們使用 Normalized RGB 的色彩空間作膚色區域分割，因為 Normalized RGB 的轉換只需簡單的數學運算就可達成，且能夠降低光的照度對影像影響。



圖二十二 家庭成員辨識系統及機器人與人互動系統架構圖



圖二十三 膚色分割及橢圓形搜尋結果

單用膚色作為人臉判別，容易受到其它與膚色相似的物體的影響而產生誤判，因此，除了膚色之外，我們亦使用另一人臉的特徵—輪廓。由於人臉的輪廓近似於橢圓形，且其橢圓形之長短軸半徑比約為 1.2:1。在輪廓判別部份，我們利用 Sobel 的方法對灰階影像作邊緣偵測，再以邊緣偵測的結果作橢圓形的輪廓搜尋。最後整合膚色分割與輪廓判別的結果，找出臉部位置。

在人臉搜尋系統中，我們整合膚色分割及橢圓搜尋方法，但在實際的實作過程中，我們發現在 320x240 大小的影像中執行橢圓形搜尋相當的浪費時間。為了加速人臉搜尋速度，以提供家用機器人一個即時人臉搜尋系統，所以在進行橢圓形搜尋之前，利用膚色分割後的資料，求其在 X 軸及 Y 軸上的投影量，以判斷出可以人臉的區塊，減少橢圓形搜尋的範圍。藉由膚色在 X 軸及 Y 軸上的投影量，我們分別設定一個門檻值，找出有可能的人臉範圍，最後在利用橢圓形搜尋得到圖二十三的結果，黑線所框出來的區域為可能人臉區塊，白線框出的為橢圓形搜尋後的結果。



圖二十四 臉部影像照度補償

為了要達到提高辨識率的目標，除了有強健的辨識演算法之外，還需要有一適當的人臉影像的前置處理機制，以減少輸入影像資料間的差異性(諸如：不同照度下、臉部影像大小不同、臉部的旋轉角度不同及表情不同等情況)。在人臉影像的前置處理方面，我們將輸入的影像經過正規化的調整，以得到標準的影像形式。希望藉由減少輸入影像之間的差異性，提高辨識率。本計畫提出的人臉影像正規化處理過程包括：

- (1) 特徵(眼睛)的擷取
- (2) 臉部的調整
- (3) 臉部照度補償

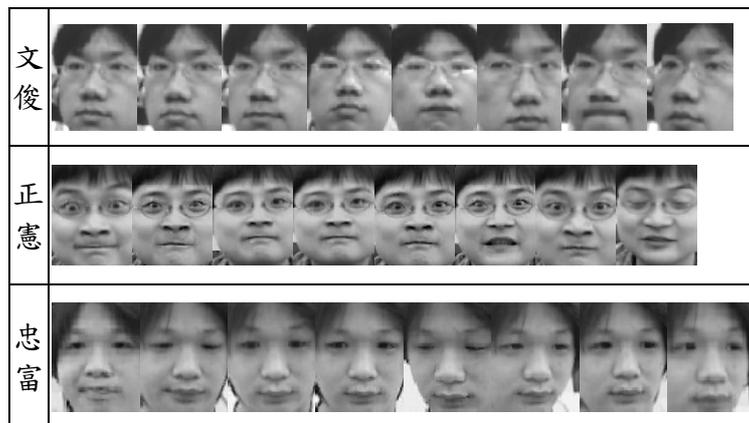
圖二十四為利用多張未經照度補償的臉部影像，經過為經照度補償後的結果。由其結果可看出確實改善了光照度的問題。

人臉辨識系統主要的目的是為了應用在家用機器人上，所以系統的即時性對我們來說非常的重要。我們希望儘可能的減少辨識時所需花費的時間。在此，我們使用主要元素分析法(Principal Component Analysis, PCA)的特徵臉演算法(Eigenfaces approach)對臉部影像作維度的化減，再利用 Radial Basis Function Neural Network 作最後的辨識。特徵臉演算法是利用主要元素分析法透過 K-L 轉換來達成影像上統計資訊的維度化減的方法，其可將輸入訊號的高維度資訊中所有的相關性消去，以化減資料的維度。在演算法的運算過程中，將二維矩陣的資訊，以一維的向量方式來表示，並且從輸入的所有影像中萃取出臉部特徵空間，臉部特徵空間的維度比原空間維度小，將輸入影像投影到臉部特徵空間，可以得到較少的維度的資訊，以達到減少維度的目的。在辨識方法，因為 Radial Basis Function 的類神網路具有快速學習的好處，相當適合於即時(Real-Time)系統。在此，我們利用 Radial Basis Function 作人臉的訓練及辨識，並且利用 Normal Equation 方法來求得 RBF 的權重值。再利用最小均方誤差(Least Mean Square Error, LMSE)作參數細部的調整，以求得最佳的 RBF 參數。

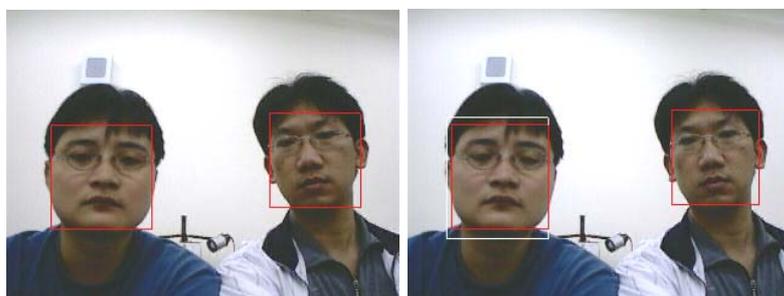
本計畫目前已完成藉由 Web Camera 抓取影像進行人臉搜尋、臉部調整及人臉辨識。採用實驗室中 4 位成員的臉部影像進行人臉辨識測試，每位成員取 10

張影像，且4位成員中取其中3位建立資料庫，另一位則用來測試非資料庫成員時的情況。表四為3位成員各取8張用以建立人臉資料庫。取出資料庫中某位成員之參數，對環境中的4張人臉進行比對。圖四十三所示為特定人臉識別與追蹤實驗結果。實驗中，兩位成員在機器人前進行臉部識別與追蹤實驗，而機器人識別出特定人臉後，便會進行人臉追蹤的動作。圖二十五(a)為人臉偵測結果。圖二十五(b)為人臉識別結果，其中白色框所框選出來的為特定人臉識別結果。圖二十五(c)為機器人進行特定人臉追蹤結果。圖二十五(d)為特定人臉移動時，機器人進行追蹤結果。

在人臉追蹤方面，就是控制機器人頭部之運動，而頭部運動控制主要目的在於使機器人頭部上的攝影機能移到目標物所在的位置上。本系統是基於影像(Image-based)的伺服控制系統，由影像的特徵作為伺服控制命令，不需透過逆向運動學來推導目標物的位置與姿態，控制系統中有兩種回授迴圈：1.控制系統影像位置回授迴圈，可稱之外迴路控制。2.頭部機構伺服控制迴圈，可稱之內迴路控制。系統中的影像特徵萃取與定位功能，配合兩種回授迴圈完成以影像特徵為基礎的閉迴路控制。圖二十六為影像追蹤控制器系統架構圖。在本系統中希望目標物始終能在影像的中心點位置上，因為我們處理影像的大小為320\*240，故設定期望位置(Desired Position)(Xd,Yd)=(160,120)。



表四 資料庫成員臉部影像



(a) 人臉偵測

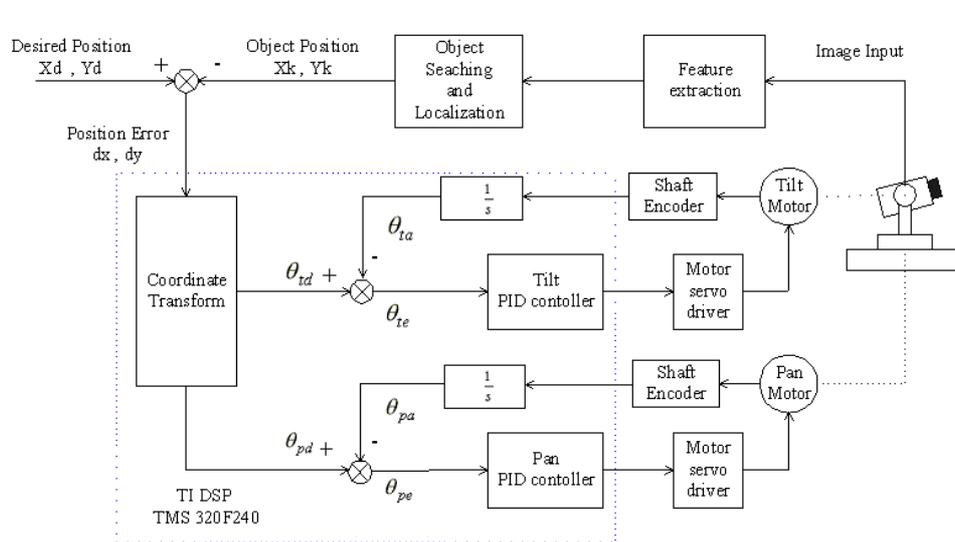
(b) 尋找特定目標(白色框為特定目標)



(c) 頭部追蹤

(d) 特定目標上移

圖二十五 臉部識別與追蹤實驗

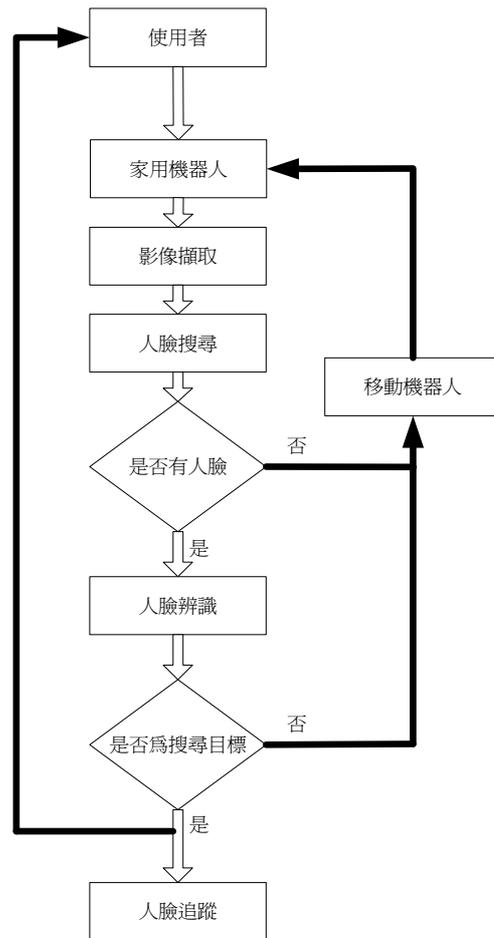


圖二十六 影像追蹤控制器系統架構圖

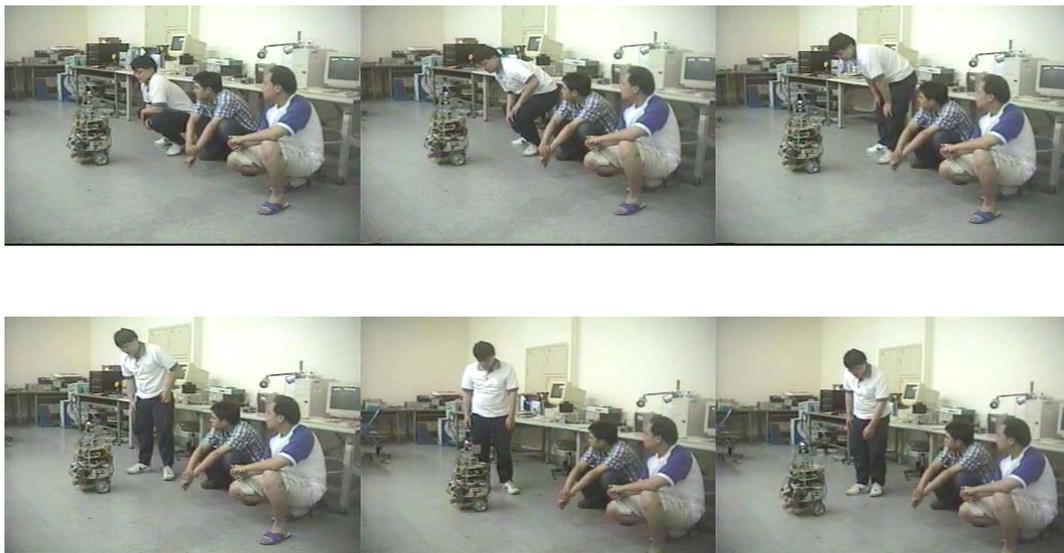
圖二十七就是人臉辨視及追蹤主要的流程圖，除了開始時為等待狀態及結束時為追蹤狀態，其它系統大部分都是在執行搜尋的動作。在移動式追蹤方面，利用 2 自由度頭部控制系統及本體操控系統，對搜尋到的目標進行移動式的持續追蹤。圖二十八為家用機器人對特定人搜尋與互動之實驗結果。實驗中機器人必須在三位家庭成員中識別出特定目標成員並與其進行互動。實驗結果顯示辨識系統的功能運作可達到預期的目標。

#### 4.1.5 多機器人定位融合及環境地圖建立實驗

機器人要提供智慧型的服務，必須對其周圍環境有一定程度上的認知。因此給機器人一適當的環境模型來做導航(navigation)及定位(localization)是非常重要的。為了讓智慧型家用機器人了解自己身處何處，並且知道週遭環境的狀況，建立一個環境地圖是必要的，有了適當的環境資料，機器人便可以進行導航



圖二十七 家用機器人對特定人搜尋之流程



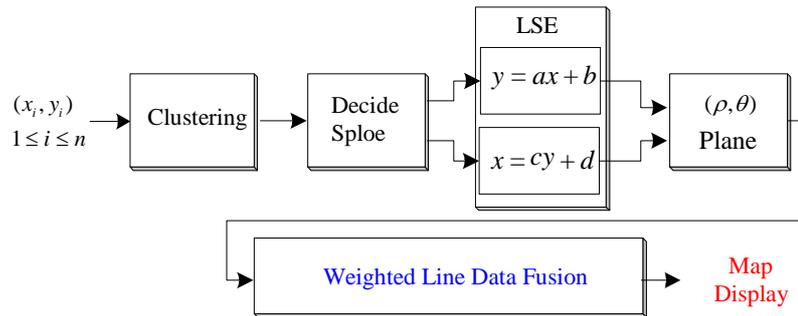
圖二十八 家用機器人對特定人搜尋與互動之實驗

亦即探索或搜尋的動作。為了要實現提供可以提供智慧型家用機器人一個可靠的環境模型，作為家用機器人智慧型行為的依據，我們利用多機器人系統建立一精準的環境模型。利用多機器人來做環境地圖建立的目的是在於“降低由單一機器人感測所造成的不確定性”，來達到精準的量測，建立與環境更加匹配的地圖。

