

國立交通大學
電機與控制工程研究所

碩士論文

搭載於二輪式自動平衡移動平台之
布袋戲偶機器人系統

Self-balancing Control and Manipulation of a Glove
Puppet Robot on a Two-wheel Mobile Platform

研究生：孫冠群

指導教授：胡竹生 博士

中華民國九十八年七月

搭載於二輪式自動平衡移動平台之
布袋戲偶機器人系統

Self-balancing Control and Manipulation of a Glove
Puppet Robot on a Two-wheel Mobile Platform

研究生：孫冠群

Student : Guan-Cyun Sun

指導教授：胡竹生教授

Advisor : Prof. Jwu-Sheng, Hu

國立交通大學
電機與控制工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Electrical and Control Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in

Electrical and Control Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

搭載於二輪式自動平衡移動平台之 布袋戲偶機器人系統

研究生：孫 冠 群

指導教授：胡 竹 生 博士

國立交通大學電機與控制工程研究所碩士班

摘 要

布袋戲是台灣傳統藝術文化之一，厲害的操偶師傅可憑著靈巧手掌運用技巧讓戲偶動的栩栩如生彷彿有了生命一般。而本論文研發一隻仿布袋戲偶機器人，取名為『X-Puppet』，它可以用一只數位手套來操控使其行動有如真的布袋戲偶般。而這數位手套包括了五片壓電材料、一個傾斜儀、陀螺儀、以及一塊微控制器板，它可以藉由數學模型分析出來的手部運動與機器人之間關係的動作函數，即時計算出手部姿態並控制機器人。除此之外，本作品將此機器人裝置在一具二輪式自動平衡移動平台之上，它提供了機器人靈活移動和轉身的功能，但礙於此一平台本身為不穩定系統，所以必須實現一自動平衡演算法去計算底座以及上半身機器人動作行為的轉動力矩，利用計算轉矩法以及陀螺儀、傾斜儀和加速規去即時更新系統參數，讓整個系統可以即時地保持平衡，並且利用設計角度值的概念讓整個系統移動。為了讓整個系統做到最小化以及最低成本，本作品致力於簡化模型計算量，將整個系統實現在一 8 位元的單晶片微控制器上。

Self-balancing Control and Manipulation of a Glove Puppet Robot on a Two-wheel Mobile Platform

Student : Guan-Cyun Sun

Advisor : Prof. Jwu-Sheng Hu

Institute of Electrical and Control Engineering

Abstract

The glove puppet is the traditional culture in Taiwan. The master puppeteer manipulates the glove puppets and brings each animated puppet character to life. We make a glove puppet robot called “X-Puppet” which can be manipulated by a data glove like a real glove puppet. The data glove has five Piezoelectric Film sensors, one gyro, one tilt, and one microcontroller. It measures the gesture data, translates it into the motion of the robot and controls the robot immediately. And we mount this 9-DOF mechanism, which mimicking a glove puppet manipulation, on a two-wheel mobile platform. The platform provides agile movements of the robot but itself is an unstable system. Hence, a self-balancing controller is implemented by considering the motion as well as configuration variation of the upper body (the 9-DOF mechanism). The control law utilizes the principle of computed torque method with online identification of related parameters using various sensors including an accelerometer. The incline angle is obtained by fusing a gyroscope and a tilt sensor. Under the balancing control, the forward motion of the robot is achieved by giving a desired tilt angle profile. To minimize the footprint of electronics, the controller is implemented using an 8-bit single-chip microcontroller.

誌謝

本論文能完成第一要感謝實驗室的老闆胡竹生教授，老師過人的思考推理速度、強大的學術知識背景、天馬行空般的創意與想像力，每每讓我又驚又恐又喜，深怕一不小心就跟不上老師的腳步，另一方面卻又暗自慶幸有一個很好的榜樣值得學習效仿，未來還有很大的空間需要努力去充實自己，期許自己也能更上一層樓。第二要感謝製作 X-Puppet 的元老級專題生們，狸貓、啟彥、小蔡、阿 him、崇賢，沒有大家共同設計出來 X-Puppet 的原始架構，就沒有延伸出來的 idea，本論文也就無法順利完成。

而在研究所時期，每天相處時間最長，在學業或研究上幫忙最多的自然是實驗室 X-Lab 的學長姐及同學們：實驗室的老大興哥，聽說雨傘只要貼上興哥的姓名貼就不會不見！理論強到爆炸的鏗元學姐。亦師亦友人又細心的好學長永融，在各方面都幫了我很多的忙，大感謝！吃遍新竹的美食達人阿吉學長，吃飯、聚餐、辦桌、找餐廳皆可諮詢。桌球高手勁源學長，我們討論過桌球的殺球跟拳擊的右鈎拳具有某種程度上的關連性 XD！人帥+運氣好到抽中 wii+籃球也打得好的明唐學長！實驗室上一代的機器人強者 PAPA 學長。攻城能力一流而且幸福美滿的 HCY 學長。一秒鐘幾十萬上下的包租公 Gum 學長。歌唱很好而且愛吃金針菇到一種瘋狂境界的瓊文學姐。同是愛車人的俊宇學長。實驗室的傳奇人物，每天會走快一小時的路程來學校的 alphas 學長。潮男 lundy 學長，實驗室唯一敢開老師玩笑的強者。靠著手工圍巾脫團的嘟嘟學長，女朋友小紅人也很 nice。真的很愛灌籃高手的籃球人肉鬆學長。跟賣滷味的阿姨也可以聊天的小蔡。樂團玩很好的 simon。坐飛機回澳門比我回家還要快的阿 him。Dell 螢幕買很大的沛錡。對刀子很有研究的聖翔。巴西來的外國人活多福。實驗室一天都不能缺少的美麗重要助理淑玲。

另外還要感謝散打搏擊社人很好很客氣又超強的世界盃散打冠軍粵光教練。一起練拳又老是請我吃飯人生閱歷比八點檔還精彩的竣元學長。有你們在讓我研究之餘也不乏精彩刺激的生活。

最後要感謝我的老爸孫逢德先生、老媽廖金環女士、老妹莉蘋，提供我不虞匱乏的生活、無需多操心的後盾，讓我可以專心一致在研究上。還有女朋友佳穎，陪我度過了漫長的大學和研究所生涯。要感謝的人實在是太多了，難怪大家最後都喜歡感謝天，那我也感謝天吧！

目 錄

摘 要	i
Abstract.....	ii
誌 謝	iii
目 錄	iv
表 列	vi
圖 列	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻探討.....	1
1.2.1. 布袋戲偶之簡介.....	2
1.2.2. 戲偶機器人之開發實例與應用.....	3
1.2.3. 二輪式自動平衡移動平台之開發實例與應用.....	6
1.2.4. 二輪式自動平衡移動平台搭載人形機器人開發實例與應用.....	8
1.3 研究目標.....	10
1.4 論文架構.....	10
第二章 系統架構.....	11
2.1 布袋戲偶機器人『X-Puppet』.....	11
2.1.1 『X-Puppet』之機械本體設計概念.....	11
2.1.2 『X-Puppet』之系統設計架構.....	17
2.2 二輪式自動平衡移動平台.....	19
2.2.1 二輪式自動平衡移動平台之機械本體設計概念.....	19
2.2.2 二輪式自動平衡移動平台之系統設計架構.....	23
第三章 數位手套(Data Glove)控制器.....	25
3.1 數位手套(Data Glove)之簡介.....	25
3.2 壓電材料感測器(Piezoelectric Film Sensors)之簡介.....	26
3.3 壓電材料感測器實現數位手套.....	27
3.3.1 壓電材料實現感測彎曲程度(Angle)電路架構.....	27
3.3.2 微控器連結回授之系統架構.....	28
3.4 數位手套操控機器人動作原理.....	28
3.4.1 手部骨骼運動對應機器人動作之模型.....	30

3.4.2	模型參數校正.....	32
第四章	二輪式即時自動平衡移動控制平台.....	33
4.1	系統模型架構分析.....	33
4.1.1	二輪式移動平台系統模型分析.....	33
4.1.2	『X-Puppet』系統模型分析.....	34
4.2	計算轉矩法(Compute Torque Method)實現系統平衡演算法.....	39
4.3	以傾斜儀(Tilt)和陀螺儀(Gyro)合成增強角度偵測準確度.....	43
4.4	利用遞迴最小平方法(Recursive Least-Squares Method)估計系統參數.....	45
4.5	穩態之系統重心補償(Center of Mass Compensation).....	47
4.6	二輪式移動平台旋轉之概念描述與推導.....	48
第五章	軟硬體設計與實驗結果.....	50
5.1	數位手套控制器.....	50
5.1.1	數位手套實體架構.....	50
5.1.2	行為模式之數據分析.....	51
5.2	『X-Puppet』.....	56
5.2.1	『X-Puppet』之實體架構.....	56
5.2.2	行為模式之分析.....	56
5.2.3	即時實驗之連續圖.....	59
5.3	二輪式自動平衡平台搭載『X-Puppet』.....	65
5.3.1	二輪式自動平衡移動平台搭載『X-Puppet』之實體架構.....	65
5.3.2	自動平衡演算法之模擬分析.....	66
5.3.3	行為模式之分析.....	72
5.3.4	即時實驗之連續圖.....	73
第六章	結論.....	77
6.1	研究成果.....	77
6.2	未來展望.....	77
附錄		78
I.	$x^* = (A^T A)^{-1} (A^T b)$ 為 $Ax=b$ 的最小平方誤差解之證明.....	78
II.	遞迴最小平方法的推導.....	79
III.	機械手掌參考資料.....	81
IV.	『X-Puppet』元件設計圖.....	83
Reference:		87

表 列

表 2-1 伺服馬達 PICO STD 規格表.....	13
表 2-2 伺服馬達 DS1313 規格表	14
表 2-3 伺服馬達 HS-65MG 規格表	15
表 2-4 X-PUPPET 硬體設備規格表.....	16
表 2-5 陀螺儀硬體設備規格表[44]	21
表 2-6 傾斜儀硬體設備規格表[45]	22
表 2-7 加速規硬體設備規格表[45]	22
表 2-8 二輪式自動平衡移動平台硬體設備規格表.....	23
表 3-1 數位手套 (5DT DATA GLOVE 5 ULTRA) 規格表[46].....	25
表 3-2 PVDF SENSOR 規格表 [47].....	26



圖 列

圖 1-1 (A)布袋戲偶 (B)布袋戲偶臉譜	3
圖 1-2 (A)布袋戲前台 (B)布袋戲後台樂隊	3
圖 1-3 香瓜博士(DR. BUNSEN HONEYDEW)	4
圖 1-4 ELMO 搔癢娃娃	4
圖 1-5 京劇機器人	5
圖 1-6 日本送茶人偶	5
圖 1-7 左為 MIT 自製賽格威，右為實際賽格威產品	6
圖 1-8 左為 BALANCING ROBOT，右為與實際賽格威比較圖	7
圖 1-9 nBOT BALANCING ROBOT	7
圖 1-10 EMIEW 2	8
圖 1-11 ANYBOT-QA	9
圖 1-12 會騎乘賽格威的機器人 HUBO	9
圖 2-1 (A) 牽動原理的手指架構 (B) 驅動馬達組	12
圖 2-2 (A) SHADOW 公司研發的 DEXTEROUS HAND [47] (B)手指的結構	12
圖 2-3 『X-PUPPET』機構草稿圖	13
圖 2-4 廣營電子生產的微小型伺服馬達 PICO STD [39]	13
圖 2-5 雷虎公司生產的伺服馬達 DS1313 [40]	14
圖 2-6 HiTEC 公司生產的微小型伺服馬達 HS-65MG [41]	15
圖 2-7 (A) 『X-PUPPET』第一代設計 (B) 『X-PUPPET』第二代設計	16
圖 2-8 馬達主控板	17
圖 2-9 馬達控制板	17
圖 2-10 (A)電源降壓模組 (B)電池先生公司生產之充電電池[42]	18
圖 2-11 機器人硬體控制系統示意圖	18
圖 2-12 個人用運輸載具賽格威(SEGWAY)[38]	19
圖 2-13 搭載 『X-PUPPET』之二輪式移動平台構想圖	20
圖 2-14 (A)藍芽無線模組 (B)藍芽接收器	23
圖 2-15 底座模組與機器人結合系統示意圖	24
圖 3-1 數位手套 (5DT DATA GLOVE 5 ULTRA)[46]	25
圖 3-2 PVDF SENSORS [47]	26
圖 3-3 PVDF 感測器積分電路	27
圖 3-4 微控器連結回授之系統架構	28
圖 3-5 手掌的結構與關節代號定義 [1]	29
圖 3-6 八種主要的操偶姿態與其對應的手勢，依次為(A)站姿 (B)彎腰	29
圖 3-7 (A)中指模型 REF.[?] (B) 『X-PUPPET』模型	31
圖 3-8 數位手套設計圖	32
圖 4-1 『X-PUPPET』腰部以下的自由體圖	34
圖 4-2 (A) 『X-PUPPET』底部到頭部連桿示意圖 (B)中央連桿的自由體圖	37

圖 4-3 (A)機器人肩膀到手部模型 (B)機器人左半身示意圖.....	39
圖 4-4 底座輪子的數學模型.....	39
圖 4-5 θ_d 設計讓機器人往前移動.....	43
圖 4-6 θ 角度的偵測，由上方到下方依序為傾斜儀、陀螺儀、.....	44
圖 4-7 卡曼濾波器演算法流程[11].....	45
圖 4-8 H 參數陣列其中一元素在不同初始條下的收斂情形.....	47
圖 4-9 系統重心補償示意圖.....	47
圖 4-10 系統旋轉示意圖.....	49
圖 4-11 全系統示意圖.....	49
圖 5-1 類比積分放大電路+重置電路實體圖.....	51
圖 5-2 數位手套硬體與系統流程示意圖.....	51
圖 5-3 點頭-上為數位手套資訊，下為模型圖.....	52
圖 5-4 揮右手-上為數位手套資訊，下為模型圖.....	53
圖 5-5 揮左手-上為數位手套資訊，下為模型圖.....	54
圖 5-6 揮雙手-上為數位手套資訊，下為模型圖.....	55
圖 5-7 (A)『X-PUPPET』實體圖 (B)控制電路板與電源模組.....	56
圖 5-8 八種主要的操偶手勢相對於機器人的動作，依次為(A)站姿 (B)彎腰.....	57
圖 5-9 八種主要的實際操偶姿態相對於機器人的動作，依次為(A)站姿.....	58
圖 5-10 點頭動作連續圖.....	59
圖 5-11 彎腰動作連續圖.....	59
圖 5-12 轉身動作連續圖.....	60
圖 5-13 揮左手動作連續圖.....	60
圖 5-14 揮右手動作連續圖.....	60
圖 5-15 一連串任意動作連續圖.....	61
圖 5-16 布袋戲偶與機器人映射-點頭動作連續圖.....	62
圖 5-17 布袋戲偶與機器人映射-彎腰動作連續圖.....	62
圖 5-18 布袋戲偶與機器人映射-轉身動作連續圖.....	62
圖 5-19 布袋戲偶與機器人映射-揮左手動作連續圖.....	63
圖 5-20 布袋戲偶與機器人映射-揮右手動作連續圖.....	63
圖 5-21 布袋戲偶與機器人映射-一連串任意動作連續圖.....	64
圖 5-22 (A)二輪式平台搭載『X-PUPPET』正面圖.....	65
圖 5-23 改變 k_d 值對系統脈衝反應的影響.....	66
圖 5-24 由上至下依序為設計角度值 θ_d (DESIRED ANGLE)、.....	67
圖 5-25 上圖為配合實際硬體限制所設計之 θ_d 值與系統反應， $k_p=36$ $k_d=9$	69
圖 5-26 上圖為配合實際硬體限制所設計之 θ_d 值與系統反應， $k_p=36$ $k_d=6$	69
圖 5-27 設計 θ_d 值讓機器人往前移動， $k_p=36$ $k_d=9$	70
圖 5-28 設計 θ_d 值讓機器人往前移動， $k_p=36$ $k_d=6$	70
圖 5-29 平衡演算法在遭受突然外力的反應.....	71
圖 5-30 平衡演算法在遭受突然外力並對 θ_d 值做補償的反應.....	71
圖 5-31 靜止平衡與受外力干擾連續圖.....	73

圖 5-32 慢速轉身連續圖	74
圖 5-33 快速轉身連續圖	74
圖 5-34 穩態系統之重心補償連續圖	74
圖 5-35 向前移動連續圖	75
圖 5-36 在機器人動作同時保持平衡連續圖	75
圖 5-37 用數位手套控制機器人同時保持平衡與移動連續圖	75
圖 5-38 用數位手套控制機器人同時保持平衡連續圖	76



第一章 緒論

1.1 研究動機

一開始，我們只是一群想要做機器人的專題生聚在一起，沒有目標，也不確定方向是什麼，在偶然的情況下拿到一只 5DT(Fifth Dimension Technologies)公司所出之五個自由度的數位手套(5DT Data Glove 5 Ultra)，於是開始思考這項產品除了可以拿來做虛擬實境外，還有什麼跟手部運動有關的有趣應用，正巧當時布袋戲正流行，大家便靈機一動想到，若能把這項台灣傳統藝術文化與機器人做一個結合，不但有趣，而且更含有文化傳承與推廣的意涵，兼容東方藝術與西方科技，最重要的是，我們打造了一隻台灣特有的布袋戲偶機器人『X-Puppet』！

如同大家所熟知的，布袋戲偶的特色之一為僅靠手指靈活地運動來操控木偶，使其栩栩如生地表現出生、旦、淨、末、丑、雜等各種別具特色之角色，為此，本作品特地做了一只數位手套(Data Glove)，分析手部骨骼運動與戲偶行為之數學模型關係，並反映在機器人上做出相同的動作，操控此機器人使其具有如真實布袋戲偶般的行為模式，而另一大布袋戲的特色為瀟灑不受拘束的身段姿態，以及打鬥時俐落靈活地轉身動作，為達此一目標，參考了時下流行的賽格威(Segway)二輪式的移動平台，藉由其自動平衡的設計和靈活轉身的特性來效仿並實現此一目標。

1.2 文獻探討

本小節主要分成四個部分，第一部分將對台灣傳統文化布袋做一個簡單的介紹，第二部分列舉目前曾經出現過戲偶與機器人模型的結合實例，第三部分則針對二輪式自動平衡的移動平台做一簡介，並且整理出目前世界上已出現哪些中小型的二輪式自動平衡移動平台，第四部分要討論的是二輪式移動平台搭載人形機器人並能自動保持穩定狀態，以及世界上已經出現的實例與應用。

1.2.1. 布袋戲偶之簡介

布袋戲又稱作布袋木偶戲(如圖 1-1(a) 所示)、手操傀儡戲、手袋傀儡戲、掌中戲、小籠、指花戲，布偶的頭是用木頭雕刻成中空的人頭，除了偶頭、戲偶手掌與足部外，戲偶之軀幹與四肢都是用布料所做出服裝，因此有了布袋戲之通稱。布袋戲兩百多年前由中國大陸福建泉州、漳州移民引進使用南管、潮調音樂曲調的古典布袋戲開始，在臺灣歷經幾個世代的傳衍，不同世代的演師陸續加入北管音樂、平劇音樂、日本流行音樂、西洋音樂、歌仔調音樂，並突破木製彩樓、舞臺的限制，引進商業劇場的編劇，加入電子化的聲光效果，而遞變為商業劇場的聲光布袋戲與電視布袋戲。經此長期演變發展，布袋戲乃成為特具臺灣文化風格的臺灣布袋戲。

操作戲偶的方法，以左手操偶為例，只要將食指部分套入偶頭，拇指放入布袋戲戲偶右手，另外三根手指放入戲偶左邊(左手) 之後(如圖 3-6 所示)，即可利用手掌與五指的搖擺或晃動，來控制戲偶頭、身體與手來表演。如果以角色方面來論述，布袋戲偶約略可以分為生、旦、淨、末、丑、獸、雜等七種角色，而如同中國戲劇一般，布袋戲偶的面相往往也代表著這一角色的性格，例如“淨”角，主要指的是豪氣、勇猛型有著非常強烈男子氣概、陽剛氣質的男角(如圖 1-1(b) 所示)。至於在演出上則可分為前場與後場，前場即戲台部分(如圖 1-2(a) 所示)，觀眾可見到操偶師傅操作人偶於戲台上的表演，後場(如圖 1-2(b) 所示) 則包括了操偶師、樂團和口白師傅。

(以上資料來源摘錄自維基百科-布袋戲)[31]



(a) (b)

圖 1-1 (a)布袋戲偶 (b)布袋戲偶臉譜



(a) (b)

圖 1-2 (a)布袋戲前台 (b)布袋戲後台樂隊

1.2.2. 戲偶機器人之開發實例與應用

布袋戲偶機器人因為地緣因素，除了台灣之外很難有其他國家出現相同的機器人，但就目前各國較具知名度的特殊玩偶、卡通人物、具代表性的藝術文化為原形，所製造出來的人形機器人倒是玲瓏滿目，茲舉例如下：

➤ 香瓜博士 (Dr. Bunsen Honeydew) [32]

由尼加州冒險樂園 (California Adventure) 的布偶活動實驗室 (Muppet Mobile Lab) 所研發，布偶劇 (Muppet) 人物「香瓜博士」，它騎著一輛類似賽格威的戴具，後座載著小跟班 Breaker 踩著單車。



圖 1-3 香瓜博士 (Dr. Bunsen Honeydew)

➤ 芝麻街 ELMO 搔癢娃娃

美國芝麻街美語著名的角色 Elmo 為範本所做的機器人，它在下巴、肚子、腳趾裝有感測器，當有偵測到訊號時會產生大笑的和有趣的肢體反應。



圖 1-4 ELMO 搔癢娃娃

➤ 京劇機器人

中國科大電子工程與資訊科學系所研發的京劇機器人，它將京劇的動作和川劇的變臉相結合，還會吹鬍子、瞪眼、變臉等等，將中國古代戲曲人物表演的栩栩如生。



圖 1-5 京劇機器人

➤ 日本送茶人偶

高約 45 公分的送茶人偶是以日本傳統服飾為設計原形，雙手端一個托盤，只要在托盤中放上茶碗，人偶就會移動到客人面前，一旦把茶碗取走，人偶會自動停止，當客人喝完茶把空碗放回托盤，人偶會轉身自動把空碗移回原處。



圖 1-6 日本送茶人偶

1.2.3. 二輪式自動平衡移動平台之開發實例與應用

二輪式的移動平台最初以賽格威(請參考 2.2.1 小節)個人交通工具出現，一上市就引發很大議題與討論，很多研究人員開始對這樣一個自動平衡的平台有興趣，一部分的研究人員利用低價位的單晶片來製做賽格威，有另一部分則是把二輪式移動平台小型化，茲舉例如下：

➤ 麻省理工學院自製簡易賽格威 [33]：

MIT(麻省理工學院)學生自製的簡易版賽格威，整個控制系統的核心採用的是 Microchip 公司出的 PIC 微控制器，用來讀取 MEMS 的加速規和陀螺儀訊號，實現平衡演算法並控制輪胎馬達組。



圖 1-7 左為 MIT 自製賽格威，右為實際賽格威產品

➤ Balancing Robot – Bender [34] :

一樣是由 PIC 微控器當核心，但實現了二輪式自動平衡移動平台的微小化，另外搭配許多感測器例如攝影機，超音波等等，讓機器人可以自主地行動而不會因外在環境的干擾而導致不穩定。

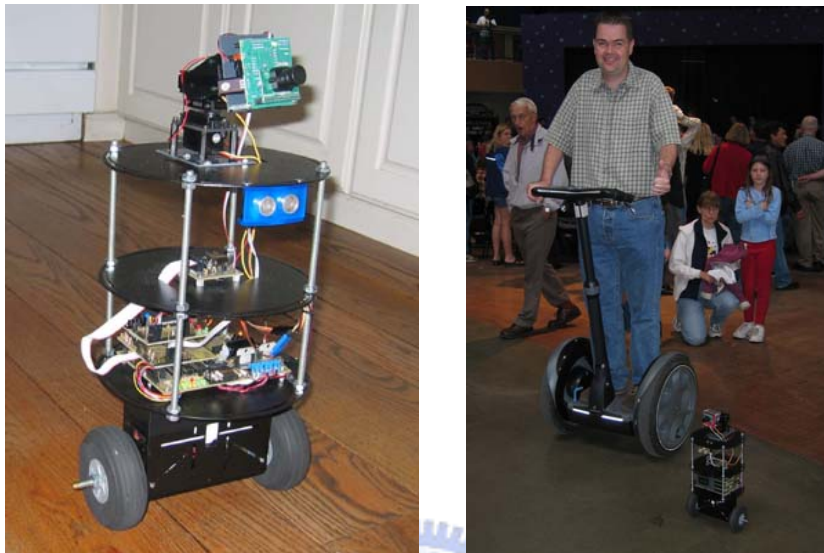


圖 1-8 左為 Balancing Robot，右為與實際賽格威比較圖

➤ nBot Balancing Robot [35] :

nBot 的核心用的是嵌在 M. I. T. 6.270 board 上的 HC11 robot controller，它有很高的解析度與平衡能力，nBot 加上輔助輪後可以用一根倒單擺連桿頂住一顆球在上方而不至於掉下來。

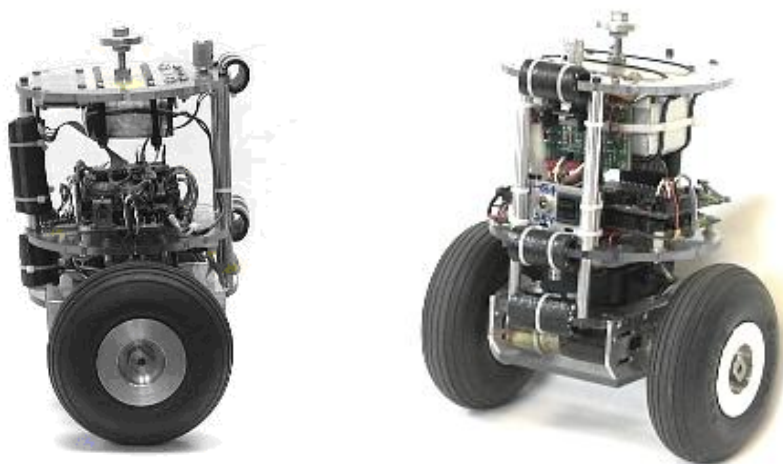


圖 1-9 nBot Balancing Robot

1.2.4. 二輪式自動平衡移動平台搭載人形機器人開發實例與應用

由於二輪式的移動平台本身就需具備自動平衡的能力，如果在上方搭載一個複雜的系統例如人形機器人，那勢必會增加底座的判斷條件和運算量，使得系統更加難保持在穩定的狀態，不過隨著研究人員的投入與微控器計算速度的演進，也開始出現具有人形運動姿態的機器人搭載於二輪式自動平衡系統，茲舉例如下：

➤ EMIEW 2 [24] [36]

日立(Hitachi)公司所研發出的 EMIEW 2，屬於辦公室工作機器人(Office Worker Robot)，其高度大約為 1.3 公尺，重量 70 公斤，女性外觀的機器人，上半身具有簡單的運動能力。



圖 1-10 EMIEW 2

➤ ANYBOT - QA [37]

QA-The Telepresence Robot，是由 ANYBOTS 公司所生產的二輪式人形機器人，他具備有無線網路、影音播放能力、LCD 顯示器、雷射指向器、導航能力，屬於比較完整而商業化的機器人。



圖 1-11 ANYBOT - QA

➤ Hubo [48]

機器人 Hubo 是由 HUBO Lab 所研發出來的機器人，為人形外觀，有趣的地方是，他是第一隻會騎乘賽格威交通工具的機器人。



圖 1-12 會騎乘賽格威的機器人 Hubo

1.3 研究目標

以打造布袋戲偶機器人為主題，將台灣這一項傳統文化以不同的面貌再度搬上舞台。為達此一目的，本論文償試去結合目前各式的感測器技術與微控制器，利用數學模型與演算法，盡可能地去符合布袋戲偶的運動形態，並努力消除人與機器之間所呈現出的不協調與生硬感，也希望藉由本論文提出兩項技術，能夠加強機器人的行為模式，使之更為圓融，更貼近與人之間的距離。其一為數位手套，它可以擷取手掌的運動姿態並經由轉換函數計算出相對應的機器人動作，讓機器人行為更加貼近由手部運動直接操控之傳統布袋戲偶；其二為二輪式自動平衡移動平台，它除了可以讓機器人具有移動能力外，也因其二輪的特性而可以使得機器人更靈活的轉身，表現出更具行動力、更多元而不生硬的行為。

1.4 論文架構

這篇論文包含了三個主要的部分，分別是布袋戲偶機器人 X-Puppet 的硬體與系統的介紹、數位手套和平衡系統演算法的推導，軟硬體架構與演算法的驗證。底下大致描述這三個部分的內容：

第一部份：

第二章：系統架構

第二部分：

第三章：數位手套(Data Glove)控制器

第四意：二輪式即時自動平衡移動控制平台

第三部分：

第五章：軟硬體設計與實驗結果

第六章：結論

第二章 系統架構

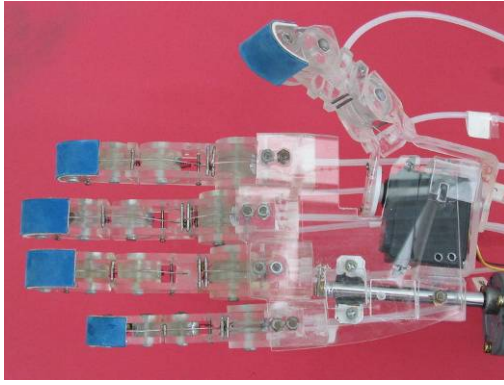
本章分為兩個部分，一為布袋戲偶機器人『X-Puppet』的系統架構介紹，二為底部二輪式移動平台的系統架構介紹，『X-Puppet』為交大嵌入式系統實驗室 X-Lab 所製做之布袋戲偶機器人，泛指任何可搭配布袋戲偶外衣並利用電機系統操作之機械載具，並不一定包括移動平台，而本論文就我所負責的區塊在此分為這兩個部分說明。

2.1 布袋戲偶機器人『X-Puppet』

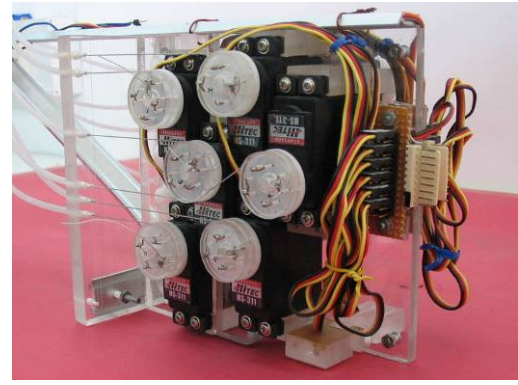
此部分的機器人主要為控制布袋戲偶上半身的人形機構，這部分機械本體要感謝同組的同學鄧智謙和蘇崇賢負責設計機構板件和找尋合適的馬達，系統設計與硬體架構的部分要感謝實驗室學長已經開發完成的馬達控制系統，主要操控系統的部分是沿用我們實驗室之前所做之雙足機器人『PAPA - Man』[19] 的架構，以下再細分兩部分做介紹。

2.1.1 『X-Puppet』之機械本體設計概念

一開始希望做一隻布袋戲偶機器人時，最直覺的想法是做一隻機械手掌，由手掌直接來操控布袋戲偶，本作品參考了很多目前世界上有公佈資料的機械手掌(請參考附錄三)，但他們不外乎都各有一些不適用的地方，目前能找到的設計主流分有兩種，第一種是利用牽動原理，藉金屬繩索以及彈簧的配合，對機械手指進行伸縮動作的驅動(如圖 2-1 所示)，但其馬達組所佔用的體積較大，且無法細微的調整每一個關節的角度，因此，對於控制布袋戲偶最重要的大拇指與中指需要三維運動來說，這樣的設計可能無法符合要求。另一種像是 Shadow 公司研發的 Dexterous Hand(如圖 2-2 所示)，動力來源改用空氣肌肉(Air Muscles)取代伺服馬達，但由於價錢昂貴以及結構複雜也不列入考量。



(a)



(b)

圖 2-1 (a) 牽動原理的手指架構 (b) 驅動馬達組



(a)



(b)

圖 2-2 (a) Shadow 公司研發的 Dexterous Hand [47] (b) 手指的結構

由於想要設計一隻機械手掌來操控布袋戲偶似乎困難重重，於是決定換個方向思考，既然布袋戲偶也是人形的機構，那就直接設計一隻體積比較小可以套進戲偶裡的人型機械結構，如此一來，戲偶的各個關節部分的對應關係就可以一目了然，在設計機構上也更可以符合尺寸要求。

本作品的目標是設計一隻可以操控布袋戲偶的機器人，所以並不考慮腳部的機構，單純只有上半身的設計，而分析機器人所需的自由度包括了頭部、左右肩膀的轉動、左右手臂，左右手掌、腰部以及轉身，一共九個自由度，也就是需要九顆伺服馬達，然後依據我們的想法畫出草圖如下(圖 2-3 所示)。

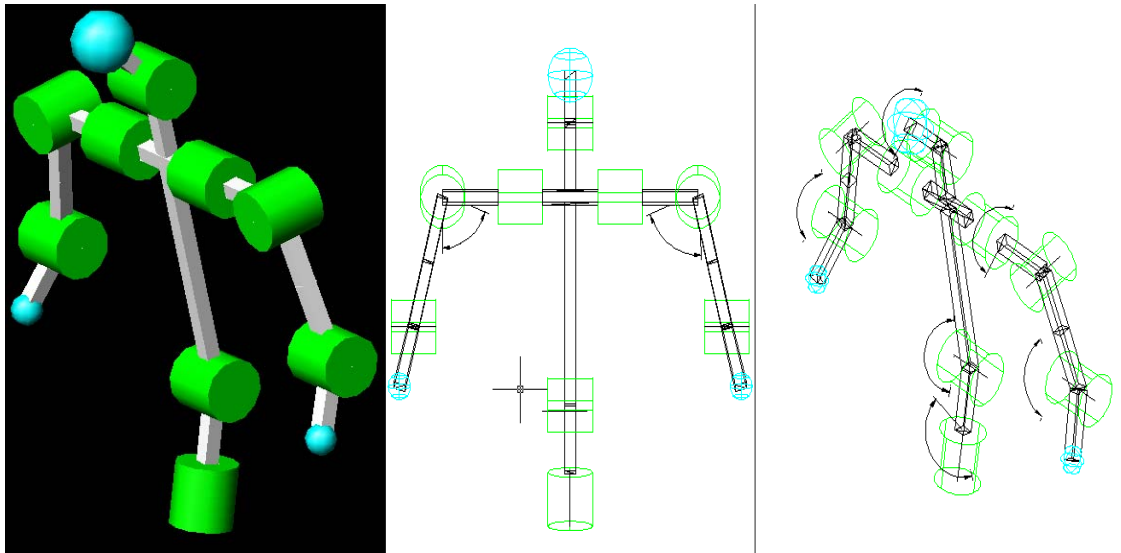


圖 2-3 『X-Puppet』機構草稿圖

有了設計的想法後，接下來的重點便是選擇適合的馬達，由於傳統的布袋戲偶(如圖 1-1 所示)的體型不大，所以馬達的選取必需要能配合戲偶的尺寸。本作品選擇了廣營電子公司所生產的微小型伺服馬達，型號 PICO STD(如圖 2-4 所示)，其規格如表 2-1：



圖 2-4 廣營電子生產的微小型伺服馬達 PICO STD [39]

表 2-1 伺服馬達 PICO STD 規格表

規格	GWS-PICO/STD/微小型伺服機
尺寸	22.8x9.5x16.5CM
重量	5.40 公克
速度	0.19(秒/60°) @4.8V 0.09(秒/60°)@6.0V
扭力	0.70 公斤-公分 @4.8V 0.84 公斤-公分@6.0V

另外腰部和轉身的關節處因為承受了機器人整體的重量，所以選用扭力比較大的伺服馬達，由雷虎公司(Thunder Tiger)生產的 DS1313 (如圖 2-5 所示)，其規格如表 2-2 所示：



圖 2-5 雷虎公司生產的伺服馬達 DS1313 [40]

