

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩 士 論 文

全方位移動平台網路化控制及感測融合實現

The NCS-based the Omni-directional Mobile Robot Control
with Sensor Fusion

研 究 生：林也強

指導教授：徐保羅 博士

中 華 民 國 九 十 七 年 七 月

全方位移動平台網路化控制及感測融合實現

研究生：林也強

指導教授：徐保羅 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

網路化在工業上的應用越來越普及，由於網路化可以帶來需許多優點，比如減少配線、減少安裝及維護的成本，所以由網路連結與多系統的溝通也成為了一種趨勢。在建構網路化控制方面，本研究運用 RS-232 串接的形式將多軸馬達連接構成一個網路化的系統，藉由 DSP F2812 與馬達之間的通訊協定成功的來控制四軸馬達。使平台行駛於低速(30 cm/s)與高速(100 cm/s)時所產生的實際位置誤差，並加入平台位置迴路上加上 PID 控制器，改善實際位置誤差。由於網路式的控制受限於傳輸率的限制，所需的取樣周期較大，因此我們將針對於不同的取樣時間下，探討網路式與集中式的效果。

近來全方位攝影機在機器人導航領域中被拿來做為目標物追蹤以及機器人定位，本文以 Kalman filter 針對影像目標物相對位置作估測，以消除平台行走間產生震盪問題，本論文提出以感測融合的方式，結合影像與 encoder，提升平台相對定位的精確度及穩定性。

本論文整合遠端控制、影像傳輸與平台運動控制三方面，遠端遙控者可以藉由網路傳輸下達命令給平台，平台上影像也可藉由網路傳輸回傳至遙控者觀看。最後，整體平台藉由網路化的結構，並具由遠端遙控及自主的系統，於全方位移動平台上實現。

The NCS-based Omni-directional Mobile Robot Control with Sensor Fusion

Student : Yeh-Chiang Lin

Advisor : Dr. Pau-Lo Hsu

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Recently, network control system (NCS) becomes popular in different industrial applications with advantages as low cost, reduction of installation, and easy maintenance. The servo motor adopted in this study with the serious RS-232 interface to connect all motors as the NCS. The DSP F2812 is applied to generate commands as the protocol to control four motors of an omni-directional mobile robot (ODMR). The mobile robot was tested with both at a low speed (30 *cm/s*) and a high speed (100 *cm/s*) with acceleration and deceleration. By adding the PID position controller, the robot motion accuracy is significantly improved in a centralized control structure which is usually faster compared with the NCS structure. A suitable sampling time for the NCS on the ODMR is determined in real application experimentally by considering the sampling time and the system performance.

The omni-directional camera can be applied as the function of tracking and localization on the robot navigation. Its estimation of relative position between an object and a robot is improved by applying the Kalman filter to reduce the oscillation as robot starts to move. Moreover, the sensor fusion is applied to integrate both the wheel encoder and the image signals to improve the accuracy and stability of localization. The present integrated system, including the remote control, the image, and the motion control systems, is developed for the remote operator to transmit the command and receive the image through the internet. Finally, the mobile robot which is built by the NCS structure has been applied to an autonomous system successfully.

誌 謝

首先要感謝指導教授徐保羅 博士在兩年研究生生活中的耐心指導，當研究遇到問題與挫折時，能夠適時地找到正確出路，使我能順利的完成碩士學位，在此表達我最真誠的敬意與感謝。另外感謝口試委員王伯群 博士、洪哲文 博士、葉賜旭 博士對於本論文的指正，並給予寶貴的建議，使得本論文更加完善。

感謝實驗室的學長、同學與學弟們：博士班謝鎮洲學長、幸琮政學長、王安平學長、張昭琳學長、賴建良學長、黃煒生學長，平時給我的意見、指導與幫助，以及實驗室鄭景文學長、鄧元銘學長、劉興漢學長、林宗翰學長、莊孝麟學長、蔡雨坤學長、簡林億學長、黃宗勝學長、建龍、醇偉、任斌、子強、正忠、煒智、孟哲在學業上的相互切磋與指教，並且時常地分享生活趣事讓實驗室充滿歡笑和活力。特別對琮政學長、任斌學弟在研究與實驗上的大力幫忙，獻上誠摯地感謝。感謝所有夥伴這兩年在 Lab 816 給我的美好回憶。

最後要感謝我的所有關心我的父母、女友與家人，因為有你們在身旁的支持與關懷，使我能夠心無旁騖地完成學業，並且順利地克服我人生中的每一個重大考驗。

願 平安 健康 成就感

2008.07.28

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vii
圖目錄	viii

第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究背景與發展現況.....	2
1.3 問題陳述.....	4
1.4 研究方法與步驟.....	5
1.5 論文架構.....	6
第二章 平台運動模型與系統架構.....	8
2.1 平台運動模型.....	8
2.2 硬體架構.....	10
2.2.1 eZdsp TM F2812 DSK之功能介紹.....	11
2.2.2 SCI傳輸.....	13

2.2.3 DAC介面	14
2.2.4 Encoder介面	16
2.2.5 平台伺服馬達.....	18
2.3 全方位視覺系統.....	20
2.3.1 硬體架構	20
2.3.2 影像格式	22
2.4 程式控制架構.....	23
2.4.1 命令產生流程.....	23
2.4.2 平台控制迴路.....	24
2.4.3 馬達命令方式.....	25
第三章 網路式與集中式控制系統.....	28
3.1 單軸特性分析	28
3.2 平台控制器設計之實驗結果	29
3.2.1 平台控制器設計.....	29
3.2.2 實驗結果	31
3.3 網路式與集中式實驗結果.....	35
3.3.1 開迴路控制.....	35
3.3.2 閉迴路控制.....	38
3.4 小結	40

第四章 結合影像感測融合機制實現.....	41
4.1 影像處理.....	41
4.1.1 色彩辨識	43
4.1.2 目標物相對距離與角度.....	48
4.2 KALMAN FILTER於平台行駛時位置估測	50
4.2.1 Kalman Filter [22].....	50
4.2.2 Kalman Filter平台位置估測實驗結果	53
4.3 感測融合架構.....	57
4.4 結合影像融合機制實現.....	59
4.5 網路化遠端控制平台	66
第五章 結論與未來發展.....	71
5.1 結論	71
5.2 未來發展	72
參考文獻.....	73



表 目 錄

表 2-1 命令資料格式.....	14
表 2-2 RS-232 實驗中不同傳輸率所需時間 (單位: ms).....	27
表 3-1 平台位置控制器 K_p 、 K_i 、 K_d 參數調整.....	31
表 3-2 平台開迴路與閉迴路IAE比較($L=200\text{cm}$ ， $\phi=180^\circ$ ， $V=30\text{ cm/s}$).....	34
表 3-3 平台開迴路與閉迴路IAE比較($L=200\text{cm}$ ， $\phi=180^\circ$ ， $V=100\text{ cm/s}$).....	35
表 3-4 未加入位置控制器Encoder位置回授誤差 (單位:cm).....	36
表 3-5 加入位置控制器Encoder位置回授誤差 (單位:cm).....	38
表 4-1 網路化控制於不同感測方式之位置IAE比較Sampling time=50ms	60
表 4-2 集中式控制於不同感測方式之位置IAE比較Sampling time=50ms	60
表 4-3 集中式控制於不同感測方式之位置IAE比較Sampling time=2ms	60
表 4-4 網路化控制於不同感測方式之前後位置誤差比較Sampling time=50ms	64
表 4-5 集中式控制於不同感測方式之前後位置誤差比較Sampling time=50ms	65
表 4-6 集中式控制於不同感測方式之前後位置誤差比較Sampling time=2ms	65



圖 目 錄

圖 1-1 全方位攝影機所拍攝之影像.....	5
圖 2-1 全方位移動平台座標定義.....	8
圖 2-2 硬體系統架構示意圖.....	11
圖 2-3 實驗平台實體圖.....	11
圖 2-4 TI TMS320F2812 DSP功能方塊圖	13
圖 2-5 PC與DSP溝通架構.....	14
圖 2-6 DAC 7625 內部功能方塊圖	15
圖 2-7 四軸DAC介面電路	16
圖 2-8 QEP訊號示意圖	16
圖 2-9 四軸encoder介面電路.....	17
圖 2-10 平台所使用的全向輪[18].....	18
圖 2-11 SmartMotor伺服馬達	19
圖 2-12 全方位攝影機實體圖.....	21
圖 2-13 全方位影像系統成像原理.....	21
圖 2-14 影像擷取盒AME S960[20].....	22
圖 2-15 全方位影像.....	22
圖 2-16 YUY2 影像格式	23
圖 2-17 主程式流程.....	23
圖 2-18 命令產生流程.....	23
圖 2-19 梯形速度規劃.....	24
圖 2-20 平台位置控制迴路.....	25
圖 2-21 集中式控制硬體架構.....	26
圖 2-22 網路式控制硬體架構.....	26
圖 2-23 量測RS-232 傳輸所需時間圖.....	27
圖 3-1 集中式控制命令步階響應.....	28
圖 3-2 網路式控制命令步階響應.....	29
圖 3-3 直線加自旋路徑理想位置曲線.....	30
圖 3-4 直線加自旋理想速度曲線.....	30
圖 3-5 直線加自旋路徑之各軸理想旋轉方式.....	32
圖 3-6 平台位置P控制器之直線加自旋路徑追跡($V=30\text{ cm/s}$)	33
圖 3-7 平台位置PID控制器之直線加自旋路徑追跡($V=30\text{ cm/s}$)	33
圖 3-8 平台位置PID控制器之直線加自旋路徑追跡($V=100\text{ cm/s}$).....	34
圖 3-9 平台開迴路運動軌跡圖	36
圖 3-10 平台運動控制開迴路於低速運動之誤差($V=30\text{ cm/s}$)	37

圖 3-11 平台運動控制開迴路於高速運動之誤差($V=100\text{ cm/s}$).....	37
圖 3-12 平台閉迴路運動軌跡圖.....	38
圖 3-13 平台運動控制閉迴路於低速運動之誤差($V=30\text{ cm/s}$)	39
圖 3-14 平台運動控制閉迴路於高速運動之誤差 ($V=100\text{ cm/s}$)	40
圖 4-1 整體平台架構圖.....	41
圖 4-2 PC程式介面.....	42
圖 4-3 目標物定義.....	42
圖 4-4 影像處理流程.....	43
圖 4-5 YUV處理影像結果.....	44
圖 4-6 3×3 空間濾波器遮罩.....	45
圖 4-7 影像低通濾處理.....	45
圖 4-8 對比度增強的灰階轉換函式.....	46
圖 4-9 閾值為 40 的二值化圖形.....	47
圖 4-10 在二值化影像中貼標籤.....	47
圖 4-11 偵測到目標物的位置.....	48
圖 4-12 攝影機與目標物相對距離及角度.....	49
圖 4-13 由全像鏡估測之X-Y 距離對應至實際距離.....	50
圖 4-14 Kalman Filter流程圖.....	52
圖 4-15 透過影像所得到相對位置.....	55
圖 4-16 Kalman Filter對圖 4-15 的位置估測.....	56
圖 4-17 平台行使於高速時($V=100\text{ cm/s}$).....	57
圖 4-18 距離與角度信任權重比.....	59
圖 4-19 Type 1 直線路徑圖($\mu_{Encoder}=1$).....	61
圖 4-20 Type 2 直線路徑圖($\mu_{Image}=1$).....	63
圖 4-21 Type 3 直線路徑圖(影像距離 $\geq 50\text{cm}$ 啟動融合).....	64
圖 4-22 平台網路化遠端控制架構.....	66
圖 4-23 Ad Hoc無線區域網路架構.....	67
圖 4-24 全方位攝影機拍攝圖形.....	68
圖 4-25 圓柱投影示意圖.....	68
圖 4-26 全方位攝影機展開圖形.....	68
圖 4-27 Client端控制介面.....	69
圖 4-28 Server端控制介面.....	70

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

機器人導航(navigation)的研究領域是從 1950 年代開始，發展至今，機器人的移動形式向來是主要研究領域之一，因應各類環境的運用需求，發展了相對的移動自由度(degree of free, DOF)機器人，例如足型、輪型、軌跡型.....等不同類型的機器人。

在輪型機器人(亦稱移動平台)中，全向輪(omni-directional wheel)平台因為具有 3DOF，機動性最高，故現今很多研究機器人的平台均以此結構為基礎，然而全向輪因為有側向輪，使得與地面打滑(slip)現象所造成的相對誤差(relative error)將比傳統的差動式輪子更為顯著。

機器人架構是由多個感測器及運用感測融合機制來達到避障及定位的功能，因此必須由較多的周邊電路，因此若將這些週邊設備都以網路化的連接來實現，可以使得接線簡單，不容易除錯，也可減少干擾。整體系統的控制命令與回授訊號是藉由網路的傳輸來完成，稱此系統為網路控制系統(network control system, NCS)，由網路來控制系統帶來了許多好處，但也因為是使用網路來做為訊息傳輸的媒介，因此所需花費的時間依傳送速度的快慢及資料量來決定，網路傳送過程中，會產生資料封包的遺失，使得取樣周期越小網路系統呈現飽和問題[1]-[2]。

另外運動過程中，終究有累積誤差(accumulated error)問題，這使得平台無法長時間使用，所以在機器人導航領域中，也有絕對位置(absolute position)定位之研究。近年來，由於全方位攝影機(omni-directional camera)的興起，利用雙曲面鏡(hyperbolic mirror)及反射(reflect)，攝影機能看到周圍 360 度的環境資訊，其中以標地物(landmark)方式定位的研究已有幾十年歷史，不過

由影像作標地物或障礙物的識別等，但影像的識別上容易受到周圍環境亮度的影響，且經過雙曲面鏡所得到的影像容易扭曲失真，會因此而影響到定位的精密度。

本論文需建立全方位平台所需之運動模型(kinematics model)，使平台能達到任意方向、路徑移動，並發展所需的控制方法，探討平台於網路式控制與集中式控制的差異，並且研究如何將全方位影像上所得到的資訊定位之精確性提升的機制與修正法則，加強其運動精確性，降低平台相對定位的誤差，使平台可以精確且快速到達目標物的相對位置，長時間的使用下，均可維持一定的準確性。

1.2 研究背景與發展現況

近年來，移動平台不只是個熱門的研究題目，而且已廣泛被應用，在工業界，舉凡工廠廠房、倉庫、建築工地，更被推廣應用在生活的居家環境中。這些平台不僅協助人們搬運重物、完成困難繁瑣的工作還可以做巡邏或清掃房子等工作。隨著技術的發展，使得平台能擁有更多更強的功能，工作於不同的環境。

全向平台被提出[3]，它採用全方向性輪子，這種輪子同時擁有橫向及縱向相互垂直的輪子，可以透過輪子間合力分力的關係，決定任何移動方向，比起差動輪移動平台，全向輪移動平台有更好的移動性，其優點為：(1)改變平台方向時，輪軸不需移動。(2)可在原地旋轉平台，不需旋轉半徑。(3)可同時自旋與曲線運動。此類的移動平台，已被廣泛的討論[4]-[6]。

目前常見的全向性移動平台，大多以三軸到五軸的平台為主，在不同的考量下，這三類平台各有本身的優缺點[7]，三軸在以 60 度為倍數的移動角度上，可以達到較好的移動效率，四軸則是在 90 度為倍數的角度上，能獲得遠大於其他兩者的效果，至於五軸的效能，則是在各種角度效能都相當平

均，此外，在負重能力上，軸數越多負重能力就相對的越好，本論文中是採用四軸全向平台，對於直線路徑，移動速率與節省消耗功率都有所幫助。

在機器人自動導航研究領域中，大致可分為四類：地圖建制(map building)、路徑規劃(path planning)、自我定位(self-localization)以及防障碰撞(obstacle avoidance)。其中自我定位又可分成未知環境或已知環境之下的定位問題，本論文所探討的是在已知環境之下如何定位。

自主式移動平台，必須透過感測器(sensor)告知外界資訊，才能有效定位，一般輪式機器人測量距離均使用馬達回授(encoder)，但encoder容易因為各種因素造成輪子與地面接觸不完全或打滑而產生累積誤差，因此通常會把平台的動態特性或打滑現象忽略，在系統上設計平台控制器，Tsai et al. [8]的系統使用三軸全向輪平台，encoder回授，各軸使用比例積分控制器(PI controller)將動態系統包含在內，驗證了全向平台在直線與曲線行走上的可行性，其行走速度為 3 cm/s。Huang et al. [9]是使用四軸全向輪平台，encoder回授，同樣使用PI控制器，但速度上快許多(85cm/s)，同樣在直線與圓形行走上有不錯的效果，兩者之直線行走(100cm)或圓形行走(半徑 2cm[8]與 20cm[9])位置誤差皆在 5cm內。

而在感測器方面，目前用來做影像定位最常見的為全方位攝影機，運用雙曲面鏡反射[10]-[11]感測周圍 360 度環境資訊。Betke and Gurvits [12]使用camera照射reflecting ball裝於平台正中央，使平台偵測四周環境所設定的兩點標地物，運用三角近似法(triangulation approach)進行平台定位，並估測平台位置。Chen et al. [13]為實現於足球機器人運用影像回授物體追蹤與避障。Saedan et al.[14]為運用影像擷取環境的特徵，進行絕對定位與相對定位。Sun et al. [15]為運用圓柱投影(cylindrical projection)的方式將全方位影像展開，增加精密度及追蹤的強健度，實現於中型足球機器人。Winters et al. [16]為將平台至於走廊上，偵測地面與牆壁夾邊進行機器人導航。Kobayashi et al. [17]為運用影像偵測一目標物，並加入類神經網路感測融合(neural network based sensor fusion)作平台定位。

1.3 問題陳述

1、全方位移動平台各軸控制誤差問題

全方位移動平台是藉由四軸相互作用產生合力分力來形成運動路徑，但各軸為獨立的驅動，因此四軸的特性會有些許的差異，因此容易造成四軸運動不匹配。驅動馬達的形式可以分為兩種控制命令，一為電壓命令，另一為 RS-232 傳輸命令，電壓命令會產生 bias 的存在；隨著網路化的普及，網路化可以減少整體平台的接線，因此馬達可以藉由 RS-232 將平台上四軸串接，形成一個網路的系統，但網路式的傳輸受限於傳輸速率的影響，因此需花費較多的傳輸時間，由於各軸的運動是多樣的，因此如何設計一個適合平台的控制器也是一研究課題。綜合上述的幾種情形，本論文第一部分將平台運動控制主要研究重點在於：

- (1)平台控制器的如何設計。
- (2)平台網路化後與集中式控制的差異比較。

2、由 encoder 所產生的累積誤差改善

平台在移動的過程中，encoder 會因為輪子的打滑而導致累積誤差的產生，因此若單純由 encoder 做位置回授控制，則容易導致實際上的誤差，因此必須藉由外加的感測器來改善整體的實際誤差。加入全方位攝影機來做為平台另一個感測器，全方位影像可以觀察到平台周圍 360 度的影像資訊如圖 1-1 所示，但由於影像為雙曲面鏡反射所得，因此容易扭曲失真，且會因為距離的不同而有不同的精密度。在平台的移動過程中，會因為平台震盪的問題，而導致影像所偵測到的目標物位置震盪。由以上的描述，本論文第一部分將探討的研究在於：

- (1)當影像所得到的位置震盪時，如何將雜訊克服。
- (2)如何運用 encoder 與影像所得到的位置來提升平台運動精密度。

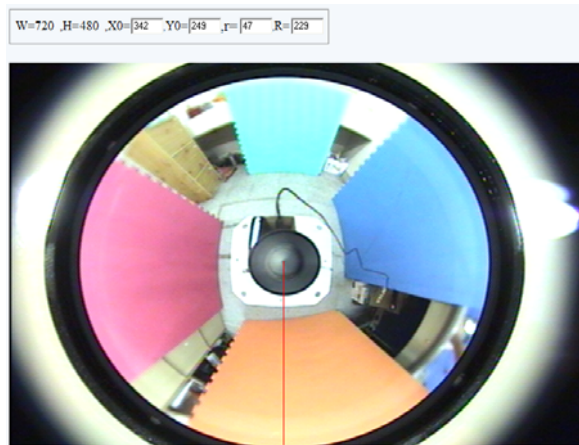


圖 1-1 全方位攝影機所拍攝之影像

3、控制與感測整合於目標物追蹤

在機器人的研究中，平台移動的穩定度是相當重要的，讓平台朝著目標物前進，並且隨著目標物的移動，希望平台可以穩定且快速到達所指定的位置，為本研究實現所發展之控制與感測主要目標。

1.4 研究方法與步驟

1、全方位移動平台各軸控制誤差問題

- (1)首先需建立硬體電路，將數位訊號處理器(digital signal processor，DSP)與驅動器(driver)、encoder 連接，完成基本的閉迴路(closed-loop)控制系統。藉由 encoder 回授訊號，推算出各軸之間的轉速與位移量，並導出馬達轉速與驅動器控制訊號間的關係式，做為閉迴路控制時之參考依據。
- (2)為了使平台不會因為步階命令而使得啟動時產生輪子易打滑的情形，平

台將以梯形速度規劃的形式減速，以預防打滑情形發生。

- (3)由於各軸由電壓命令控制會導致各軸所產生些許電壓 bias，容易影響各軸的匹配性，因此藉由 RS-232 來將命令傳送給驅動器，使得各軸不受到外在因素的影響，不過由於傳輸四軸命令須花費較多的傳輸時間，整體平台若於鮑率 19200bps 的傳輸速率下，約需花費 40ms 的時間，因此將集中式控制與網路式控制實作於不同取樣時間下，對於平台實際位置的差異性。

2、由 Encoder 所產生的累積誤差改善

感測器方面，使用影像來偵測目標物的位置，以目標物為一定點，求出目標物於影像上位置的距離對應至實際距離的曲線，因此平台在行走的過程中會有 encoder 與影像的值利用 fuzzy 融合的機制，使得平台不會有瞬間晃動的情形，而增加整體平台的運動精密度，改善 encoder 回授的誤差。

3、目標物追蹤與遠端控制平台

為了驗證本研究成果於實際目標物的追蹤，讓平台可以追蹤目標物的位置，將目標物任意移動，平台可以平穩且快速的追蹤到目標物的位置，進而驗證平台有好的運動追蹤能力。並且結合無線網路，讓平台可以遠端控制，整合平台網路化控制。

1.5 論文架構

本論文共分五章，第一章旨在簡述研究動機、目的、背景與發展，並陳述所要研究的問題、方法、步驟。第二章介紹全方位移動平台的定義與運動模型推導，並說明整體系統架構，包含使用的硬體元件規格、連接方式，以及應用於此平台之程式架構。第三章描述整體平台位置控制器的設計，探討平台控制

於集中式控制與網路式控制在不同取樣時間下的運動精密度，藉此找到平台的最佳取樣時間。第四章為結合影像與 encoder 兩種感測器進行感測融合的機制，藉此改善平台的運動精密度，以及如何運用 Kalman Filter 來作其影像位置的估測。第五章中對本論文做一個結論，並提出未來可以再發展之方向。



第二章 平台運動模型與系統架構

本章將分析全方位移動平台的運動模型，定義平台其座標系統與符號，並推導其運動模型。在得到平台運動模型後，進一步發展平台所需之控制法則，使平台達到任意平面方向、角度移動。另外，本章也就實驗平台實驗硬體系統與軟體控制方式作通盤性的介紹。