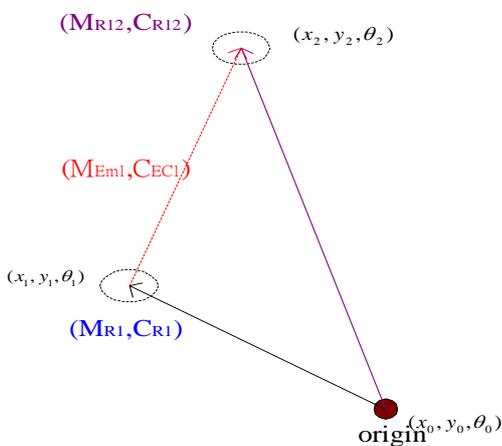
圖二十九為環境地圖建立流程圖，首先我們將立體視覺模組所感測到的環境資料點當作輸入，我們先將這些資料點作分群(Clustering)的動作，其目的在將屬於同一線段特徵的點粹取出來，接下來我們利用 Decide Slope 方塊判斷每個群最接近的斜率，在 LSE 方塊中以最小平方誤差法來利用線段  $y = ax + b$  或  $x = cy + d$  來擬合群中的點集合，為了避免斜率有無窮大的情形，再將這些線段轉換為單一表示式  $y \sin \theta + x \cos \theta = \rho$  來表示，將所有找到的線段進行權重線段資料融合 (Weighted Line Data Fusion)，將最後結果顯示成地圖線段。

在多機器人網路架構當中，我們會經過兩個融合階段：Serial Fusion, Parallel Fusion。融合的演算法當中，為了要配合硬體及系統的處理能力，我們利用矩陣計算來加速及簡化我們的處理。此融合法則採用離散卡曼濾波器 (Discrete Kalman Filter) 原理來實現。

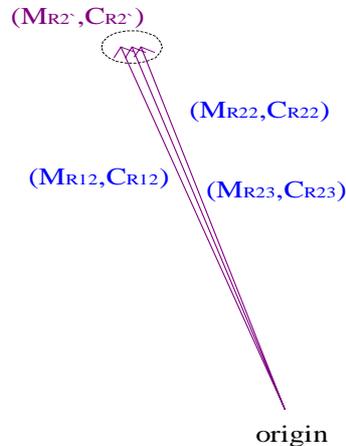
利用 R1 本身之不確定參數指標，再加上 R1 對 R2 估測之不確定參數指標，來得到 R2 相對於世界座標系原點的不確定性 (uncertainty)。M 表示機器人位置的



圖二十九 環境地圖建立流程圖



圖三十 串列融合概念圖



圖三十一 並列融合概念圖

平均值， $C$  為機器人位置不確定性之共變異數矩陣。圖三十為串列融合概念圖。令  $(x_i, y_i, \theta_i)$  為機器人  $i$  的姿態資訊， $i=1、2$ 。 $(x_e, y_e, \theta_e)$  為機器人 1 估測機器人 2 的姿態資訊。則機器人 2 由機器人 1 所觀測到的姿態資訊可表示為：

$$M_{R12} = \begin{bmatrix} x_1 + x_e \cos \theta_1 - y_e \sin \theta_1 \\ y_1 + x_e \sin \theta_1 + y_e \cos \theta_1 \\ \theta_1 + \theta_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{R12} = J * \begin{bmatrix} C_{R1} & \sigma C_{R1} C_{E12} \\ \sigma C_{R1} C_{E12} & C_{E12} \end{bmatrix} * J^T \quad (4)$$

其中  $J$  為 Jacobian 矩陣，其表示式為：

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_e \sin \theta_1 - y_e \cos \theta_1 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & x_e \cos \theta_1 - y_e \sin \theta_1 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $\sigma$  為共變異數矩陣  $C_{R1}$  與  $C_{E12}$  之間的相關係數(correlation coefficient)。

當我們在所有網路節點中的 serial fusion 皆簡化到平行時，此時我們進行最後步驟，並列融合(Parallel Fusion)，目標再於將多組不同之二維高斯分布融合成一組。圖三十一為並列融合概念圖，其可用離散卡曼濾波器(Discrete Kalman Filter)原理來實現：

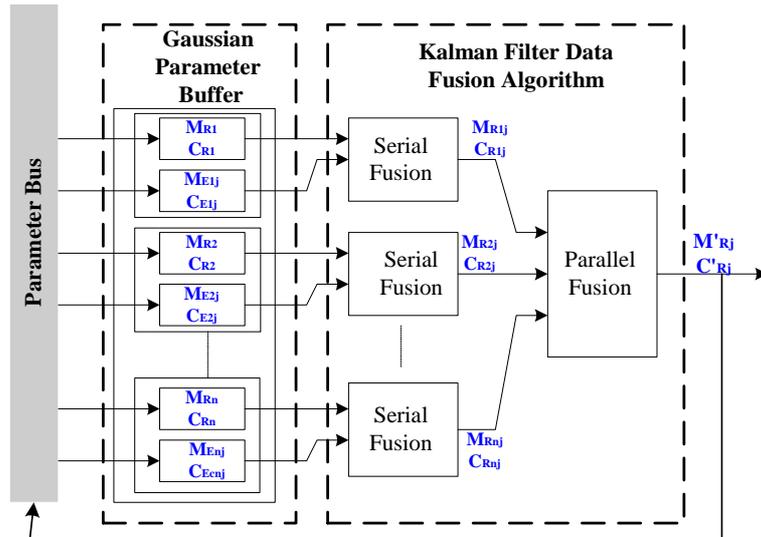
$$(M_{Rj})_{k+1} = (M_{Rj})_k + K * [(M_{Rj})_k - (M_{Rij})_k] \quad (6)$$

$$(C_{Rj})_{k+1} = (C_{Rj})_k - K * (C_{Rj})_k \quad (7)$$

$$K = (C_{Rj})_k * [(C_{Rj})_k + (C_{Rij})_k]^{-1} \quad (8)$$

其中  $K$  為卡曼增益(Kalman gain)。

圖三十二為整個多機器人感測融合之流程圖。圖中 Gaussian Parameter Buffer 方塊儲存所有機器人的位置不確定參數， $M_{Ri}$  及  $C_{Ri}$ ，同時也儲存著機器人的感測模型參數， $M_{Eij}$  及  $C_{Eij}$ ， $1 \leq i、j \leq n$ 。假設機器人  $R1$  感測到  $Rj$  時，其位置不確定參數及感測模型參數會馬上進行串列融合，我們經過串列融合馬上得到  $R1$  觀測到  $Rj$  的位置不確定參數  $M_{E1j}$  及  $C_{E2j}$ ，同理，假設有更多機器人觀測到  $Rj$  則會有更多的串列融合參數產生。最後我們把所有的串列融合參數進行並列融合，就



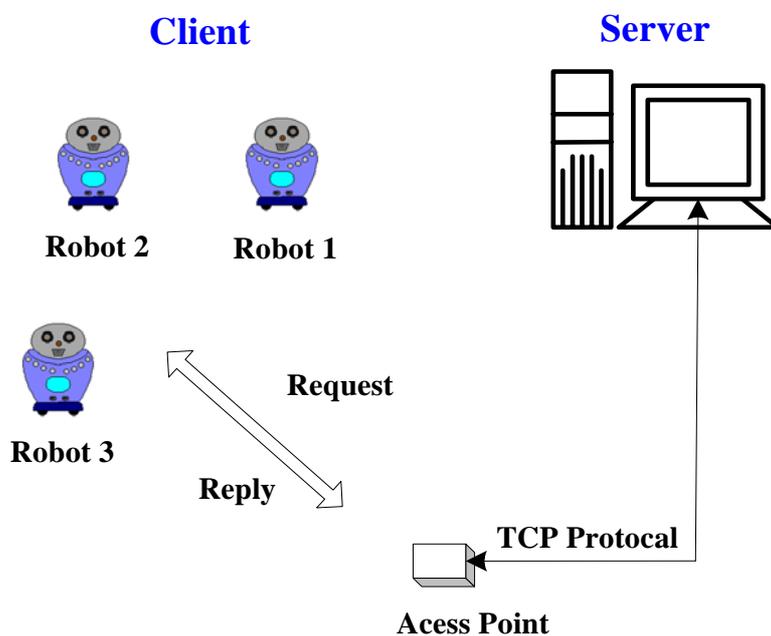
圖三十二 多機器人感測融合流程概念圖

會得到機器人  $R_j$  被觀測融合後新的位置不確定參數  $M'_{R_j}$  及  $C'_{R_j}$ 。我們再將此參數經過 Parameter Bus 將 Gaussian Parameter Buffer 中舊的位置不確定性參數更新。將此流程遞迴的演算下去，我們將能隨時更新住機器人的位置不確定性參數，使機器人達到定位的效果。

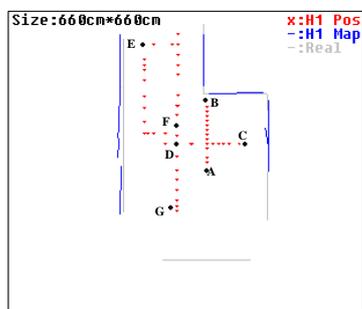
我們採用實驗室自行研發之智慧型家用機器人 H1 與 H2；H1 與 H2 本體所使用之運動控制卡，為本實驗室所開發之 DSP Base 雙軸運動控制卡，此運動控制除一般 PID 伺服控制外，本體運動控卡包含了路徑追縱控制器，用於追蹤路徑產生器所下之命令，使用鉛酸電池為其電力來源。利用目前普遍的網際網路 TCP/IP 通訊協定架設了多機器人合作專用之 Server-Client 架構，以供實現多機器人網路合作架構。

Server 主要作為使用者與機器人的傳輸媒介，同時整合機器人所得到的環境資訊，多機器人團隊中的成員只要得到周圍環境的地圖資訊或者發現其身邊有其他成員，就會將資料傳送到伺服器端，等待伺服器的處理完畢，會將個別資料回傳至機器人團隊，如此一來，多機器人團隊的互動與操控架構便會建立起來。機器人伺服器端在整個多機器人合作定位架構上是不可或缺的，它除了當作機器人間的橋樑之外，它更監控了所有的機器人(Client 端)，當機器人有突發狀況時，例如有障礙物出現、網路中斷等，都會馬上將資訊傳送回 Server 端，此時再由 Server 端來作工作上的分配調整，讓失去工作能力的機器人負擔較少的工作，增加其它正常運作機器人的工作。伺服器端與機器人團隊間的通訊必須透過一個網路橋接器(Wireless Access Point)，無線橋接器可以視為是 Ethernet 上的一個節點，接收機器人上的無線網路卡所傳回來的資料並送至 Ethernet 上的 Server，圖三十三為我們設計之多機器人 Server-Client 示意圖。

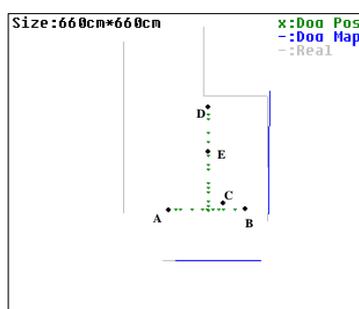
本研究以機器人 H1 及 H2 組成機器人團隊，進行多機器人合作感測定位與環境地圖建立的實驗。圖三十四顯示在 Server 端機器人 H1 所建立的區域地圖，圖三十五為機器人 H2 所建立的區域地圖，其環境範圍皆為 660cm×660cm。圖三十四與圖三十五中黑點代表機器人移動軌跡，黑色線段代表機器人所建構的環境特徵，圖中灰色線顯示的是環境的真實線段。加入本研究所提出之合作感測融合 (Cooperative Sensing)，將卡曼濾波器的並列融合 (Parallel Fusion) 導入本實驗當中，所得之結果如圖三十六，此為 H1 與 H2 的合作感測地圖建構結果，其結果比原個別所建者更符合實際環境。



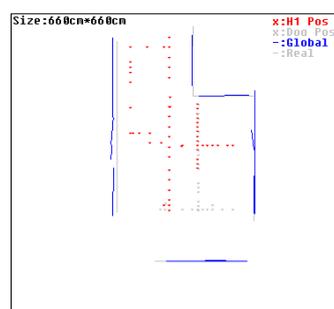
圖三十三 多機器人 Server-Client 示意圖



圖三十四 H1 地圖建立



圖三十五 H2 地圖建立



圖三十六 H1 與 H2 合作感測地圖建構結果

## 4.2 家用機器人系統之資訊與網路平台研發

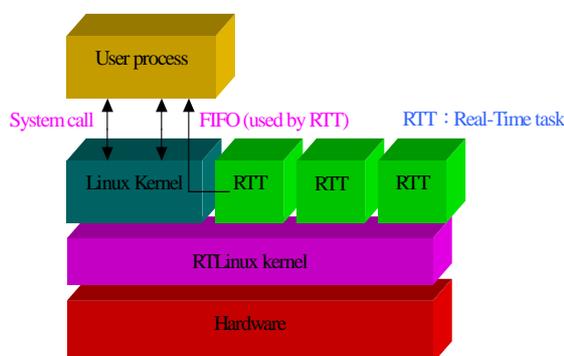
我們針對家用機器人之資訊系統軟硬體平台進行研發，其重點在於省電高效能以及具備現代化資訊整合與連結能力的機器人發展平台。並建構一個以即時多工控制(Real time control)理論為基礎之機器人發展環境。我們提出三層式控制架構改善機器人在處理工作時硬體結構與軟體規劃的問題。此三層式架構以資料處理的角度分為：1.即時控制層 2.開道伺服層 3.訊息交流層。而以學習與智慧成長可分為：1.反射動作層 2.單一智慧層 3.合作式學習層。使家用機器人擁有似人類神經網路般聰明，並擁有高彈性的成長空間。

在這部分的研究我們主要完成以下四項結果。

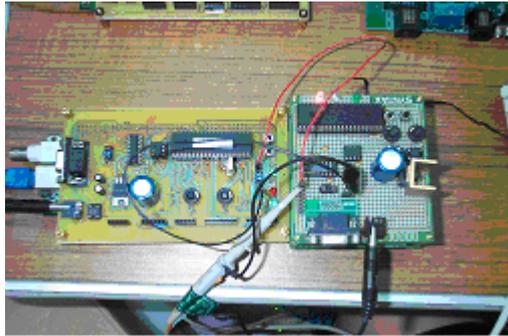
1. 建置家用機器人之嵌入式 Linux 乙太網路伺服器控制器
2. 嵌入式乙太網路微型控制器
3. 硬體層即時網路通訊協定(HRTP)
4. HRTP 之乙太網路時脈同步方法之理論研究以及實作和驗證

我們成功地運用 Embedded Linux 技術成功的建構出 Home Robot 之即時嵌入式 Linux 乙太網路伺服控制器。本控制器以有不到 3Mbyte 的 code size 便能擁有 Ftpd、Telnetd、Httpd、NFS Client、Real Time Task 等能力。並運用 RTLinux[164] 建構於核心當中提供硬體即時排程規劃。運用此架構建構一個屬於家用機器人網路伺服環境如圖三十七所示。

