中華民國第53屆中小學科學展覽會
作品說明書

高職組　機械科

第一名
最佳創意獎

090906

步行機構綜合設計原理之研究

學校名稱：國立嘉義高級工業職業學校

作者：	指導老師：
職二 陳宣翰	黃永國
職二 張晏嘉	高文雅
職二 羅武元	

關鍵詞：平行四連桿機構、固定滑塊機構、
雙足步行機構

得獎感言

一分耕耘，一分收穫

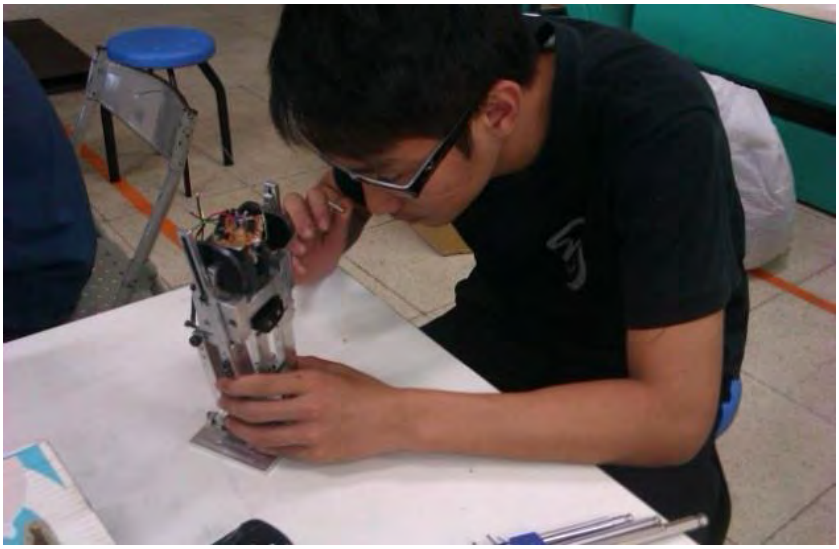
參加此次科展每個選手都是做足了準備，我們遇到來自不同縣市的選手，也從各個職類中發現不少驚奇，更從其他選手的報告中得到了無比的震撼。看到各個選手的作品後也激起我們腦中一些想法，透過參考別人的作品使我們對自己的作品產生了無限想像的空間及未來的發展，進而使我們的作品更加完整。

製作此次科展的過程中必然得付出不少時間，常常得利用放學後的時間及六日來討論及製作我們的作品，其中不免會遇到瓶頸使人懊惱、想要放棄，甚至開始懷疑自己是否真的有能力去完成這項研究，在面對這些問題時我們發現唯有抱持著一股熱誠將我們的作品視為自己的生命並耐心地一步步將那一團糾結在一起的結一個個打開，在一次又一次的遇到問題與解決問題的過程裡，無形之中增加了我們的實力以及彼此之間的向心力。參與這次的科學展覽不僅讓課本中所學到的知識得以運用於實際上同時也學到了不少課本上所學不到的知識，以及競賽時與評審們對談中增加了我們的台風與表達能力，更讓我們清楚了解到我們作品的問題和未來可以精進之處，讓我們對與此次研究報與更大的信心及熱誠，持續前進。

科展的製作過程中我們皆積極參與製作與討論，我們認為唯有親自參與全程的製作才能對自己的作品有清楚的了解，並在與評審的問答能應答自如而且信心十足，掌握作品的重點不至於答非所問，始報告的過程中較為精闢完整。

運用電腦軟體進行零件設計、機構模擬分析，以及作品說明書撰寫。

實際操作車床、銑床加工完成零件。



將完成之零件組裝、測試、調整。

摘要

人類是地球上極少能用雙足自由活動的生物之一，人類的步行動作優美，肌肉及骨骼可以做出細微的動作，在高職二年級的課程中有一門機件原理的課程，專門介紹各種機械結構的運作原理及構造形狀。因為機械結構具有動作確實、成本低、壽命長以及可做出一個固定循環的動作輸出，在設計方面機械結構又是可做成不同串聯及並聯的組合，來符合我們的需求。因此本專設計出二種不同的步行機構設計，來做為步行機器人中的雙足的運行軌跡，並分析二種機構在步行運動時的特點。經由機構的設計、製造組裝及測試的過程讓我們學到課本上所學不的實作經驗，印証了課本中的機構知識，達到學以致用的目的。

壹、研究動機

就讀機械科的我們，二年級的機件原理課程當中，下冊第十四章為構連桿機構。連桿，用來與其他機件相連接，以傳達運動或力量的機件。兩個連桿連接在一起，可以構成一對偶(pair)，而由多個對偶組成的一種運動連鎖系統，稱為「連桿組」，也稱為「運動鏈」。

這麼多連桿機構當中，我對「急回機構」及「平行四連桿」特別的感到興趣。剛好想到機電整合的課程當中，提及雙足機器人用到許多伺服馬達的串連與控制單元，才能完成一個雙足步行的動做循環，我就在想說，既然他有固定的運動機構，機構設計上不能簡簡單單的連桿組就好嗎？一定運動軌跡，不常運用連桿組去完成嗎？

與老師討論過後，我們決定以這樣的主題，以速回機構為基礎，配合其他機構來製作本次的專題。探究自己是否能運用速回機構，搭配其他連桿機構，來完成我們不需要用到伺服馬達的「步行機構」，達到雙足步行的動作，並比較二種不同的機械結構在步行機構應用上的特點，最後達到步行的功能。

貳、研究目的

本專題的研究目的，在使用一組機構的串並連結合，來做到雙足機器人在運動時的步行動作，現行的伺服馬達雙足機器人的步行動作，須使用最少 12 個以上伺服馬達串聯來模擬腳部及膝蓋的動作，由於馬達數量多在控制上相當複雜，因此使用機構來達到雙足機器的步行動作可以達到降低成本、控制容易、連桿結構的機械動作優美等優點。

因此本專題使用高職現有的機件原理教材中所介紹的速回機構、固定滑塊機構、凸輪、平行四連桿機構等，利用機構的串聯及並聯的結合來做成二個雙足步行機構，使步行機構達到雙足機器人步行的目的。

參、文獻探討

步行機構是用來模擬人類走路的機構，形式有很多種，以目前的方式大多使用伺服馬達串聯來模擬步行機構中的各個關節，使用伺服馬達的優點是可以做出比較細緻的動作，步行機構在運動上也比較靈活，但是要完成步行動作事先必須把各個伺服馬達的旋轉角度記憶在微電腦上，由微電腦根據使用者的指令來轉動伺服馬達做到步行的動作。[2]

動物和人類都利用了類似直立的棒--就是腳來做為移動的工具。這就所謂的步行。傳達到這個棒的動力媒介是借用體內的連桿機構而行事的。還是生物體所具備特有的運動形態，這種步行機構特別適用於凹凸、泥海路面(未整地路面)上的行走。平坦的路面白不在話下，山徑的行走，游泳也沒有任何問題。行走的速度雖然不怎麼快速，但是對於環境的適應性卻遠比輪形裝置為強大。

具有「自走性」的作業機器人，由於裝備有腳的機構，可以想像得出生產作業上的各種形態將會有的巨大變化。目前還是以被利用在沒有道路的 山岳叢林地帶為最適當。

現在步行機構的腳數，有各種腳數的支撐，以靜態來看 3 點支持是最低的限度。因此若加上動作時則首先考慮到的將是 6 支，在機械動物(mechani- cal animal)等裝置裡最多這種實施例。如果步行中不會改變重心位置時，則「棒」 先端的運動軌跡應該 D 驅動最適當了。

而雙足步行的方式則最為困難。由於具備動的平衡之故，同時必須配用自動控制系統。人們以兩腳行動時下意識裡已執行了各種的控制活動,但是機器人之情形,則必須隨時檢出、修正、預測，達到控制正常步行的目的。[2]

在機構學上，四連桿機構中有一種稱為 D 驅動的機構設計可以用來模擬，D 驅動顧名思義為連桿的輸出為英文字 D 的形狀，D 的形狀和人步行的腳掌軌跡類似，但是在 D 驅動的路徑中，直線部分占整個路徑的時間不到 1/2，所以 D 驅動用在步行機構上必須使用四組以上的機構才不致於使步行機構跌倒[2]。

雙足機器人或廣義的人形機器人的種類大致上可分為如真人般大小的人形機器人以及小型的人形機器人兩大類。小的人形機器人的身高通常低於 50cm、重量少於 3kg，其致動器大都選用輸出力矩為 10~20 kg-cm 的伺服機。[4]

二足步行機器人的平衡與步行控制為發展可如人類自由行走之人形機器人的先決條件。二足步形機器人為多自由度機構複雜非線性而且大多屬於欠缺致動器的控制系統而且一個步行週期存在多個不同動態模式以及需與環境進行碰撞接觸。二足步形機器人步行時之動態過程為單腳支撐期及雙腳支撐期交替互換之混合式動態系統。單腳支撐期時一腳為支撐腳而另一腳則擺動前進至著地；然後進入雙腳支撐期。雙腳支撐期發生於當擺動腳著地與地面碰撞之瞬間；通常假設擺動腳著地時既不會反彈也不會在地面上滑動。雙腳支撐期間兩腳也一同互換角色。[5] [6]

肆、研究過程與方法

一、研究設備及器材

研究設備及器材

(一)車床

(二)切削中心機

(三)CNC 車銑複合機

(四)鑽床

(五)刀具及量具

(六)軸承

(七)鋼珠

(八)馬達

(九)Solidworks 及 Mastercam 軟體

使用材料

項次	設備名稱	規格	備註
1	固定板	鋁 6061，依尺寸加工	
2	凸輪	pom，依尺寸加工	
3	連桿	pom，依尺寸加工	
4	滑塊	鋁 6061，依尺寸加工	

二、步行機構- 機構設計策略

由文獻的分析，使用機構的運動來做到步行動作，必須考量機構末端輸出的軌跡，軌跡會影響整個機構重心的位置,及步行機構腳掌著地的時間,所以D驅動[2]是一個很好的選擇，但是步行機構只用二隻腳，且腳掌著地的時間比值必須大於整個步行動作循環的 1/2 以上，所以必須使用數個機構的組合來到這個目標。

在機械科二年級的機件原理課程中有提到速回機構，速回機構是一個可以使機構的末端輸出去回的點行相同；但是去回的時間不同的特點，而且去回的時間比值可以由速回機構中各連桿的比例來調整，這一個優點剛好符合上述步行機構中腳掌著地及懸空在時間分配上不同的特點。因此我們就以速回機構為基礎，來設計二足步行機構的機械結構。

（一）步行機構腳掌位置之運動軌跡及重心位置分析

1. 步行機構，對於步行機構在腳掌運動軌跡，位置關聯性與重心位置互有相關。由於步行機構在做步行運動時左右腳必須做到一定的軌跡動作就是抬腳、前進等來達到重心往前移動，造成就身體前進，但是在抬腳時，重心位置必須轉移到接觸地面的腳上，才不會造成傾倒。而且雙腳在接觸地面及懸空的時間比例要大於 1 來確保隨時有腳和地面接觸。