2.1 平台運動模型

全方位移動平台運動模型如圖 2-1 所示，其平台為四顆全向輪所組成，每軸為對稱形式擺放呈現 90° 的夾角。

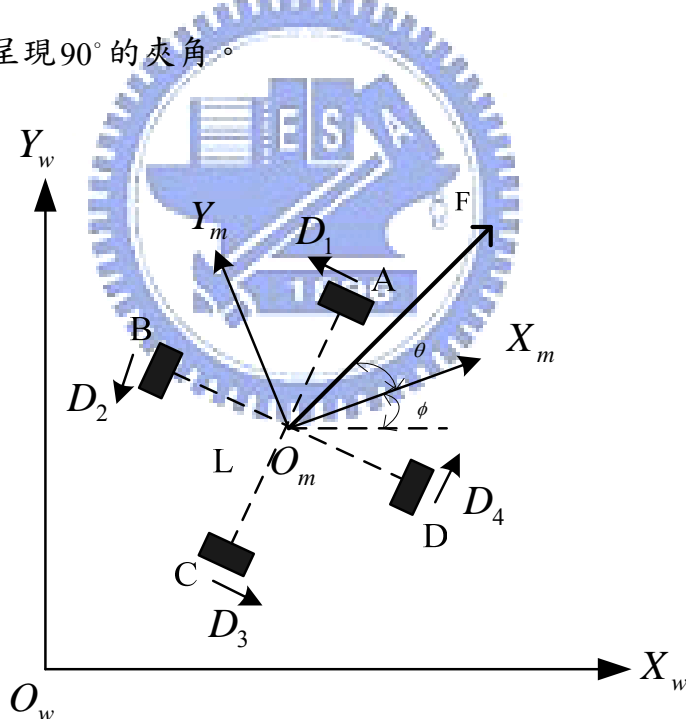


圖 2-1 全方位移動平台座標定義

1、全向位移動平台座標系統與符號定義

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

X_m 、 Y_m 、 O_m ：平台座標(mobile coordinate) X、Y 與原點

A、B、C、D：平台四個全向輪位置

F：平台移動方向

θ ：平台移動方向與平台 X 軸之夾角

ϕ ：平台 X 軸與世界座標 X 軸之夾角，逆時針為正

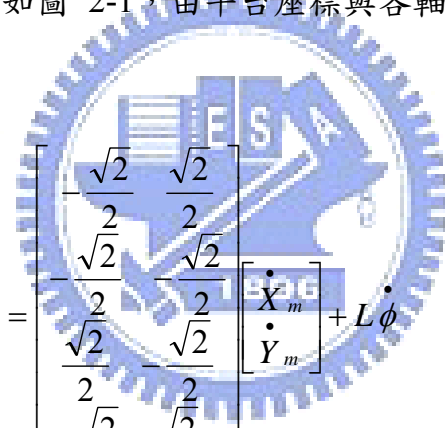
L：平台之半徑 25cm

r：全向輪之半徑 5.08cm

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 ：分別為全向輪 A、B、C、D 的旋轉角速度

2、全方位移動平台運動模型

平台運動模型定義如圖 2-1，由平台座標與各軸之間的關係可以表示成(2-1)式：



$$\begin{bmatrix} r\omega_1 \\ r\omega_2 \\ r\omega_3 \\ r\omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{Y}_m \end{bmatrix} + L\dot{\phi} \quad (2-1)$$

而坐標之間關係則透過座標矩陣(coordinate transformation matrix)來得到世界座標與絕對座標的轉換關係表示為(2-2)式：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{Y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

由(2-1)、(2-2)式可整合成(2-3)式：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\omega_1 \\ r\omega_2 \\ r\omega_3 \\ r\omega_4 \end{bmatrix} = De(\phi) \begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

其中 $De(\phi)$ 稱為解耦合(Kinematics Decoupled)矩陣為(2-4)式：

$$De(\phi) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(-\sin\phi - \cos\phi) & \frac{1}{\sqrt{2}}(-\sin\phi + \cos\phi) & L \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\phi - \cos\phi) & \frac{1}{\sqrt{2}}(-\sin\phi - \cos\phi) & L \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\phi + \cos\phi) & \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\phi - \cos\phi) & L \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(-\sin\phi + \cos\phi) & \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\phi + \cos\phi) & L \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

從各軸反推世界座標可寫成(2-5)式：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = De^{-1}(\phi) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中 $De^{-1}(\phi)$ 稱為逆運動(inverse kinematics)矩陣為(2-6)式：

$$De^{-1}(\phi) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{4}(-\sin\phi - \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(\sin\phi - \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(\sin\phi + \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(-\sin\phi + \cos\phi) \\ \frac{\sqrt{2}}{4}(-\sin\phi + \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(-\sin\phi - \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(\sin\phi - \cos\phi) & \frac{\sqrt{2}}{4}(\sin\phi + \cos\phi) \\ \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

2.2 硬體架構

圖 2-2 即為平台硬體系統架構示意圖，圖 2-3為實驗平台實體圖，於實驗平台上裝設全方位攝影機(omni-directional camera)作為感測器，透過RS-232 將所得到的平台整體資料與DSP溝通，而於馬達控制方面可以分別由RS-232 命令與電壓訊號命令來控制馬達的轉速，使得整體平台可以由影像資訊與馬達回授達到感測融合機制。詳細的軟硬體內容於後面章節介紹。

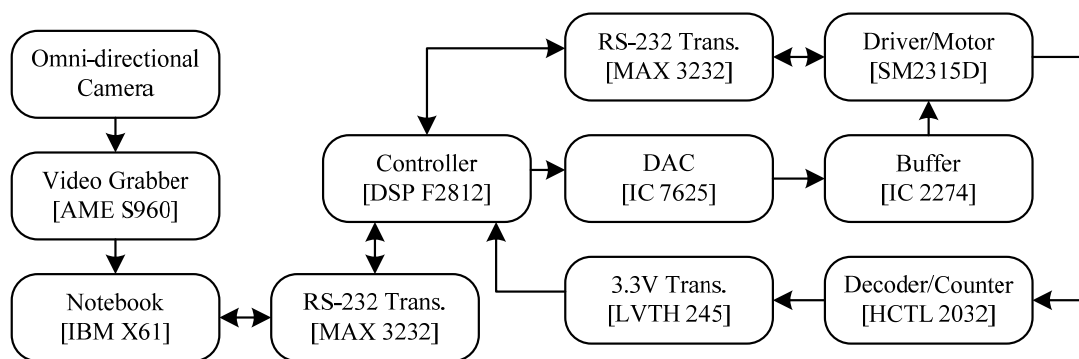


圖 2-2 硬體系統架構示意圖

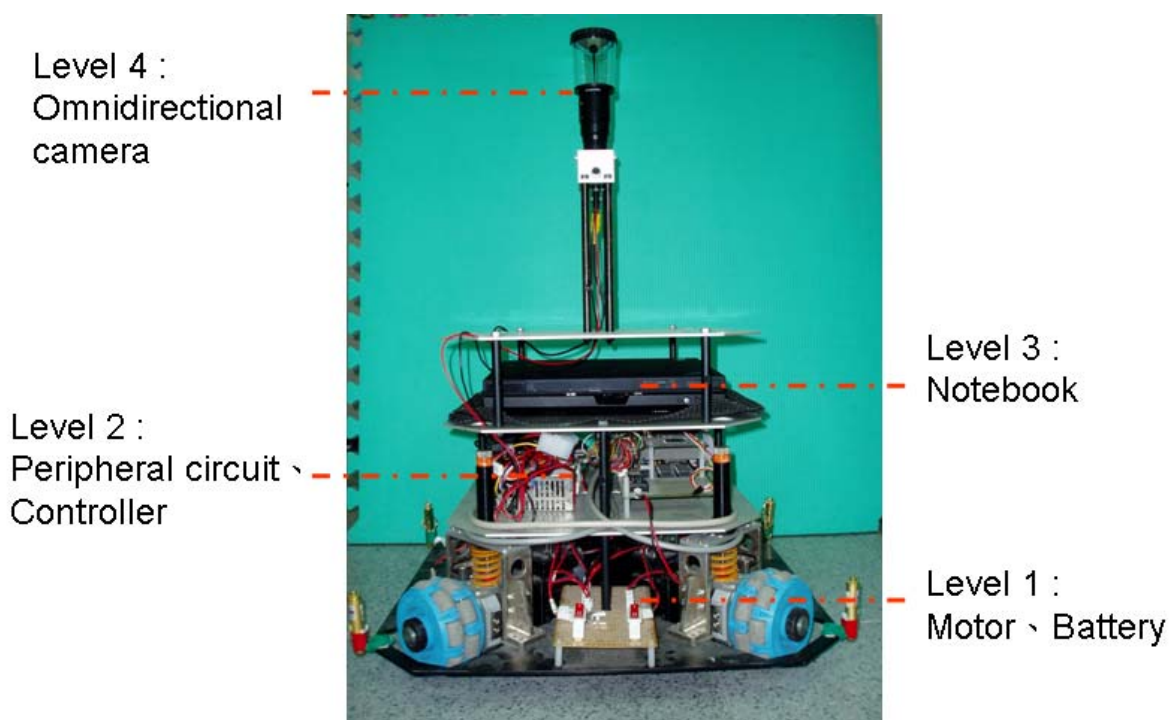


圖 2-3 實驗平台實體圖

2.2.1 eZdsp™ F2812 DSK 之功能介紹

近年來由於超大型積體電路(VLSI)技術的不斷演進，使得 DSP 數位訊號為控器的運算速度及周邊處理功能大幅的改善，在行動通訊、資訊家電與馬達驅動等領域都廣泛的使用。因此本論文採用由德州儀器(Texas Instrument, TI)公司研發的 TMS320 F2812 DSP(簡稱 F2812)作為控制核心。

應用 DSP 於運動控制系統，主要就是希望充分利用 DSP 強大的數學運算能力，而以最少的硬體周邊元件來實現馬達控制所需的功能。德州儀器公司所生產的 DSP 中，'C2000 系列的硬體發展平台是專為控制應用最佳化而設計的，其中本論文所使用的 F2812 晶片是此系列中目前最高等級的控制器，其特點在於擁有 150 MHz(6.67 ns cycle time)的快速處理能力，比 TI 早期出產的 DSP 'C240 快 7 倍，比傳統 8051 單晶片快約 150 倍。在核心部分，算數邏輯單元(ALU)、累積器(ACC)均採用 32 位元定點運算，為了提升數位訊號運算效能，以硬體方式實現乘法器、乘積位移器，可在一個指令週期(instruction cycle)內完成乘加運算。在整數計算方面，為減少數值計算所衍生如溢位(overflow)等問題，也採用硬體式的輸出倍率位移器來提高軟體執行的精確度。

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

Spectrum Digital公司則利用F2812 晶片結合自行開發之周邊模組，發展出 eZdsp™ F2812 初學板(DSP Started Kit, DSK)，其週邊主要有 16 個通道的 12 位元類比數位轉換器(ADC)，串列傳輸支援了四種常用的型式：SPI (Serial Peripheral Interface)、SCIs (Two Serial Communications Interface)、eCAN (Enhanced Controller Area Network)、McBSP (Multi-channel Buffered Serial Port)，最高可支援 56 個GPIO(General-Purpose I/O)。如圖 2-4為TI TMS320F2812 DSP 功能方塊圖。

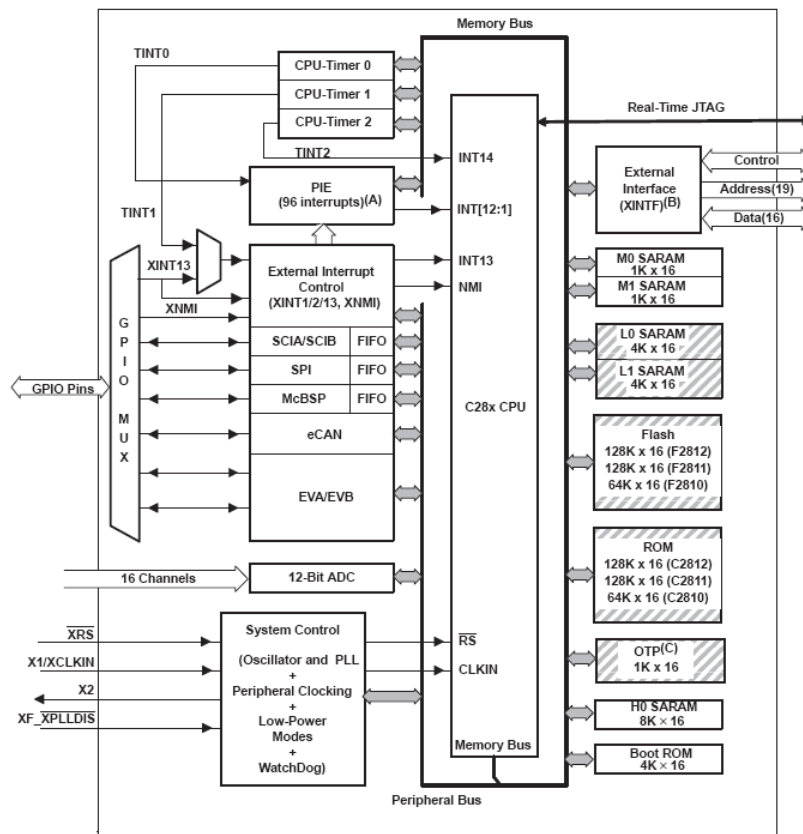


圖 2-4 TI TMS320F2812 DSP 功能方塊圖

2.2.2 SCI 傳輸

SCI 的串列傳輸介面就是所謂的 RS-232，在串列傳輸的代表下 RS-232 可謂是標準的代表，由美國的 EIA 協會於西元 1969 年所制定的序列介面規格，所有的串列傳輸裝置只要符合這個規格，都可以經由 RS-232 來達到資料交流的目的。RS-232 優點在於，基本架構簡單，價格便宜，配備此介面之裝置相當多，且有豐富之應用軟體資源。

SCI的接線方式是用Rx、Tx兩條線的訊號佈線，每一筆訊號藉由這兩端來達到傳送與接收的程序，本研究所使用eZdsp™ F2812 DSK於週邊設計中包含SCI作為傳輸資訊，在此若DSP要與電腦或是馬達溝通需透過一個MAXIM所出產 3.3V transceiver MAX 3232 來將電壓轉成DSP可接收的電壓範圍，如圖 2-5為PC與電腦溝通的架構圖。

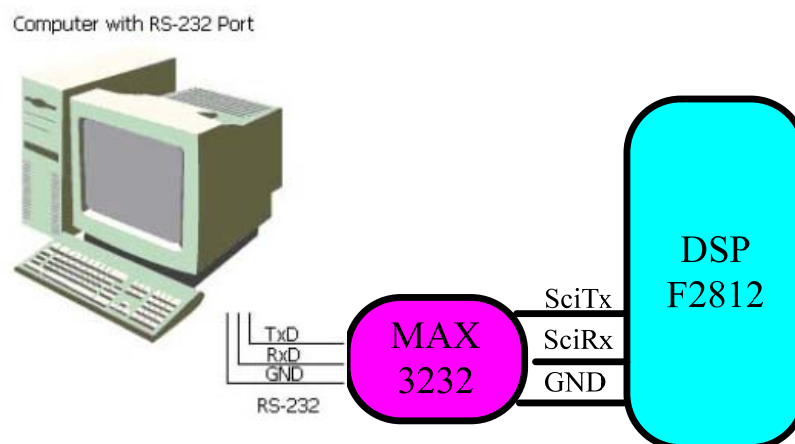


圖 2-5 PC 與 DSP 溝通架構

表 2-1由PC與DSP溝通的資料格式，平台的控制命令包含X、Y、 ϕ 三個運動方向，每個命令都用一個識別的字元來判斷，將命令的資料切割為兩個Byte的資料，分為高位元與低位元，所以整體平台所下達的命令為 9 個Byte的資料量，以鮑率(baud rate)為 115200 bps的速率傳輸。

表 2-1 命令資料格式

Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8	Byte9
X	H	L	Y	H	L	F	H	L

*X、Y、F 為平台命令 ID；H、L 為命令資料的高位元與低位元

2.2.3 DAC 介面

由於控制馬達輸入驅動器的速度指令為 0V~5V的類比電壓值，而 eZdsp™ F2812 DSK的輸出僅有數位信號，因此需要用DAC進行轉換。在此使用Burr-Brown公司出產專用於馬達控制用途之DAC 7625，將數位信號轉換為類比信號，圖 2-6 為內部功能方塊圖。其主要特色如下：

- ◆ 可選擇單極性(unipolar)與雙極性(bipolar)運作模式。

- ◆ 穩定時間約為 10 us。
- ◆ 12 位元的解析度。
- ◆ 數位資料並列輸入。
- ◆ 支援 4 通道(channel)且同步輸出。

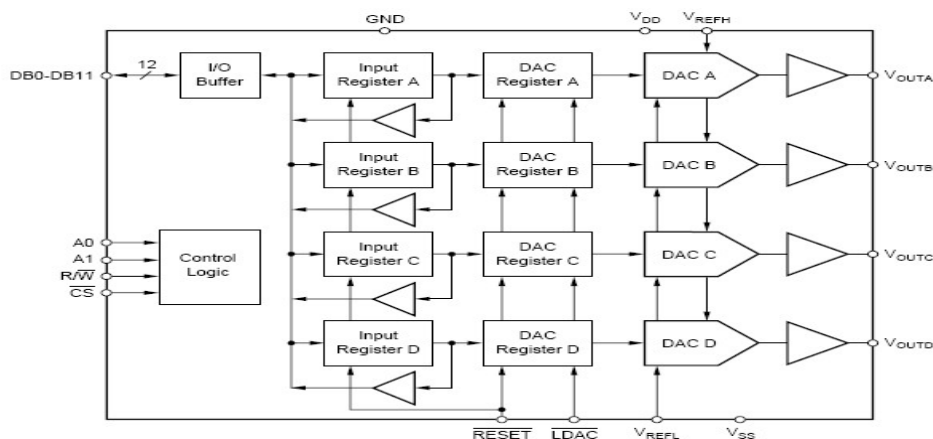


圖 2-6 DAC 7625 內部功能方塊圖

利用選擇通道接腳 A1、A0，依序將數位值由 DB11~DB0 寫入，四軸的數位值會存放於各自的暫存器中，當 LDAC 控制接腳變為低電位時，才一次同時轉換為類比訊號輸出，轉換公式如(2-7)式：

$$V_{out} = V_{REFL} + \frac{(V_{REFH} - V_{REFL}) \times D_{value}}{4096} \quad (2-7)$$

其中 V_{REFH} 與 V_{REFL} 各代表參考電壓的上下限值，設為 +2.5V 與 0V， D_{value} 則是輸入的數位值， V_{out} 為輸出電壓值。由於驅動器操作在 0V~5V 之間，而 DAC 7625 的 V_{REFH} 僅能達到 +2.5V (亦為輸出電壓上限)，為此， V_{out} 必須增加兩倍放大電路之後，才能匹配驅動器之需求。四軸 DAC 介面電路連接如圖 2-7 所示。

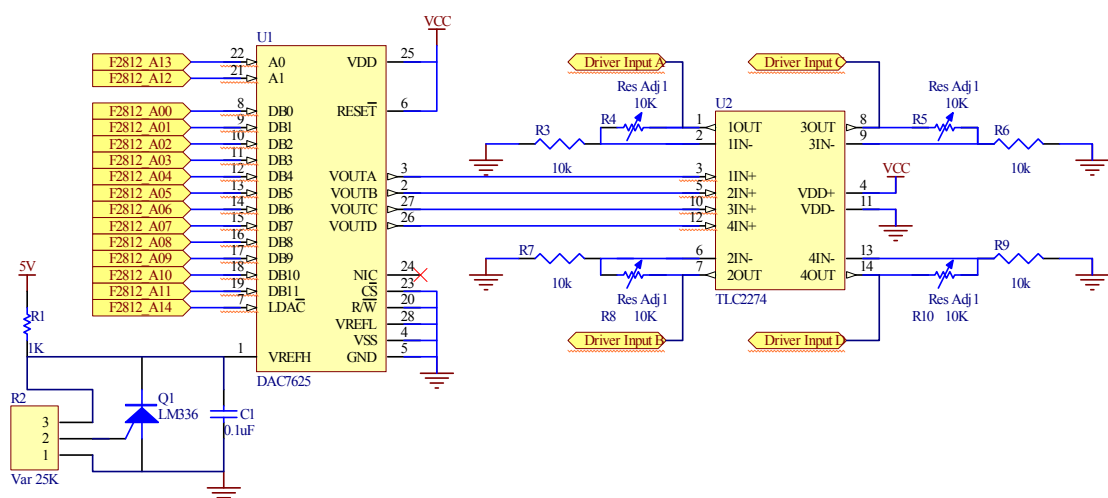


圖 2-7 四軸DAC介面電路

2.2.4 Encoder 介面

1、Encoder 原理與介面電路

Encoder回授由馬達內部輸出QEP訊號，A、B相位(phase)會剛好相差 90 度，如圖 2-8所示，因此產生了四種邏輯訊號組合(00、01、11、10)，除了可提升四倍的解析度之外，也可藉由四種邏輯訊號出現的先後順序得知輪軸轉動方向(direction)。

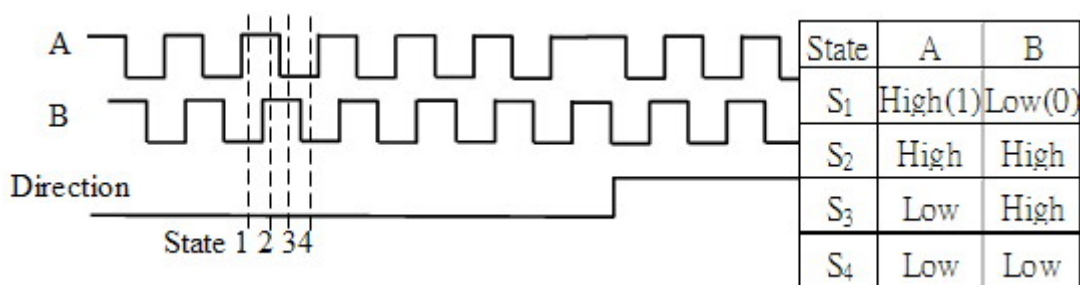


圖 2-8 QEP 訊號示意圖

Encoder 會由 QEP 計數的 HCTL 2032(簡稱 2032)將馬達所轉動的 pulse 個數

算出，由馬達一轉的 pulse 數(E_{pulse})與 2032 所計算到的計數值(K)，可推算出輪軸轉動角度 ω_{angle} (rad.)，關係式為(2-8)式：

$$\omega_{angle} = \frac{2\pi K}{E_{pulse}} \quad (2-8)$$

HCTL 2032 主要特色如下：

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

本論文平台為四軸運動控制，故需要兩組 2032 作為輪軸轉動之計數器。又因輸出為 5V 訊號，必須轉換成 F2812 可接受之 3.3V，故銜接位準轉換器(transceiver) LVTH245，圖 2-9 為四軸 encoder 介面電路。