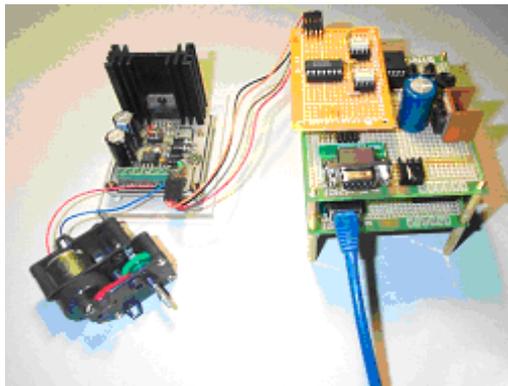
為了符合 Home Robot 小體積，省電的目的，我們亦運用 Mobile thin client 技術研發多種嵌入式乙太網路微型控制器模組。此可擴充主從架構式的 Robot 應用周邊模組，模組之原型如圖三十八。此嵌入式乙太網路微型控制器模組最大的特色為運用傳統單晶片 RSIC 為核心降低成本體積小省電、運用乙太網路為傳輸媒介且使用強健性之 TCP/IP 協定為通訊基礎降低使用的困難度。更近一步的完成 Ethernet 馬達控制模組，如圖三十九。



圖三十七 家用機器人網路伺服環境



圖三十八 Robot 應用周邊模組

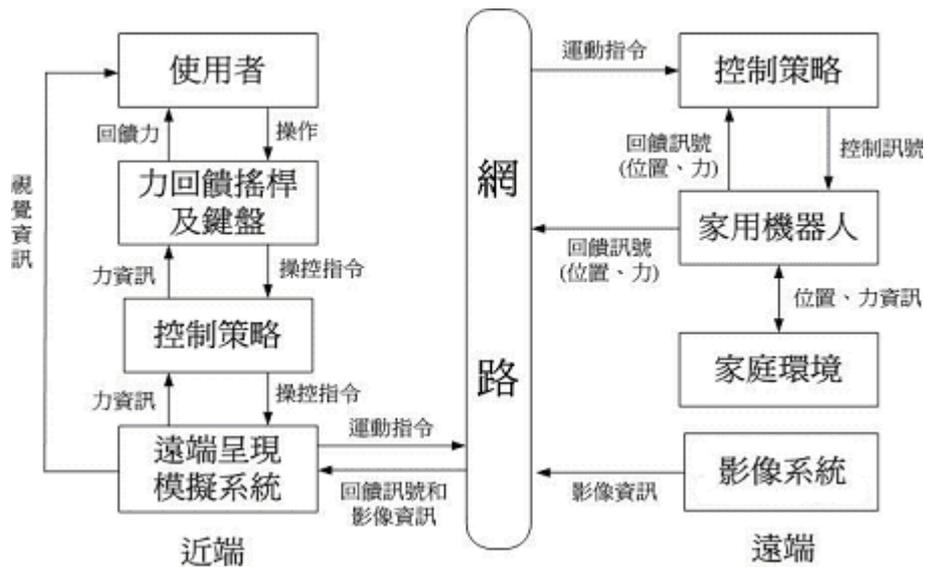


圖三十九 Ethernet 馬達控制模組

硬體層即時網路通訊協定(HRTP)方面，運用傳統的 OSI 與 CSMA/CD 理論架構。將 HRTP 建構於 OSI 第三層之內將網路封包依照 HRTP-Time Table 所作的時間傳輸規劃作傳輸分配。藉此避免掉網路碰撞造成 Back-off Time 的不確定性。因而達成即時網路對時間嚴謹要求。且將系統通訊延遲時間便成一個可預測規劃的架構。更重要的是 HRTP 對系統所作的封包切換控制技術 Packet Traffic Control[165]並不會影響傳統封包傳遞，也就是說擁有完全相容於傳統網路協定，此為其最大的特色。

### 4.3 家用機器人之遠端呈現與操控系統研發

此部分研究在於建立家用機器人之遠端操控系統，操作者透過網路，傳達命令給家用機器人，而機器人在家中與物件及環境的互動則經由電腦以影像的方式以及力回饋搖桿以觸感的方式呈現給操作者。我們將以虛擬實境技術來產生遠端呈現(Telepresence)，讓遠端操作者獲得身處家中的感覺，也將發展力回饋搖桿，讓操作者同時能感受到機器人與環境接觸碰撞的互動，而在家中變動、不確定的環境中，碰撞接觸是無可避免的，此外，也將發展一兩軸機器臂來執行物件搬動、組裝等工作，由於機器人與環境會同時產生位置與力的互動，也將發展因應的順應性控制策略。系統架構與控制流程如圖四十所示。



圖四十 虛擬實境家用機器人遠端操控與呈現系統架構圖

在建構虛擬場景時，需要多種的 3D 物件，我們運用 3D Studio Max 軟體來建構模型，因為此軟體可執行多種檔案的匯入及匯出的功能，另外我們採用 WorldToolKit 7 軟體工具，它可以將我們利用 3DS 所建構完成的幾何物件匯入到場景中，讓幾何物件可以呈現在虛擬場景中，另外也可以將事先錄製好的音效載入到場景中，讓虛擬實景更為生動逼真。圖四十二(a)-(b)我們是針對家用機器人繪製，其實際外貌如圖四十一所示。

在人類的視覺感受中，為了要讓人感覺畫面流暢，至少每秒需繪製 20 到 30 個畫面，也就是虛擬實境的更新頻率需要 20-30Hz 左右；在觸覺呈現方面，其取樣頻率範圍約在 300-1000 Hz；所以如果要同時在模擬迴圈中傳送並呈現出視覺及回饋力，讓它在相同的模擬控制迴圈中，會因為無法提供足夠的頻寬，而可能會造成回饋的力不穩定，讓操控者會因所回饋的力不連續而感覺不舒服，所以觸覺上其更新頻率必須夠快，才可滿足人類對觸覺的需求，因此我們利用多執行緒的技巧來解決這問題。



(a)側視圖



(b)前視圖

圖四十一 真實家用機器人 圖四十二 虛擬家用機器人：(a)側視圖和(b)前視圖

當機器人與家庭環境中的設備、物品等互動、接觸時，彼此之間會產生位置與力的變化，這些變化則經由裝置在機器人上的位置與力感測器量得，經網路送回操作者端的遠端呈現模擬系統，模擬系統則可根據這些量測來讓虛擬物件產生較真實的位移與形變，其主要可分為三大部分，即為幾何建模、物理建模及互動模擬來達成，以下針對這三部分進行描述。

### A. 幾何建模

由形變建模方法中，我們利用一種強而有力的描述形變方法：自由結構形變，簡稱FFD (free-form deformation)，FFD讓使用者將要改變外形的幾何物體放置於一個3維的平行六面體的框架中，構成這平行六面體的頂點稱之為控制點，當使用者希望幾何物體產生形變時，可以經由位移改變這些控制點，再經由Bezier方程式運算，計算幾何物體上各頂點的加權和為多少，然後在局部座標系統底下分配各頂點位置，讓幾何物體產生形變效果，這也是FFD的優點，它可以提供使用者一個直覺的方式直接控制它，來產生所想要的物體形狀。其中所運用到Bezier體積的演算法，用來描述在三維空間中立體的幾何物體，在這利用了三個參數(即  $u$ 、 $v$  和  $w$ )來描述，下式表示  $P$  陣列為  $4 \times 4 \times 4$ ，也就是裡面包含了64個控制點，則Bezier體積方程式表示如下：

$$Q(u, v, w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 B_{i,3}(u) B_{j,3}(v) B_{k,3}(w) P_{ijk} \quad 0 \leq u, v, w \leq 1 \quad (9)$$

上述的Bezier體積中，可利用將其階數提高，也就是增加其控制點數目，即便可描述更複雜且更細部的精確圖案，但卻會消耗更多時間在計算上，使整體效率降低，所以遠端呈現系統中，為了提高模擬效率，採用  $4 \times 4 \times 4$  個控制點來實現形變物體。

### B. 物理建模

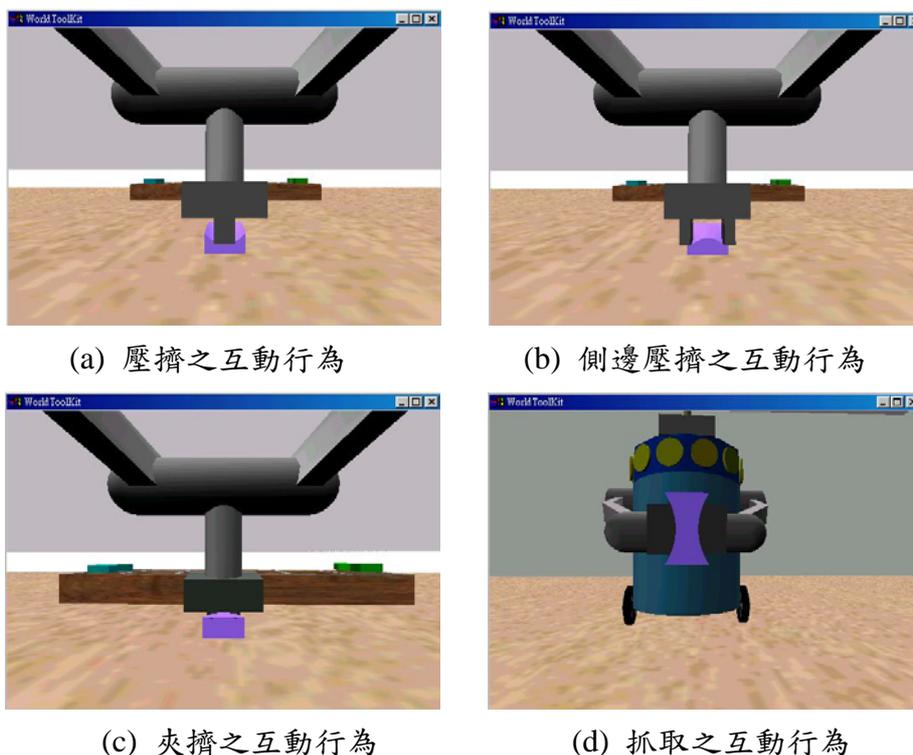
在虛擬實境中除了上述的幾何建模技術，用來描述物體的幾何外型外，還需利用物理建模技術來描述物體的行為，我們利用彈簧模型來模擬彈性物體的物理模型，其建構方式是在控制點間架設彈簧，而每個彈簧可以描述如下：

$$F = -K \cdot (L - R) \quad (10)$$

其中  $F$  代表彈簧所產生的力， $K$  是彈簧的彈性係數， $L$  是彈簧的長度， $R$  是彈簧初始的平衡長度。而在力資訊方面，彈簧模型不但用在模擬形變物體外，也可以透過(10)式，模擬出軟物體所產生的相對虛擬力，再將這力資訊傳送到力回饋搖桿上，讓使用者感受到虛擬力。

### C. 互動模擬

在所建構的虛擬家用機器人場景中，其互動的模擬是根據家用機器人與其互動的物體所發生的互動行為來設計的，例如機器手對彈性物體的壓、夾、擡、放等操作，在這也針對這幾個互動的動作進行模擬，並且觀察其形變效果，而使用者可以透力回饋搖桿，操控虛擬實境中的機器人與彈性物體互動，此時碰撞偵

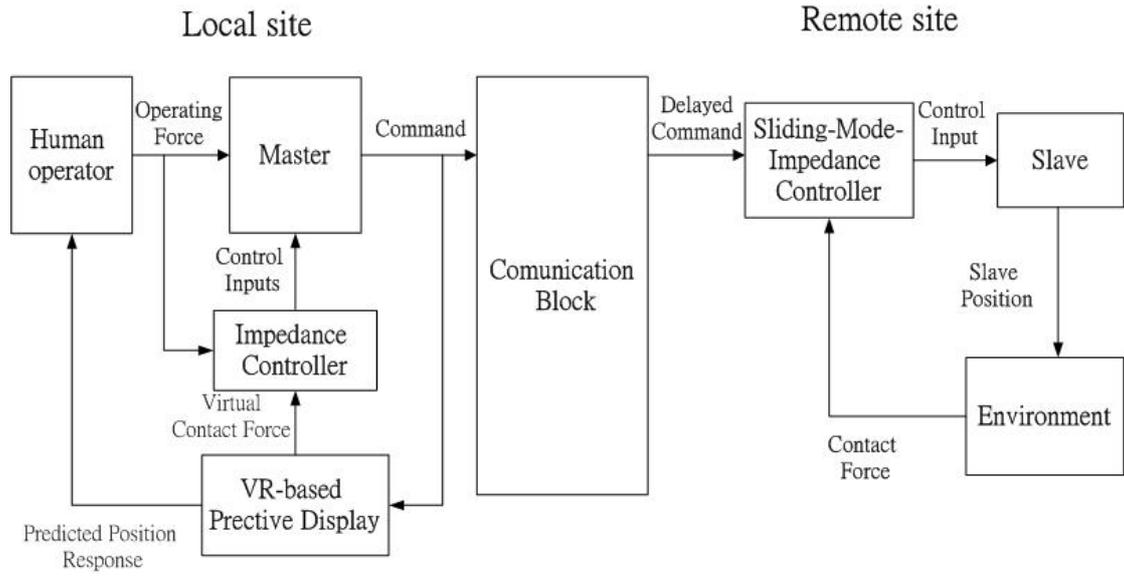


圖四十三 機器夾爪與彈性物體的互動過程：(a)壓擠之互動行為，(b)側邊壓擠之互動行為，(c)夾擠之互動行為，和(d)抓取之互動行為。

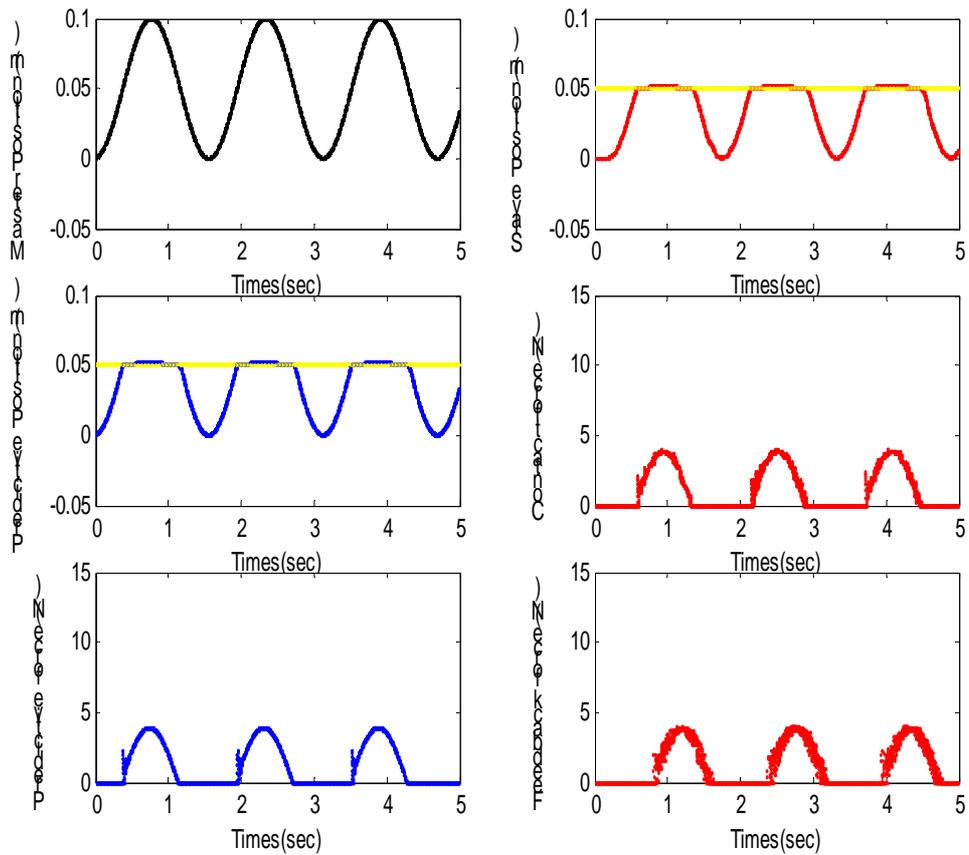
測機器人與彈性物體間的碰撞情形，一旦發生碰撞，則產生適當的碰撞響應行為來模擬它們之間的互動情形，在互動的過程中，彈性物體所產生的反應，包括物體形變與運動，將由幾何與物理模型來描述，最後透過視覺與觸覺裝置，將模擬結果的形變外觀和所產生對應的回饋力呈現給使用者來感受。圖四十三(a)-(d)即我們在虛擬實境中模擬物體形變的行為。

