

國立交通大學
電機與控制工程研究所

碩士論文

使用模糊邏輯之雙足機器人即時平衡
控制系統設計

The Development of Real-Time Balance Control System
in Biped Robots Using Fuzzy Logic Algorithm

研究生：邱耀賢

指導教授：胡竹生 博士

中華民國九十五年七月

使用模糊邏輯之雙足機器人即時平衡控制系統設計

The Development of Real-Time Balance Control System
in Biped Robots Using Fuzzy Logic Algorithm

研究生：邱耀賢

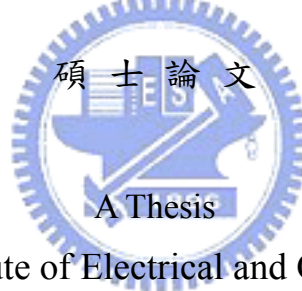
Student : Yao-Hsien Chiu

指導教授：胡竹生 博士

Advisor : Dr.Jwu-Sheng Hu

國立交通大學

電機與控制工程學系



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

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

使用模糊邏輯之雙足機器人即時平衡控制系統設計

研究生：邱耀賢¹

指導教授：胡竹生博士²

國立交通大學電機與控制工程研究所碩士班

摘要

長久以來，即時平衡一直是雙足機器人急需解決的重要課題。傳統上解決平衡問題之作法為利用動態方程式與逆向運動學來獲得機器人目前重心與相對姿態，但此作法複雜且運算量龐大，只適用於使用高運算能力處理器之機器人。為了解決此問題，本論文使用運算能力較為低階之微處理器(PIC-18F452)為控制核心，以仿鴛鴦構造之雙足機器人『PAPA-Man』為研究發展平台。成功提出一個以ZMP觀點搭配智慧型演算法-模糊邏輯的平衡方法，並且發展出一套機器人雙足穩定之分散式平衡控制系統架構，藉此能即時適應於不同地形與斜面。機器人並協同以Visual Basic設計pc端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，透過此視窗介面，可即時觀看目前機器人重心位置而下達行為操控之指令；進一步，本研究整合二足步行機器人之電子模組與電腦端之軟體通訊，實現即時平衡之適應能力。本設計亦同時希望以此達到低成本、高效率及高擴充性之優點。

¹ 國立交通大學電機與控制工程研究所碩士

² 國立交通大學電機與控制工程系教授，新竹市大學路 1001 號，Tel：886-3-5712121ext54318

The Development of Real-Time Balance Control System in Biped Robots Using Fuzzy Logic Algorithm

Student : Yao-Hsien Chiu

Advisor : Dr.Jwu-Sheng Hu

Institute of Electrical and Control Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Real-time balance in biped robots is an important research issue to be solved. Traditionally, inverse kinematics from dynamic equations is solved to obtain the centre of gravity and the gesture of the robot. But the computing effort induced from the complicated technique prohibits the realization of the real-time balance. In this thesis, an intelligent control algorithm using fuzzy logic and ZMP is developed to achieve real-time balance. Our research is implemented on a biped robot named “*PAPA-Man*” whose mechanical architecture mimics an ostrich. The goal of the system is to make the robots balance on different landforms and incline. Further, a “Balance Control Agent” is designed using Visual Basic as the control interface. The software computes the location of the central gravity synchronously and sends commands to the robot for balance control. This work integrates the electronics and firmware of the biped robots with the communication software on the personal computer to realize the ability of real-time balance. Other objectives such as low cost, high efficient and easy to expand are also considered.

誌謝

交大研究所兩年的燦爛時光，深深感謝胡竹生教授對我悉心的指導，感謝入學時能有緣從電子 IC 組跨組而成為老師的研究生。老師不僅給予我學術上的啟發，更教導我一個研究生應有的研究態度、解決問題實事求是的精神與深入思考的方法。或許漫長的學生生涯，隨著本論文的完成暫時劃下了句點，但相信老師所帶給我的影響，不論在求學或是工作上，將是受用無窮。

而在研究生涯裡，感謝 905 實驗室的學長姐、同學和學弟們的協助與陪伴。首先感謝機器人組博士班的頭頭立偉，不僅對本論文提出許多建議與指導，在我徬徨時所給予的鼓勵，更使我多了一份堅持的力量！還有號稱史上最強的博士价呈、熱愛漫畫與健身的劉大人、有很多正妹好友的宗敏、萬事通的安喬、胃不好的帥哥士奇、愛碎碎念的群棋、風度翩翩的興哥、有許多網友的晏榮、很少吃飯的鏗元和實驗室一姊的岑思，一起奮鬥畢業的同學螞蟻、烏蕙、永融、恆嘉、朱木和佩靜，有了你們的陪伴，讓原本平淡無奇的研究生活增添許多歡樂。另外也謝謝研究所與大學部的學弟弘齡、楷祥、Alphar、正剛和阿吉，有您們則使研究生活更多采多姿。亦感謝大學好友們真摯的友情，使我研究生活以外的世界更添色彩。此外，感謝美玲長久以來關懷體貼的陪伴，貼心的鼓勵和不變的支持是我完成學業的動力。

除此之外，還要感謝曾經幫助我以及輔助過我的人，感謝上天讓我一路平順，讓我可以如願取得碩士學位。

最後，謹將此論文獻給我的家人，感謝父親邱富明先生、母親江美瑩女士含辛茹苦的栽培與教養，不斷鼓勵我學習成長，不論是學業、待人處事上，我若有任何一點成就都要歸功於您們！謝謝您們！

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 動機與目的	2
1.3 文獻探討	3
1.3.1 雙足機器人之系統模型	3
1.3.2 雙足機器人之軌跡規劃	4
1.3.3 雙足機器人之零力矩點 (Zero Moment Point)	5
1.3.4 雙足機器人之智慧控制	7
1.3.5 雙足機器人之開發實例與應用	8
1.4 論文架構	8
第二章 系統架構與通訊介面	11
2.1 雙足機器人『PAPA-Man』之機械本體	11
2.2 『PAPA-Man』系統設計	15
2.3 『PAPA-Man』之硬體架構	18
2.4 『PAPA-Man』致動器配置	21
2.5 『PAPA-Man』之通訊介面	24
第三章 即時平衡控制系統	29
3.1 機器人平衡之重要因子- ZMP	29
3.1.1 傳統上 ZMP 點之推算	30
3.2 『PAPA-Man』 ZMP 點之實現	33
3.3 開道伺服層智慧型平衡演算之實現	39
3.3.1 模糊控制器程式演算流程	40
3.3.2 控制器輸入與輸出之歸屬函數	41
3.3.3 模糊規則庫	43
3.3.4 模糊推論與解模糊化	48
3.4 ZMP 控制法則	49
第四章 平衡穩定性之改進	55
4.1 Data Moving Average	55
4.2 智慧型馬達速度控制	58

4.2.1	軟體速度控制.....	58
4.2.2	模糊速度控制.....	60
第五章	控制介面與實驗結果.....	65
5.1	控制介面軟體『Balance Control Agent』.....	65
5.2	軟體功能介紹.....	69
5.3	實驗平台架設與數據分析.....	70
5.3.1	實驗平台架設.....	70
5.3.2	數據分析.....	75
5.4	即時平衡實驗之連續圖.....	98
第六章	結論與未來發展.....	102
6.1	結論與貢獻.....	102
6.2	未來發展與建議.....	103
附錄	輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數.....	104
參考文獻	106



圖目錄

圖 1-1：單質量倒單擺模型(左)、雙質量倒單擺模型(右)	4
圖 1-2：控制流程圖與最佳化步態軌跡圖	5
圖 1-3：ZMP 於雙腳支撐相之運算結果	5
圖 1-4：簡化後之雙足機構以及單腳穩定區域 ZMP 位置圖	6
圖 1-5：適應性類神經模糊系統之架構(ANFSI)	6
圖 1-6：智慧型之控制架構	7
圖 2-1：人類步行之運動模式 (小腿往後彎)	11
圖 2-2：鴛鳥步行之運動模式 (小腿往前彎)	12
圖 2-3：雙足機器人 <i>PAPA-Man</i> 正視圖(左) 與 後視圖(右) 之機械製圖	12
圖 2-4： <i>PAPA-Man</i> 左前視圖(左) 與 左後視圖(右) 之 3D 模擬繪圖	13
圖 2-5：機器人方向 Roll、Pitch、Yaw 座標示意圖	14
圖 2-6： <i>PAPA-Man</i> 機構自由度組合圖(左)、自由度說明圖(右)	14
圖 2-7： <i>PAPA-Man</i> 雙足機器人完成之實品圖	15
圖 2-8：三層式機器人系統設計架構	15
圖 2-9：『Artificial Brain(人工頭腦)』硬體架構	15
圖 2-10：Motor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)	19
圖 2-11：Sensor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)	20
圖 2-12：Motor & Sensor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)	20
圖 2-13： <i>PAPA-Man</i> 之配電設計	21
圖 2-14：DS1013 數位伺服機外觀(左) 及 內部金屬齒輪構造(右)	22
圖 2-15：伺服馬達訊號輸入圖	23
圖 2-16：機器人與電腦端之藍芽通訊網	25
圖 2-17：無線藍芽模組對 RS-232 轉換器	25
圖 2-18：益眾藍芽轉換器之韌體修改程式	27
圖 2-19： <i>PAPA-Man</i> I2C 通訊網路架構圖	28
圖 3-1：腳掌之 ZMP 點與力矩分佈狀態	29
圖 3-2：雙足機器人連續動作中 ZMP 維持穩定之範圍	30
圖 3-3：機器人腳底平面之受力狀況	33
圖 3-4：ZMP 點之受力規劃圖	34
圖 3-5：Force Sensing Resistors 實體圖與其形狀規格	35
圖 3-6：Force Sensing Resistors 構造分析圖	35
圖 3-7：Force Sensing Resistors 壓力對電導特性圖	36
圖 3-8：FSR 於『 <i>PAPA-Man</i> 』腳底規劃配置圖	36
圖 3-9：FSR 於『 <i>PAPA-Man</i> 』腳底實際配置圖	37
圖 3-10：開道伺服層與 FSR 轉換電路	37

圖 3-11：平衡控制系統方塊圖	39
圖 3-12：模糊控制器方向示意圖	40
圖 3-13：模糊平衡控制器內部程式演算流程圖	41
圖 3-14：輸入變數 E 之歸屬函數圖	42
圖 3-15：輸入變數 E_{zmp} 之歸屬函數圖	42
圖 3-16：輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖	42
圖 3-17：ZMP 控制過程圖	49
圖 3-18：單腳站立時理想 ZMP 點示意圖	51
圖 3-19：雙腳站立時理想 ZMP 點示意圖	51
圖 3-20：左右平衡的馬達角度計算	52
圖 3-21：雙足機器人 <i>PAPA-Man</i> 於地面左傾、右傾時之模擬平衡 3D 圖	53
圖 3-22：前後平衡的馬達角度計算	53
圖 4-1：Data moving average 的資料流程圖	56
圖 4-2：馬達的線性分割控速	59
圖 4-3：馬達的指數分割控速	59
圖 4-4：速度控制系統方塊圖	61
圖 4-5：馬達段速與補償角度之對應圖	63
圖 4-6：控速過程的速度變化示意圖	64
圖 5-1：ZMP 視窗軟體-Balance Control Agent	65
圖 5-2：雙足機器人左右腳 ZMP 點座標移動分析圖	68
圖 5-3：機器人即時平衡數據量測之整體實驗平台	70
圖 5-4：電動翹翹板之 PC 端程式操控視窗介面	71
圖 5-5：傾斜儀實體與其規格	72
圖 5-6：陀螺儀(Gyro)實體與其規格	73
圖 5-7：雙軸傾斜儀 X 軸與 Y 軸即時偵測傾斜角度視窗	73
圖 5-8：陀螺儀(Gyro)即時偵測角速度視窗	74
圖 5-9：實驗平台實際架設於雙足機器人 <i>PAPA-man</i>	74
圖 5-10：機器人站立姿態水平 0 度之穩定比較圖	76
圖 5-11：慢速左右傾斜 5 度之穩定比較圖	77
圖 5-12：慢速左右傾斜 10 度之穩定比較圖	77
圖 5-13：慢速左右傾斜 15 度之穩定比較圖	78
圖 5-14：慢速左右傾斜 20 度之穩定比較圖	78
圖 5-15：慢速左右傾斜 25 度之穩定比較圖：	79
圖 5-16：中速左右傾斜 5 度之穩定比較圖	79
圖 5-17：中速左右傾斜 10 度之穩定比較圖	80
圖 5-18：中速左右傾斜 15 度之穩定比較圖	80
圖 5-19：中速左右傾斜 20 度之穩定比較圖	81
圖 5-20：中速左右傾斜 25 度之穩定比較圖	81

圖 5-21：快速左右傾斜 5 度之穩定比較圖.....	82
圖 5-22：快速左右傾斜 10 度之穩定比較圖.....	82
圖 5-23：快速左右傾斜 15 度之穩定比較圖.....	83
圖 5-24：快速左右傾斜 20 度之穩定比較圖.....	83
圖 5-25：快速左右傾斜 25 度之穩定比較圖.....	84
圖 5-26：站立姿態傾斜 0 度之安定比較圖.....	86
圖 5-27：慢速左右傾斜 5 度之安定比較圖.....	86
圖 5-28：中速左右傾斜 5 度之安定比較圖.....	87
圖 5-29：快速左右傾斜 5 度之安定比較圖.....	87
圖 5-30：慢速左右傾斜 10 度之安定比較圖.....	88
圖 5-31：中速左右傾斜 10 度之安定比較圖.....	88
圖 5-32：快速左右傾斜 10 度之安定比較圖.....	89
圖 5-33：慢速左右傾斜 15 度之安定比較圖.....	89
圖 5-34：中速左右傾斜 15 度之安定比較圖.....	90
圖 5-35：快速左右傾斜 15 度之安定比較圖.....	90
圖 5-36：慢速左右傾斜 20 度之安定比較圖.....	91
圖 5-37：中速左右傾斜 20 度之安定比較圖.....	91
圖 5-38：快速左右傾斜 20 度之安定比較圖.....	92
圖 5-39：慢速左右傾斜 25 度之安定比較圖.....	92
圖 5-40：中速左右傾斜 25 度之安定比較圖.....	93
圖 5-41：快速左右傾斜 25 度之安定比較圖.....	93
圖 5-42：站立姿態下傾斜 0 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	94
圖 5-43：慢速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	95
圖 5-44：中速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	95
圖 5-45：快速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	96
圖 5-46：慢速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	96
圖 5-47：中速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	97
圖 5-48：快速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖.....	97
圖 5-49：『PAPA-Man』於右邊傾斜 20 度之即時平衡實驗分解圖.....	98
圖 5-50：『PAPA-Man』於右邊傾斜 30 度之即時平衡實驗分解圖.....	98
圖 5-51：『PAPA-Man』於左邊傾斜 45 度之即時平衡實驗分解圖.....	99
圖 5-52：『PAPA-Man』於前方傾斜 30 度之即時平衡實驗分解圖.....	100
圖 5-53：『PAPA-Man』於前方傾斜 20 度之”單腳”即時平衡實驗分解圖.....	100
圖 5-54：『PAPA-Man』受到未知外力”拉力”之即時平衡實驗分解圖.....	101
圖 5-55：『PAPA-Man』受到未知外力”推力”之即時平衡實驗分解圖.....	101
圖 0-1：機器人右傾對 ZMP 位置變化關係圖.....	104
圖 0-2：機器人左傾對 ZMP 位置變化關係圖.....	105
圖 0-3：輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖.....	105

表 目 錄

表 1-1：論文研究之架構流程.....	10
表 2-1： <i>PAPA-Man</i> 硬體設備規格表.....	13
表 2-2：DS1013 數位伺服機硬體規格表.....	22
表 2-3：藍芽轉換器之規格.....	26
表 2-4：韌體修改程式說明.....	27
表 3-1：左右腳之座標規劃表.....	37
表 3-2：x 方向評分判定之模糊規則表.....	45
表 3-3：x 方向經二維模糊切割之規則表.....	46
表 3-4：x 方向之模糊控制規則表.....	46
表 3-5：y 方向之模糊控制規則表.....	47
表 3-6：x 方向 49 條規則之模糊規則表.....	47
表 3-7：dzmp(x)、dzmp(y)與所受馬達影響之關係.....	52
表 4-1：馬達段速之 look-up table.....	61
表 4-2：馬達段速規格表.....	62



第一章 緒論

1.1 研究背景

機器人之研發已是廣為重視的科學，從以往發展的數十年中，世界上也已經有許多專家學者提出相關的研究成果。而機器人的種類，隨著各類地形需求，一般可分成輪式、軌道式和多腳式機械人等，但是無論如何，近似人類二腳步行模式的雙足機器人仍舊是多數人關心之項目與研究發展之目標。不同於軌道式僅能在固定的軌道中、輪式在平坦無障礙的環境下移動；雙足式機器人除去了地形環境上的限制之後，具有非常高之機動性，不論是轉彎、避障或上下階梯等，皆以雙足機器人表現的較為出色及有效率。

其實人類雙足運動是一件相當複雜的動作行為，實體化的完成更需要高度機電整合的實務性研究，其結合了電子工程、結構力學、控制工程、機器人學、仿生學、商業設計等學門而成。由於研發包含各種領域，因此雙足式機器人的發展一直是各國研究人員的挑戰課題，也是宣揚各國科技發展的重要指標，特別是日本等國對於高階機器人已經列入禁止輸出技術，可窺見其重要之一般。其主要的研究內容有：機械人機構設計，步態規劃，步行軌跡，平衡及控制方法，智慧型控制理論等。

二足步行機器人除去了地形環境上的限制之後，以其高自由度與靈活度的狀態下，便可代替或協同人類處理各種事務，不僅能節省時間、更可提高工作效率。不管是人體無法勝任惡劣環境下之未知區域的探勘，還是枯燥乏味的重覆性工作等，甚至隨著高齡化社會的來臨，亦可驅使照顧老年人或病人。因此機器人對於未來人類社會的獻貢在被高度期待下吸引了許多不同領域人士的投入，也更值得現今的我們深入研究與發展。

1.2 動機與目的

由上節可知雙足機器人的研究內容主要包括了 1.機械人機構設計 2.步態規劃 3.步行軌跡 4.平衡及控制理論 5.人工智慧等，每一項皆是可以單獨分開詳細研究的龐大主題，但縱觀這些項目可發現，機器人的各種動作不管是步態規劃還是步行軌跡，都離不開“穩定性”這項議題，機器人若具有良好的穩定性，則不論各種設計，都能發揮其最佳的效益。由此可推想，探討穩定性最直接的方式就是研究其“平衡及控制理論”。

在以往的文獻中，傳統擁有高階運算能力、高自由度的機器人往往本身造價昂貴且不容易發展和使用。而現今人形機器人的運動模型發展，不外乎模仿生物型態的運動軌跡為探討基礎、PID 控制以及倒單擺運動模型來完成步行運動行為的實現。因此深究傳統解決平衡問題之方法，初始化的步足軌跡的獲得往往是一個繁瑣的工作，其必須仰賴數學化的幾何空間描述，利用動態方程式與逆向運動學所獲得機器人目前重心與相對姿態來反覆修正真實的機器人運動而獲得其平衡的姿態。這過程中往往會遇到 Inverse kinematics 求解過程無解的困難情況。另外在運動學分析重心過程必須要考慮到所有的板件重量、瞬時速度、瞬時角速度等分佈細節，此作法複雜且運算量龐大、耗時，難以達成及時平衡之目的。因此可知以往對於小型且低階運算之機器人的即時平衡控制理論議題並無一定或是特定有效之方法；本論文即先由此平衡議題著手並且以仿鴛鳥構造之雙足機器人『PAPA-Man』為發展平台，從近幾年來所提出的 ZMP 觀點搭配智慧型演算法-模糊系統，發展出一套機器人平衡控制的系統架構，即時適應於不同地形與斜面。並協同以 Visual Basic 設計 pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，透過此視窗介面，即時觀看目前機器人重心位置並下達行為操控之指令，目的為以模組化的方式，整合二足步行機器人之電子模組與電腦端之軟體通訊，實現雙足機器人即時平衡於不同地形與斜面之適應能力。

1.3 文獻探討

此節之文獻探討，主要是對本論文研究相關之機器人發展歷程做一個回顧與討論。首先針對雙足機器人之系統模型與控制理論進行相關之研究及探討；其次涉獵二足機器人軌跡規劃、ZMP 零力矩點及智慧型控制理論等相關文獻，最後參考國內外雙足機器人之開發實例與應用，希望從此獲取助益，使本研究之機器人系統架構更趨於完善。

1.3.1 雙足機器人之系統模型

1. Golliday and Hemami (1997)

Golliday and Hemami[1]於 1997 年以 Lagrangian 的動態理論，推導出無膝蓋 (Kneeless) 雙足運動機器人之數學模型。此方式將機器人系統以數學模型線性化，簡化其原本複雜之非線性系統，而能以較簡易的方式分析其穩定性(stability)、可控制性(controllable)及可觀察性(observable)。

2. Miyazaki and Arimoto (1980) , Furusho and Masubuchi (1986)

Miyazaki and Arimoto[2]、Furusho and Masubuchi[3]、Napoleon et al. (2002)[4]等學者，將雙足步行機器人模擬成倒單擺(Inverted Pendulum)系統與雙質量倒單擺模型，機器人的步行運動就像是以支撐腳為連桿，腰際重心為擺錘，為一連串的倒單擺運動，如圖 1-1 左[4]所示。但此時並沒有考慮到遊擺腳之狀態，直到 1998 年，John H. Park and Kyoung D.Kim[5]提出以倒單擺模型為基礎，並考慮了遊擺腳之動態，事先規劃遊擺腳的路徑並同時配合倒單擺 ZMP 之軌跡，最後可減少成當只有一個倒單擺時的誤差，如圖 1-1 右[4]所示。由此可知，控制機器人之穩態平衡與步行運動視同為倒單擺平衡的分析，可適度地簡化數學模型與非線性系統，而更易於模擬分析，但由於只能滿系統定性分析上的需求，因此尚有不能被

用來設計實際機器人之缺點。

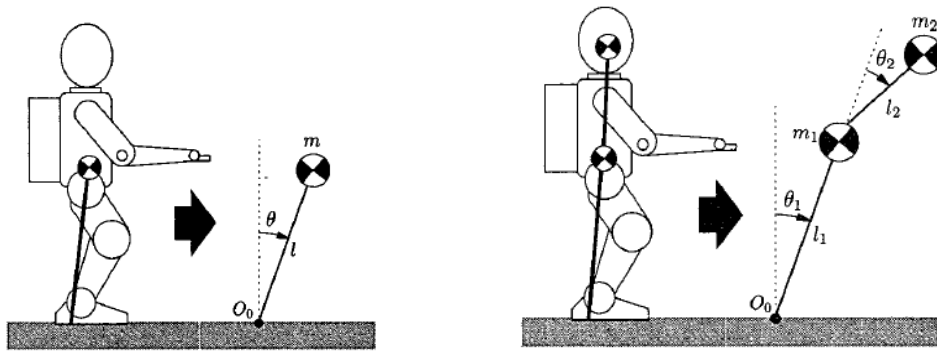


圖 1-1：單質量倒單擺模型(左)、雙質量倒單擺模型(右)

1.3.2 雙足機器人之軌跡規劃

1. Vukobratovic (1970)

Vukobratovic[6]使用數值方法計算產生雙足步行機器人動態步行之軌跡，但是因為步行所需的參考軌跡計算運算量太大，相對地，所耗時間也長，幾乎不能即時適應地形的變化，除非未來軌跡產生演算法則被簡化或者處理器運算速度加快，否則以數值方法產生機器人步行軌跡還是存在著微處理器運算速度太慢或是價格太過昂貴之問題。

2. Tesuro Kitazoe (1994)

Tesuro Kitazoe[7]運用非監督式的學習法則來規畫雙足機器人之行走軌跡，考量如何於達成最佳行為模式後再繼續保持，並藉由分析雙足之間的動作對應關係以定義評估步行模式之準則。

3. Shih and Zhu (1991)

Shih 和 Zhu 等學者[8]提出雙足機器人步態軌跡最佳化之方法。透過牛頓-尤拉(Newton-Euler)方法推導出系統的動態模型，最對目標函數進行最佳化，求得零力矩點 ZMP 與單腳支撐區域中心之最小誤差，用以產生一最佳的步態軌跡，其步態軌跡與控制流程如下圖 1-2 所示：

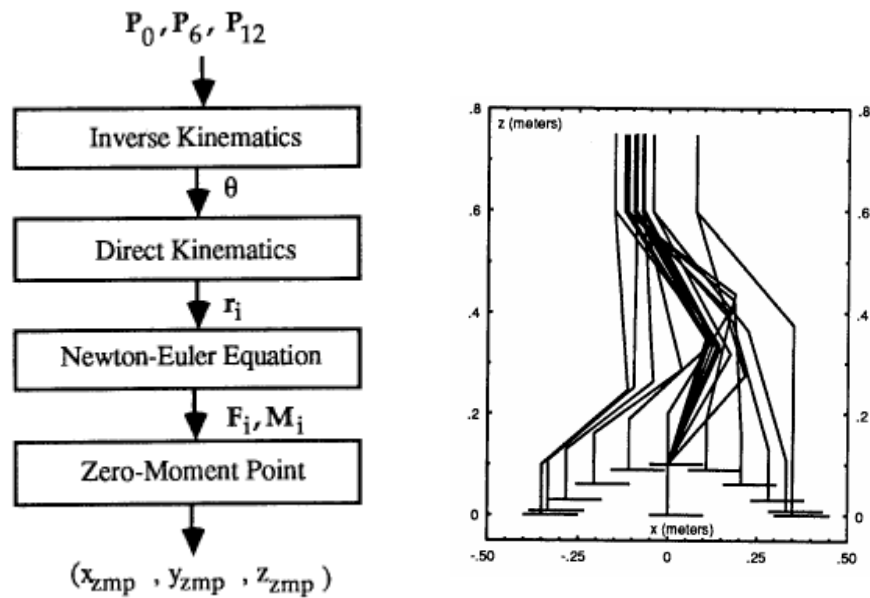


圖 1-2：控制流程圖與最佳化步態軌跡圖

1.3.3 雙足機器人之零力矩點 (Zero Moment Point)

1. Takanishi and Ichiro Kato (1991)

機器人使用零力矩點(ZMP)如圖 1-3 來控制其穩定度。ZMP 最早是由日本早稻田的教授所提出的[9]。Takanishi 和 Ichiro Kato 實作之雙足機器人 WL-12RIII 設計了步行運動控制器，並以零力矩點作為判斷步行穩定之準則。

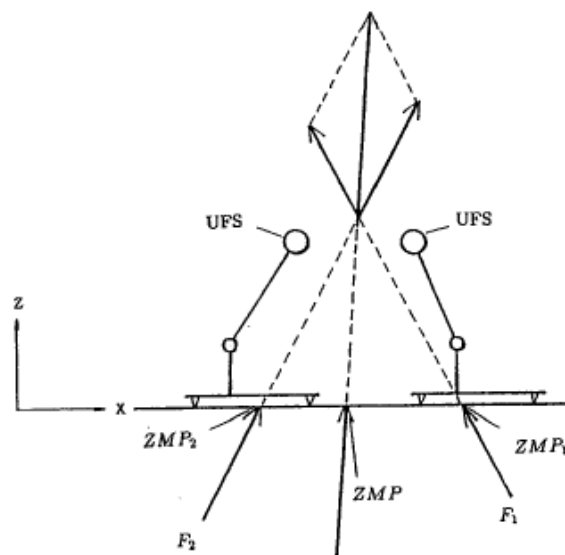


圖 1-3：ZMP 於雙腳支撐相之運算結果

2. Kim and Oh (2000)

Kim and Oh 等[10]提出一最簡化之二足步行機器人機構設計，從圖 1-4 可看出其最小自由度以及連桿狀態，恰符合正常行走之最簡機能。除此之外，並利用 ZMP 的控制法則，對機器人進行姿態軌跡控制與調整動態步行穩定度，以防止傾倒之發生。

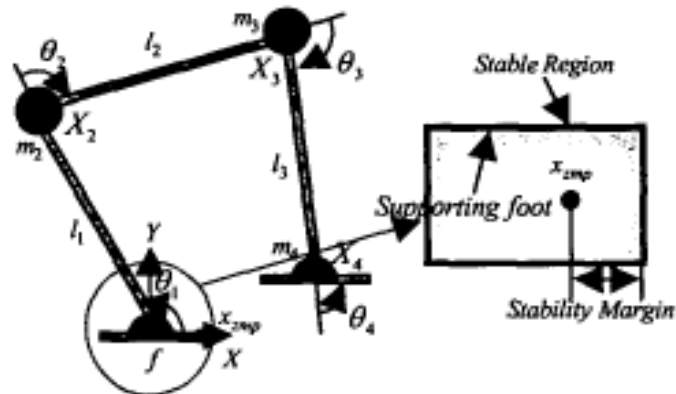


圖 1-4：簡化後之雙足機構以及單腳穩定區域 ZMP 位置圖

3. D. Kim, S.-j. Seo and G. -T. Park (2005)

D. Kim 等學者[11]利用壓力感測器(Force Sensing Resistors, FSR)，量測已規劃好的雙足機器人步行軌跡之 ZMP 變化值，並且用適應性的類神經模糊系統(adaptive neuron-fuzzy system,ANFS)來 model ZMP 的軌跡變化。如圖 1-5 所示，利用 ANFS 來最佳化模糊系統的歸屬函數值與模糊法則。此方式證明用類神經系統所判斷出 ZMP 的值與用 FSR 所量測出之 ZMP 是相近的，但由於使用類神經網路，故仍然有系統複雜且需要大量訓練資料之缺點。

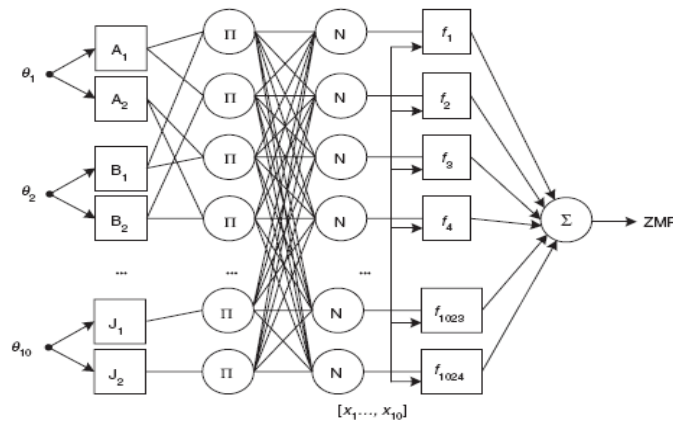


圖 1-5：適應性類神經模糊系統之架構(ANFSI)

1.3.4 雙足機器人之智慧控制

1. M. Y. Cheng and C. S. Lin (1995)

M. Y. Cheng 和 C. S. Lin [12]使用基因演算法(Genetic Algorithms,GAs)來搜尋 5 連桿雙足機器人系統中最佳化之步態設計參數。相對於傳統的最佳化法是以微分為基礎，作單目標最佳化的設計，且在面對複雜系統會因微分不易而導致限制過多與容易落入區域最佳點之缺點；基因演算法則是不需作微分處理的零次單目標最佳化設計法則(Zero-order optimization)，且能隨機、平行的搜尋以求得全域最佳解。最後此篇以模擬的方式，顯示以一定義好的步伐在崎嶇表面或地形上能用較高速的方式步行。

2. Hani Hagra, Victor Callaghan and Martin Colley (1999)

Hani Hagra 等學者[13]結合基因演算法則和模糊邏輯推論，對移動式機器人之控制系統進行即時線上學習之發展。此控制法則藉由感測資訊之回授，用於同步修改模糊邏輯系統以縮小搜索參數範圍值，故可快速收斂線上行為之學習。

3. T. Fukuda and Y. Komata (1997)

T. Fukuda 與 Y. Komata 等學者[14]提出適應性多變環境之智慧型控制。利用機器人感測元件訊號回饋，進行機器人穩定性之 ZMP 計算，並將此值輸入至基因遺傳法則以求取最佳參數解；同時，訓練其類神經網路，得到一組最佳權重值，以此權重之網路作遞迴運算，而可得到最佳化速度與角度值，使機器人系統具控制強健性(Robust)與地形適應性。其智慧型之控制架構如圖 1-6 所示。

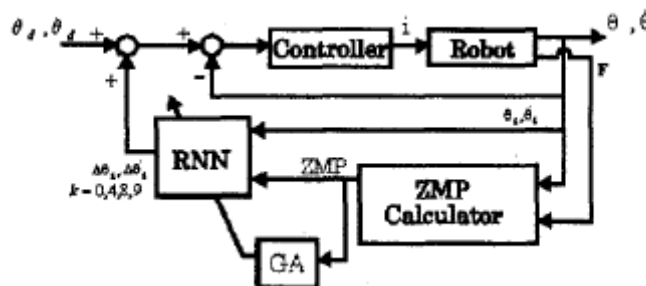


圖 1-6：智慧型之控制架構

1.3.5 雙足機器人之開發實例與應用

目前國內外已有不少研究機構發表實例成果，如美國南加大與 MIT、日本、韓國...等大學機器人實驗室之研究用實體機器人，以及國際知名廠商如日本 HONDA 公司生產的 Asimo 及 SONY 公司生產的 Qrio 等，皆先後完成商業化雙足機器人之原型製品，茲略舉如下：

1. Kato 和 Takanishi[9](1973)設計了世界上首次能步行運動的雙足機器人 (WL-5)，並在 1983 年設計了由靜態步行轉而能動態步行之半動態步行機器人。
2. Furusho 和 Sano[15]設計的一系列 Biper-型雙足步行機器人，利用機器人上的感測器量測步行之步態訊息。
3. Honda 公司[16]於 1986 年開始研究，歷經十四年研發以及七代實驗機型 (E0-E6;1986-1993)和三代原型機型(P1-P3;1992-1997)，家庭式機器人 Asimo 於 2000 年 10 月 31 日誕生[17]。
4. Sony 公司推出的 Qrio[18]，其利用各種知覺感測和記憶學習功能，實現了高運動性和豐富互動能力的小型二足步行娛樂機器人。

1.4 論文架構

本文研究架構如附表 1-1，共分五章，茲分述如下：

第一章為緒論，說明本篇論文之研究背景、動機與目的，簡述本論文之寫作架構並對相關研究之機器人發展歷程做一個回顧與討論。

第二章為系統架構與通訊介面，闡述『PAPA-Man』之設計概念與機械本體製造，並探討內部仿人腦之系統、三層架構設計與機器人對內、對外之通訊介面。

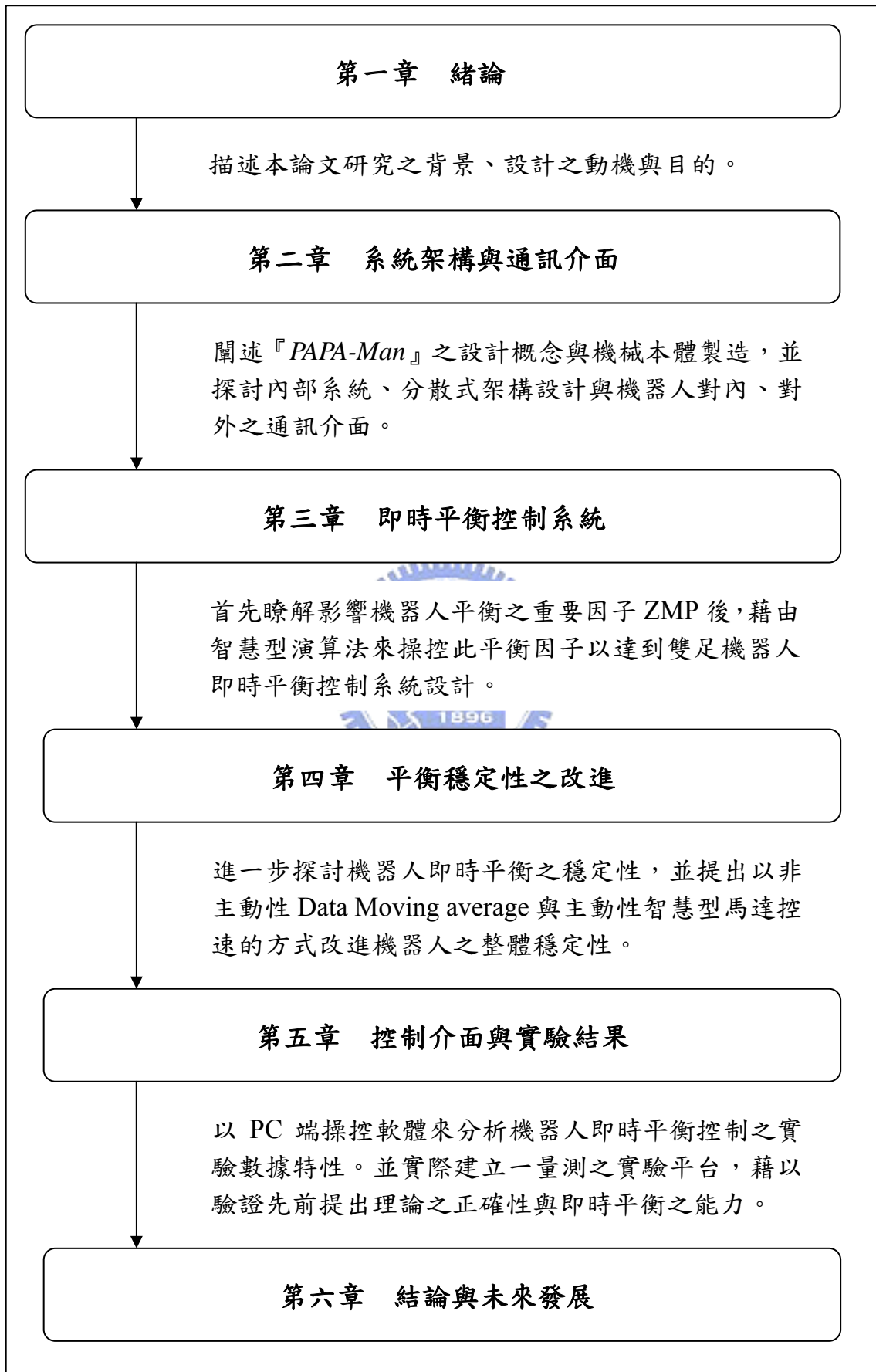
第三章為即時平衡控制系統，為本論文之核心重點，首先瞭解影響機器人平衡之重要因子 ZMP 後，並藉由智慧型演算法-模糊邏輯來操控此平衡因子以達到所預期機器人之最佳姿態，完成雙足機器人即時平衡控制系統設計。

第四章為機器人穩定性分析，我們藉由上一章所設計出之成果，進一步探討機器人即時平衡動作上之穩定性，並提出以非主動性-Data Moving average 與主動性-智慧型馬達控速兩種方式相互配合，改進機器人整體穩定性。

第五章為控制介面與實驗結果，結合前兩章所設計之成果，協同以 Visual Basic 設計 pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，透過此視窗介面，操控者能即時觀看目前機器人重心位置並下達行為操控之指令，增進了人機互動的機制，並結合此視窗軟體，使機器人能擴展多元化的功能。最後此章分析機器人即時平衡控制之實驗數據特性並將其實際實驗結果作一個相互驗證。

第六章為結論與未來發展，本文的貢獻為完整的以智慧型演算-模糊邏輯之方式配合 FSR 電路擷取目前機器人之 ZMP 點，並進一步探討機器人之穩定性，建立機器人即時穩定平衡系統；更有別於傳統 ZMP 演算之機器人，具有遭受到不明外力後仍可自我保持平衡之優點。最後對本論文之研究做一個總結，闡述其設計優點與未來發展。

表 1-1：論文研究之架構流程



第二章 系統架構與通訊介面

本章節將介紹雙足機器人『PAPA-Man』之機構設計、系統架構與通訊介面。由於本論文之機器人系統架構採模組化觀念設計，因此本章先縱觀『PAPA-Man』的系統架構，之後章節再針對各模組分別進行深入介紹。

2.1 雙足機器人『PAPA-Man』之機械本體

傳統上，仿人形之雙足機器人，其設計特點為模仿人類的雙足構造，採取小腿往後彎之型態（如圖 2-1 所示）。因此，許多雙足機器人的步行控制研發也是遵循此種架構。但深入研究人體的雙足運動後，可發現人類在步行運動時通常需要同時以雙手來維持身體與雙腳的平衡，而目前所開發之多數雙足機器人，為了簡化其機構與運動模型，通常將上半身與雙手之機構省略不計，但此機構設計已和人體平衡的機制有所違背；令人不禁產生一個疑問，是否仿人二足之雙足機器人在平衡與步行上為最良好之設計呢？

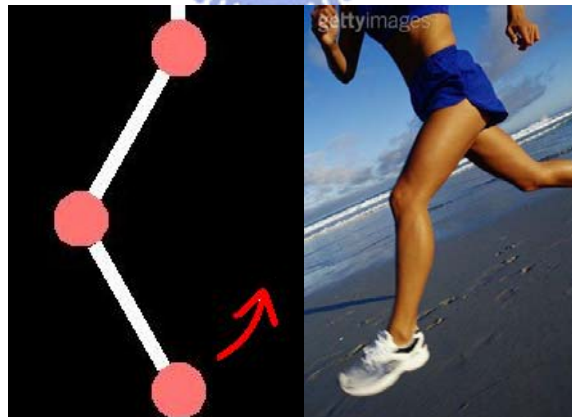


圖 2-1：人類步行之運動模式（小腿往後彎）[19][20]

反觀自然界的生物，可以發現有許多雙足動物的架構並不是如同人類小腿般只能夠往後彎曲。像是駝鳥，其小腿即只能向前彎曲（如圖 2-2 所示）。然而生物演化至此特徵上，可觀察到駝鳥等的雙足生物擁有許多人類所沒有運動上的優點特性，其一就是駝鳥的生理結構使其運動速度可達到時速 72 公里，比人形體

態運動快的多，且在跳躍上活動能力較強。更值得一提的是，小腿往前彎曲的結構使其在跌倒後能方便獨自以雙腳爬起，並不像人形的動物般必須仰賴雙手輔助平衡才可直立站起。這一點在機器人科學上是很重要的特性，藉此我們可以不需設計多餘的雙手來輔助雙足機器人，亦可以達到平衡之效果。

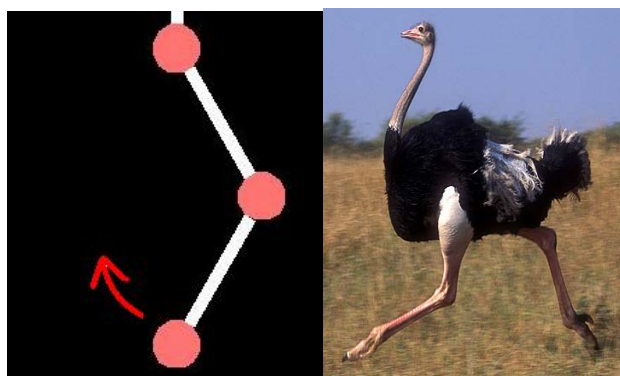


圖 2-2：駝鳥步行之運動模式 (小腿往前彎)[19][21]

因此，雙足機器人『*PAPA-Man*』系統之機構設計模仿駝鳥之生物骨骼構造，充分融合其運動上步行與靈活跳躍之優點，為一創新的雙足機器人結構設計（如圖 2-4 所示）。一般可知由於機器人的動力來源-馬達，其重量會隨著額定的力矩而增加，因而存在著動力大小與負載相互對立的情況，所以機器人本體結構一般以重量輕、體積小且剛性強為設計目標；由於仿駝鳥之雙足生理架構，使 *PAPA-Man* 本身機構上亦有節省空間以及減輕馬達負載重量與成本之優點。

