

# 大型雙足機器人設計開發

劉智誠、伍寒楨、吳建宏、林家弘、翁慶昌\*

淡江大學 電機工程學研究所

E-mail: wong@ee.tku.edu.tw

## 摘要

本論文主要為設計實現一台大型雙足機器人，以高度130公分的8至9歲孩童身高為目標，所完成之下半身的高度及重量分別為89公分及47公斤，共有12個自由度，左右腳各有6個自由度，其中髖關節、膝關節及踝關節分別有3個、1個及2個自由度。機器人機構的重點設計主要有兩項：(1) 雙髖角設計和(2) 扭力緩衝設計。在雙髖角設計中，位於大腿骨的部分有往內彎折些許角度，這個彎折的角度並不是人類特有而是生物演化而成，經統計彎折的角度平均約為6度，這樣的角度可以讓類人的重心偏移較為迅速，用於人型機器人設計上能讓行走中的穩定度更高。在扭力緩衝設計中，在大腿機構和小腿機構之間加上氣壓棒來做為緩衝以及輔助扭矩的設計。在蹲下時，氣壓棒會有向上的推力來幫忙緩衝向下的扭矩，其可以避免突然過大的力道會造成減速機的損壞；在站立時，氣壓棒會有向上的推力來幫忙輔助向上的扭矩，其可以減少馬達所要承受的負載。由實驗結果可知，本論文所設計的大型雙足機器人可執行重心偏移、起立及蹲下等動作。

關鍵詞：雙足機器人、機構、仿生、扭力補償。

## Abstract

This paper is presenting the design and implement of a lower body mechanism of an adult-sized biped robot. The aim of this paper is to build up a 130 cm tall humanoid robot, but the robot presented is only the lower body, which is 89 cm high and weighs 47 kg. The biped robot has total 12 actuated DoFs and each leg has 6 actuated DoFs. For one leg, the hip joint has 3 motors; the knee joint has 1 motor; the ankle has 2 motors. These DC brushless motors are used with decelerator to increase torque for each joint. The design of robot mechanical has two main parts: (1) skeleton design and (2) cushion design. In the skeleton design, the bone of thigh bends inward a few angles. The bending angle is not unique for humans but biological evolution. Statistically, the bending angle is averaged around 6 degrees, which can make center of mass shift fast when human walks. In the cushion design, the gas spring is used for the buffer and the auxiliary torque between thigh and shank mechanism. When robot squats, the gas spring, which has upward thrust to reduce downward torque, can avoid sudden

excessive force to cause decelerator damage. Also, when robot stands up, the gas spring can reduce the load for motors. As the experimental results, adult-sized biped robot designed in this paper could exhibit weight shift, stand up, squat and other movements.

**Keywords** : Biped Robot, Mechanism, Bionic, Torque Compensation.

## 1. 前言

在目前廣大的機器人中，有分為各式各樣的機器人，有行走的、飛行的、爬行的、水中游的、雙足、三足、多足、無足的各種分類都有人在專研，不過這些設計的靈感很多都是來自於大自然的生物，便有了仿生學(Bionics)的一詞產生。1958年，美國的Jack E. Steele提出「仿生學是研究以模仿生物系統的方式、或是以類似生物系統方式工作的科學」，從演化的角度來看，地球上的生物經歷了千萬年的演化各自發展了獨特的生物特徵，這些獨特的生物特徵藉由人類觀察並記錄以及研究將其應用於科學或工程上，也助於在設計機器人時可以做為設計的要點，如鳥類機器人，其為德國公司FESTO所研發可以栩栩如生的飛翔於空中的仿鳥型機器人SmartBird [3]，FESTO以海鷗為設計概念，重量為450公克可自主起飛、飛行以及降落。FESTO公司還有研究其他仿生的機器人，例如袋鼠機器人BionicKangaroo [5]，此袋鼠高為90公分，長約76公分，重約7公斤，最有名的就是它和袋鼠一樣會跳躍，高度約為40公分。美國波士頓動力(Boston Dynamics)公司原本就以開發機器人聞名，其開發的仿狗機器人BigDog [2]，以絕佳的行動力與靈敏性為人所知，BigDog以四肢運動的哺乳類奔跑時的運動與平衡為設計參考。