當透過網路來操控遠端的機器人系統去執行順應性工作時，可能會因為存在於網路的變動時間延遲的關係，造成遠端機器人的錯誤動作以及整個操控系統的不穩定；另外，延遲過後的回饋訊號也可能使操作者誤判遠端的真實狀況，近而下達不當的命令，造成遠端的機器人系統和環境之間產生不當且不穩定的接觸力而造成機具的損壞。我們發展一套雙向控制策略來改善時間延遲造成系統不穩定的問題，並且利用此一控制策略來使得利用遠端操控系統執行順應性工作時，遠端機器人系統能夠穩健的跟隨操作者給定的命令並且與環境接觸時能維持接觸力的穩定，所以我們提出以虛擬實境為基礎之雙向遠端操控系統控制架構如圖四十四所示。

我們以圖四十四的架構，在模擬中測試以虛擬實境為基礎的預測技術，其模擬結果如圖四十五所示，由模擬結果我們成功的在近端提供即時的遠端機器人軌跡及接觸力的預測資訊。



圖四十四 抗時間延遲以虛擬實境為基礎之雙向控制系統方塊圖



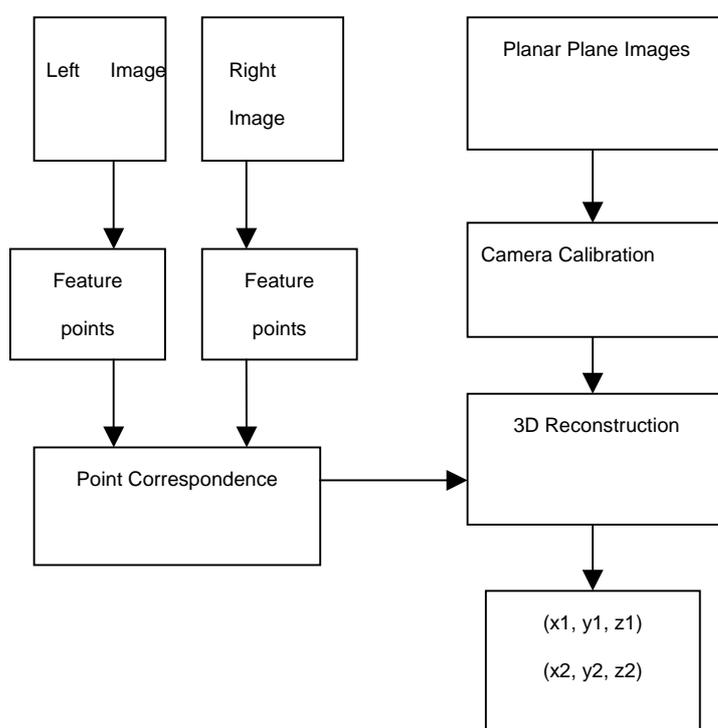
圖四十五 變動時間延遲下加入以虛擬實境為基礎之預測技術的模擬結果

## 4.4 家用機器人之電腦視覺系統研發

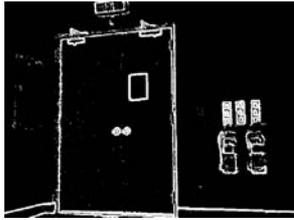
視覺模組之系統架構如圖四十六所示。本系統首先進行左右兩攝影機所攝得的影像的特徵點選取。選取之特徵點再於特徵點對應模組內進行匹配。此階段也會進行特徵點的篩選。其次，利用所得的特徵點對應關係，並且引入相機自我校正時所得的相機參數，我們可以求得相機外部參數，包含相機相對於場景的三度空間位置，各軸旋轉角等等。接著，藉由以上諸步驟所獲得的資訊，來重建場景的三維結構，並建立其三維模型。如此所得的三維資訊，將可用來規劃機器人的避碰行進路線。

### 4.4.1 影像特徵擷取與對應模組

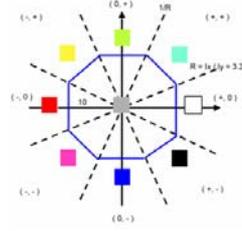
我們使用 Harris 的特徵點擷取方法來擷取特徵點，用 Sobel 的方法來擷取邊並連成線段，並利用後者的資訊來改良在明暗對比不佳的影像中找出的特徵點結果不甚理想的情形。由 Harris 的演算法，找出室內場景中的角點作為特徵點，並且對運算過程中所計算的梯度資訊做分析，將梯度向量量化為九個方向，並配合與已知對應組合的相對關係比較，以建立特徵點對應。此演算法經過實驗證明之後，具有一定的正確性與效率性。



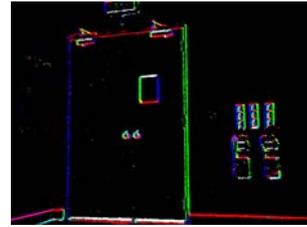
圖四十六 電腦視覺系統架構



圖四十七 Harris 所擷取出來的特徵點



圖四十八 以九種顏色分別代表九個量化後的梯度方向

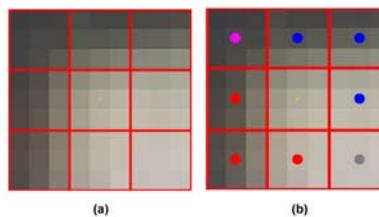


圖四十九 對圖四十七量化梯度方向的結果

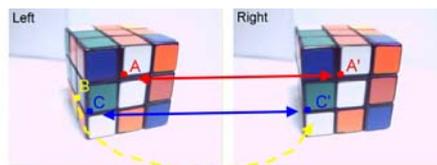
由輸入影像，經過 Harris 特徵點擷取以及計算梯度向量後，這些特徵點通常位於邊或線上，或是線與線的交點，如圖四十七所示。我們將所有的梯度方向量化為八個方向，並賦予不同的顏色來表示之，如圖四十八。進一步分析圖四十七的特徵點，我們可以得到圖四十九。由此圖可以看出同一方向的邊或線上的影像點均為相同的顏色，可以提供一穩定且可信賴的對應資訊。

我們在特徵點的周圍，定義八個  $3 \times 3$  大小的視窗，在每個視窗中有九個影像點，而其中每一個影像點皆對應一個量化的梯度方向。統計在此視窗中佔多數的梯度方向來代表整個  $3 \times 3$  範圍的梯度方向，如此對一個特徵點就可以取得其周圍八個視窗所對應的彩色碼，如圖五十所示。相較於樣板對應所需要的複雜計算，彩色碼特徵比對所需資訊在執行 Harris 演算法時即已得到，對應特徵點時，只需要比較彩色碼即可。我們所提出的演算法，適合用來對應影像中具有明顯材質且穩定，不易因視角的些微變化導致特徵點得消失或偏移。

此外，我們亦利用雙向對應，進一步解決立體影像的遮蔽問題，以及模稜兩可的對應問題。例如圖五十一，其中  $B$  點在右邊影像中已幾乎被完全遮蔽，因為有雙向對應的考量，所以由左影像對應到右影像並不會發生錯誤。



圖五十 (a)特徵點周圍八個方向的  $3 \times 3$  視窗 (b)以彩色碼代表每個視窗中的梯度方向



圖五十一 雙向對應一致性

而針對對應點和非對應點的彩色碼的分析，我們以下列兩個要素，當作評估對應關係的準則：

1. 彩色碼相異數：即周圍八個視窗彩色碼相異的數目。
2. 彩色碼距離：特徵點周圍八個彩色碼的差距。

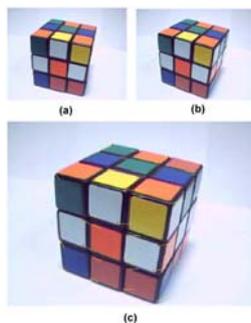
根據以上兩個準則，配合我們的演算法，我們設計出一個彩色碼的比對機制：比對兩個特徵點八個視窗的彩色碼，若彩色碼的相異數小於我們所設定的臨界值，則為可能對應的候選點；若在挑選出來的多個候選點中，其彩色碼的相異數皆相同，則彩色碼距離就可用來做第二階段的篩選。除了局部的彩色碼資訊，我們也考慮到特徵點與鄰近特徵點的相對關係的相似性，包含距離，角度，彩色碼的比較，來加強對應的正確性。

由於此研究的視覺系統，是採用視訊輸入，亦即連續影像，所以我們也針對連續影像的特徵點追蹤進行研究。追蹤所得到的特徵點運動軌跡也有助於了解機器人得移動模式。圖五十二是一個特徵點追蹤的例子。以一個魔術方塊為中心，將相機繞著魔術方塊移動，並取得二十張連續的影像後，我們畫出各個特徵點追蹤後所得的移動軌跡。

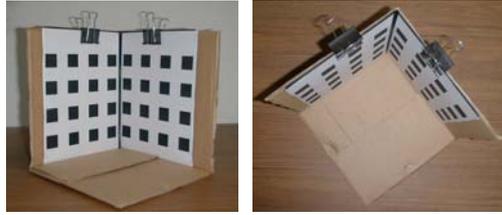
另外，我們亦利用極線幾何的限制，提出一個演算法來改善特徵點對應的問題。一組正確的對應應該要滿足兩個極線限制，包括：特徵點必須落在對應的極線上、且所有的極線必須交於極點之上。觀察極線分佈的情形後，演算法可分別對極線距離以及極點到極線的距離設合理的門檻值，如此可以去除錯誤的對應。之後再以剩下的特徵點計算基本矩陣，並重複以上步驟，如此即可以找出最正確的特徵點對應。

#### 4.4.2 相機參數計算與幾何重建

在相機內部參數計算方面，我們探討適用於家用機器人的相機校正方法。主要採用的方法是藉由在不同角度觀察一個平面的圖形，來推算相機的各個內部參數。實驗過程共探討了幾個校正方法，包含以三維物體為基礎的校正、自我校正、相機變焦的校正、利用 Homography 算焦距等等。在實驗中，虛擬影像和真實影像皆被使用，都能得到很好的結果，而且這個方法忍受雜訊的能力相當高。但因所需時間稍嫌緩慢，故考慮另一種利用 Homography 的方法快速地計算相機的參考焦距，並由計算結果的對應來獲得更精確的相機內部參數。



圖五十二 (a) 第 1 張影像 (b) 第 20 張影像 (c) 由第 1 張影像至第 20 張影像的追蹤結果



(a) (b)

圖五十三 正交方塊圖板之 (a)側視影像 (b)俯視影像。

圖五十三為本三維重建實驗中的待重建物體，是由兩個夾角約為 90 度的平面所構成的正交方塊圖板，每個平面上有 16 個方塊。實驗之最終目的為針對這些方塊圖案平面進行三維重建。以下為此實驗主要的步驟：

1. 六張影像經過 Harris 角點偵測，並人工刪除不必要的點後，在正交方塊圖板左右平面各可得到 64 個特徵點。
2. 從六張影像中任取兩張為一組，以人工方式完成 128 個特徵點對應。
3. 任取兩張影像做三維重建，共 15 組重建結果。

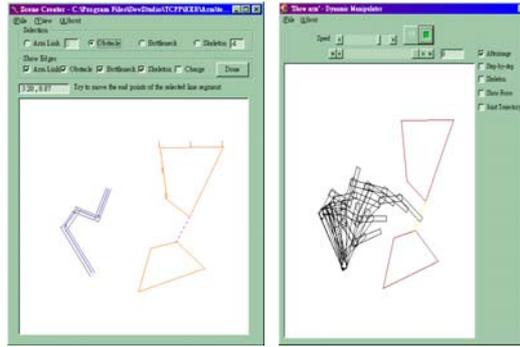
但是在考慮實際的應用時，許多因素會影響到重建與定位結果。有些因素與相機所攝得的影像品質有關。

#### 4.4.3 路徑規畫模組

路徑規劃問題，是在工作空間中為物體找一條無碰撞 (collision-free) 的路徑。隨著物體自由度 (degree of freedom, 或簡稱為 DOF) 的提高，或是障礙物的構成更加曲折複雜，都會讓運算複雜很多。這類型的三維空間的路徑規劃已經被證明為 PSPACE-hard 的問題，且任何一個路徑規劃的完全演算法 (complete algorithm) 所需的時間複雜度，會隨著物體的自由度的增加而快速的成長。

我們發展一套整合的模擬環境，物體的描述，障礙物與物體工作空間的建構，演算法的執行與調整以及執行結果的輸出，都能在這個環境中輕易地給使用者操作。

實際上，我們的二維空間的模擬環境如圖五十四所示，(a)中我們先輸入構成移動物體及障礙物邊界的線段，並指定機械手臂須通過的瓶頸。在按下執行的按鈕之後，演算法執行的結果即顯示於(b)中。在家用機器人的應用上，若以輪動式的移動而言，其運動大致是可以由二維空間的角度來描述。然而若考慮機械手臂的動作，則三維空間之運動與避障功能，則必須確實建立。由於我們所提出的位能場模型已確實能推展到三維空間，所以我們將先前所發展的路徑規劃演算法運用在三維的機械手臂上的研究是可行的。



(a) (b)

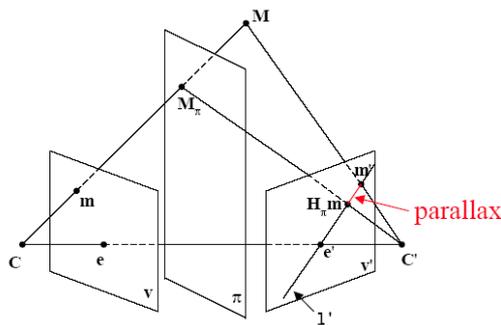
圖五十四 二維空間路徑規劃的模擬環境

#### 4.4.4 人臉辨識模組

以往人臉辨識的方法是拿人臉影像中二維的資訊來作分析，它們忽略了人臉三維的資訊。本研究由三維的觀點來探討利用人臉作身分驗證的問題。在我們的方法中，人臉的三維資訊是由所謂的相關仿射結構的投影不變性來表現，同一個人臉的影像它的相關仿射結構是不變的。根據這個特性，我們可以建立一個根據人臉影像作驗證的身分驗證系統。