表 2-2 伺服馬達 DS1313 規格表

規格	DS1313 伺服機
馬達	Coreless
齒輪	金屬
尺寸大小(LxWxH)mm	41.8 x 20.3 x 39.6
重量(g/oz)	66/2.328
扭力(kg-cm/oz-in)@6V	12.5/173.6
電壓範圍	4.8V~6V

另外機器人控制頭部運動的馬達也需要較大的扭力值，主要因為布袋戲偶雖然身體大部分為布料很輕，但頭部由於材質與設計裝飾品的關係，重量較大，PICO STD 的扭力值略顯不足，加上它是塑膠齒輪比較容易崩牙損壞，所以採用了另一顆大小差不多但是扭力值較大價錢也較貴，由 HiTEC 公司生產的 HS-65MG (如圖 2-6 所示)，其規格如表 2-3 所示



圖 2-6 HiTEC 公司生產的微小型伺服馬達 HS-65MG [41]

表 2-3 伺服馬達 HS-65MG 規格表

規格	HS-65MG 微小型伺服機
尺寸	23.6x11.6x24CM
齒輪	金屬
重量	12.5 公克
速度	0.14(秒/60°) @4.8V
扭力	1.8 公斤-公分 @4.8V

有了馬達之後就可以設計板件來組裝出機器人，由於人體的關節常常同一個地方具有一維以上的自由度，但對馬達來說，一顆馬達只能提供一個自由度，而且馬達固定為方形的結構，所以為了讓機器人更貼近人形的活動方式，需要一些機構上的巧思和設計，也需要時常更改板件的設計，到目前為止所使用的是『X-Puppet』第二代設計(如圖 2-7 所示)，其規格如表 2-4 所示：

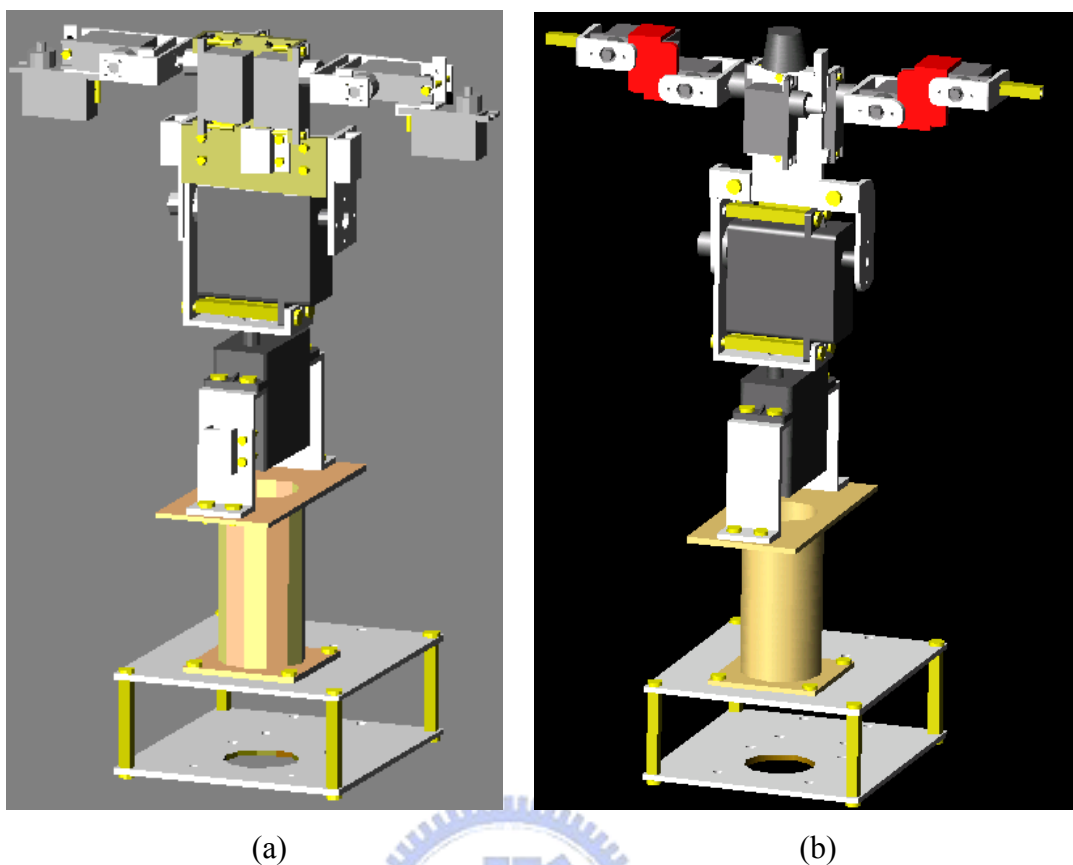


圖 2-7 (a) 『X-Puppet』 第一代設計 (b) 『X-Puppet』 第二代設計

表 2-4 X-Puppet 硬體設備規格表

設備	規格
自由度	九個自由度
高度	30cm
重量	1.5 kg
控制晶片	Microchip PIC 18F452 (8-bit 30MHz)
致動器	RC servo motors
電源供應	6V for motors, 5V for control board

2.1.2 『X-Puppet』之系統設計架構

『X-Puppet』的馬達控制系統主要承襲自本實驗室另外一隻雙足機器人『PAPA-Man』[19]的架構，整個控制系統將分成三個部分：馬達主控板，馬達伺服板以及電源模組，茲說明如下：

➤ 馬達主控板(Master Board)：

馬達主控板主要工作為透過 RS-232 通訊協定與外界溝通，接收馬達指令，然後運算解譯成馬達的 PWM 訊號值，最後藉由 I2C 通訊定傳資訊給馬達控制板做動作。

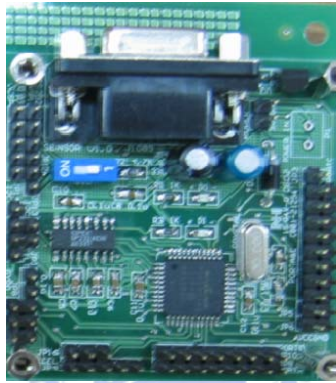


圖 2-8 馬達主控板

➤ 馬達控制板(Motor Board)：

它會根據馬達主控板所接收到的控制指令內容去調整每一顆馬達裝置的 PWM 控制訊號，專門負責趨動馬達組。

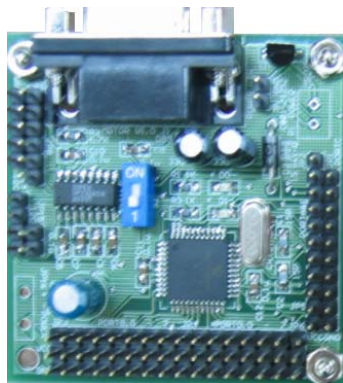
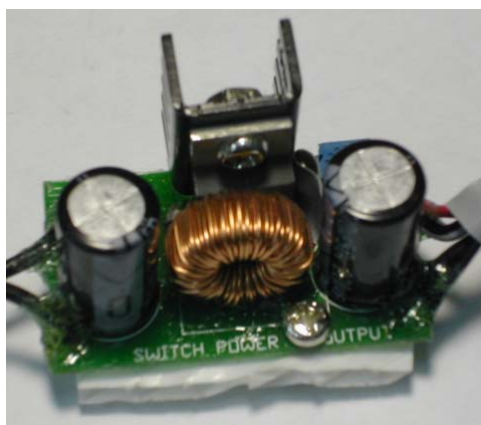


圖 2-9 馬達控制板

➤ 電源模組(Power Module)：

電源模組採用三個 Step-down 穩壓模組(如圖 2-10 所示)，相較於一般常用的 78 系列降壓 IC，Step-down 穩壓模組能更有效率地轉換能量以減少損失。電池(Battery)使用電池先生(Mr. Battery)公司所出的充電電池，它不僅攜帶方便，而且充電簡單，也可以由使用者選擇輸出電壓值。



(a)



(b)

圖 2-10 (a)電源降壓模組 (b)電池先生公司生產之充電電池[42]

整體電路系統與馬達架構所組成『X-Puppet』的系統示意圖如下：

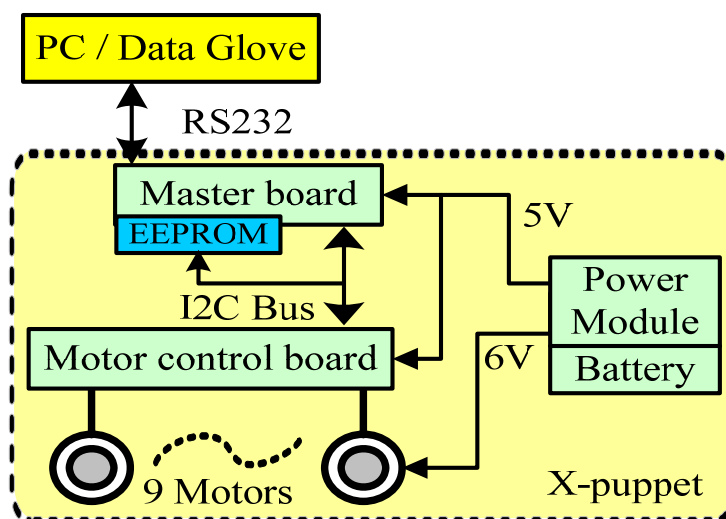


圖 2-11 機器人硬體控制系統示意圖

2.2 二輪式自動平衡移動平台

二輪式自動平衡移動平台為本篇論文研究重點，主要本論文想研究戲偶機器人搭載於二輪式移動平台是否可以增加機器人的靈活性與機動性，是否可以展現出布袋戲偶有別於人特有的行走模式，以下二小節介紹移動平台的構想來源與實現的硬體架構。

2.2.1 二輪式自動平衡移動平台之機械本體設計概念

二輪式自動平衡移動平台最初的構想是來自賽格威(Segway 如圖 2-12 所示)，賽格威是一種電力驅動、具有自我平衡能力的個人用運輸載具，由美國發明家狄恩·卡門 (Dean Kamen) 與他的 DEKA 研發公司 (DEKA Research and Development Corp.) 團隊發明設計，並創立賽格威責任有限公司 (Segway LLC.)，自 2001 年 12 月起將賽格威商業化量產銷售。賽格威的運作原理主要是建立在一種被稱為「動態穩定」(Dynamic Stabilization) 的基本原理上，以內置的精密固態陀螺儀 (Solid-State Gyroscopes) 來判斷車身所處的姿勢狀態，透過精密且高速的中央微處理器計算出適當的指令後，驅動馬達來做到平衡的效果。



圖 2-12 個人用運輸載具賽格威(Segway) [38]

要效仿賽格威的移動方式，首先必需先做出一個雙輪式的移動平台來搭載『X-Puppet』（如圖 2-13 所示），而此平台需要以直流馬達來趨動輪子移動，不可以用伺服馬達，考慮到直流馬達還必需要搭配減速齒輪使用，又還要加上控制電路和感測器，其體積可能會過於龐大，於是拿現有的馬達 DS1313（如圖 2-5 所示）來改裝成直流馬達，將其外殼打開把裡面測量位置的可變電阻拆掉，這樣一來它就失去了位置回授而變成一顆單純的直流馬達，其好處是就不需要額外搭配減速齒輪使用，因為它內部本來就有設置，只要另外搭配驅動 IC 來驅動馬達，就可以利用微控制器產生 PWM 訊號來控制馬達的輸出功率。

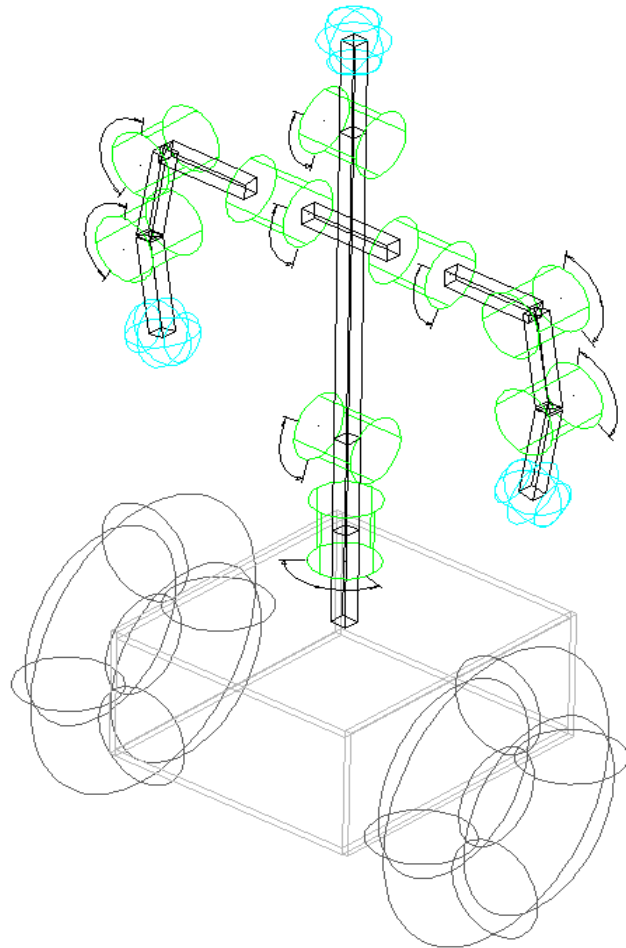


圖 2-13 搭載『X-Puppet』之二輪式移動平台構想圖

要做到自動平衡的系統，必需要有感測器來偵測整個系統的傾斜角度，在此本論文用了二種可以偵測角度的感測器分別為陀螺儀(如表 2-5 所示)和傾斜儀(如表 2-6 所示)，另外由於平衡演算法推導得知還需要系統的加速度，另一方面考量是如果我們希望移動平台有估測距離的能力，還必需要加上一顆加速規(如表 2-7 所示)在系統裡，以上三種感測器皆為類比輸出，所以必需透過類比到數位轉換器(A/D converter)輸入到微控制器中做訊號處理，最後電源的部分則是沿用『X-Puppet』的電源系統架構(請參考 2.1.2 小節)，這樣就完成了底座移動平台的機械本體結構。

表 2-5 陀螺儀硬體設備規格表[44]


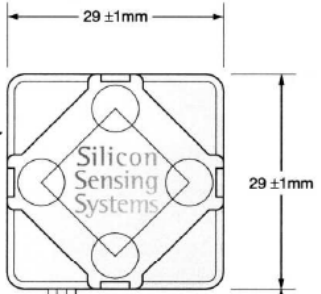
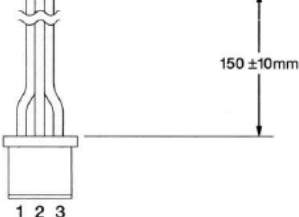
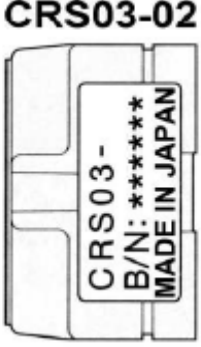

	Rate range (deg/sec)	0 to ± 100								
	Scale Factor mV/(deg/sec)	20								
	Supply Voltage (Vdd)	5.00 ± 0.25								
	Bias (% of Vdd)	50% $\rightarrow 2.5 \pm 0.125$								
	Output Impedance (ohm)	100								
	Max output current (mA)	>0.5								
	Dimensions (mm)	$29 \times 29 \times 18.4$								
										
										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin Nr.</th> <th>Function</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>+Vdc</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Ground</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Output</td> </tr> </tbody> </table>	Pin Nr.	Function	1	+Vdc	2	Ground	3	Output
Pin Nr.	Function									
1	+Vdc									
2	Ground									
3	Output									
<p>CRS03-02 有三個接腳，兩根腳位供應感測器電源，一根輸出電壓訊號，相對應的接腳圖如上圖</p>										

表 2-6 傾斜儀硬體設備規格表[45]

	Angular range (°)	±20
	Angular Resolution(° rms)	0.03
	Sensitivity (mV/°)	100 ± 10
	Supply Voltage (V)	6~30
	Zero Angle Voltage (V)	2.5 ± 0.15
	Current (mA)	8
	Dimensions (mm)	24.1 × 50.8 × 30.5

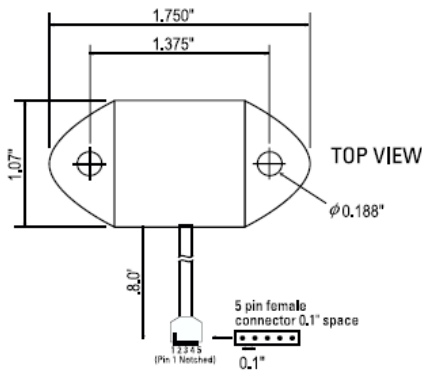
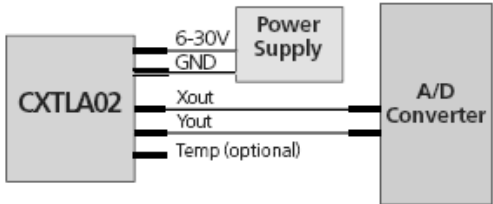

	 <p>Typical CXTLA02 Configuration</p>
<p>CXTLA02 有五個接腳，兩根腳位供應感測器電源，三根輸出電壓訊號，但只需轉換其中兩根，相對應的接腳圖如上圖</p>	

表 2-7 加速規硬體設備規格表[45]

	Input range (g)	±1
	Sensitivity (V/g)	2
	Supply Voltage (V)	5 ± 0.25
	Zero Angle Voltage (V)	2.5 ± 0.15
	Output Loading (ohm)	>20KΩ , <30nF
	Current (mA)	4/axis
	Dimensions (mm)	19.0 × 47.6 × 25.4

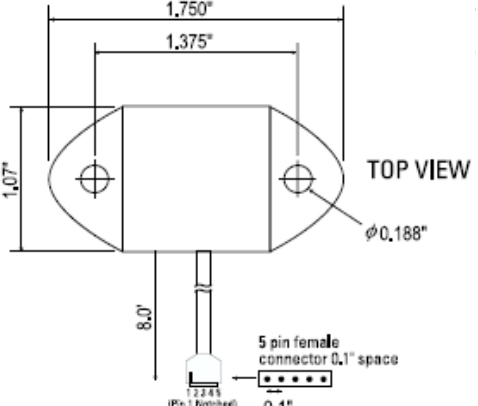
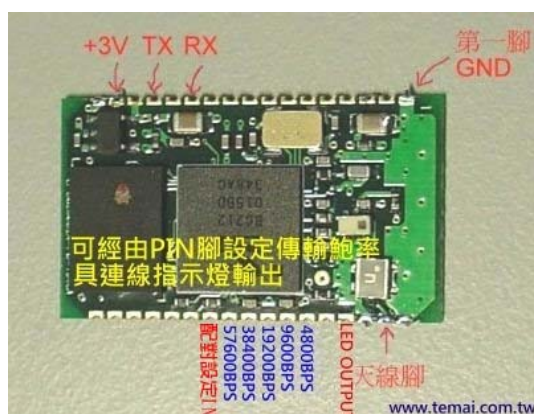
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin</th> <th>Color</th> <th>Function</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Red</td> <td>Power In</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Black</td> <td>Ground</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>White</td> <td>X-axis Out</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Yellow</td> <td>Y-axis Out</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Green</td> <td>Z-axis Out</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pin Diagram</p>	Pin	Color	Function	1	Red	Power In	2	Black	Ground	3	White	X-axis Out	4	Yellow	Y-axis Out	5	Green	Z-axis Out
Pin	Color	Function																	
1	Red	Power In																	
2	Black	Ground																	
3	White	X-axis Out																	
4	Yellow	Y-axis Out																	
5	Green	Z-axis Out																	
<p>CXTLA02 有五個接腳，兩根腳位供應感測器電源，三根輸出電壓訊號，相對應的接腳圖如上圖</p>																			

表 2-8 二輪式自動平衡移動平台硬體設備規格表

設備	規格
自由度	二個自由度
高度	10cm
重量	0.5 kg
控制晶片	Microchip PIC 18F452 (8-bit 30MHz)
致動器	RC servo motors (DS1313)
感測器	陀螺儀 x1、傾斜儀 x1、加速規 x1
電源供應	6V for motors, 5V for control board

2.2.2 二輪式自動平衡移動平台之系統設計架構.

二輪式自動平衡移動平台之系統核心我們選用跟控制機器人一樣的微控制器板 PIC18F452(如圖 2-8 所示)，利用微控制器上內建的 A/D Converter 將感測器的類比訊號讀取進來，執行平衡演算法計算控制指令，然後輸出 PWM 的訊號控制底座馬達的移動，另外利用藍芽無線模組(如圖 2-14 所示)模擬 RS-232 通訊協定的連接埠接收與傳送使用者下的指令。



(a)



(b)

圖 2-14 (a)藍芽無線模組 (b)藍芽接收器

底座平台與機器人結合其系統示意圖如下圖(如圖 2-15 所示):

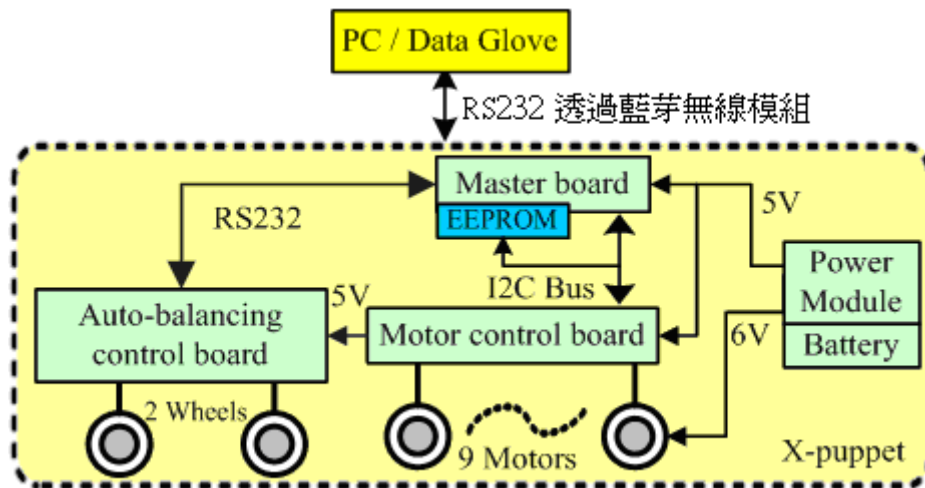


圖 2-15 底座模組與機器人結合系統示意圖



第三章 數位手套(Data Glove)控制器

3.1 數位手套(Data Glove)之簡介

數位手套是在虛擬實境系統中，可提供使用者將其手部動作訊息傳送給系統的裝置。在手套的每根手指關節部分皆裝置有感測元件，一般常見的感測元件形式有光纖、可變電阻或是特殊設計之機械結構，當使用者手指彎曲時，各手指上的感測元件便可將使用者彎曲的變化量回報給系統。實驗室最初購買的 5DT Data Glove 5 Ultra (如圖 3-1 所示) 為一五個自由度的數位手套，其自由度分別對應到五根手指的彎曲，而其規格如表 3-1 所示。



圖 3-1 數位手套 (5DT Data Glove 5 Ultra) [46]

表 3-1 數位手套 (5DT Data Glove 5 Ultra) 規格表 [46]

規格	5DT Data Glove 5 Ultra (left or right)
操作系統	Cross platform SDK for Windows, Linux and UNIX operating systems
軟體	Kaydara MOCAP, 3D Studio Max (free beta version), Maya, SoftImage XSI
連接埠	USB
感測器數量	5
感測器解析度(°)	0.2 (A/D)
感測器頻率 (Hz)	75 (>)
感測器類型	Fibre Optic

3.2 壓電材料感測器(Piezoelectric Film Sensors)之簡介

壓電材料(Piezoelectric Material)是指材料的偏極化電荷的產生,是由外界施加在材料上的應力而產生的,當應力很小時,其偏極化的變化與應力成正比。而壓電性顧名思義就是指物體受到一機械應力作用時,會使其內部之正負電荷中心產生一相對位移,並產生一相對電場。本作品所使用的是普威公司(Pro-Wave)出的PVDF(PolyVinylidene Fluoride)感測器(如圖 3-2 所示),料號 FS-2513P,跟其他壓電晶體(Piezoelectric Crystals),壓電陶瓷(Piezoelectric Ceramic)比較起來,它具有更好的壓電性和相對高於其他感測器 10~20 倍的效能,更重要的是,可以依據我們的需求,做客製化的大小和尺寸,其規格如表 3-2 所示。

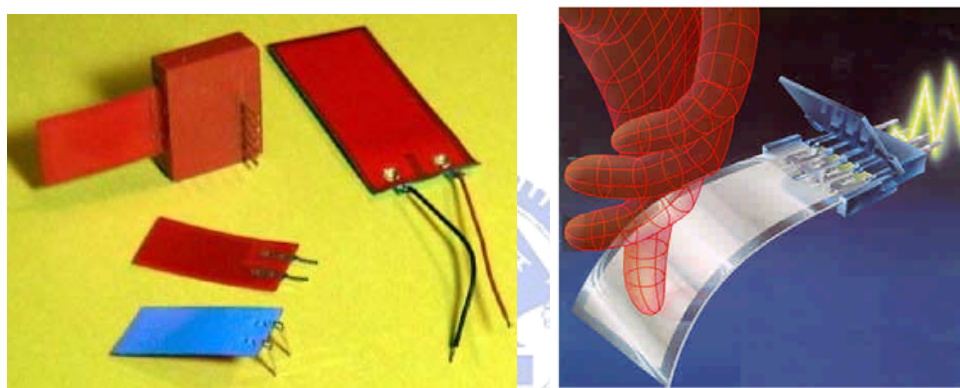


圖 3-2 PVDF sensors [47]

表 3-2 PVDF sensor 規格表 [47]

Model Number	FS-2513P	FS-2513W	FD-2513P	Unit
Type	Lead Pins	Lead Wires	Lead Pins	-
Voltage sensitivity at fr	70	70	-	mV/ms ⁻²
Transverse sensitivity	10	10	-	mV/ms ⁻²
Resonant frequency	80±10	80±10	-	Hz
Capacitance	1.5±30%	1.5±30%	-	nF@1KHz
Operation voltage (Vcc)	-	-	3-30	DC volts
Operation current	-	-	1	mA
Max. output current	-	-	20	mA
Operation temperature	-20 ~ +60	-20 ~ +60	-20 ~ +60	°C
Storage temperature	-40 ~ +70	-40 ~ +70	-40 ~ +70	°C

3.3 壓電材料感測器實現數位手套

此小節介紹的是如何用 PVDF 感測器來製造一只可隨需求選擇自由度位置的數位手套，本作品原先所使用的 5DT 數位手套，其訊號穩定，但是礙於自由度不足，且價格昂貴，另外操作一隻布袋戲偶需要更多細節關節的彎曲訊號，所以便興起了自己製作的想法。最後採用 PVDF sensor，是因為單片價格便宜，又可以視需求在適當的位置貼上感測器，擷取該部位的訊號。

3.3.1 壓電材料實現感測彎曲程度(Angle)電路架構

由於 PVDF sensor 的訊號來自於其受到形變時產生的，可將其視作感測器被彎曲時的速度，但在此應用上所需要的是手指彎曲的角度，所以必須透過類比電路(如圖 3-3 所示) 來做一次積分並放大感測器所產生的訊號，如此一來就可以得到感測器的彎曲程度值，經過適當的比例縮放，就可以得到彎曲的角度。另外由於 PVDF 感測器屬於電流訊號元件，要謹慎選擇 FET 型式輸入阻抗大的 OP，否則會產生輸入訊號過度衰減，造成輸出訊號錯誤。而輸出的類比訊號則藉由一塊微控制器 PIC 18F452 的 A/D 埠轉換成數位資訊，方便做訊號處理。

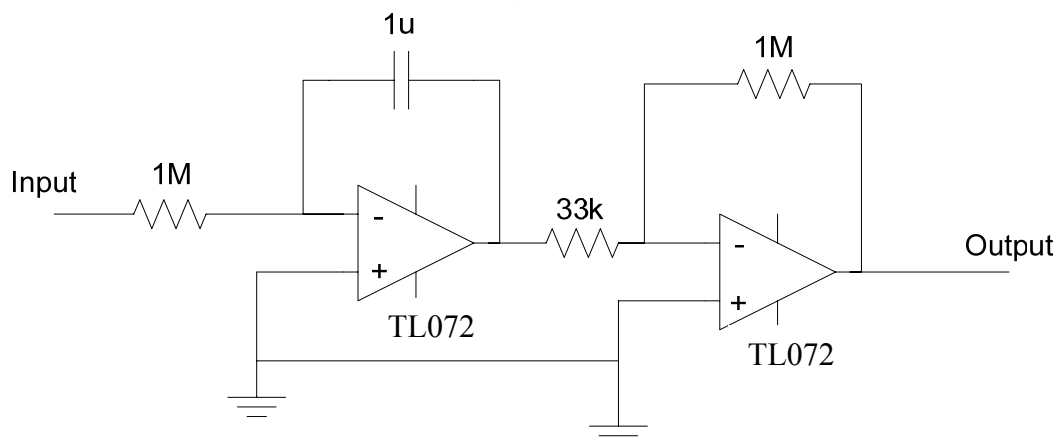


圖 3-3 PVDF 感測器積分電路

3.3.2 微控器連結回授之系統架構

由於類比積分電路存在著受雜訊干擾或是偏壓電位不準所造成的電壓偏差 (Offset) 問題，隨著時間越長其誤差累積越多，而造成系統過載(Overflow)，所以必須有一個回授機制來檢查電路的情況，判斷是否需要對系統做重置(Reset)的動作，這時可以使用一顆數位類比開關(IC 4053)，與積分電路之電容兩端相接並連一個電阻，數位開關腳位則接給微控器做監控判斷是否開啟的動作，其流程如圖 3-4 所示。

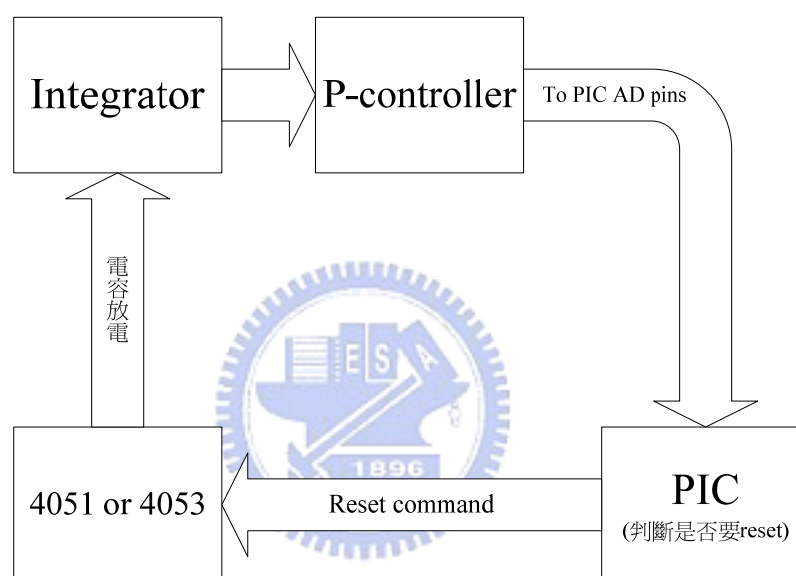


圖 3-4 微控器連結回授之系統架構

3.4 數位手套操控機器人動作原理

如同我們所知，布袋戲是一門深具傳統文化與複雜操控技術的藝術表演，一個經驗豐富可自立門戶的師傅通常需要幾十年的時間來練習、揣摩各個不同戲偶的特色與行為，其中很大的原因就在於，布袋戲偶是用手指的運動去表現一個“人”的姿態，而手掌的結構(如圖 3-5 所示)與人形有著極大的差異，它們並不是一對一的關係，這中間存在著一個映射(Mapping)函數，而本論文試著利用實際操偶方式的幾個主要動作(如圖 3-6 所示)來分析，在 3.4.1 小節要討論的是利用數學的模型去揣摩手指的運動與人形戲偶或是機器人之間的映射關係，而 3.4.2 小節則是討論如何利用測量值來訓練(Training)模型的參數值。

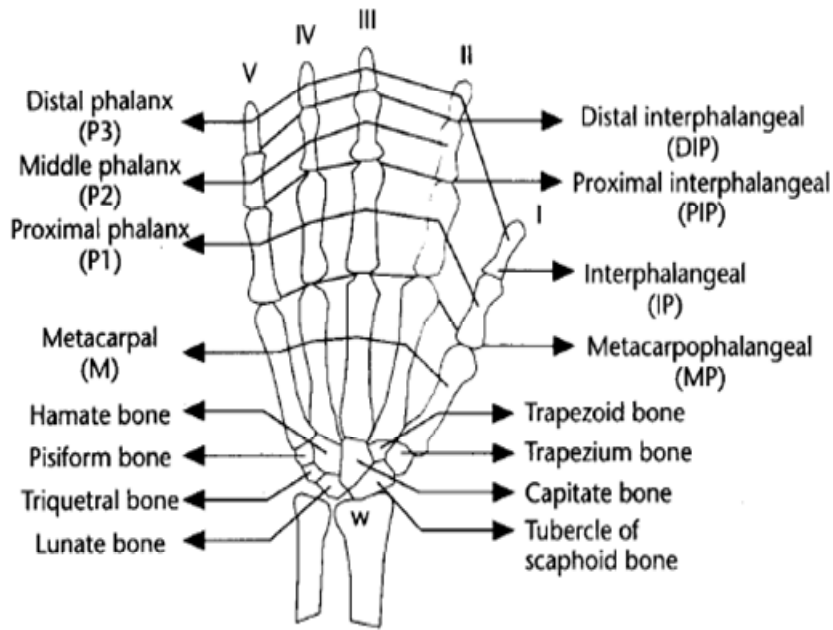


圖 3-5 手掌的結構與關節代號定義 [1]

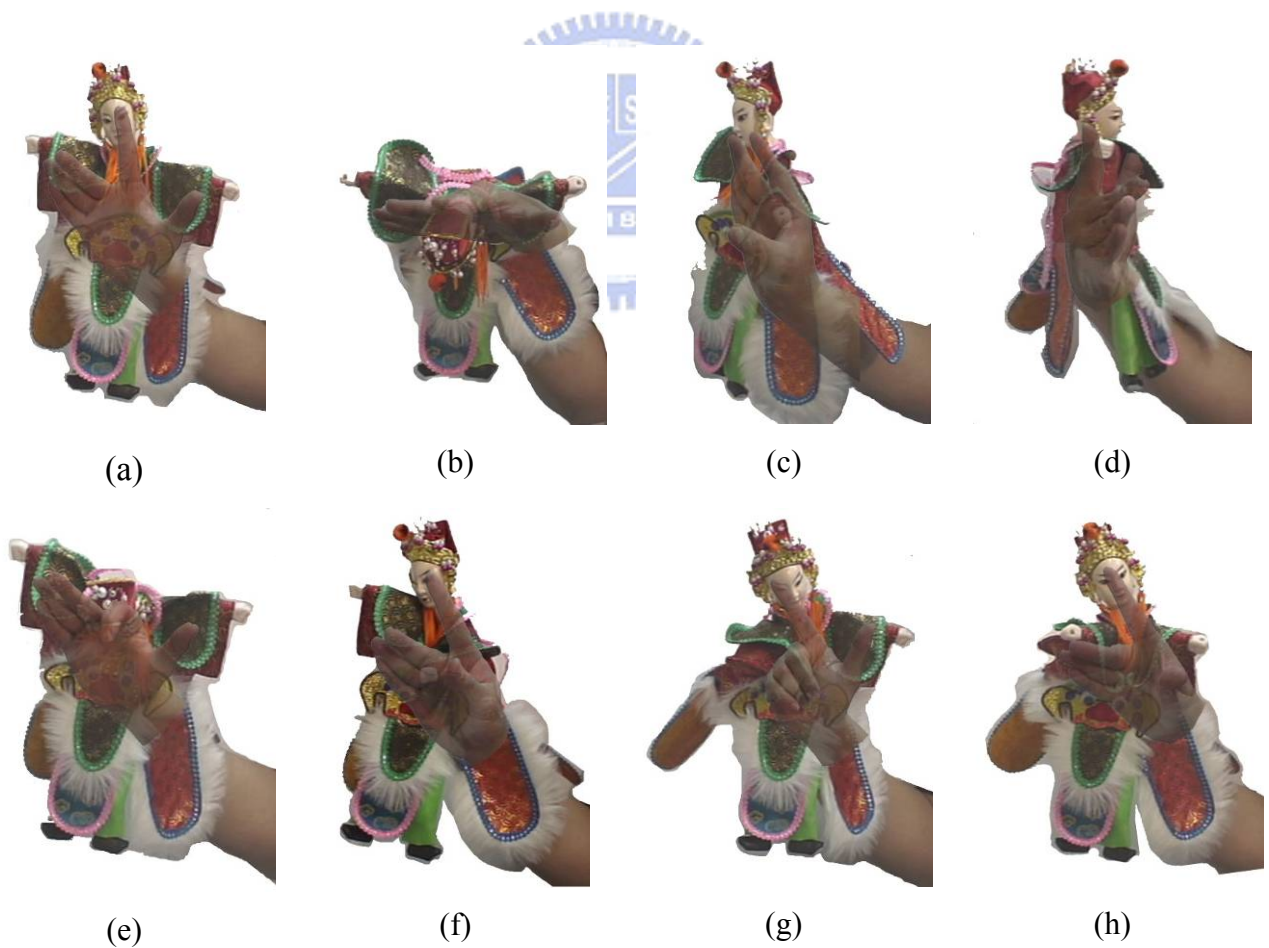


圖 3-6 八種主要的操偶姿態與其對應的手勢，依次為(a)站姿 (b)彎腰 (c)右轉身 (d)左轉身 (e)點頭 (f)揮左手 (g)揮右手 (h)同時揮動雙手