人形機器人已經是現今很熱門的研究主題之一，有非常多的企業或是學術單位甚至是個人興趣都在投入開發這塊領域，日本在人形機器人有著非常多的成果被發表出來，本田公司所研發的ASIMO [8]可為當代人形機器人的先鋒，本田公司於1986年有相關的機器人研究，最近一代為2011年所發表，當初ASIMO一亮相就以平穩地行走、小跑步、上下樓梯以及跨越障礙物等能力驚艷眾人。

在美國較為知名的雙足機器人為波士頓動力，上述介紹到的仿狗形機器人BigDog也是同公司設計開發，並以研發BigDog的經驗來設計雙足機器人，並於2011年發表雙足機器人PETMAN [4]，

PETMAN 是模擬人類身穿防護衣時行走運動的機器人，目的是要在以模擬真實環境下士兵穿著化學防護衣行走的狀況，PETMAN 行走的速度可達每小時 7.2 公里。2013 年，以研究 PETMAN 的經驗並與美國國防部國防高等研究計畫署 (DARPA) 合作發表 Atlas [6]，Atlas 身高 180 公分，體重 150 公斤，28 個自由度，相較其他人形機器人較為高大，但是除了能在一般路上行走，也可以在顛簸崎嶇的地形上自動平穩並行走，並且在上半身也有特別設計可以使用雙手與雙腳進行攀登。

以上述介紹來看目前的人形機器人的研發，在美國、日本以及韓國都有不錯的成果，可以看到穩定的行走甚至於可以跑步，但是對於人形機器人這些只是初步的設計與開發的空間，還有許多未知的研究可以繼續發展。

## 2. 機構規劃與設計

### 2.1. 自由度

自由度 (Degree of Freedom, DoF)，代表著機器人能夠做動作的複雜度，在同樣動作目標下，在自由度越高的機器人上表現出來的動作會越精細且順暢，但也代表著控制越困難，在大型雙足機器人所使用的馬達為直流無刷馬達搭配諧和式減速機，每個馬達都需要一個馬達驅動器來控制，所以在機構設計上也必須把這一些驅動器的大小以及位置也考慮進去，總和以上條件，在本論文所設計的大型雙足機器人身上以下面敘述方式來做自由度的配置，總共配置為 12 個自由度，分別為髖關節配置 3 個自由度 (Pitch、Roll、Yaw)，膝關節 1 個自由度 (Pitch)，踝關節 2 個自由度 (Pitch、Roll)，如圖 1 所示。

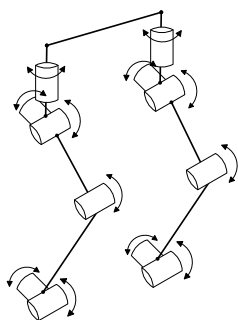


圖 1. 自由度分配

### 2.2. 馬達

在馬達的挑選上主要從 Maxon 直流無刷馬達中來做為選擇，並且運行電壓在 36 伏特 (V) 下的條件下選擇輸出扭力足夠且轉速也不會過低的馬達，主要還要搭配上諧和式減速機 1:160 的轉速比來做考慮，故選擇 Maxon 公司所生產的 429291，如圖 2 的馬達，詳細規格如表 1。



圖 2. 馬達

表 1. 429271 直流無刷馬達規格表

Type	429271
Nominal voltage	36 V
Nominal speed	2510 rpm
Nominal torque	560 mNm
Nominal current	4.76 A
Size	Φ90mm*27mm
eight	600 g