首先，我們由透視投影及雙相機系統，可以推導出視差公式。如圖五十五所示， $M$  與  $M_{\pi}$  因深度的不同，造成在影像平面  $v'$  上產生視差。

在[85]中，Shashua 由視差出發，推導出一個相關不變性，稱為相關仿射結構 (relative affine structure)。稱為「相關」不變性的原因是因為這個不變性和第一台相機的相機中心的位置有關。



圖五十五 因投影轉換而產生的視差

假設空間中一參考平面的其次座標為

$$\pi = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{3 \times 1} \\ d_{\pi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

則對於空間中的任意一點  $M$ ，其在影像平面  $v$  和  $v'$  上的投影點  $m$  和  $m'$  之

間有以下的關係

$$\mathbf{m}' \cong \mathbf{H}_\pi \mathbf{m} + \left( \frac{d}{d_\pi z} \right) \mathbf{e}' \quad (12)$$

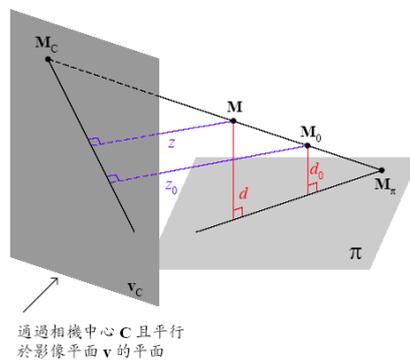
其中  $e'$  是極點位置， $d$  及  $z$  分別為  $M$  到參考平面與到平行於影像平面且通過投影中心的平面的距離。如圖五十六所示。並且根據圖五十六中相似三角形的關係，我們可以得到

$$\lambda = \frac{z_0}{z} \frac{d}{d_0} = \frac{\overline{\mathbf{M}_C \mathbf{M}_0}}{\overline{\mathbf{M}_C \mathbf{M}}} \frac{\overline{\mathbf{M} \mathbf{M}_\pi}}{\overline{\mathbf{M}_0 \mathbf{M}_\pi}} = \text{CR}(\mathbf{M}_C, \mathbf{M}, \mathbf{M}_0, \mathbf{M}_\pi) \quad (13)$$

我們可以注意到上式事實上是一個交比值，所以其具有透視投影不變性的特性。這個特性依照每個人臉型的不同，而有不同的值，所以可使用於人臉辨識。我們對每位測試人物求算其相關仿射結構的演算法如下：

1. 利用8對以上的對應點求出基本矩陣  $F$ 。
2. 利用基本矩陣  $F$ ，求出極點  $\mathbf{e}$  和  $\mathbf{e}'$ 。
3. 選取3對對應點，用這3對對應點和極點求出  $H_\pi$ 。
4. 選取1對對應點  $m_0$  和  $m_0'$ 。
5. 調整  $H_\pi$  的比例使得  $m_0' \cong H_\pi m_0 + e'$
6. 利用  $m_1' \cong H_\pi m_1 + \lambda_1 e'$  即可求出對應點  $m_{1j}$  和  $m_{1j}'$  的相關仿射結構  $\lambda_1$ 。

根據相關仿射結構，對於兩張拍攝同一個人臉所得的影像，只要我們所選擇的參考平面  $\pi$  以及參考點  $M_0$  不變。擇空間中的一個點  $M$  的相關仿射結構不受第二台相機的位置和內部參數的影響。利用這個特性，我們先利用兩張同一個人臉的影像，計算出其相關仿射結構，並將結果及其中一張人臉影像先存於驗證資料庫中。當需要作人臉辨認的時候，再拿出驗證資料庫中的人臉影像，和將被驗證的人臉影像計算相關仿射結構，並且比較計算出來的相關仿射結構與資料庫中預先儲存的相關仿射結構的差異。只要這個差異大於某個門檻值，我們就可以判斷被驗證者是否通過驗證。



圖五十六相關仿射結構的幾何意義

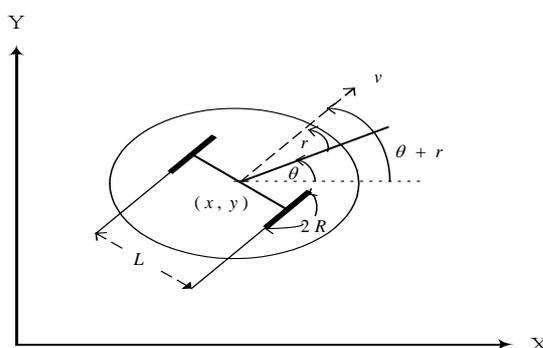
## 4.5 家用機器人之影像追蹤控制器設計

追蹤控制器的設計是家用機器人移位控制中所不可或缺的一環，若無法準確及快速的定位將嚴重影響家用機器人的實用價值。這部分研究我們利用影像及追蹤控制的相關方法來達到家用機器人的準確及快速的定位、追蹤問題。

首先，我們先建立定位控制器之數學模型，(14)為自走車系統之三階不確定簡化模型：

$$\begin{aligned}\dot{x} &= pv \cos(\theta + r) \\ \dot{y} &= pv \sin(\theta + r) \\ \dot{\theta} &= qw,\end{aligned}\tag{14}$$

其中  $x, y$  為平面座標， $\theta$  為水平夾角， $v$  為向前速度， $w$  為角速度， $p, q$  為相關於車半徑，軸距等之未知參數。



圖五十七 兩輪式移動機器人模型

控制目標為設計一簡單的連續控制器，使得狀態變數會收斂到任一指定的穩態誤差。由於我們所使用之平台為兩輪單獨控制之 mobile robot，故由圖五十七

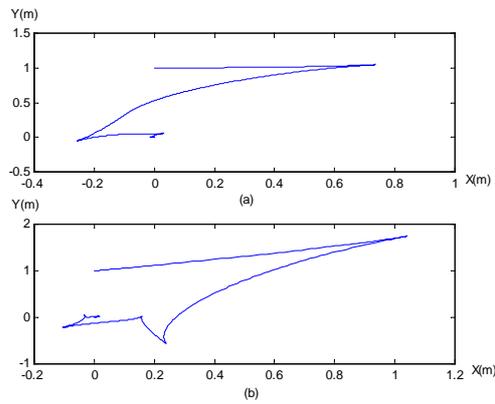
及簡單的計算可得  $w = \frac{w_r - w_l}{2}$ ， $v = \frac{w_r + w_l}{2}$ ， $p = R$ ， $q = \frac{2R}{L}$ ，其中  $w_l$  及  $w_r$  分別為左右輪之轉速。並且我們將此系統轉換為以下三階之 *chained-form* 形式的 Error Model：

$$\begin{aligned}\dot{x}_0 &= u_0 + \eta_0 u_0 \\ \dot{x} &= u_0 Ax + Bu_1 + u_0 \Delta A(\eta_0, \eta_1)x + \Delta B(\eta_0, \eta_1)u_1,\end{aligned}\tag{15}$$

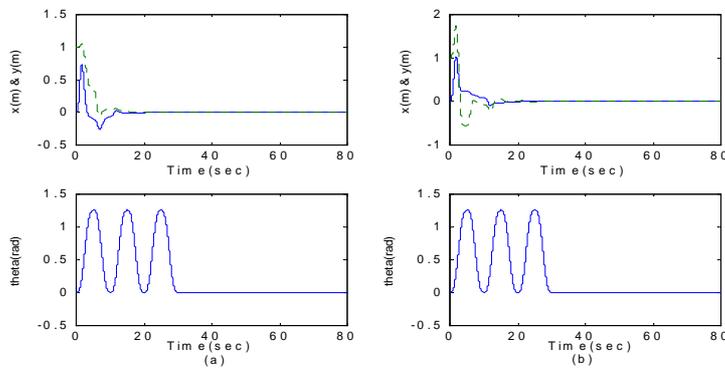
其中  $A, B$  為 CCF 型式且  $\Delta A$  及  $\Delta B$  定義如下

$$\Delta A = \begin{bmatrix} -(1+\bar{p})\sin r & \eta_0 \\ -\eta_0 + \bar{p}\cos r - 1 + \cos r & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta B = \begin{bmatrix} -(1+\bar{p})\sin(r) \\ \bar{p}\cos r - (1 - \cos r) \end{bmatrix}.$$

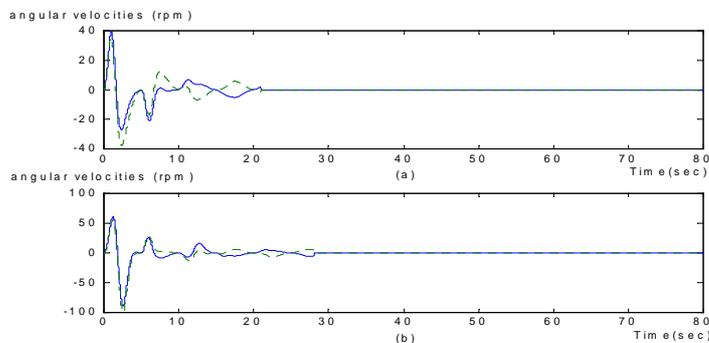
我們運用系統(15)來實現我們的定位控制器，但是有一點值得注意的是系統(15)在  $r = \bar{q} = \bar{p} = 0$  時並不滿足 Brockett 的必要條件(necessary condition)[140]，也就是說此系統並不存在非時變(time-invariance)的連續控制器，這個特性即是造成控制器困難設計的原因。故我們可引進線性系統的理論對其作極點移置(pole placement)使控制器將繼承線性穩定性之特性，具有強健特性，使得在  $r, p, \bar{q}$  很小時，系統仍能保持穩定。圖五十八~六十為追蹤控制器之模擬結果。



圖五十八 平行停車之機器人運動軌跡圖



圖五十九 機器人之位置與朝向角變化圖



圖六十 機器人之角速度控制命令。

完成定位控制後，我將結論推廣至追蹤控制問題。假設給定一欲追蹤的軌跡 (desired trajectory)  $(x_r(t), y_r(t), \theta_r(t))$  (例如：  $x_r(t) = R \cos t$ ,  $y_r(t) = R \sin t$ ,  $\theta_r(t) = t$ ，即是讓機器人繞一半徑為  $R$  的圓旋轉)；我們的目的是設計一控制器使得  $x(t) \rightarrow x_r(t)$ ,  $y(t) \rightarrow y_r(t)$ , 及  $\theta(t) \rightarrow \theta_r(t)$  等。為了使以下的討論更簡潔，定義欲追蹤自動車的直線速度  $v_r = (\dot{x}_r^2(t) + \dot{y}_r^2(t))^{\frac{1}{2}}$  與角速度  $w_r = \dot{\theta}_r$ 。考慮以下的變換

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta - \theta_r \\ -(x - x_r) \sin \theta + (y - y_r) \cos \theta \\ -(x - x_r) \cos \theta - (y - y_r) \sin \theta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{u}_0 \\ \bar{u}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w - w_r \\ -w \bar{x}_1 - v + v_r \cos x_0 \end{bmatrix}.$$

則誤差系統(參考系統(1),其中  $p=q=1, r=0$ )可化為

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_0 &= \bar{u}_0 \\ \dot{\bar{x}}_1 &= \bar{x}_2(\bar{u}_0 + w_r) + v_r \sin \bar{x}_0. \\ \dot{\bar{x}}_2 &= \bar{u}_1 \end{aligned} \quad (16)$$

控制目標則為  $\bar{x}_0 \rightarrow 0, \bar{x}_1 \rightarrow 0, \bar{x}_2 \rightarrow 0$  (注意  $\bar{x}_1 \rightarrow 0, \bar{x}_2 \rightarrow 0 \Rightarrow x(t) \rightarrow x_r(t), y(t) \rightarrow y_r(t)$ )，如此我們便將追蹤問題成功的轉換為穩定性問題。並

且我們利用 Lyapunov 函數  $V = \frac{1}{2}(\bar{x}_0^2 + \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2)$  及選擇控制法則如下：

$$(\bar{u}_0, \bar{u}_1) = (-v_r \alpha(\bar{x}_0) \bar{x}_1 - \bar{x}_0, -\bar{x}_1(\bar{u}_0 + w_r) - \bar{x}_2) \quad (17)$$

其中若  $\bar{x}_0 \neq 0$  則  $\alpha(\bar{x}_0) = \frac{\sin \bar{x}_0}{\bar{x}_0}$  且定義  $\alpha(0) = 1$ 。則可推得  $\dot{V} = -(\bar{x}_0^2 + \bar{x}_2^2) \leq 0$ 。使用(17)

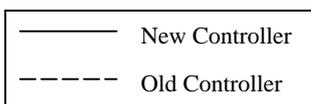
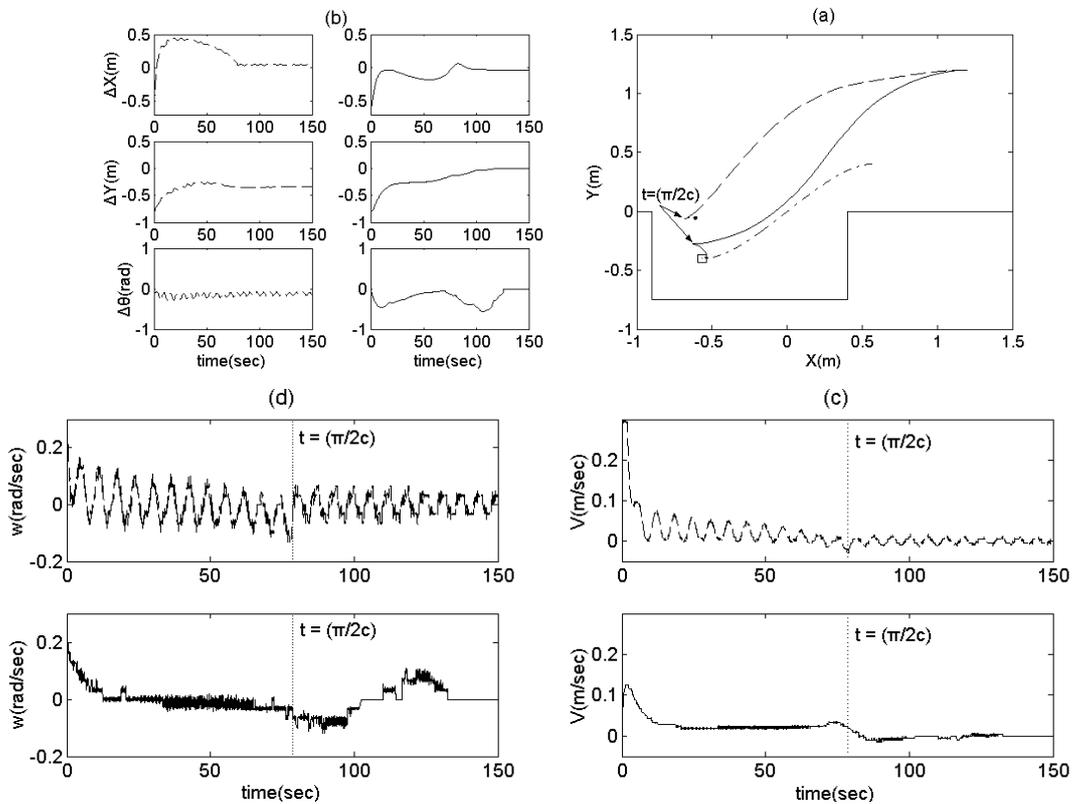
及[166]推導之廣義 LaSalle 法則，可證明下列的定理。

