

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

雙足機器人之步態補償控制設計

Gait Compensation Control Design of a
Biped Robot



研究生：許煥坤

指導教授：宋開泰 博士

中華民國九十七年十月

雙足機器人之步態補償控制設計
Gait Compensation Control Design
of a Biped Robot

研究生：許煥坤

Student: Huan-Kun Hsu

指導教授：宋開泰 博士

Advisor: Dr. Kai-Tai Song



A Thesis
Submitted to Department of Electrical and Control Engineering
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Electrical and Control Engineering
October 2008
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年十月

雙足機器人之步態補償控制設計

學生：許煥坤

指導教授：宋開泰 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

本論文之目的在於設計一雙足機器人及其運動控制系統，並探討其於直線步行中遇到不平物體障礙時之步態補償以避免傾倒。藉由安裝在腳底的壓力感測器取得腳底受力的資訊，使雙足機器人得以在地面上有不平物體之步行中，產生適度的補償動作以完成步行。本論文中採用靜態步行(Static Walking)的控制方式來設計機器人的動作與軌跡，使用不同的參數設定可對軌跡進行修改。在方法上，本論文發展出一套補償控制器演算法，使用量測式的 ZMP 計算，於步行中可以藉由機器人腳底壓力感測器所獲得的 ZMP 資訊，判斷腳底障礙物的存在與位置，並因此產生機器人腳部的補償動作以進行障礙物之適應，使機器人得以順利跨越障礙物。文中以實驗室自行設計之 60 公分高的 12 自由度雙足機器人搭配工業電腦，驗證所提出方法的可行性。經過實驗驗證，此系統可相當程度提高機器人經過 21mm 高障礙物之穩定性。

Gait Compensation Control Design of a Biped Robot

Student: Huan-Kun Hsu

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The objective of this thesis is to design a biped robot and a motion controller such that it can handle an uneven floor in bipedal walking. Walking pattern for stably straight motion is generated online in real time. Using the information of the pressure sensors under the biped feet, the robot can walk across an uneven obstacle with suitable compensation of the angle of the ankle joint. The method of static walking is adopted to generate the walking trajectory which can be changed by modulating parameters. By measuring the ZMP, we also develop an algorithm which is used to sense obstacles under the foot and generating the compensation of the ankle. The compensation is combined with the walking trajectory to adapt to the obstacle on the ground while robot walking. Experimental results show that the biped robot can walk successfully across the obstacle which is lower than 21mm.

誌謝

謹向我的指導教授宋開泰博士致上感謝之意，感謝他兩年來在專業上的指導，以他豐富的學識與經驗，配合理論的應用，使得本論文得以順利完成。感謝口試委員楊谷洋教授與蔡清池教授的指導與意見，讓本論文能夠更加嚴謹。

感謝與我共同奮鬥的同學弘哲、兆戊及仕傑的相互鼓勵及提攜，以及學弟科棟、巧敏及舒涵在生活上帶來的樂趣，同時感謝學長孟儒、嘉豪、格豪、振暘、志昇及裕宏在實作與理論上的指點。

感謝我的朋友們的勉勵與支持，並在研究上相互討論，讓我獲益良多。最後感謝我的父母與家人，由於他們的辛苦栽培，在生活上給予我細心地關懷與照料，使得我才得以順利完成此論文，在此我願以此論文獻給我最感激的父母親。



目錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 相關研究回顧.....	2
1.3 問題描述.....	3
1.4 系統架構.....	4
1.5 主要貢獻.....	5
1.6 章節說明.....	5
第二章 雙足機器人設計與實現	6
2.1 雙足機器人之整體架構.....	6
2.2 雙足機器人之機構設計與實現.....	7
2.2.1 雙足機器人腳部自由度配置.....	7
2.2.2 雙足機器人下半身機構設計與實現.....	12
2.2.3 雙足機器人上半身機構設計與硬體配置.....	19
2.3 雙足機器人之硬體設計與實現.....	19
2.3.1 運算系統之實現.....	20
2.3.2 壓力感測系統之設計與實現.....	21
2.3.3 馬達控制系統之設計與實現.....	25
2.4 雙足機器人之軟體設計與實現.....	28
第三章 步態規劃	29
3.1 步行軌跡產生系統架構.....	29
3.2 步態規劃.....	30
3.2.1 腰部及腳部軌跡產生.....	31

3.2.2	腳部至腰部向量計算.....	33
3.2.3	雙足機器人運動學.....	34
3.2.4	雙足機器人行走之分析.....	41
第四章	補償控制器設計	43
4.1	補償控制器架構.....	43
4.2	壓力感測器數值轉換.....	44
4.3	零力矩點 ZMP 計算	44
4.4	基於力量測之 ZMP 補償	46
4.4.1	ZMP 穩定區間定義	47
4.4.2	控制器的作用原理與方式.....	48
4.4.3	控制器的作用時機.....	50
第五章	實驗結果	51
5.1	壓力感測器實驗.....	51
5.2	平地直線軌跡步行實驗.....	54
5.3	障礙地形步行實驗.....	61
5.4	討論.....	69
第六章	結論與未來展望	72
6.1	結論.....	72
6.2	未來展望.....	72
參考文獻	73

圖目錄

圖 1.1 系統架構圖.....	5
圖 2.1 雙足機器人之整體架構.....	6
圖 2.2 雙足機器人重心橫移正面示意圖.....	8
圖 2.3 雙足機器人重心前移側面示意圖.....	9
圖 2.4 雙足機器人跨步高度正面示意圖(a)單腳 4 自由度(b)單腳 5 自由度.....	9
圖 2.5 雙足機器人跨步旋轉俯視示意圖.....	9
圖 2.6 雙足機器人自由度配置示意圖.....	10
圖 2.7 雙足機器人各關節座標旋轉向量示意圖.....	11
圖 2.8 雙足機器人正面全身圖.....	11
圖 2.9(a)右腳踝關節背面設計圖(b)右腳踝關節正面設計圖.....	12
圖 2.10 踝關節實際外觀(a)背面(b)正面.....	13
圖 2.11(a)右腳踝關節 Roll 方向活動性(b)右腳踝關節 Pitch 方向活動性.....	13
圖 2.12(a)膝關節背面設計圖 (b)膝關節正面設計圖.....	14
圖 2.13 膝關節實際外觀(a)背面(b)正面.....	14
圖 2.14 膝關節 Pitch 方向活動性.....	14
圖 2.15 (a)髖關節背面設計圖 (b)髖關節正面設計圖.....	15
圖 2.16 髖關節實際外觀(a)背面(b)正面.....	16
圖 2.17 (a)髖關節 Pitch 活動性(b)髖關節 Roll 活動性(c)髖關節 Yaw 活動性.....	16
圖 2.18 下半身設計正面全圖.....	18
圖 2.19 下半身設計背面全圖.....	18
圖 2.20 控制系統架構.....	20
圖 2.21 IPC GENE-9310.....	20
圖 2.22 足底壓力感測器裝配位置俯視與相對位置示意圖.....	21
圖 2.23 腳底夾層設計.....	21
圖 2.24 壓力感測器實體.....	22
圖 2.25 OP 放大電路實體.....	23
圖 2.26 OP 反相放大電路設計示意圖.....	23
圖 2.27 OP 放大電路電源板實體與電池.....	23
圖 2.28 OP 放大電路電源板示意圖.....	24
圖 2.29 類比轉數位轉換器實體.....	24
圖 2.30 直流伺服馬達實體.....	26
圖 2.31 直流伺服馬達控制器實體.....	26
圖 2.32 CAN 匯流排介面控制器實體.....	27
圖 2.33 CAN 匯流排介面電路分接板.....	27
圖 2.34 PC 端操作介面.....	28
圖 3.1 步行軌跡產生器架構.....	30

圖 3.2 擺線輪廓曲線函數示意圖.....	31
圖 3.3 雙足機器人行走模擬側視圖.....	32
圖 3.4 單週期腰部軌跡示意圖.....	33
圖 3.5 腳部至腰部位置向量計算示意圖.....	33
圖 3.6(a)腳部模型(b)腳部 D-H model	35
圖 3.7 一組位置可解出之所有角度解.....	40
圖 3.8 單週期雙足機器人行走模擬 3D 圖	40
圖 3.9 雙足機器人行走相位示意圖.....	41
圖 3.10 雙足機器人步行之完整週期.....	42
圖 3.11 雙足機器人行走重心示意圖.....	42
圖 4.1 補償控制器架構圖.....	44
圖 4.2 雙足機器人步行時 ZMP 穩定範圍示意圖	45
圖 4.3 壓力感測器安裝示意圖.....	47
圖 4.4 單腳 ZMP 穩定區間示意	48
圖 4.5 擺動腳障礙物偵測的原理示意(a)未補償(b)補償中(c)補償後.....	48
圖 4.6 控制器的作用時機示意.....	50
圖 5.1 壓力感測器壓力與讀值對應曲線 (a)sensor 1 (b)sensor 2 (c)sensor 3 (d)sensor 4 (e)sensor 5 (f)sensor 6 (g)sensor 7 (h)sensor 8	53
圖 5.2 實驗環境配置.....	55
圖 5.3 直線步行動作單週期序列示意圖.....	55
圖 5.4 左腳 X 方向 ZMP 軌跡	56
圖 5.5 左腳 X 方向單一週期 ZMP 軌跡	56
圖 5.6 左腳 Y 方向 ZMP 軌跡	57
圖 5.7 左腳 Y 方向單一週期 ZMP 軌跡	57
圖 5.8 右腳 X 方向 ZMP 軌跡	58
圖 5.9 右腳 X 方向單一週期 ZMP 軌跡	58
圖 5.10 右腳 Y 方向 ZMP 軌跡	59
圖 5.11 右腳 Y 方向單一週期 ZMP 軌跡	59
圖 5.12 左右腳軌跡(a)DOF1(b) DOF2 (c) DOF3 (d) DOF4 (e) DOF5 (f) DOF6.....	60
圖 5.13 實驗環境配置.....	62
圖 5.14 步行固定障礙有控制器三步動作序列.....	62
圖 5.15 有控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡	63
圖 5.16 右腳取樣補償角與總補償角.....	63
圖 5.17 右腳踝關節 Pitch 角度變化	64
圖 5.18 步行固定障礙無控制器三步動作序列.....	65
圖 5.19 無控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡	65
圖 5.20 步行手動障礙有控制器五步動作序列.....	67
圖 5.21 有控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡	68

圖 5.22 右腳單位補償角與總補償角.....	68
圖 5.23 右腳踝關節 Pitch 角度變化	69
圖 5.24 步行手動障礙無控制器五步動作序列.....	70
圖 5.25 無控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡	70



表目錄

表 2.1 自訂各自由度可活動範圍.....	17
表 2.2 壓力感測器規格.....	22
表 2.3 直流伺服馬達規格.....	25
表 2.4 直流伺服馬達控制器.....	27
表 3.1 D-H 參數表	35
表 5.1 壓力感測器臨界設定值.....	52
表 5.2 壓力感測器壓力與數值對應表.....	52



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

近年來，機器人領域各相關技術之發展相當蓬勃，舉凡機構設計、運動規劃與控制、驅動伺服控制、影像視覺技術、環境辨識感知技術、互動學習系統、嵌入式系統晶片開發、整合系統設計研製等各方面，都有許多學者提出有效的方法。由於機器人的各項功能及動作都互有關聯，各項技術之整合設計將是機器人研究最重要的一環。

綜觀現今之各型機器人，最適合與人類一起生活的應該是人形機器人，因為其動作近似人類，關節自由度高因此靈活度高，與現有工作環境容易配合，與人類互動也最無隔閡。但是，從大多數的機器人來看，很多並不像人的形狀，有的甚至沒有一點人的模樣，這也讓很多機器人愛好者大失所望。其實，研發出外觀和功能都與人相同的機器人一直是科學家們夢寐以求的願望，也是他們努力不懈追求的目標。人形機器人就是以建造與人類相同軀體架構為目標，希望製造像人類一樣雙足直立行走。而以人形架構為設計主軸的機器人，則以日本各大企業之研發成果最為豐碩，如 Honda 公司的 ASIMO 機器人[1]，以及 Fujitsu 公司的 HOAP-1 機器人[2]，以及 SONY 公司的 QRIO 機器人[3] 都是相當成功的研究。此外，日本工業技術綜合研究所和清水建設公司共同開發建築機器人「HRP-2P」[4]，此機器人身長和體重與真人差不多，能和人一起搬運建材之類的重物，也會與人合作固定螺栓。而為了使人形機器人在人類的環境中能夠自由行動適應環境，雙足的步行是很重要的課題，同時為了平衡也須付出相當大的努力。為了使機器人在未知的環境中移動，必須具備足夠的環境偵測能力，在遇到障礙物或目標物時能隨時自我反應。因此，機器人本身所具有的感測器的種類與性能便決定了機器人對外界的辨識能力。

人形機器人顧名思義為一具有類似人類的外型與功能的機器人，在人形機器

人的發展中，分為人形雙足機器人以及上半身擬人形但下半身為一移動平台的結構兩大方向。上半身擬人形而下半身為一移動平台的結構通常具有頭部與手部的擬人形構造，而在下半身則為一具輪式的移動平台，此類型的人形機器人的結構設計多數著重於模仿人類頭部與雙眼方面的研究以及透過雙臂進行互動工作[5][6]。而在另一方面，人形雙足機器人的研究亦有多年的歷史，研究初期多著重在雙足的步行控制，屬於多自由度的連桿運動機構，並且對於機構自由度的設計安排也有所探討[7][8]，而後探討上半身與下半身的協調控制。如日本早稻田大學至今已完成十多具人形雙足機器人的原型機以及步行實驗，且日本 HONDA 公司在 1998 年公開發表其人形雙足機器人 P2[9]的研究成果後，許多著名日本大學如東京大學、名古屋大學、東京技術學院、京都大學等也不遺餘力在研究自己的人形雙足機器人，直到現今的 HONDA 公司的 ASIMO[1]和早稻田大學的 WABIAN-2[10]等也都有不錯的成果。

在眾多種類的機器人當中以雙足機器人的移動方式最近似於人類，關節自由度多因此靈活度高，最容易與現有人類的生活空間與工作環境相配合，適合於幫助人類與人類一同工作。

1.2 相關研究回顧

在雙足機器人步行的部分，由於一個穩定且可依賴的步行是最重要的基本理念，然而對於雙足機器人的腳部所具備的多自由度則是一個相當大的難題，而這樣的運動問題可以從以下 2 個方向做探討。

首先是連續步行軌跡的產生。一般雙足機器人的雙足步行運動被劃分為 2 種運動模式，分別為靜態步行(static walking)與動態步行(dynamic walking)2 種[11][12][13]，靜態步行是發生在雙足步行機器人以較低速運動時，忽略了機器人本身慣性的存在，持續保持機器人的重心投影落於腳底所形成的支撐多邊形上，控制方式較為單純，分析也較容易。而動態步行則是發生在較高速運動時，此時

系統的重心投影並不一定要落在腳底所形成的支撐多邊形上，其維持平衡的方法是透過複雜控制系統，精確控制步行速度、加速度及作用力矩等，如零力矩點(ZMP)理論，使 ZMP 落於腳底支撐多邊形內。大部分在採用 ZMP 理論規劃動態軌跡之時都是離線進行運算，並設定好已知的機器人模型與環境條件[9][14]，因此主要適用於固定的環境，機體專用性高，而後開始有人將 ZMP 軌跡運算採用線上的即時運算方式加入[15][16][17]。

另一方面，則是針對控制器進行設計，首先是由動態方程式來設計機器人運動控制器[18][19]，在實行上會使用到較高的運算資源，也需要設定精確的機器人模型。為了簡化控制器，許多人提出了使用倒單擺模型控制來穩定步行[9][20]，有效性也受到證實。

爾後根據生物學上對人類步行的研究指出了人類的步行其實是根據有韻律與周期性的內在步行動作與反射式的動作組合而成[21]。在這典型的步行環境中，這種已設定好直接輸出的周期性軌跡是必要的，而加上反射式的動作，則可以如同人類的神經系統一般，針對感測器輸入產生快速且局部性的反應，用來應付突發性的狀況，像是不預期的外力與不理想的地形等[22][23][24][25]，更進一步利用反射的方式直接進行腳踝的調整[24][25]，使機器人得以保持平衡，跨越過不平整地面或是斜坡，使控制逐漸朝向更接近人類的方式邁進。

1.3 問題描述

對於一具有步行移動功能的雙足機器人而言，首要的問題便是在於如何在環境中進行平穩的步行，而真實環境通常不是完美的，加上雙足機器人本身所具備的高自由度，在動作規劃與平衡維持上更顯重要。尤其要使雙足機器人運動方式可以接近人類，在自由度的安排與數量選擇上，將是一個重要的考量。

而當雙足機器人開始步行後，可能會遭遇到不在原本規劃之內的情形，尤其是當環境中具有不理想的地形或不預期的障礙物時，使用固定模式的步行將不足

以完成任務，因此要如何利用自身的感測系統來察覺，並對於察覺到的環境情報來加以判斷，使機器人得知目前的處境是必要的。因此，如何設置足夠多的感測器來進行對外在環境的感知便是一個考量。

而當雙足機器人的感測系統感測到外界情報並進行處理後，機器人本身則必須要能夠對不同類型的障礙物產生出適當的反應，使自身不因受到外界環境的影響而導致傾倒等危險，並繼續完成原有之動作。而針對刺激產生反應的控制器就是設計的重點所在。

因此，本篇論文希望能夠設計一套具備適當自由度的雙足機器人移動平台，其本身可以藉由規畫好的軌跡來進行步行運動，也可以在遭遇不在預期中的障礙物時，由感測系統感知，而後交由補償控制器進行修正，以使得障礙物的影響降到最低，讓雙足機器人可以繼續完成動作。

而為了使設計出的雙足機器人更類似於人類，吾人採用了如同人類的反射動作般直覺的補償控制器設計，並且以類似人類腳底皮膚觸覺的壓力感測器作為感測系統，以感測器所感測到的資訊來做為雙足機器人在環境中行走時對於不在預期中之不平地形進行步伐補償之依據。期望能使雙足機器人的行走更加平穩順暢。

而在補償的方式上，吾人藉由觀察人類的腳步於踩到障礙物時的反應，會產生腳踝對地面的姿態適應，因此將補償朝向此種方式設計，且配合反射動作的方式設計補償，與使用演算法完全重新計算動作相比，可以節省許多計算量，並且得到較快速的反應。

1.4 系統架構

圖 1.1，為本論文所設計的系統架構，主要分為 2 個主要區塊：步行軌跡產生器(Walking pattern generator)與補償器(Compensator)，其中每個主要區塊尚包含 3 至 4 個步驟。而此系統架構及是描述我們如何經由使用者的輸入，產生可用

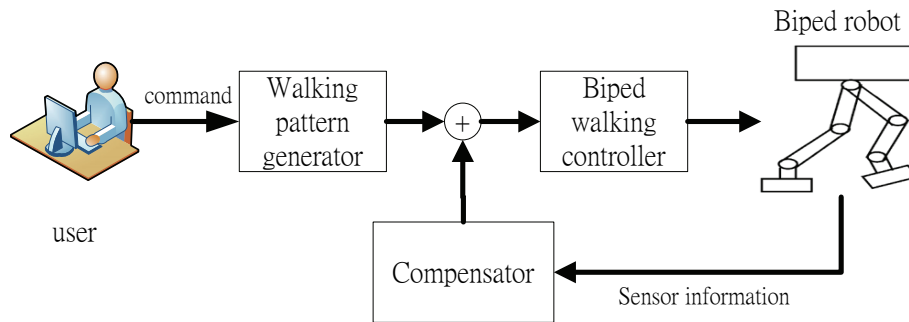


圖 1.1 系統架構圖

的步行軌跡以控制機器人本身的動作。

首先，經由使用者輸入所想要的軌跡特性與行走步數，產生步行軌跡，再經由雙足機器人身上的感測器回傳資訊產生補償動作，而後將 2 者合成雙足機器人實際步行軌跡，最後輸出給機器人使其產生想要的動作。

1.5 主要貢獻

本論文主要貢獻分別為：

- (1) 設計並實現一台單腳 6 自由度，雙腳共 12 自由度的機器人平台，可以產生近似人類的腳步運動。
- (2) 設計一不須精確建立機器人之系統模型即可使用之靜態步行軌跡，可以簡單實現並且調整彈性大。
- (3) 提出一針對地面障礙物跨越步行之步態補償控制法，使機器人行走時遇到一定程度的障礙物可以不致傾倒。

1.6 章節說明

本論文一共分為六章，第一章介紹研究動機與目的，並且概略說明所設計之系統架構。第二章說明雙足機器人實驗平台的設計與組建。第三章則為本論文所提出之雙足機器人步行軌跡規畫法。第四章為補償控制器演算法。第五章為實驗結果，驗證整體設計上之可行性。第六章為結論與未來展望。

第二章 雙足機器人設計與實現

本論文之主要目標為實現一隻能夠進行平穩步行並且自由度接近於人類之雙足機器人，並且設計一運動控制演算法使其可以進行不平路面之步行而不至於傾倒。關於本論文中雙足機器人的整體架構之設計與軟體、硬體、機構之實現都將在本章節中說明，其內容包含：

1. 吾人所提出之整體系統架構，包含系統訊號流程。
2. 實現設計所需之硬體設備及機構，包括感測器、晶片與機構設計概念等。

2.1 雙足機器人之整體架構

本論文以回授控制系統的概念來提出一雙足機器人之整體系統架構，如圖 2.1 所示。整體系統為一使用感測器資訊之閉回路運動控制系統。以下扼要說明此運動控制系統之主要功能與目的，詳細內容則敘述於後續章節。

此系統主要目的為接收由程式端使用者輸入之運動命令，以離線方式產生雙足機器人步行前進之動作軌跡。另外，即時配合壓力感測器之回授訊號，使機器人能夠在遭遇障礙時感測資訊與調整姿態使行進不致傾倒，使雙足機器人對於環境有著更高的適應能力。

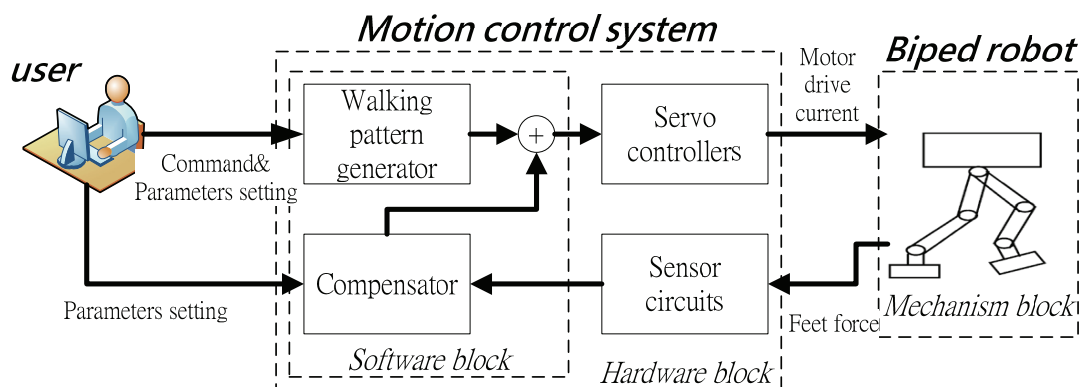


圖 2.1 雙足機器人之整體架構

2.2 雙足機器人之機構設計與實現

本論文自行設計開發一隻雙足機器人機構，在機器人板金材料方面選用鋁合金，厚度為 2mm，主要優點在於鋁合金質輕且強度高，相當廣泛的使用於航太科技或是汽車上。另外，在某些需要進行焊接以取得更高強度的部位，則是採用了 0.8-1mm 厚的白鐵作為板金的材料，以及在轉軸的部分使用鋼製作。在機器人構成整體結構的部件上，則是大量使用了邊緣反摺的設計方式，可以在不增加組裝的情況複雜度下，強化部件的結構強度。

對於雙足機器人來說，由於行走是其重要之能力，因此腳部機構的設計就顯得相當重要，而在腳部設計之前必須先決定腳關節自由度的數量。若自由度數量不足，則動作將較不靈活，行動也會受到較多的限制，但是若自由度過多，則會增加控制上的複雜度與運算量以及機構設計上的困難，因此必須取得設計上的平衡點。接著雙足機器人身體的部分主要是用來放置控制電腦、各種電路及控制器的地方，因此必須考量所以需要裝進去的配備來進行設計，並且分配其安裝空間。另外，由於雙足機器人在行走中腳部的姿態是處於不斷變化的狀態，在馬達配線部分也必須注意要留有足夠的拉伸容忍度以及避免被機構夾到，否則線路及機構都容易受損。

2.2.1 雙足機器人腳部自由度配置

在本論文中吾人所設計的雙足機器人，其設計重點主要在於使其可以進行平順的行走動作，動作靈活度與動作模式可以類似於人類，並且為了使機構的設計上得以簡化與動作控制的複雜度得以降低，我們必須選擇使用最少但符合靈活度要求的自由度，來進行雙足機器人的設計。吾人所需的動作靈活性如下[7]：

- (1) 可以進行身體重心的左右方向平移運動，使機器人重心可以輕易的受到調整，且身體姿態不會產生太大的歪斜，在單腳支撐相時可以落在支撐腳的區域內，雙腳支撐相時則可以移動至下一隻支撐腳區域內，

如圖 2.2 所示，圖中之 COG 為機器人重心，投影在支撐腳內則靜態步行得以穩定。因此由圖可以知道在此種運動中，機器人之髖關節與踝關節各需要 Roll 方向 1 自由度的機構。

- (2) 可以進行身體重心的前後方向平移運動，可以使機器人身體向前方移動，且身體姿態不會產生太大的歪斜，在單腳支撐相時可以落在支撐腳的區域內，雙腳支撐相時則可以移動至下一隻支撐腳區域內，如圖 2.3 所示，圖中之 COG 為機器人重心，投影在支撐腳內則靜態步行得以穩定。因此可以知道在此種運動中，機器人之髖關節與踝關節也各需要 Pitch 方向 1 自由度的機構。
- (3) 可以使抬腳時離地的高度上升，且不需產生過大的腳部姿態變化，如圖 2.4 所示，抬腳同一高度的情況下，膝關節自由度的增加可以降低腳部外彎的情況，因此可以知道增加膝關節 Pitch 方向 1 自由度的必要性。
- (4) 使機器人可於行進中改變方向，如圖 2.5 所示，將抬起的腳進行旋轉以使得腳底著地點發生改變，只要增加髖關節 Yaw 方向 1 自由度即可達成。

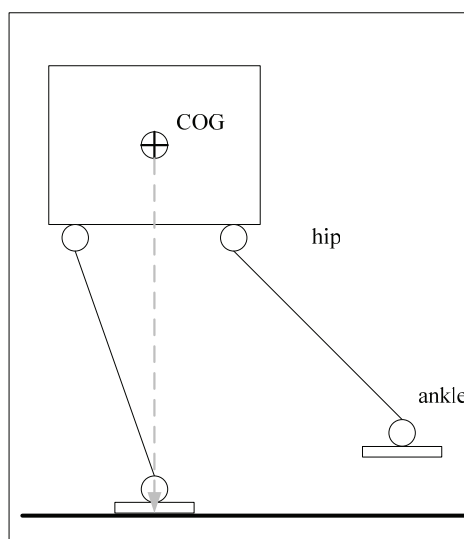


圖 2.2 雙足機器人重心橫移正面示意圖

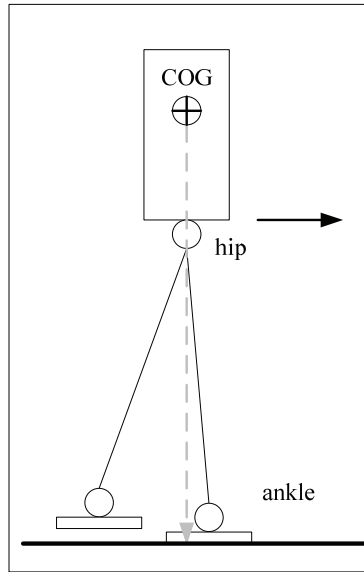


圖 2.3 雙足機器人重心前移側面示意圖

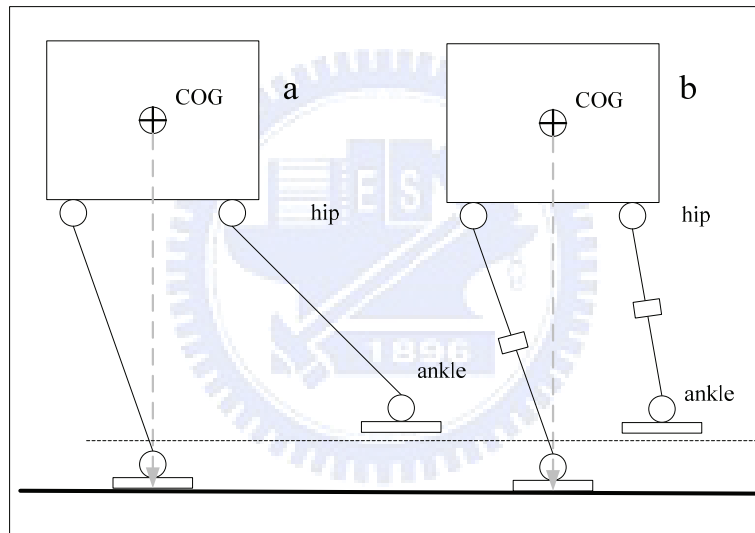


圖 2.4 雙足機器人跨步高度正面示意圖(a)單腳 4 自由度(b)單腳 5 自由度

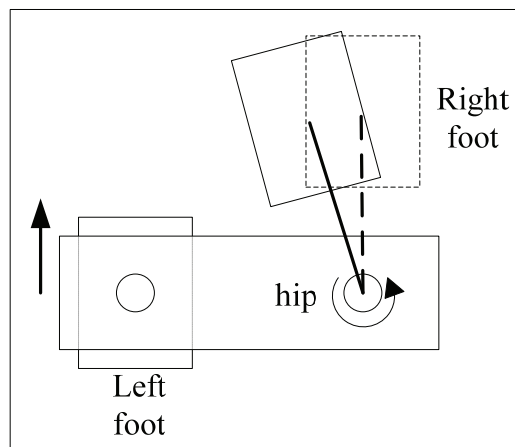


圖 2.5 雙足機器人跨步旋轉俯視示意圖

在第(1)點與第(2)點中，吾人共需要單腳 4 自由度，分別於 Pitch 方向與 Roll 方向各 2 自由度，基本上具有此 4 自由度已經可以使雙足機器人保持適當的重心移動以進行適當的步行，但進行步行時的姿態則會因為腳底至腰部的連桿長度不變而產生較大且不自然的動作。因此吾人再加進第(3)點所需的膝關節，由於此膝關節的加入，使得腳底至腰部的距離可以藉由膝關節彎曲而縮短，使得抬腳時不需將腳底繞至外側，而是可以直接將腳抬起，移動角度降低不少，姿態也較為自然，而最後加入的第(4)點則是為了使雙足機器人可以在其步行軌跡上產生變化，除了直線行進以外，還可以藉由髖關節的旋轉使行進方向發生改變，動作可以更近似於人類。