根據表 2.1 中，此款直流無刷馬達轉速每分鐘可旋轉 2510 圈搭配上 1:160 轉的諧和式減速機後的輸出轉速為

$$2510 \div 160 = 15.6(\text{rpm}) \quad (1)$$

表示每分鐘會有 15.6 圈，若在轉換成 rps 的話為

$$15.6 \div 60 = 0.26(\text{rps}) \quad (2)$$

表示每秒鐘有 0.26 圈，大約為 93.6 度每秒，此速度已經符合對於機器人動作的的需求。

### 2.3. 減速機

減速機的型式有許多種，有行星式減速機 (Planetary gears)，齒輪減速機 (Gear reducer)、擺線減速機 (Cycloid reducer) 以及諧和式減速機 (Harmonic drive) 等，各式各樣的減速機中，本論文選擇使用 Harmonic Drive System 公司諧和式減速機有以下幾個優點，在一定的尺寸下有較高的減速比、無背隙、高剛性以及高精度等優點。諧和式減速機主要包含了三個基本的元件：(1) 波產生器 (Wave Generator)、(2) 撓性杯 (Flex Spline) 以及 (3) 環型內齒 (Circular Spline)，如圖 3 所示。

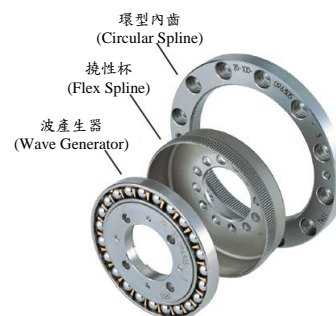


圖 3. 諧和式減速機零件

在諧和式減速機的挑選上，首先參考了諧和式減速機型錄內所有的型號，在從中挑選體積不能過大、能承受較大的扭矩並且好安裝為主要考慮的版

本，故選擇了 CSD 聯座型系列，在尺寸以及減速比上有許多選擇，減速比有 50、100 以及 160 三種來進行挑選，本論文使用最大的 160 的減速比來增加輸出的扭力，選擇 25 型的大小，對於能夠承受的靜態扭矩、動態扭矩、徑向力及軸向力都有不錯的表現，其規格如表 2 所示。

表 2. 諧和式減速機規格表

Type	CSD-25-160-2UF
Ratio	160
Allow Input Torque	7.4 cNm
Allow Input Speed	5600 rpm
Peak Torque at Start/Stop	123 Nm
Size	Φ110mm*31.5mm
Weight	1700 g

## 2.4. 機構設計

本論文以 SolidWorks 繪圖軟體來繪製 3D CAD 圖檔，並依據挑選好的馬達與減速機的尺寸大小及位置的配置來做為草圖參考繪圖，材料主要使用鋁合金 6061-T6 來製作並作陽極處理，圖 4 為本論文開發的大型雙足機器人 3D CAD 圖。



圖 4. 大型雙足機器人 3D CAD 圖

碳纖維棒有著比金屬輕量，在縱向承受力有比金屬還要好的承受能力以及彈性等優點，但是在軸向承受力不能承受太大的力，這和碳纖維的成型方式有關係，而在碳纖維此材質中有加工的方向性，碳纖維也不方便做攻牙的動作，這樣會使得此材質剛性會變得非常的脆弱，大多數都使用膠合的方式來做連接的方式，如圖 5 所示。

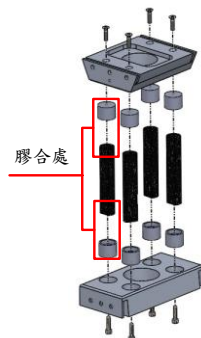


圖 5. 碳纖維棒膠和處

碳纖維棒如上述所說不方便做攻牙的加工，故先與機構件做膠合在從機構件和連接件使用螺絲栓緊，當在做膠合時，需要靜止一段時間來讓膠能夠黏合的更為牢固，當使用一段時間之後，在膠合的部分會造成脫落，這是其中的缺點，有可能是膠合用的膠使用不對，並且何時會脫落都是未知數，故解決方法改為鋁合金一體設計並且加入仿生設計，如圖 6 所示。