**定理 1：**考慮追蹤誤差模型(16)。使用控制法則(17)及假設下列條件成立（等價于追蹤一移動軌跡）：

**(PE[persistency excitation] condition)：** 存在一正數  $T_0$  使得

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \left| \int_t^{t+T_0} v_r(\tau) d\tau + \int_t^{t+T_0} w_r(\tau) d\tau \right| > 0, \quad (18)$$

則追蹤控制系統之閉迴路系統必為全域均勻穩定(UGAS)及局部指數穩定。雖然此方法可以達到局部指數穩定，但是精確的收斂比率仍然不清楚，所以我們線性化和極點移置方法來提升控制器的性能。最後，我們選擇兩個典型的軌跡規劃即路邊停車和倒車入庫來驗證控制法則的表現。為了強調新控制器的停車表現，我們把它與一個來自文獻[167]的舊控制器比較，實驗結果如圖六十一。圖六十二說明平行停車實驗的部份圖片。結果顯示這個新控制器不僅能夠解決一般停車問題而且保證快速的收斂效果。



圖六十一 和[177]舊控制器做一比較(a)位置變動 (b) 追蹤誤差 (c) 中心點的線性速度 (d) 角速度

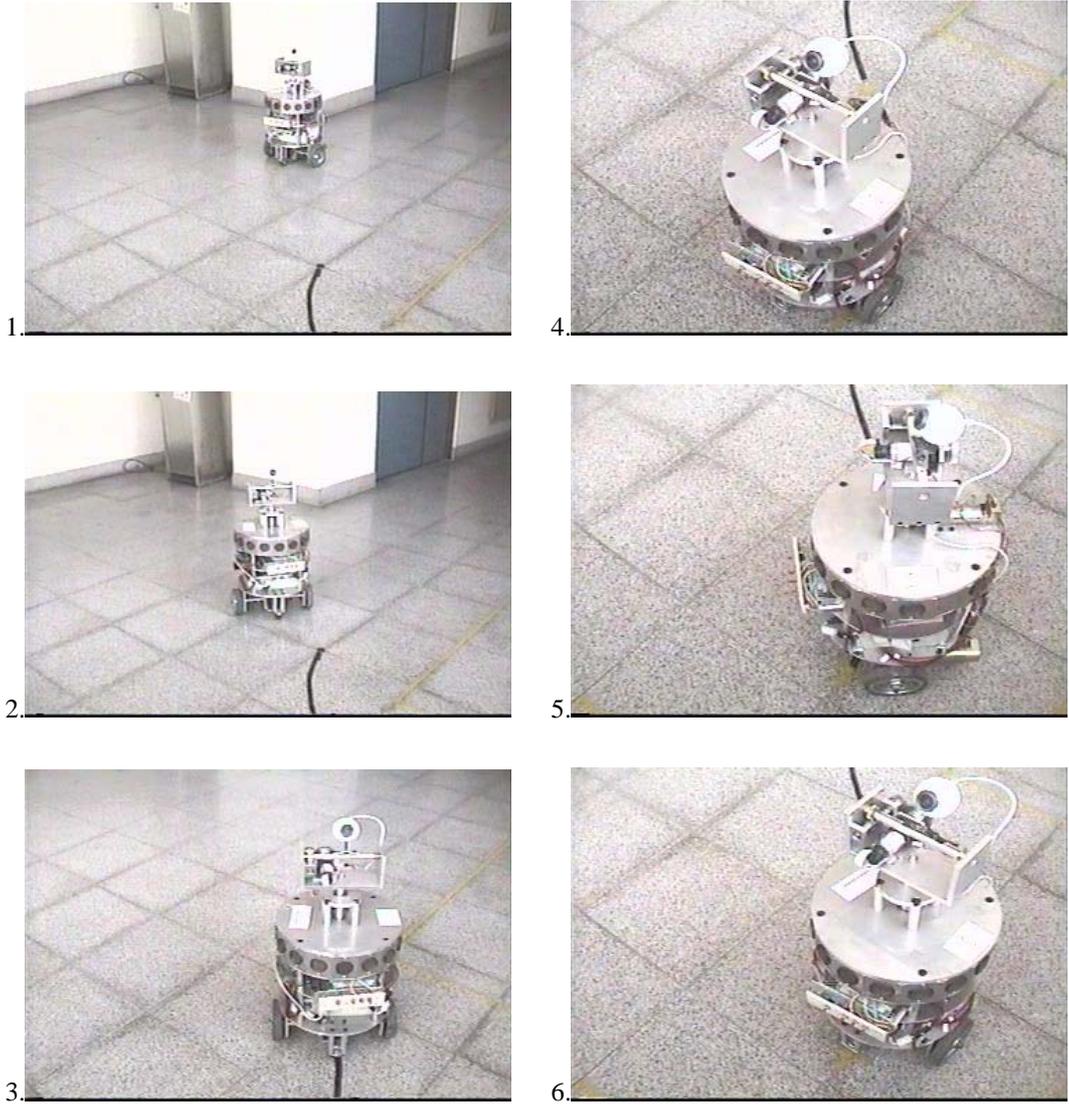
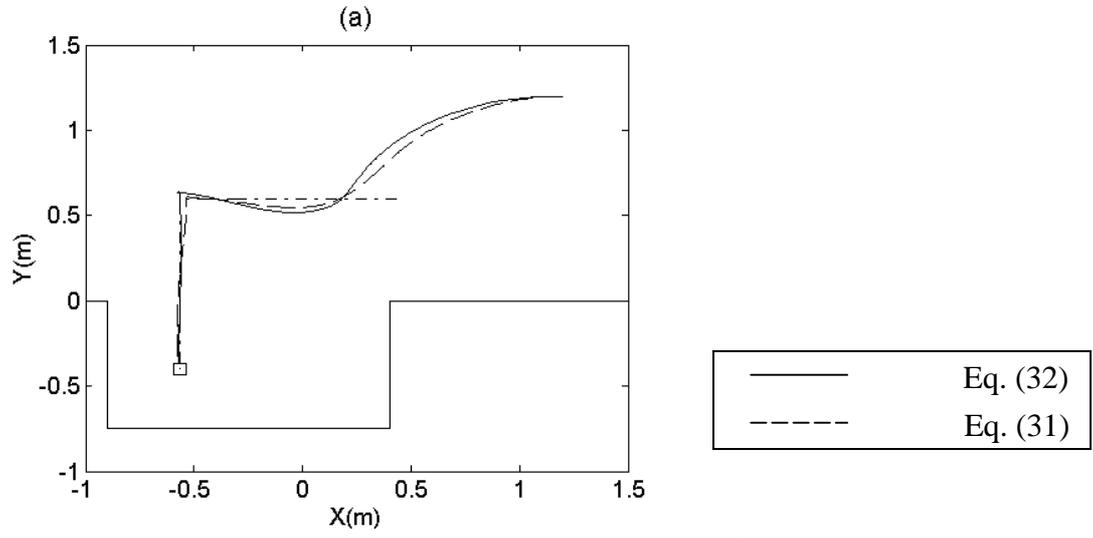


圖 六十二 平行停車實驗

圖六十三為 L 形軌跡以進行倒車入庫實驗。



圖六十三 顯示倒車入庫實驗結果

接下來我們將建立兩輪移動式機器人在影像空間上的數學模型，相關模型已出現在文獻[163]及[168]上，我們以此推導一非常簡單之定位控制器，不需使用正確的目標高度及 focal length 等資訊。

取一 Lyapunov 函數如下：

$$V = |\zeta_1|^2 + |f\zeta_2|^2. \quad (19)$$

微分  $V$  可得  $\dot{V} = f\zeta_2 v / \hat{h}$ 。並且  $\hat{h}$  的符號已知設為  $\sigma(\hat{h})$ 。取控制器如下：

$$v = -k\zeta_2 \sigma(\hat{h}). \quad (20)$$

則  $\dot{V} = -kf\zeta_2^2 / |\hat{h}| \leq 0$ 。則任取一滿足 PE 條件之  $\omega$  皆可使相關於  $(\zeta_1, \zeta_2)$  的子系統穩定，特別的取

$$\omega = k_0 \sin(\omega_0 t), \quad (21)$$

此式滿足且  $\theta$  值只在某一範圍變動，而且每經一周期， $\theta$  將回到原起始狀態。控制器(20)-(21)的優點可條列如下：

1. 非常簡單，易實現。
2. 不需要相機內在參數如 focal length 及物體實際高度等資訊。因為具指數穩定性，故有相當的強健特性可抵抗干擾及 un-modeled 的部份。

與文獻[163]比較，我們不需要額外估測  $\hat{h}$ ，但是其缺點為需要先知道  $\hat{h}$  的正負。

## 五、 結果與討論

本計畫完成兩台家用機器人雛型，此機器人具備一三自由度之機械手臂，可藉由視覺導引抓取環境中之特定物體。此機器人具有自主式閃避障礙物導航功能，透過無線網路 (WLAN) 可由一般個人電腦及 PDA 網路遠控及監測，以機器人上攝影機可達成家庭成員之人臉辨識及追蹤，已具備實用性之助理功能。

我們建構了家用機器人的視覺模組架構，機器人可以建立三維場景的模型，並推估自身與所處環境間的相對幾何關係，以及解決與障礙物發生碰撞的問題。整體架構分為數個功能模組，其中包含影像特徵點擷取，相機內部參數自我校正，相機外部參數校正，以及空間幾何架構的建立。在特徵點對應模組方面我們所提出的演算法能成功地自影像中獲取相當正確而完整的對應關係，包含特徵點的運動軌跡。在路徑規劃模組方面，在環境障礙物碰撞的問題，我們發展的方法可以成功的達到目標，且規劃出的移動路徑為最佳避碰路徑且為平滑路徑。在人

臉辨識研究，也有相當不錯的效能。

利用立體視覺來判斷週遭環境的多機器人合作系統，我們建構的立體視覺系統成功地運用在機器人身上。經過以上實驗與理論推導中，我們發現對於我們所設計的多機器人環境地圖建立系統，其可行性是存在的，而且效果也相當不錯，未來我們希望能將此機器人系統加入實際家庭環境場景中，希望能建立出可靠的環境地形表示，以提供智慧型家用機器人後續使用以及家庭成員利用。

為了使家用機器能夠對不同的家庭成員提供適當的服務與互動，使家用機器人能更人性化，我們發展一種家庭成員的辨識方法，使家用機器人能夠辨識不同的家庭成員，進而與成員間產生智慧型互動。為了使機器人的使用更為「自然」與「方便」，並且賦予機器人與使用者之間能夠產生溝通的能力，本計畫一方面藉由影像辨識技術來發展人臉辨識系統，以達成提供機器人作家庭成員的辨識，讓機器能對不同的使用者提供不同的服務及互動，並且發展語音辨識系統，讓機器人能夠藉由使用者的訊息，作出適時適當的反應動作。

在語音互動方面，目前我們已完成語音操控系統。為了方便使用者對家用機器人的操作，我們使用先前完成之語音辨識系統，製作一對於家用機器人之行為操控系統。機器人只需要使用者給定所需要的資訊，利用這些資訊，讓家用機器人可以正確地執行任務，機器人也可以語音的方式回應資訊給使用者，增加與使用者之間的互動性。

我們成功地運用 Embedded Linux 技術成功的建構出 Home Robot 之即時嵌入式 Linux 乙太網路伺服控制器，此控制器擁有 Ftpd、Telnetd、Httpd、NFS Client、Real Time Task 等多項能力，並且運用 RTLinux 建構於核心當中提供硬體即時排程規劃。使 Home Robot 擁有無限成長，學習與記憶空間，所以 Internet 連線之電腦就可以是 Robot 的大腦。與 Robot 相處附近的 Robot House PC 便猶如一個閘道，可視為 Robot 的小腦與脊椎神經，其與 Robot 之間，則是一個負責即時與命令反應動作的控制單元。理想規劃下，網際網路猶如其大腦神經系統。我們可以運用網際網路上無限多的訊息資訊提供給機器人系統，並可運用網路上無限多的計算資源建構一個複雜且龐大的學習與合作的機制。

本計劃所發展的遠端呈現與操控系統主要包括遠端呈現模擬系統以及具力回饋功能的操控器，我們利用虛擬實境的技術來實踐遠端呈現模擬，建立擬真的虛擬場景，並利用電腦視覺的資訊來提高虛擬與真實場景的相似性，在虛擬場景的建立中，著重在機器人與環境互動時位置與力變化的呈現，利用計劃發展的具力回饋功能的操控器可提供使用者來自遠方環境的接觸力，讓使用者更能掌握全局，進行有效的操控。

此計畫不僅完整地落實解決資訊、控制、電機機械與系統整合的問題，並讓人工智慧與學習理論相關學術研究擁有一個很好的橋樑，更可進一步驗證多層式即時多工控制理論架構的可行性，並給予產業學術界注入一股新的契機與力量。

## 六、結論

本計畫已開發出家用機器人感測控制與資訊整合平台，此平台上是以 PC-based 嵌入式工業電腦為基礎，連結並控制各種感測器與致動器，配合適當之微控器(Microcontroller)、數位訊號處理器(DSP)與可程式化裝置(FPGA)，機器人可以達成即時性之反應。我們成功的實現了多超音波環境感測器、數位影像立體視覺、人臉辨識與追蹤、語音辨識與聲控、網路遠端遙控、自主式導航及多機器人合作感測。我們提出機器人互動控制方面的新架構與理論，也研發出具體之機器人與外界互動之硬體設備與處理法則，對智慧型機器人的未來實際應用將十分有幫助。

本計畫之研究內容與原計畫完全符合並已達到預期目標，所發展之家用機器人設計等研究成果具有學術價值與實用性，已發表有三十六篇學術論文其中七篇期刊論文及二十九篇發表於國際研討會 ICMT 2002、IEEE ICRA2003、IEEE CIRA 2003、IEEE CCA 2004、IEEE IROS 2004、IEEE SMC 2004 及中華民國自動控制研討會，另有較完整的論文近期內將投稿於學術期刊。

