行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

具有教育及競賽功能的人形機器人系統之設計與開發--子計畫一：人形機器人自主動態平衡之研究(2/3)
期中進度報告(精簡版)

計 畫 類 別 ：整合型
計 畫 編 號 ：NSC 97-2218-E-032-002-
執 行 期 間 ：97 年 08 月 01 日至 98 年 07 月 31 日
執 行 單 位 ：淡江大學電機工程學系

計 畫 主 持 人 ：黃志良

處 理 方 式 ：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 98 年 06 月 15 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

具有教育及競賽功能的人形機器人系統之設計與開發
子計畫一：人形機器人自主動態平衡之研究(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2218-E-032-002

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃志良

執行單位：淡江大學電機工程學系

中華民國 98 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中精簡報告

具有教育及競賽功能的人形機器人
子計畫一：人形機器人自主動態平衡之研究(2/3)

計畫編號：NSC 97-2218-E-032-002

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

主　持　人：黃志良　淡江大學電機工程學系

計畫參與人員：伍寒楨、陸念聞、黃俊豪、林明龍　淡江大學電機工程學系

中文摘要

本子計畫已建立一小型人形機器人系統平台，並以動態平衡為主要的研究。本子計畫欲以此小型人形機器人進行跨越障礙物之動態平衡為主要的研究，其方法如下：首先，校正動態感知系統(例如，兩組壓力感測器、單軸陀螺儀)，接著，操控機器人跨越障礙並藉由動態感知系統擷取相關資訊，分析其跨越障礙的響應，並提出適當的步態修正策略，使跨越障礙物之動作能適應不同狀況的地面(例如，不同坡度之斜坡)。本子計畫相關的研究主題包括如下：(一)機構之設計，(二)伺服控制系統之設計，(三)具有步態規劃之人機界面，(四)動態感知系統之設計與開發，(五)不平坦地面之步態規劃。最後，以相關實驗證明所建議方法的可行性及有效性。

關鍵字：小型人形機器人、機構設計、伺服控制系統、動態感知系統、人機界面、步態規劃、動態平衡、跨越障礙物。

Abstract

The main theme of this subproject is to build up a platform for the small-size humanoid robot with the consideration of dynamic balance. The stepping over an obstacle with dynamic balance is addressed in this subproject. In the beginning, the dynamic sensing systems (e.g., two sets of pressure sensors and a single-axis gyro) are calibrated. Then these two sets of pressure sensors are employed to obtain the response of the center of pressure (COP) during the stepping over an obstacle. After the anaysis of the response, the suitable path for the stepping over an obstacle is effectively planned such that it can be successfullly operated on the ground with different slopes. There have many factors affecting the stepping over an obstacle, e.g., the designs of machanisim, servo control system, dynamic sensing system, and human-man interface for path planning. Finally, the experiments confirm the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Small-size humanoid robot, Mechanism design, Servo control system, Dynamic sensing system, Human machine interface, Path planning, Dynamic balance, Stepping over the obstacle.

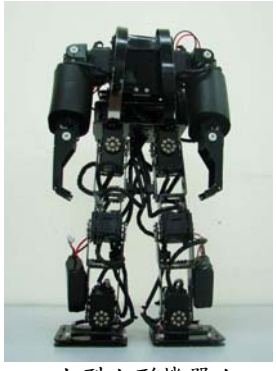
一、前言及研究目的

眾所周知，人形機器人之研究需要整合多項技術，例如，電力電子科技、計算機技術、機械技術、人工智慧與運動學等各項理論，可以探討的題目也非常的多元，國內在機器人相關領域的研究，學術界已發展多年，而且在人形機器人的研究亦有一些相關研究成果[1]-[15]。機器人產業為一個高度技術整合、高度關聯性且具有高附加價值的明星產業，未來應用之範圍非常廣泛，除了產業用機器人外，更擴展到服務、娛樂、軍事、救災與保全用機器人，對國內整體經濟效益提升具有舉足輕重，因此 2005 年政府已將智慧型機器人產業列為發展重點。目前由四大法人研究單位(即工研院機械所、金屬中心、精密機械中心及中科院)帶頭投入在智慧型機器人產品與技術之研究。此外，台灣已經在 2007 年春季成立「台灣機器人產業發展協會」，為台灣第一個專為智慧型機器人產業設置的協會，它集合了機械業、玩具業、保全業、資電業、家電業等各產業代表，以及學界、法人代表，一起來推動機器人產業，發展台灣經濟的新紀元。

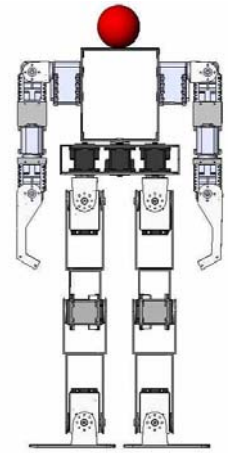
本計畫研究目標為人形機器人的動態平衡[3], [4], [6]，一如人類嬰兒，機器人也不是天生就能夠在運動中達到平衡，人類靠各種感官感受外界資訊，藉以平衡自身動作，而機器人則需要感測器，藉以修正(或平衡)本身動作。本計畫欲使用的感測器為核心系統所述的壓力感測器，並且設計與開發動態感知系統界面，在運動動作過程中記錄感測器的響應，藉由分析後規劃平衡演算模組，以達到平衡的功能需求。本子計畫所設定為人形機器人跨越障礙物[7]、以及不平坦地面之跨越障礙物之步態規劃[1], [2], [9], [11]，在計畫中需要整合如下研究：(一)機構之設計，(二)伺服控制系統之設計，(三)步態規劃之人機界面，(四)動態感知系統之設計與開發，(五)不平坦地面之步態規劃。本計畫使用如圖一所示的小型人形機器人實驗平台，包括 21 個自由度(不包含頭部)，應用兩組壓力感測器組成動態感知系統，藉由此系統完成人形機器人於跨越障礙物的動態平衡研究。此外，本計畫使用人機界面，編輯與產生機器人各馬達的角度與速度，使之組合成所需的動作。

本計畫報告之組織結構如下：第二段落將探討機構之設計，此乃本整合計畫的第二代人形機器人，第三段落將討論核心系統之建構，第四段落探討運動控制規劃與實現之人機界面，第五段落為動態感知系統之設計與開發，跨越障礙動態平衡之實驗成果則安排於第六段落探討，最後，將結論與未