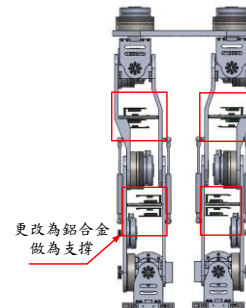


圖 6. 大型雙足機器人 3D CAD 圖

踝關節機構件主要目的為要將 Pitch 軸和 Roll 軸這 2 個自由度的馬達與減速機組裝於上述的機構，本論文為了避免以上情形在不影響其剛性下將一體式設計更改為組合式設計，如圖 7 所示。

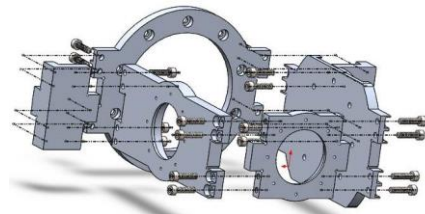


圖 7. 踝關節組合式設計

## 3. 仿生設計

### 3.1. 人體長度比例設計

本論文要設計開發一台大型雙足機器人，故也先參考人體的比例，若要設計一台總身高 130 公分高的大型人形機器人，按照人類的身體比例來比較約為 8 至 9 歲的孩童身高，如圖 8(a)所示。在身體的比例中可以發現的是在大腿以及小腿的長度比例為一樣長，近乎是全身的  $(310+310)/1300=47.6\%$  的長度，若腳的長度過長會有行走困難的問題產生，腳長過短在於行走速度也會受到影響，機器人也較不美觀，故本論文設定關節長度為髖關節到膝關節長度為 300mm，膝關節到踝關節的長度也為 300mm，最後大型雙足機器人的設計比例如圖 8(b)所示。

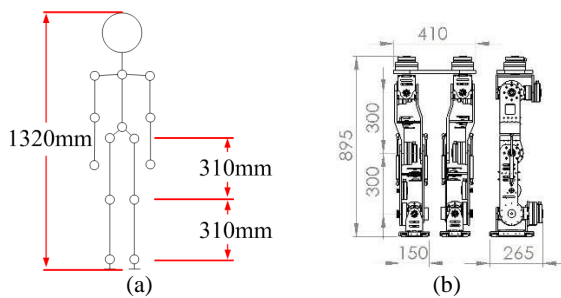


圖 8. (a)身體比例圖和(b)雙足機器人機構比例圖

### 3.2. 雙髌角設計

本論文參考人類骨架設計大型雙足機器人，人體骨骼中大腿骨如圖 9(a)所示，在大腿骨的部分是並不是從最上方的轉子部分垂直的向下進而連接到膝關節，而是有個往內的角度在連接到膝關節的部分，在大腿骨向內彎折的角度叫做雙髌角(Bicondylar Angle) [1]。雙髌角的角度在每個人身上都不盡相同，在國外有對於男性與女性的雙髌角做研究統計[7]，在男性的右腳雙髌角範圍為 3.9 度~11 度，平均角度為 6.371 度，左腳範圍為 3 度~11 度，平均角度為 7.348 度，女性右腳雙髌角範圍為 4 度~12 度平均角度為 8.209 度，左腳範圍為 5 度~12.5 度，平均角度為 8.729 度，從統計資料來看可以發現男性以及女性在骨架上就會發現有身體構造上不同的部分，詳細數值如表 3 所示。從以上得知平均角度多為 6~8 度，故本論文設計大腿部分機構往內設計彎折 6 度，主要因素為若往內彎折過大的角度，會導致腳底板過於靠近，在行走或者是平行移動時會有機構干涉的情況發生，故選擇角度為 6 度時腳底板間距為 5 公分，如圖 9(b)所示。

表 3、雙髌角角度統計表

	右腳		左腳	
	男性	女性	男性	女性
平均角度	6.371°	8.209°	7.348°	8.729°
角度範圍	3.6°~11°	4°~12°	3°~11°	5°~12.5°