3.4.1 手部骨骼運動對應機器人動作之模型

由圖 3-6 可以發現，戲偶的點頭，彎腰和轉身都可以很直覺的映射

- 點頭(如圖 3-6 (e)所示) -> 由食指操控
- 彎腰(如圖 3-6 (b)所示) -> 由傾斜儀(Tilt)操控
- 轉身(如圖 3-6 (c)(d)所示) -> 由陀螺儀(Gyro)操控

但肩膀的旋轉和手臂的彎曲程度就不是那麼的直接，底下分成戲偶右手和戲偶左手的運動情形兩個部分來討論。

戲偶右手：

根據圖 3-6 (g)可以發現，中指、無名指和小指是一起連動的，因此只需考慮中指的運動，另外，中指在構造上的可動範圍幾乎可以忽略掉 MP (如圖 3-7 所示) z 軸的運動，只需考慮 MP(對 x 軸), PIP(對 x 軸)和 DIP(對 x 軸)的轉動，根據 ref.[1]，可以先假設：

$$\theta_{DIP} = \frac{2}{3}\theta_{PIP} \quad (3-1)$$

定義 a、b、c 分別為手指頭第一指節到第三指節的長度(如圖 3-7 (a)所示)，而 r_R 為手指底端到尖端的長度，利用三角餘弦關係可以得到：

$$r_R = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + 2abc \cos \theta_{PIP} + 2bc \cos \theta_{DIP} + 2ac \cos(\theta_{PIP} + \theta_{DIP})} \quad (3-2)$$

利用泰勒展開式(Taylor series)展開並保留二次項，然後將式(3-1)帶入可得：

$$r_R = f(\theta_{PIP}) \approx a_1 \theta_{PIP}^2 + a_2 \theta_{PIP} + a_0 \quad (3-3)$$

另外定義 r'_R 為機器人手部尖端到肩膀的距離(如圖 3-7 (b)所示)，由實驗觀察到 r'_R 與 r_R 有很高的相依性，可以假設機器人的 r'_R 是屬於 θ_{PIP} 的函數，得到：

$$r'_R = f'(\theta_{PIP}) \approx a'_1 \theta_{PIP}^2 + a'_2 \theta_{PIP} + a'_0 \quad (3-4)$$

有了 r'_R 後就可以藉由反運動學(Inverse Kinematics)模型推論得到機器人手臂上的 θ_a 和 θ_b (如圖 3-7 (b)所示)，同樣地，定義 η_R 為 r_R 與 y 軸之夾角，根據幾何學與三角函數定理推算並經由泰勒展開式展開保留二次項可得

$$\eta_R = h(\theta_{MP}, \theta_{PIP}) \approx b_1 \theta_{MP}^2 + b_2 \theta_{MP} \theta_{PIP} + b_3 \theta_{PIP}^2 + b_4 \theta_{MP} + b_5 \theta_{PIP} + b_0 \quad (3-5)$$

經由觀察得知 η_R 與 θ_c 有很高的相依性，可假設：

$$\theta_c = h'(\theta_{MP}, \theta_{PIP}) \approx b'_1 \theta_{MP}^2 + b'_2 \theta_{MP} \theta_{PIP} + b'_3 \theta_{PIP}^2 + b'_4 \theta_{MP} + b'_5 \theta_{PIP} + b'_0 \quad (3-6)$$

於是就可以藉由 θ_{PIP} 和 θ_{MP} 來推得 θ_a 、 θ_b 、 θ_c ，表現出機器人右手的運動行為。

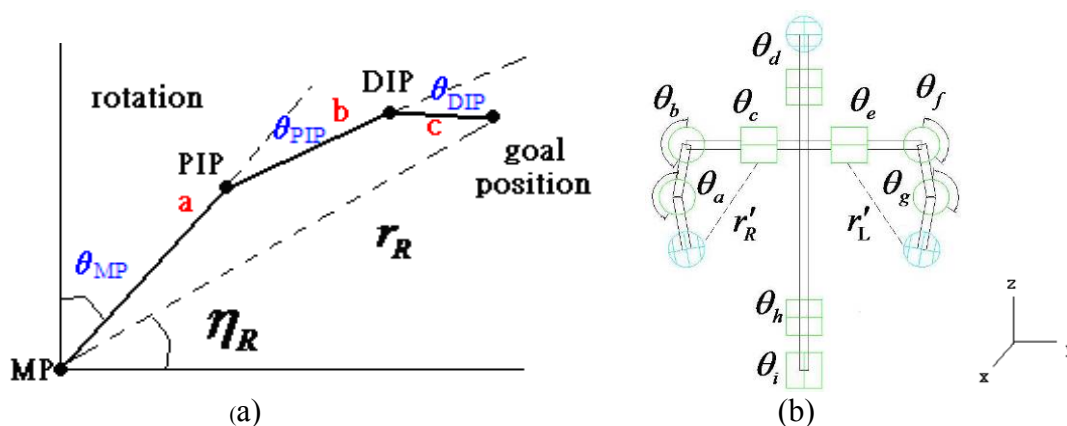


圖 3-7 (a) 中指模型 ref.[?] (b) 『X-Puppet』模型

戲偶左手：

根據圖 3-6 (f)，可以得知布袋戲偶的左手是由大拇指所控制，根據圖 3-5 對大拇指的定義，只有 MP 和 IP 兩個關節處，大拇指 θ_{IP} 的對於操控布袋戲的影響等同於中指的 θ_{PIP} ，但是決定機器人模型的 θ_e 和 r'_L (如圖 3-7(b) 所示) 確不是只有 θ_{MP} 和 θ_{IP} 的影響，大拇指在 θ_{MP} 的下方還有一個可動關節定義成 θ_M (如圖 3-5 所示)，不過我們也發現，當揮動布袋戲偶左手時， θ_M 與 θ_{MP} 有一個比例的連動關係，也就是說 θ_M 是 θ_{MP} 的函數，那一樣利用和戲偶右手相同的分析法，可得：

$$r'_L = g'(\theta_{IP}) \approx c'_1 \theta_{IP}^2 + c'_2 \theta_{IP} + c'_0 \quad (3-7)$$

$$\theta_e = k'(\theta_{MP}, \theta_{IP}) \approx d'_1 \theta_{MP}^2 + d'_2 \theta_{MP} \theta_{IP} + d'_3 \theta_{IP}^2 + d'_4 \theta_{MP} + d'_5 \theta_{IP} + d'_0 \quad (3-8)$$

以上即完成了映射函數的推導，雖然機器人一隻手臂有三個馬達，但僅需利用一隻手指的兩個關節角度即可映射完成所對應的動作，配合點頭動作所需一個食指的關節角度值總共需要五個 PVDF 感測器，以及轉身和彎身的傾斜儀和陀螺儀，就可以設計一只數位手套配置如圖 3-8 所示。

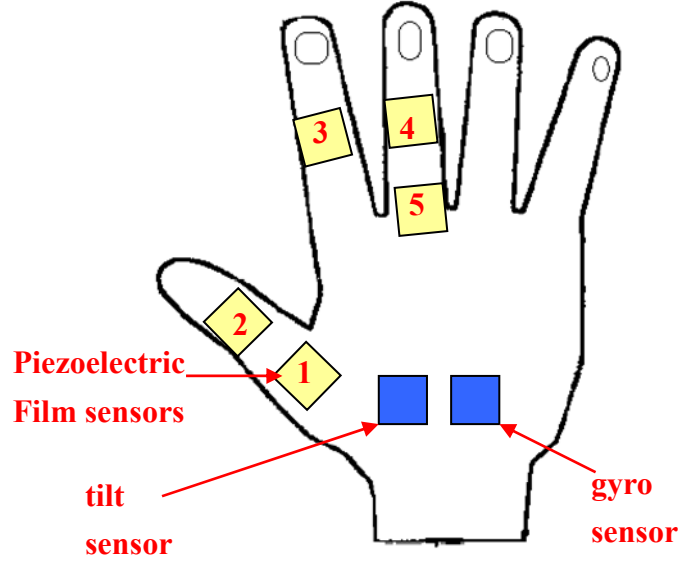


圖 3-8 數位手套設計圖

3.4.2 模型參數校正

由式 3-4 舉例，首先希望得到 $a'_0 \sim a'_2$ ，先令機器人右手擺出 N 個不同的姿態，得到 $r'_R[n]$ ， $n=0 \sim N-1$ ，然後請使用者戴著數位手套做出相對應的動作，得到 $\theta_{PIP}[n]$ ， $n=0 \sim N-1$ ，另外定義 $\theta_1^n = \theta_{PIP}^2[n]$ 、 $\theta_2^n = \theta_{PIP}[n]$ ，令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \theta_1^0 & \theta_2^0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_1^{N-1} & \theta_2^{N-1} & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ a'_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} r'_R[0] \\ \vdots \\ r'_R[N-1] \end{bmatrix} \quad \text{得到}$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{Y}$$

$$\Rightarrow \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (3-9)$$

可得 x 為最佳化的最小平方誤差解(證明請參考附錄 I)，而 x 即為我們所需要的參數 $a'_0 \sim a'_2$ ，以此方法類推，就可以得到其他手指運動到機器人行為的映射函數之參數值，而這個值會隨著使用者不同而有所差異。

第四章 二輪式即時自動平衡移動控制平台

第四章可視為本篇論文的重要核心，講述的是如何實現利用二輪式的移動平台搭載『X-Puppet』，使其有移動的能力而不被侷限在原地。此一平台除了在機器人靜止時可以自動保持平衡外，在運動的狀態下，每個馬達各別或是交互作用都會相對於底座產生不為 0 的轉矩，在這樣的狀態下所設計的系統也要能自動計算並產生出對應的反轉矩來抵消影響，使得整個系統依舊保持在穩定的狀態下，讓機器人保持平衡。截止至本篇論文完成以前，陸陸續續也看到其他也具有人形外觀與行為能力的二輪式移動機器人，例如日立 (Hitachi) 公司所研發出的 EMIEW 2(如圖 1-10 所示)，其高度大約為 1.3 公尺，重量 70 公斤，而本論文的『X-puppet』高約 30 公分，重約 2 公斤，只利用了一顆 8 位元的微控制器 (PIC 18F452) 來實現平衡演算法同時驅動底座的馬達機構，及二顆微控制器來驅動控制機器人本體的九顆伺服馬達，是目前世界上最小隻的人形二輪式移動機器人。

4.1 系統模型架構分析

在此小節，將系統分成二部分，一是底座二輪式移動平台的模型分析，負責實現平衡演算法所計算出的控制力量，二是『X-Puppet』的系統模型分析，主要讓平衡平台可以得知系統的動態行為，藉以產生反轉矩來抵抗不讓系統到達不穩定狀態。

4.1.1 二輪式移動平台系統模型分析

首先先利用自由體圖 (Free Body Diagram) 把機器人腰部以上分開，而腰部以下與底座平台的連接視做一個倒單擺模型(如圖 4-1 所示)，先假設上半身的移動包括彎腰、揮手、點頭等運動視做可計算 (Countable) 的分量 F_{x_1} 、 F_{y_1} 以及轉動力矩 M_1 作用於倒單擺的頂點， XY 軸為相對於地不動的座標軸， X_1Y_1 座標軸定義在倒單擺軸上，而 θ 在逆時鐘方向定義為正值，於是可以得到 \vec{r}_G 在 X_1Y_1 座標軸以及其相對應到 XY 軸的運動方程式如下：

$$\vec{r}_G = L_1 \hat{i} = (L_1 \sin \theta + x) \hat{i} + (L_1 \cos \theta + r) \hat{j}$$

$$\dot{\vec{r}}_G = (L_1 \dot{\theta} \cos \theta + \dot{x}) \hat{i} + (-L_1 \dot{\theta} \sin \theta) \hat{j}$$

$$\ddot{\vec{r}}_G = \ddot{\vec{a}}_G = (-L_1 \ddot{\theta} \cos \theta + L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta + \ddot{x}) \hat{i} + (-L_1 \ddot{\theta} \sin \theta - L_1 \dot{\theta}^2 \cos \theta) \hat{j}$$

由系統為靜態平衡合力為零可得：

$$-m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta + m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta + m_1 \ddot{x} = F_x + F_{x_1} \quad (4-1)$$

$$-m_1 L_1 \ddot{\theta} \sin \theta - m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \cos \theta + m_1 g = F_y + F_{y_1} \quad (4-2)$$

而由轉動力距為零可得：

$$I_1 \ddot{\theta} = L_1 F_x \cos \theta + L_1 F_y \sin \theta - L_2 F_{x_1} \cos \theta - L_2 F_{y_1} \sin \theta + M_1 \quad (4-3)$$

式(4-1)~(4-3)即為二輪式移動平台系統模型的運動方程式。

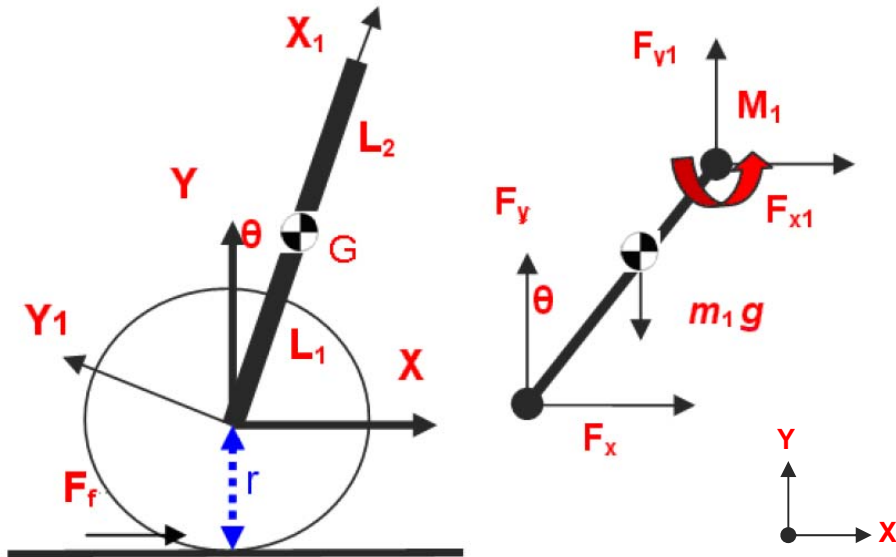


圖 4-1 『X-Puppet』腰部以下的自由體圖

4.1.2 『X-Puppet』系統模型分析

在 4.1.1 小節中，假設機器人腰部以上的運動量值為可計算，並定義為 F_{x_1} 、 F_{y_1} 及 M_1 ，在此一小節要分析 『X-puppet』腰部以上的模型來計算這些量值，在此分成二個部分來討論，一是機器人的從底部到頭頂的中心軸部分，二是機器人肩膀到手部的橫軸部分。

底部到頭頂的中心軸部分：

首先定義出整個中心軸與其相對應的座標系(如圖 4-2(a) 所示)，然後利用 Homogeneous Matrices 寫出每個座標系之間的關係如下：

$$\mathbf{A}_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & x \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 + L_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{23} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

一樣可以用座標轉換與靜態平衡質量中心合力為零的方法來計算中央連桿(如圖 4-2(b) 所示)的運動方程式如下：

$$\bar{\mathbf{r}}_2 = \frac{1}{2} L_2 \hat{\mathbf{i}}_2 = \mathbf{A}_{01} \mathbf{A}_{12} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} L_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{01} \mathbf{A}_{12} \bar{\mathbf{r}}_2$$

$$\dot{\bar{\mathbf{r}}}_2 = (\dot{\mathbf{A}}_{01} \mathbf{A}_{12} + \mathbf{A}_{01} \dot{\mathbf{A}}_{12}) \bar{\mathbf{r}}_2$$

$$\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_2 = \bar{\mathbf{a}}_2 = (\ddot{\mathbf{A}}_{01} \mathbf{A}_{12} + \dot{\mathbf{A}}_{01} \dot{\mathbf{A}}_{12} + \dot{\mathbf{A}}_{01} \dot{\mathbf{A}}_{12} + \mathbf{A}_{01} \ddot{\mathbf{A}}_{12}) \bar{\mathbf{r}}_2$$

$$\Rightarrow m_2 \bar{\mathbf{a}}_2 = (-Fx_1 + Fx_2) \hat{\mathbf{i}} + (Fy_2 - Fy_1 - m_2 g) \hat{\mathbf{j}}$$

$$I_{G2} \ddot{\theta}_2 = M_1 - M_2 - \frac{1}{2} L_2 Fx_1 \sin \psi + \frac{1}{2} L_2 Fy_1 \cos \psi - \frac{1}{2} L_2 Fx_2 \sin \psi + \frac{1}{2} L_2 Fy_2 \cos \psi$$

Where $\psi = \theta_1 + \theta_2$

經由上面的計算發現， F_{x_1} 和 F_{y_1} 會展成一連串非常長又複雜而且是 θ_1 與 θ_2 的函數，也就是說 θ_1 與 θ_2 的變化量同時會形成作用在中央連桿的力，不過因為本作品使用的是伺服馬達，它相對於 θ_1 的變化量來說有很大的力量去趨動和固定馬達，換句話說，假設 θ_1 的變化量不足以超過伺服馬達的轉矩，那麼 F_{x_1} 和 F_{y_1} 的式子中，有出現 θ_1 與 θ_2 交互影響的地方皆可視作為零，那麼 F_{x_1} 和 F_{y_1} 就可以簡化成單純只有 θ_2 的函數如下：

$$\begin{aligned} \frac{-1}{2}m_2L_3\ddot{\theta}_2 \sin \theta_2 + \frac{-1}{2}m_2L_3\dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 &= Fx_2 - Fx_1 \\ \frac{1}{2}m_2L_3\ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \frac{-1}{2}m_2L_3\dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_2g &= Fy_2 - Fy_1 \\ I_{G_2}\ddot{\theta}_2 &= -\frac{1}{2}L_3 \sin \theta_2 Fx_1 + \frac{1}{2}L_3 \cos \theta_2 Fy_1 - \frac{1}{2}L_3 \sin \theta_2 Fx_2 + \frac{1}{2}L_3 \cos \theta_2 Fy_2 + M_1 - M_2 \end{aligned} \quad (4-4)$$

同樣的道理，機器人頭部也就是最末端連桿也可簡化成如下：

$$\begin{aligned} \frac{-1}{2}m_3L_4\ddot{\theta}_3 \sin \theta_3 + \frac{-1}{2}m_3L_4\dot{\theta}_3^2 \cos \theta_3 &= -Fx_2 \\ \frac{1}{2}m_3L_4\ddot{\theta}_3 \cos \theta_3 + \frac{-1}{2}m_3L_4\dot{\theta}_3^2 \sin \theta_3 + m_3g &= -Fy_2 \\ I_{G_3}\ddot{\theta}_3 &= -\frac{1}{2}L_4 \sin \theta_3 Fx_2 + \frac{1}{2}L_4 \cos \theta_3 Fy_2 + M_2 \end{aligned} \quad (4-5)$$

透過式(4-4)和(4-5)，就可以估算出底部到頭頂的中心軸部分對於底座的影響 F_{x_1} 、 F_{y_1} 以及轉動力矩 M_1 。

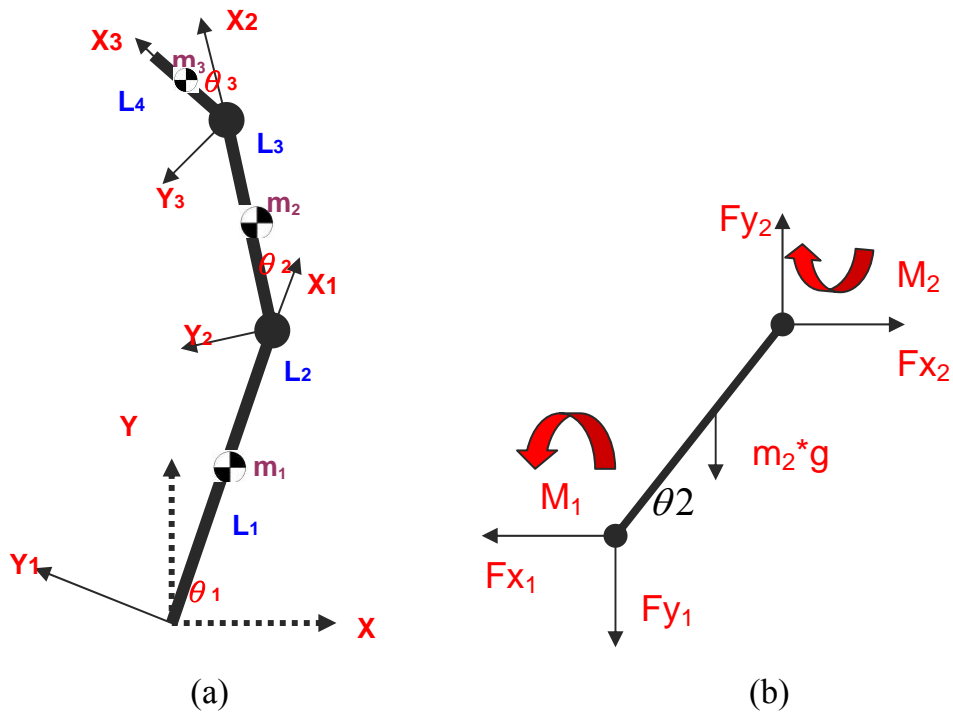


圖 4-2 (a) 『X-Puppet』底部到頭部連桿示意圖 (b)中央連桿的自由體圖

手部的橫軸部分：

『X-Puppet』肩膀到手部之間的馬達有三顆，其中控制肩膀轉動的馬達屬於中央軸的一部分，而突出來形成手臂的馬達可以分成二段(如圖 4-3(b) 所示)，雖然說手臂部分是橫向的，但如果換個方向去看，旋轉一下座標軸，會發現它跟中央連桿的架構幾乎一樣(如圖 4-3(a) 所示)，要注意的是此時的座標系是已經過旋轉過後，另外由上一部分得知，要計算連桿作用於支點的作用力，因為伺服馬達的關係可簡化為計算連桿本身的運動方程式即可，不需要考慮其他馬達對於此連桿的影響，令肩膀的原點為支點，因為它有 z 軸和 y 軸的轉動，可以藉由 Homogeneous Matrices 寫出它們的轉換矩陣如下：

$$\mathbf{H}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 θ_4 定義為 z 軸逆時針方向的旋轉角，又因為 θ_6 的變化對系統而言非常微小，所以將 L_5 與 L_6 視為同一連桿，於是就可以列式計算出連桿中心質量與角度變化對支點的作用力如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{G_{56}} &= \frac{1}{2}(L_5 + L_6)\hat{\mathbf{i}}_5 = \mathbf{H}_y \mathbf{H}_z \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(L_5 + L_6) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_y \mathbf{H}_z \mathbf{r}_{G_{56}} \\ \dot{\mathbf{r}}_{G_{56}} &= (\dot{\mathbf{H}}_y \mathbf{H}_z + \mathbf{H}_y \dot{\mathbf{H}}_z) \mathbf{r}_{G_{56}} \\ \ddot{\mathbf{r}}_{G_{56}} &= \mathbf{a}_{G_{56}} = (\ddot{\mathbf{H}}_y \mathbf{H}_z + \dot{\mathbf{H}}_y \dot{\mathbf{H}}_z + \dot{\mathbf{H}}_y \dot{\mathbf{H}}_z + \mathbf{H}_y \ddot{\mathbf{H}}_z) \mathbf{r}_{G_{56}} \\ &= \begin{bmatrix} ((-\ddot{\theta}_4 \sin \theta_4 - \dot{\theta}_4^2 \cos \theta_4) \cos \theta_5 + 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 \sin \theta_4 \sin \theta_5 + \cos \theta_4 (-\ddot{\theta}_5 \sin \theta_5 - \dot{\theta}_5^2 \cos \theta_5)) \frac{1}{2}(L_5 + L_6) \\ (-\ddot{\theta}_5 \cos \theta_5 + \dot{\theta}_5^2 \sin \theta_5) \frac{1}{2}(L_5 + L_6) \\ ((\ddot{\theta}_4 \cos \theta_4 - \dot{\theta}_4^2 \sin \theta_4) \cos \theta_5 - 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 \cos \theta_4 \sin \theta_5 + \sin \theta_4 (-\ddot{\theta}_5 \sin \theta_5 - \dot{\theta}_5^2 \cos \theta_5)) \frac{1}{2}(L_5 + L_6) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} F_{x_{4L}} \\ F_{y_{4L}} \\ F_{z_{4L}} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-6)$$

假設機器人底座的輪胎摩擦力夠大，可以省略式(4-6)中 z 軸的力量，僅考慮 θ 的變化量作用在支點上 x 與 y 軸的力，另外也省略掉質量中心的重力對於支點的影響，把重力的影響歸納在 4.5 小節討論，因為左右手的是對稱的，所以一樣可藉由同樣的式子計算出右手的影響 $F_{x_{4R}}$ 與 $F_{y_{4R}}$ ，而計算出了手臂運動變化的影響後，將它加至圖 4-2(b) 中央連桿自由體圖的頂端，將式(4-4)中 F_{x_2} 與 F_{y_2} 改寫成 $F_{x'_2}$ 與 $F_{y'_2}$ ，而

$$F_{x'_2} = F_{x_2} + F_{x_{4R}} + F_{x_{4L}}$$

$$F_{y'_2} = F_{y_2} + F_{y_{4R}} + F_{y_{4L}}$$

到此，就完成了上半身的影響 F_{x_1} 、 F_{y_1} 以及轉動力矩 M_1 的估計。

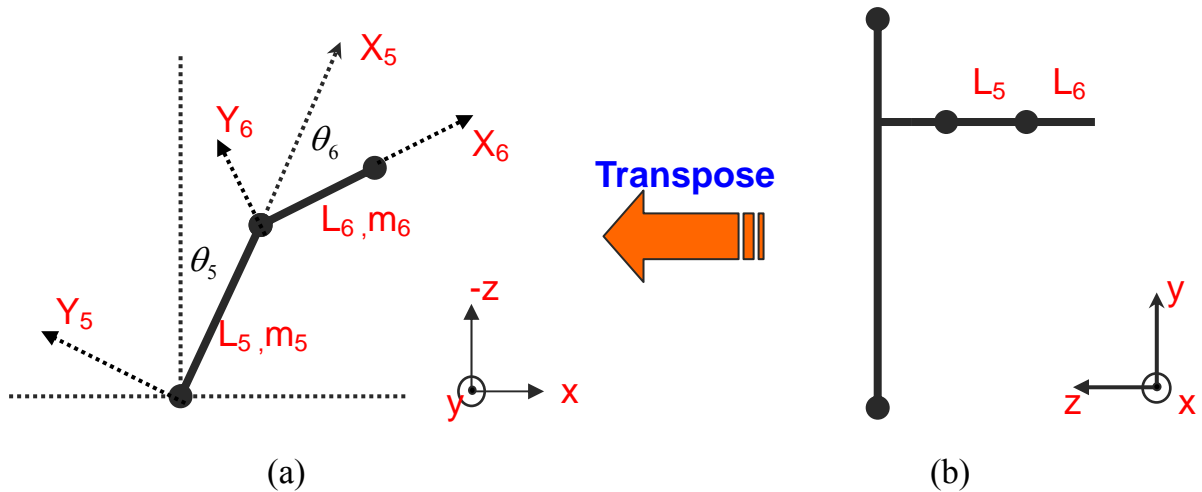


圖 4-3 (a) 機器人肩膀到手部模型 (b) 機器人左半身示意圖

4.2 計算轉矩法(Compute Torque Method)實現系統平衡演算法

經由 4.1.2 可以藉由機器人身各個部位伺服馬達的轉動角度、角速度和角加速度來估算出 F_{x_1} 、 F_{y_1} 以及轉動力矩 M_1 ，搭配 4.1.1 小節所計算出來的底座運動方程式，接下來分析底座輪子的數學模型(如圖 4-4 所示)，最後利用計算轉矩法 (Compute Torque Method) 來結合與推導移動平台平衡演算法。

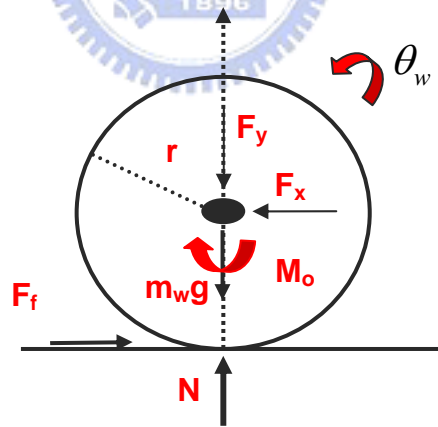


圖 4-4 底座輪子的數學模型

首先把 F_{x_1} 、 F_{y_1} 、 M_1 當作已知，將式(4-1)、(4-2)代入(4-3)得到

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\theta} &= L_1 \cos \theta (m_1 \ddot{x} + m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta - m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta - F_{x_1}) \\
 &\quad + L_1 \sin \theta (-m_1 L_1 \ddot{\theta} \sin \theta - m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \cos \theta + m_1 g - F_{y_1}) \\
 &\quad - L_2 F_{x_1} \cos \theta - L_2 F_{y_1} \sin \theta + M_1 \\
 &= m_1 L_1 \ddot{x} \cos \theta - m_1 L_1^2 \ddot{\theta} - (L_1 + L_2) F_{x_1} \cos \theta + m_1 g L_1 \sin \theta - (L_1 + L_2) F_{y_1} + M_1
 \end{aligned}$$

整理上式得

$$\begin{aligned} & (I_1 + m_1 L_1^2) \ddot{\theta} - m_1 \ddot{x} L_1 \cos \theta - m_1 g L_1 \sin \theta \\ & = -(L_1 + L_2) F x_1 \cos \theta - (L_1 + L_2) F y_1 \sin \theta + M_1 \end{aligned} \quad (4-7)$$

分析輪子的數學模型(如圖 4-4 所示)得

$$m_w \ddot{x} = F_f - F_x \quad (4-8)$$

得將式(4-1)帶入式(4-8)可得

$$\begin{aligned} m_w \ddot{x} &= F_f - m_1 \ddot{x} + m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta - m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta + F x_1 \\ & \text{or} \\ (m_w + m_1) \ddot{x} &+ m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta - m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta = F_f + F x_1 \end{aligned} \quad (4-9)$$

式(4-7)和式(4-9)即是底座的運動方程式

然後由式(4-9)可得

$$\ddot{x} = \frac{1}{(m_w + m_1)} \left(-m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta + m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta + F_f + F x_1 \right) \quad (4-9a)$$

將上式代入式(4-7)可得

$$\begin{aligned} & (I_1 + m_1 L_1^2) \ddot{\theta} - \frac{m_1 L_1 \cos \theta}{(m_w + m_1)} \left(-m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta + m_1 L_1 \ddot{\theta} \cos \theta + F_f + F x_1 \right) - m_1 g L_1 \sin \theta \\ & = -(L_1 + L_2) F x_1 \cos \theta - (L_1 + L_2) F y_1 \sin \theta + M_1 \end{aligned}$$

or

$$\begin{aligned} & \left(I_1 + m_1 L_1^2 - \frac{m_1^2 L_1^2 \cos^2 \theta}{(m_w + m_1)} \right) \ddot{\theta} - m_1 g L_1 \sin \theta + \frac{m_1^2 L_1^2 \cos \theta \sin \theta}{(m_w + m_1)} \dot{\theta}^2 \\ & + \left((L_1 + L_2) \cos \theta - \frac{m_1 L_1 \cos \theta}{(m_w + m_1)} \right) F x_1 + (L_1 + L_2) F y_1 \sin \theta - M_1 \\ & = \frac{m_1 L_1 \cos \theta}{(m_w + m_1)} F_f \end{aligned}$$

將上式參數重新排列整理成

$$\begin{aligned}
& \left(I_1 + m_1 L_1^2 - \frac{m_1^2 L_1^2 \cos^2 \theta}{(m_w + m_1)} \right) \ddot{\theta} - \sin \theta m_1 g L_1 + \cos \theta \sin \theta \dot{\theta}^2 \frac{m_1^2 L_1^2}{(m_w + m_1)} \\
& + \cos \theta \left((L_1 + L_2) - \frac{m_1 L_1}{(m_w + m_1)} \right) F x_1 + \sin \theta (L_1 + L_2) F y_1 - M_1 \\
& = \frac{m_1 L_1 \cos \theta}{(m_w + m_1)} F_f
\end{aligned}$$

用參數化的型式展開如下

$$m_\theta \ddot{\theta} + \mathbf{a}_1^T \mathbf{b} = k_1 F_f \quad (4-10)$$

在此參數定義如下

$$\mathbf{a}_1 = \left[\cos \theta \sin \theta \dot{\theta}^2 \quad F x_1 \cos \theta \quad F y_1 \sin \theta \quad \sin \theta \quad -1 \right]^T \quad (4-10a)$$

$$\mathbf{b} = \left[\frac{m_1^2 L_1^2}{(m_w + m_1)} \quad \left((L_1 + L_2) - \frac{m_1 L_1}{(m_w + m_1)} \right) \quad (L_1 + L_2) \quad -m_1 g L_1 \quad M_1 \right]^T$$

(4-10b)

$$k_1 = \frac{m_1 L_1 \cos \theta}{(m_w + m_1)} \quad \text{and} \quad m_\theta = I_1 + m_1 L_1^2 - \frac{m_1^2 L_1^2 \cos^2 \theta}{(m_w + m_1)} \quad (4-10c)$$

再從式(4-7)得到

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{(I_1 + m_1 L_1^2)} (m_1 \ddot{x} L_1 \cos \theta + m_1 g L_1 \sin \theta - (L_1 + L_2) F x_1 \cos \theta - (L_1 + L_2) F y_1 \sin \theta + M_1)$$

將上式帶入式(4-9)可得

$$\begin{aligned}
& (m_w + m_1) \ddot{x} + \frac{m_1^2 L_1^2}{(I_1 + m_1 L_1^2)} \ddot{x} \cos^2 \theta + m_1 L_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta - \frac{m_1^2 L_1^2 g}{(I_1 + m_1 L_1^2)} \cos \theta \sin \theta \\
& + \frac{(L_1 + L_2) m_1 L_1 F x_1}{(I_1 + m_1 L_1^2)} \cos^2 \theta + \frac{(L_1 + L_2) m_1 L_1 F y_1}{(I_1 + m_1 L_1^2)} \cos \theta \sin \theta - \frac{m_1 L_1 M_1}{(I_1 + m_1 L_1^2)} \cos \theta - F x_1 = F_f
\end{aligned} \quad (4-9b)$$