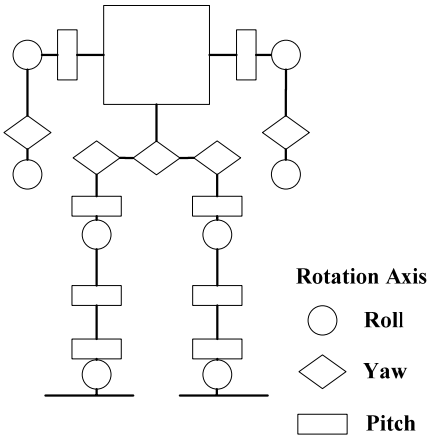
來研究安排於第七段落。



圖一、小型人形機器人



圖二、小型人形機器人機構示意圖



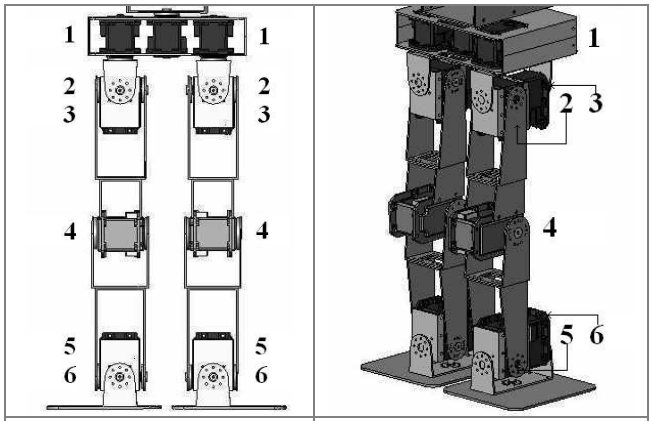
圖三、機器人四肢及身體自由度示意圖

二、機構之設計

本次設計與開發的小型人形機器人系統，是為了發展多項機器人關鍵技術外，也期盼所完成的系統亦具有競賽的功能，此乃淡江大學電機系智慧型機器人實驗室的第二代人形機器人系統。其能有效率地實現基本的操控能力：往前後走、原地左右轉、左右平移、上下樓梯、跌倒站起、拿起與搭載重物等動作。如圖二所示的人形機器人之機構，共有 21 個自由度(不包含頭部)，其運動的自由度如圖三所示。現分別敘述各部位之機構設計與伺服系統：

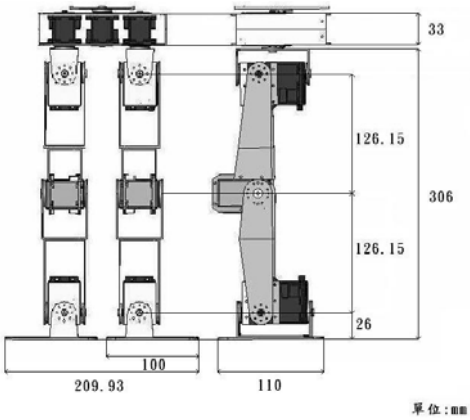
(1)具有 6 個自由度之腳

如圖四所示的機器人的腳部設計，乃是採用大、小腿等長比例，以避免於行走中因屈膝易使重心移出腳底板外，而造成機器人重心無法平衡；至於膝關節則設計成讓機器人半蹲時，重心位置能保持更低，使得機器人更容易達到平衡。機器人雙腳各規劃 6 個自由度：標示 1 為股關節旋轉自由度的伺服機，用來控制機器人腳部轉動；標示 2、3 為髖關節的前後與左右兩個自由度的伺服機，用來控制機器人的腳部可以前後與左右的轉動；標示 4 為膝關節彎曲自由度的伺服機，用來控制機器人小腿前後的轉動；標示 5、6 為腳踝關節的左右與前後兩個自由度的伺服機，用來控制機器人的腳掌可以左右與前後的轉動。而如圖五所示為腳部長度之尺寸。



(a) 正視圖　　(b) 3D 視圖

圖四、機器人腳部自由度圖



圖五、機器人下半身長度規劃圖

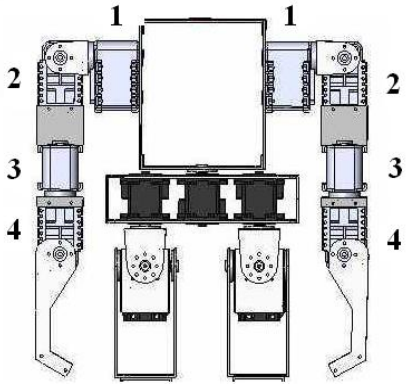
(2)具有 4 個自由度之手

手部機構設計的目在讓機器人可以舉起重物及跌倒時將機器人上半身撐離地面。如圖六所示的雙手各規劃 4 個自由度：標示 1 為肩膀前、後的自由度的伺服機，用來控制機器人手部的前後轉動，將伺服機設計於機器人身體內部，是為了使機器人上半身重量更靠近重心；標示 2 為肩膀左右自由度的伺服機，用來控制機器人手部的左右轉動；標示 3 為手腕旋轉自由度的伺服機，用來控制機器人手掌的旋轉；標示 4 為手掌左右自由度的伺服機，用來控制機器人手掌開閉的轉動，也可以使機器人能夠抓起物體。而如圖七所示為手部長度之尺寸。機器人的配重是一個重要的問題，為了減輕機器人的重量且手部動作的需求量較低，是故以重量較輕且扭力足的如表三所示規格之

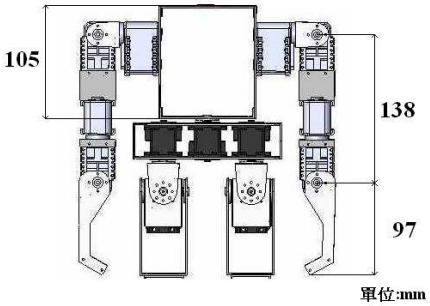
ROBOTS AX-12 型號的伺服機。

(3)具有 1 個自由度之身體(含腰部)

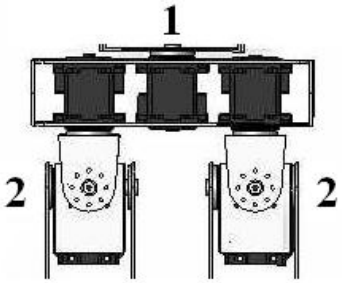
腰部機構設計之目的在於機器人可以左右轉動與前後傾斜。機器人腰部規劃如圖八所示：標示 1 為腰部的自由度，用來控制機器人腰部左右的轉動；標示 2 為腿部代替腰部的自由度，用來控制機器人腰部前後的轉動。機器人在做旋轉腰部的動作時，需要支撐整個上半身的重量，是故腰部的伺服機必須使用大扭力的 ROBOTS RX-28 型號伺服機(其與腳部的伺服機相同)。如圖九所示其內部乃是放置微處理器、驅動和穩壓電路，此外為了方便拆取其內部的電路板，同時便於腳部伺服機與驅動電路板的連接以及電池與感測器走線的配置，因此用 4 片鋁片以組合的方式構成。