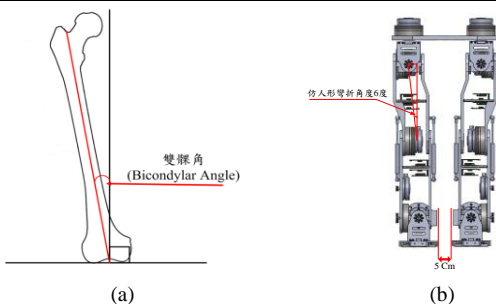


圖 9. (a)大腿骨與雙髌角和(b)仿人形彎折角度

### 3.3. 扭力緩衝設計

本論文設計的大型雙足機器人在膝關節處加裝氣壓棒，最主要功能為輔助膝關節所需承受的扭力以及輔助馬達輸出扭力。機器人通常要做行走或是其他動作時，總會有一個先做的動作叫做「蹲

下」，而在於蹲下時對於膝關節所承受的扭矩相對的較大，本論文設計加入氣壓棒來做為輔助，讓膝關節所需承受的扭矩相對的較少，並且能否輔助蹲下要起立時所需的扭矩，如圖 10 所示。在圖 10(a)中，所做的動作為蹲下，當大型雙足機器人在蹲下時，位於膝關節所承受的扭矩最大來自於上半身的重量，如圖中藍色箭頭的部分，當蹲的越低，上半身對於膝關節的有效力臂就會越長，所造成的扭矩就會越大，而這時位於膝關節的氣壓棒，會因為大型雙足機器人蹲下會有扭矩，相當於對於氣壓棒施力就會造成氣壓棒壓縮行程，氣壓棒主要是藉由內部兩個氣室壓力隨著空間變化產生的壓力差來做為升降伸縮動力，氣壓棒是使用高壓氣體近似液體的耐壓縮性來提供支撐力所以壓力極高，然後造成的壓縮量相當於能量儲存，所儲存的能量會在起立時釋放出來，如圖 10(b)中，大型雙足機器人要做起立的動作，膝關節要將上半身做抬升的動作，若蹲下時蹲得過低，對於膝關節造成的扭矩可能會超過膝關節所能輸出的扭矩，但是在蹲下時對於氣壓棒造成的壓縮量這時會有一個反向的力，稱為反力，這反力會和壓縮時的力量成反方向，如圖中紅色箭頭部分，進而可以輔助膝關節讓上半身抬升，進而達到扭力補償的功用。

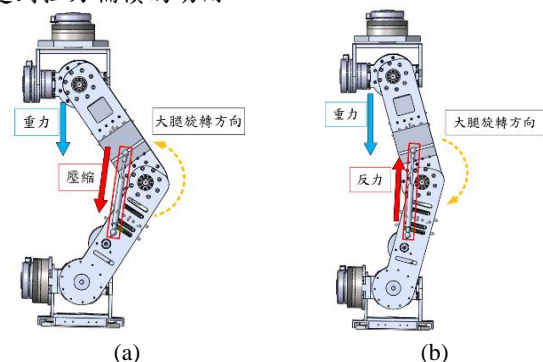


圖 10. 大型雙足機器人動作(a)蹲下時和(b)站立時

## 4. 電控設計

大型雙足機器人的機電系統為整合機器人各個電路系統，透過電控可以讓大型雙足機器人行走起來，從主控端的控制命令到馬達控制訊號，總共可分為四個項目：(1)工業電腦(IPC)、(2) FPGA (Field-Programmable Gate Array) 發展板、(3)馬達驅動板及電源規劃和(4) 磁旋轉編碼器。工業電腦負責進行步態的計算以及馬達命令發送；FPGA 發展板負責封包的編解碼、傳送與接收；馬達驅動器為本論文自行設計的馬達驅動板而電源規劃是用鋰電池搭配超級電容電池來供電給機器人使用；馬達則是使用無刷直流馬達並搭配磁旋轉編碼器回授角度，以下依續介紹。