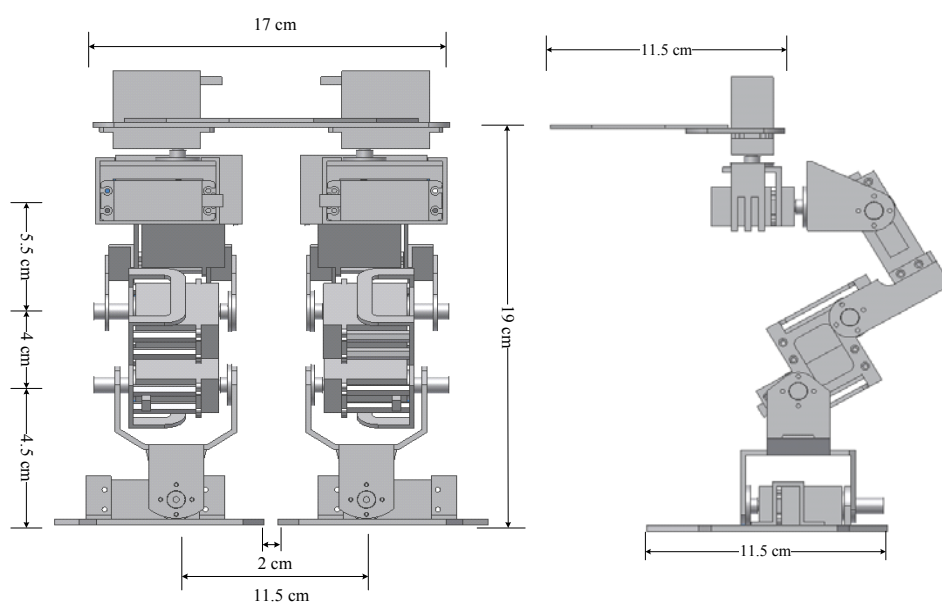


圖 2-3：雙足機器人 *PAPA-Man* 正視圖(左) 與 後視圖(右) 之機械製圖

本論文以『PAPA-Man』為發展平台，PAPA-Man 之製作流程為構想設計、自由度配置，並根據致動器與感測器的尺寸、受力與結構，再以 3D 機構繪圖軟體設計，進行動態的模擬與測試，試驗確定可行性後，最後則進行實體機構之製造，如圖 2-4 所示，表 2-1 則為 PAPA-Man 之硬體規格。

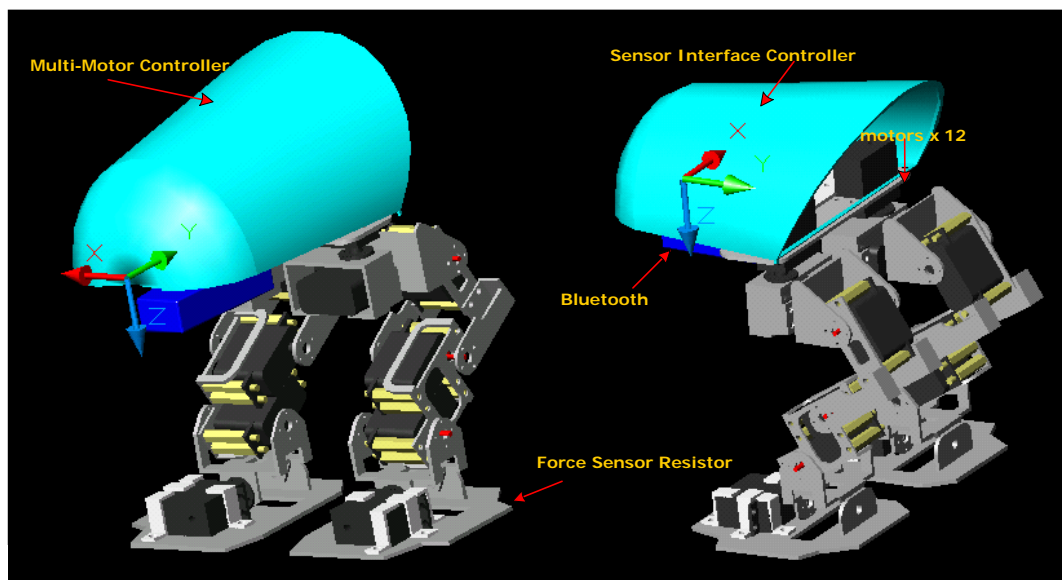


圖 2-4：PAPA-Man 左前視圖(左) 與 左後視圖(右) 之 3D 模擬繪圖

表 2-1：PAPA-Man 硬體設備規格表

設備	規格
自由度	Pitch 軸 2*2, Roll 軸 3*2, Yaw 軸 1*2
高度	25 cm
總重量	2500 g
控制晶片	Microchip PIC 18f452(8bit 30MHz)
量測裝置	0.2 Inch FSR*6 (Phidgets Inc.)
致動器	RC servo motors (ACE DS1013)
電源供應	6V for motors, 5V for control

在自由度配置方面，首先定義三個轉動方向 Roll (滾動)、Pitch (擺動) 和 Yaw(搖動)，如圖 2-5 所示。

Roll：沿著此軸作旋轉，會造成機器人機身前後晃動 (Ankle & Hip)

Pith：沿著此軸作旋轉，會造成機器人機身左右擺動 (Ankle)

Yaw：沿著此軸作旋轉，會造成機器人機身順或逆時滾動 (Pitch & Hip)

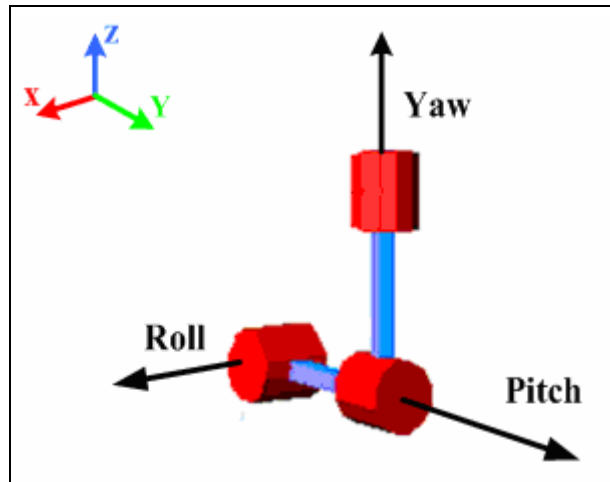


圖 2-5：機器人方向 Roll、Pitch、Yaw 座標示意圖

PAPA-Man 共擁有 12 個自由度，如圖 2-6、圖 2-7，每一個滾筒皆代表一個自由度的方向。左右之腳踝(Ankle)皆有 Roll 和 Pitch 兩個自由度，左右膝蓋(Knee)皆有 Pitch 一個自由度，而左右髖部(Hip)則皆有 Roll、Pitch 和 Yaw 三個自由度，因此左腳右腳各為 6 個自由度，故雙足機器人整體為 12 個自由度。

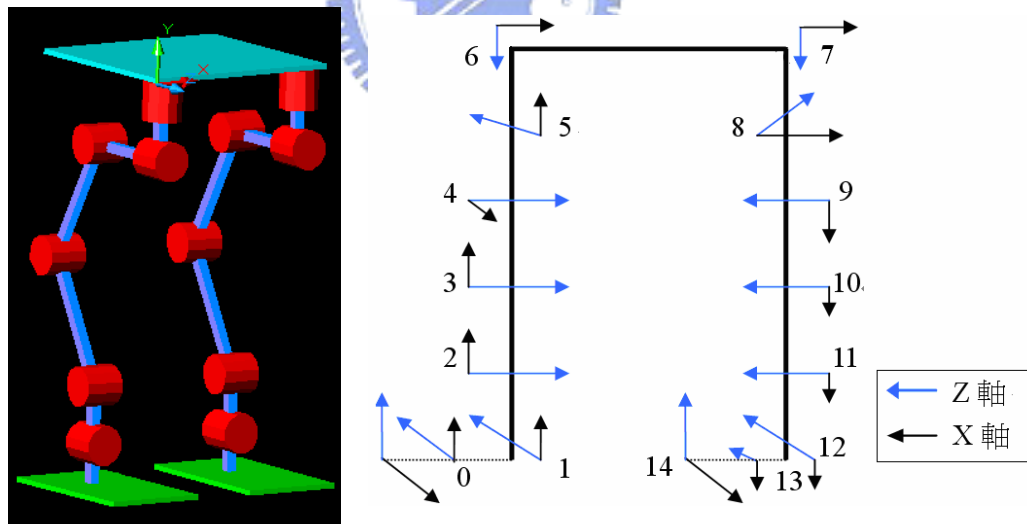


圖 2-6：PAPA-Man 機構自由度組合圖(左)、自由度說明圖(右)

最後並且根據 Modified Link Parameters 的方法來定義連桿座標軸(frame)，即關節 i 是連接連桿 $i-1$ 到連桿 i 的關節，座標 $(XYZ)_{i-1}$ 的原點設在關節 i 的軸線上，座標軸的設定需依照下列規則：

- (1) Z_{i-1} 軸與關節 i 的軸線重合。
- (2) X_{i-1} 軸在關節 i 軸線指向關節 $i+1$ 的法線線上。
- (3) 座標軸 $(XYZ)_i$ 的原點在 X_i 軸跟 Z_i 軸的交點上。
- (4) Y_i 軸用右手定則決定。

機器人在行走時，腳掌必定會貼緊地面，所以以腳掌中心為座標原點，圖 2-6 (右)即定義以 *PAPA-Man* 右腳腳掌為座標原點。

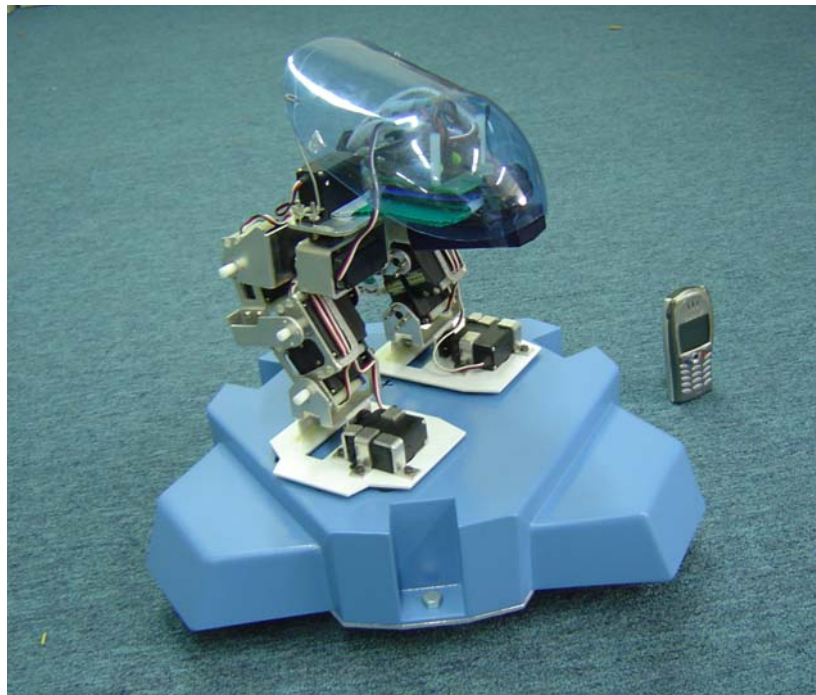


圖 2-7：PAPA-Man 雙足機器人完成之實品圖

2.2 『PAPA-Man』系統設計

深究現有的機器人電子控制系統之網路整合技術，我們發現傳統高階機器人為了整合聲音、影像、運動控制與多個 Sensors 回授等複雜且龐大之資訊，主要採取了 PC-Base、DSP、單晶片等架構為基礎。然而，PC-Base 等架構本身即需要一個複雜作業系統和應用程式去整合，架構本身之性能同時也限制了機器人交錯協調之控制能力與硬體計算之擴充。高複雜度更同時造成系統耗電與資源低重複利用率的問題；除此之外，造價昂貴的成本為其最大之缺點(例如:ASIMO Robot)。

另一方面以 DSP 及單晶片等架構為基礎之機器人系統往往容易面臨擴充不便、對上下層資訊連結整合不易以及通訊協定不統一的繁瑣問題。因此近幾年科學文獻上為了解決相類似的難題，提出的技術為 OPEN-R BUS 架構(例如: SONY 所屬之 QRIO、AIBO、SDR-3X、SDR-3X 等 robot 皆是此架構)。但由於 OPEN-R BUS 其頻寬僅有 12Mbps，且有系統不普遍與熟悉發展系統人數不多之缺失，故目前仍期待有所改進。

因此為一個多軸控制雙足機器人設計軟硬體、韌體、電子電路系統本身是一件複雜的問題。而技術上要組合如此複雜的控制系統會帶來幾個難題：1. 多種類 sensor, actuator, CPU 之組合造成網路系統高複雜度、2. 多種介面間通訊系統不易整合、3. 開發語言及分散式軟體計算技術和工具需要一個統一的整合協定、4. 網路拓樸架構須有容易擴充的特性。為了克服上述困難，機器人之系統設計充滿了挑戰性，很明顯必須在系統需求與技術瓶頸之衝突下擁有重大突破。因此本論文在系統設計上注入新的組織系統的想法，我們試著從大自然中尋找解決途徑，在研究哺乳類動物大腦內部的神經元之網路型態緊密分布後[22]，本研究決定以此為系統架構(見圖 2-8)。此架構是模仿人類的大腦，小腦和神經網路建置，運用 I2C 網路技術為神經通訊骨幹，將所有系統以 Master、Slave 的方式佈置成基本的階層式架構。此階層架構主要可分三層：1. Control and Sensing Layer(控制感測層) 2. Gateway Layer (閘道伺服層) 3. Internet Layer(網際網路層)。茲說明如下：

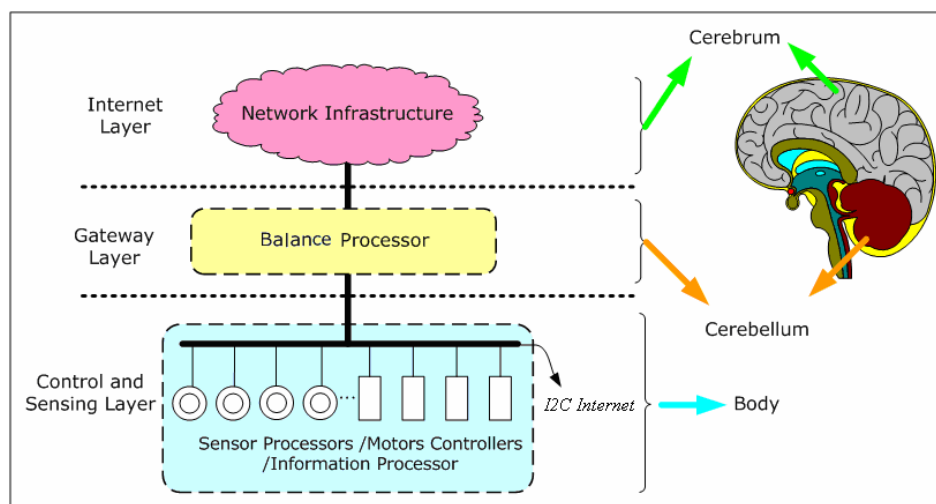


圖 2-8：三層式機器人系統設計架構

1. Control and Sensing Layer(控制感測層):

控制感測層如同脊椎動物的動器及受器，此層之核心為馬達控制器，整層由多個馬達、Tilt、Gyro、Accel 等各種感測元件(偵測速度、聲音、影像等)所構成。這些感測資訊為即時的(Real-Time)，其資料種類繁多且運算量龐大，故獨立分散為一層。其位於 I2C 網路中之 Slave 端，可運用 I2C 網路將感測運算後之結果與資料封包整合與統一傳送到上層 Master 端(網際網路層)，因此上層系統或使用者只要知道封包格式和意義便可以輕鬆獲得控制感測層量測之運算結果而加以判斷處理。此外，上層也可透過 I2C 網路直接對馬達控制器下達馬達操控之指令。

2. Gateway Layer (閘道伺服層):

閘道伺服層可視為機器人小腦，為本論文核心之發展重點，猶如人類小腦一般，其負責機器人的即時平衡控制。本論文所發展之智慧型即時控制演算即運作在此層。此層核心為 Fuzzy 平衡控制器，由 Sensor 電路板與壓力感測器 (FSR) 構成，主要功能除了能得知目前機器人重心與 ZMP 點外，還能即時偵測目前地面環境的傾斜資訊。經由此層的平衡控制器運算，最後再把運算結果之 ZMP 資料封包，利用 I2C 網路傳送到上層 Master 端(網際網路層)，網際網路層接收此 ZMP 資訊後即會統籌決定該如何平衡運作，並將最後的判斷指令利用 I2C 網路傳達給控制感測層的馬達控制器，致動馬達而保持機器人機身之平衡。

此閘道伺服層亦提供了網際網路層間的資訊整合，我們可以將其稱為一個 Robot Agent，其整合了上層與下層的資訊，簡化了上層溝通的訊息。如小腦一般，統籌了許多具即時性且相當重要的反應訊息，並且分散了大腦端之運算量，讓上層系統不需額外花時間處理，使得許多重要的事情可以同步運作。

3. Internet Layer(網際網路層):

網際網路層之核心為 Motor&Sensor 電路版，其位於 I2C 網路的 Master 端。網際網路層可視為機器人之大腦，為機器人決策之司令，其主要是對下層 Slave

端透過 I2C 網路所傳來之資訊作一個統整處理與命令判斷，並把決定好之結果經由 I2C 網路將指令封包分別傳送到下層欲操控之 slave 端而命令其動作。除了對內可經由 I2C 朝下層下達行為操控之指令外，若遭遇到難以判斷之資訊或運算量過於龐大之處理，則可透過對外通訊如藍芽或網際網路將現有高速計算資源系統整合起來(例如:桌上電腦、PDA、3G 手機、叢集伺服器等等)。每一台計算系統都可視為一顆腦神經元，由網路所組成的叢集式系統提供網際網路層可觀的擴充性、無限大的記憶空間、計算能力和系統資源，而可對傳來之資訊做一週詳處理。

故綜合上述，此三層猶如人類的腦部神經系統結構組織，其中控制感測層為人類的感測和運動神經叢集；而開道伺服層則如同小腦操控平衡反應與整合即時資訊，且分散大腦長時間之運算；最後網際網路層如大腦般對下層資訊作一個統整處理與命令。在此三層架構下運用 I2C 網路 / Bluetooth 通訊使其達到更適合於網路計算之環境，並擁有高傳輸率、高容錯性、高度系統整合之能力，且依機器人功能需求，具有擴充 Slave 端而不影響其整體架構之優點；而低成本分散式架構也提高了運算效率並同時達成即時通訊之能力，使得複雜的交錯協調控制簡化，也更容易與叢集系統連結，因而降低研發門檻，節省模擬開發成本。

2.3 『PAPA-Man』之硬體架構

如先前所述，PAPA-Man 之硬體架構為模仿哺乳類動物大腦小腦與神經網路的運作，其精神上為專司即時反應及資料訊息之總管，不著重高速計算而在於資

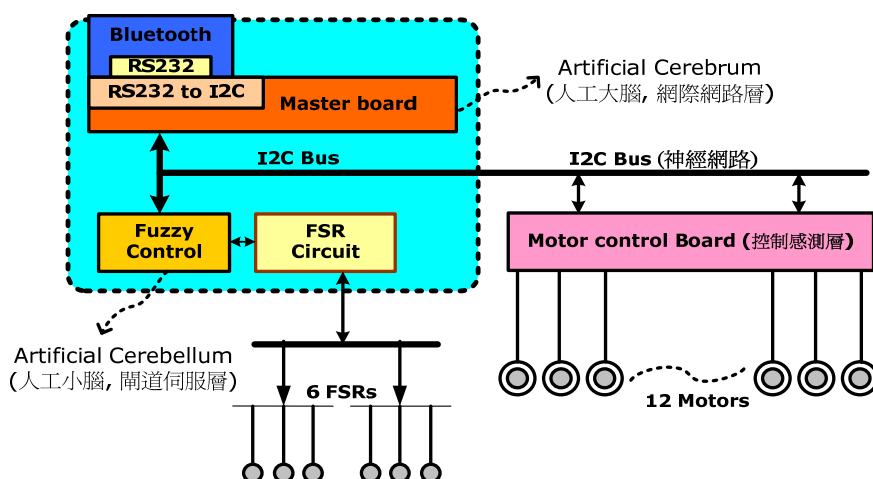


圖 2-9：『Artificial Brain(人工頭腦)』硬體架構。

訊高度的整合與傳遞。因此我們亦稱此架構為『Artificial Brain (人工頭腦)』，圖 2-9 為實際之硬體架構；而控制感測層、閘道伺服層與網際網路層三層則以本實驗室機器人團隊自行研發的三塊控制電路板為核心，分別為 motor board、sensor board 與 motor & sensor board，如上節所述，於各層中各司其職。每塊電路板皆使用 8bit 的微控器「Microchip PIC18F452」來做電路板的處理核心，30Mhz 的工作頻率則使機器人有較為省電之好處；其內建 AD 模組，方便用來讀取感測器的輸出電壓，並經由 RS232 或是無線網路將輸出資訊回傳給電腦，即可在電腦端顯示目前位置、速度、角度等感測資料。PIC18F452 有 PORT A、B、C、D、E，5SPORT 共有 34 個輸出入接腳可以使用，並規劃其周邊而擁有 RS232、I2C BUS、I/O 與讀取感測器之能力。由於將系統簡化以 8bit-MCU 來整合整體架構，所以系統本身亦有成本低廉之優點。

以下再分別對所使用之三塊電路板作一簡單之介紹：

Motor board (控制感測層):

利用 PIC18F452 的 PORT B、D 輸出 PWM 訊號來控制馬達轉角，共可控制 16 顆馬達，藉此來控制機器人之動作；此外，也可接受感測器的量測輸入。而馬達的電源跟 PIC 的電源分開輸入，則可避免馬達內部的電感對電源產生突波，影響 PIC 的電源供應。

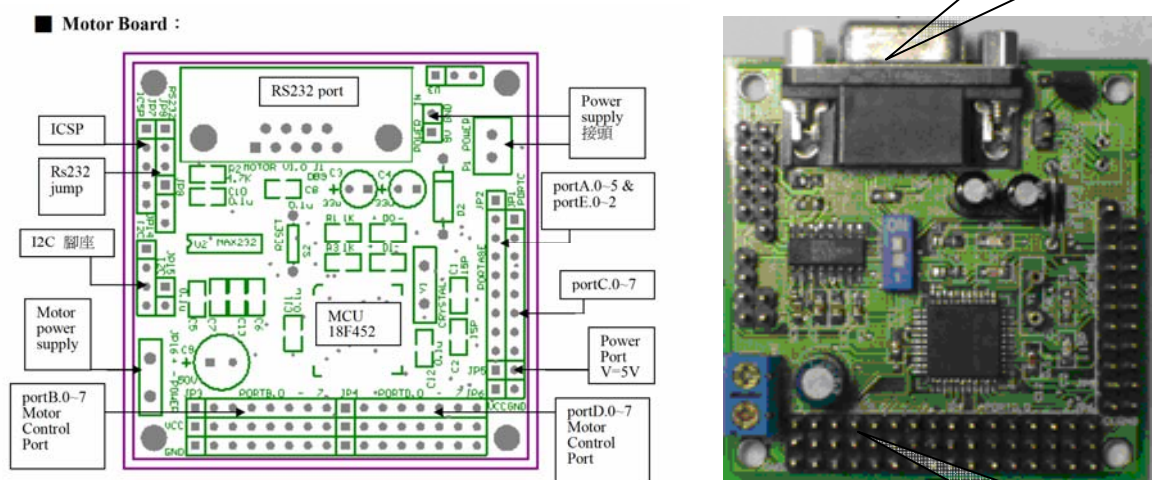


圖 2-10：Motor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)

Sensor board (開道伺服層):

本論文核心之模糊控制演算與壓力感測計(FSR)即在此塊板子完成，AD 資訊擷取主要用來讀取壓力感測計的壓力輸出資料，其使用 PIC18F452 內建的 AD 模組，可以轉換 FSR 的類比輸出電壓成數位值。

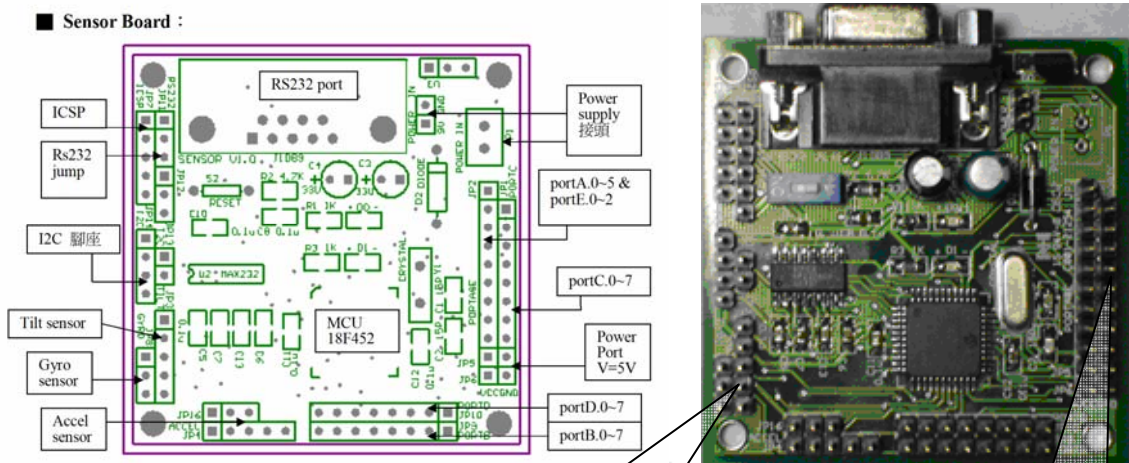


圖 2-11：Sensor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)

特別設計的 Tilt 與 Gyro 角位

8 組 A/D Pin 腳
可供 Sensor 轉換

Motor & Sensor board(網際網路層)

前兩塊電路板之功能整合，為 I2C 網路中之 Master，因此接收到 I2C 下層 slave 端之資訊後即可在此區作運算決策，並同時可再經由 RS232 或是無線網路模組傳給電腦叢集做複雜運算；在此特別設置了一個外接 EEPROM 的腳位，若大腦端的資訊一時過於龐大，可另儲存於此外接記憶體。

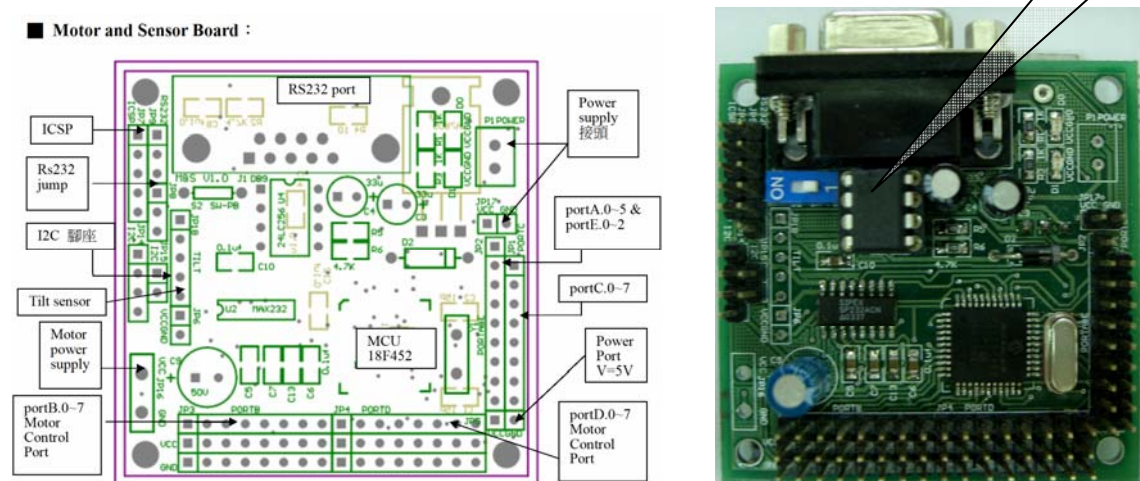


圖 2-12：Motor & Sensor board 之設計規劃圖(左) 與 硬體實施完成圖(右)

為了達到機器人完全無線之設計，因此要考慮其電源配電之問題。三塊電路板配電皆吃 5V 的直流電，以圖 2-13 (b)之廣營 GWS 所生產 11.1v/1300mAh 鋰電池，轉接圖 2-13 (a)之變壓器模組後即可產生 5v 的直流電，因此把三塊電路板電源串接以共地。同理，伺服馬達的配電也是類似，只是變壓器轉出的電壓為 6v。



(a) 配電之變壓器模組

(b) 鋰電池

圖 2-13：PAPA-Man 之配電設計

最後，神經網路方面則運用先進的 RS232、I2C 資料傳輸以及 Bluetooth 技術，用來作為多馬達控制板(Motor control board)和感測器模組(Sensor board)的溝通匯流排。當要測試電路板的功能時，主要使用 RS232 跟電腦溝通，使用方便。當放在機器人上使用時，可以透過 Bluetooth 跟無線模組溝通，透過無線方式傳送資料給電腦。經由這樣的整合規劃，系統便擁有良好的周邊應用和上下層溝通的能力；至於較詳細之機器人對內與對外通訊，則容後 2.5 節再加以敘述。

2.4 『PAPA-Man』致動器配置

目前機器人所採用的動力來源為分散式直流伺服馬達，所謂分散式指的是在機器人的各個關節上安置一致動器，如圖 2-6，每個自由度上皆配置馬達，由馬達牽動連接於關節兩側的骨架，使得機器人的動作改變。在馬達的選配上採用市售動態模型的 DS1013 伺服馬達，它包含一顆高轉速的直流馬達、減速齒輪組，

用以提高輸出扭力，以及 PID 控制電路。從外界觀之，它只有兩條正、負電源輸入和一條白色控制轉角的 PWM 訊號輸入線，可由微控制器產生 PWM 訊號來操作伺服馬達的角度。伺服馬達的外觀和內部構造如下圖 2-14 所示：



圖 2-14：DS1013 數位伺服機外觀(左) 及 內部金屬齒輪構造(右) [23]

DS1013 數位伺服機為國產雷虎公司出品的高扭力數位伺服機系列[24]，動力中心採用高速高扭力無核心馬達，搭配全金屬齒輪，提供高速、高扭力、高精準度反應，適合競賽與高階數位伺服機需求(硬體規格如表 2-2 所示)，其優點如下。

- 1.全金屬材質驅動齒輪。
- 2.數位式控制核心機板。
- 3.高散熱效率鋁合金材質外殼。
- 4.高扭力、低耗電量無刷馬達。

表 2-2：DS1013 數位伺服機硬體規格表

DS1013 數位伺服機	規格
扭 距	13.0(kg/cm)
速 度	0.108(sec/60°) @ 6V
齒輪材質	金屬*4pcs
軸承樣式	滾珠軸承
重 量	62g
外殼尺寸	40.4x20.0x37.9(mm)

所謂 PWM 訊號即 Pulse width modulation 的縮寫，是一種常用於微處理器控制類比電路的調變技術。顧名思義它是以前脈衝寬度來承載資訊，如圖 2-15 所示，所在意的是維持高電位的時間（即脈衝寬度），而與脈衝之間隔無關。典型的 RC 伺服控制信號 PWM 週期為 18~22 msec，duty cycle 安全範圍為 0.75~2.25 msec，臨界值 0.5~2.5msec，若信號超出臨界範圍時，伺服機則有燒毀之可能。

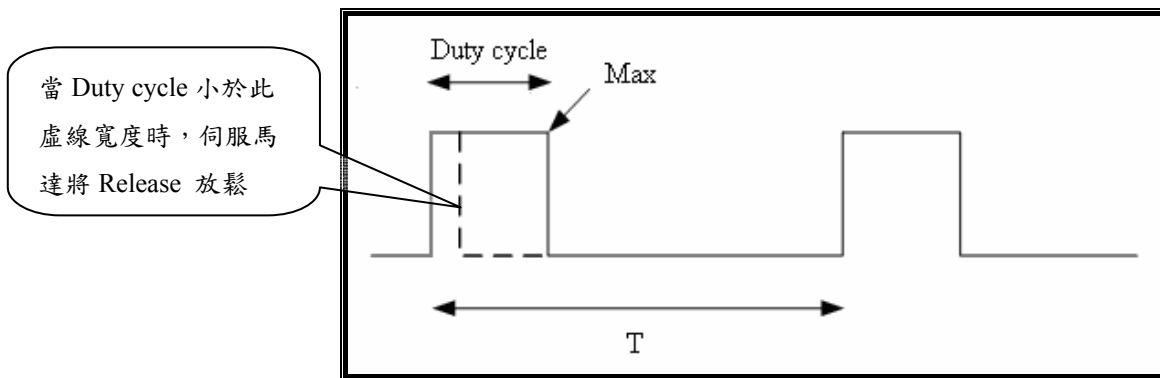


圖 2-15：伺服馬達訊號輸入圖

由於 Servo motor 是以 PWM 信號的 Duty cycle 來控制其轉動角度，但若由上層的開道伺服層或是網際網路層直接以 PWM 訊號來指揮各顆伺服馬達，勢必會造成多項困擾，諸如必需持續產生多顆馬達的 PWM 訊號，以使伺服馬達的位置固定，抵抗外力的推移；而持續、多頻道的 PWM 訊號將會佔用大量的通訊頻寬，不符合經濟效益。再者經過長距離的傳輸，訊號恐將造成延遲，或被干擾的現象，使得操作不易。為了改善這些缺點，因此目前『PAPA-Man』所發展的三層架構中，控制感測層的馬達控制器，與伺服馬達一同安置於機器人身上，一來可就近產生 PWM 訊號保持伺服馬達的轉角正確位置，而不用佔據大量的通訊頻寬；二來即使馬達控制器與上層（外界）之間發上通訊干擾、斷訊，仍可持續產生正確的 PWM 訊號，維持機器人正常的姿態，而不會做出超出預期以外的動作，以致意外的發生。

本論文所使用之馬達控制器中，PIC 單晶片提供兩個硬體 PWM，但為了控

制 12 顆馬達，兩個硬體中斷是不夠的，為了能達到同時控制 12 個馬達的效果，所以利用 timer 中斷來做軟體式 PWM。其中之軟體設計有幾個要點：

- (1) 如何製造高精確度的脈衝寬度，若能在 Duty cycle 之間切出愈多區間，則就能提高伺服馬達的角度控制精密度。
- (2) 脈衝之間隔亦為考量之一，當脈衝輸入伺服馬達並被識別後，就會促使其內部馬達出力保持伺服馬達齒輪組的輸出端在脈衝波的對應位置。

因此若能縮短脈衝之間隔，則表示馬達停止出力的時間縮短，相對地提高伺服馬達的輸出動力。但過短的脈衝間隔將導致伺服馬達的不穩定，造成輸出轉軸抖動，甚至扭力下降。至於拉長脈衝間隔則會使得伺服馬達動力輸出較為疲軟。

2.5 『PAPA-Man』之通訊介面

在本論文中，機器人之通訊介面分為兩種，第一種是機器人對外的通訊連結，第二種則是機器人本身對內之網路通訊，茲分別介紹如下：

對外通訊：藍芽 (Bluetooth)

目前市面上已有許多資訊產品使用藍芽通訊技術，包括個人電腦、手機、PDA … 等，這意謂藍芽通訊顯然已成為一種趨勢。這樣的潮流下，在機器人上安裝藍芽通訊功能，除了順應潮流之外，更可以達到與各項眾多的藍芽資訊產品交換資訊形成網路。由於藍芽無線技術主要是涵蓋低成本、低電力無線電介面的個人區域網路 (PAN)，在 2.4 ISM 頻寬中操作，並以即時 (real time) 傳遞數據資料與語音訊號。不同於無線區域網路 (WLAN)，它是以較大的資料流量和較長的傳輸距離為特色，缺點就是比低功率的藍芽通訊較為耗電。以目前雙足機器人「PAPA-man」的情況，操作範圍大都在 10 公尺之內 (Bluetooth class 2)，而且希求省電以達較長時間的運作，這項要求也就因應在機器人上裝配藍芽通訊的另一個理由。

圖 2-16 為機器人與電腦端之藍芽通訊網，可知機器人是以前端網路層 Master 端與外界電腦溝通。這是一種雙向溝通的機制，當機器人的 Master 大腦端獲取底下 slave 端的資訊而有所判決處理後，可同時透過藍芽將資訊送到外界電腦，在外部電腦端做進一步後端的複雜運算；相對的，若使用者想傳達指令給機器人，亦可透過電腦端的程式界面，以藍芽傳輸，傳遞操控指令給機器人的 Master 端。

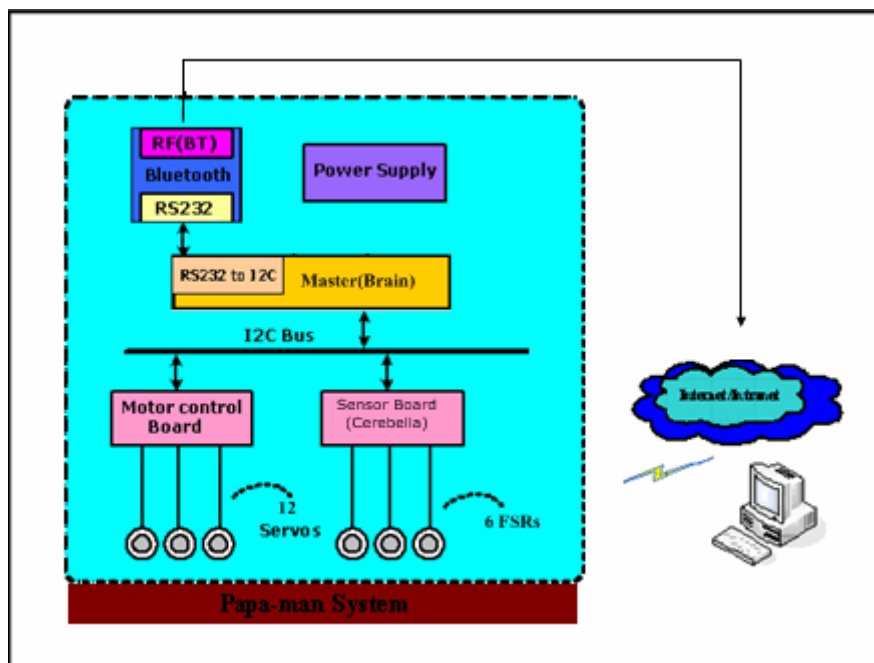


圖 2-16：機器人與電腦端之藍芽通訊網

目前控制伺服器的微控器 PIC 18F452 具有對外以 UART(RS232) 的通訊能力，因此建構藍芽通訊上採取較簡便的方式完成。採用益眾公司出品的無線藍芽模組對 RS-232 轉換器，具有將 RS232 轉換為藍芽通訊的能力，如下圖所示：



圖 2-17：無線藍芽模組對 RS-232 轉換器 [25]

此藍芽轉換器各具有一個 RS-232 DSUB-9(公) 、RS-232 DSUB-9(母)連接器，可與 RS-232 設備連結，達成藍芽無線通訊。下表為此轉換器的規格[25]：

表 2-3：藍芽轉換器之規格

項目	規格
電源	5伏
藍芽版本	1.1版
鮑率	可更改，最高115200 bits/s
調變方式	GFSK
頻帶	2.400~ 2.4835 GHz
功率	Class 1
靈敏度	- 82 dbm
工作溫度	+5 ~ +55 °C
天線	內建隱藏式天線

目前網際網路層 Motor & Sensor 電路板安置於機器人身上，並擁有 RS-232、IC2...等內外通訊功能，利用其中的 RS-232 通訊和無線藍芽模組對 RS-232 轉換器，即可在機器人建立起對外藍芽通訊。而在客戶端方面也需具備一個 RS-232 通訊埠，轉接至另一個無線藍芽模組對 RS-232 轉換器，如此便完成客戶端的藍芽通訊建構。在此種藍芽通訊建構上，雖然較方便、快速，但相對地自由度也較少，必需使用相同的一對藍芽轉換器才行，不像只要客戶端具有藍芽通訊功能即可建構藍芽通訊網；雖然藍芽轉接器只能彼此之間互相連線而已，並不能對外連線，但其安全性與保密性則相較為高，不易受到資料竊取與雜訊干擾之影響。此外，機器人端和客戶端所使用的藍芽轉接器雖然外觀、硬體是相同的，但在軟體上是不同的。客戶端所用的是”master”的軟體；而機器人端則是用”slave”，兩者是不同的。在機器人端和客戶端通電後，屬”master”的藍芽轉接器會主動與”slave”的藍芽轉接器建立連線而開啟通訊。

此藍芽轉接器是可以透過電腦程式和 RS-232 通訊完成軟體的修改，該廠商所提供之修改程式[25]如下圖所示：

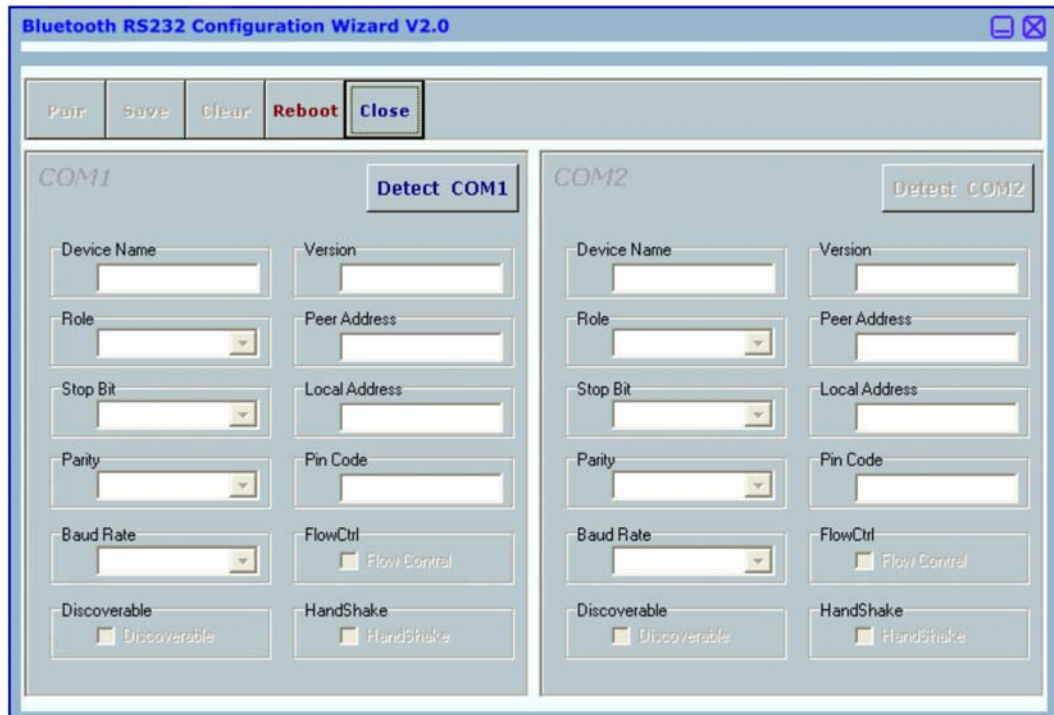


圖 2-18：益眾藍芽轉換器之韌體修改程式

藍芽轉接器所提供更改的項目很多，如裝置的名稱、修改的版本…等。與通訊方面相關之設定則如下表：

表 2-4：韌體修改程式說明

欄位	說明
Role	設定該藍芽連接器是” master” ，還是” slave” 。1.1版
Stop Bit	UART 中設定停止位元的長度。
Baud Rate	UART 中傳輸速度的設定，最高到 119200 bits/s
Peer Address	填入連入對方轉接器的地址
Local Address	填入本機轉接器的地址