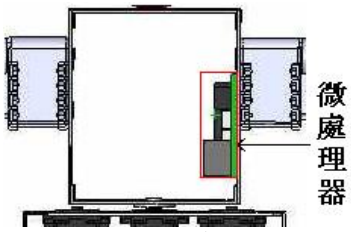
圖六、機器人手部正視圖



圖七、機器人上半身長度規劃圖



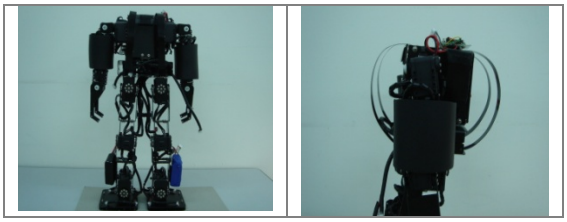
圖八、機器人腰部正視圖



圖九、機器人身體正視圖

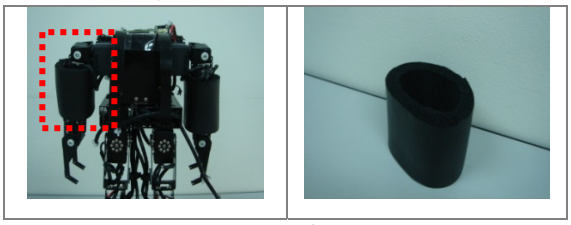
(4)機器人被動保護機構

如圖十所示的在機器人前後面分別安裝兩片 0.6mm 厚的鋼條，當機器人受到外力撞擊時(例如，跌倒)，鋼條可以保護其內部的微處理器和驅動電路板不會毀損。此外，鋼片具有彈性，能夠減小其本身所受到的衝擊，而且不會完全貼於地面，故在執行跌倒爬起來時，手部相對可以減輕支撐身體的重量，更容易完成跌倒爬起的動作。



圖十、機器人身體保護機構

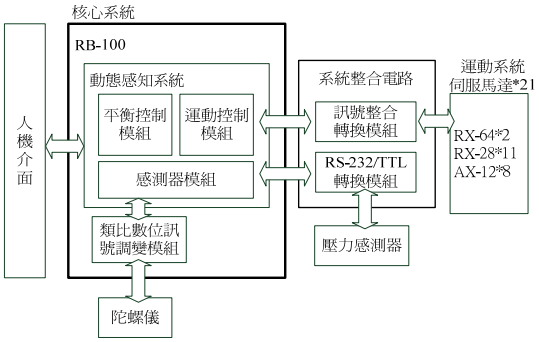
同理，如圖十一所示的肩膀關節是比較脆弱的，如果機器人在跌倒時，由側邊先接觸到地面，有可能會照成肩膀的機構斷裂，因此我們在肩膀份放上保護墊。



圖十一、機器人肩膀保護機構

三、核心系統之建構

圖十二為本計畫的系統架構圖，其中的核心系統為嵌入系統 RB-100，透過所設計的人機界面可進行機器人的控制，並搭配外部整合電路進行馬達控制及感測器的資料讀取及儲存。嵌入系統 RB-100(參考圖十三及表一)為 DM&P 所製作之一款專為機器人設計的單板電腦，最大特色為相容一般市面上常見之作業系統，包含 Microsoft Windows 98/ME/XP/CE 以及 Linux 和 DOS。讓使用者以最常見的開發軟體撰寫機器人的控制程式，以進行演算法的驗證。在本計畫中使用 Microsoft Visual C++ .NET 進行機器人操作程式的人機界面撰寫，此軟體為 PC-Based 的開發軟體，透過此軟體可以讓機器人的操作程式達到直覺化的效果。除了一般電腦的標準 RS-232 傳輸界面，嵌入系統 RB-100 尚提供感測器的 SPI，I^2C 及 ADC 界面，另外還提供伺服馬達或其他應用的 PWM 及 GPIO (參考圖十四)[16]-[18]。

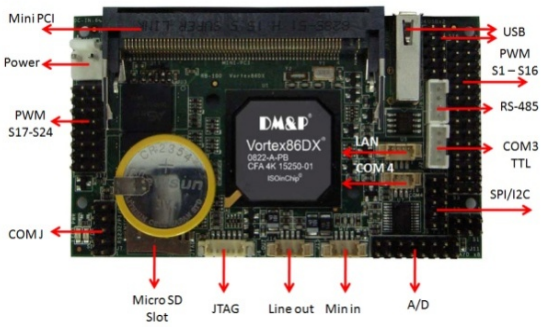


圖十二、系統架構圖

圖十三、嵌入系統 RB-100

表一、嵌入系統 RB-100 規格

處理器	DM&P Vortex86DX
BIOS	AMI BIOS
記憶體	256MB DDR2 onboard
ADCs	AD-7918 10-bit
I/O 界面	Micro SD slot USB 2.0 version
耗電	+5V @400mA
輸入電源	DC-in 6V to 24V
尺寸	96 x 56 mm
重量	40g
適用作業系統	DOS, Windows 98/ME, Windows XP/ XP Embedded, Windows Embedded CE, Windows Embedded Standard Linux



圖十四、嵌入系統 RB-100 周邊 I/O

表二、伺服馬達 RX-64 規格

RX-64		
重量(g)	125	
尺寸(mm)	40.2x61.1x41.0	
齒輪減速比	1/200	
使用電壓	at 15V	at 18V
扭力(kgf.cm)	64.4	77.2
轉速(Sec/60degrees)	0.188	0.157

圖十五、伺服馬達 RX-64

表三、伺服馬達 RX-28 規格

RX-28		
重量(g)	72	
尺寸(mm)	35.6x50.6x35.5	
齒輪減速比	1/193	
使用電壓	at 12V	at 16V
扭力(kgf.cm)	28.3	37.7
轉速(Sec/60degrees)	0.167	0.126

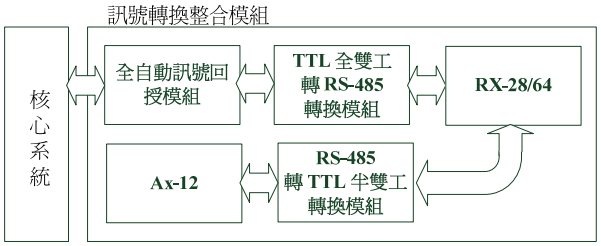
圖十六、伺服馬達 RX-28

表四、伺服馬達 AX-12 之規格

AX-12		
重量(g)	55	
齒輪減速比	1/254	
使用電壓	at 7V	at 10V
扭力(kgf.cm)	12	16.5
轉速(Sec/60degrees)	0.269	0.196

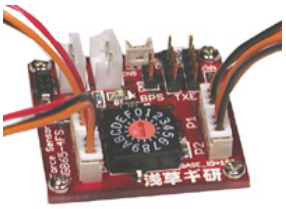
圖十七、伺服馬達 AX-12

本計畫皆使用 Robotis 之伺服馬達，其最大的特色為控制訊號訊為 UART 的數位資料，與一般使用 PWM 訊號來控制的伺服馬達不同，也因為使用數位資料的方式來控制，可以藉由傳送命令的方式使馬達回傳位置、溫度及電壓等相關訊息。總共使用 2 顆 RX-64(參考圖十五及表二)、11 顆 RX-28(參考圖十六及表三)、8 顆 AX-12(參考圖十七及表四)。RX-28 主要應用於腳部及腰部，但考量膝關節負荷較大，其亦使用 RX-64。由於 RX-64 重量較重且體積較大，採用太多會造成機器人總重增加。因為機器人上半身的手部負擔並不大，採用重量較輕且體積較小的 AX-12。以上的馬達的控制訊號為 RS-485 及 TTL UART，嵌入系統 RB-100 本身有提供 4 種不同的 UART 模式(RS-232/RS-485/TTL Full Duplex/TTL Half Duplex)，因為各種 UART 模式分別位於不同的連接埠，在考量整體訊號同步及走線規劃，藉由一個訊號整合轉換電路，將所有馬達串在同一個 UART 訊號(參考圖十六及表三)。