因此吾人將自由度設定為單腳 6 自由度，雙腳共 12 自由度，機器人自由度配置如圖 2.6，分別為：髖關節 3 自由度、膝關節 1 自由度與踝關節 2 自由度，並且使髖關節三旋轉軸正交相交於同一點，效果如同人類的球形關節，使其可以有效地接近人類的行走方式。圖 2.7 為各自由度旋轉方向定義，定義順序為由下往上，左右腳相同，以及定義機器人重心於身體中央。下半身長約 330mm，雙腳中心距 140mm，腳底板長約 180mm，寬約 110mm。上半身則是採用方盒狀中空設計，深約 100mm，寬約 200mm，高約 240mm，可容納電腦、電源電路、控制電路以及感測電路等。雙足機器人全高則約 570mm，重量在電路設備等裝備上去後約為 7 公斤，實際雙足機器人的外觀如圖 2.8。

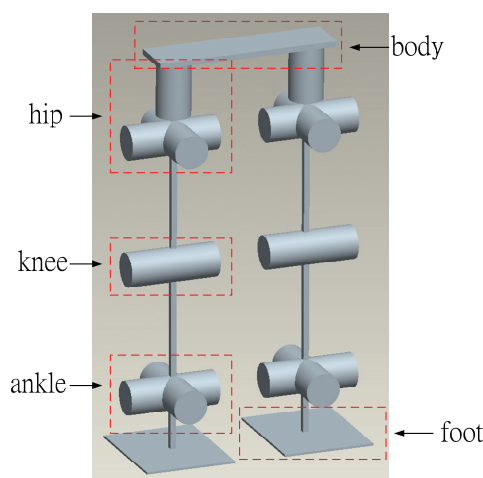


圖 2.6 雙足機器人自由度配置示意圖

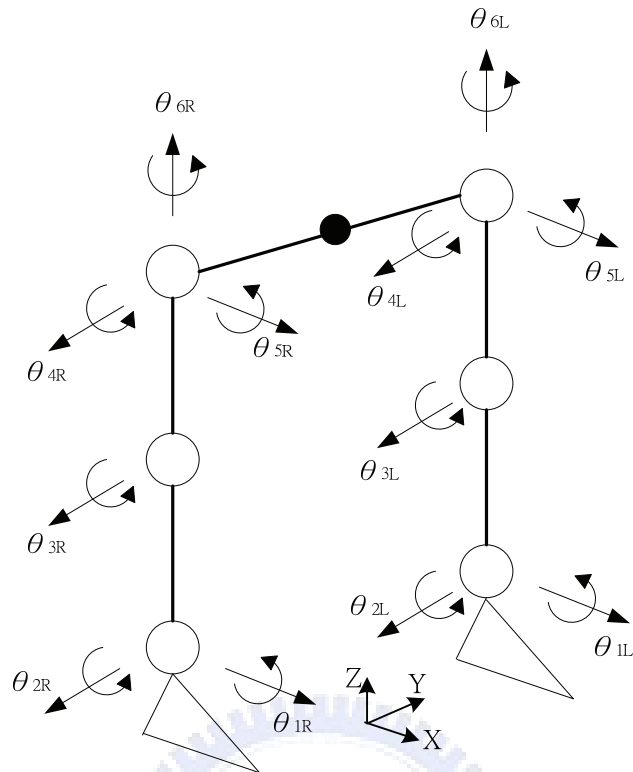


圖 2.7 雙足機器人各關節座標旋轉向量示意圖

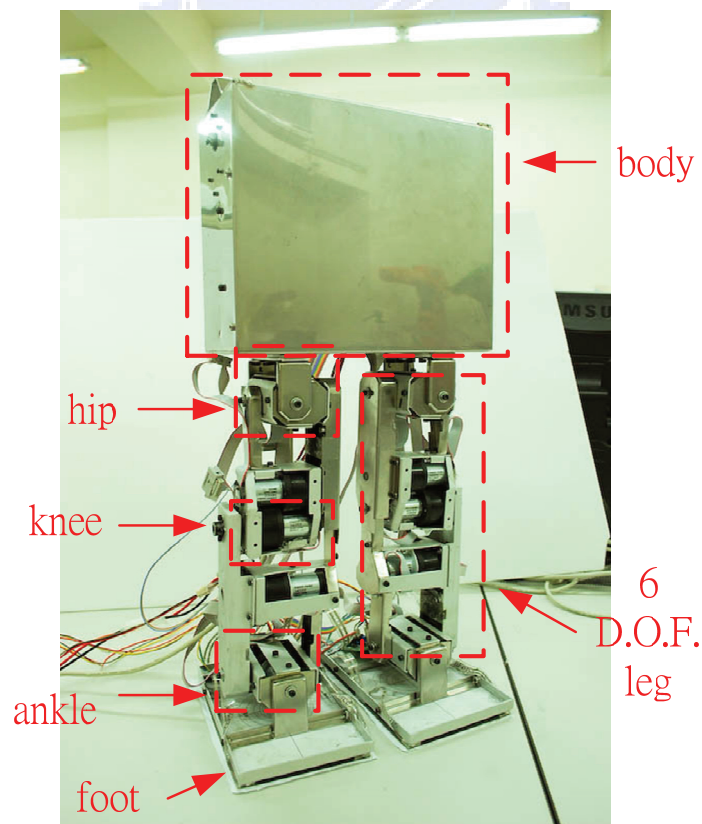


圖 2.8 雙足機器人正面全身圖

2.2.2 雙足機器人下半身機構設計與實現

本論文中雙足機器人的下半身包含了三個主要部分，分別是髖關節、膝關節與踝關節。

在踝關節的設計中，包含了 2 個自由度，如圖 2.9，分別是 Pitch 方向旋轉和 Roll 方向旋轉，設計的特點是使用了減速比為 1：1 的時規皮帶輪進行運動傳遞將 Pitch 方向的馬達旋轉軸向下方等效平移到與 Roll 方向的馬達旋轉軸處於相同平面上，而使 2 個正交的旋轉軸等效交於同一點，而 Roll 方向的馬達則是進行直接輸出驅動即可，不進行額外的運動傳遞，實際外觀如圖 2.10。如此的設計方式主要是使用了皮帶輪運用上的彈性，可以自由設計旋轉軸平移的距離，與齒輪組運動傳遞相比，重量、體積與效率皆占有優勢，而令旋轉軸正交於同一點，則是可以更接近人類的身體運動方式，同時也可以降低運動學模型建立時的參數複雜度。而踝關節的活動性則如圖 2.11 所示，在雙足機器人直立的情形下，單獨進行右腳踝關節各自由度的活動性模擬，在 Roll 方向約 71~29 度，Pitch 方向約 92~97 度，左腳的設計則是與右腳呈現對稱關係。

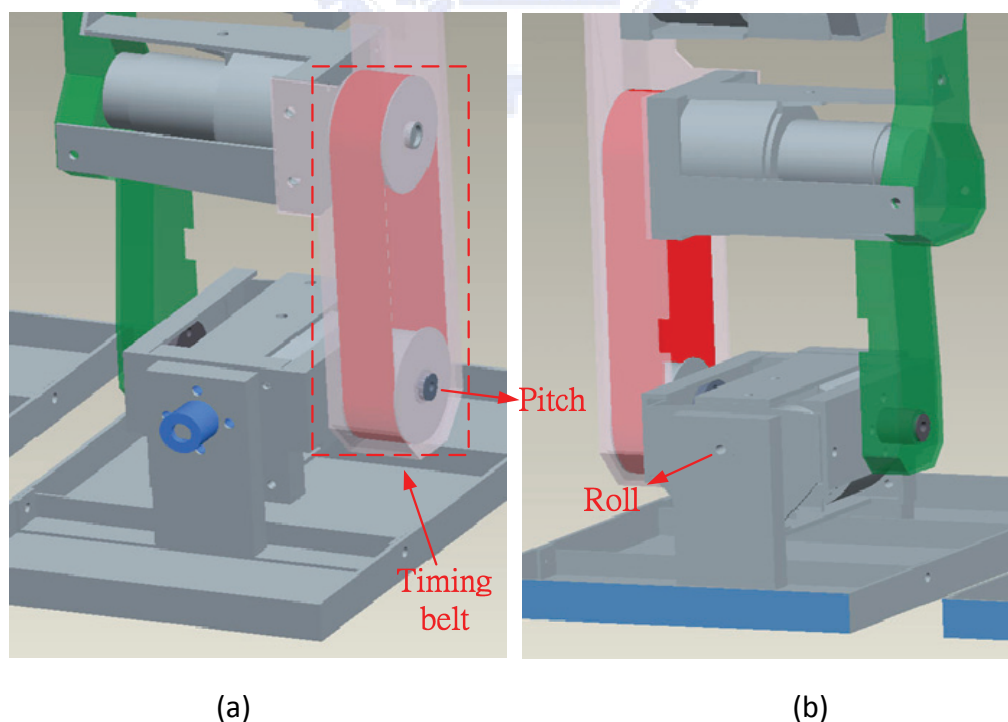
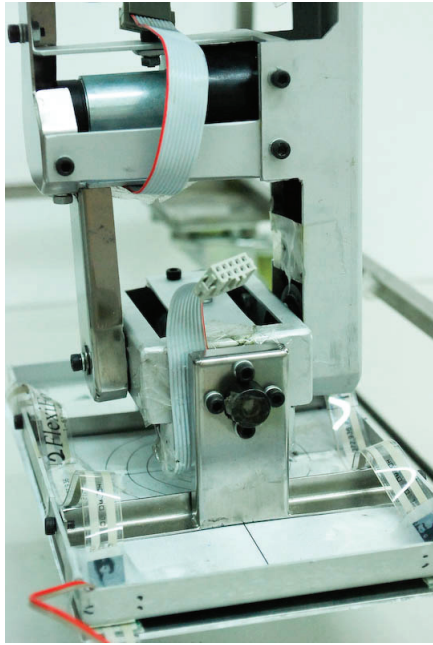
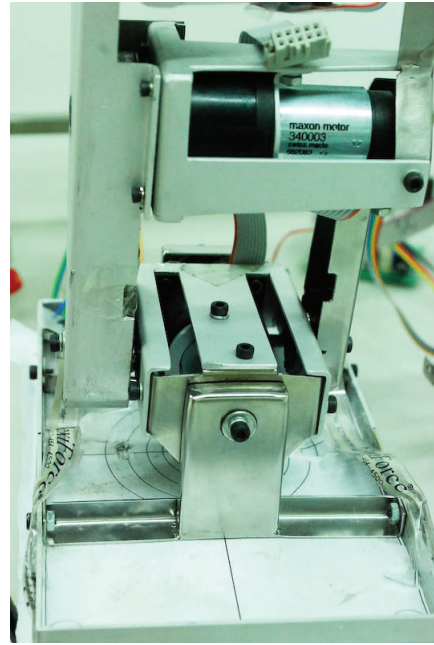


圖 2.9(a)右腳踝關節背面設計圖(b)右腳踝關節正面設計圖

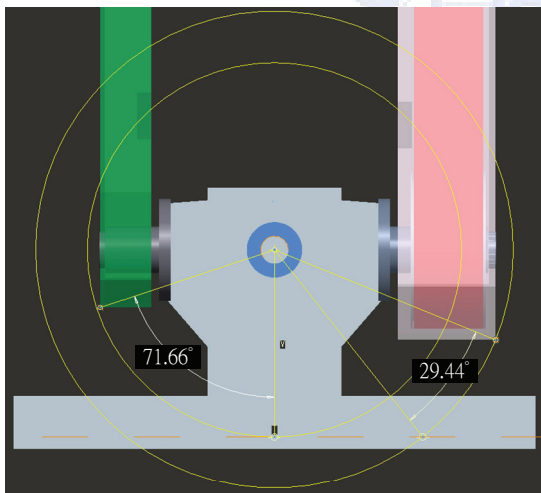


(a)

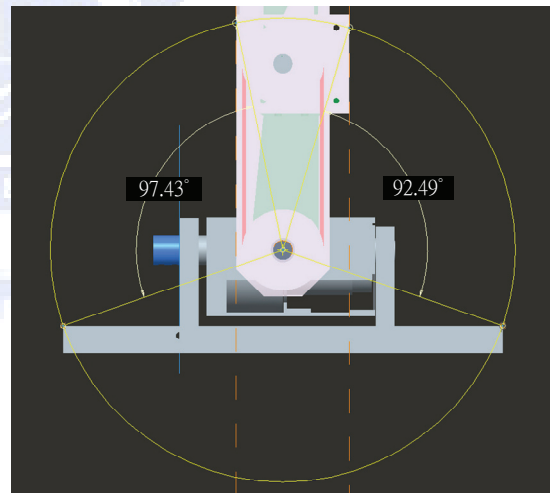


(b)

圖 2.10 踝關節實際外觀(a)背面(b)正面



(a)



(b)

圖 2.11(a)右腳踝關節 Roll 方向活動性(b) 右腳踝關節 Pitch 方向活動性

在膝關節的設計中，只包含了單 1 個自由度，如圖 2.12 所示，只有 Pitch 方向旋轉的可活動性，可以產生使腳部彎曲的效果，使機器人動作更加靈活，實際外觀如圖 2.13。馬達則是採取直接驅動的方式，不經過運動傳遞，直接帶動下肢連桿轉動，膝關節的活動性則如圖 2.14 所示，這是在雙足機器人直立的情形下，單獨進行右腳膝關節自由度的活動性模擬，如同人類身體一般將向前的自由度大

幅縮減，而將向後的自由度提高。下肢向前方運動的活動性藉由機構限制至 27 度，向後則可達到約 144 度，左腳的設計則是與右腳呈現對稱關係。

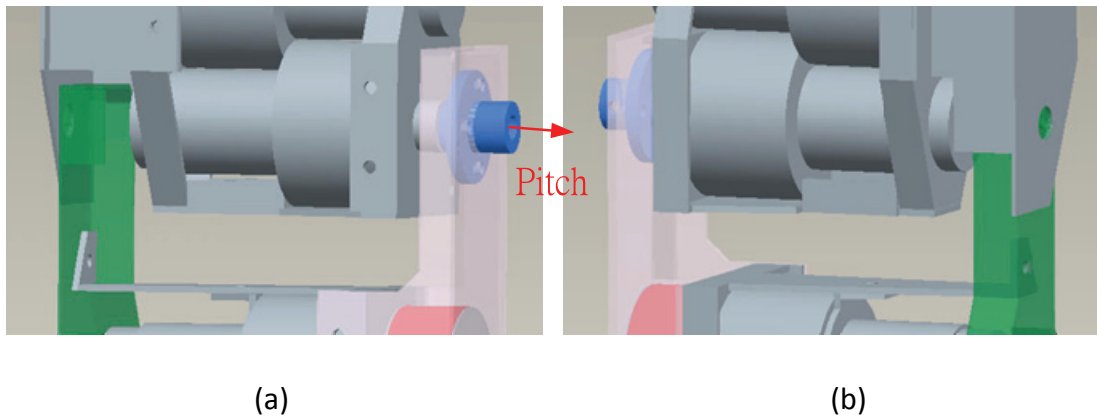


圖 2.12(a)膝關節背面設計圖 (b)膝關節正面設計圖

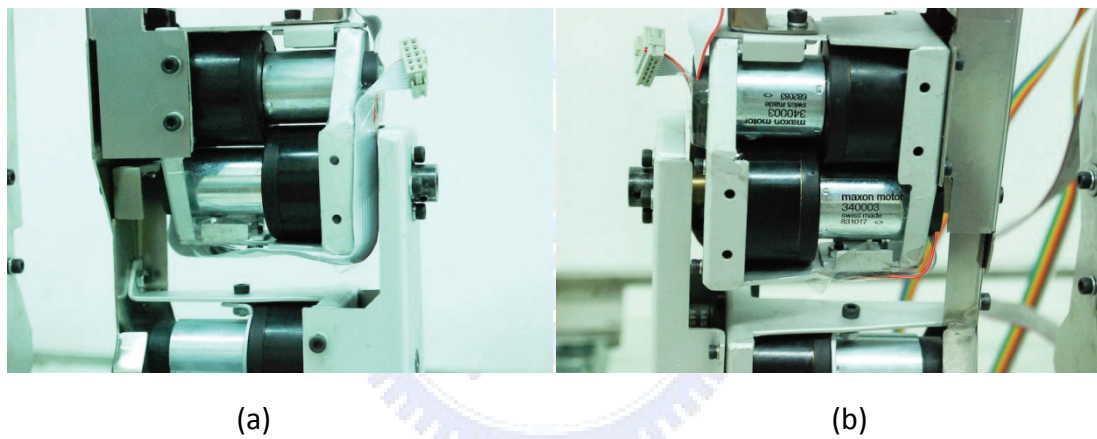


圖 2.13 膝關節實際外觀(a)背面(b)正面

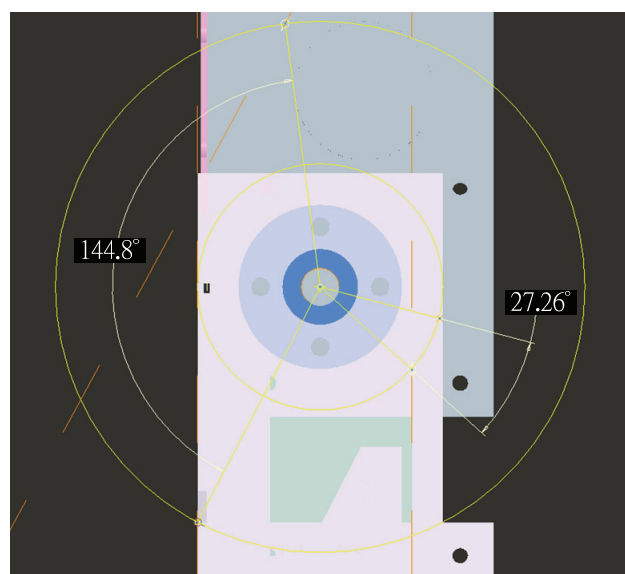


圖 2.14 膝關節 Pitch 方向活動性

在腕關節的設計中，總共包含了 3 個旋轉自由度，如圖 2.15 所示，分別為 Yaw 方向旋轉、Pitch 方向旋轉和 Roll 方向旋轉，在 Pitch 和 Roll 方向上設計類似於踝關節，特點同樣在於使用了減速比為 1:1 的時規皮帶輪來將 Pitch 方向的馬達旋轉軸向上方等效平移至 Roll 方向的馬達旋轉軸的平面。並且由於 Yaw 方向的馬達較小，轉軸也較細，若直接進行驅動則可能因為受到非旋轉方向的外力，而有彎曲甚至斷裂的危險，因此也加上一段減速比為 1:1 的時規皮帶輪進行運動傳遞，將運動效果轉移到較粗的轉軸上，進而帶動整隻腳旋轉，再將其設計為使 Yaw 方向旋轉軸也與 Pitch 和 Roll 方向旋轉軸正交於同一點，達成三旋轉軸正交於同一點的結果，同樣也是為了使此腕關節可以更加靈活，動作更類似人類，並且同樣可以降低運動學模型建立時的參數複雜度，實際外觀如圖 2.16。腕關節的活動性則如圖 2.17 所示，在雙足機器人直立的情形下，單獨進行右腳腕關節各自由度的活動性模擬，在 Roll 方向約 54~-25 度，Pitch 方向約 102~-110 度，Yaw 方向若不包含腳底，範圍為 180~-180 度，若包含腳底則是 19~-19 度之間，左腳的設計則同樣是與右腳呈現對稱關係。

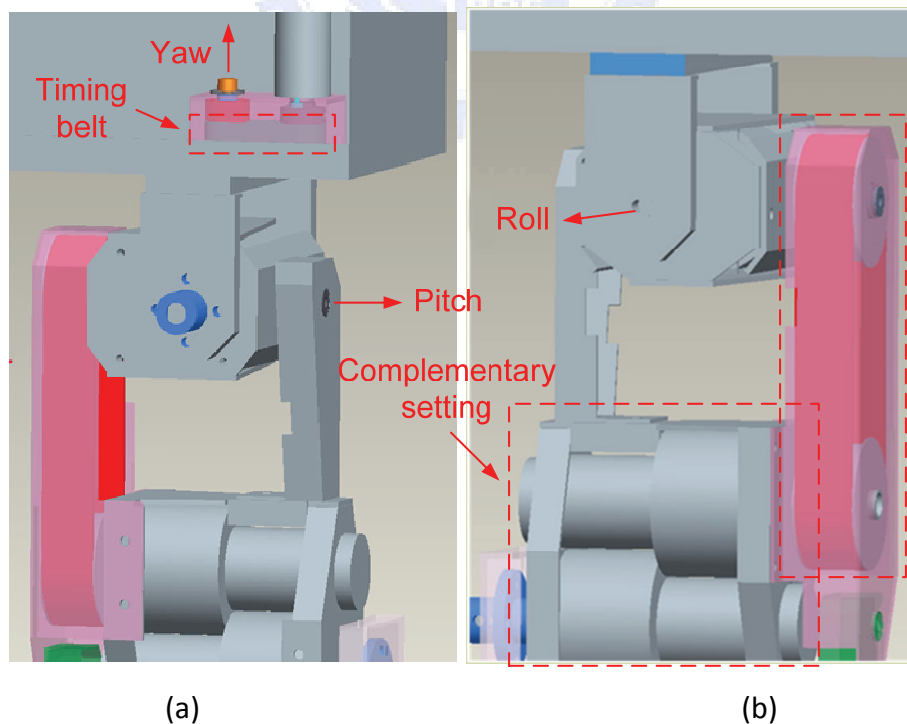
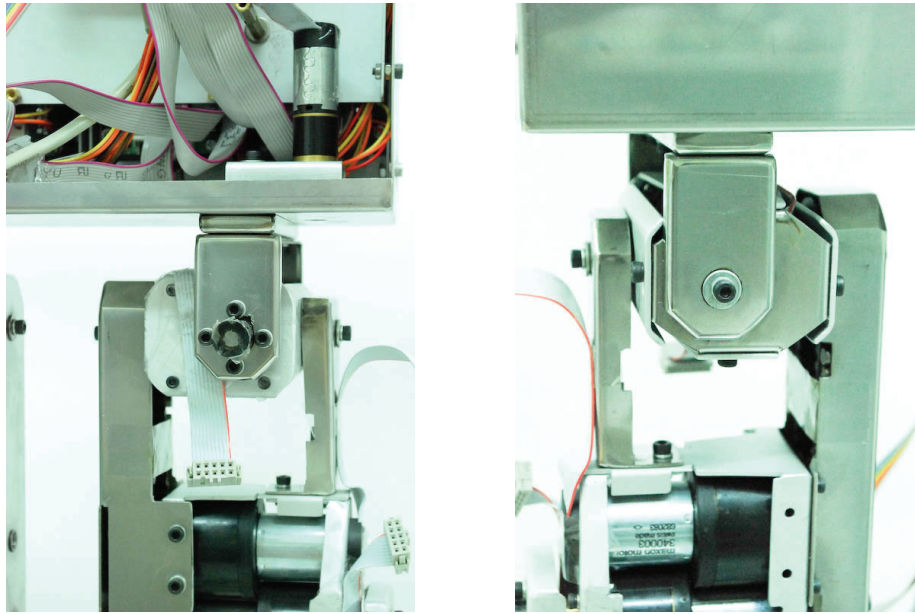


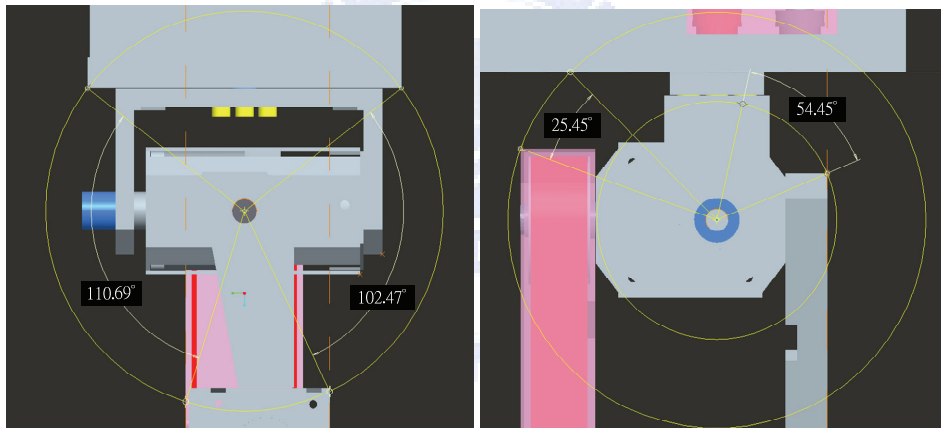
圖 2.15 (a)腕關節背面設計圖 (b)腕關節正面設計圖



(a)

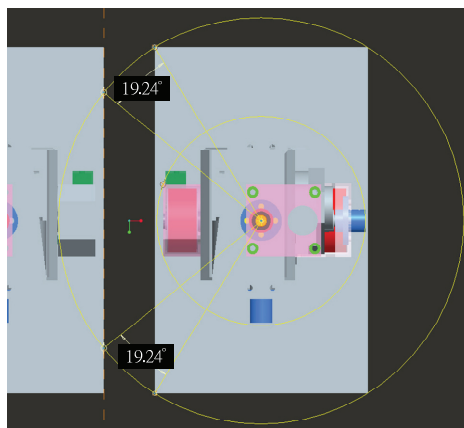
(b)

圖 2.16 腕關節實際外觀(a)背面(b)正面



(a)

(b)



(c)

圖 2.17 (a)腕關節 Pitch 活動性(b)腕關節 Roll 活動性(c)腕關節 Yaw 活動性

由以上的設計，吾人可知各關節大概的活動範圍為何，但是卻不可以直接將此範圍拿來使用，只能當作一個不可以超過的參考，因為當多自由度同時運作的時候，各個自由度的範圍都會互相影響而有所減少，程度難以預料，因此吾人必須針對雙足機器人即將進行的動作軌跡來進行範圍的調整，設定一個較小但合適的範圍。因為目前的軌跡是針對直線步行設計，因此吾人將各自由度的可活動範圍設定如表 2.1，旋轉方向由圖 2.7 定義，由表可知踝部的 Roll 方向活動性低於 Pitch 方向活動性，且第 6 軸固定不動。下半身完整設計圖如圖 2.18 和圖 2.19。

總結本論文中雙足機器人的步行機構設計特點有以下數點：

- (1) 髖關節和踝關節具有類似的設計，減少了部份零件的種類，可以降低製作成本及組裝複雜度。
- (2) 需要進行旋轉軸平移的馬達使用皮帶輪將旋轉軸平移傳動具備了高效率以及可彈性的設計並且節省空間使用及重量。若是馬達輸出軸直徑較細，強度不足，則同樣使用減速比 1:1 的皮帶輪將旋轉軸轉換為直徑較粗，強度足夠的旋轉軸進行驅動。而不需要旋轉軸平移的馬達則是盡量以直接連結的方式驅動，可減少能量耗損。
- (3) 根據馬達的形狀採取了互補的裝配法，如圖 2.15(b)，可節省空間的使用，也具有一定結構強度，單獨的馬達也使用框架作成模組化設計。
- (4) 除了踝關節 2 正交軸共交點與髖關節 3 正交軸共交點之外，關節與關節之間的轉軸也使其於直立時位於同一垂直面上，如圖 3.6，更進一步減少運動學模型的參數複雜度。

表 2.1 自訂各自由度可活動範圍

θ_1	$-25^\circ \sim +25^\circ$
θ_2	$-55^\circ \sim +55^\circ$
θ_3	$0^\circ \sim 105^\circ$
θ_4	$-55^\circ \sim +55^\circ$
θ_5	$-25^\circ \sim +25^\circ$
θ_6	0°