因此我們可知，利用此藍芽轉接器所建立的藍芽通訊系統是一種簡單的結構，且比起一般使用藍芽模組所建立的藍芽通訊網，還有其他的藍芽裝置並無法切入藍芽轉接器之間通訊之優點，在某種程度上可增加保護性與安全性，故為 PAPA-Man 機器人之分散式系統建構於此種通訊方式上的重要原因。

對內通訊： I2C

PAPA-man 機器人的三階層人工頭腦架構便是以 I2C 界面為內部神經網路，使各階層相互溝通，傳遞重要的封包資訊。一般而言，單晶片有串列匯流排與平行匯流排兩種與周邊設備溝通的傳輸方式，常見的串列匯流排包括三線式的非同步串列通信(RS232)和同步串列通訊(SPI)、與兩線式同步串列通訊(I2C/USB)等。

I2C 是 Inter-Integrated Circuit 的縮寫，原始目的是用於電路板上 IC 之間的通訊，由 Philips 於 1980 年代所發展的雙向兩線式串列匯流排標準[26]，具有 I2C 界面的元件彼此只需要兩條線便能傳輸資料，較平行傳輸架構之可靠性與安全性更佳，且節省空間與成本，通訊速度可達 1 MBit/sec，通訊距離一般低於數公尺，但加上放大器後亦可達數十公尺之遠。

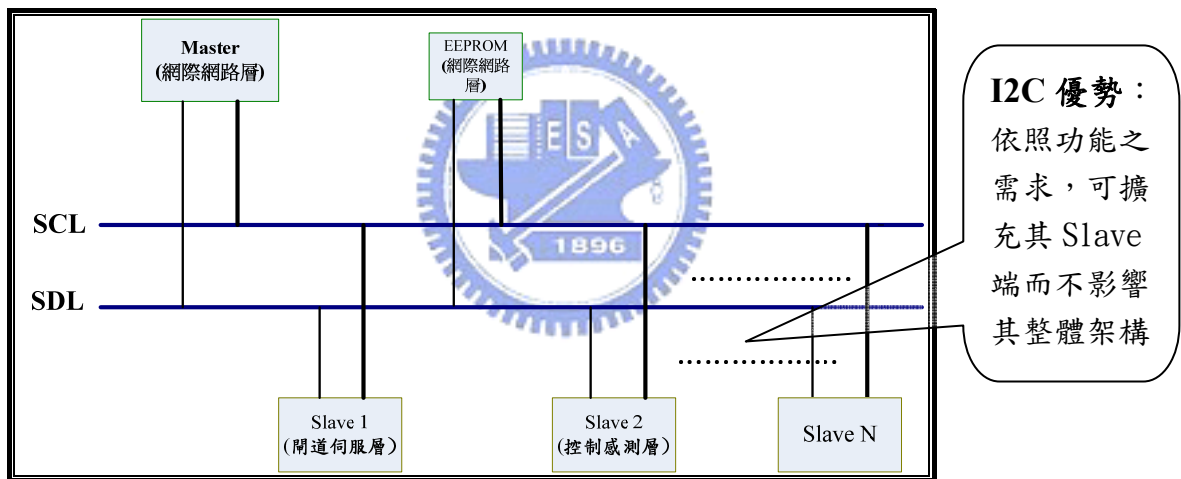


圖 2-19：PAPA-Man I2C 通訊網路架構圖

如圖 2-19 所示，為 PAPA-man I2C 通訊網路架構。I2C 的 SCL 線是用於產生時脈 clock，SDA 的線則用以資料傳輸。圖中以網際網路層為 Master，其餘各層則在 Slave 的工作模式下，每個 Slave 必須有自己唯一的位址(偶數值)，Master 先對 I2C 上所有元件廣播，並送出所要溝通元件的位址，所指定的 Slave 開始與 Master 連線進行溝通、資料傳遞，其餘 Slave 不作回應，溝通結束後回到初始狀態，等待下一次動作。當 Master 要對 Slave 寫入資料時，是先送出位址(一個偶數值)，而 Master 讀取 Slave 時，則是送出位址+1(一個奇數值)。故利用 I2C，即可依機器人功能之需求，具有擴充低成本的 Slave 端而不影響整體架構之優勢。

第三章 即時平衡控制系統

接下來的章節為論文發展之核心重點，首先瞭解影響機器人平衡之重要因子 ZMP 後，利用 FSR 壓力感測器來獲取機器人即時 ZMP 點，接著藉由智慧型演算法則來操控此平衡因子以完成雙足機器人之即時平衡控制系統設計。

3.1 機器人平衡之重要因子- ZMP

在對雙足機器人作平衡的控制分析前，首先要瞭解影響機器人平衡之重要因子為何，而零力矩點 ZMP (Zero Moment Point) 的觀點從提出至今已有三十餘年了，現在已經成為機器人步行控制與平衡分析中最主要的方法之一，像 ASIMO 與 QRIO 的行走也都是依據 ZMP 來達成，只是詳細的應用方式有所不同。

下圖 3-1[27]表示人類在接觸地面時腳上的反作用力分佈情形，若將地面的反作用力集中於 P 點，則可定義出正向力 N 與力矩 M。若 P 點位在地面上，且此點周圍不管是由內力或重力所產生的淨力矩皆為零，即可定義 P 點為零力矩點 (ZMP)。

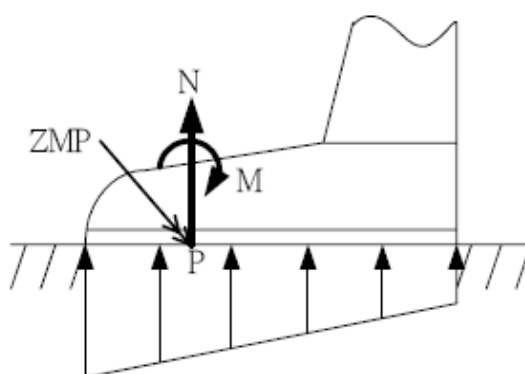


圖 3-1：腳掌之 ZMP 點與力矩分佈狀態

同理，將上述定義套用在雙足機器人可知，當機器人在活動時，各桿件會產生加速度而具有慣性力。假設全部桿件的合力矩由地面一反作用力矩相互抵消

後，地面反作用力作用之點仍在腳掌內，即表示全部桿件的合力作用在腳掌範圍，因此機器人穩定且不傾倒。故單腳支持時，ZMP 使機器人保持平衡的範圍為圖 3-2 所示深灰色領域的支持腳腳掌內；雙腳支持時，ZMP 則只要在圖 3-2 所示淺灰色領域內的所有色塊即可，其中深灰色區塊是機器人單腳腳掌的幾何形狀。由上述可知，ZMP 可隨著機器人連續性或非連續性的行動方式而改變，當 ZMP 落在這些範圍內就表示此步行機器人可以很穩定的行走，ZMP 落在範圍之外，則很有傾倒之可能。除此之外，ZMP 與安全範圍間的關係可以視為一種相對穩定度的分析方法。當離安全範圍越遠，其越接近不穩定狀態；當越靠近安全範圍中心時，越遠離不穩定狀態，因此本論文所控制機器人之 ZMP 點，皆是使其設法靠近安全範圍中心，而接近理想穩定之狀態。

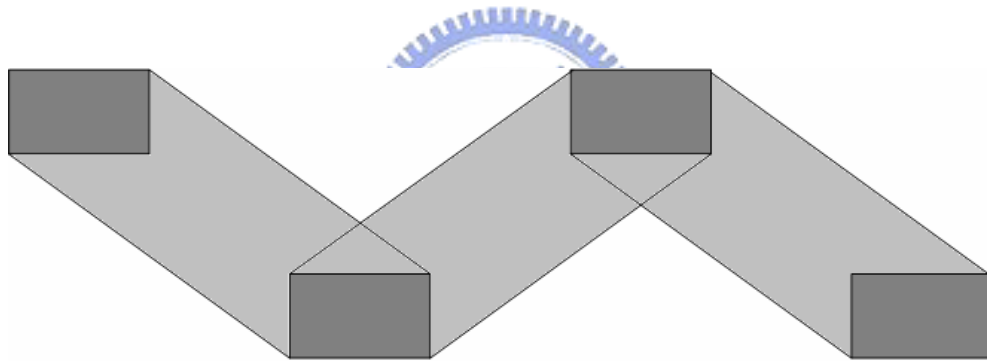


圖 3-2：雙足機器人連續動作中 ZMP 維持穩定之範圍

3.1.1 傳統上 ZMP 點之推算

傳統上推算 ZMP 點，是利用 Kinematic Chain 的方式來推導 ZMP。且由上節可知，ZMP 點上之淨力矩為零，故可利用 D’Alambert 觀點來列出其公式，其傳統已知公式如下：

$$\sum_i \left[m_i (\vec{r}_i - \vec{P}) \times \left(\ddot{\vec{r}}_i + \vec{g} \right) + I_i \ddot{\alpha}_i + \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i \right] + \sum_j \vec{M}_j + \sum_k (\vec{S}_k - \vec{P}) \times \vec{F}_k = 0 \quad (3-1)$$

若將各桿件視為單一質點，且無外力與外力矩作用，則 (3-1) 式可簡化為

$$\sum_i \left[m_i (\vec{r}_i - \vec{P}) \times (\ddot{\vec{r}}_i + \vec{g}) \right] = 0 \quad (3-2)$$

因為在機器人運動中，支撐腳一定位於地面上，所以 ZMP 值恆為零，其 $\vec{P} = (X_{zmp} \vec{e}_1 + Y_{zmp} \vec{e}_2)$ ，且 $g_x = g_y = 0$ ，故重力加速度 $\vec{g} = -g \vec{e}_3$ 。由以上條件，可將 (3-2) 式展開成：

$$\begin{aligned} & \sum_i m_i \left[(Y_i - Y_{zmp}) \times (\ddot{Z}_i - g) - Z_i \ddot{Y}_i \right] \vec{e}_1 + \\ & \sum_i m_i \left[-(X_i - X_{zmp}) \times (\ddot{Z}_i - g) + Z_i \ddot{X}_i \right] \vec{e}_2 + \\ & \sum_i m_i \left[(X_i - X_{zmp}) \ddot{Y}_i - (Y_i - Y_{zmp}) \ddot{X}_i \right] \vec{e}_3 = 0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

接著將 (3-3) 式依 X、Y、Z 各軸方向依序拆解成下列三式：

$$\sum_i m_i \left[(Y_i - Y_{zmp}) \times (\ddot{Z}_i - g) - Z_i \ddot{Y}_i \right] = 0 \quad (3-4)$$

$$\sum_i m_i \left[-(X_i - X_{zmp}) \times (\ddot{Z}_i - g) + Z_i \ddot{X}_i \right] = 0 \quad (3-5)$$

$$\sum_i m_i \left[(X_i - X_{zmp}) \ddot{Y}_i - (Y_i - Y_{zmp}) \ddot{X}_i \right] = 0 \quad (3-6)$$

最後將 (3-4) 式和 (3-5) 式經過移項整理可得：

$$X_{zmp} = \frac{\sum_i m_i \left[(\ddot{Z}_i - g) X_i - Z_i \ddot{X}_i \right]}{\sum_i m_i (\ddot{Z}_i - g)} \quad (3-7)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i \left[(\ddot{Z}_i - g) Y_i - Z_i \ddot{Y}_i \right]}{\sum_i m_i (\ddot{Z}_i - g)} \quad (3-8)$$

(3-7)式與(3-8)式即為一般機器人在 X-Y 平面穩定運動，所需滿足的 ZMP 公式。其中， M_i 為第 i 個桿件質量； X_i 、 Y_i 、 Z_i 為第 i 個桿件位置向量，分別是 P 向量中各分量的 X、Y、Z 值； \ddot{X}_i 、 \ddot{Y}_i 、 \ddot{Z}_i 為第 i 個桿件加速度向量，其值由對 P_i 二次微分而得； g 則為重力加速度。在此，二足機器人運動中的速度、加速度向量等參數是以線性化的方式利用動力學中基本定義來求解，因此將所需參數算出並代入 (3-7) 及 (3-8) 式後，最後即可求得 ZMP 點 X 軸與 Y 軸之位置。

除此之外，若機器人遭受到外力時，(3-7) 式及 (3-8) 式於分子項便皆增加了外力項 f_x 、 f_y ，而可改寫成 (3-9) 式與 (3-10) 式。

$$X_{zmp} = \frac{\sum_i m_i \left[\left(\ddot{Z}_i - g \right) X_i - Z_i \ddot{X}_i \right] + \sum f_x}{\sum_i m_i \left(\ddot{Z}_i - g \right)} \quad (3-9)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i \left[\left(\ddot{Z}_i - g \right) Y_i - Z_i \ddot{Y}_i \right] + \sum f_y}{\sum_i m_i \left(\ddot{Z}_i - g \right)} \quad (3-10)$$

總結可知，當機器人遭遇到外來的力量，使得機器人重心上造成影響時，若我們能確實知道此外來力量之量值，便能以此公式算出目前機器人遭受到外力後所改變之 ZMP 位置，而可進一步設法控制機器人之姿態以保持平衡。但此為理想狀態，一般而言，機器人所遭受之外來力量為未知的，因此無法把此未知外力值帶入 (3-9) 及 (3-10) 式以算出機器人改變姿態後之 ZMP 位置。故傳統上計算 ZMP 機器人平衡之方法，大多有無法顧及外力的影響而當面對外力之狀況下機器人具有無法自我平衡之缺點。以此情況而言，可能並不是一擁有最良好計算 ZMP 點之方式。

3.2 『PAPA-Man』 ZMP 點之實現

由上節所述，傳統 ZMP 的計算具有無法考慮未知外力的缺點，除此之外，最大之缺點為其計算公式將各桿件假設為位於桿件重心之單一質點，且參數中除了需得知機器人每個板件之質量外，甚至要求知目前機器人正在運動中每個板件之位置向量、速度向量與加速度向量等；但要獲取這些機器人運動中的即時參數，不僅作法複雜且運算量龐大，且即便可算出 ZMP 點，也幾乎難以低運算量即時算出 ZMP 而達成即時平衡之目的；有鑑於許多國內外之文獻，在計算機器人 ZMP 點時，為了簡化上述 ZMP 參數的複雜取得，常改以模擬之方式，利用 Adams 等機構軟體來模擬取得各個所需之參數與角度，帶入傳統之 ZMP 公式而得知其目前之 ZMP 狀況，但由於本論文為機器人之實做，故於論文中並不考慮此種軟體模擬的方式。

在此是以另一種方法- 直接以腳底受力資訊的觀點來算出其 ZMP 點，如圖 3-3 所示。若地面的反作用力集中機器人腳底 P 點，且沿著 P 點之 X 軸與 Y 軸，不管是內力或重力產生的淨力矩皆為零，即可定義 P 點為零力矩點 (ZMP)。

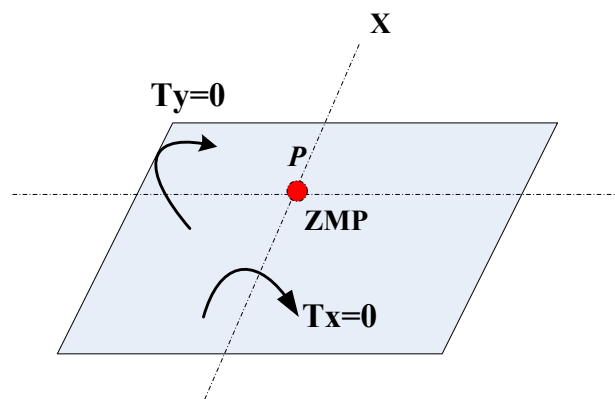


圖 3-3：機器人腳底平面之受力狀況

為了計算出上述之 ZMP 點，我們可以規劃機器人腳底的受力狀況[11]來完成，如下圖 3-4 所示。

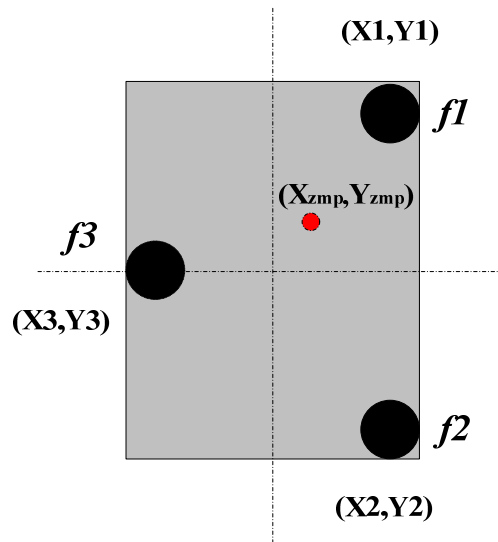


圖 3-4：ZMP 點之受力規劃圖

已知通過 ZMP 點之 X 軸與 Y 軸，不管是由內力或重力所產生的淨力矩皆為零，在此即利用此觀點對其 X 軸與 Y 軸之受力狀況分開分析此規劃圖

X 座標系

$$(X_{zmp} - X_1) f_1 + (X_{zmp} - X_2) f_2 + (X_{zmp} - X_3) f_3 = 0 \quad (3-11)$$

Y 座標系

$$(Y_{zmp} - Y_1) f_1 + (Y_{zmp} - Y_2) f_2 + (Y_{zmp} - Y_3) f_3 = 0 \quad (3-12)$$

最後將 (3-11) 式和 (3-12) 式經過移項整理可得所求之 ZMP 公式

$$X_{zmp} = \frac{X_1 f_1 + X_2 f_2 + X_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \quad (3-13)$$

$$Y_{zmp} = \frac{Y_1 f_1 + Y_2 f_2 + Y_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \quad (3-14)$$

在此重點為如何得知 f_1 、 f_2 、 f_3 的壓力值，若可求得目前其分別的壓力值，則代入 (3-11)、(3-12) 式後即可計算出雙足機器人即時之 ZMP 點了。

為了得知 f_1 、 f_2 、 f_3 的壓力值，在此以 Phidgets Inc.[28]所生產的壓力感測器 (Force Sensing Resistors, FSR)，量測上述規劃好之雙足機器人腳底壓力分佈點 f_1 、 f_2 、 f_3 。圖 3-5 為 FSR 實體圖與規格大小。

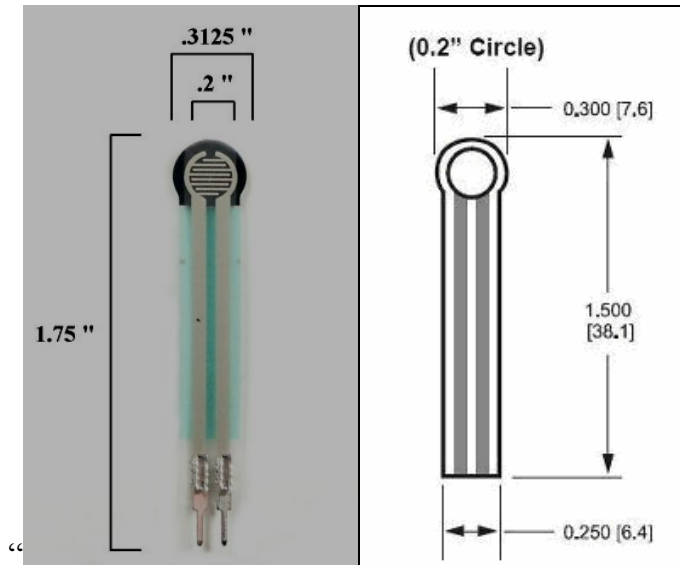


圖 3-5：Force Sensing Resistors 實體圖與其形狀規格

壓力感測器為多層薄膜的聚合體，其構造如下圖 3-7，功能為當外力施展到其主動表面的區域時，FSR 會隨著外力的增加而電阻隨之下降。除此之外，雖然特性與應變規有很多相似之處，但它們仍有所不同，且當壓力感測器使用在人類觸碰控制的電子元件中，壓力敏感度為最佳化。

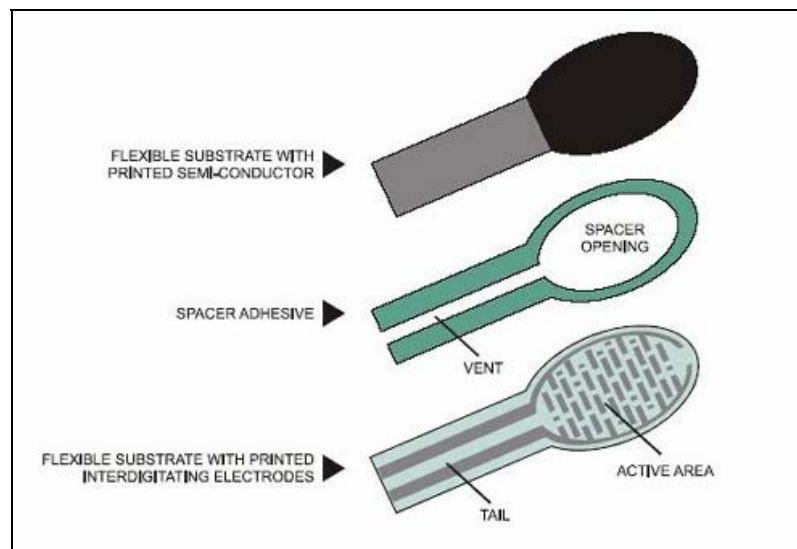


圖 3-6：Force Sensing Resistors 構造分析圖[28]

圖 3-7 為 FSR 壓力對電導的特性圖[28] (電導為電阻之倒數： $1/R$)，在圖中為了作為參考，右邊垂直軸為其左邊電導相對之電阻值。當外力施力於 FSR，其電導即隨外力的上升而上升。圖中虛線部份為其錯誤容忍度之範圍，一般而言，其範圍為正負 15%~ 正負 25%；除此之外，壓力感測器都有一個重大特點，圖 3-7 的右圖為 0 到 1 公斤重的特性放大圖，由此放大圖可知，此款 FSR 在受力由 0g 變為 50g 時，其電阻值會由 100K 急遽下降至 10K，此動態轉折區是取決於每個 FSR 的材質與厚度的不同而有所不同，而用於『PAPA-Man』機器人，50g 後即成線性變化而可量測取用，由於 50g 量值極小，故其之前非線性變化並不造成影響，其實際之壓力量測範圍為 0 到 175 psi (0 到 22lbs 於 0.125in²)。

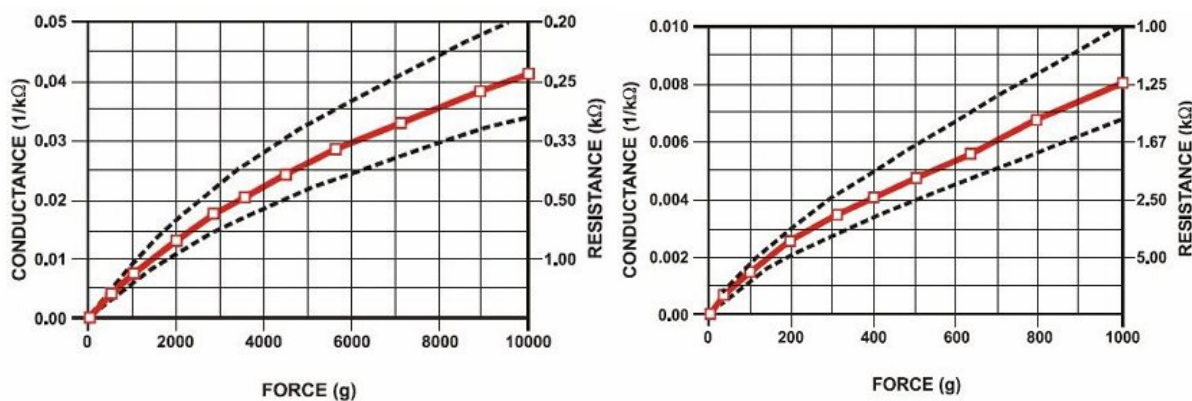


圖 3-7：Force Sensing Resistors 壓力對電導特性圖

故實際將壓力感測器(FSR)配置於機器人雙足腳底，如之前圖 3-4 之概念，我們實際規劃 FSR 裝至於機器人腳底如下圖 3-8、圖 3-9

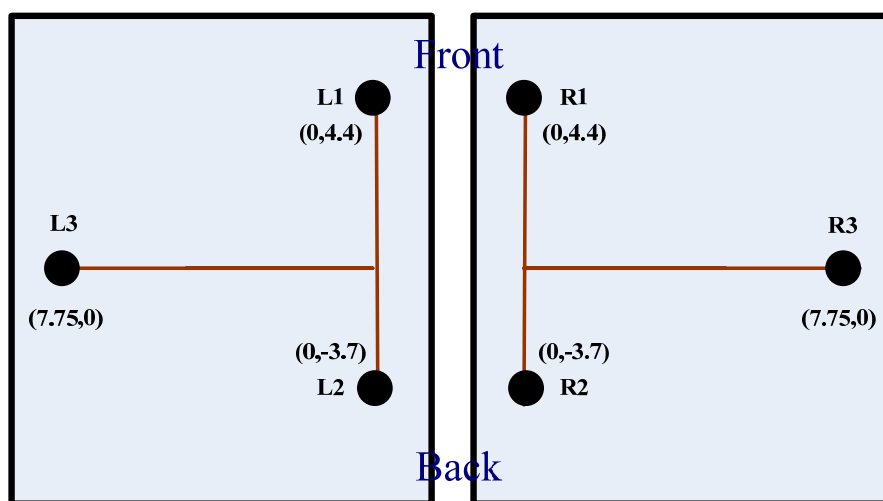


圖 3-8：FSR 於『PAPA-Man』腳底規劃配置圖

在此雙腳之座標軸為分開獨立規劃。因為機器人雙足在運動時，左右腳常會有相對移動的現象，容易造成數值上的誤差，左右腳的座標規劃如下表所示

表 3-1：左右腳之座標規劃表

左右腳	X 座標軸 (cm)	Y 座標軸 (cm)
L1、R1	0	4.4
L2、R2	0	-3.7
L3、R3	7.75	0

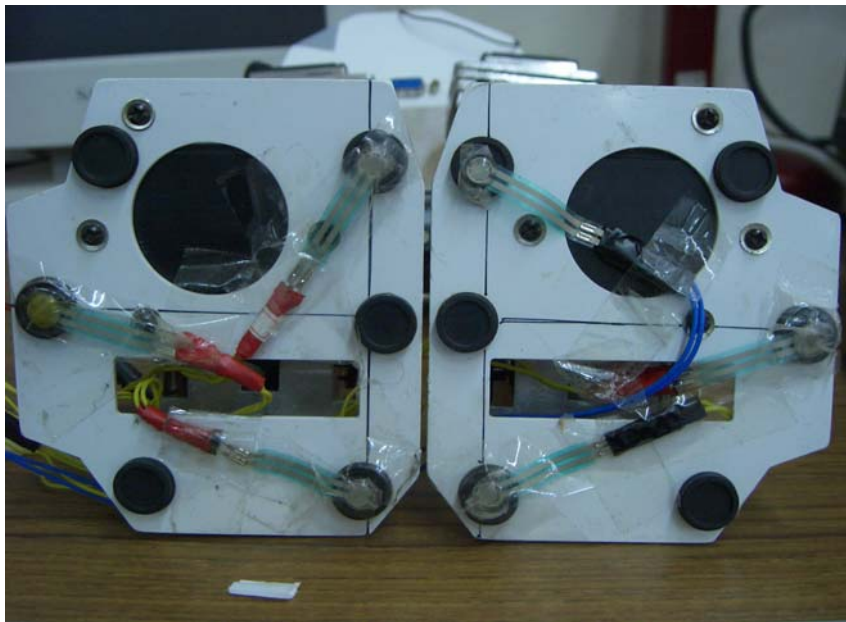
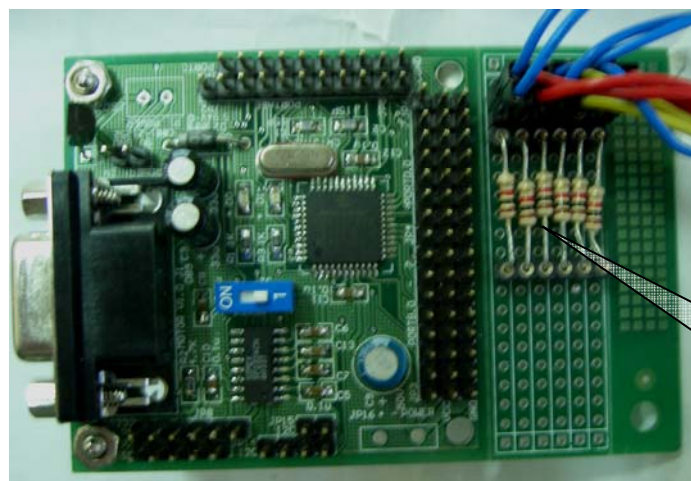


圖 3-9：FSR 於『PAPA-Man』腳底實際配置圖

接下來利用下圖電流轉換成電壓之電路，就可以把 FSR 的電導直接以電壓的方式等比輸出，並在此以閘道伺服層 PIC 的 A/D 取出電壓數位化後的量值。



FSR 電流、電壓轉換電路

圖 3-10：閘道伺服層與 FSR 轉換電路

由於自行規劃 FSR 各個位置，故可得每個 FSR X 座標與 Y 座標之確切數值，且 f_1 、 f_2 、 f_3 的壓力值也可由上述之方式，利用閘道伺服層的 Sensor 控制板中 PIC18F452 的 8 個 A/D channel 8 bit 取出此六個壓力感測器經電流、電壓轉換電路後電壓數位化後之量值。

最後，將這些參數值代入 (3-11)、(3-12) 式後便可求得雙足機器人即時之 ZMP 點。接下來的章節，便是利用此即時算出之 ZMP 點對雙足機器人作進一步的智慧型控制以及演算。



3.3 開道伺服層智慧型平衡演算之實現

雙足機器人之即時平衡過程中，最重要的就是控制其 ZMP 點保持於穩定區域內以維持平衡，因此利用 FSR 壓力感測器獲取機器人 ZMP 點的位移與速度差後，即可藉由此節的智慧型演算法-模糊邏輯，設計一模糊平衡控制器，修正雙足機器人之關節角度來操控平衡因子 ZMP 於所預想之位置，達到雙足機器人即時平衡控制之目的。

如下圖所示，為機器人平衡控制系統方塊圖，模糊平衡控制器有兩個輸入變數 (E_{zmp} & E) 與一個輸出變數 $\Delta\theta$ 。其中 E_{zmp} 為機器人目前取樣 ZMP 與前次取樣 ZMP 在一單位時間內的相對速度誤差值 $E_{zmp} = ZMP^n - ZMP^{n-1}$ ； E 則為目前取樣 ZMP 與機器人預期之 ZMP (r_c) 的絕對位移誤差值 $E = ZMP^n - r_c$ 。在此便是以 ZMP 的絕對位移誤差 E 與相對速度誤差 E_{zmp} 為輸入變數，經模糊平衡控制器的演算，得到輸出變數 $\Delta\theta$ ，修正雙足機器人的馬達角度而維持機身之平衡。

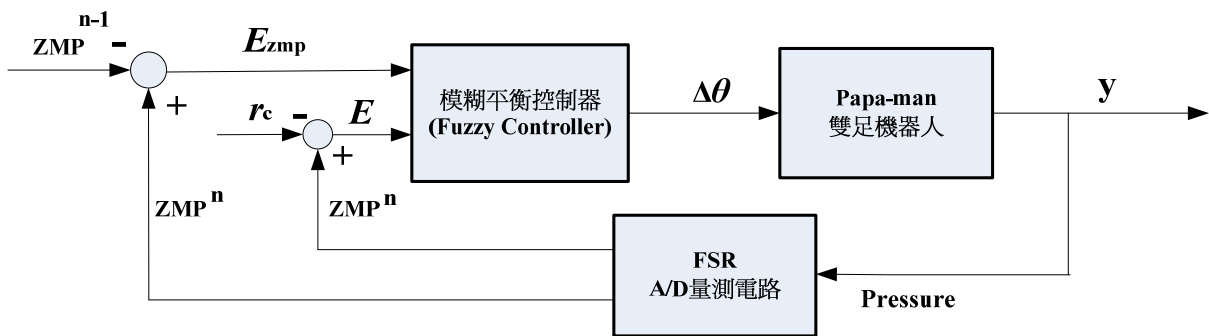


圖 3-11：平衡控制系統方塊圖

進一步對模糊平衡控制器加以說明，如圖 3-12 所示。模糊平衡控制器分別對左右平衡與前後平衡獨立分析，機器人的 X 軸代表機器人運動之左右方向，Y 軸則代表機器人運動之前後方向，故輸入變數 E_{zmp} 和 E 包含了 X 方向與 Y 方向的誤差量，輸出變數 $\Delta\theta$ 也包含了 X 方向與 Y 方向的角度調整量。

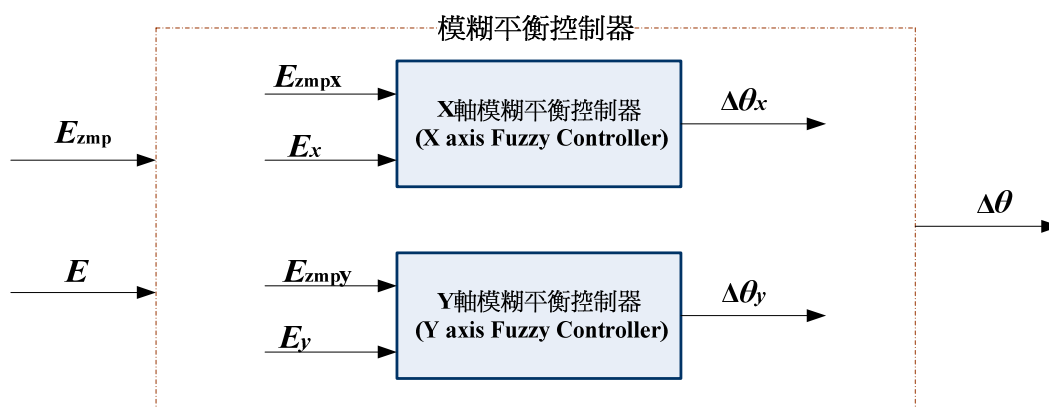


圖 3-12：模糊控制器方向示意圖

3.3.1 模糊控制器程式演算流程

本論文採模糊理論之主要原因為其具有不完全依賴或不依賴被控制系統數學模式之特性，而是以知識推論、操縱經驗以及控制系統的參考訊息(如控制輸出、誤差、延遲)等，得出相對應之控制動作。由於此特點，模糊控制在不確定性、非線性等複雜系統上，具有比一般方法良好之強健性及適應性。在此，『PAPA-Man』雙足機器人模糊控制器的演算步驟如圖 3-13。茲每個流程簡述如下，並在其餘各小節進一步說明實做方法。

(1) 定義輸入與輸出變數(Crisp Input, Output)

決定出受控系統哪些狀況是必須被觀察、量測，設定為輸入變數；而哪些是必須被控制的，則設定為輸出變數。

(2) 定義各變數模糊化的條件(fuzzifier)

按實際狀況考慮輸出入變數的量測與操作範圍，決定出變數的模糊分割與論域(Universe of Discourse)。然後安排每個變數的語言表示項及相對的歸屬函數。

(3) 設計控制規則與模糊推論(Knowledge Base & Fuzzy Inference)

通常可以由專家的知識和操作者的經驗配合實際實驗的結果，轉化成語言式的控制規則，在此為機器人判斷該如何平衡之思考邏輯。

(4)選擇解模糊化的方法(Defuzzifier)

把推論完成的模糊輸出量轉成實際明確值(Crisp value)，這項工作為解模糊化，在此就是利用解模糊化後的明確量，對馬達的輸出角度加以修改補償。

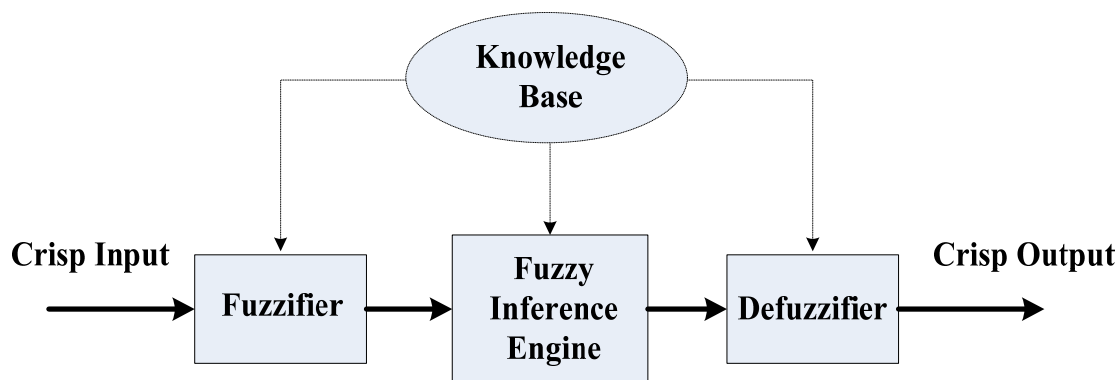


圖 3-13：模糊平衡控制器內部程式演算流程圖

3.3.2 控制器輸入與輸出之歸屬函數

已知模糊平衡控制器的三個變數後，第一步驟就是將系統所有變數之訊號轉成模糊邏輯的表示方法，所以需先經由模糊化的過程，將其轉為以歸屬函數及歸屬度的表示法；在模糊分割方面，選用三角形規屬函數為系統的歸屬函數，每一個輸入皆對應至兩個歸屬函數且有相對應之歸屬度，在此每個變數切割成五個模糊區塊，NB(Negative Big) 代表負大、NS(Negative Small) 代表負小、ZO(Zero) 代表剛好、PS(Positive Small) 代表正小、PB(Positive Big)代表正大；在模糊控制器設計時，該選取多少個模糊集合來分割變數空間並沒有一定的標準，一般而言，選擇個數多的模糊集合時，制定模糊推論的規則會比較精細，因此推論上較為靈活，但是會造成規則的複雜化與資料量過於龐大的缺點，致使模糊推論的過程時間太長，間接影響控制器的性能。目前在許多發表的文獻中，大多採用模擬和實驗的方法來決定變數空間劃分的方式，由於在此為即時控制之設計，經由多方的嘗試之後，為了減低計算量與增加靈活性，故採取了常用的 5 個模糊集合。

圖 3-14 為輸入變數 E 之歸屬函數圖， E 為目前 ZMP 取樣與機器人理想之 ZMP (r_c) 的絕對位移誤差值 $E = ZMP^n - r_c$ ，由 3.4 節可知，理想 ZMP (r_c) 位在雙足的連線中心上，故其論域取決於機器人 ZMP 點距理想 ZMP 點之最大距離，由於 *PAPA-Man* 雙足機器人單腳掌之有效穩定長度為 7.5 公分，故其論域依此長度設定為 $[-7.5, 7.5]$ ； E_{zmp} 之歸屬函數亦為同理，如圖 3-15 所示， E_{zmp} 為機器人目前取樣 ZMP 與前次取樣 ZMP 的相對速度誤差值 $E_{zmp} = ZMP^n - ZMP^{n-1}$ ，其論域主要取決於機器人 ZMP 點的穩定範圍，*PAPA-man* 單腳掌之有效穩定長度是 7.5 公分，因此雙腳支撐面的長度為 15 公分，為 2 個 ZMP 點所能跑到的最遠距離，故誤差量的論域為 $[-15, 15]$ 。最後依照上述的三角形歸屬函數等距切為 5 個模糊集合。

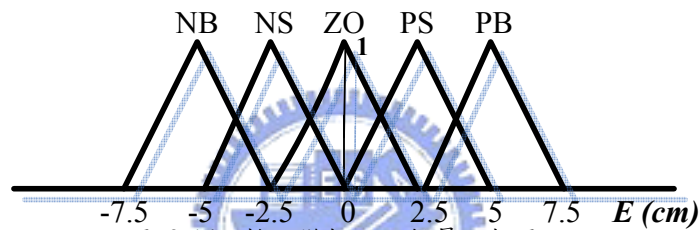


圖 3-14：輸入變數 E 之歸屬函數圖

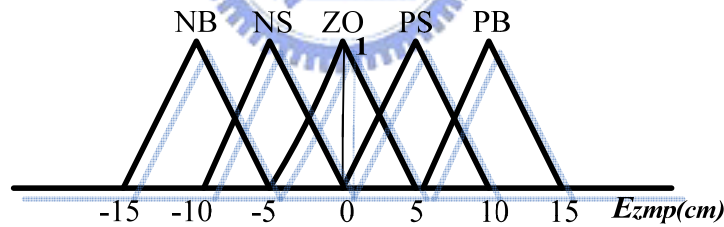


圖 3-15：輸入變數 E_{zmp} 之歸屬函數圖

而輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖設計則較為複雜， $\Delta\theta$ 的論域是依腳踝關節和髖部關節角度調整與重心位置變化之關係，依其實驗結果而決定的數值，其詳細的設計過程不在此描述，請參考附錄之推導。

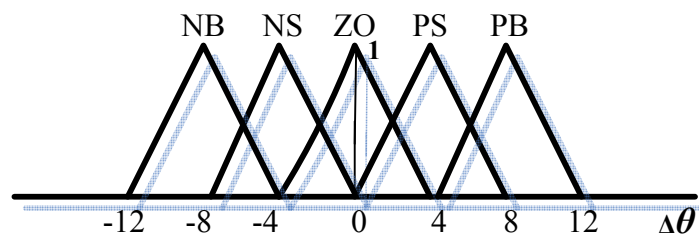


圖 3-16：輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖

3.3.3 模糊規則庫

在此平衡控制器的規則庫，為機器人判斷平衡輸出之依據，模糊規則一般是根據實驗結果、物理特性與系統控制的要求所訂定出來，因此模糊控制為非線性式的控制，在受控系統無法以線性數學模式精確描述的情況下，只要經由適當調整控制規則，即可對非線性的模型加以控制。在此的表示法如下：

$$\begin{array}{c} | \leftarrow \text{命 題 部} \rightarrow | \quad | \leftarrow \text{推論部} \rightarrow | \\ R^i : \text{if } E_{zmp} \text{ is } A_{i1} \text{ and } E \text{ is } A_{i2} \quad \text{then } \Delta\theta \text{ is } B_i \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

其中：

i ：控制規則的編號

E_{zmp}, E ：命題部的輸入變數

$\Delta\theta$ ：推論部的輸出變數

A_i, B_i ：模糊集合



由於機器人系統即為一複雜之非線性模型，因此相當適合以模糊理論來加以控制。在此平衡控制器的規則庫，有如人類大腦之思維抉擇，為機器人平衡輸出轉角之判斷依據，因此模糊規則庫訂定的好壞立即嚴重影響到機器人平衡之效能，故勢必需對此議題作一深入之探討。有鑑於模糊規則庫制定的重要性，本論文在此提出一針對機器人平衡之模糊規則庫的訂定法則。

一般機器人在平衡控制時，主要為保持 ZMP 點在穩定區域且操控機身與地面平行以維持平衡與穩定度。故由上述影響機器人之平衡因子中可發現，平衡控制是有脈絡可循的，我們進一步藉由本論文所設計之 ZMP 視窗觀測軟體(5.1 節)可得知，若機器人目前之 ZMP 值為小負，即目前重心是在身體稍微偏左方，假設地面同時發生稍微右傾之現象，可由 ZMP 視窗觀測軟體發現其 ZMP 會由左方移動至中央方向；進一步，若地面繼續往右小幅度傾斜，則 ZMP 點從中央移動