F_f 為當輪子受到轉動力距而移動時，地面作用於輪子上的摩擦力，造成底座向前的動力，而這個力量的大小來自於我們下給底座馬達的指令，假設馬達指令為 u ，那麼 F_f 跟 u 之間會有一個關係式假設為

$$F_f = k_u u$$

將上式帶回式(4-9b)然後用參數化的形式表示如下：

$$\mathbf{a}_2^T \mathbf{h} = u \quad (4-11)$$

在此參數定義如下：

$$\mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} \ddot{x} & \ddot{x} \cos^2 \theta & \dot{\theta}^2 \sin \theta & F_{y_1} \cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & F_{x_1} \cos^2 \theta & -\cos \theta & -F_{x_1} \end{bmatrix}^T \quad (4-11a)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \frac{m_w + m_1}{k_u} & \frac{m_1^2 L_1^2}{(I_1 + m_1 L_1^2) k_u} & \frac{m_1 L_1}{k_u} & \frac{m_1 L_1 (L_1 + L_2)}{(I_1 + m_1 L_1^2) k_u} & \frac{m_1^2 L_1^2 g}{(I_1 + m_1 L_1^2) k_u} & \frac{(L_1 + L_2) m_1 L_1}{(I_1 + m_1 L_1^2) k_u} & \frac{m_1 L_1 M_1}{(I_1 + m_1 L_1^2) k_u} & \frac{1}{k_u} \end{bmatrix} \quad (4-11b)$$

比較式(4-10b)和(4-11b)，可以得到它們的關係如下

$$\frac{b_1}{k_u} = \frac{h_3^2}{h_1}, \quad \frac{b_2}{k_u} = \frac{h_3 h_5}{h_2} - \frac{h_3 h_7}{h_1}, \quad \frac{b_3}{k_u} = \frac{h_3 h_4}{h_2}, \quad b_4 = \frac{h_3 h_6}{h_2}, \quad k_1 = \frac{h_3}{h_1} \cos \theta, \quad \frac{m_\theta}{k_u} = \frac{h_3^2}{h_2} - b_1 \cos^2 \theta \quad (4-12)$$

式(4-11)可以用遞迴最小平方法(在 4.3 小節中討論)來估計出參數陣列 \mathbf{h} ，然後經由式(4-12)的關係，可以計算出參數陣列 \mathbf{b} ，如此一來就可以利用式(4-10)來計算平衡演算法去控制 θ ，令馬達命令為控制指令

$$u = \frac{1}{k_1} \left(\frac{m_\theta}{k_u} \ddot{\theta}_d + \frac{1}{k_u} \mathbf{a}_1^T \mathbf{b} - \frac{m_\theta}{k_u} k_d (\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - \frac{m_\theta}{k_u} k_p (\theta - \theta_d) \right) \quad (4-13)$$

θ_d 為設計角度(Desired angle)，將式(4-13)帶入式(4-10)，可得

$$m_\theta (\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e) = 0$$

其中 $e = \theta - \theta_d$ 為誤差角度(Error signal)

而 $m_\theta > 0$ ，所以誤差角度將會自動收斂回零，也就是說系統角度 θ 將會趨近於我們所設計的角度 θ_d ，給定 θ_d 為零，則系統將收斂在平衡的狀態，如果希望機器人往前移動，可以藉由設計 θ_d 來達到目標(如圖 4-5 所示)。

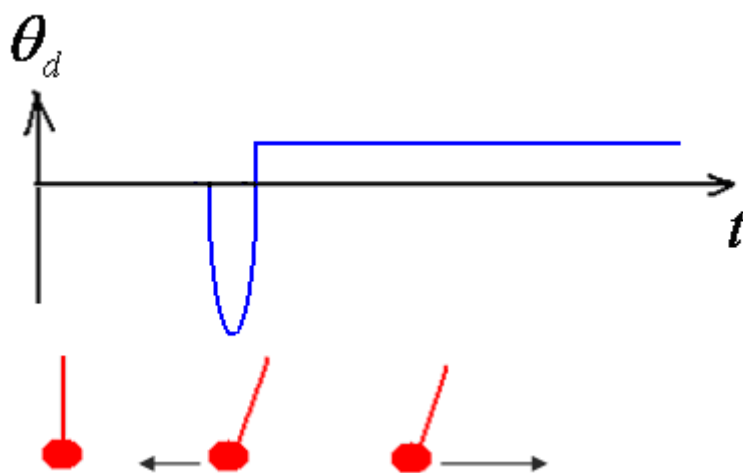


圖 4-5 θ_d 設計讓機器人往前移動

4.3 以傾斜儀(Tilt)和陀螺儀(Gyro)合成增強角度偵測準確度

在本論文的系統裡，其中 θ 的測量佔有極重要的位置，要是估計有了誤差，整個系統將會發散到不穩定的狀態，另外在透過 θ 的變化估計 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 時，因為是微分的關係，會放大高頻的雜訊，要是 θ 的估測不穩定，將會造成 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 項的誤判，使得平衡演算法不收斂，所以必需要針對 θ 做增強補償。

用來偵測 θ 的感測器有很多種，本系統選擇用傾斜儀(Tilt)和陀螺儀(Gyro)來估測，就我們所觀察得到，傾斜儀雖然可以在穩定的狀態下收斂至準確的傾斜角度，但由於其內部的構造設計關係，當有加速度作用在感測器上時，其暫態會出現過度測量值(Overshoot)，如圖 4-6 第一張圖所示，而這個誤差量在估計 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 時將會造成很大的影響，另外如果使用的是陀螺儀來測量，因為陀螺儀所輸出的是旋轉的角速度值，透過一次積分的結果即為 θ 值，因為是一次積分，所以會濾掉高頻的訊號，使得輸出的 θ 值不會產生過度測量值(如圖 4-6 第二張圖所示)，但是積分的結果如果有一點的偏差(Bias)影響， θ 值將會不斷的累積誤差，造成系統的誤判。

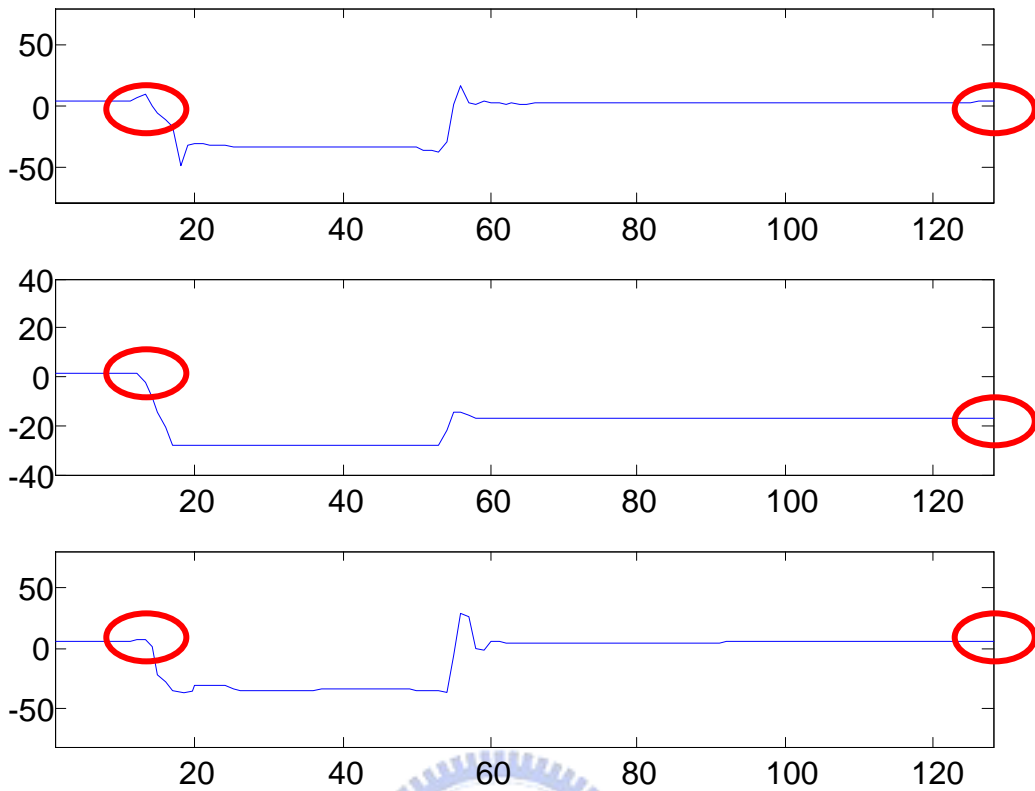


圖 4-6 θ 角度的偵測，由上方到下方依序為傾斜儀、陀螺儀、
傾斜儀與陀螺儀經由卡曼濾波器(Kalman Filter)合成的結果

由以上的結果得知，似乎兩種感測器都有美中不足之處，但也發現它們的優點可以互補，於是在本論文中試著應用卡曼濾波器(Kalman Filter)[11]的演算法來對兩種感測器的值做合成(Sensor Fusion)[29]，使得 θ 值的偵測可以融合兩種感測器的優點，抑制兩者的缺點。

卡曼濾波器在實作領域上有非常好的效能，卡曼全名 Rudolf Emil Kalman，是匈牙利的數學家，卡曼濾波器乃是源自於他的博士論文和 1960 年所發表的一篇文章《A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems》，它是一種利用實際測量值(Observation)來估計(Estimate)與修正(Modify)系統的狀態值(State)，它的系統模型如下

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

其中 w_k 為過程雜訊(Process Noise)， v_k 為測量雜訊(Measurement Noise)，而 w_k 和 v_k 皆為白高斯雜訊(White Gaussian Noise)，這時透過卡曼濾波器的演算法(如圖 4-7 所示 ref.[11]) 就可以得到一個最佳化的狀態估測 \hat{x}_k 。

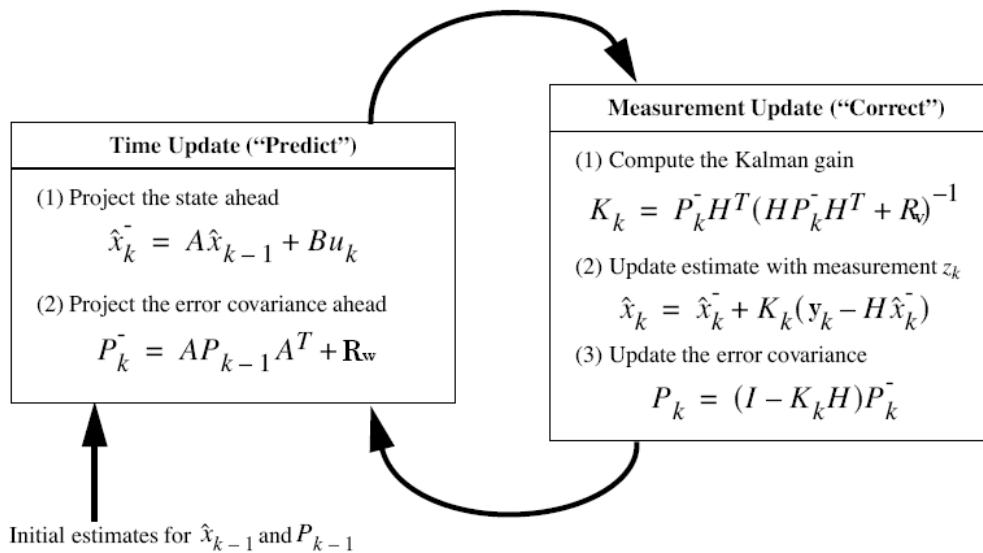


圖 4-7 卡曼濾波器演算法流程[11]

有了卡曼濾波器的演算法搭配感測器合成的概念，可以讓陀螺儀的測量值為輸入值 u_k ，而傾斜儀的測量值為實際測量值 y_k ，而系統模型的參數 A 為 1， B 為 ΔT ， H 為 1，就可以得到經過傾斜儀與陀螺儀合成出來的結果(如圖 4-6 第三張圖所示)，可以看到原先在傾斜儀量測訊號很尖銳的地方，合成出來後的訊號會變的較為平緩，而陀螺儀所累積的誤差在合成之後也可以收斂到跟傾斜儀相同的值。

4.4 利用遞迴最小平方法(Recursive Least-Squares Method)估計系統參數

在實作的過程中發現，如果要實現經由 4.2 小節推導出來的平衡演算法，必須要知道這整個系統很多的參數，像是底座跟各個連桿的質量，各連桿的長度、轉動慣量(Moment of Inertia)，馬達指令與作用力之間的關係值 k_u 等，以及推算出的參數陣列 h (式(4-11b))和參數陣列 b (式(4-10b))，但是因為很難直接去量得每

個參數值，所以希望藉由遞迴最小平方法讓系統自行去運算訓練出參數陣列 \mathbf{h} ，藉以求得參數陣列 \mathbf{b} 並帶回平衡演法中求值。

由式(4-11) 得知 $\mathbf{a}_2^T \mathbf{h} = \mathbf{u}$ ，令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_2^T(0) \\ \mathbf{a}_2^T(1) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

要求得最小平方誤差的解 $h = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{u}$ ，該注意的是這樣的運算當中需要去計算反矩陣，運算量非常的大，而且需要事前先預錄一段訊號來做參數訓練的動作，但這樣訓練出來的系數並不足以應付不同的環境所造成的差異，因為本作品希望這系數的訓練動作是可以實現在系統當中做即時(Real Time)的更新，所以引進了遞迴最小平方法的概念，它可以每新得到一筆資料 $\mathbf{a}_2^T(k+1)$ 和 $u(k+1)$ ，就更新一次 \mathbf{h} 的解，其運算流程如下：

$$\mathbf{h}(k+1) = \mathbf{h}(k) + \frac{\mathbf{P}(k)\mathbf{a}_2(k+1)}{1 + \mathbf{a}_2^T(k+1)\mathbf{P}(k)\mathbf{a}_2(k+1)} [u^T(k+1) - \mathbf{a}_2^T(k+1)\mathbf{h}(k)]$$

$$\mathbf{P}^{-1}(k+1) = \mathbf{P}(k) - \frac{\mathbf{P}(k)\mathbf{a}_2(k+1)\mathbf{a}_2^T(k+1)\mathbf{P}(k)}{\mathbf{I} + \mathbf{a}_2^T(k+1)\mathbf{P}(k)\mathbf{a}_2(k+1)}$$

$$\text{其中 } \mathbf{P}(k) = [\mathbf{A}^T(k)\mathbf{A}(k)]^{-1}$$

值得注意的是上式的分母項 $\mathbf{a}_2^T(k+1)\mathbf{P}(k)\mathbf{a}_2(k+1)$ 是一個 1x1 的元素，取代了原式的反矩陣，大大的降低了運算量，使得訓練參數這個演算法可以嵌入系統裡做即時的運算，有趣的是，這個演算法所有的測量值和輸入值都是經由平衡演算法輸出控制指令並作用在整個系統後的結果，然後計算出來的參數值又轉換成平衡演算法的參數，像是一個雞生蛋，蛋生雞的議題，又因為平衡演算法會強迫系統收斂，所以自然地遞迴最小平方法所計算出來的結果也會收斂至一個固定值，如圖 4-8 為 \mathbf{h} 參數陣列其中一元素在不同初始條件下的收斂情形，而遞迴最小平方法的推導過程請參考附錄 II。

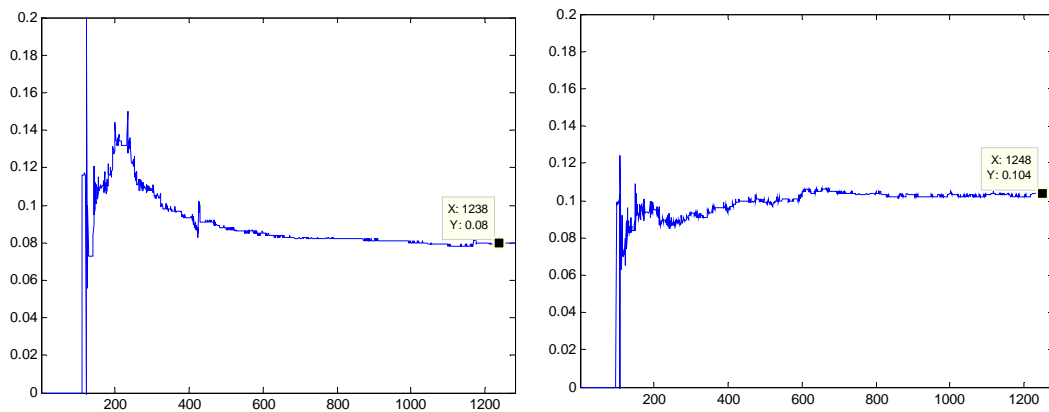


圖 4-8 h 參數陣列其中一元素在不同初始條件下的收斂情形

4.5 穩態之系統重心補償(Center of Mass Compensation)

4.1~4.4 小節分析了整個系統的暫態情形，在這個小節要討論的是如果機器人行動完後並沒有立即回復到原來的姿態，它可能停留在某一個姿勢，這時對平衡演算法來說，只能計算到系統因為重力不在垂直軸上所產生的轉矩，如果整個系統還是要求回到 $\theta_d = 0$ 的條件，那麼機器人就會因為必需一直抵抗重力所產生的轉矩而不停的往前移動，這樣的結果並不符合我們所期望的，所以必須要針對機器人在不同的姿態下計算靜平衡點所得到的 θ 值，並且對設計 θ_d 值做補償，換句話說即是控制 θ 值收斂在靜平衡時所需要的角度(如圖 4-9 所示)。

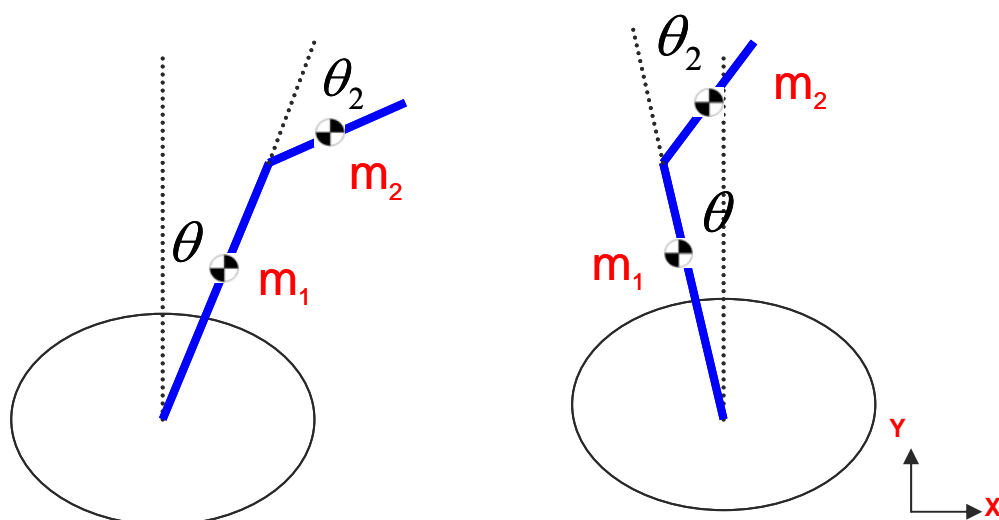


圖 4-9 系統重心補償示意圖

由於機器人從底座到腰部的連桿與腰部至頭部的連桿佔了大部分的質量，在此僅考慮這兩個連桿對系統靜平衡點的影響，首先計算這兩根連桿的質心位置並令它為零，可得

$$\frac{1}{2}m_1L_1\sin\theta + m_2(L_1\sin\theta + \frac{1}{2}L_2\sin(\theta + \theta_2)) = 0$$

利用三角函數公式並重新排列參數項可得

$$(\frac{1}{2}m_1L_1 + m_2L_1)\sin\theta + \frac{1}{2}m_2L_2(\sin\theta\cos\theta_2 + \cos\theta\sin\theta_2) = 0$$

$$(\frac{1}{2}m_1L_1 + m_2L_1 + \frac{1}{2}m_2L_2\cos\theta_2)\sin\theta + (\frac{1}{2}m_2L_2\sin\theta_2)\cos\theta = 0$$

上式中 m_1 、 m_2 、 L_1 、 L_2 和 θ_2 皆為可量測，可視為已知，並改寫成下式

$$\alpha(m_1, m_2, L_1, L_2, \theta_2)\sin\theta + \beta(m_2, L_2, \theta_2)\cos\theta = 0$$

與 $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ 做連立方程式，因為 $\theta_2 \geq 0$ 可限制 $\theta \leq 0$ ，可求得 θ 的唯一解，並回饋給 θ_d 做補償，而整個系統會變成像圖 4-11 所示。

4.6 二輪式移動平台旋轉之概念描述與推導

由運動力學可以得知，二輪式的移動平台底座所施給機器人的力為兩輪所出之力的和（如圖 4-10 所示），如果在其中一輪的輸出上加上 ΔF ，另一輪減掉 ΔF ，那麼合力依舊為原來的力，不會破壞掉原來平衡演算法所需要的力矩，又由於兩輪的輸出力量不同，會造成速度差，而此一速度差即為此平台旋轉的角速度如下式：

$$\dot{\phi}_d = \frac{u_{right} - u_{left}}{b}$$

$$u_{right} = u + \frac{1}{2}\dot{\phi}_d, \quad u_{left} = u - \frac{1}{2}\dot{\phi}_d$$

其中 b 為兩輪之間的徑距(Span)， u 為平衡演算法計算出來的力量大小， $\dot{\phi}_d$ 為欲設計之轉速。

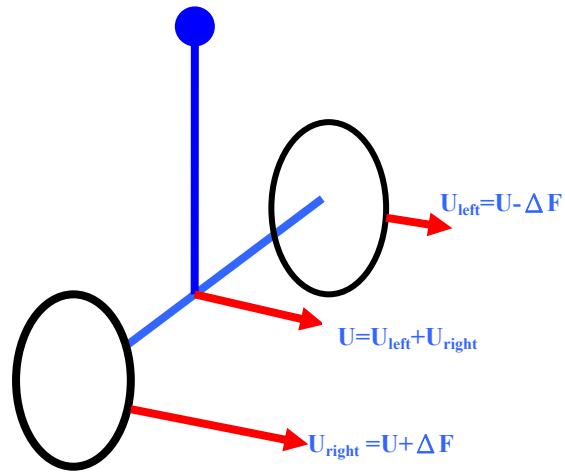


圖 4-10 系統旋轉示意圖

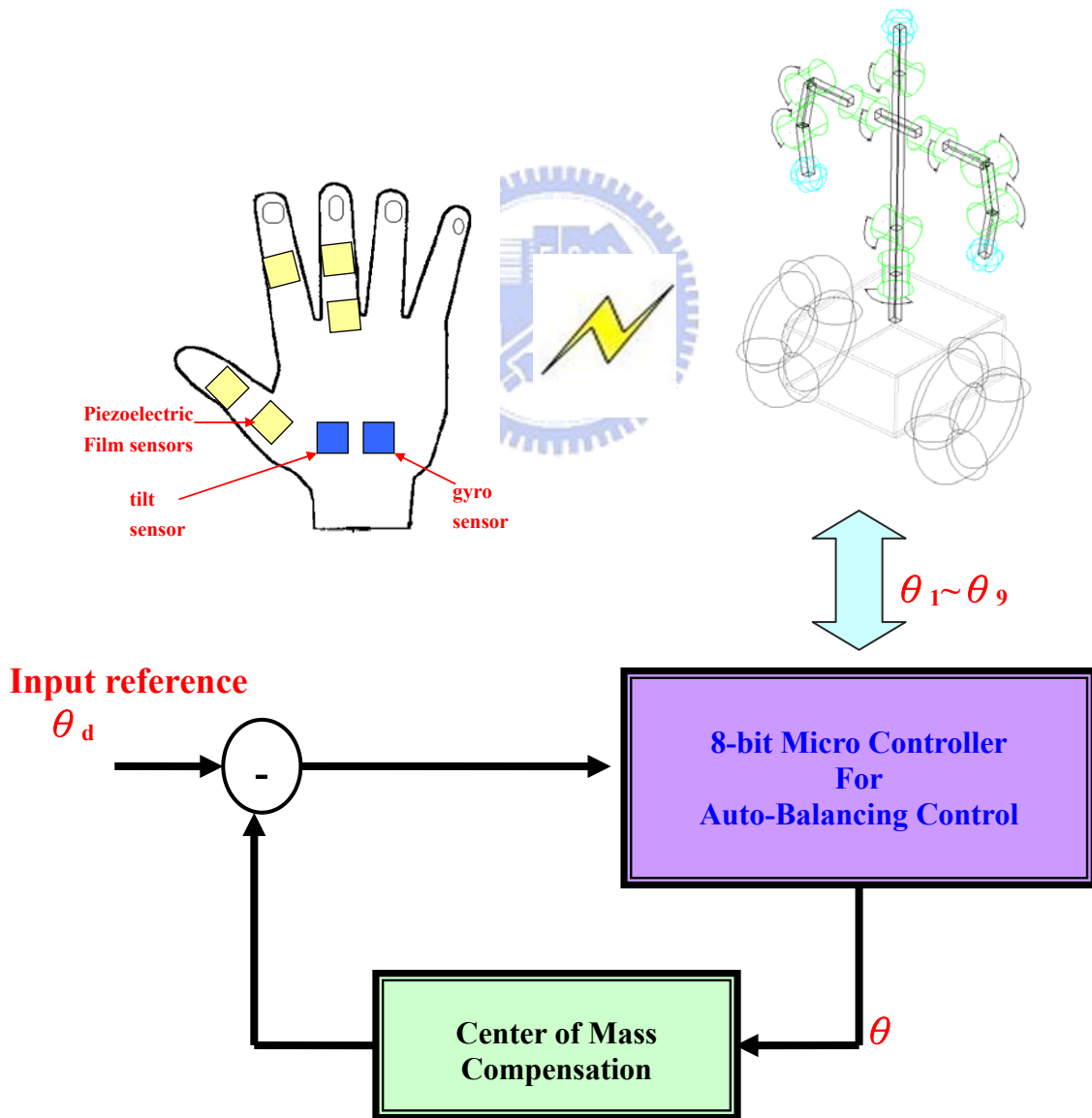


圖 4-11 全系統示意圖

第五章 軟硬體設計與實驗結果

第五章主要在介紹硬體與整個系統架構的實現，以及實驗數據的分析，分為三個部分，一為數位手套控制器，二為『X-Puppet』布袋戲偶機器人，第三則為二輪式自動平衡移動平台搭載『X-Puppet』同時利用數位手套控制。

5.1 數位手套控制器

本小節將要介紹數位手套整個硬體系統的架構，以及利用 Matlab 軟體實現 3.4 小節所推導之數學模型來模擬手掌與機器人模型之對應關係。

5.1.1 數位手套實體架構

在第三章介紹利用壓電材料 PVDF 感測器當作彎曲感測器，實現 3.3 小節所設計之類比積分放大電路(如圖 5-1 所示)與微控器連接，並做條件重置(Reset)來完成一自製的數位手套系統，接著利用 3.4 小節所推導分析手部骨骼運動學整理出用手掌操作布袋戲與人形機器人之間的映射函數(Mapping function)，簡化所需的關節測量值所得到的最低自由度需求之數位手套示意圖(如圖 3-8 所示)。為了做出符合本作品所需要的數位手套，我們請裁縫師傅特製一只在關節處具有類似小口袋的裝置(如圖 5-2 所示)，可以用來放置 PVDF 感測器，然後透過微控器執行映射方程式並將計算出來的指令透過 RS232 通訊協定傳給機器人做動作，其硬體架構與系統流程示意圖如圖 5-2：

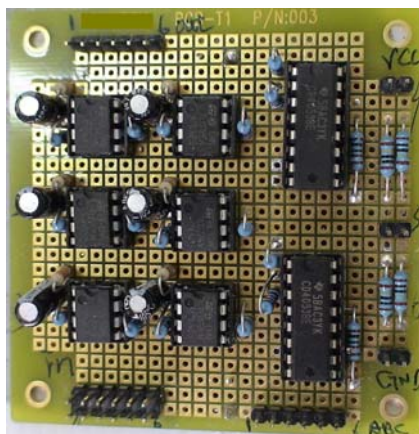


圖 5-1 類比積分放大電路+重置電路實體圖

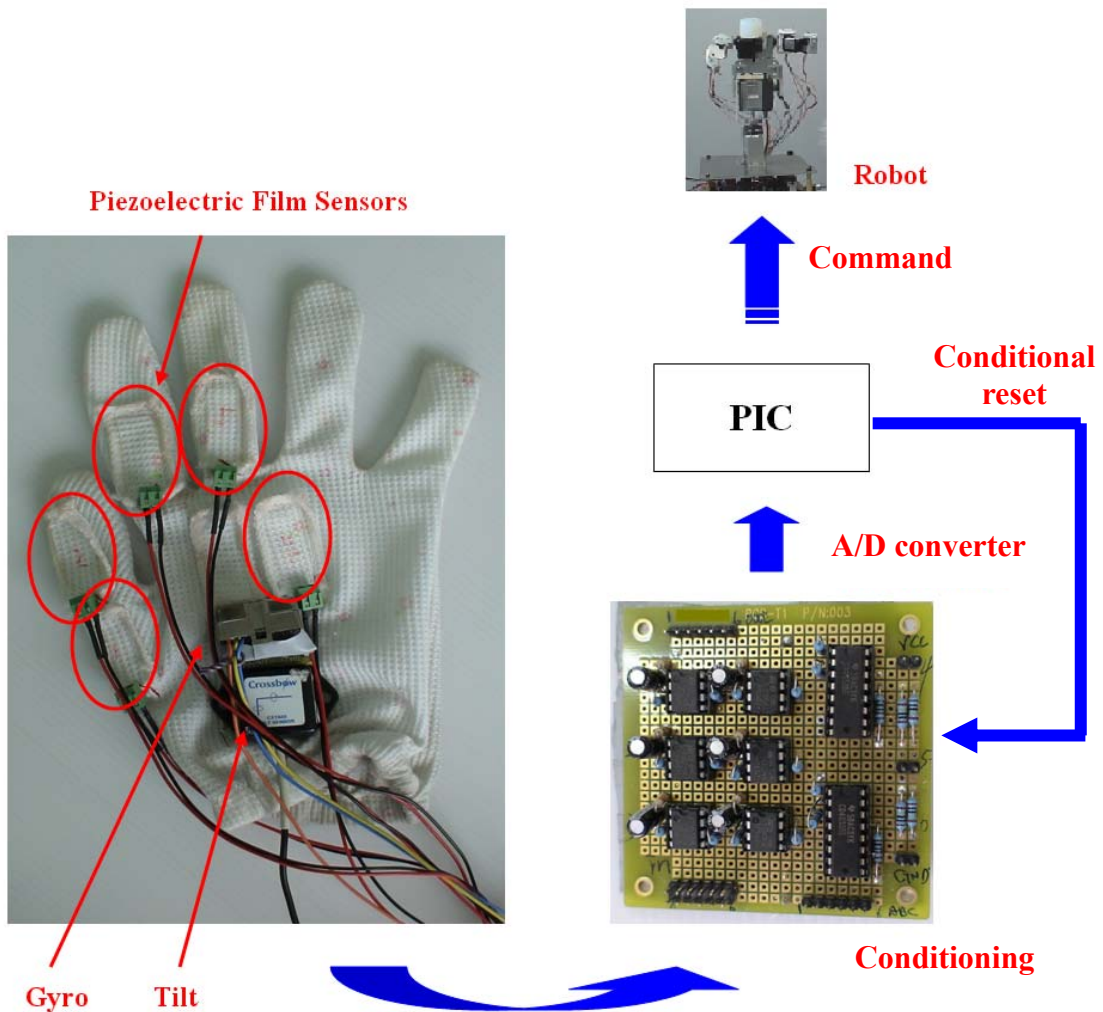


圖 5-2 數位手套硬體與系統流程示意圖

5.1.2 行為模式之數據分析

由數位手套所產生的類比訊號經由微控器轉成數位資訊輸出，利用 Matlab 把資料讀進電腦，並在電腦中建立手掌和機器人的簡易模型，藉此就可以驗證手掌資訊與機器人之間的動作映射是否正確，以下擷取點頭、揮左手、揮右手以及揮雙手的數據與模型圖，而數據圖中感測器的編號 No. 1~No. 5 分別對應到圖 3-8 所編號的五個 PVDF 感測器位置：

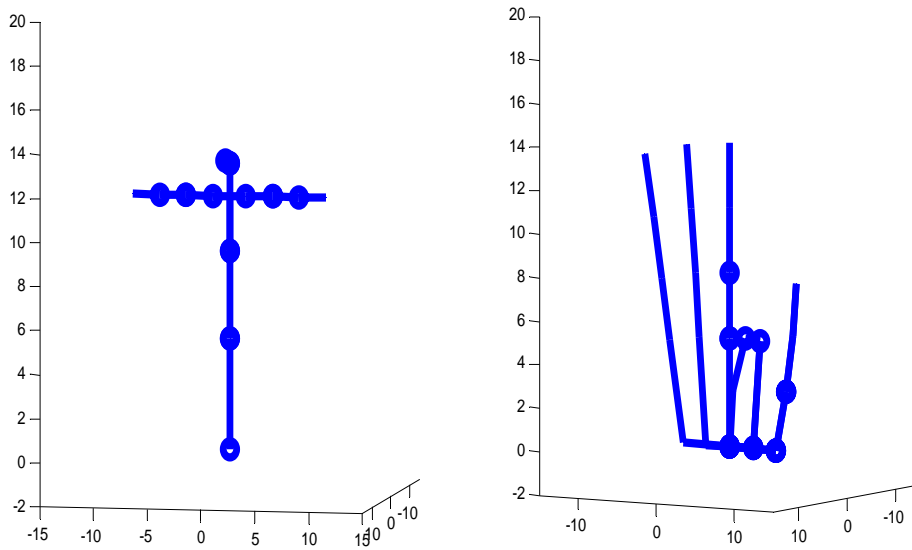
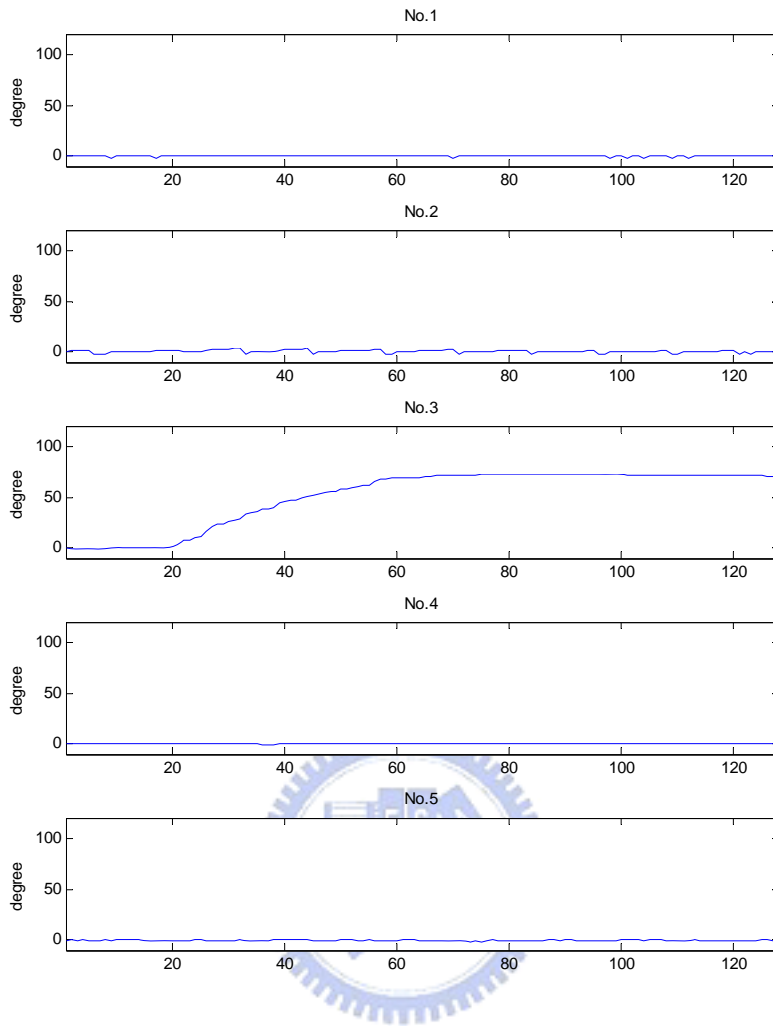


