

國立交通大學

電控工程研究所

碩士論文

行走輔助機器人傾斜地面之
順應性運動控制設計

Slope Surface Compliant Motion Control Design
of a Walking Help Robot



研究生：黃科棟

指導教授：宋開泰 博士

中華民國九十九年一月

行走輔助機器人傾斜地面之
順應性運動控制設計

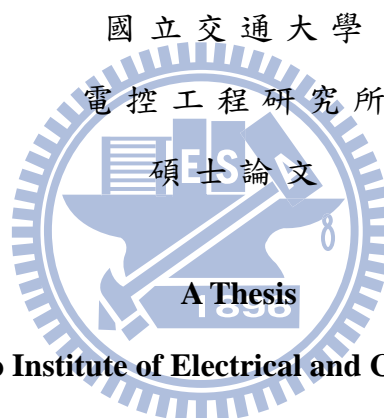
Slope Surface Compliant Motion Control Design
of a Walking Help Robot

研究生：黃科棟

Student: Ko-Tung Huang

指導教授：宋開泰 博士

Advisor: Dr. Kai-Tai Song



Submitted to Institute of Electrical and Control Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

January 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年一月

行走輔助機器人傾斜地面之 順應性運動控制設計

學生:黃科棟

指導教授:宋開泰 博士

國立交通大學電控工程研究所



本論文發展一個全向性的行走輔助機器人(Walking helper robot, Walbot)來協助老年人與行動不便者在室內的行走。經由傾斜地面順應性運動控制設計，使 Walbot 可以在傾斜的地面下擁有被動式的行為，因此使用者可以安全地操控行走輔助機器人來順應自己的意向移動。透過所設計的外力估測器，行走輔助機器人可以得知使用者的意向，不需要使用昂貴的力/轉矩感測器，即可達到順應性運動之功能。當行走輔助機器人操作在斜坡上時，其自身的重力分力將會影響機器人的動態響應，透過特別設計的重力補償器，使用者能夠如同在水平地面般的在傾斜地面上操控行走輔助機器人。實驗結果驗證所設計的控制方法是確實可行的。

Slope Surface Compliant Motion Control Design of a Walking Help Robot

Student: Ko-Tung Huang

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

Institute of Electrical and Control Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

In this thesis, an omni-directional walking help robot (Walbot) is presented for assisting elderly or handicapped people in indoor walking. A compliant motion controller with gravity compensation has been designed to make this powered robotic walker with passive behavior on a slope surface. This design allows a user to handle the robot safely to follow his/her motion intent. In order to detect user's motion intent, an external-force observer has been developed to replace expensive force/torque sensors. On a slope surface, the gravity force will affect robot's dynamic motion and contradict to the user's motion intent. A gravity compensator is proposed and added to the compliant motion control loop. Then, the user can walk with the robot on the slope as if it is on a flat surface. The proposed control method has been validated by experimental results.

誌謝

謹向我的指導教授宋開泰博士致上感謝之意，感謝他二年多來給於我許多在生活處事上的意見以及專業研究上的指導，以他豐富的學識與經驗，配合理論的應用，使得本論文得以順利完成，且無論在知識或生活等各方面都收穫良多。

感謝學長嘉豪、孟儒及格豪在實做及理論上的指導，以及感謝與我共同奮鬥的同學舒涵及巧敏的相互鼓勵及提攜，同時也感謝學弟信毅、宗暘、哲豪、傑巽、維峻及亦廷在研究途中的協助及在生活上帶來的樂趣。

最後，特別感謝我的父母以及所有家人，由於他們的辛苦栽培與鼓勵，在生活上給予我細心地關愛與照料，並支持我就讀碩士學位，使得我才得以順利完成此論文，在此我願以此論文獻給我最感激及最偉大的父母親。



目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖例.....	vi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 相關研究回顧.....	2
1.3 問題描述.....	8
1.4 章節說明.....	9
第二章 行走輔助機器人 Walbot 硬體設計.....	10
2.1 設計理念.....	10
2.2 硬體介紹.....	11
2.2.1 硬體組成.....	11
2.2.2 速度控制系統.....	12
2.2.3 電流感測系統.....	13
2.2.4 斜坡感測系統.....	14
2.3 行走輔助機器人之運動控制.....	16
2.3.1 運動模型推導.....	16
2.3.2 整體運動控制架構.....	20
第三章 傾斜環境下之順應性控制.....	22
3.1 外力估測器設計.....	22
3.1.1 基於機器人整體之外力估測器.....	25
3.1.2 傾斜環境下之重力補償.....	28

3.2 行走輔助機器人順應性控制設計.....	31
第四章 實驗結果.....	33
4.1 水平環境下之機器人順應性控制模擬.....	33
4.2 水平環境下之機器人順應性控制實驗.....	37
4.3 傾斜環境下之機器人順應性控制實驗.....	40
4.3.1 實驗環境介紹.....	41
4.3.2 四度斜坡實驗結果.....	42
4.3.3 八度斜坡實驗結果.....	45
第五章 結論與未來展望.....	48
參考文獻.....	50



圖例

圖 1-1、台灣人口統計與預測圖	1
圖 1-2、RT Walker 與 servo brake	3
圖 1-3、SmartCane 與 PAMM System	4
圖 1-4、SmartWalker 與 ASOC	4
圖 1-5、WHEE-II 實體圖與硬體配置示意圖	5
圖 1-6、Omni RT Walker 實體圖與控制架構示意圖	6
圖 2-1、行走輔助機器人底座與扶手設計圖	10
圖 2-2、行走輔助機器人 Walbot	12
圖 2-3、運動控制卡	13
圖 2-4、電流感測板方塊圖	14
圖 2-5、電流感測板	14
圖 2-6、傾斜計實體圖與量測角度軸向定義	15
圖 2-7、傾斜計角度量測實驗結果	15
圖 2-8、機器人朝向角 θ 為 0 時之運動示意圖	17
圖 2-9、行走輔助機器人之運動示意圖	19
圖 2-10、機器人整體運動架構	21
圖 3-1、單一馬達之外力估測器方塊圖	24
圖 3-2、行走輔助機器人之力幾何圖	26
圖 3-3、理想環境下行走輔助機器人之外力估測器方塊圖	27
圖 3-4、行走輔助機器人之重力分力示意圖	28
圖 3-5、含重力補償之行走輔助機器人外力估測器方塊圖	30
圖 3-6、順應性控制整體架構圖	32
圖 4-1、行走輔助機器人控制系統架構圖	33
圖 4-2、行走輔助機器人軸向定義圖	34

圖 4-3、Y 軸順應性控制模擬結果圖	34
圖 4-4、Y 軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖	35
圖 4-5、三軸順應性模擬結果圖	36
圖 4-6、三軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖	36
圖 4-7、水平環境下之機器人順應性控制實驗過程	38
圖 4-8、水平環境下之機器人順應性控制實驗結果	39
圖 4-9、水平環境下之機器人順應性控制實驗的四輪馬達電流大小	39
圖 4-10、4 度斜坡實驗平台	41
圖 4-11、8 度斜坡實驗平台	42
圖 4-12、4 度斜坡實驗結果	43
圖 4-13、4 度斜坡上不施加外力之實驗結果	44
圖 4-14、實驗過程中機器人停留在 4 度斜坡上	44
圖 4-15、8 度斜坡實驗結果	45
圖 4-16、平地與斜坡數據比較	47



第一章 緒論

1.1 研究動機

依據國際標準，當一個地區的老年人口(泛指 65 歲以上之人口)占人口總數的比例超過 7%時，便可以判定此區域已達到人口高齡化的水準。根據行政院經建會所進行的台灣人口統計與預測[1]，如圖 1-1 所示，在民國 97 年我國老年人人口所佔比例約為 10%，此後比例逐年增加，預計在民國 145 年所佔比例將達到 38%，由此可以證明台灣已逐漸步入高齡化的社會，這帶來的是一種社會型態的衝擊。當人的年紀老化，各種生理機能就會開始退化，許多老年人開始需要外力的協助與照護。但是由圖 1-1 中可以得知，工作年齡人口所佔比例所呈現的趨勢是逐年下降，這將會造成一個問題，一方面需要看護的老人越來越多，另一方面可以進行看護工作的青壯年人口越來越少，人力資源上的缺乏，將使得老人無法獲得妥善的照顧，也使得老年人看護所需的人力，對整個社會來說變成了一件沉重的負擔。

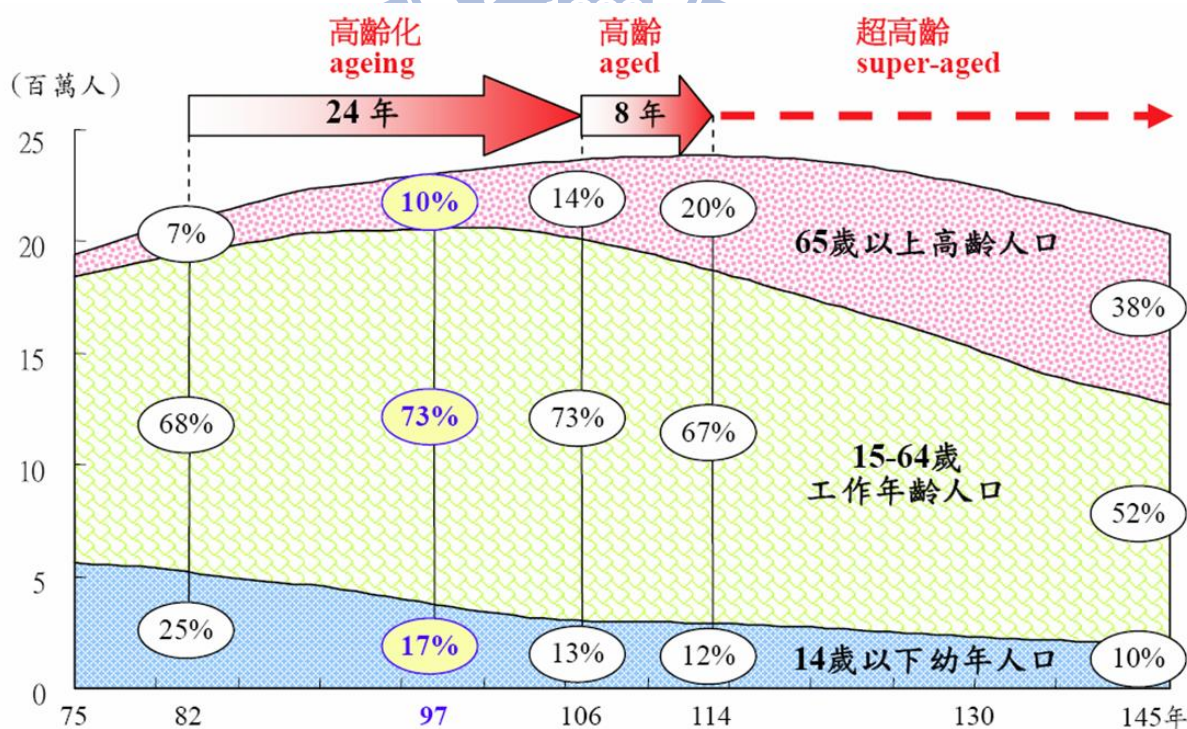


圖 1-1、台灣人口統計與預測圖[1]

近年來，機器人產業的蓬勃發展，協助解決了很多面的人力資源不足的困境，其中尤以產業用機器人(Industrial robots)為最，而這也帶動了許多機器人的技術與研究，逐漸拓展到機器人的另外一個分類：服務型機器人[2]，其中包括了醫療看護、環境清潔、巡邏保安等方面的功能。本論文所要研究的行走輔助機器人也屬於服務型機器人，其主要目的是要協助解決老年人看護上的人力資源缺乏。經由觀察探討後發現，除了臥病在床的老年人病患，大多數的老年人在生理機能退化後，受到的最大影響就是自主行動能力的衰減，即使想要進行自我照護，都因此而有心無力無法達成，所以本論文所設計的行走輔助機器人將著重於協助老年人回復自主移動的能力。基於目前許多公共場所都安置有無障礙空間，為了使所設計的行走輔助機器人更具有實用性，因此在設計上並不能只考慮水平的環境，而必須考量到斜坡環境對機器人操作上所產的影響，並讓使用者在斜坡上一樣能夠輕鬆的操控所設計行走輔助機器人。當然此行走輔助機器人所的使用者並不侷限於老年人，也適用於行動不便者或需要做移動復健的患者。

1.2 相關研究回顧

對於行走輔助系統的分類上，可以分為兩種運動模式：被動式與主動式。被動式指的是行走輔助系統的移動平台沒有任何動力驅動裝置(馬達、引擎…等)，反之則稱為主動式。在行走輔助系統的設計上有一個重點是需要被特別關注的，那就是安全性，會使用這類機器人的使用者，往往在行動能力上是需要幫助的，因此若不能確保行走輔助系統的安全性，反而有可能會對使用者造成危害。在這個方面，被動式平台擁有較大的優勢，當使用者在推動一個被動式平台時，並不會特別考慮「安全性」這個概念，這是因為被動式平台完全是依靠使用者的意向而移動，對使用者而言有較好的安全性，但主動式平台卻不然。主動式平台在移動上是需要由使用者下達指令來進行控制，當使用者的意向與其所下達的控制命令不相符時，就可能對使用者造成傷害，由此也可得知，相較於主動式平台，被動式平台能讓使用者擁有直覺式的操控感。不過，被動式平台也有其自身的缺點所在，因為缺乏動力驅動，在操控被動式平台時，使用者必須承擔平台上的所有重量，若是在其上搭載了過多的功能組件，往往會造成系統過重而使用者難以操

控。而主動式平台上地負載則完全由其所搭載的馬達或是引擎來承擔，因此就算搭載了許多的附屬功能，也不會對使用者產生影響。

在行走輔助系統的相關研究上，日本東北大學的 Kosuge 教授的實驗室設計了一款被動式的機器人 RT Walker[3]。如圖 1-2 所示，RT Walker 在運動方面並沒有使用動力驅動裝置，而是完全依靠使用者的出力來移動，利用其上所安裝的伺服煞車(servo brake)，RT Walker 可進行兩種運動控制。其一為使用者適應性控制(Human-adaptive control)，透過伺服煞車所提供的煞車力，改變系統等效模型中的質量與阻尼參數，讓 RT Walker 的移動速度可以控制在某一固定的數值之內，而不會因為使用者持續施力所產生的加速度，使系統的移動速度一直提高。另一種運動控制為操作環境適應性控制(Environment-adaptive control)，RT Walker 所搭載的雷射測距儀與地面呈現一個夾角，因此除了可以偵測周圍的障礙物外，還可以偵測地面的高低起伏，並藉此環境資訊改變左右兩輪的煞車力，協助使用者閃避障礙物。

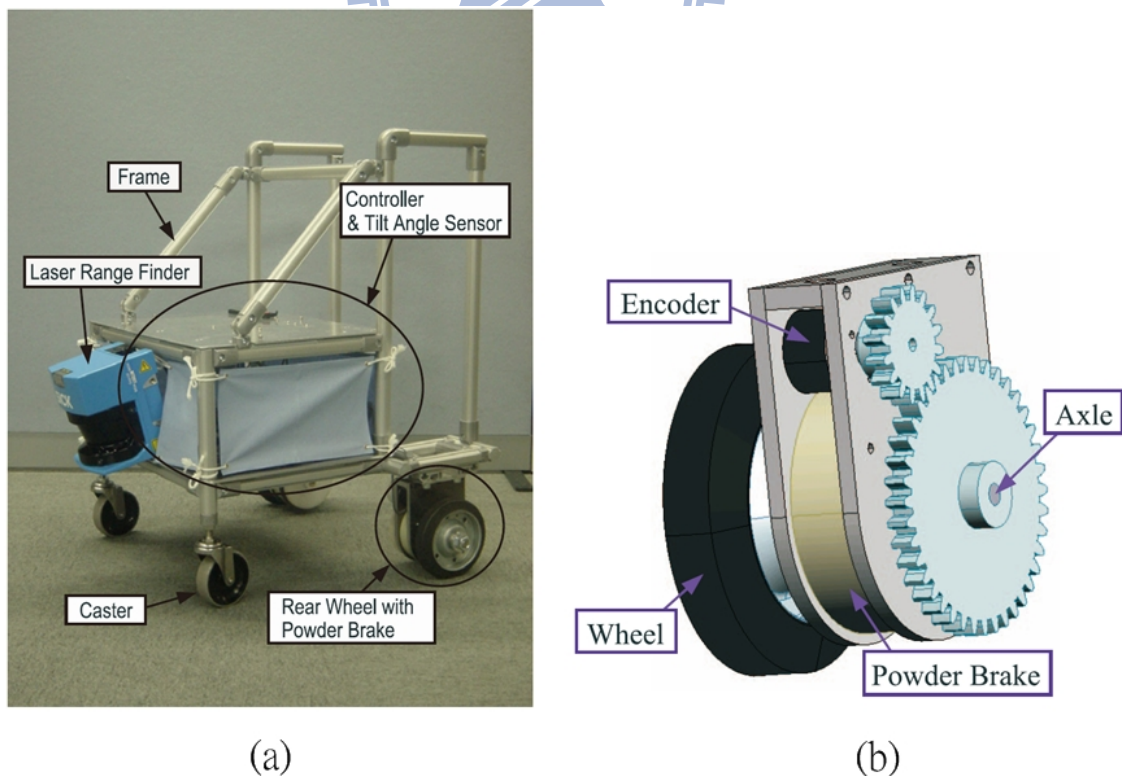


圖 1-2、RT Walker 與 servo brake[3]

在主動式平台的設計上，如何讓行走輔助系統能夠正確接收到使用者所下達的控制指令，且避免控制命令與使用者行動意向相違背是一個重點。美國麻省理工學院的 Dubowsky 教授的實驗室所開發的行動輔助系統 PAMM (Personal Aid for Mobility and Monitoring)[4-5]使用拐杖為基礎架構(SmartCane)，由圖 1-3(a)可看出在拐杖中間安置了一個六軸的力/轉矩感測器。因此當使用者朝其所想要前進的方向移動時，透過力/轉矩感測器可偵測出使用者施力的方向，並藉此進行速度控制命令的計算，如圖 1-3(b)所示。因為行走輔助系統的設計目的就是協助人類移動，所以必須考量到人類可以進行全向性移動的特點，因此 PAMM 系統也沿生出了具有全方性移動的 SmartWalker，透過特別設計的 ASOC(active split offset castor)讓系統的驅動輪可以如惰輪一般的自由旋轉。圖 1-4 為 SmartWalker 與 ASOC 的實體圖。

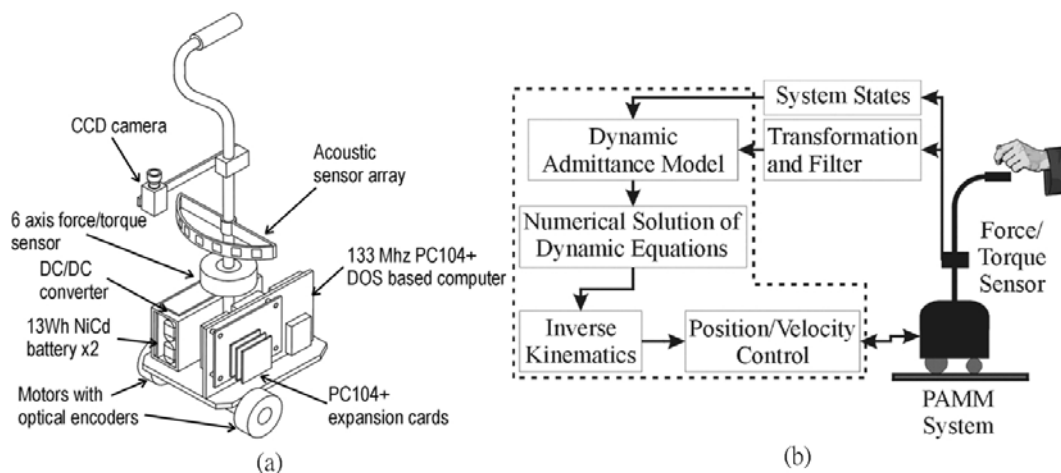


圖 1-3、SmartCane 與 PAMM System[4]

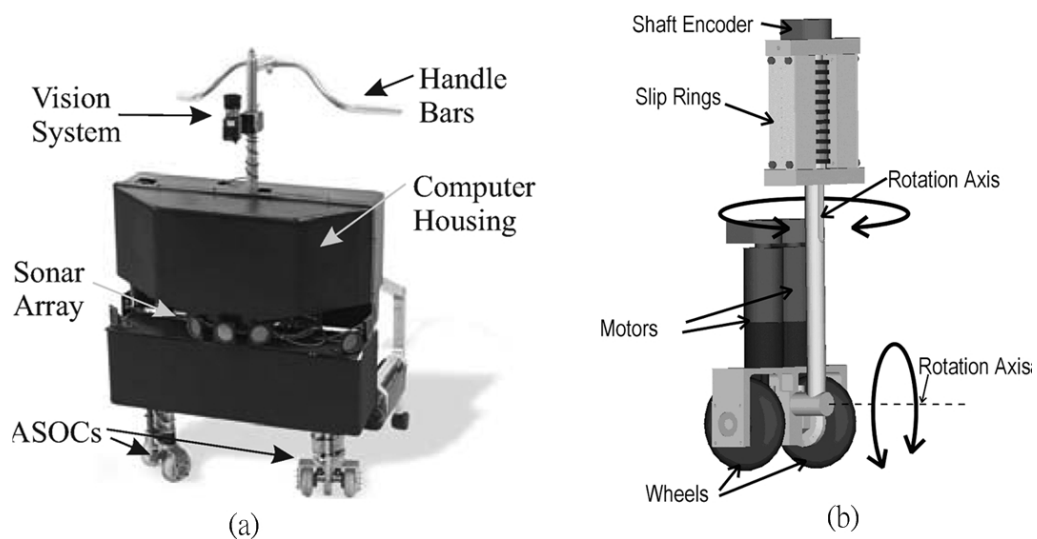


圖 1-4、SmartWalker 與 ASOC[5]

