

國立清華大學

碩士論文

題目：

八連桿仿生步行機構設計

(Mechanism Design of A 8-Link Walking Machine)

所別：動力機械工程研究所 組別：設計製造組

學號姓名：9633575 袁嘉廷 (Jai - Ting Yuan)

指導教授：左培倫 博士 (Dr. Pei - Lum Tso)

中華民國九十八年七月

目錄

目錄.....	1
圖目錄.....	2
第一章 緒論.....	4
1-1. 前言.....	5
1-2. 仿生機械簡介	8
1-3. 研究動機與內容	10
1-4. 文獻回顧.....	12
1-5. 論文架構.....	20
第二章 設計概念.....	22
2.1 曲線設計.....	22
2.2 機構選取.....	26
第三章 研究構想.....	30
3.1 機構合成.....	30
3.2 機構配合.....	31
第四章 建立合成程式-單元八連桿	32
4.1 合成規劃.....	32
4.2 公式推導.....	35
4.2.1 第一步：決定主要參數(L1、L7、L10 與 $\theta_{7,0}$)	35
4.2.2 第二步：決定次要參數(L2、L4)	38
4.2.3 第三步：決定次要參數(L3、L5)	40
4.2.4 第四步：決定次要參數(L6、L8、L9、 $\theta_{5,6}$ 與 $\theta_{9,10}$)	41
4.3 BCB 合成程式介面規劃	45
4.4 本章小結.....	49
第五章 建立組合分析	53
5.1 支撐足的高低間距	53
5.2 中心位置的震動	55
5.3 本章小結.....	56
第六章 結論與未來之展望	58
Reference :	59

圖目錄

圖 1.1：運動示意圖.....	7
圖 1.2：Leonard Da vinci 的撲翼機.....	8
圖 1.3：1893 Rygg 的機械馬.....	12
圖 1.4：美國軍用 BIGDOG.....	14
圖 1.5：王氏木牛流馬 [林，1995].....	15
圖 1.6：王氏木車馬 [邱，1996].....	15
圖 1.7：木馬車.....	16
圖 1.8：單邊一對八連桿機構.....	16
圖 1.9：沈氏八連桿.....	17
圖 1.10：the leg mechanism of chiang' swalking machine and its foot trajectory.....	17
圖 1.11：Theo Jansen 的海灘動物.....	18
圖 1.12：曲柄搖桿.....	18
圖 1.13：八連桿機構.....	19
圖 2.1：耦點曲線.....	22
圖 2.2：(a)高過小；(b)高適中.....	23
圖 2.3：相對高度差.....	24
圖 2.4：曲線截取示意圖.....	24
圖 2.5：截取之足跡線.....	25
圖 2.6：八連桿運動鏈目錄.....	27
圖 4.1：乙-5 型八連桿機構.....	33
圖 4.2：Loop 1.....	33
圖 4.3：Loop 2.....	33
圖 4.4：Loop 3.....	33
圖 4.5：第一步示意圖.....	35
圖 4.6：第二步示意圖.....	39
圖 4.7：第三步示意圖.....	41
圖 4.8：第四步示意圖.....	42
圖 4.9：合成程式介面.....	46
圖 4.10：輸入精確點.....	46
圖 4.11：求得 2 組解.....	47
圖 4.12：第二步驟之程式介面.....	47
圖 4.13：L3, L5 解答平面.....	48
圖 4.14：最後結果顯示.....	49
圖 4.15：足跡曲線與耦點曲線比較圖(前腳).....	51
圖 4.16：足跡曲線與耦點曲線比較圖(後腳).....	52
圖 5.1：足點高度與絕對角度.....	54
圖 5.2：支撐足的高低間距.....	54

圖 5.3：一個回圈內中心震動.....	55
圖 5.4：組合分析程式介面.....	56

表目錄


表 一：前腿合成尺寸表.....	50
表 二：後腿合成尺寸表.....	51
表 三：各區域之最大間距的最小值.....	57
表 四：各區域之最大間距的最小值.....	57