至身體偏稍微右方，此時若我們能夠再轉動機器人左右方向之馬達角度往左小幅度轉動，即可以影響 X 方向之 ZMP 點，使得偏右方的 ZMP 點，再度回到中央。因此我們可以發現影響 ZMP 而使機器人保持平衡有三大要素，第一為機器人目前之 ZMP 方向、第二為地面傾斜之程度、第三則為機器人馬達之轉角；綜歸以上之實驗測試結論，我們可以在此特別提出一機器人維持平衡之推理法則：

(1)目前機器人 ZMP 點之偏移程度 + (2)地面傾斜之改變程度

+ (3) 機器人轉角欲調整之方向程度 = 水平程度

在此對照模糊平衡控制器的兩個輸入變數 (E_{zmp} & E) 與一個輸出變數 $\Delta\theta$ ，即可發現輸入變數 E_{zmp} 即代表(1)目前機器人 ZMP 點之偏移程度，另一輸入變數 E 即代表(2)地面傾斜之改變程度，最後輸出變數 $\Delta\theta$ 則代表(3)機器人轉角欲調整之方向程度。因此輸入變數 E_{zmp} & E 與輸出變數 $\Delta\theta$ 所建構而成之模糊規則庫，若經由上述所提出之機器人平衡法則作為訂定規則庫之依據，即可成功的作為機器人即時動作中維持平衡之邏輯判斷。進一步，在此繼續提出上述平衡法則如何應用於模糊規則庫之訂定。

本論文提出以權重評分之方式來解決此問題，首先將 3.3.2 節所提出之兩個輸入變數的五個模糊區塊，NB(Negative Big) 代表負大、NS(Negative Small) 代表負小、ZO(Zero) 代表剛好、PS(Positive Small) 代表正小、PB(Positive Big)代表正大，加以權重上之評分，因此訂定 NB 為-2 分、NS 為-1 分、ZO 為 0 分、PS 為 1 分、PB 為 2 分；對照輸出入變數後，帶入上述平衡法則可形成一公式：

$$E_{zmp} \text{ 評分} + E \text{ 評分} + \Delta\theta \text{ 評分} = \text{機器人平衡分數}$$

在此由於操控機器人機身與地面平行以維持平衡與穩定度，故我們希望機器人平衡呈水平之狀態，故定為零分。最後機器人平衡判斷所依照之公式即如下：

$$E_{zmp} \text{ 評分} + E \text{ 評分} + \Delta\theta \text{ 評分} = 0$$

其中框框所表示的即為所求之輸出解，因而可由此平衡判斷公式訂定機器人 X 方向之模糊規則庫。試舉一例，若機器人目前 ZMP 位置為 NB，即目前 E_{zmp} 之評分為左傾兩分；而地面變動程度為 PS，即目前 E 之評分為右傾 1 分，若要使機器人維持平衡，其分數總和 $(-2) + (1) + \boxed{\Delta\theta \text{ 評分}} = 0$ ，故可推之 $\Delta\theta$ 評分即為 1 分，也就是機器人的馬達轉角轉動程度為往右轉動 PS，即可使機器人保持平衡；以下表 3-2 即為依照此評分判定而成之模糊規則表。

表 3-2：x 方向評分判定之模糊規則表

X 方向	E_x					
	$\Delta\theta_x$	⁻² NB	⁻¹ NS	⁰ ZO	¹ PS	² PB
E_{zmp_x}	⁻² NB	⁴ P ³ B	³ P ² B	² PB	¹ PS	⁰ ZO
	⁻¹ NS	³ P ² B	² PB	¹ PS	⁰ ZO	⁻¹ NS
	⁰ ZO	² PB	¹ PS	⁰ ZO	⁻¹ NS	⁻² NB
	¹ PS	¹ PS	⁰ ZO	⁻¹ NS	⁻² NB	⁻³ N ² B
	² PB	⁰ ZO	⁻¹ NS	⁻² NB	⁻³ N ² B	⁻⁴ N ³ B

由此表 3-2 可發現，若將輸入兩變數 E 與 E_{zmp} 皆切割成 5 個模糊集合，其最大之權重評分範圍為正負 2，因此為了維持機器人平衡，輸出馬達轉角最大權重評分範圍為正負 4，也就是理想上切割成 9 個模糊集合，對整個模糊規則表之效能為最佳化。但實際上馬達轉角之模糊切割數要考慮到現實的輸出論域限制，由於 PAPA-Man 機器人馬達轉角的補償論域範圍為 $[-12,12]$ 並不大，若切割成 9 塊模糊集合，則每塊集合所分配到之轉角過為精細，容易遭受輸入變數的雜訊干擾而運行至錯誤之規則，在此考慮到現實之因素，將馬達轉角的補償值切割為與輸入變數相同，常用的 5 個模糊區塊，因而有必要再對表 3-2 做二維之模糊切割並將

$\Delta\theta$ 評分為 2 以上之分數，二維切割成同一區，使分數皆成為 2 分之 PB 區塊；評分負 2 以下之分數亦為同理，二維切割使分數皆為負 2 分 NB，如表 3-3 所示。

表 3-3：x 方向經二維模糊切割之規則表

X 方向	E_x					
	$\Delta\theta_x$	NB	NS	ZO	PS	PB
E_{zmp_x}	NB	P ³ B	P ² B	PB	PS	ZO
	NS	P ² B	PB	PS	ZO	NS
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS	PS	ZO	NS	NB	N ² B
	PB	ZO	NS	NB	N ² B	N ³ B

因此最後之模糊規則庫即可完成，如表 3-4、表 3-5 所示，分別為 x 軸的左右控制器與 y 軸的前後控制器之控制規則表，其中 x 軸控制器共有二十五條規則，而 y 軸控制器也同樣有二十五條規則。

表 3-4：x 方向之模糊控制規則表

X 方向	E_x					
	$\Delta\theta_x$	NB	NS	ZO	PS	PB
E_{zmp_x}	NB	PB	PB	PB	PS	ZO
	NS	PB	PB	PS	ZO	NS
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS	PS	ZO	NS	NB	NB
	PB	ZO	NS	NB	NB	NB

表 3-5：y 方向之模糊控制規則表

Y方向	E_y					
	$\Delta\theta_y$	NB	NS	ZO	PS	PB
E_{zmp_y}	NB	PB	PB	PB	PS	ZO
	NS	PB	PB	PS	ZO	NS
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS	PS	ZO	NS	NB	NB
	PB	ZO	NS	NB	NB	NB

隨意抽取一例作為驗證，若 ZMP 的位置離期望之 ZMP 距離為負的且很遠 (NB)，且 ZMP 的瞬時移動速度為正的且很快 (PB)，表示 ZMP 點正在快速的修正中，因此就不需對馬達關節作角度上的修改 (ZO)，ZMP 位置就可以接近期望位置。此節所提出之平衡法則，使我們可輕易的以此公式推論出模糊規則庫，若將來我們想以此公式推導出更複雜如 49 條規則庫，也可簡單達成如下表所示。

表 3-6：x 方向 49 條規則之模糊規則表

X方向	E_x							
	$\Delta\theta_x$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E_{zmp_x}	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	PS
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
	PB	ZO	PS	NM	NB	NB	NB	NB

3.3.4 模糊推論與解模糊化

在此利用最小推論法則來進行模糊推論的工作。模糊控制器的輸出，仍然為一個模糊集合，解模糊化就是將這個模糊集合轉化為一個明確量，送至受控體統上，控制馬達的轉動。在此解模糊化的方法為常用之重心法(Center of Gravity)，其算法如下所示

$$\Delta\theta = \frac{\sum_{i=1}^n W_i B_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

其中

$\Delta\theta$: 為最後模糊輸出的角度補償值

W_i : 第 i 個控制規則命題部的適合程度

B_i : 第 i 個控制規則推論部歸屬函數中心點對應值

因此最後計算所得的明確角度值，即為機器人處於不穩定狀態下的馬達補償角度，其使機器人整體姿態修改到所預期 ZMP 點的最佳姿態，因而保持平衡。至於解模糊化後所算出的角度要如何補償於機器人的各個馬達，則在下節的 ZMP 控制法則時詳細敘述之。

本論文之模糊推論與解模糊化，在此為線上模糊演算，其模糊控制過程中，每次的輸入都經由模糊推論而即時計算輸出，因此有精確算出推論結果-補償角度 $\Delta\theta$ 的優點；雖然每次都必須重複作推論運算，不像離線模糊演算法事先算出模糊推論的結果而寫成一查詢表 (Look-up table)，以節省計算時間，但卻有常常因為記憶體容量的限制損失了一些精確度而造成誤差的缺點。

3.4 ZMP 控制法則

上節模糊控制器的演算，目的在於控制機器人 ZMP 點。由 FSR 壓力感測器獲取機器人的即時 ZMP 點後，可藉由模糊控制器的設計，控制機器人 ZMP 點保持於穩定區域內以維持身體的平衡；此節的重點即在穩定區域與非穩定區域的定義以及如何藉由輸出轉角操控 ZMP 點於所預想之位置。

當機器人發生傾倒的過程中，ZMP 點總會位於腳掌的邊緣，反之，機器人在穩定站立的姿態時，ZMP 點則位於腳掌的範圍之內，不會有傾倒的現象，因此若我們能將 ZMP 置於腳掌之內，則可維持機器人之平衡。為了要控制 ZMP 點，機器人的腳掌可劃分成兩個區域，分別為”有效穩定區域”與”可能不穩定區域”，由下圖所知，虛線方框內的區域即為有效的穩定區域，而虛線方框至腳掌方框的區域則為可能不穩定區域。Measured ZMP 為目前所量測到的 ZMP，其與腳掌邊緣的距離可從圖中看出由 x 方向的 $d_{zmp}(x)$ 與 y 方向的 $d_{zmp}(y)$ 組成，長度 d 則為腳掌的邊緣至有效穩定區域的距離。

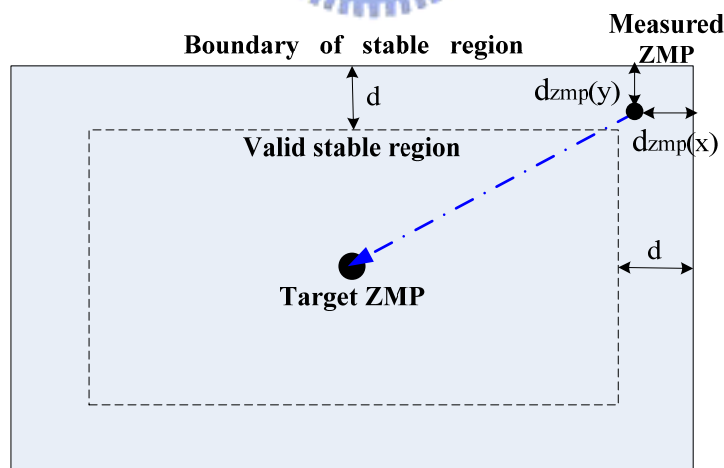


圖 3-17：ZMP 控制過程圖

而機器人腳掌”有效穩定區域”與”可能不穩定區域”的劃分，依每隻機器人的機構設計與重心配置不同，其區域的分割也為不同，為了使各種類型機器人也可套用『*PAPA-Man*』ZMP 的控制法則，在此將虛線方框的有效穩定區域濃縮為一

個點，此點即定義在機器人腳掌之幾何中心點，如上圖之 Target ZMP 點，於本論文稱此點為理想 ZMP 點，在有效穩定區域內，為最理想之 ZMP 穩定點。

接下來為了 ZMP 的補償，我們可以由上圖推導出目前所量測到的 ZMP 與所欲放置到理想 ZMP 點的誤差函數(error function, ε)，在此，x 軸與 y 軸為相互獨立，故誤差函數分別討論之。

$$\varepsilon(x) = \left| 1 - \frac{d_{zmp}(x)}{d(x)} \right|^2 \quad (3-15)$$

$$\varepsilon(y) = \left| 1 - \frac{d_{zmp}(y)}{d(y)} \right|^2 \quad (3-16)$$

(3-15) 式為目前 ZMP 點 x 軸的誤差函數， $d_{zmp}(x)$ 為目前 ZMP 與腳掌邊緣 x 方向的差距，故由(3-15)式可知，若 $d_{zmp}(x)$ 趨近於 $d(x)$ ，則 x 方向誤差函數 $\varepsilon(x)$ 即會趨近於零，意謂著目前量測到的 ZMP 點很接近理想 ZMP 點，由於已知目前 $d_{zmp}(x)$ 之值，若能控制 $d_{zmp}(x)$ 使其趨近於 $d(x)$ ，則 Measured ZMP 即可移動到理想 ZMP 的 x 座標點；(3-16) 式亦同理，為目前 ZMP 點 y 軸的誤差函數，若能控制 $d_{zmp}(y)$ 使其趨近於 $d(y)$ ，則 Measured ZMP 即可移動到理想 ZMP 的 y 座標點。若同時考慮 x 軸與 y 軸，則誤差函數即變成(3-17)所示，控制法則也如同上述所示，但在此論文中，x 軸與 y 軸為獨立分析，並不同時考慮。

$$\varepsilon(x, y) = \left| 1 - \frac{d_{zmp}(x)}{d(x)} \right|^2 \square \left| 1 - \frac{d_{zmp}(y)}{d(y)} \right|^2 \quad (3-17)$$

圖 3-18、圖 3-19 為理想 ZMP 點在『PAPA-Man』的位置示意圖，圖 3-18 表示機器人單腳站立時的理想 ZMP 點，如之前所述，置於三角形的幾何中心點，也就是三角形的重心；圖 3-19 則表示機器人雙腳站立時的理想 ZMP 點，不同於單腳，而是置於左右單腳理想 ZMP 點的連線中心上。

a. 單腳站立時:

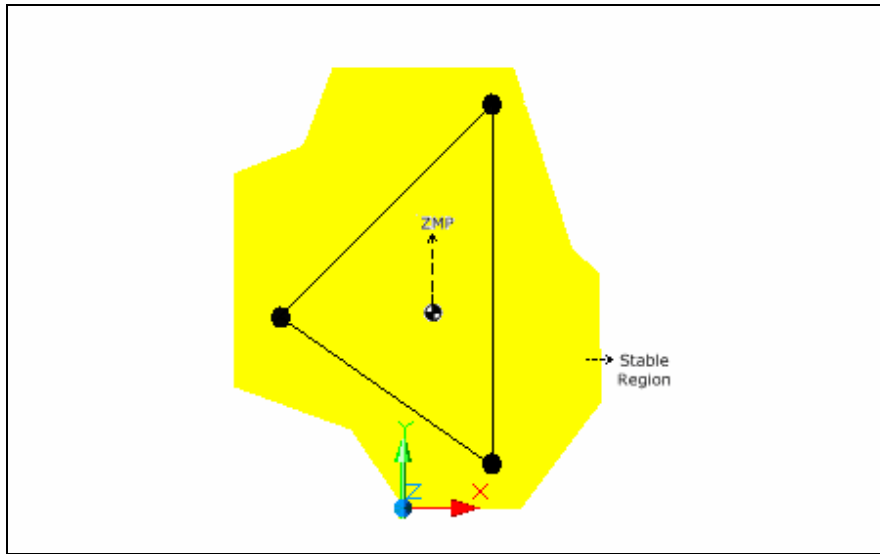


圖 3-18：單腳站立時理想 ZMP 點示意圖

b. 雙腳站立時:

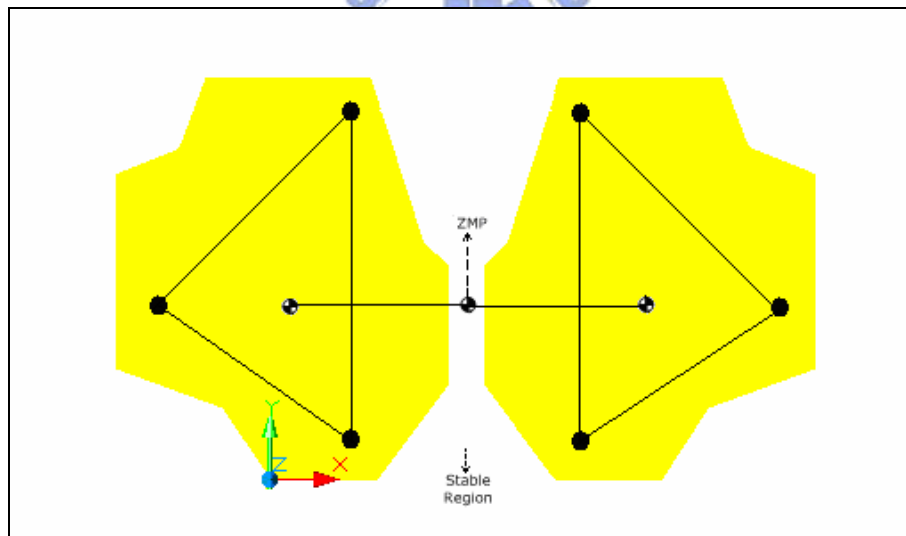


圖 3-19：雙腳站立時理想 ZMP 點示意圖

由上述結論可知，控制 $d_{zmp}(x)$ 使其趨近於 $d(x)$ ，Measured ZMP 即可移動至理想 ZMP 的 x 座標點，而如何控制 $d_{zmp}(x)$ 即為其重點，由於 x 座標表示機器人側面左右的方向，因此 x 方向的 $d_{zmp}(x)$ 受到機器人左右擺動的影響，即 2.1 節圖 2-5：機器人方向 Roll、Pitch、Yaw 座標示意圖定義之 Pitch 左右擺動的馬達關節；

另一方面，y 方向亦為此理， $d_{zmp}(y)$ 受到機器人前後晃動的影響，即示意圖定義之 Roll 前後轉動的馬達關節。表 3-7 即為雙足機器人 d_{zmp} x 方向與 y 方向所受到何種馬達關節影響之關係表。

表 3-7：dzmp(x)、dzmp(y)與所受馬達影響之關係

dzmp(x): 左右擺動(Pitching)	dzmp(y): 前後晃動(Rolling)
腳踝 Ankle	腳踝 Ankle
髖部 Hip	膝蓋 Knee
	髖部 Hip

由上表可知，本論文即是修正雙足機器人相關之關節角度來移動平衡因子 ZMP 至所預想之理想 ZMP 點，以達到雙足機器人平衡控制；以表中的 x 方向為例，影響 dzmp(x)為左右擺動的馬達- Ankle 與 Hip 關節。而雙足機器人 Hip 關節為了保持上半身的水平，仿人類左右平衡時的關節動作，Hip 關節連線的腰部與 Ankle 的關節連線保持為兩條平行線，如下圖 3-20 所示：

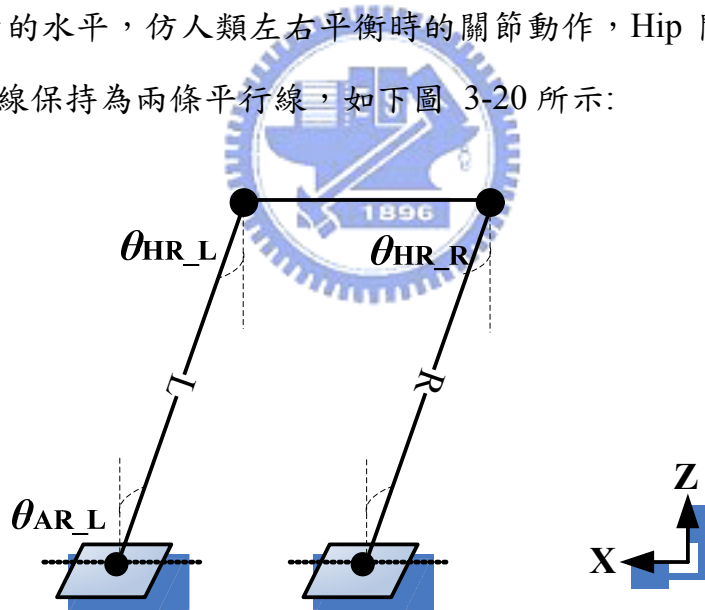


圖 3-20：左右平衡的馬達角度計算

由於 Hip 關節連線與 Ankle 關節連線為兩條平行線，由幾何學平行線的截角性質-內錯角相等的原理，Ankle-Pitch 轉角等於 Hip-Pitch 轉角，可寫成(3-17)式。

$$\theta_{HR_L} = \theta_{AR_L} \quad (3-17)$$

由於人類左右平衡時的雙腳常保持相同姿態，因此機器人的左腳 L 連桿與右腳 R 連桿也設計為相互平行，此時則由平行線的截角性質-同位角相等的原理，

Hip-Pitch_L 轉角等於 Hip-Pitch_R 轉角，可寫成(3-18)式。

$$\theta_{HR_L} = \theta_{HR_R} \quad (3-18)$$

而為了要維持雙足機器人即時的左右平衡，因此要隨時修正 Ankle 與 Hip 關節角度來移動左右平衡因子 $dzmp(x)$ 至所預想之理想 ZMP x 座標位置，在此我們每 50ms 即補償一次馬達角度，即時將 ZMP 放在 Stable Region 內，才能確保雙足機器人即時左右平衡的穩定性；而機器人在不穩定的狀態下，維持機器人平衡而馬達所要補償的度數則是利用上一章模糊平衡控制器的輸出結果 $\Delta\theta$ ，以開道伺服層的智慧型平衡演算來求出，故機器人可智慧地判斷該補償多少角度，而維持其平衡，如圖 3-21 的 3D 模擬圖所示，最後可推之馬達的補償結果。

$$\Delta\theta = \theta_{HR_L} = \theta_{AR_L} = \theta_{HR_R} = \theta_{AR_R} \quad (3-19)$$



圖 3-21：雙足機器人 PAPA-Man 於地面左傾、右傾時之模擬平衡 3D 圖

同理，機器人之前後平衡亦為此概念，馬達角度計算如下圖 3-22 所示，

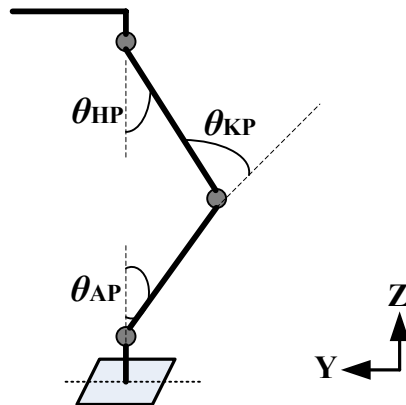


圖 3-22：前後平衡的馬達角度計算

其前後平衡受到 Ankle、knee 與 Hip 關節的影響，其角度的關係如(3-20)式，由於機器人 *PAPA-man* 為下半身雙足之設計，故受上半身的影響不大，因此可簡化其馬達關節的影響，在此省略 Hip-Roll 關節只考慮 knee-Roll 與 Hip-Roll 關節角度的補償。

$$\theta_{AP} = \theta_{KP} - \theta_{HP} \quad (3-20)$$

因此左右平衡與前後平衡皆為利用模糊控制器的輸出角度，對分別所受影響方向的馬達進行角度的補償，目的皆欲使其方向之 ZMP 點移到所預想之理想 ZMP 點，而使機器人處於最理想 ZMP 點的機構姿態，在此即稱為雙足機器人的理想姿態。因此亦可說，機器人在即時平衡的過程中，皆是以其理想姿態為目標，隨時進行馬達角度的修改，使機器人永遠保持在理想平衡的狀態，而對外界的刺激有最靈活的反應。至於機器人即時模糊平衡能力實際上的數據分析，則到第五章的控制介面與實驗結果再做討論。



第四章 平衡穩定性之改進

建立完雙足機器人即時平衡控制系統後，便可進一步探討雙足機器人在即時平衡的過程中所遭受到的重要問題-穩定性。一般機器人在運動過程中，除了會有是否精確達到預定動作的問題外，最容易面臨的是在運動過程中是否有足夠的穩定性；而機器人在即時的平衡動作中，常常受到外界刺激性的資訊而有激烈的動作產生，因此，在探討機器人即時平衡的問題，除了機器人有沒有確實的做出平衡的反應動作外，其穩定性分析更格外重要，一旦具有良好的穩定性後，對外界即時改變的刺激才能做出快速且靈敏的反應。

在此章，我們對於機器人常發生不穩定的現象提出一解決方法。搖晃與中央震盪的現象為機器人產生不穩定動作的主因，在此提出以非主動性的 Data Moving average 與主動性的智慧型控制馬達轉速之方式，改進雙足機器人在運動時之整體穩定性。



4.1 Data Moving Average

為了解決機器人不穩定產生的搖晃與中央振盪現象，在此以兩種解決方法相互配合而預期到達最佳效果，分別為主動性的方法與非主動性的方法。由於 *PAPA-Man* 是以腳底的壓力感測器 FSR 來量測外界的資訊，而外界的資訊，除了所欲量測的真實資料外，還常常包含了電子電路所帶來的雜訊與外界干擾所突然產生的錯誤資料等，而量測到的錯誤資料也因此會對機器人目前重心位置的計算造成誤判，進而馬達角度錯誤的補償，使得機器人產生不穩定的動作；由於此些錯誤資料是不可避免的，也很難加以消除，在此首先使用非主動的方法，不消除雜訊反之接受雜訊的存在，以 Data Moving average 的方式如圖 3-1 所示，目的為減少外界雜訊與干擾的影響與降低雙足機器人欲停止在正中央時卻來回振盪之現象。

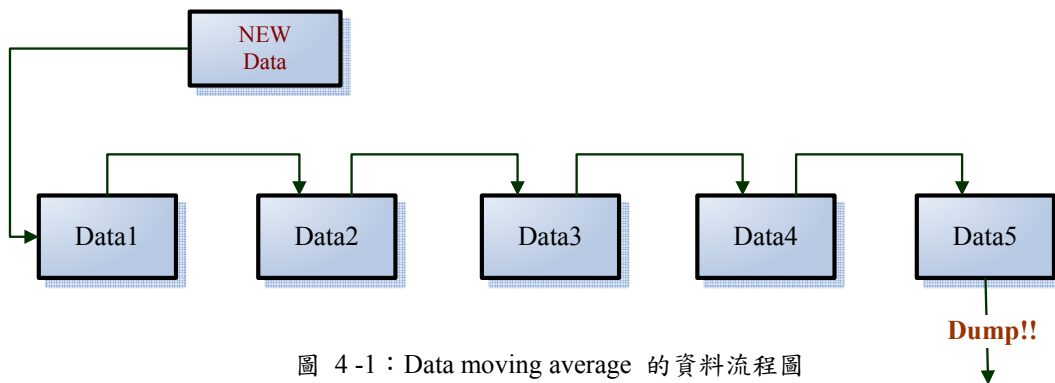


圖 4-1：Data moving average 的資料流程圖

上圖為 Data moving average 的資料流程圖，在此每一筆的資料是指 6 個 FSR 所計算而得的 ZMP 值，其 window 數目設為 5，故同時會處理 5 筆的資料；Data 1 為前一筆資料取樣時所計算出之 ZMP 值，Data 5 則為前 5 筆資料取樣時所計算出之 ZMP 值，Data 1~Data 5 皆暫存在 PIC 的 buffer 之中，而 New Data 是指目前當下所計算出最新的 ZMP 點。當最新的 ZMP Data 進來後，如流程圖所示，每一筆資料皆往右移一位，最新的資料就移動到 Data1 的位置上，Data4 因此移動到 Data5 的位置上，因為只考慮 5 筆 data，故原本的第 5 筆資料就捨棄不用，其最後輸出即為真正考慮的 ZMP 點，其演算法為

$$\text{Output ZMP} = \text{moving average value} = \frac{\sum_{i=0}^{w-1} \text{Data}(i)}{W}$$

其 moving average 值為此五筆資料相加除以 windows 個數，W 為所設之 windows 個數，在此 W = 5，而利用 moving average 所算出之值，即代替目前所量測到包含雜訊的 ZMP 值，為目前真正考慮的 ZMP 值。Moving average 後的 ZMP 值，為所量測到前五筆 ZMP 的平均值，由於目前 FSR 的 Sampling Rate 為 50ms，而取樣 5 筆的資料所需花的時間為 250ms，在 250ms 這麼短的時間內取 5 點，基本上機器人仍為同一個姿態，故這 5 點 ZMP 值應相差不大，若當最新量測到的 ZMP 值和前面四個 Data 值比較起來有明顯之差距，此值即有可能為突然遭受到外界雜訊與干擾的影響而受到變動，故在此利用受到干擾的 ZMP 值與前面四個

ZMP 值做一平均，藉此減少外界雜訊與干擾對雙足機器人運動時所造成的影響，而增進其穩定性。

除了減少雜訊與干擾外，利用 moving average 最大的優點為減輕機器人欲停在正中央卻因慣性而有來回振盪的現象；一般來說，中央來回振盪為機器人在左右運動所常常發生的重大難題，也是一般機器人不穩定的主要原因之一，而藉由 FSR 所傳回的資訊可直觀發現，機器人之所以會在中央左右搖晃，為機器人產生連續正負、正負的 ZMP 值，因此若能消除或控制此連續正數與負數 ZMP 值或許可避免此來回振盪的現象。在此利用之前提到 data moving average 前五筆 ZMP 相加後再平均的特性，若新進資料為連續的正負值，其相加後幾乎可正負抵銷，雖然整體平均後的 ZMP 值有小幅度的改變，但是這樣一來便消除連續正數與負數 ZMP 的現象，再加上資料的取用類似佇列存取之方法，一旦新進一筆資料後即平均計算一次，而不是累計五次後才一併計算，故沒有 down sampling 般造成資料解析度下降之問題，依舊是每 50ms 傳出其判斷之 ZMP 值，而能有效的減輕機器人在中央不斷來回振盪的現象。

由上可知，moving average 非主動式的優點為減少雜訊與干擾的影響與減輕機器人中央來回振盪的現象，而值得一提的是，moving average 中， W 為所設之 windows 個數，而 W 個數的多寡則是隨機器人環境狀態的不同可自由調整的，從另一個觀點看來， W 的設定為降低信號的頻寬，類似一個低通濾波器，當 W 個數越多，則濾掉越多的高頻雜訊，因此信號的頻寬越低，益加減少雜訊與干擾的影響，但相伴隨之而來的壞處是對外界反應不靈敏，可能無法即時對外界訊號的刺激作反應且維持機器人本身之平衡；由於此矛盾現象，因此如何設定 W 的範圍是一個重要的課題，在此選定 $W=5$ 是因為一個取樣點所花的時間為 50ms，而 5 個取樣 250ms 時間對機器人的姿態並不會造成太大的影響且配合實驗結果觀察，才選定了一個既有效果而不至影響機器人靈敏度之 W 值。

4.2 智慧型馬達速度控制

以非主動 Moving average 的方式，雖然減少了外界雜訊的影響與降低機器人在中央來回震盪的現象，但並不全然解決了震盪的問題。在機器人的動作控制過程中，由於慣性力的作用使雙足機器人的移動不免發生過衝與震盪的現象，尤其在速度快時。雙足的震盪可能造成機器人本身失去重心而跌倒。因此在有些時候會需要伺服馬達轉速快一些，而有時候慢一些，甚至能智慧地感測到外界環境的變化而隨之改變其轉動速度。在此提出主動式控制馬達轉速的方法，並加入了智慧型馬達控速的程式，能使雙足機器人在運動時更為穩定，並配合 Moving average 非主動的方式，大為改進雙足機器人在運動時之整體穩定性。

4.2.1 軟體速度控制

為了要控制伺服馬達的轉速，首先要從伺服馬達的特性提起，傳統而言，在定電源電壓下伺服馬達的輸出轉速是固定的，無法改變其速度，因此所輸入的 PWM 訊號只能指定其轉軸的角度位置，即做角度的控制。以所使用的雷虎 ds-1013 伺服馬達為例，若電源為 6 伏的狀態下其速度為 0.108 秒 /60°，表示此顆伺服馬達轉 60 度需要 0.108 秒的時間，這是它的特性，單純的方式是無法改變的，除了一些特殊昂貴高階的馬達外，目前所採用的伺服馬達並不具備這種功能。因此若提升速度從硬體方面著手，可能從施加電壓，或是由馬達本身電路上改造起，這方面就比較冒險且無法精準控制；雖然提升伺服馬達的固定轉速在改造硬體較為困難，但若將伺服馬達的轉速降低則似乎較為可行，因此在這從軟體方面著手，可以從控制程式的寫作改起，只要想辦法延遲伺服馬達的轉軸速度即可。在尚未控速前的馬達控制程式中指令角度的指定是直接的，給予多少度，伺服馬達就以最快速度轉過去，若以延遲轉速的方式就是在目前角度與目標角度之間切成許多等分，每當轉軸轉至每個等分點時就在那裡停留一下，再轉至下一

個等分點，依序轉至最後的目標角度。如此一來就會比一開始直接轉至目標角度來得慢一些，在此尚未加入智慧型的軟體控速就是利用此原理所造的。

依此原理將馬達欲到達的角度以及初始角度分別存起來，並先判斷要旋轉的方向後，接著將角度差取出，根據選擇的馬達速度，將角度差分割，再一段一段的輸出，也就是一種線性分割的控速，如下圖所示：

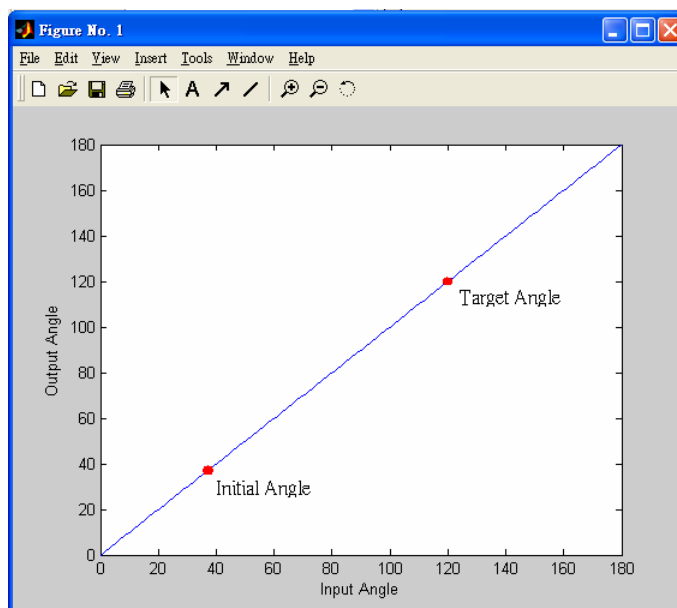


圖 4-2：馬達的線性分割控速

而除了利用線性的方式控制馬達的速度外，亦可用 exponential 函數逼近的方法，如圖 4-3：

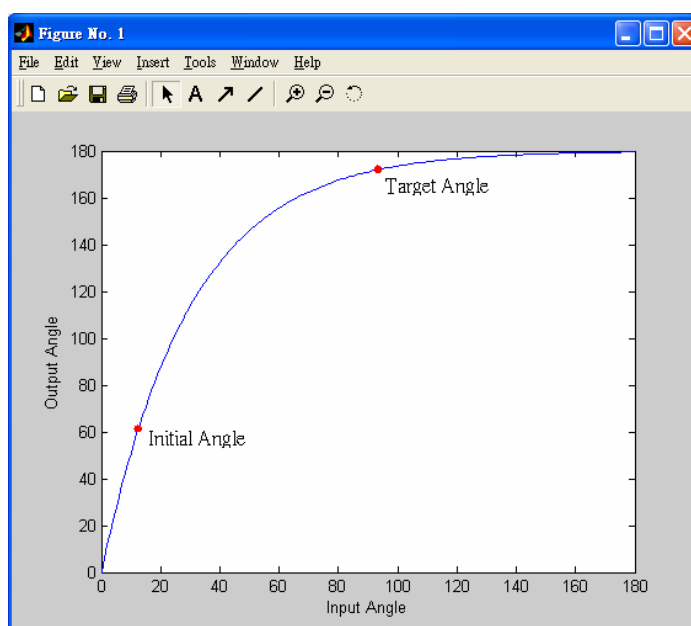


圖 4-3：馬達的指數分割控速

本論文主要是以上述線性的方式對一次移動的角度做分割，然後再一次一次的丟到伺服馬達中，但用軟體控速仍有一些限制，比如說不能不斷的丟封包到微處理器中，不然會使得處理器當機，而有不太流暢的情形發生，若未來提昇硬體上的運算量，就能改善此種情況。而若欲再提昇馬達的段數，要注意的先決條件就是要在目前角度位置與目標角度位置之間盡量切得很多區間，這樣才可以在分割點的停留時間短一點，但分割點很多轉至目標角度所需花的時間很長，若要達到速度慢卻又不會有停頓、抖動的現象，對於這樣的要求即表示需要高解析度的角度位置控制；目前馬達控速的範圍由 0 到 9 共 10 段，其中第 0 段為原始轉速，速度最快，不加以任何控制。第一段為最慢，然後依段速增加而變快，在後面幾段較快的段速中由於馬達所轉的等距角度較大，故在停止等待下一個 PWM 訊號時，容易受到馬達衝量的影響，比較有停頓、不順的現象發生。

4.2.2 模糊速度控制

經由上述軟體操控的方式，使馬達本身具有可控制其轉速的功能，雖然馬達已可被控制其旋轉，但決定馬達要以多快的段速運轉，仍然是由操控者判斷並下達其指令，機器人本身無法自行作馬達段數的調整，且若操控者下達一轉速命令，則機器人在平衡運動過程中，只會依照此固定轉速作平衡，無法一邊平衡一邊自行判斷要以多快的速度。此節延續『*PAPA-Man*』的智慧型架構，並結合上節的軟體控速，提出智慧型馬達控速- 模糊速度控制的方式，使機器人感測到外界環境的變化而能自我判斷並隨之改變其轉動速度。

模糊速度控制並無重新設計一個模糊演算法則，而是延續了『*PAPA-Man*』開道伺服層的模糊平衡演算架構，以模糊平衡解模糊化後的輸出-馬達角度補償值為依據，依照此維持平衡狀態所需補償的角度值，精確的規劃出一個 Look-up table，並藉由此查表的方式，設計出速度控制的法則，系統方塊圖如圖 4-4 所示，加強了原本平衡系統的架構，與其不同的是，由於新增智慧型馬達控速的功能而

加入了一個馬達控速的 Look-up table 區塊，如下所示。

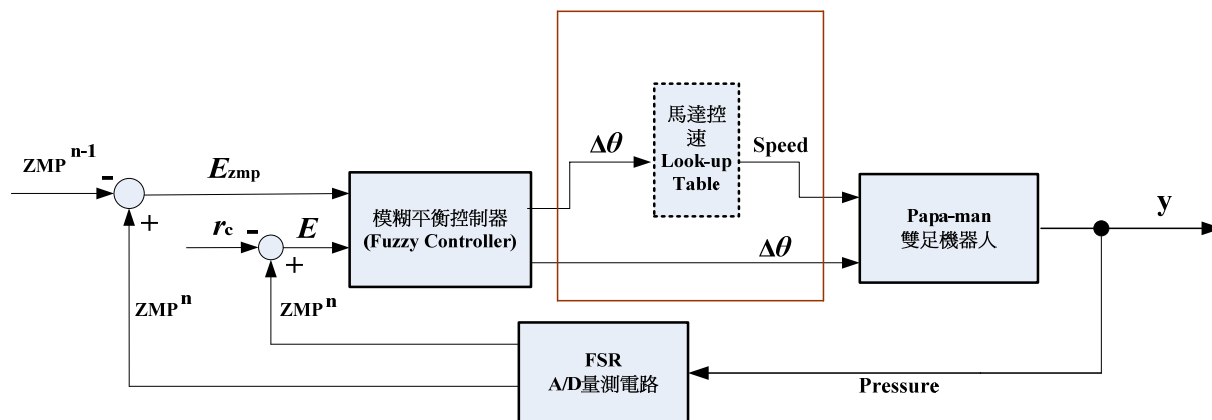


圖 4-4：速度控制系統方塊圖

此 Look-up table 區塊，將模糊平衡器的輸出-馬達角度補償值為依據，做出相對應速度的判斷，從輸出補償的正 12 度到負 12 度，每一個補償角度都有相對應的速度規劃，其規劃機器人速度與補償角度的 Look-up table 如下表，因此便可利用查表的方式，立即找出其對應之速度值，並連同補償角度一起輸入 PAPA-man 雙足機器人。

表 4-1：馬達段速之 look-up table

補償角度	馬達段速	補償角度	馬達段速
		0°	Speed 2
-12°	Speed 5	1°	Speed 2
-11°	Speed 5	2°	Speed 2
-10°	Speed 5	3°	Speed 4
-9°	Speed 5	4°	Speed 4
-8°	Speed 5	5°	Speed 5
-7°	Speed 5	6°	Speed 5
-6°	Speed 5	7°	Speed 5
-5°	Speed 5	8°	Speed 5
-4°	Speed 4	9°	Speed 5
-3°	Speed 4	10°	Speed 5
-2°	Speed 2	11°	Speed 5
-1°	Speed 2	12°	Speed 5

至於 Look-up table 是如何規劃速度的呢？由上節所知，利用軟體控速的方式可使馬達有 0~9 段的速度變化，在此先探討每段速的詳細速度，如下表

表 4-2：馬達段速規格表

段速	規格	速度	描述
Speed 1	每5個週期 累加1°	60 ms/1°	最慢
Speed 2	每4個週期 累加1°	48 ms/1°	慢
Speed 3	每3個週期 累加1°	36 ms/1°	慢
Speed 4	每2個週期 累加1°	24 ms/1°	中
Speed 5	每1個週期 累加1°	12 ms/1°	快
Speed 6	每1個週期 累加2°	6 ms/1°	極快
Speed 7	每1個週期 累加3°	4 ms/1°	極快
Speed 8	每1個週期 累加4°	3 ms/1°	極快
Speed 9	每1個週期 累加5°	2.4 ms/1°	極快
Speed 0	全速轉動 0.108 秒/60°	1.8 ms/1°	最快

此 10 段速中，各有各的特性與規格，在建立的 Look-up table 中，就是依據各段速特性不同而有所其規劃，其中 6~9 段為最高速運轉，使機器人在動作控制過程中容易有高度慣性力的過衝現象，因此 Look-up table 並不採取最高速的 6~9 段，而剩餘之 1~5 段，排除最慢速的第一段後，即開始規劃。在此採取三階段的速度控制，高速 **FAST**、中速 **Mid** 和慢速 **Slow**，此設計為三段控速，使雙足機器人在即時平衡能同時有快、中、慢三種速度來應对外界的變化。最後綜合以上各段速的特性結果，規劃高速為第 5 段、中速為第 4 段、慢速則為第 2 段。設計好雙足機器人的速度規劃後，以下將 Look-up table 畫成馬達段速與補償角度對應圖，即可清楚表明角度的規劃狀況。

圖 4-5 為馬達段速與補償角度之對應圖，與規劃速度相似，由圖上三組不同顏色可知，將補償角度從正 12 度到負 12 度亦分割為三類，大角度、中角度與小角度，分別大角度配上速度規劃的高速、中角度配上中速、小角度配上慢速，即完成了 Look-up table 的規劃。