左右腳運動軌跡之關聯性：

當右腳在 $\overline{A_R B_R}$ 時，左腳必須在圓弧 $B_L C_L A_L$ 上。如圖 1(a)所示。

當左腳在 $\overline{A_L B_L}$ 時，右腳必須在圓弧 $B_R C_R A_R$ 上。如圖 1(b)所示。

左右腳時間之關聯性：

一個往前走一步的循環中，$\dfrac{\overline{A_R B_R}}{\text{圓弧}A_R B_R C_R}$ 的時間至少大於 1。使左右腳掌能在任何時間點保持與地面接觸，才能維持重心在水平方向，不至於變動太大。

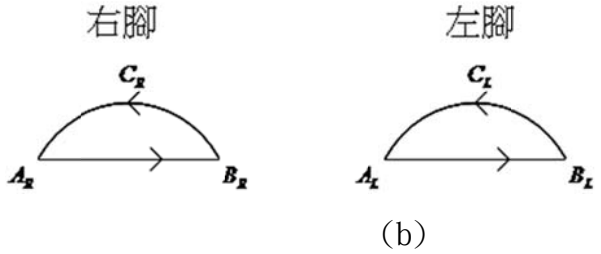


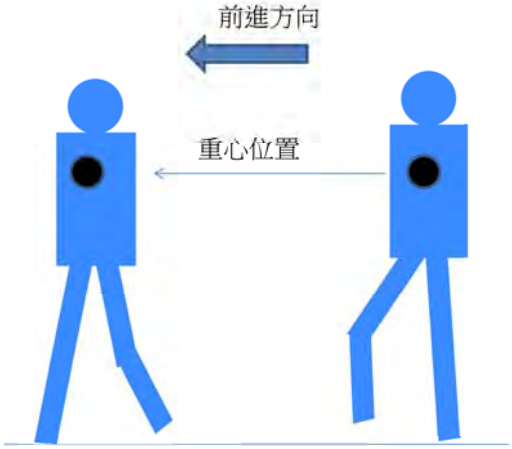
圖 1 步行機構左右二腳的步行軌跡

分析上述的軌跡及步行時腳部著地及懸空循環在時間上的差異，在機構結構中使用速回機構是一個很好選擇。

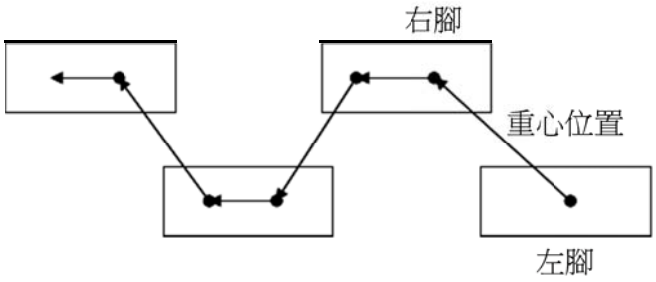
2. 重心位置：

探討步行機構的重心位置可分為二個方向來看，一個是由側面來看步行機構行走時重心在高度方向上儘量維持水平移動，上下起伏不要太大，若起伏太大可能造成往前或往後傾倒(如圖 2)；另一個是從俯視方向來看重心位置，重心位置必須配合左右兩腳何時和地面接觸，並把重心調整到和地面接觸腳的上方。使得重心落於和地面接觸的腳的面積上。如果沒有落於和地面接觸的腳的面積上時，則會往左右兩側傾倒。

由於機器人重心必須落在和地面接觸的腳的面積上，而雙腳和地面接觸位置不相同，因此我們藉由平衡機構，使得機器人的重心，在左腳著地時位於左腳、右腳著地時位於右腳。



側視圖(a)



俯視圖(b)

圖 2　重心位置變化 (a)側視圖　(b)俯視圖

(二) 在上述的討論中，步行機構在行走時需考慮腳掌的位移軌跡及重心在前進高度及左右水平方向的位置，而位移軌跡及重心位置又必須有關聯性，因此在機構的設計上，我們選用速回機構做為基礎，再並聯及串聯一個固定滑塊曲柄機構、平行四連桿機及及凸輪機構來構成二種步行機構腳部的位移軌跡。

速回機構具有相同的位移路徑，但是可以用曲柄及連心線的長度關係來控制機構輸出衝程來回的時間比值。

如圖 3 所示，當曲柄在 BC' 位置以順時針方向等速旋轉 θ_1 角而達 BC 位置時，搖桿則由 AE' 擺至 AE，帶動滑塊由 R' 移至 R。當曲柄再轉 θ_2 角時，搖桿回擺至 AE'，滑塊復由 R 回至 R'。

因曲柄所旋轉之角度與所花費時間成正比，即 $\frac{\text{行程時間}(t_1)}{\text{行程時間}(t_2)}=\frac{\text{去程角度}(\theta_1)}{\text{回程角度}(\theta_2)}$ (1)

所以去程及回程時間即及可設定為機器腳掌在行走時與地面接觸的時間及抬起懸空的時間。

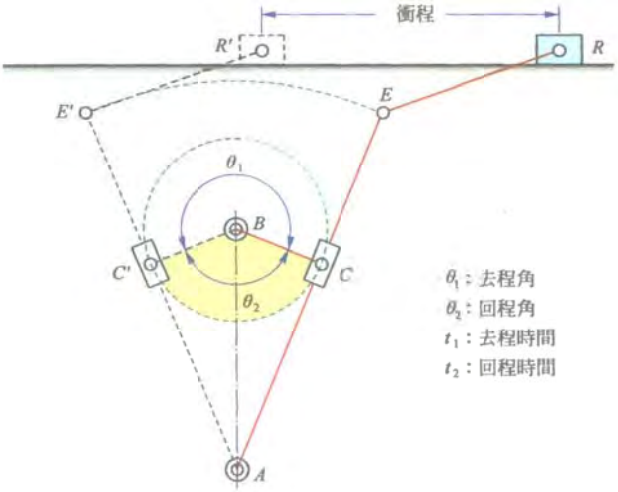


圖 3 速回機構(迴轉滑塊機構)[3]

（三）固定滑塊曲柄機構：

使速回機構的輸出端作為往復運動的軌跡，做為步行機構行進時腳掌的運動軌跡，我們使用固定滑塊機構來約束速回機構輸出端的運動軌跡。如圖 5 所示為一固定滑塊曲柄機構，圖 4 中滑塊 4 為固定，當曲柄 2 迴轉時，滑槽 1 會因滑塊的拘速而做直線的來回運動。 當圖 4 中的曲柄 2 和上述速回機構的搖臂結合，連桿會做來回擺動而件 1 也因件 2 的擺動而作去回直線運動，而件 1 去回運動的時間比為速回機構中 θ_1 ： θ_2 的比。在我們速回機構的設計參數中去程與回程之角度比 θ_1：θ_2 ＝102.636°：77.364°，因此去程與回程之時間比也是 102.636：77.364。

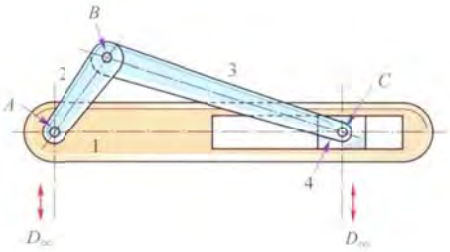


圖 4 固定滑塊機構[3]

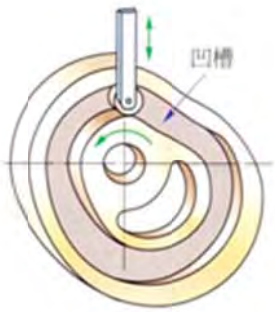


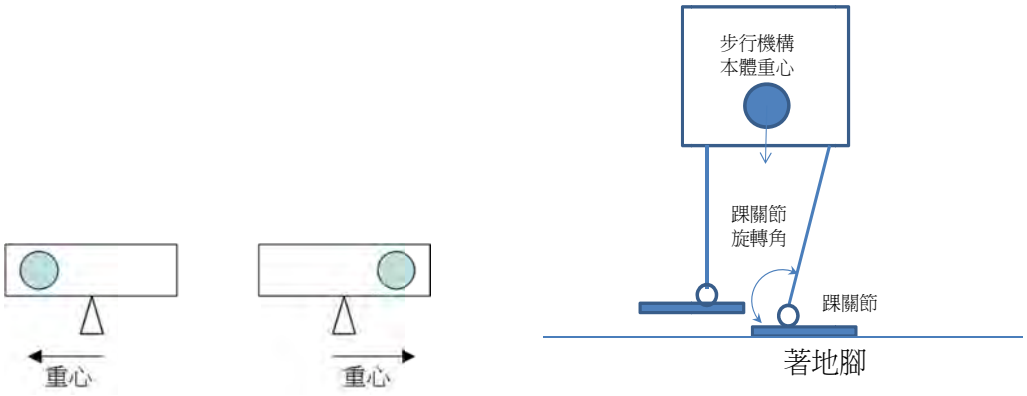
圖 5 確動面凸輪[3]

（四）凸輪機構

本專題利用凸輪機構去抬高上述件 1 滑槽在回程之路徑，使得去回路徑分開，而達到我們要求的軌跡。在這次的專題中我們選用確動面凸輪來完成這個工作。確動面凸輪，在平板之正面上，刻製曲線凹槽，槽寬與從動件之滾子直徑相同，滾子從動件嵌入槽溝內，與凸輪作相應之運動如圖 5 所示。

（五）平衡機構

用以轉移重心，人行走時，腳部肌肉能不斷轉移重心使得重心落於著地腳，步行機構行走時，與人一樣，需要使得重心落於著地腳已達平衡，因此我們藉由平衡筒來達到這樣的目的。圖 6(a)為平衡筒示意圖，利用平衡筒內之銅球的位置來使得機構重心發生轉移; 圖 6(b)為使用踝關節之旋轉角模擬人類行走時的情況來轉移重心位置，使重心落於著地腳掌上。



(a) (b)

圖 6(a) 利用平衡筒來轉移重心位置 6(b)利用踝關節旋轉角轉移重心

（六）機構組成

以上對於步行機構，在步行方式及名稱機構的討論後，我們使用固定滑塊運動機構及平行四連桿機構來做為步行機構的基礎，進行細部設計，設計概念如流程圖 7(a)及 7(b)所示。圖 7(a)為使用固定滑塊裝置做為步行的運動軌跡的基礎;圖 7(b)為使用平行四連桿機構做為步行的運動軌跡的基礎。

1. 左右腳為同一個動力來源，方便設計，左右對稱。
2. 速回機構可以控制步行機構腳掌著地及懸空時間的比值（須大於 1）。
3. 固定滑塊機構及平行四連桿機構可以使腳掌在著地後以直線運動。除了可以使步行機構前進外，直線可以使機器人在動力方向（Z 軸），可以保持水平運動。
4. 利用確動凸輪來抬升腳掌懸空軌跡，在平行四連桿的機構中使用凸輪來修正四連桿浮桿的運動軌跡。