圖十八、訊號整合轉換模組

動態感知系統採用壓力感測器為 AGB65-4FS 模組，此模組包含圖十九壓力感測器控制器及圖二十壓力感測器量測點，表五為其規格。



圖十九、壓力感測器控制器圖

圖二十、壓力感測器量測點圖

表五、壓力感測器規格

控制器電壓	7.5V ~ 25VDC
消耗電流	30mA
解析度	8bit/12bit
測定荷重	10N(約 1Kg)
破壞荷重	45N(約 4.6Kg)
通訊鮑率	9600bps/115kbps
通訊設定	8 位元,停止位元 1, 無流量控制, TTL 準位
ID 範圍	100 ~ 115 , 16 種類(可手動設定)
尺寸	29mm x 29mm,
重量	9g

當機器人跨越障礙時，身體重心在不穩的情況下，易於造成其往前或往後傾倒，在此使用 MLX90609 單軸陀螺儀偵測機器人身體是否傾斜，陀螺儀的動態範圍在±300 °/s 之間，MLX90609 有兩種通訊界面，類比訊號透過 A/D 轉換器轉成數值後，再使用是 SPI 傳輸模組將資料送出。陀螺儀原理敘述如下: 陀螺儀由高速旋轉剛體子中，旋轉轉子在空間能保持固定狀態並抗拒一切使其改變的力。當受到扭轉力時，它的轉動方式取決於扭轉力的大小和方向以及陀螺儀安裝的初始狀態。垂直方向自由旋轉的陀螺儀(萬向支架，兩個半圓環成直角裝在萬向支架上，使其可向任何方向轉動)在運載工具俯仰傾斜時仍然保持垂直，從而提供一個人工的地平線。水平的陀螺儀將保持一定的方向，在飛機(輪船)轉彎時指出航向。

表六、MLX90609 規格

工作電壓	+5V
消耗電流	20mA
量測範圍	±300°/s
輸出(角速率=0)	+2.5V
靈敏度	6.67 mV/°/sec
頻寬	75 Hz

圖二十一、MLX90609

四、運動控制規劃與實現之人機界面

人形機器人在設計與調整動作，是相當複雜與艱難的，往往需要花費許多時間，若是直接使用程式設計或調整，不僅在設計動作的時間會很長，而且還會發生輸入錯誤的數值，造成馬達或機構上的損傷。基於以上的理由，本計畫使用 Visual Studio 2008 開發一人機界面以設計與調整機器人的動作，藉著圖形視窗化界面，輸入與輸出使用者所需要的資料，避免錯誤資料的輸入與單顆馬達誤植資料而需全部重新鍵入。所完成的人機界面具有傳輸的功能、馬達回傳與編輯功能，其分別敘述如下:

(1)編輯功能

編輯功能主要是讓使用者容易並有效率的設計與調整機器人動作，其界面如圖二十二所示。編輯的方式可分為以下三種:(a)單一傳送模組,(b)馬達卸力模組，(c)選定馬達傳送模組。

(a)單一傳送模組

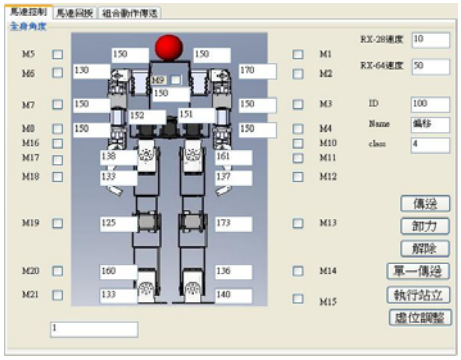
使用者可以任意調整機器人全身馬達的角度，當選取界面機器人圖形中欲選取的馬達時，圖形中的馬達便會轉換成紅色，以供使用者亦於分辨欲調整的馬達，使用者僅需給各顆馬達角度與速度的數值，機器人便會轉到對應的角度。此功能可以觀察機器人整體的動作與速度。

(b)馬達卸力

在調整機器人動作時，輸入每顆馬達適當的數值以達到理想中的動作是非常困難的，往往調出來的動作大不如預期，此時使用者都會希望用手將馬達轉到所希望的位置，並讓機器人維持在使用者所期望的姿勢。馬達卸力編輯就是利用上述的功能，將馬達卸力，讓使用者將馬達轉至想要的位置，並按下編輯界面如圖二十二所示的解除按紐，以恢復馬達的力矩，讓機器人維持目前動作。此功能可以相當快速地設計動作與觀察機器人動作的協調性與整體平衡，並達到更人性化的特性。

(c)選定馬達傳送

在機器人動作調整，有時使用者只想要針對某幾顆馬達進行調整，如下圖二十二所示的選定馬達傳送只要勾選所需要調整的馬達，並輸入要調整該幾顆馬達的角度與速度。



圖二十二、編輯界面

(2)馬達回授界面

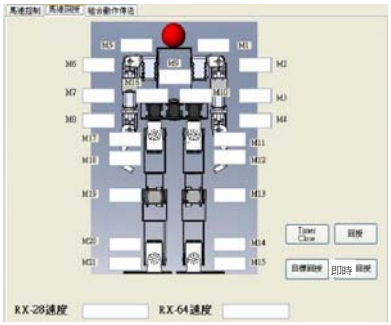
馬達回授功能主要目的是為了在控制馬達與調整動作上的便利而設計，這種方式可以觀察目前的內容(例如，角度與速度)。在前面所介紹馬達卸力功能，就是為編輯動作而設計，而編輯完成的動作就需透過本節所介紹的馬達回授界面來得知目前馬達的角度與速度，並儲存於記事本中。馬達回授界面的回授分為兩種方式：(a)目標回授，(b)即時回授。

(a)目標回授

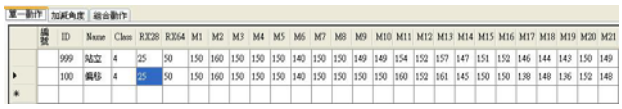
馬達在卸力的模式下回復力矩，並回授目前馬達回復力矩的角度。

(b)即時回授

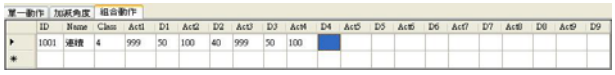
與目標回授相反，可以直接回授目前在卸力模式下，馬達任意轉動的角度，使用者可以在馬達卸力的模式下，調整機器人連續動作，透過即時回授界面得到所有連續動作的馬達角度，圖二十三為馬達回授界面。



圖二十三、馬達回授界面



圖二十四、單一動作



圖二十五、執行組合動作界面

(3)組合動作

組合動作功能就是將多筆已經調整好的單一動作做串聯，每筆單一動作前設有獨自的 ID，讓使用者易於在多筆動作下做區分與執行。如圖二十四為多筆以調整好的單一動作資料，圖二十五為組合動作編輯界面，使用者需先設一個四位數的 ID 給欲執行的組合動作，並將要做組合的單一動作 ID 填入 Act1~Act9 中，而 D1~D9 為各單一動作與動作間的延遲時間。如圖二十六所示的將欲執行組合動作的 ID，填入組合動作界面中，並按下傳送組合動作按鈕。