有別於先前所提到的行動輔助系統所採用的扶持設計，韓國 KAIST 大學的 Lee 教授的實驗室所研發的機器人 WHEE-II[6] 採用了 BWS(Body weight support mechanism) 架構，機器人透過協助支撐使用者自身的重量來完成行走輔助的目標。由圖 1-5 可知，WHEE-II 也是屬於主動式平台，控制系統能夠利用所安裝的加速度計與電子羅盤，來得知使用者的移動方向，而不需要使用者輸入速度控制命令來進行控制。

在前面的論述中，我們可以看得出來主動式平台與被動式平台的特點出現在各類機器人上，例如：被動式平台 RT Walker 的移動完全依靠使用者的推力，系統的速度與所受到的推力呈現正比關係，使用者的推力大，系統的速度就快，反之亦然，因此 RT Walker 擁有良好的安全性與操控性，但也因為缺乏動力驅動，而無法搭載太多功能。而主動式平台 WHEE-II 除了可以搭載較多的功能，更可以負擔使用者的體重。但是在系統的運動控制上，系統所得到的使用者動向資訊精確性，完全受限於所使用的感測器準確度，甚或當感測器干擾過大時，將使得系統接收到錯誤的資訊，進而產生錯誤的反應，對使用者造成危害。這兩種平台各有其優缺點，在文獻[7-9]中，Kosuge 教授提出了一種結合兩種平台優點的設計概念，基於被動式概念的主動式平台運動控制(Active type based on passive behavior concept)。圖 1-6(a)為基於此概念所設計的 Omni RT Walker，其基本

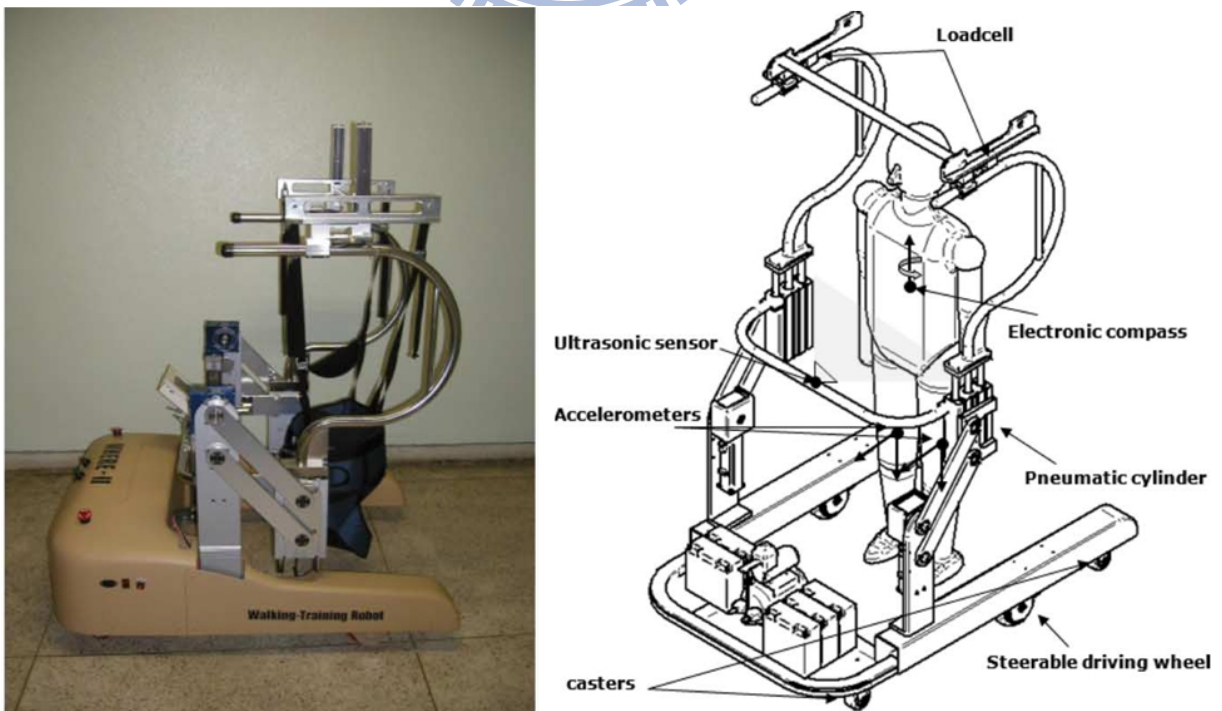


圖 1-5、WHEE-II 實體圖與硬體配置示意圖[6]

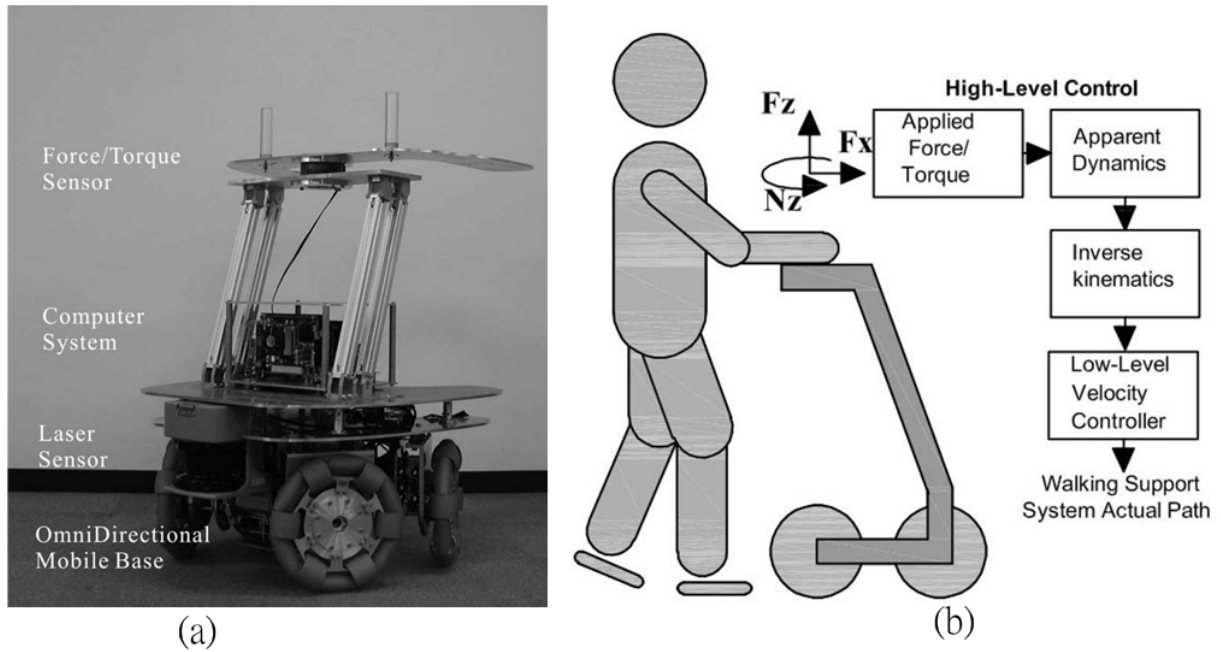


圖 1-6、Omni RT Walker 實體圖與控制架構示意圖[7]

架構屬於主動式平台，因此同其他主動式平台一樣，需要透過感測器將使用者的意向轉化為主動式平台的控制輸入，在這裡 Omni RT Walker 所使用的是力/轉矩感測器。但不同之處在於，經由將系統等效為簡單的質量-阻尼物理模型，並以此進行系統動態方程式計算所得出的速度控制命令，可以讓使用者感覺就像是在操控被動式平台般的靈活，我們稱這種控制方法為順應性控制(Compliant control)。並且因為系統本身為主動式平台，不存在被動式平台因系統過重而難以操控的問題，所以可以搭載較多的組件。美國德拉瓦大學的 Agrawal 教授也採用了相同的概念[10-11]，都是將主動式平台與被動式平台的優缺點進行截長補短的整合，不過解決問題的手段卻不同。透過系統動態方程式的推導，可以找出使用者所施加的力與各個輪子上所產生的力矩之間的關聯，因此只要能夠測量出使用者所施加給系統的力，就可以影響各個輪子的輸出力矩，並藉此完成系統的順應性控制。

大多數的行走輔助系統在設計控制架構時，所考慮的操作環境都是水平環境，但是在現實環境裡，真正水平環境所占的比例很小，大部分還是屬於傾斜的地面。當機器人操作傾斜環境下時，系統本身將會因此產生重力分力，其在系統的運動控制上將扮演很重要的角色。若我們將重力分力置之不理，也不根據重力分力修改原始的控制系統的

話，當行走輔助機器人操作在斜坡時，將有可能對使用者造成危害。

基於這樣的原因，Kosuge 教授在另一篇文獻[12]中對 RT Walker 的設計進行了改進，透過額外增加的傾斜計，使其可以得知目前環境的傾斜程度，並據此計算出目前系統所承受的重力分力。當使用者在斜坡上操控 RT Walker 時，突然將手離開機器人，此時機器人本應受到重力分力而滑動，但是伺服馬達將會提高煞車力，使其與重力分力相抵消，此時機器人則會如同停在平地一般的停在斜坡上。雖然當系統在停止狀態時，重力分力會與煞車力相抵消，但是在行走狀態下，系統所產生的重力分力將會完全由使用者承受，造成使用者的負擔。因為被動式平台沒有驅動裝置可以協助使用者承受重量，因此唯一可以減輕這種現象的方法就是讓被動式平台的重量變輕。因此在文獻[13-14]中，則使用拐杖(IP Cane)來建構被動式平台。

德國的 Morales 等人所研究的 ALACRANE[15] 機器人包含了一個履帶傳動平台與一個可以旋轉的機械手臂。ALACRANE 的主要功能是執行探索與救援任務，因此常常需要在地面高低起伏不平的環境下作業，因此探討重力分力對其所造成的影響是很重要的。而且隨著其機械手臂的旋轉位置不同，系統的重心位置也會隨著改變，因此就算可以得知當下的環境傾斜角度，還必須計算出當下的系統重心位置，才可以進行進一步的重力補償運算。

日本的 Hori 等人則是利用市售的傳統輪椅(YAMAHA JWII)來進行研究[16]。其在輪椅的輪子上安置馬達以及轉矩感測器，當使用者依照傳統輪椅的方式進行移動時，控制系統可以偵測使用者施加於輪子上的轉矩大小，並控制馬達根據此出力來放大使用者施力。而我們知道當傳統輪椅在上下斜坡的時候是很容易造成危險地，而其研究的目地在於探討該輪椅在斜坡環境下如何避免輪椅傾倒，以及在斜坡上如何協助使用者抵抗重力分力的影響。國外尚有一些相關於斜坡環境下，如何補償重力分力的研究[17-18]。

在主動式平台的控制上，大部分的系統都採用力/轉矩感測器來將使用者的意向轉換為電子訊號，這是因為相較於電子羅盤或是加速度計，力/轉矩感測器所測得的資訊最符合使用者的意向。但是使用此感測器的缺點在於高昂的價格，而在系統的硬體上也需要進行特殊的設計，且使用者只能在安裝感測器的地方對機器人進行操控。基於這些缺

點，我們將嘗試若不使用力/轉矩感測器，是否有其他方法可以偵測使用者的施力資訊。在日本的 Ohnishi 教授經由馬達的標準物理模型推導出了一個回授估測器[19-20]，透過量測馬達的電流與轉速資訊，經由馬達的動態方程式，可測出此時馬達所受的額外力矩。透過這個方法就不需要使用力/轉矩感測器，也可偵測使用者的所施外力，且使用者可以在系統的任意位置施加外力，而不需要受限於某一處，因為此法只與馬達本的資訊有關。在下面的章節我們將詳細論述這個方法。

1.3 問題描述

本論文的研究目標在於設計一個行走輔助機器人，其主要目的是協助老年人或行動不便者回復自主移動的能力。考慮到老年人的生理機能開始衰退，因此所設計的機器人在操控上不能給予使用者太大的負擔，並且要能提供給老年人直覺式的操控，讓使用者不需要透過控制器來下達速度命令，只需要輕輕推動機器人，機器人就可以偵測到使用者的推力大小與方向，並藉此改變其自身的速度與朝向角。且對於行走輔助機器人而言，系統的安全性是最重要的，即使在操作過程中使用者突然將雙手離開機器人，機器人的狀態也要馬上保持在靜止。

在相關研究上，大都使用力/轉矩感測器來取得使用者施力資訊，但使用力/轉矩感測器有成本較高與設計複雜等問題，所以交大林振暘與宋開泰根據行走輔助機器人上的馬達轉速與電流資訊，設計一個外力估測器來估測系統所受到的外界施力[21]。

為了讓行走輔助機器人能夠在現實環境中使用，我們必須考慮到地面傾斜對機器人的影響，其中最主要的影響是因此而產生的系統重力分力。若是系統無法得知當下環境的傾斜程度，則在進行順應性控制時，系統會將重力分力誤判為是另外一個使用者地意向，進而對真正的使用者意向造成影響。所以當機器人在傾斜地面上進行操縱時，機器人必需要即時偵測出操作環境的傾斜程度，進而計算出此時系統的重力分力，更進一步的根據所受到的重力分力大小來增減馬達的出力，讓使用者在斜坡上就如同在平地上操作機器人一般。

1.4 章節說明

本論文分為五個章節。第一章主要描述相關研究背景，與說明進行本研究的動機，以及最後要達到研究目標。第二章主要介紹行走輔助機器人 Walbot 的硬體，包括基礎移動平台的設計理念、機器人自身資訊的取得與環境資訊的偵測，最後將推導出系統的運動模型。第三章為行走輔助機器人 Walbot 的控制系統設計，如何在傾斜環境下也能使用無力感測器的順應性控制，將會在本章進行論述。第四章為實驗結果，實驗環境分為水平環境與傾斜環境，由實驗結果來佐證第三章所設計的控制系統是可行的，且可達成第一章所設定的研究目標。第五章為本論文的結論與未來展望。



第二章 行走輔助機器人 Walbot 硬體設計

2.1 設計理念

在行走輔助機器人的設計之初[22]，我們即決定採用主動式的移動平台來作為機器人的基座。雖然主動式平台在控制系統方面比被動式平台複雜許多，但是站在使用者的立場上，主動式平台可以搭載較多的功能且不會造成使用者操作上的負擔，才是我們考量的重點，而關於安全上的考量，在第三章會有完整的解決方法。而在平台的選擇上，考量到人類的移動方式是屬於全方向性的移動，為了使機器人能夠符合這個特性，所以採用了四個全向輪來架構機器人的基礎移動平台，藉此提供給使用者更佳的操作性。

在四個全向輪的配置上，我們特別採用左右輪對稱且相互間隔 120° 、前後輪間隔 60° 的月弧狀設計，如圖 2-1(a)所示，而非正交 90° 的圓形設計，這是為了讓使用者在行走時，雙腳能夠有擺動的空間而特別設計的配置。圖 2-1(b)為行走輔助機器人上所特別設計的扶手。此扶手提供給使用者多樣化的扶持方式，讓使用者可以依據自己的使用習慣或抓取、或握持地操控行走輔助機器人。扶手配置在離地面高度約為 89.3 公分，大約是一般人手肘附近的高度，這讓使用者可以自然的攙扶於機器人上。為了讓使用者能夠輕鬆的對扶手施力，扶手整體呈現為 15° 的上翹設計，讓使用者可以順著手臂彎曲的方向施力。

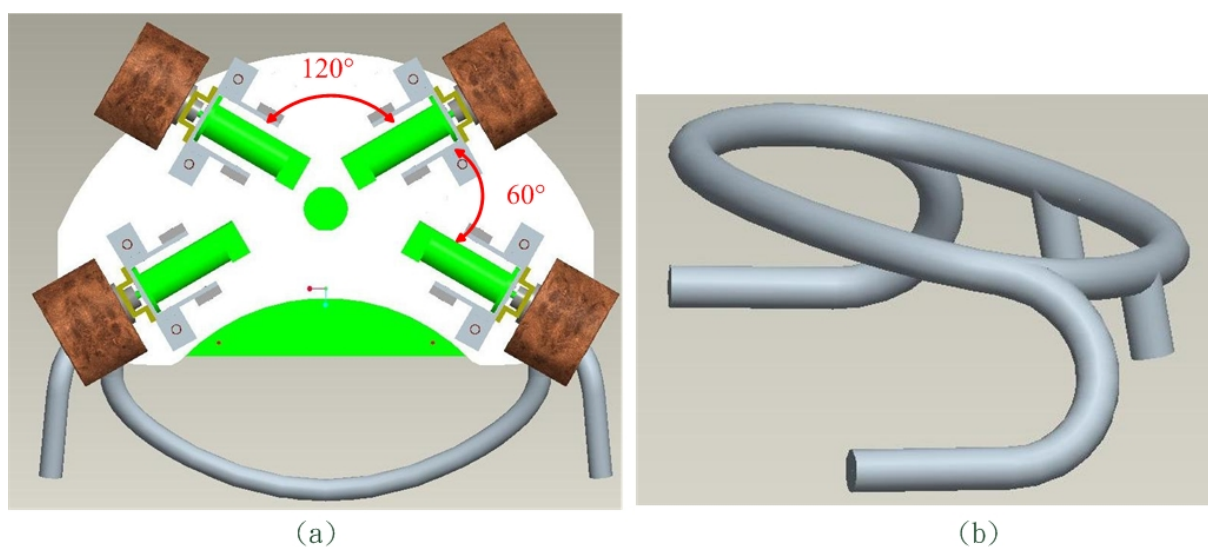


圖 2-1、行走輔助機器人底座與扶手設計圖

2.2 硬體介紹

行走輔助機器人 Walbot 的體積 (長*寬*高)為 60*45*89.3 立方公分，重量為 44.6 公斤。圖 2-2 為行走輔助機器人 Walbot 的硬體配置圖，共可以分為五個部分。第一部分為機器人的基礎移動平台，由位於最下層的直流馬達與全向輪所組成。馬達是採用 FAULHABER 所生產的直流馬達，型號為 3863H012C，工作電壓 12 伏特，額定轉速為每分鐘 6700 轉，並搭配 14:1 的減速齒輪盒來提高馬達的出力，以及解析度為 500 lines 的軸編碼器來回授馬達的轉速。全向輪是由 KORNYLAK 公司所製作，型號 RW28，主輪上共有六個滾動輪，直徑為 12 公分，鋁製輪身，滾動輪為硬質橡膠，每輪重約 1.4 公斤且可負重 100 公斤。六個滾動輪的轉動方向為主輪的軸心方向，因此全向輪擁有具有全向性的移動能力。

第二部分為機器人速度控制系統與電流感測系統，主要功能為控制馬達以及回傳所需的馬達轉速與電流資訊，這部分在後面小節會詳細說明。第三部分為機器人的操作系統，所採用的架構為 PC-based，主機板是威強公司所生產的工業電腦，型號為 NOVA-6612，並搭配 2GHz 之 Intel CPU。使用 PC-based 優點在於強大的運算處理能力以及良好的擴充性。第四部分為機器人搭載的感測器模組，目前搭載的有傾斜計以及雷射測距儀。透過雷射測距儀所感測出的周遭環境障礙物資訊，機器人可以主動閃避障礙物。而傾斜計是我們所設計的斜坡感測系統使用的主要感測器，目的是為了即時偵測環境中的地面傾斜度大小，以利控制系統進行重力補償，在後面小節將會詳細說明。第五部分為安置在最頂端的扶手，供使用者操控以及攙扶使用。

2.2.1 硬體組成

在本論文的設計中，行走輔助機器人的硬體組成可分為兩個環節：內在運動控制與外界環境資訊感測。在內在運動控制環節中，透過速度控制系統、電流感測系統以及下一章節要介紹的外力估測器與順應性控制器，行走輔助機器人可以順應使用者的意向來改變自身的速度與朝向角，呈現出如同被動式平台的行為模式。而外界環境資訊感測環節在本論文中指的是斜坡感測系統。經由斜坡感測系統，行走輔助機器人可以得知目前