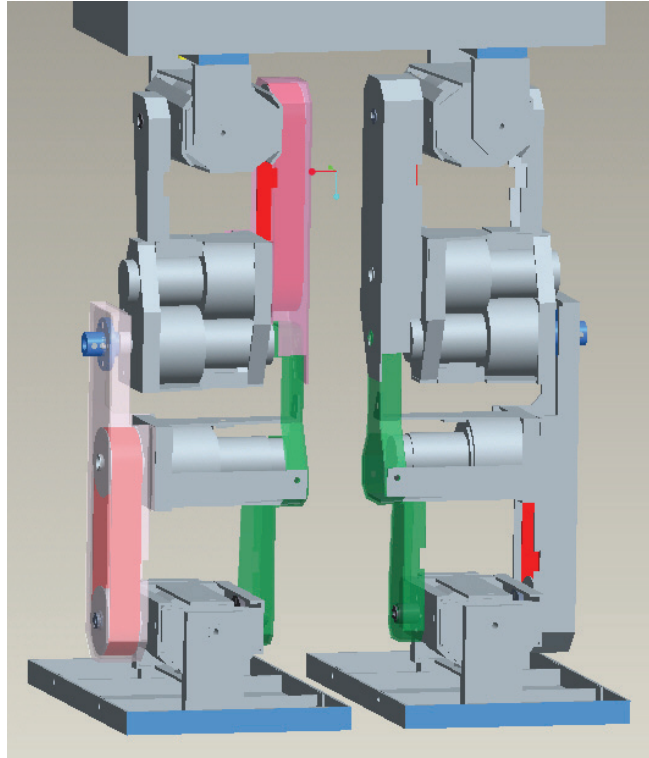


圖 2.18 下半身設計正面全圖

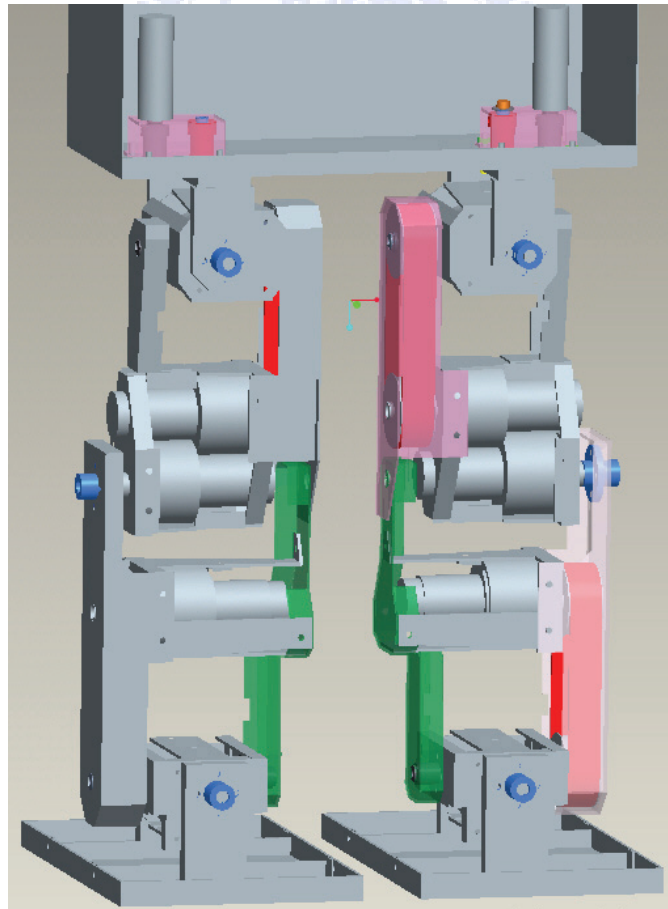


圖 2.19 下半身設計背面全圖

2.2.3 雙足機器人上半身機構設計與硬體配置

在本論文中的雙足機器人設計中，上半身主要的用處是在於放置各種須搭載於雙足機器人上之裝置，並且兼具保護的功用，因此設計成為一中空的方盒，其中最內層先放置的是 12 個直流伺服馬達控制器，再來第 2 層放置的是 USB 介面的類比轉數位轉換電路、CAN 匯流排介面的電路分接板與壓力感測器放大電路所需之電源板。最後一層則是工業電腦的裝置、USB Hub 與 CAN 匯流排介面控制器支撐架。

2.3 雙足機器人之硬體設計與實現

本論文所提之控制系統架構如圖 2.20 所示。

圖中白色區塊的機器人控制器為雙足機器人系統中的運算系統，負責各種控制程式的執行與人機介面的操作，這裡主要是採用工業電腦，使用 USB 通訊介面與外部連接。

圖中淺灰色區塊為壓力感測器搭配 8 通道類比轉數位轉換器組成之壓力感測系統，透過 USB 通訊介面傳送 8 個壓力感測器的讀值給主要運算核心的工業電腦(圖中白色區塊)，每腳有 4 個壓力感測器，1-4 號為左腳，5-8 號為右腳。

圖中深灰色區塊則為 12 個直流伺服馬達與 12 個直流伺服馬達專用驅動器，搭配傳輸命令用的 CAN(Controller Area Network)匯流排介面組合成馬達控制系統，透過 USB 通訊介面接收工業電腦的馬達控制命令，每腳有 6 個馬達，1-6 號為左腳，7-12 號為右腳。在伺服馬達控制的部份，採用的是位置控制，裝置於馬達上的編碼器會將馬達位置資訊傳送給馬達控制器以進行控制。

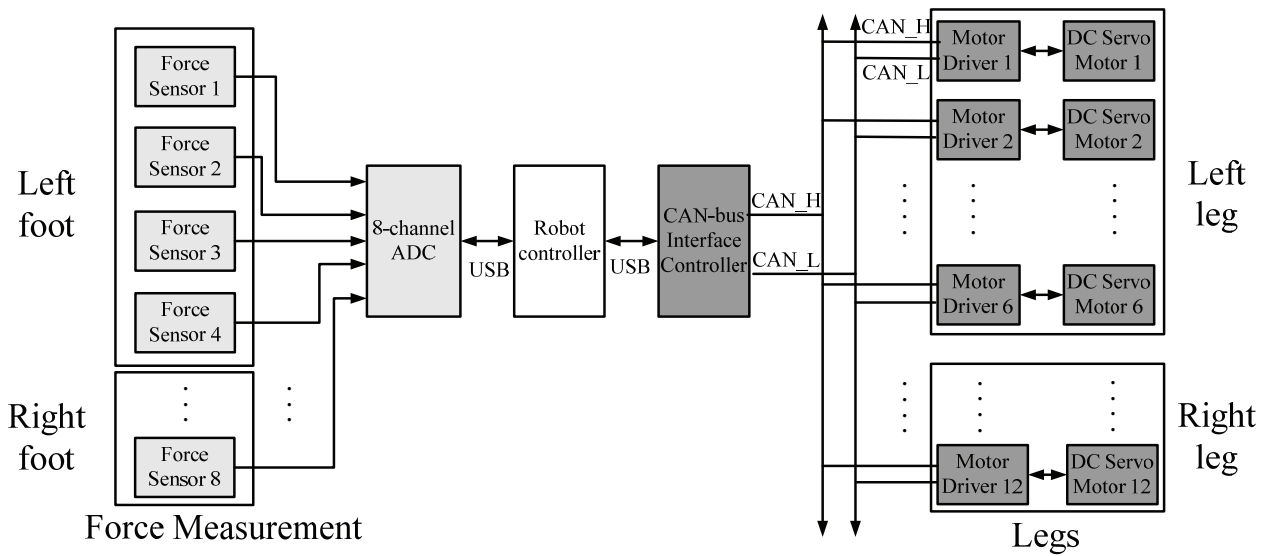


圖 2.20 控制系統架構

2.3.1 運算系統之實現

本論文之雙足機器人採用以 PC 為基礎的運算系統，為了降低體積與重量，使用了由研揚科技生產的小型工業電腦 GENE-9310，實體如圖 2.21，選用 INTEL 公司時脈 2GHz 的中央處理器及 2GB 的記憶體。儲存媒體則因為電腦需裝置於機器人身上，會接受到許多的振動與加速度，為了降低因震動而可能造成的損壞，而使用 8GB 固態硬碟取代傳統硬碟。

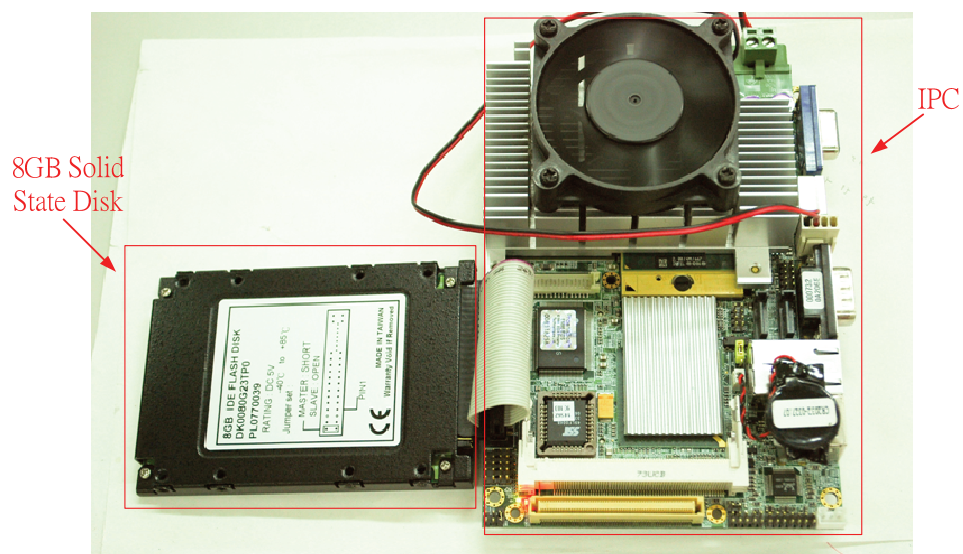


圖 2.21 IPC GENE-9310

2.3.2 壓力感測系統之設計與實現

在本論文中，為了取得雙足機器人與地面的接觸情況，吾人在雙足機器人的矩形腳底裝設了壓力感測器。裝配位置如圖 2.22，每隻腳的 4 個角落各裝設了 1 個壓力感測器，共使用 8 個。另外，為了使地面的作用力可以由每隻腳底的 4 個壓力感測器完全吸收，採用了如圖 2.23 的夾層設計，並將壓力感測器的感測區域以小塊墊片墊高，以確保腳底板的受力可以由 4 個支點完全吸收，並且在與地面接觸的底板是使用高硬度的 2mm 厚鋁合金板製作，用以降低腳板因受力形變而造成的測量誤差。

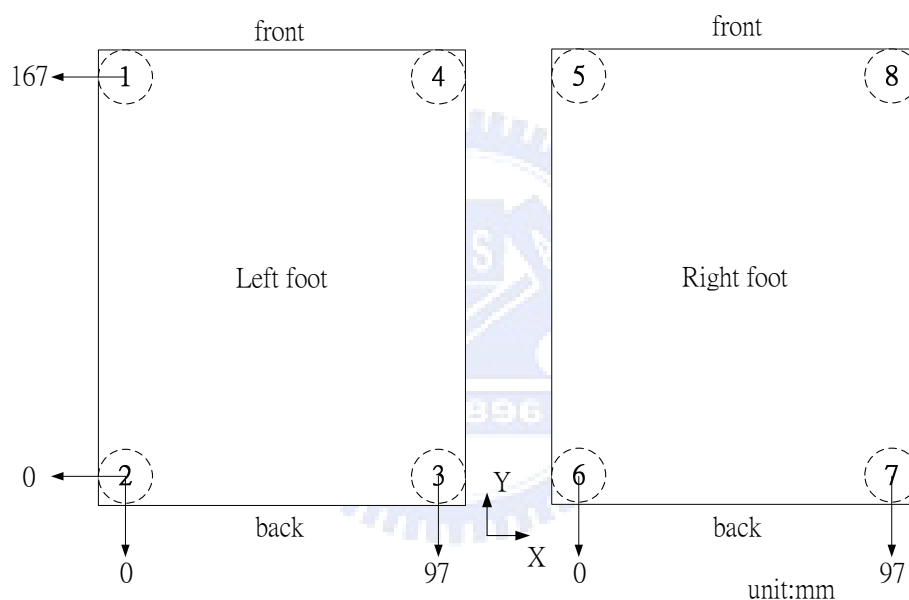


圖 2.22 足底壓力感測器裝配位置俯視與相對位置示意圖

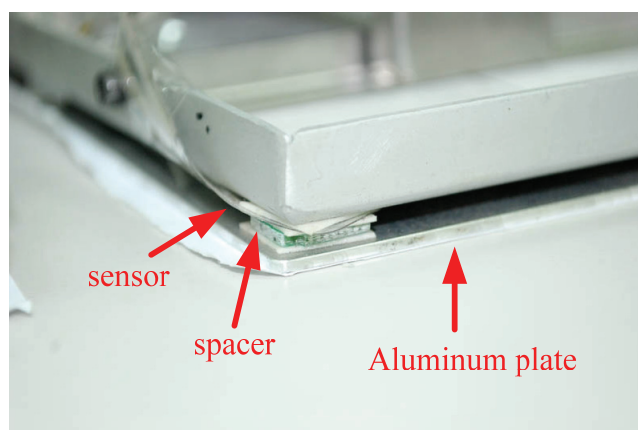


圖 2.23 腳底夾層設計

在此處使用的感測器則是 Tekscan 公司所生產之撓性壓力感測器 “FlexiForce Sensor”，外觀如圖 2.24，規格如表 2.2，屬於壓阻效應型，測量範圍 0 - 25 lb. (110N)，無負載時阻抗約 20MΩ 以上，當有壓力施加於感測器上時，感測器阻抗則會隨著壓力的上升而降低。

因為此壓力感測器的特性是阻抗隨著壓力而改變，不是電壓隨著壓力而改變，因此無法直接使用類比轉數位轉換器讀取壓力數值，需要使用一轉換電路，將電阻變化的效果轉換成電壓變化。吾人所使用的電阻轉電壓轉換電路為使用 OP 放大器之反相放大電路，使用的 OP 放大器為 MC34074P，此 IC 是將 4 個 OP 放大器整合在一起，因此 8 個壓力感測器只需分別做出 2 組電路，如圖 2.25，可以節省許多電路元件配置的空間，電路設計如圖 2.26 所示。放大電路的電源板實體圖如圖 2.27 所示，使用了 2 個 7.4V 的鋰電池，一個做為 OP 放大器的正電源，另一個反接到 7905 穩壓 IC，使 -7.4V 降成 -5V，以作為放大器的負電源以及反相放大器的輸入電源，電路設計如圖 2.28。由於輸入電源為負，根據反相放大器的公式，如(2.1)式，可得輸出電壓為正，再加上電路中所配置的 500KΩ 的可變電阻，可將電壓範圍進行調節，使其符合類比轉數位轉換器的 0-5V 輸入範圍，並且最佳化雙足機器人行走壓力感測所需的解析度。



圖 2.24 壓力感測器實體

表 2.2 壓力感測器規格

Thickness	0.005"(0.127mm)
Length	8.00"(203mm)
Width	0.55"(14mm)
Sensing Area	0.375"diameter(9.53mm)
Connector	3 pin Male Square Pin

$$V_o = -\left(\frac{R_v}{R_s}\right) * V_i \quad (2.1)$$

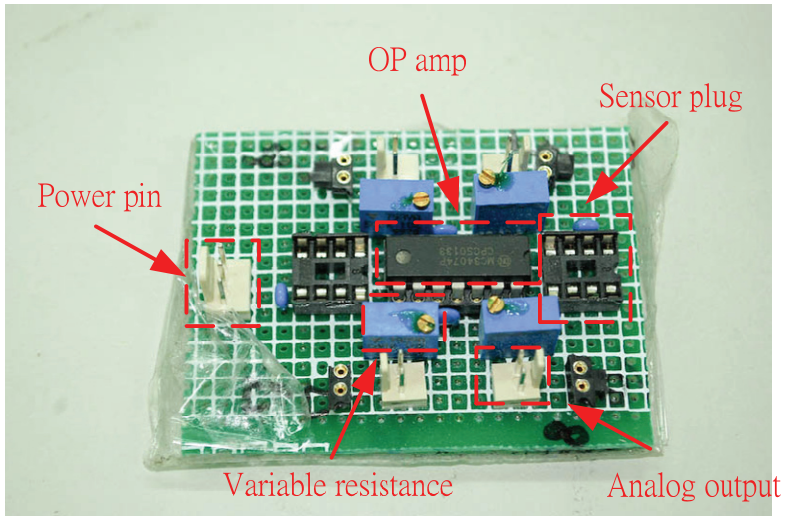


圖 2.25 OP 放大電路實體

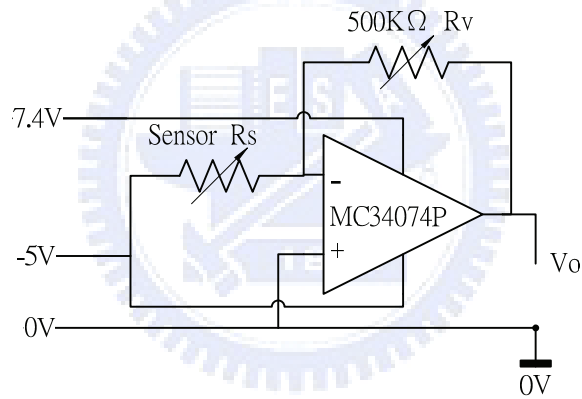


圖 2.26 OP 反相放大電路設計示意圖

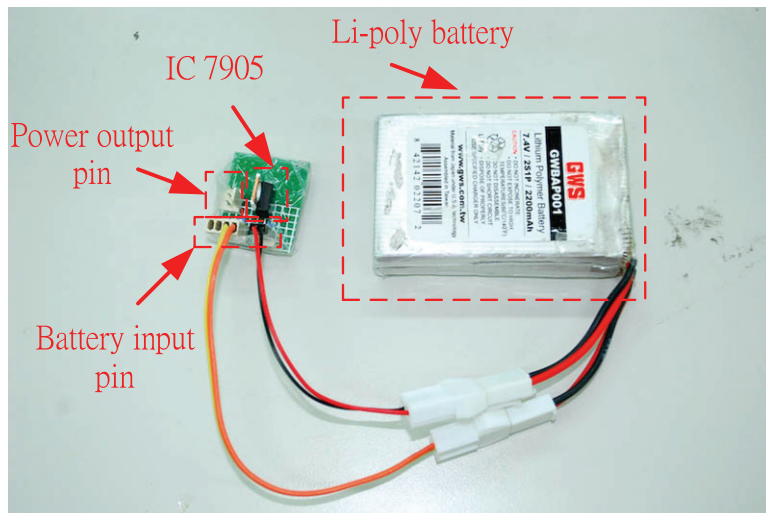


圖 2.27 OP 放大電路電源板實體與電池

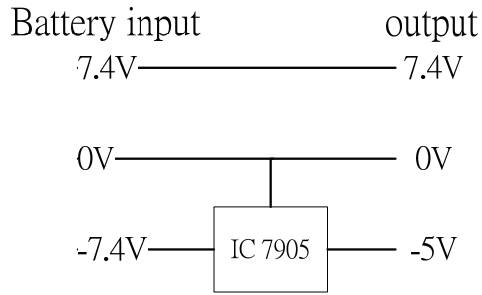


圖 2.28 OP 放大電路電源板示意圖

接著吾人便可以將感測電路所得到的 8 個壓力感測器的輸出電壓表現連接到類比轉數位轉換器中進行讀取，在此處吾人所選用的類比轉數位轉換器為 PHIDGETS 公司所設計生產的 PhidgetInterfaceKit 8/8/8，實體如圖 2.29 所示，具有 8 個通道的類比輸入、8 個通道的數位輸入及 8 個通道的數位輸出，可以一次對應到吾人的 8 個類比輸入需求，並且資料的傳送與控制都可藉由 USB 介面與電腦連接，便利性相當高。吾人在此處主要是利用其類比輸入功能，其類比轉數位之範圍為 0-5V，性能可以達到 10Bit 的解析度，也就是 1024 階，電壓解析度約為 5mV，而取樣的更新速度約為每秒 65 次，足以搭配本論文中的控制系統使用。

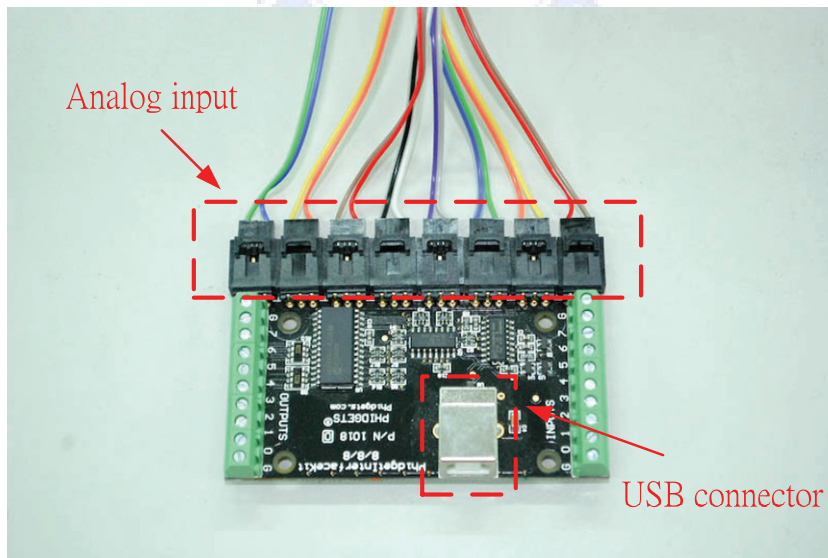


圖 2.29 類比轉數位轉換器實體

2.3.3 馬達控制系統之設計與實現

在本論文中由於雙足機器人體型較大，因此扭力的需求也較高，無法採用一般的 RC 伺服馬達(Radio Control Servo Motor)，因此採用的是直流伺服馬達，這樣同時也具備了定位的高精準度。在馬達的選用方面，主要是採用 MAXON 公司所生產的直流伺服馬達，包含了直流馬達、減速機和編碼器三部份。而目前的腳部設計則是將馬達區分成 2 種不同大小扭力的等級，如表 2.3 所示，實體圖如圖 2.30。吾人共使用 12 個馬達，每自由度使用 1 個馬達，10 個大的 2 個小的，左右腳各 6 個自由度。小馬達使用的地方主要是在髖關節的 Yaw 方向，其餘的髖部、膝部和踝部皆使用相同規格的大馬達。

表 2.3 直流伺服馬達規格

torque level	high	low
motor type	RE max 24(ϕ 24mm)	A max 16(ϕ 16mm)
gear type	GS 38(ϕ 38mm)	GS 16 A(ϕ 16mm)
Nominal voltage(V)	24	24
Reduction	900:1	485:1
Max. efficiency	53%	59%
Max. continuous torque before reduction(mNm)	11.2	2.44
Max. continuous speed before reduction(rpm)	7742	6790
Max. continuous speed after reduction(rpm)	8.602222222	14
Max. continuous torque after reduction(kg*cm)	102.8571429	12.0755102
Max. continuous speed after reduction(degree/s)	51.61333333	84
Encoder type	Encoder MR	Encoder MR
Count per turn	256	256
resolution after reduction(degree/count)	0.0015625	0.002899485
length(mm)	67.6	47.4

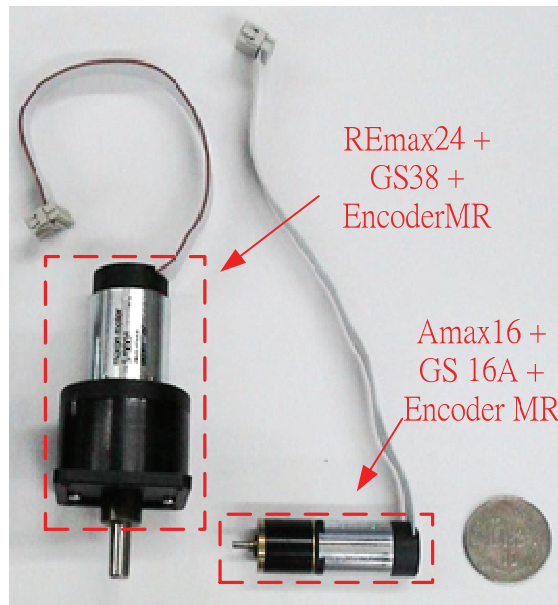


圖 2.30 直流伺服馬達實體

在馬達控制器的部分，使用的是同樣由 MAXON 所生產的直流伺服馬達控制器 EPOS 24/1，實體如圖 2.31，概略規格如表 2.4，可藉由排線直接讀取編碼器數值並控制馬達進行位置控制、速度控制和電流控制等數種控制，在本論文中，吾人所使用的控制方式為位置控制，其控制方式如同一閉迴路，在吾人下達一位置命令後，控制器就會不斷讀取編碼器讀值並加以控制馬達誤差修正以達成所設定之命令，而修正之方式為 PID 控制，吾人可藉由調整 PID 各參數，使控制器的誤差修正效能有不一樣的表現。

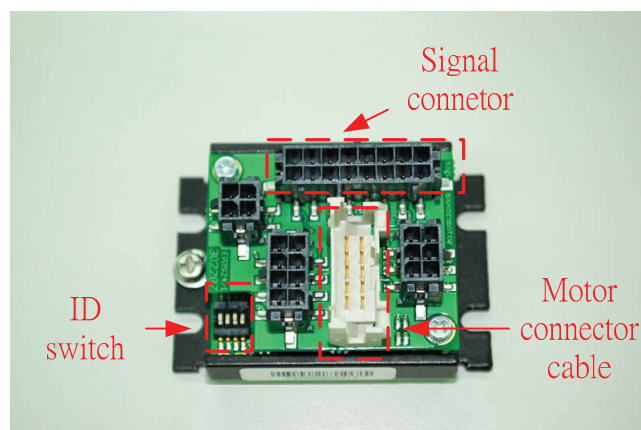


圖 2.31 直流伺服馬達控制器實體

表 2.4 直流伺服馬達控制器

Operating voltage	9-24VDC
Max. output current(<1 s)	2A
Continuous output current	1A
Max. speed	25000rpm

另外，在馬達控制器的數量上，由於一個控制器只能控制一個馬達，因此控制器的數量同樣也是 12 個。而在分配控制器命令的方面，是由 CAN 匯流排介面負責傳輸，因為與 RS232 傳輸介面相比，CAN 匯流排介面可以更輕易的連接多個節點與有著更高的傳輸速度。吾人在此所選用的是與 MAXON 馬達控制器相容的由 National Instrument(NI)所生產的 CAN 匯流排介面控制器，實體如圖 2.32，可藉由 USB 傳輸介面與電腦相連接，並將電腦端所發出的命令藉由 CAN-High 與 CAN-Low 兩條訊號線傳輸到各個控制器節點，如圖 2.33 為吾人所製作之將馬達電源與 CAN 匯流排連接至各個並聯控制器之電路分接板。

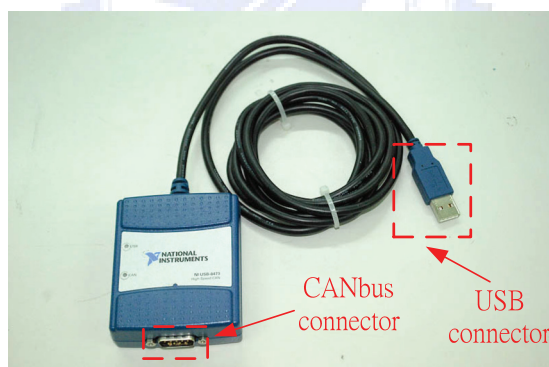


圖 2.32 CAN 匯流排介面控制器實體

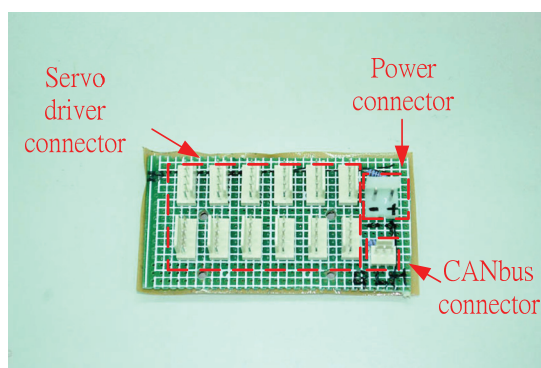


圖 2.33 CAN 匯流排介面電路分接板

2.4 雙足機器人之軟體設計與實現

吾人在 PC 的視窗系統環境下進行控制程式與演算法的編寫，只要載入類比轉數位轉換器與直流伺服馬達控制器的驅動程式，依照原廠所提供的指令即可對硬體進行控制，整合性與方便性相當高，對於圖形化界面的編寫也相當容易，吾人所撰寫之 PC 端控制介面如圖 2.34。

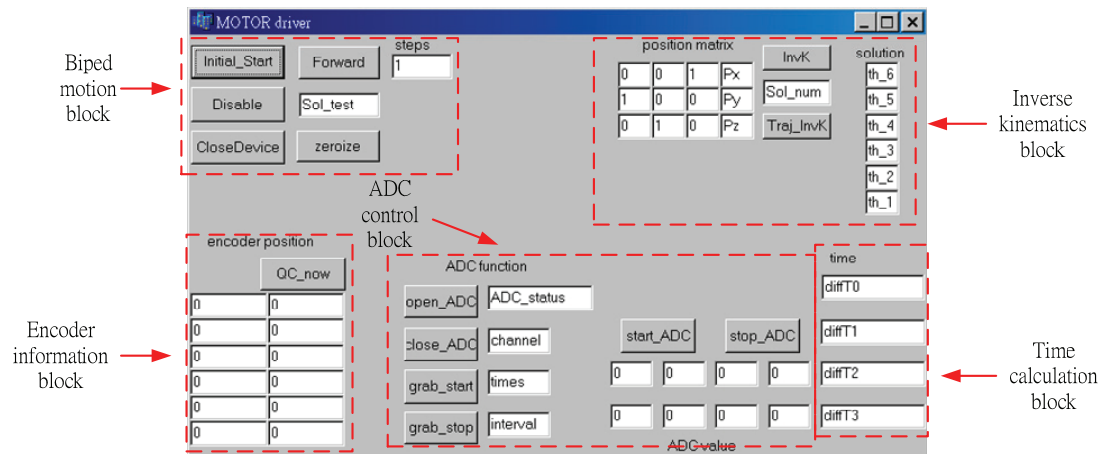


圖 2.34 PC 端操作介面

第三章 步態規劃

回顧過去雙足機器人的研究，主要皆集中在控制機器人的姿態。如何使得雙足機器人在運動時的穩定及平衡是一個很重要的課題。在機器人學中，分析的面向主要可分為運動學 (Kinematics) 以及動力學 (Dynamics) 兩部份[26]。以一個多連桿系統為例，在運動學的分析中，主要是在計算各連桿之旋轉角度所產生在空間中的位移量。而其中可再分為順向運動學 (Forward-Kinematics) 和逆向運動學 (Inverse-Kinematics) 兩種。另外，動力學的分析則包括連桿之速度、角速度、加速度或扭力等等，而分析方法主要有 Newton-Euler method 及 Lagrange Equation。但是，吾人認為上述之動力學分析法在應用上缺乏一實際且準確的系統質量模型，且應用在雙足機器人時，受控系統的自由度 (Degree of Freedom, DOF) 相當多，如此將使得分析過程變得複雜。並且在系統模擬分析的過程不易以將環境的變數考慮進去，例如地形的變化，包括坡度、不平坦等。本章節將說明吾人所提出之雙足機器人的運動控制器架構與軌跡模擬等。

3.1 步行軌跡產生系統架構

為了使雙足機器人可以進行步行，吾人設計了一套步行軌跡產生器，架構如圖 3.1。概述功能如下：

由使用者從程式操作介面輸入想要得到的行走步數與行走模式參數等進入步行軌跡產生器，程式便會先分別產生所需的腰部與腳部擺線軌跡，而後對應各取樣時間點，計算腳部至腰部的位置向量，將其帶入反運動學求解，轉換為各關節角度，最後根據步態的週期性與所需步數連接組合出完整之步行軌跡。到目前的過程皆為步行開始前之離線作業。而 $\theta_p(t)$ 則是將計算完之關節軌跡逐步取樣後產生之長度 12 之向量，分別對應 12 個馬達，之後配合補償控制器進行即時控制，將於下一章詳述。