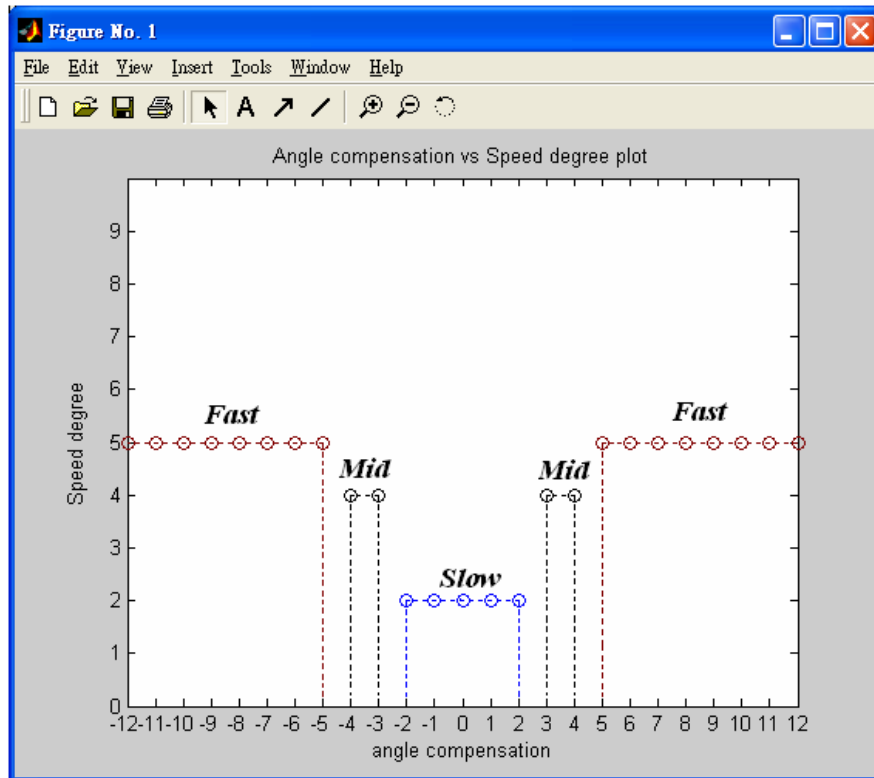


圖 4-5：馬達段速與補償角度之對應圖

在這裡特別重要的是小角度的規劃，若規劃恰當，即可配合非主動的 Data Moving Average 方法，同步解決機器人中央不穩定振盪的問題並達成三段控速的效果；由於機器人在中央震盪時，容易因為運動速度太快、慣性導致衝力過大，而在中心點左右來回作小角度不穩定的擺動，其通常約為正負 1、2 度的搖擺，且當機器人從大角度運動到中央時，因為已經接近站立時的穩定狀態，故也只會作小角度的補償，因此若規劃補償角度正負 2 度內為慢速 Slow，機器人便會在移動到中央時減速，以慢速度來補償中央角度，由於慢速度減輕了機器人的慣性，故機器人不受衝力而影響 ZMP 位置，最後並配合之前所提到的 Moving Average 解決不穩定的方式，大幅度解決機器人中央振盪的問題。

三段式控速過程的速度變化示意圖如圖 4-6 所示，此種設計架構最特殊之處，不僅僅是補償大角度時採快速度移動、中角度時採中速度移動、小角度時採小速度移動，而是如圖 4-6 所示，當機器人左右平衡從大角度移動回中央時，其運動的速度首先為高速，接著會減速煞車，接近中央的時候是以慢速，最後停在

其中央平衡點；從中角度移回中央時，其運動的速度首先為中速，接近中央的時後即減速成慢速；而從小角度移回中央時，則一直保持著慢速運動。因此藉由此三段控速的煞車機制，即可有效的減低機器人運動時的衝量，維持其穩定之動作。

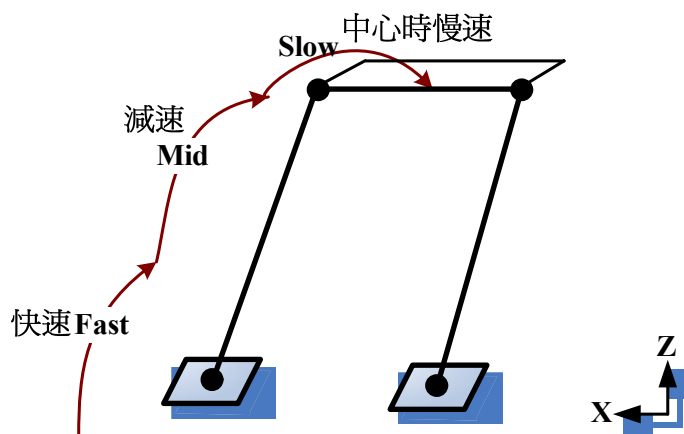


圖 4-6：控速過程的速度變化示意圖

綜合 Data Moving Average 與智慧型馬達控速的結果，除了增進機器人整體穩定度外，還有縮短 Sample 時間間隔的優點。以此方式增加 PAPA-man 的穩定度後，Sample 時間可由 200ms 縮短到 50ms，增快了四倍的補償速度，即一秒鐘能下 20 次的馬達角補償命令，獲取 FSR 所傳來的外界資料量也為之增加，故除了穩定度外同時也提昇了機器人的整體反應與靈敏度，而至於速度控制實際在即時平衡上的數據分析，則到第五章的控制介面與實驗結果再一併討論。

第五章 控制介面與實驗結果

第五章為控制介面與實驗結果，結合前兩章所設計之成果，協同以 Visual Basic 設計 pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，透過此視窗介面，操控者能即時觀看目前機器人 6 個 FSR 值與 ZMP 於腳掌之位置，並同時可下達行為操控之指令，增進了人機互動的機制，並結合此軟體，使機器人能擴充後端多元化的功能。最後此章並建立了一個機器人的量測平台，將其機器人實際即時平衡控制的實驗結果與平台量測之實驗數據作一相互驗證與特性分析。

5.1 控制介面軟體『Balance Control Agent』

經由前面章節在微處理器中算出機器人的 ZMP 點後，為了使操控者能即時觀看目前機器人 ZMP 實際位置並下達行為操控之指令，因此本論文以 Visual Basic 設計 pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，如下圖 5-1 所示。

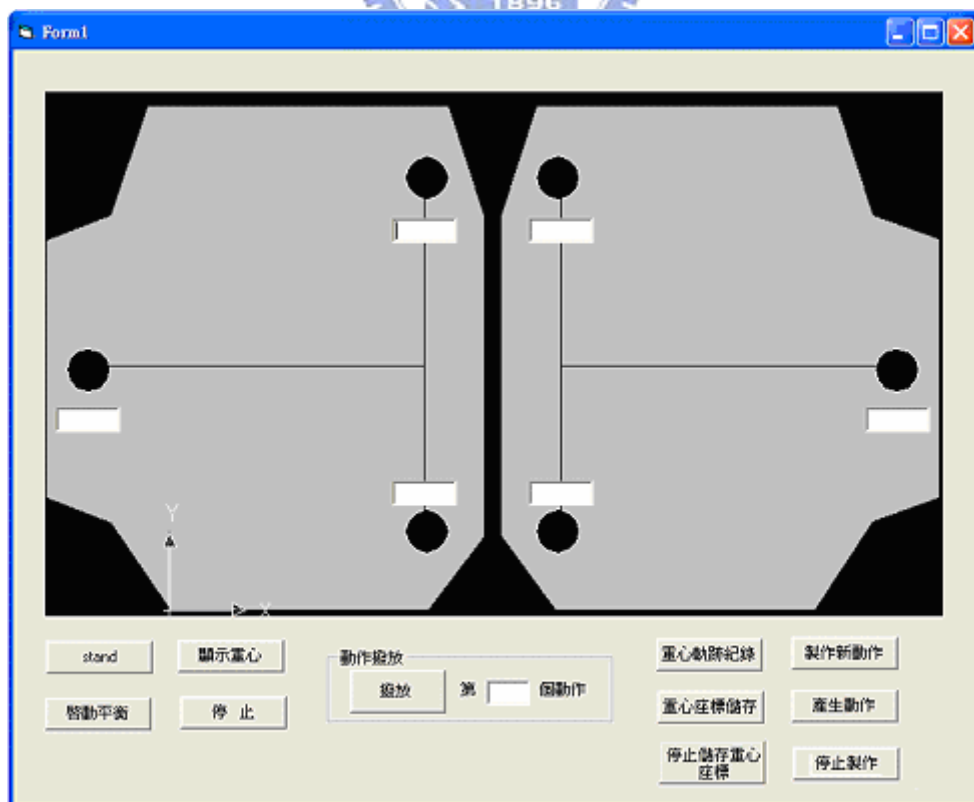
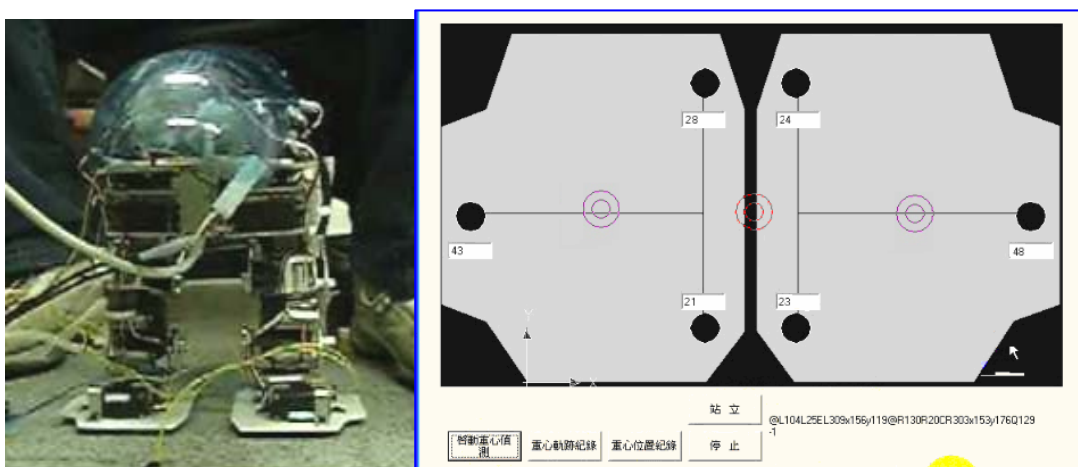


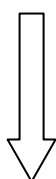
圖 5-1：ZMP 視窗軟體-Balance Control Agent

『Balance Control Agent』軟體，最主要的功能為將微處理器中算出的機器人 ZMP 點，經由 Master 的藍芽通訊將此 ZMP 資料封包傳遞到 pc 端，此軟體可解開 pc 端所接收的 ZMP 封包，並經由圖形化介面的方式，將 *PAPA-Man* 腳底所承受的壓力資訊實際顯現在軟體視窗中，使操控者能即時觀看目前機器人 ZMP 的實際位置且下達行為操控之指令。因此 pc 可視為網際網路層 Master 端的擴充，藉由『Balance Control Agent』軟體的延伸，整合網際網路中現有且高速計算的資源系統，使得機器人具有可觀的擴充性，解決龐大計算、記憶體容量不足的問題。

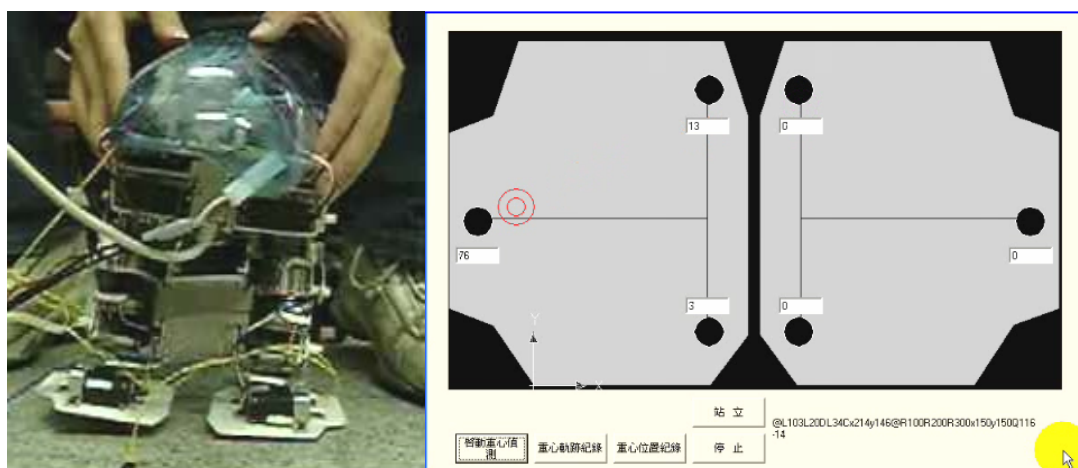
在此經由此軟體視窗，實際配合機器人的運動作一實驗，我們依序將機器人往中間、左傾、右傾、後傾、前傾移動，實際觀看其 ZMP 的位置，結果如下。

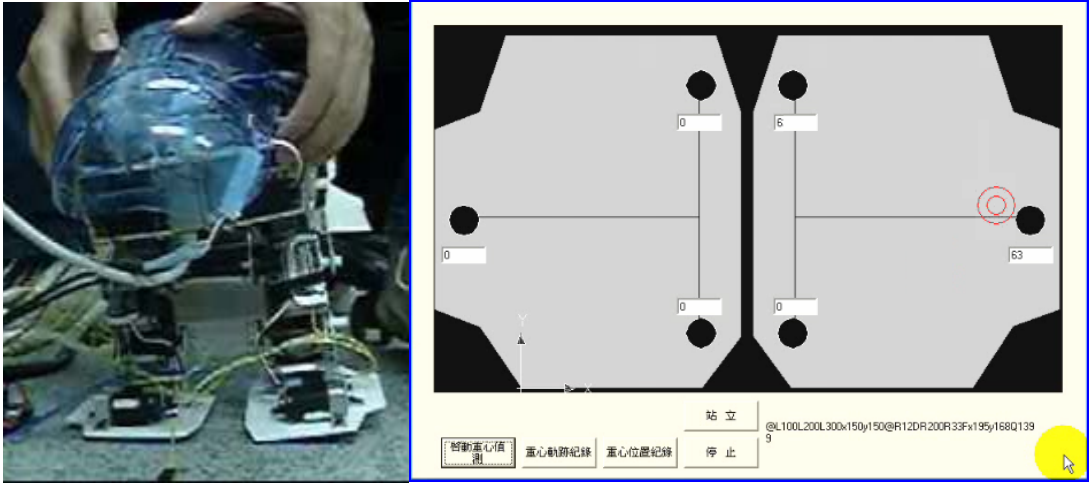


左傾



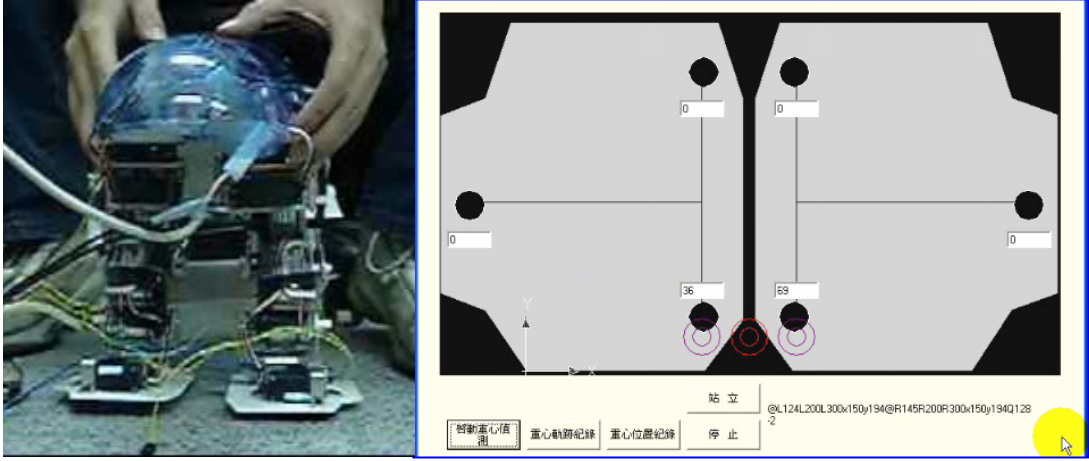
上面左圖為機器人預設的中間站立位置，可觀察其右圖的軟體視窗，可知『*PAPA-Man*』左右腳分別的 ZMP 位置（紫色圓圈）與中心的 ZMP 位置（紅色圓圈）。若機器人往左傾且右腳懸空，則 ZMP 變化如下圖





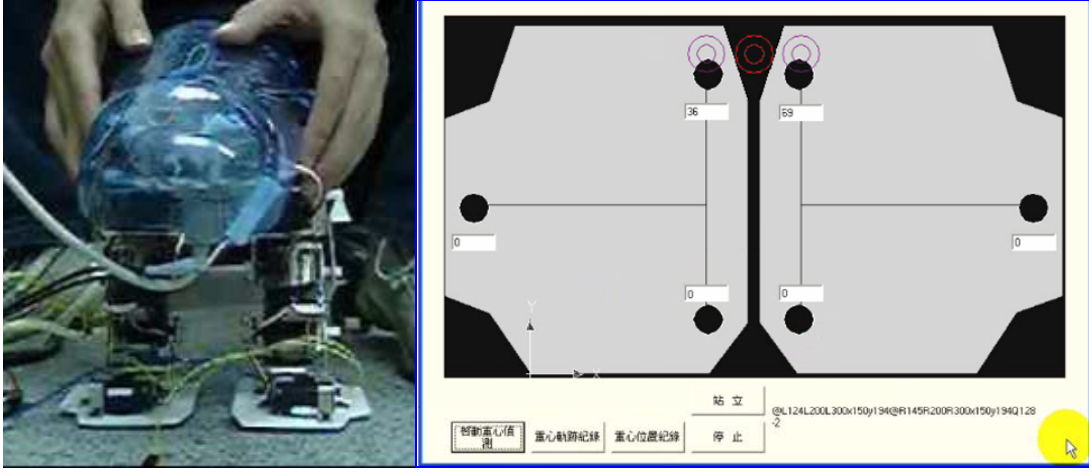
左往
右傾

上圖為機器人往右傾且左腳懸空，則 ZMP 點可看出由左腳最左點移動到右腳最右點，接下來若機器人往後傾，則 ZMP 點移動到視窗軟體兩隻腳掌的最後方，如下圖所示。



前傾

上圖為機器人往後傾，ZMP 點在兩隻腳掌的最後方，接下來機器人由後傾往前傾，則 ZMP 由兩隻腳掌的最後方移到最前方，如下圖所示。



以上的一連串實驗，藉由直接移動機器人姿態之方式，再搭配『Balance Control Agent』軟體，即可於軟體視窗實際觀看 6 個 FSR 即時壓力值與 ZMP 點在雙足機器人腳掌的位置。依照此種實驗，ZMP 對照機器人的實際姿態，我們即可初步驗證整個機器人 ZMP 計算系統的正確性，但由於在『Balance Control Agent』視窗軟體中，只會顯示即時的 ZMP 位置資訊，為了後端資料處理的方便，在圖 5-1 ZMP 視窗軟體中加入了重心軌跡紀錄儲存的功能，可觀看即時 ZMP 圖形位置，並同時將 ZMP 的座標軌跡與 FSR 壓力值紀錄成一個文字檔，提供後端資料的處理。在此以工程軟體 Matlab 分析其文字數據，將左右腳分別的 ZMP 座標值精準的顯示，如下圖 5-2 即為剛才一連串機器人移動的 X 方向左右腳 ZMP 軌跡紀錄圖。同 ZMP 視窗，我們也可由此圖明顯驗證出 ZMP 與機器人一連串動作之關係，而至於即時平衡等智慧型控制後的 ZMP 數據，則容 5.3 節再一併敘述。

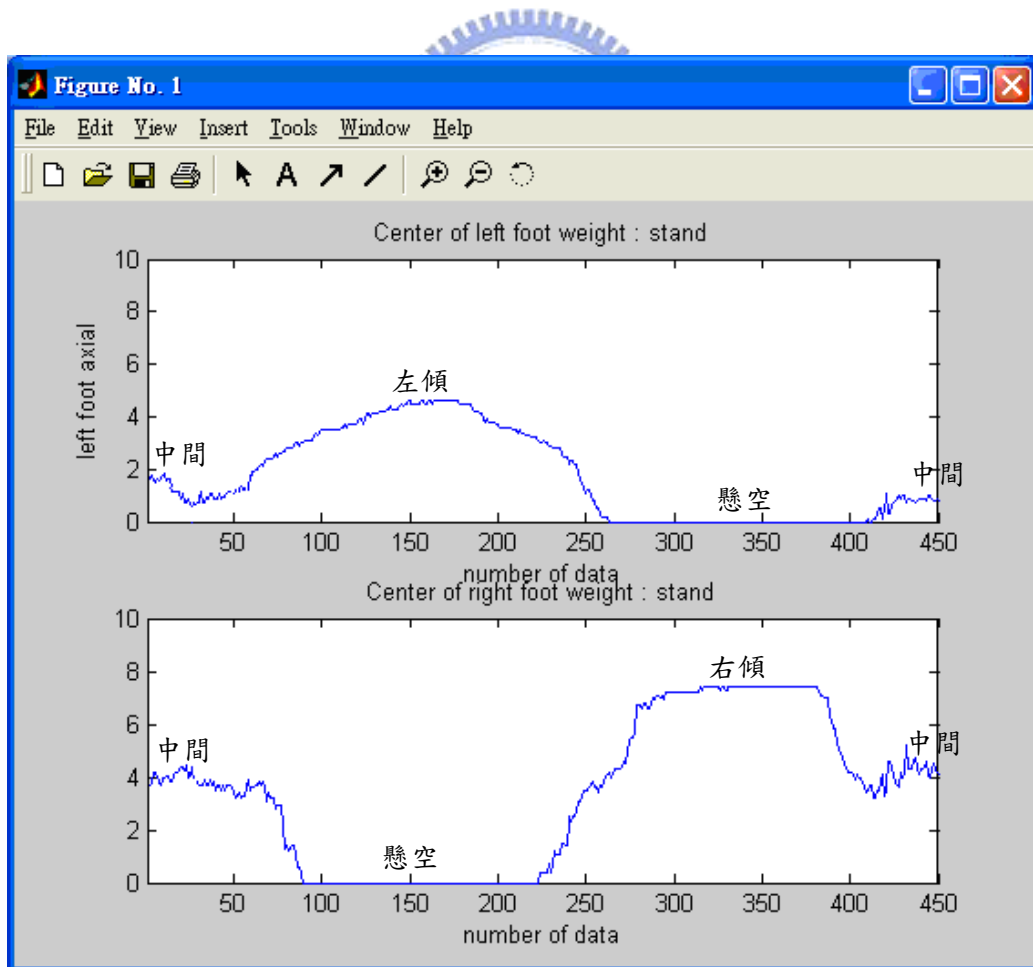


圖 5-2：雙足機器人左右腳 ZMP 點座標移動分析圖

5.2 軟體功能介紹

pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』主要功能為即時顯示機器人 ZMP 的實際位置並控制雙足機器人的即時平衡，而為了機器人後端的分析與行為控制，因此另外設計了多元化的功能，可對照參考圖 5-1。

A. ZMP 座標軌跡與 FSR 值之記錄：

負責處理機器人後端的資料分析，上一節所用到即為此項功能，可將機器人左右腳的 ZMP 座標軌跡與 6 個 FSR 的壓力值存成文字檔或 Excel，以提供科學軟體的繪圖與分析。

B. 線上即時平衡的開啟：

此項功能決定機器人是否對現在的環境做即時平衡動作。當尚未開啟時，我們可以藉由 ZMP 視窗觀察目前機器人動作對 ZMP 的影響，一旦開啟此功能，機器人就會對環境產生自我平衡的動作，以維持 ZMP 點於理想之 ZMP 點上。

C. 離線平衡動作的產生：

此項功能為相當重要之延伸發展，當機器人欲操作在固定的斜面或環境中，可先開啟線上的即時平衡，接著便可利用此項功能，離線產生其平衡動作檔，藉此動作檔之輸入，不需平衡即可重複動作於此固定的環境中而不會傾倒。

D. 連續動作的播放：

可以使儲存在機器人 Master 的動作，藉由此項指令，一個動作一個動作的播放出來，通常協同配合平衡動作產生之功能。

E. 資料取樣與傳輸間隔設定：

可於此介面設定資料的取樣時間與藍芽傳輸間隔的設定，在此資料的取樣時間為 50ms~200ms，而藍芽傳輸的包率為 115200bps。

5.3 實驗平台架設與數據分析

5.3.1 實驗平台架設

本論文以 ZMP 觀點搭配智慧型演算法-模糊系統，發展出一套機器人雙足穩定的平衡控制系統架構後，協同上節以 Visual Basic 所設計人機介面之操控軟體-『Balance Control Agent』，成功使操控者透過此控制介面即時觀看機器人 ZMP 點，並操控機器人於不同地形與斜面之即時平衡。在此為了測試本論文設計之 *PAPA-Man* 機器人實際上即時平衡之成果與效能，另外建立了一個機器人的量測平台，並以 Visual Basic 專為此平台設計一套測量軟體，最後將平台軟體量測之實驗數據與機器人實際即時平衡控制的實驗結果作一相互驗證與特性分析。

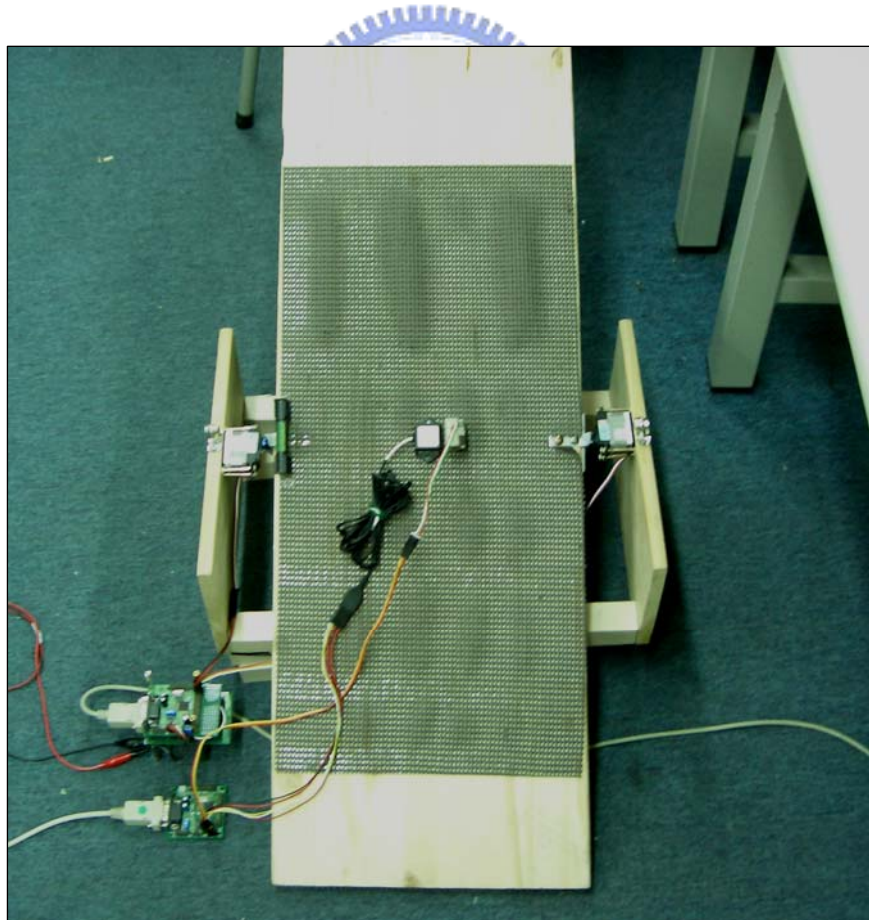


圖 5-3：機器人即時平衡數據量測之整體實驗平台

此實驗平台建設之目的為精準的量測機器人於各種不同地面傾斜角度與變動速度下，PAPA-Man 機器人即時平衡之效能與實驗數據。其平台設計的整體架構如上圖 5-3 所示，主體是由一木製的電動翹翹板構成，藉由控制電路板配合伺服馬達的運轉來帶動整個翹翹板的轉動，而為了精準的操控此電動翹翹板的轉動角度以及轉動速度，在此與 PAPA-Man 即時平衡之視窗軟體-『Balance Control Agent』相同，同樣以 Visual Basic 設計一套專為此實驗平台之操控軟體-包含了電動翹翹板、傾斜儀與陀螺儀的操控介面。而電動翹翹板的操控介面如下圖 5-4 所示，分為翹翹板控制與路徑規劃兩個區塊；翹翹板控制區塊中只要藉由方便的拉桿往左或往右，或是直接輸入所要的轉角，即可操控翹翹板精準往左或右傾到所預想的位置。除此之外，馬達以軟體控速設計了 5 種不同的段速，主要是以三種不同的速度慢、中、快來控制翹翹板到所預想的角速度，其分別的速度值如下圖。

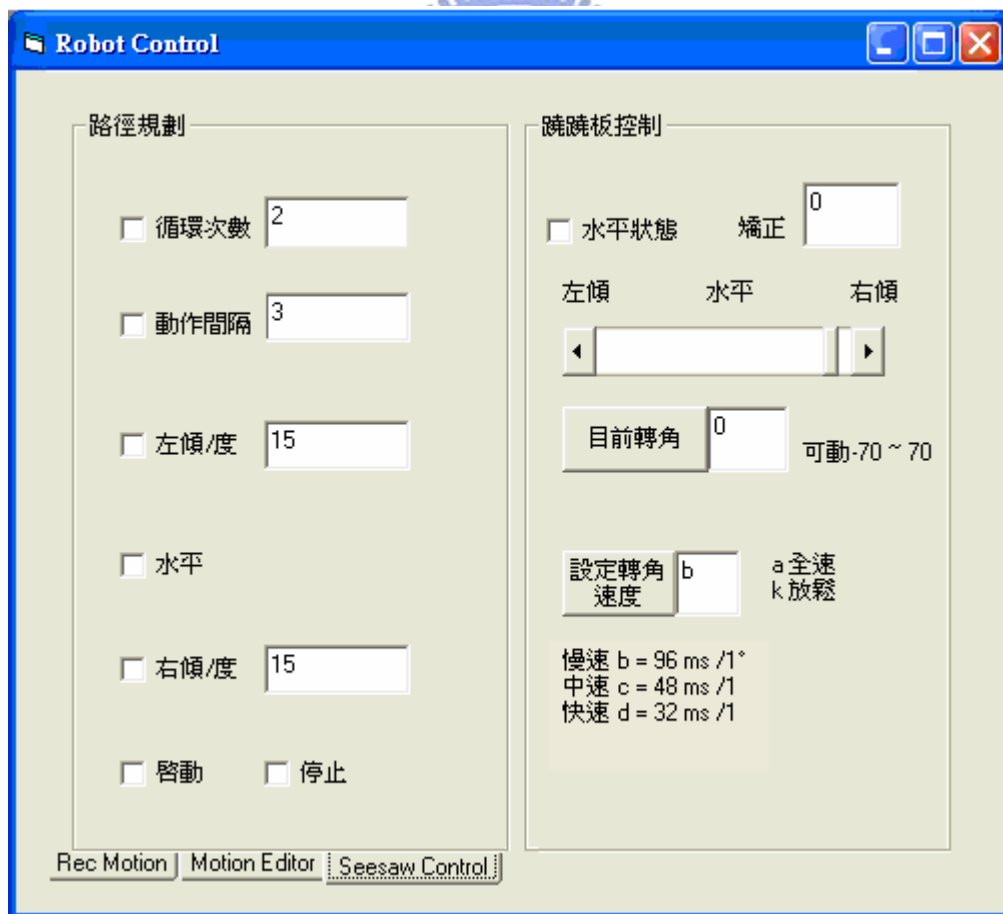


圖 5-4：電動翹翹板之 PC 端程式操控視窗介面

而為了適應實驗環境中地面水平的些微誤差，此介面加入了水平矯正的功能，且可同時配合翹翹板上所設置之水平儀，達到矯正水平的起始功能。路徑規劃之區塊則是可以自行規劃機器人在翹翹板上平衡時，翹翹板要如何的動作，不論是動作的間隔時間、循環次數、行經路徑，皆可由使用者依實驗需求而自行定義，藉此產生一連續之擺動動作。本論文量測機器人平衡時所規劃之翹翹板路徑，為求實驗上的一致性，皆是統一從水平方向起始，先往右傾停頓三秒之後回到中央水平位置，三秒後接著再往左傾，並於停頓三秒後再度回到中央位置。

此實驗平台設計之 Visual Basic 視窗軟體除了上述的電動翹翹板操控介面外，為了量測機器人於電動翹翹板各種不同角度與速度下的水平穩定度與角速度安定性，因此安裝兩種感測器於機器人身上，分別為傾斜儀(Tilt)與陀螺儀(Gyro)，同樣的在此也以 Visual Basic 設計其感測器量測之介面。

首先簡介一下這兩種感測器，傾斜儀[29]主要的功能為量測傾斜角度的資訊。在此使用的為雙軸傾斜儀，雙軸可量測 X 軸與 Y 軸分別之傾斜角度，X 軸在此即代表量測機器人左右的傾斜角度，Y 軸則是前後的傾斜角度，因此可利用傾斜儀來獲得目前機器人的水平穩定度。下圖即為傾斜儀實體與形狀規格。

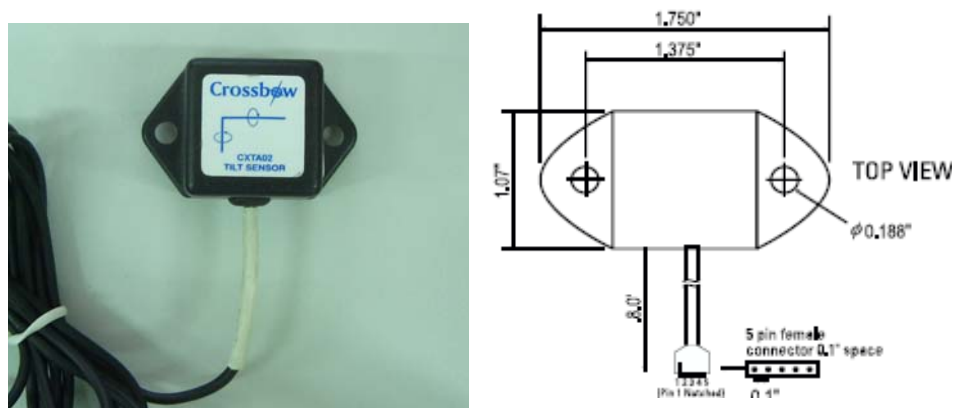


圖 5-5：傾斜儀實體與其規格

接下來介紹陀螺儀，陀螺儀[30]主要的功能為量測角速度的資訊，在此安裝在機器人身上，可利用陀螺儀來獲得目前機器人運動時的角速度變化，藉此瞭解機器人作動時快慢變化之安定性。下圖即為陀螺儀實體與其形狀規格。

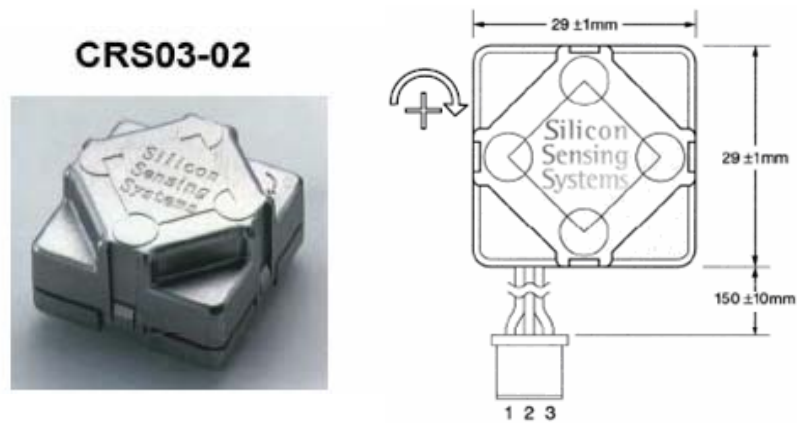


圖 5-6：陀螺儀(Gyro)實體與其規格

在此兩種感測器資訊是利用 Sensor 電路板特別為傾斜儀與陀螺儀設計之 AD 角位，將其所量測到類比電壓轉為數位化，接著經由所設計之 VB 介面的 Timer 為中斷，每 100ms 從 MSComm 元件中的 buffer 取出 AD 後的數位電壓值，最後經由 VB 程式的運算可即時顯示在程式介面的視窗。圖 5-7 為雙軸傾斜儀的即時偵測視窗，紅線代表其 X 座標，藍線則代表 Y 座標，對此雙軸分別的傾斜角度即時顯示在視窗中以便觀測；而圖 5-8 為陀螺儀的即時偵測視窗，綠色的線即代表目前角速度的變化值。而為了方便後端的資料分析與處理，感測器資訊除了即時顯現在視窗外，我們亦可將所有資料存成一 txt 檔，方便後端 Matlab 的分析。

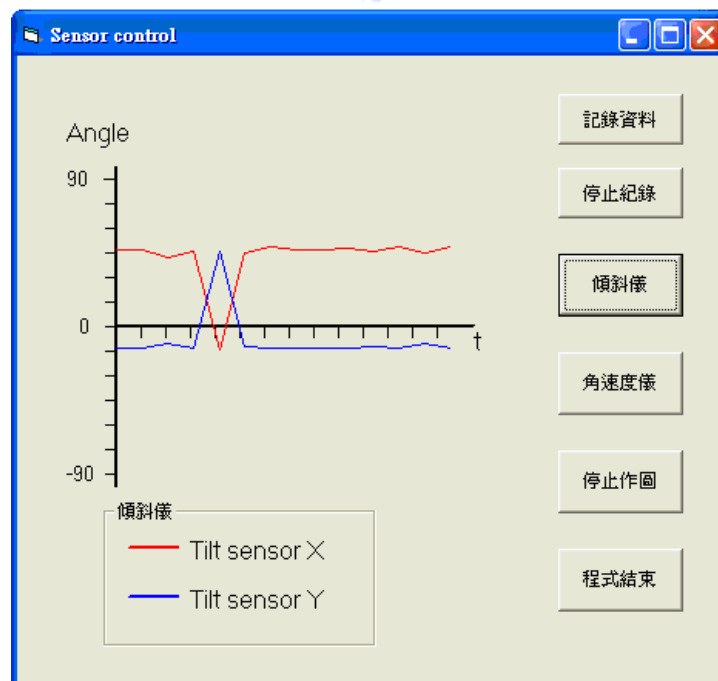


圖 5-7：雙軸傾斜儀 X 軸與 Y 軸即時偵測傾斜角度視窗

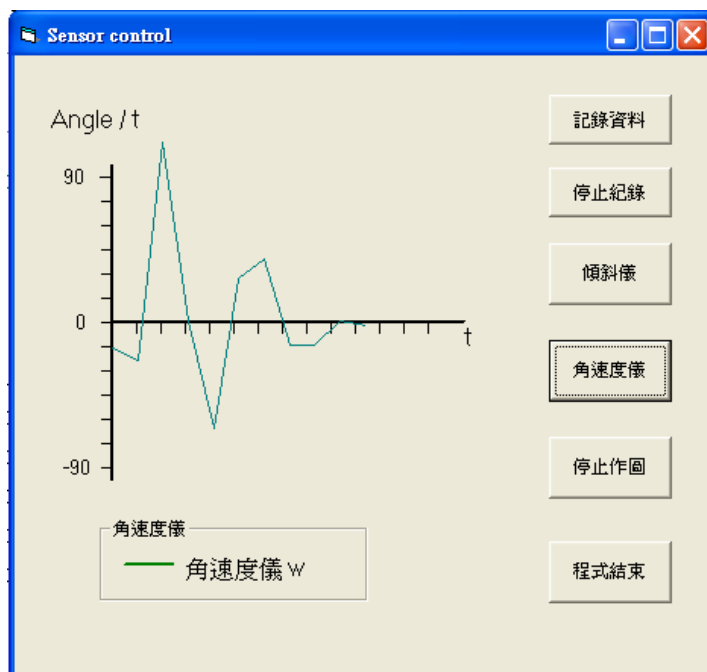


圖 5-8：陀螺儀(Gyro)即時偵測角速度視窗

因此包含電動翹翹板、傾斜儀與陀螺儀之實驗平台與操控介面即架設完成，將傾斜儀與陀螺儀實際放置到 *PAPA-Man* 上便可對即時平衡作數據上的量測，下圖即為整個平台包含 *PAPA-Man* 的實體架設，並以此平台進行下節的數據分析。

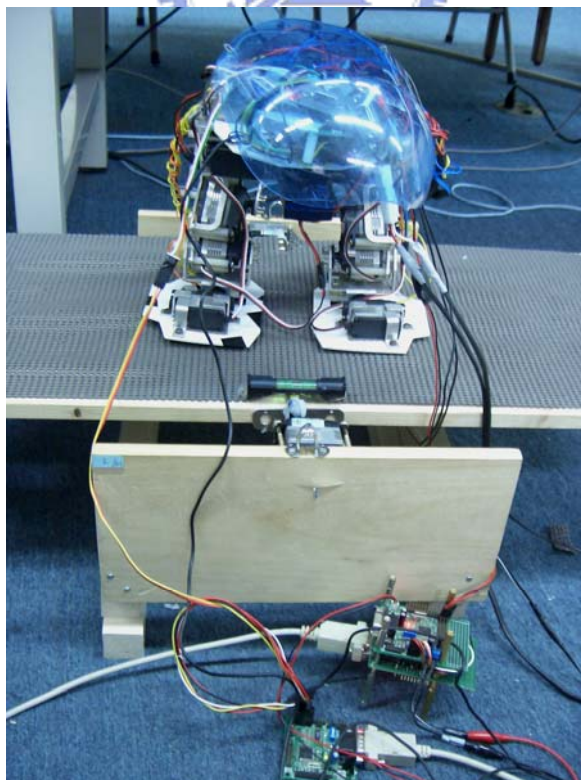


圖 5-9：實驗平台實際架設於雙足機器人 *PAPA-Man*

5.3.2 數據分析

5.1 節中，我們藉由直接移動機器人姿態之實驗，搭配『Balance Control Agent』軟體，從軟體視窗實際觀看機器人即時 ZMP 位置，並對照機器人的實際姿態，初步驗證了機器人 ZMP 計算系統的正確性。進一步，為了測試本論文所設計之智慧型系統控制下，PAPA-Man 機器人即時平衡中穩定度、安定性之平衡能力與驗證第四章所提出的被動性 Data Moving average、主動性智慧型馬達控速能提昇雙足機器人運動時整體穩定性之理論。此節即搭配上節實驗平台的建立，量測機器人於不同傾斜狀況下實際平衡結果之數據資料，對其作一數據分析與驗證。

為了分析機器人的穩定度與安定性，這裡利用實驗平台的傾斜儀來量測其穩定度傾斜角度的平穩狀況，並用陀螺儀來量測其安定性角速度的變動資訊。傾斜儀與陀螺儀實際安置於 PAPA-Man 上便可對機器人即時平衡作數據上的量測與分析。本論文量測機器人平衡能力所規劃之翹翹板路徑，為求實驗上的一致性，皆是統一翹翹板從水平方向起始，先往右邊傾斜並停頓三秒之後回到中央水平位置，三秒後接著再往左傾，同樣於停頓三秒後再度回到中央位置。至於所傾斜的角度和速度，由於傾斜儀線性量測的角度範圍為正負 20 度內、陀螺儀線性量測的範圍為正負 100 deg/sec，故以 0 度、5 度、10 度、15 度、20 度、25 度作為翹翹板左右擺動角度，並分別用三種速度：慢速 (b) 96 ms / 1°、中速 (c) 48 ms / 1°、快速 (d) 32 ms / 1° 的環境下量測機器人於不同傾斜狀況實際平衡結果之數據。為了避免翹翹板本身的誤差，實驗 1 將 Tilt 與 Gyro 直接放在翹翹板上量測原始擺動數據，作為其他組之對照；因此在同一實驗環境下所作的四組實驗描述如下。

- (1) 對照組： Tilt&Gyro 直接放在翹翹板上量測原始數據作為對照。
- (2) 對照組： Tilt&Gyro 放在機器人身上但不啟動即時平衡，作為對照。
- (3) 實驗組： Tilt&Gyro 放在機器人身上並啟動智慧型即時平衡。
- (4) 實驗組： Tilt&Gyro 放在機器人身上啟動即時平衡但不控速。