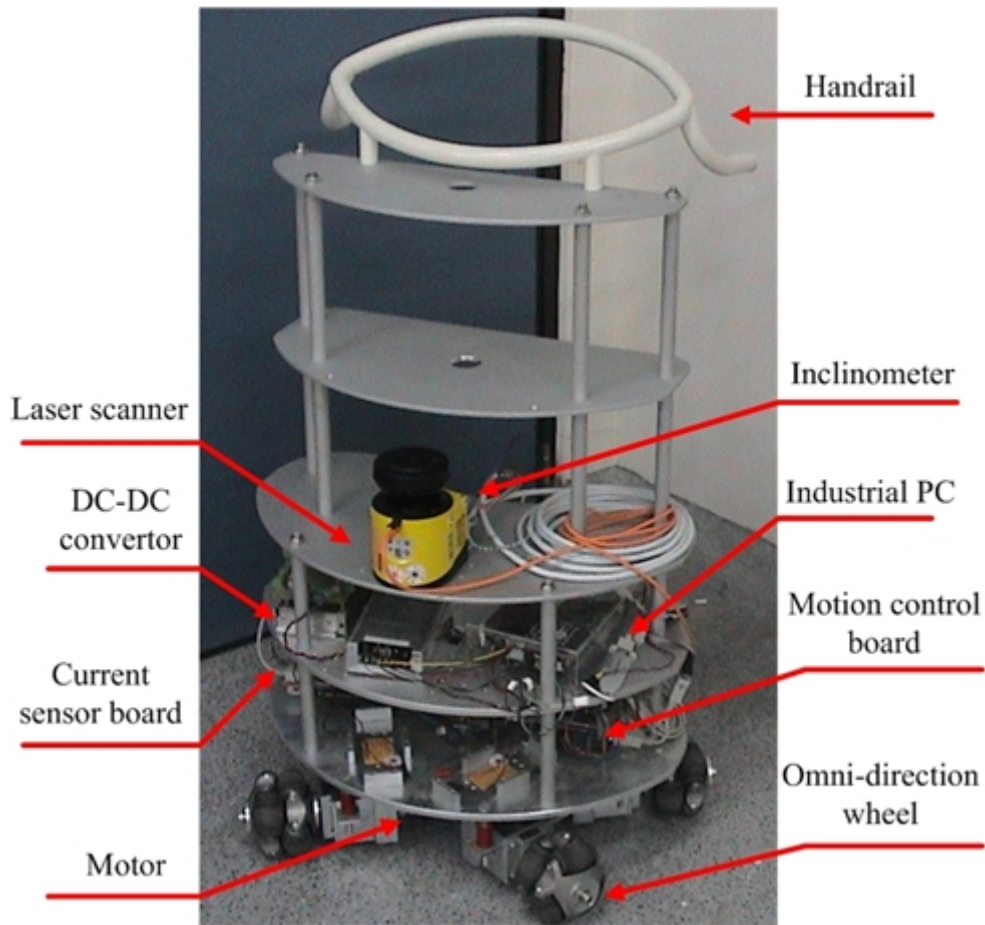


圖 2-2、行走輔助機器人 Walbot

操作環境地面的傾斜程度，並主動補償因地面傾斜所產生的重力分力，進而提供給使用者猶如在水平地面上操作的感受。

2.2.2 速度控制系統

速度控制系統主要由下列的幾個元件所組成：工業電腦、運動控制卡、馬達伺服驅動器以及軸編碼器。其中運動控制卡為本實驗室所自行開發，如圖 2-3 所示，其核心為 TI 出產的 TMS320F240 DSP 處理器。此 DSP 不僅有 PWM 輸出可用於馬達速度命令，亦包含有 QEP 解碼電路，可直接讀取軸編碼器訊號，做為速度控制的回授訊號。此運動控制卡的功用為依據電腦端所下達的速度命令，輸出穩定的 PWM 訊號給馬達伺服驅動器，以及記錄軸編碼器所回傳的馬達轉速資訊，且每 51ms 回傳軸編碼器的脈波數至電腦端，使電腦可透過脈波數計算出馬達轉速。而馬達伺服驅動器的功能為接收運動控制卡的 PWM 訊號，並利用放大後的 PWM 訊號來驅動馬達，因此在馬達伺服驅動器的

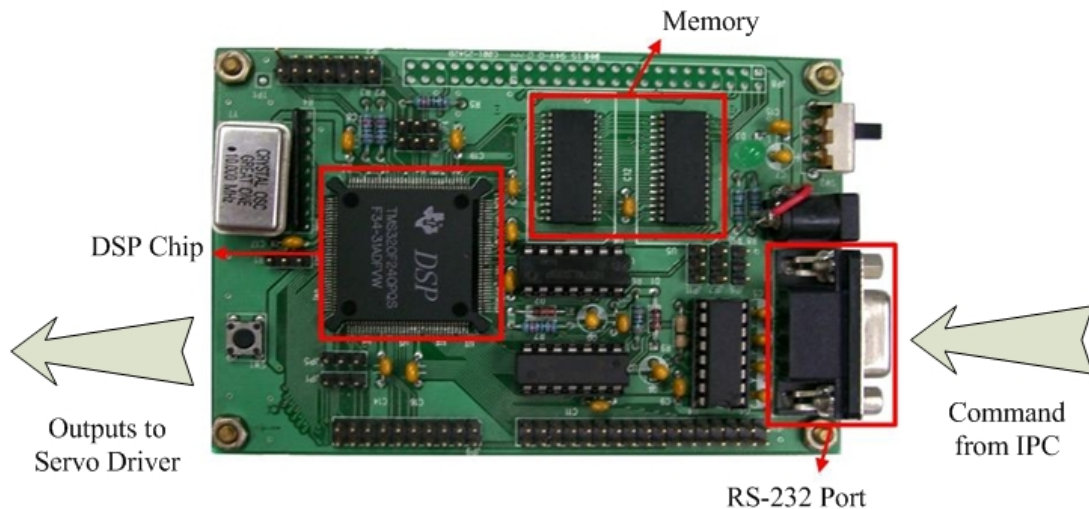


圖 2-3、運動控制卡

選擇上必須選擇可以承受大電流的驅動器。論文中使用的是 Pololu 30A 高功率 DC 馬達驅動器，其優點是體積小且在 20 伏特的電壓輸入下可耐連續電流達 30 安培。

2.2.3 電流感測系統

根據馬達物理特性可以得知，在馬達轉速固定時，馬達出力與馬達電流呈現一個正比的關係，所以我們要想得知馬達出力的大小，就需要先量測出驅動馬達的電流大小。電流量測系統主要由兩個電流感測板所組成，每個電流感測板可以量測兩個馬達電流 [22]，圖 2-4 為電流感測板方塊圖，由霍爾元件 LTS 25-NP、OPA LM358、ADC0804 以及微控器 AT89C51 所組成。首先，利用霍爾感測元件(LTS 25-NP)將馬達電流轉換為類比電壓訊號，由於此霍爾感測元件在一般情況下的電壓輸出為 1.9 伏特至 3.1 伏特，但類比-數位轉換晶片(ADC0804)是將 0 伏特至 5 伏特的類比電壓轉換為 8 bit 的數位訊號，因此我們利用運算放大器(OPA LM358)將此電壓區間作線性放大以符合 ADC0804 所需的 0 伏特至 5 伏特，最後利用微控器(AT89C51)控制 ADC 將類比訊號轉換為數位訊號後，使用 RS-232 串列埠傳回工業電腦進行下一步的運算。圖 2-5 為電流感測板實體圖。

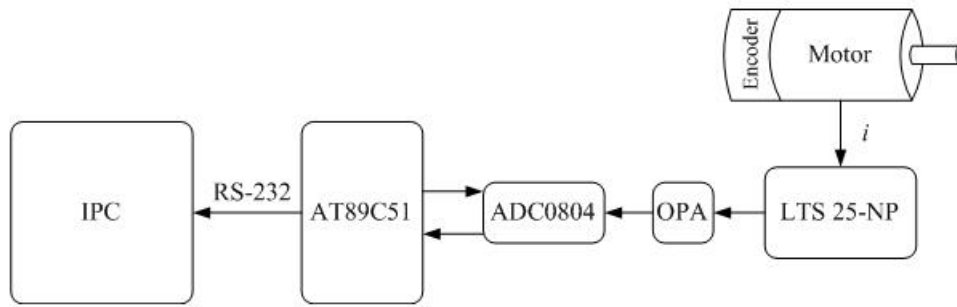


圖 2-4、電流感測板方塊圖[22]

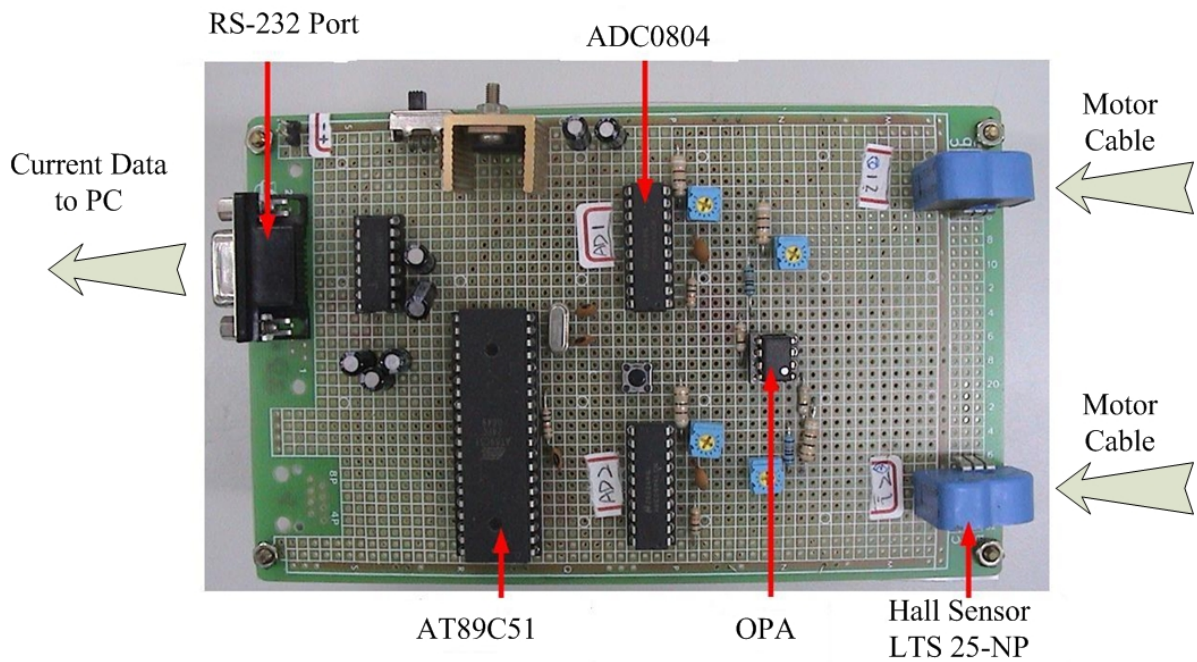


圖 2-5、電流感測板[22]

2.2.4 斜坡感測系統

在實驗環境的選擇上，許多的行走輔助機器人相關文獻中，都是設定為水平地面，並且這些研究成果都是以水平地面為基礎所完成的。不過在現實環境下，真正水平的地面畢竟是少數，因此為了讓行走輔助機器人能夠在現實環境裡幫助使用者，必須要考慮傾斜地面對行走輔助機器人所造成的影響，進而提高行走輔助機器人的適用環境。為了這個目的，行走輔助機器人必須要能夠即時得知目前環境的傾斜角度。

斜坡感測系統使用傾斜計來偵測目前環境的傾斜程度，並透過 RS-232 串列埠將角度值傳回工業電腦進行進一步的運算。傾斜計是採用拿鐵盒子公司所出產的 3D 磁力計與加速度規感應模組，尺寸大小為 30*35 mm，額定電壓為 5V，圖 2-6 為傾斜計實體圖

與量測角度軸向定義。此傾斜計的角度量測範圍為 Pitch 軸 $0^{\circ}\sim 90^{\circ} / 270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 、Roll 軸 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 、Yaw 軸 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ，量測解析度為 1° 。圖 2-7 為傾斜計的角度量測實驗結果，我們將傾斜計安放於角度刻度盤上，透過旋轉刻度盤的方式，提供給傾斜計不同的角度，並記錄其回傳的角度值。圖 2-7 中橫軸為刻度盤的角度值，縱軸為傾斜計 100 次回傳值的平均。

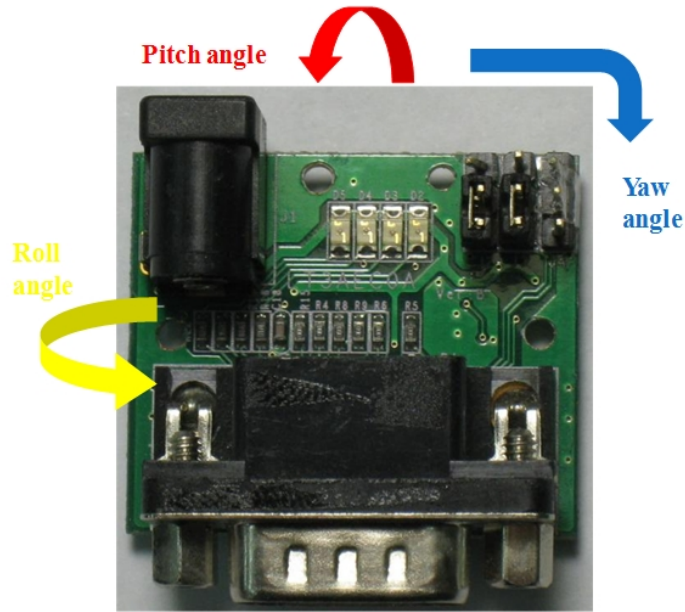


圖 2-6、傾斜計實體圖與量測角度軸向定義

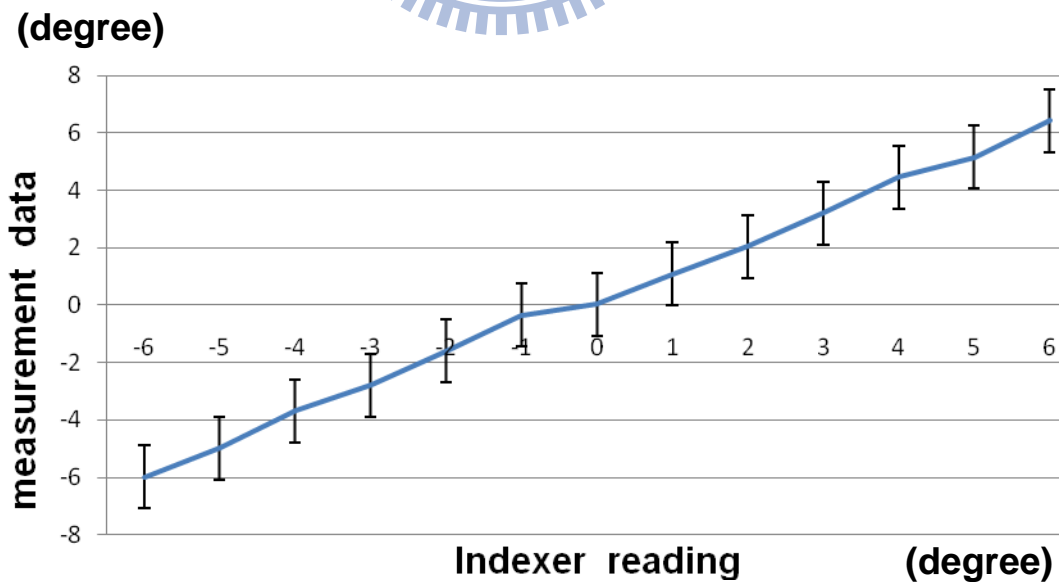


圖 2-7、傾斜計角度量測實驗結果

2.3 行走輔助機器人之運動控制

在下一章節所要介紹的順應性控制器中，行走輔助機器人可以根據使用者的意向來呈現出相對應的機器人運動速度。而在速度控制系統中，電腦端下達給運動控制卡的速度命令為各輪子的轉速命令。透過接下來所要推導的行走輔助機器人運動模型 (Kinematic Model)，我們可以得知機器人的運動速度與各輪轉速這兩者之間的關係，並藉此可以達到機器人整體之運動控制。

2.3.1 運動模型推導

在推導的過程中，我們使用了兩個座標系：世界座標平面 Σ_G 與行走輔助機器人座標平面 Σ_R ，其中將機器人坐標平面的原點定義為機器人的中心點，亦即四個輪子軸心的交匯點。根據機器人的移動平台架構可以得知， d_1 和 d_2 為機器人中心點至輪子中心點的距離，四輪軸心與 X_R 軸的最小夾角為 $\pi/6$ 。我們將機器人的朝向角 θ 定義為 Σ_R 的 Y_R 軸與 Σ_G 的 X_G 軸夾角，圖 2-8 為機器人朝向角 θ 為 0 時的運動示意圖。為了推導上的方便，我們先定義一個旋轉矩陣 $\mathbf{R}(\delta)$ ， δ 為向量旋轉的角度，當 δ 角度為正值時，則向量將依逆時針旋轉 δ 角度：

$$\mathbf{R}(\delta) = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

由移動平台架構可以得知，機器人座標平面 Σ_R 中各輪子中心點的位移向量 \mathbf{P}_{iR} 分別為

$$\mathbf{P}_{iR} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta_i) \cdot L_i \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1 \sim 4 \quad (2-2)$$

其中 L_i 為機器人中心點到各輪子的距離，各值表示為 $L_1 = L_2 = d_1$ 、 $L_3 = L_4 = d_2$ ， θ_i 為各輪子位移向量 \mathbf{P}_{iR} 的角度，各值為 $\theta_{1 \sim 4} = \pi/6$ 、 $5\pi/6$ 、 $-5\pi/6$ 、 $-\pi/6$ 。由圖 2-8 我們可以得知當機器人朝向角為 0 時， Σ_R 與 Σ_G 角度相差 $-\pi/2$ ，此時在世界座標平面 Σ_G 中各輪子

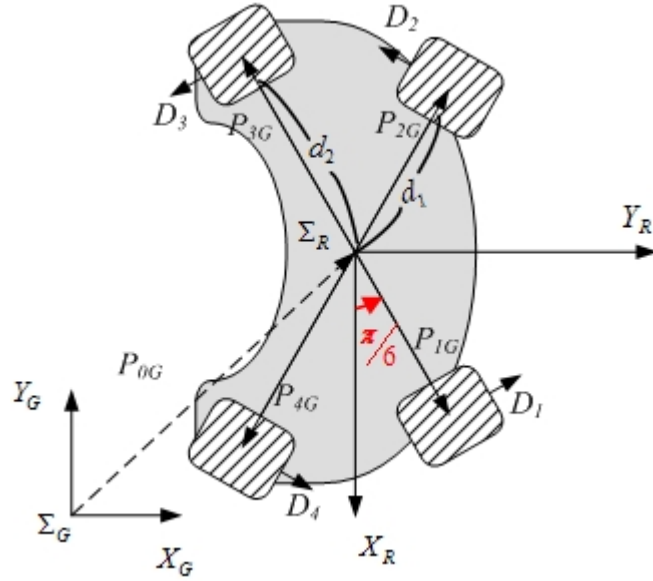


圖 2-8、機器人朝向角 θ 為 0 時之運動示意圖

中心點與機器人中心點的位移向量 P_{iG} 為

$$P_{iG} = R(-\pi/2) \cdot P_{iR}, \quad i = 1 \sim 4 \quad (2-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{1G} = d_1 \begin{bmatrix} \sin \pi/6 \\ -\cos \pi/6 \end{bmatrix}, P_{2G} = d_1 \begin{bmatrix} \sin \pi/6 \\ \cos \pi/6 \end{bmatrix} \\ P_{3G} = d_2 \begin{bmatrix} -\sin \pi/6 \\ \cos \pi/6 \end{bmatrix}, P_{4G} = d_2 \begin{bmatrix} -\sin \pi/6 \\ -\cos \pi/6 \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

而 P_{0G} 為行動輔助機器人的移動平台中心點位置向量，表示為 $P_{0G} = [x_G \quad y_G]^T$ ，同時我們定義各輪的切線方向單位向量為 D_i ，當機器人朝向角 θ 為 0 時，各輪子轉動方向的單位向量 D_i 為

$$D_i = \frac{1}{L_i} R\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot P_i, \quad i = 1 \sim 4 \quad (2-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 = \begin{bmatrix} \cos \pi/6 \\ \sin \pi/6 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} -\cos \pi/6 \\ \sin \pi/6 \end{bmatrix} \\ D_3 = \begin{bmatrix} -\cos \pi/6 \\ -\sin \pi/6 \end{bmatrix}, D_4 = \begin{bmatrix} \cos \pi/6 \\ -\sin \pi/6 \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

從圖 2-9 中可以得知，當機器人朝向角 θ 不為 0 時，各輪子在世界座標的位置向量 S_{iG}

為機器人中心點位置向量加上隨機器人朝向角旋轉的各輪子位移向量：

$$\mathbf{S}_{iG} = \mathbf{P}_{0G} + \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{P}_{iG} \quad , \quad i = 1 \sim 4 \quad (2-5)$$

其中的 θ 為機器人的朝向角。將各輪子的位置向量對時間微分後我們可以得到各輪子中心點的速度 \mathbf{v}_i ：

$$\mathbf{v}_i = \frac{d}{dt}(\mathbf{S}_{iG}) = \dot{\mathbf{P}}_{0G} + \dot{\mathbf{R}}(\theta) \cdot \mathbf{P}_{iG} \quad , \quad i = 1 \sim 4 \quad (2-6)$$

得到了各輪子中心點的速度後，還必須將其轉換為各輪子的切線方向速度。將方程式(2-4)中的切線單位向量隨機器人朝向角旋轉後，與方程式(2-6)互做內積即可得到各輪子的切線方向速度，如方程式(2-7)所示。

$$\begin{aligned} V_i &= \mathbf{v}_i^T \cdot \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{D}_i \\ &= \dot{\mathbf{P}}_0^T \cdot \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{D}_i + \mathbf{P}_i^T \cdot \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \cdot \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{D}_i \quad , \quad i = 1 \sim 4 \end{aligned} \quad (2-7)$$

因此，各輪子的切線方向速度 V_i 為

$$\begin{cases} V_1 = \cos(\theta + \pi/6) \dot{x}_G + \sin(\theta + \pi/6) \dot{y}_G + d_1 \dot{\theta} \\ V_2 = -\cos(\theta - \pi/6) \dot{x}_G - \sin(\theta - \pi/6) \dot{y}_G + d_1 \dot{\theta} \\ V_3 = -\cos(\theta + \pi/6) \dot{x}_G - \sin(\theta + \pi/6) \dot{y}_G + d_2 \dot{\theta} \\ V_4 = \cos(\theta - \pi/6) \dot{x}_G + \sin(\theta - \pi/6) \dot{y}_G + d_2 \dot{\theta} \end{cases} \quad (2-8)$$