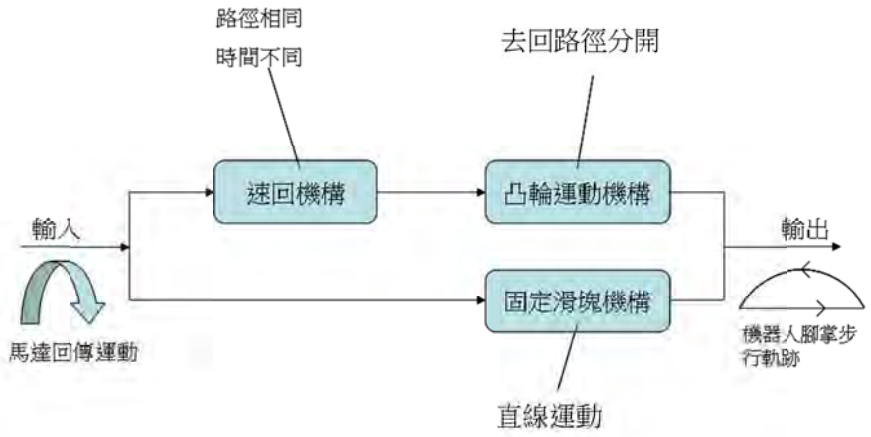


圖 7(a)　固定滑塊型步行機構設計構想流程圖

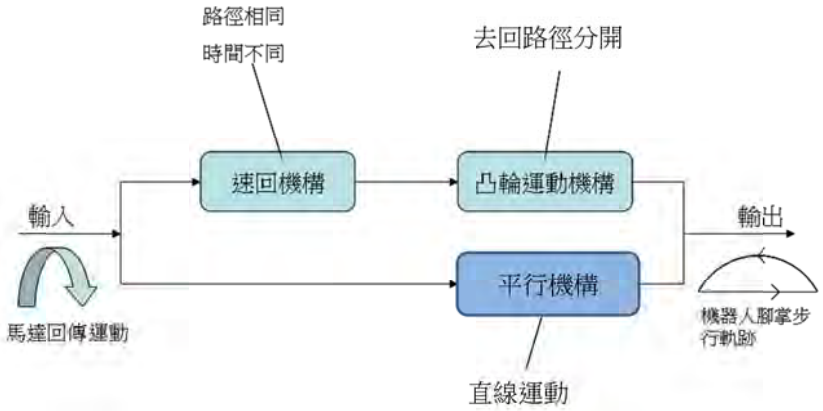


圖 7(b)　平行機構型步行機構設計構想流程圖

三、固定滑塊型步行機構零件細部設計

（一）馬達及驅動

決定馬達減速機規格，採用雙軸輸出，12V，100rpm。下為我們使用之馬達規格如圖：

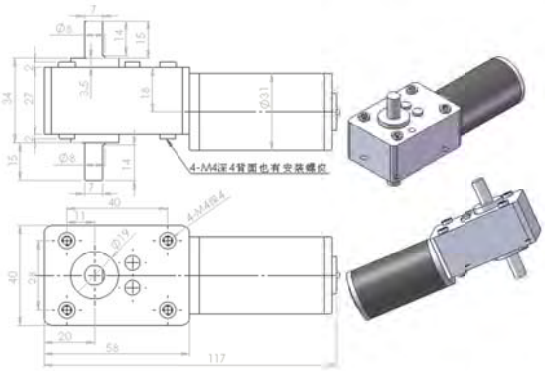


圖 8　馬達規格

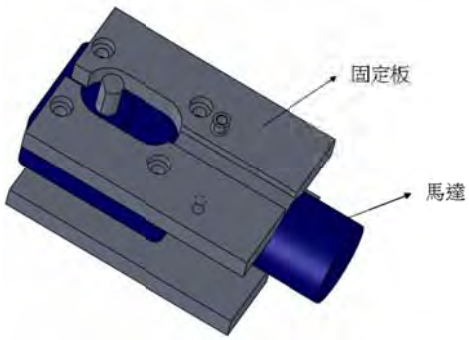


圖 9 固定板及驅動馬達

（二）固定板

功能：固定馬達，提供旋轉支撐及各桿件的機架及凸輪從動件的滑動軌道。

（三）搖桿

搖桿扮演兩個角色。一個為速回機構的搖桿，另一個為固定滑塊機構的搖桿。速回機構，可以提供搖臂來回的時間比值不同，而連帶推動。

（四）曲柄＋凸輪＋搖桿

在本專題中，我們把曲柄及凸輪設計在同一個機件上，因為曲柄的旋轉角度及凸輪的曲線位置有相關，凸輪的曲線控制步行機構在行走時腳掌懸空的位置，

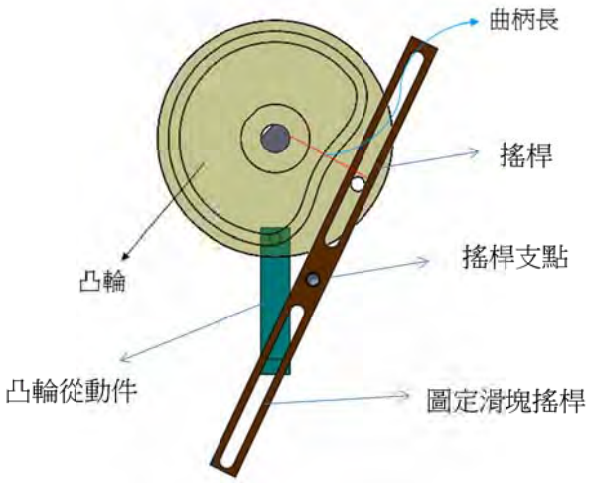
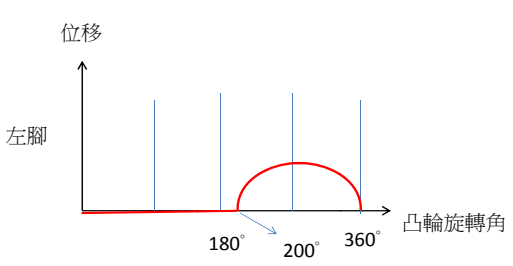


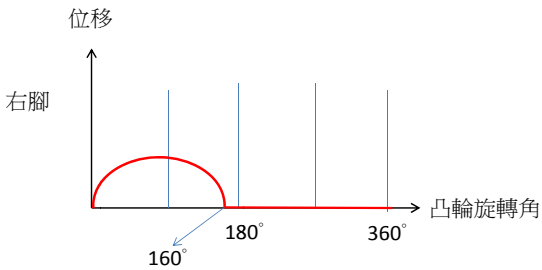
圖 10 曲柄、搖桿凸輪及凸輪從動件相關位置設計圖

在凸輪的設計上，考量從動件需要有抬腳的動作，所以採用確動凸輪。凸輪的運動曲線如圖 11 所示，圖中顯示左腳在凸輪旋轉到 200 度時開始運動，在 280 度時到達最高點，到 360 度時又回到原點。

我們將時間位移圖畫成凸輪的工作曲線如圖 11 所示，這個曲線決定左右二個腳掌抬起的時間點及抬起的高度，在本專題中，抬起的高度設定為 15mm，在時間點上左右二腳的時間點必須要錯開，一個在凸輪旋轉角的前半段(0°～180°)一個在凸輪旋轉角的後半段(180°～360°)，這樣設計的步行機構在步行時才不致於跌倒。

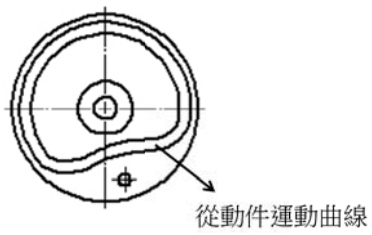
由於凸輪的工作曲線也決定步行機構在步行時重心在高度方向的位置，若重心在高度方向的位置變動愈少，步行機構就愈穩定，重心在高度方向位置是由左右二腳交替在保持，工作曲線在位移量為 0 時即代表該腳掌和地面接觸，由凸輪來控制腳掌的高度方向位置有一個很大的優點就是重心在高度方向的位置可以保持一定。

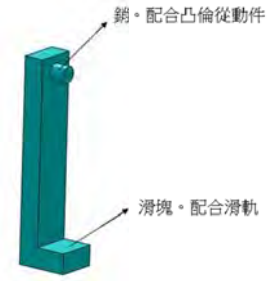




(a)

(b)





(c) (d)

圖 11 (a)(b)左右腳凸輪位移曲線時間圖及運動曲線

(c)確動凸輪工作曲線 (d) 凸輪從動件(下端配合固定滑塊)

（六）凸輪從動件及滑塊

凸輪從動件的目的在配合凸輪作出步行機構的軌跡，而滑塊的末端可以配合滑軌。

（七）平衡筒重心調整機構

平衡筒的目的在幫助步行機構在單腳站立時，或是左右腳分別接觸地面時可以使重心落於接觸地面的腳掌上。平衡筒的構造如圖 12 所示，我們利用一個鋁管，筒的二邊分別安置一個磁鐵，磁鐵 S 極向下，中空的筒內置一個銅球，銅球會因平衡筒的傾斜而左右邊滾動；當凸輪上的磁鐵轉到平衡筒的下方時，因極性的關係而推動平衡筒上移，此時銅球滾向著地腳掌的一邊。凸輪上的磁鐵安排的位置在凸輪從動件要抬起腳掌的位置。

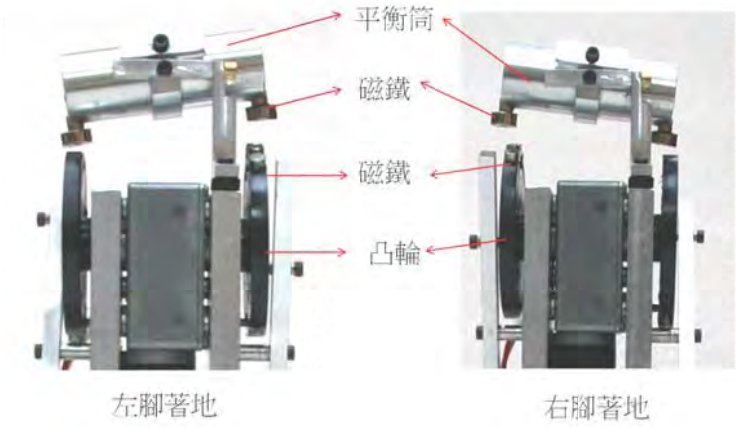


圖 12 平衡筒重心調整機構

四、機構模擬分析

在零件細部設計後，利用繪圖軟體進行組合，並使用繪圖軟體中的模擬功能進行運動軌跡模擬分析，以確認我們所設計步行機構可以運作以及達到我們所需的步行軌跡，如圖 14 所示，由軟體的模擬可以看出腳掌軌跡，但是軌跡在空間中提起的高度大小，必須再分別模擬。初步的軌跡可以看出二個有在空間中畫出一個弧形曲線，這個弧形曲線是前節凸輪設計中的位移曲線加上固定滑塊的運動所組成。這個軌跡和圖 11 中我們所設計的凸輪工作曲線一致，所以由軌跡圖可以看出步行機構的左右腳確實可以抬起。而且由步行機構模擬運行軌跡的結果可以証實，我們所設計的步行機構的腳掌運動軌跡是可經由凸輪的工作曲線來控制。

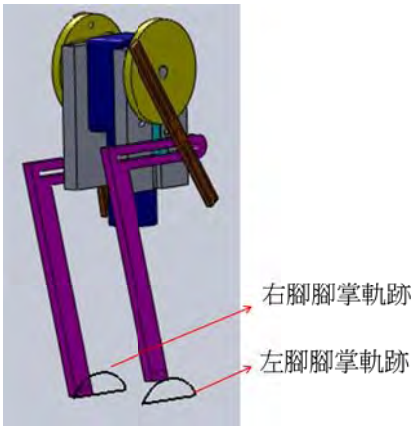


圖 14 機構運動模擬軌跡

左右腳運動軌跡合成及時間分析：

將步行機構左右二腳分別模擬運動時在空間的位置如圖 15 所示，從圖 15 可以看出左右二腳的運動軌跡，一個步行的循環約為 0.75 秒，懸空及觸地的時間比約 為 1:1.25，這個比值符合當初的設計及有速回的效果，腳掌抬起的高度約為 14mm。在圖中顯示，左右二腳在懸空及觸地有互相交替的效果。也可以証實速回機構確實可以使步行機構在動作時去回的時間可以分配以達到我們的要求。