首先對上述四組實驗做機器人 X 方向之左右翹翹板平衡，對傾斜角度的穩定性數據比較。由以下數據，我們發現每一個比較圖都有相同之特性，實驗一為理想對照之狀態，不論傾斜角度與速度為何，傾斜儀量測到的傾角與目前翹翹板所擺動的角度皆相同，除了可驗證此平台實際轉角的正確性外，由於一般是操控機器人機身與地面平行以維持其穩定度，因此傾斜儀無論何時幾乎與翹翹板成平行之特性，穩定度為四組相同實驗環境中最為理想；實驗二為機器人不開啟平衡即站立在左右擺動之翹翹板，由於無法自動平衡，無法控制其重心在中央位置，因此從實驗數據可明顯看出，翹翹板左擺或右擺時，機器人重心會隨之朝左腳或右腳移動而使傾斜角度會大於翹翹板所擺動的轉角，且擺動轉角越大其差異越明顯，從數據可得知其在左右傾斜 15 度的慢速下為其極限，之後便發生傾倒；實驗三即為本論文之核心，對於機器人做智慧型的即時平衡控制，從數據上可驗證，由於可自我保持其 ZMP 點於中心位置，因此與實驗一相同，能控制機器人與翹翹板成平行，而使其傾斜角度恢復成與翹翹板的轉角一致，且不至於傾倒；實驗四則相對於實驗三，開啟機器人的即時平衡但未加入第四章智慧型馬達控速之理論，由於較容易反應不及，相對實驗三數據可驗證較易發生機身抖動之現象。

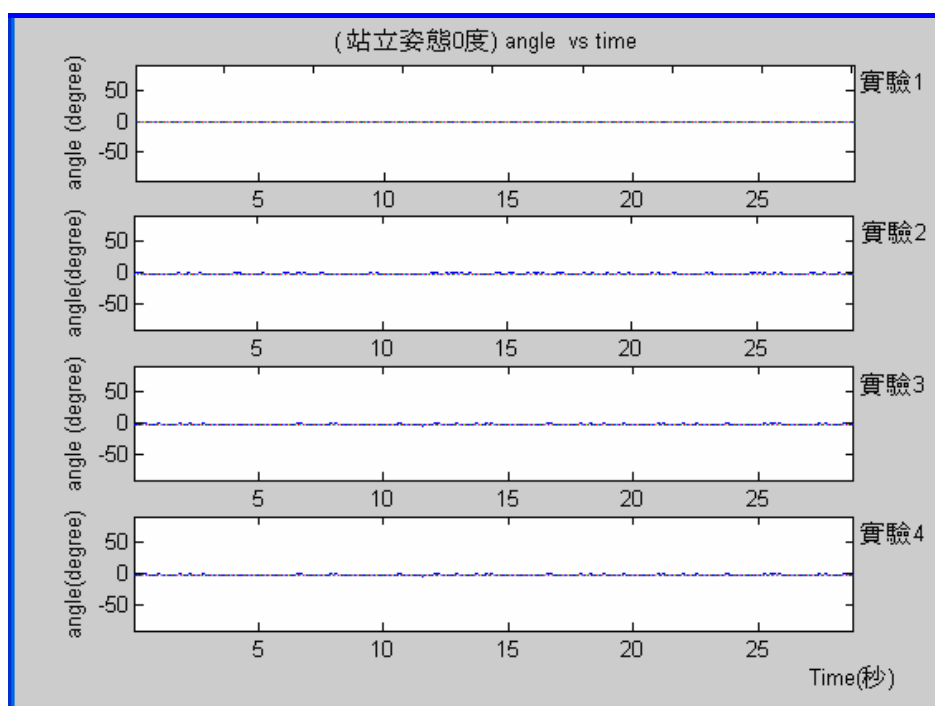


圖 5-10：機器人站立姿態水平 0 度之穩定比較圖

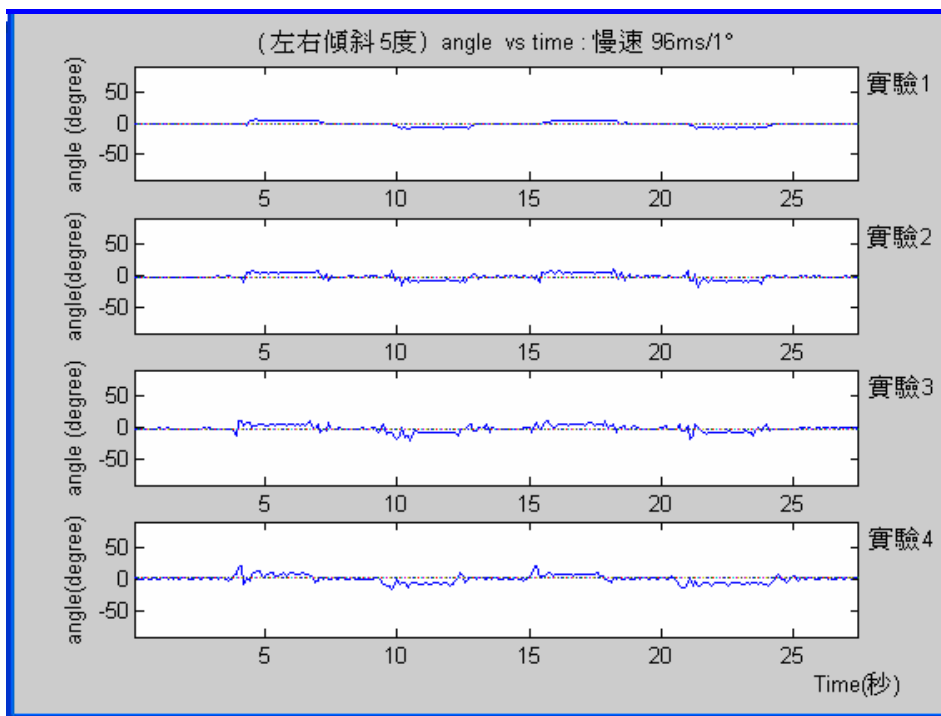


圖 5-11：慢速左右傾斜 5 度之穩定比較圖

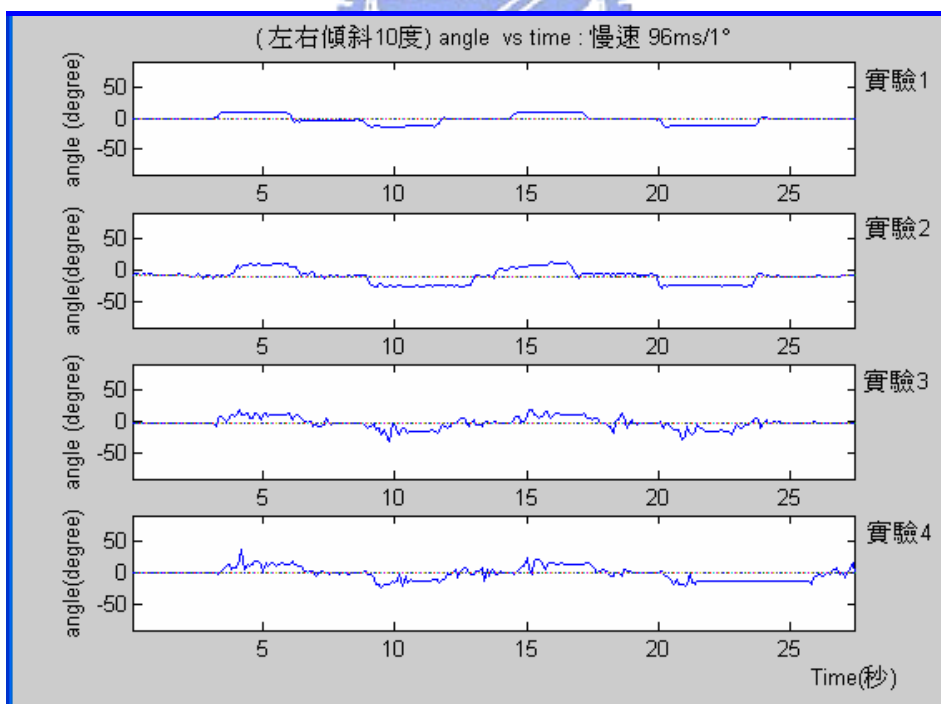


圖 5-12：慢速左右傾斜 10 度之穩定比較圖

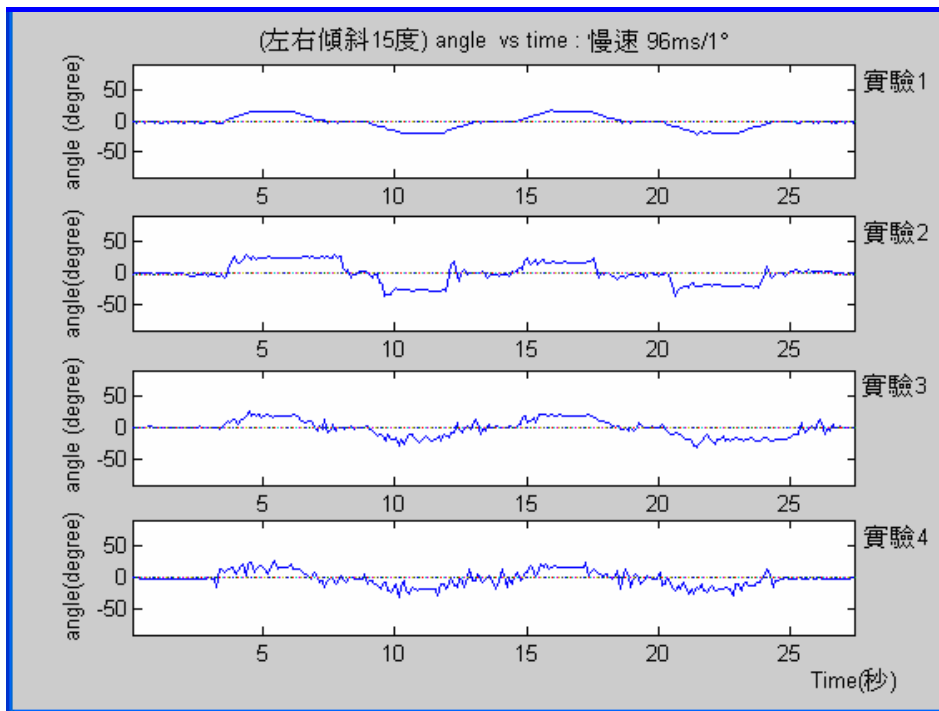


圖 5-13：慢速左右傾斜 15 度之穩定比較圖

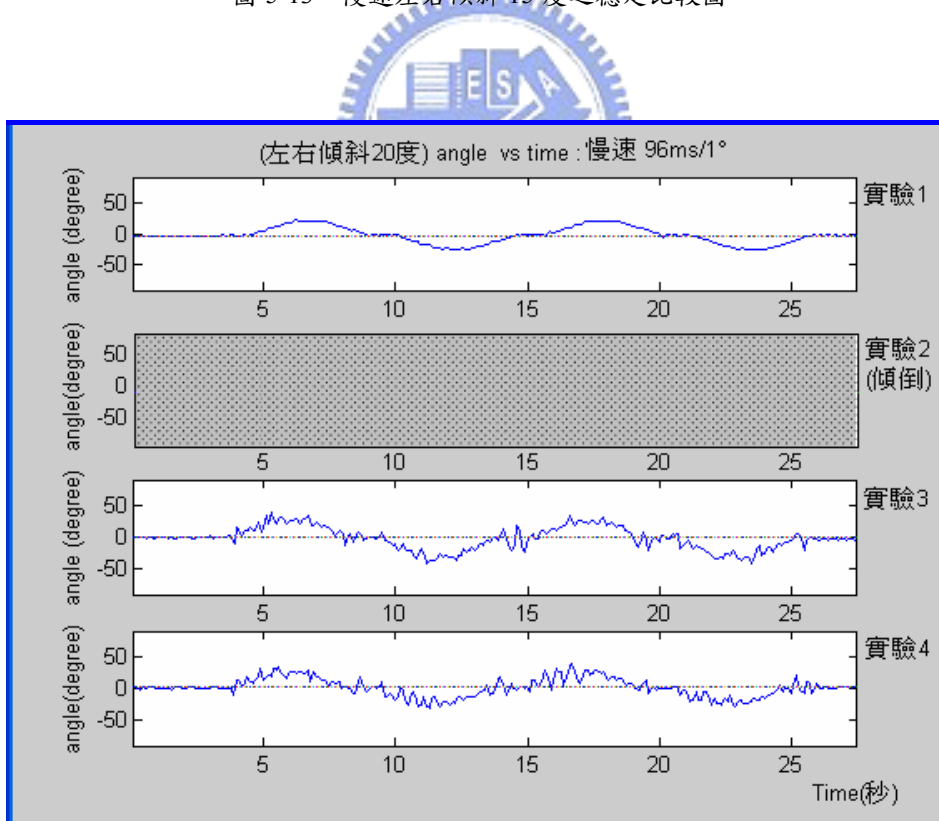


圖 5-14：慢速左右傾斜 20 度之穩定比較圖

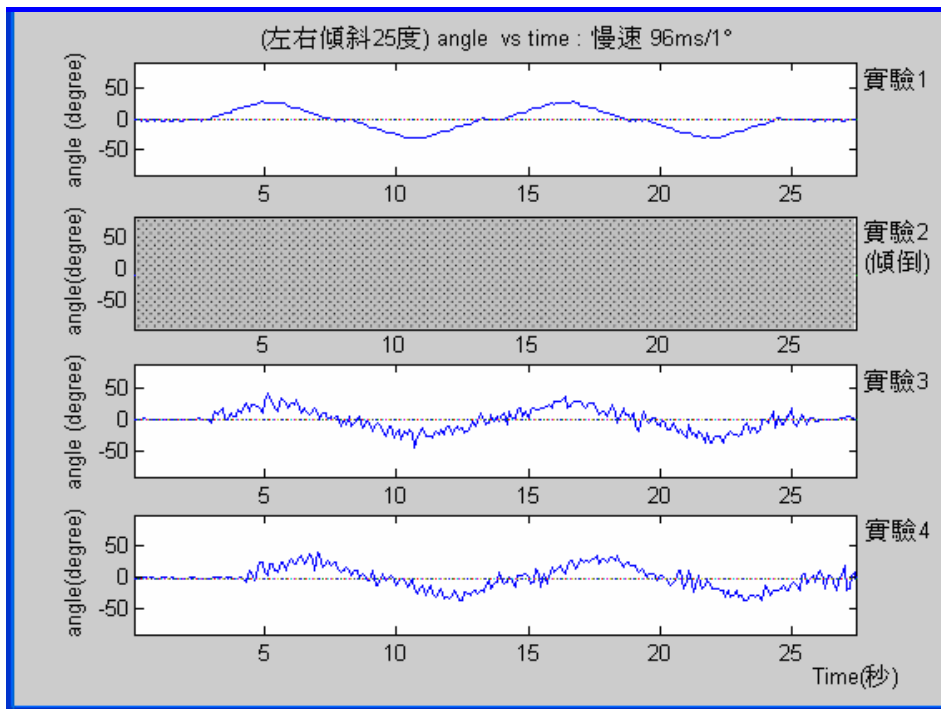


圖 5-15：慢速左右傾斜 25 度之穩定比較圖：

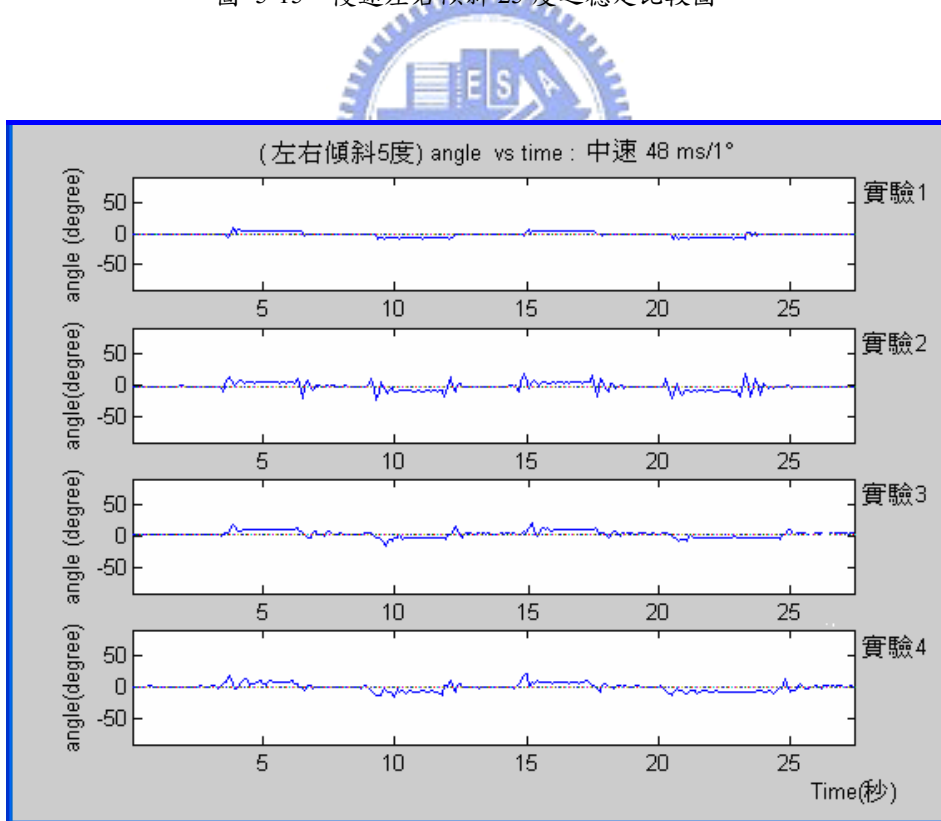


圖 5-16：中速左右傾斜 5 度之穩定比較圖

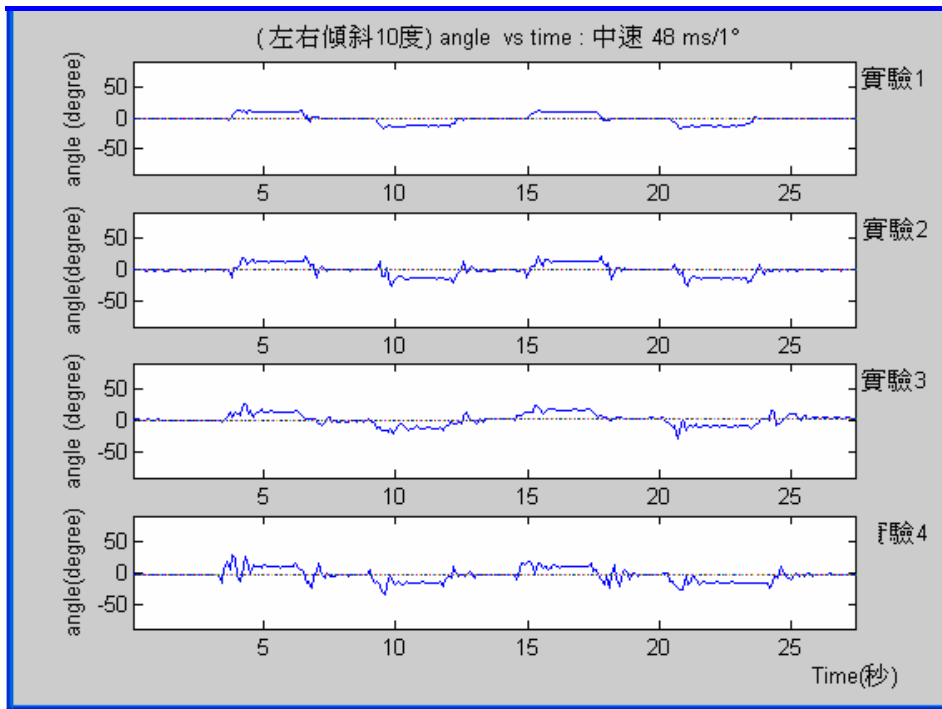


圖 5-17：中速左右傾斜 10 度之穩定比較圖

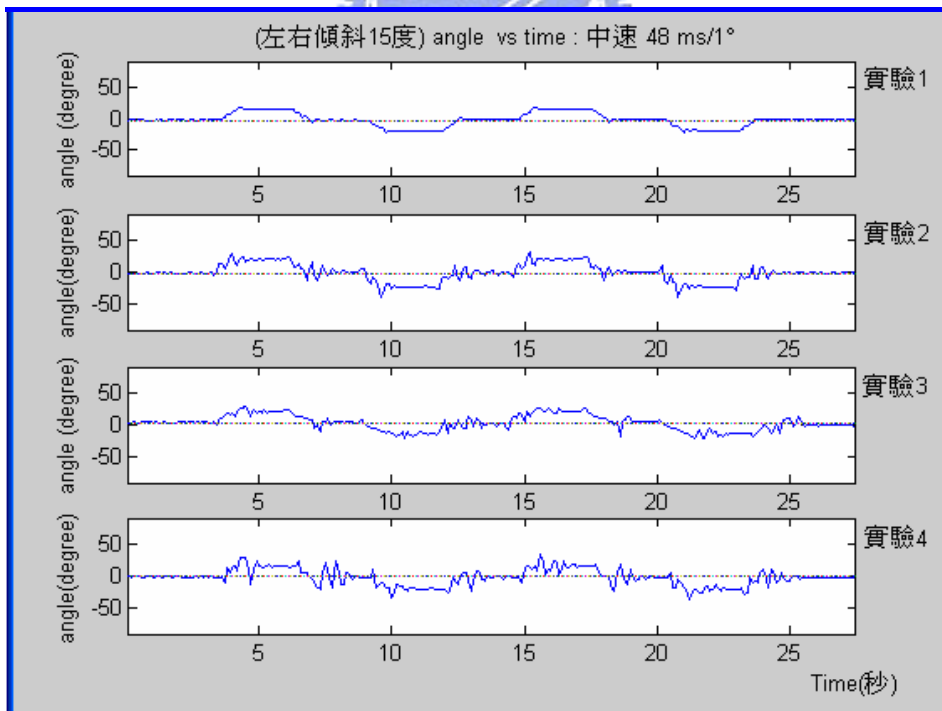


圖 5-18：中速左右傾斜 15 度之穩定比較圖

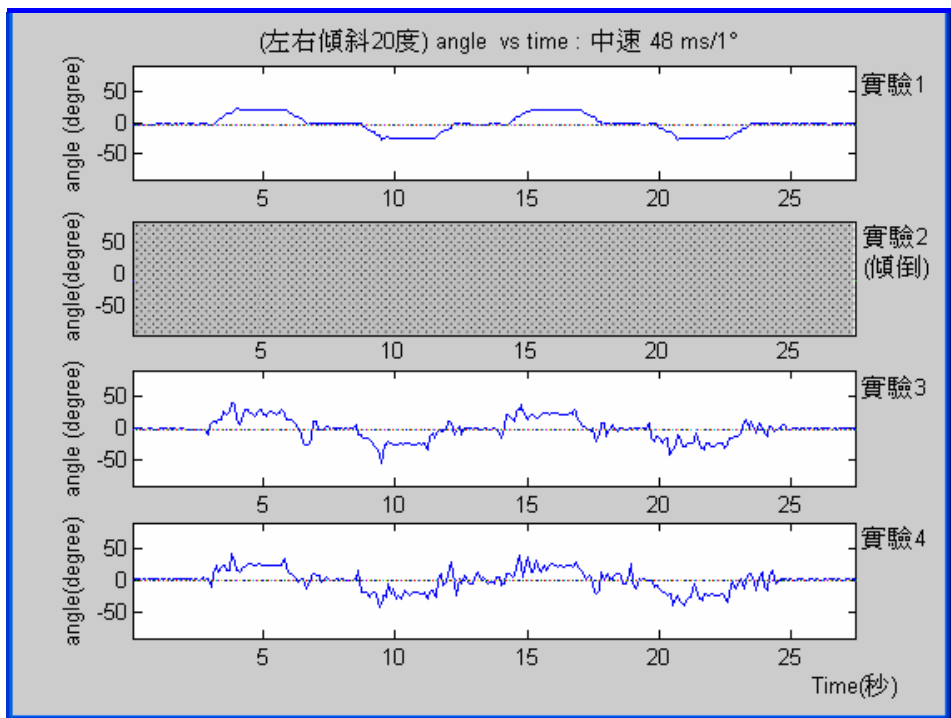


圖 5-19：中速左右傾斜 20 度之穩定比較圖

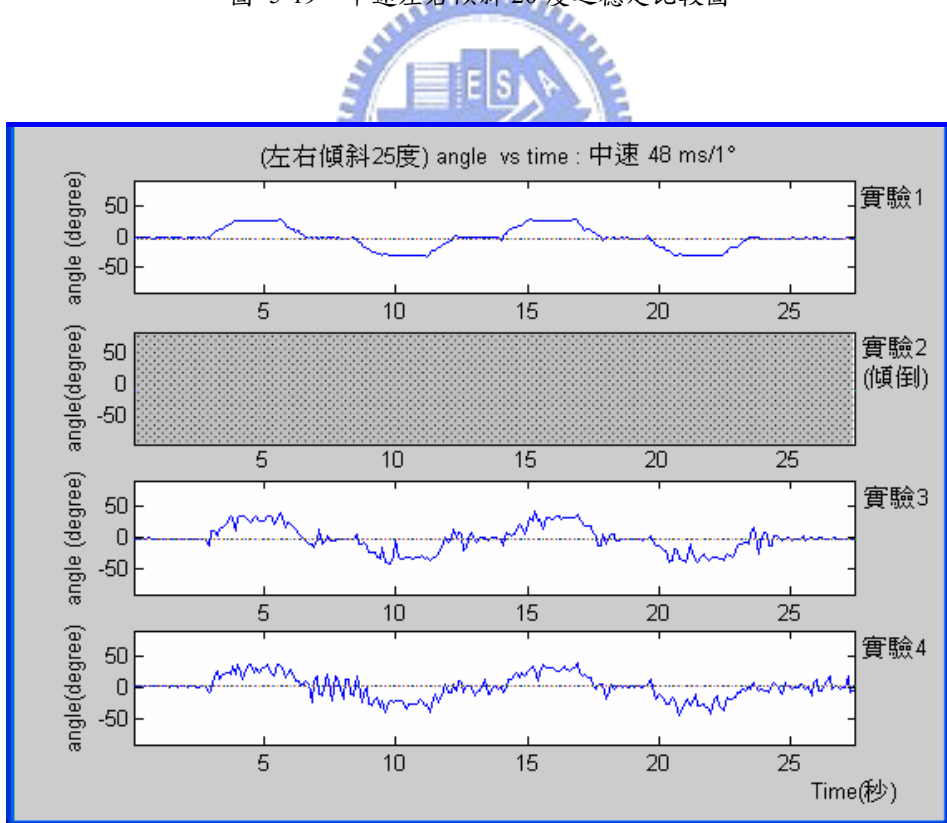


圖 5-20：中速左右傾斜 25 度之穩定比較圖

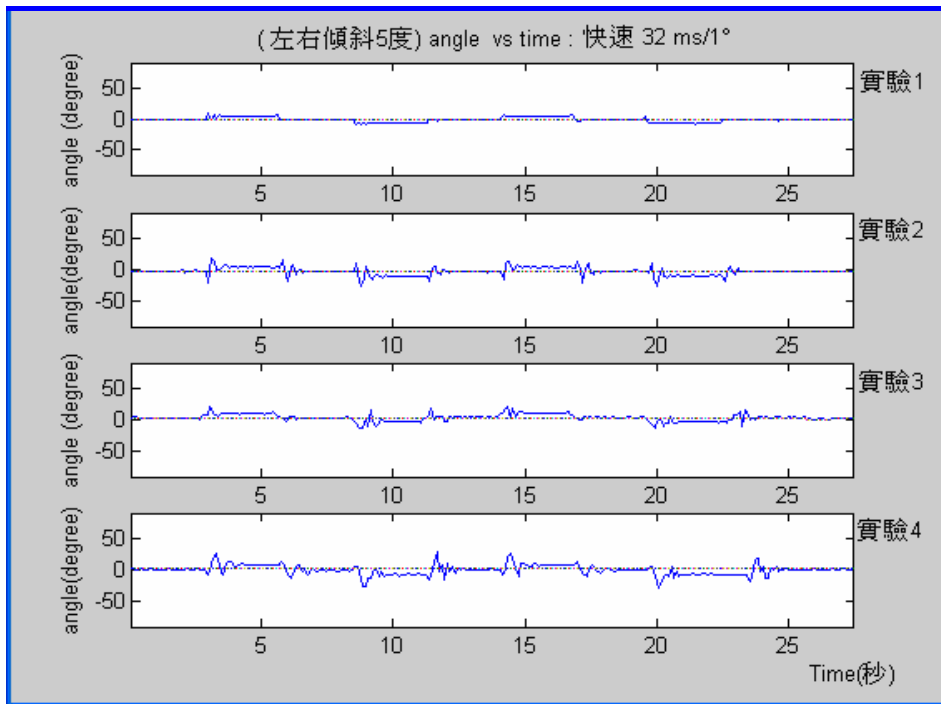


圖 5-21：快速左右傾斜 5 度之穩定比較圖

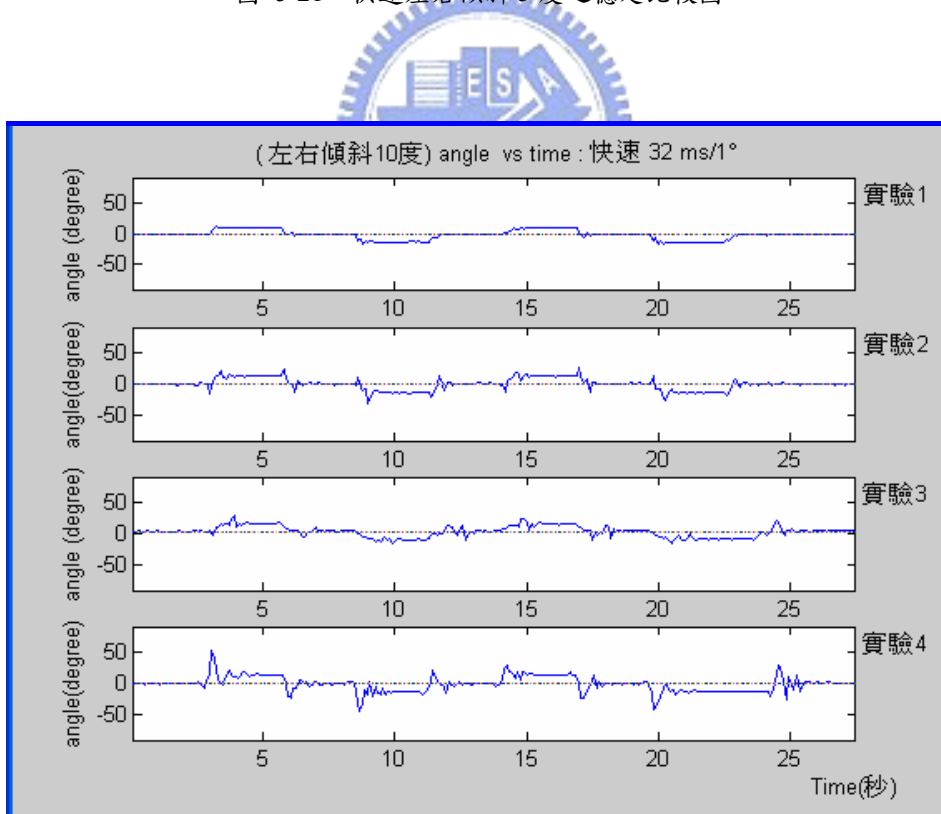


圖 5-22：快速左右傾斜 10 度之穩定比較圖

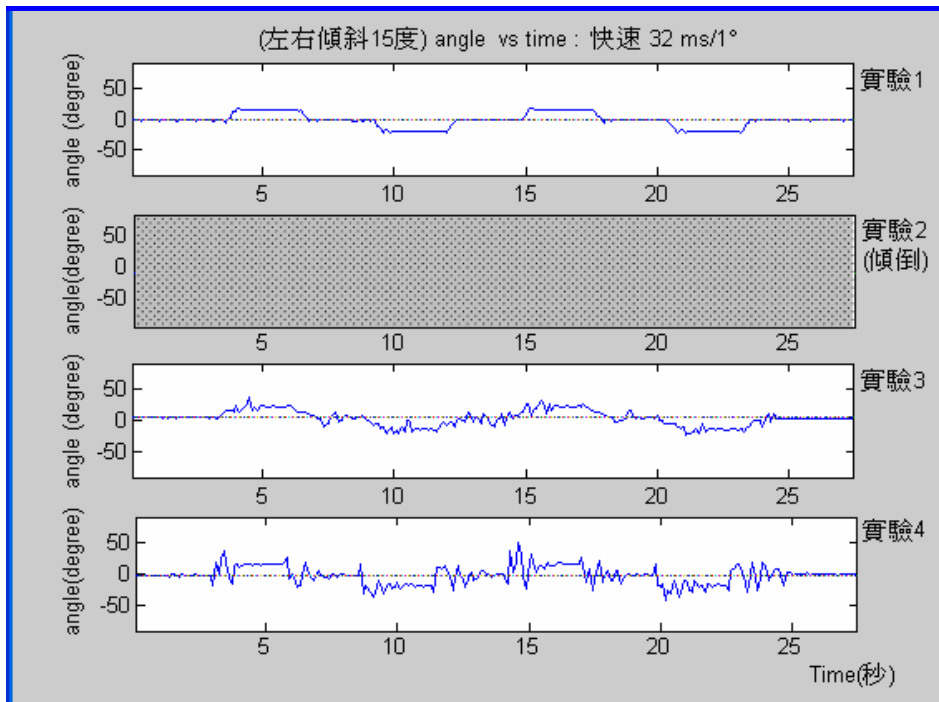


圖 5-23：快速左右傾斜 15 度之穩定比較圖

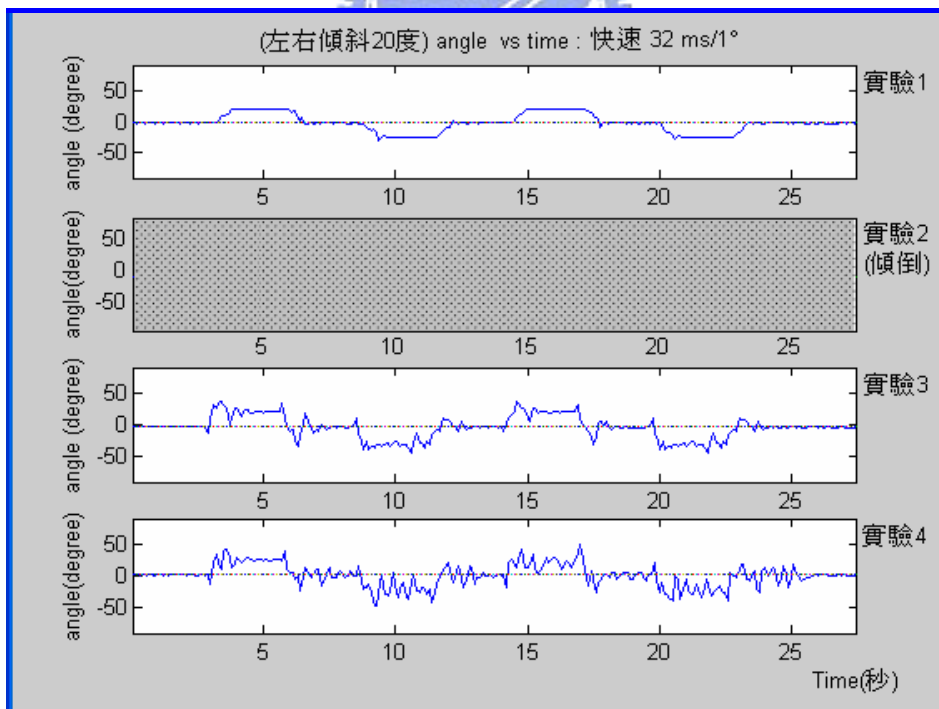


圖 5-24：快速左右傾斜 20 度之穩定比較圖

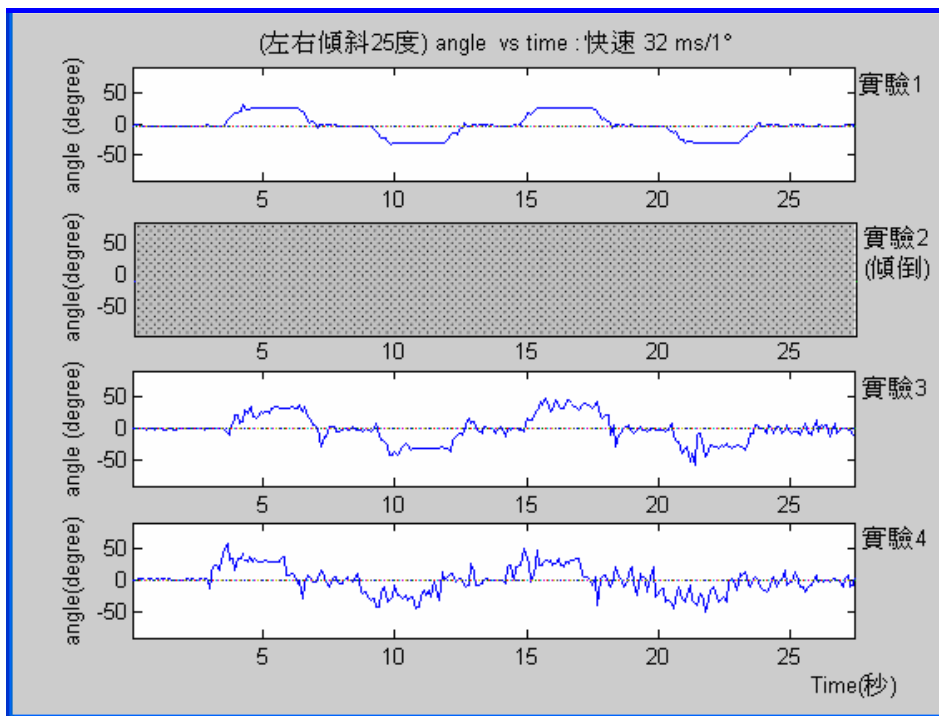


圖 5-25：快速左右傾斜 25 度之穩定比較圖



接著則是對做機器人 X 方向左右平衡之安定性分析，在翹翹板不同角度與快、中、慢傾斜速度下四組實驗的角速度數據比較。一般機器人平衡移動時為維持其安定性，機身保持等速度運動且避免中央站立時左右震盪，故角速度除了運動轉折點外，盡可能保持為 0 以防不當之振動；而目前蹺蹺板的擺動規劃是從水平方向先右傾再左傾來回兩次，總共有 8 個速度轉折點，也就是翹翹板運動有 8 次加速度點，且在其餘時刻等速度轉動故加速度為 0，因此理想上實驗數據只會出現 8 筆類似脈衝之加速度點，且加速度隨著翹翹板擺動的速度增加，轉折時所產生之加速度改變值也會為之增加。以下之實驗即可發現每一個比較圖之特性，實驗一為理想對照之狀態，陀螺儀量測到之角速度即為 8 筆加速度點且其餘時刻加速度為 0，故相同的實驗環境下在四個實驗中具有最理想之安定性；實驗二為機器人不開啟平衡即站立在左右擺動之翹翹板，由於無法自動平衡，無法控制馬達轉動使其重心在中央位置，因此從實驗數據可明顯看出，翹翹板左擺或右擺時，機器人重心會隨之朝左腳或右腳移動而使其角速度大於翹翹板擺動轉折時的角速度，且擺動速度越大其差異越明顯，由數據可得知在左右傾斜 15 度的慢速下為其極限，之後便發生傾倒；實驗三即為本論文之核心，對於機器人做智慧型的即時平衡控制，從數據上可驗證，由於可轉動馬達而保持其 ZMP 點於中心位置，因此有別於實驗二，能控制機器人與翹翹板成平行，使機器人在翹翹板上避免受到機身傾斜變動之影響而改變原本機器人之角速度，增進其安定性，且智慧型馬達控速之演算，使得角速度在 0deg/sec 附近時正負擺動較為緩慢，減少 PAPA-Man 機器人在中央時機身來回震盪的現象；實驗四則相對於實驗三，開啟機器人的即時平衡但未加入智慧型馬達控速之理論，由於無控速之功能因此較容易對大角度與較快速的擺動反應不及，從數據上驗證與有控速的實驗三相比，角速度 0deg/sec 附近正負擺動較為劇烈，導致易發生機器人機身震盪之現象。以下各圖即為四個實驗中 X 方向左右平衡時角速度的分析比較圖。