圖 5-3 點頭-上為數位手套資訊，下為模型圖

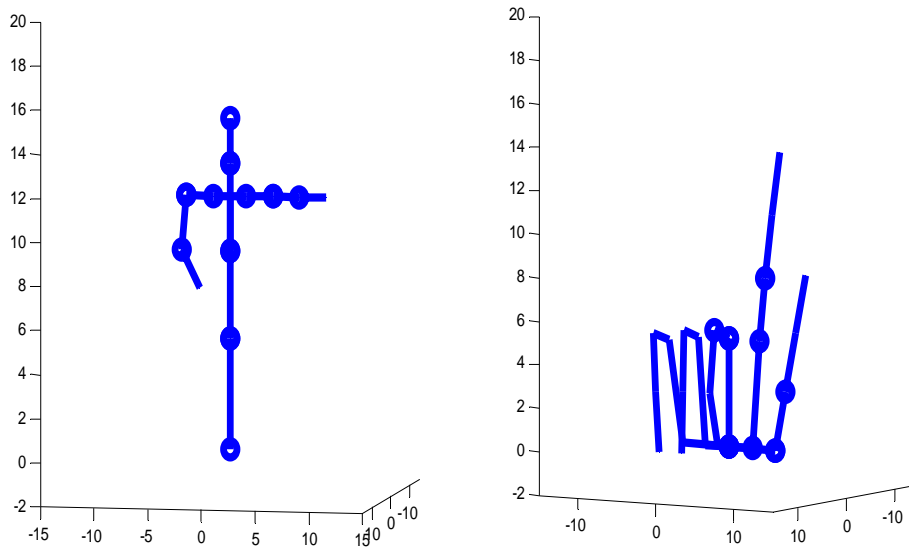
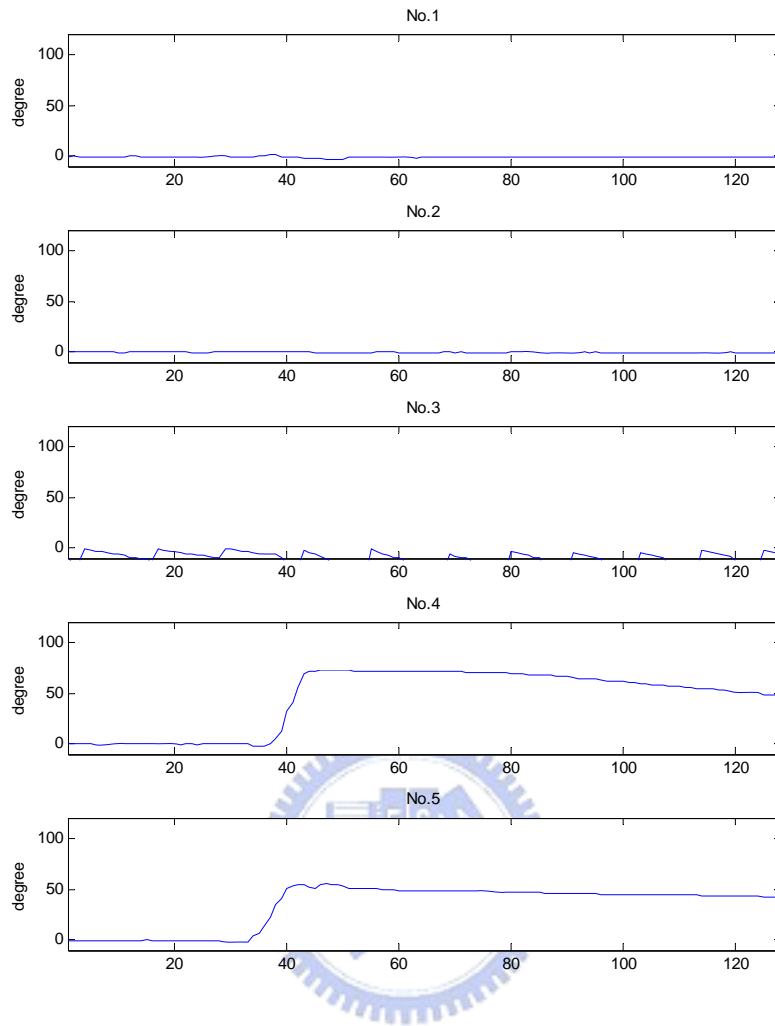


圖 5-4 揮右手-上為數位手套資訊，下為模型圖

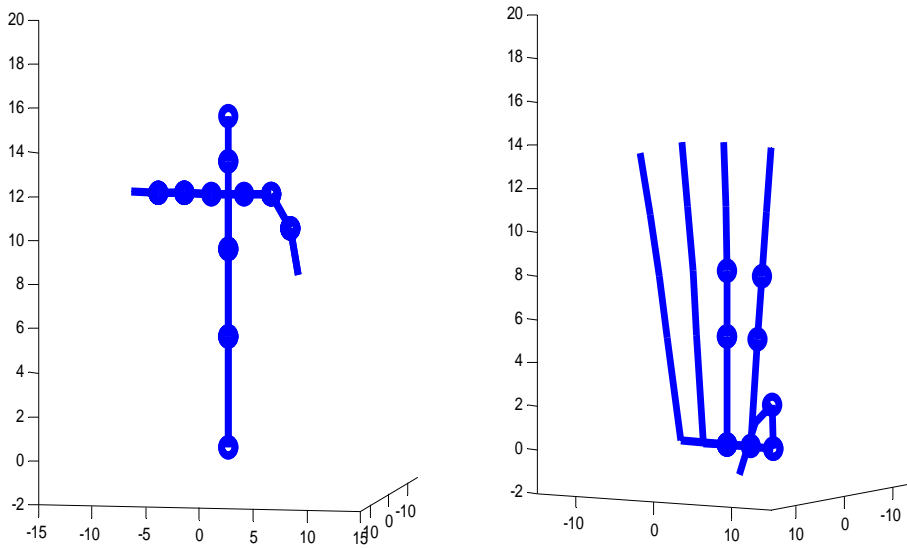
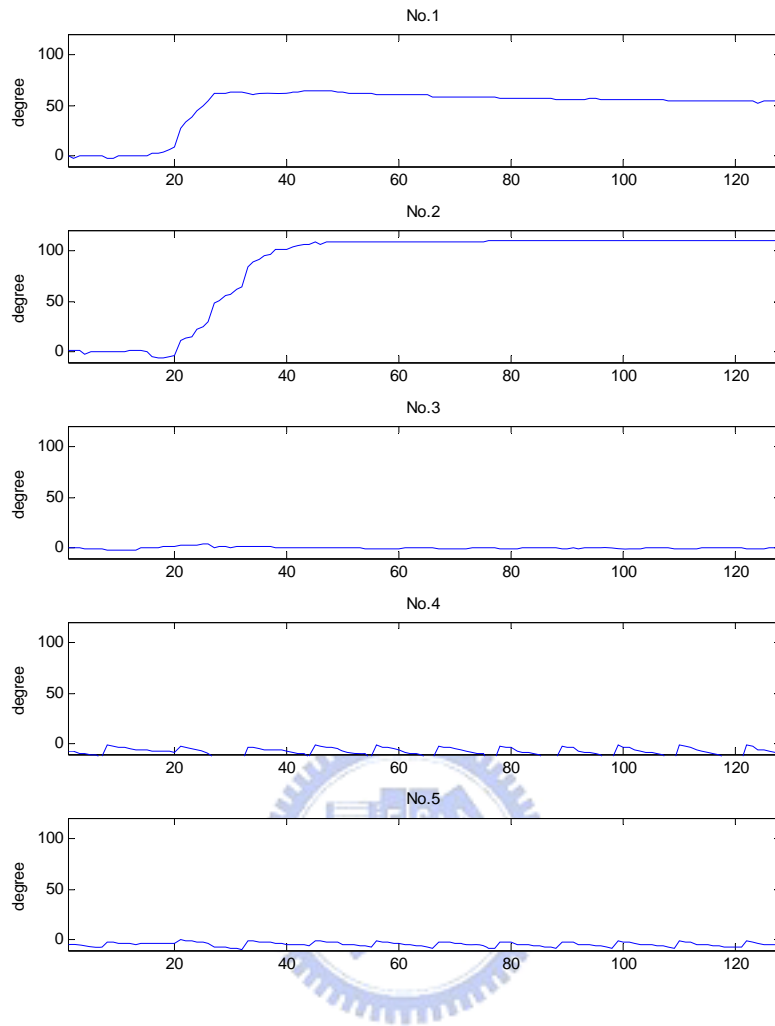


圖 5-5 揮左手-上為數位手套資訊，下為模型圖

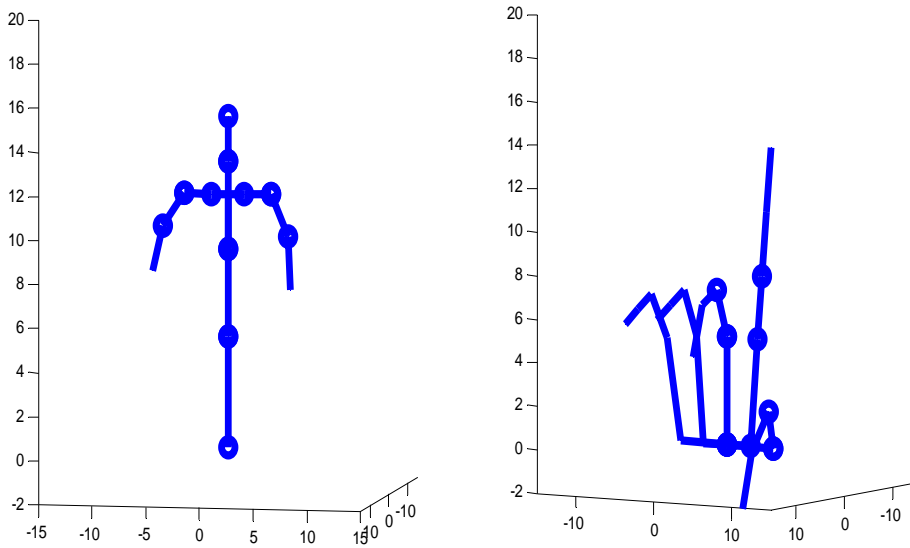
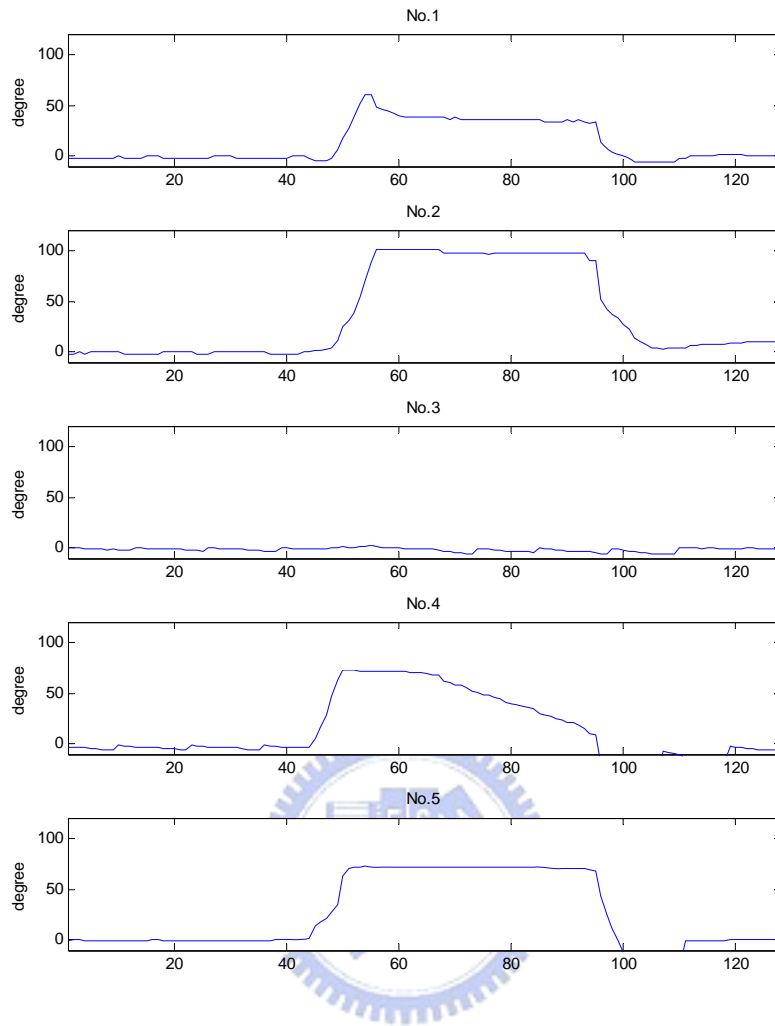


圖 5-6 揮雙手-上為數位手套資訊，下為模型圖

5.2 『X-Puppet』

本小節將要介紹『X-Puppet』的實體圖以及依據圖 3-6 所設計之實驗結果與分析。

5.2.1 『X-Puppet』之實體架構

『X-Puppet』的控制模組、電源模組以及馬達的部分在 2.1 小節已介紹過，利用設計出來的板件(請參考附錄 IV)所組成的實體圖以及主控台如下圖：

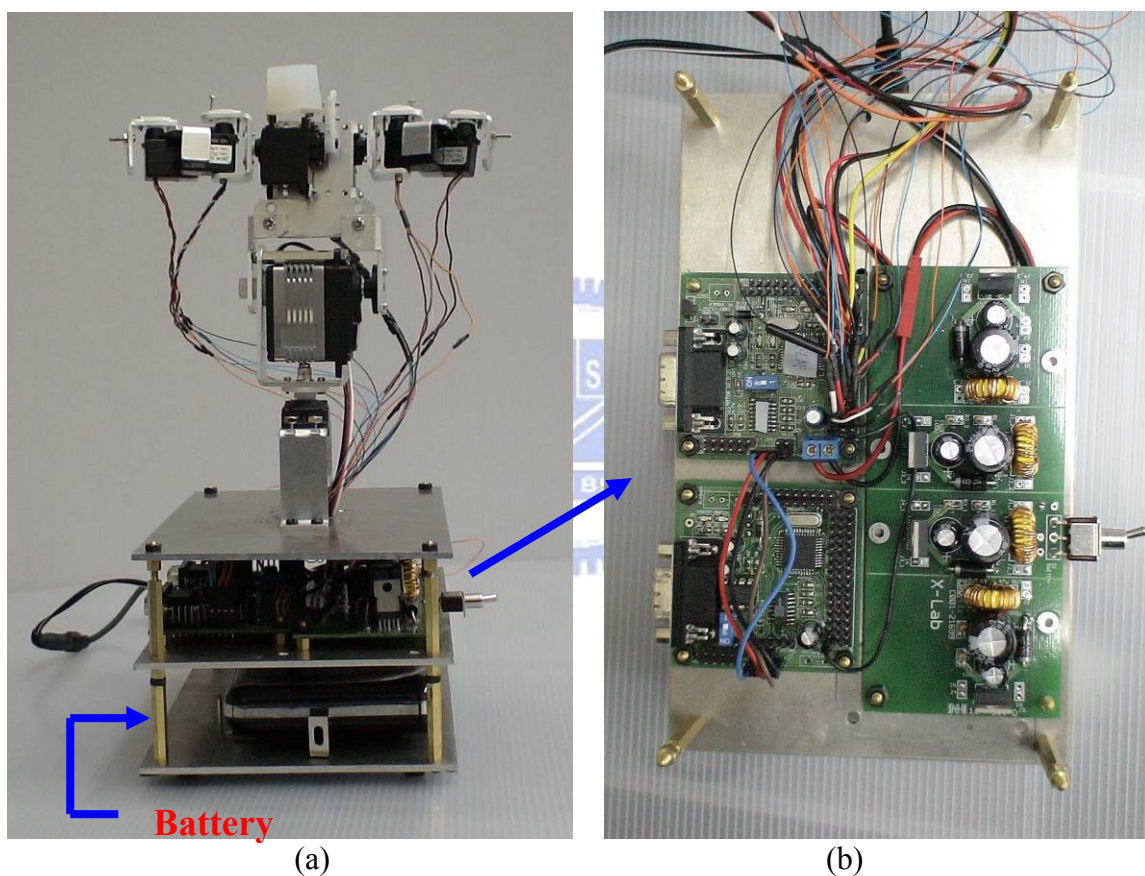


圖 5-7 (a) 『X-Puppet』實體圖 (b)控制電路板與電源模組

5.2.2 行為模式之分析

由 5.1.2 小節已經完成了操控戲偶主要的動作分析以及對應到數位手套的映射關係，以下藉由實驗結果來驗證實際機器人動作是否符合模擬結果，實驗包括數位手套手勢與機器人動作對照，以及布袋戲偶操作與機器人動作對照二部分。

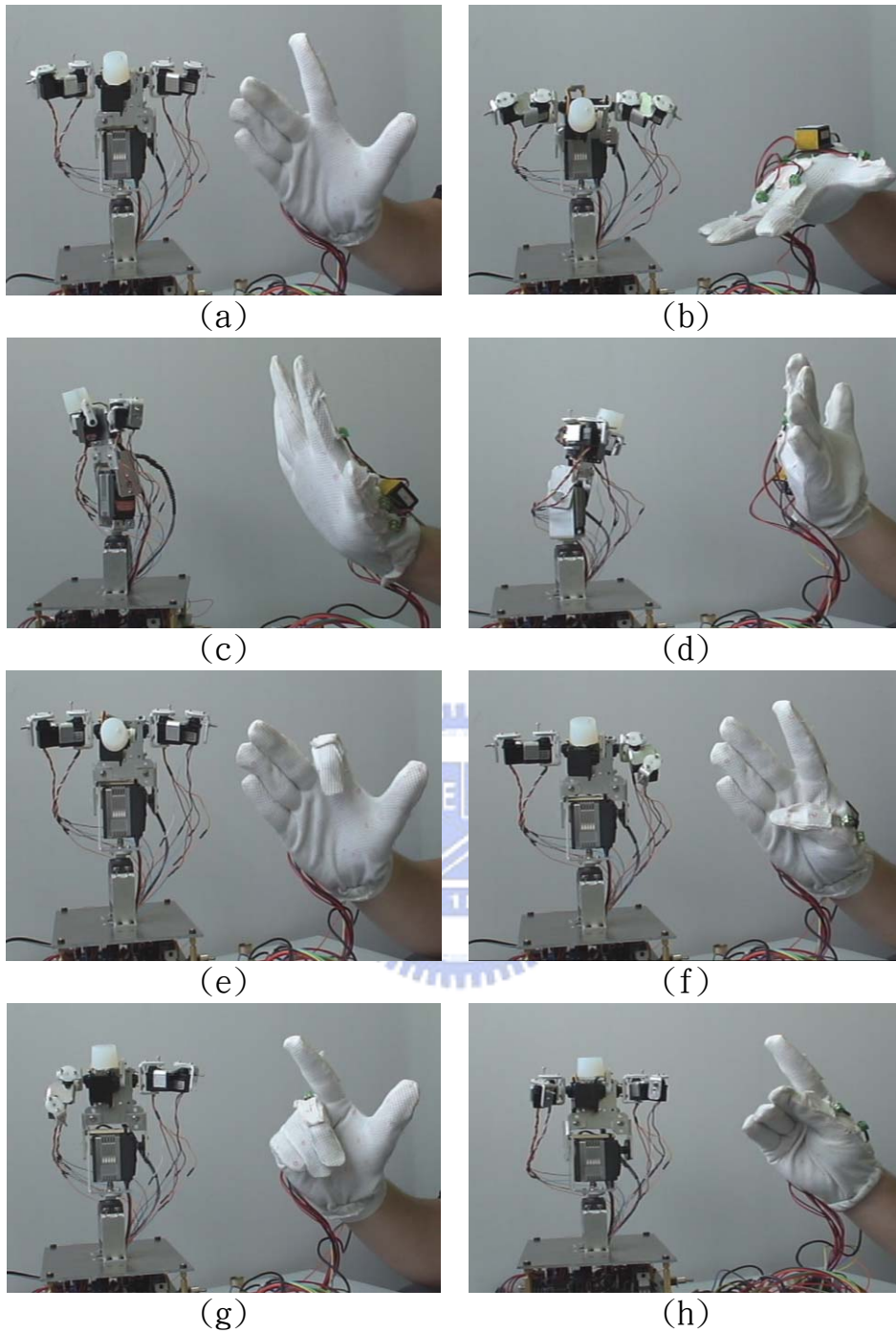


圖 5-8 八種主要的操偶手勢相對於機器人的動作，依次為(a)站姿 (b)彎腰 (c)右轉身 (d)左轉身 (e)點頭 (f)揮左手 (g)揮右手 (h)同時揮動雙手

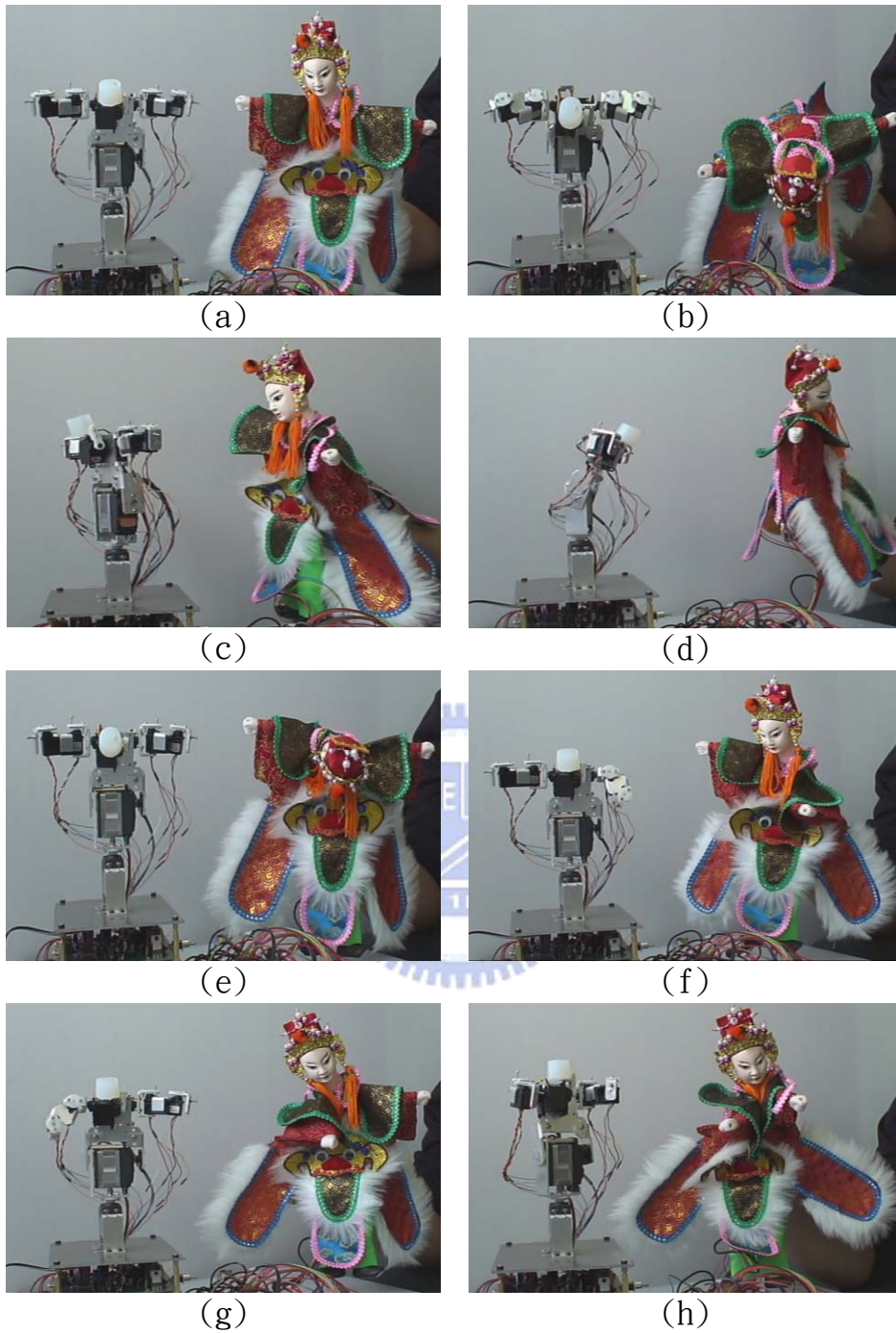


圖 5-9 八種主要的實際操偶姿態相對於機器人的動作，依次為(a)站姿 (b)彎腰 (c)右轉身 (d)左轉身 (e)點頭 (f)揮左手 (g)揮右手 (h)同時揮動雙手

5.2.3 即時實驗之連續圖

在前一小節驗證了靜態的手套資訊與機器人動作的映射函數關係，接下來要驗證的是此一映射函數在動態行為中的連續性，此一部分分為兩種呈現方式，一是只戴手套對照機器人的關係，二是操作戲偶對照機器人的關係，連續動作則分為點頭、彎腰、轉身、揮左手、揮右手、以及一連串不特定姿態的操偶方式，而以下所有連續圖順序皆為由左到右，由上到下。