第一章 緒論

1-1. 前言

在陸地上，我們常見的移動模式可分為幾種，最常見的就是滑動、滾動與走動。滾動的最佳代表輪，是我們在演化過程中所發展出來的工具，原始人類沒有車輛代步，只有靠人力和獸力，如果要搬移重物或行往遠方，可就很不方便，發現了圓形的東西滾動起來省力多了，於是從原木發展出輪子，而漸漸的依據許多的經驗及科學理論將輪子的性能做最佳化。而他的原理是以扭矩為動力源產生角加速度，藉著與地面接觸點的摩擦力使該點速度為與地面相同，讓輪子的軸形成相對的位移。



足則是生物與生俱有並經過長時間演化的器官。生物的足具有很強的控制性與針對性，以控制性而言，由於他是開迴路且自由度高，可以針對落點控制與調整重心等，而針對性則是依據生物演化所得的結構上的變化，如肉食性動物在狩獵時需要無聲無震動，所以發展出肉墊，靠水生活的鴨鵝則發展出蹼來划水。

而蛇的爬行原理是蛇體在地面上作水準波狀彎曲，使彎曲處の後邊施力於粗糙的地面上，由地面的反作用力推動蛇體前進。第二種是履帶式運動，蛇沒有胸骨，它的肋骨可以前後自由移動，肋骨與腹鱗之間有肋皮肌相連。當肋皮肌收縮時，肋骨便向前移動，這

就帶動寬大的腹鱗依次豎立，即稍稍翹起，翹起的腹鱗就像踩著地面那樣，但這時只是腹鱗動而蛇身沒有動，接著肋皮肌放鬆，腹鱗的後緣就施力於粗糙的地面，靠反作用把蛇體推向前方，這種運動方式產生的效果是使蛇身直線向前爬行，就像坦克那樣。第三種方式是伸縮運動，蛇身前部抬起，盡力前伸，接觸到支援的物體時，蛇身後部即跟著縮向前去，然後再抬起身體前部向前伸，得到支持物，後部再縮向前去，這樣交替伸縮，蛇就能不斷地向前爬行。

另外還有橇的滑行，主要用於摩擦力較小的地面，由動力源產生拉力後，負荷重物的一端藉由橇與地面較小的摩擦力隨之滑行，達到節省動力的目的。

綜合上述，我們可以知道，若是要移動，還是必需要與地面產生相對運動。而產生相對運動的方法很多，但主要還是藉由摩擦力、機構、機架與動力源。機構連接機架與地面，藉由摩擦力或其他方式將機構固定於地面，由動力源使機構運動，使與機架和地面相接的點產生相對運動，而推動整體移動。如圖 1.1 所示，∧型連桿即是推動機架與地面相對運動之機構。

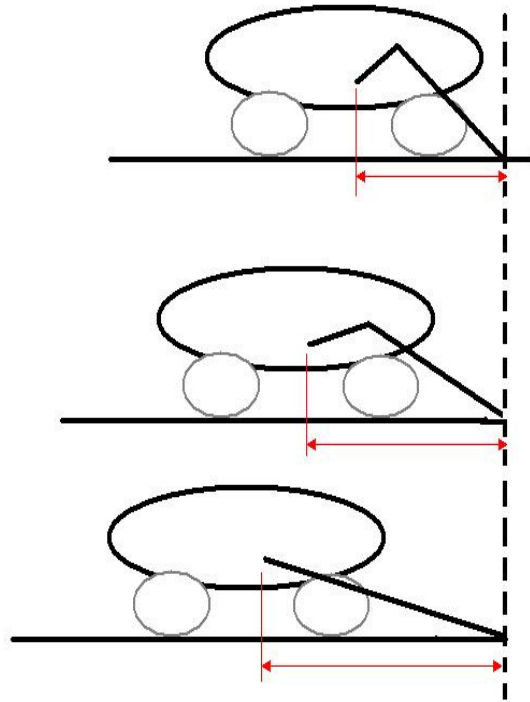


圖 1.1：運動示意圖



1-2. 仿生機械簡介

在自然界中，生物通過物競天擇和長期的自身進化，已對自然環境具有高度的適應性。它們的感知、決策、指令、回饋、運動等機能和器官結構，遠比人類所曾經製造的機械更為完善。隨著科技的發展，人們不斷的從自然之中學習，不斷的進步，由型態的模仿，到內部功能的模仿。

十五世紀，義大利的 Leonard Da vinci 認為人類可以模仿鳥類飛行，並繪製了撲翼機(圖 1.2)。到十九世紀，各種自然科學有了較大的發展，人們利用空氣動力學原理，製成了幾種不同類型的單翼機和雙翼滑翔機。1903 年，美國的萊特兄弟發明了飛機。