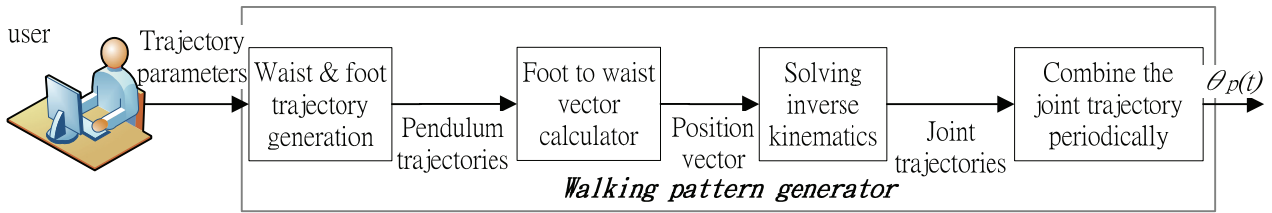


圖 3.1 步行軌跡產生器架構

3.2 步態規劃

在本節中，所要說明的是本論文中的雙足機器人所使用到的步行軌跡產生方式，如圖 3.1 中，主要分為四個小區塊，首先是需要產生腰部與腳部軌跡的功能，接著是利用產生出的軌跡計算出腳部連桿系統所需的末端點位置，將其帶入逆向運動學進行求解，取得單一週期腳部各軸角度軌跡，而後根據所需的移動跨步數重複將軌跡連接組成最終軌跡，最後再將軌跡角度從頭到尾逐個輸出至馬達控制器。

根據維持本身平衡的方法，一般將雙足機器人或是多足機器人的步行分為靜態步行及動態步行。動態步行的定義為機器人的重心投影在步行時有時不會落在腳部的支撐多邊形區域內，反之，靜態步行就是機器人的重心投影在步行時會全落在腳部的支撐多邊形區域內。一般而言，採用靜態步行的雙足機器人都會有較大的腳板與較低的加速度，其目的是希望雙足機器人在運動時重心投影可以容易置於支撐多邊形內，並且較不會受到加速度的影響而不穩定。而動態步行的雙足機器人通常有較輕的身體，且有較小的腳掌以維持步行的靈敏度，其維持平衡的方法是透過複雜的控制系統，精確計算步行速度、加速度及作用力矩等，以運動慣量來保持平衡。一般而言，進行動態步行的雙足機器人可做較高速的運動，但其平衡控制的難度遠高於靜態步行。因此靜態步行依舊會是一個重要的研究課題，尤其是當我們要分析當雙足機器人行經不平坦地面時的穩定度變化情形。因此吾人也是採用靜態步行作為本論文雙足機器人的基本控制。

3.2.1 腰部及腳部軌跡產生

首先是圖 3.1 中第一區塊的功能描述，由於吾人需要進行腳部之軌跡規畫，來取得想要之運動軌跡。吾人為了使雙足機器人步行運動能近似人類步伐，在此使用了擺線輪廓曲線函數來規劃雙足機器人步行時的腳掌座標位置[27][28]，設定擺線輪廓曲線函數所需的參數由使用者於程式中設定，需要設定的參數包括擺線輪廓曲線的高度、長度與取樣切分數。如圖 3.2 中虛線所示，其中黑色代表是左腳，而灰色代表的是右腳。此擺線輪廓曲線函數提供一簡單函數來描述人類正常步行之腳踝的運動軌跡。且此函數容易修改，適合不同的步行模式。左右腳的軌跡也都相同，僅只是順序不同輪流出現。

令擺動腳之運動軌跡如式(3.1)所示。其中， α 為跨一步於 Z 軸方向之半跨距，也就是擺線總長度之半； h 為跨步高度； T 為跨一步之取樣數，也就是將一週期擺線分為多少等分。圖 3.3 顯示出雙足機器人行走模擬圖，其中紅色(較淺色)代表是左腳，而藍色(較深色)代表的是右腳，上方黑色則是代表軀幹。模擬參數分別為半跨距 $\alpha=60\text{mm}$ 、跨步高度 $h=40\text{mm}$ 、跨步取樣 $T=128$ 、桿件長度為上：108.6mm，下：135.4mm。

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\alpha}{\pi} (2\pi \frac{t}{T} - \sin(2\pi \frac{t}{T})) \\ z(t) = \frac{h}{2} (1 - \cos(2\pi \frac{t}{T})) \end{cases}, 0 \leq t \leq T \quad (3.1)$$

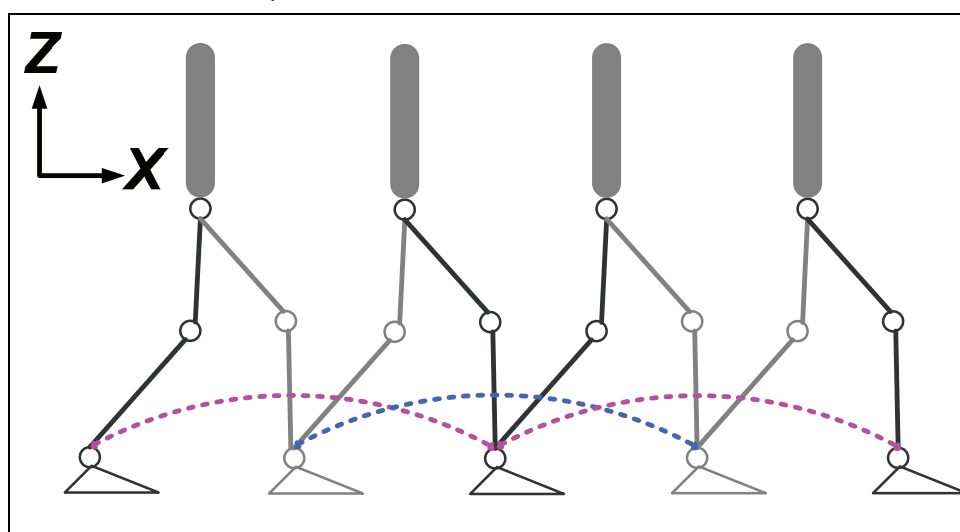


圖 3.2 擺線輪廓曲線函數示意圖

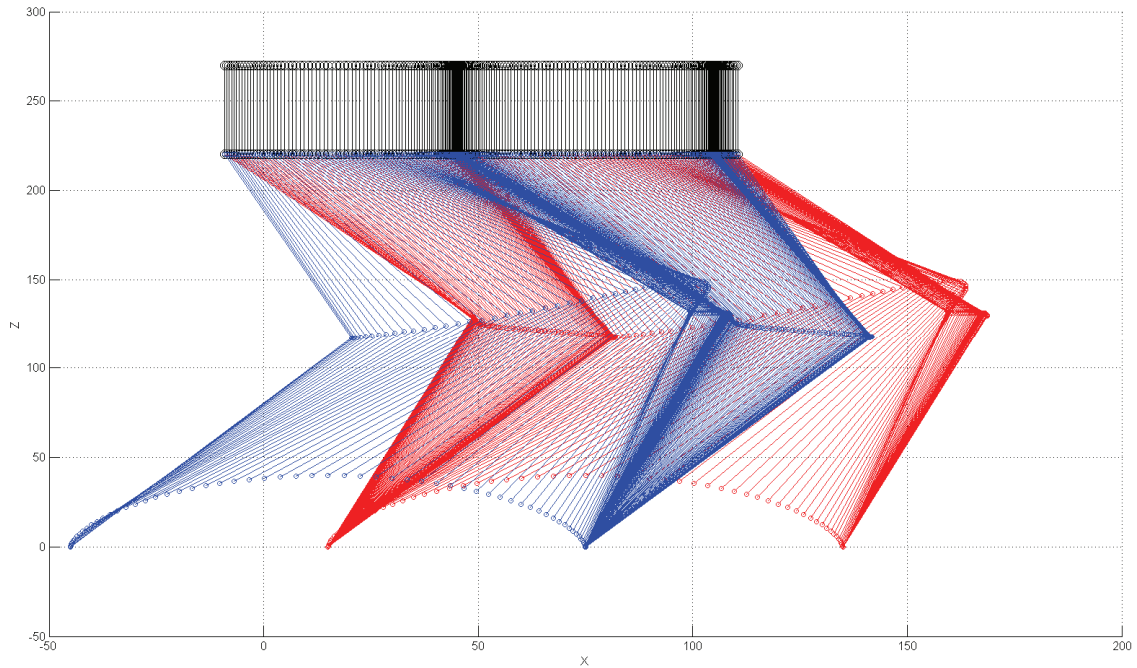


圖 3.3 雙足機器人行走模擬側視圖

另外，由於在本論文中所使用的是靜態步行，除了腳部軌跡之外，還必須規畫腰部的軌跡，藉以規劃機器人之重心位置來使得機器人的重心可以落於支撐多邊形內，軌跡設定的方式就是在單腳支撐相時，將重心置於支撐腳上方，而在雙腳支撐相時就將重心往另一隻支撐腳移動，為了避免軌跡轉折點造成的不穩定，腰部軌跡的產生同樣使用了可調整的擺線輪廓曲線函數作為軌跡，軌跡函數為式(3.2)，使腰部可以進行水平方向平滑的左右移動，如圖 3.4 所示，使機器人可以在單腳支撐相時將重心偏移至支撐腳上，而雙腳支撐相時再將重心經由支撐多邊形偏移至一隻腳支撐面內，而一個完整週期步行中共需 2 個腰部的擺線輪廓曲線軌跡。

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\alpha}{\pi} (2\pi \frac{t}{T} - \sin(2\pi \frac{t}{T})) \\ y(t) = \frac{h}{2} (1 - \cos(2\pi \frac{t}{T})) \end{cases}, 0 \leq t \leq T \quad (3.2)$$

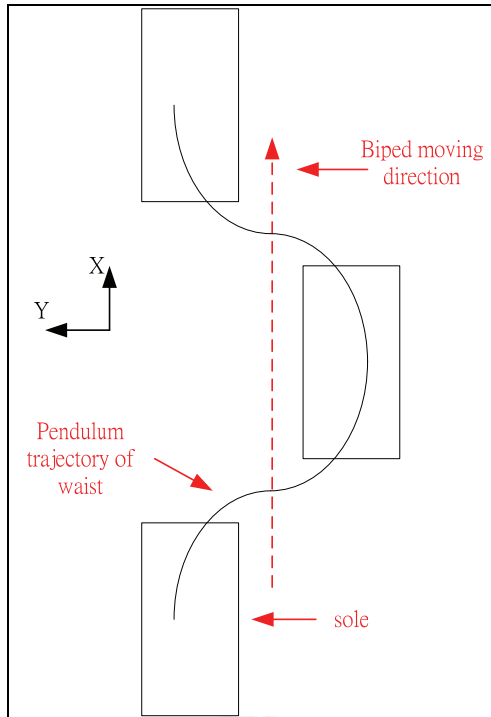


圖 3.4 單週期腰部軌跡示意圖

3.2.2 腳部至腰部向量計算

此節描述的是圖 3.1 中第二區塊的功能，吾人根據前節決定好的腰部軌跡以及腳部軌跡即可相減算出左右兩腳所應該產生之由腳部至腰部的末端點向量軌跡，如圖 3.5 所示。而此位置向量即是從腳底指向腰部的操作臂末端點位置，因此我們需要將其帶入反向運動學進行角度求解。

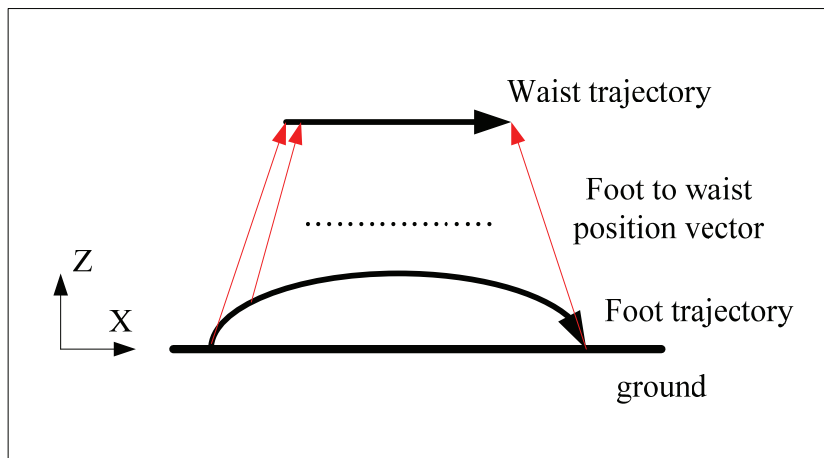


圖 3.5 腳部至腰部位置向量計算示意圖

3.2.3 雙足機器人運動學

機器人的運動學又可分為順向運動學（Forward-Kinematics）及逆向運動學（Inverse-Kinematics）兩部分。順向運動學為給定各關節軸之旋轉角度數據，進而求得末端桿件（link）在絕對座標系中的空間位置；而逆向運動學則是以給定末端桿件在絕對座標系中的空間位置，反過來求解各軸關節的旋轉角度，這也就是圖 3.1 中第三區塊主要執行的功能。若已知各桿件向量和各關節旋轉角的資料，可利用順向運動學方程式推導出各關節點之空間座標，也可由連續的腳掌點座標形成行走軌跡。為了模擬雙足機器人步行的情形，必須先規劃步行姿態使機器人動作。其中，兩隻腳掌座標以及髖部座標必須先規劃完成，而後使用這三點之座標軌跡，透過逆向運動學之計算，即可求解出機器人步行時各關節旋轉軸之絕對角度。而透過步行姿態規畫也可改善或調整機器人之穩定性。在本論文中，吾人採用的是 D-H model 將機器人建立運動學模型，用以進行順向運動學以及逆向運動學的計算。D-H model 是一種針對連桿運動設計的運動學分析法，可以對連桿在 3 度空間的移動與轉動有著簡單而完整的描述。

進行分析之前，本論文先做下列之假設：

- (1) 身體中心的位置將一直保持在離地面固定高度上，將運動從 3D 降為 2D，身體的姿態也將在運動中保持不變，也就是身體主要是處於水平移動的狀態。
- (2) 移動中的腳底板的姿態會與初始狀態相同，也就是維持水平且方向不變。
- (3) 各桿件為剛體。
- (4) 桿件間旋轉接頭處視為一點。
- (5) 不考慮雙足機器人受地面衝擊之振動行為。
- (6) 假設雙足機器人支撐腳底不與地面產生滑動。

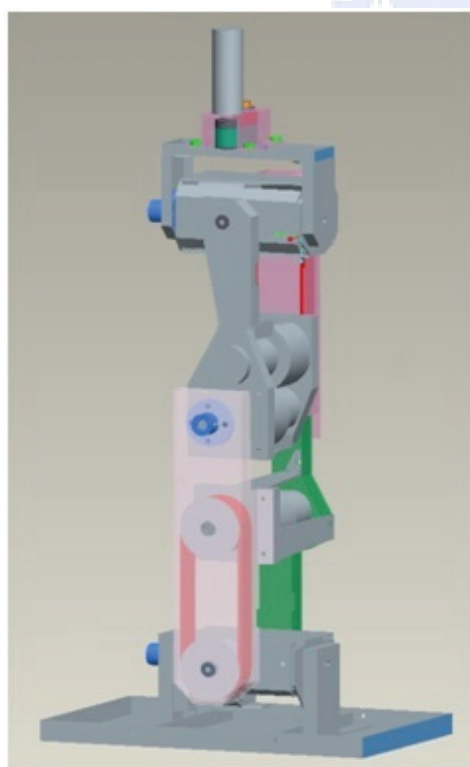
接著利用 D-H model 來建立運動學模型，建立順序為由腳底到腰部，如圖 3.6

所示，表3.1為雙足機器人D-H model的參數表，其中每4個D-H參數（ θ 、 α 、 a 、 d ）可決定出一個手臂自由度的座標轉換矩陣，如式(3.3)，左上角3*3矩陣代表的是旋轉方向，而第4行前三個元素則是代表X、Y、Z方向的位移。整個手臂有多少自由度就有幾個座標轉換矩陣作為代表，將所有自由度的代表矩陣照順序乘積起來即可得知操作臂末端的姿態與位置的矩陣。

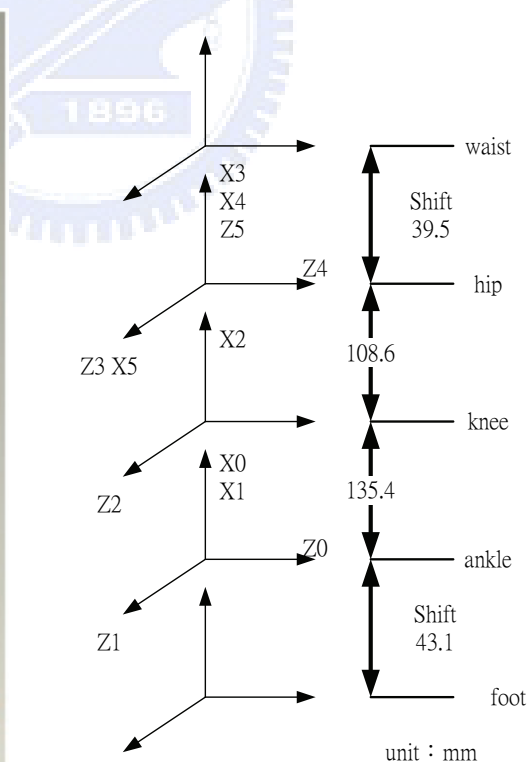
$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

表 3. 1 D-H 參數表

	θ	α	a	d
Joint1	θ_1	-90°	0	0
Joint2	θ_2	0	135.4	0
Joint3	θ_3	0	108.6	0
Joint4	θ_4	90°	0	0
Joint5	$\theta_5 + 90^\circ$	90°	0	0
Joint6	θ_6	0	0	0



(a)



(b)

圖 3. 6(a)腳部模型(b)腳部 D-H model

因此本論文之雙足機器人模型可建立以下 6 個轉換矩陣，如式(3.4-3.9)，除了這 6 個自由度的轉換矩陣之外，其餘自由度皆為平移效果，因此在求逆向運動學之時，可以先將其效果忽略進行求解，直到最後需要使用順向運動學計算身體與腳底位置之時再將其加入。

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 135.4 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 135.4 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 108.6 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 108.6 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

並定義雙足機器人採用卡式座標系，以正 X 軸為前進方向，Z 軸為上方向，並以起始位置雙腳踝中心為原點。機器人身體中心座標以及雙腳踝座標對絕對座標系原點皆只是平移運動。各軸旋轉角度方向定義如圖 2.7。

逆向運動學求解方式如下：

將腳底座標系設為基座往上進行連桿帶動，直到腕部最後一自由度設為末端，根據模型可知此種結構為 wrist-partitioned 的類型，求解 6 自由度操作臂之時，有容易解的算法。也就是因為末端位置的決定只受到 A1-A3 轉換矩陣的影響，A4-A6 轉換矩陣只會影響到末端姿態，因此可以藉由末端空間的三個座標變數(X、Y、Z)來解得三個矩陣的角度變數(θ_1 、 θ_2 、 θ_3)，而產生將 6 自由度的問題拆成 2

個 3 自由度問題的效果。令吾人所欲取得的末端空間座標值 P 與系統的前三自由度轉移矩陣 $A_1 * A_2 * A_3$ 之第四行，設為 T_{13} ，分別為式(3.10-3.11)，式(3.11)即為順向運動學推導出之本系統末端之空間座標。

$$P = [P_x \ P_y \ P_z \ 1]^T \quad (3.10)$$

$$T_{13} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (\cos \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \sin \theta_2 \sin \theta_3) \\ \sin \theta_1 (\cos \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \sin \theta_2 \sin \theta_3) \\ -\sin \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

接著令其在空間的三個座標變數(X、Y、Z)分別相等，也就是令式(3.10)與式(3.11)個別相等，可得以下三式：(3.12-3.14)。

$$P_x = \cos \theta_1 (\cos \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \sin \theta_2 \sin \theta_3) \quad (3.12)$$

$$P_y = \sin \theta_1 (\cos \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \sin \theta_2 \sin \theta_3) \quad (3.13)$$

$$P_z = -\sin \theta_2 (135.4 + 108.6 \cos \theta_3) - 108.6 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \quad (3.14)$$

用此三方程式解三個變數，因此有解。首先將式(3.13)左右同除以式(3.12)，可得：

$$\frac{P_y}{P_x} = \tan \theta_1 \Rightarrow \theta_1 = \text{Atan2}(P_y, P_x) \quad (3.15)$$

另外， θ_1 具有以下的同值解：

$$\theta_1 = \text{Atan2}(-P_y, -P_x) \quad (3.16)$$

相位相差 180 度。接著在已知 θ_1 後， A_1 也為已知，因此令 A_1^{-1} 同左乘 P 與 T_{13} ，可得 $A_1^{-1} * P$ 與 $A_2 * A_3$ 之第四行相等，設為 T_{23} ，可得下三式(3.17-3.19)：

$$135.4 \cos \theta_2 + 108.6 \cos(\theta_2 + \theta_3) = P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1 \quad (3.17)$$

$$135.4 \sin \theta_2 + 108.6 \sin(\theta_2 + \theta_3) = -P_z \quad (3.18)$$

$$0 = P_y \cos \theta_1 - P_x \sin \theta_1 \quad (3.19)$$

將式(3.17) 與式(3.18) 平方相加可解得下式：

$$\cos \theta_3 = \frac{(P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1)^2 + P_z^2 - 135.4^2 - 108.6^2}{2 * 135.4 * 108.6} \quad (3.20)$$

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad (3.21)$$

所以可得

$$\theta_3 = \text{Atan2}(\sin \theta_3, \cos \theta_3) \quad (3.22)$$

因為 Sin 有正負號的緣故，另一解為

$$\theta_3 = \text{Atan2}(-\sin \theta_3, \cos \theta_3) \quad (3.23)$$

剛好相差一個負號。接著，由於 θ_1 、 θ_3 皆已知，吾人再將 A_2^{-1} 同左乘 $A_1^{-1} * P$ 與 $A_2 * A_3$ ，可得 $A_2^{-1} * A_1^{-1} * P$ 與 A_3 之第 4 行相等設為 T_3 ，可得下列三式：

$$-P_z \sin \theta_2 + P_x \cos \theta_1 \cos \theta_2 + P_y \sin \theta_1 \cos \theta_2 - 135.4 = 108.6 \cos \theta_3 \quad (3.24)$$

$$-P_z \cos \theta_2 - P_x \cos \theta_1 \sin \theta_2 - P_y \sin \theta_1 \sin \theta_2 = 108.6 \sin \theta_3 \quad (3.25)$$

$$P_y \cos \theta_1 - P_x \sin \theta_1 = 0 \quad (3.26)$$

藉由式(3.24)與式(3.25)解 $\sin \theta_2$ 與 $\cos \theta_2$ 之聯立方程式，可得

$$\cos \theta_2 =$$

$$-\frac{108.6 \sin \theta_3}{P_z} + \frac{(P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1)(108.6 \sin \theta_3 (P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1) + P_z(135.4 + 108.6 \cos \theta_3))}{P_z((P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1)^2 + P_z^2)} \quad (3.27)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{-108.6 \sin \theta_3 (P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1) + P_z(135.4 + 108.6 \cos \theta_3)}{(P_x \cos \theta_1 + P_y \sin \theta_1)^2 + P_z^2} \quad (3.28)$$

所以可知

$$\theta_2 = \text{Atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (3.29)$$

到此已解出前三軸角度，接下來要利用末端點之空間姿態方向來解出後三軸角度。

在之前模型設定時已將第一個自由度的座標方向定義為 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，並且由於

本論文中之機器人移動軌跡皆為直線，暫不考慮最後一軸之旋轉，並且根據假設腳底座標軸各軸的方向將與身體姿態座標軸平行，也就是 X_0 、 Y_0 、 Z_0 與 Z_5 、 X_5 、

Y_5 平行，則末端的空間姿態則固定為 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ，令 $A_1 * A_2 * A_3$ 之旋轉矩陣 3*3 稱

做 R_3^0 ，而 $A_4 * A_5 * A_6$ 之旋轉矩陣 3*3 稱做 R_6^3 ，分別可知：

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos \theta_1 \\ -\sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 + \sin \theta_4 \sin \theta_6 & \sin \theta_4 \cos \theta_6 - \cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 & \cos \theta_4 \sin \theta_5 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_4 \sin \theta_6 & -\cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 & \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ \sin \theta_5 \cos \theta_6 & -\sin \theta_5 \sin \theta_6 & -\cos \theta_5 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$R_6^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = R_3^0 * R_6^3 \quad (3.32)$$

將已知的 R_3^0 同左乘式(3.32)左右，可得 $R_6^3 = R_3^0^{-1} * R_6^0$ ，由於右側皆為已知，設

其為矩陣 $\begin{bmatrix} n_x^3 & o_x^3 & a_x^3 \\ n_y^3 & o_y^3 & a_y^3 \\ n_z^3 & o_z^3 & a_z^3 \end{bmatrix}$ ，與式(3.31)比較可得：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 + \sin \theta_4 \sin \theta_6 & \sin \theta_4 \cos \theta_6 - \cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 & \cos \theta_4 \sin \theta_5 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_4 \sin \theta_6 & -\cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 & \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ \sin \theta_5 \cos \theta_6 & -\sin \theta_5 \sin \theta_6 & -\cos \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x^3 & o_x^3 & a_x^3 \\ n_y^3 & o_y^3 & a_y^3 \\ n_z^3 & o_z^3 & a_z^3 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

因此可知

$$\theta_4 = \text{Atan2}(a_y^3, a_x^3)$$

$$\theta_5 = \text{Atan2}\left(\sqrt{a_y^{32} + a_x^{32}}, -a_z^3\right), \text{範圍 } 0 \sim \pi \quad (3.34)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}(o_y^3, -n_x^3)$$

或

$$\theta_4 = \text{Atan2}(-a_y^3, -a_x^3)$$

$$\theta_5 = \text{Atan2}\left(-\sqrt{a_y^{32} + a_x^{32}}, -a_z^3\right), \text{範圍 } -\pi \sim 0 \quad (3.35)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2}(-o_y^3, n_x^3)$$

以此方式解得之所有解的組合如圖 3.7，共有 8 組，因此吾人必須搭配各個自由度的可行活動範圍來進行篩選，最後只留下一組可行解。到此，吾人已經可以將想要之末端坐標經由逆向運動學轉換成為各關節角度。

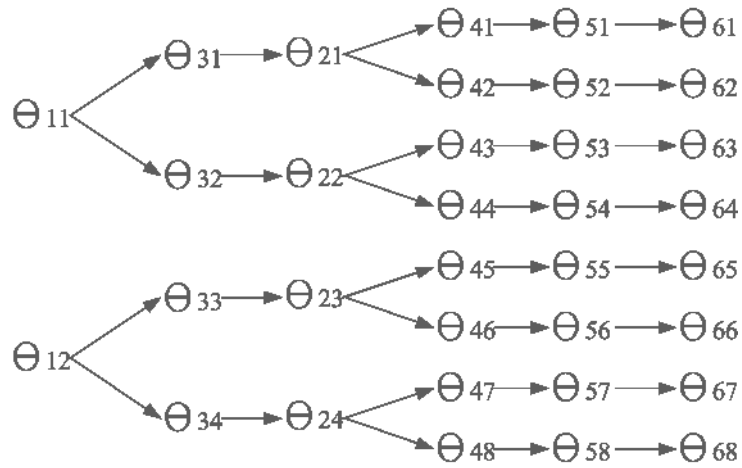


圖 3.7 一組位置可解出之所有角度解

接著將前節所得到之向量軌跡依序帶入反運動學求解，即可得到所應產生之旋轉角度軌跡，而利用解出之角度帶入順向運動學中，畫出的軌跡模擬圖，如圖 3.8 所示，腰部軌跡參數：半跨距 $\alpha_1 = 30\text{mm}$ 、距中心橫移距離 $h_1 = 70\text{mm}$ 、跨步取樣 $T_1 = 64$ ；腳部軌跡參數：半跨距 $\alpha_2 = 60\text{mm}$ 、跨步高度 $h_2 = 40\text{mm}$ 、跨步週期 $T_2 = 32$ 、桿件長度為上： 108.6mm ，下： 135.4mm ，全週期取樣為 128，左右腳軌跡相差半個週期，單腳支撐相及雙腳支撐相時間長度相等並交互出現，腰部在 Y 方向以擺線輪廓曲線左右橫移。

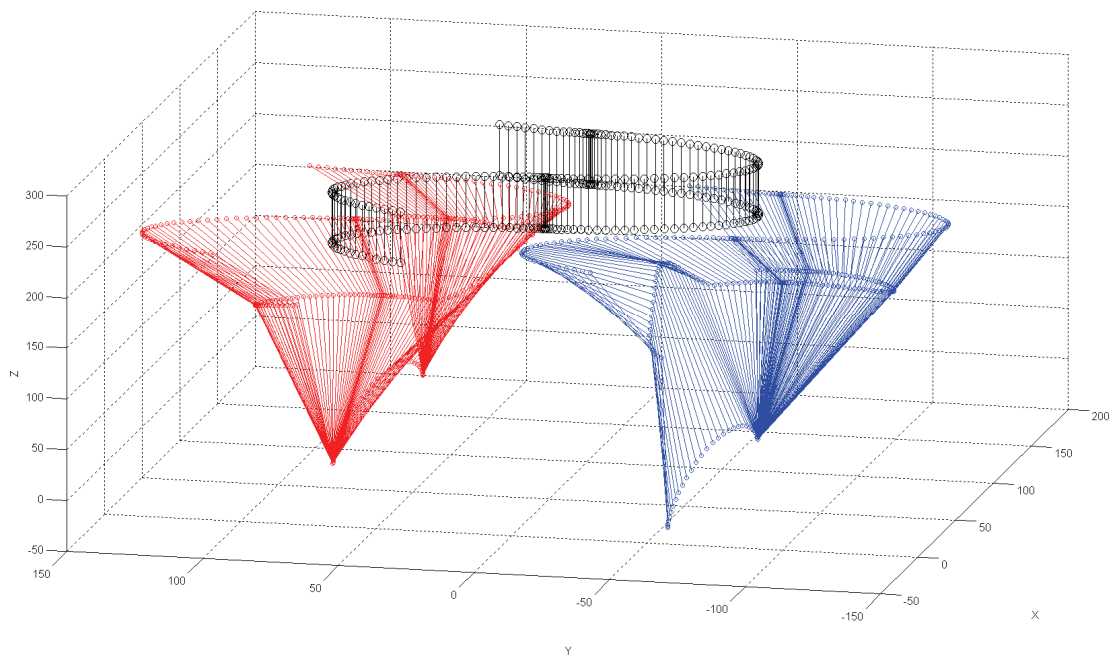


圖 3.8 單週期雙足機器人行走模擬 3D 圖

3.2.4 雙足機器人行走之分析

一般而言，過去的研究將兩足機器人之行走的過程中的姿態分為單腳支撐相（Single-support phase）與雙腳支撐相（Double-support phase）兩種[22][29]。而機器人在行走的過程中，便是這兩種相位循環交替，形成週期性的動作而前進，如圖 3.9。其中，假設灰色的腿為左腳，而黑色的腿為右腳。首先由右腳跨出一步，開始跨步時，從圖 3.9 中由左到右歷經雙腳支撐相與單腳支撐相之後，最後再回到雙腳支撐相，如此反覆循環，達成連續行走之姿態。