其中 $[\dot{x}_G \quad \dot{y}_G \quad \dot{\theta}]^T$ 代表機器人中心點在世界座標下的速度。將 (2-8) 寫成矩陣形式，則 $\mathbf{T}_v(\theta)$ 代表機器人中心點在世界座標平面的速度向量與四輪切線速度向量的轉換矩陣。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_G R_W \omega_1 \\ K_G R_W \omega_2 \\ K_G R_W \omega_3 \\ K_G R_W \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \pi/6) & \sin(\theta + \pi/6) & d_1 \\ -\cos(\theta - \pi/6) & -\sin(\theta - \pi/6) & d_1 \\ -\cos(\theta + \pi/6) & -\sin(\theta + \pi/6) & d_2 \\ \cos(\theta - \pi/6) & \sin(\theta - \pi/6) & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_v(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

其中 ω_i 為輪子的轉動角速度， K_G 為馬達齒輪比， R_W 為輪子半徑， θ 為機器人的朝向角。

在上述的推導中，我們在世界座標平面下得到了轉換矩陣 $\mathbf{T}_v(\theta)$ ，該矩陣為一變數矩陣，且會隨著機器人朝向角 θ 不同而變動，這將會造成一個問題的產生。即使行走輔

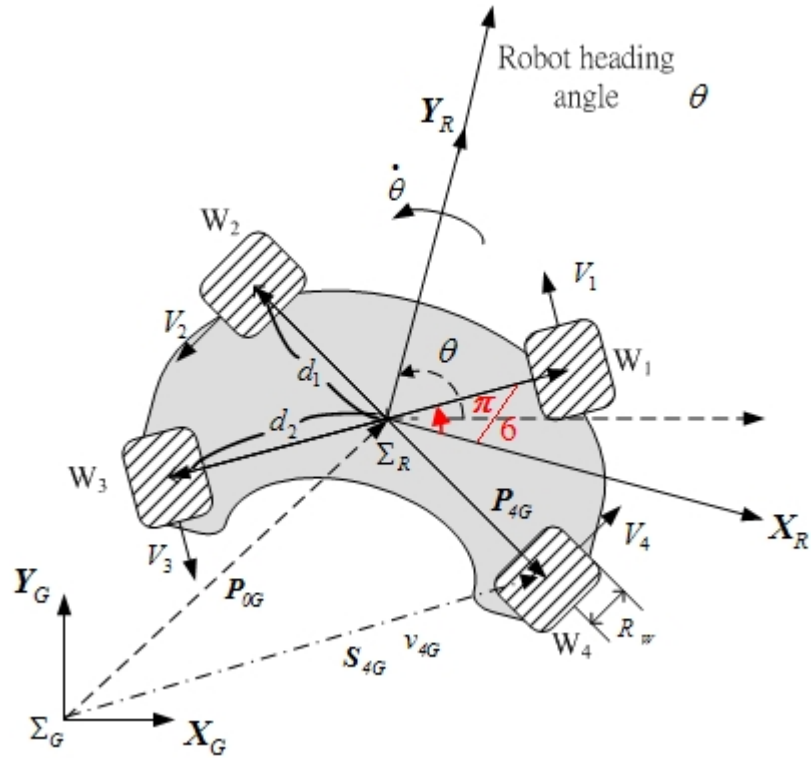


圖 2-9、行走輔助機器人之運動示意圖

助機器人停下不動時，當世界坐標平面設定的不同，機器人的朝向角就會不同，而轉換矩陣 $T_v(\theta)$ 也會隨之改變。由圖 2-9 可以得知世界坐標平面 Σ_G 與行走輔助機器人座標平面 Σ_R 轉換關係，當機器人的朝向角為 θ ，機器人中心點速度在兩個座標系中的轉換關係如下列方程式所示：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = T_R(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

其中 $[\dot{x}_R \ \dot{y}_R \ \dot{\theta}]^T$ 代表機器人中心點在機器人座標下的速度， $T_R(\theta)$ 為 Σ_G 與 Σ_R 之間的轉換矩陣。將方程式(2-10)代入方程式(2-9)得到方程式(2-11)：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = T_v(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = T_v(\theta) \cdot T_R(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = M_V \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M}_V = \mathbf{T}_V(\theta) \cdot \mathbf{T}_R(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha & d_1 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & d_1 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & d_2 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & d_2 \end{bmatrix}。$$

\mathbf{M}_V 為機器人座標平面上的中心點速度向量轉換成四輪切線速度向量的轉換矩陣，亦即行走輔助機器人的逆向運動模型(inverse kinematic model)。當馬達軸編碼器經由速度控制系統回授機器人各輪旋轉速度時，我們可以得知此時機器人中心點的速度大小。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_G \mathbf{R}_W \mathbf{M}_V^+ \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_V^+ = (\mathbf{M}_V^T \mathbf{M}_V)^{-1} \mathbf{M}_V^T \quad (2-12)$$

\mathbf{M}_V^+ 是將四輪速度轉換至機器人座標平面上的中心點速度的轉換矩陣，亦即行走輔助機器人的順向運動模型(forward kinematic model)。在下一章節的順應性控制中，由於使用者出力是直接作用於機器人座標平面上，然後藉此出力來改變機器人的移動速度與朝向角，並且 \mathbf{M}_V 為一個常數矩陣，各矩陣元素中並無其他變數，因此當我們選用機器人座標平面來作為系統運算時的座標系時，能夠得到較為直觀的控制並簡化系統的運算。

2.3.2 整體運動控制架構

如圖 2-10 所示，當工業電腦處理完行走輔助機器人的控制程式，並運算出機器人所應呈現的中心點運動速度後，利用行走輔助機器人的運動模型(Kinematic Model)轉換為各輪子的運轉速度，並透過串列埠對運動控制卡下達速度命令，運動控制卡透過驅動器將控制訊號轉換為驅動訊號來推動馬達使輪子運轉。而馬達上的軸編碼器在馬達運轉時會產生脈波傳回運動控制卡，透過累積的脈波數可以換算出馬達轉速，使運動控制卡可對馬達作速度控制，亦可將累積的脈波數透過 RS-232 回傳至工業電腦。

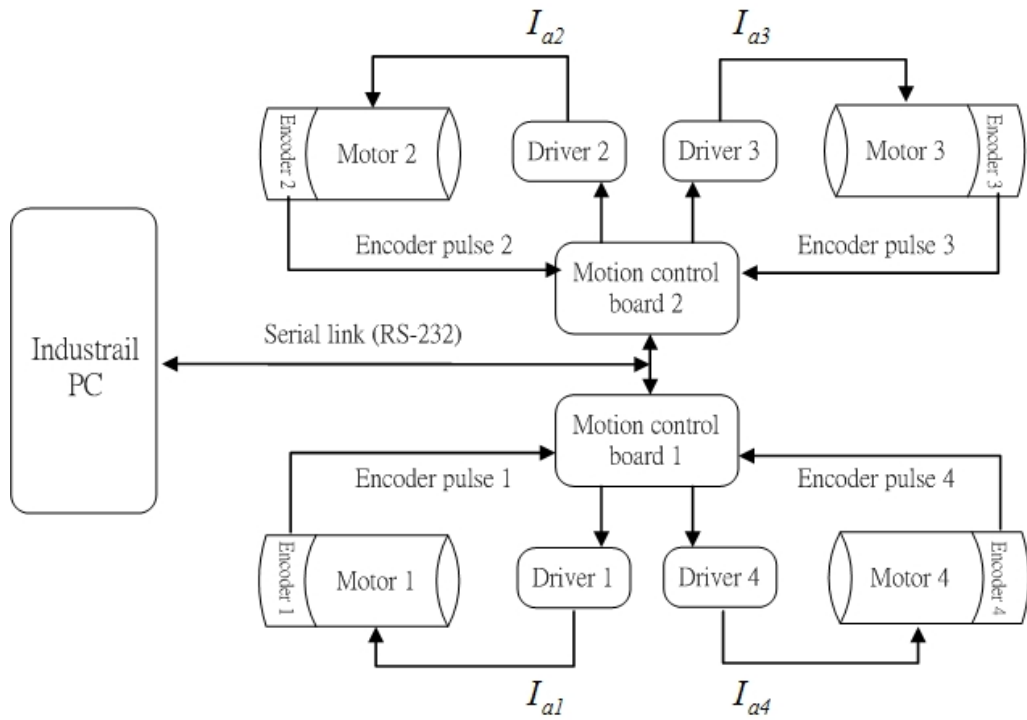


圖 2-10、機器人運動控制系統架構圖



第三章 傾斜環境下之順應性控制

在本論文中所設計的行走輔助機器人，主要功能為幫助使用者回復自主移動的能力，因此如何讓使用者可以輕鬆且安全地控制機器人是設計上的重點。在前一個章節中，我們已經得知採用主動式移動平台，機器人可以減輕使用者在操作上的負載問題。而在本章節裡，我們將設計一順應性控制系統，並藉此將行走輔助機器人仿效為被動式平台的行為模式，使機器人可以依據使用者的意向來改變自身的移動速度與朝向角，亦即當使用者的出力大時，機器人的移動速度就提高；當使用者不施加外力於機器人時，機器人將會停留在原地，如此一來就可以確保行走輔助機器人操作上的安全性。考慮到在現實環境中，傾斜地面的存在比例遠大於水平地面，且機器人在斜坡上的重力分力大小相較於使用者的施力，並不能忽略不計，所以在設計上必須為傾斜環境下所產生的重力分力進行補償，以求讓行走輔助機器人在斜坡上也如同在水平地面一樣，順應使用者的意向，施力即走，鬆手則停。

在順應性控制中，使用者的施力大小資訊即為使用者的意向，而取得施力資訊最直接的方式是利用力感測器。但是力感測器的價格昂貴，不利於行走輔助機器人的普及，且使用力感測器必須進行特殊的機構設計，當使用者施力於機器人上的其他位置時，力感測器無法估測出使用者的施力大小與方向。本論文所設計的外力估測器，透過直流馬達的電流與轉速資訊，即可估測出行動輔助機器人所受的外加施力，不須進行特別的機構設計，且使用者只要施力於機器人上的任一部位，其施力資訊就可被估測得知。取得使用者的施力資訊後，經由順應性控制設計可計算出機器人所應呈現速度大小與方向，之後再透過速度控制系統即可完成行走輔助機器人的順應性控制。

3.1 外力估測器設計

根據單一馬達的物理模型，我們可以得知馬達產生的總力矩是電磁轉矩 T_m ，在扣除外加施力 T_{ext} 以及摩擦力 T_f 後，才是馬達的輸出轉矩。此時透過馬達的動態方程式，即可得知此時馬達的轉速 ω ，而馬達的電磁轉矩 T_m 則與電流 i_a 成正比關係。以單一馬達為例，外力估測器中所要估測的為馬達系統所受到的外加施力 T_{ext} ，接下來我們將說明

如何經由馬達電流與轉速資訊估測出系統所受外加施力。

圖 3-1 為單一馬達之外力估測器方塊圖[22]。馬達的所產生的電磁轉矩與馬達的電流關係如下列方程式

$$T_m = K_b \cdot i_a \quad (3-1)$$

其中 K_b 為馬達的轉矩常數。馬達上所承受的負載轉矩 T_l ，可視為具有慣性矩 J_l 和阻尼係數 B_l 的負載模型，因為其與馬達相連接，所以有相同的轉速。為了方便計算，我們可將馬達本體與負載視為一體，如下列方程式所示

$$T_l = J_l \dot{\omega} + B_l \omega \quad (3-3)$$

$$J_t = J_m + J_l \quad (3-4)$$

$$B_t = B_m + B_l$$

J_t 為馬達與負載的慣性矩和， B_t 為馬達與負載的阻尼係數和。而馬達系統的動態方程式則為下列方程式

$$J_t \dot{\omega} + B_t \omega = T_m - T_{ext} - T_f \quad (3-5)$$

其中， ω 為馬達轉速， T_f 為摩擦轉矩， T_{ext} 為外加轉矩，為負載轉矩。根據方程式(3-1)與(3-5)，我們可得知馬達所受的外加轉矩為

$$T_{ext} = K_b i_a - J_t \dot{\omega} - B_t \omega - T_f \quad (3-6)$$

在方程式(3-6)中， J_t 與 B_t 可由馬達與負載的出廠參數得知，而摩擦轉矩 T_f 通常可視為定值，並可事先得知，因此變數只剩下馬達電流、馬達轉速與外加轉矩三者。而我們可利用軸編碼器即得馬達轉速，利用霍爾感測器測得馬達電流，此時馬達運轉中所受到的外加轉矩即可得知。

當我們在使用感測器量測馬達轉速與電流資訊時，其所測出的資訊通常存在有高頻雜訊，因此在圖 3-1 中使用了一個低通濾波器來削減雜訊所造成的影響。由於估測器所輸出的估測值已非原來的外加轉矩 T_{ext} ，因此以 \hat{T}_{ext} 表示外力估測器的輸出估測值，如下

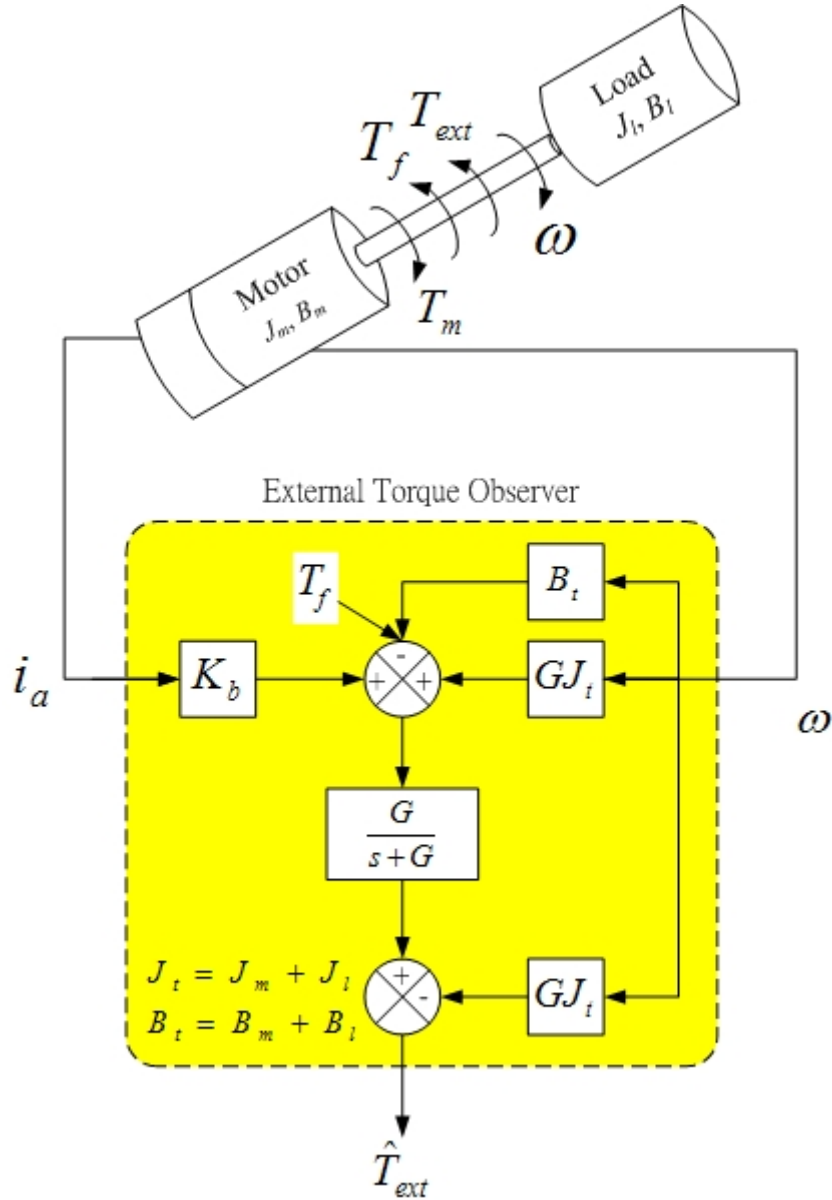


圖 3-1、單一馬達之外力估測器方塊圖[22]

列方程式所示

$$\begin{aligned}
 \hat{T}_{ext} &= \frac{G}{s+G} (K_b i_a - J_t s \omega - B_t \omega - T_f) \\
 &= \frac{G}{s+G} (K_b i_a + J_t G \omega - B_t \omega - T_f) - J_t G \omega
 \end{aligned}
 \tag{3-7}$$

相較於方程式(3-6)，方程式(3-7)中並不需要使用馬達的角加速度 $\dot{\omega}$ ，這也是我們採用低通濾波器的所帶來的一個優點。 G 為一階濾波器的參數亦為此估測器的參數， G 的大小關係到系統的頻寬， G 越大估測出的值越接近實際情形。圖 3-1 為方程式(3-7)的方塊圖實現。

3.1.1 基於機器人整體之外力估測器

在本論文中，我們所要進行估測的外力為使用者的意向，亦即使用者經由扶手施加給行走輔助機器人整體的出力。所以在估測器的設計上，我們所考慮的並非各馬達上所受的外加力矩，而是將機器人視為一個整體來估測機器人中心所受的外力，因此在使用外力估測器時所需的速度的資訊，指的是機器人中心點的移動速度 V_r ，透過順向運動模型與移動平台上四輪轉速即可推算出來

$$V_r = \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = M_V^+ K_G R_W \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

在使用單一馬達外力估測器時所需的馬達電流資訊，其本意為計算馬達的電磁轉矩大小，而當我們欲從機器人中心點來估測系統所受外力時，估測器所需的電流資訊指的是四輪馬達電磁轉矩於機器人中心點的合力 $F_O = [F_X \ F_Y \ N_Z]^T$ 。為此我們必須先推導出馬達出力與中心點合力的力轉換矩陣。

圖 3-2 為行走輔助機器人之力幾何圖，各輪的正向切力 f_i 與馬達所輸出的電磁轉矩 T_i 的關係如下列方程式所示

$$f_i = \frac{T_i}{K_G R_W} = \frac{K_b}{K_G R_W} i_{ai} \quad (3-9)$$

其中 K_G 為減速機之齒輪比， R_W 為輪半徑， i_{ai} 為馬達電流值。將各個輪子的正向切力投影至機器人座標軸 X_R 與 Y_R ，而各個輪子的正向切力可分為兩個分力 $f_{X_R,i}$ 、 $f_{Y_R,i}$ ， $i=1\sim 4$ ，其值如下列方程式所示

$$\begin{cases} f_{X_R,1} = -\sin \pi/6 \cdot f_1 \\ f_{Y_R,1} = \cos \pi/6 \cdot f_1 \end{cases}, \begin{cases} f_{X_R,2} = -\sin \pi/6 \cdot f_2 \\ f_{Y_R,2} = -\cos \pi/6 \cdot f_2 \end{cases} \quad (3-10)$$

$$\begin{cases} f_{X_R,3} = \sin \pi/6 \cdot f_3 \\ f_{Y_R,3} = -\cos \pi/6 \cdot f_3 \end{cases}, \begin{cases} f_{X_R,4} = \sin \pi/6 \cdot f_4 \\ f_{Y_R,4} = \cos \pi/6 \cdot f_4 \end{cases}$$

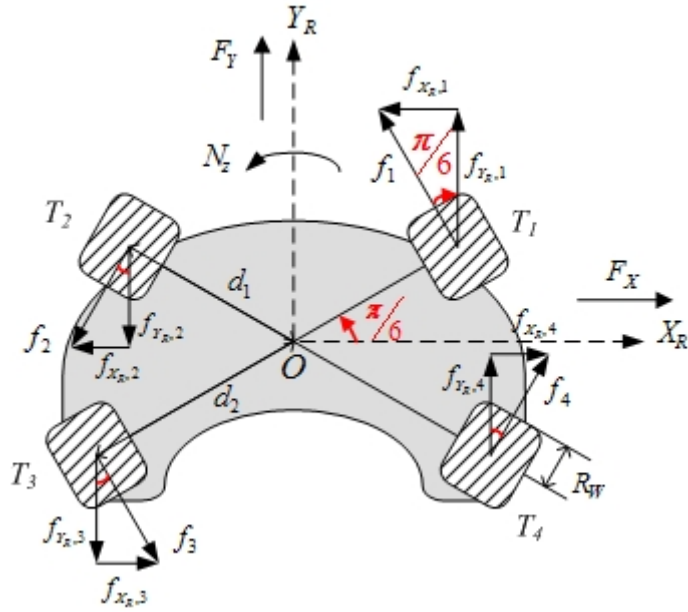


圖 3-2、行走輔助機器人之力幾何圖

而透過幾何關係可將各輪的 X 軸分力與 Y 軸分力轉換為機器人中心點的合力 F_O ，如下列方程式所示

$$\mathbf{F}_O = \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ N_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{X_{R,1}} \\ f_{Y_{R,1}} \\ d_1 \cdot f_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{X_{R,2}} \\ f_{Y_{R,2}} \\ d_1 \cdot f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{X_{R,3}} \\ f_{Y_{R,3}} \\ d_2 \cdot f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{X_{R,4}} \\ f_{Y_{R,4}} \\ d_2 \cdot f_4 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