圖 16 為左右二腳在進行一個步行循環時機構運動模擬，從左腳著地右腳懸空開始(圖 a)，右腳往前邁出去著地(圖 b)再左腳抬起右腳著地(圖 c)後，完成一個步行循環。

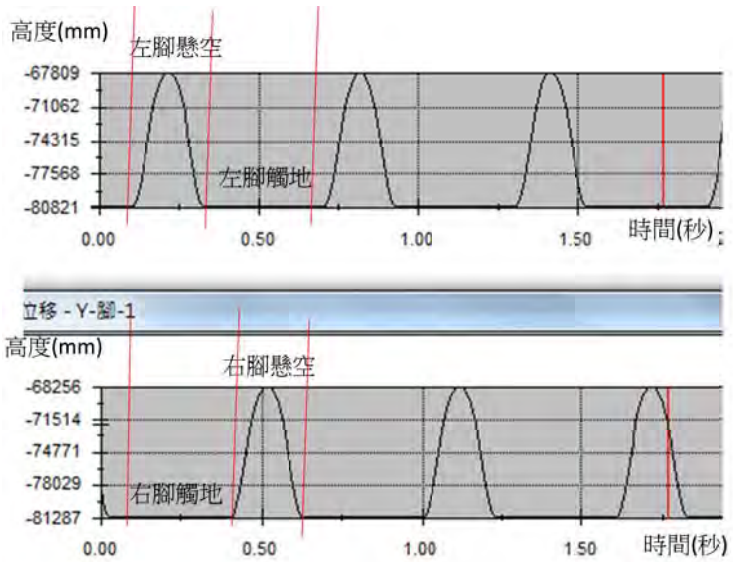
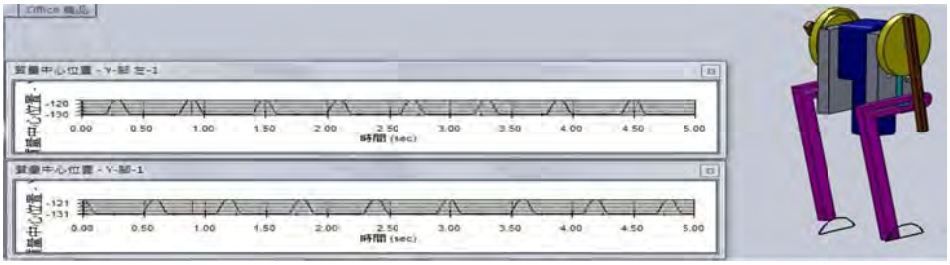
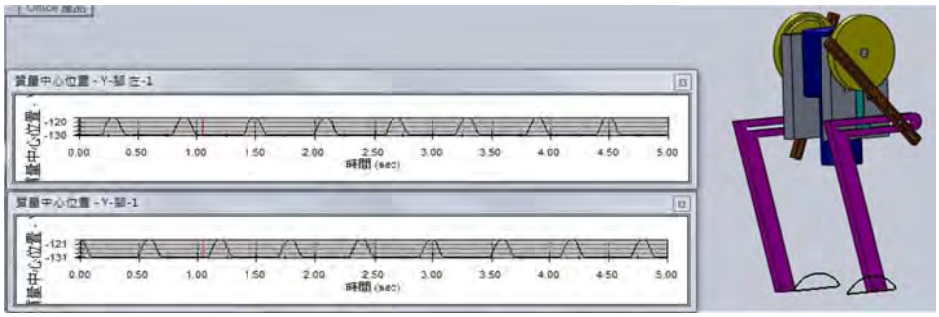


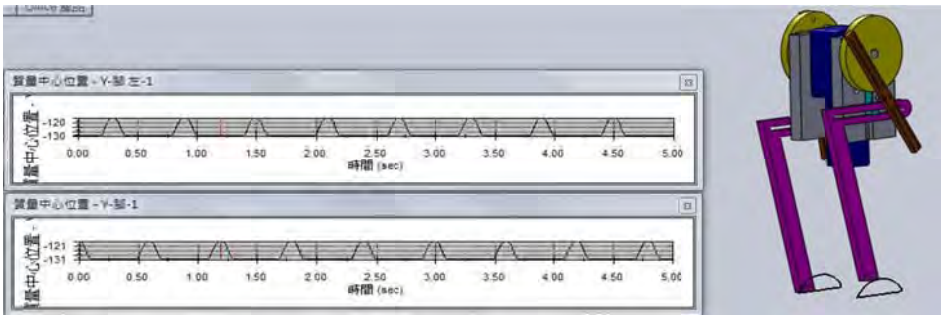
圖 15 左右腳掌的時間及高度方向位移圖



（a 圖）左腳→著地；右腳→懸空。



（b 圖）左腳→著地；右腳→著地。



（c 圖）左腳→懸空；右腳→著地。

圖 16 步行一個步行循環運動模擬

五、固定滑塊型步行機構實驗測試

（一）機構組裝及測試

將固定滑塊型步行機構的各個零件按設計圖加工後，組裝完成如圖 17 所示，組裝完成後進行測試。整個實驗架構如圖 18 所示，電源部分由一個 24V 的電源供應器供給再連接一個直流電源馬達驅動器，這組電馬達驅動器含有一個可調整的變頻電路，可以控制 12V 的輸出功率，再串接一個馬達正反轉控制電路，如此可次控制馬達的轉速及正反轉。

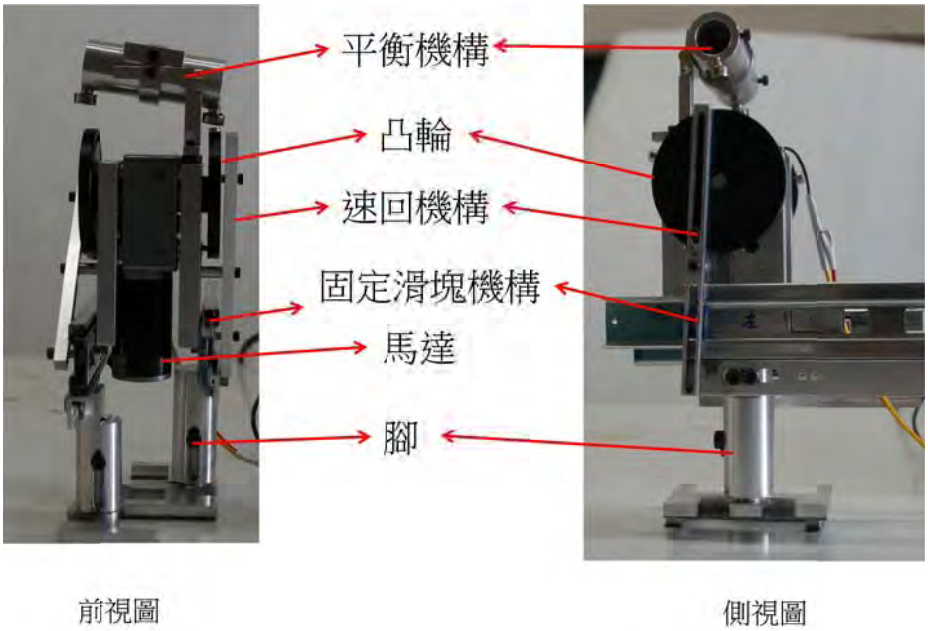


圖 17 步行機構組裝完成圖

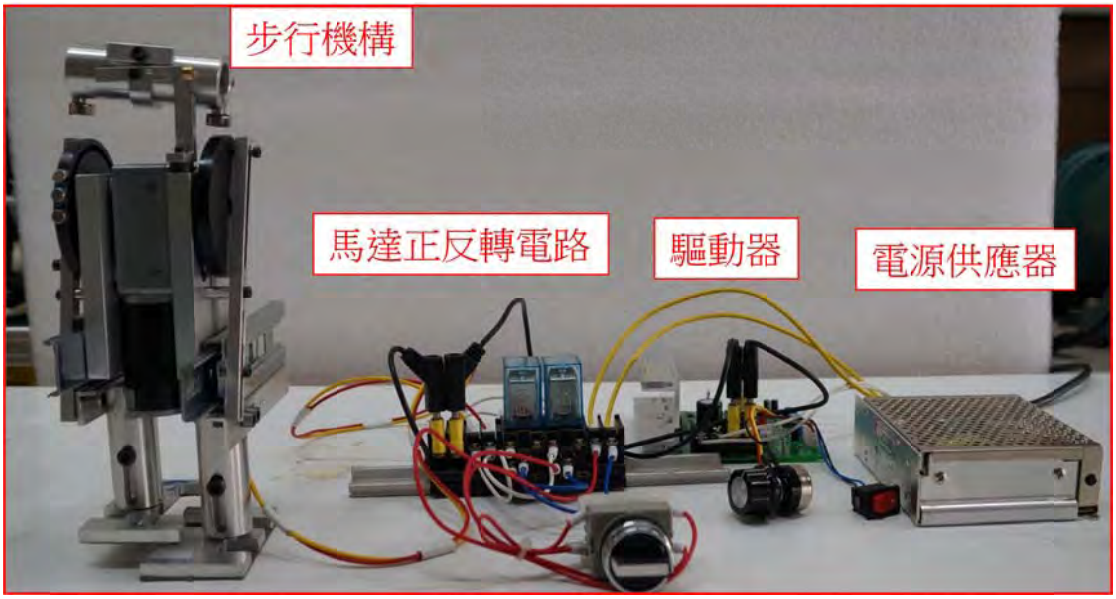


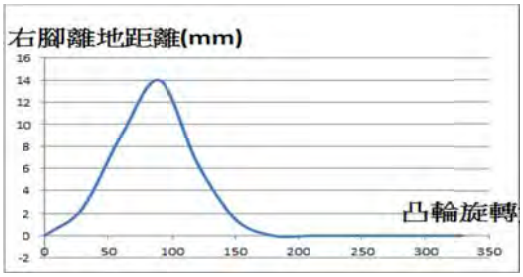
圖 18 步行機構測試架構

（二）固定滑塊型步行機構測試結果與討論

我們將固定滑塊型步行機構接上電源進行步行實驗及量測相關數據,結果如表1所示 ，分別將凸輪旋轉角及腳掌離地距離就可以畫出腳掌的移動軌跡，如圖 19 所示，由圖 19 我們可以看左右二腳有交替著地及懸空，所以可以步行前進，而平衡筒也有傾斜到著地腳掌，使重心轉移到著地腳掌上；整個機構重心在前進的高度方向變化在 2mm 以內，表示步行機構前進時重心除了左右轉移之外，在高度方向不致於變化太大而造成不穩定。表 1 各項數據顯示都有符合當初設計時的條件。