圖二十六、組合動作傳送界面

(4)存檔與讀檔

若所完成的動作資料無法透過軟體來儲存，那將會造成在使用上的不便，每當使用者重新啟動軟體，就必須從新輸入各顆馬達的資料。所設計的人機界面軟體尚具有存檔與讀檔的功能，而存檔與讀檔主要是將以完成的單一動作與組合動作資料來儲存與讀取的功能，在此我們使用 Visual Studio 2008 中的 DataGridView 元件來修改與管理資料。存檔的功能是將完成於 DataGridView 元件中的資料以橫寫的方式寫入於記事本中，使用者也可以直接由記事本來修改每顆馬達的資料。讀檔的功能與寫檔相反，讀取記事本中的資料存入暫存器中，並顯示於 DataGridView 元件中，可使用兩種方式來修改馬達的資料，第一種方式，直接從人機界面的 DataGridView 中修改，而另一種為在以存好的記事本中修改。

(5)人形機器人動作調整

在此以人形機器人跨越障礙為例，來介紹如何使用人機界面來調整動作。在機器人跨越障礙之前，初始站立將是非常重要，因此我們透過四點壓力感測器來調整機器人站立的動作，將 COP 調整至雙腳腳底板中心，並維持雙腳每個自由度左右對稱。人形機器人跨越障礙動態平衡分為如下兩點：(1)步態分析，(2)重心調整。現在分別敘述如下:

(1)本計畫將跨越障礙動作如圖二十七，分為六個步驟：(a) Step 1為機器人初始站立在障礙物後面，(b)Step 2為抬起其中一隻腳，並跨越過障礙物，(c)Step 3為將跨越過的腳放到地面，(d)Step 4為將重心由後腳移到前腳，(e)Step 5為將後腳抬起並跨過障礙物，(f)Step 6為調整回初始站立。其中Step 3與Step 5為單腳支撐(Single-Support-Phase) 其他為雙腳支撐(Double-Support-Phase)。

(2)在步態分析中，分為單腳支撐與雙腳支撐兩個時期來調整重心的位置。單腳支撐時期將COP調整至支撐腳的腳底板中心，雙腳支撐時，則是將COP分別維持在各腳底板的中心位置，以上皆是透過雙腳的前後左右維度來進行調整。

結合以上兩點，將機器人跨越障礙動作([7],如圖二十八)分解成十五個單一動作，並在圖二十五的組合動作界面中，串聯以下十五個單一動作，並執行連續

動作。

(1)初始動作站立。

(2)重心偏移，從初始的站立動作中，將重心移至左腳(支撐腳)讓右腳能在地面上些許移動，防止機器人因重心沒有完全移至左腳而抬右腳動作，讓地面對右腳的反作用力而導致其往前傾倒，如圖二十八之1。

(3)與(4)其中(3)為抬起右腳，(4)抬起右腳高過障礙物，同時維持支撐腳COP於腳底板中心位置(此時為單腳支撐)，如圖二十八之2。

(5)右腳越過障礙物，在此單一動作中機器人將會往前倒，如圖二十八之3。

(6)右腳跨過障礙物(此時為雙腳支撐)，並透過上一步單一動作往前倒的慣性力，讓機器人右腳胯至障礙物前方，如圖二十八之4。

(7)機器人上半身前傾並回正，此單一動作是為了修正機器人在跨過障礙物後,步伐會有往左或右偏的現象。

(8)將機器人右腳膝蓋向前彎曲，讓身體重心落在右前腳，圖二十八之5。

(9)左腳墊起腳尖，使機器人在執行下一個單一動作時，能輕易的將重心移至右前腳，減輕右前腳馬達負載，並讓機器人在跨越障礙動作時更像人類的動作，圖二十八之5。

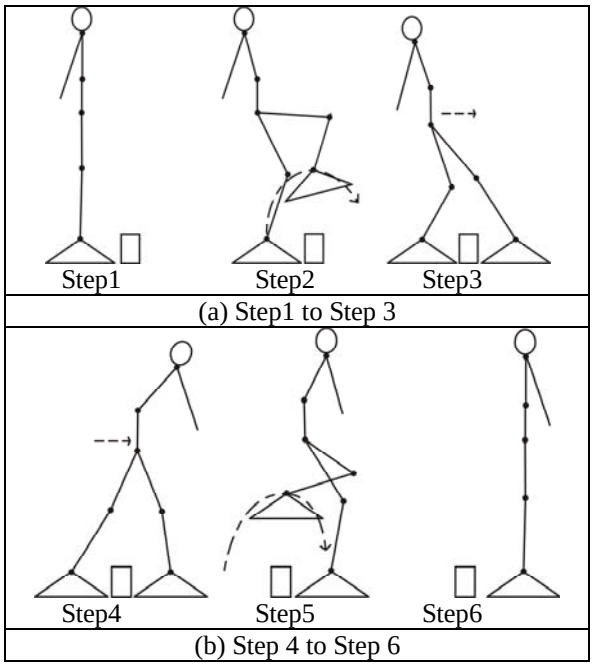
(10)將左後腳縮起，讓重心完全落在右前腳中心(單腳支撐)，圖二十八之6。

(11)左後腳跨過障礙物，在這個單一動作中，機器人會往前倒，並產生一個往前的慣性力，圖二十八之7。

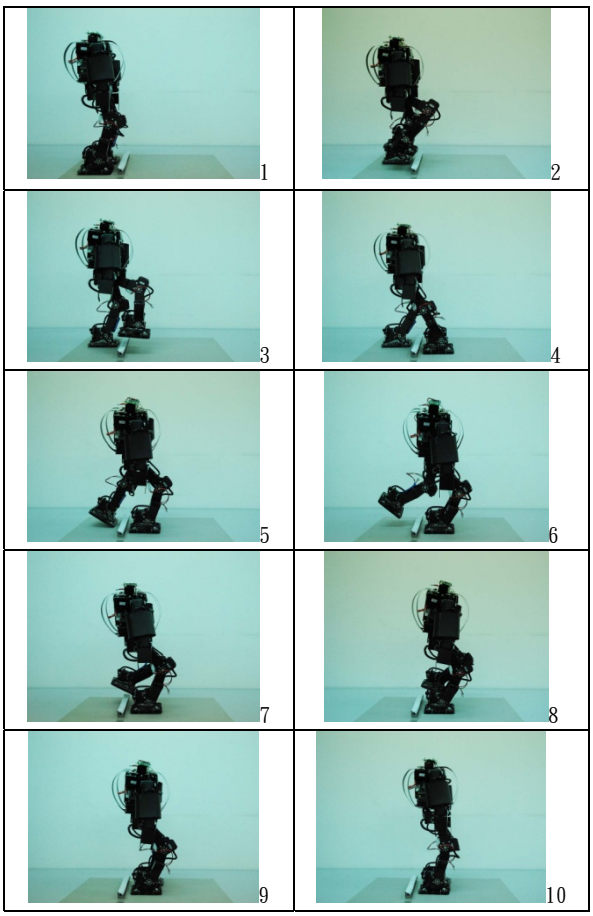
(12)透過上一步往前的慣性力，並在還未完全往前倒之前讓機器人左腳著地，圖二十八之8。