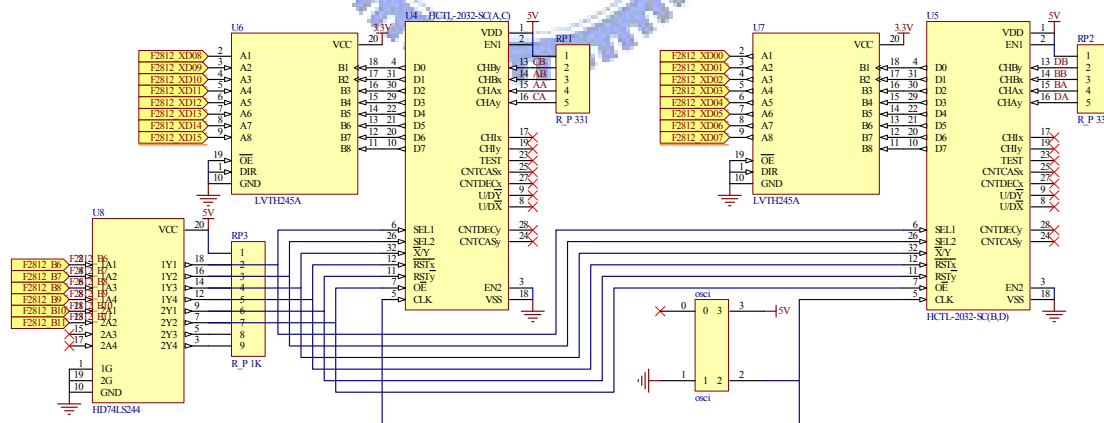


圖 2-9 四軸 encoder 介面電路

2、Encoder 應用方式

SmartMotor所傳回來的encoder解析度為 500 pulse/cycle，由 2032 將解析度

提升為 2000 pulse/cycle，所使用的全向輪則如圖 2-10，輪半徑(r)為 5.08 cm，圓周長為 31.92 cm，而馬達推動輪子中間有經過一個 9：1 的減速機構，所以馬達轉動 9 圈對應全向輪轉動 1 圈，由此可以得到輪子轉動時cm與pulse之間的關係約為 1：563.934，藉此對照關係，方便以常用單位cm來下達路徑控制命令。回授encoder訊號以位置迴路取樣週期為 2ms，利用各軸 2032 所累積計數值作為平台位置之參考。

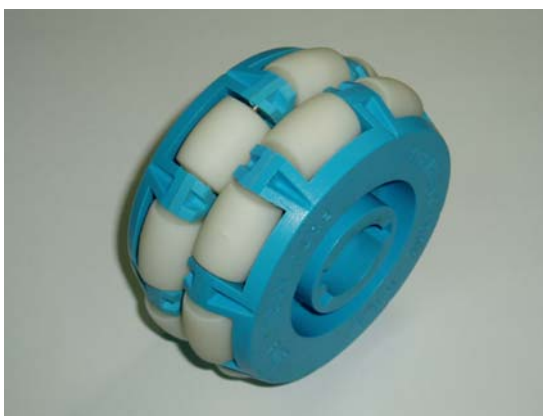


圖 2-10 平台所使用的全向輪[18]

2.2.5 平台伺服馬達

在全方位移動平台上，裝有四顆由敏石(MONTROL)公司[19]所製造的DC直流伺服馬達OEM系列的SM2315D，其外觀如圖 2-11所示，硬體規格如下：

- ◆ 額定輸出：130W。
- ◆ 電壓常數：4.45 V/krpm。
- ◆ 編碼器：增量式，pulse 數 2000 pulse/cycle。
- ◆ 馬達結構：伺服控制、驅動器、編碼器與馬達。



圖 2-11 SmartMotor 伺服馬達

SmartMotor 伺服馬達是透過過積體電路(IC)技術，將傳統伺服控制系統所需的運動控制器、驅動器、伺服馬達、I/O 模組整合而成的單一裝置。馬達可以透過電壓傳送速度命令或藉由 RS-232 傳送速度命令給馬達，並接收馬達目前的位置由外部 QEP 或 RS-232 傳送。若要使用 RS-232 同時控制多軸馬達，可將每顆馬達以串接的形式連接，如圖 2-5 所示，先將每個馬達設定一個位址，決定馬達優先順序，預先在馬達內部下達定址命令：

◎Pre-Addressing

SADDRn	※設定每顆馬達位址
ECHO	※每顆馬達開啟回應
END	

各種模式下的的命令方式，以下為速度模式的命令：

◎Command

0MV	→ 0x80, 'M', 'V', ','
// all motion with velocity loop control	
nV=DATA	→ 0x81, 'V', '=', 'DATA', ','
//n th -motion velocity command with DATA	
0G	
//all motion are synchronize	

0RP → Response Position → DATA , 0x0D

//motor feedback command

命令先儲存至各軸的暫存器暫存，等待接收同動命令讓多軸一起動作，以減少各軸因起始時間不一樣而造成各軸動作不一致。

2.3 全方位視覺系統

此節中將介紹應用於平台上的全向式視覺感測系統，其目的在於判斷目標物位置的相對距離與角度。而整體全方位影像的截取由全方位攝影機將 NTSC 訊號傳送給影像擷取卡，以 USB (universal serial bus) 串列傳輸傳送給 Notebook，經過影像處理程序後，將命令以 RS-232 傳送給 DSP 與 Encoder 資訊作感測融合機制。



2.3.1 硬體架構

1、全方位攝影機

全方位攝影機(omni-directional camera)實體圖如圖 2-12所示，其利用雙曲面鏡的特性，如圖 2-13，藉由光學反射原理，使得攝影機可以擷取平台四周圍的環境，水平可視範圍為 360 度，垂直所能看到的範圍為上方 15 度，下方 60 度之間。



圖 2-12 全方位攝影機實體圖

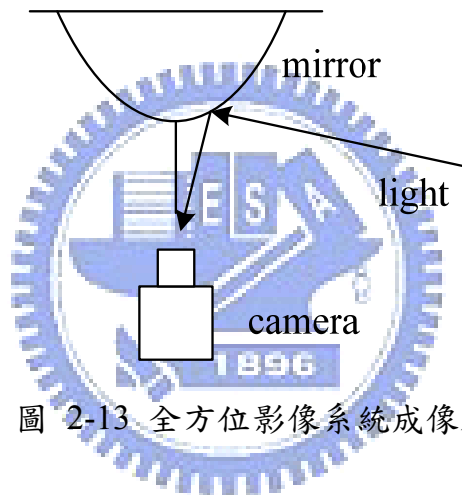


圖 2-13 全方位影像系統成像原理

2、影像擷取盒

全方位攝影機的輸出訊號為類比的NTSC訊號，在所使用的筆記型電腦上無法接收此訊號，因此必須藉由影像擷取盒將訊號轉為電腦所能接收的訊號，如圖 2-14所示為AME S960，由影像擷取盒所得到的訊號運用USB串列傳輸傳給電腦，規格如下：

- ◆ PC 介面：USB 2.0。
- ◆ 影音標準：NTSC、PAL、SECAM。
- ◆ 軟體介面：Windows WDM driver，TWAIN interface。
- ◆ 檔案格式：BMP、AVI、PCX、TIF、JPG、TAG。

◆ 資料格式：YUV4-2-2，YUV4-2-0、RGB。



圖 2-14 影像擷取盒AME S960[20]

2.3.2 影像格式

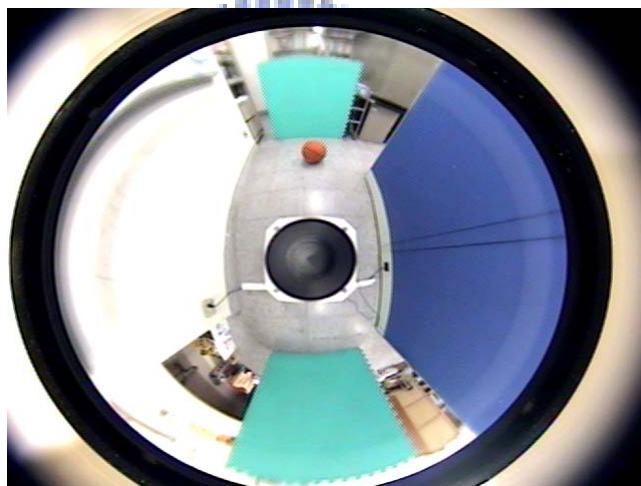


圖 2-15 全方位影像

由以上的影像系統的介紹，由全方位攝影機所看到的圖像如圖 2-15所示，大小為 320x240 的彩色影像。影像擷取卡所選擇的影像格式為YUY2 為YUV格式的其中一種，Y所代表為明亮度(Luminance)，U和V則分別為色度及濃度(Chrominance、Chroma)，YUY2 又稱之為YUYV、YUV422 的格式。如圖 2-16所示，YUV以 4：2：2 的比例作取樣，保留Y分量，而U、V分量每 4 個像素取兩次，所以其資料量只有RGB24 的三分之二，以減少傳輸的頻寬。

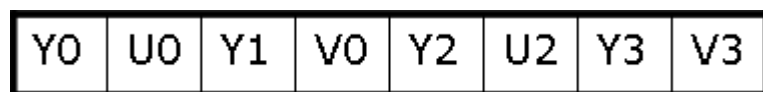


圖 2-16 YUY2 影像格式

2.4 程式控制架構

在控制平台主程式方面分成兩個區段：命令的產生、平台控制迴路及馬達命令方式，如圖 2-17所示，而每一個區段內又可分成幾個區塊，將依序介紹各個區塊的程式片段。

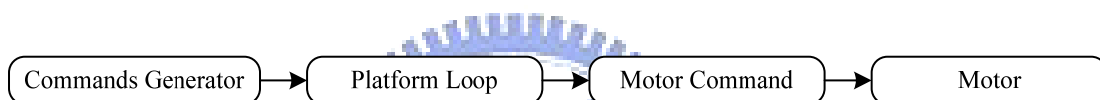


圖 2-17 主程式流程

2.4.1 命令產生流程

在命令產生的區段，如圖 2-18所示，分成參數的設定(parameter)、速度的規劃(velocity schedule)、產生位置命令(position generator)。

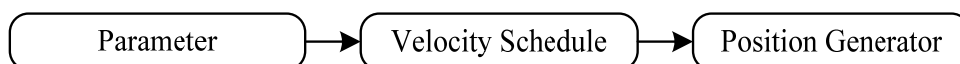


圖 2-18 命令產生流程

由於全方位移動平台可以任意方向直線及自旋，所以必須決定平台的起點與終點於直角座標上的座標位置及行進時所需旋轉的角度；而在速度規劃方面則要決定平台的速度與加速度，若加速度為零時，則平台命令為步階；

加速不為零時，則平台會依所給予的加速度及速度作梯形速度規劃。

平台行駛於速度規劃的用意為使平台運動軌跡更為平滑(smooth)，除了可以減少對於機構的傷害之外，也可減少因運動慣性所產生的輪子打滑現象。

梯形速度規劃示意圖如圖 2-19所示，梯形速度規劃已知的條件為：最大速度(V_{\max})、最大角速度($\dot{\phi}_{\max}$)、加速度(A)、距離(d)與角位移(ϕ)，由以上條件可以得到以下方程式：

$$T_a = \frac{V_{\max}}{A} \quad or \quad T_a = \frac{\dot{\phi}_{\max}}{A} \quad (2-9)$$

$$\text{加速及減速時所走的距離 } d_a = T_a \times V_{\max} \quad (2-10)$$

$$\text{行駛於最大速度時所需時間 } T_2 = (d - d_a) / A \quad (2-11)$$

$$T = T_2 + 2 \times T_a \quad (2-12)$$

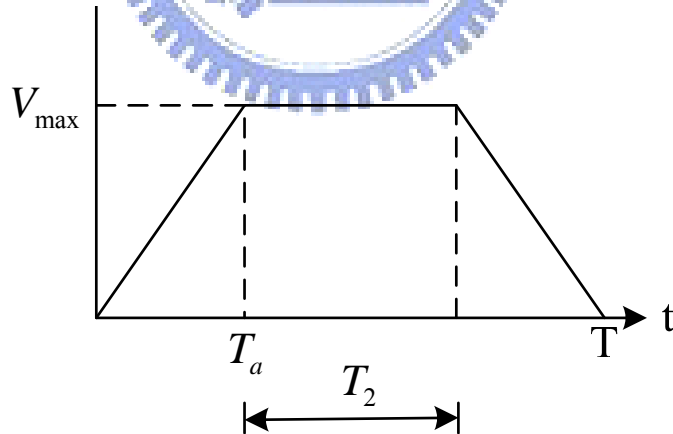


圖 2-19 梯形速度規劃

2.4.2 平台控制迴路

平台控制迴路主要分成平台控制器(platform controller)、平台運動模型的

解耦合(decoupled)與逆轉換(inverse)、感測融合四部份，如圖 2-20所示。平台控制器定義於其輸入與輸出 X 、 Y 、 ϕ 有關，由此來組成平台的位置迴路控制。運動模型為2.1節所建立之矩陣運算。感測融合將於第四張介紹。

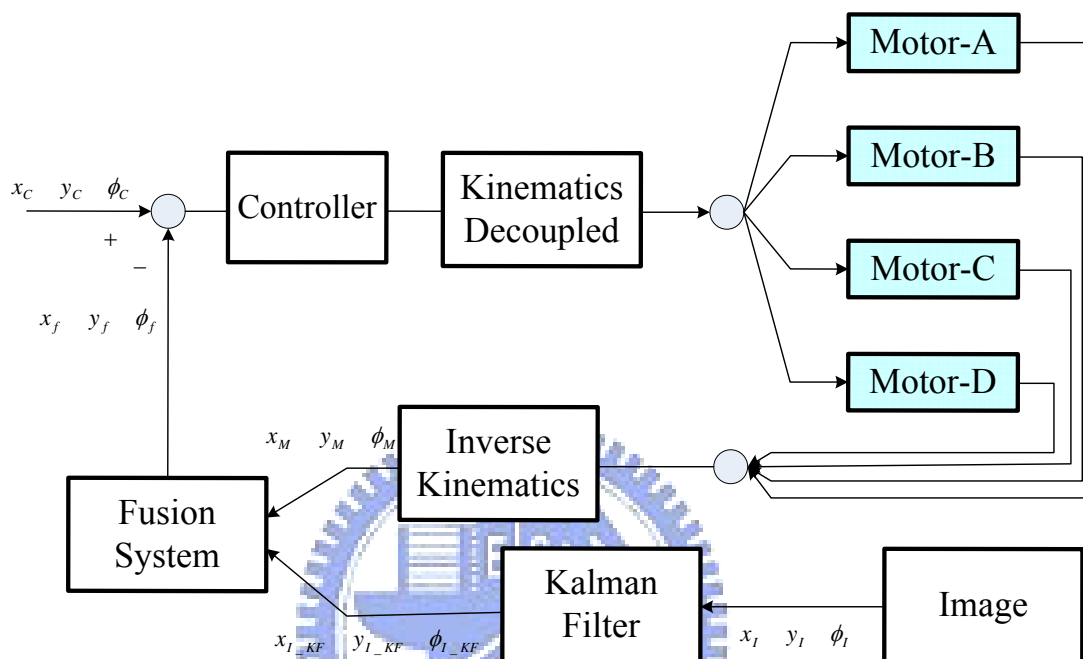


圖 2-20 平台位置控制迴路

2.4.3 馬達命令方式

馬達的控制方式分為電壓命令與 RS-232 命令，分別稱之為集中式控制與網路式控制，皆採用 DSP F2812 為控制的核心，以下將分別介紹兩種控制方式的結構：

1、集中式控制

圖 2-21為集中式的控制架構，平台命令以電壓 0V~5V作為控制馬達正反轉命令，以 2.5V作為基準；在回授馬達的pulse數則是由馬達輸出A、B相的訊號，由外部QEP將訊號計數，以並列訊號方式傳回給DSP做運算。

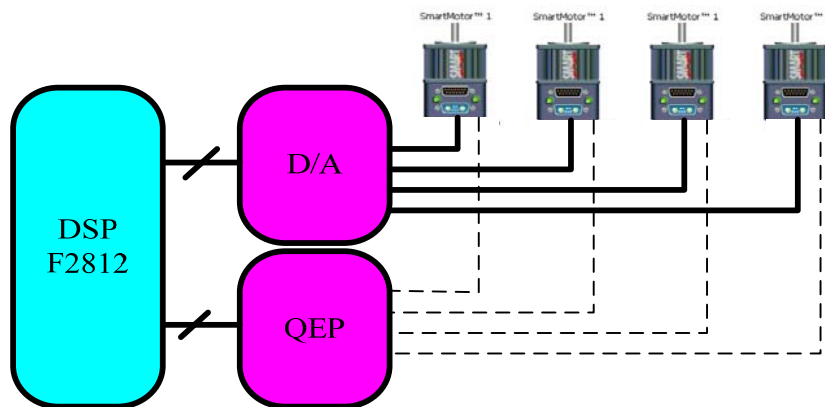


圖 2-21 集中式控制硬體架構

2、網路式控制

圖 2-22 為網路式的控制架構，平台由 DSP 的 SCI 介面與馬達發送及接收命令，各個馬達以串接的方式相連接，不過受限於傳輸率的影響，將傳輸所需花費的時間由示波器量得如圖 2-23 所示，平台傳送四軸命令與接收四軸命令於傳輸率 19200 bps 需 40ms，於 9600 bps 需 80 ms，為了預防整體平台傳輸資料量不定，因此選擇取樣時間如表 2-2 所示，為於不同鮑率的情控下控制平台所需花費的傳輸時間。若所選擇的取樣週期小於傳輸所需花費的時間，則會使得平台傳送給馬達命令會來不及接收，回授訊號也來不及接收，整體平台就無法移動，因此 RS-232 的取樣週期受限於傳輸率的影響。

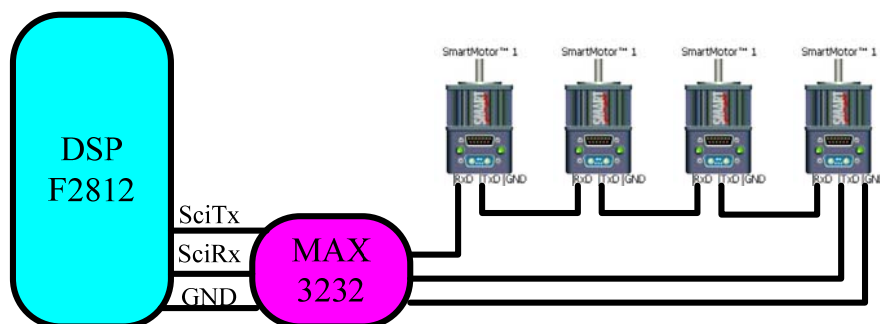
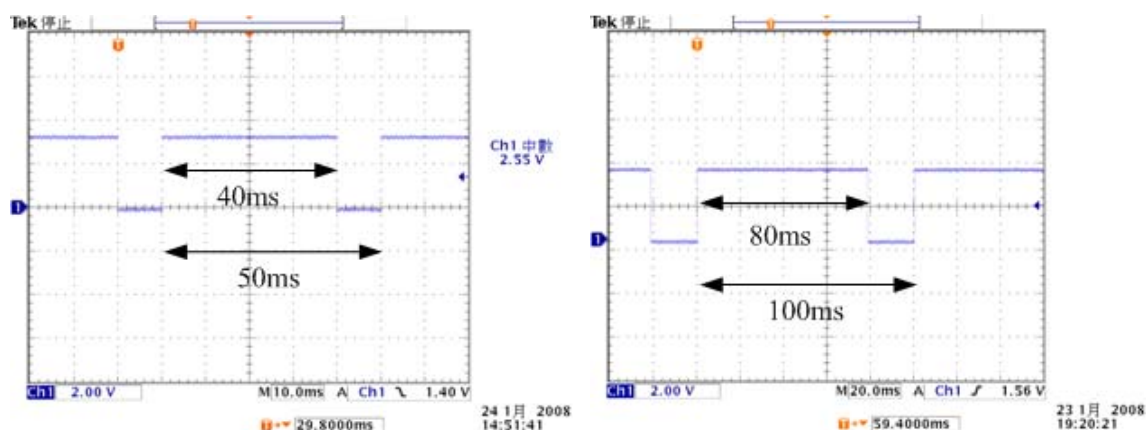


圖 2-22 網路式控制硬體架構



(a) 19200 bps

(b) 9600 bps

圖 2-23 量測 RS-232 傳輸所需時間圖

表 2-2 RS-232 實驗中不同傳輸率所需時間 (單位: ms)

RS-232	9600 bps	19200 bps
Transmission time	80	40
Sampling time	100	50

由集中式與網路式的架構中，可以看出由網路式的架構控制形式接線較為簡略，而集中式則需要較多的周邊元件，因此存在些許的偏壓，導致輸出電壓會有飄動現象；不過集中式的控制方式較為直接，不受傳輸時間的影響，因此取樣周期大約為 2 ms。在 3.3 節中，將針對集中式與網路式的實驗結果與分析。

第三章 網路式與集中式控制系統

本章描述相對定位的實驗結果，分析平台控制於網路式與集中式控制各軸之間的特性差異，設計合適的平台控制器，討論平台移動於低速(30 cm/s)與高速(100 cm/s)所產生的實際位置誤差，由於網路式的控制受限於鮑率的限制，所需的取樣周期較大，因此將針對於不同的取樣時間下，探討集中式控制與網路是控制的差異。

3.1 單軸特性分析

SmartMotor 內部速度迴路的控制架構圖，可以藉由外部輸入電壓與 RS-232 的控制方式控制馬達正、反轉，不過由於網路式的命令方式受限傳輸率 (baud rate) 的影響，因此所能傳輸命令給馬達的最快間隔為 50ms 一次，而電壓控制的形式則不受限於傳輸的時間，因此可以達到 2ms 傳送一次命令。

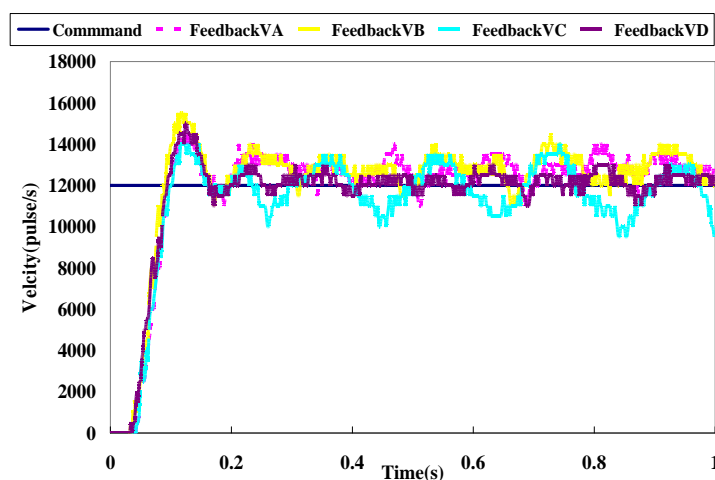


圖 3-1 集中式控制命令步階響應

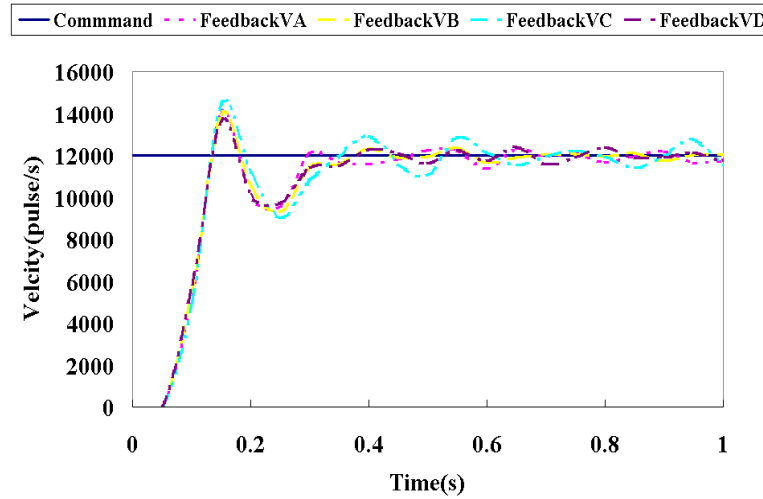


圖 3-2 網路式控制命令步階響應

圖 3-1、圖 3-2分別為使用集中式命令控制與網路式命令控制的步階響應，使用網路式在穩態所產生震盪較小，而使用集中式則有較大的穩態震盪，這是由於D/A輸出會有bias的存在，而網路式則將命令傳至馬達驅動器執行，因此網路式的傳輸可以克服外在的bias因素，使得穩態誤差較小。