因此將連續 2 組單雙支撐相組合起來成為一個新週期，如圖 3.10 所示，機器人的動作將會是完全重複。因此在圖 3.1 中第四區塊的功能中，主要是將吾人設計出之一完整週期之步態軌跡，按照命令輸入的步數連接起來重複組合使用，展延出所需的步行距離，並且吾人所設定之單腳支撐相與雙腳支撐相之取樣時間皆為相等。因此，吾人之做法為在機器人控制起始之時先將所需之全步態軌跡運算完成，而後再將運算出之分段取樣軌跡逐個輸出使機器人產生運動。

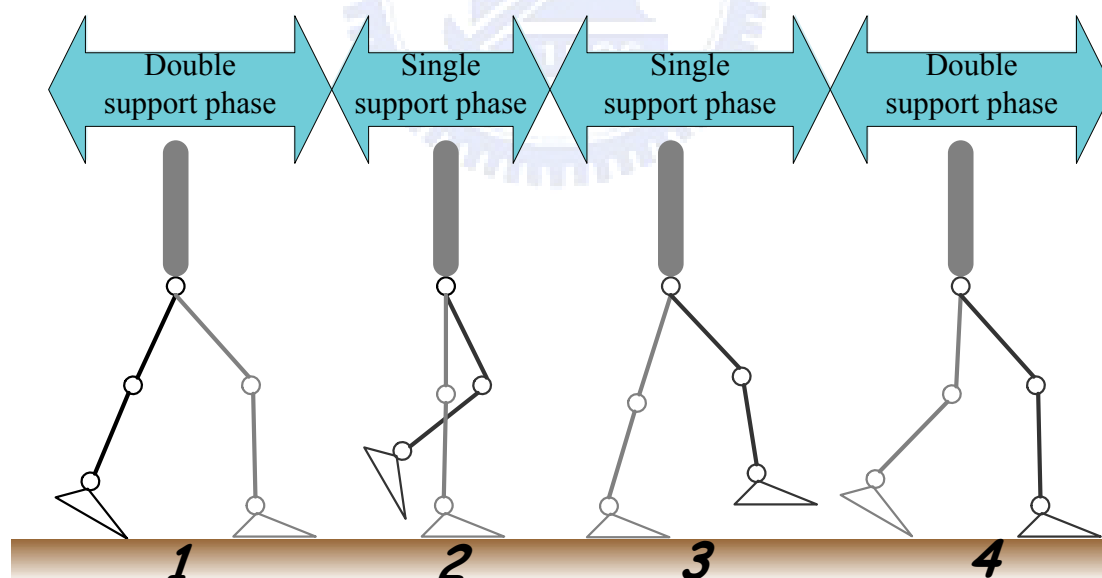


圖 3.9 雙足機器人行走相位示意圖

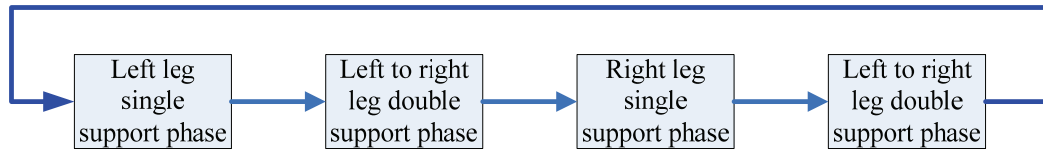


圖 3.10 雙足機器人步行之完整週期

當靜態步行在移動的過程中，為了不至於傾倒，都必須將重心置於支撐腳的多邊形內，如圖 3.11，虛線代表的是腳浮空，圖中紅色所代表的是機器人的重心位置，而重心是隨著步伐的移動而改變的，但是都是落在支撐腳多邊形上，如此便能保持平衡不跌倒。因此，在機器人學的分析中，機器人的關節運動軌跡規畫是重要的，因為這對於兩足機器人之平衡有著絕對的關係。一般來說，吾人先經由運動學之分析，以驗證關節 (joint) 運動軌跡之可行性，而後經由實驗驗證以完成控制器。

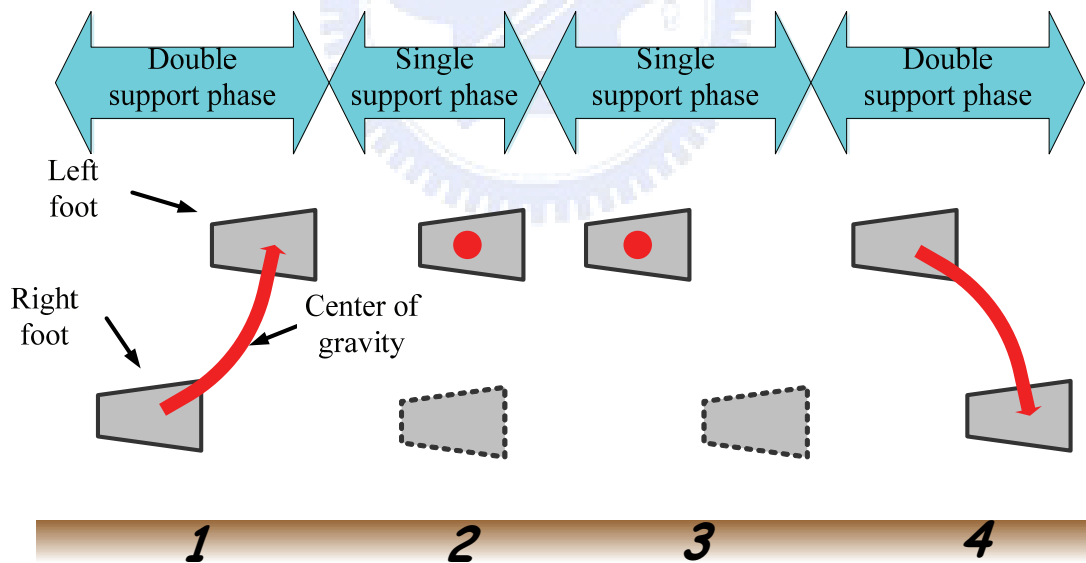


圖 3.11 雙足機器人行走重心示意圖

第四章 補償控制器設計

在前節中，吾人已經設計好了一個可以進行平地行走的軌跡，使雙足機器人得以進行直線靜態步行，但是當機器人一但遭遇障礙物或非理想地形時，就很容易產生不穩甚至於傾倒的現象。因此，設計一個控制器可以在行走過程中感測地形的變化，並根據變化輸出補償去微調原本的步行軌跡，不使重心的移動產生過大的變動，並在變化解除之後得以還原至原本的軌跡將補償值歸零，便是本節的重點。

4.1 補償控制器架構

本論文中補償控制器的架構，如圖 4.1 所示，是屬於每個步行取樣中都會啟動的及時控制方式，內容概述如下：

在雙足機器人的步行取樣中，根據裝置在雙足機器人腳底的壓力感測器所取得的數值，傳送到補償器中，藉由自行建表內插轉換成為壓力值，再根據 ZMP 計算公式算出 ZMP 的位置。將算出之 ZMP 位置與使用者設定之相關參數送入補償產生器，計算本次步行取樣所需的補償角或補償歸零角累加至總補償角中於每次取樣時輸出。

接著於每次取樣時，步行軌跡產生器與補償器都會送出數值進行加總，一個是本次取樣時理論上應執行的角度，另一個是累積至本次取樣時之總補償角度，合成後則為本次取樣實際輸出角度。將實際輸出角度連續輸出則成為新步行軌跡。角度合成如式(4.1)，令 $\theta_j(t)$ 為最終輸入給馬達的角度， $\theta_p(t)$ 則是步行軌跡所產生的馬達角度， $\Delta\theta(t)$ 就是補償控制器所產生的總補償角，以上三個皆為長度 12 的向量，分別對應 12 個馬達自由度，但在總補償角向量中，由於吾人只針對踝部的軌跡作補償，因此除了踝部 Pitch 方向之外，其餘自由度皆為 0。

$$\theta_j(t) = \theta_p(t) + \Delta\theta(t) \quad (4.1)$$

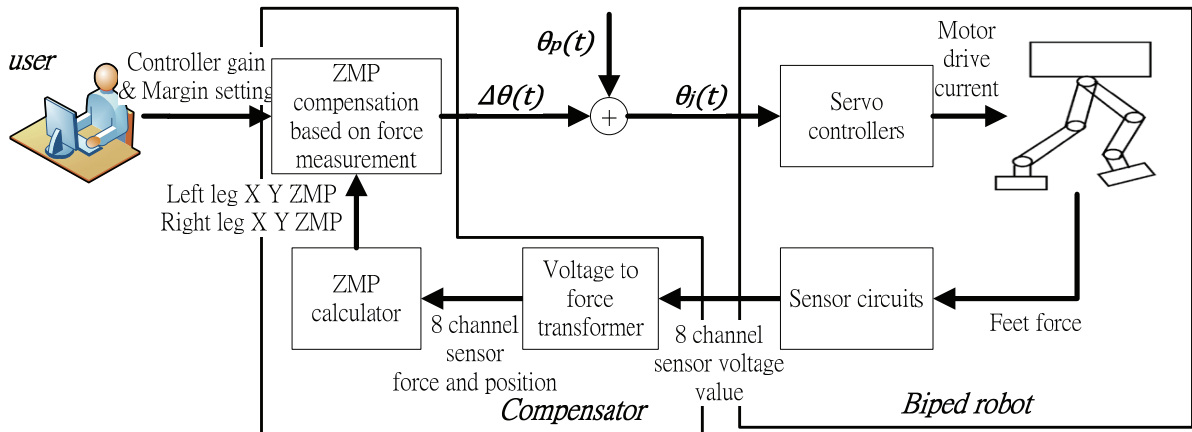


圖 4.1 補償控制器架構圖

4.2 壓力感測器數值轉換

在補償控制器的圖 4.1 第一個區塊中，主要是進行將腳底 8 個壓力感測模組輸出的電壓由類比轉數位轉換器讀取的數值轉換為對應壓力的工作，由於壓力感測器對於受力感測的範圍，在不同力量大小之下，有著相異的變化情形，呈現一種非線性對應的狀況，因此吾人不可將讀取到的數值直接當成受力大小進行計算，否則將會造成誤差。在此吾人則是使用建表查表的方式來設定轉換的曲線，在壓力讀取數值為 0-1000 的範圍內，吾人先將壓力感測器的測量值做一個統一的動作，也就是先統一使用一個 5 公斤重的重物壓在壓力感測器上並調整可變電阻，使壓力感測器的測量值達到 700，接著使用標準砝碼組合出各種重量並對各個壓力感測器進行測量，建立各個壓力感測器的數值壓力對應表，而對於此表所未測量的數值，則是採用線性插補法計算其壓力值來近似其特性曲線。

4.3 零力矩點 ZMP 計算

為了達到控制的目的，推導足以代表系統動態行為的雙足步行機器人數學模型是有必要的，一般常用之方法有兩種：第一種為 Lagrange Equation，此方法從能量的觀點出發，基於整個系統之動能與位能之消耗而得，可提供設計者了解系

統之動態行為。但是當系統自由度越多時，系統的動態方程式將會過於複雜；第二種方法為 Newton-Euler method，從力的觀點出發，將機器人每一連桿視為一個獨立之自由體，以公式決定每一根連桿之動態模型，最後所求得之運動方程式代表的是連桿與相鄰連桿之變化關係的疊代模型。此模型包括了連桿平移與轉動之動態量，此模型可幫助設計者了解每一根連桿之動態行為，尤其該公式可以指出透過機器人關節所傳遞之力與力矩和關節之間的相互作用力大小。

但是吾人認為上述之動力學分析法在應用上缺乏一實際且準確的系統模型，當應用在兩足機器人時，受控系統的自由度相當多，如此將使得分析過程變得複雜。且在系統模擬分析的過程不易以將環境的變數考慮進去，例如地形的變化等。所以本論文對機器人動力學的分析是採用對零力矩和點（Zero Moment Point, ZMP）的分析[30]而成的。

當機器人運動時，各桿件產生加速度而有慣性。假設全部桿件的合力矩由一地面反作用力矩相抵消。而地面反作用力若作用在腳掌內，即表示全部桿件的合力作用也在腳掌內，則機器人保持平衡不跌倒，稱為零力矩和點（ZMP）。所以，若是 ZMP 落在雙足機器人與地面所作用之支撐範圍內，吾人便可認為機器人為平衡狀態，如圖 4.2。圖中深灰色之範圍為穩定支撐區域，所以雙足機器人在行走時，ZMP 應該落在此區域中。

在過去許多研究當中，ZMP 是經由機器人之動態模型分析而得，如式(4.2)與式(4.3)所示。其中 m_i 為桿件之質量， I_{ix} 與 I_{iy} 為慣量， $\ddot{\Omega}_{ix}$ 及 $\ddot{\Omega}_{iy}$ 則分別是第 i 個桿

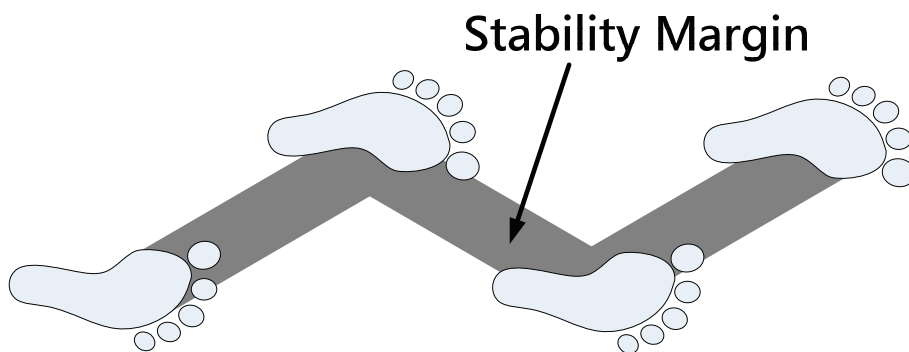


圖 4.2 雙足機器人步行時 ZMP 穩定範圍示意圖

件之質量中心沿著x軸與y軸的絕對角速度，g為重力加速度常數， (x_i, y_i, z_i) 為桿件質量中心之座標向量。

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i+g)x_i - \sum_{i=0}^n m_i\ddot{x}_iz_i - \sum_{i=0}^n I_{iy}\ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i+g)} \quad (4.2)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i+g)y_i - \sum_{i=0}^n m_i\ddot{y}_iz_i - \sum_{i=0}^n I_{ix}\ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i+g)} \quad (4.3)$$

而在圖 4.1 第二區塊中，則是應用另一種直覺的方式得到 ZMP[23][25][31]，利用安裝於雙足機器人足底平面之壓力感測器（Force Sensing Resistor, FSR），測量機器人與地面之間的作用力，經由計算後得到 ZMP 軌跡。安裝示意圖如圖 4.3 所示。圖 4.3 中長方形方塊代表的是機器人之腳底，而方塊中的圓點代表的是壓力感測器。並分別在雙足機器人的兩隻腳底各安裝 4 個感測器，分別配置在四個角落。而後感測訊號透過類比轉數位轉換後傳輸至控制系統中，並經過公式計算得到 ZMP，如式(4.4)，成為機器人平衡回授訊號。在式(4.4)中， f_i 為第 i 個感測器所量到的壓力， $s_i = [x_i \ y_i]^T$ 為第 i 個感測器的位置向量， $P = [P_{zmp}^x \ P_{zmp}^y]^T$ 為 ZMP 的位置向量， n 為壓力感測器數量。因此，將機器人全部的 8 個感測器帶入所算出的 ZMP 為總 ZMP，而如果只將單一隻腳的 4 個感測器帶入計算則可得到對應此腳的 ZMP，而利用單腳的 ZMP 也可得知地面分別對左右腳的受力情形，而在單腳支撐相時，支撐腳之單腳 ZMP 即為總 ZMP，雙腳支撐相時，總 ZMP 必定會在左右腳單腳 ZMP 之連線。透過這樣的計算方式，可以簡易且直覺的計算出目前雙足機器人於行走或是站立等其他姿態時的 ZMP 軌跡，以及兩隻腳分別的受力情況。

4.4 基於力量測之 ZMP 補償

此小節主要是圖 4.1 中第三區塊功能的描述，主要的功用是在每個取樣時間中，根據此取樣時間是處於步態週期中的哪一階段，以及對應腳的 ZMP 位置，計算該取樣時間應該產生的步態補償動作、步態歸零動作或不動作。

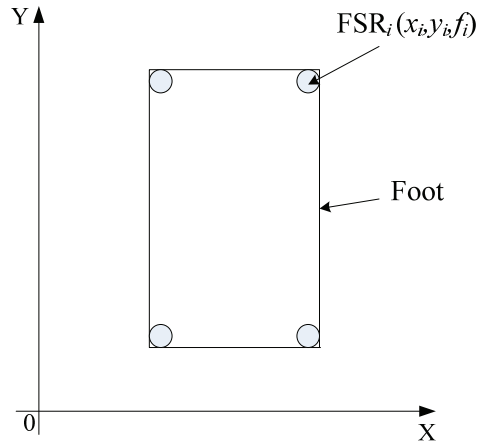


圖 4.3 壓力感測器安裝示意圖

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n f_i * s_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (4.4)$$

4.4.1 ZMP 穩定區間定義

機器人會不會傾倒的主因在於 ZMP 是否在支撐腳之內，但並不是在步行軌跡中將機器人的 ZMP 設定到支撐腳腳板內就可以了，若是 ZMP 的設定軌跡過於腳板邊緣，當機器人受到不預期的力量作用時，例如抬腳、著地時的衝擊或是馬達產生的震動等，都會使得 ZMP 產生移動，這時就較容易會移出支撐腳範圍而傾倒，因此吾人在此設定一個單腳 ZMP 的穩定範圍，如圖 4.4，中間的部分是穩定區間，而周圍的部分是作為緩衝區之用，穩定區間的大小是自行定義的，吾人是藉由使機器人進行一般平地步行取得標準 ZMP 軌跡資料後，將範圍定為比補償器可作用階段之補償區中的標準 ZMP 軌跡略寬，使一般步行不至於產生過大的補償。落於穩定區間外的 ZMP 將可得到一 dy_{zmp} ，根據圖 4.4 中的座標方向，定義落於上緩衝區之 dy_{zmp} 為正，下緩衝區之 dy_{zmp} 為負。而吾人的補償控制器即是在雙足機器人腳底感測到有障礙物之時，嘗試將落於擺動腳穩定區間外之擺動腳 ZMP 藉由對於腳踝關節的角度調整，將其拉回穩定區間之內。

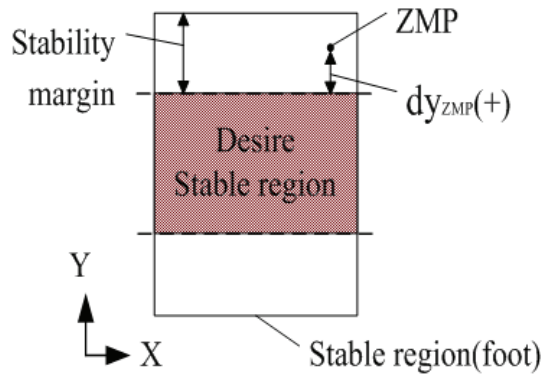


圖 4.4 單腳 ZMP 穩定區間示意

4.4.2 控制器的作用原理與方式

障礙物偵測的原理主要如圖 4.5，設定的條件如下：

- (1) 擺動腳移動方向為正下方，障礙物對腳底施力方向為向上。
- (2) 障礙物的設置為長條棒狀剛體，寬度約為腳寬。
- (3) 設置方式為橫放，使補償自由度為 Pitch 方向，因為本論文之雙足機器人在 Roll 方向可活動角度較低，不適合進行補償控制，可能使步行時自由度超出工作範圍而造成傾倒。
- (4) 橫放之位置於腳底板之前 1/4 或後 1/4 之範圍內。

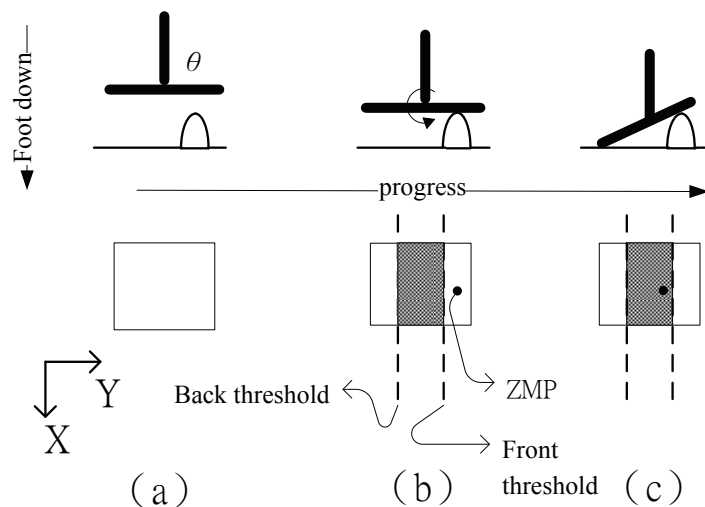


圖 4.5 擺動腳障礙物偵測的原理示意(a)未補償(b)補償中(c)補償後

未補償時腳底板與地面平行，一開始未接觸到障礙物，無 ZMP 並且壓力感測器數值皆小於自行設定之臨界值，補償控制器不動作，如圖 4.5(a)；接下來如圖 4.5(b)，當腳底板與障礙物接觸到一定程度以上，由於腳向下踩到障礙物，障礙物會給腳底板向上的施力，使壓力感測器讀取到較大的數值，突破臨界值而判斷腳底遭遇障礙物使補償器啟動，此時由於受力點偏向前方，ZMP 計算之結果也會在前方，若 ZMP 超出自行設定之 ZMP 穩定區間前方，則補償值就根據距離穩定區間的距離 dy_{zmp} 乘上控制參數 K 來得到此取樣時間的應補償角度，或是在不補償時間中輸出 0 與歸零時間中輸出補償歸零值，如式(4.5)，並於之後將其累加到總補償角度中輸出，如式(4.6)，使得腳踝順著障礙物的施力方向旋轉，經過數個取樣時間後累積足夠的旋轉角度使前方受力變小將 ZMP 向後拉到穩定區間內，則補償停止，如圖 4.5(c)，因此產生腳底對地形的調整性，使之後的單腳支撐相步行可以通過障礙物而不傾倒。

因此，控制器的控制流程為當進入補償器可作用階段之補償區時，先進行壓力感測器臨界值測量而非直接進行補償，臨界值的設定為比一般步行中補償器可作用階段之補償區的壓力感測器數值略大，直到任一壓力感測器臨界值突破，確認遭遇非正常障礙物後，才正式啟動補償器，如式(4.5)的第一項，補償值為自行設定之 K 乘上 dy_{zmp} ，再將其加入總補償角，如式(4.6)。而在補償完之後總補償角將維持輸出直到進入歸零狀態。而當進入補償器可作用階段之歸零狀態時，則立即進行歸零程序，首先將前一時刻未進入歸零狀態時(設為 n_0)最大補償角數值取出，再除以歸零區間總取樣數(設為 m)，計算出之數值設為 Z_0 ，如式(4.7)，之後整個歸零區段皆固定以 Z_0 累加至總補償角，將總補償角歸零，而除了以上的情況之外，控制器皆以 0 作為輸出，總補償角將維持不變，如式(4.5)第三項：

$$\delta\theta(jT_s) = \begin{cases} K * dy_{zmp}(jT_s), & dy_{zmp}(jT_s) \neq 0 \text{ and compensator enable} \\ Z_0, & \text{time to zeroize} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\Delta\theta(nT_s) = \sum_{j=1}^{j=n} \delta\theta(jT_s) \quad (4.6)$$

$$Z_o = \Delta\theta(n_o T_s)/m \quad (4.7)$$

T_s 為取樣時間單位， j 為整數 1,2,3...， $\delta\theta(jT_s)$ 為 jT_s 此取樣時間之補償值， $\Delta\theta(nT_s)$ 為從啟動至現在各取樣時間補償值之累計。

4.4.3 控制器的作用時機

控制器作用的時機如圖 4.6 所示為灰色範圍，淺灰色為產生補償區域，深灰色為產生歸零區域。由於感測的目的是腳在落下的過程中是否踩到障礙物，因此作用範圍主要是從單腳支撐相之後半週期開始，也就是擺動腳下落的時間，直到接下來的雙腳支撐相將重心移往前腳的前 1/4 週期。在此期間擺動腳先根據壓力感測器吾人自行設定的臨界值來判斷是否有障礙物存在，如果判斷有障礙物，再根據擺動腳腳底的 ZMP 受力狀況，判斷障礙物處於腳底的前部或後部，進而於每取樣中做出對應的擺動腳 ZMP 穩定區間補償，最後直到下一個單腳支撐相的擺動腳前半週期，擺動腳浮空之時則於每取樣中將前次總補償數值逐漸歸零，之後等待下一週期到來，周而復始，左右腳皆是如此。

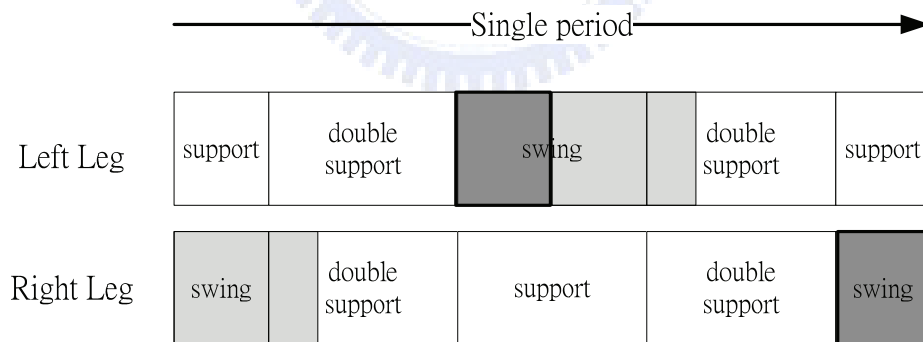


圖 4.6 控制器的作用時機示意

第五章 實驗結果

本章主要是說明針對前面所說明的步態規劃與補償控制器的效果進行實驗。首先吾人先將所需使用到的壓力感測器作校正以及特性量測，為了之後的實驗所需的量測資料鋪路。接著吾人將要驗證步行軌跡產生器的功能是否可以正確的產生所需的軌跡與產生出軌跡的穩定性。在步行軌跡產生器可以正常使用之後，吾人將加入補償控制器來配合步行軌跡產生器，於行進中進行機器人步伐的修正，並在機器人的行進路線上加入障礙物以測試補償控制器是否會產生應有的補償效果，使機器人得以順利完成步行。

5.1 壓力感測器實驗

壓力感測器是為了量測腳底所受到的壓力而設置，而由於感測器自身的特性與設置上些微的誤差，對於相同壓力所感測出來的數值就不盡相同，因此我們採用的是使用標準砝碼重量建立對應數值表的方法來產生數值與受力的轉換關係。

首先建立一接觸面積接近感測區域的小支撐座，使砝碼可以易於放置於 4 個角落，直接壓在壓力感測器上，針對各個壓力感測器取值，另將壓力感測器編號如圖 2.22，壓力臨界值設定如表 5.1，臨界值決定方法為先令機器人進行一般步行，然後觀察補償器作用區間中各壓力感測器數值，接著設定臨界值略高於一般軌跡的極值即可，使一般步行不至於啟動補償器作用。

校準壓力感測器的第一步是將 5 公斤重物壓上去之後藉由調整放大電路的可變電阻使類比轉數位轉換器讀取數值變為 700，待 8 個壓力感測器皆調整完畢之後開始量測其餘重量之數值，類比轉數位轉換器數值範圍為 0-1000，每個壓力感測器約取得 11 組數據，如表 5.2。而由表 5.2 的點作直線連接作圖可得圖 5.1(a)-(h)，分別為腳底的 8 個壓力感測器，在程式中計算各種 ZMP 即是使用圖 5.1 的各個曲線將讀取之數值轉換為受力來進行計算。

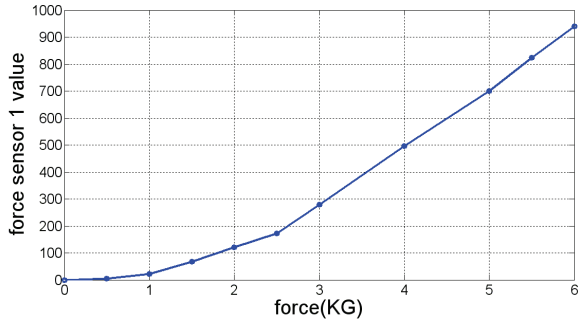
由圖 5.1 可以知道 8 個壓力感測器的量測在重量小於 0.5KG 的情況下變化皆較為緩和，對於較輕微的力量較不敏感，而在重量大於 1.5KG 之後曲線則接近線性，對於力量的感測解析度也提高不少。

表 5.1 壓力感測器臨界設定值

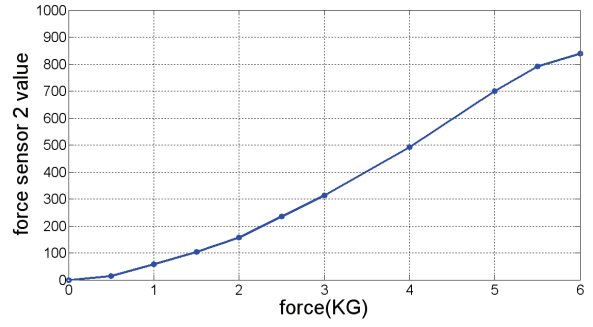
Sensor ID	1	2	3	4	5	6	7	8
threshold	20	30	20	105	95	20	35	20