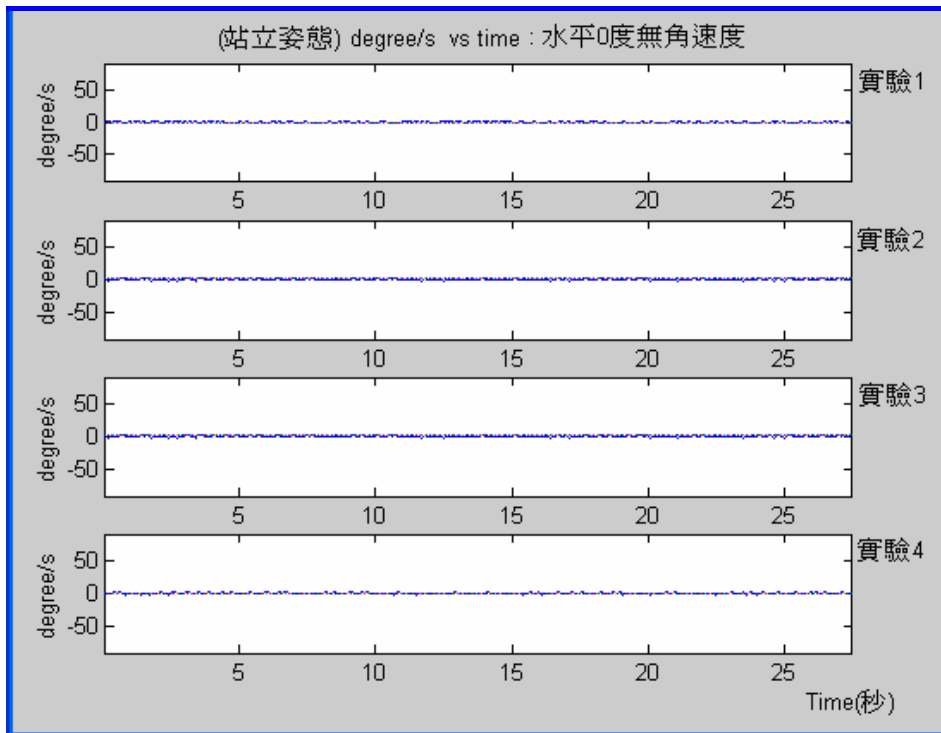


圖 5-26：站立姿態傾斜 0 度之安定比較圖

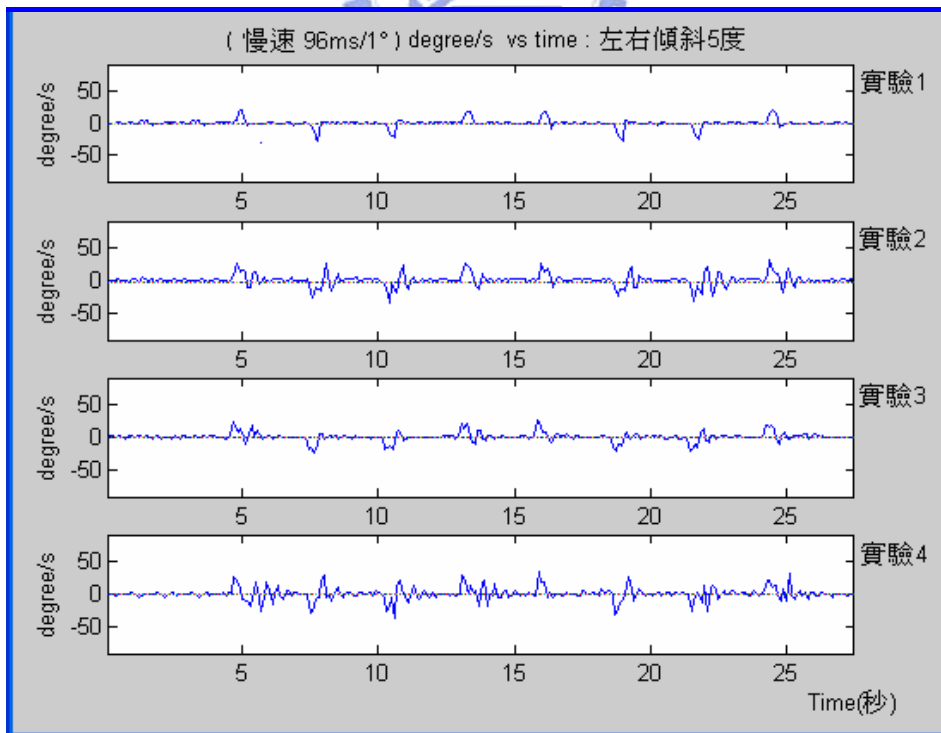


圖 5-27：慢速左右傾斜 5 度之安定比較圖

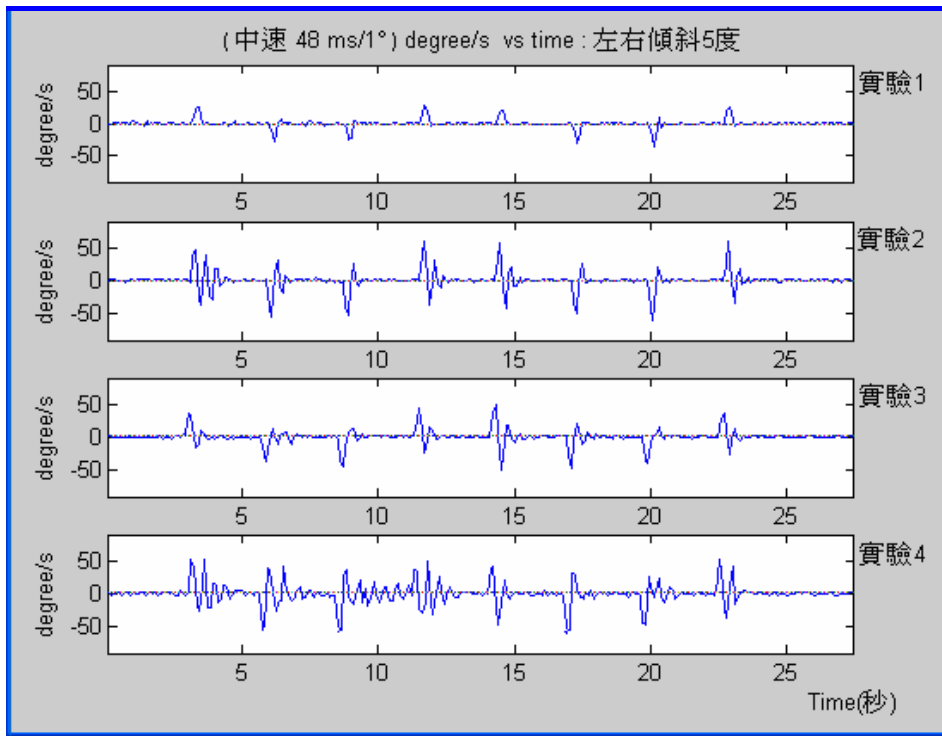


圖 5-28：中速左右傾斜 5 度之安定比較圖

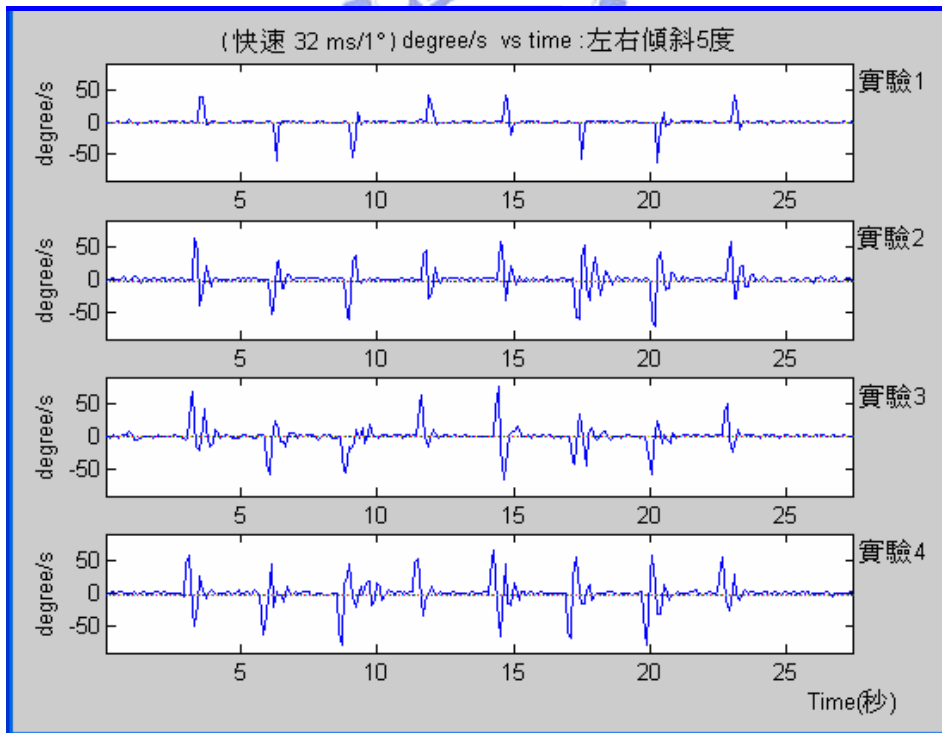


圖 5-29：快速左右傾斜 5 度之安定比較圖

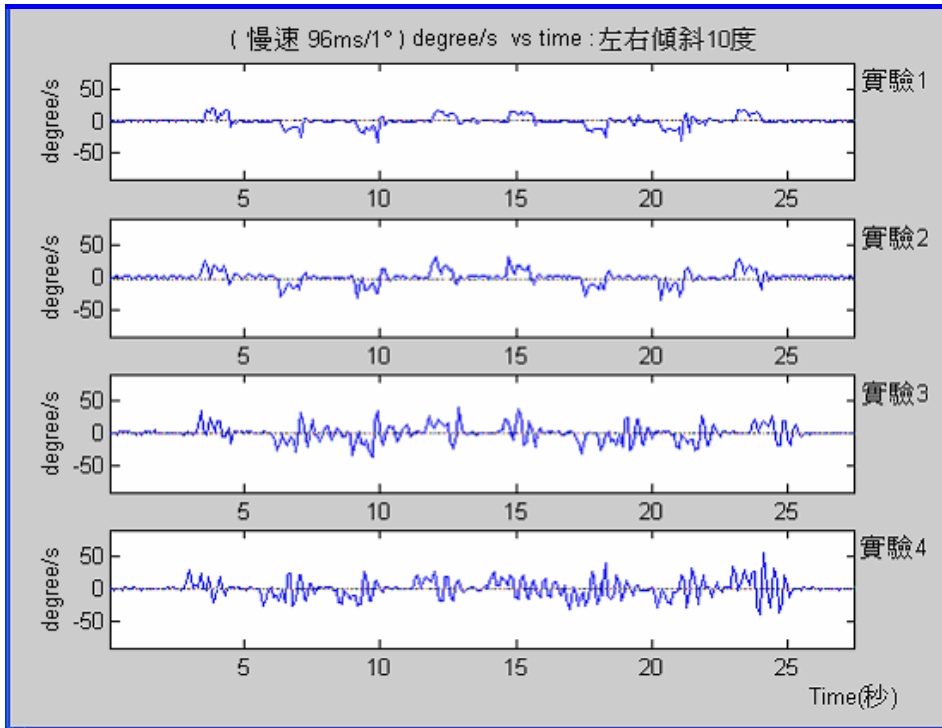


圖 5-30：慢速左右傾斜 10 度之安定比較圖

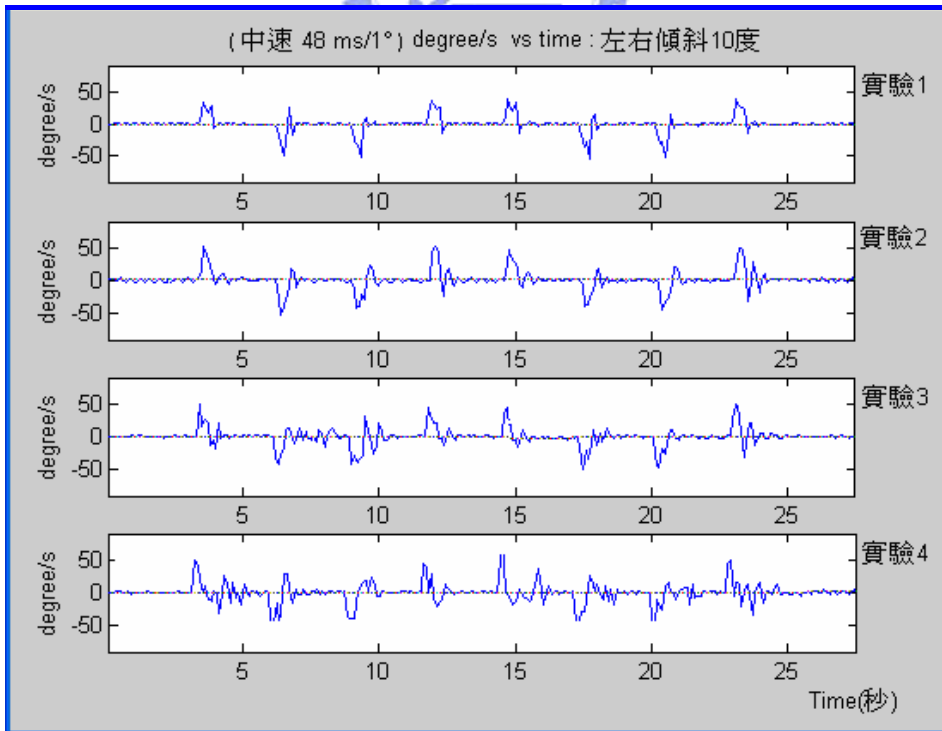


圖 5-31：中速左右傾斜 10 度之安定比較圖

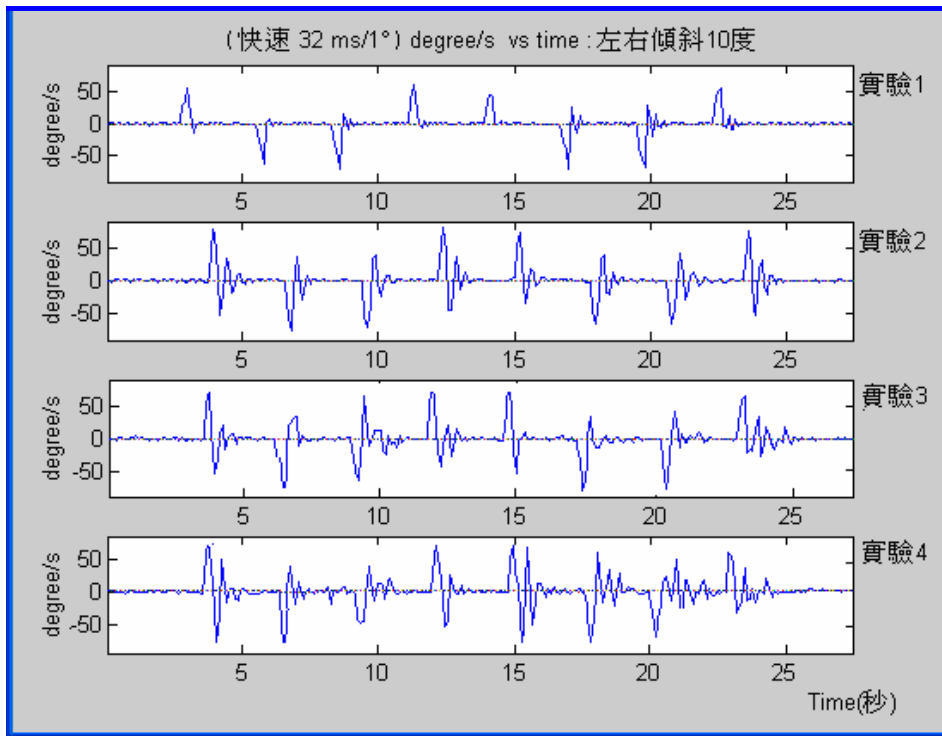


圖 5-32：快速左右傾斜 10 度之安定比較圖

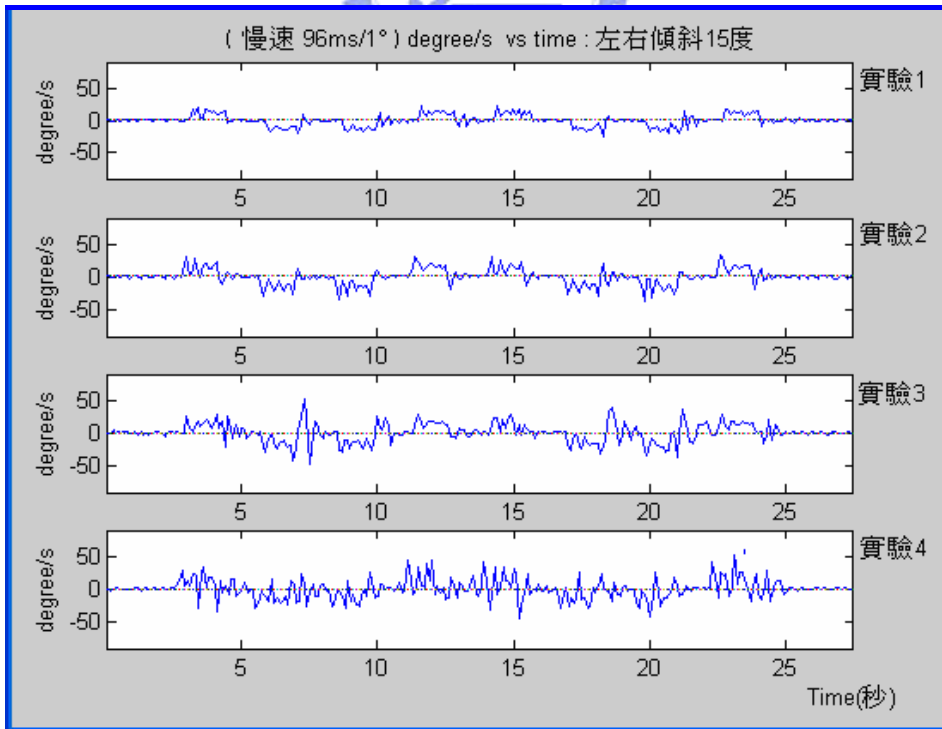


圖 5-33：慢速左右傾斜 15 度之安定比較圖

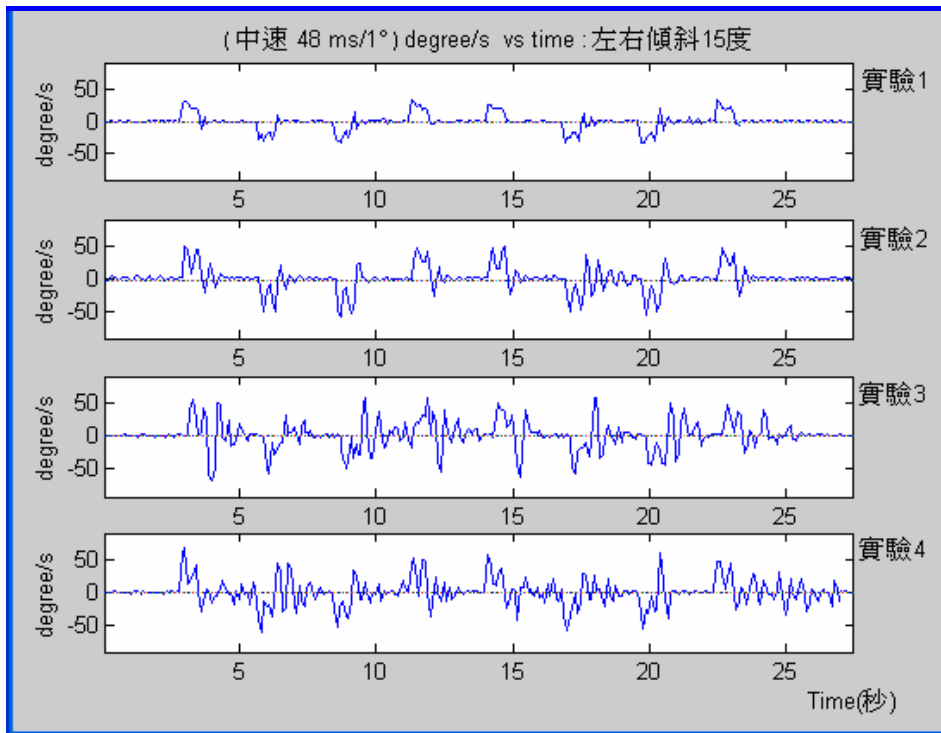


圖 5-34：中速左右傾斜 15 度之安定比較圖

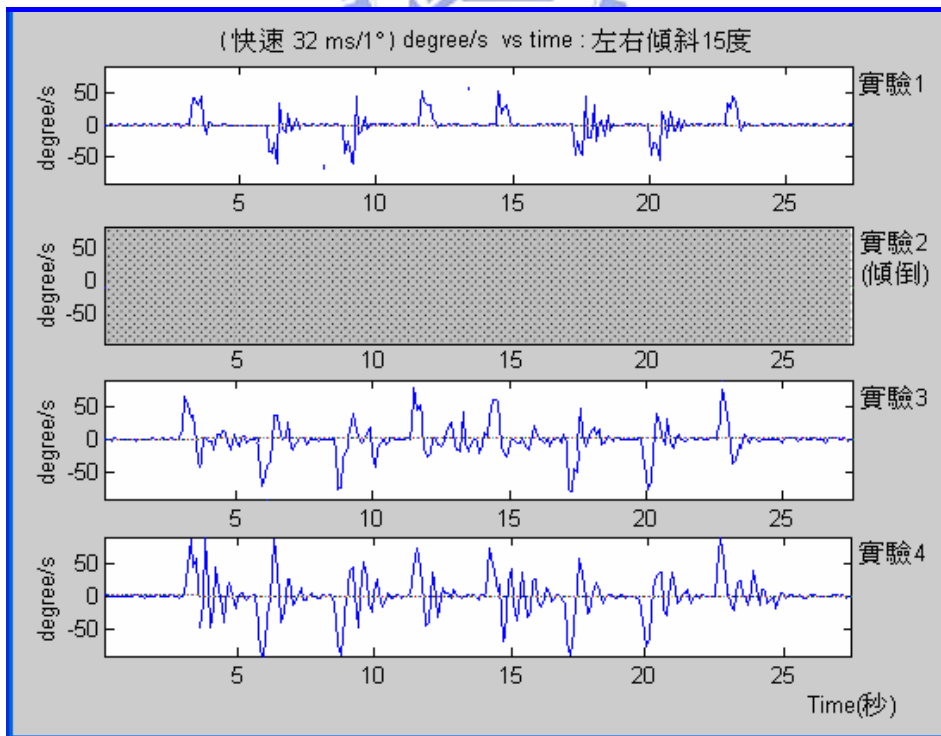


圖 5-35：快速左右傾斜 15 度之安定比較圖

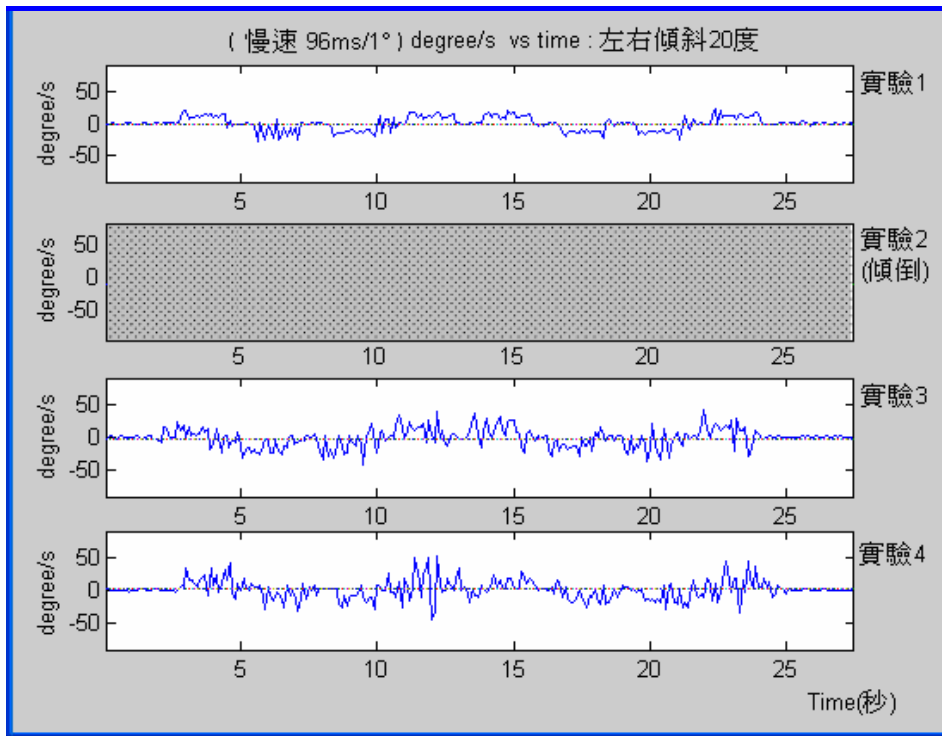


圖 5-36：慢速左右傾斜 20 度之安定比較圖

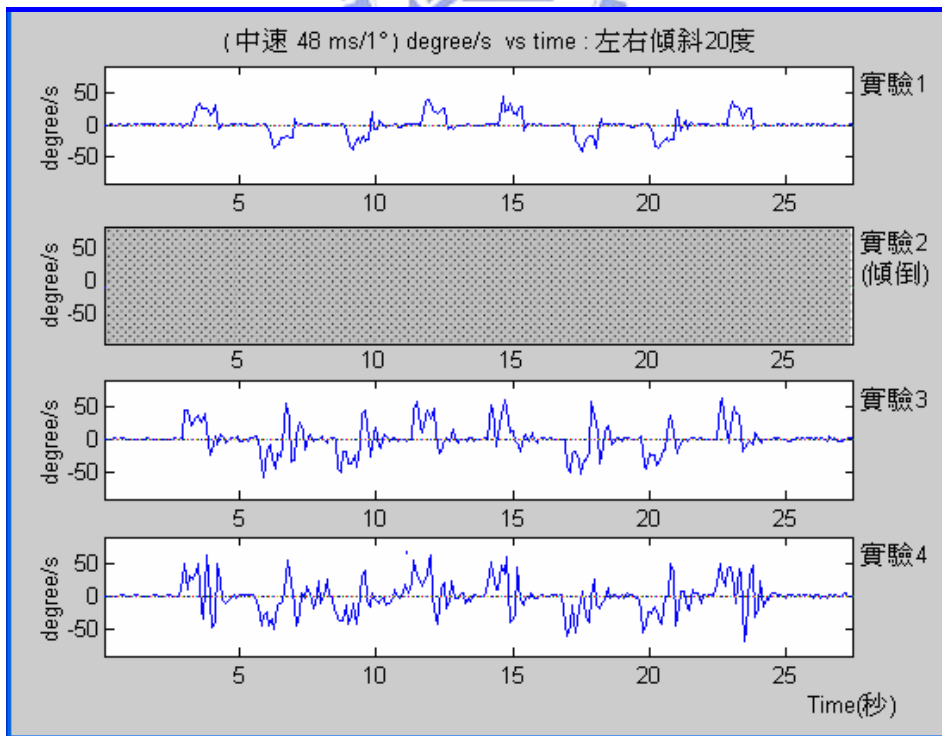


圖 5-37：中速左右傾斜 20 度之安定比較圖

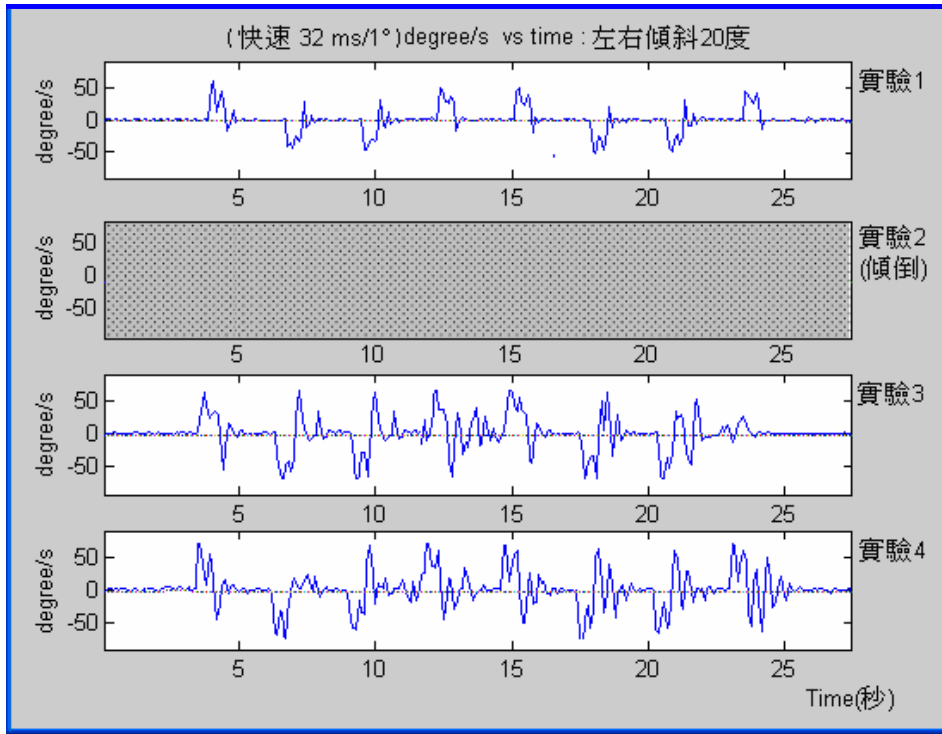


圖 5-38：快速左右傾斜 20 度之安定比較圖

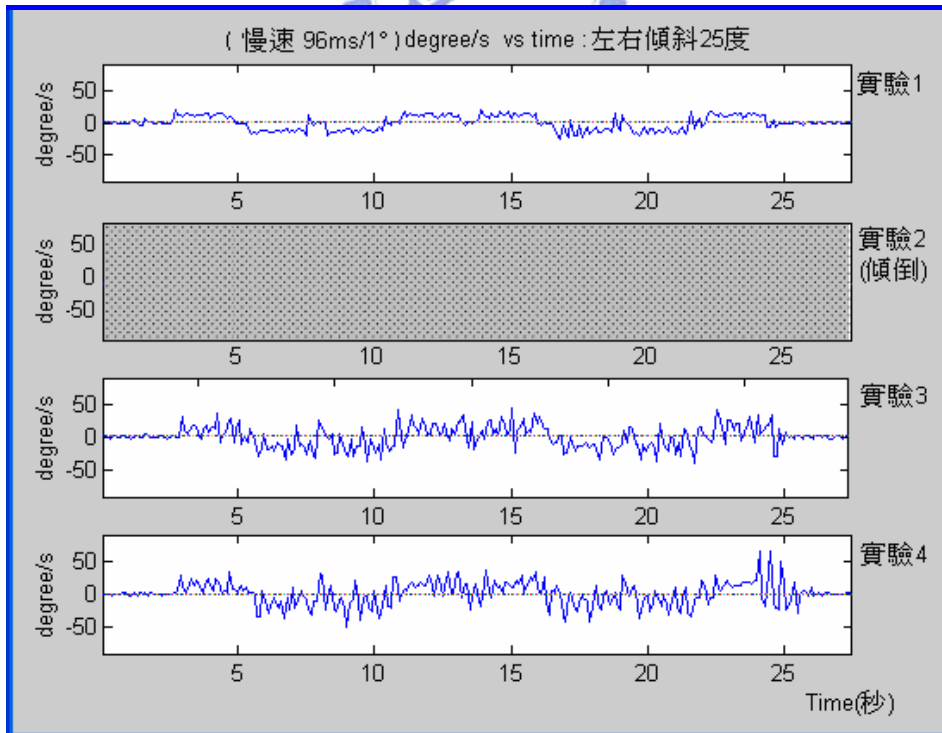


圖 5-39：慢速左右傾斜 25 度之安定比較圖

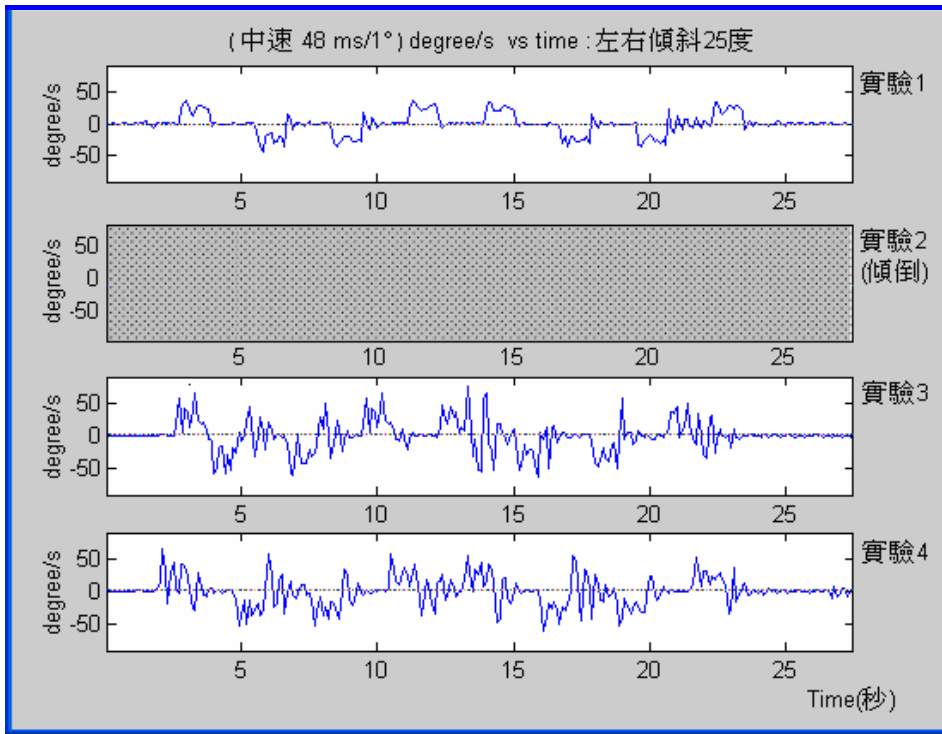


圖 5-40：中速左右傾斜 25 度之安定比較圖

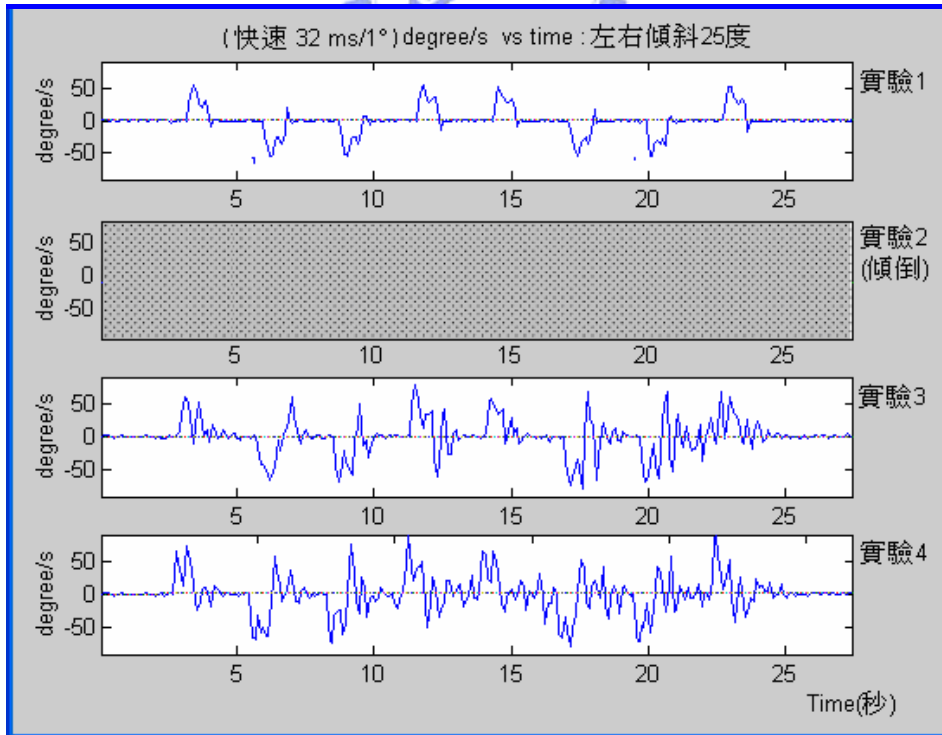


圖 5-41：快速左右傾斜 25 度之安定比較圖

除了利用上述實驗平台的傾斜儀與陀螺儀來量測機器人穩定度之傾斜角度與安定性之角速度資訊外，在此可以由 *PAPA-Man* 機器人雙足腳底的 FSR 來驗證目前 ZMP 是否使機器人處於平衡之狀態。5.1 節中，我們藉由直接移動機器人姿態之實驗，搭配『Balance Control Agent』軟體，從軟體視窗重心軌跡紀錄儲存的功能來紀錄目前機器人 ZMP 的移動變化；在此我們即是以此方式，開啟 *PAPA-Man* 機器人之智慧型即時平衡功能，利用『Balance Control Agent』軟體來紀錄機器人於各種不同地面傾斜角度與變動速度下即時平衡之 ZMP 變化情形。理想狀態下，機器人維持其即時平衡時，整體之 ZMP 點會保持在雙腳各自 ZMP 的連線中心上，因此若能一直維持左右腳各自的 ZMP 於設想之位置上，即能保持平衡，由圖 5-42 可得知機器人於站立姿態下傾斜 0 度之左右腳各自之 ZMP 平衡位置，因此開啟平衡後，若機器人之移動使得其左腳與右腳之 ZMP 點皆努力維持在圖 5-42 之目標位置，即可保持平衡，由以下之數據我們即可看出左右腳 ZMP 點努力維持此目標位置之現象，故可以驗證智慧型即時平衡系統與實際機器人即時平衡之正確性。由於可平衡之各種角度與速度實驗下，ZMP 數據皆可看出此種趨勢，在此便以 5 度與 10 度之數據來作為驗證之代表。