左凸輪旋轉角	右凸輪旋轉角	右腳離地距離(mm)	左腳離地距離(mm)	平衡筒傾斜位置	重心高度位置(mm)
180°	0	0	0	左	168
210°	30	2.5	0	左	168
240°	60	9	0	左	168
270°	90	14	0	左	168
300°	120	6.5	0	左	168
330°	150	1.5	0	右	168
0°	180	0	0	右	170
30°	210	0	2	右	170
60°	240	0	9	右	170
90°	270	0	12.5	右	168
120°	300	0	6	右	168
150°	330	0	1.5	左	168

表 1 凸輪旋轉角及各項數據



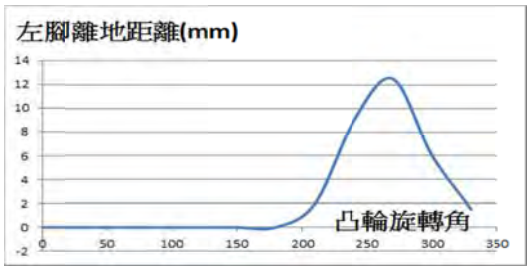


圖 19 凸輪旋轉角及腳掌位置關係實測圖

1. 步行循環測試及高度方向重心變化:

使用攝影機連拍功能拍攝步行機構的步行運動如圖 20 所示,每張影像的間隔為 1/6 秒，整個步行循環為 2 秒。第 1 張為右腳抬起往前邁出；第 5 張為右腳著地左腳準備抬起；第 8

張為左腳抬到最高點；第 12 張為左腳著地右腳準備抬起。第 1 張到第 12 張為一循環，從圖中的參考線來比對凸輪的中心點可以看出，重心在步行機構的運動期間在高度方向並無明顯變化，因為重心不會因步行機構在行走時忽高忽低，所以不會往前或往後傾倒。

這個結果和當初我們在機械設計時的想法是相同的，由於凸輪工作曲線我們是可以自行因腳掌位置來決定，這種設計方式可以增加步行機構的穩定性。

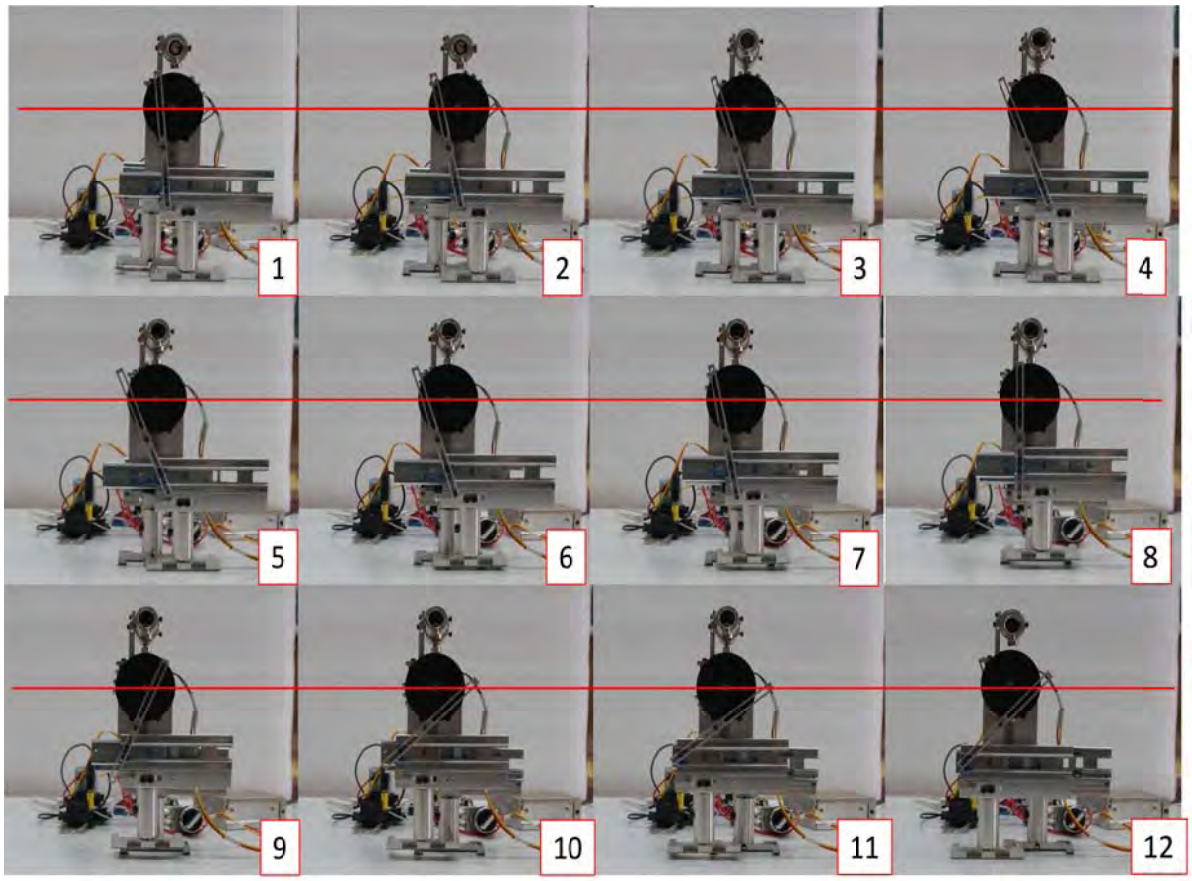


圖 20 高度方向重心變化連拍

2. 步行測試及水平方向重心變化:

水平方向的重心變化，最主要觀察重心平衡機構的動作及運作是否正確，以及步行機構是否會往左右兩邊傾倒。整個步行循環如圖 21 所示。由圖中編號第 11 及 12 張影像顯示，平衡筒確實由所動作，而且動作的時間點正確，當平衡筒往左腳傾斜時，負責重心轉移的銅球往左邊移動，重心即偏向左邊，此時右腳準備抬起，第 13 張影像即顯示右腳抬起的動作。第 15 及 16 張影像即顯示平衡筒往右邊傾斜，此時右腳已著地，第 17 張即左腳抬起的影像。

另外，固定滑塊型步行機構在水平方向的運動實驗中由一連串的連續影像及圖中的參考紅線，我們可以看到一個現象，步行機構會因抬起右腳而整個機構往右邊變形，抬起左腳而整個機構往左邊變形，經觀察後可以判定為固定滑塊機構中的軌道為鋼珠及滑軌的結構剛性不足所造成，這個問題可經由加強軌道的剛性來改善。

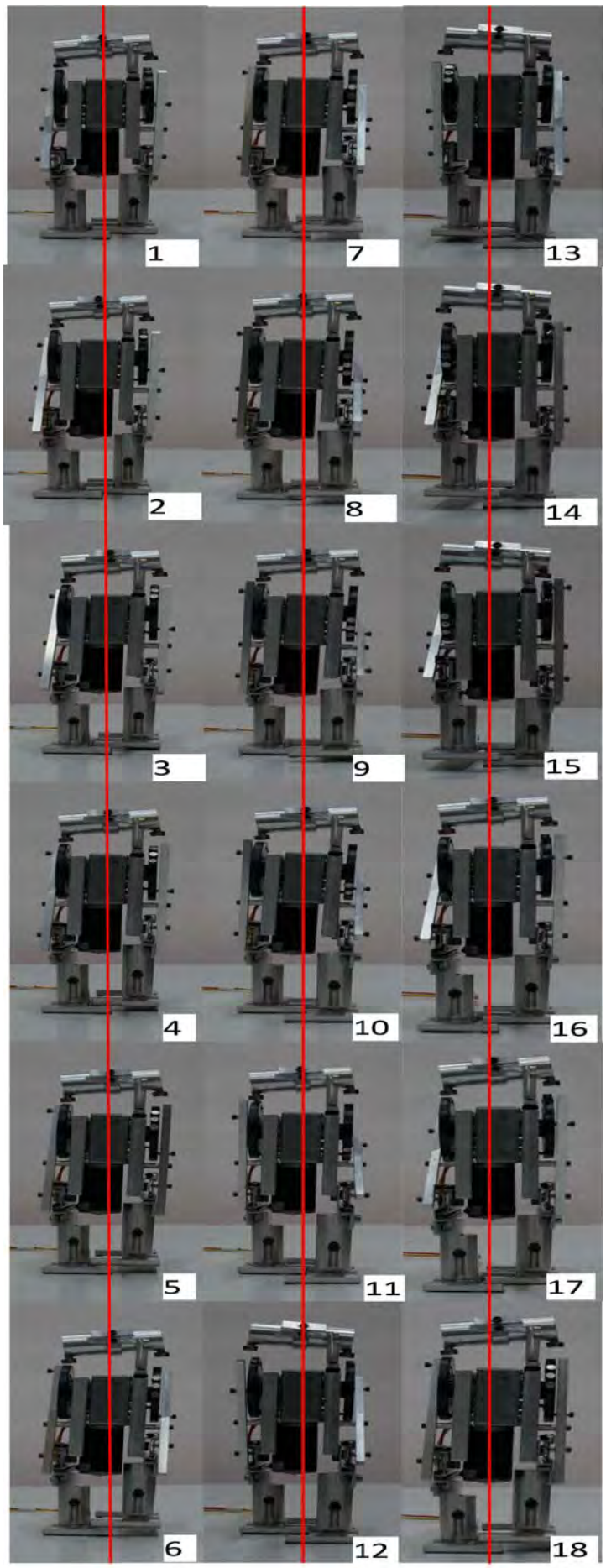


圖 21 水平方向重心變化及平衡機構運作連拍

另外經由可調整馬達轉速之控制旋鈕，我們測試不同轉速時步行機構的穩定性以及機構所能承受極限轉速如下表。

凸輪轉速	每分鐘步行數	機構步行狀態
20 rpm	20 步/分	穩定步行
35 rpm	35 步/分	穩定步行
46 rpm	46 步/分	穩定步行
53 rpm	53 步/分	穩定步行
59 rpm	59 步/分	穩定步行
65 rpm	65 步/分	穩定步行
68 rpm	68 步/分	穩定步行
71 rpm	71 步/分	傾倒

經由測試，得到此機構所能承受之馬達最大轉速為每分鐘 71 轉，若超出此轉速，步行機構因為機構運轉慣性關係，將會傾倒。

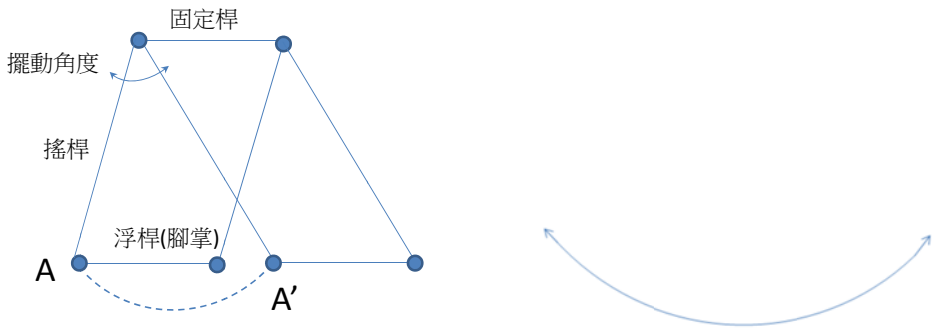
六、固定滑塊型步行機構測試結果與討論

在固定滑塊型步行機構的實驗結果顯示：機構的運作符合我們當初設計的要求，機構也可以步行前進，平衡筒也會自行跟據凸輪的位置而動作，使用筒內銅球滾動到傾斜方向，來使機構的重心在水平方向有所轉移，但是因為銅球的重量和機構本身的重量差異太大，所以重心轉移程度不大，因此為了防止步行機構在行進過程達到穩定的效果，我們使用了匸字形的腳掌結構，然而銅球在滾動過程所造成的慣性仍可讓步行機構在運動時有幫助穩定的效果。另外實驗的過程中固定滑塊機構的軌道剛性也有改善的空間。