表 5.2 壓力感測器壓力與數值對應表

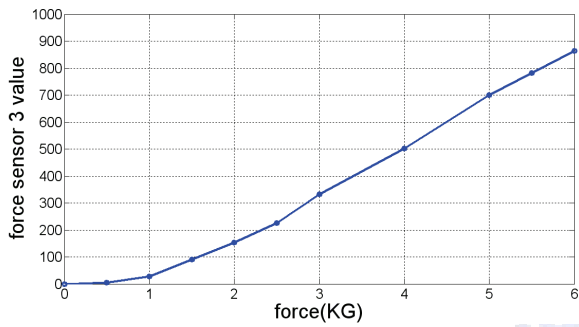
Kg \ sensor	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	5.5	6
	ID 1	0	4	22	68	121	172	279	497	700	824
ID 2	0	15	58	103	158	235	313	493	700	791	840
ID 3	0	4	28	91	154	226	333	502	700	782	863
ID 4	0	1	14	51	118	180	307	495	700	800	931
ID 5	0	1	8	28	92	195	262	498	700	782	905
ID 6	0	10	48	102	162	224	311	483	700	790	862
ID 7	0	11	52	101	172	236	308	488	700	795	870
ID 8	0	5	30	82	145	241	338	502	700	755	805



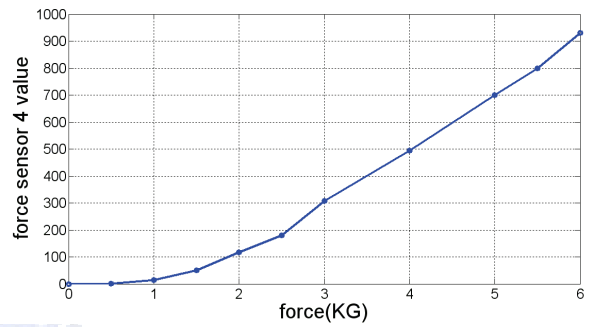
(a)



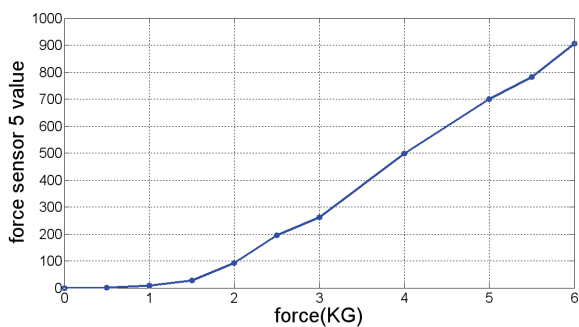
(b)



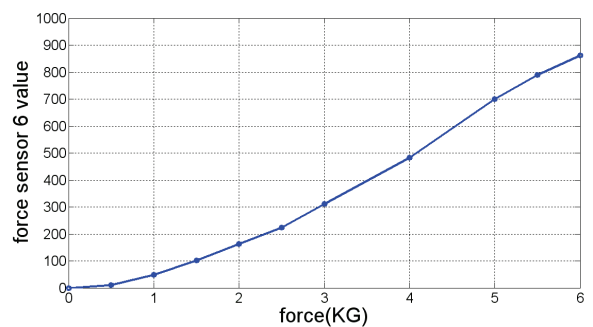
(c)



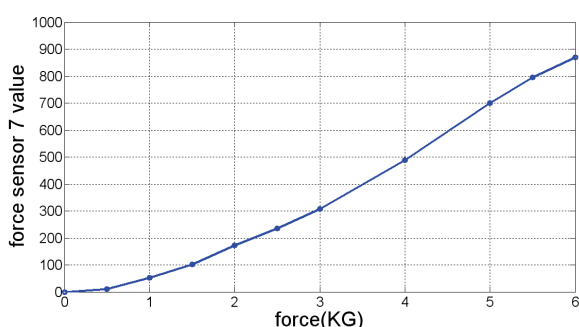
(d)



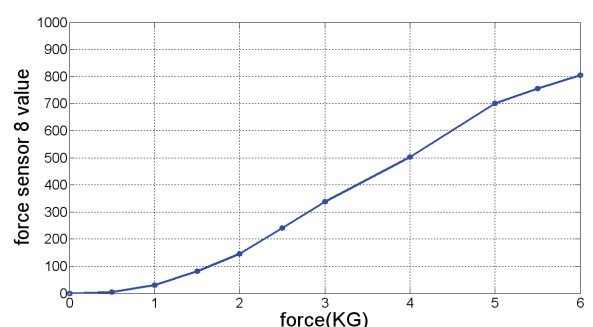
(e)



(f)



(g)



(h)

圖 5.1 壓力感測器壓力與讀值對應曲線(a)sensor 1(b)sensor 2(c)sensor 3(d)sensor 4

(e)sensor 5(f)sensor 6(g)sensor 7(h)sensor 8

5.2 平地直線軌跡步行實驗

本實驗的目的，主要是驗證由前述方式所設計出來的步行軌跡是否可以使機器人正確而穩定的步行在平坦地面上，用以成為後續加入補償器控制的軌跡。

實驗中主要展示的是依照吾人所設定的靜態步行軌跡進行的行走直線一公尺，腰部軌跡參數：半跨距 $\alpha_1=25\text{mm}$ 、橫移距離 $h_1=70\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_1=192$ ；腳部軌跡參數：半跨距 $\alpha_2=50\text{mm}$ 、跨步高度 $h_2=40\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_2=96$ ，實驗環境為平坦的實驗桌並架設 2 條標記相距 1m，如圖 5.2，實際動作序列照如圖 5.3(a)-(f)，分別是(a)身體左移、(b)抬起右腳、(c)右腳著地、(d)身體右移、(e)抬起左腳和(f)左腳著地。圖 5.4-圖 5.11 分別為左右腳 X、Y 方向 ZMP 與將其中取出單一週期放大圖。

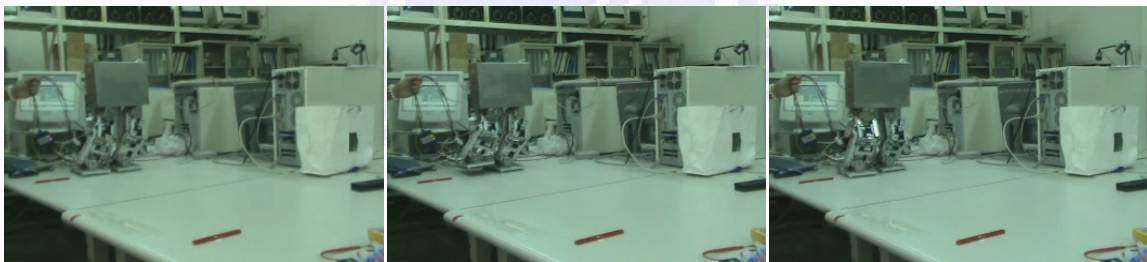
在全週期圖中 X 軸方向由較小寬度虛線夾住的是此腳單腳支撐相時之階段取樣，Y 軸方向虛線夾住的是此腳單腳支撐相時 ZMP 最大的變化範圍，位置可參考圖 2.22，X 方向邊界在 0 與 97mm，Y 方向邊界在 0 與 167mm，因此可以知道在移動過程中左右腳單腳支撐相之 ZMP 變化皆距離邊界有一定的緩衝區間，至少約有 10 到 50mm 之間，並且每週期呈現規律性的變化。共行進 12 週期，每週期行進約 85mm，總長約為 1m，每週期取樣為 384，每週期所需時間約為 6 秒。而在單一週期中共分為四個階段，各為 96 取樣，順序分別是單腳支撐相支撐腳、雙腳支撐相、單腳支撐相擺動腳與雙腳支撐相。

在單腳支撐相支撐腳中，單腳 ZMP 軌跡就等於全身 ZMP 軌跡，因此可從此得知整體的穩定狀態，而在雙腳支撐相中，全身 ZMP 是由雙腳的 ZMP 權重計算得到，因此必定落於雙腳 ZMP 之連線上，只要雙腳之 ZMP 軌跡皆處於一定的穩定區間之內，則全身 ZMP 也必定處於由雙腳所構成之穩定多邊形內，而在單腳支撐相擺動腳中，由於腳是屬於懸空不接觸地面，因此不影響全身 ZMP，此時所量測出來之受力皆為機體振動所引起，四個感測器會有微小但接近的變化，因此同樣由 ZMP 公式計算得到的軌跡會趨向腳底中心。

因此可以得知由吾人所設定之一般步態軌跡產生出之直線步行在使用上是可行的，並且在每週期之間呈現類似的週期變化，可以後續加入補償器進行控制。



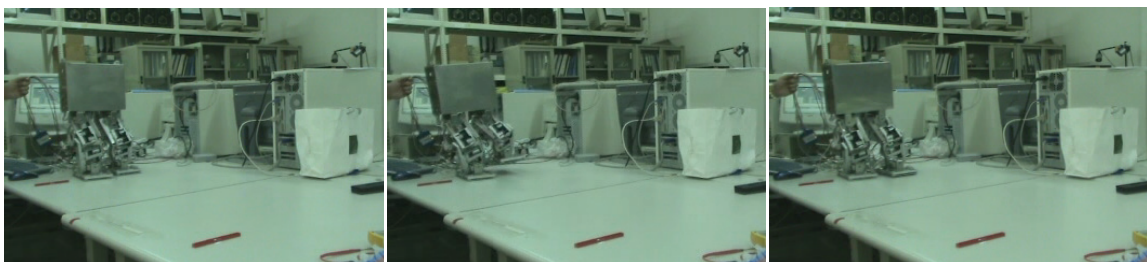
圖 5.2 實驗環境配置



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

圖 5.3 直線步行動作單週期序列示意圖

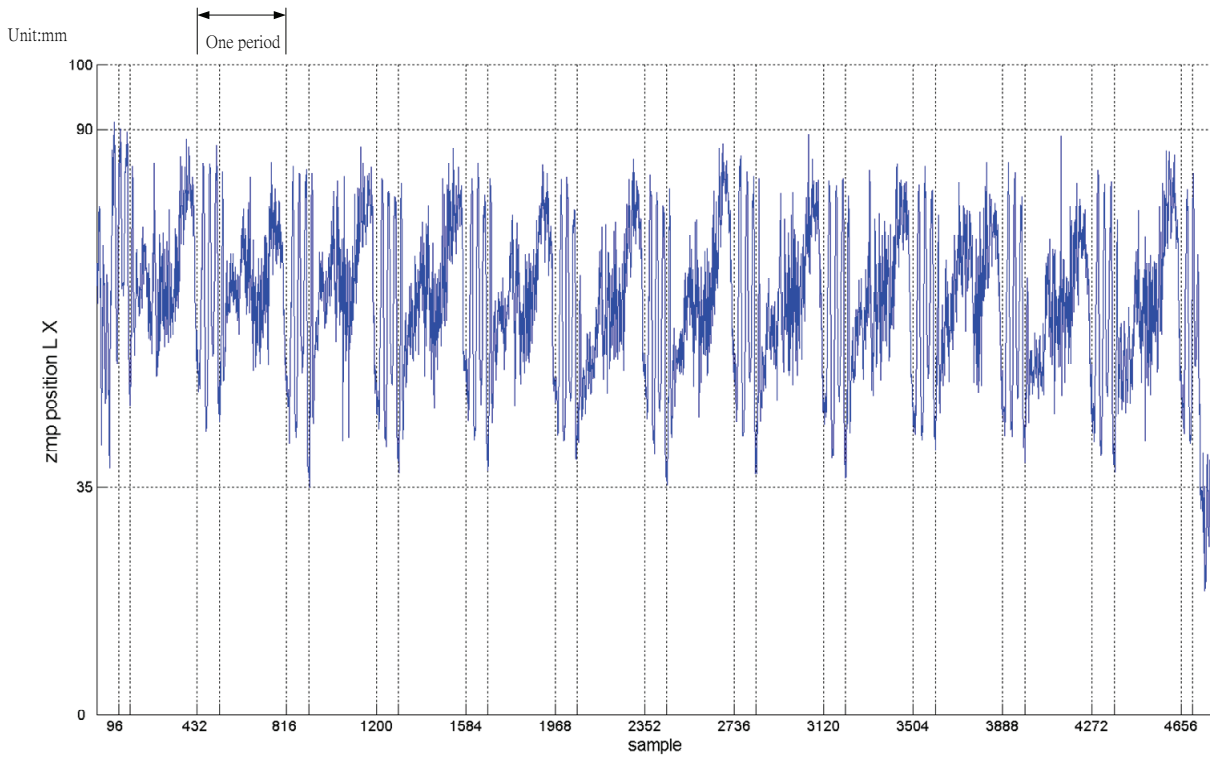


圖 5.4 左腳 X 方向 ZMP 軌跡

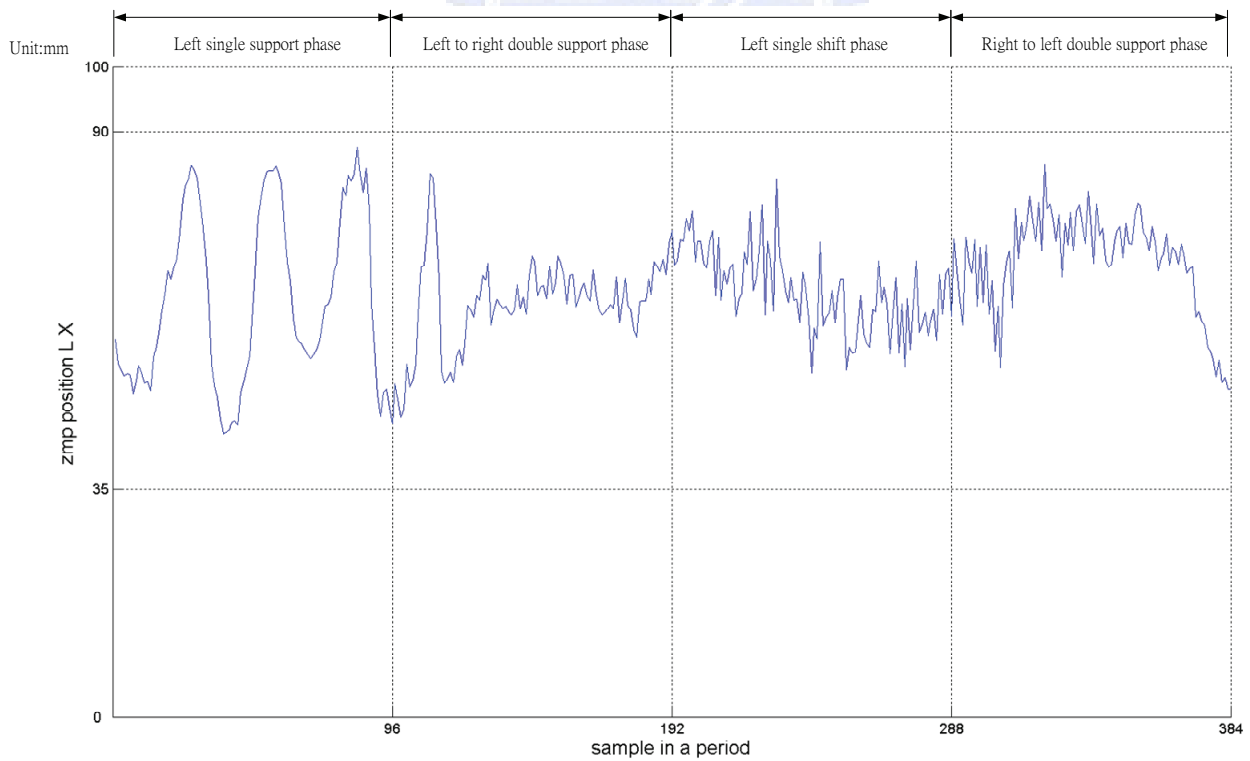


圖 5.5 左腳 X 方向單一週期 ZMP 軌跡

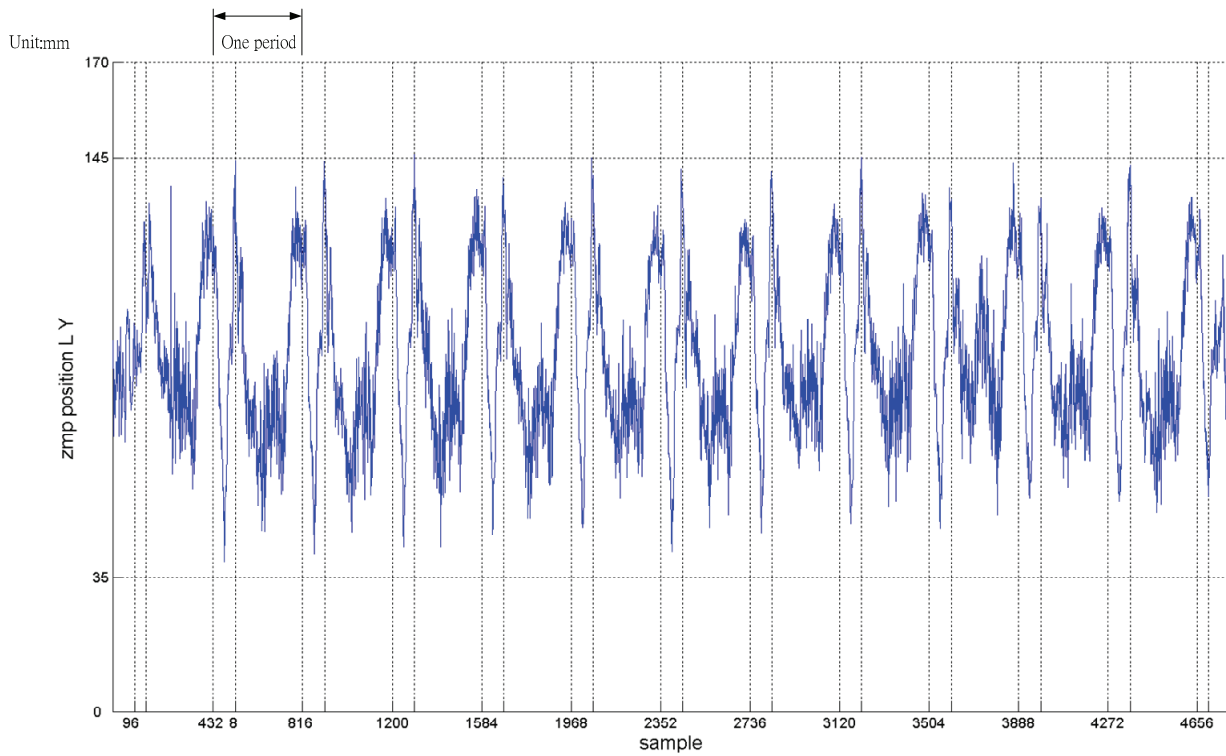


圖 5.6 左腳 Y 方向 ZMP 軌跡

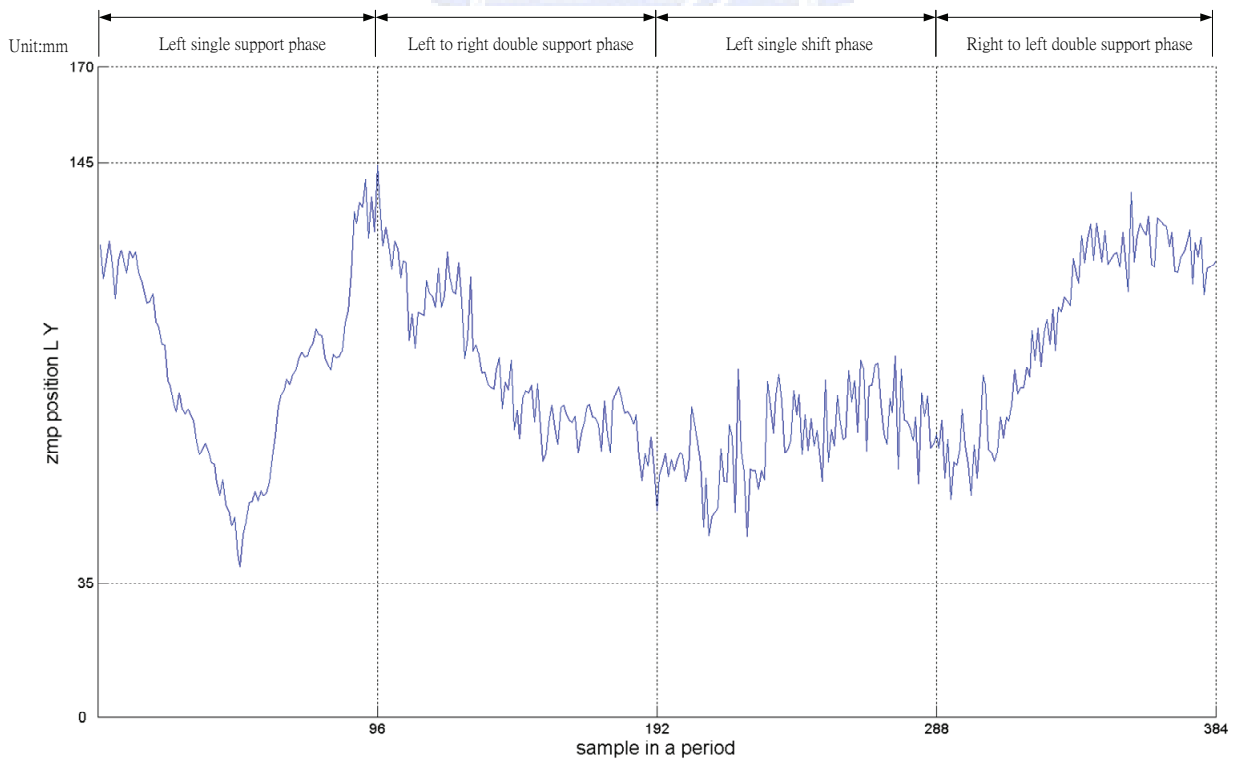


圖 5.7 左腳 Y 方向單一週期 ZMP 軌跡

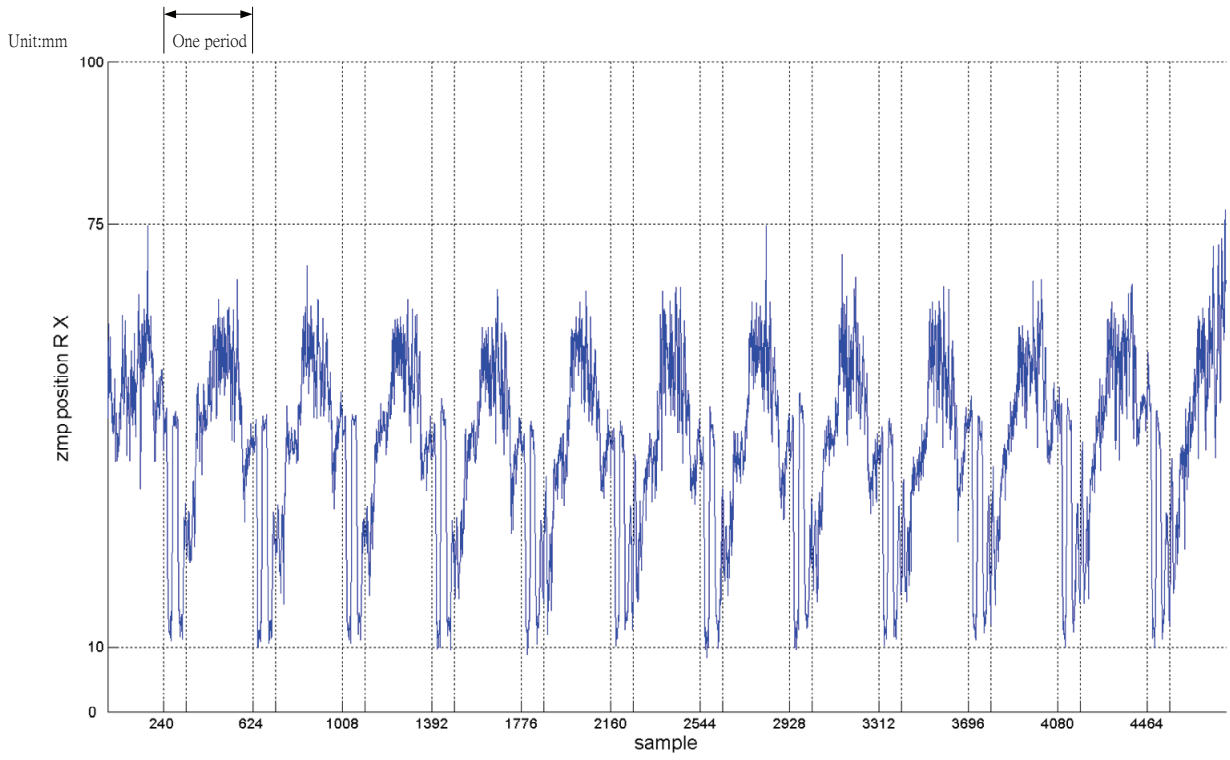


圖 5.8 右腳 X 方向 ZMP 軌跡

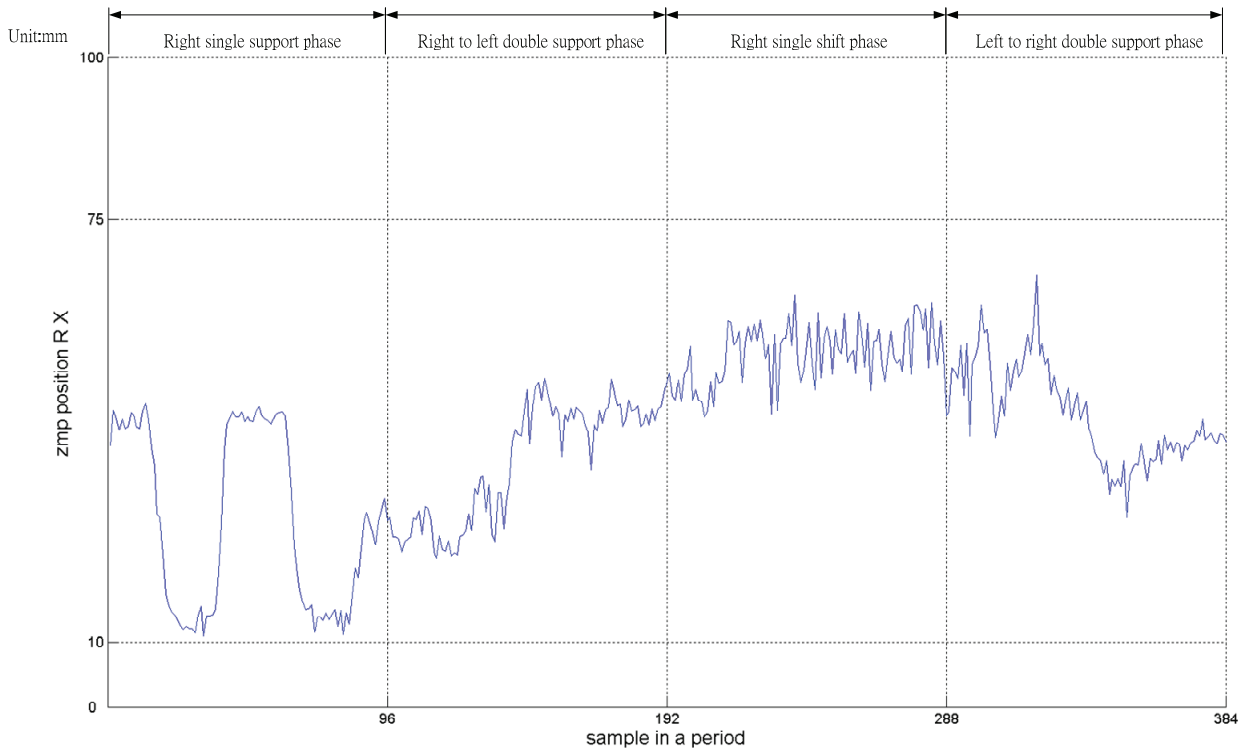


圖 5.9 右腳 X 方向單一週期 ZMP 軌跡

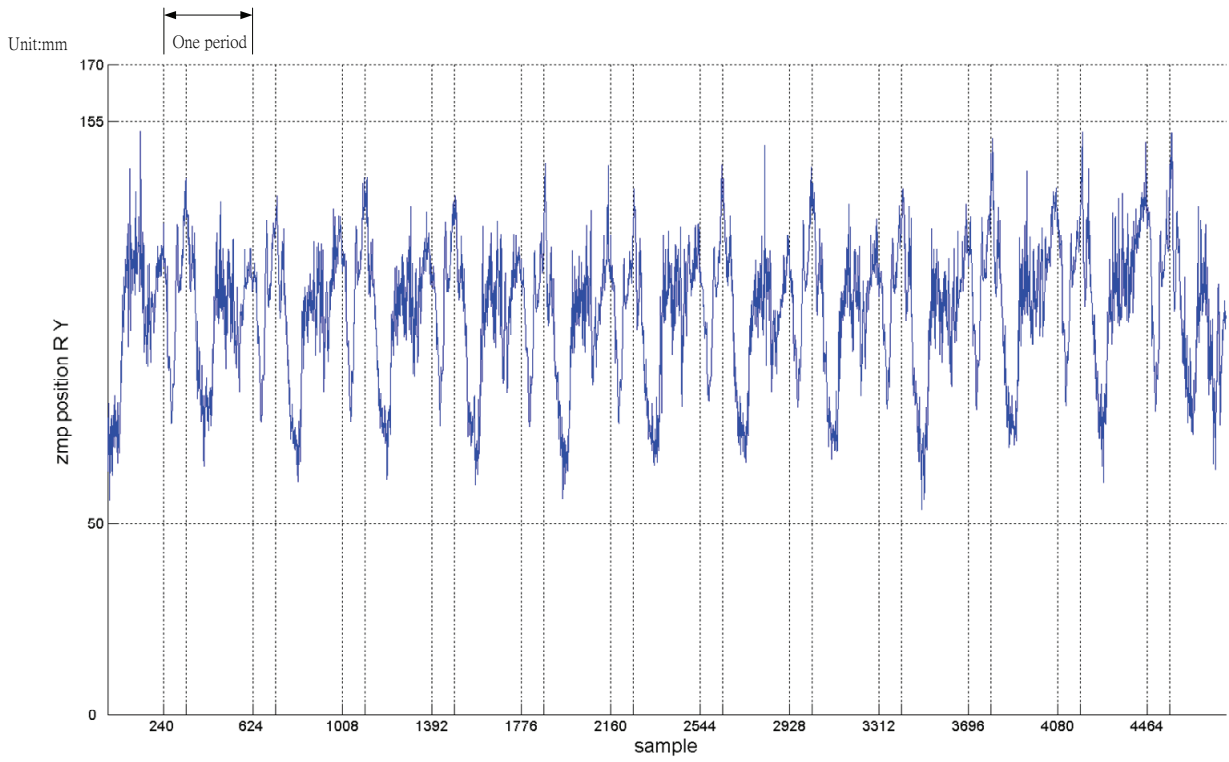


圖 5.10 右腳 Y 方向 ZMP 軌跡

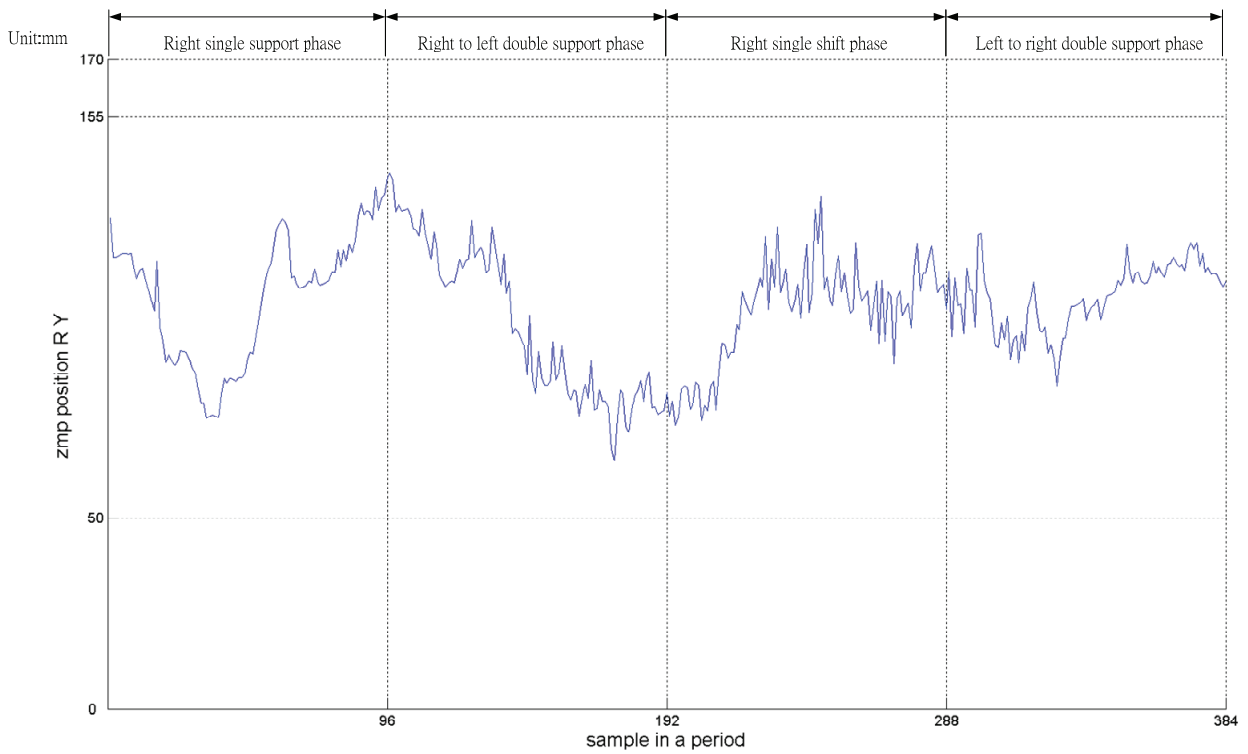


圖 5.11 右腳 Y 方向單一週期 ZMP 軌跡

圖 5.12(a)-(f)則是一週期中軌跡產生之左右腳各關節角度變化，虛線為左腳，實線為右腳。旋轉方向與自由度順序可參照圖 2.7，可以看出左腳與右腳的軌跡是相當類似的，在圖 5.12(b)(c)(d)中，左右腳相差半個週期，而在圖 5.12(a)(e)中，除了左右腳相差半個週期之外，旋轉方向也相異，在圖 5.12(f)中，由於第 6 自由度在直線運動中不使用到，因此皆為 0。