將方程式(3-10)與方程式(3-11)結合後，可得到各輪正向切力與機器人中心點合力的關係式

$$\mathbf{F}_O = \begin{bmatrix} -\sin\pi/6 & -\sin\pi/6 & \sin\pi/6 & \sin\pi/6 \\ \cos\pi/6 & -\cos\pi/6 & -\cos\pi/6 & \cos\pi/6 \\ d_1 & d_1 & d_2 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$= \mathbf{M}_f \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

其中我們定義 \mathbf{M}_f 為行走輔助機器人的力轉換矩陣。由方程式(3-9)與方程式(3-12)可以得知機器人中心點合力與馬達電流的關係式

$$\mathbf{F}_O = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ N_z \end{bmatrix} = \frac{K_b}{K_G R_W} \mathbf{M}_f \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{a3} \\ i_{a4} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

此時，我們已經可將前小節所講述的外力估測器，由單一馬達拓展至整體行走輔助機器人。因為我們將機器人視為一個整體，因此在機器人中心點的動態方程式如下列方程式所示

$$\mathbf{M}_r \cdot \dot{\mathbf{V}}_r + \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r = \mathbf{F}_O - \mathbf{F}_{dis} \quad (3-14)$$

其中， $\mathbf{M}_r = \text{diag}(M_{rx}, M_{ry}, I_{rz})$ 、 $\mathbf{D}_r = \text{diag}(D_{rx}, D_{ry}, D_{rz})$ 為機器人的質量與阻尼係數， \mathbf{F}_{dis} 為機器人所受到的外力干擾。在目前的推導中，我們並不考慮外界對系統所造成的干擾，亦即將機器人視為在理想實驗環境下運作，所以在本小節中所指的外界干擾即為使用者施加於機器人上的出力。圖 3-3 為理想環境下行走輔助機器人之外力估測器方塊圖。透過外力估測器可得知所受外力干擾的估測值 $\hat{\mathbf{F}}_{dis}$ ，如下列方程式所示

$$\hat{\mathbf{F}}_{dis} = \frac{G_O}{s + G_O} (\mathbf{F}_O - \mathbf{M}_r s \mathbf{V}_r - \mathbf{D}_r \mathbf{V}_r) \quad (3-15)$$

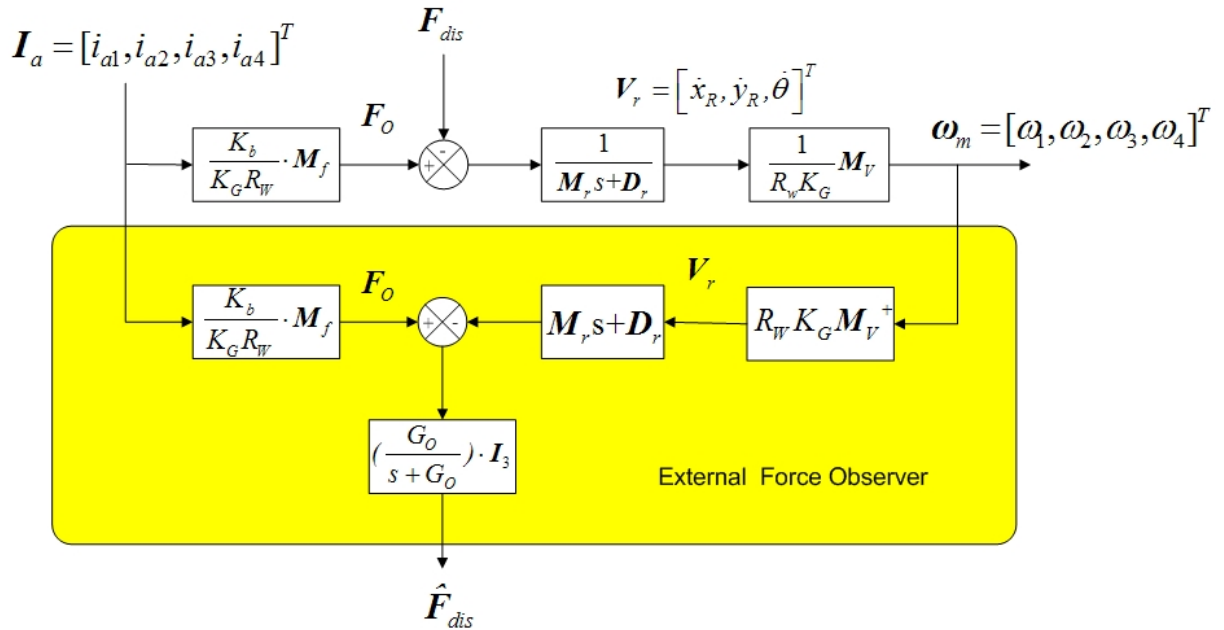


圖 3-3、理想環境下行走輔助機器人之外力估測器方塊圖

3.1.2 傾斜環境下之重力補償

當行走輔助機器人操作於實際環境下時，我們必須考慮機器人所受到的環境干擾，在大多數的相關文獻中，所設定的操作環境都是水平地面，因為系統的重力方向和移動方向成正交關係，所以不用考慮地心引力對系統造成的影響，所以只需要考慮操作地面的摩擦力即可。但是在本論文中，我們所關注的重點在於，當操作環境為有斜坡的地面時，行走輔助機器人在斜坡上的反應。如圖 3-4 所示，在斜坡環境下，機器人所受到的環境干擾，除了摩擦力之外，還必須考慮機器人本身重量所造成的重力分力。

在進行重力補償之前，機器人必須要得知目前操作環境的傾斜度資訊，透過前述的斜坡感測系統，我們使用傾斜計的 Pitch 軸來測量機器人坐標平面上坐標軸 Y_R 的傾斜度，使用 Roll 軸來測量座標軸 X_R 的傾斜度，因此機器人所受到的重力分力 F_g ，如下列方程式所示

$$F_g = \begin{bmatrix} F_{gx} \\ F_{gy} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x g \sin \theta_x \\ M_y g \sin \theta_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

其中， g 為重力加速度值。此時機器人所受到的環境外力干擾為 F_{dis} 。

$$F_{dis} = F_{ext} + F_f + F_g \quad (3-17)$$

上式中， F_f 為機器人所受地面摩擦力， F_{ext} 為系統所受外加施力。 F_g 為重力分力，當地

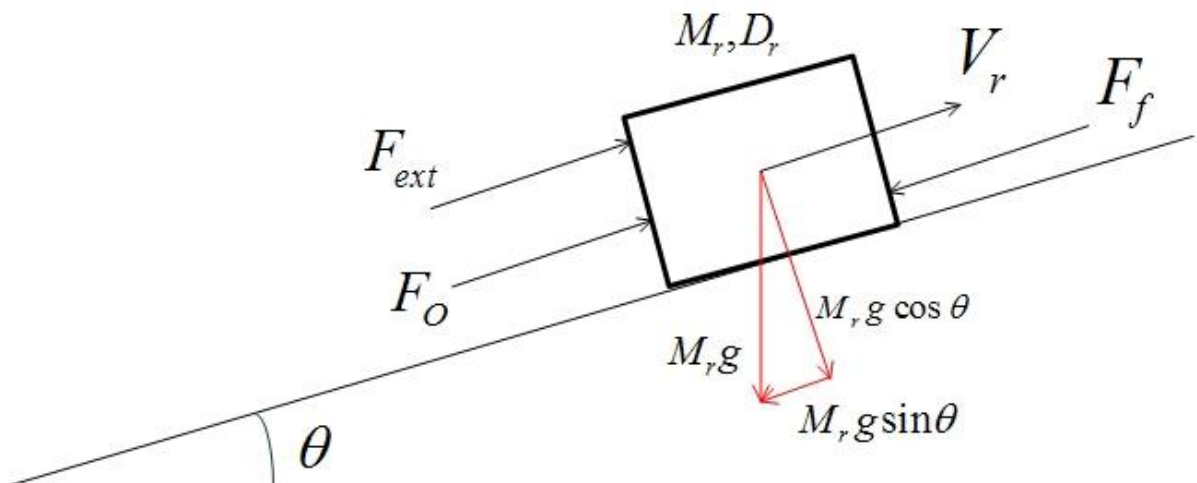


圖 3-4、行走輔助機器人之重力分力示意圖

面傾斜角度越大時，系統所受到的重力分力就越大。將方程式(3-17)代入方程式(3-14)可得此時傾斜環境下的機器人動態方程式，如下列方程式所示

$$\mathbf{M}_r \cdot \dot{\mathbf{V}}_r + \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r = \mathbf{F}_O - (\mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_g) \quad (3-18)$$

而系統所受到的外加施力 $\mathbf{F}_{ext} = [F_{extx}, F_{exty}, N_{extz}]^T$ 則為

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{F}_O - \mathbf{M}_r \cdot \dot{\mathbf{V}}_r - \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r - \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_g \quad (3-19)$$

機器人控制系統可以透過電流感測系統得知機器人四輪馬達的電流值，並使用方程式(3-13)來算出機器人中心點的合力 $\mathbf{F}_O = [F_x \ F_y \ N_z]^T$ ，而透過速度控制系統與軸編碼

器的回傳值可計算出機器人四輪的轉速 $\boldsymbol{\omega}_m = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]^T$ ，藉由方程式(3-8)可得知機

器人的中心點速度 $\mathbf{V}_r = [\dot{x}_r, \dot{y}_r, \dot{\theta}]^T$ 。因為電流感知板與馬達軸編碼器在高頻時容易含有高頻的雜訊，所以在估測器中使用一階低通濾波器來削減雜訊所造成的影響，而外加施力的實際值與估測值的關係式如下

$$\hat{\mathbf{F}}_{ext} = \frac{G_O}{s + G_O} \mathbf{F}_{ext} \quad (3-20)$$

G_O 為低通濾波器的截止頻率，當 G_O 越大時， $\hat{\mathbf{F}}_{dis}$ 越近似於 \mathbf{F}_{dis} 。相較於方程式(3-15)，所估測出的系統總外力干擾，我們所真正想估測的是包含於外力干擾中的外加施力，為此在估測器的設計上，我們必須先扣除其他項所產生的影響，才能使得估測器的輸出為外加施力估測值 $\hat{\mathbf{F}}_{ext}$ ，由方程式(3-19)與方程式(3-20)可得知

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{F}}_{ext} &= \frac{G_O}{s + G_O} (\mathbf{F}_O - \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r - \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_g) - \frac{sG_O}{s + G_O} \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{V}_r \\ &= \frac{G_O}{s + G_O} (\mathbf{F}_O - \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r - \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_g) - (G_O - \frac{G_O^2}{s + G_O}) \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{V}_r \\ &= \frac{G_O}{s + G_O} (\mathbf{F}_O + G_O \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{V}_r - \mathbf{D}_r \cdot \mathbf{V}_r - \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_g) - G_O \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{V}_r \end{aligned} \quad (3-21)$$

由上式，我們可以得到含重力補償之行走輔助機器人外力估測器方塊圖，如圖 3-5。此外力估測器可以準確的估測出使用者的施力大小，且當機器人操作在不同的斜坡上時，系統可以主動對重力分力進行補償。當所受的重力分力越大時，馬達將會輸出額外的力矩來對重力分力進行補償，而使用者將不會感受到重力分力的影響，由實驗結果可以驗證我們的設計是可行的。

由圖 3-5 中可以看出來，在外力估測器中，我們所採用的補償摩擦力與重力分力的方法是相似的，但是這兩者的本質是全然不同的。我們知道摩擦力的方向與運動方向永遠是成相反的，對於系統而言，摩擦力造成的影響永遠都是降低系統的速度，因此就算系統突然操作在不同的摩擦力大小的環境下，外力估測器還是能夠正確反映出使用者的意向，並進行下一步的順應性控制，只是呈現出來的速度大小的差別。但是重力分力不同，重力分力的方向只和坡度有關，其所造成的影響有可能是減緩或加快系統速度，端看重力分力方向與系統運動方向來決定。因此，如果系統突然操作在不同的坡度，且沒有及時的偵測目前坡度的大小並進行重力補償的話，系統有可能無法正確的順應使用者

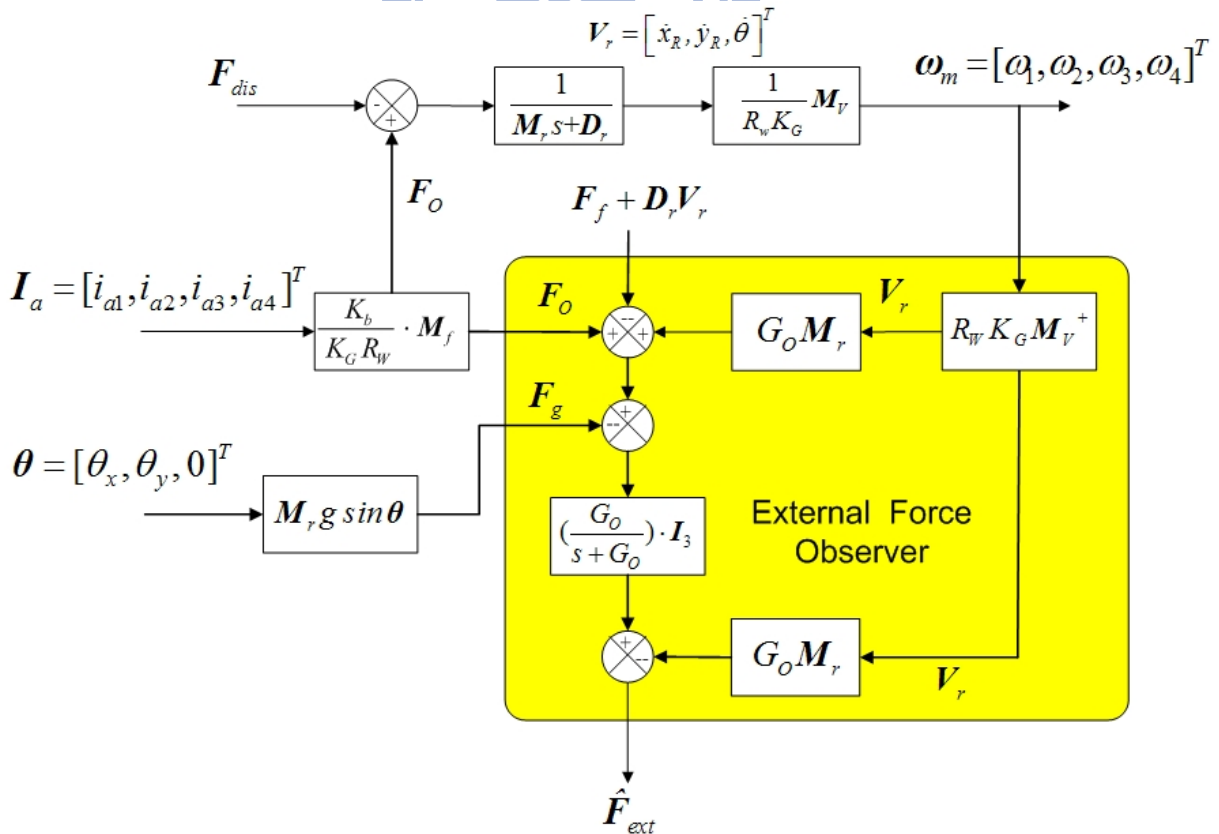


圖 3-5、含重力補償之行走輔助機器人外力估測器方塊圖

的意向，甚或違反使用者的意向而移動。換句話說，若是不進行摩擦力補償的話，行走輔助機器人還是能夠正常操作，只是在操控上會顯得比較不夠靈活。而若是不進行重力補償的話，當機器人操作在斜坡上時，重力分力將成為使用者操控上的負擔，甚而將可能會造成安全上的問題。

3.2 行走輔助機器人順應性控制設計

在本節裡，我們的目的是透過順應性控制的設計，讓行走輔助機器人可以呈現出被動式的行為。由於行走輔助機器人是跟人有直接互動的關係，因此操縱上的安全性非常重要。由於我們的機器人是屬於主動式的操控平台，透過前述所提及的「基於被動式概念的主動式平台運動控制」概念，我們希望它可以擁有被動式平台的行為響應，而透過順應性控制設計將可以達成這個目的。

當我們對一無動力的剛體系統施與一個施力時，透過物理計算可以得知該系統的速度，亦即該無動力剛體系統順應所受的施力呈現出相對應的速度。但是因為主動式平台的移動是需要透過控制電腦來對運動控制系統下達速度命令，而無法直接經由使用者的施力來進行操控，因此在主動式平台上進行順應性控制可分為兩個階段。第一是需要讓行走輔助機器人得知目前其所受到的外加施力，在大部分的相關研究裡，都是使用昂貴的力/轉矩感測器，在本論文裡我們使前述的外力估測器即可得知使用者的施力大小與方向。其次是需要將所得知的外加施力轉化為相對應的速度命令，並藉此驅動主動式平台的移動，這也是本節所要介紹的主要部分。我們將行走輔助機器人視為一個無動力的剛體系統，並設計一個質量-阻尼物理模型來將整個機器人等效為一被動式平台。當使用者施予機器人一個外加施力時，透過此物理模型可計算出相對應的速度命令，亦即機器人會順應此外加施力來移動並呈現出相對應的速度，反之，當使用者無施加外力於機器人時，機器人將靜止不動。

根據上一小節所設計的外力估測器，機器人可以得知不受外界干擾的使用者意向，亦即不受摩擦力與重力分力影響的使用者施力大小，因此不管機器人是操作在傾斜或是水平、粗糙或是光滑的環境下，我們都可將行走輔助機器人等效為一個操作在水平無摩

擦地面，由質量 M_d 與阻尼 D_d 係數所構成的物理模型，而此等效物理模型的動態方程式，如下式所示

$$\mathbf{M}_d \cdot \dot{\mathbf{V}}_{r,cmd} + \mathbf{D}_d \cdot \mathbf{V}_{r,cmd} = \mathbf{F}_{user} \quad (3-22)$$

其中， \mathbf{M}_d 、 \mathbf{D}_d 為我們所設定的期望質量與期望阻尼係數， $\mathbf{F}_{user} = -\hat{\mathbf{F}}_{ext}$ 為外力估測器所估測出的使用者所施外力，不過因為施力方向設定上的不同，兩者相差一個負號。圖 3-6 為機器人順應性控制整體架構圖，由方程式(3-22)所解出的 $\mathbf{V}_{r,cmd} = [\dot{x}_R, \dot{y}_R, \dot{\theta}]^T$ 為機器人中心點速度命令，系統可透過逆向運動模型推算出四輪的速度命令，且下達於速度控制系統，使其對馬達進行速度控制，以完成機器人的順應性控制。各馬達的速度命令如下所示

$$\mathbf{V}_{m,cmd} = \begin{bmatrix} V_{m1,cmd} \\ V_{m2,cmd} \\ V_{m3,cmd} \\ V_{m4,cmd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_w \omega_{1,cmd} \\ R_w \omega_{2,cmd} \\ R_w \omega_{3,cmd} \\ R_w \omega_{4,cmd} \end{bmatrix} = M_V \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (25)$$

而根據我們所設計的機器人等效物理模型，可經由設定模型參數 M_d 與 D_d 的大小，來改變機器人經過順應性行為所呈現出的被動式行為響應。譬如當使用者希望機器人使用起來感覺重一點時，我們可藉由調高 M_d 值來讓機器人計算出較小的速度命令，亦即當使用者想要達到同樣的速度時，就必須要施予較大的出力。根據每個使用者使用上的觀感不同，我們可藉由調整參數來讓使用者得到較好的操作感受。

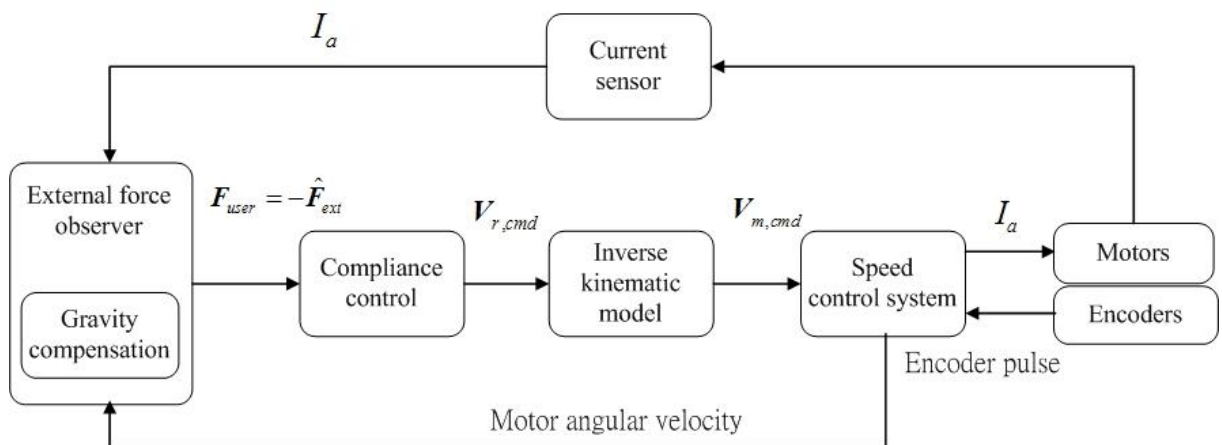


圖 3-6、順應性控制整體架構圖

第四章 實驗結果

在本章節，我們將對第三章所設計的控制方法進行模擬與實驗，以驗證控制方法的可行性。實驗環境分為水平環境與傾斜環境，實驗結果如以下小節所示。

4.1 水平環境下之機器人順應性控制模擬

在這個小節裡，我們利用電腦數值分析的方式，對先前所設計的順應性控制與外力估測器進行模擬，檢驗系統是否能夠正確估測到使用者的外力，並呈現出相對應的速度。根據行走輔助機器人的硬體架構數據與馬達參數，我們在電腦上建構了行走輔助機器人的等效物理模型。在控制方法上，因為電腦模擬環境為理想環境，所以我們使用方程式(3-15)與方程式(3-22)來建構此電腦模型的外力估測與順應性控制，而透過馬達參數我們建置了一個馬達模型，透過此馬達模型我們可得知外力估測器所需的馬達電流值與轉速大小，圖 4-1 行走輔助機器人控制系統架構圖。在模擬中，我們設定機器人期望質量 $M_d = \text{diag}(20, 20, 1.2)$ ，單位為 kg 和 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，而機器人期望阻尼為 $D_d = \text{diag}(36, 36, 2)$ ，單位為 $\text{Nt}\cdot\text{s}/\text{m}$ 與 $(\text{Nt}\cdot\text{m})\cdot\text{s}/\text{rad}$ 。在行走輔助機器人的軸向定義上，當使用者正常操作機器人時，將使用者的前方定義為+Y 軸，右側定義為+X 軸，沿著機器人中心點進行逆時針旋轉則為+Z 軸，如圖 4-2 所示。