(13)與(14)皆為雙腳著地的動作，為了讓機器人左起動作來能更像人類，於是在將此動作分為兩步，並減少機器人往後傾倒，如圖二十八之9。

(15)最後一步為機器人回至初始站立動作。



圖二十七、機器人步態分析

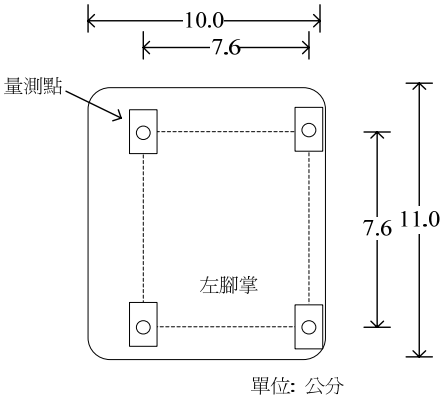


圖二十八、跨越障礙動作側視圖

五、動態感知系統

壓力感測器的量測點配置位置需要考量腳掌大小及所需量測的動作[4]-[6]。本計畫將壓力感測器量測點放置為一矩形，其配置如圖二十九，因為壓力感測器量測點需要與測量平面貼平，若裝置過於外側，則會造成量測點反應遲鈍甚至無法量測的情形，是故如圖三十所世的左腳掌大小與其能量測的範圍，至於右腳掌則與左腳掌對稱。

圖二十九、壓力感測器裝置位置示意圖

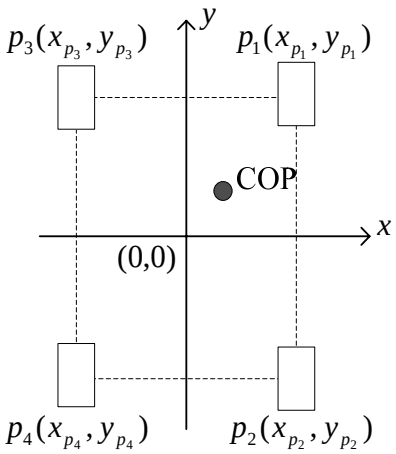


圖三十、左腳掌量測範圍

單腳壓力中心點可以藉由裝置於腳底的壓力感測器量測點數據，經由加權重心法求得，四點壓力感測器量測點分別為 p_1、p_2、p_3 及 p_4，其座標分別為 (x_{p_1}, y_{p_1})、(x_{p_2}, y_{p_2})、(x_{p_3}, y_{p_3}) 及 (x_{p_4}, y_{p_4})，四點回傳的壓力數值為 f_{p_1}、f_{p_2}、f_{p_3} 及 f_{p_4}，則壓力中心點COP(Center of Pressure)點座標如式(1)所示。

$$\left(x_{COP}, y_{COP}\right) = \left(\sum_{i=1}^{4} x_{p_i} f_{p_i} \Big/ f_t, \sum_{i=1}^{4} y_{p_i} f_{p_i} \Big/ f_t\right) \quad (1)$$

$$f_t = \sum_{i=1}^{4} x_{p_i} f_{p_i}$$



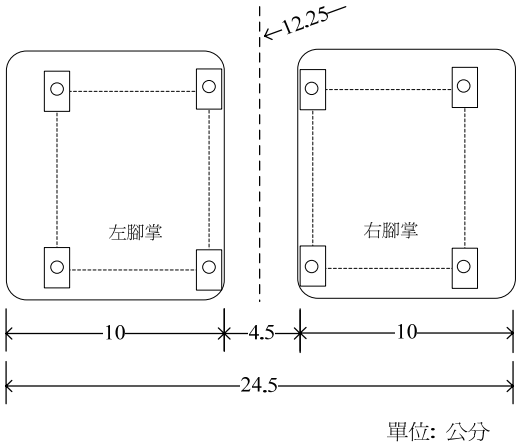
]圖三十一、單腳COP示意圖

至於機器人雙腳成站立狀態時，雙腳之間有著4.5公分的距離，如果只考慮X軸方向，則其中間點會落在12.25公分的位置，如圖三十二，若分別將左腳與右腳的COP的x座標取平均，加上初始中間點的數值，可以得到如式(2)所示的一個推估的雙腳COP點，位置如圖三十三。其相關數學方程式如下：

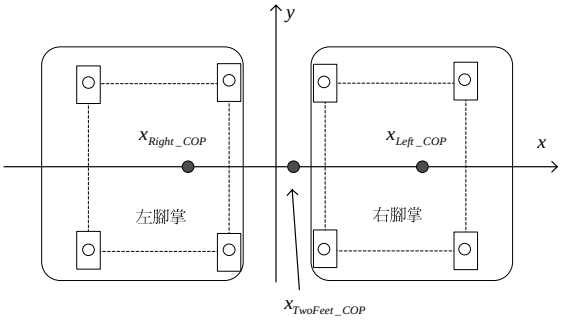
$$x_{TwoFeet_COP} = 12.25 + \left(x_{Right_COP} + x_{Left_COP}\right)/2 \quad (2)$$

$$y_{TwoFeet_COP} = d_{step}/4 + \left(y_{Right_COP} + y_{Left_COP}\right)/2 \quad (3)$$

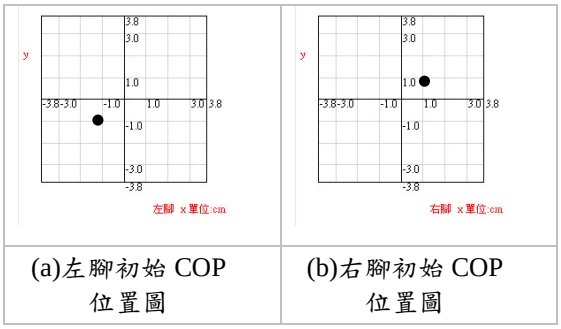
其中 $\left(x_{TwoFeet_COP}, y_{TwoFeet_COP}\right)$ 雙腳支撐之COP座標相對於後腳的COP原點(即圖三十一之原點)。本計畫中機器人的初始狀態為雙腳站立，當機器人站立不動時，左右兩腳的COP點大致上是呈現對稱的狀態，如圖三十四，壓力感測器所回傳左腳的結果如圖三十五，縱軸為腳掌寬度，因為腳掌長度為7.6公分，所以變動範圍於正3.8cm到負3.8cm，橫軸為時間，每100ms為單位，因為機器人就算是站立不動，依然會有震顫產生，壓力感測器會產生不規則的訊號，如果不使用濾波消除，在運動狀態開始時，反應會劇烈震盪，造成數據不易分析，於是本計畫使用均值濾波器，將訊號作校正，訊號取樣時間為每100ms，均值濾波取樣樣本數為50，校正過後的訊號如圖三十六。