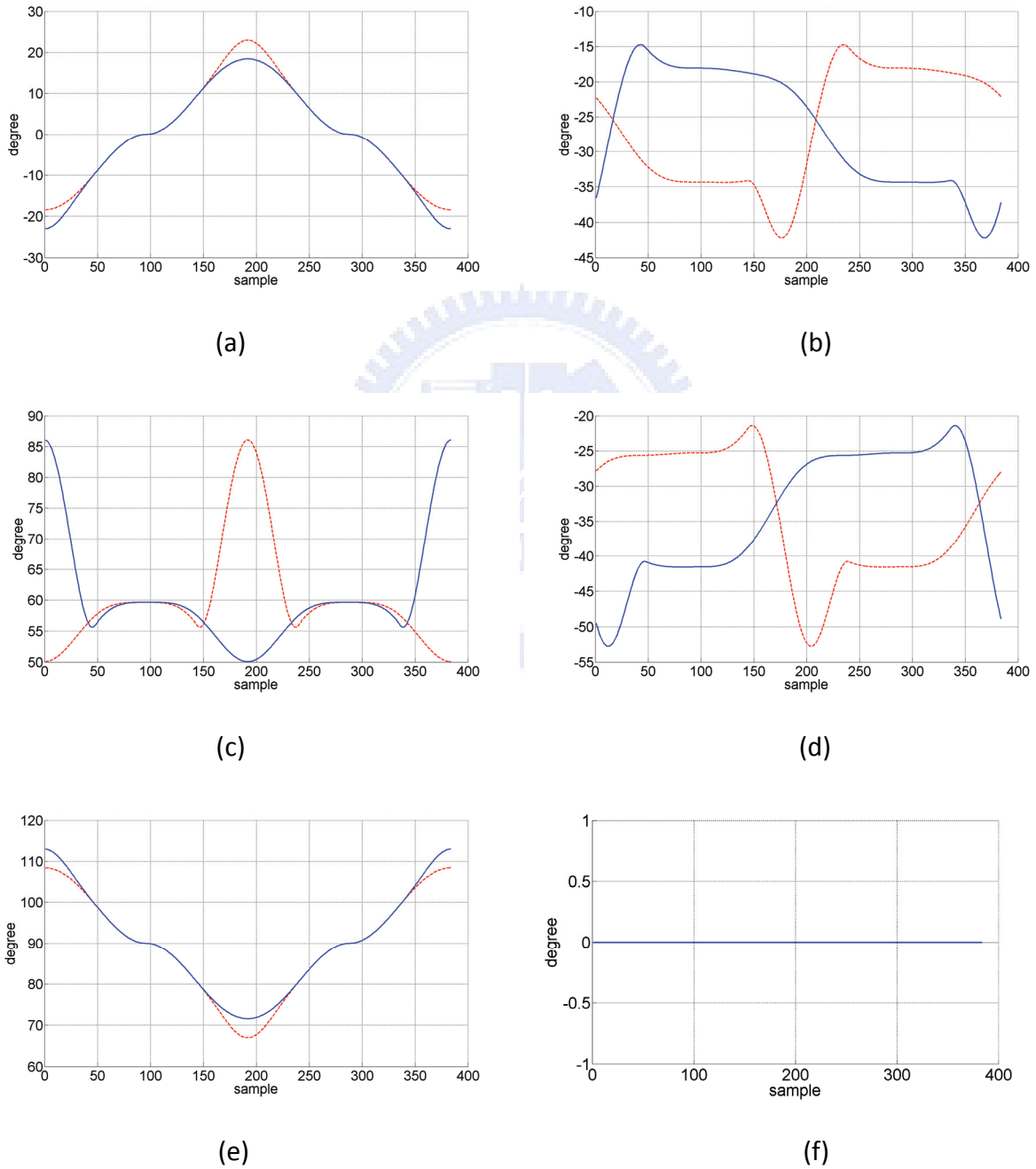


圖 5.12 左右腳軌跡(a)DOF1(b) DOF2 (c) DOF3 (d) DOF4 (e) DOF5 (f) DOF6

5.3 障礙地形步行實驗

本實驗的目的是驗證當機器人使用步行軌跡並加入補償控制器之後，是否可使機器人在行走中跨越障礙物而不致傾倒，確認補償控制器的有效性。

此實驗可分為 2 部分，第一部分為機器人站定位且障礙固定於地面固定位置，令機器人走三步，第一步與第二步之右腳將踩到障礙物約 21mm 高，控制器之穩定區間範圍設定為前緣 105mm 後緣 60mm，相關位置可參照圖 2.22，控制器增益 $K=40$ 。

腰部軌跡參數：半跨距 $\alpha_1=25\text{mm}$ 、橫移距離 $h_1=70\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_1=256$ ；腳部軌跡參數：半跨距 $\alpha_2=50\text{mm}$ 、跨步高度 $h_2=40\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_2=128$ ，全週期取樣為 512，全週期所需時間約為 8 秒，一週期長約為 85mm。實驗環境為平坦的實驗桌，以樂高積木架設 1 條高 21mm 之固定障礙，並將機器人配置如圖 5.13。

實際動作序列照如圖 5.14(a)-(l)，分別為(a)抬右腳、(b)右腳著地、(c)抬左腳和(d)左腳著地，之後重複(a)-(d)的動作 2 次，共走 3 步。機器人於圖 5.14(b)右腳前方踩到障礙物進行補償與圖 5.14(f)右腳後方踩障礙物後進行補償。結果如圖 5.15-圖 5.17，圖 5.15 中可知超過設定之穩定區間後發生補償之時機及方向，方向由圖 4.4 定義之 d_{zmp} 方向決定，Y 軸上的 2 條虛線為穩定區間前緣與後緣，X 軸虛線夾住之範圍為一個步行週期中補償器可作用階段之補償區，臨界值達成的取樣數分別為 105、622 與 1127，分別再以區域中的虛線標出，在進行補償之後右腳單腳支撐相階段雖仍有踩在障礙物上造成的 ZMP 前移與後移現象，但仍迅速趨於穩定，維持於可繼續步行的狀態。圖 5.16 之實線為單位取樣時間補償角，虛線為累加之總補償角，X 軸虛線夾住之範圍為可產生補償的階段，在一個週期的最後有產生歸零的階段，在第一步中是腳底前方踩到障礙物，腳踝補償約+3 度，第二步中則是腳底後方踩到障礙物，腳踝補償約-4.5 度，第三步雖未踩到障礙物，但因腳步姿態的誤差，導致腳底姿態較不水平，些微誤判但程度輕微不影

響原始步行軌跡。圖 5.17 之實線為原本踝部 Pitch 步態軌跡，虛線為加入補償後之軌跡，可以看出補償前與補償後之右腳踝部軌跡變化大小與方向。

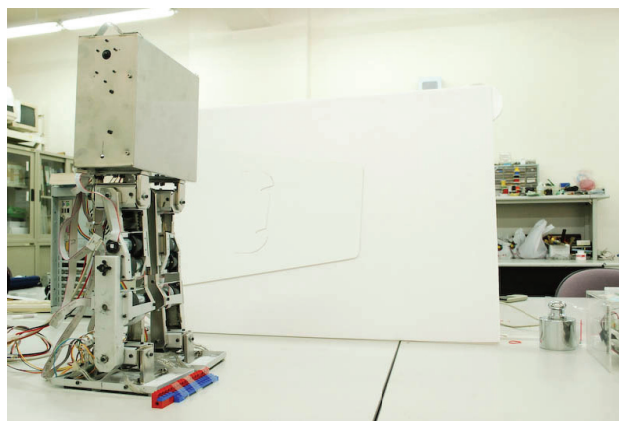


圖 5.13 實驗環境配置

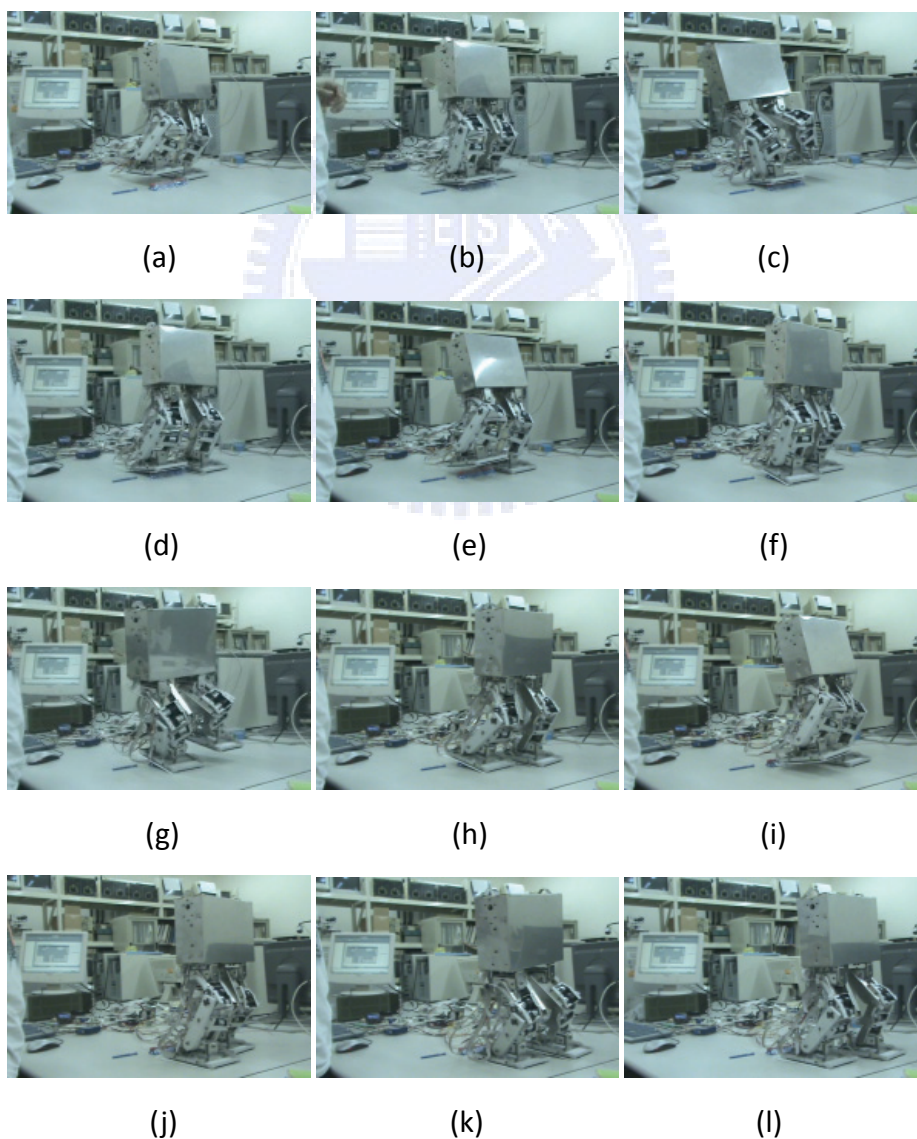


圖 5.14 步行固定障礙有控制器三步動作序列

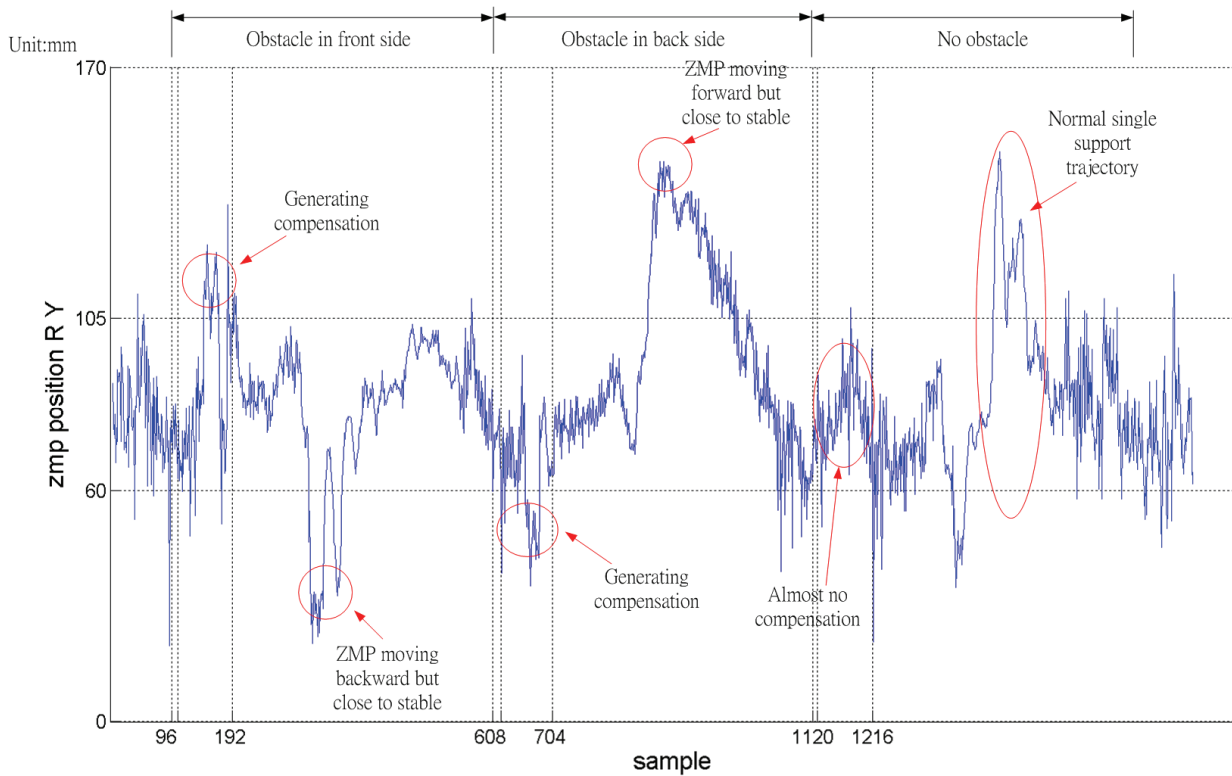


圖 5.15 有控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡

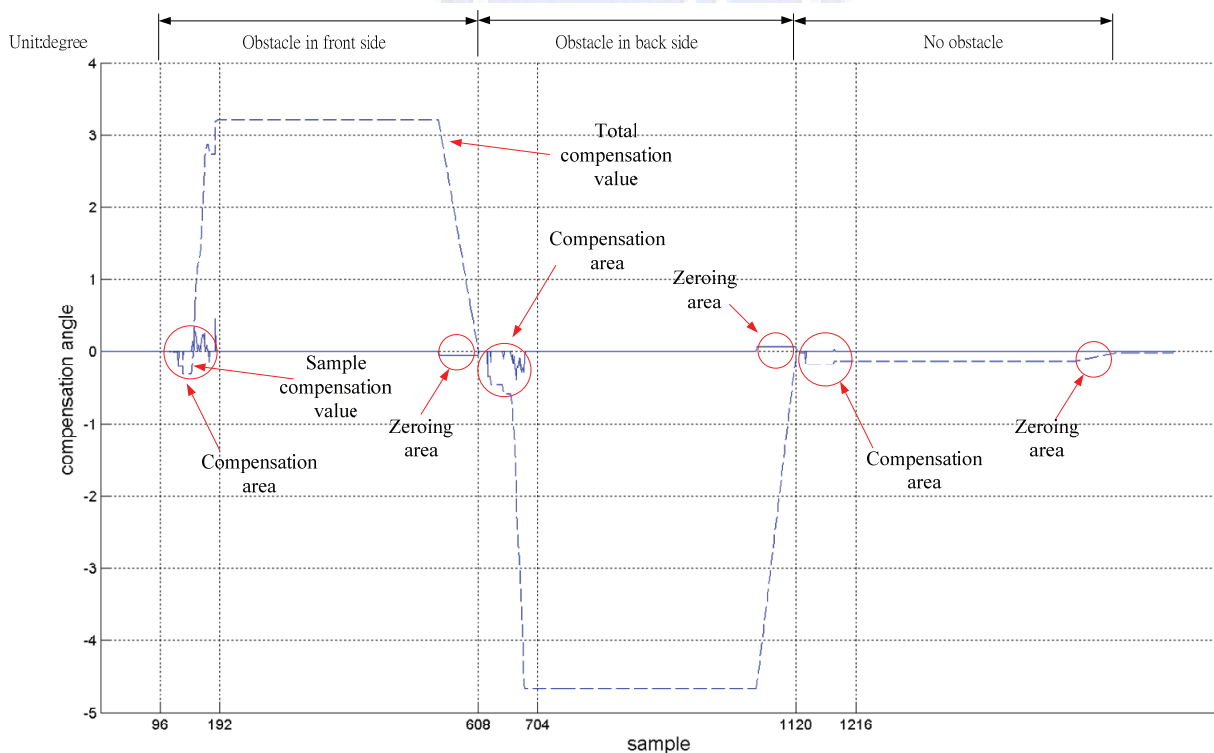


圖 5.16 右腳取樣補償角與總補償角

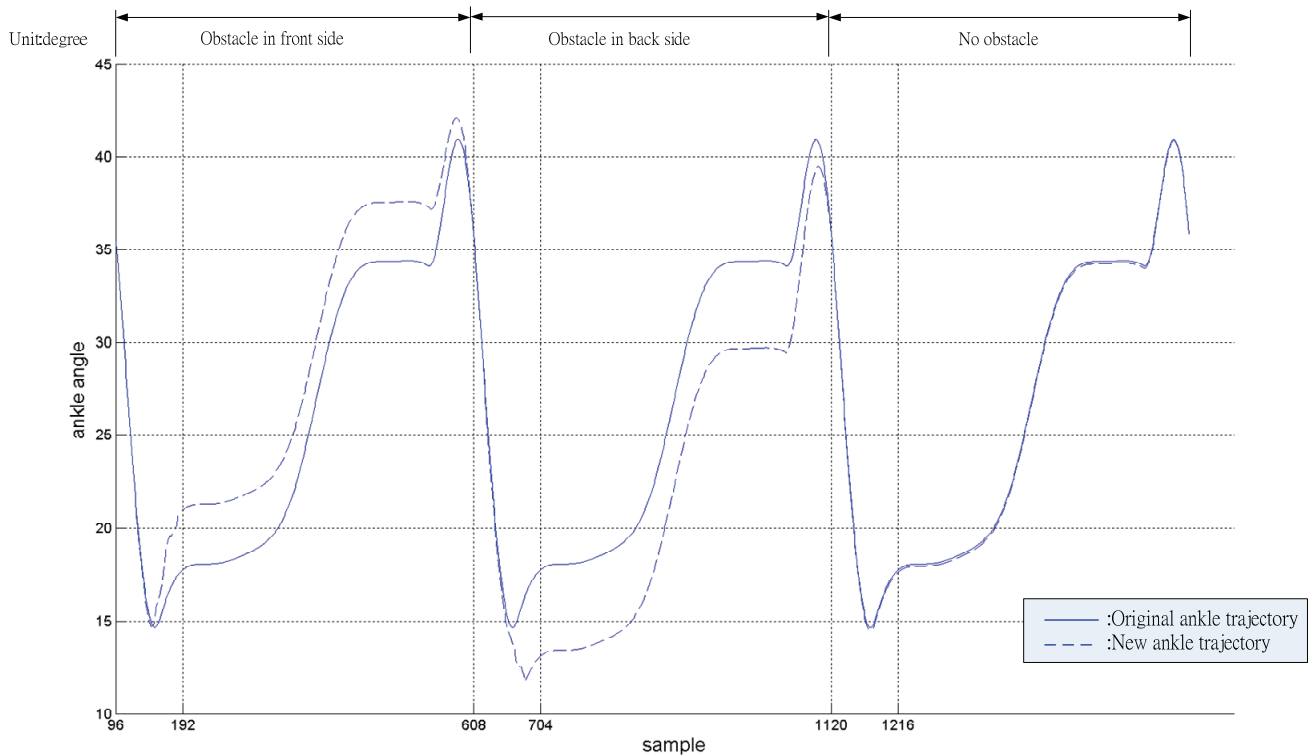


圖 5.17 右腳踝關節 Pitch 角度變化

接下來討論的是無進行補償之步行，軌跡及條件皆如前述，僅控制器增益 $K=0$ 。實際動作序列照如圖 5.18(a)-(i)，分別為(a)身體左移、(b)抬起右腳、(c)右腳著地、(d)抬起左腳、(e)左腳著地、(f)抬起右腳、(g)右腳著地、(h)抬起左腳和(i)左腳前移。機器人於圖 5.18(c)右腳前方踩到障礙物，由於未進行補償，因此在圖 5.18(d)左腳抬起時，身體產生向後方晃動的不穩傾向，而當圖 5.18(g)右腳後方踩到障礙物後，也由於未進行補償，因此在圖 5.18(h)左腳抬起與圖 5.18(i)左腳前移時，身體向前方大幅度的傾倒，造成步行的失敗。圖 5.19 為其右腳之 Y 方向 ZMP 軌跡，可以看出在踩到障礙物後有超出定義的穩定區間的傾向，而在第一次轉為單腳支撐相時，ZMP 停留在後緣的時間較長，機體穩定度較低，而在第二次轉為單腳支撐相時，可以明顯看出踩在障礙物上之右腳產生劇烈晃動跌倒，ZMP 移動到腳部懸空時應感測到的中間位置。

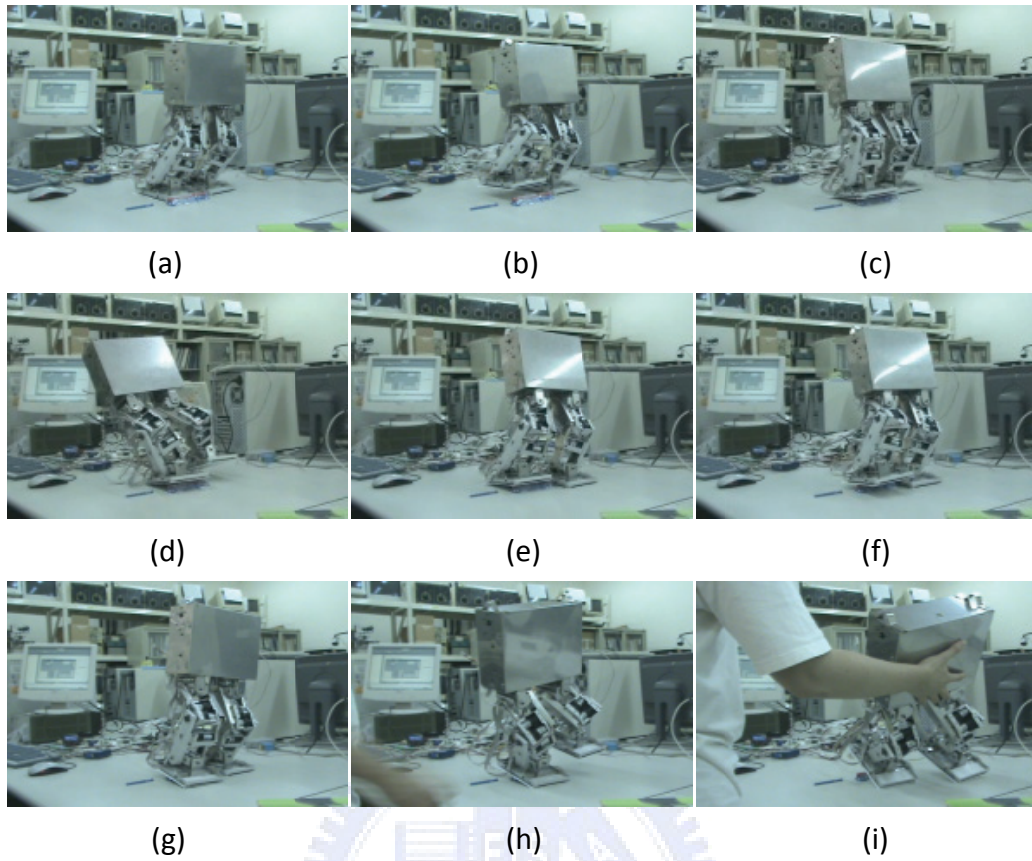


圖 5.18 步行固定障礙無控制器三步動作序列

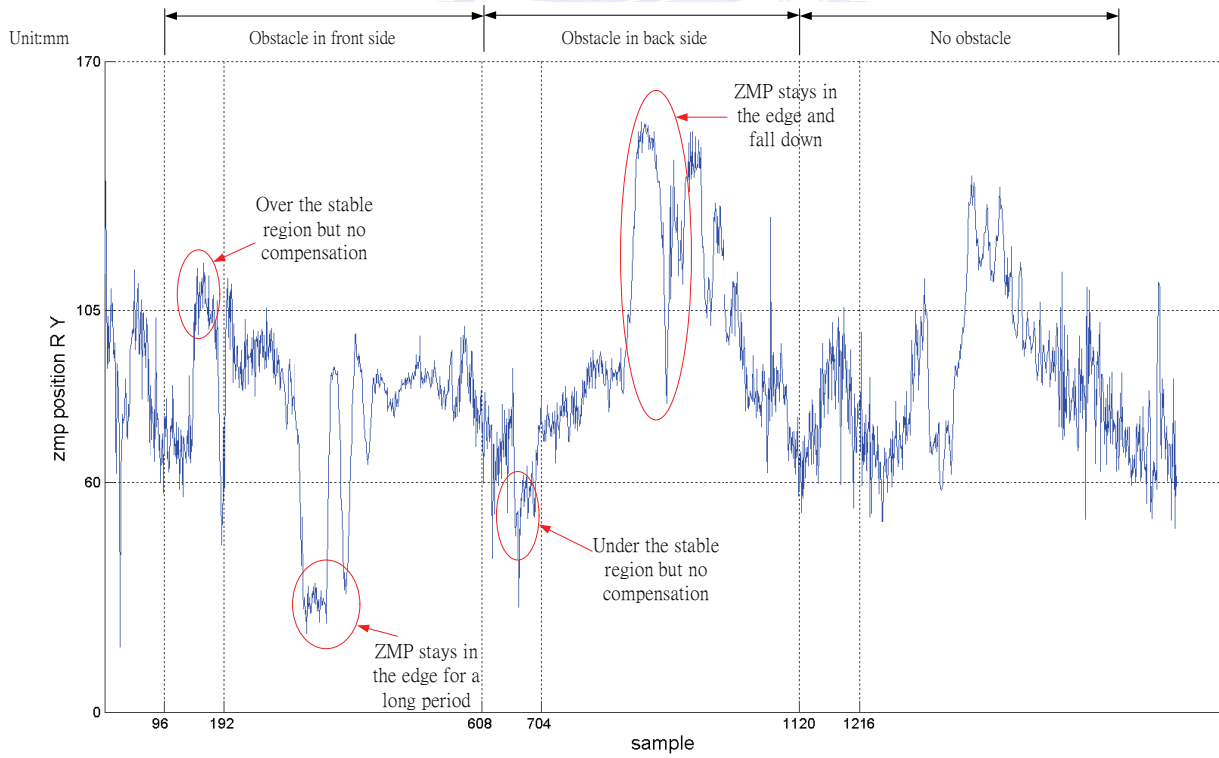


圖 5.19 無控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡

而實驗的第二部分則是使機器人向前行走 5 步，吾人手動於第 3 週期時將障礙物置於右腳前部落地之位置，障礙物約 21mm 高，控制器之穩定區間範圍設定為前緣 125mm 與後緣 90mm，控制器增益 $K=60$ 。