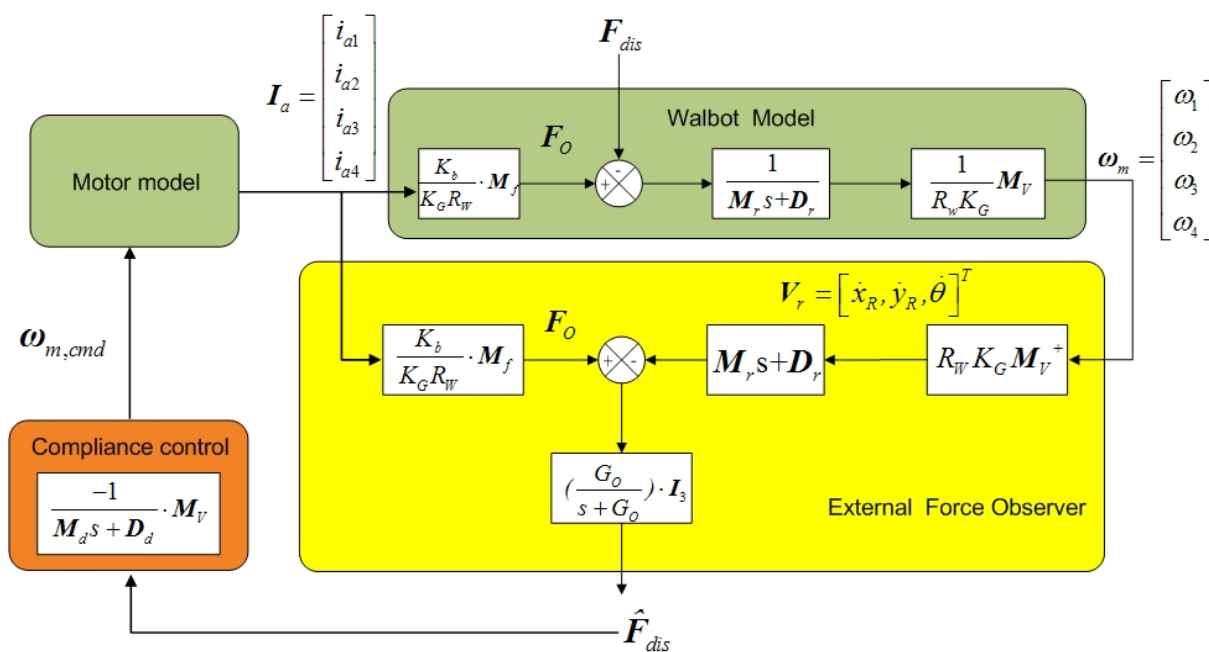


圖 4-1、行走輔助機器人控制系統架構圖



圖 4-2、行走輔助機器人軸向定義圖

首先，我們對機器人電腦模型的 Y 軸給予一虛擬的外力，並檢視外力估測器所估測的外力大小及方向，以及機器人速度的反應與馬達電流的變化，圖 4-3 為 Y 軸順應性模擬結果圖，圖 4-4、Y 軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖。

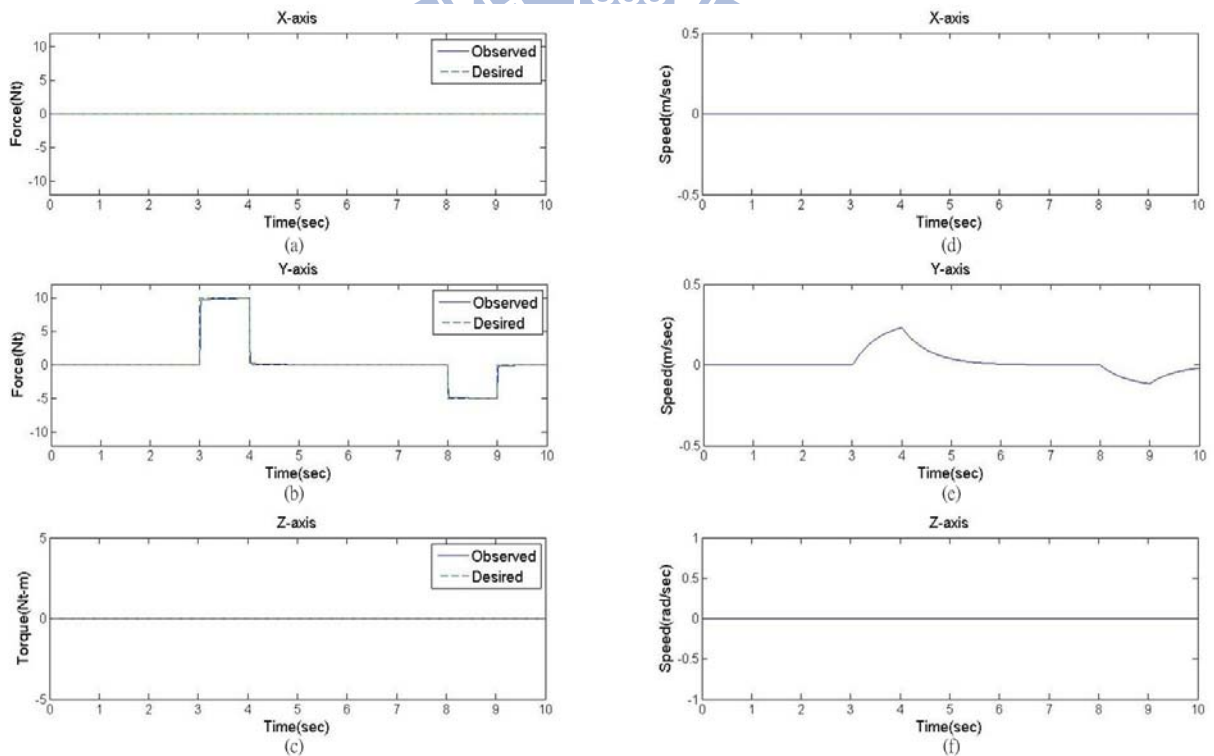


圖 4-3、Y 軸順應性控制模擬結果圖

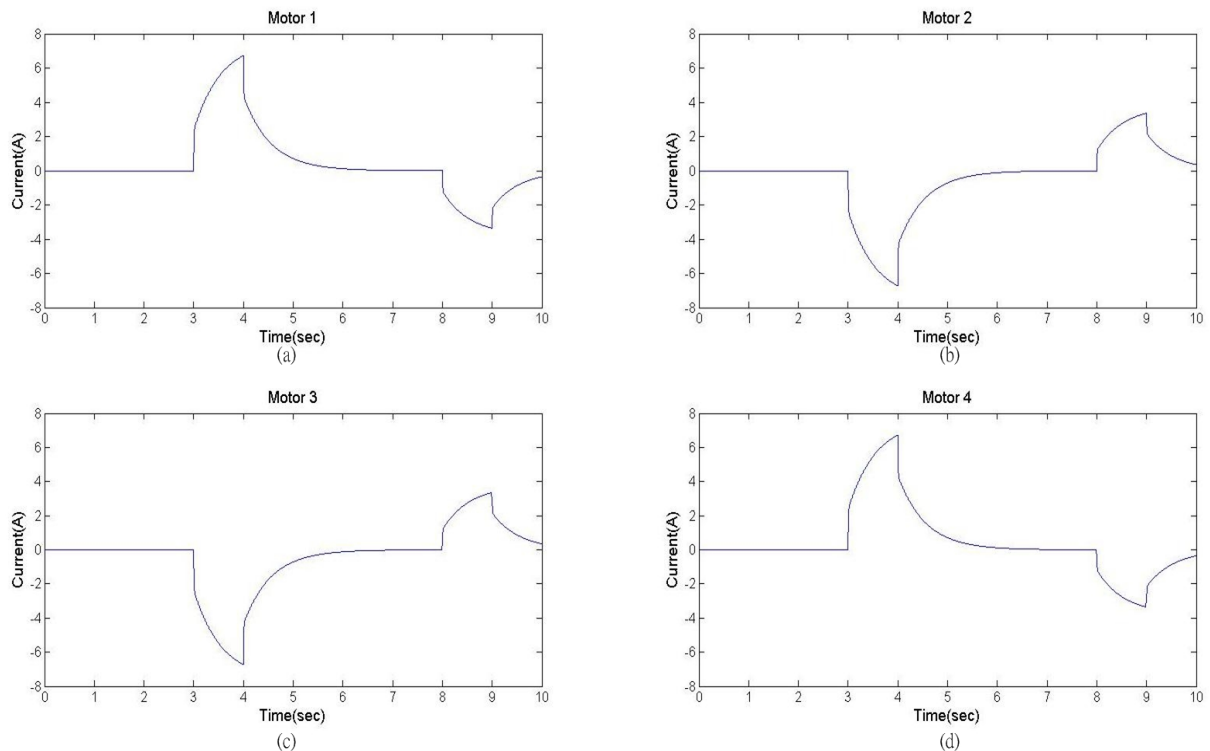


圖 4-4、Y 軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖

圖 4-3(d)(e)(f)為模擬過程中的機器人的各軸速度值。而在圖 4-3(a)(b)(c)中，虛線代表的是模擬過程中所施加給電腦模型的虛擬外力(Desired)，實線為透過外力估測器取得的估測值(Observed)。由圖 4-3(b)(e)可以得知在無外力輸入的情況下，外力估測器的估測值為零，機器人的速度也為零。當有外力輸入時，外力估測器可以正確估測出所受外力值，且機器人會順應著外力的大小與方向改變其自身的速度。由圖 4-4 中可知，當無外力輸入時，馬達電流為零，再次驗證機器人此時處於靜止狀態。而當外力輸入時，根據方程式(3-6)可知，馬達電流與轉速會產生變化。此時變化值透過外力估測器估測出外力的大小，再交由順應性控制器計算相對應的速度命令，透過速度控制系統將速度命令轉為馬達電流訊號，因此機器人移動後，馬達電流將不再為零。由於 X 軸與 Z 軸所呈現的單軸模擬結果與 Y 軸相似，所以在此我們不再贅述，而是經由下一個模擬來檢驗 X 軸與 Z 軸的模擬結果。

接下來我們將要驗證的是，當我們連續對機器人的 X 軸、Y 軸、Z 軸給予虛擬外力，外力估測器是否能夠取得正確的估測值，而不會受到其他軸的外力影響，圖 4-5 為三軸順應性模擬結果圖，圖 4-6 為三軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖。

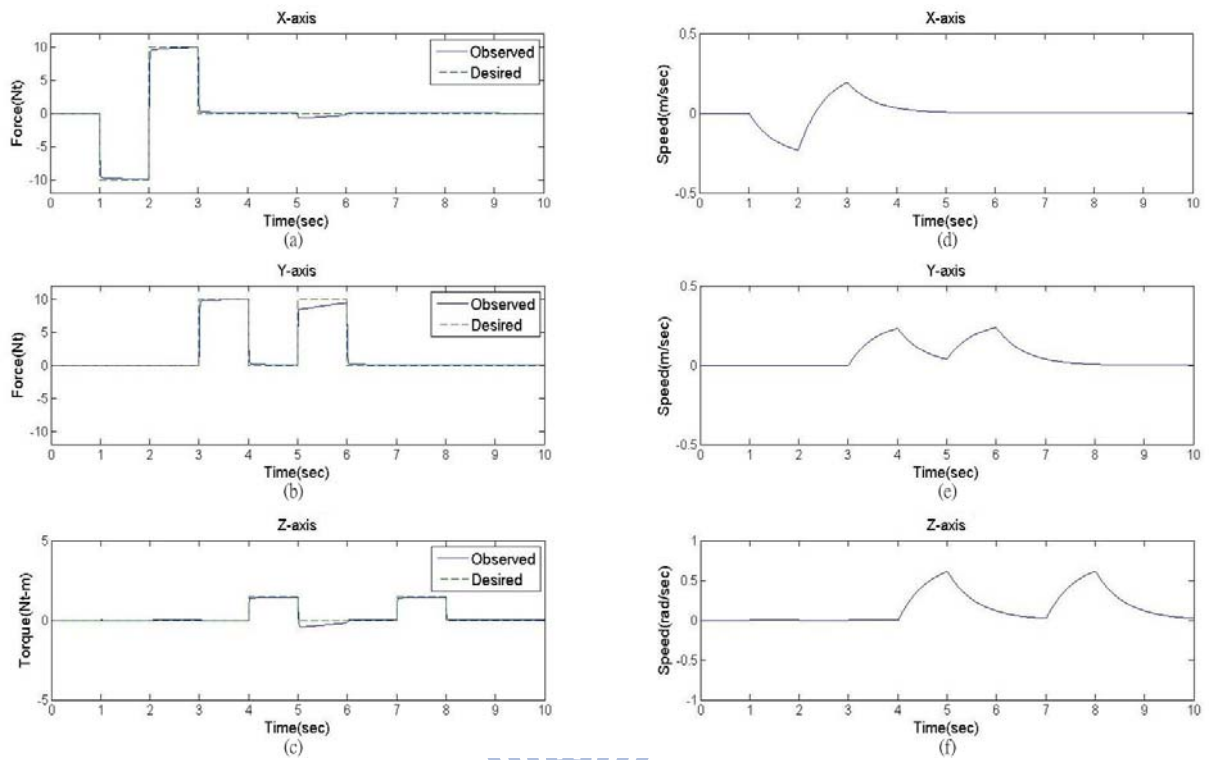


圖 4-5、三軸順應性模擬結果圖

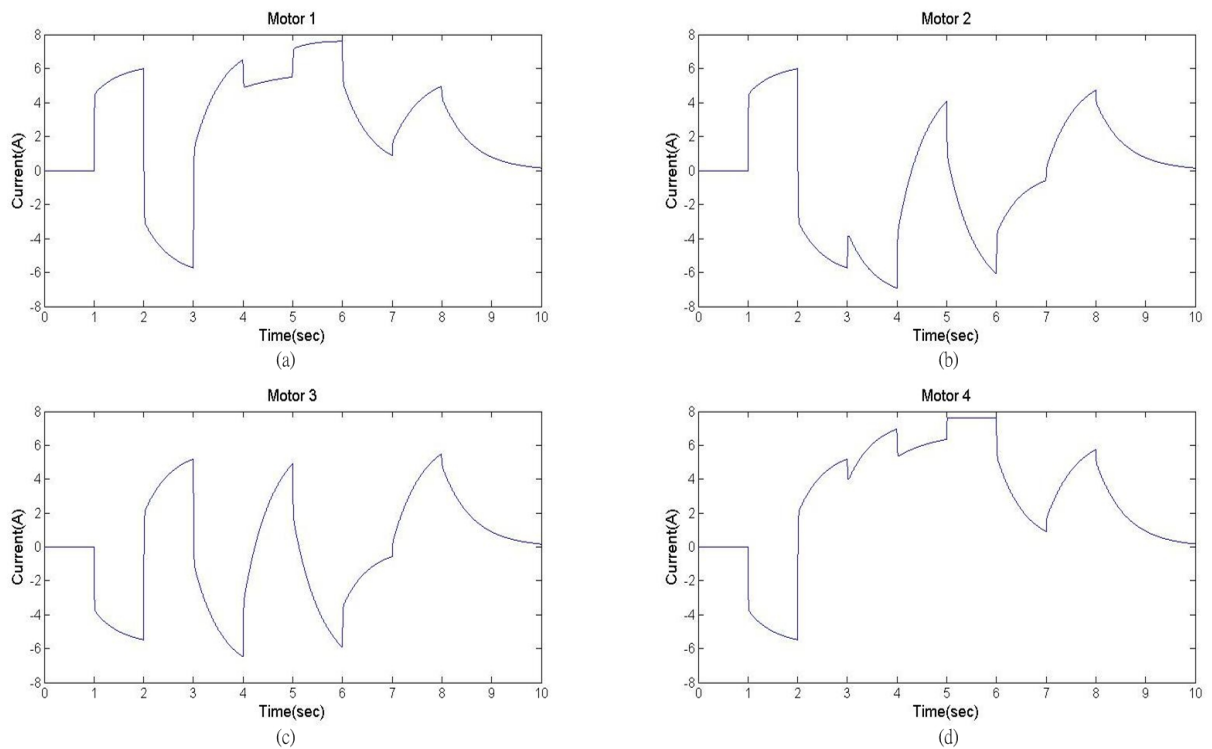


圖 4-6、三軸順應性控制模擬之四輪馬達電流圖

圖 4-5(a)(b)(c)為機器人三個軸向所設定給予的虛擬外力與估測值，圖 4-5(d)(e)(f)為模擬過程中的機器人的各軸速度值。由圖 4-5(a)(c)(d)(f)可以看出機器人的 X 軸與 Z 軸

可以同樣正確的估測出所受到的虛擬外力值，並且反應出該外力值所對應的速度大小，這個結果與前述的 Y 軸模擬結果相同。而這次的模擬實驗可以得知，當我們對行走輔助機器人連續地施與不同方向的外力時，外力估測器都可以正確地估測出所受外力地軸向與大小，且不會受到外界施力變化的干擾。透過順應性控制，機器人可以順應外力的方向與大小來移動，且不同軸向的施力不會影響到其他軸向的速度。

4.2 水平環境下之機器人順應性控制實驗

在本小節裡，我們將實際環境下進行實驗，並與先前的模擬結果進行對照與討論。當行走輔助機器人在實際環境下進行操縱時，外界環境的干擾將會影響到外力估測器對使用者意向的估測。因此為了正確地估測出使用者所施加的外力大小與方向，系統必須要事先對外界環境干擾進行補償。在本次實驗裡，我們使用方程式(3-21)來估測使用者所受的外力，其中需要事先得知的物理參數有機器質量 M_r 與阻尼係數 D_r ，而摩擦力 F_f 與重力分力 F_g 則屬於外界環境干擾。由於本節中的實驗環境為水平地面，因此重力分力 F_g 為零，而我們所量測出的機器人質量為 $M_r = \text{diag}(44.6, 44.6, 1.2)$ 。因為摩擦力與阻尼係數較不易量測，所以我們將方程式(3-21)改寫為方程式(4-1)，並藉此估算出系統的摩擦力與阻尼值

$$\hat{F}_{ext} + F_f + D_r \cdot V_r = \frac{G_o}{s + G_o} (F_o + G_o M_r \cdot V_r) - G_o M_r \cdot V_r \quad (4-1)$$

此時，我們直接指定機器人以某一固定速度 V_r 移動，而非因順應使用者的施力來移動，所以這時的外加施力估測值 \hat{F}_{ext} 為零。當機器人以固定速度行走於 X 軸、Y 軸與 Z 軸時，同樣透過馬達電流與轉速資訊，利用方程式(4-1)即可估測出此時摩擦力 F_f 與阻尼摩擦力 $D_r \cdot V_r$ 之和，由於 V_r 為給定數值，經過計算後可得知摩擦力與阻尼係數的估測值，阻尼係數 $D_r = \text{diag}(50, 36, 3.8)$ ，單位為 $\text{Nt}\cdot\text{s}/\text{m}$ 與 $(\text{Nt}\cdot\text{m})\cdot\text{s}/\text{rad}$ ，而摩擦力 $F_f = [28, 32, 8]^T$ ，其單位為 Nt 。圖 4-7 為實驗過程中的照片。