3.2 平台控制器調整之實驗結果

3.2.1 平台控制器調整

平台控制器係指運動命令分於四軸前，對於平台命令 X_w 、 Y_w 、 ϕ 的運算調整。本論文藉由平台移動於直線加旋轉路徑 ($d = 200\text{cm}$ 、 $\phi = 180^\circ$)，如圖 3-3 所示，並針對平台的移動速度進行加減速的規劃 ($V = 30\text{cm/s}$ 、 $A = 15\text{cm/s}^2$)，圖 3-4 所示，使平台的移動速度為作為設計平台的P及PID位置控制器的參考依據，利用直線加旋轉的移動方式作為相對定位之運動控制成效評比。平台初始位置皆設為 $(X_w \ Y_w \ \phi) = (0 \ 0 \ 0)$ ，終點位置為 $(X_w \ Y_w \ \phi) = (0 \ 200 \ 180)$ 。

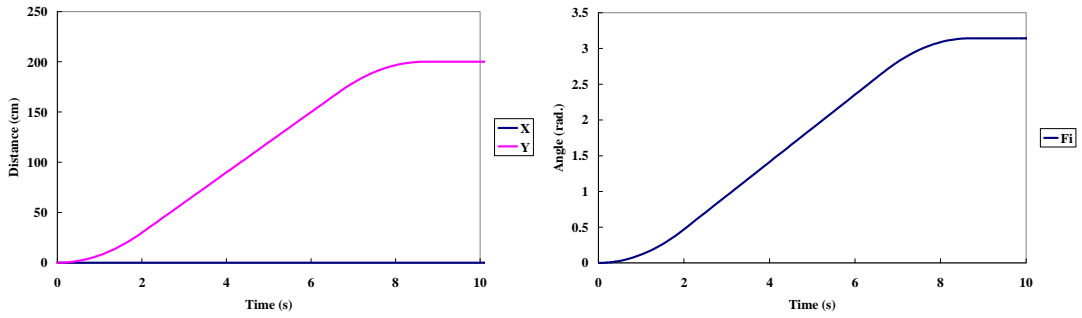


圖 3-3 直線加自旋路徑理想位置曲線

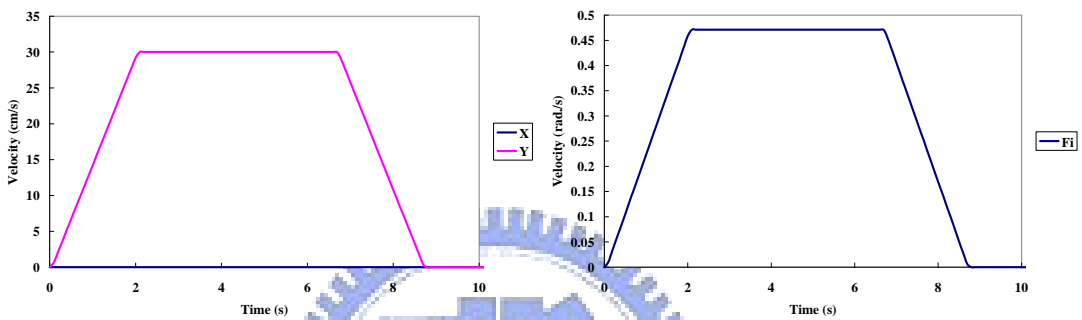


圖 3-4 直線加自旋理想速度曲線

設計結果如表 3-1所示，使用位置的絕對誤差累積值(Integral of Absolute Error, IAE)作為調整參數的評量標準，如(3-1)式。

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e_k| \quad (3-1)$$

當只有 K_p 時，則較小的 K_p 值會拉長整體的安定時間，造成與命令有較大的誤差，而無法追上命令；若 K_p 較大時，則會使得平台不穩定而產生較大的震盪。加入 K_i 來使得整體平台 IAE 值變小，也就是可以使得平台命令與回授誤差變小。加入 K_d 之後可以再減少位置 IAE 值，最後控制參數決定：

$$K_p(X_w \ Y_w \ \phi) = \{0.02 \ 0.02 \ 0.02\}。$$

$$K_i(X_w \ Y_w \ \phi) = \{0.00012 \ 0.00012 \ 0.00012\}。$$

$$K_d(X_w \ Y_w \ \phi) = \{0.6 \ 0.6 \ 0.6\}$$

表 3-1 平台位置控制器 K_p 、 K_i 、 K_d 參數調整

($L = 200 \text{ cm}$ ， $\phi = 180^\circ$ ， $V = 30 \text{ cm/s}$ ， $\text{acc/dec} = 15 \text{ cm/s}^2$)

IAE (cm) or (rad.)			
Controller coefficient	X	Y	ϕ
$K_p=0.01$	31.8	404	6.06
$K_p=0.02$	8.2	200	3.02
$K_p=0.03$	6.59	131.7	1.99
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00011$	3.36	24.4	0.37
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00012$	3.03	22.75	0.35
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00013$	3.19	21.19	0.32
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00012 \text{ } K_d=0.5$	2.59	22.77	0.34
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00012 \text{ } K_d=0.6$	2.1	22.82	0.35
$K_p=0.02 \text{ } K_i=0.00012 \text{ } K_d=0.7$	2.48	22.64	0.36

3.2.2 實驗結果

由直線加旋轉的方式於 $V=30 \text{ cm/s}$ 的情況下去調整平台的控制器，各軸之間的旋轉方式如圖 3-5，由於四軸是設計成對稱的關係，故兩軸的運動方式均會與另兩軸相對稱，由此為一非零值則表示平台有角速度自旋運動，若為等角速度運動則對稱值固定，反之則對稱值隨角速度而變化，本實驗所使用的旋轉角速度為梯形速度規劃，因此對稱性會因為角速度而有所變化。直線加自旋路徑之 P、與 PID 控制器追跡情形如圖 3-6、圖 3-7，由兩圖的(a)可以發現若單純只加入 P 則整體平台路徑會因為旋轉的關係而使得平台出現較大的 IAE，必須加上 I 及 D 來補償整體平台的路徑；由兩圖的(c)、(d)來觀察平台

梯形速度的變化，整體平台速度會因為加入I及D控制器而使得速度命令可以有更好的響應，因此整體平台的PID設計可以有效改善平台的IAE。

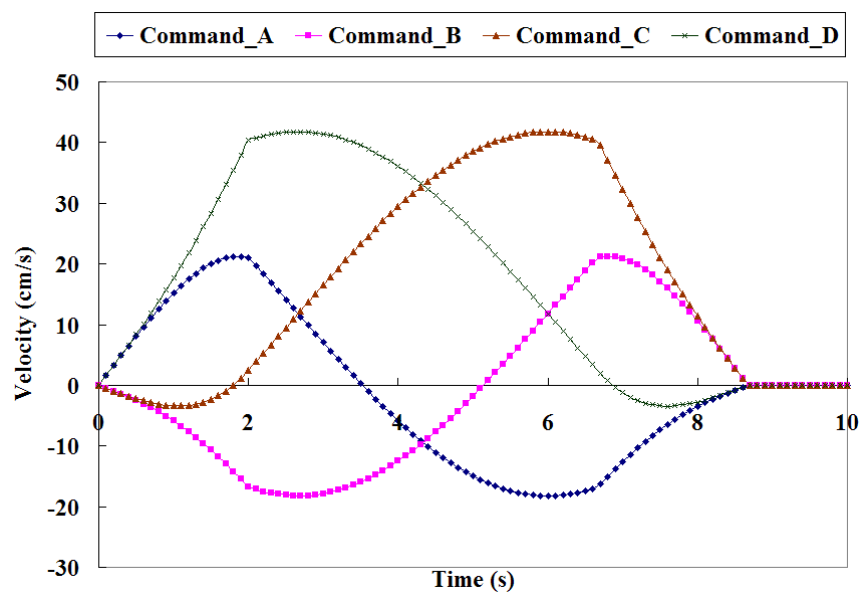
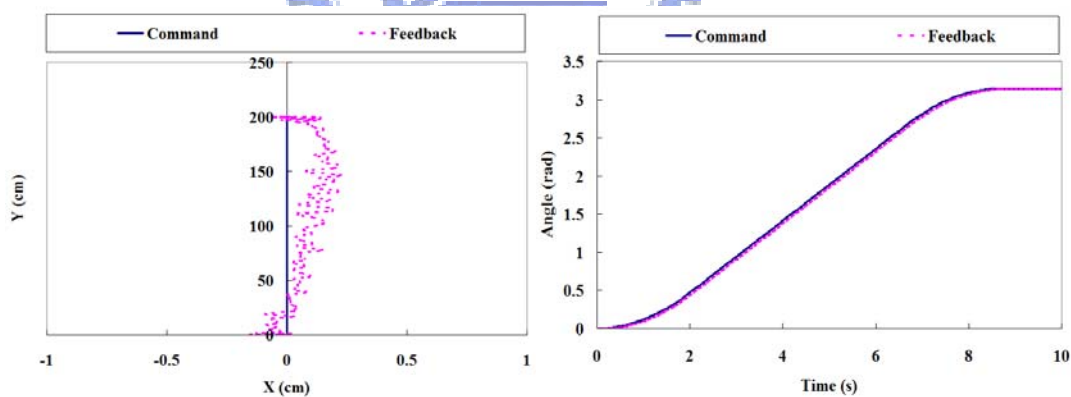
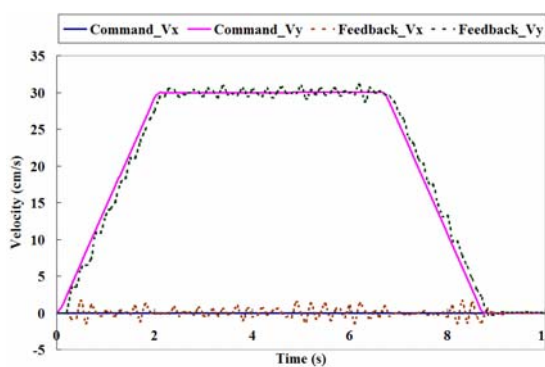


圖 3-5 直線加自旋路徑之各軸理想旋轉方式

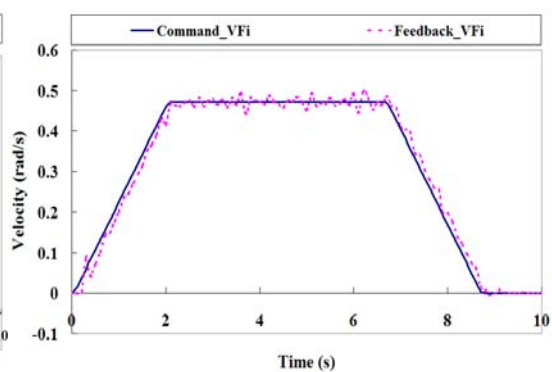


(a) X_w & Y_w 位置變化

(b) 角位置變化

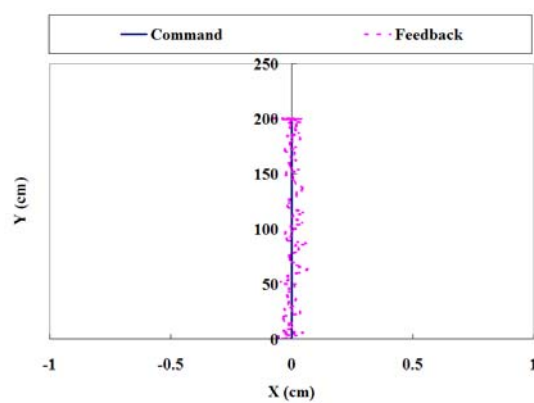


(c) X_w & Y_w 速度變化

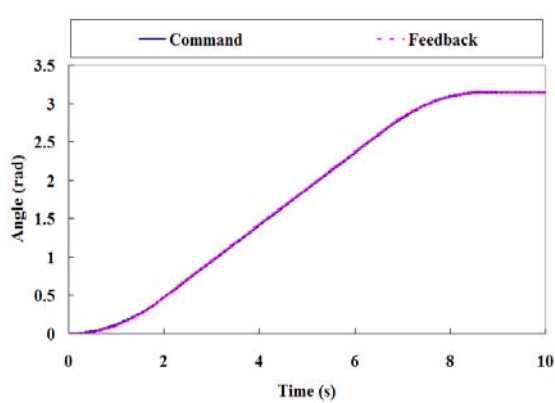


(d) 角速度變化

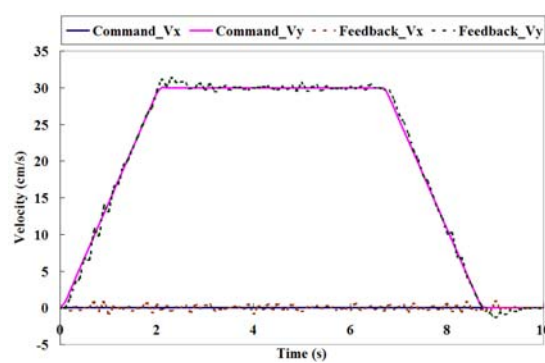
圖 3-6 平台位置 P 控制器之直線加自旋路徑追跡($V=30\text{ cm/s}$)



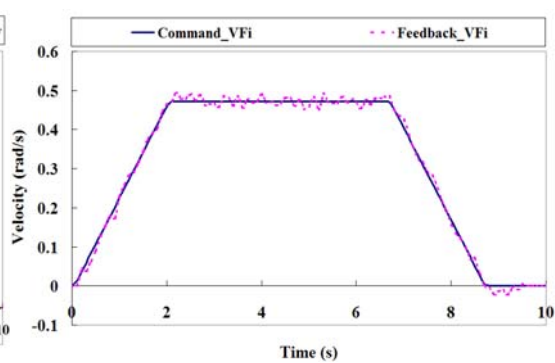
(a) X_w & Y_w 位置變化



(b) 角位置變化



(c) X_w & Y_w 速度變化



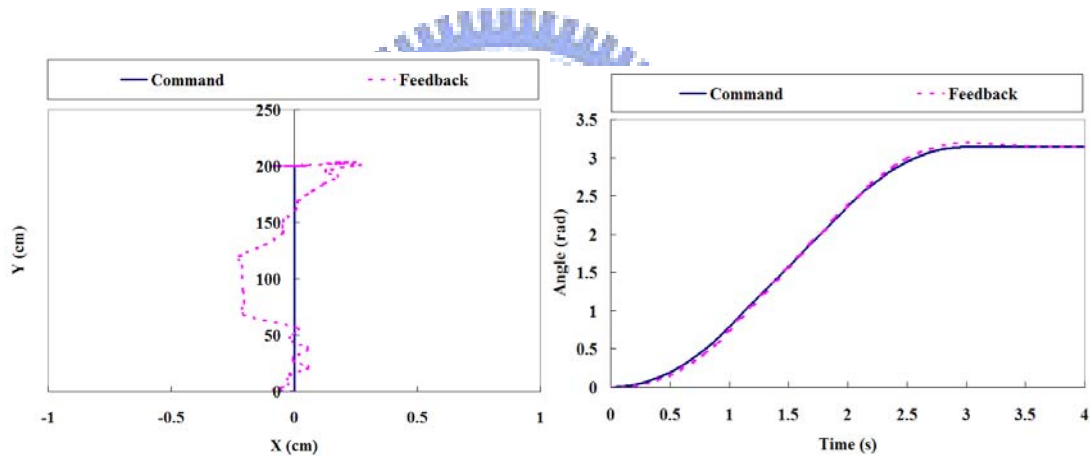
(d) 角速度變化

圖 3-7 平台位置 PID 控制器之直線加自旋路徑追跡($V=30\text{ cm/s}$)

表 3-2 平台開迴路與閉迴路 IAE 比較($L=200\text{cm}$ ， $\phi=180^\circ$ ， $V=30\text{ cm/s}$)

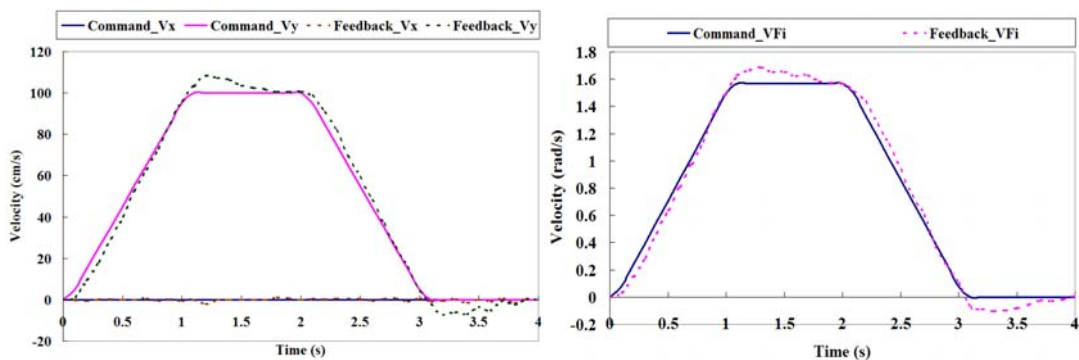
Control	$X_w(\text{cm})$	$Y_w(\text{cm})$	$\phi(\text{rad.})$
各軸獨立控制	231.36	89.96	2.72
整體平台控制	2.10	22.82	0.35

由以上所得到的PID控制將實驗平台於高速的情況下，如圖 3-8所示，整體的平台位置控制一樣可以到達所指定的位置，而在速度方面則會因為速度的增加而使得平台速度產生了超越量(overshoot)，整體平台於高速時，經過低速時所調到的PID值，也有良好追跡的結果。



(a) X_w & Y_w 位置變化

(b) 角位置變化



(c) X_w & Y_w 速度變化

(d) 角速度變化

圖 3-8 平台位置 PID 控制器之直線加自旋路徑追跡($V=100\text{ cm/s}$)

表 3-3 平台開迴路與閉迴路 IAE 比較($L=200\text{cm}$ ， $\phi=180^\circ$ ， $V=100\text{ cm/s}$)

Control	$X_w(\text{cm})$	$Y_w(\text{cm})$	$\phi(\text{rad.})$
各軸獨立控制	90.44	43.53	1.34
整體平台控制	4.51	37.40	1.07

3.3 網路式與集中式實驗結果

在3.2中介紹了整個平台於集中式平台控制器的設計，取樣時間為 2 ms ，由於網路式的控制方式必須花費較大的傳輸時間，因此整體取樣周期必須大於 50ms 以上，接下來將介紹平台網路式與集中式的控制結果於不同的取樣周期下，對於整體平台的實際位置誤差的結果，並與集中式控制作比較。



3.3.1 開迴路控制

整體平台於未加入控制器時，位置誤差由encoder所觀察到的誤差於不同的取樣時間，如表 3-4，在各種不同取樣時間下整體平台誤差由馬達回授可以得到若未加入平台控制器，則集中式產生了較大的誤差，這是由於各軸不匹配的情況下，則平台隨著取樣時間越大而位置誤差也越明顯；而NCS則由於各軸直接接受RS-232 命令，所以於整體路徑的行走上會有較小的誤差值。

圖 3-9為表示平台未加入控制器於集中式與網路式的軌跡，可以看出由集中式控制各軸不匹配的情況下，則若平台旋轉角度越大，則encoder誤差越為明顯；而於網路式控制則各軸較為匹配，因此平台加旋轉由encoder反算誤差較小。

表 3-4 未加入位置控制器 Encoder 位置回授誤差 (單位:cm)

	V=30 cm/s		V=100 cm/s	
	Centralized	NCS	Centralized	NCS
2ms	5.71		4.09	
10ms	7.98		6.02	
20ms	8.76		7.16	
50ms	9.23	0.04	12.47	0.16
100ms	11.43	0.10	17.63	0.36
200ms	12.82	0.48	33.77	1.69

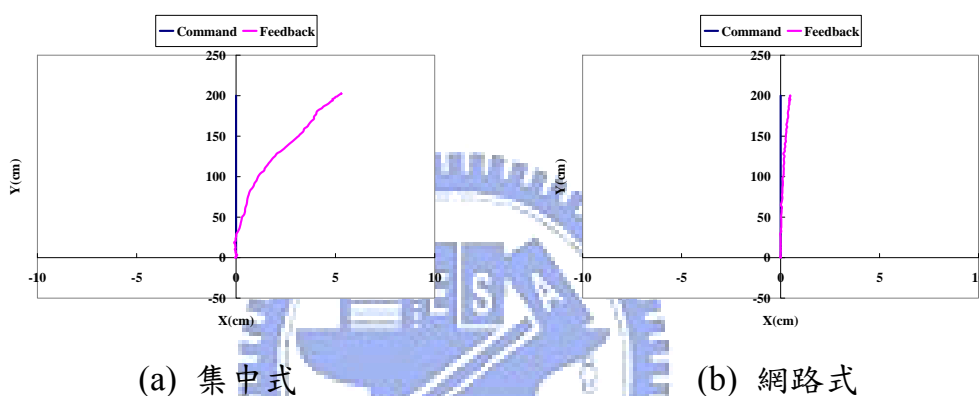


圖 3-9 平台開迴路運動軌跡圖

以上都是由encoder經過inverse kinematics反算而求得 X_w 、 Y_w 、 ϕ 值，接下來探討平台開迴路實際量測誤差，圖 3-10、圖 3-11為表示平台於網路式控制與集中式控制於低速與高速運動下實際量測誤差，誤差會隨著取樣時間越大而誤差越大。慢速開迴路時，網路式控制於 50ms取樣時間下，與集中式控制於 2ms有相當的表現，但encoder所觀察到的差異較大；而於高速開迴路時，網路式控制於 50ms取樣時間下，與集中式控制於 20ms有相當的表現，但encoder一樣差異較大。因此於開迴路狀態下，網路式的控制有較好的表現。

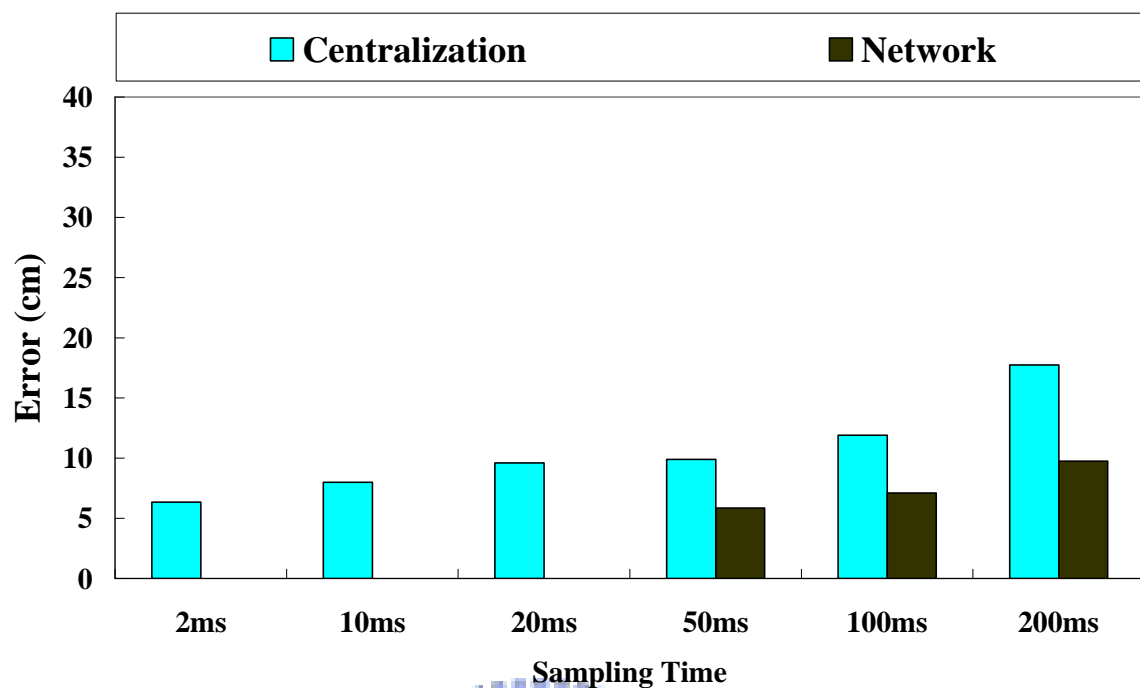


圖 3-10 平台運動控制開迴路於低速運動之誤差($V=30 \text{ cm/s}$)