圖三十二、左右腳掌示意圖



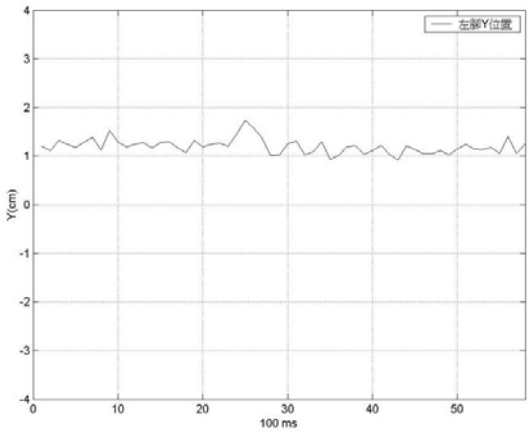
圖三十三、推估雙腳支撐之COP示意圖



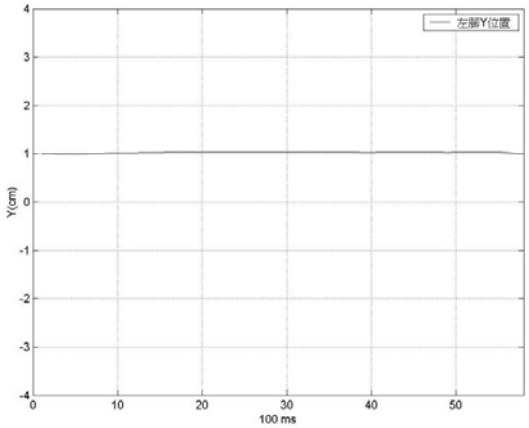
(a)左腳初始 COP 位置圖	(b)右腳初始 COP 位置圖

圖三十四、初始站立狀態下雙腳 COP 位置圖

動態感知系統的界面如圖三十七所示，界面功能有(a)壓力重心點位置、壓力重心點速度以及壓力重心點加速度顯示功能，(b)上述感測器資料記錄與檔案寫入功能，(c)動作資料庫分析與執行功能，(d)平衡演算功能。

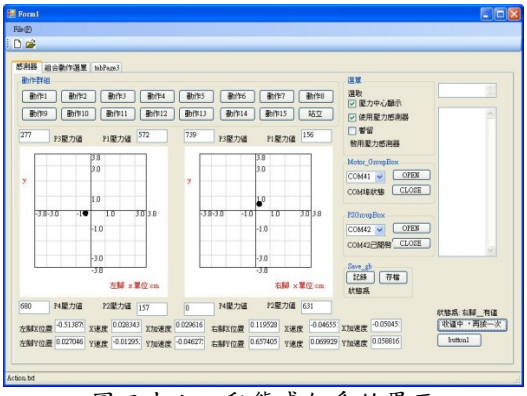


圖三十五、左腳 COP 初始狀態

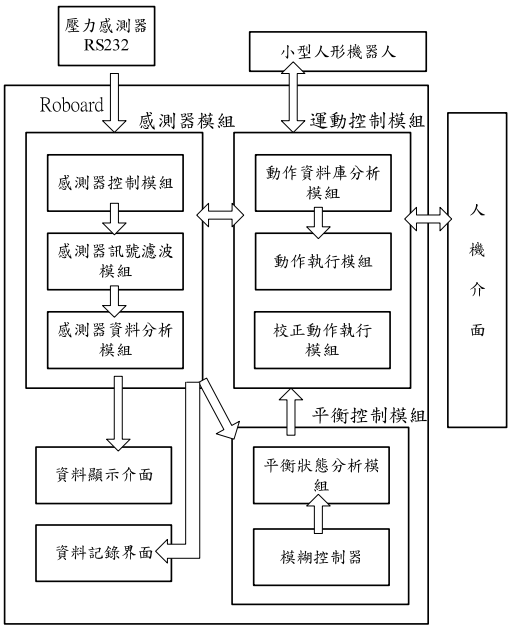


圖三十六、濾波後左腳 COP

動態感知系統架構方塊圖如圖三十八所示，壓力感測器的壓力資訊透過RS232的傳輸格式，由感測器控制模組控制壓力資訊的接收，接收的資訊會先經過濾波以及分析模組，成為有用的資料，平衡演算模組將每一筆資料經由模糊控制器求得輸出值，此輸出值將會判斷機器人是否需要執行校正動作以維持平衡，若需要，即將校正訊號傳遞給平衡狀態分析模組，平衡狀態分析模組將適宜的動作送往校正動作執行模組，動作執行模組將校正動作送往人形機器人，藉此完成平衡的動作。



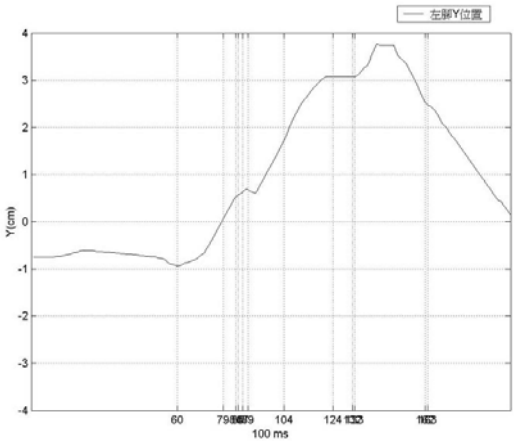
圖三十七、動態感知系統界面



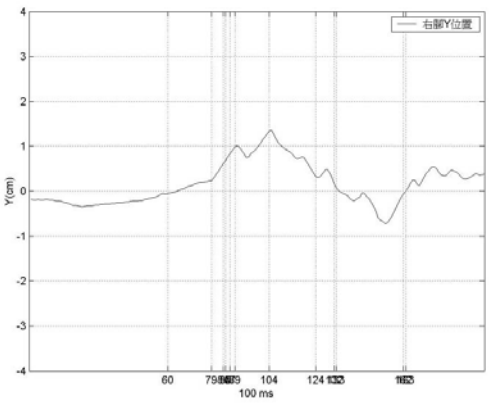
圖三十八、動態感知系統方塊圖

於平衡控制模組的模糊控制器部分，本計畫利用支撐腳的COP以及COP變化來設計適當的模糊控制器，當我們執行由人機界面所產生的基本跨越障礙動作時如圖二十八，可以觀察到支撐腳，其壓力中心點y值變化量如圖三十九與圖四十，此y值變化量將會被平衡控制模組的平衡狀態分析模組所使用。