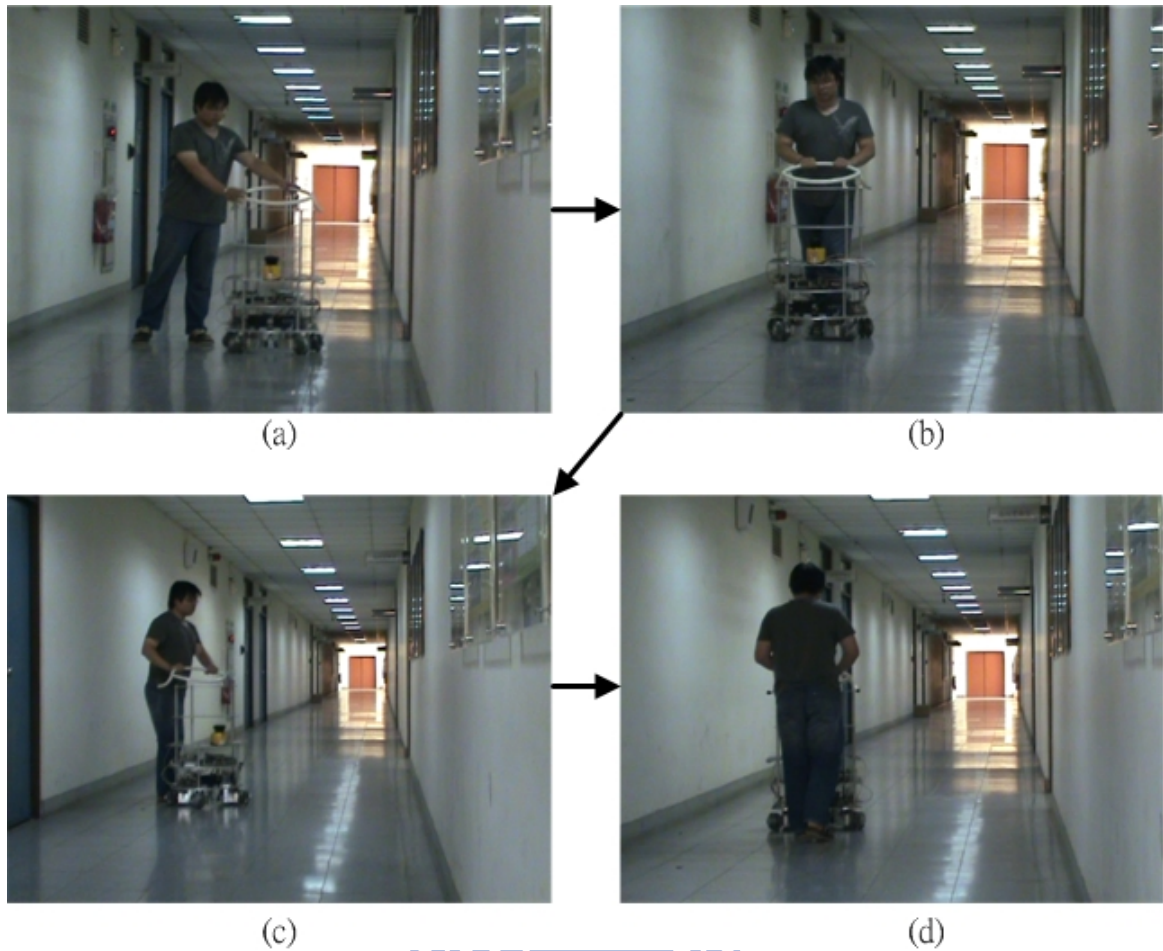


圖 4-7、水平環境下之機器人順應性控制實驗過程(a)施加 X 軸外力(b)施加 Y 軸外力
(c)施加 Z 軸外力(d)施加 Y 軸外力

當我們取得所有的參數之後，就可以開始進行實驗。使用者透過機器人上的扶手施予外力，當控制系統經由外力估測器得此外力資訊後，透過順應性控制器可計算出相對應的速度命令，並利用速度控制系統控制各輪達到相應的轉速，使行走輔助機器人完成順應性控制。順應性控制方程式(3-22)的參數，機器人期望質量與期望阻尼係數我們設定為 $M_d = \text{diag}(15, 20, 1.2)$ ，單位為 kg 和 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ， $D_d = \text{diag}(10, 10, 2.0)$ ，單位為 $\text{Nt}\cdot\text{s}/\text{m}$ 與 $(\text{Nt}\cdot\text{m})\cdot\text{s}/\text{rad}$ 。圖 4-8 為水平環境下之機器人順應性控制實驗結果，圖 4-8(a)(b)(c)為使用者透過機器人扶手所施予之外力的估測值，分別為 X 軸、Y 軸與 Z 軸，圖 4-8(d)(e)(f)則為機器人順應使用者所施外力而呈現的三軸速度值。圖 4-9 為水平環境下之機器人順應性控制實驗的馬達電流大小。在順應性控制裡，系統所計算出的速度命令 $V_{r,cmd}$ 應該

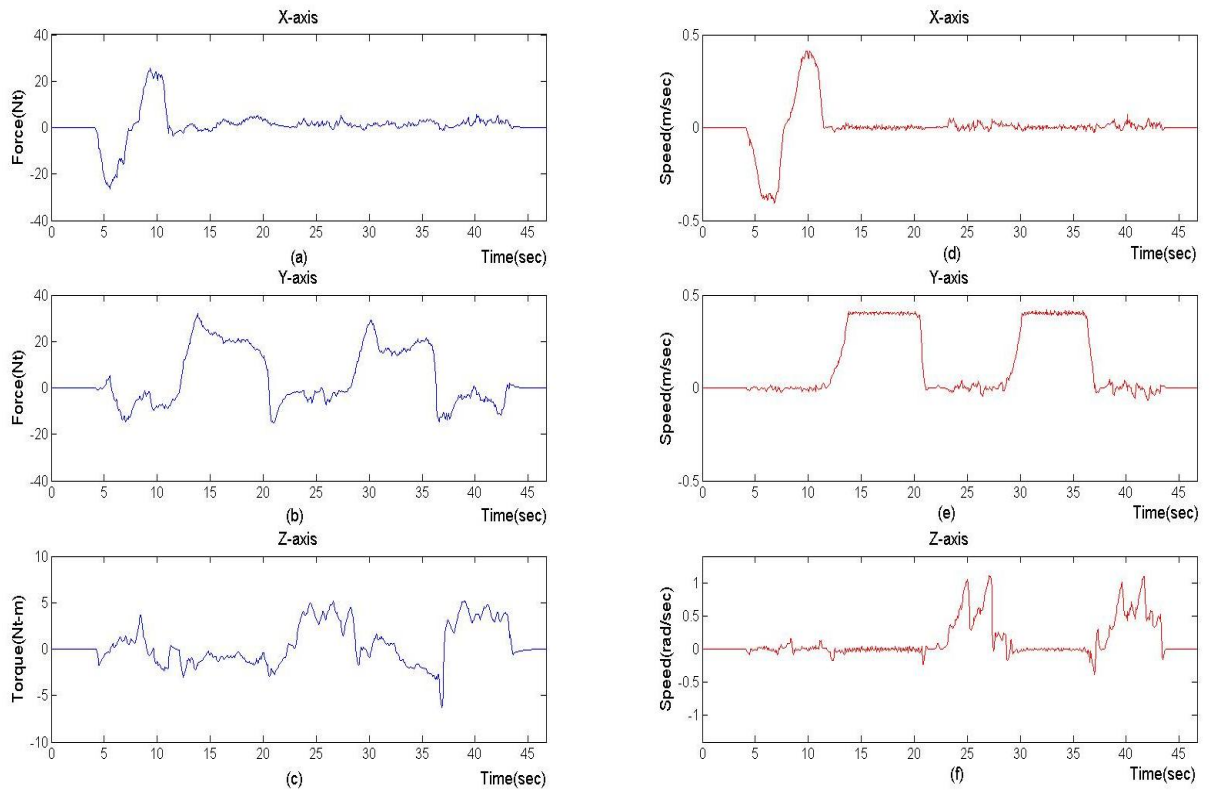


圖 4-8、水平環境下之機器人順應性控制實驗結果(a)(b)(c)三軸外力估測值(d)(e)(f)機器人移動速度

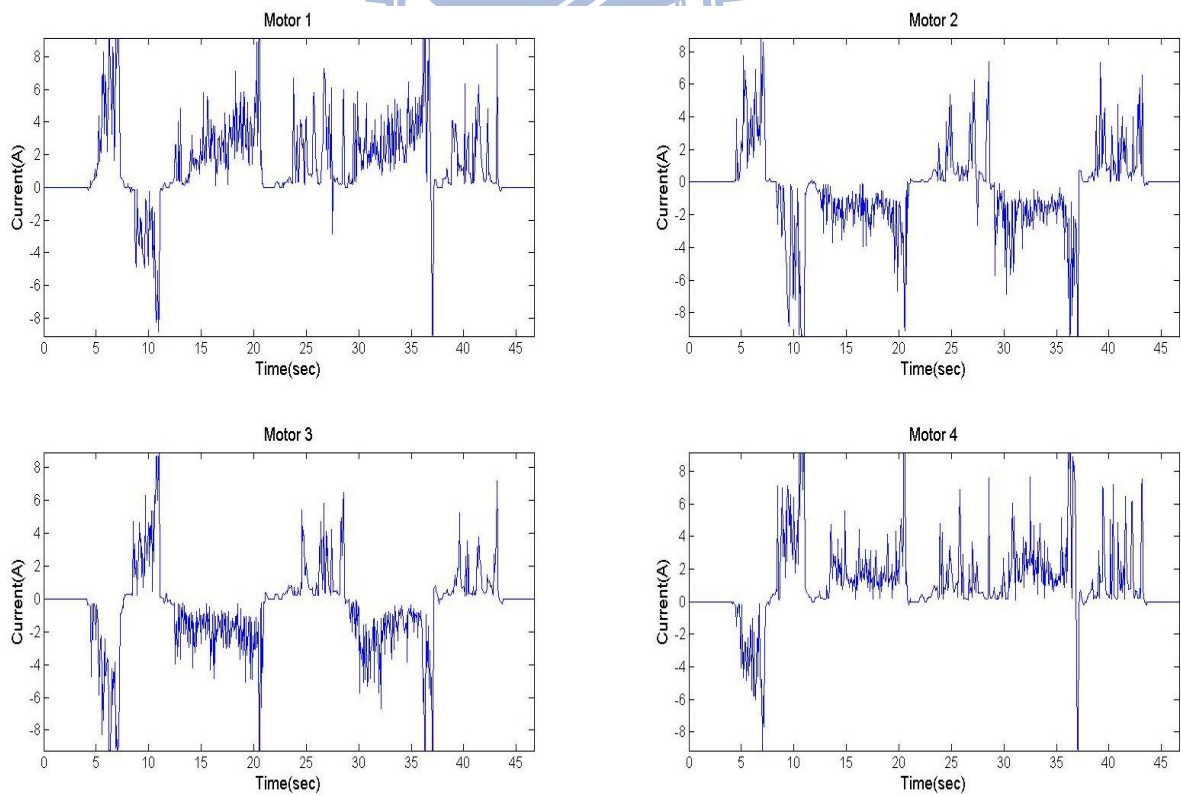


圖 4-9、水平環境下之機器人順應性控制實驗的四輪馬達電流大小

是隨著使用者施力的提高而上升，但是由於行走輔助機器人的設計對象是老人與行動不便的患者，考慮到當系統速度過快時可能造成的危險，在實際的設計上，我們將對系統的速度命令大小進行限制，當系統速度命令的絕對值大於某一閾值時，則將系統速度定為該閾值，以確保行走輔助機器人的移動速度可以維持在一適當的範圍。因此若使用者所施與機器人的外加出力過大時，機器人的速度大小將無法順應使用者的施力而提高到相對應的數值，而是會鎖定在所設定的移動速度最大值，這是為了操作上的安全所進行的設計，由圖 4-8(d)(e)(f)可以看的出來當使用者的施力過大時，機器人的速度會鎖定在一個定值。

由圖 4-8(a)(b)(c)中可以看出來，相較於先前的模擬結果，在實際環境下操作的行走輔助機器人，由於使用者施力的不均勻，使得當使用者要往某一個軸向前進時，其他兩個軸向也會受到影響，其中以 Z 軸最為明顯，如圖 4-8(c)所示。這是因為當使用者以雙手操控機器人時，只要左右手施力不相同，相對於機器人中心點就會產生力矩。因此在外力估測器中我們設計了一個閾值 $F_{min} = [5 \ 5 \ 3.5]$ ，單位為 Nt，只有當外力估測值取絕對值後大於其相應的閾值才會進行下一步的順應性控制，否則就視為是因為使用者施力不均勻所造成的干擾。如圖 4-8(d)(e)(f)所示，在機器人的速度上確實能夠反應出使用者真實的意向，減輕因為此項干擾所造成的影響。由於圖 4-8 與圖 4-5 的使用者施力向變化次序相同，故模擬與實驗可以相互印證，且圖 4-9 與圖 4-6 的馬達電流值在趨勢上是雷同的，但是因為圖 4-9 的電流值跳動較大，所以在進行外力估測時需要使用低通濾波器來過濾高頻雜訊。

4.3 傾斜環境下之機器人順應性控制實驗

我們已經驗證了所設計的外力估測器與順應性控制器在實際環境下的水平地面可以得到正確的反應，為了使所設計的行走輔助機器人能夠擁有更好的適用性，我們將進行傾斜環境下的實驗，並驗證先前所設計的重力補償系統，而這也是本論文的主要訴求，實驗結果如下列小節所示。

4.3.1 實驗環境介紹

在傾斜環境的建造上，基於行走輔助機器人本身的重量因素，所以我們採用 $120 \times 120 \times 1.5 \text{ cm}^3$ 的實心木板為材料來製作斜坡高台。在我們的設計裡，行走輔助機器人必須根據環境傾斜程度的大小，主動提高馬達出力來補償因傾斜而造成的重力分力，所以當重力分力大於機器人的系統最大出力時，行走輔助機器人將無法順利進行重力補償。因此在斜坡高台的傾斜角度選擇上，必須要考慮到行走輔助機器人的硬體架構，包括馬達的最大輸出轉矩、減速齒輪盒的減速比、輪半徑與馬達配置。我們所使用的全向輪半徑為 6 cm ，直流馬達額定輸出轉矩為 0.11 Nm ，減速齒輪盒的減速比為 $14:1$ ，因此馬達的輸出轉矩為 1.54 Nm ，再透過力轉換矩陣 M_f 可得知機器人中心點的最大出力為 88.9 Nt ，而行走輔助機器人的質量為 44.6 Kg ，則重力分力值小於 88.9 Nt 的角度範圍為正負 11.7 度。考慮到機器人的中心點出力，除了補償重力分力之外，還要進行基本的行走輔助功能，因此我們選取 4 度斜坡與 8 度斜坡做為我們的實驗環境。圖 4-10 為 4 度斜坡實驗平台，圖 4-11 為 8 度斜坡實驗平台。

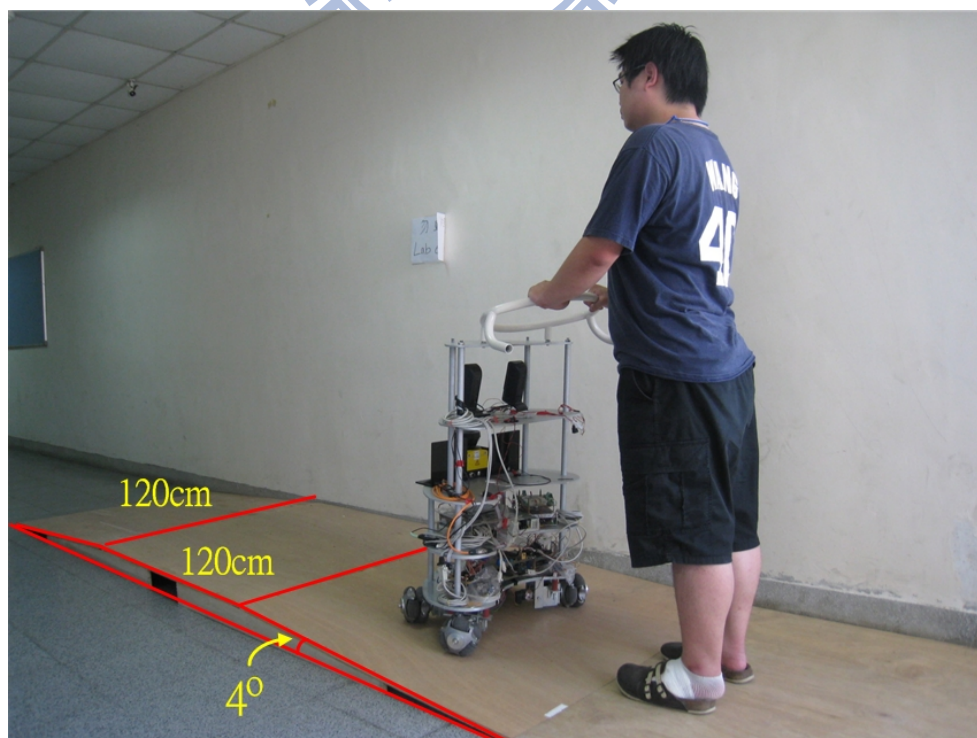


圖 4-10、 4 度斜坡實驗平台

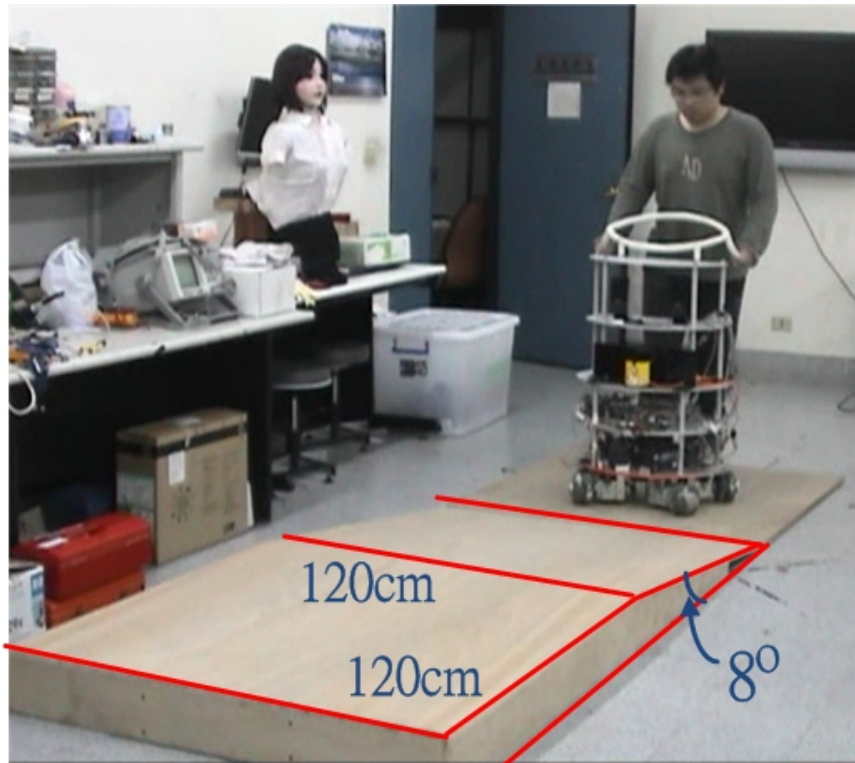


圖 4-11、8 度斜坡實驗平台

4.3.2 四度斜坡實驗結果

當在斜坡上進行外力估測時，若是不告知系統目前的系統重力分力為何，則當機器人在上坡時，系統會將重力分力所產生的影響視為是另一個使用者在施力，因此若是不進行重力補償，而使用者又想使系統有正確的反應，則必須施力大於此時的系統重力分力。延續上一小節的實驗及參數設定，透過方程式(3-16)、(3-21)、(3-22)，行走輔助機器人可以正確順應使用者的意向。圖 4-12 為機器人沿著 Y 軸在 4 度斜坡上移動的實驗結果。圖 4-12(a)為行走輔助機器人中心點的馬達合力，由電流感測板所偵測出的馬達電流所計算得知，圖 4-12(b)為外力估測器所估測的使用者所施外力，我們將其視為使用者的意向，圖 4-12(c)為由傾斜計估測出的機器人所受到的重力分力，圖 4-12(d)為由軸編碼器估測出的機器人實際速度。實驗過程為使用者由平地出發，沿著機器人 Y 軸開始移動，在 4.5 秒時到達 4 度斜坡，由圖 4-12(b)可以看出系統開始估測到重力的影響，而在 7.9 秒時離開斜坡到達水平高台，且在向前移動緩衝之後停在高台上。

由圖 4-12(a)可以看到當機器人在斜坡上時，馬達出力提高以補償重力分力所造成的

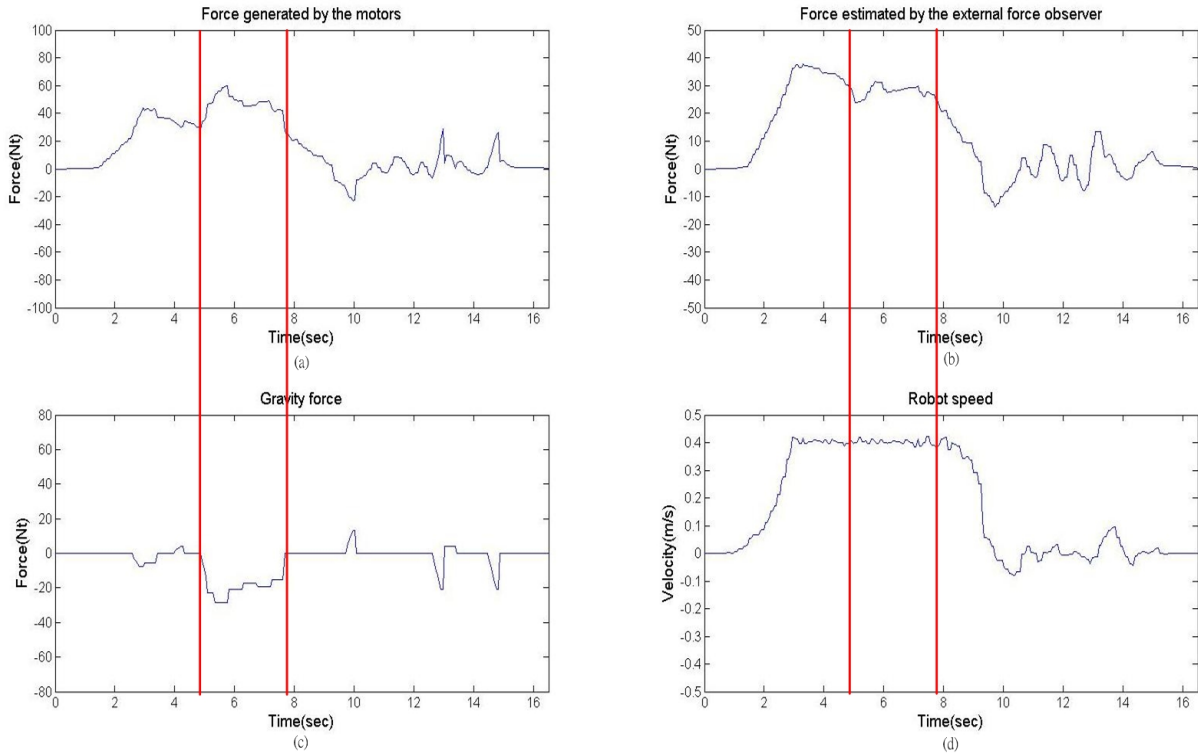


圖 4-12、4 度斜坡實驗結果(a)機器人中心點馬達合力(b)使用者所施外力的估測值(c)重力分力(d)系統速度

影響，而由圖 4-12(b)(d)可以得知使用者在水平地面與 4 度斜坡上的出力並無太大變化，且機器人的速度沒有受到斜坡的影響，這個現象符合我們最初的設計概念，讓使用者在斜坡上操控機器人與在平地上的響應一致。在 4 度斜坡上，行走輔助機器人所應承受的重力分力為 30.5Nt，遠小於系統的最大出力 88.9 Nt，因此我們讓使用者在 4 度斜坡上不在施力，檢驗機器人是否如同在平地一般，當使用者不施加外力時，行走輔助機器人將停留在原地。圖 4-13 為 4 度斜坡上不施加外力之實驗結果，機器人在 15~25 秒間處於 4 度斜坡上。在 17~23 秒這個區間，使用者不施加外力於機器人上，由圖 4-13(a)(b)可以看出這時馬達的出力與估測器所估測到的外力都降低，而在圖 4-13(d)可以得知機器人的速度趨近於停止，此時會有微小的速度變化是因為系統處於動態平衡的狀態。圖 4-14 為機器人停留在 4 度斜坡上的照片。