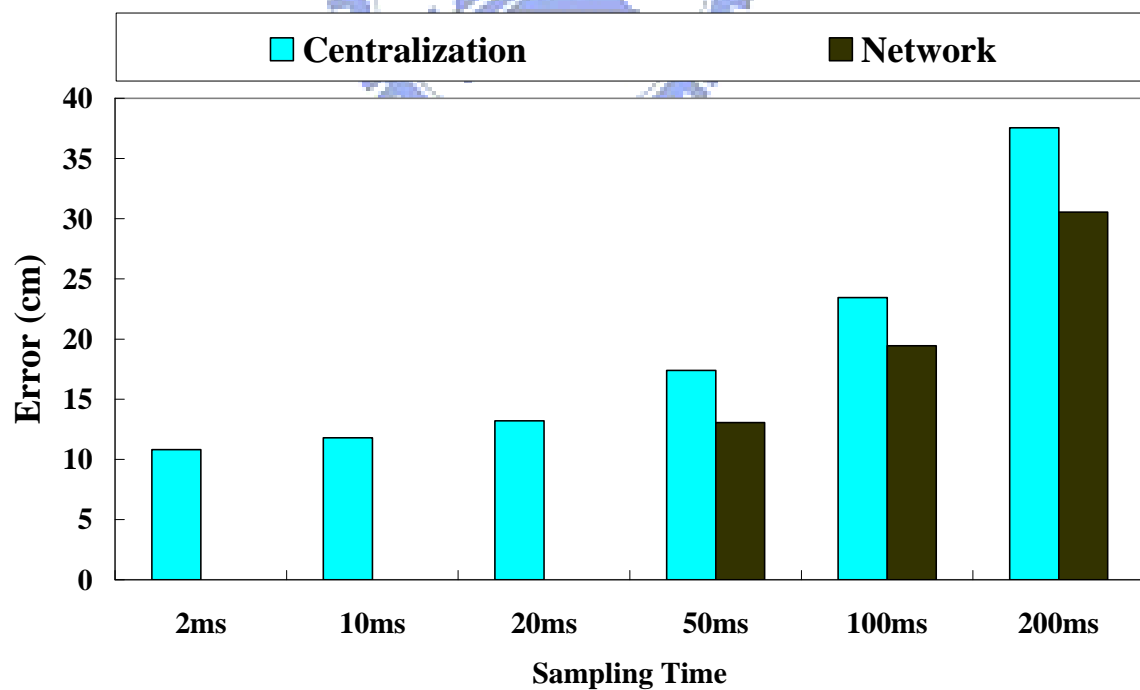


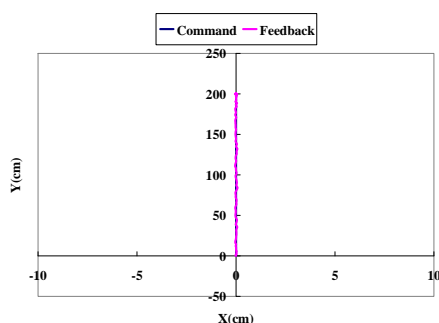
圖 3-11 平台運動控制開迴路於高速運動之誤差($V=100 \text{ cm/s}$)

3.3.2 閉迴路控制

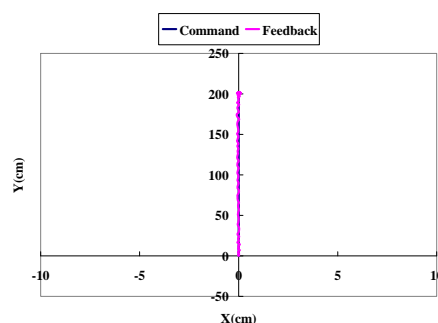
整體平台未加入控制器時，由encoder 所觀察到的NCS誤差低速時小於 1 cm，高速時小於 2 cm，集中式的誤差則皆大於 4 cm以上，必須加入平台控位置制器來改善整體平台的位置誤差，因此於不同取樣時間下調整平台控制器的參數，加入位置控制器所得到的誤差如表 3-5所示，經過位置控制器的補償後，將平台encoder所得到的誤差接近於零，提升了平台的位置控制，觀看平台的運動軌跡如圖 3-12所示，由運動軌跡我們可以看出經過閉迴路控制後，平台運動軌跡會被補償，提升平台的精確性。

表 3-5 加入位置控制器 Encoder 位置回授誤差 (單位:cm)

	V=30 cm/s		V=100 cm/s	
	Centralized	NCS	Centralized	NCS
2ms	0.02		0.04	
10ms	0.19		0.10	
20ms	0.21		0.20	
50ms	0.13	0.03	0.18	0.16
100ms	0.23	0.19	0.07	0.13
200ms	0.14	0.23	0.11	0.17



(a) 集中式



(b) 網路式

圖 3-12 平台閉迴路運動軌跡圖

由encoder觀察可以看到控制器對平台追跡的改善效果，接下來探討平台閉迴路實際量測誤差，圖 3-13、圖 3-14為表示平台於網路式控制與集中式控制於低速與高速運動下實際量測誤差，加入位置控制器可以有效改善平台的實際位置誤差，特別針對原本開迴路encoder誤差較大的集中式改善最為明顯；而網路式則因為各軸較為匹配，因此閉迴路控制改善較低。取樣時間50ms至 200ms之間於低速及高速時，兩種模式會有相當的位置誤差。於低速時，平台取樣時間小於 50ms位置誤差相似；於高速時，則取決於取樣時間的大小，取樣時間越小，則準確性越好，反之則越差。

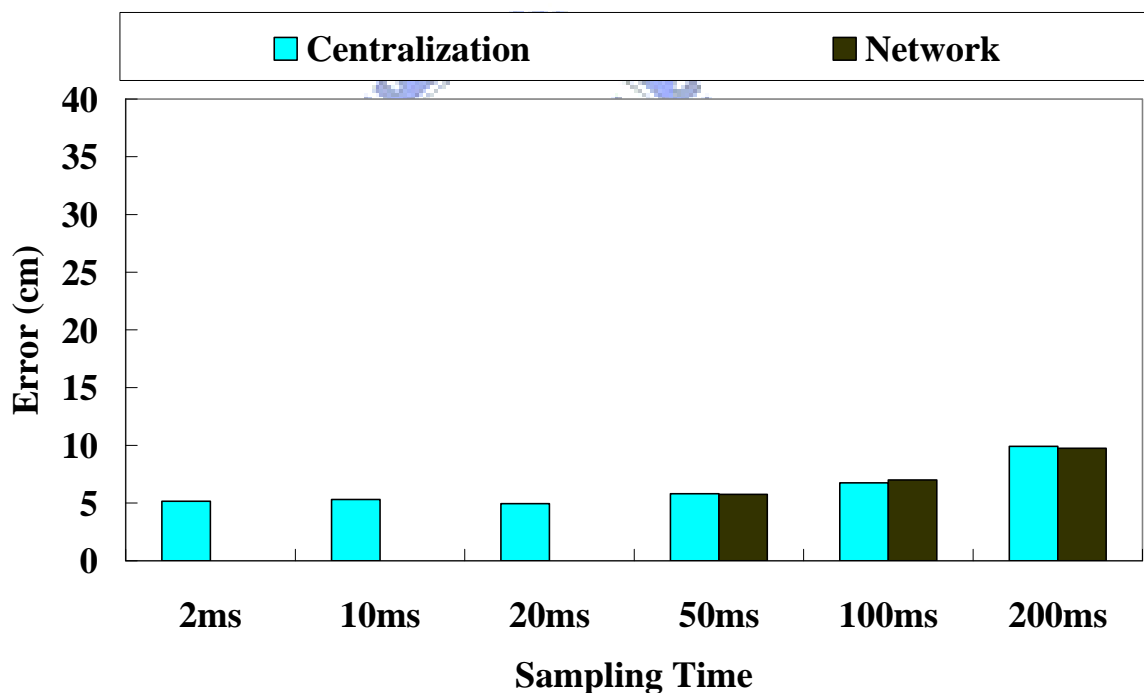


圖 3-13 平台運動控制閉迴路於低速運動之誤差($V=30\text{ cm/s}$)

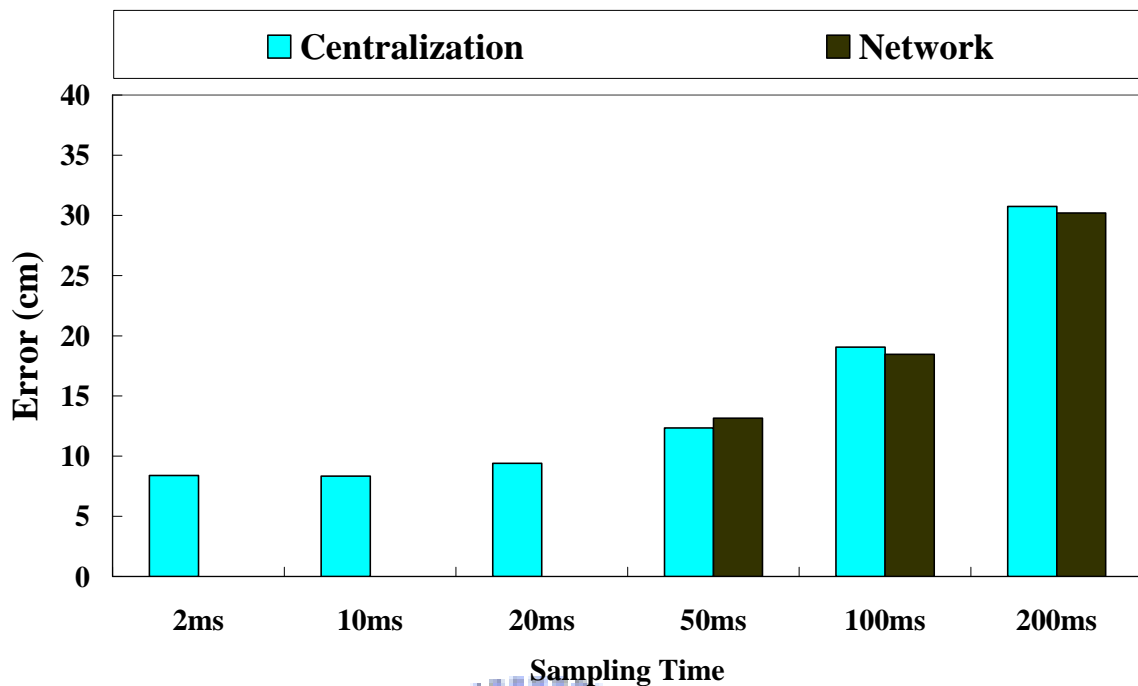


圖 3-14 平台運動控制閉迴路於高速運動之誤差 ($V=100\text{ cm/s}$)

3.4 小結

由本章的實驗結果以及數據的分析，可以得到以下結論：

- 1、本論文所使用的平台位置 PID 控制器可以改善平台的實際位置誤差及追跡誤差，尤其對於集中式控制較為明顯，這是由於各軸不匹配的關係。
- 2、在高速的移動下，運動控制精密度將會因為取樣時間的增加而退化；網路式控制則不適合於高速運動，不過於低速的控制下，網路式與集中式有相似的表現。
- 3、由以上的實驗可以得到，若平台各軸運動於匹配的狀況下，則整體運動精密度會與平台加入位置控制器有相當的表現。

因此，平台控制於集中式與網路式的架構中，各有各的優缺點，不過兩種控制模式都可藉由位置控制器來改善平台誤差。

第四章 結合影像感測融合機制實現

本章將針對目標物的偵測，運用所得到的資訊與encoder來建造融合的機制，使得平台可以克服由encoder所產生的累積誤差，進而改善整體平台的定位誤差，平台可以穩定且快速的追尋到目標物。平台整體架構如圖 4-1所示，平台由網路化的架構所組成。

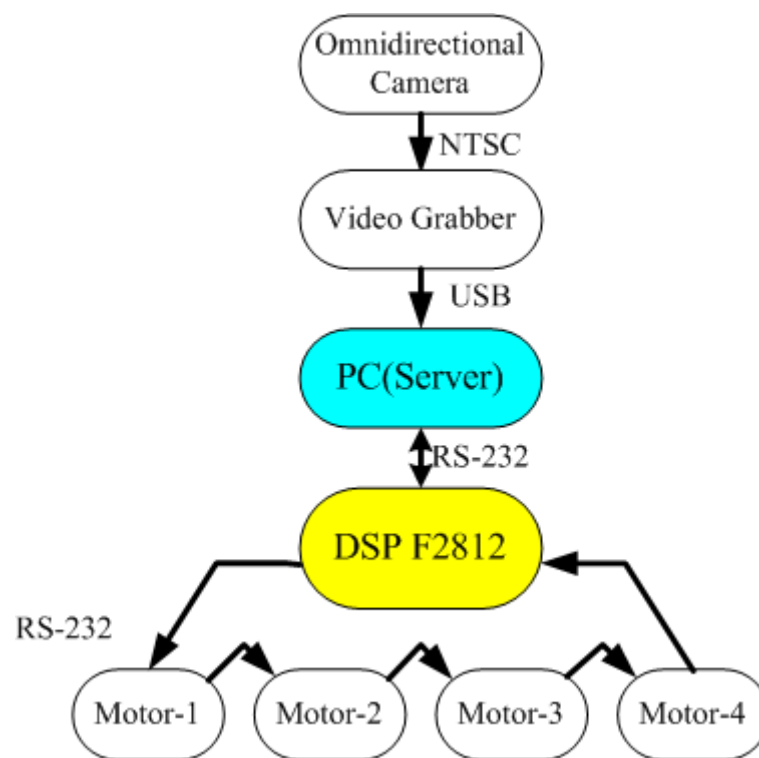


圖 4-1 整體平台架構圖

4.1 影像處理

本實驗影像處理於一台電腦上執行，所使用的程式為Borland公司開發的C++ Builder 6 撰寫而成，程式介面如圖 4-2所示。在全方位影像處理上，必須針對所要目標物進行擷取，而所選擇的目標物為一橙色的目標物，如圖

4-3所示，目標物位於整體平台的正前方，為紅色框所標示，因此必須將目標物位置偵測出來，處理程式流程如圖 4-4，將依序介紹各處理區塊。

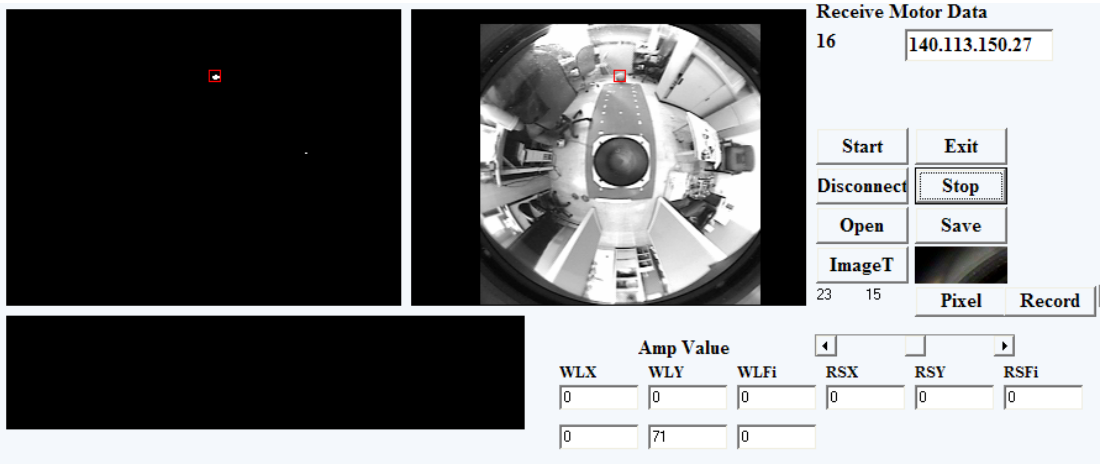


圖 4-2 PC 程式介面

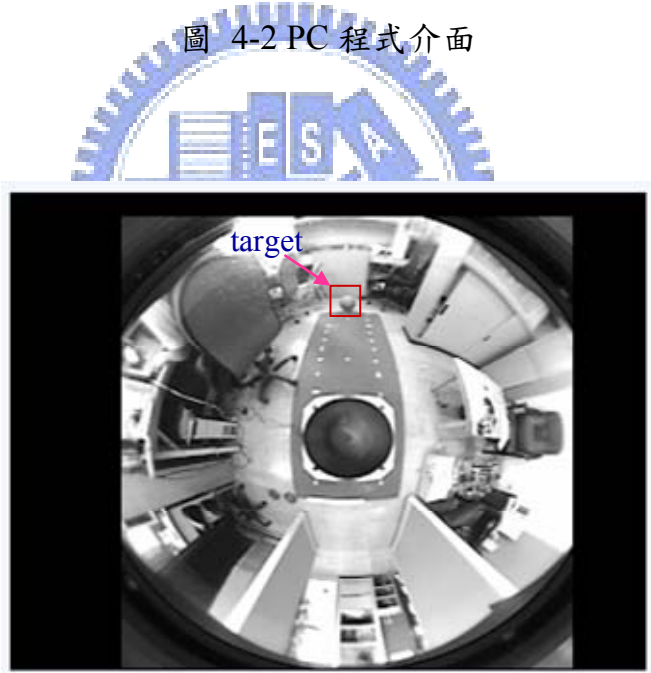


圖 4-3 目標物定義

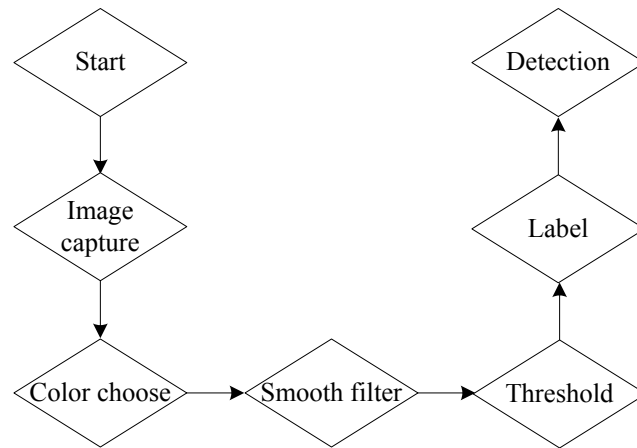


圖 4-4 影像處理流程

4.1.1 色彩辨識

1、色彩判斷[21]

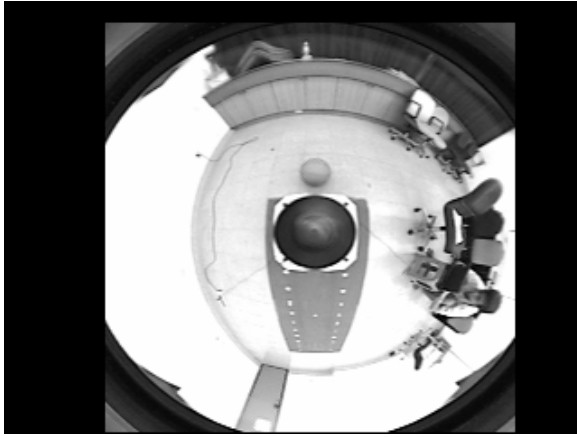
為了得到所設定的目標物的位置，由影像所接收到的 YUY2 的格式資訊得到每個像素的 YUV 值，由調整 YUV 值範圍，找出目標物的 YUV 範圍，所選擇的 YUV 臨界值為：

Y：102 ~ 164

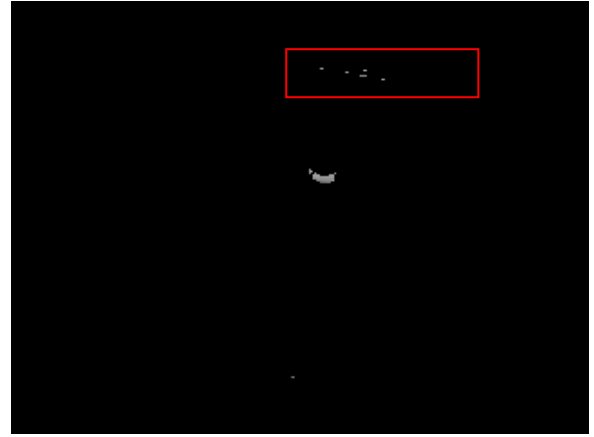
U：90 ~ 135

V：175 ~ 220

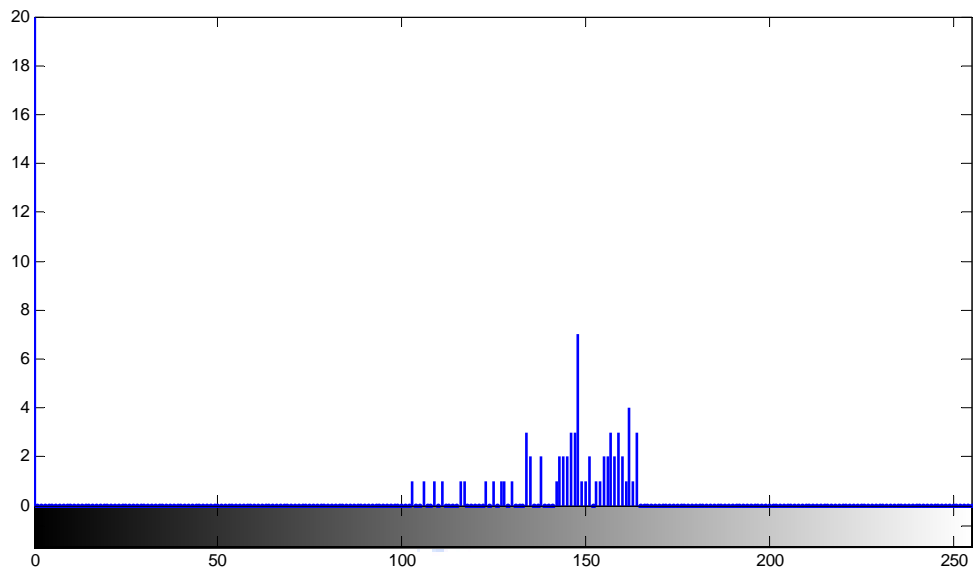
圖 4-5的(a)為原始灰階影像，(b)為所選取YUV範圍所得之影像，由影像中可以發現影像中存在些許的雜訊與目標物有一樣的YUV特性，如(b)圖圈選地方所示，因此必須藉由濾波方式將影像雜訊濾除。



(a) 原始影像灰階圖



(b) 目標物 YUV 所得到之影像



(c) 直方圖

圖 4-5 YUV 處理影像結果

2、雜訊濾波

在數位影像處理領域裡，在所擷取的影像中，有可能會出現些許的雜訊，因此必須將這些不是所需要的訊號濾除。在空間濾波遮罩方式如圖 4-6，由遮罩係數(w)與所對應到的係數灰階值(z)，影像再任意點的響應可以表示為(4-1)式。

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \cdots + w_9 z_9 = \sum_{i=1}^9 w_i z_i \quad (4-1)$$