### 4.1. 工業電腦

在工業電腦主要扮演的角色為主控端，為主要核心的部分，其會處理行走時的步態系統、操作人員使用的人機介面以及封包的傳送與接收模組，而其中在於步態行走系統需要龐大的運算量，故在工業電腦上的挑選上核心運算速度就相對的很重

要，運算速度不能太慢，其體積也是考量的重點不能太大或太重這些都是在設計大型雙足機器人是需要考慮進去的重點，綜合以上要求本論文使用研華(Advantech)公司所生產的 MIO-2261 做為大型雙足機器人核心使用，實體如圖 11 所示。

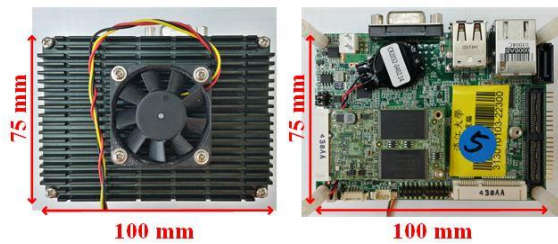


圖 11. 工業電腦

## 4.2. FPGA 發展板

本論文從工業電腦傳送封包以 RS-232 格式經過 FPGA 發展板在傳送至各個驅動器，以及從感測器回授的封包資訊從 TTL 方式接收做解析並包成封包以 RS-232 格式傳送至工業電腦進行運算。本論文使用的 FPGA 發展板為德源科技所生產的 Altera CycloneIII 系列 H3C120-V6 核心板，實體如圖 12 所示。

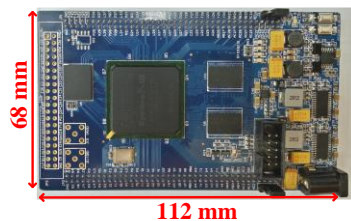


圖 12. FPGA 發展板

## 4.3. 馬達驅動板及電源規劃

馬達控制板是本實驗室自我研發的馬達控制板，其驅動器模板是參考 Texas Instruments 德州儀器(TI)公司所生產的 DRV8302-HC-C2-KIT 馬達驅動套件以及 Piccolo F28035 controlCARD 的軟體開發，最後整合成馬達驅動板，實體如圖 13 所示。

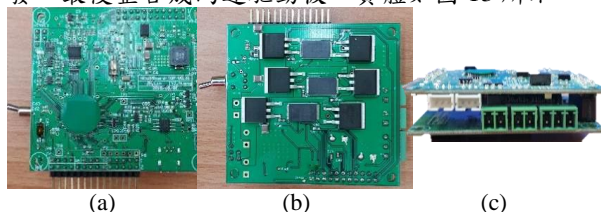


圖 13. 馬達驅動板：(a)上板、(b)下板和(c)側視

## 4.4. 磁旋轉編碼器

在大型雙足機器人中會使用到的感測器為磁旋轉編碼器，磁旋轉編碼器的功能為讀取馬達現在角度並回授給馬達驅動器進行控制。磁旋轉編碼器於使用時必須將一顆磁鐵安置在 IC 上方，當磁鐵轉動時磁旋轉編碼器會感應到磁場變化並輸出所感應磁鐵角度值，再由馬達驅動板進行接收。本論文所使用的磁旋轉編碼器為 AMS 公司所生產的 AS5145，如圖 14(a) 所示，解析度為 12-bit，同時

有數位位的串列輸出，也有 PWM 型的類比輸出。本論文為因應機構設計將 AS5145 設計成可安置在機構上的電路板，為直徑 13mm 的圓形，如圖 14(b) 所示。



圖 14. (a)AS5145 運作示意圖和(b)AS5145 電路板

## 4.5. 電源規劃

電源規劃採用獨立式電源系統放置，其分別給予左腳、右腳與系統控制端。電池分別為 36V 鋰電池、36V 超級電容電池與 12V 鋰電池。36V 鋰電池會與 36V 超級電容電池並聯放置於腰部上，其主要用途為穩定輸出供給的電流，分別給予左腳與右腳的 12 顆馬達，故左右兩隻腳需要兩顆 36V 鋰電池。而 12V 鋰電池主要供應給系統主控層的工業電腦與 FPGA 發展板，實體如圖 15 所示。