## 七、参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, “The development of Honda humanoid robot,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1321 – 1326, 1998.
- [2] S. Hashimoto, S. Narita, H. Ksahara, A. Takanishi, S. Sugano, K. Shirai, T. Hoashi, “Humanoid robot-development of an information assistant robot Hadaly, Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.106 – 111, 1997.
- [3] T.Ikeda, C..Miyazi, “Swimmable hummanoid robot, ” Proceedings IEEE of the 24th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, pp1164 –1169, 1998.
- [4] J. A. Driscoll, R. A. Peters, and K. R. Cave, “A visual attention network for a humanoid robot , “ Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.96 – 101, 1998.
- [5]S.Hashimoto, “Vision system for humanoid robot-toward emotional man-machine-environment interaction,” Proceeding KES '98 Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, pp. 269 –273, 1998.
- [6] K. Nishiwaki, A. Ionno, K. Nagashima, M. Inaba, and H. Inoue, “ The humanoid Saika that catches a thrown ball,” Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 94 – 99, 1997.
- [7] R. A. Brooks, “Behavior-based humanoid robotics,” Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp. 1-8, 1996.
- [8] S. A. Setieawan, H. H. Sang, J. Yamaguchi, and A. Takanishi, “Physical Interaction between Human and a Bipedal Humanoid Robot –Realization of Human – follow Walking,”Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 361 –367, 1999.
- [9] T.Inoue, “Future tasks of research in robotics,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 24, 1995.
- [10] O. Tetsuya and S. Shigeki, “Emotional Communication Between Humans and the Autonomous Robot Which has the Emotion Model,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3177 –3182, 1999.
- [11] M. Toshio, Hiroyasu, and S. Shigeki, “Development of Human Symbiotic Robot: WENDY,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automaion, pp. 3183 –3188, 1999.
- [12] T. Atsuo, T. Hideaki, K. Isao, and U. Tomohiko, “Development of the Anthropomorphic Head-Eye Robot WE-3R11 with an Autonomous Facial

- Expression Mechanism,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3255 – 3260, 1999.
- [13] Y. J. Cho, J. M. Park, S. R. Oh, and C. W. Lee, “A control architecture to achieve manipulation task goals for a humanoid robot,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.206-212, 1998.
- [14] S. Lee D.S. Choi, M. Kim, C. W. Lee, and J. B. Song, “An unified approach to teleoperation: human and robot integration, ” Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.261 –266, 1998.
- [15] S. Lee, D. S. Choi, M. Kim, C. W. Lee ; and J. B. Song, “Human and robot integrated teleoperation,” Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.3406 – 3058. 1998.
- [16] S. Lee. D. S. Choi, M. Kim, and C. W. Lee, “The Distriuted Controller Architecture for a Masterarm and its Application to Teleoperation with Force Feedback,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 375 – 380, 1999.
- [17] K. Berns, T. asfour, and R. Dillmann, “ARMAR – An Anthropomorphic Arm for Humanoid Service Robot,” Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 702 – 707, 1999.
- [18] H. Nishiyama, W. Yamazaki, F. Mizoguchi, “Negotiation protocol for proof of realization of cooperative task in multi-agent robot systems,” Proc. of 2000 IEEE International Conf. On Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1685 –1690.
- [19] G. Ferretti, S. Filippi, C. Maffezzoni, G. Magnani, and P. Rocco, “Modular Dynamic Virtual-Reality Modeling of Robotic Systems,” IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 6(4) (1999), 13-23.
- [20] A. Goto, R. Inoue, T. Tezuka, and H. Yoshikawa, “A Research on Tele-operation Using Virtual Reality,” in: IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 1995, pp. 147-152.
- [21] C. P. Kuan, and K. Y. Young, “VR-based Teleoperation for Robot Compliance Control,” accepted by J. Intelligent and Robotic Systems.
- [22] J. E. Lloyd, J. S. Beis, D. K. Pai and D. G. Lowe, “Programming Contact Tasks Using a Reality-Based Virtual Environment Integrated with Vision,” IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 15(3) (1999), 423-434
- [23] M. Mitsuishi, T. Hori and T. Nagao, “Predictive Information Display for Tele-Handling/Machining System,” in: IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1994, pp. 260-267.
- [24] D. Bomon, “International Survey: Virtual-Environment Research,” Computer, Vol. 28(6) (1995), 57-65.
- [25] G. Burdea and P. Coiffet, Virtual Reality Technology, John Wiley & Sons, 1994.

- [26] M. Gobel, "Projects in VR: Industrial Applications of VEs," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 16(1) (1996), 10-13.
- [27] G. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, 1996.
- [28] Y. Y. Liao, L. R. Chou, T. J. Horng, Y. Y. Luo, K. Y. Young and S. F. Su, "Force Reflection and Manipulation for a VR-Based Telerobotic System," *Proceedings of the NSC --- Part A: Physical Science and Engineering, Taiwan*, Vol. 24(5) (2000), 382-389.
- [29] K. Hirota and M. Hirose, "Providing Force Feedback in Virtual Environments," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 15(5) (1995), 22-39.
- [30] L. Oly and C. Andriot, "Imposing Motion Constraints to a Force Reflecting Telerobot Through Real-Time Simulation of Virtual Mechanisms," in: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1995, pp. 357-362.
- [31] W. A. McNeely, "Robotic Graphics: A New Approach to Force Feedback for Virtual Reality," in: *IEEE Virtual Reality Annual Int. Symposium*, 1993, pp. 336-341.
- [32] T. Yoshikawa, Y. Yokokohji, T. Matsumoto and X. Z. Zheng, "Display of Feel for the Manipulation of Dynamic Virtual Objects," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 117(4) (1995), 554-558.
- [33] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. K. Bejczy, "Force-Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telemanipulators with Time Delay," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8(2) (1992), 176-185.
- [34] H. Kazerooni and G. M. Her, "The Dynamics and Control of a Haptic Interface Device," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 10(4) (1994), 453-464.
- [35] Y. Yokokohji, R. L. Hollis and T. Kanade, "What You Can See Is What You Can Feel - Development of a Visual/Haptic Interface to Virtual Environment," in: *IEEE Virtual Reality Annual Int. Symposium*, 1996, pp. 46-53.
- [36] S. Chiaverini and L. Sciavicco, "The Parallel Approach to Force/Position Control of Robotic Manipulators," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 9(4) (1993), 361-373.
- [37] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Parts I, II, and III," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107 (1985), 1-24.
- [38] C. P. Kuan, and K. Y. Young, "Reinforcement Learning and Robust Control for Robot Compliance Tasks," *J. Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 23 (1998), 165-182.
- [39] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulator," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 11(6) (1981),

418-432.

- [40] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102 (1981), 126-133.
- [41] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 34(5) (1989), 494-501.
- [42] T. Kotoku, "A Predictive Display with Force Feedback and Its Application to Remote Manipulation System with Transmission Time Delay," in: *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1992, pp. 239-246.
- [43] R. J. Anderson and M.W. Spong, "Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators," *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. 4(5) (1988), 549-556.
- [44] T. F. Chan, R.V. Dubey, and S. E. Everett, "Variable Damping Impedance Control of a Bilateral Telerobotic System," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17(1) (1997), 37-45.
- [45] R. Colbaugh, H. Seraji, and K. Glass, "New Results in Adaptive Impedance Control of Manipulators," in: *IEEE Conf. on Decision and Control*, 1993, pp. 3410-3415.
- [46] S. Lee and H. S. Lee, "Intelligent Control of Robot Manipulators Interacting with an Uncertain Environment Based on Generalized Impedance," in: *IEEE Int. Symposium on Intelligent Control*, 1991, pp. 61-66.
- [47] G. Hirzinger, B. Brunner, J. Dietrich and J. Heindl, "Sensor-Based Space Robotics --- ROTEX and Its Telerobotic Features," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 9(5) (1993), 649-663.
- [48] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, "Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 10(6) (1994), 799-822.
- [49] V. Lumelsky, "On Human Performance in Telerobotics," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 21(5) (1991), 971-982.
- [50] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press, 1992.
- [51] T. Yang, Y. Xu and C. S. Chen, "Hidden Markov Model Approach to Skill Learning and Its Application to Telerobotics," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 10(5) (1994), 621-631.
- [52] T. Piantanida, D. Boman and J. Gille, "Human Perceptual Issues and Virtuality," *Virtual Reality Systems*, Vol. 1(1) (1993), 43-52.
- [53] K. Shimoga, "A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dextrous Telemanipulation," in: *IEEE Virtual Reality Annual Int. Symposium*, 1993, pp. 263-279.

- [54] O. D. Faugeras, "What can be Seen in Three Dimensions with an Uncalibrated Stereo Rig?" Proc. ECCV, pp. 563-578, 1992.
- [55] R. I. Hartley, R. Gupta and T. Chang, "Stereo from Uncalibrated Cameras," Proc CVPR, pp. 761-764, 1992.
- [56] O. D. Faugeras, O.-T. Luong and S. J. Maybank, "Camera Self-Calibration: Theory and Experiments," Proc. ECCV, pp. 321-334, 1992.
- [57] M. Armstrong, A. Zisserman, and R. Hartley, "Self-Calibration from Image Triplets," Proc. ECCV, pp. 3-16, 1996.
- [58] O. D. Faugeras, "Stratification of 3D Vision: Projective, Affine, and Metric Representation," J. Optical Society of America, vol. 12, no. 3, pp. 465-484, 1995.
- [59] R. I. Hartley, "Euclidean Reconstruction from Multiple Views," Applications of Invariance in Computer Vision, LMCS 825, Springer-Verlag, pp. 237-256, 1994.
- [60] A. Heyden and K. Aastrom, "Euclidean Reconstruction from Constant Intrinsic Parameters," Proc. ICPR, pp. 339-343, 1996.
- [61] M. Pollefeys and L. Van Gool, "Self-Calibration and Metric Reconstruction in Spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters," Proc. ICCV, pp. 90-95, 1998.
- [62] L. Quan and B. Triggs, "A Unification of Auto-Calibration Methods," Proc. ACCV, pp. 917-922, 2000.
- [63] A. Zisserman, P. Beardsley and I. Reid, "Metric Calibration of a Stereo Rig," Proc. IEEE Workshop Representation of Visual Scenes, pp. 93-100, 1995.
- [64] M. Pollefeys, L. Van Gool and M. Proesmans, "Euclidean 3D Reconstruction from Image Sequences with Variable Focal Lengths," Proc. ECCV, pp. 31-42, 1996.
- [65] M. Pollefeys and L. Van Gool, "Stratified Self-Calibration with the Modulus Constraint," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 21, no. 8, pp. 707-724, 1999.
- [66] L. Apapito, E. Hayman and I. Reid, "Self-Calibration of a Rotating Camera with Varying Intrinsic Parameters," Proc. BMVC, 1998.
- [67] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., St. Louis, MO, Mar. 1985.
- [68] P. Khosla and R. Volpe, "Superquadric artificial potentials for obstacle avoidance and approach," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Philadelphia, PA, Apr. 1988.
- [69] B. Cohen-Tannoudji, C. Diu, and F. Laloe, Quantum Mechanics, New York: Wiley, 1977, vol.2.
- [70] C. I. Connolly, J. B. Burns, and R. Weiss, "Path planning using Laplace's equation," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Cincinnati, OH, May 1990.

- [71] J.-H. Chuang, C.-H. Tsai, W.-H. Tsai, and C.-Y. Yang, "Potential-Based Modeling of 2D Regions Using Non-uniform Source Distributions," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 30, no. 2, pp. 197-202, 2000.
- [72] J.-H. Chuang, "Potential-based modeling of three dimensional workspace for obstacle avoidance," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 14, no. 5, pp. 778-785, Oct. 1998.
- [73] J. T. Schwartz, and M. Sharir, "On the 'piano movers' problem: II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds," *Advances in Applied Mathematics* 4: pp. 298-351, 1983.
- [74] J. F. Canny, "The Complexity of Robot Motion Planning," Cambridge, MA: MIT press, 1988.
- [75] K. K. Gupta, "Fast Collision Avoidance for Manipulator Arms: A Sequential Search Strategy," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 6, no. 5, Oct. 1990.
- [76] D. Hsu, J. C. Latombe, and Motwani, "Path Planning in Expansive Configuration Spaces," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, Albuquerque, NM, pp:2719-2726, 1997.
- [77] R. Alami, J. P. Laumond, and T. Simeon, "Two manipulation planning algorithms," *Algorithmic Foundations of Robotics, WAFR'94*.
- [78] Y. Koga, and J. C. Latombe, "On multi-arm manipulation planning," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, San Diego, CA, pp. 945-952, 1994.
- [79] H.J. Yeo, I. H. Suh, B. J. Yi, and S. R. Oh, "A Single Closed-Loop Kinematic Chain Approach For a Hybrid Control of Two Cooperating Arms with a Passive Joint: An Application to Sawing Task," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 15, no. 1, Feb. 1999.
- [80] I. Craw, H. Ellis and J. R. Lishman, "Auto extraction of face-features," *Pattern Recognition Letters*, vol. 5, pp. 183-187, Feb. 1987
- [81] X. Xie, R. Sudhaka and H. Zhuang, "On improving eye feature extraction using deformable templates," *Pattern Recognition* , vol. 27, no. 6, pp. 791-799, 1994
- [82] F. Samaria and S. Young, "HMM-based architecture for face identification," *Image and Vision Computing*, vol. 12, no. 8, pp. 537-541, Oct. 1994
- [83] Zhujie and Y. Yu, "Face recognition with eigenfaces," *Proc. IEEE Conf. Industrial Technology*, pp. 434-438, 1994.
- [84] P. Belhumeur, J. Hespanha and D. Kriegman, "Using discriminant eigenfeatures for image retrieval," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 18, no. 8, pp. 831-836, Aug. 1996.
- [85] Amnon Shashua and Nassir Navab, "Relative Affine Structure : Canonical Model for 3-D From 2D Geometry and Applications," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.18, no. 9, pp.873-883, 1996.