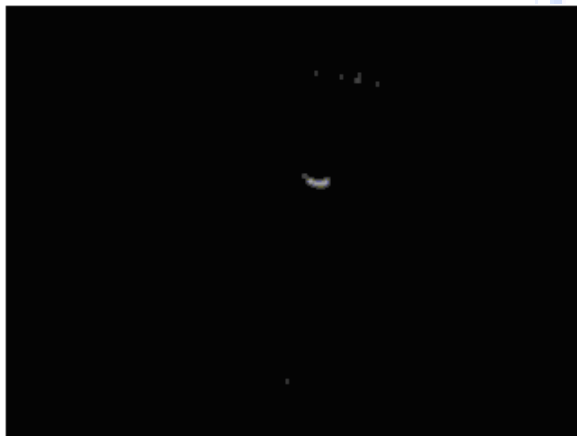
w_1	w_2	w_3
w_4	w_5	w_6
w_7	w_8	w_9

圖 4-6 3×3 空間濾波器遮罩

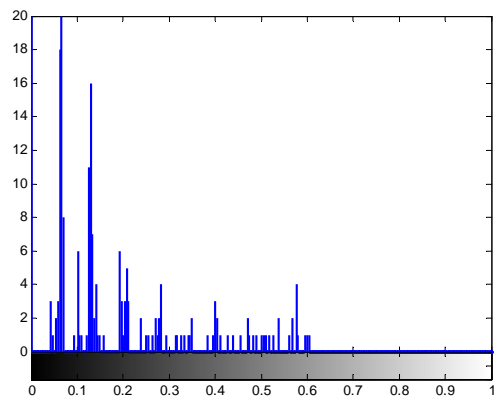
色彩判斷所偵測出來目標物，會出現些許的雜訊存在，因此加入一個平滑濾波器(smooth filter)將雜訊濾除，平滑濾波器用於模糊化與減少雜訊，為一線性空間濾波器的輸出(響應)，由濾波器遮罩的鄰域所含像素的平均，如(4-2)表示。

$$R = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 z_i \quad (4-2)$$

圖 4-5的(a)經過平滑濾波器處理後如圖 4-7的(a)所示，整張圖形變的模糊化，並將雜訊減小，(b)為濾波後的直方圖，變的較為平滑。



(a) 低通濾波後影像



(b) 直方圖

圖 4-7 影像低通濾處理

3、二值化(Thresholding)

影像二值化為選定一個閾值(threshold)，例如若 $T(r)$ 具有圖 4-8中所表示的形式，則 $T(r)$ 將產生一幅二值(二元)影像，所有像素凡是灰階度大於閾值(m)，令其為亮點，設值為 255；凡是灰階值小於閾值(m)，令其為暗點，設值為 0。二值化影像可以有效減少資料的儲存量，在影像處理當中，二值化影像的亮點即代表目標物，易於進行分析處理，因此由濾波器處理過後的結果，選擇 $m=40$ (正規劃後 $m_N=0.1568$)，所得到的二值化圖形如圖 4-9所示，雜訊經由二值化後去除，更清楚看到目標物所在位置。

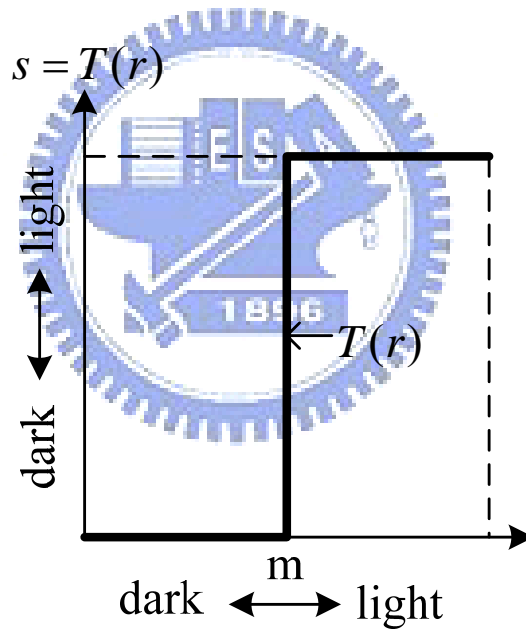


圖 4-8 對比度增強的灰階轉換函式

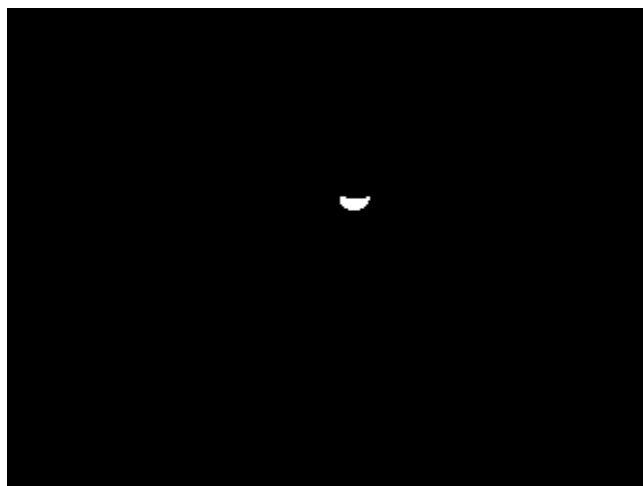


圖 4-9 閾值為 40 的二值化圖形

4、標籤法(Labeling)

像素與像素之間稱之為連通性，常見的為四鄰近與八鄰近，運用八鄰近的方式將鄰近像素為 255 值標為同一個編號，如圖 4-10為標示在一張圖有不同的區塊，將每個區塊標示為不同的編號。

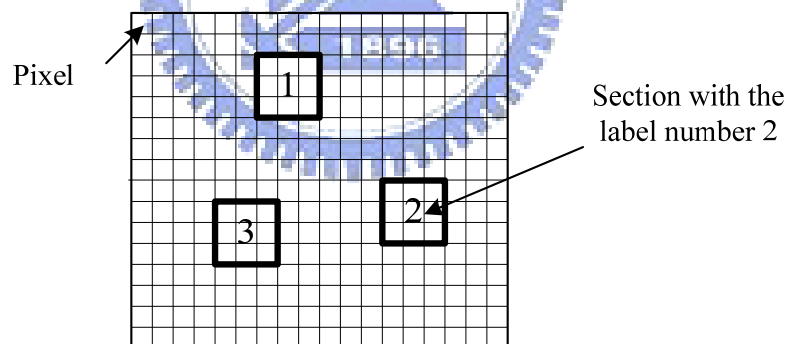
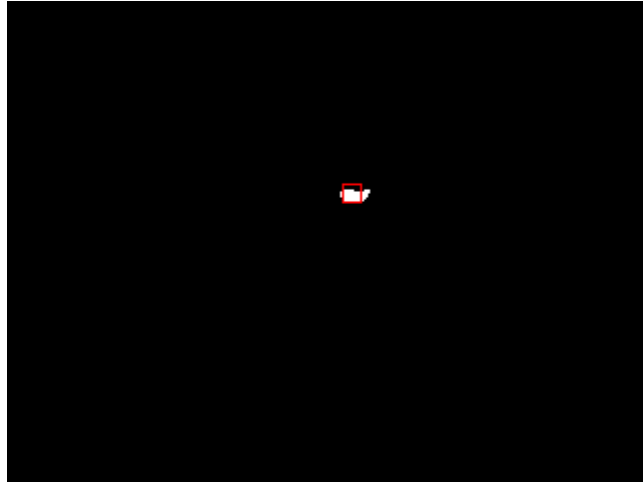


圖 4-10 在二值化影像中貼標籤

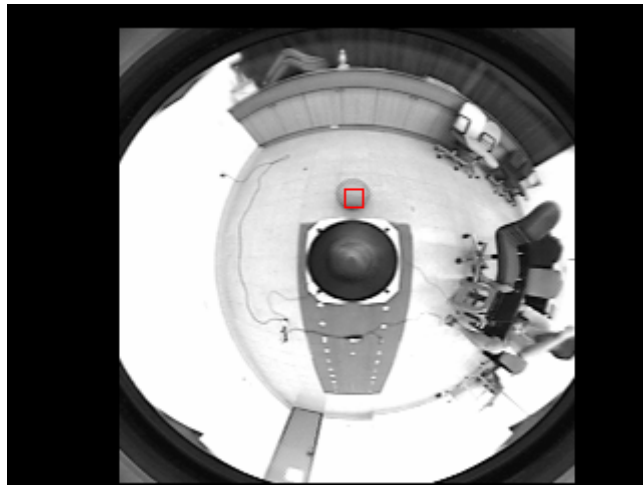
在貼完標籤後，將影像所看到的最大面積分辨出來，並由(4-3)、(4-4)算出目標物重心(\bar{x} , \bar{y})，如圖 4-11中的(a)紅色框框即表示由二值化所求得的物標物位置，(b)圖即為實際環境中，所找到的的確是目標物的位置。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad (4-3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \quad (4-4)$$



(a) 二值化所看到目標物位置



(b) 實際全方位攝影機所看到目標物位置

圖 4-11 偵測到目標物的位置

4.1.2 目標物相對距離與角度

全方位攝影機是利用雙曲面鏡反射，將四周圍的環境擷取下來，因此目標物會隨著在曲面鏡上反射的距離不同而扭曲變形，圖 4-12為全方位鏡上所看到的一個座標系統，以攝影機的中心(x_{Cen} , y_{Cen})為中心點，其中 $x_{Cen} = 173$ 、 $y_{Cen} = 128$ ，目標物的座標為(x_{Tar} , y_{Tar})，目標物與y軸的夾角稱為 θ_{Image} ，由以上

的定義，可以將求出目標物距離中心點的距離 D_{Image} 由 (4-5) 式所示：

$$D_{Image} = \sqrt{(x_{Tar} - x_{Cen})^2 + (y_{Tar} - y_{Cen})^2} \quad (4-5)$$

角度 θ_{Image} 下式 (4-6) 式所示：

$$\theta_{Image} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{y_{Tar} - y_{Cen}}{x_{Tar} - x_{Cen}}\right) \quad (4-6)$$

由圖形上兩點像素距離所算出來的 D_{Image} ，必須將它換算為實際於平面上平台與目標物的距離，因此將測量實際距離(cm)與像素距離(pixel)之間的關係，分別由 0 cm 至 200 cm 之間，每相隔 20 cm 測量一次所對應到的像素值。全方位攝影機為 360 度完全對稱的形式，因此針對一條線去做距離的量測，即可映射至平台對目標物距離。

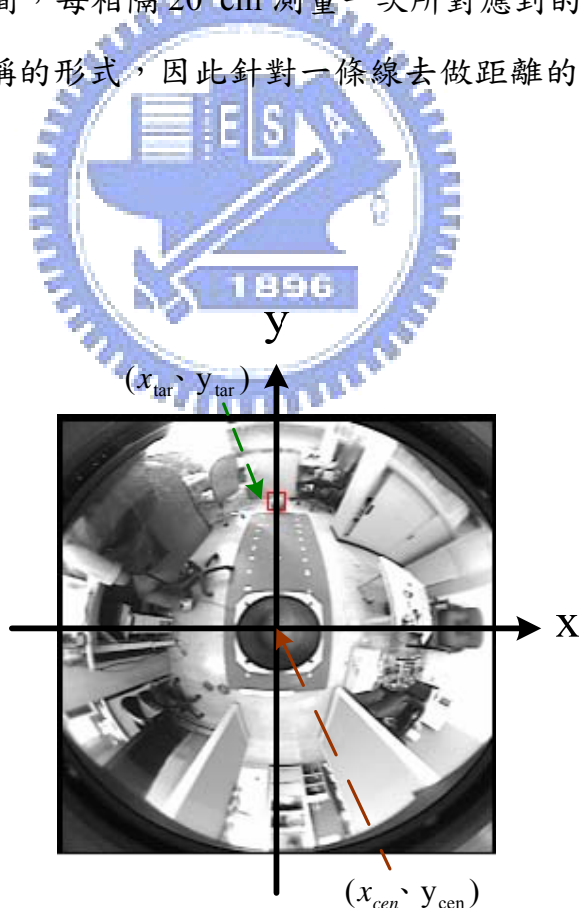


圖 4-12 攝影機與目標物相對距離及角度

使用 curve fitting 的方式去找出一條轉換函式近似，所得到的轉換函式為 (4-7)式。

$$y = 3.0682 \times 10^{-6} x^3 - 3.7984 \times 10^{-3} x^2 + 1.7915x - 288.24 \quad (4-7)$$

由所近似的方程式與實際量測所得到的圖形為圖 4-13所示。

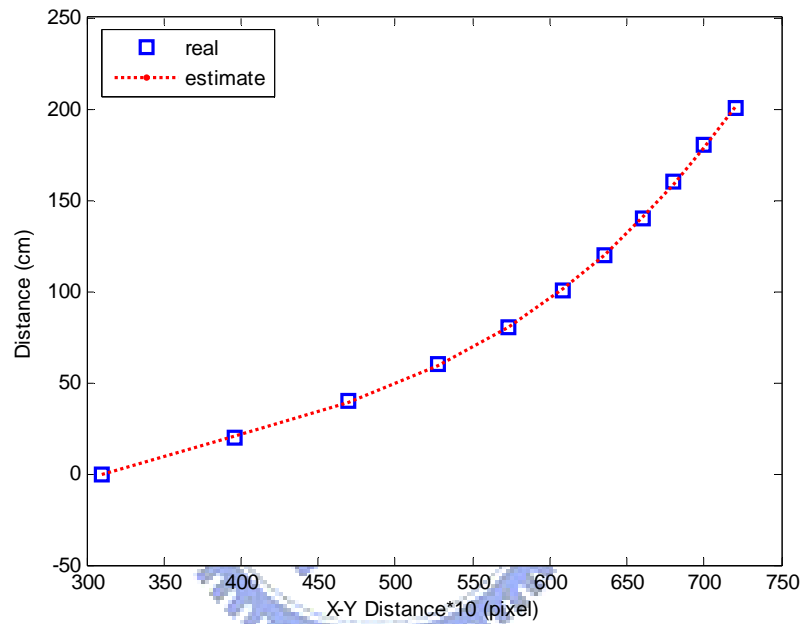


圖 4-13 由全像鏡估測之 X-Y 距離對應至實際距離

4.2 Kalman Filter 於平台移動位置估測

4.2.1 Kalman Filter [22]

當影像收尋到所看到的目標物後，為了有效的追蹤目標物的位置，並以平穩的路徑到達所指定的位置，預估其下一步的位置是相當重要，在眾多的估測理論中，Kalman filter 是最常被用來做運動控制的估測，也因此針對 Kalman filter 做介紹。

Kalman filter 對於估測離散系統的下一個狀態提供一有效的解決方法，

這也是可以在電腦視覺的領域上，Kalman filter 始終佔有著一席之地，應用範圍廣及全球定位系統、目標物追蹤等。

其架構如下式所示：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4-8)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4-9)$$

x 為系統的狀態變數， $x \in R^n$ ， u 為輸入矩陣， $u \in R^l$ ， z 為系統的量測值， $z \in R^m$ ， w_k 、 v_k 分別為系統誤差矩陣與量測誤差矩陣，彼此為互相獨立，且為高斯分佈，如下式所示

$$\begin{aligned} p(w) &\sim N(0, Q) & Q : \text{process noise covariance} \\ p(v) &\sim N(0, R) & R : \text{measurement noise covariance} \end{aligned}$$

雖然 Q 、 R 會隨時間而改變，但實際上的應用，都設為常數值， $n \times n$ 矩陣 A 為狀態轉移矩陣，與上一狀態 $k-1$ 及當時的狀態 k 有關，其一樣會對時間改變，因此將 A 設定為一常數， $n \times 1$ 矩陣 B 為輸入 u 至狀態變數 x 的轉移矩陣， $m \times n$ 的量測矩陣 H 也為一個常數矩陣。由於 Kalman filter 是預測狀態變數 x 的值，所以定義 \hat{x}_k^- 為量測前的預估值， \hat{x}_k 為預估後的值，則可得前估測誤差 (priori estimation error) $e^- = x_k - \hat{x}_k^-$ 協方差為

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (4-10)$$

後估測誤差 (posteriori estimation error) $e_k = x_k - \hat{x}_k$ 協方差為

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (4-11)$$

假設量測後的預估值為量測前的預估值與量測值的線性組合，如下式

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4-12)$$

其中 K_k 為尚未決定值的組合因子

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \quad (4-13)$$

稱式為 Kalman 增益。

Kalman filter 可以為兩個部份，分別為預測與更新：

預測部分：

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + B u_{k-1}$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$$

更新部份：

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

由預測與更新這兩部份來預測系統的狀態，然後運用系統實際所觀察的結果來更新系統的狀態如圖 4-14所示。

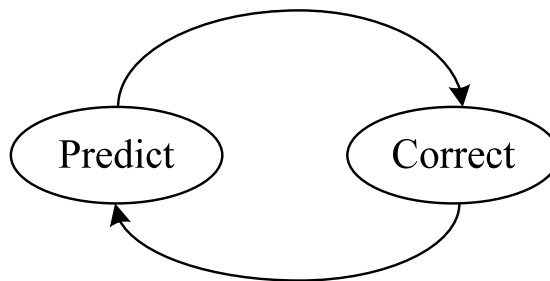


圖 4-14 Kalman Filter 流程圖

根據以上所敘述，可以發現 Kalman filter 主要是利用量測到的數據不斷更新預測，可以歸納出兩種特色：

- 一、以隨機程序的向量模型來建構而成，利用所有量測數據求得最佳估測狀態。
- 二、採用遞迴的方式來處理具有雜訊干擾的量測資訊，只要用最新的量測數據。

由以上 Kalman filter 的估測程序是以迴授控制為基礎，將某一時刻的預估值回授給量測方程式，則未來的狀態的確可以經由過去的狀態推測而得。

4.2.2 Kalman Filter 平台位置估測實驗結果

在4.1.2節中，得到了目標物與平台之間的距離關係，因此可以運用影像來測試平台的距離及角度，不過由於平台在移動的過程中，容易受到晃動，導致影像偵測起來也會有晃動的情形，因此加入Kalman Filter來做距離及角度位置的估測，假設量測系統狀態如下所示：

$$p(k) = p(k-1) + w(k-1) \quad (4-14)$$

$$y(k) = p(k) + v(k) \quad (4-15)$$

其中 $p(k-1)$ 為前一時刻平台的位置狀態。

$p(k)$ 為現在這個時刻平台的位置狀態。

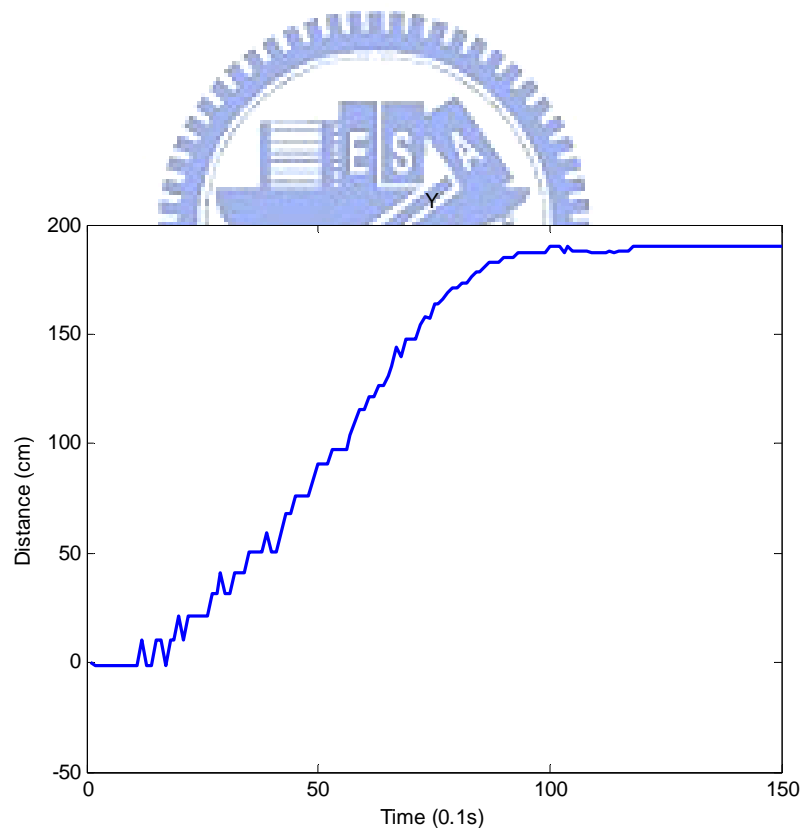
$y(k)$ 為目前平台所觀測到的位置狀態。

$w(k)$ 視為在輸入時的 white noise。

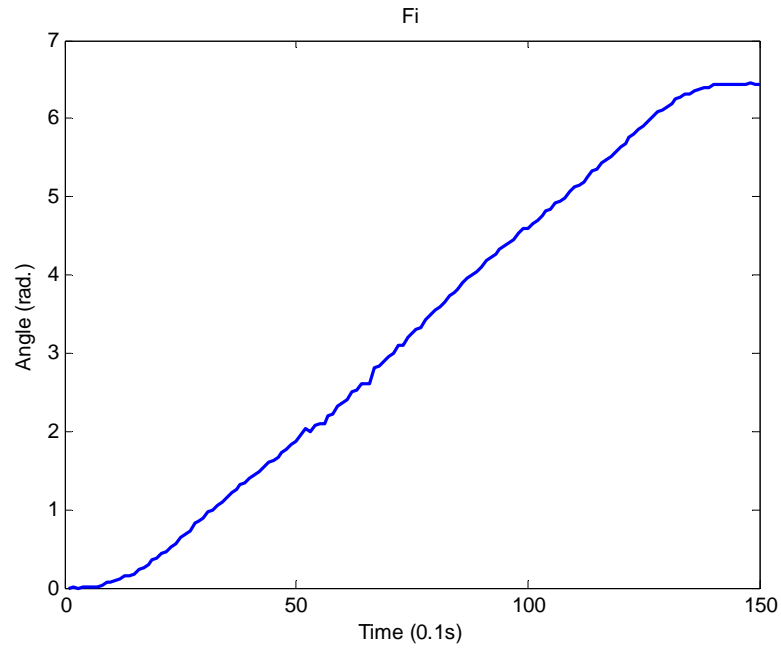
$v(k)$ 視為在輸出觀測時的 white noise。

在對於輸入與輸出系統狀態所存在的 white noise 可能造成的原因，輸入狀態方面其 white noise 是由於在平台移動時，對輸入的位置狀態有一隨機改變；而在輸出狀態方面其 white noise 則可能因為平台移動期間本身存在一個震動的問題。

而在這裡要處理相對位置雜訊干擾的問題，焦點集中在相對位置取線的估測，所以將位置曲線取出，並且在單位上統一以距離以cm來做計算，角度以徑度(rad.)做計算。因此要透過Kalman Filter來處理的位置曲線，分別有兩種由全方位攝影機所得到距離位置X-Y與角度位置，平台於慢速影像所看到的位置如圖4-15所示：