腰部軌跡參數：半跨距 $\alpha_1=25\text{mm}$ 、橫移距離 $h_1=70\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_1=256$ ；腳部軌跡參數：半跨距 $\alpha_2=50\text{mm}$ 、跨步高度 $h_2=40\text{mm}$ 、擺廓曲線取樣數 $T_2=128$ ，全週期取樣為 512，全週期所需時間約為 8 秒，一週期長約為 85mm。實際動作序列照如圖 5.20(a)-(x)，動作分別為(a)身體直立、(b)身體右移、(c)抬起右腳、(d)右腳著地、(e)左腳抬起和(f)左腳著地，接著重複(c)-(f)的動作 4 次與最後的(w)右腳抬起及(x)恢復直立，共有 5 個完整步行週期在其中。機器人於圖 5.20(l)右腳前方踩到障礙物進行補償與圖 5.20(p)右腳後方踩到障礙物後進行補償，過程中未發生傾倒。

結果如圖 5.21-圖 5.23，圖 5.21 中可知超過設定之穩定區間後發生補償之時機及方向，方向由圖 4.4 中定義之 dy_{zmp} 方向決定，Y 軸上的 2 條虛線為穩定區間前緣與後緣，X 軸上虛線夾住之範圍為一個步行週期中補償器可作用階段之補償區，臨界值達成的取樣數分別為 1194、1689 與 2230，分別再以區域中的虛線標出。

圖 5.22 之實線為單位取樣時間補償角，虛線為累加之總補償角，在第三步中則是腳底前方踩到障礙物，腳踝補償約 +5.5 度，在第四步中則是腳底後方踩到障礙物，腳踝補償約 -1 度，第 5 步雖未踩到障礙物，但因腳步姿態的誤差，導致腳底姿態較不水平，產生些微誤判使 ZMP 稍微前移但程度輕微不至傾倒。

圖 5.23 之實線為原本踝部 Pitch 步態軌跡，虛線為加入補償後軌跡，可以看出補償前與補償後之右腳踝部軌跡變化大小與方向。

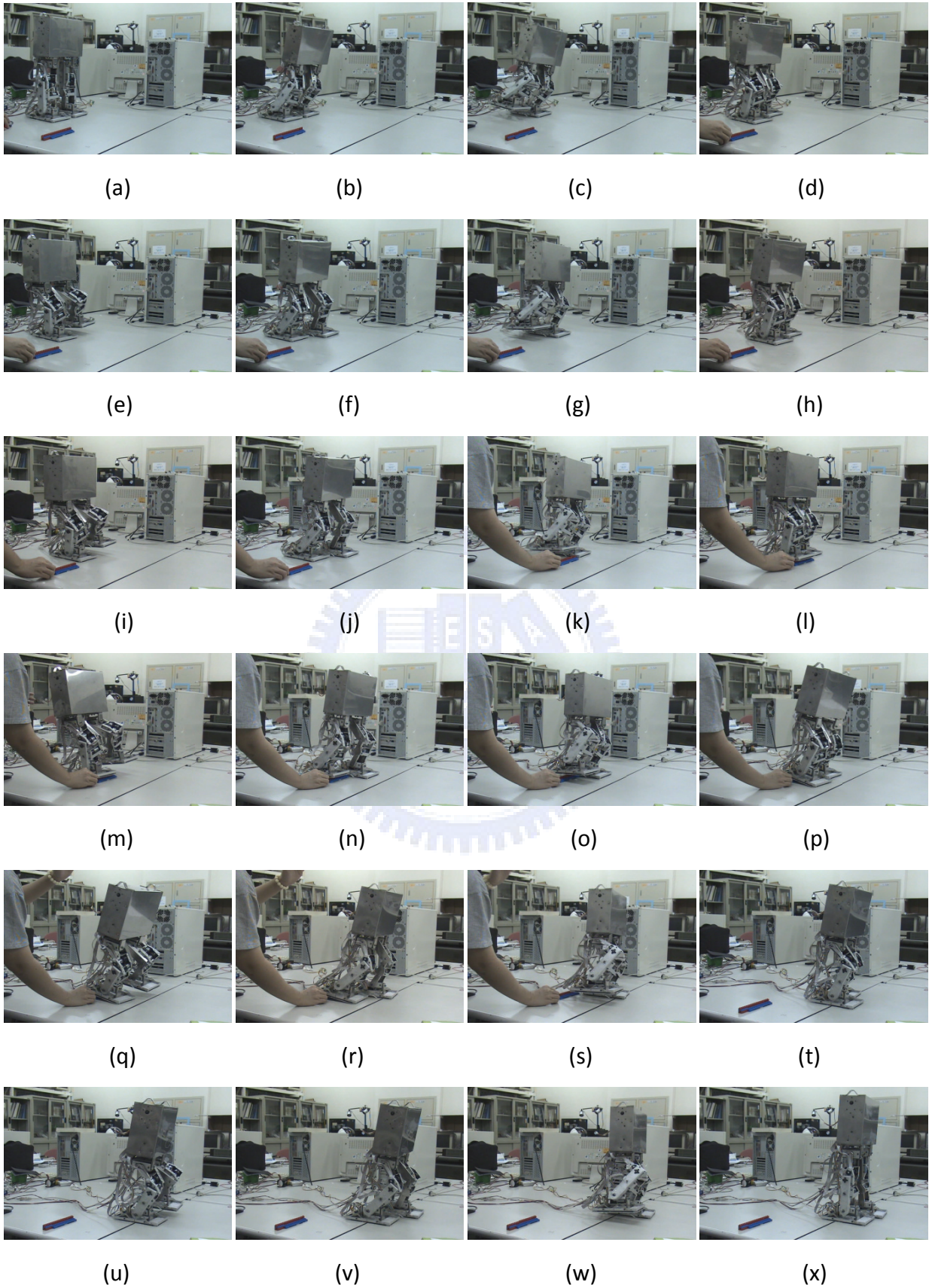


圖 5.20 步行手動障礙有控制器五步動作序列

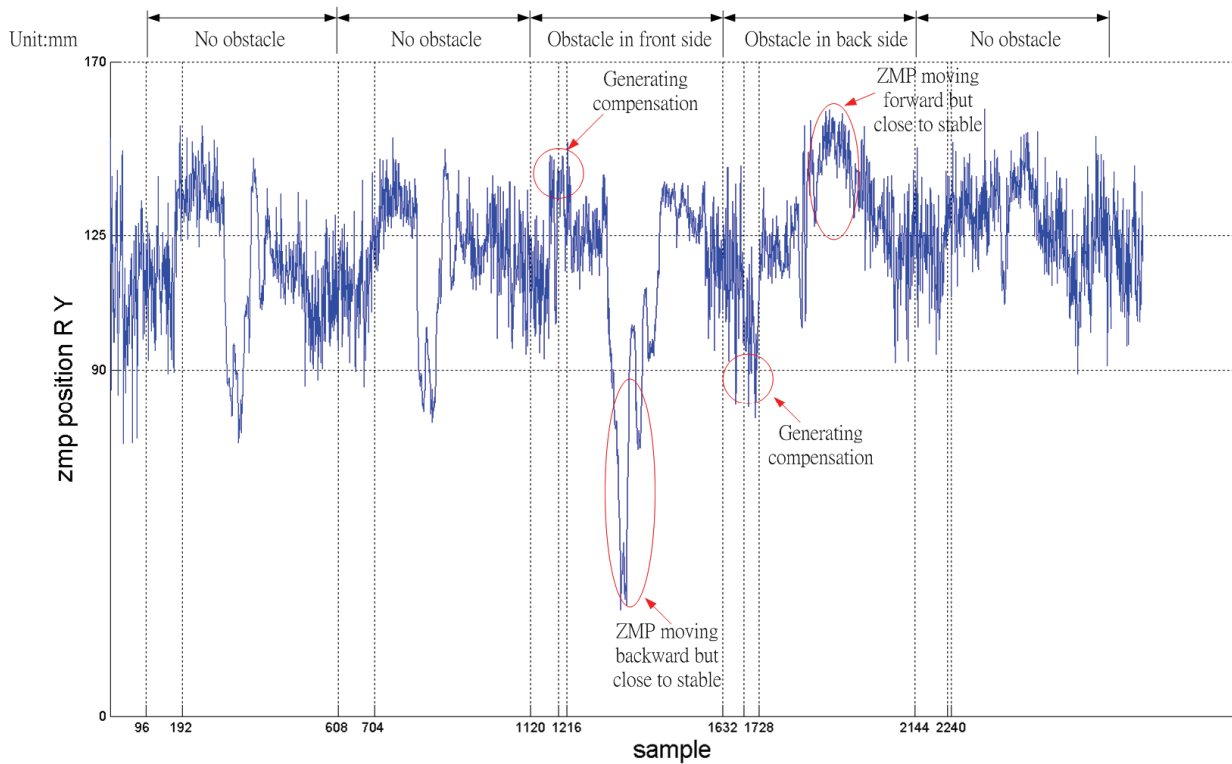


圖 5.21 有控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡

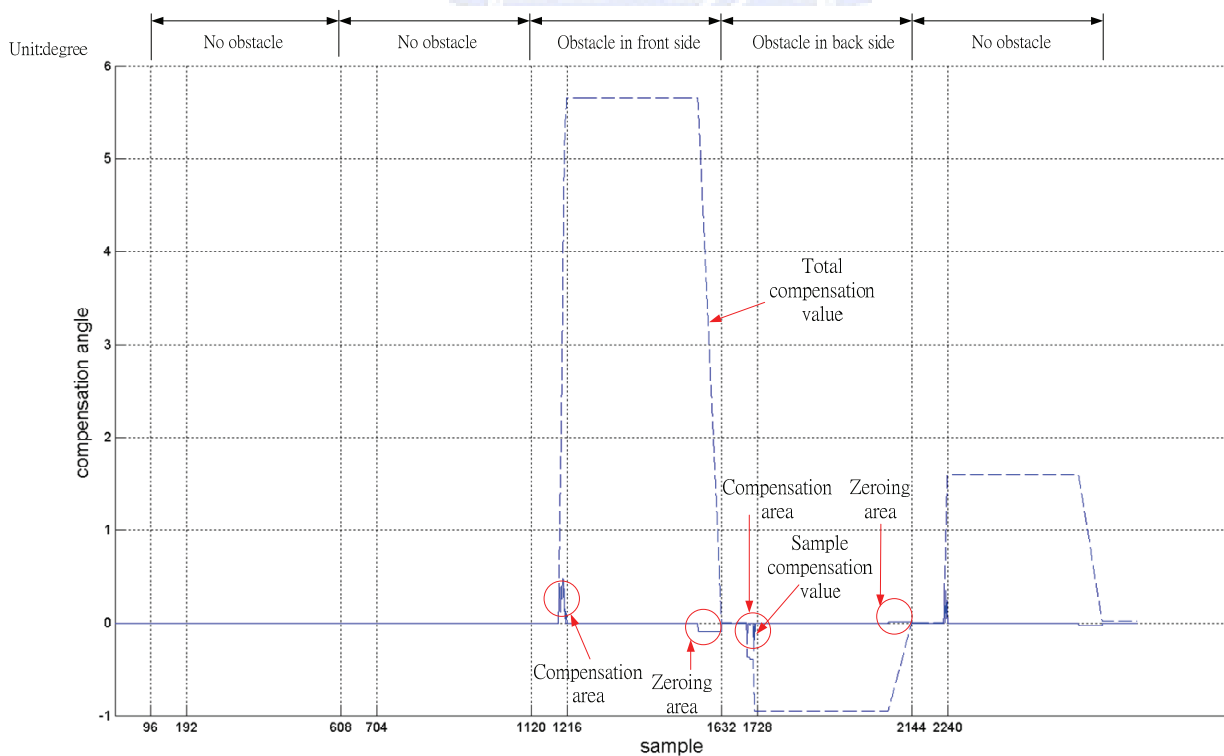


圖 5.22 右腳單位補償角與總補償角

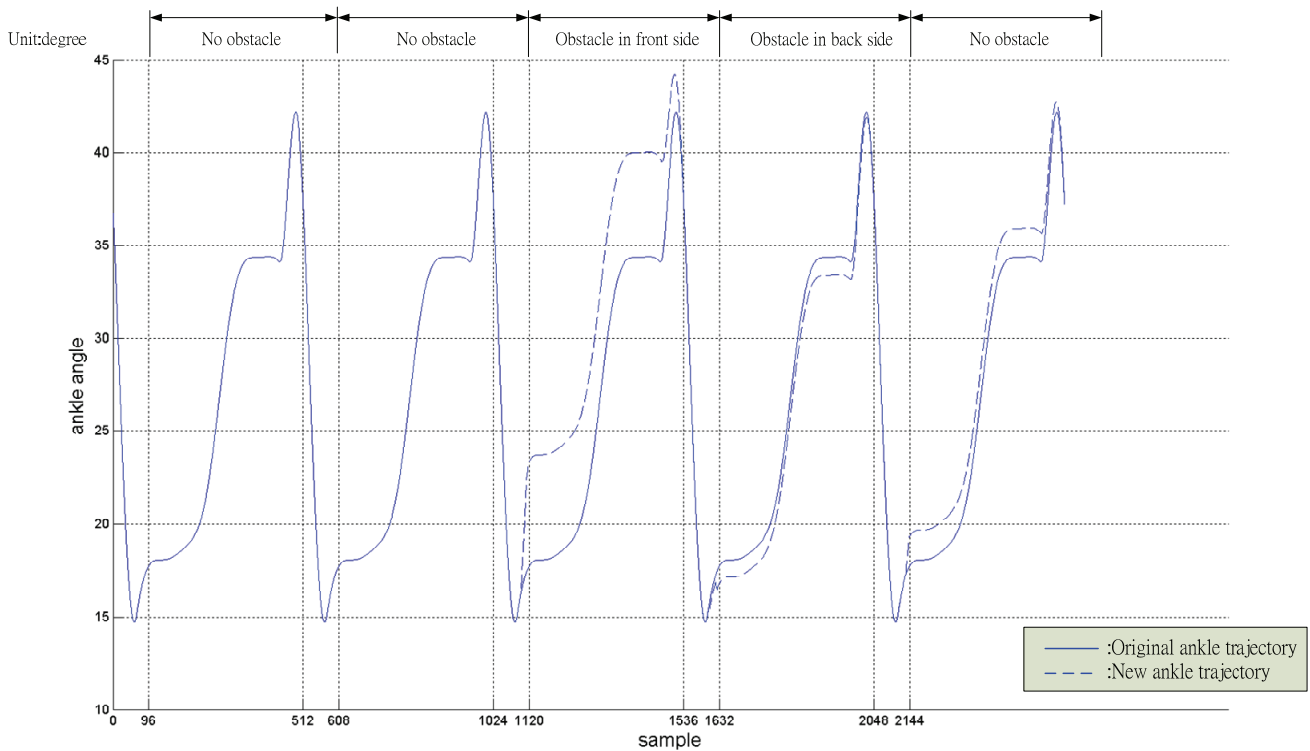


圖 5.23 右腳踝關節 Pitch 角度變化

接下來討論的是無進行補償之步行，軌跡及條件皆如前述，僅控制器增益 $K=0$ 。實際動作序列照如圖 5.24(a)-(l)，動作分別為(a)身體直立、(b)抬起右腳、(c)右腳著地、(d)抬起左腳、(e)左腳著地、(f)抬起右腳、(g)右腳著地、(h)抬起左腳、(i)左腳著地、(j)抬起右腳、(k)右腳著地、(l)抬起左腳。由於當機器人於圖 5.24(k)右腳前方踩到障礙物時，未產生補償，因此當圖 5.24(l)抬起左腳時，身體重心大幅向後傾倒，導致機器人步行的失敗。圖 5.25 為其右腳之 Y 方向 ZMP 軌跡，可以明顯看出在其第 3 週期轉為右單腳支撐相時，踩在障礙物上之右腳產生向後跌倒。

5.4 討論

由 5.2 節的實驗可知由於左右腳 X、Y 方向之單雙支撐相 ZMP 軌跡皆在一定的穩定區域之內，且 ZMP 的軌跡重複也呈現穩定的週期性，因此可知此靜態步行軌跡的設計與實現為可行的。因此吾人可以藉由此靜態步行軌跡作為機器人的

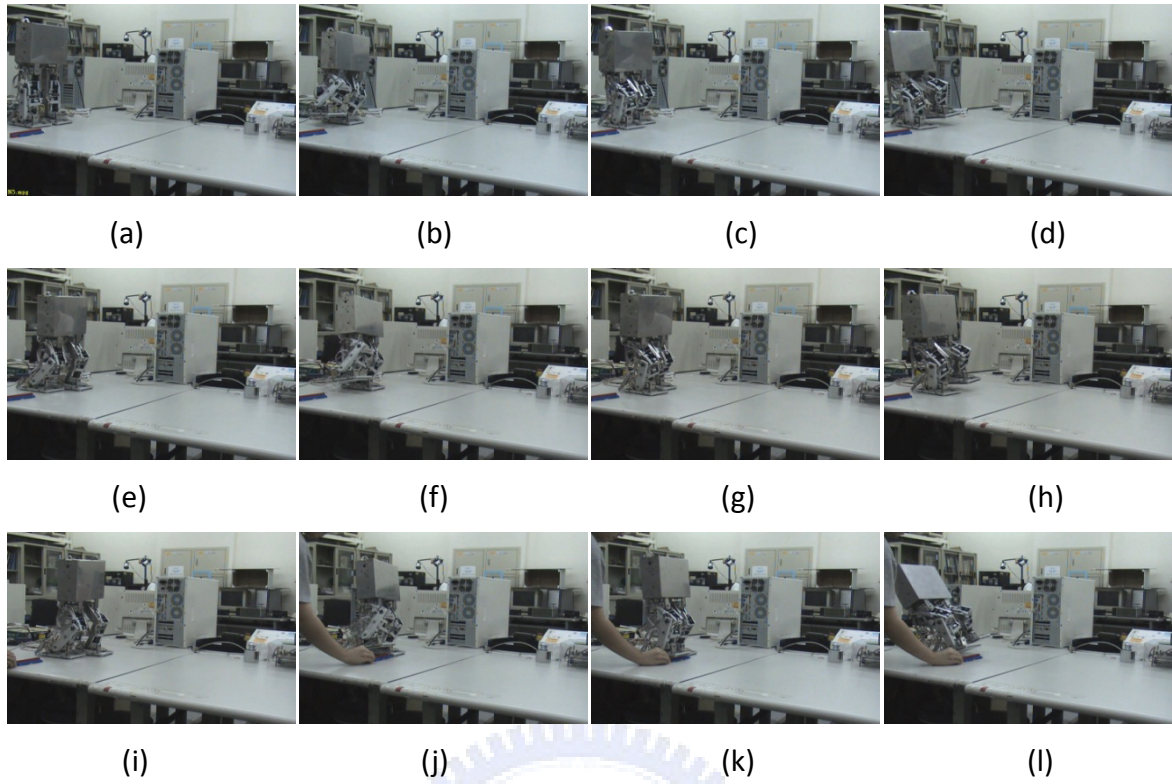


圖 5.24 步行手動障礙無控制器五步動作序列

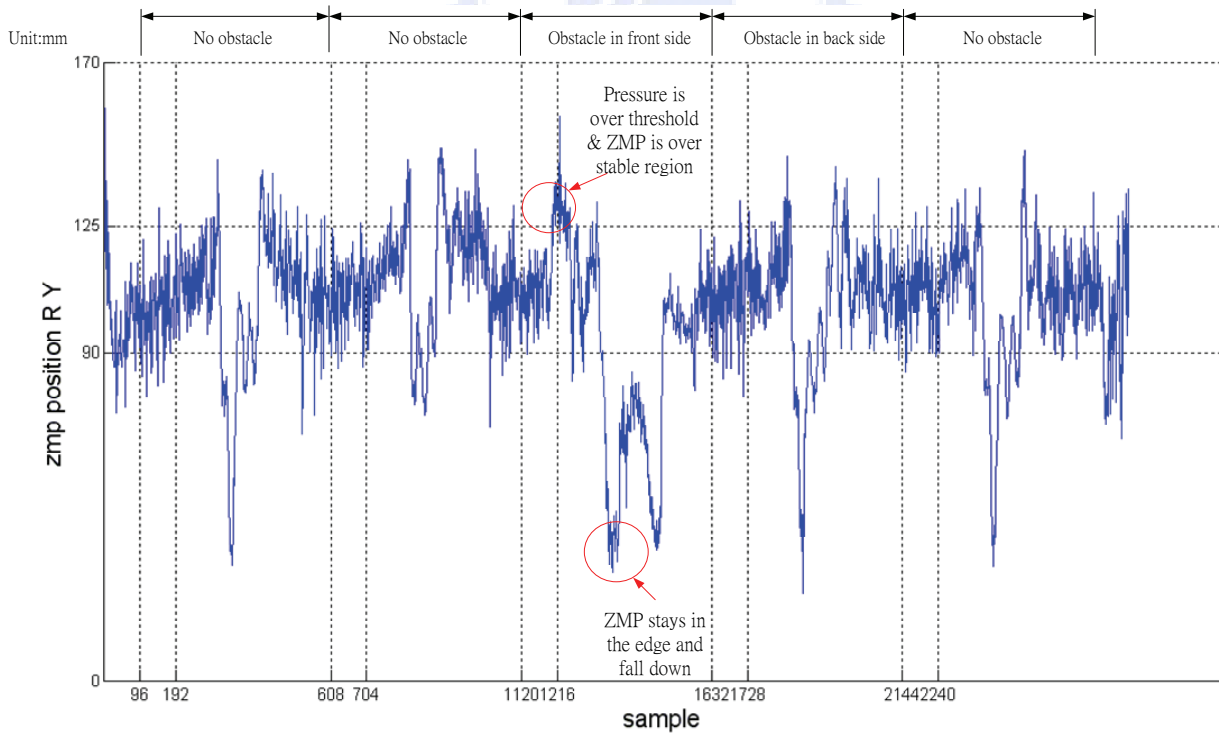


圖 5.25 無控制器右腳 Y 方向 ZMP 軌跡

步行軌跡來進行操作。

由 5.3 節的實驗可以看出有加入障礙物補償控制器的步態軌跡與未加補償控制器之間的差別。不加控制器的軌跡在腳底踩到障礙物之時，並不產生角度補償，在之後轉移到此腳進行單支撐相的動作時，雙足機器人的 ZMP 軌跡就會因為腳底障礙物造成的傾斜而產生向前或向後的大量偏移甚至超過支撐區域，這將導致雙足機器人發生傾倒。因此，在有加控制器的情況之下，若可以經由壓力感測器感知障礙物的存在以及位置，則可以經由適度的改變來適應障礙物使得雙足機器人在踩到障礙物之腳轉換至單支撐相之時，其 ZMP 軌跡可以適度的被修正，而不會造成傾倒的現象。



第六章 結論與未來展望

6.1 結論

藉由靜態步行的設計，雙足機器人得以使用固定的步態規畫進行穩定且連續的步行，對於已知環境中的應用相當方便，但對於環境中的障礙物仍然無法避免其影響，而在利用了壓力感測器量測 ZMP 的資訊來進行控制器的設計，則可以使雙足機器人得知有關障礙物的情報，並且令控制器產生適當的補償使機器人得以跨越高達 21mm 之障礙。此種架構的優點就在於單純的設計方式與運算量較低的處理，目的是在靜態步行中產生對地形的適應性，使步行的成功率得以提升許多，可適用於一般小型機器人，讓整體的應用上將更加的具有一般化與實用性。

6.2 未來展望

本論文在控制器設計方面，由於僅使用壓力感測器作為回授，因此對於壓力感測器的依賴性相當高，而且對於腳底輕微力量的偵測效能也較為要求，若能於將來設計一更加靈敏可靠的壓力感測模組，則勢必可以使機器人獲得更多更清楚的資訊，使控制器效果更加穩健。並且如能加入其他種類的感測器，如加速規、陀螺儀等，使雙足機器人可以得知除了腳底狀態的其他情報，則應可以使控制方式更加多元。而本論文中的控制器增益與穩定區間定義皆是由吾人以經驗方式調整，在不同情況下之適應略顯不便，未來可試著將類神經網路的學習功能加入，使控制器可以自行學習。

在步行軌跡規畫方面，由於本論文使用的是靜態步行產生，雖然所需的運算較低，設計好的軌跡也相當穩定，但動作較大，步伐也較緩慢，對於正常步行略顯不足，因此未來朝向動態步行的方向做設計，並且配合機器人機構的改良與輕量化，使雙足機器人可以產生順暢快速的步行動作。

参考文献

- [1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2002, pp.2478-2483.
- [2] K. Noritake, S. Kato, T. Yamakita and H. Itoh, "A motion generation system for humanoid robots - Tai Chi motion," *Proceedings of International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, 2003, pp.265-269.
- [3] M. Fujita, Y. Kuroki, T. Ishida and T. T. Doi, "A small humanoid robot SDR-4X for entertainment applications," *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Kobe, Japan, 2003, pp.938-943.
- [4] F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, S. Kajita, K. Yokoi, H. Hirukawa, K. Akachi and T. Isozumi, "The first humanoid robot that has the same size as a human and that can lie down and get up," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003, pp.1633-1639.
- [5] T. Morita, H. Iwata and S. Sugano, "Development of human symbiotic robot: WENDY," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, 1999, pp.3183-3188.
- [6] T. Morita, K. Shibuya and S. Sugano, "Design and Control of Mobile Manipulation System of Human Symbiotic: Hadaly-2," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998, pp.1315-1320.
- [7] F. R. Sias, Jr. and Y. F. Zheng, "How many degrees-of-freedom does a biped need ? ," *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsuchiura, Ibaraki, Japan, 1990, pp. 297-302.
- [8] P. Sardain, M. Rostami and G. Bessonnet, "An anthropomorphic biped robot: dynamic concepts and technological design," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 28a, No.6, pp.823-838, 1998.
- [9] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka, "The development of Honda

- humanoid robot," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998, pp.1321-1326.
- [10] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H.O. Lim and A. Takanishi, "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, 2006, pp. 835-840.
- [11] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280-288, 2001.
- [12] K. Asa, K. Ishimura and M. Wada, "Adaptive behavior to environment of a humanoid robot with CPG," *SICE Annual Conference*, Sapporo, Japan, 2004, pp. 208-213.
- [13] H. Yussof, M. Ohka, M. Yamano and Y. Nasu, "Analysis of human-inspired biped walk characteristics in a prototype humanoid robot for improvement of walking speed," *Second Asia International Conference on Modelling and Simulation*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008, pp. 564-569.
- [14] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee and W. A. Cruver, "Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single-support phase," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, 1990, pp. 1646–1652.
- [15] S. Kajita, O. Matsumoto and M. Saigo, "Real-time 3-D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, 2001, pp. 2299–2306.
- [16] H. Lim, Y. Kaneshima and A. Takanishi, "online walking pattern generation for

- biped humanoid robot with trunk," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, 2002, pp. 3111–3116.
- [17] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, "Online generation of humanoid walking motion based on a fast generation method of motion pattern that follows desired ZMP," *Proceeding of IEEE International Conference Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2002, pp. 2684–2689.
- [18] 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.
- [19] Y. Fujimoto, S. Obata and A. Kawamura, "Robust biped walking with active interaction control between foot and ground," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998, pp. 2030–2035.
- [20] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi and H. Hirukawa, "A realtime pattern generator for biped walking," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, 2002, pp.31-37.
- [21] L. M. Nashner, "Balance adjustments of humans perturbed while walking," *Neurophysiology*, No. 44, pp. 650–664, 1980.
- [22] J. Yamaguchi, N. Kinoshita, A. Takanishi and I.Kato, "Development of a Dynamic Biped Walking System for Humanoid - Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Humans' Living Floor -", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, 1996, pp. 232-239.
- [23] J.H. Kim, K.H. Park, J.S. Jang, Y.D. Kim, B.J. Lee and K.P. Kim, "Humanoid robot HanSaRam: schemes for ZMP compensation," *International Conference on*

Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems, Singapore, 2003.

- [24] Q. Huang and Y. Nakamura, "Sensory reflex control for humanoid walking," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.21, No.5, pp.977-984, 2005.
- [25] V. Prahlaad, G.Dip and M.H, Chia, "Disturbance rejection by online ZMP compensation," *Robotica*, Vol. 26, pp. 9-17, 2008.
- [26] Richard P. Paul, "Robot manipulators: Mathematics, programming, and control," MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1981.
- [27] 陳澄峰，二足機器人行走模式之研究，大葉大學機械工程學系碩士論文，2002.
- [28] 張格豪，小型人形機器足球員之設計與實作，南台科技大學電機工程研究所碩士論文，2007.
- [29] P. Sardain and G. Bessonnet, "Zero moment point-measurements from a human walker wearing robot feet as shoes," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, Vol. 34, Issue 5, pp.638-648, 2004.
- [30] Y. Hasegawa, T. Arakawa and T. Fukuda, "Trajectory generation for biped locomotion robot," *Mechatronics*, Vol. 10, pp.67-89, 2000.
- [31] Q. Li, A. Takahashi and I. Kato, "A biped walking robot having a ZMP measurement system using universal force-moment sensors," *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1991, pp. 1568-1573.