伍、步行機構改良－平行四連桿步行機構

1. 使用平行機構代替固定滑塊機構。

由於先前固定滑塊機構，太過於笨重且較複雜、固定滑塊及配合的軌道間的結合剛性不足，會使得腳的支撐發生傾斜，進而影響到重心平衡裝置的效能，因此我們在腳部前後往復運動改以四連桿之平行機構來作動，平行四連桿機構的裝置簡單而且在搖桿擺動時，浮桿(腳掌)的位置不論在那個位置都可以保持水平，但軌跡為圓弧，如圖 22 所示，



(a)平行機構　　(b)A 點位移軌跡

圖 22　平行機構

在四連桿的運動時，浮桿(腳掌)來回的運動軌跡為一個圓弧，如圖 21(b)　所示，這個圓弧的軌跡最高點及最低點的距離大小由四連桿的搖桿長度及搖桿的長度來決定，如圖 23 所示，平行機構的搖桿長為 100mm，擺動角度約為 32 度，因為平行機構搖桿和速回機構的搖桿相連，所以擺動角度由速回機構的設計條件決定，的擺動角度其計算方法如下:

$$2\theta = 2 \times tan^{-1}\left(\frac{速回機構曲柄長}{速回機構搖桿長}\right)$$

$$2\theta = 2 \times tan^{-1}\left(\frac{20}{70}\right)$$

整個平行四連桿機構擺動角約為 32 度，若 θ 為擺動角度的一半。

則圓弧的軌跡最高點及最低點的距離大小為:

$$平行機構搖桿長 \times (1 - \cos(\theta))$$

由上述的討論知 $\theta = 16°$

因此計算結果 圓弧的軌跡最高點及最低點的距離大小為 3.8mm

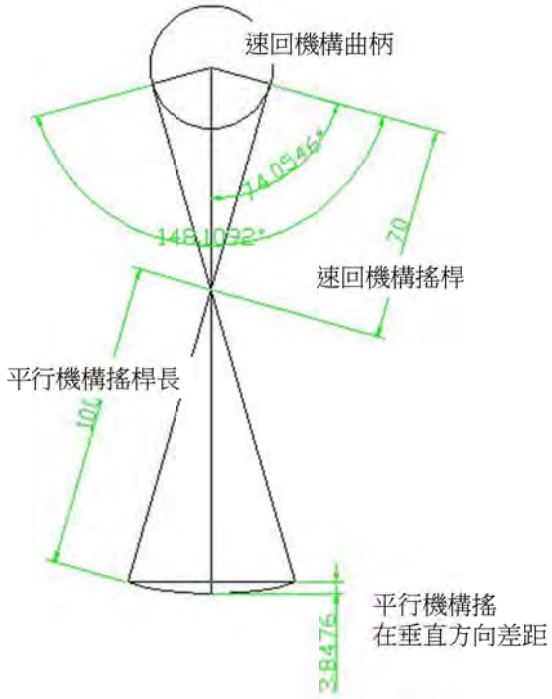


圖 23 速回機構及平行機構搖桿長及擺動角度關係

然而，圖 24(右)才是我們要的運動軌跡，因此我們必須配合凸輪機構，將整個平行機構做抬升的動作。所以在平行機構做搖擺的同時，用凸輪的工作曲線驅動平行機構中的固定桿件，把平行機構的圓弧曲線修整為上述的步行曲線。

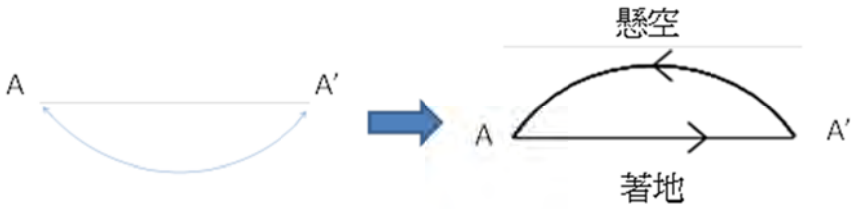
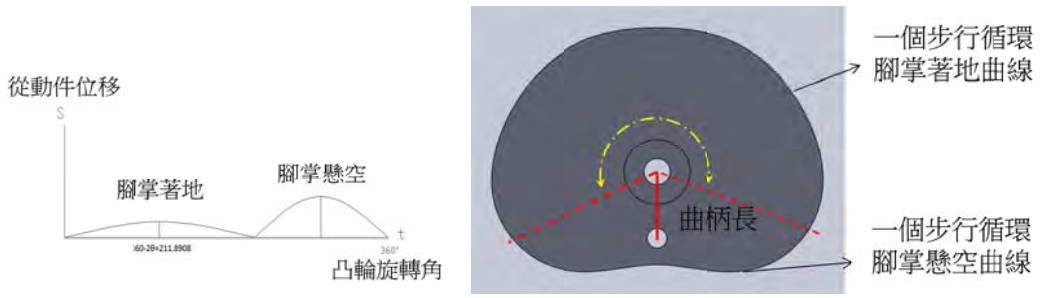


圖 24 平行機構及步行機構之運動軌跡

凸輪的設計如圖 24 所示，先決定時間位移圖，時間位移圖中腳掌著地的位移為上述計算的圓弧的軌跡最高點及最低點的距離大小為 3.8mm，因為如比設計可以確保把腳掌著地的軌跡修整為直線，如此，步行機構在前進時重心位置在高度方向不致於產生變化，也較為穩定；

時間位移圖中腳掌懸空的位移我們設計為 10mm，根據凸輪的位移-時間圖，並且我們選用尖端從動件，可以設計出凸輪外型。其中有兩段曲線，一段是將平行機構往下擺之曲線上拉成直線，另一段便是抬腳的動作使腳掌懸空。



凸輪位移-時間圖 及凸輪外形

圖 25　凸輪設計

經由上述討論的結果及設計條件，使用繪圖軟體繪製出零件，並且使用組裝功能進行組裝，在組裝過程中將凸輪旋轉角度可以觀察出各機構是否可以達到當初設計的功能。如圖 26 所示，腳掌在著地及懸空時的位置均可符合我們的要求。

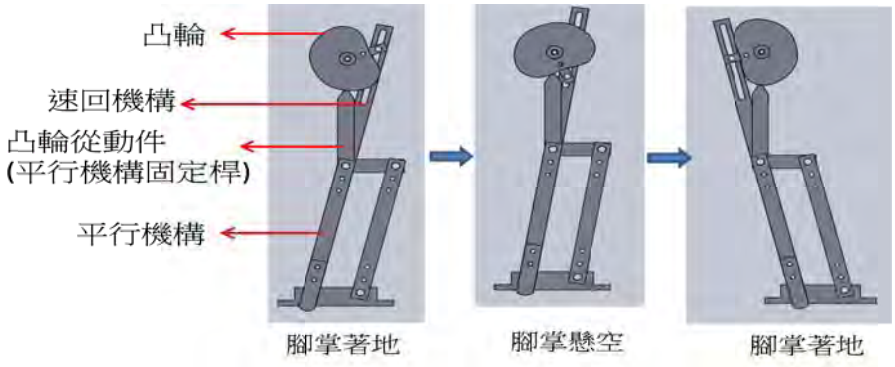
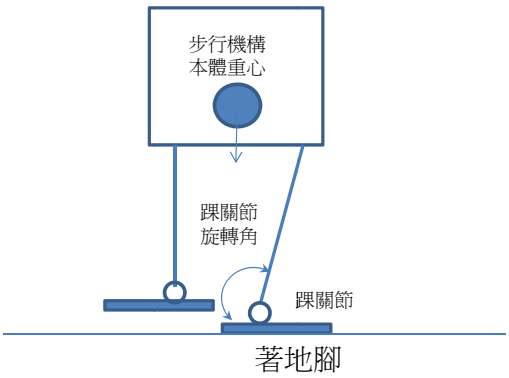


圖 26 平行四連桿步行機構

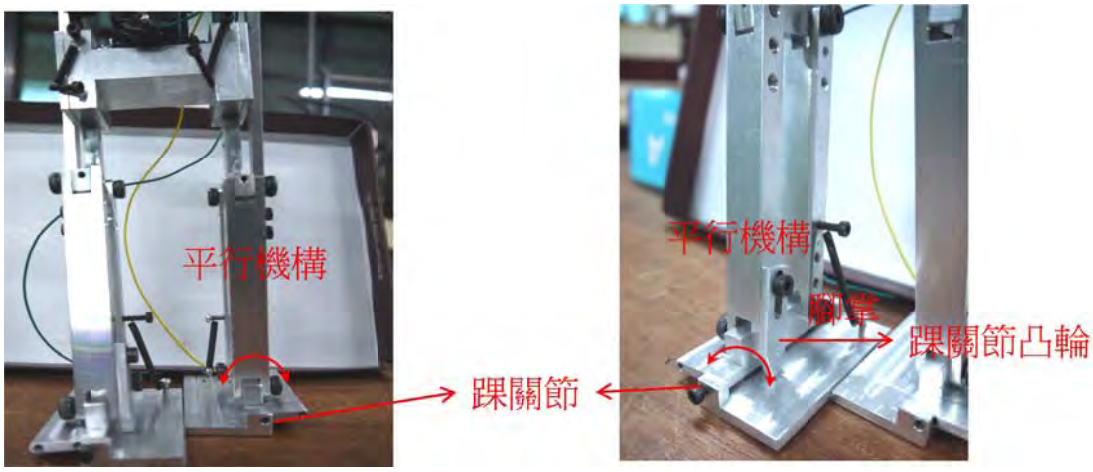
2. 重心平衡機構之改良：

在前一次步行機構的設計中，使用平衡筒搭配磁鐵來轉移重心的位置，在效果上不太穩定，因而使用ㄈ字形的腳掌，雖然可達到步行效果，但是整體的架構太笨重，失去了靈活度而且必需使用大功率馬達，因此我們移除平衡筒，在腳掌位置加裝踝關節迴轉對，模擬人類行走的方式，企圖來轉移步行機構本身的重心在著地的腳掌上，目的與先前的平衡筒相同：抬腳時，重心轉移至著地腳。

由於平衡筒之結構配合過為複雜，動作經常不確實，且因為平衡筒重量小於機構本體太多，導致重心轉移之效果不明顯，因此我們比照人類的踝關節圖 27(a)，將腳掌的地方多一個迴轉對，並配合踝關節凸輪產生角度的偏擺，使其機構本體之重心落於著地腳。機構的設計示意圖及機構的實體設計圖如圖 27(b)所示。



(a)



(b)

圖 27(a) 踝關節及機構重心示意圖 (b) 踝關節設計圖

在圖 28 中我們使用一個踝關節凸輪固定於平行機構的搖桿上，藉由搖桿的轉動使踝關節凸輪撐開著地腳掌，使踝關節產生踝關節旋轉角，並由一個拉伸彈簧來使踝關節凸輪和腳掌保持接觸。