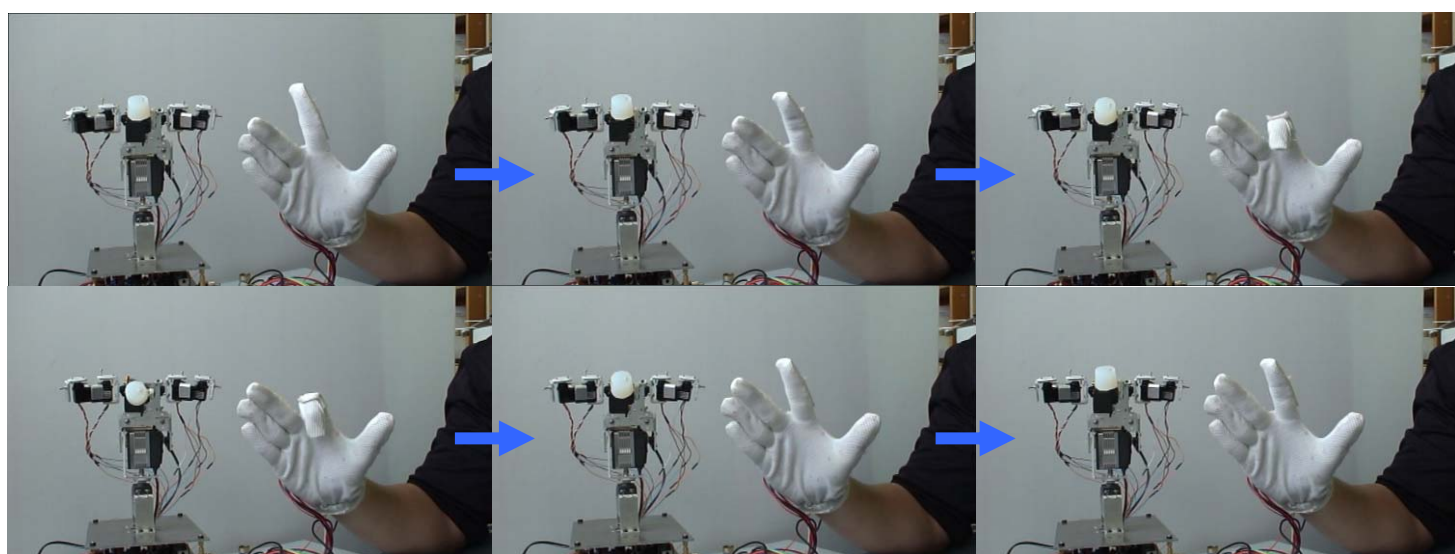


圖 5-10 點頭動作連續圖

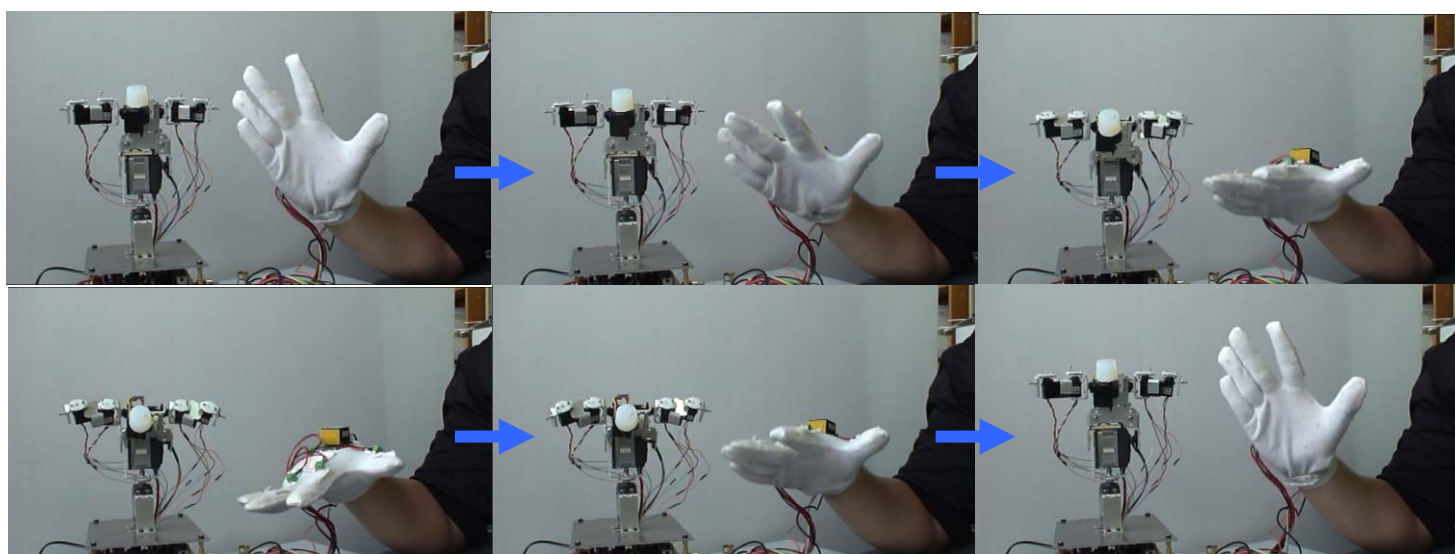


圖 5-11 彎腰動作連續圖

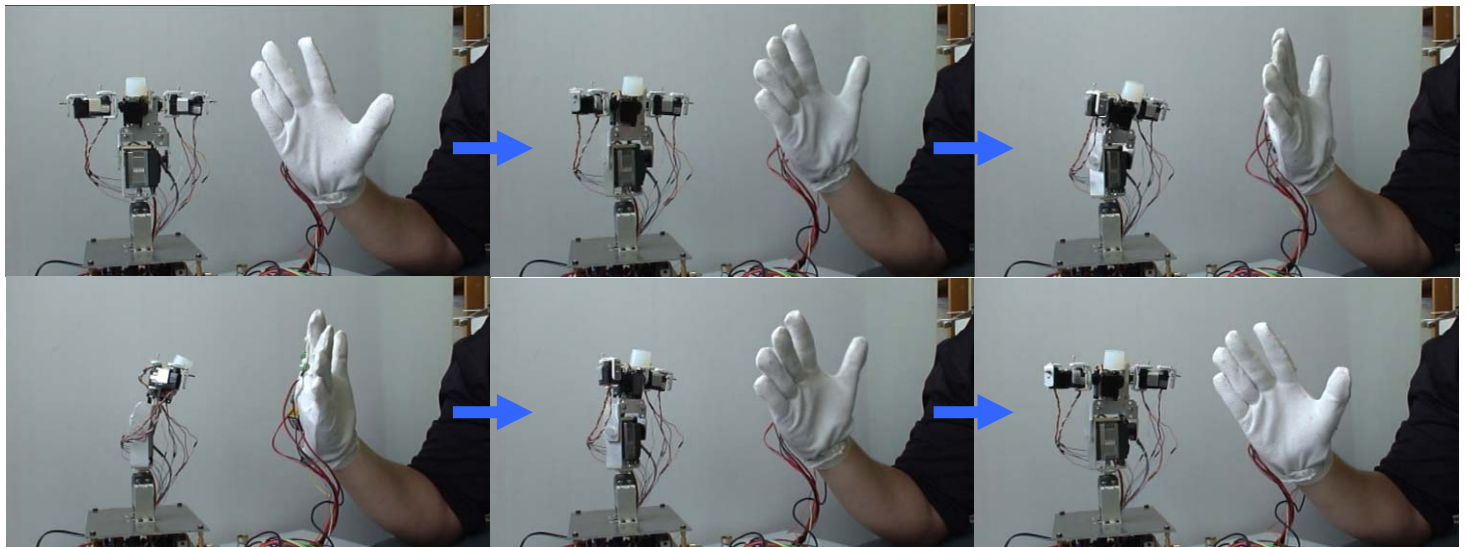


圖 5-12 轉身動作連續圖

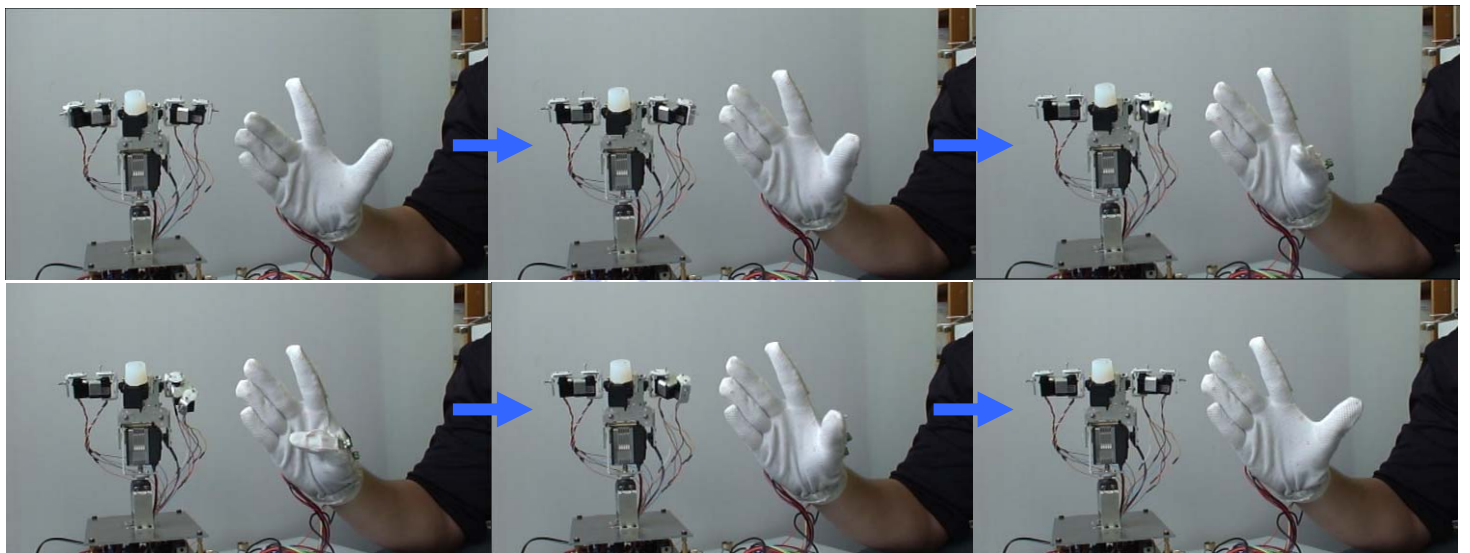


圖 5-13 揮左手動作連續圖

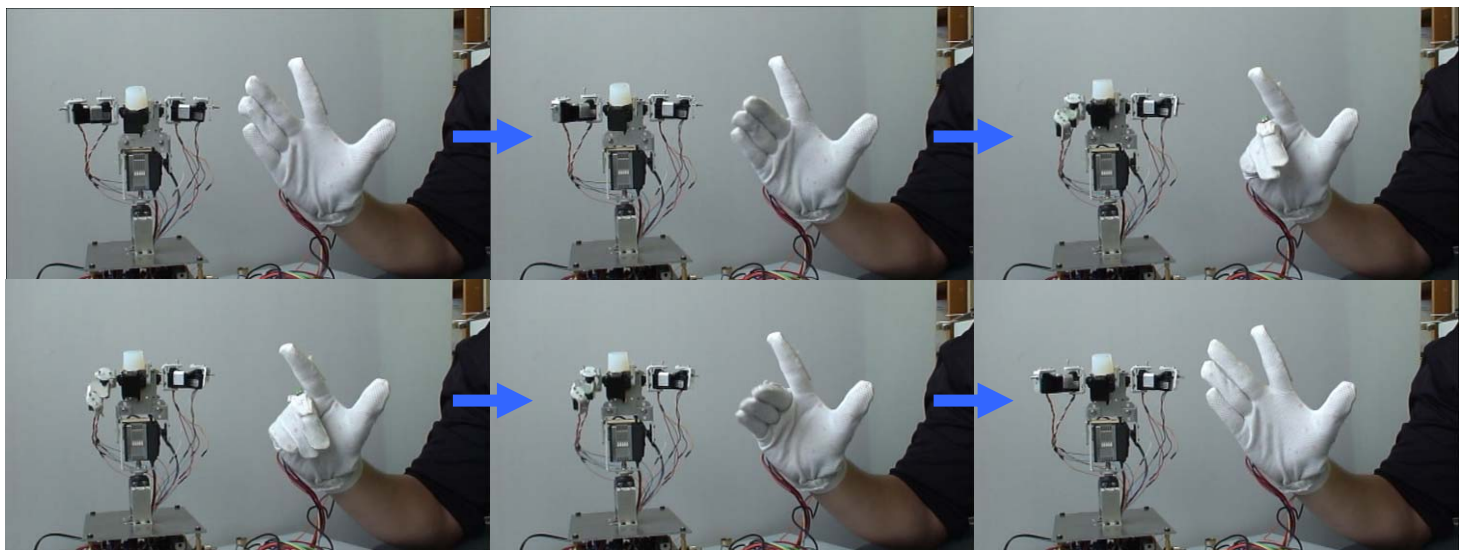


圖 5-14 揮右手動作連續圖



圖 5-15 一連串任意動作連續圖

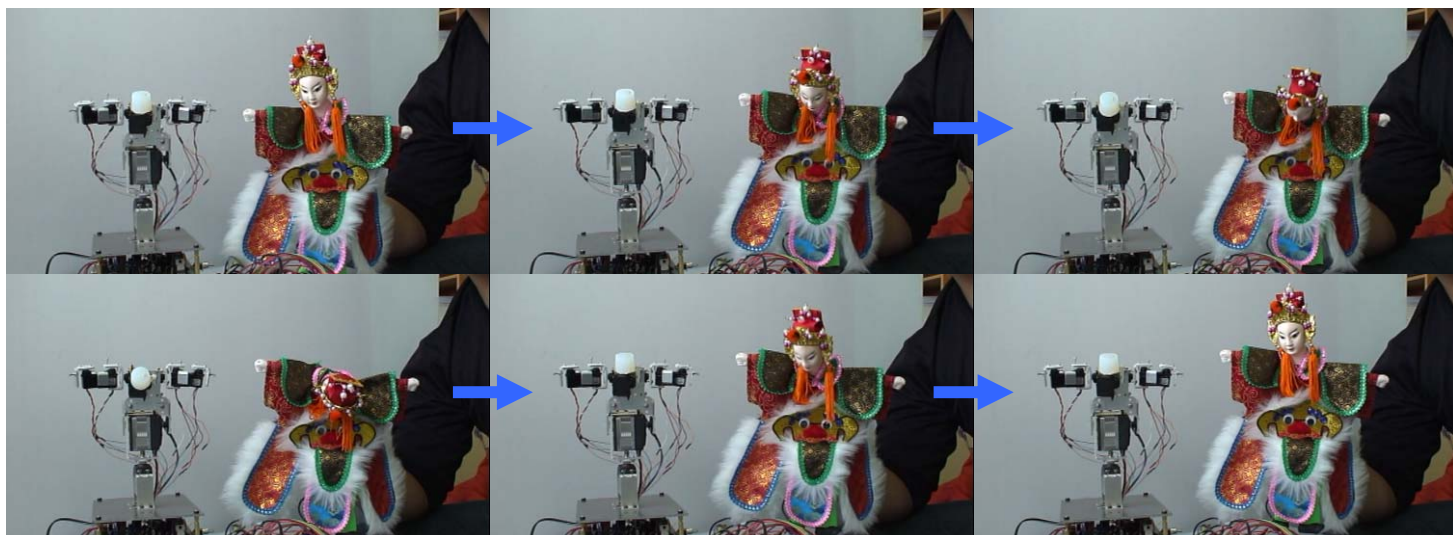


圖 5-16 布袋戲偶與機器人映射-點頭動作連續圖

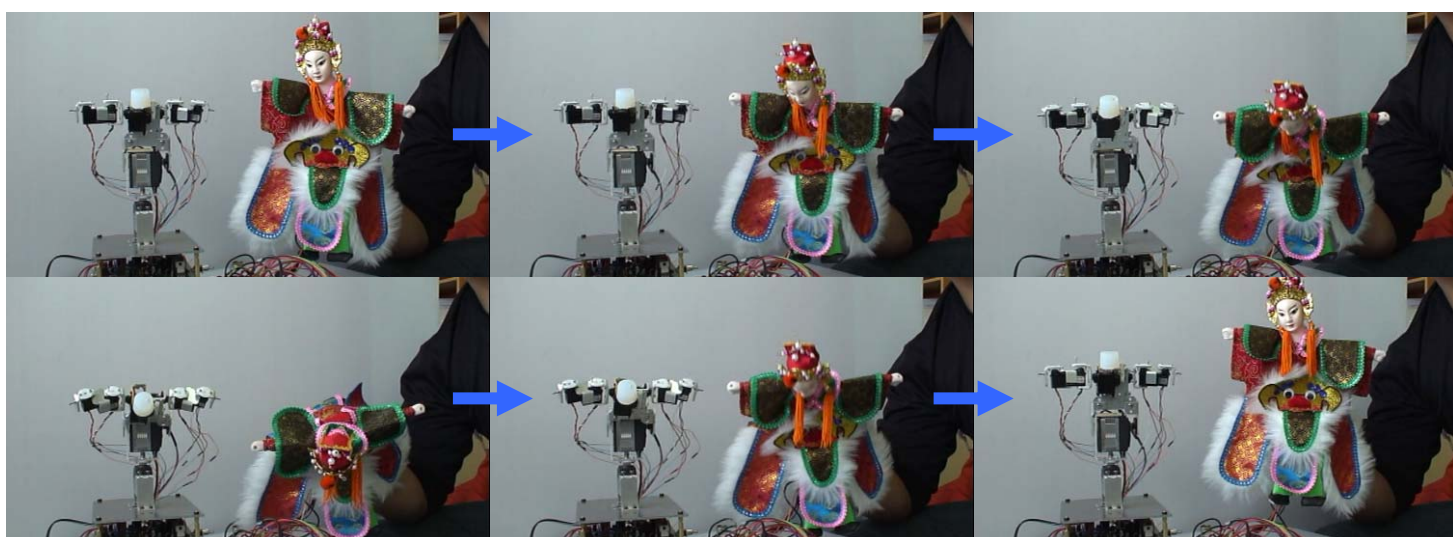


圖 5-17 布袋戲偶與機器人映射-彎腰動作連續圖

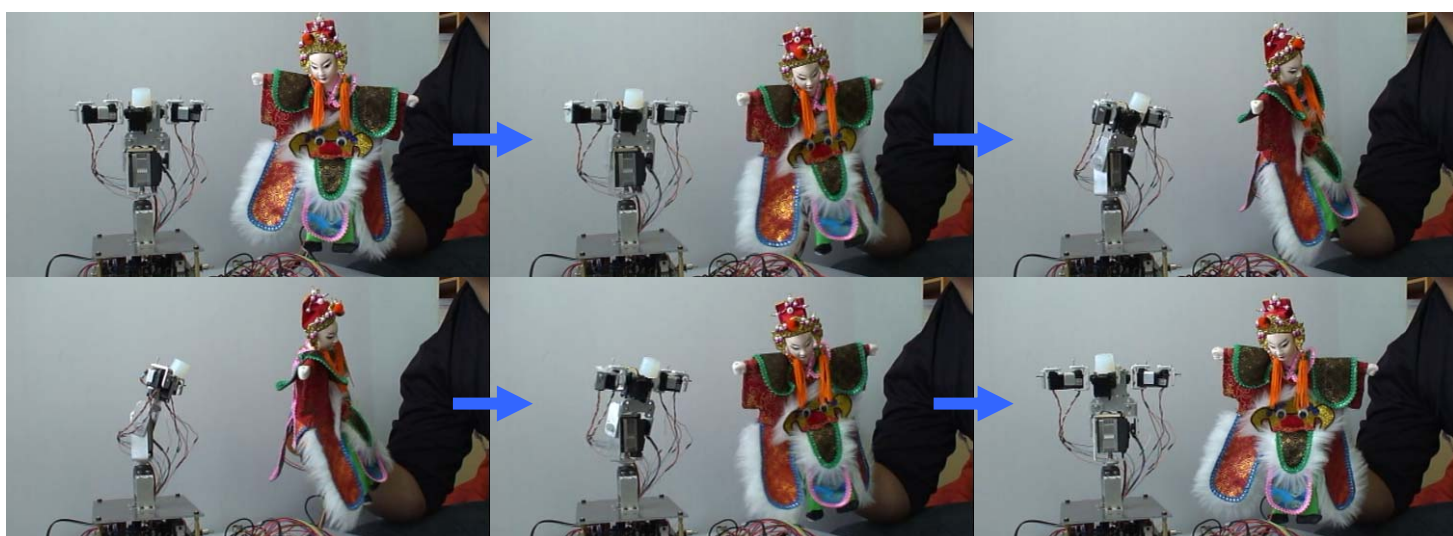


圖 5-18 布袋戲偶與機器人映射-轉身動作連續圖

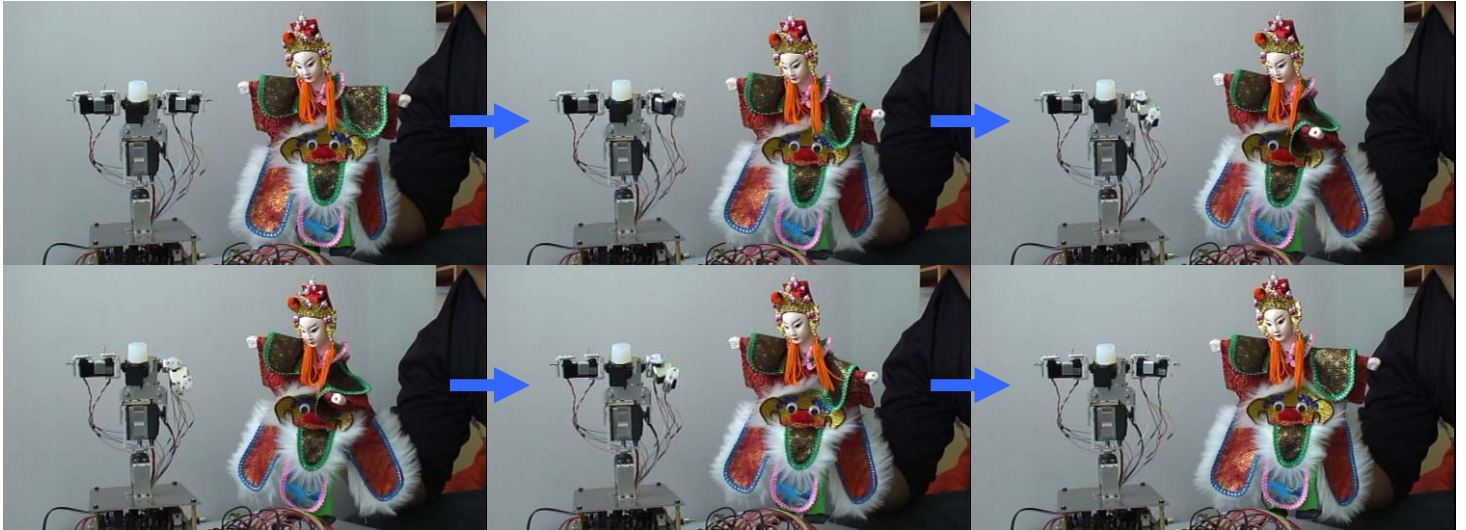


圖 5-19 布袋戲偶與機器人映射-揮左手動作連續圖

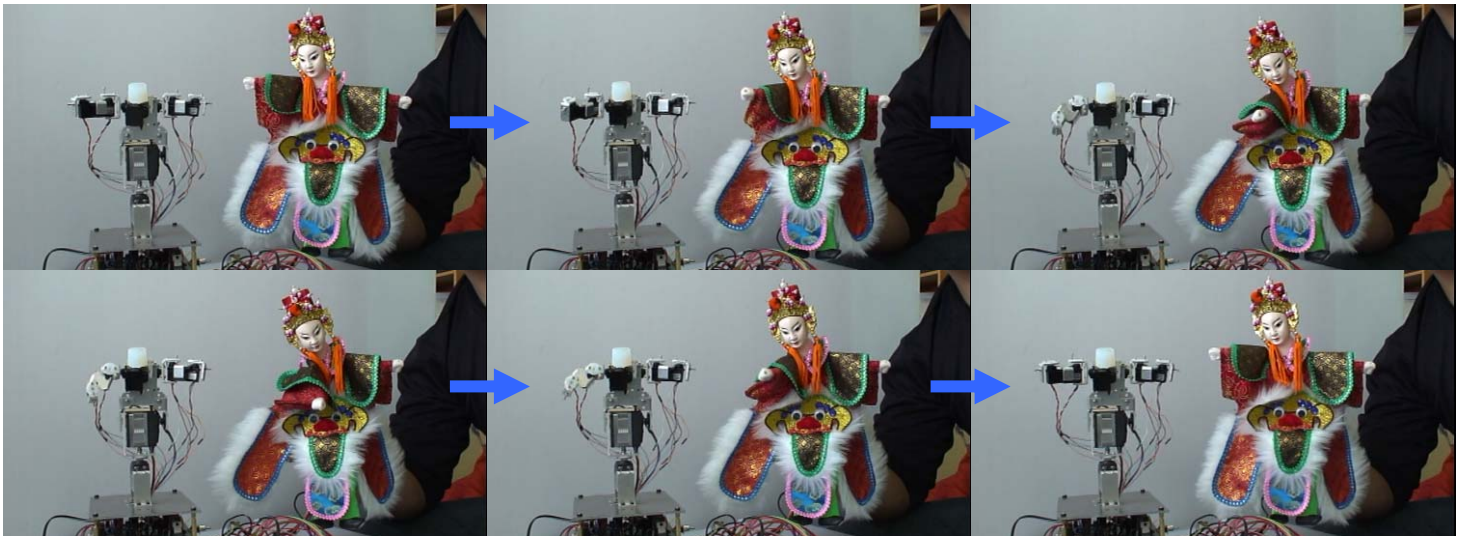


圖 5-20 布袋戲偶與機器人映射-揮右手動作連續圖

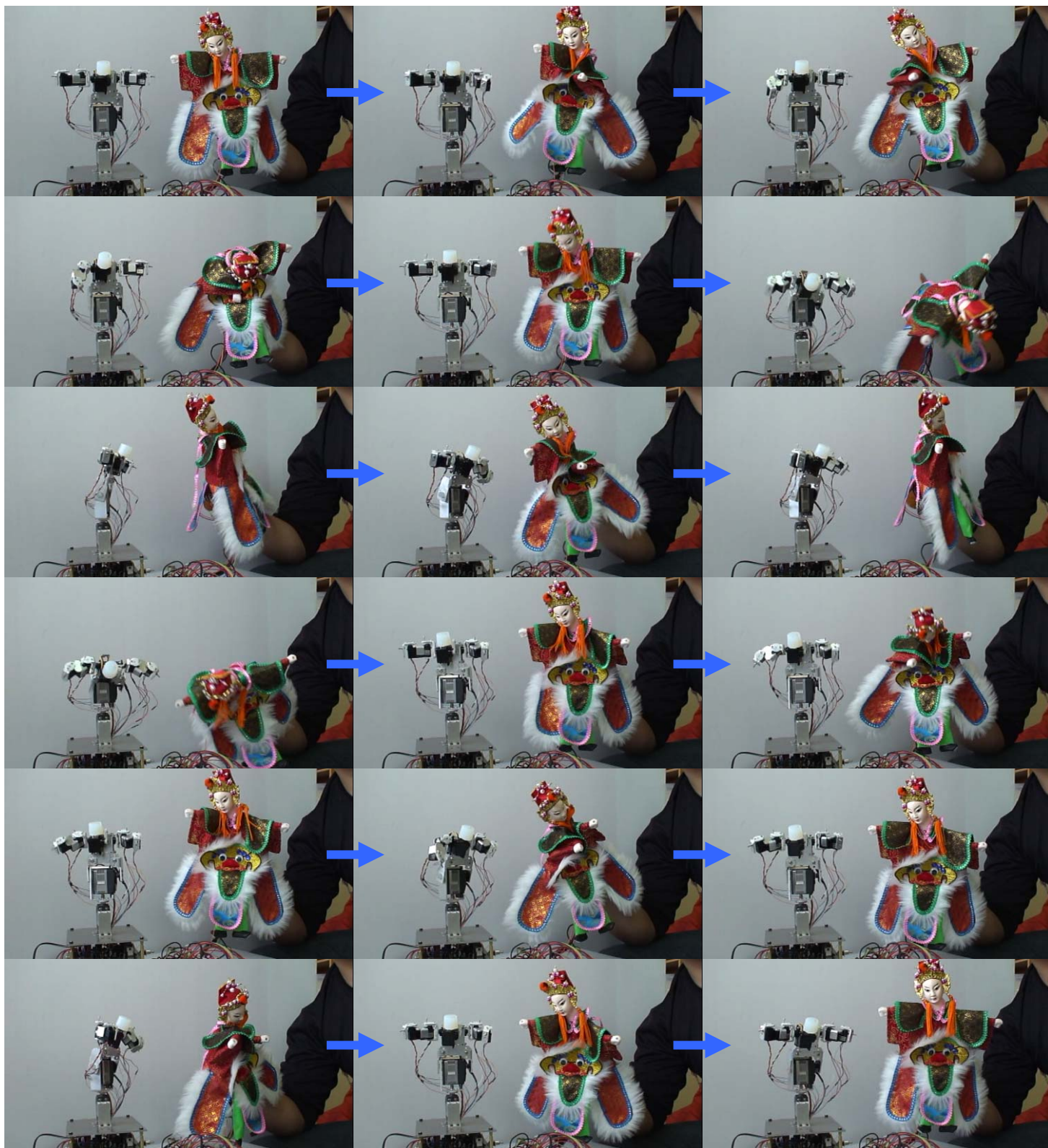


圖 5-21 布袋戲偶與機器人映射-一連串任意動作連續圖

5.3 二輪式自動平衡平台搭載『X-Puppet』

本小節所介紹的是將5.1與5.2的研究成果搭載於二輪式自動平衡移動平台之上，本二輪式移動平台提供了『X-Puppet』的行動與靈活轉身的的能力，使其不受拘束而表現更加靈活，底下分為實體架構、平衡演算法之模擬、行為模式分析以及動態連續圖三個部分。

5.3.1 二輪式自動平衡移動平台搭載『X-Puppet』之實體架構

如同賽格威交通工具，二輪式移動平台為『X-Puppet』的底座與地面接觸，其內部載有馬達、馬達趨動模組、以及陀螺儀和傾斜儀感測器，背面鎖有一塊平衡演算法控制板、兩塊機器人控制模組以及藍芽無線模組，其實體架構如下圖所示：

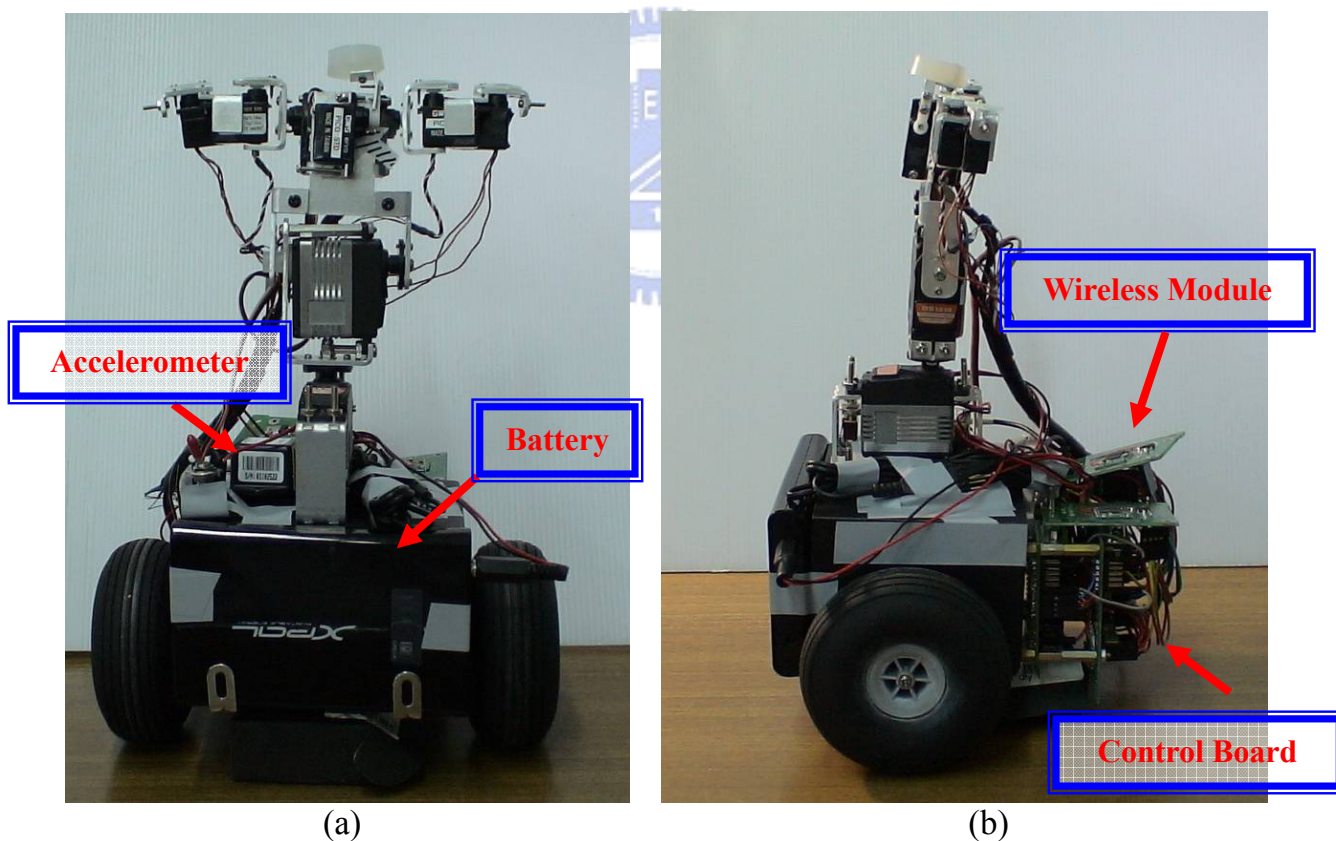


圖 5-22 (a)二輪式平台搭載『X-Puppet』正面圖

(b) 二輪式平台搭載『X-Puppet』側面圖

5.3.2 自動平衡演算法之模擬分析

本小節將針對 4.2 小節所推導出來的平衡演算法做一些數據模擬與參數設計，並針對可能出現在實際情況的硬體受限問題提出解決的辦法，由式(4-10)以及式(4-12)、(4-13) 可得控制指令(Control Command)以及系統方程式如下

$$u = \frac{1}{k_1} \left(\frac{m_\theta}{k_u} \ddot{\theta}_d + \frac{1}{k_u} a_1^T b - \frac{m_\theta}{k_u} k_d (\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - \frac{m_\theta}{k_u} k_p (\theta - \theta_d) \right)$$

$$m_\theta (\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e) = 0, \quad e = \theta - \theta_d \text{ 為誤差角度 (Error signal)}$$

而設計 k_d 和 k_p 可以改變誤差角度的收斂速度，在此先固定 k_p 值，然後改變 k_d 值，並設計角度值 θ_d (Desired angle) 為一脈衝訊號(Impulse)，去看系統的脈衝反應(Impulse Response)得圖 5-23，很容易可以發現，當 k_d 值越小，訊號上升的時間愈短，相對地過度訊號(Overshoot)也會隨著增加，但如果過度地調大 k_d 值確會造成控制指令(Control Command)放大，過大的值在精度有限的微控器裡會超過上限而被截掉，這樣會造成系統不穩定。

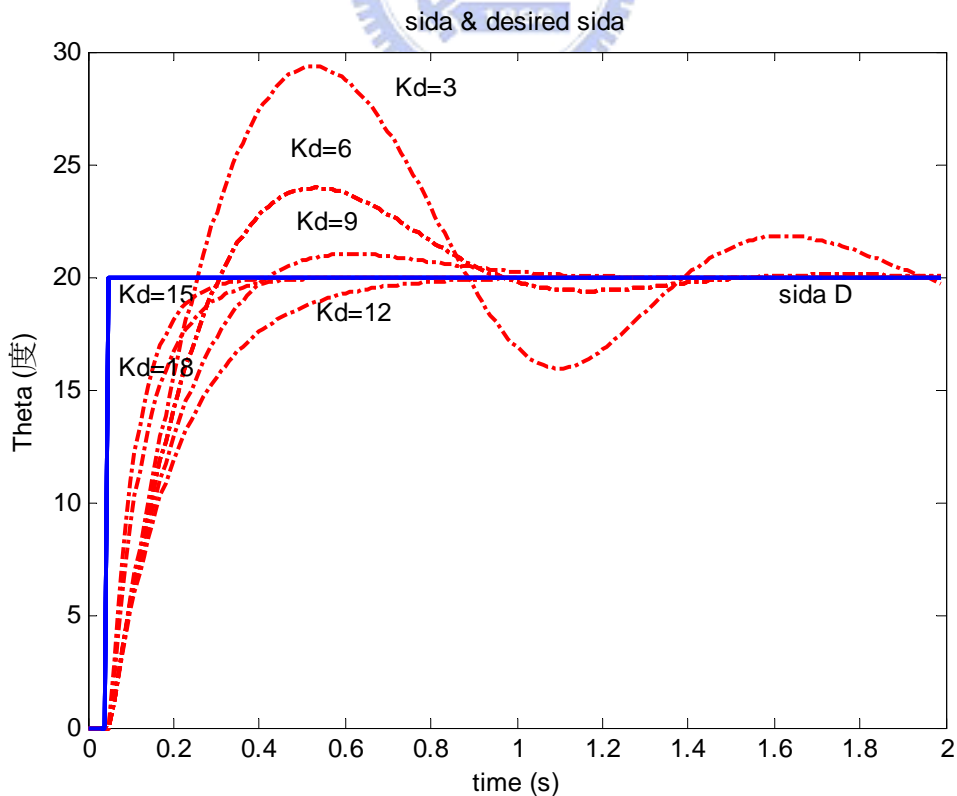


圖 5-23 改變 k_d 值對系統脈衝反應的影響

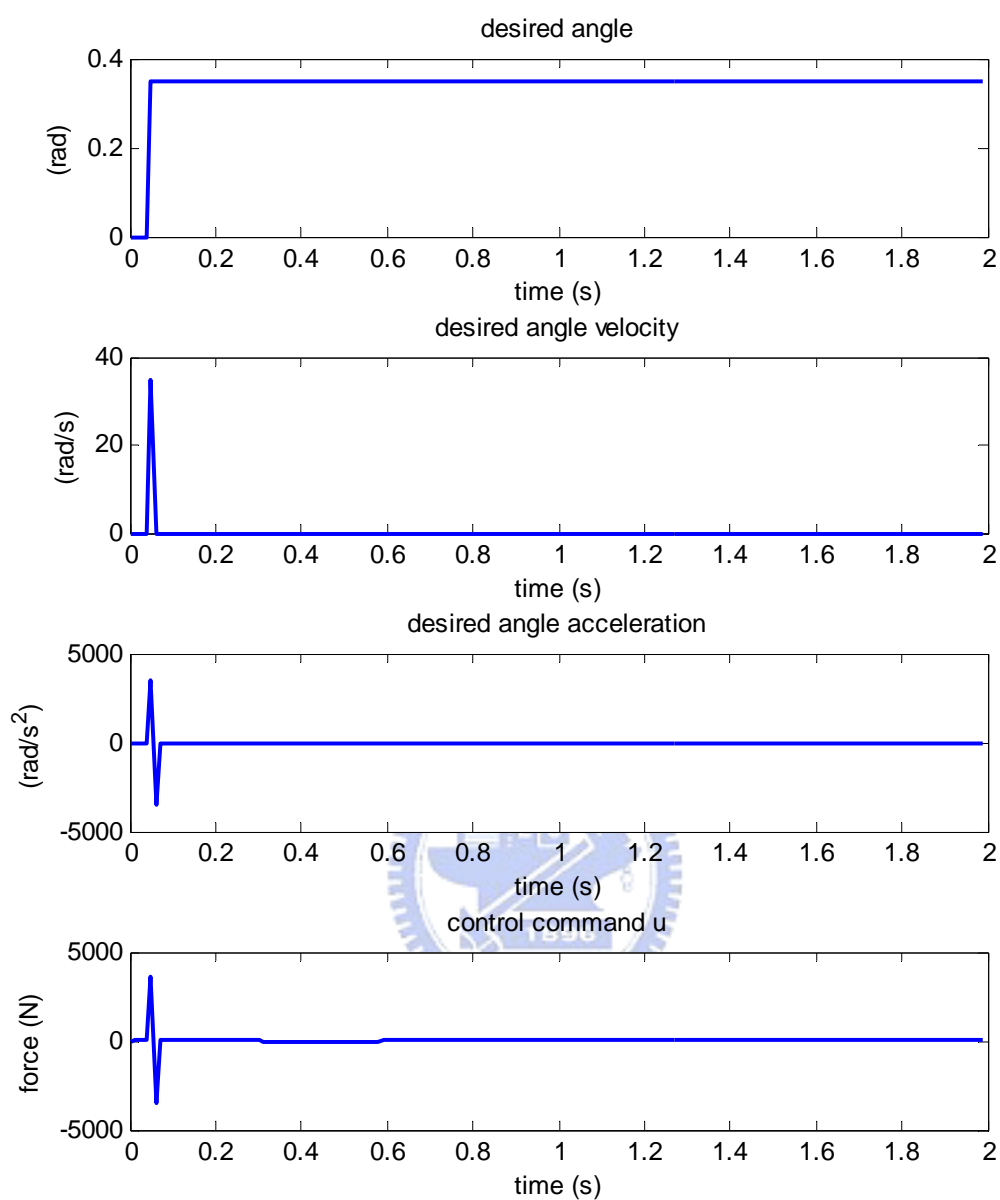


圖 5-24 由上至下依序為設計角度值 θ_d (Desired angle)、
 設計角速度值 $\dot{\theta}_d$ (Desired angle velocity)、
 設計角加速度值 $\ddot{\theta}_d$ (Desired angle acceleration)
 以及控制指令(Control Command)

另外如果要得到好的行為模式，除了要好的設計角度值 θ_d (Desired angle)，還要搭配好的設計角速度值 $\dot{\theta}_d$ (Desired angle velocity)、設計角加速度值 $\ddot{\theta}_d$ (Desired angle acceleration)，但相對地會造成高頻、高增益的控制指令(Control Command) 如圖 5-24 所示，高頻的訊號會受限實際伺服馬達的反應時間 (Response time) 而無法即時產生出所需的轉矩，為了解決這些問題，勢必要犧牲一些效能來換取執行的可能性，我們可以先讓設計角速度值 $\dot{\theta}_d$ 和設計角加速度值 $\ddot{\theta}_d$ 為零，讓控制指令無需去符合高頻的行為，然後設計角度值 θ_d 盡量避免跳躍 (Step) 的情形發生，使其變化幅度不要太快，讓平衡演算法有一小段時間緩衝可以跟上，如圖 5-25、5-26 模擬所示，確實達到延後系統反應的時間來降低控制指令的值，以及避免高頻的訊號產生。

而在 4.2 小節最後也提到，可以利用設計 θ_d 值來讓機器人往前移動，這也可利用模擬結果來說明，如果要設計讓機器人往前移動，直接給予角度值(如圖 5-25、5-26 所示) 可能會讓機器人難以適應突如其來的動量而不平衡，所以必須設計 θ_d 值一開始為反方向較小值(如圖 5-27、5-28 所示)，讓控制指令不至於突然上昇，另外反方向的指令可以讓機器人先製造出一個傾角，接著控制固定住機器人往前移動的傾角，讓平衡演算法為了不讓機器人傾倒一直往前轉動達到移動的效果。

最後要討論不管在平衡或是移動的狀態，如果突然遇到一不可抗外力，或是來自機器人上身部分動作所產生的內部轉矩，整個平衡演算法必須可以將整個系統拉回到平衡的狀態(如圖 5-29 所示)，但卻發現這樣會有一高增益的控制指令，如果遇到這種狀況，可以配合偵測到的訊號，微調 θ_d 值來讓平衡演算法不要產生高增益的控制指令，如圖 5-30 所示。

由模擬情形得到結論，要在有限的硬體能力下同時具有很好的行為效能是不太可能，這之間是一個此消彼長的交換關係(Trade off)，所以依據本作品所需之硬體規格與實際實驗結果，必須選擇一合適的參數值來實現整體的系統。