在實驗環境中，斜坡的傾斜角度都保持為一固定值，但在圖 4-12(b)與圖 4-13(b)中可以看出重力補償系統所計算出的重力分力並非為一固定值，這是因為在機器人的基礎移動平台上配置有懸吊系統。因此在移動的過程中，系統的重力分力會隨著懸吊系統的變化而改變，而重力補償系統也會即時的感測當下機器人所受到的重力分力。

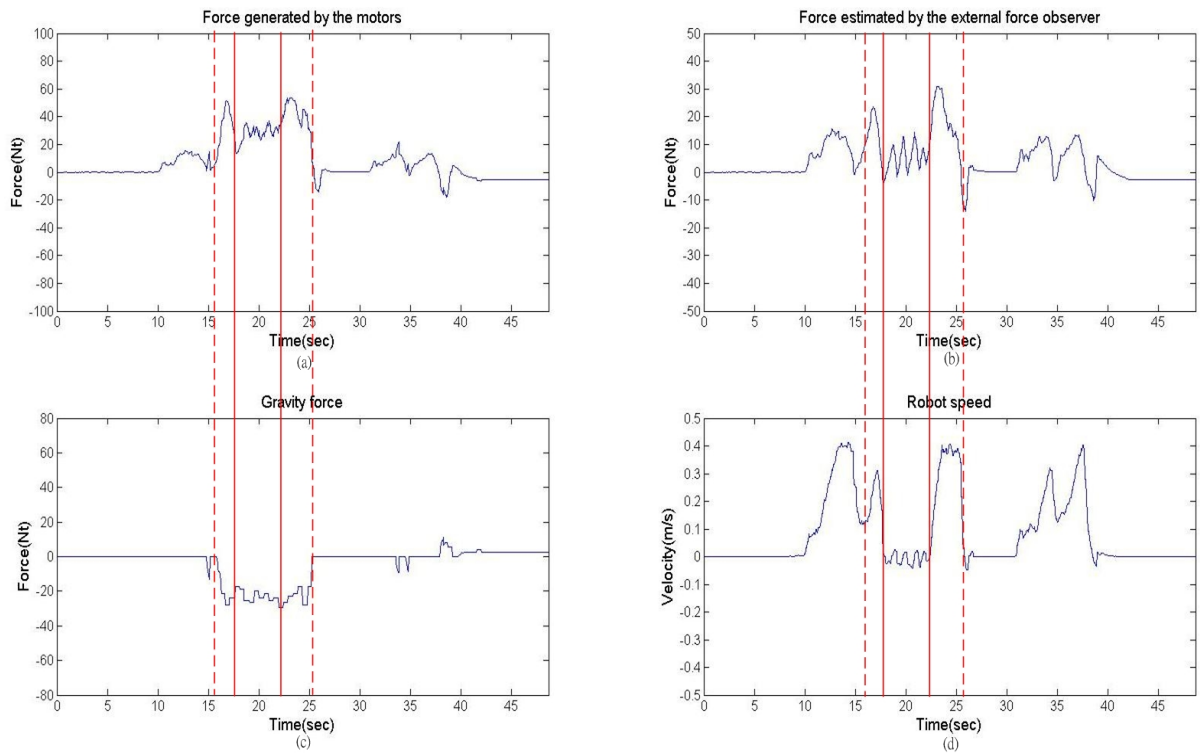


圖 4-13、4 度斜坡上不施加外力之實驗結果(a) 機器人中心點馬達合力(b)使用者所施外力的估測值(c)重力分力(d)系統速度



圖 4-14、實驗過程中機器人停留在 4 度斜坡上

4.3.3 八度斜坡實驗結果

在本節裡，我們將行走輔助機器人的操作環境由 4 度斜坡提升為 8 度斜坡，由於坡度變陡，自然系統所受到的重力分力也自然增大。當行走輔助機器人操作在 8 度斜坡上時，此時機器人所應承受的重力分力為 60.8Nt，小於系統的最大出力，因此機器人可以在此斜坡上進行重力補償。圖 4-15 為機器人沿著 Y 軸在 8 度斜坡由下往上移動的實驗結果，以及與 4 度斜坡實驗結果所進行的比較，圖中實線數值為 8 度斜坡，虛線數值為 4 度斜坡。由圖 4-15(a)(c)可以得知，機器人在 5~10 秒區間行進在 8 度斜坡上，而馬達的出力為了補償重力分力的影響，很明顯的可以看出提高，而且馬達出力值最高已經超出先前所計算的馬達出力最大值。但是即使是在這種情況下，由圖 4-15(b)可以看出估測器所估測出的外力值，亦即使用者所施予的推力，與 4 度斜坡也差相彷彿，且由圖 4-15(d)中可知兩者間的速度也差不多，由此可以驗證前一章節所設計重力補償控制確實可以完成補償重力分力的目標，且可協助外力估測器分辨出真正的使用者意向。

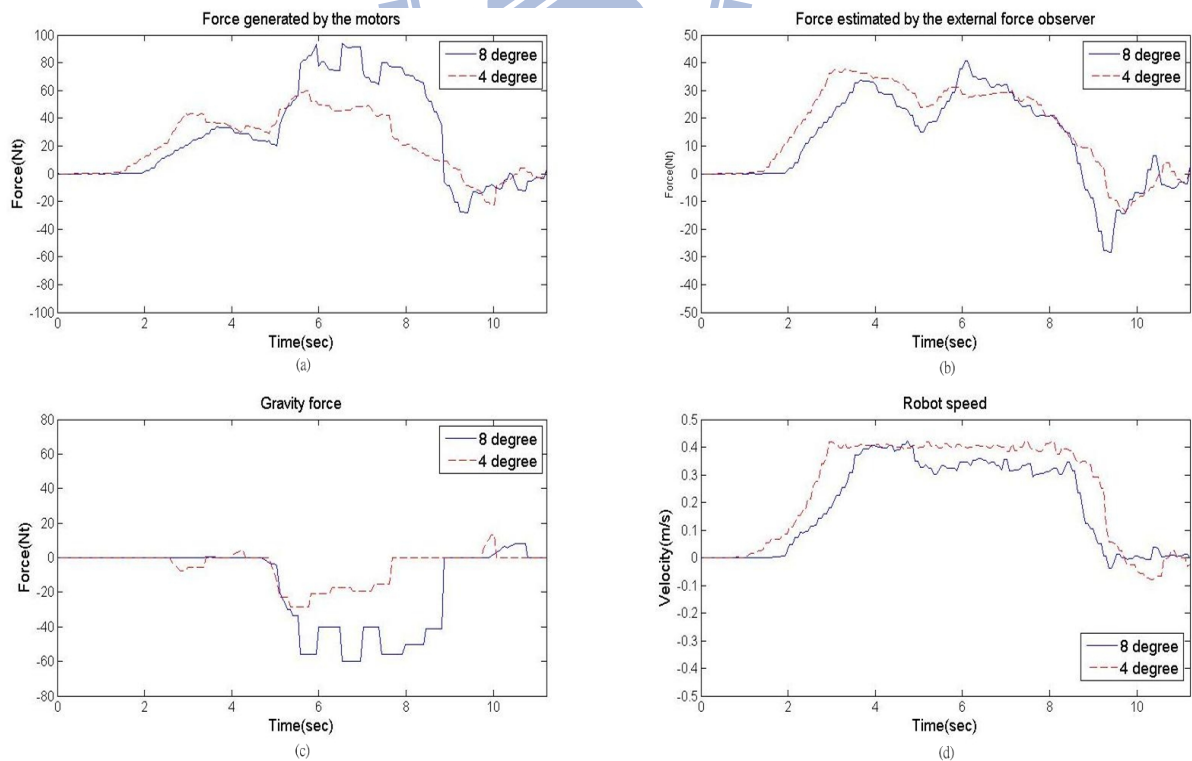


圖 4-15、8 度斜坡實驗結果(a) 機器人中心點馬達合力(b)使用者所施外力的估測值(c)重力分力(d)系統速度

接下來，我們將使用者在水平地面操控行走輔助機器人時的所施外力大小與系統速度，與使用者在 4 度斜坡與 8 度斜坡進行移動的實驗數據進行比較，圖 4-16 為使用者所施外力與系統速度的數據比較結果。由圖中可以發現，兩個斜坡實驗所呈現的數據與水平地面的數據非常相似，由圖 4-16(a)中很難發現機器人在哪一個時間點已經進入傾斜環境。而在圖 4-16(b)中我們可以得知，當使用者所施的外力相似時，機器人的移動速度也相似，且不會受到重力分力的影響。以上這些實驗數據驗證了我們所設計的傾斜環境下之順應性控制，不只是能夠在模擬結果中估測出正確的所受外力值，在實際環境下，也能夠達到我們所設定的目標，讓使用者在斜坡上也可以如同在平地上一般地操控行走輔助機器人。



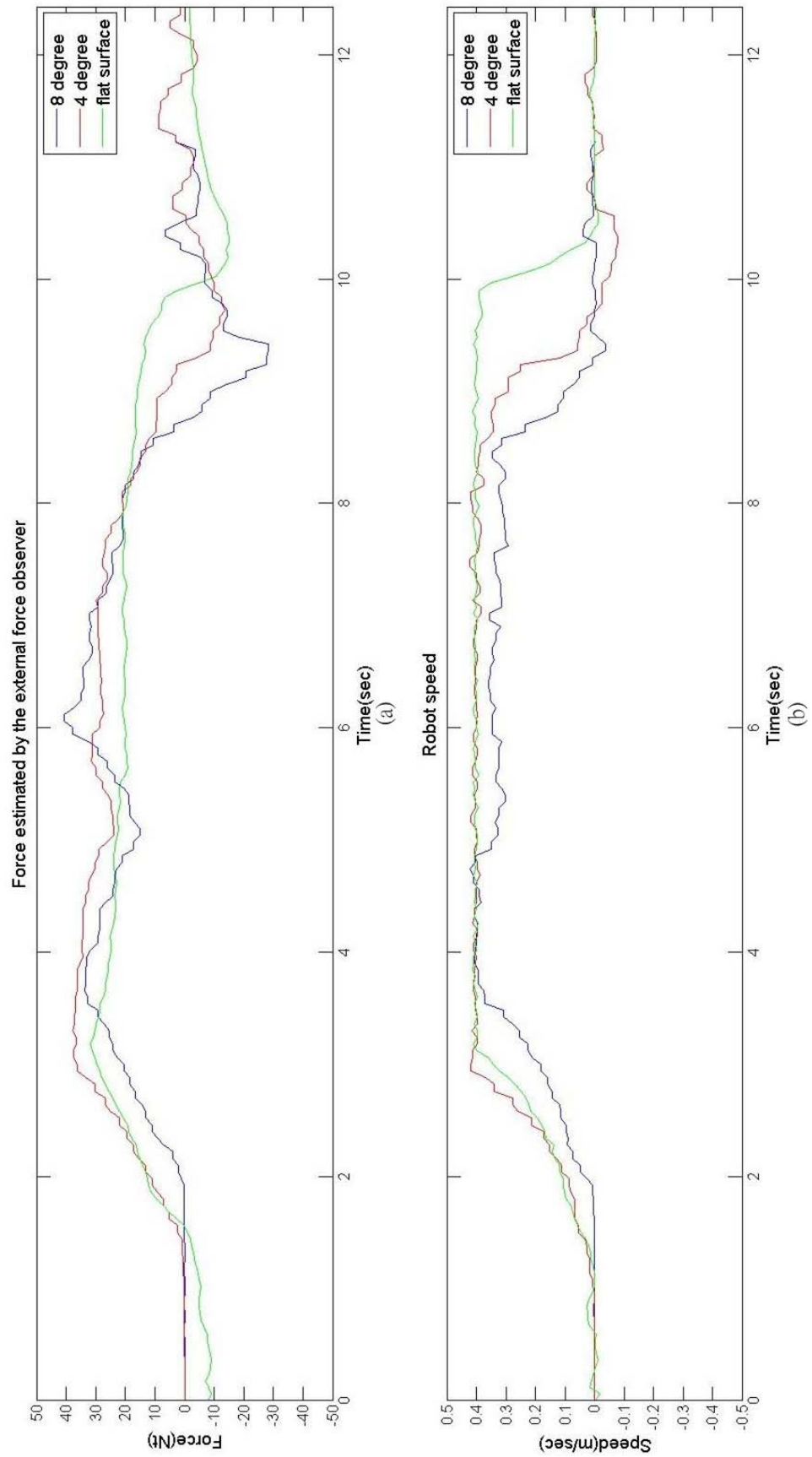


圖 4-16、平地與斜坡數據比較(a)使用者所施外力的估測值(b)系統速度

第五章 結論與未來展望

本論文的主要構想在設計一個供行動不便者使用之行走輔助機器人，並讓使用者能夠直覺式的控制此機器人，且不單單只能使用於水平地面上，在傾斜地面上也能夠擁有與平地相同的操控性能。

為了減輕使用者在操控上的負擔與在斜坡上能夠進行重力補償，機器人的基礎架構上採用主動式的架構，並搭配上全向輪平台來契合人類全向性移動的本能。在解決主動式平台容易造成安全上的隱憂時，我們進一步地將主動式平台仿效為一被動式的移動平台，也就是使用順應性控制系統來操控行走輔助機器人。而使用順應性控制系統，機器人必須要能夠取得使用者的施力資訊，透過所設計的外力估測器，經由馬達電流與轉速即可估測出系統所受的外力，而不需要使用昂貴的力感測器，同時也提供給使用者直覺式的操控性能。為了讓機器人能夠在斜坡上運轉自如，必須要得知機器人當下的重力分力，我們利用傾斜計來組成斜坡感測系統，進而使機器人可以在外力估測器中進行傾斜環境下的重力補償。

由實驗數據可以得知，在水平地面上，行走輔助機器人可以順應使用者所施加的外力來改變其自身的速度與朝向角，這驗證了我們所設計的外力估測器與順應性控制系統是可行的，且能夠提供給使用者良好的操控性。而在傾斜環境下，由數據可以看得出來，經由斜坡感測系統所測得的環境傾斜程度，能夠透過重力補償系統使外力估測器可以正確估測出使用者的意向，而不受重力分力的影響，如圖 4-13 所示，當使用者不施予外力時，機器人能夠如同操作在水平地面一樣停留在斜坡上，讓使用者即使在斜坡上也可以安全的操控行走輔助機器人。相較於被動式平台只能夠在斜坡上靜止時，透過伺服煞車來抵抗系統所受到的重力分力，而在行進狀態時，仍需使用者施予額外的施力來抵抗重力分力，我們所設計的行走輔助機器人可以即時地主動提高馬達出力來對重力分力進行補償，就算使用者在行進中也不會感受到系統所產生的重力分力負擔。而大部分的主動式行走輔助系統都是以水平環境來進行設計，並沒有考慮到當操作環境傾斜時重力分力的影響，而透過本論文所設計的傾斜地面之順應性控制，可以提高行走輔助機器人的

適用性範圍，使其更具有實用性。

本論文所建構的行走輔助機器人在運動性能、操控性、安全性與傾斜環境適用性上已經有了初步的整合，在未來發展上大致可分為兩個方面。其一為將目前的機器人視為一個基礎的平台，並在其上搭載各種智慧型的功能，例如居家看護或是保安巡邏，讓行走輔助機器人除了能夠協助使用者進行移動之外，也能在醫療、保全或是娛樂等方面給予協助。另一方面則是持續改善現有的平台，譬如使用更高轉矩的馬達或減輕機器人的重量使其能夠適用於更陡峭的斜坡，或是對控制方法進行改良，譬如採用閉回路控制的順應性控制架構，藉此消除因機構製造上的不準確所產的誤差。除此之外，在行動輔助方面上也有許多重要功能需要搭載在行走輔助機器人上，例如增加主動閃避環境中障礙物的功能、感測環境資訊來提供系統定位與導航等。期望本論文所完成的行走輔助機器人並不是一個完結，而是一個開始。



參考文獻

- [1] 行政院經濟建設委員會網頁：<http://www.cepd.gov.tw/m1.aspx?sNo=0000455>
- [2] International Federation of Robotics website：<http://www.ifr.org/service-robots/>
- [3] Y. Hirata, A. Hara and K. Kosuge, "Passive-type intelligent walking support system RT Walker," *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004, pp. 3871-3876.
- [4] M. Spenko, H. Yu and S. Dubowsky, "Robotic personal aids for mobility and monitoring for the elderly," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 14, No. 3, September 2006, pp. 344-351.
- [5] Yu. M. Spenko and S. Dubowsky, "An adaptive control system for an intelligent mobility aid for the elderly," *Autonomous Robots*, vol. 15, 2003, pp. 53-66.
- [6] Kap-Ho Seo and Ju-Jang Lee, "The development of two mobile gait rehabilitation systems," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 17, No. 2, April 2006, pp. 156-166.
- [7] O. Chuy, Y. Hirata, Z.D. Wang and K. Kosuge, "A control approach based on passive behavior to enhance user interaction," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, October 2007, pp. 899 – 908
- [8] O. Chuy, Y. Hirata, Z.D. Wang and K. Kosuge, "Active type robotic mobility aid control based on passive behavior," *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, San Diego, CA, USA, October 2006, pp. 165-170.
- [9] O. Chuy Jr., Y. Hirata and K. Kosuge, "Environment feedback for robotic walking support system control," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, April 2007, pp. 3633-3638.
- [10] S.K. Agrawal, K. Pathak and Ji-chul Ryu, "Control of a passive mobility assistive robot," *Proc. of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Chicago, Illinois, USA, November 2006. pp. 1-10.
- [11] K. Pathak and S. Agrawal, "An integrated path planning and control framework for nonholonomic unicycles," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 4605-4610.

- [12] Y. Hirata, A. Hara and K. Kosuge, "Motion control of passive intelligent walker using servo brakes," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, October 2007, pp. 981-990.
- [13] S. Suzuki, Y. Hirata and K. Kosuge, "Development of intelligent passive cane controlled by servo brakes," *Proc. of The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, Sept. 27 - Oct. 2, 2009, pp. 97-102.
- [14] M. Saida, Y. Hirata and K. Kosuge, "Motion control of passive mobile robot consisting of casters with servo brakes," *Proc. of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, October 2009, pp. 42-48.
- [15] J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow, J. Seron, A. Garcia-Cerezo and A. Pequeno-Boyer, "Center of gravity estimation and control for a field mobile robot with a heavy manipulator," *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, Malaga, Spain, April 2009, pp. 1-6.
- [16] S. Oh, N. Hata and Y. Hori, "Control developments for wheelchairs in slope environments," *Proc. of the 2005 American Control Conference*, Portland, OR, USA, June 2005, pp. 739-744.
- [17] J. Wang and Y. Li, "Kinematics and tip-over stability analysis for a mobile humanoid robot moving on a slope," in *Proc. IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China, 2008, pp. 2426-2431.
- [18] D. S. Nasrallah, H. Michalska and J. Angeles, "Controllability and posture control of a wheeled pendulum moving on an inclined plane," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 3, June 2007, pp. 564 – 577
- [19] T. Murakami, R. Nakamura, F. Yu and K. Ohnishi, "Force sensorless impedance control by disturbance observer," *Record of the Power Conversion Conf.*, Yokohama, Japan, 1993, pp.352 – 357.
- [20] W. Iida and K. Ohnishi, "Sensorless force control with force error observer," in *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2003, pp. 157-162.
- [21] Kai-Tai Song and Chen-Yang Lin, "A new compliant motion control design of a walking-help robot based on motor current and speed measurement," *Proc. of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, October 2009, pp. 4493-4498.
- [22] 林振暘, "基於馬達電流量測之行動輔助機器人順應性控制", 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, 民國 97 年 10 月。