(a) 以 encoder 為回授之直線運動影像量測



(b) 平台等速旋轉時影像角度量測

圖 4-15 透過影像所得到相對位置

運用 Kalman Filter 對圖 4-15 作位置的估測，估測狀態如下所示：

$$\hat{p}(k) = a\hat{p}(k-1) + K_k[y(k) - ac\hat{p}(k-1)] \quad (4-16)$$

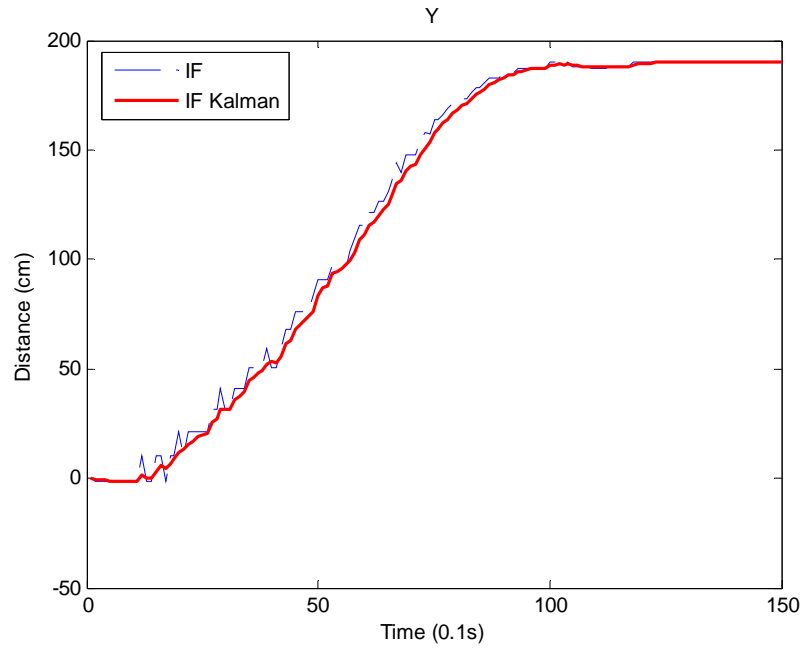
其中 $\hat{p}(k-1)$ 為前一個時刻平台的位置估測狀態。

$\hat{p}(k)$ 為現在這個時刻平台的位置估測狀態。

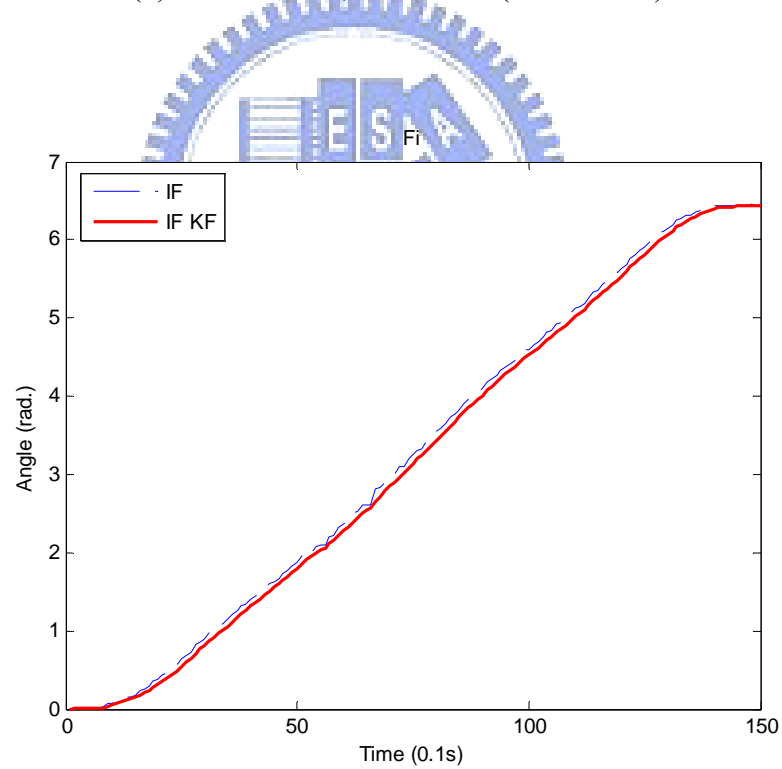
第一點的位置估測用直接量測到的值，也就是 $\hat{p}(1) = y(1)$ 。

此位置估測的系統狀態空間參數中， $a=c=1$ ，輸入狀態的 white noise 為 $w(k)$ ， $Q = \sigma_w^2 = E[w^2(k-1)]$ ，輸出狀態的 white noise 為 $v(k)$ ，其變異數 $R = \sigma_v^2 = E[v^2(k-1)]$ 。

在 Kalman Filter 中，有幾個參數是未知的，包括 $w(k)$ 、 $v(k)$ 。因此在考慮實際狀況及經過實驗調整後，選擇 $Q=0.1$ 、 $R=1.0$ 這一組參數，利用其來處理圖 4-15，其結果如圖 4-16 所示：



(a) 低速時影像距離估測($V=30\text{cm/s}$)



(b) 影像角度估測

圖 4-16 Kalman Filter對圖 4-15的位置估測

於高速時，如圖 4-17所示，則平台在移動的過程中產生了較劇烈的震盪，加入Kalman Filter後，將震盪的大震幅降低，達到較穩定的位置估測。

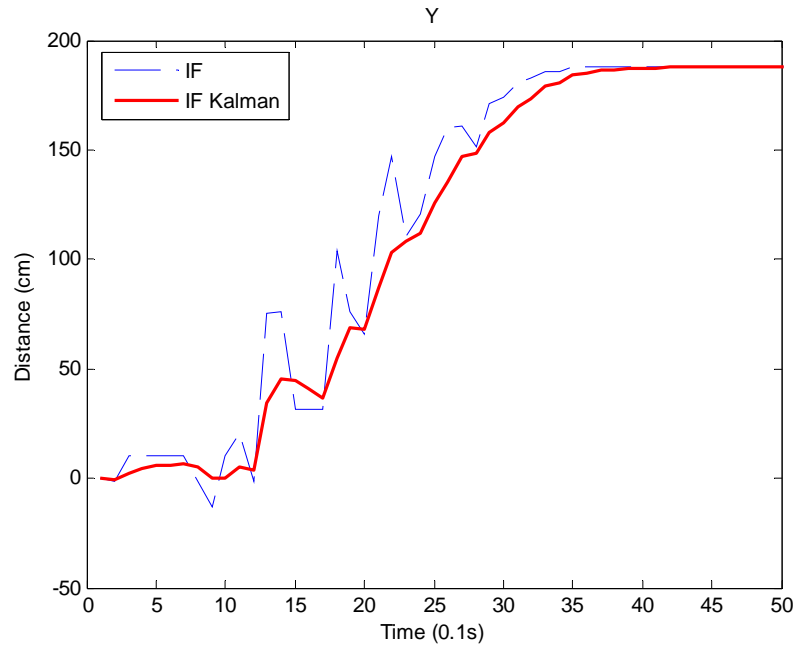


圖 4-17 平台行使於高速時($V=100\text{ cm/s}$)

可以看出在 noise 的干擾之下，可以將大振幅的干擾降低，達到想要估測的位置狀態，且估測狀態變化量也不大，在均方誤差上也是很小的。

在此提出以一維的 Kalman Filter 經過實驗數據調整輸入、輸出系統狀態的 white noise variance，在位置估測運算上很方便且容易實現。並且對於在不同的速度下，都有很好的位置估測曲線，將所得到的位置估測值作為平台的回授，可以使得平台有更好的精確度。

4.3 感測融合架構

由4.2節中，將影像所得到的距離及角度經過Kalman Filter濾波估測後，得到較為穩定的結果，因此接下來將Encoder與影像所得到的資訊做一整合，利用其各自優勢截長補短：

Encoder：有較好的穩定性，但隨著時間的累積或打滑的產生而準確性下降。

影像回授：有較好的準確性，但由於影像於較遠處的地方，容易產生較大的振盪行為，因此於近距離有較好的精確度。

由圖 4-16、圖 4-17 可以看到影像於低速及高速的運動下，當影像回授小於 100cm 以下容易產生不穩定，因此希望平台可以運動於平穩的狀況下，將使用 Fuzzy 的觀念將 encoder 與影像所得到的數值融合，如圖 4-18 所示，將影像所偵測到的位置距離 (D_{Image}) 做為依據，並令兩信任程度函數分別為 μ_{Image} 、 $\mu_{Encoder}$ 。

在 D_{Image} 較小時，由於此時影像不穩定，encoder 穩定性較佳，故 $\mu_{Encoder}$ 值較高；當 D_{Image} 較大時，由於影像容易產生累積誤差，影像精確性大於 encoder，因此 μ_{Image} 值較高。

D_{Image} 、 μ_{Image} 與 $\mu_{Encoder}$ 的關係使用 trapezoidal-function：

$$\mu_{Image} = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq D_{Image} < 50 \\ \frac{50}{D_{Image} - 50} & , \quad 50 \leq D_{Image} < 100 \\ 1 & , \quad 100 \leq D_{Image} \end{cases} \quad (4-17)$$

$$\mu_{Encoder} = 1 - \mu_{Image} \quad (4-18)$$

由 (4-17)、(4-18) 式，以 50cm 及 100cm 為權重轉換點，這是由於影像小於 100cm 容易產生不穩定的現象，因此加入距離感測融合機制。

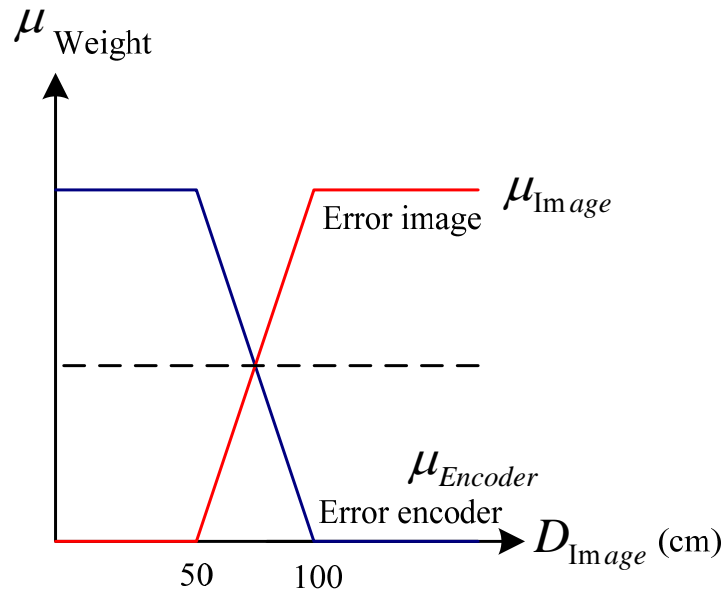


圖 4-18 距離與角度信任權重比

4.4 結合影像融合機制實現

為探討感測融合對於路徑追跡的影響，由於影像感測容易產生震盪，因此若平台位置控制器太大時，容易產生震盪，因此於網路化控制使用相同的控制器 ($K_p=0.1$) 做為評比的標準，而集中式的控制則使用相同的控制器 ($K_p=0.003$)，讓平台低速行走於直線路徑，做為實驗條件。將實驗分成三部份：

Type 1：無感測融合(encoder)。

Type 2：無感測融合(image)。

Type 3：感測融合(fusion)。

表 4-1、表 4-2、表 4-3 為表示三種類型的 X_w 、 Y_w 、 ϕ 位置 IAE 值於網路式與集中式控制，可以看出當平台完全採用 encoder 為回授依據時，則平台行走較為穩定，因此 IAE 值較小；當平台完全使用 image 回授時，由於距離目

標物遠，平台一開始容易產生些微震盪，會影響平台的初始角度，因此有較大的IAE值；運用encoder與image融合後，IAE值則介於encoder與image之間。

表 4-1 網路化控制於不同感測方式之位置 IAE 比較 Sampling time=50ms

Straight		X_w			Y_w			ϕ		
		Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion
Position	Mean	0.02	7.43	5.2	899.68	958.62	953.49	0.05	0.13	0.06
IAE	Max	0.03	9.93	5.86	899.89	964.85	955.71	0.05	0.28	0.1

(單位:cm)

表 4-2 集中式控制於不同感測方式之位置 IAE 比較 Sampling time=50ms

Straight		X_w			Y_w			ϕ		
		Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion
Position	Mean	12.57	25.25	14.9	934.6	984.48	968.0	0.01	0.16	0.02
IAE	Max	13.71	30.49	16.5	936.82	988.41	971.2	0.01	0.37	0.04

(單位:cm)

表 4-3 集中式控制於不同感測方式之位置 IAE 比較 Sampling time=2ms

Straight		X_w			Y_w			ϕ		
		Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion	Encoder	Image	Fusion
Position	Mean	17.58	60.8	31.5	1375	1420	1417	0.01	0.06	0.01
IAE	Max	20.6	66.8	34.6	1376	1428	1422	0.01	0.12	0.01

(單位:cm)

Type 1：無感測融合(encoder)

使用encoder作為平台角度、位置回授，在位置IAE與位置誤差都有較佳的表現，平台也可以控制的穩定，但其缺點為平台若產生打滑，導致累積誤

差的產生，如圖 4-19為平台三方向的軌跡，可以看出encoder確實有到最終位置，而影像則偵測出距離目標物還有誤差 10.09cm，最後實際誤差如表 4-4 所示，為 10.1cm。

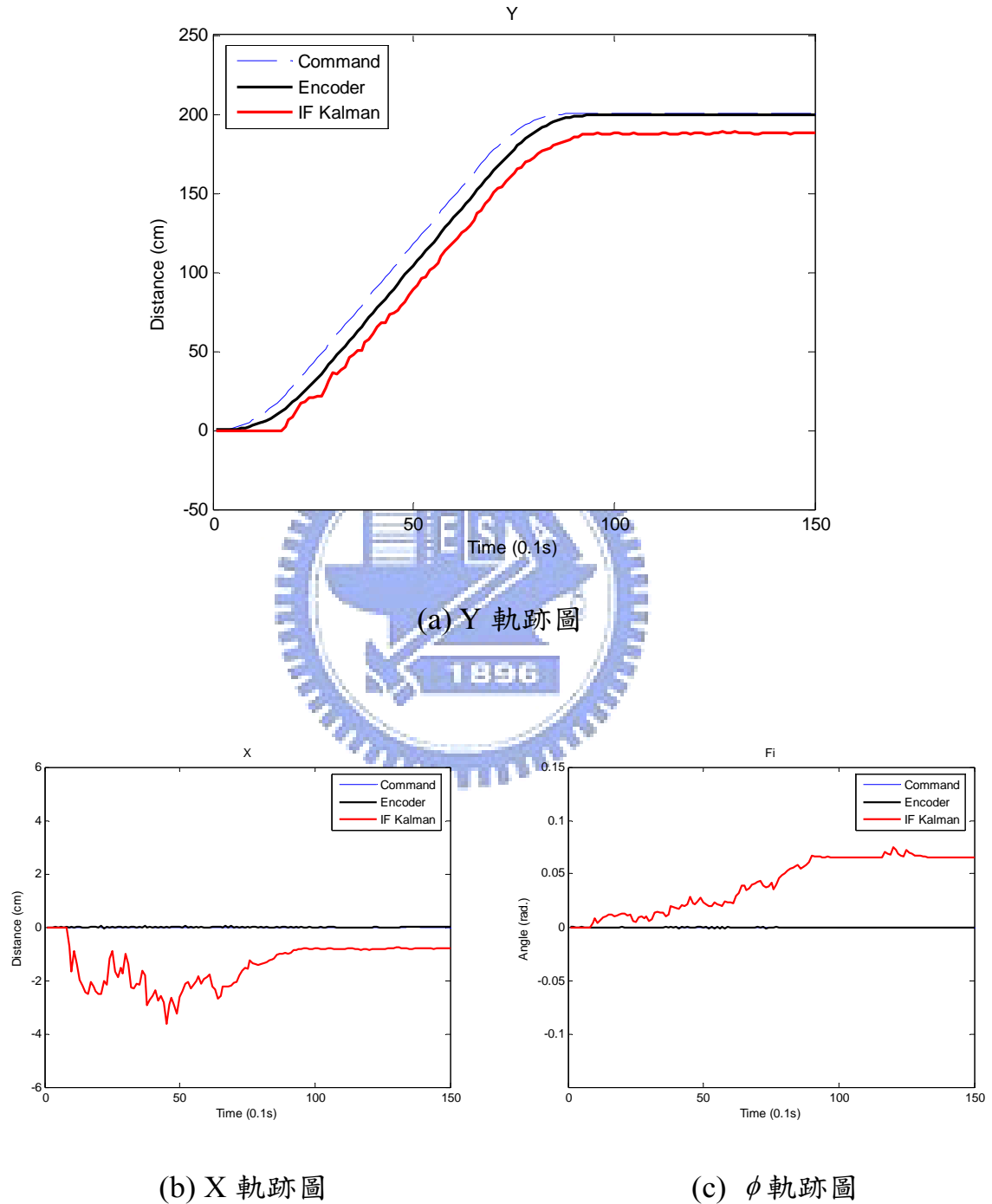
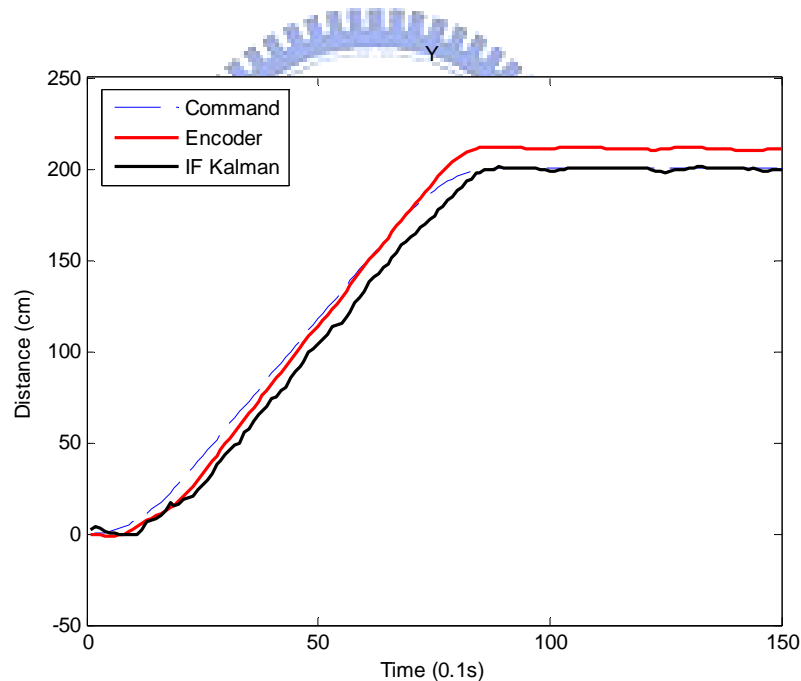


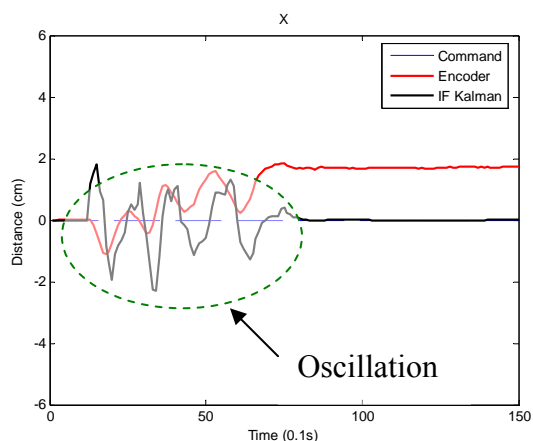
圖 4-19 Type 1 直線路徑圖($\mu_{Encoder}=1$)

Type 2：無感測融合(image)

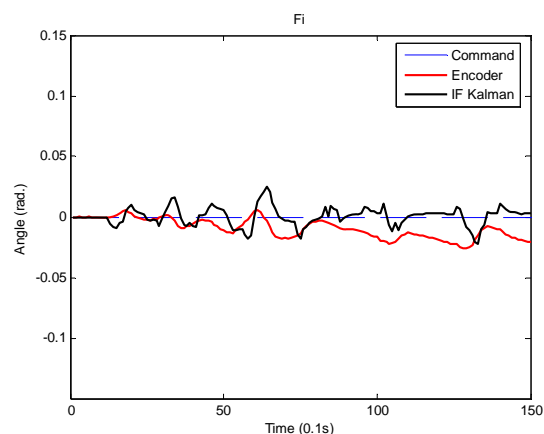
使用影像所得到的位置、角度回授，影像經由Kalman Filter位置估測後，減少影像的震盪，由全方位鏡上所得到的平台座標X、Y、 ϕ 最為回授，圖 4-20為使用image回授所得到的平台三方向軌跡，可以看出若平台距離偵測物較遠時，則容易震盪，導致平台一開始所偵測到的角度稍為傾斜，因此整體由影像所得到的回授有達到，實際誤差如表 4-4 所示，差了 1.5cm，與Type 1 比較起來，整體平台實際精確度大為提升，因此為了消除平台一開始行走的震盪現象，提出Type 3 的融合方法。



(a) Y 軌跡圖



(b) X 軌跡圖

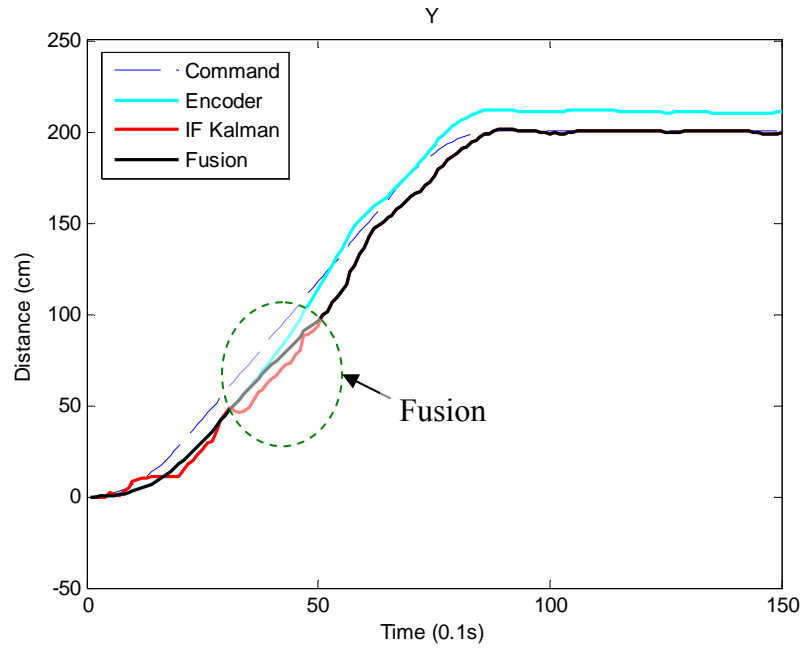


(c) ϕ 軌跡圖

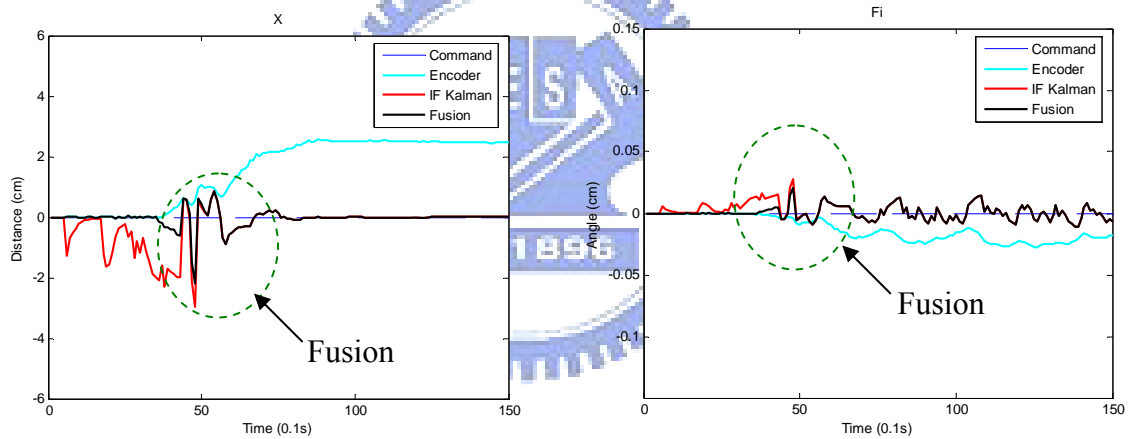
圖 4-20 Type 2 直線路徑圖($\mu_{Image}=1$)

Type 3：感測融合(fusion)