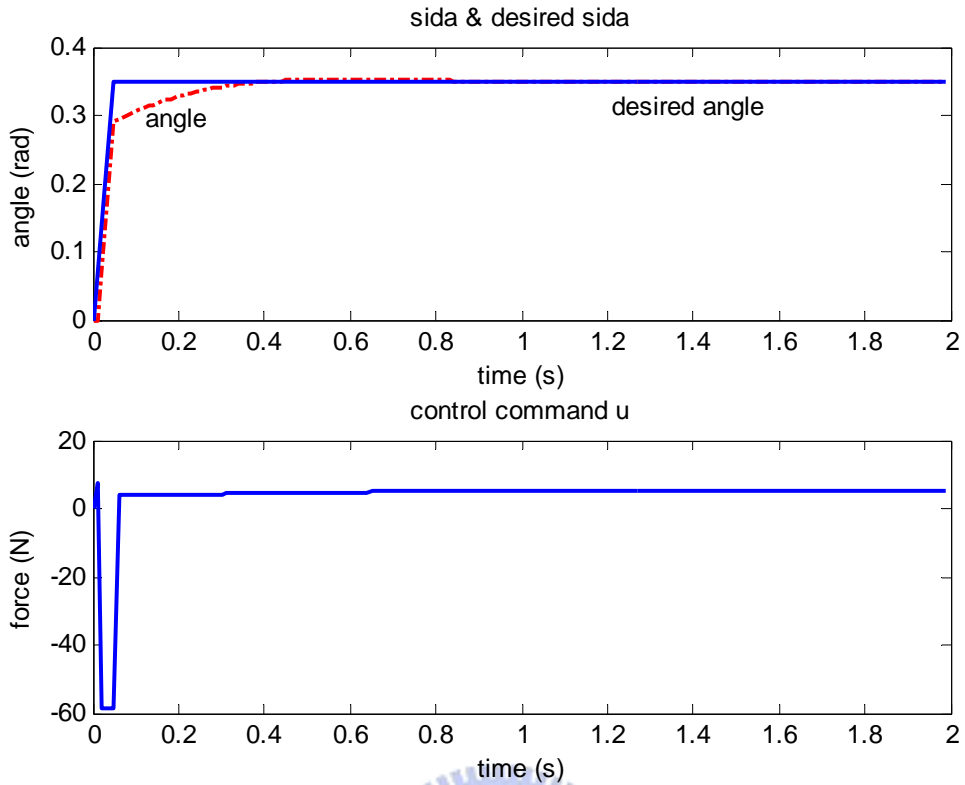


圖 5-25 上圖為配合實際硬體限制所設計之 θ_d 值與系統反應， $k_p=36$ $k_d=9$
 下圖為對應之控制指令

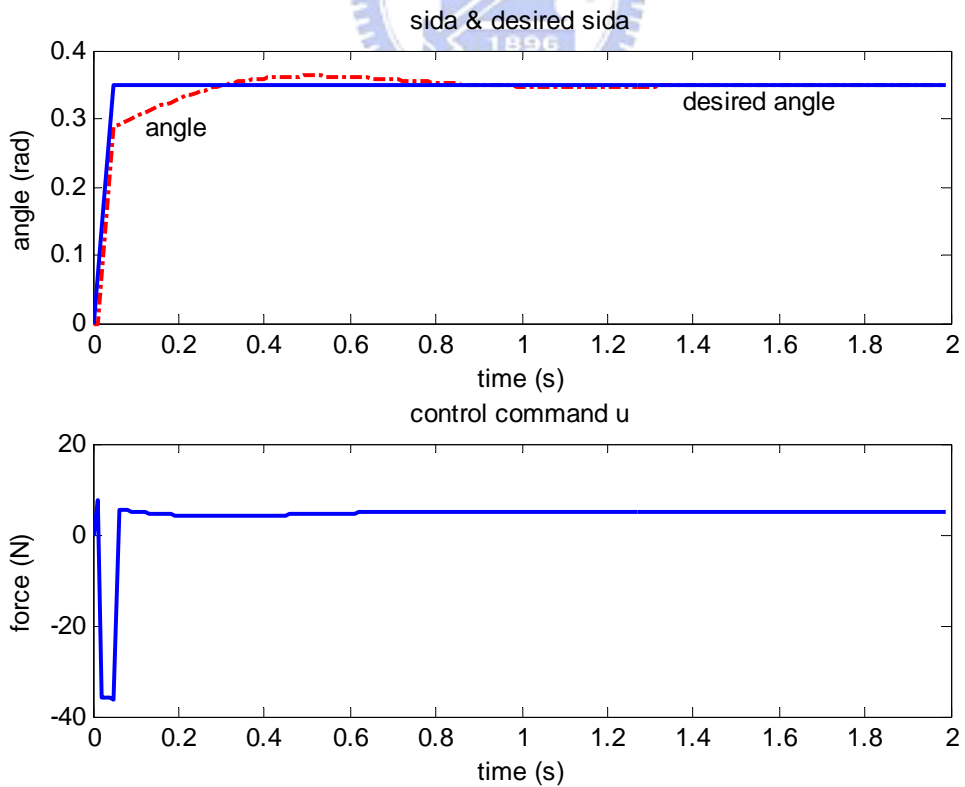


圖 5-26 上圖為配合實際硬體限制所設計之 θ_d 值與系統反應， $k_p=36$ $k_d=6$
 下圖為對應之控制指令

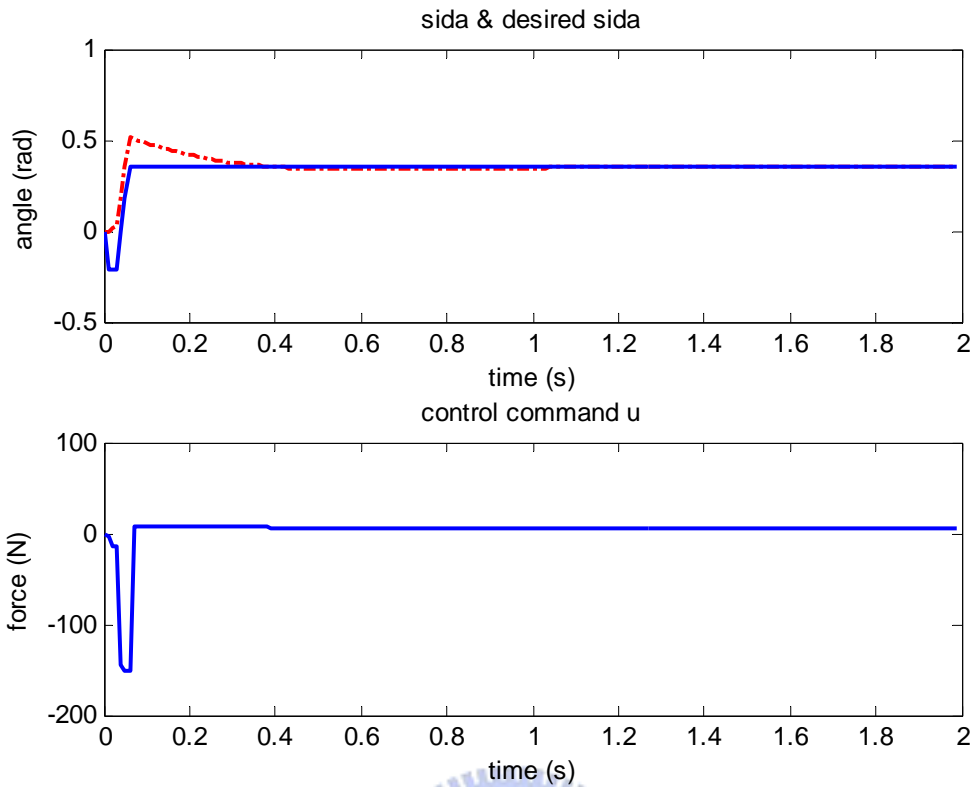


圖 5-27 設計 θ_d 值讓機器人往前移動， $k_p=36$ $k_d=9$

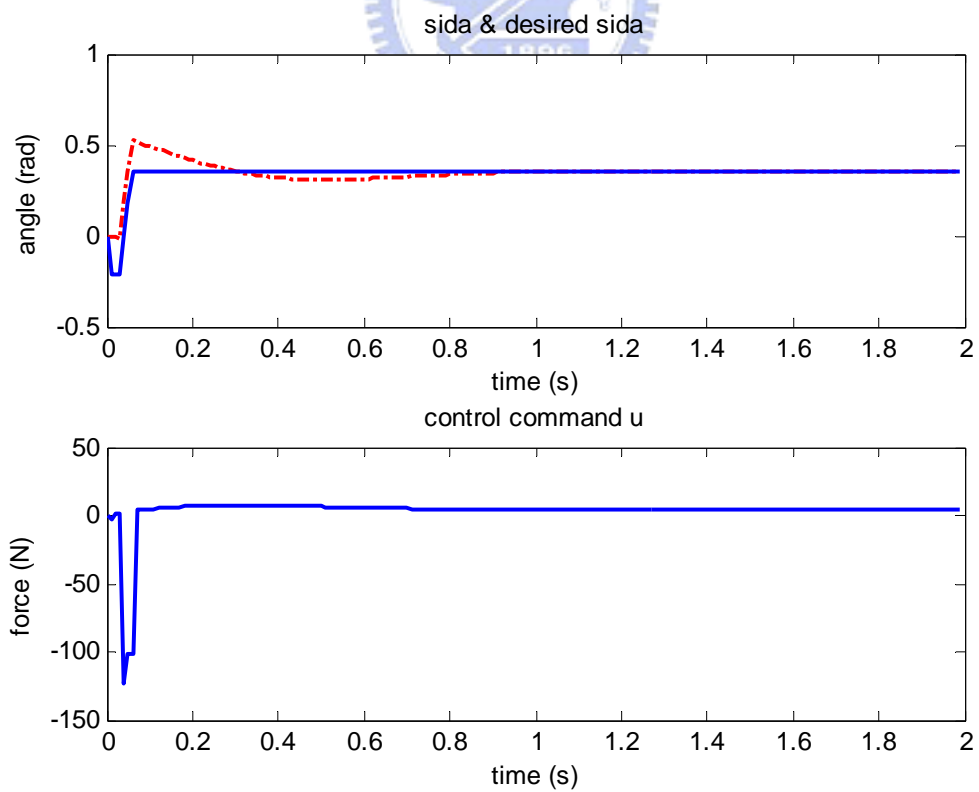


圖 5-28 設計 θ_d 值讓機器人往前移動， $k_p=36$ $k_d=6$

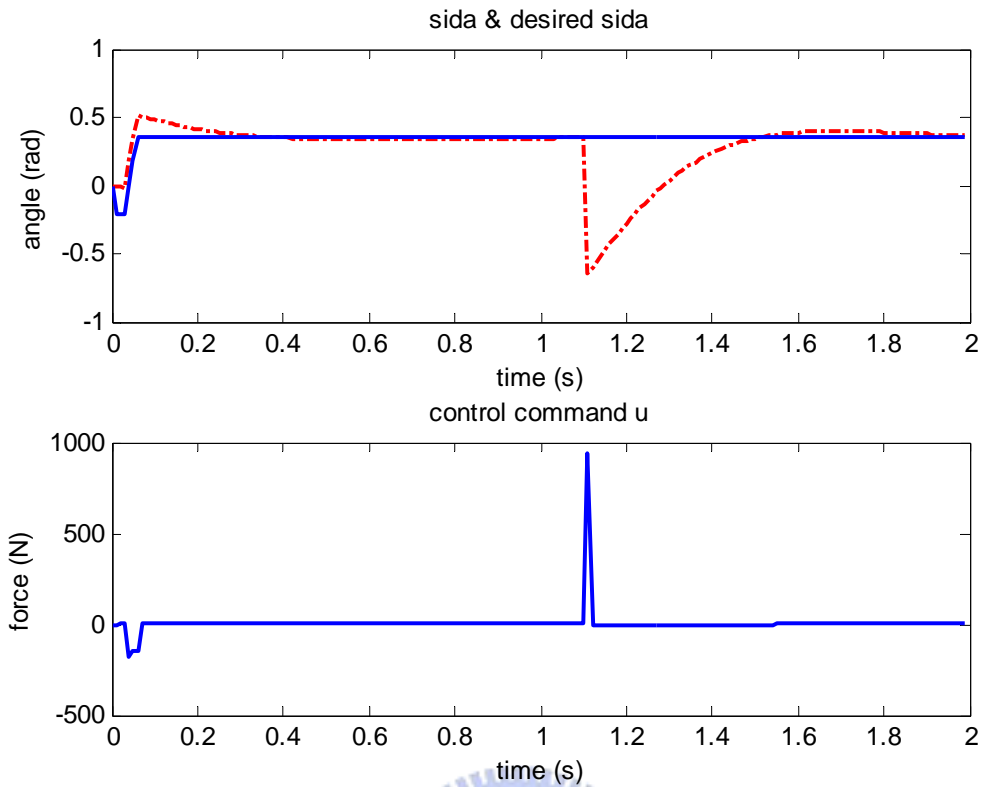


圖 5-29 平衡演算法在遭受突然外力的反應

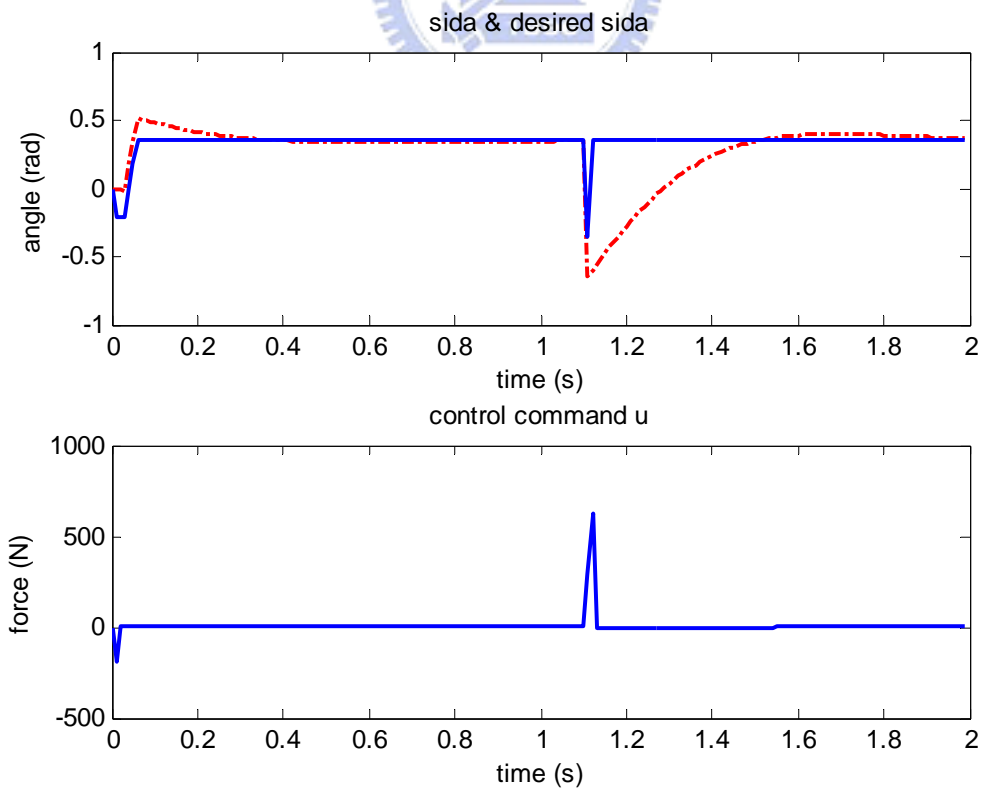


圖 5-30 平衡演算法在遭受突然外力並對 θ_d 值做補償的反應

5.3.3 行為模式之分析

二輪式移動平台除了在靜止情況下要能保持平衡穩定的狀態，也要可以應付外力影響，機器人本身所造成的力矩影響，以下分成幾個狀況討論：

➤ 站立穩態平衡

在站立平衡的情況下，此一底座要能保持平衡，針對外界突然而來的干擾要能做出即時平衡反應，以及能抵抗外界持續受力的干擾。

➤ 轉身平衡

在 4.6 小節所提出的旋轉概念，讓機器人在轉身的同時也要能繼續計算平衡演算法保持平衡的狀態。

➤ 系統穩態之重心補償

在 4.5 小節所提到，此二輪式移動平台要能偵測到上半身機器人的姿態並且計算出角度補償使系統保持平衡。

➤ 移動能力

在 4.2 小節所提到，經由設計 θ_d ，可以讓系統具有移動能力並且同時保持平衡狀態。

➤ 在機器人有行為模式下保持平衡穩定狀態

利用平衡演算法以及機器人模型推導，此平台要能估測出機器人的行為模式並計算出所產生的力量及力矩，同時利用底座的移動來抵消影響。

➤ 結合數位手套控制機器人的情況下同時保持平衡穩定狀態

最終，要能利用數位手套直接控制機器人做任意的操偶動作，而底座依舊要能保持平衡穩定不傾倒的狀態。

5.3.4 即時實驗之連續圖

本一小節以實驗結果來驗證此系統在 5.3.3 小節中的行為模式皆為可行，以下為實驗結果連續圖，包括靜止平衡、慢速轉身、快速轉身、穩態系統重心補償、移動、機器人動作同時保持平衡、數位手套控制機器人同時保持平衡、數位手套控制機器人同時移動並保持平衡，而以下所有連續圖順序皆為由左到右，由上到下。

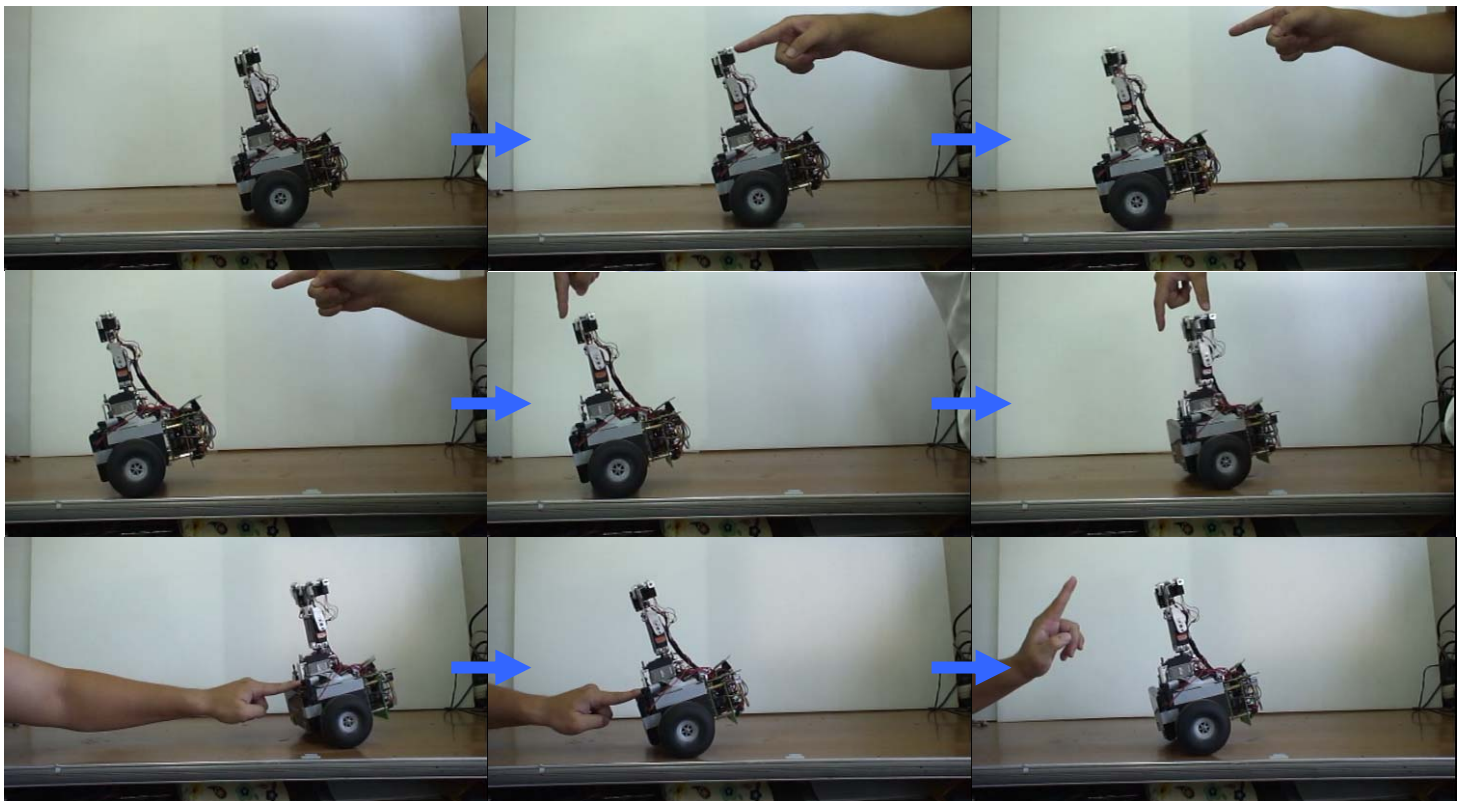


圖 5-31 靜止平衡與受外力干擾連續圖

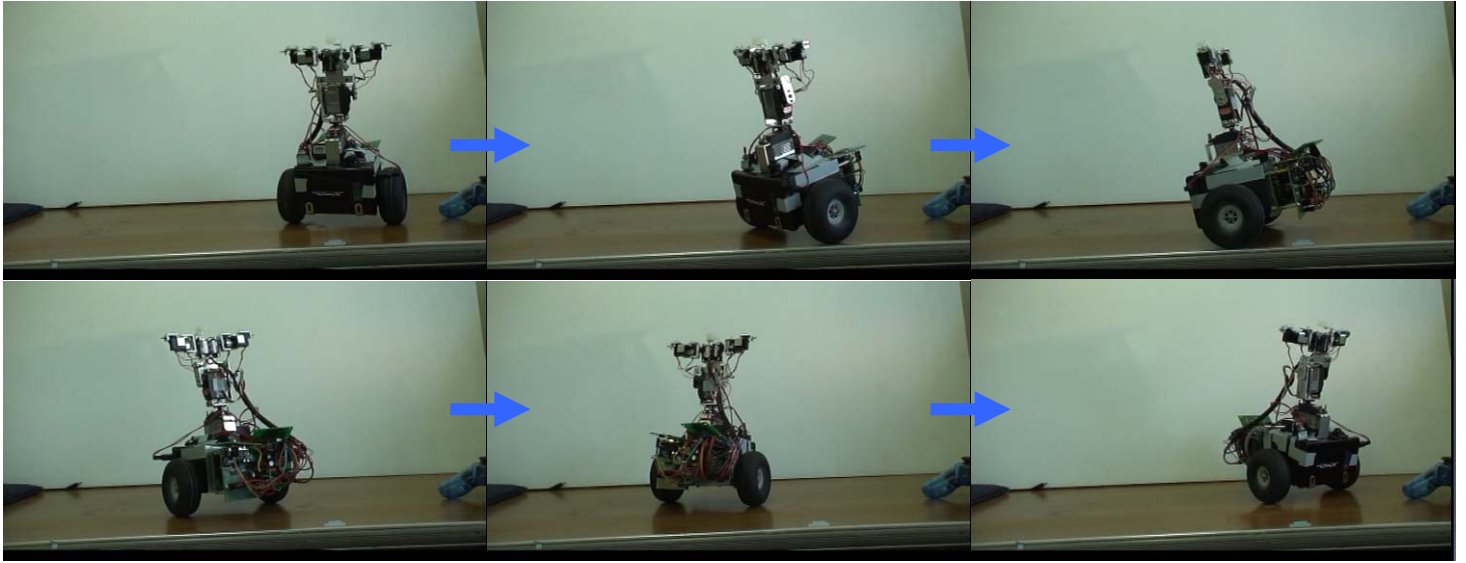


圖 5-32 慢速轉身連續圖

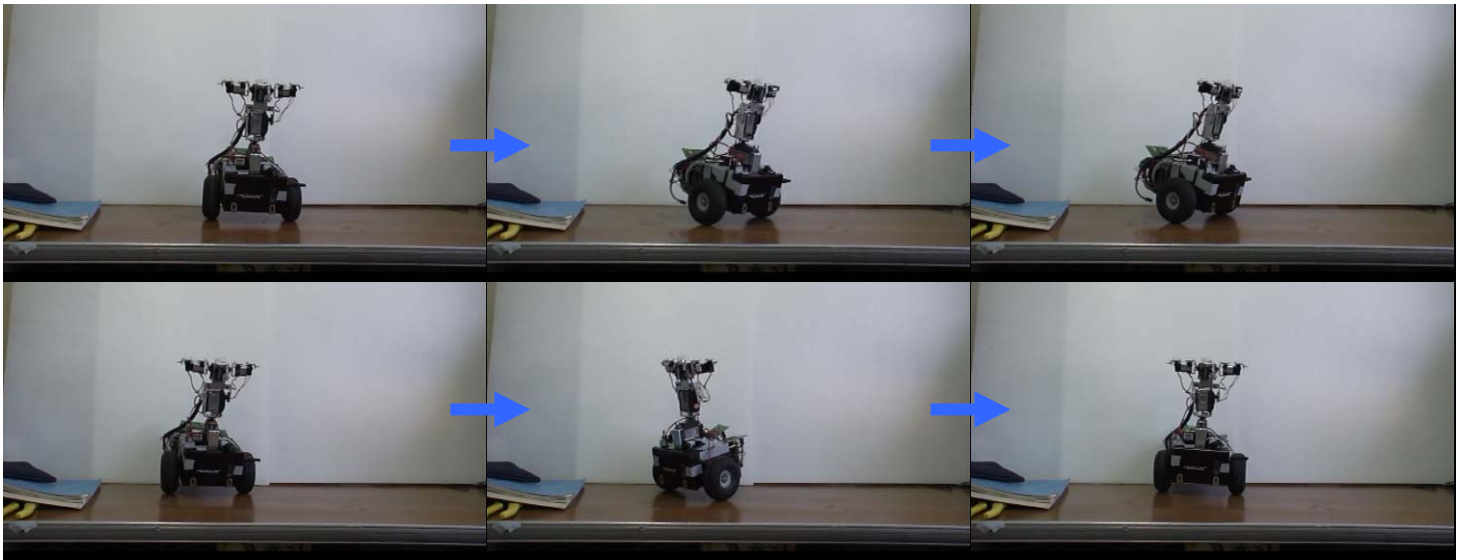


圖 5-33 快速轉身連續圖

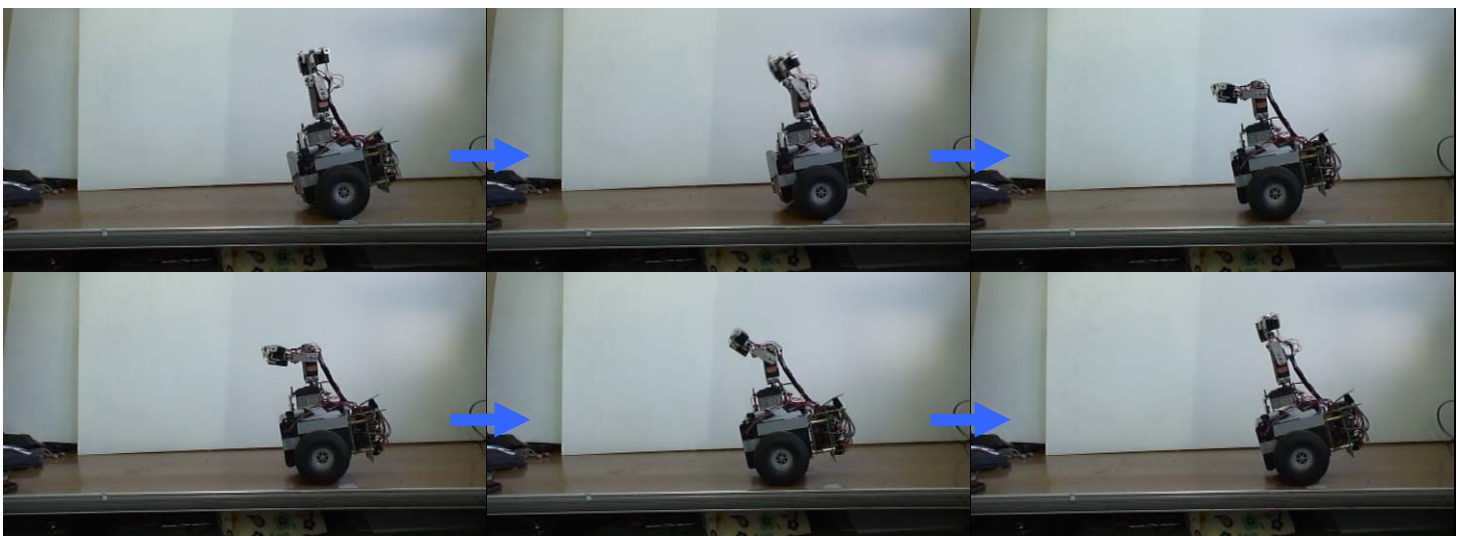


圖 5-34 穩態系統之重心補償連續圖

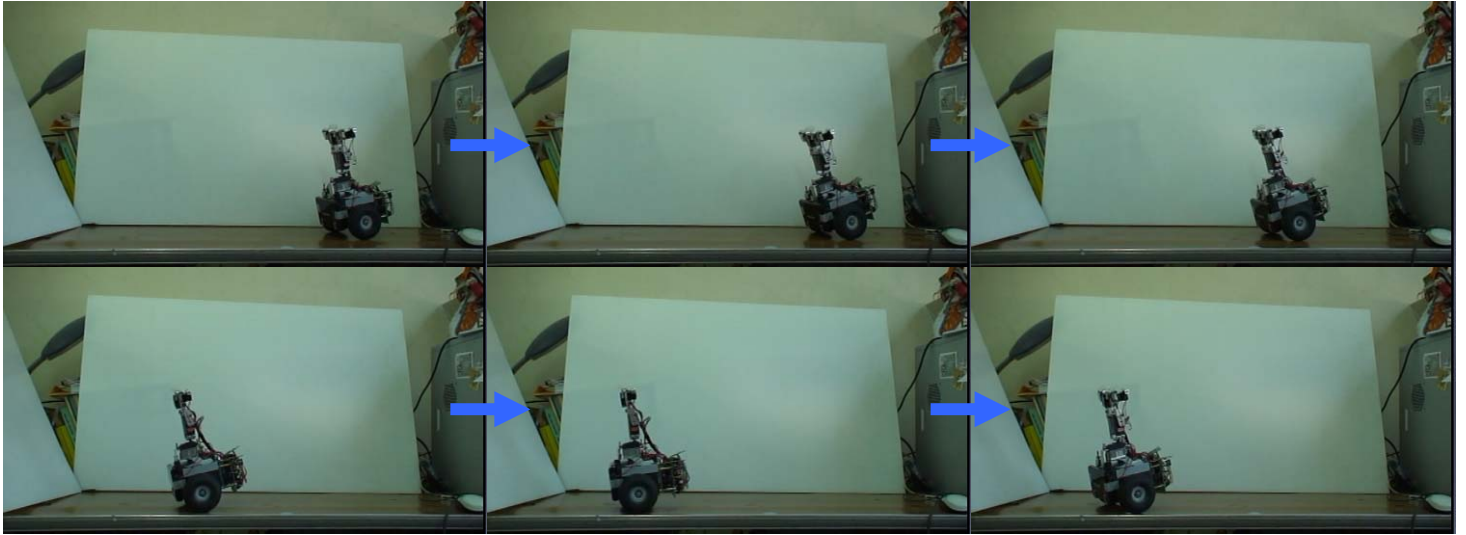


圖 5-35 向前移動連續圖

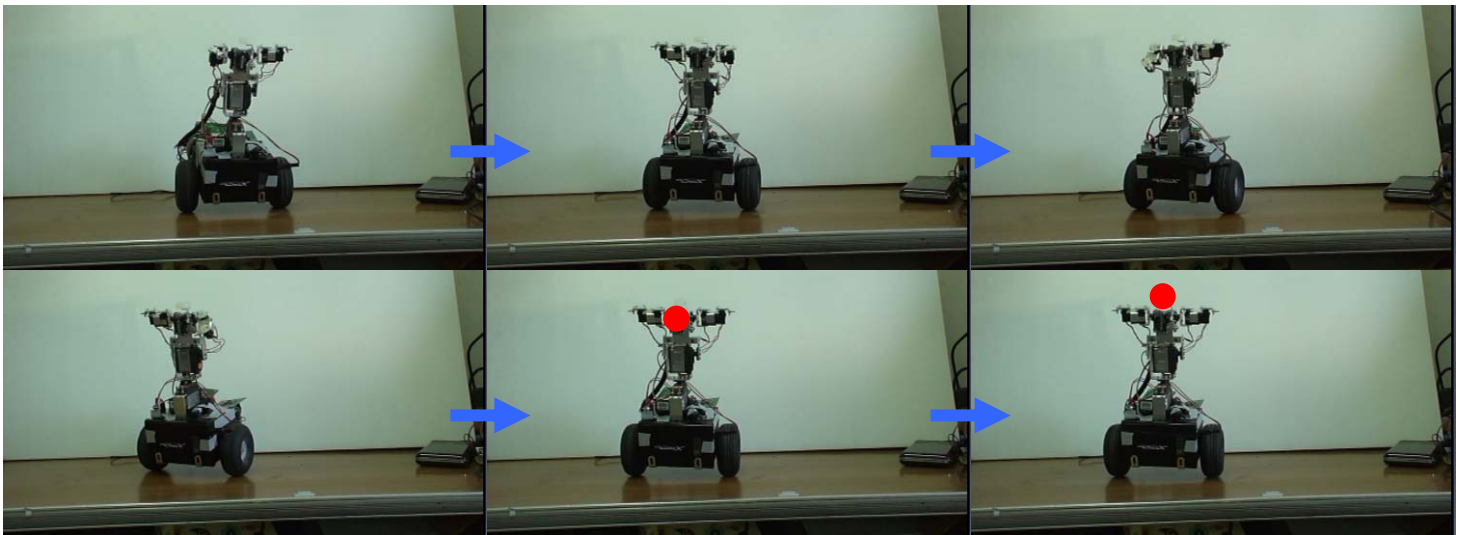


圖 5-36 在機器人動作同時保持平衡連續圖

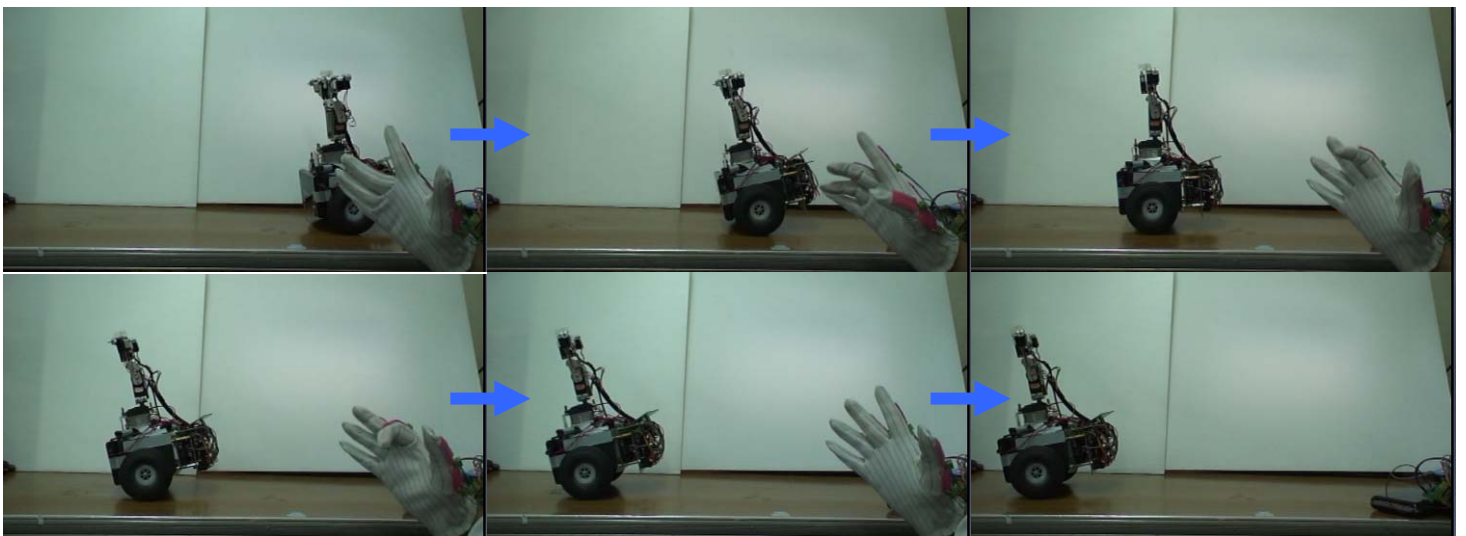


圖 5-37 用數位手套控制機器人同時保持平衡與移動連續圖

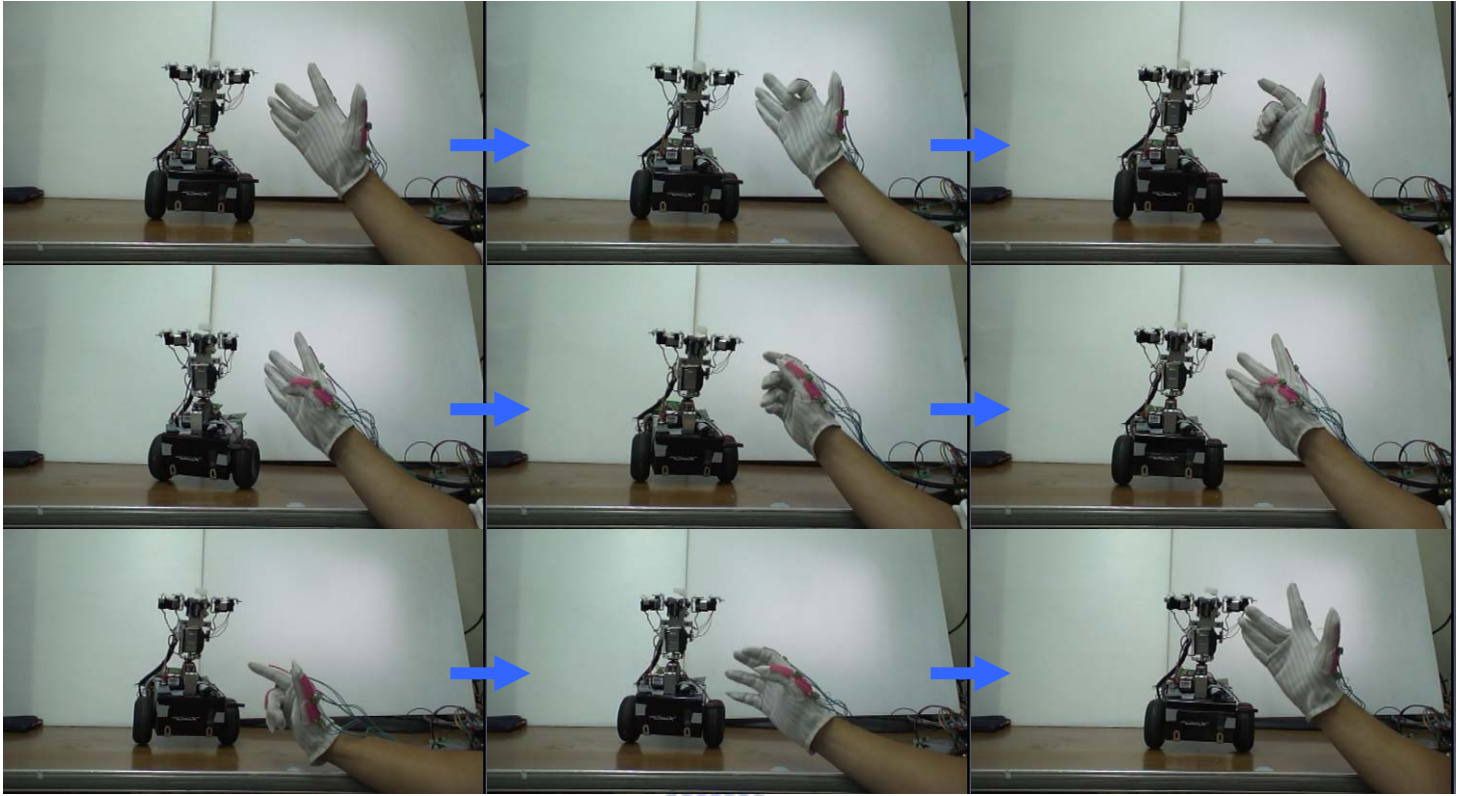


圖 5-38 用數位手套控制機器人同時保持平衡連續圖



第六章 結論

6.1 研究成果

本論文針對布袋戲偶機器人的行為模式與移動方式提供了一個完整配套的控制方法，實現了包括數位手套抓取手部姿態並透過映射函數計算出對應到機器人行為，布袋戲偶人形機器人的設計，二輪式自動平衡移動平台讓機器人擁有更多維的運動空間以及靈活的動作，透過數學模型的簡化與使用低價的感測器和微控制器實現整個系統，也了解到二輪式移動平台的模型推導與硬體實現方法，這意味著目前高價位的賽格威在未來有可能可以透過技術的進步來壓低價格，在普及與推廣上更具競爭力，讓更多人認識這項有趣的交通工具。另外我們也積極參與各種展示場合，一方面展示我們實驗室的研究成果，另一方面也介紹布袋戲這項傳統的藝術文化。