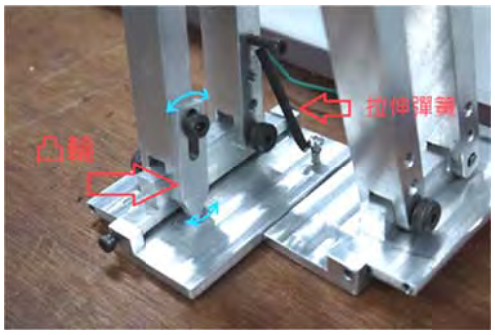


圖 28 踝關節凸輪及旋轉角

上述之踝關節凸輪，經由測試發現其功能性並未達到我們最初設計的效果，而且凸輪的來回作動會導致腳掌的磨損。因此我們又將凸輪變更設計成另一種型態，如圖 29 所示，方法是把凸輪固定於腳掌上方，平行機構的搖桿沿凸輪擺動，搖桿上的踝關節凸輪從動件，使踝關節產生角度變化。凸輪從動件至踝關節轉動支點為 21mm，為使踝關節繞踝關節旋轉支點從 90°轉到 100°（此時重心落於著地腳）再往回轉到 85°(此時將重心轉至另一腳)，設計出凸輪高點到低點差距為 21×sin5°，約為 1.83mm。

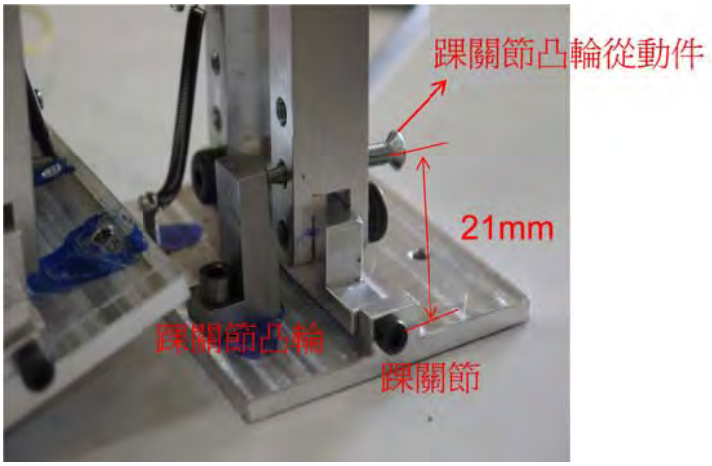


圖 29 重新設計之踝關節凸輪及旋轉角

3.使踝關節旋轉角度使重心變化轉移策略：

人類在行走過程中，腳掌上方的踝關節有二個自由度的旋轉，一個為前後的旋轉方向提供人體重心往前，來達到行進的效果。另外左右旋轉的自由度是可以讓人體重心保持在著地腳的腳掌上，因此踝關節旋轉角度使重心變化轉移策略為，腳掌可沿著我們所設計的運動軌跡(圖 24)來作動，此時在腳掌著地時，我們藉由踝關節凸輪來產生踝關節旋轉角，如圖 30 所示。在腳掌著地的運動軌跡過程中我們設計踝關節的旋轉角度、平行四連桿搖桿的角度及重心位置描述如表 2 表所示。

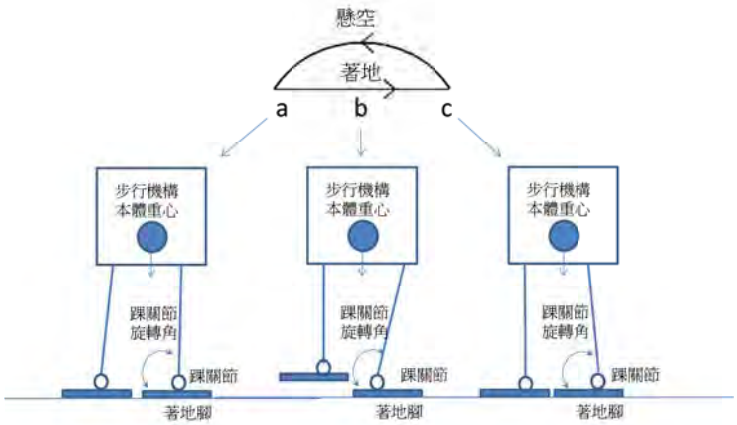


圖 30 腳掌著地時運動軌跡及踝關節角度關係

著地位置	平行機構的旋轉角(搖桿)	踝關節的旋轉角	著地腳狀態及重心位置描述
a	-16	90	腳掌從懸空位置即將著地,踝關節的旋轉角保持 90 度可使步行機構本身的重心因慣性從另一支著地腳的位置點 c 轉移到本腳。
b	0	100	著地腳位於著地位置，另一支腳為懸空，整體機構以單腳支撐,所以踝關節的旋轉角超過 90 度可以使重心落於本腳
c	16	85	著地腳即將懸空，踝關節的旋轉角小於 90 度可以使重心因踝關節的旋轉角變化而轉移到另一支即將著地腳。

表 2 踝關節旋轉角度使重心變化轉移策略--踝關節的旋轉角度及著地腳狀態及重心位置描述

4. 前進方向步行軌跡電腦模擬分析

如同上一章節，我們將步行機構左右二腳分別模擬運動時在空間的位置如圖 31 所示，從圖 31 可以看出左右二腳的運動軌跡，一個步行的循環約為 1.5 秒，懸空及觸地的時間比約為 1:1.15,這個比值符合當初的設計及有速回的效果,腳掌抬起的高度約為 10mm。在圖中顯示，左右二腳在懸空及觸地上有互相交替的效果。在左右腳掌觸地的軌跡，並像固定滑塊步行機構一樣是一直線,初步判斷是因為凸輪的運動曲線無法完全修正腳掌著地的軌跡修整為直線，由圖中可以看出直線的誤差約為 0.5mm， 圖 32 為左右二腳踝關節的角度大小和步行運動軌跡之間的關係。

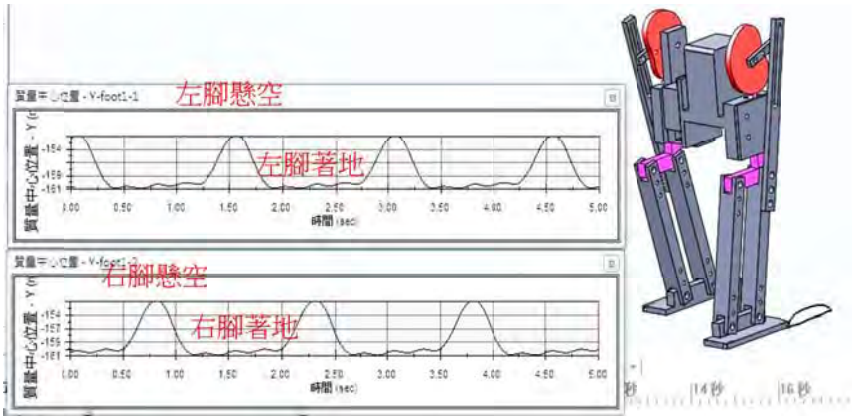
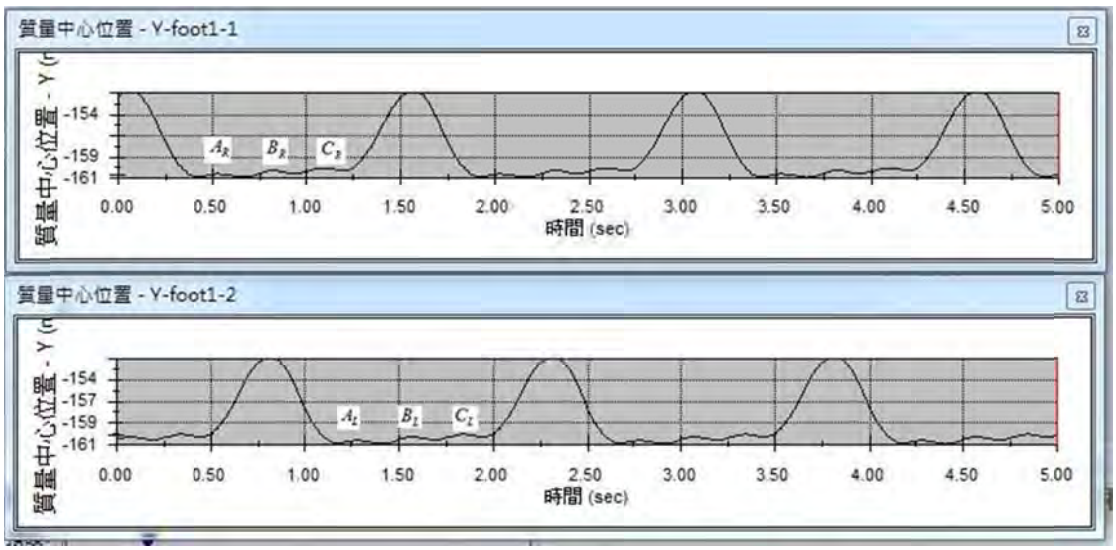


圖 31 平行四連桿步行機構步行軌跡電腦模擬分析



右腳著地位置	踝關節角度
A_R	90°
B_R	100°
C_R	85°

左腳著地位置	踝關節角度
A_L	90°
B_L	100°
C_L	85°

圖 32 為左右二腳踝關節的角度大小和步行運動軌跡之間的關係

5. 平行四連桿步行機構設計結果

將各零件加工組裝後，如圖 33 所示，因為這次的設計較為輕巧，所以我們選用一般的玩具馬達及齒輪箱做為動力來源，這一個齒輪箱動力輸出轉速約為 15rpm，扭矩 0.5kg-cm。

圖 33 平行機構型步行機構

6. 平行四連桿步行機構實驗測試結果

我們將齒輪箱動力接上 3 伏特的直流電源進行測試，步行的循環約為每分鐘 15 步。步行的狀態及測試結果如表及圖 34 及圖 35 所示。由圖 34 可以看出，左右腳掌的運動軌跡有符合當初的需求，所以可以步行前進。在表 3 中踝關節的角度並沒有如同我們當初設計的一樣，初步推斷原因為凸輪在加工及安裝時的位置所導致，如此步行機構仍可以行走，只是速度要降至 5rpm 以下。圖 35 為步行機構行時在連續步行時的狀態及各項數據。

右凸輪旋轉角	左凸輪旋轉角	右腳離地距離(mm)	左腳離地距離(mm)	右腳踝關節角度	左腳踝關節角度	重心高度位置(mm)
180°	0°	12	0		96°	175
225°	45°	16	0		96.7°	175
270°	90°	17	0		95°	176
315°	135°	10	0		93.5°	175
0°	180°	0	10	94.6°		175
45°	225°	0	18	95.5°		176
90°	270°	0	19	96.1°		176
135°	315°	0	14	94.4°		176