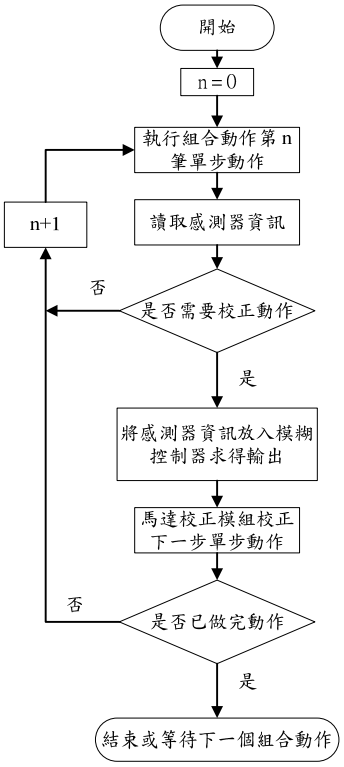
平衡控制模組主要為接收感測器模組所處理完的資料，包括支撐腳資訊以及COP點位置資訊，平衡控制模組分為平衡狀態分析模組，以及模糊控制器。平衡分析模組的任務為將壓力感測器偵測到目前支撐腳COP的y值與平地跨越障礙的COP的y值作比較，並將其相差值當作模糊控制器的輸入，得到的輸出為馬達校正角度，將該校正角度修改動作資料庫中的下一筆單步動作，直到跨越障礙的組合動作結束為止，其流程圖如圖四十一。



圖三十九、平地跨越障礙左腳壓力中心響應



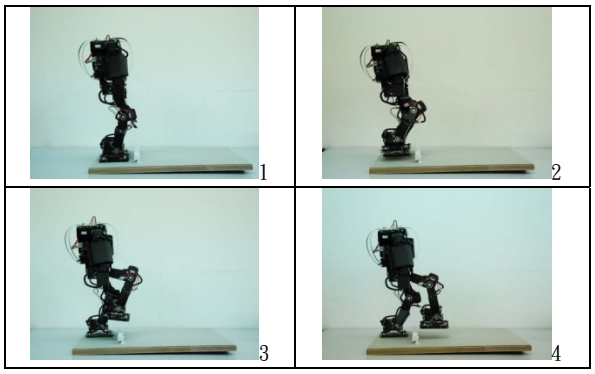
圖四十、平地跨越障礙雙腳壓力中心響應

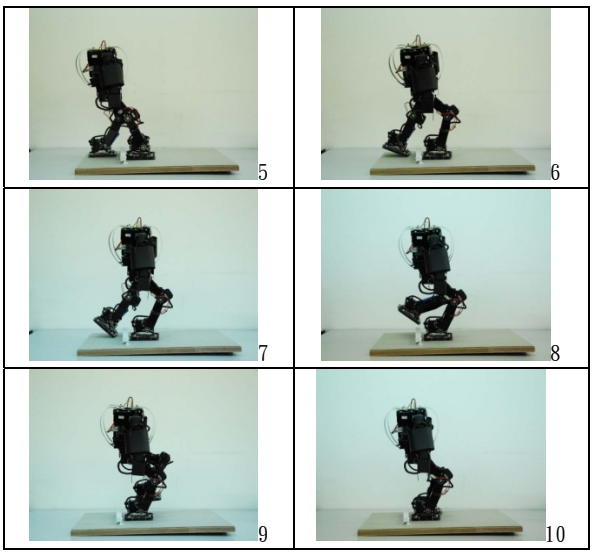


圖四十一、平衡控制模組流程圖

六、跨越障礙動態平衡之實驗成果

先前之研究[7]，並未在斜坡跨越障礙，而本計畫以 2 度斜坡製作不平衡的地面狀態，機器人跨越障礙動作如圖四十二，實驗結果顯示所建議方法是可行的。





圖四十二、斜坡上跨越障礙動作側視圖

七、結論與未來研究

本計畫提出一個具有基本行動能力的人形機器人系統，並且開發出一個可以設計與編輯動作的人機界面，以及動態感知系統。首先，應用人機界面產生正常狀況可平衡的動作後，以動態感知系統記錄相關的資訊，當作不同狀況的跨越障礙之修正依據，使機器人能在不同斜度的斜坡上執行跨越障礙的動作。根據實驗結果得知機器人於斜坡上跨越障礙，其動作將會往前傾且重心降低，以利於跨越障礙物時的平衡，在過程中機器人的支撐腳，將會承受全身的重力，是故腳踝馬達的扭力與機械結構是一項需要考慮的問題。此外，將記錄一穩定跨越障礙的 COP，並以此為控制的參考輸入，主動控制人形機器人跨越障礙的動態平衡。由於人形機器人的動態具有強烈的非線性及耦合性，是故將以模糊分散控制[19]探討人形機器人的自主動態平衡。

八、參考文獻

[1] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi and K. Tanie, “Planning walking patterns for a biped robot,” *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 17, no. 3, pp.280-289, May 2001.

[2] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, “Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei Taiwan, pp.1620-1626, Sep. 14-19, 2003.

[3] K. Loffler, M. Gienger, F. Pfeiffer and H. Ulbrich, “Sensors and control concept of a biped robot,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp.972-980, Oct. 2004.

[4] Q. Huang and Y. Nakamura, “Sensory reflex control for humanoid walking,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no. 5, pp. 977-984, Oct. 2005.

[5] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. O. Lim, and A. Takanishi, “Development of a new humanoid robot WABIAN-2,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and*

Automation, pp. 835-840, Feb. 2006.
[6] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "Dynamic balance of a humanoid robot during manipulation tasks," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 22, no. 3, pp.568-575, Jun. 2006.
[7] Y. Guan, E. S. Neo, K. Yokoi and K. Tanie, "Stepping over obstacles with humanoid robots," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 22, no. 5, pp. 958-973, Oct. 2006.
[8] http://www.worldrobotics-online.org, "The Robots are coming! " *World Robotics*, October, 23rd 2007.
[9] K. Harada, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Real-time planning of humanoid robot's gait for force-controlled manipulation," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 12, no. 1, pp. 53-62, Feb., 2007.
[10] J. E. Pratt and S. V. Drakunov, "Derivation and application of a conserved orbital energy for the inverted pendulum bipedal walking model," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.4653-4659, Apr. 10-14, 2007.
[11] H. Hirukawa, S. Hattori, S. Kajita, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, "A pattern generator of humanoid robots walking on a rough terrain," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.2546-2551, Apr. 10-14, 2007.
[12] S. Kajita, K. Kaneko and M. Morisawa, "ZMP-based biped running enhanced by toe springs," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.3963-3969, Apr. 10-14, 2007.
[13] M. Wisse, D. G. E. Hobbelen and A. L. Schwab, "Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 23, no. 1, pp.112-123, Feb. 2007.
[14] C.C. Wong, C.T. Cheng, K.H. Huang, Y.T. Yang, Y.Y. Hu, H.M. Chan, and H.C. Chan, " Humanoid soccer robot: TWNHR-IV" , 2008 FIRA Robot World Congress.
[15] C. L. Hwang, H. C. Wu, N. W. Lu, M. L. Lin, C. H. Huang, T. C. Hsu, I. C. Luo, and H. J. Chou, "Realization of humanoid service robotic system," IEEE ARSO2008, Taipei Internation Convention Ceneter, Taiwan, Aug. 23-25, 2008.
[16] http://www.kionix.com/accelerometers/accelerometer-KXP84.html
[17] http://zh.wikipedia.org/wiki/I2C
[18] http://en.wikipedia.org/wiki/SPI_bus
[19] C. L. Hwang and C. Y. Shih, "A distributed active-vision network-space approach for trajectory tracking and obstacle avoidance of a wheeled robot," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 846-855, Mar. 2009.