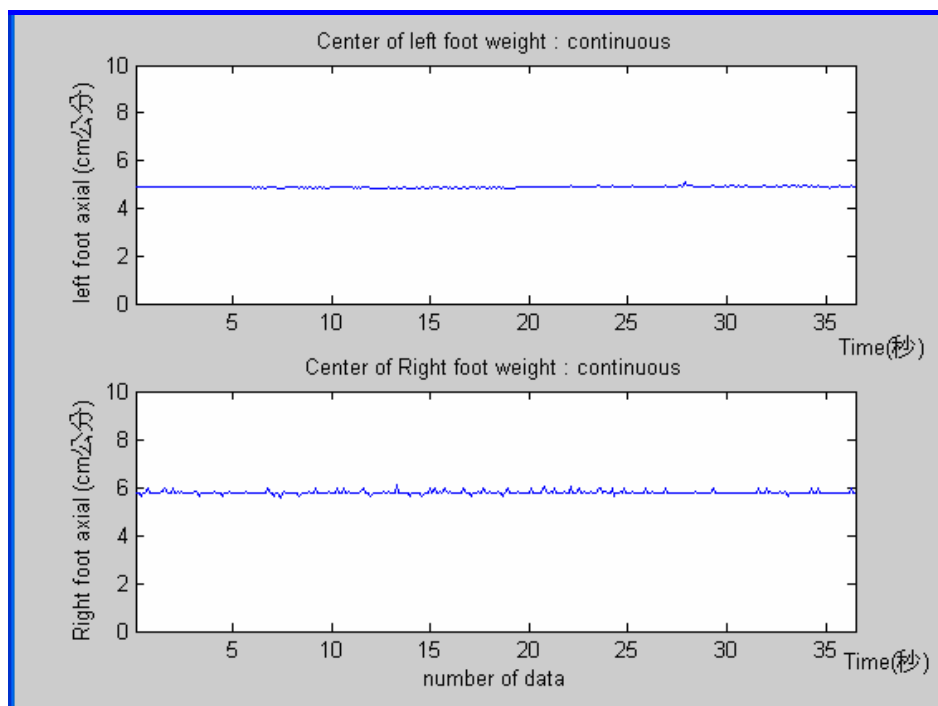


圖 5-42：站立姿態下傾斜 0 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

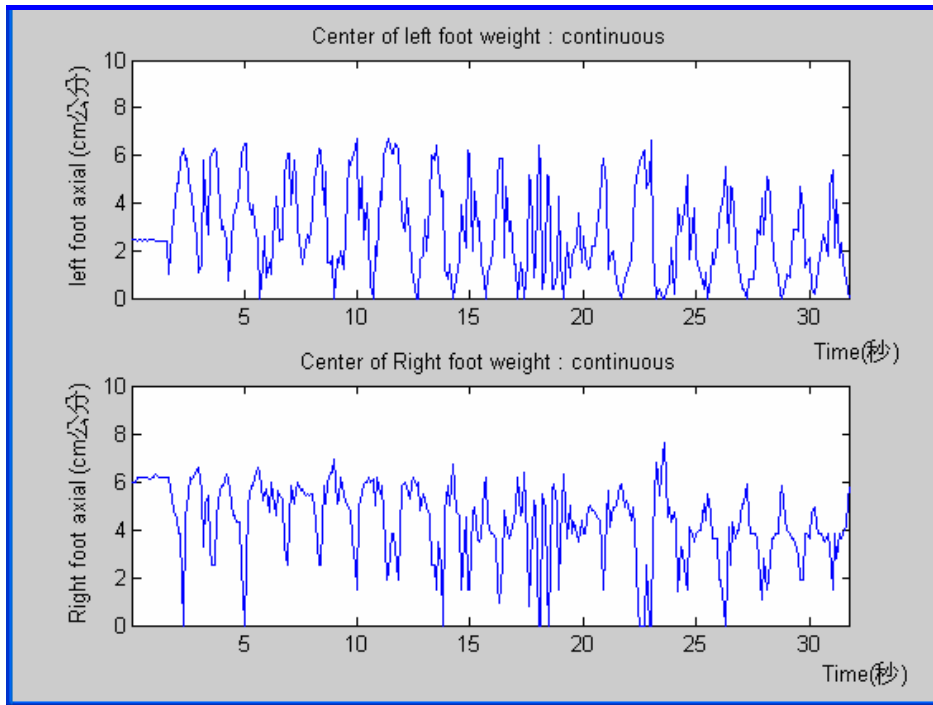


圖 5-43：慢速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

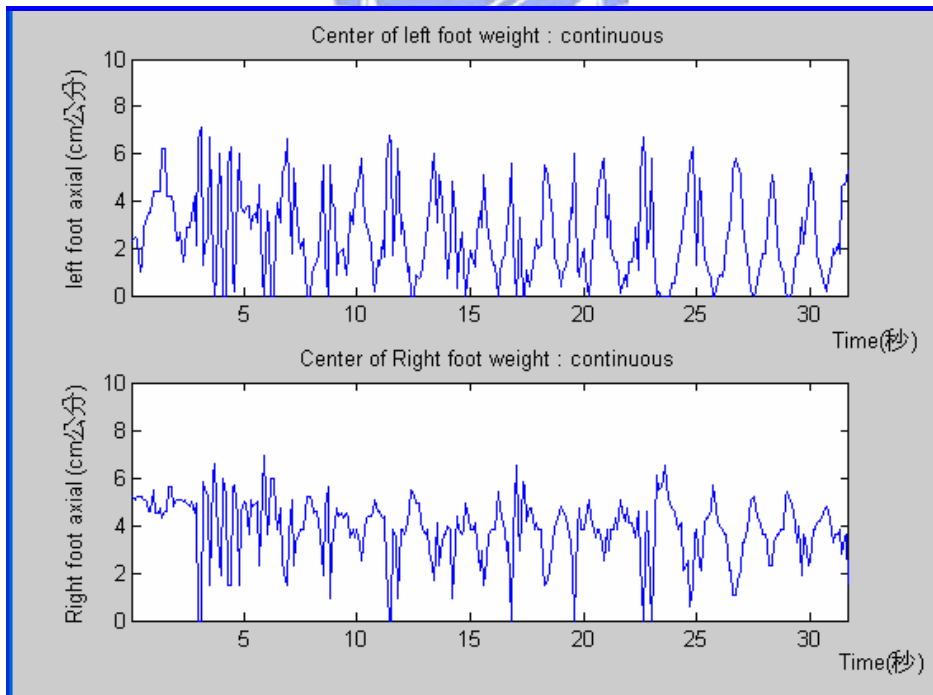


圖 5-44：中速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

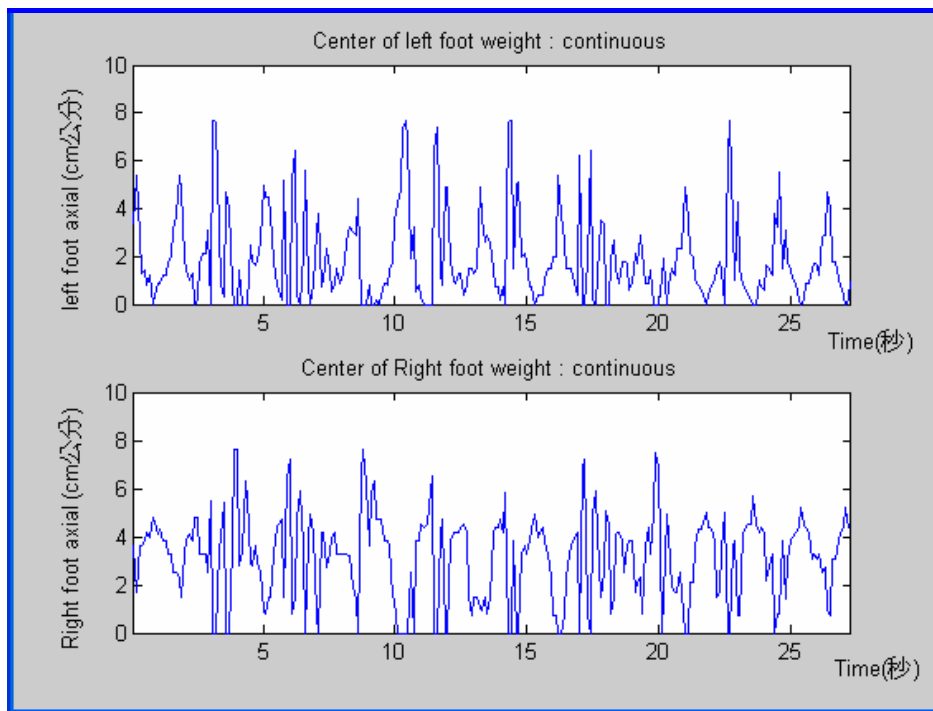


圖 5-45：快速左右傾斜 5 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

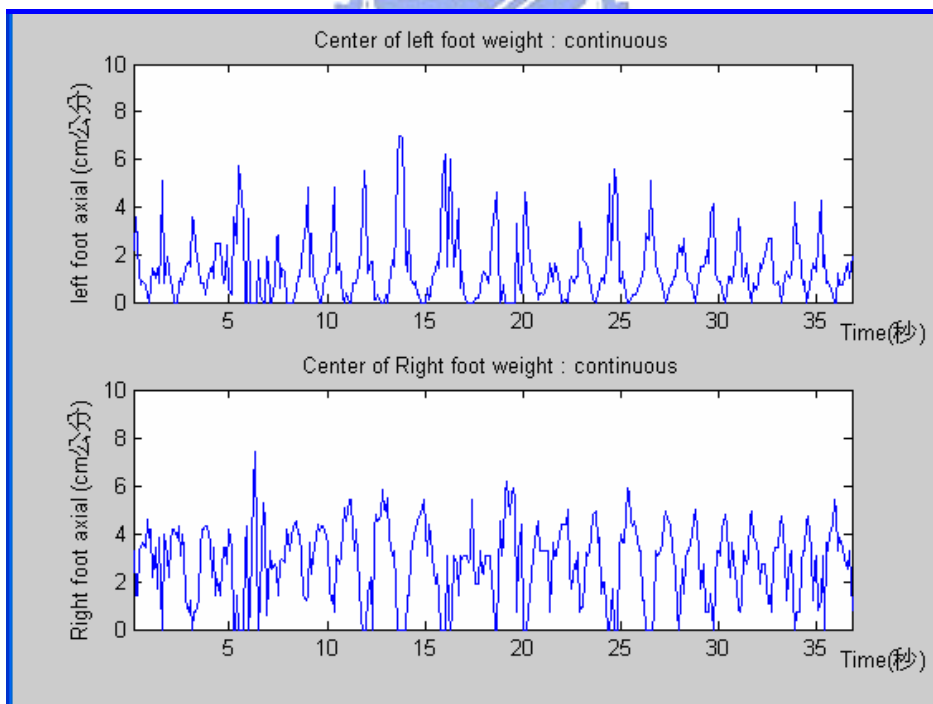


圖 5-46：慢速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

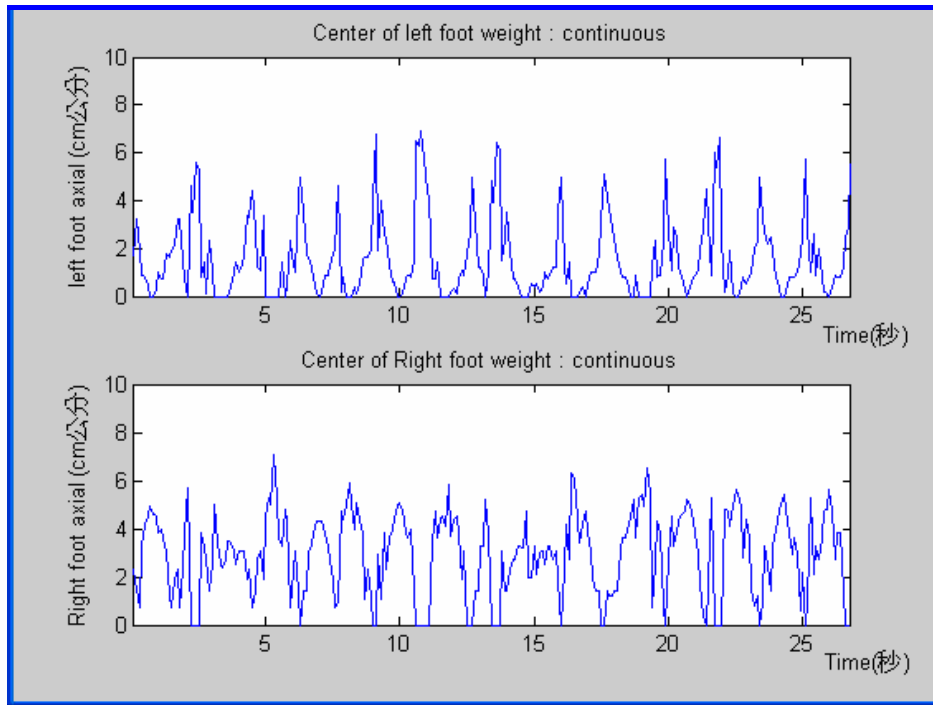


圖 5-47：中速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

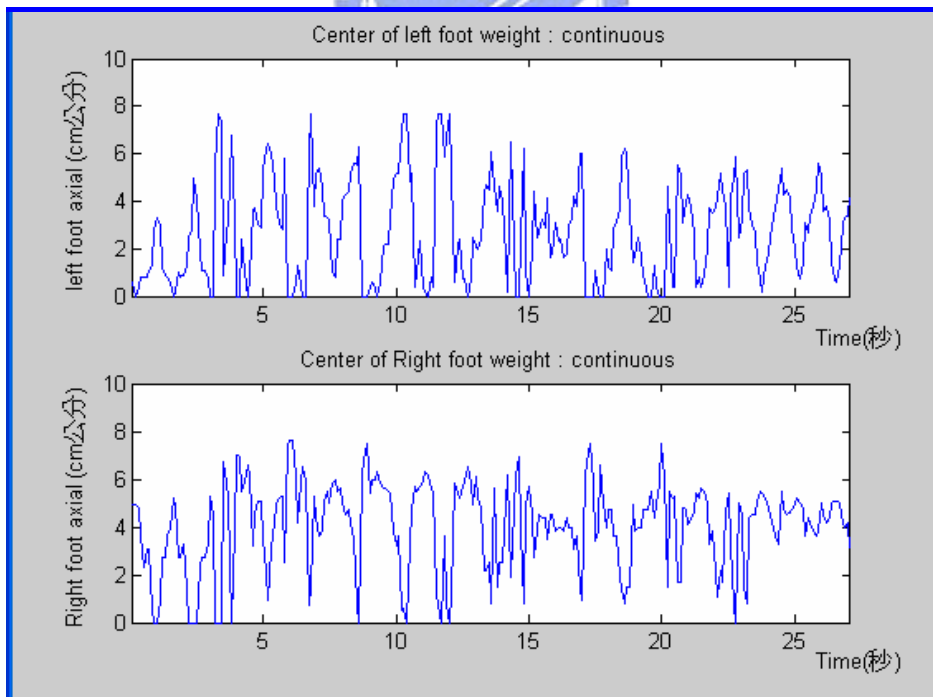


圖 5-48：快速左右傾斜 10 度之左右腳 ZMP 平衡位置圖

5.4 即時平衡實驗之連續圖

由上節得知雙足機器人『PAPA-Man』於各種平衡狀況的實驗數據後，最後本節介紹『PAPA-Man』在即時平衡實驗中主要具代表性的實際連續分解圖。

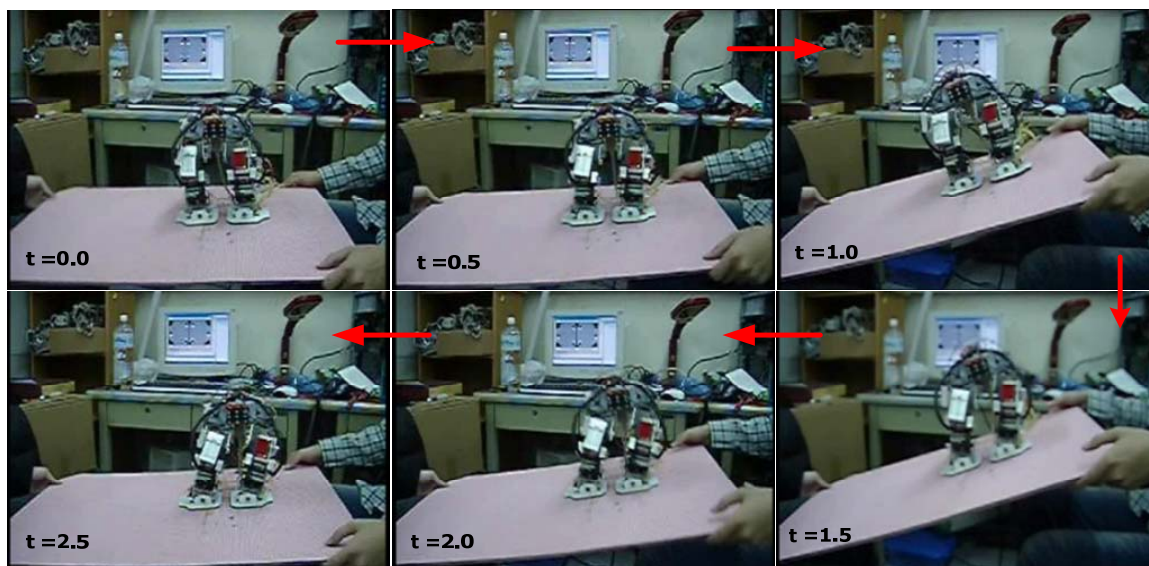


圖 5-49：『PAPA-Man』於右邊傾斜 20 度之即時平衡實驗分解圖

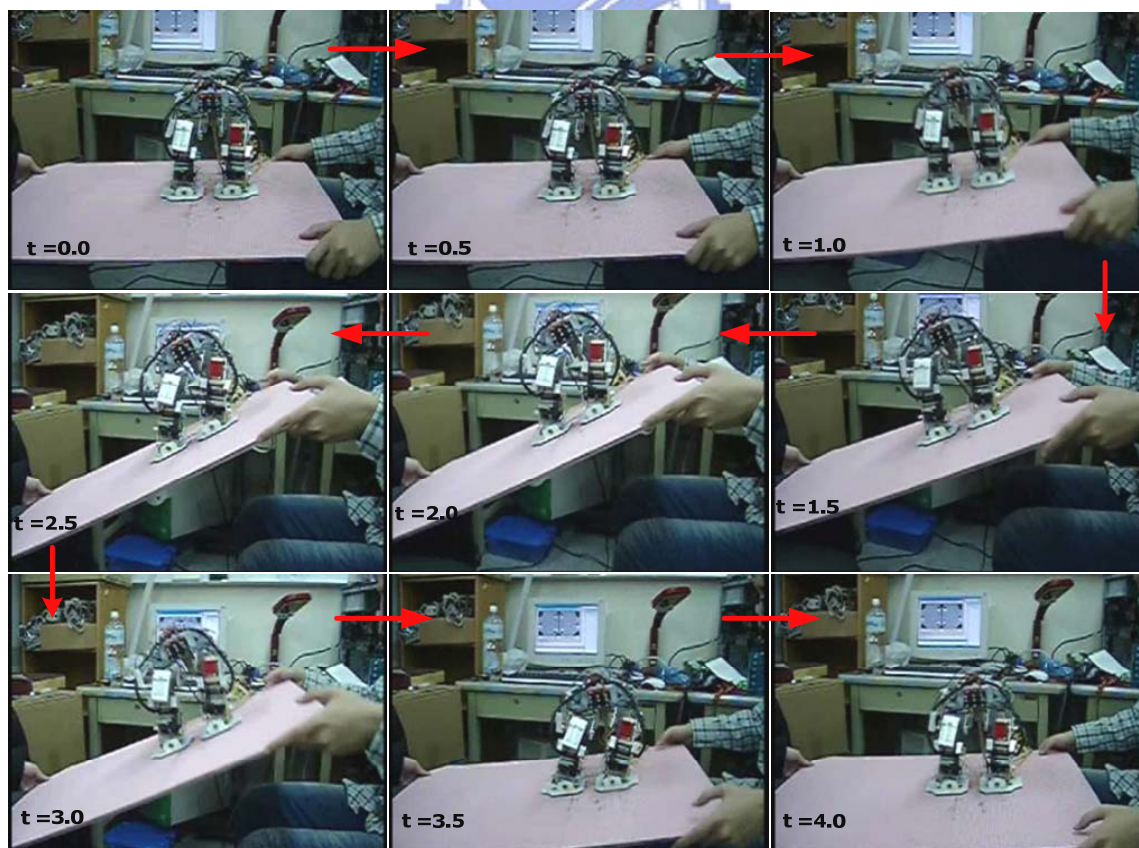


圖 5-50：『PAPA-Man』於右邊傾斜 30 度之即時平衡實驗分解圖

在此首先介紹雙足機器人 X 方向左右即時平衡的實驗，以小角度、中角度、大角度為傾斜角度之即時平衡實際連續分解圖當代表性的例子。圖 5-49、圖 5-50 分別為『PAPA-Man』於 X 方向右邊傾斜之即時平衡實驗分解圖，圖 5-49 為小角度傾斜約 20 度，圖 5-50 為中角度傾斜約 30 度，其小角度與中角度之右傾即時平衡狀況即如圖所示。下圖 5-51 則為『PAPA-Man』雙足機器人於 X 方向左邊傾斜之即時平衡實驗分解圖，其左傾斜角度為大角度 45 度，其平衡狀況如圖所示。『PAPA-Man』於實驗結果可得知其動態平衡時所能承受的傾斜角度約為 40 度~45 度，在每隔 0.5 秒的間距下快照，而大角度只要 2 秒鐘即可由水平的狀態提升到最高點，小角度更只需花費 1 秒，由此即可看出『PAPA-Man』於外界環境快速變化時即時模糊平衡之良好能力。

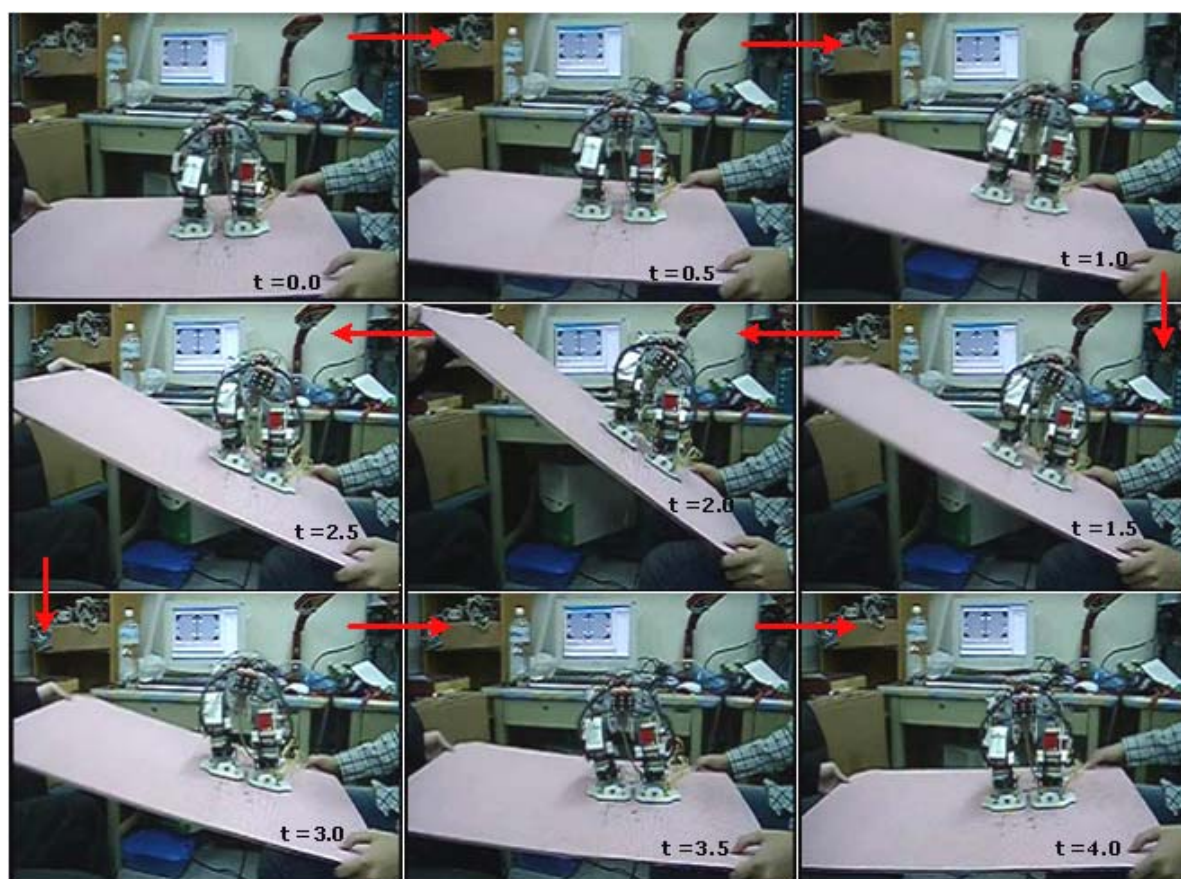


圖 5-51：『PAPA-Man』於左邊傾斜 45 度之即時平衡實驗分解圖

接著介紹機器人 Y 方向前後即時平衡的實驗。圖 5-52 為『PAPA-Man』於 Y 方向前後傾斜之即時平衡實驗分解圖，其傾斜角度約為 30 度，圖 5-52 為每隔 1

秒快照之平衡實驗分解圖。圖 5-53 亦為 Y 方向前後即時平衡的實驗分解圖，其特別之處為以單腳作前後方向的平衡，其傾斜角度約為 20 度。

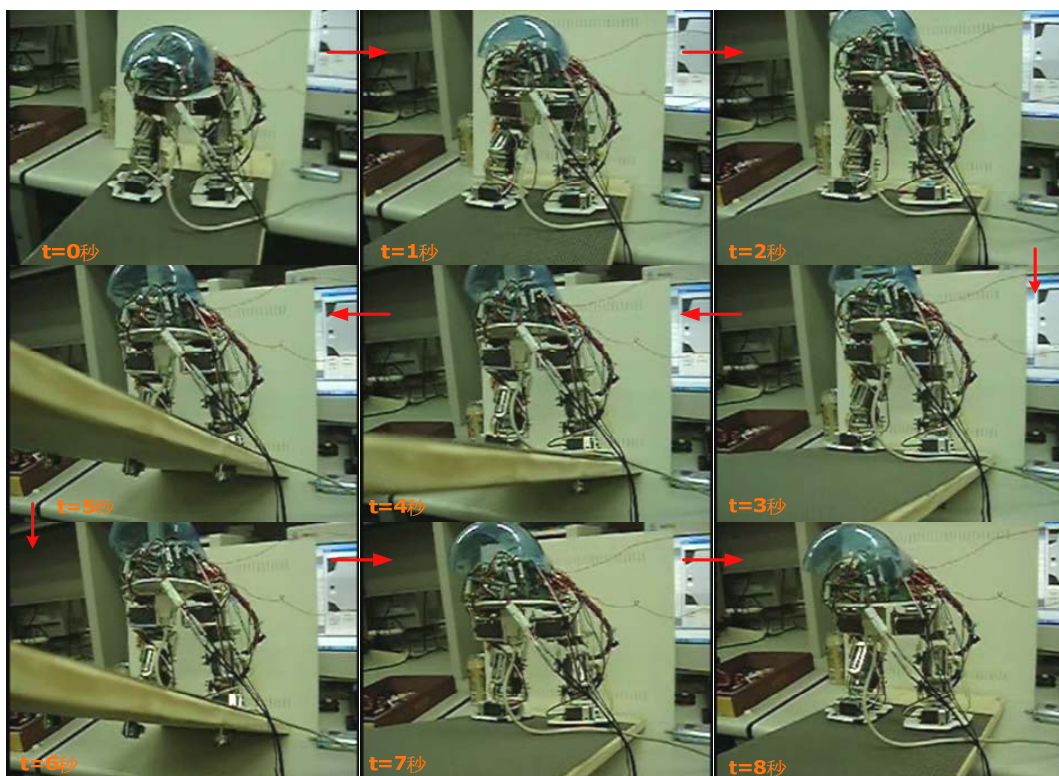


圖 5-52：『PAPA-Man』於前方傾斜 30 度之即時平衡實驗分解圖

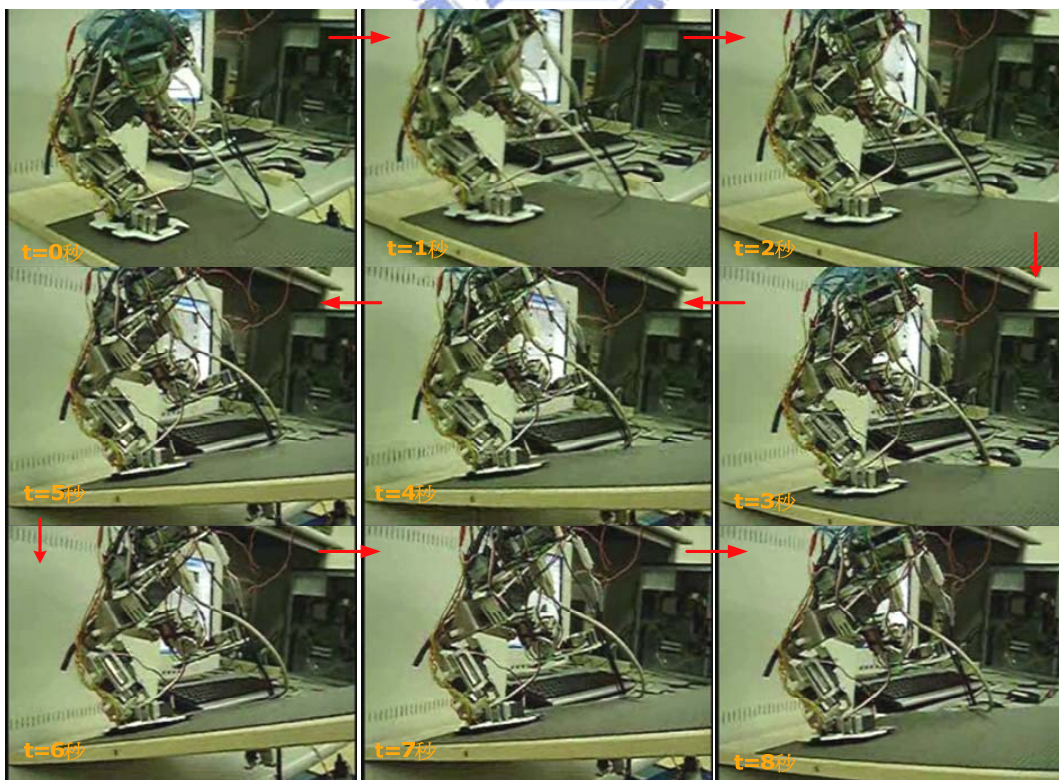


圖 5-53：『PAPA-Man』於前方傾斜 20 度之”單腳”即時平衡實驗分解圖

描述完『PAPA-Man』於 X 與 Y 方向傾斜之即時平衡的實驗後，除了特別簡介單腳前後平衡外，最後介紹『PAPA-Man』所具有特殊的平衡功能。由 3.1.1 小節可得知，傳統的 ZMP 公式計算機器人平衡時，大多有無法得知未知外力而具有無法自我平衡之缺點，而本論文利用 FSR 的量測來計算 ZMP 點即解決了此項問題；不需得知外力之值，在不明外力之作用下依然可以經由 FSR 計算出即時之 ZMP 點並交由模糊演算保持自身之平衡，如圖 3-8『PAPA-Man』受到未知外力”拉力”、圖 3-9 受到未知外力”推力”，機器人仍可智慧判斷而即時保持平衡。

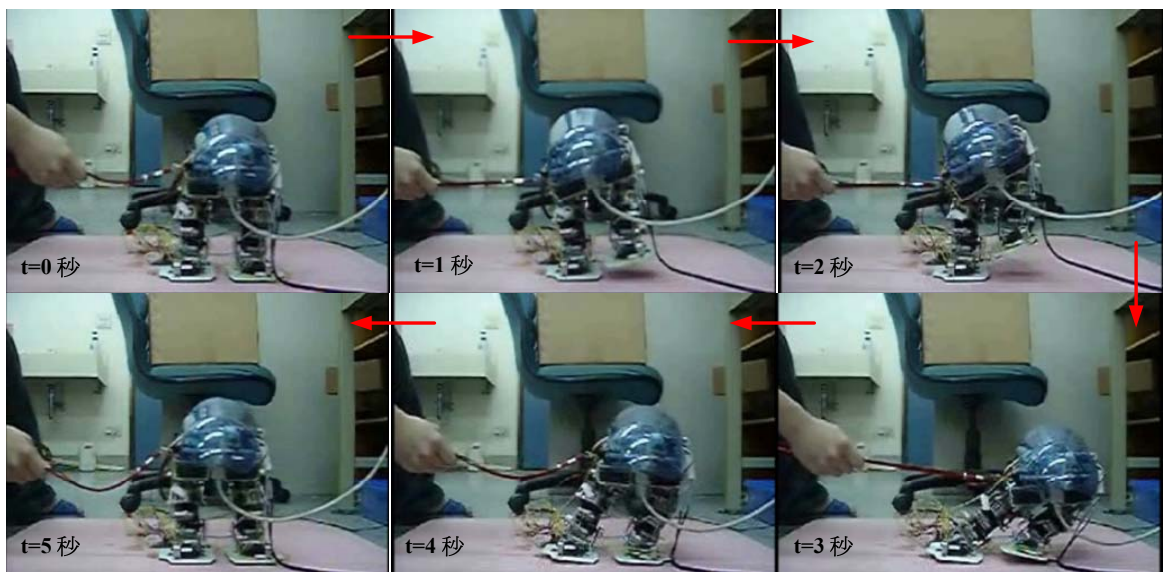


圖 5-54：『PAPA-Man』受到未知外力”拉力”之即時平衡實驗分解圖

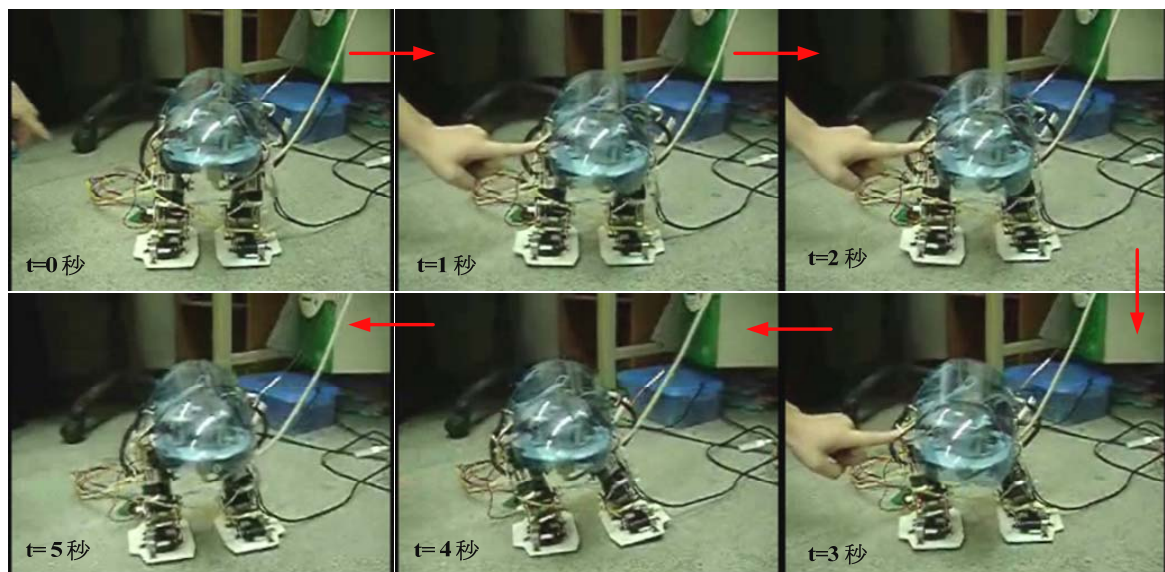


圖 5-55：『PAPA-Man』受到未知外力”推力”之即時平衡實驗分解圖

第六章 結論與未來發展

6.1 結論與貢獻

本論文之目的為使用低運算量之演算以達成機器人即時平衡之功能。因此使用運算能力較為低階之微處理器(PIC-18F452)為控制核心，以仿駝鳥構造之雙足機器人『PAPA-Man』為研究發展平台，成功發展出一套以 ZMP 觀點搭配智慧型演算法-模糊系統的平衡方法，並藉由此智慧型演算之方式改善傳統機器人平衡控制使用高階能力處理器所造成高成本與高運算量之缺失。本論文亦提出一套可彈性擴充機器人功能之分散式系統架構，此架構模仿人類的大腦，小腦和神經網路建置，運用 I2C 網路技術為神經通訊骨幹，將所有系統以 Master、Slave 的方式佈置成三層之階層式架構；可依照機器人功能之需求，利用 I2C 網路中 Slave 端之建置，簡易的以低成本低運算處理器擴充其 Slave 端，專職機器人新增加之功能做演算。由於各 Slave 端平行處理其負責之項目，Master 端只接收最後結果做判斷，因此 Slave 端之擴充不僅不影響其整體架構，倘若其中一個 Slave 端造成損壞，也只會損失其所負責之功能，而不影響機器人其餘功能之正常運作。

而本論文之核心，以智慧型演算法-模糊系統來控制機器人 ZMP 點的平衡方法，除了本身成功地建構在論文平台 PAPA-Man 雙足機器人，使其在不同傾角之地形與斜面即時平衡外，還具有少見能抵抗未知外力而能自我保持平衡之優點。而所提出的各種控制方法，如模糊規則庫之制定、ZMP 點控制之法則等，對於雙足機器人之平衡控制皆試圖提出一共通法則，希求若依照本論文所提供之共通方法，即可將此即時平衡之演算系統輕易的移植到各類雙足機器人上，為將來欲研究此項目者提供一簡易之門檻。進一步，對於機器人即時平衡實做上所容易遭受到的穩定性問題，在此提出了非主動性的 Data Moving average 與主動性的智慧型馬達控速之理論，並搭配第五章數據比較之驗證，改進雙足機器人在平衡時之整

體穩定性。

最後本論文以 Visual Basic 設計 pc 端人機介面的操控軟體-『Balance Control Agent』，透過此視窗介面，可即時觀看目前機器人重心位置而下達行為操控之指令，因此機器人即可以藍芽通訊經由此軟體對外擴充其運算能力。本研究整合了二足步行機器人之電子模組與電腦端之軟體通訊，並成功達到了低成本、高效率及高擴充性之優點。

6.2 未來發展與建議

本論文中，雙足機器人即時平衡之左右與前後方向平衡為獨立運作的，因此未來可繼續朝此目標邁進，可建立左右平衡與前後平衡同時運作之機制，雙足機器人即可對左右斜前方或是左右斜後方做即時平衡，而更靈活於適應在現實環境中。進一步，若將來雙足機器人 *PAPA-Man* 在機構上之設計更為穩定與流暢，未來可考慮將本論文所設計之即時平衡系統，與機器人連續的不同動作做即時平衡上之結合；目前本論文可以做到針對各個連續不同之動作以離線方式產生平衡動作檔，但尚未可以與機器人連續動作做即時的結合。因此未來若朝此方向前進，平衡系統與機器人連續之步行動作相結合，即可發展出機器人即時在各種不同斜坡角度之適應行走且同時保持每個動作之平衡，而不需事先得知目前斜坡之傾斜角度，將平衡系統做一深層之發展。除此之外，本論文所發展之平衡系統還有許多後續相關的結合與應用，如以目前的模糊平衡控制，再搭配上基因演算法或是機器人學控制理論精確之矩陣運算，藉以控制機器人以達到精準的軌跡而不失其平衡；或是利用與類神經網路來調整歸屬函數之劃分，使平衡效能產生最佳化等。

本論文所研究之方向，實為機器人領域中冰山之一角，還有許多方向值得我們去結合與開發。在此希求本論文所提供平衡演算系統之共通法則，可為將來欲研究此機器人平衡項目者提供一簡易之門檻，因而容易對平衡相關之研究發展出比此更深一層之理論與成果。

附錄 輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數

輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖設計則較為困難，由於機器人 ZMP 點的左右移動是受到腳踝關節和髖部關節角度調整之影響，但其之間的相互關係為非線性，很難以一個單純之數學式子來 dzmp 與 $\Delta\theta$ 之關係；比如說，在水平面調整 5 度的馬達轉角與在 10 度的斜面下調整 5 度的馬達轉角對機器人 ZMP 點之移動所造成之影響是不同的，這也是本論文不是以數學之關係來找出其確切馬達之補償轉角的原因，而改以模糊理論的方式，利用輸出馬達之補償角度來調整機器人之 ZMP 位置，使其盡可能保持在理想之 ZMP 點而維持其平衡。雖然在此並不是以精確之數學式子找出其關聯性而加以控制，但我們仍可藉由簡易的實驗之方式找出補償角度之論域與 ZMP 位置變化之大約關係。我們首先對機器人在站立平穩之狀態下，一度一度的往右調整其馬達角度，使馬達因此不斷往右傾，並同時紀錄馬達角度每往右動一度時，機器人 ZMP 的移動位置，如下圖所示。

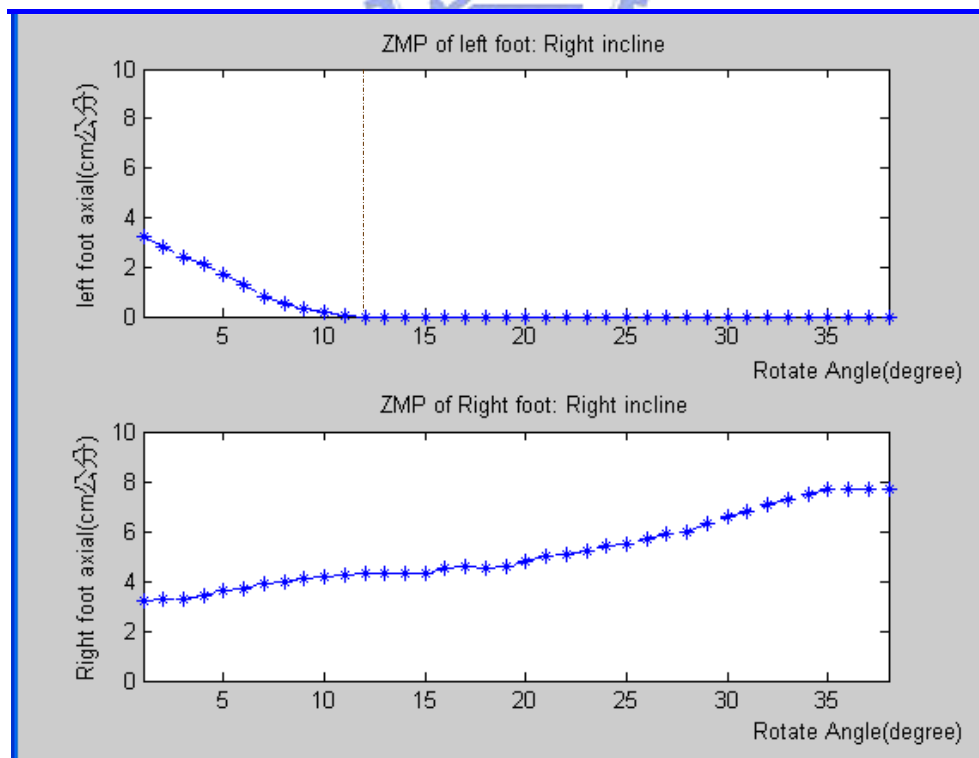


圖 0-1：機器人右傾對 ZMP 位置變化關係圖

接著則對機器人從站立平穩之狀態下，一度一度的往左調整其馬達角度，使馬達因此不斷往左傾，並同時紀錄馬達角度每往左動一度時，機器人 ZMP 的移動位置，如下圖所示。

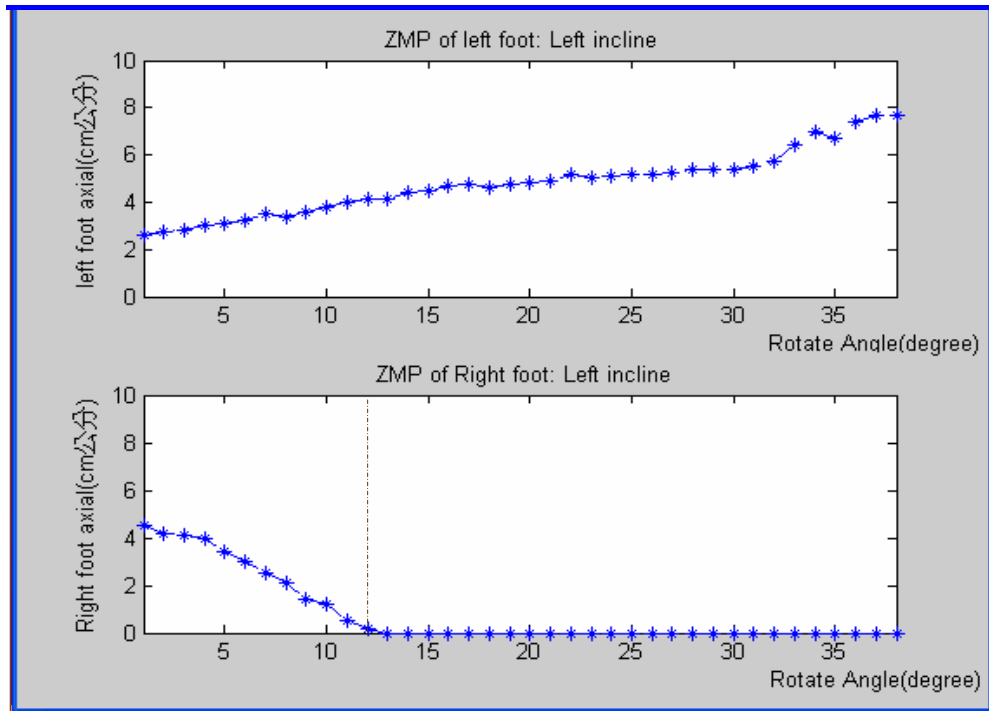


圖 0-2：機器人左傾對 ZMP 位置變化關係圖

由右傾的圖 0-1 與左傾的圖 0-2 相互比較可以發現，當馬達轉角轉到約為 12 度時，右傾時的左腳與左傾時的右腳即會離開地面，使騰空腳之 ZMP 變為零，故當馬達由 0 度轉到 12 度時，可發現機器人從雙腳支撐轉變為單腳支撐，而用單腳來維持身體之平衡較雙腳不穩定，故我們希望當機器人在平衡時，其補償之度最多在正負 12 度之間較為理想，故在此定訂出機器人輸出轉角之論域為 $[-12,12]$ ，並切割成 5 個模糊區塊，其最後完成之歸屬函數即如下圖所示。

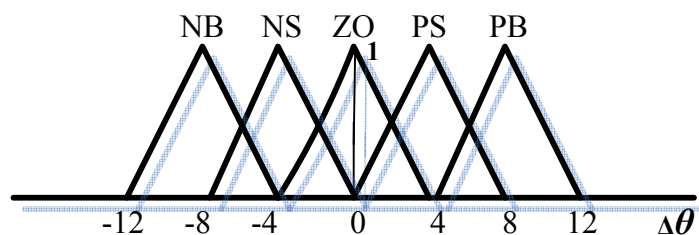


圖 0-3: 輸出變數 $\Delta\theta$ 之歸屬函數圖

参考文献

- [1] C.L. Golliday, Jr. and H. Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls," *IEEE Transactions on Automation Control*, AC-22-6, Vol. 22, No. 6, pp. 963-972, 1977.
- [2] Miyazaki, F., and Arimoto, S., 1980, "A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion," *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, pp. 233-239.
- [3] Furusho, J., and Masubuchi, M., 1986, "Control of a dynamical biped Locomotion System for Steady Walking," *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, pp. 111-118.
- [4] Napoleon, Shigeki Nakaura and Mitsuji Sampei, 2002, "Balance Control Analysis of Humanoid Robot based on ZMP Feedback Control," *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [5] John H. Park and Kyoung D.Kim, 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*.
- [6] A. A. Frank, "An Approach to the Dynamic Analysis and Synthesis of Biped Locomotion Machines," *Med. Biol. Eng.*, Vol. 8, pp. 465-476, 1970.
- [7] Tesuro Kitazoe, "Unsupervised Learning of Two Legged Robot", *IEEE International Workshop On Robot And Human Communication* (1994)
- [8] C. Shih and Y. Zhu, "Optimization of the biped robot trajectory," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 899-903 vol.2 1991.
- [9] Q. Li, A. Takanishi, and I. Kato, "A Biped Walking Robot Having A ZMP Measurement System Using Universal Force-Moment Sensor," *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and System IROS'91*, Nov. 3-5, pp. 1568-1573, 1991.
- [10] Sung-Hoon Kim, Jun-Ho Oh, and Ki-Hoon Lee, "Design of 4 Joints 3 Links Biped Robot and Its Gaits," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1155 - 1160 2000.
- [11] D. Kim, S.-j. Seo and G. -T. Park, "Zero-moment point trajectory modelling of a biped walking robot using an adaptive neuro-fuzzy system," *IEEE Proceedings Control Theory Application*, Vol. 152, No. 4, July 2005.
- [12] M. Y. Cheng, C. S. Lin, "Genetic Algorithm for Control Design of Biped Locomotion", 1995 IEEE.
- [13] Hani Hagaras, Victor Callaghan, Martin Colley, "Online Learning of Fuzzy Behaviours using Genetic Algorithms & Real-Time Interaction with the

- Environment ”, *Proceedings of the 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference*.
- [14] T. Fukuda and Y. Komata, “Stabilization control of biped locomotion robot based learning with GAs having self-adaptive mutation and recurrent neural networks,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 217-222 vol.1 1997.
- [15] J. Furusho, and A. Sano, “Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped,” *International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 83-98, 1990.
- [16] 來源網站：<http://world.honda.com/ASIMO/>.
- [17] Hirai, M., et al., 1998 “The Development of Honda Humanoid robot,” in Proc., *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1321-1326.
- [18] 來源網站：<http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/>.
- [19] Wu, L.-W., Hu, J.-S. Demo Video: A Distributed Embedded Control Platform for Robots Using Real-Time Ethernet. [Online]. Available: <http://xlab.cn.nctu.edu.tw/Liwei/eRobot.htm>.
- [20] 來源網站：<http://www.pclady.com.cn/body/equipment/0506/pic/20050616yy28.jpg>.
- [21] 來源網站：<http://www.treknature.com/gallery/Africa/Tanzania/photo3010.htm>.
- [22] Li-Wei Wu, Jwu-Sheng Hu, "Distributed Embedded Real-Time Ethernet Platform for Robots Control, "IEEE International Conference on Mechatronics, July 10-12, 2005.
- [23] 來源網站：<http://www.speedmodels.com/deutsch/cars/buggys/eb4-s3.html>.
- [24] 來源網站：http://210.202.88.200/products_electron.php?id=28&class_id=2.
- [25] 益眾無線藍芽模組對 RS-232 轉換器使用說明書。[Online]. Available:<http://www.icci.com.tw/>.
- [26] 來源網站：<http://www.semiconductors.philips.com/>.
- [27] Erbatur, K., Okazaki, A. Obiya, K. and Kawamura, A. “A study on the Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots,” *7th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.431-436, 2002.
- [28] 來源網站：<http://www.phidgetsusa.com/index.asp>.
- [29] 來源網站：http://www.xbow.com/Inertial_home.aspx.
- [30] 來源網站：<http://www.spp.co.jp/sssj/sirikon-e.html>.
- [31] Vukobratović, M. 著，步行機器人與人工腳，趙平譯，臺隆書店，臺北，1983。
- [32] 王文俊，認識 fuzzy，全華科技圖書股份有限公司，1994。
- [33] 紀捷聰，「二足步行機器人的設計製作與控制」，國立台灣科技大學電機工程研究所，博士學位論文，民國 90 年。