圖 15. (a)36V 鋰電池、(b)36V 超級電容電池和 (c)12V 鋰電池

## 5. 實驗結果

在動作呈現的部分，主要執行在行走時必須的重心偏移動作，要偏移到立足腳的重心才能讓抬起腳能夠抬起來達到行走的部分，並且在重心偏移的部分，搭配上本論文的大腿彎曲的設計能夠在更短的距離來達到重心偏移，來達到上半身晃動幅度更小更穩定的效果。如圖 16 以及圖 17 來展示偏移重心，圖 18 為蹲下起立動作，以實驗結果來看加入氣壓棒的功用有完整輔助膝關節的做站立動作。

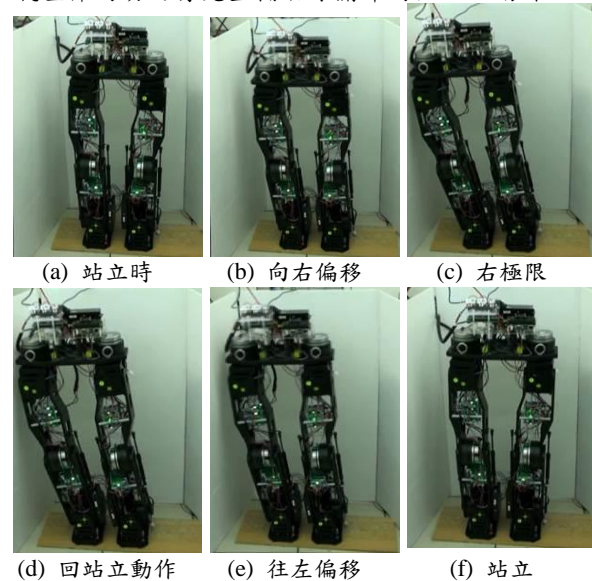


圖 16. 重心向右偏移

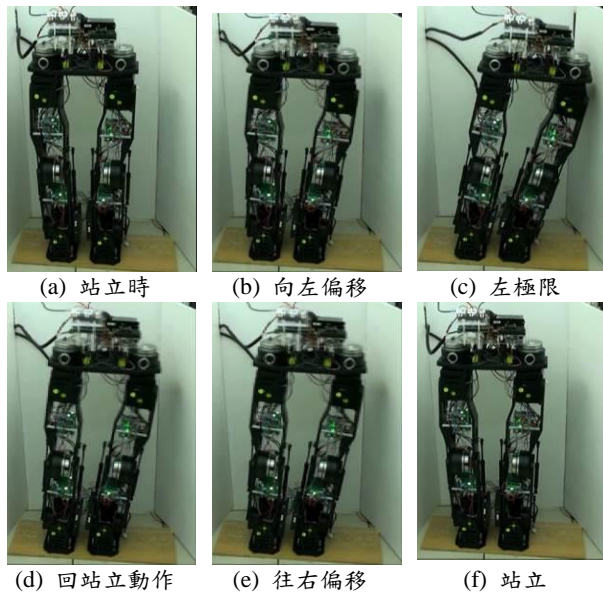


圖 17. 重心向左偏移

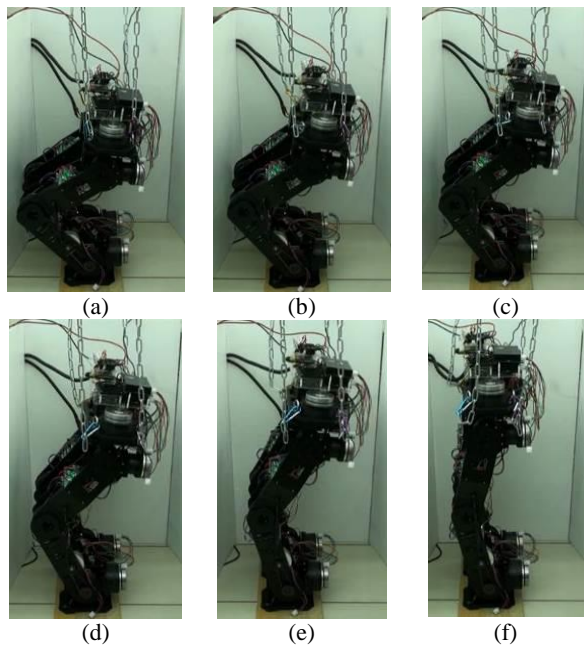


圖 18. 蹲下起立動作

## 6. 結論與未來規劃

本論文主要注重於機構部分加入仿人形的設計與扭力補償，在仿人形的部分加入了與人類相似的大腿骨彎曲設計，藉由這個設計在偏移重心時更加的迅速且偏移距離較短，以及加入氣壓棒的扭力輔助機構，讓機器人能夠順暢地蹲下後再站立，且能蹲的更低，不用擔心無法站立起來。測試大型雙足機器人的馬達控制上可執行本論文所下達的動作設計。

在本論文完成的大型雙足機器人上，在未來可改善的部分，在整體方面還可以再做重量的減輕來減輕致動器的負擔，以及馬達搭配減速機更多元化的搭配，未來可以朝向自行設計減速機與馬達的連結可以結合驅動板以及回授電路在內的更高整合度設計，再來就是驅動器的擺放位置以及挑選，在

不影響大型雙足機器人安裝與拆卸的方便性下可以考慮加入更多的傳動元件，例如螺桿、皮帶輪、傘形齒輪等來讓大型雙足機器人更為有變化性不單單只是馬達搭配減速機直接輸出，另外可以加入更多的回授訊號例如六軸力規、IMU、加速規等回授機制，再搭配行走動作來進行修正與平衡。

## 7. 參考文獻

- [1] A. R. Tilley, "The Measure of Man and Woman," *Henry Dreyfuss Associates*, pp. 16–17, Dec. 2001.
- [2] D. Wooden, M. Malchano, K. Blankespoor, A. Howard, A. A. Rizzi, and M. Raibert, "Autonomous Navigation for BigDog," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 4736–4741, May 3-8, 2010.