表 3 各項數據量測

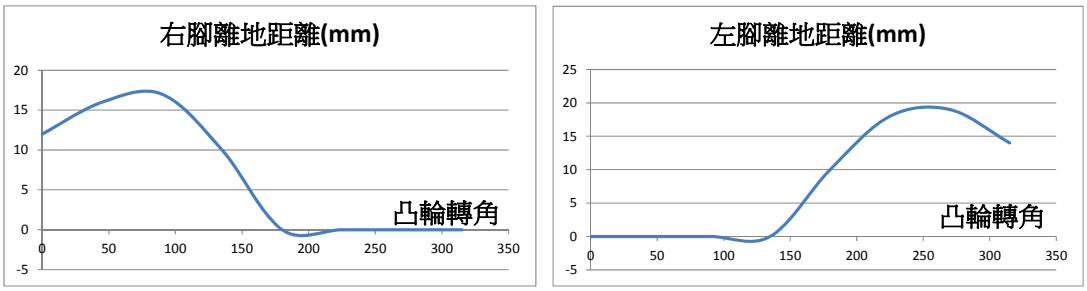
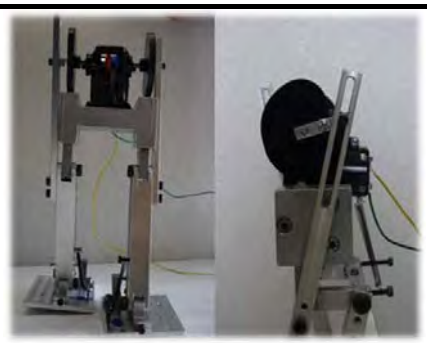
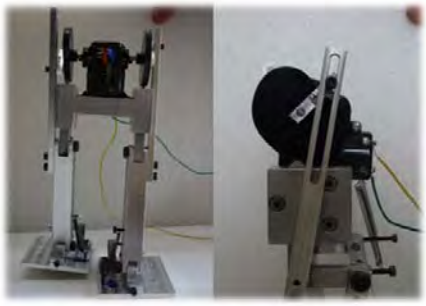


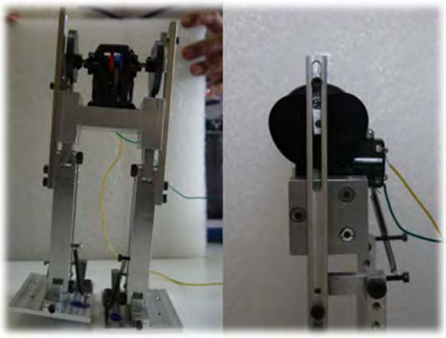
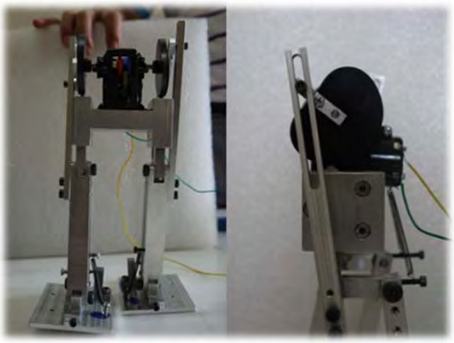
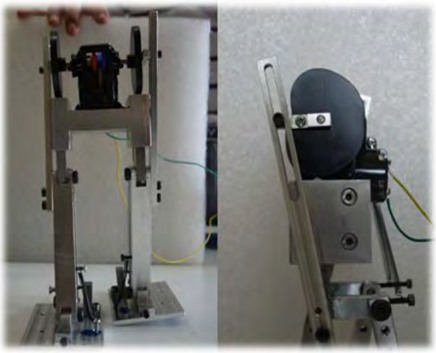
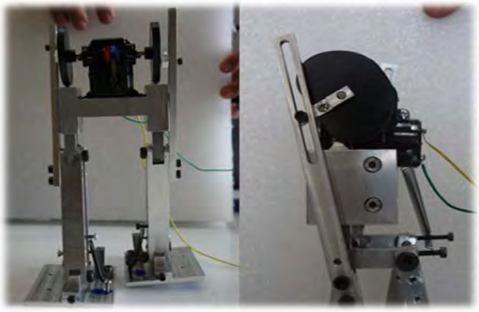
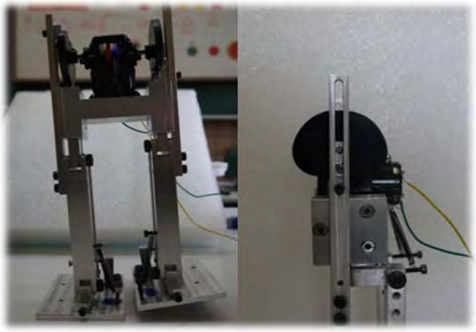
圖 34　凸輪轉角及左右腳掌高度



右凸輪	180°
左凸輪	0°
右腳離地距離(mm)	12
左腳離地距離(mm)	0
右腳踝關節角度	(懸空)
左腳踝關節角度	96°
重心高度位置(mm)	175



右凸輪	225°
左凸輪	45°
右腳離地距離(mm)	16
左腳離地距離(mm)	0
右腳踝關節角度	(懸空)
左腳踝關節角度	96.7°
重心高度位置(mm)	175

	右凸輪	270°
	左凸輪	90°
	右腳離地距離(mm)	17
	左腳離地距離(mm)	0
	右腳踝關節角度	(懸空)
	左腳踝關節角度	95°
	重心高度位置(mm)	176
	右凸輪	315°
	左凸輪	135°
	右腳離地距離(mm)	10
	左腳離地距離(mm)	0
	右腳踝關節角度	(懸空)
	左腳踝關節角度	93.5°
	重心高度位置(mm)	175
	右凸輪	0°
	左凸輪	180°
	右腳離地距離(mm)	0
	左腳離地距離(mm)	10
	右腳踝關節角度	94.6°
	左腳踝關節角度	(懸空)
	重心高度位置(mm)	175
	右凸輪	45°
	左凸輪	225°
	右腳離地距離(mm)	0
	左腳離地距離(mm)	18
	右腳踝關節角度	95.5°
	左腳踝關節角度	(懸空)
	重心高度位置(mm)	176
	右凸輪	90°
	左凸輪	270°
	右腳離地距離(mm)	0
	左腳離地距離(mm)	19
	右腳踝關節角度	96.1°
	左腳踝關節角度	(懸空)
	重心高度位置(mm)	176

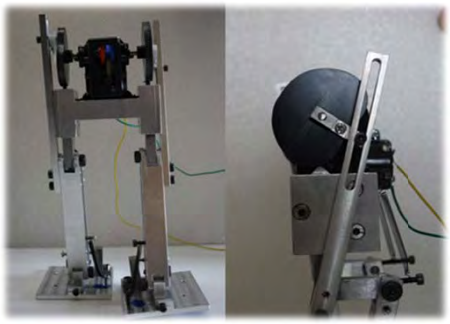
	右凸輪	135°
	左凸輪	315°
	右腳離地距離(mm)	0
	左腳離地距離(mm)	14
	右腳踝關節角度	94.4°
	左腳踝關節角度	(懸空)
	重心高度位置(mm)	176

圖 35 步行機構連續步行時各項數對照表

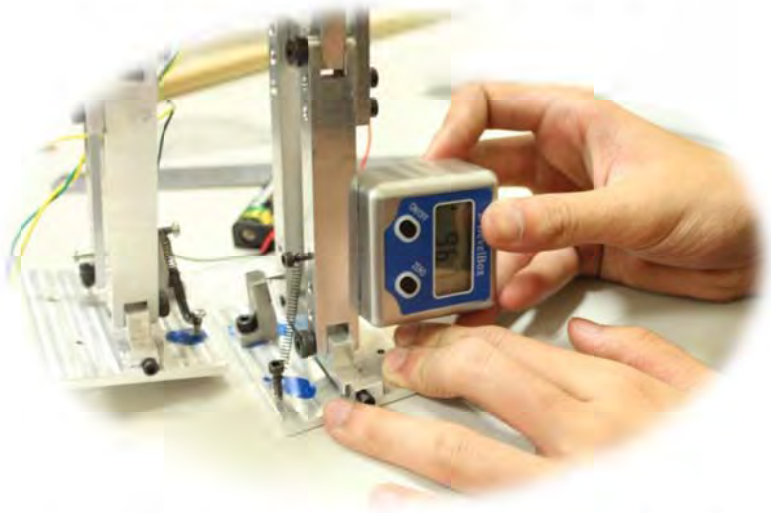


圖 36 運用 Angle Sensor 斜角器(直讀式)做踝關節實際角度測量

平行四連桿步行機構測試結果與討論：

在平行四連桿型步行機構的實驗結果顯示：機構的運作符合我們當初設計的要求，機構也可以步行前進，踝關節的角度由實驗結果也符合上述討論時的步行策略，但是在步行速度加快時腳掌及踝關節的角度有時候會不穩定，而使得整個步行機構發生傾倒。在踝關節的角度實際量測上和設計時的數據有些不同，可能是造成機構傾倒的原因，在平行四連桿型步行機構的實驗中，我們沒有使用匚字形的腳掌結構，做為往後加入步行機構可以轉彎的功能。

陸、 結論與討論

在本次的專題中，我們應用機械科課程中的專業知識設計了二台步行機構，並對這二台步行機構進行零件加工、組裝及測試，在固定滑塊型及平行四連桿型這二種機構在步行運動的實驗及數據量測中，我們比歸納出底下結論：

1. 整個步行機構的設計，固定滑塊型因使用滑軌及滑塊所以在結構上較為笨重，而且在步行循環中須要將整個滑軌及滑塊做提升所以凸輪使用較大的功率驅動來源。在步行機構不傾倒的狀態下，固定滑塊型可以達到 71 個步行循環/每分鐘，而四連桿型為 15 個步行循環/每分鐘。
2. 平行四連桿型機構較為輕巧，可以使用踝關節；固定滑塊型腳部無搖桿旋轉運動所以無法使用桌關節。
3. 以腳掌的運動軌跡來看，固定滑塊型步行機構的運動軌跡，在凸輪零件設計過程較為簡單。
4. 在機構重心轉移方面，固定滑塊型步行機構無法使用踝關節的設計方式來轉移重心。
5. 踝關節的重心轉移裝置較平衡筒的裝置在機構上設計較為簡單，而且動作也較為確實。
6. 匚字腳掌結構有助於步行時的穩定性，但較不靈活。

由以上的結論我們得知經由速回機構、固定滑塊機構、平行四連桿機構、凸輪機構的串並連合可以讓整個機構做出步行的動作，以及步行機構腳掌的運動曲線是可以由凸輪的工作曲線來控制及調整，而且我們比較了二種不同的機構設計模式及不同的重心轉移裝置，最後都可以達到步行的功能。在本次的專題中我充份實踐了機械科在學理上的專業知識，也有了實作經驗，也由此過程讓我們學到機構的實際應用而不是局限於書本上的知識。

柒、參考文獻

1、徐孟輝(民 95)，創意機構設計，東大 台南

2、李文欽(民 80)，自動省力化機構，建興　台北

3、葉倫祝(民 99)，機件原理，全華 台北

4、賴光哲(民 90)，機械構造解剖圖鑑，世茂 台北

5、喻永光(民 98)，機器人 DIY 系列，科學出版社 大陸

6、施慶隆，雙足機器人控制，台灣科技大

【評語】090906

本作品研究一具以速回機構製成的步行機器人，使用單顆馬達驅動即可達成兩腳交替行進的功能。

此作品機構設計精巧，深具創意，不論在設計上或是製作上均非常用心。研究人員設計兩種不同的步行機構，詳細分析步行的軌跡，機器人步行姿態優雅，經測試可達每分鐘 70 步，並且具有遙控功能。另外，參與同學對所研製的作品了解相當深入，展現高度的自信與熱情，是一件極為成功的研究計畫。