將影像與encoder所得到的值做融合機制如圖 4-18所示，當距離目標物較遠時，則使用encoder為依據，較近時則以影像為主，由此來達到平台的encoder穩定與image精確的控制，為了防止突然切換encoder與image的強烈震盪，加入了權重的切換，如圖 4-21所示的融合機制，使得回授訊號較為平穩，不會導致平台不受控。由表 4-4 中可以看出NCS加入融合的方法後，整體實際誤差由 9.7cm降至 1.03cm，改善率為 89.4%。



(a) Y 軌跡圖



(b) X 軌跡圖

(c) ϕ 軌跡圖

圖 4-21 Type 3 直線路徑圖(影像距離 $\geq 50\text{cm}$ 啟動融合)

表 4-2 網路化控制於不同感測方式之前後位置誤差比較 Sampling time=50ms

Straight		Type 1 (Encoder)		Type 2 (Image)		Type 3 (Fusion)	
		Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate
Position error	Mean	0.00	9.7	0.2	1.5	0.06	1.03
	Max	0.00	10.1	0.36	1.8	0.14	1.5

(單位:cm)

表 4-3 集中式控制於不同感測方式之前後位置誤差比較 Sampling time=50ms

Straight		Type 1 (Encoder)		Type 2 (Image)		Type 3 (Fusion)	
		Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate
Position error	Mean	0.00	10.16	0.16	1.13	0.1	1.1
	Max	0.00	10.3	0.19	1.8	0.12	1.8

(單位:cm)

表 4-4 集中式控制於不同感測方式之前後位置誤差比較 Sampling time=2ms

Straight		Type 1 (Encoder)		Type 2 (Image)		Type 3 (Fusion)	
		Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate	Sensor output	World coordinate
Position error	Mean	0.00	10.03	0.13	1.9	0.11	0.93
	Max	0.00	10.1	0.15	2.5	0.12	1.5

(單位:cm)

綜合以上感測融合的結果，實際位置誤差如表 4-4、表 4-5、表 4-6 所示，由 encoder 回授於網路式控制與集中式控制，回授有達到理想的位置，而實際量測平台位置約皆差了 10cm；而由影像作為回授時，因為影像一開容易產生震盪，而影像處理的速度約為 15fps，而整體平台回授的取樣週期分為 2ms 及 50ms，為了達到同樣的回授週期，運用內插法使得影像取樣與取樣周期同步，但由於一開始影像較不穩定，則會造成一開始些為震盪偏差，如 Type 2 的型態所示，為了消除震盪偏差的行為，因此加上距離感測融合機制後，由網路式控制取樣時間為 50ms 的改善率約為 89.4%，集中式控制取樣時間為 50ms 的改善率約為 89.2%，2ms 的改善率約為 90.8%，加入融合機制後，確實可以大幅提升平台的運動精密度。

4.5 網路化遠端控制平台

本節將介紹平台遠端遙控，並可將平台上的影像傳回供操作者觀看，並可將平台上的回授資訊傳回遠端，如圖 4-22所示，底層控制由RS-232 以傳輸率 19200 bps串接而成，DSP與Server端電腦由RS-232 以傳輸率 115200 bps 溝通，Client端與Server端電腦以無線網路 802.11g作為無線傳輸，進而達到整體平台網路化的控制，進而達到整體平台網路化的控制。

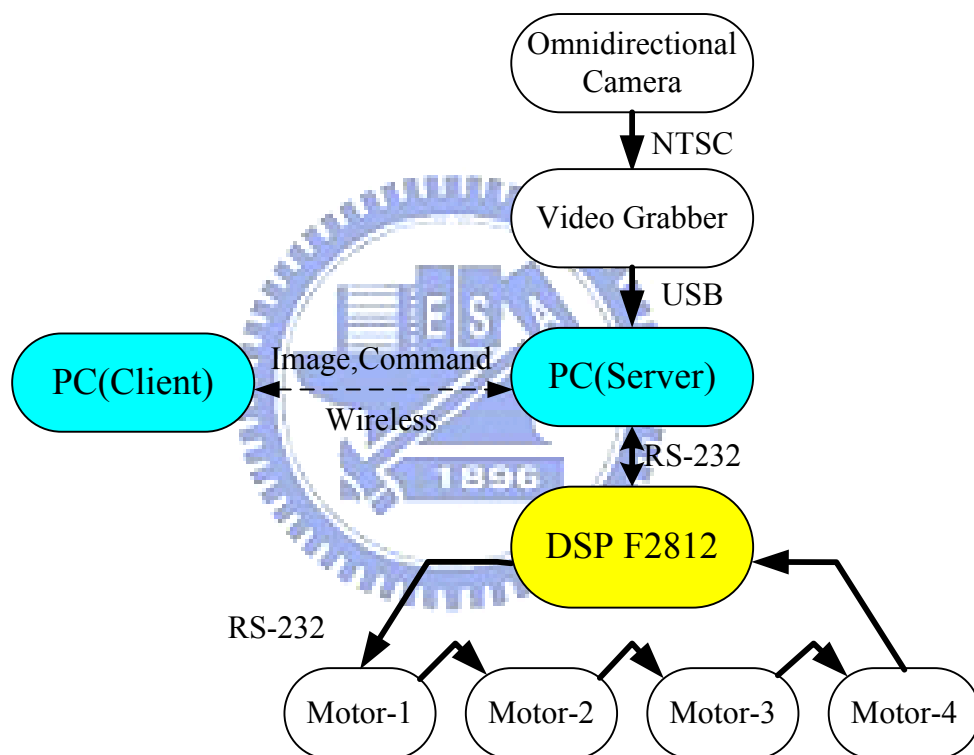


圖 4-22 平台網路化遠端控制架構

在遠端控制方面程序分為三部份：無線網路傳輸、影像展開與 PC(client)-PC(server)-DSP 之間的溝通協定，以下將依序介紹：

1、無線網路傳輸

機器人影像的資料較為龐大，因此為了可以達到影像傳輸的目的及遠端下達平台命令，利用電腦的IEEE 802.11b/g無線通訊模式，藉由OFDM調變技術最快速度可以到達 54Mbps，實現可移動式的監視系統。802.11 制訂了兩種不同類型的無線區域網路基本架構，分別是「Ad Hoc Wireless LAN」和「Infrastructure」[29]，在此選擇Ad Hoc Wireless LAN的無線網路架構，如圖 4-23所示，Ad Hoc架構能即時架設起無線通信網路，在這種架構中，通常任二個用戶間都可直接通訊，可以達到分散式通訊的目的。

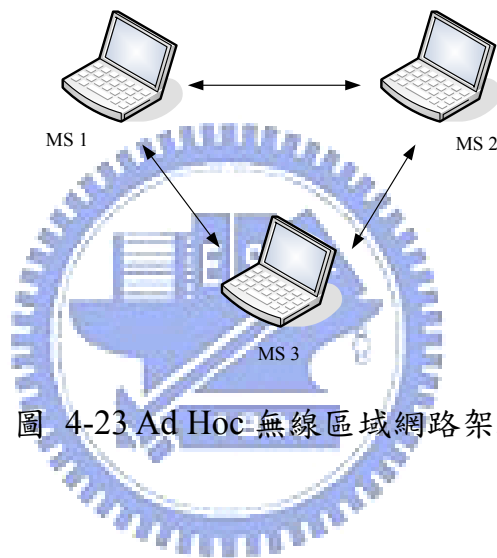


圖 4-23 Ad Hoc 無線區域網路架構

2、全方位影像展開

由於全方位攝影機是藉由攝影機去照攝曲面鏡所得到的影像，而且為了可以照射到 360 度的影像，所以整張圖形聚集於平台中心點如圖 4-24所示，為了讓全方位影像展開以方便觀察，因此使用圓柱投影法將圖形展開，如圖 4-25所示，選擇全方位圖形的中心點為(173, 127)， R 為全方位影像所能看到的最長距離與中心點的距離(圖 4-24的外環)， r 為原點所包圍的黑色環之半徑，因此選擇 $R=113$ 、 $r=21$ ，所投影出來的圖形高度為 $R-r$ ，由圖 4-25中的 x 、 y 為所對應的展開點，展開後我們可以得到圖 4-26即為全方位影像所展開之圖形，讓操作者可以更具體的看到四周圍的環境。

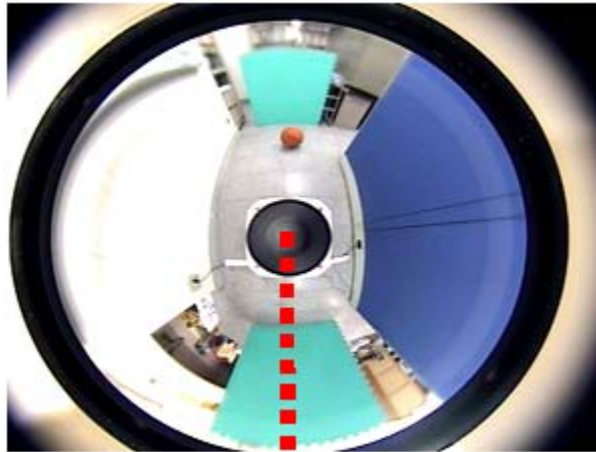


圖 4-24 全方位攝影機拍攝圖形

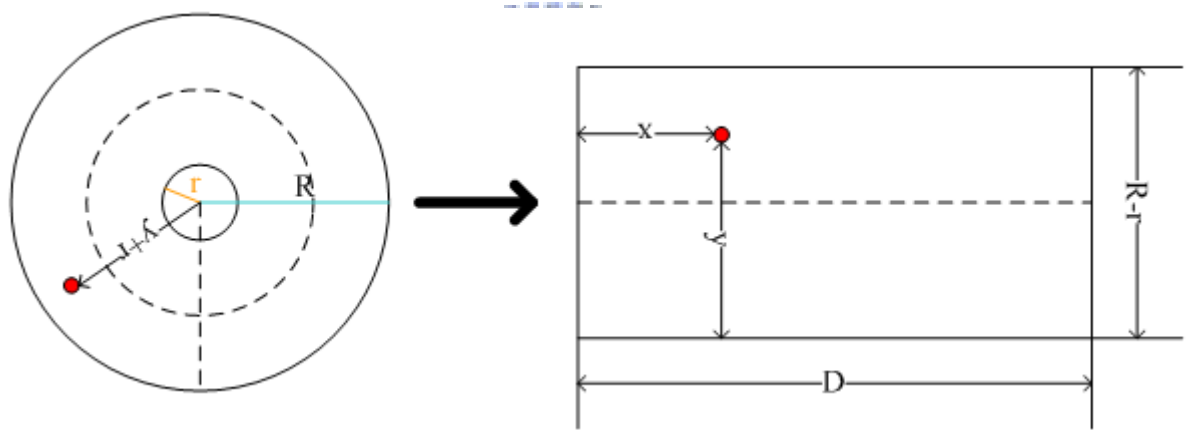


圖 4-25 圓柱投影示意圖



圖 4-26 全方位攝影機展開圖形

3、PC(client)-PC(server)-DSP 之間的通訊協定

在2.2.2節中，針對RS-232 傳輸及自訂的通訊格式介紹，將此通訊格式運用至網路通訊格式。在無線網路傳輸上，使用 802.11 介面達到影像與平台命令傳輸，以UDP封包的方式，較不考慮可靠性，但可達到最即時的傳輸。

由以上三部份的介紹，將運用這三種結合開發client端(圖 4-27)與server端(圖 4-28)的介面軟體，client端的軟體介面主要畫面分為四個部份：

- (a) 選擇平台工作模式，分為遠端控制與自主的行為，若選擇遠端控制，則可以由介面上的按鍵或搖桿控制平台前後左右及旋轉。若選擇自主的行為，則平台會啟動 server 端的影像處理系統，並偵測目標物的位置，進而使得平台可以自主追蹤物體。
- (b) 啟動遠端的影像，並將遠端的展開影像傳回至操作者觀看，使操作者可以判斷四周環境情形，遙控平台。
- (c) 將命令與 encoder 回授資訊顯示。
- (d) 將平台回授資訊畫出。

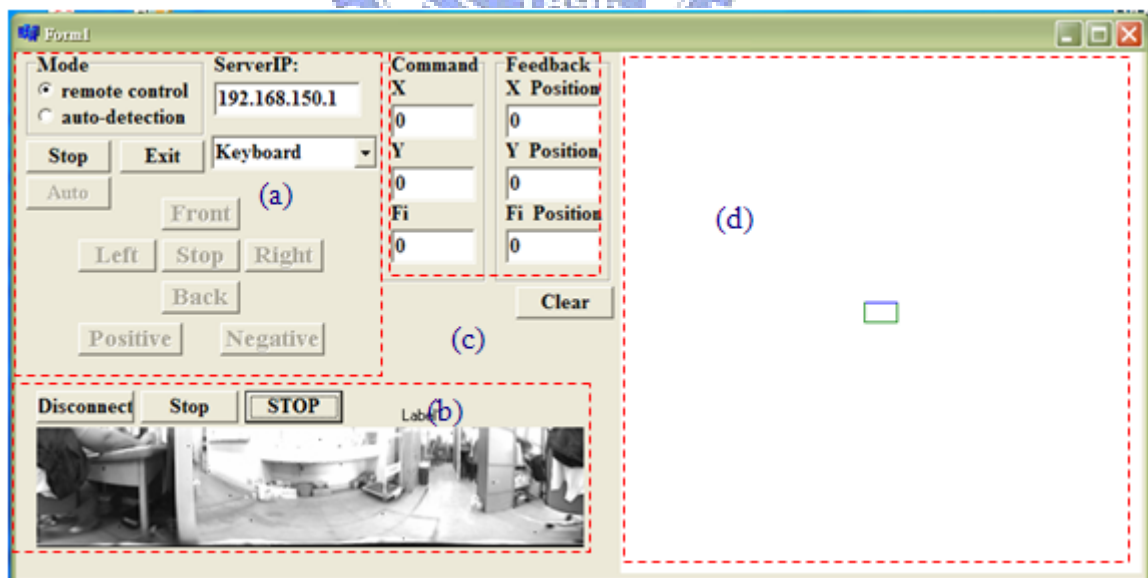


圖 4-27 Client 端控制介面

Server 端的軟體介面主要畫面分為三個部份：

- (a) 左邊為影像處理完後顯示，右邊為全方位攝影機所看到的原始影

像，當遠端選擇平台自主行為時，標示出所判斷到的目標物位置。

(b) 當選擇遠端遙控時，則平台端會啟動將影像展開的程式運算，影像展開後傳回 client 端供操作者觀看。

(c) Server 端的控制按鍵，包含影像連結處理等。

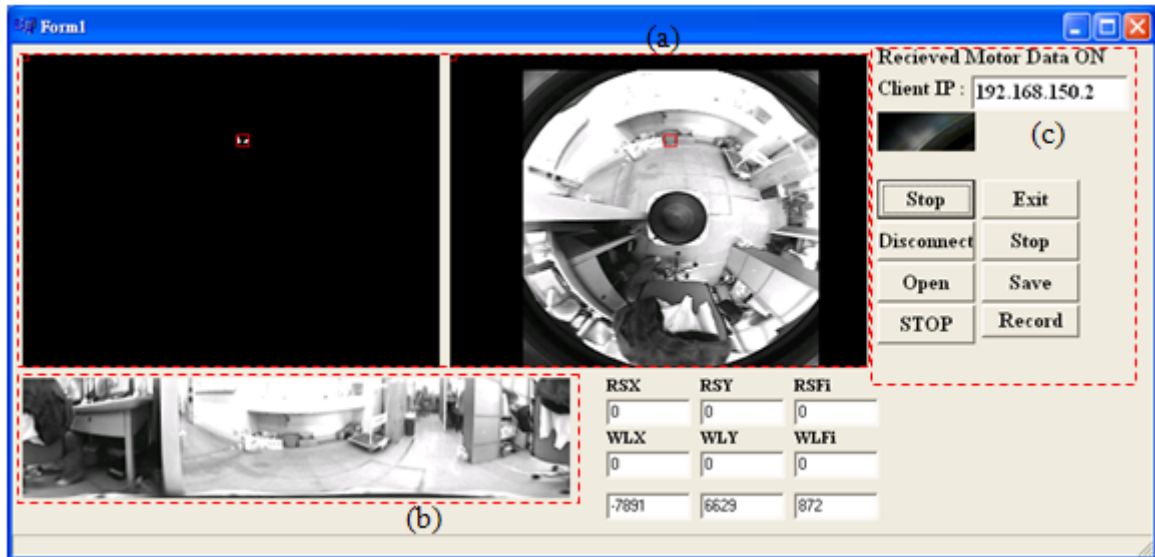


圖 4-28 Server 端控制介面

第五章 結論與未來發展

5.1 結論

根據以上的實驗結果，在此位本論文做出以下幾點結論：

1、全方位移動平台各軸控制誤差問題

首先分析單軸使用網路式與集中式的控制方式差異，並藉由導出四軸平台的運動模型，以 inverse kinematics 技術實現全向性平台之運動控制器，提升了在直線加旋轉路徑上的追跡能力。將平台控制於集中式與網路式在不同取樣時間下，於低速的運動下，則兩者會有相當的表現，若於高速時，則必須仰賴較快的取樣週期，所以必須使用集中式控制。

2、Encoder 與影像感測融合

由於 Encoder 對於平台的打滑不容易偵測出來，影像對於距離上的偵測可能會因為光亮度的影響會產生不穩定的現象，因此加入 Kalman Filter 來估測由影像所得到的位置，加入感測融合的機制，並使得平台移動穩定及準確性提升，於集中式與網路式的控制下，平台位置精密度約提升了 90%。

3、實現目標物追蹤與遠端控制平台

使得平台可以追蹤所設定的目標物，並當目標物移動時，平台可以穩定又快速的追蹤至目標物，證明此平台可以快速且穩定追蹤到目標物。並且平台可以藉由網路傳輸，將平台上影像傳回給操作者觀看，操作者亦可傳送平台速度命令來操控平台，進而實現整體平台網路化控制。

5.2 未來發展

本論文位全方位移動平台建立了基礎的架構，包含影像與底層的控制部份，未來還有許多地方可以繼續研究發展下去，在此列出數點未來發展的方向：

1、全方位移動平台運動控制方面

目前平台控制器在 X_w 、 Y_w 、 ϕ 三個方向所設計的 PID 參數皆相同，這對於不同路徑下的運動控制並不夠穩健，若能加入非線性的控制器，如 Fuzzy[28] 等，具有協調、適應能力的控制，將提升運動控制得追跡能力。

2、馬達控制方面

目前馬達控制的方式為電壓命令與 RS-232 命令兩種，由於 RS-232 的傳輸速率有限，因此整體花費在傳輸上的時間居多，未來可以加入更快的網路控制系統(NCS)，如 CAN 等，都可以提高 NCS 的控制的精密度。

3、感測融合方面

影像所偵測到的目標物距離及角度可以輔助 Encoder 降低距離與角度的誤差，但由於影像容易受到光亮度的變動影響，因此必須要在光亮度穩定的區域中實驗才不會造太大的誤差，若是能加上其他感測器，如電子羅盤、加速度計等，可以與影像及 Encoder 結合，將可更加改善平台的穩定性與精確性。

4、目標物追蹤方面

目前由影像中偵測一目標物進行相對的定位，若能加上定位點偵測來進行判別，將可使平台可以做到整體的定位，將增加整體平台運動的精確性。

參考文獻

- [1] J. Yu, S. Yu and H. Wang, “ Survey on the Performance Analysis of Networked Control Systems, ” *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 6, pp. 5068-5073, October 2004.
- [2] C. W. Cheng, C. L. Lai, B. C. Wang, and P. L. Hsu, “ The Time-delay Effect of Multiple-Network Systems in NCS, ” *SICE Annual Conference 2007*, 1C11-4, Sep. 18, 2007, Takamatsu JAPAN.
- [3] F. G. Pin and S. M. Killough, “A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, pp. 480-489, 1994.
- [4] K. Watanabe, “Control of an Omnidirectional Mobile Robot,” Proceedings of the 1998 IEEE Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia, pp. 51-60, 1998.
- [5] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S. G. Tzafestas, J. Tang and T. Fukuda, “Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 22, No. 3, pp.315-330, 1998.
- [6] J. Y. Choi, S. H. Ock, S. Kim and D. H. Kim, “Autonomous Omni-Directional Cleaning Robot System Design,” *International Conference on Control, Automation, and Systems*, Kintex, Korea, pp. 2019-2023, 2005.
- [7] Mark Ashmore, Nick Barnes, “Omni-drive robot motion on curved paths : The fastest path between two points is not a straight-line,” *Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Australia, pp. 225-236, 2002.
- [8] C.C. Tsai, Li-Bin Jiang, Tai-Yu Wang, Tung-Sheng Wang, “Kinematics control of an Omnidirectional Mobile Robot,” *Proceedings of 2005 CACS Automatic Control Conference Tainan*, Taiwan, d-three pp.13~18, 2005.

- [9] L. Huang, Y. S. Lim, David Li and Christopher E. L. Teoh, "Design and Analysis of a Four-wheel Omnidirectional Mobile Robot," *Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents*, Palmerston North, New Zealand, pp.425~428, 2004.
- [10] M. Yachida, "Omnidirectional Sensing and Combined Multiple Sensing," *Proceedings of 1998 IEEE and ATR Workshop on Computer Vision for Virtual Reality Based Human Communications*, pp. 20-27, 1998.
- [11] K. Kondo, Y. Yagi and M. Yachida, "Non-isotropic Omnidirectional Imaging System for an Autonomous Mobile Robot," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1228-1233, 2005.
- [12] M. Betke and L. Gurvits, "Mobile Robot Localization Using Landmarks," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 4, pp. 251-263, 1997.
- [13] Zi-Yuan Chen, Yu-Cheng Chen, Yin-Tien Wang, "Image-based Control of an Autonomous Robot with Omnidirectional Vision," *International Symposium on Industrial Embedded Systems*, pp. 142-147, 2007.
- [14] Mana Saedan, Chee Wang Lim and M. H. Ang, "Omnidirectional Image Matching for Vision-Based Robot Localization," *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp.17-22, 2006.
- [15] Yingjie Sun, Qixin Cao and Weidong Chen, "An Object Tracking and Global Localization Method using Omnidirectional Vision System," *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, P.R. China, Vol. 6, pp. 4730-4735, 2004.
- [16] N. Winters, J. Gaspar, G. Lacey and J. Santos-Victor, "Omni-directional Vision for Robot Navigation," *Proceedings of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp. 21-28, 2000.
- [17] F. Kobayashi, D. Masumoto and F. Kojima, "Sensor Selection based on Fuzzy

Inference for Sensor Fusion,” *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 305-310, 2004.

[18] <http://www.kornylak.com/>

[19] <http://www.montrrol.com.tw/>

[20] <http://www.ame-group.com/>

[21] J. Bruce, T. Balch and M. Veloso, “Fast and Inexpensive Color Image Segmentation for Interactive Robots,” *Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2061-2066, 2000.

[22] Greg Welch and Gary Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter,” Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, NC 27599-3175, September 17, 1997.

[23] 莊孝麟，全向性移動平台之精密運動控制設計，國立交通大學 電機與控制工程學系 碩士論文，2006.

[24] 陳致成，智慧型CAN-based汽車雷達防撞警告系統，國立交通大學 電機與控制工程學系 碩士論文，2003.

[25] 黃文吉，“C++ Builder與影像處理，” 儒林，2005.

[26] 連國珍，“數位影像處理，” 儒林，1992.

[27] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, “Digital Image Processing,” Prentice-Hall, 2002.

[28] C. C. Shing, P. L. Hsu and S. S. Yeh, “T-S Fuzzy Path Controller Design with the Kinematics Inversion for an the Omnidirectional Mobile Robot,” *accepted for the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics society*, Paris, France, 2006.

[29] M. S. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, O'Reilly, 2002.