- [3] Festo, "Aerodynamic Lightweight Design with Active Torsion," Online Available: [http://www.festo.com/net/SupportPortal/Downloads/46270/Brosch\\_SmartBird\\_en\\_8s\\_RZ\\_110311\\_lo.pdf](http://www.festo.com/net/SupportPortal/Downloads/46270/Brosch_SmartBird_en_8s_RZ_110311_lo.pdf), 2011.
- [4] G. Nelson, A. Saunders, N. Neville, B. Swilling, J. Bondaryk, D. Billings, C. Lee, R. Playter, and M. Raibert, "PETMAN: A humanoid robot for testing chemical protective clothing," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 30, no. 4, pp. 372–377, May 2012.
- [5] K. Graichen, S. Hentzelt, A. Hildebrandt, N. Kärcher, N. Gaißert, E. Knubben, "Model-based analysis and motion planning for the BionicKangaroo," *Automatisierungstechnik*, vol. 63, iss. 8, pp. 606–620, Aug. 2015.
- [6] M. D. Waard, M. Inja and A. Visser, "Analysis of flat terrain for the Atlas robot," *RoboCup Iran Open International Symposium and the 3rd Joint Conference of AI & Robotics*, pp. 1-6, 2013.
- [7] R. J. Sharma, S. K. Sharma, M. Jehan, A. Sastya, "Sexual dimorphism of the femoral bicondylar angle in Gwalior," *International Journal of Healthcare and Biomedical Research*, vol. 2, iss. 4, pp. 38–45, Jul. 2014.
- [8] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2478–2483, 2002.

## 8. 致謝

本研究由上銀科技股份有限公司 (HIWIN TECHNOLOGIES CORP.) 贊助。