- [86] Takanori Shibata, Toshihiro Tashima, Kazuo Tanie. "Human Robot Interaction for Creation of Subjective Value," Proc. of 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 179 –184.
- [87] Natsuki Miyata, Jun OTA, Yasumichi AIYAMA, and Tamio ARAI, "Real-time Task Assignment for multi-agent Robots," Proc. of IEEE SMC '99, Vol. 4, pp. 761 –768.
- [88] Georges M. Quent, "The Orthogonal Algorithm for Optical Flow Detection using Dynamic Programming," Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1992, ICASSP-92, Vol. 3, pp. 249 –252.
- [89] Anuj Dev, Ben Krose , Frans Groen, "Navigation of a mobile robot on the temporal development of the optic flow," Proc. of IROS'97, Vol. 2 , pp. 558 –563.
- [90] Thomas Braunl, "Improv and EyeBot Real-time Vision on-Board Mobile Robot," Proc. of Fourth Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 1997, pp. 131 -135.
- [91] Zhongbin Liu, Hideki Hashimoto, Ren. Luo, Fumio Harashima, Qian Li, "Path Following Control of A Mobile Robot," Proc. of 1994 IEEE International Conference on Industrial Technology.
- [92] N.Moghadam Charkari, Kazunari Ishii and Hideo Mori, "Proper Selection of Sonar and Visual sensors for Vehicle Detection and Avoidance," Proc. of IROS '94 Vol. 2, pp. 1110 -1117.
- [93] Tetsuya Ogata and Shigeki Sugano, " Mechanical System for Autonomic Nervous System in Robots", Proc. of 1997 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics , pp. 113.
- [94] <http://www.arai.pe.u-toyko.ac.jp/>
- [95] <http://www.ee.uwa.edu.au/~braunl/eyebot>
- [96] <http://www.incx.nec.co.jp/>
- [97] <http://www.irobot.com>
- [98] K.T. Song and C.C. Chang, "Reactive Navigation in Dynamic Environment Using a Multisensor Predictor," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B, Vol. 29 , No. 6. pp.870-880, 1999
- [99] K.T. Song and T. Z. Wu, "Visual Servo Control of a Mobile Manipulator Using One-dimensional Windows," Proc. of IEEE IECON'99, San Jose, CA, USA, Nov. 30-Dec.2, pp. 547-552.
- [100] K.T. Song, T.T. Tang, J.Y. Lin, H.T. Chen, and G.G. Chen, " Application of Multiple Robot Cooperation System on Robot Soccer," Technical Journal of Digital Signal Processing, March 2000, Vol. 1, pp. 70-78, 2000

- [101] 宋開泰， “導盲機器人之反應行為與運動控制系統研製(II)” ，國科會專題研究計畫成果報告, 2000, 計畫編號：NSC-89-2213-E009-113.
- [102] Inacio Fonseca , Jorge Dias , “Exploring Image Properties for Robot Navigation,” Proc. of 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Robots and Systems, pp. 533 –538.
- [103] S. Feyrer and A. Zell, “Tracking and pursuing persons with a mobile robot, ” Proc. of 1999 International Workshop on Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems, pp. 83 –88.
- [104] C. Breazeal, A. Edsinger, P. Fitzpatrick, B. Scassellati, P. Varchavskaia, “ Social Constraints on Animate Vision,” IEEE Intelligent Systems [see also IEEE Expert] , Volume: 15 Issue: 4 , July-Aug. 2000 pp. 32 –37.
- [105] M. Ricotti, M. Ceresa, A. Barili, “Real time active vision for the mobile robot PARIDE,” Proc. of IECON '94, pp. 1072 –1077.
- [106] Jian Peng, A. Srikaew, M. Wilkes, K. Kawamura, A. Peters, “An active vision system for mobile robots,” 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1472 –1477.
- [107] E. Guglielmelli, C. Laschi, G. Teti, R. Fontanelli, P. Dario, “A modular and distributed supervisory system for a semi-autonomous personal robot for household applications,” Proc. of ICAR '97. pp. 45 –50.
- [108] A. Agah, R. Walker, R. Ziemer, “A mobile camera robotic system controlled via a head mounted display for telepresence,” 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 3526 –3531.
- [109] A. Bonarini, P. Aliverti, M. Lucioni, “An omnidirectional vision sensor for fast tracking for mobile robots,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49 No. 3, June 2000, pp. 509 –512.
- [110] Alex Dickinson, Bryan. Ackland, El-Sayed Eid, David Inglis and Eric R. Fossum, “Standard CMOS Active Pixel Image Sensor for Multimedia Applications,” Proc. IEEE, pp. 214-224, 1995.
- [111] J. D. Gibon, and J. L. Melsa, “Introduction to nonparametric detection with applications,” Academic Press, New York, 1975.
- [112] Shu Wang and Zheng Dou, “Exclusive Trend Detector With Variable Observation Windows for Signal Detection,” IEEE Electronic Letters, Vol. 33, No. 17, pp. 1433-1435, 1997.
- [113] V. W. Zue and J. R. Glass, “Conversational Interface : Advances and Challenges “ Proceedings of the IEEE , Volume: 88 Issue: 8 , Aug. 2000, pp. 1166 -1180.
- [114] J. Takami, A. Kai, S. Sagayama, “ Performance Comparison of Several Speech Recognition Methods,” Proceedings of the 1991 IEEE Workshop Neural

- Networks for Signal Processing pp. 327 -336.
- [115] B. Adams, C. Breazeal, R. A. Brooks, B. Scassellati, "Humanoid Robots : A New Kind of Tool," IEEE Intelligent Systems [see also IEEE Expert], Vol. 15, No. 4, July-Aug. 2000, pp. 25 -31.
- [116] Bryan Scassellati , " Theory of Mind for a Humanoid Robot," in Proc. of IEEE Humanoids'2000.
- [117] Cynthia Breazeal and Lijin Aryananda , "Recognition of Affective Communicative Intent in Robot—Directed Speech, " Proc. of IEEE Humanoids'2000.
- [118] J. Fry, H. Asoh, T. Matsui, " Natural Dialogue with the Jijo-2 Office Robot," Proc. of 1998 IEEE/RSJ IROS'98, pp.1278 -1283.
- [119] Nikil Jayant , " Human Machine Interaction By Voice and Gesture," 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp.175 -177.
- [120] Takuya Takahashi , Satoru Nakanishi , Yoshinori Kuno , and Yoshiaki Shirai , "Human-Robot Interface by Verbal and Nonverbal Behaviors," Proc. of 1998 IEEE/RSJ IROS'98, pp. 924 -929.
- [121] K. Kelly, "NET & TEN", 大塊文化出版社出版, 1999.
- [122] Natsuki Miyata, Jun Ota, Yasumichi Aiyama , and Tamio Arai, "Real-time Assignment for Multi-agent Robots," 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 761-768.
- [123] S. C. Botelho and R. Alami, "A Multi-robot Cooperative Task Achievement System," in Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2716-2721.
- [124] Steven M. LaValle and Seth A. Hutchinson, "Game Theory as a Unifying Structure for a Variety of Robotic Tasks," in Proc. of the 1993 International Symposium on Intelligent Control, pp. 429-434.
- [125] V. N. Rajan and S. Y. Nof, "Planning Knowledge and Game-theoretic Models for Cooperative Assembly," Proc. of 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1990, pp. 957-962.
- [126] Pierre-Yves Glorennec, "Coordination Between Autonomous Robots," International Journal of Approximate Reasoning, pp. 433-446, 1997.
- [127] Kyung No Lee and Doo Yong Lee, "An Approach to Control Design for Cooperative Multiple Mobile Robots," Proc. of 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1-6.
- [128] Randy Sargent, Bill Bailey, and Anne Wright, "The Importance of Fast Vision in Winning the First Micro-robot World Cup Soccer Tournament," Robotics and Autonomous Systems, pp. 139-147, 1997.

- [129] Sung Ho Kim, Jong Suk Choi, Jae Kwon Kim, and Byung Kook Kim, "A Cooperative Micro Robot System playing Soccer: Design and Implementation," *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 177-189, 1997.
- [130] Takayuki Nakamura, "Development of Self-Learning Vision-based Mobile Robots for Acquiring Soccer Robots Behaviors," in *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2592-2598.
- [131] Jong-Hwan Kim, kwang-Choon Kim, Dong-Han Kim, Yong-Jae Kim and Prahlad Vadakkepat, "Path Planning and Role Selection Mechanism for Soccer Robots," in *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3216-3221.
- [132] R. Alami, S. Fleury, M. Herrb, F. Ingrand, and F. Robert, "Multi-robot Cooperation in the MARTHA Project," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 36-47, 1998.
- [133] A. Ferworn, R. Roque, and I. Vecchia, "MAX: Wireless Teleoperation via the World Wide Web," in *Proc. of the 1999 IEEE Canadian Conf. On Electrical and Computer Engineering, Alberta, Canada*, pp.1380-1384.
- [134] A. S. sekmen, Z. Bingul, V. Hombal, and S. Zein-Sabatto, "Human-Robot Interaction over the Internet," *Proceedings of the IEEE* , pp.223-228, 2000.
- [135] W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hahnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. steiner,, and S. Thrun, "Experiences with an Interactive Museum Tour-guide Robot," *Artificial Intelligence*, pp. 3-55, 1999.
- [136] F. Monteiro, P . Rocha, P. Menezes , A. Silva, and J. Dias, "Teleoperation a Mobile Robot – A Solution Based on Java Language," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics 1997*, pp. 263-267.
- [137] Schilling, K.J. and Roth, H., "Control Interfaces for Teleoperated Mobile Robots," *1999 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp.1399-1403.
- [138] Tracy Engwirda, Anthony Engwirda, Ljubo Vlacic, and Geoff Dromey, "Sharing Cooperative Mobile Robots Through the Internet," *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2000*, pp. 460-465.
- [139] Gaurav S.Sukhatme, and Maja J.Mataric, "Embedding Robots into the Internet," *Communication of the ACM* , Vol.43, No.5, pp. 67-73, 2000.
- [140] Brockett, R. W., "Asymptotic stability and feedback stabilization," in: Brockett R. W., Millman R. S., and Sussmann H. H. Eds., pp. 181-191, *Differential Geometric Control Theory* 1983.
- [141] M'Closkey R. T. and Murray R. M., "Exponential stabilization of driftless control systems using homogeneous feedback," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. No. pp. 1997.

- [142] M'Closkey R. T. and Murray R. M., "Exponential stabilization of nonlinear driftless control systems via time-varying homogeneous feedback," IEEE Conf. On Decision and Control, Lake Buena Vista, pp. 1317-1322, 1994.
- [143] Lucibello, P. and Oriolo G., "Stabilization via iterative state steering with application to chained-form systems," Proc. IEEE Conf. Decision and Control, pp. 2614-2619, 1997.
- [144] M'Closkey R. T. and Murray R. M., "Exponential stabilization of driftless control systems using homogeneous feedback," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. No. pp. 1997.
- [145] M'Closkey R. T. and Murray R. M., "Exponential stabilization of nonlinear driftless control systems via time-varying homogeneous feedback," IEEE Conf. On Decision and Control, Lake Buena Vista, pp. 1317-1322, 1994.
- [146] Murray R. M., Walsh, G. and Sastry S. S., "Stabilization and Tracking for nonholonomic control systems using time-varying state feedback," IFAC Nonlinear Control Systems Design, Bordeaux, ed. M. Fliess, pp. 109-114, 1992.
- [147] Jiang, Z. P. and Nijmeijer, H., "Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping," Automatica, Vol. 33, pp. 1393-1399, 1997.
- [148] Samson C. and Ait-Abderrhaim K., "Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, CA, pp. 1136-1141, 1991.
- [149] M'Closkey R. T. and Murray R. M., "Nonholonomic systems and exponential convergence: some analysis tools," IEEE Conf. On decision and Control, San Antonio, pp. 943-948, 1993.
- [150] Coron J. M., "Global asymptotic stabilization for controllable systems without drift," Mathematics of Cont. Sign. and Systems, Vol. 5, pp. 295-312, 1992.
- [151] Pomet J. B. and Samson C., "Exponential stabilization of nonholonomic systems in power form," IFAC Symposium on Robust Control Design, Rio de janeiro, pp. 447-452, 1994.
- [152] Pomet J. B., "Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift," Syst. and Contr. Letters, Vol. 18, pp. 467-473, 1992.
- [153] Jiang, Z. P. and Nijmeijer, H., "Backstepping-based tracking control of nonholonomic chained systems," Proc. 4<sup>th</sup> European Control Conf., 1997.
- [154] Jiang, Z. P. and Pomet, J. B., "Backstepping -based adaptive controller for uncertain nonholonomic systems," Proc. 34<sup>th</sup> IEEE Conf. On Decision and Control, New Orleans, LA, pp. 1573-1578, 1995.
- [155] Jiang, Z. P. and Pomet, J. B., "Combining backstepping and time-varying techniques for a new set of adaptive controllers," Proc. 33<sup>rd</sup> IEEE Conf. On

- Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, pp. 2207-2212: also Int. J. Adaptive Control Signal Process, Vol. 10, pp. 47-59, 1996.
- [156] Jiang, Z. P., "Iterative design of time-varying stabilizers for multi-input systems in chained form," Systems Control Letters, Vol. 28, pp. 255-262, 1996.
- [157] Morin P. and Samson C., "Time-varying Exponential stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with two controls," IEEE Conf. On Decision and Control, New Orleans, pp. 3988-3993, 1995.
- [158] Morin P. and Samson C., "Time-varying exponential stabilization of chained form systems based on a backstepping technique," Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, pp. 1449-1454, 1997.
- [159] Lee, T. C., Song, K. T., Lee, C. H. and Teng, C. C., "Tracking control of mobile robots using saturation feedback controller", to appear in IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2001.
- [160] 練光祐, 邱謙松, "結合模糊理論及非線性控制以實現路邊停車," 1997 自動控制研討會, 台北.
- [161] 吳佳儒, 樹林工專研討會論文集, 1997
- [162] K. T. Song(宋開泰) and R.S. Huang, "Motion Control Design of an Intelligent Autonomous Vehicle Employing Voice Recognition, "in Proc. of 1998 ROC Automatic Control Conference, Yunlin, pp.541-546, Apr. 1998.
- [163] Conticelli, F., Allotta, B. and Khosla, P. K., "Image-based visual servoing of nonholonomic mobile robots," 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, December 7-10, 1999, Phoenix, Arizona.
- [164] <http://fsmllabs.com/developers/>
- [165] Liwei Wu, Jwu-Sheng Hu, "Achieving Internet synchronization clock error detection with HRTP", CAC2003.
- [166] Lee, T. C. and Chen, B.S., "A general stability criterion for time-varying systems using a modified detectability condition," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 47, No 5, pp. 797-802, 2002. 國科會補助編號：90-2213-E-159-003.
- [167] Lee, T. C., Lee C. H. and Teng, C. C., "Adaptive tracking control of nonholonomic mobile robots by computed torque," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E84-A, No.7, pp. 1766-1777, 2003.
- [168] Y. Ma, J. Koseck'a, and S. S. Sastry, "Visual Motion Planning for Mobile Robots," *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, VOL. 15, NO. 3, pp. 521-536, 1999.

## 可供推廣之研發成果資料表

可申請專利       可技術移轉

日期：93 年 10 月 18

日

國科會補助計畫	計畫名稱：先進家用機器人系統之研發 計畫主持人：宋開泰教授 計畫編號：NSC-92-2213-E-009-003 學門領域：資訊，控制，電機機械與系統整合
技術/創作名稱	先進家用機器人系統
發明人/創作人	宋開泰教授、胡竹生教授、楊谷洋教授、莊仁輝教授、李迪章教授
技術說明	中文：移動式遠距監控機器人 英文：Remote monitoring using mobile intelligent robot
可利用之產業 及 可開發之產品	1. 智慧型家用機器人平台 2. 移動式機器人網路遙控 3. 機器人運動控制系統 4. 虛擬實境遠端操控 5. 特定人之臉辨識系統 6. 看護與安全守衛機器人
技術特點	1. 超音波閃避障礙物 2. 即時影像處理 3. PDA 網路遙控 4. 力迴授虛擬實境 5. 人臉辨識率達 94% 6. 採用一般廉價之資訊裝置，如 CMOS sensor camera
推廣及運用的價值	整合資訊，控制，電機與機械達成實用之機器人，可運用在家庭與公共場所，做為安全監控與居家照護功能。

※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。