6.2 未來展望

在各個展覽場合中，我們發現布袋戲機器人吸引的不止是布袋戲迷的目光，即使是完全不了解布袋戲的小朋友，也會被戲偶本身的鮮豔色彩所吸引，進而對這個作品產生好奇以及興趣，加上目前機器人玩具的流行，讓小朋友們更能接受我們的作品並保持較長的興趣與注意力，甚至願意花時間來了解布袋戲是什麼；另外，也有傳統的布袋戲劇團在網路上看到我們的作品，進而主動前來詢問此一機器人產品化的意願，主要的原因是因為操偶師傅已年長而不方便長時間演出，加上年輕族群外出，不願繼承演出事業，因此希望可以藉由機器人自動演出的方式來減輕老師傅的負擔；其實這些都是我們一開始期盼的發展，不過現階段機器人的呈現與實際師傅操偶表演上還是存在著些許的落差，需要進一步的動作微調，在未來，我們希望可以藉著與真正的戲團合作，將師傅實際的操偶動作記錄下來並加入我們訓練模型中，另外也要增加移動平台與機器人控制的穩定度，如此一來，讓系統完整並真實地呈現台灣傳統文化布袋戲之美的一天指日可待！

附錄

I. $\mathbf{x}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b})$ 為 $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$ 的最小平方誤差解之證明

Let $\mathbf{x}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b})$

$$\begin{aligned}\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2 &= \|\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + \mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}\|^2 \\ &= (\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + (\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}))^T (\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + (\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b})) \\ &= \|\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)\|^2 + \|\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}\|^2 + 2[\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)]^T (\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b})\end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}& [\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)]^T (\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}) \\ &= (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{A}^T [\mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T - \mathbf{I}] \mathbf{b} \\ &= (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T [\mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T - \mathbf{A}^T] \mathbf{b} \\ &= (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T [\mathbf{A}^T - \mathbf{A}^T] \mathbf{b} \\ &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2 = \|\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)\|^2 + \|\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}\|^2$$

If $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^* \Rightarrow \|\mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)\|^2 > \mathbf{0}$ because $\text{rank } \mathbf{A} = n$

So $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2 > \|\mathbf{Ax}^* - \mathbf{b}\|^2$

$\Rightarrow \mathbf{x}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b})$ is minimize of $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2$

II. 遞迴最小平方方法的推導

$$x = (A^T A)^{-1} A^T u$$

$$\text{define } P(k) = [A^T(k)A(k)]^{-1} \text{ and } A(k+1) = \begin{bmatrix} A(k) \\ a^T(k+1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{then } P^{-1}(k+1) &= A^T(k+1)A(k+1) \\ &= A^T(k)A(k) + a(k+1)a^T(k+1) \\ &= P^{-1}(k) + a(k+1)a^T(k+1) \\ &= P^{-1}(k) + a(k+1) * I * a^T(k+1) \quad I \text{ is } 1 \times 1 \text{ identity matrix} \end{aligned}$$

$$\therefore (A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (\text{prove latter})$$

$$\begin{aligned} &= P(k) - P(k)a(k+1)[I + a^T(k+1)P(k)a(k+1)]^{-1}a^T(k+1)P(k) \\ &= P(k) - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)P(k)}{I + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [A^T(k+1)A(k+1)]^{-1}A^T(k+1)u(k+1) \\ &= P(k+1)A^T(k+1)u(k+1) \\ &= P(k+1)[A^T(k)u(k) + a(k+1)u^T(k+1)] \\ &= (P(k) - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)P(k)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)}) \times [A^T(k)u(k) + a(k+1)u^T(k+1)] \\ &= x(k) - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)x(k)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)P(k)a(k+1)u^T(k+1)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} \\ &\quad + P(k)a(k+1)u^T(k+1) \\ &= x(k) - \frac{P(k)a(k+1)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} * \\ &\quad [a^T(k+1)x(k) - (1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1))u^T(k+1) + a^T(k+1)P(k)a(k+1)u^T(k+1)] \end{aligned}$$

$$= x(k) + \frac{P(k)a(k+1)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} [u^T(k+1) - a^T(k+1)x(k)]$$

$$\text{and } P^{-1}(k+1) = P(k) - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)P(k)}{I + a^T(k+1)P(k)a(k+1)}$$

And continuing

$$\begin{aligned}(\mathbf{A} + \mathbf{BCD})^{-1} &= \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{DA}^{-1} \\ \Rightarrow (\mathbf{A} + \mathbf{BCD})(\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{DA}^{-1}) \\ &= \mathbf{I} - \mathbf{B}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{DA}^{-1} + \mathbf{BCDA}^{-1} - \mathbf{BCDA}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{DA}^{-1} \\ &= \mathbf{I} - [\mathbf{B} - \mathbf{BC}(\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B}) + \mathbf{BCDA}^{-1}\mathbf{B}](\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{DA}^{-1} \\ &= \mathbf{I}\end{aligned}$$



III. 機械手掌參考資料

Human hand

	<ul style="list-style-type: none"> ● Flexion: DIP $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ PIP $0^{\circ}\sim 110^{\circ}$ MCP $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ $\theta_{DIP} = \frac{2}{3} \theta_{PIP}$ ● Abduction/adduction at the MCP joint: Maximum $-15^{\circ}\sim +15^{\circ}$ Zero for middle and the thumb ● Abduction/adduction at the thumb: CMC joint ● Average force at the finger: 15N ● Frequency response of human hand: 5.5Hz
--	--

DLR Hand II

	<ul style="list-style-type: none"> ● 1 thumb and 3 fingers ● 13 DOF ● built-in actuators ● tip force: 30N
--	---

Anthrobot 2


	<ul style="list-style-type: none"> ● 1 thumb and 4 fingers ● 20 DOF (16 controllable) ● wire-driven (two for each joint) ● tip force (finger): 2.2lbs ● tip force (thumb): 6.3lbs ● finger joint bandwidth: 3Hz
--	---

Robot Hand


using Ultrasonic Motors and Elastic Elements

	<ul style="list-style-type: none"> ● 1 thumb and 4 fingers ● 20 DOF ● built-in actuators ● tip force (finger): 5N ● tip force (thumb): 10N ● finger joint bandwidth: 10Hz
--	---

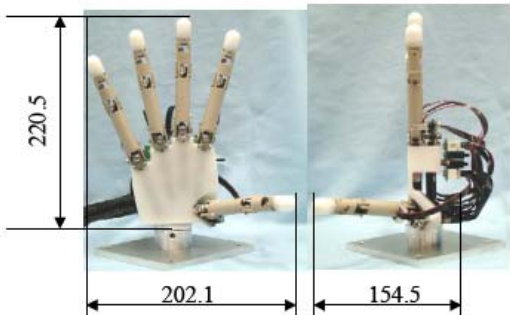
Shadow Hand

	<ul style="list-style-type: none"> ● 1 thumb and four fingers ● 21 DOF ● wire-driven by air muscle ● joint torque(thumb): 0.47 Nm avg. ● joint torque(finger): 0.31 Nm avg. ● finger joint bandwidth: 4Hz approx
---	--

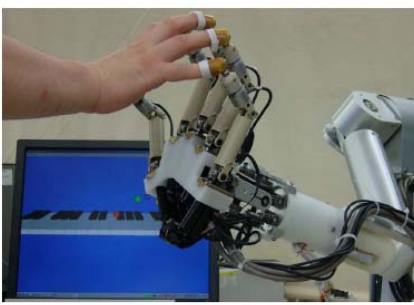
Gifu Hand II

	<ul style="list-style-type: none"> ● Fingers:5 ● DOF:16 ● Numbers of actuators:20 ● Actuation type: DC micromotors ● Transmission: Gears, links ● Output torque: First joint 3.46N Second joint 3.46N ● Maximum force at fingertip: 4.9N ● Bandwidth: 8.6Hz
---	---

KH Hand Type S

 <p style="text-align: center;">Fig. 1: KH Hand type S</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Fingers:5 ● DOF:15 ● Numbers of actuators:20 ● Actuation type: DC micromotors ● Transmission: Gears, links ● Maximum force at fingertip: 0.86N ● Bandwidth: more than 15Hz
---	--

HIRO II+

	<ul style="list-style-type: none"> ● Fingers:5 ● DOF:15 ● Numbers of actuators:15 ● Actuation type: DC micromotors ● Transmission: Gears, links ● Maximum output torques(Nm):(1st, 2nd, 3rd) 0.96, 0.52, 0.2 ● Fingertip velocities(m/s):(1st, 2nd, 3rd) 0.34, 0.64, 0.68
---	--

IV. 『X-Puppet』 元件設計圖

『X-Puppet』的元件表如表 1，各零件規格如下列圖表

出圖編號	元件註釋	數量
1	頭部馬達固定元件	2
2	肘關節馬達固定元件	2
3	手部馬達固定夾(左手)	1
4	手部馬達固定夾(右手)	1
5	肩膀馬達固定元件	1
6	身體背板	1
7	腰部馬達連接板(轉軸面)	1
8	腰部馬達連接板(非轉軸面)	1
9	腰部馬達固定元件	1
10	底部馬達固定元件	2
11	藏線座	1

表 1. 出圖元件表

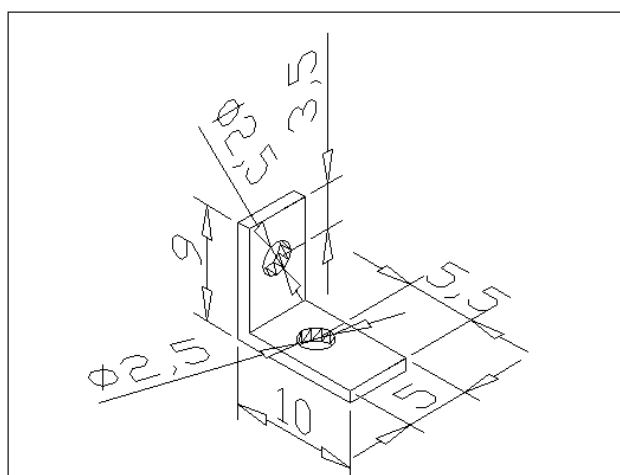


圖 1 頭部馬達固定元件

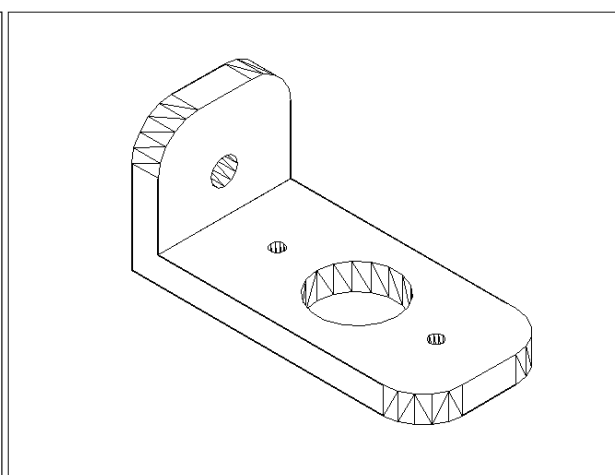


圖 2 肘關節馬達固定元件

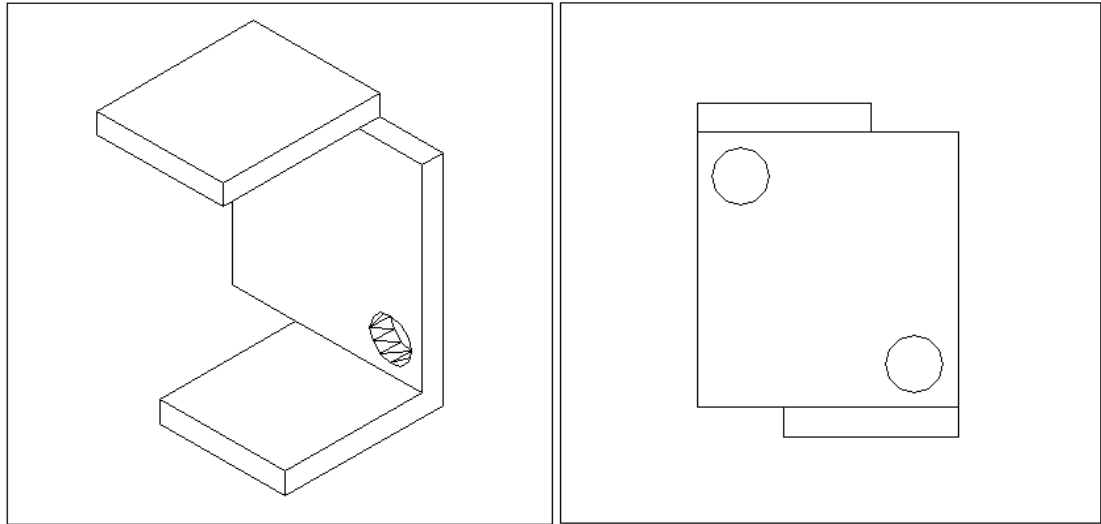


圖 3 手部馬達固定夾(左手)

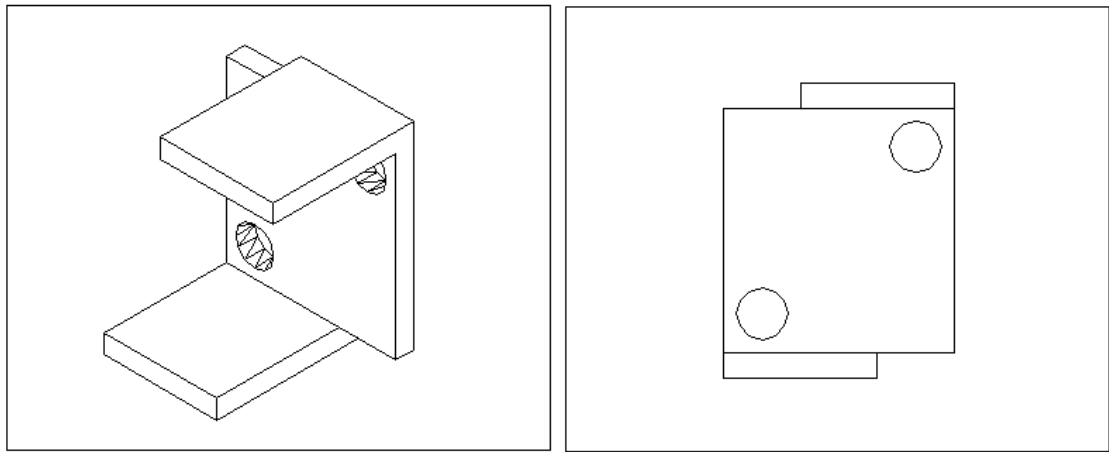


圖 4 手部馬達固定夾(右手)

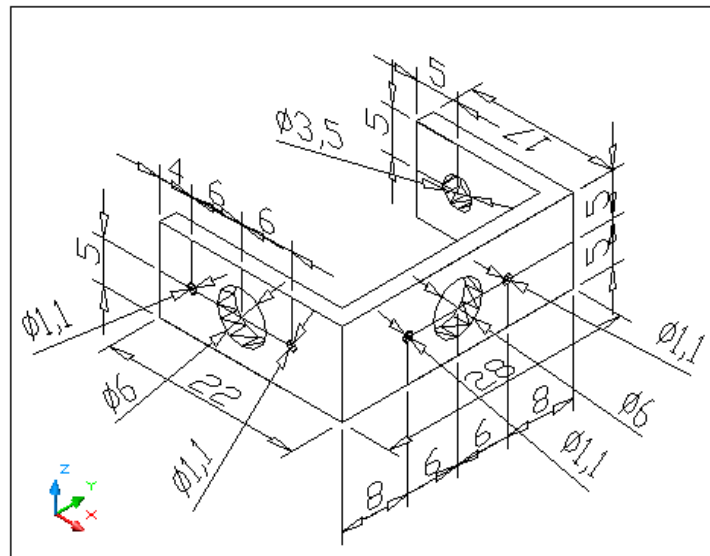


圖 5 肩膀馬達固定元件

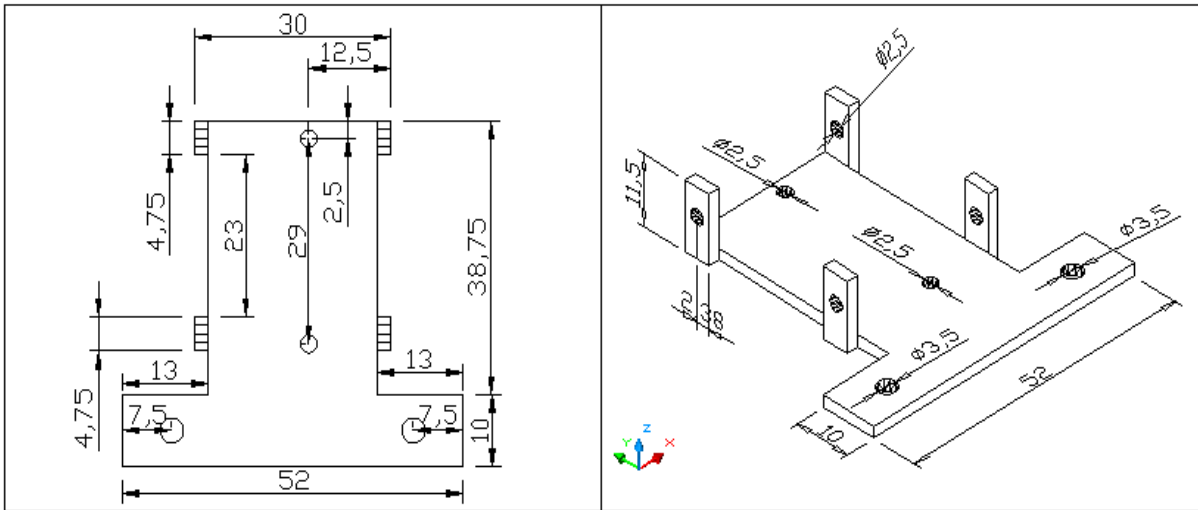


圖 6 身體背板

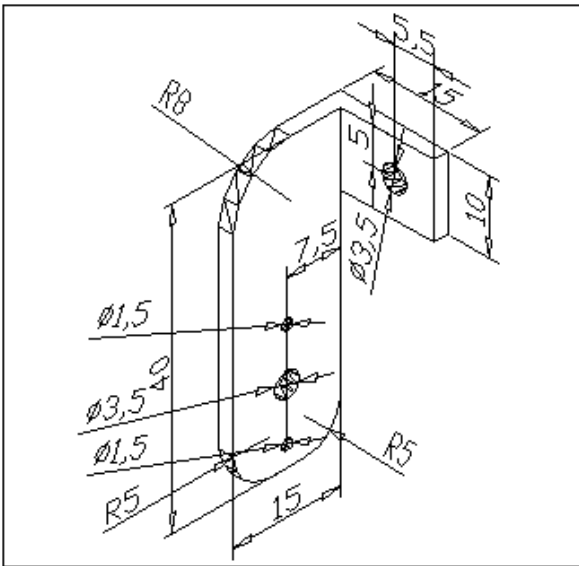


圖 7 腰部馬達連接板(轉軸面)

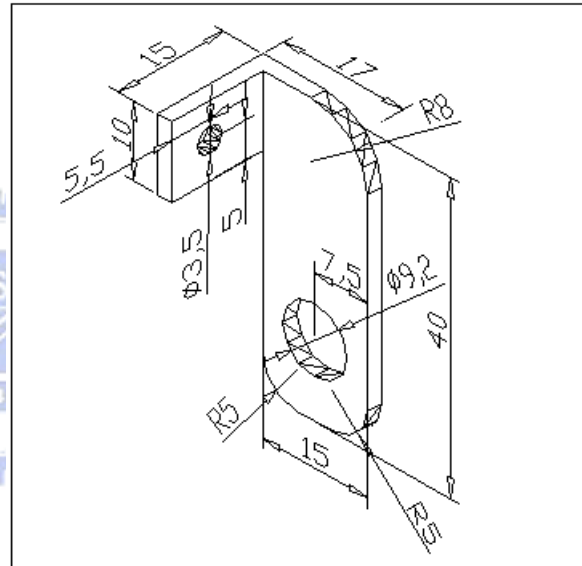


圖 8 腰部馬達連接板(非轉軸面)

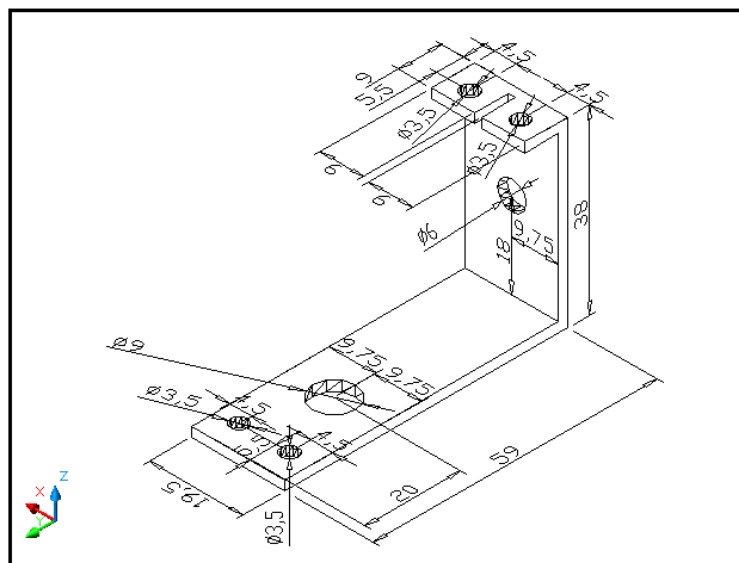


圖 9 腰部馬達固定元件

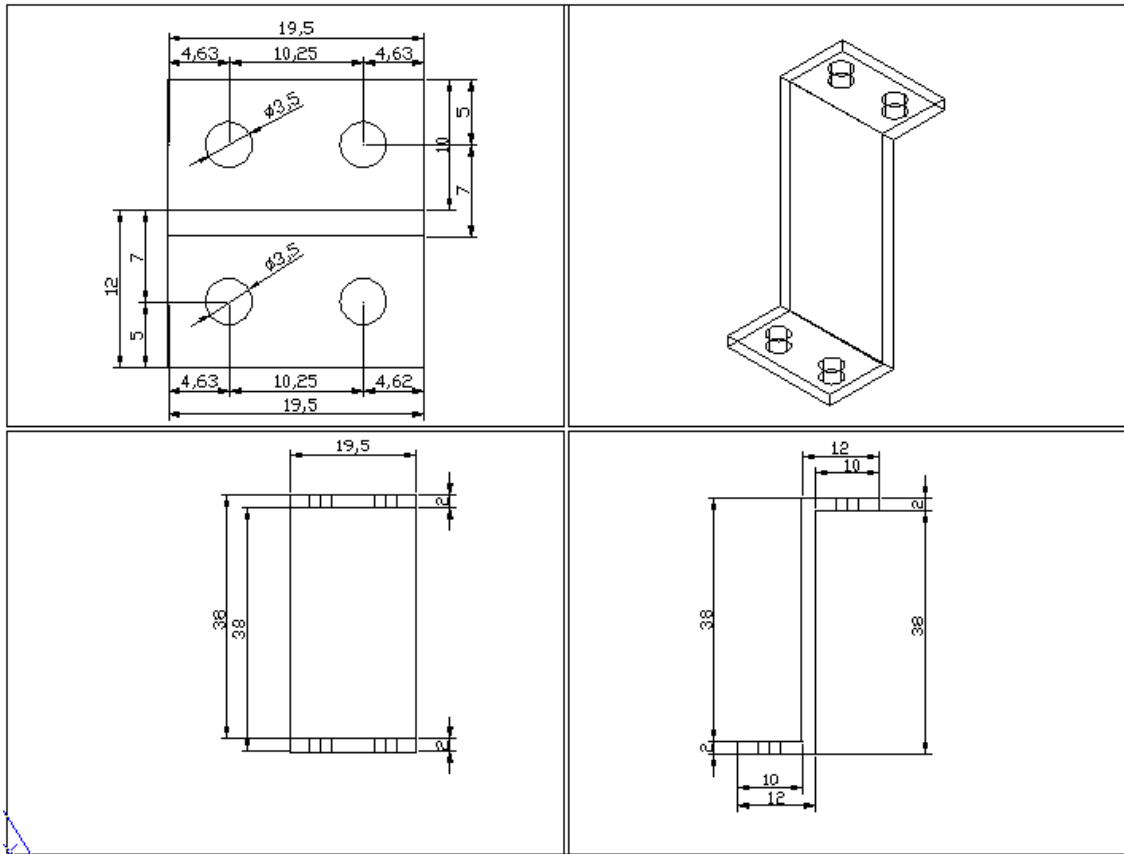


圖 10 底部馬達固定元件

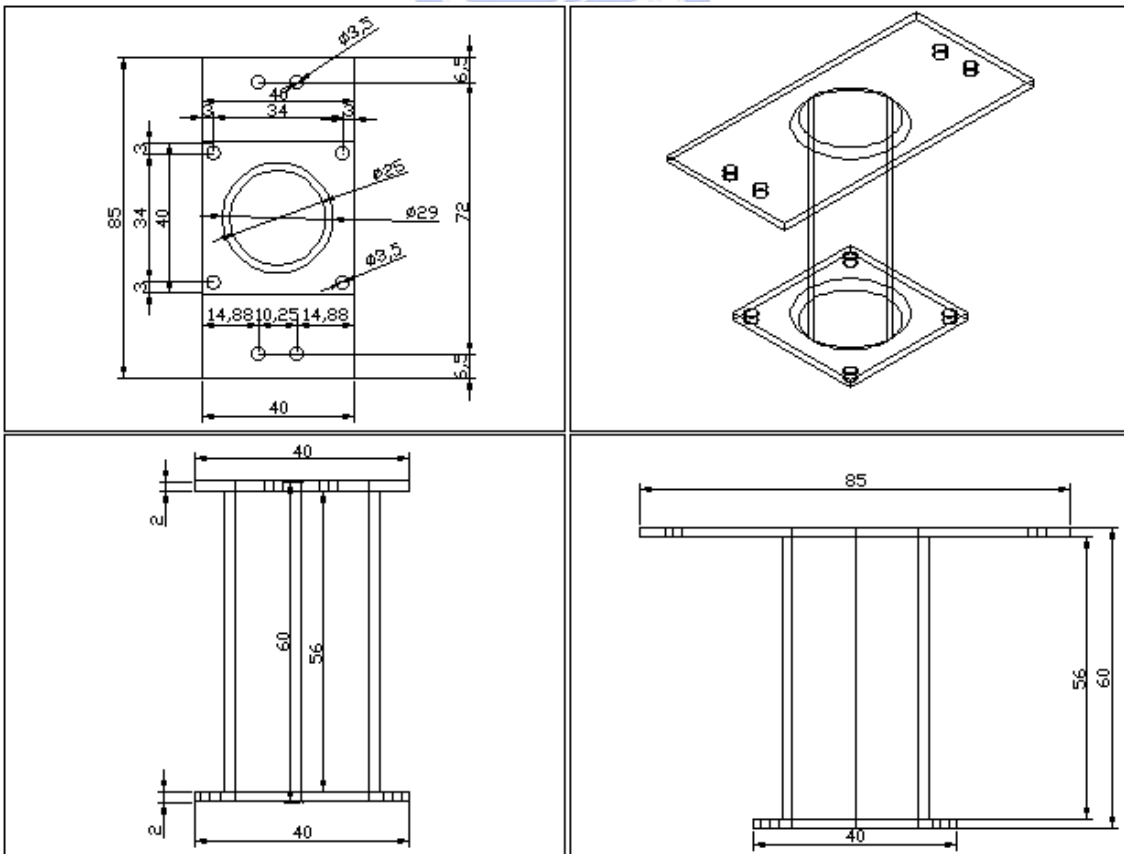


圖 11 藏線座

Reference:

- [1] J. Lee and T.L. Knuii, Model-based analysis of hand posture. IEEE Computer Graphics Application (1995), pp. 77–86.
- [2] M. Fischer, P. Van der Smagt and G. Hirzinger, Learning techniques in a dataglove based telemanipulation system for the DLR Hand, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998.
- [3] Cheng-Chang Lien and Chung-Lin Huang, Model-based articulated hand motion tracking for gesture recognition. Image and Vision Computing 16 (1998) 121-134
- [4] Makoto Kato, Yen-Wei Chen and Gang Xu, Articulated Hand Motion Tracking Using ICA-based Motion Analysis and Particle Filtering. JOURNAL OF MULTIMEDIA, VOL. 1, NO. 3, JUNE 2006
- [5] Lam, W., Zou, F., Komura, T.: Motion editing with data glove. In: Proceedings of the SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, pp. 337–342. ACM, New York (2005)
- [6] 張德仁,「3D 虛擬角色於傳統戲偶演出形式應用之研究創作」,國立交通大學應用藝術研究所,碩士論文,民國 94 年
- [7] 鄧逸仁,「以資料手套控制虛擬人偶之動作」,國立中興大學機械工程研究所,碩士論文,民國 92 年
- [8] 謝中憲,「台灣布袋戲發展之研究」,國立嘉義大學史地學系碩士班,碩士論文,民國 95 年
- [9] Jwu-Sheng Hu, Jyun-Ji Wang, and Guan-Qun Sun, 2008, “The Glove Puppet Robot: X-puppet,” IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '08), September, 22-26, 2008, Nice, France.
- [10] T. S. Huang and V. I. PavloviC. Hand gesture modeling, analysis, and synthesis. Int. Workshop on Automatic Face and Gesture-Recognition, Zurich, June 26-28, 1995.
- [11] G. Welch and G. Bishop, An introduction to the Kalman filter, available at <http://www.cs.unc.edu/welch/kalman/kalmanIntro.html>
- [12] Meinhold, R.J., and Singpurwalla, N.D. 1983. Understanding the Kalman filter. Am. Stat. 37: 123–127.
- [13] Daniel Shevitz and Brad Paden. Lyapunov stability theory of nonsmooth systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 39(9):1910–1914, 1994.

- [14] Jason Fleischer and Botond Szatmáry and Donald Hutson and Douglas Moore and James Snook and Gerald M. Edelman and Jeffrey Krichmar, “A neurally controlled robot competes and cooperates with humans in Segway Soccer,” in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006, this volume, paper submission.
- [15] B. Browning, J. Searock, P. E. Rybski, and M. Veloso, “Turning segways into soccer robots,” *Industrial Robot*, vol. 32, no. 2, pp. 149–156, 2005.
- [16] 劉晏維, 「應用 PIC 微控制器實現圓周倒單擺之 PID 平衡控制」, 國立臺灣科技大學電機工程系, 碩士論文, 民國 93 年
- [17] 李垂憲, 「兩輪自走車之設計與實現-以 NIOS 為核心之基本控制」, 國立中央大學, 碩士論文, 民國 95 年
- [18] 周烜達, 「二輪自走車之設計與實現」, 國立中央大學, 碩士論文, 民國 96 年
- [19] 邱耀賢, 「使用模糊邏輯之雙足機器人即時平衡控制系統設計」, 國立交通大學電機與控制工程學系, 碩士論文, 民國 95 年
- [20] Acheson, D. 1993. A pendulum theorem. *Proc. R. Soc. Lond. A* 443, 239–245.
- [21] Wei, Q., Dayawansa, W. P., & Levine, W. S. (1995). Nonlinear controller for an inverted pendulum having restricted travel. *Automatica*, 31(6), 841–850.
- [22] M. Baloh and M. Parent, “Modeling and model verification of an intelligent self-balancing two-wheeled vehicle for an autonomous urban transportation system,” in *Proc. Conf. Comp. Intelligence, Robot. Autonom. Syst.*, Singapore, Dec. 2003.
- [23] H. G. Nguyen, J. Morrell, K. Mullens, A. Burmeister, S. Miles, N. Farrington, K. Thomas, and D. Gage, “Segway Robotic Mobility Platform,” *SPIE Proc. 5609: Mobile Robots XVII*, Philadelphia, PA, October 2004.
- [24] Hosoda, Y.; Egawa, S.; Tamamoto, J.; Yamamoto, K.; Nakamura, R. and Togami, M. (2006). Basic Design of Human-Symbiotic Robot EMIEW, *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on IROS (IROS2006)*, Beijing, China, pp.5079-5084, 2006.
- [25] X. Yun and Y. Yamamoto, “Internal dynamics of a wheeled mobile robot,” in *Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, July 26–30, 1993, pp. 1288-1294.
- [26] Murakami T, et al. Robust motion control based on projection plane in redundant manipulator. *IEEE Trans Ind Electron* 2002;49:248–255.
- [27] Y. Kanayama, “Two dimensional wheeled vehicle kinematics,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1994, pp. 3079-3084.
- [28] J. Z. Sasiadek and P. Hartana. Sensor data fusion using Kalman filter. In *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion*, volume 2, pages 19–25, 2000.

- [29] J. Z. Sasiadek, "Sensor fusion," Annu. Rev. Control, vol. 26, pp. 203-228, 2002.
- [30] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, Probabilistic Robotics, MIT Press (2005).
- [31] 維基百科-布袋戲來源網站：
<http://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%B8%83%E8%A2%8B%E6%88%B2&variant=zh-tw>
- [32] Muppet Mobile Lab 來源網站：http://muppet.wikia.com/wiki/Muppet_Mobile_Lab
- [33] 麻省理工學院自製簡易賽格威來源網站：<http://web.mit.edu/first/segway/>
- [34] Balancing Robot – Bender 來源網站：
<http://www.tedlarsen.com/robots/balancingbot.htm>
- [35] nBot Balancing Robot 來源網站：<http://geology.heroy.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [36] EMIEW 2 來源網站：
<http://www.pinktentacle.com/2007/11/emiew-2-the-not-so-agile-robot-helper/>
- [37] ANYBOT –QA 來源網站：<http://www.anybots.com/>
- [38] Segway 來源網站：<http://www.segway.com/>
- [39] 廣營電子來源網站：<http://www.gws.com.tw/chinese/chinese.htm>
- [40] 雷虎伺服馬達來源網站：<http://www.tiger.com.tw/>
- [41] HiTEC 伺服馬達來源網站：<http://www.hitecrd.com/>
- [42] Mr. Battery 來源網站：<http://www.mrbattery.com.tw/>
- [43] 陀螺儀來源網站：<http://www.siliconsensing.com/>
- [44] 加速規與傾斜儀來源網站：<http://www.xbow.com/>
- [45] 5DT Data Glove 5 Ultra 數位手套來源網站：<http://www.5dt.com/>
- [46] PVDF sensors 來源網站：<http://www.prowave.com.tw/>
- [47] Dexterous Hand 來源網站：<http://www.shadowrobot.com/>
- [48] Hubo 來源網站：<http://www.gearfuse.com/hubo-becomes-first-robot-to-ride-segway/>