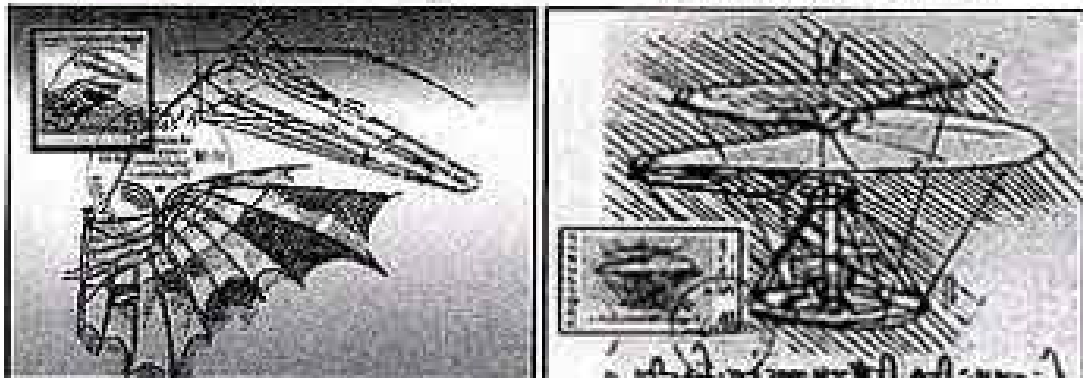


圖 1.2：Leonard Da vinci 的撲翼機

為了提高移動機械對環境的適應性，擴大人類在海底、北極、礦區、星球和沼澤等崎嶇不平地面的活動空間，模仿鳥類、昆蟲和魚類的形態構造特點，研製各種適宜在空中、水下活動的機械技術系統。這些飛行動物為人類改進飛機性能和製造新型飛行器提供了天然的設計原型。鳥類和昆蟲的某些特殊機能，如蚊蠅和蜜蜂等昆蟲靈活機動的陡然起飛，翻轉翅翼的高頻振動，光面懸垂和空中定位等，都是現代飛機所做不到的。研究類比生物的步行機構則可以提升移動機械在崎嶇不平的地面上移動的可行性與舒適性。動物的運動多是通過多關節足來實現的，因此動物足的形態機能、運動和姿體穩定控制等是研究步行機的關鍵。

所以，人們不僅要研究生物系統在進化過程中逐漸形成的那些結構和機能，更要著重揭示其組織結構的原理，評定其機能關係、適應方法、存活方法和自我更新方法等。把生物系統中可能應用的優越結構和物理學的特性結合使用，人類就可能得到在某些性能上比自然界形成的體系更為完善的仿生機械。

1-3. 研究動機與內容

現今舉凡車輛(vehicle)等代步工具，均是以輪為移動的基礎元件。但輪子卻還是有一定程度的侷限性，承前文敘述中所提到的移動方式，輪子在崎嶇路面無論是顛簸或是越過障礙，除了採用較大直徑的輪克服此障礙，不然就是增加輸出扭矩。但輪子的直徑與輸出的扭矩始終有個極限，而在這樣的前提下，自然對於跨越障礙也有一定的極限。

另外，我們知道輪子的移動是靠地面與輪表面的摩擦力產生推力，但對於如泥地、沙地等路面則顯得無力。因此，本論文將探討以仿生機構的概念，用數個閉迴路機構當作足部取代輪子對於移動的功能。以下稱此類閉迴路機構為步行機構。

首先，閉迴路的步行機構與車輪都屬於循環式且一自由度的元件，如果以機構取代車輪的功能，並不需要對動力系統做轉換與額外的控制。另外我們知道，動物靠足在移動，由於動力無法如同車輛一般迅速提升，所以在省力的部分，很大一部分是依靠重心的變化。在面對較低的上坡時，移動重心也會比增加扭矩容易。而在跨越障礙物時，仿足機構較輪子更容易克服，由於仿足機構在設計時就可以對其抬升最高點作設計。並且足的移動並不會受限於沙子表面摩擦力不足而有打滑的行為，對於在沙地行走更加有利。

本論文希望利用機構比輪子更好在沙地與顛簸地形上施力的優勢，合成一組步行機構，以解答平面的理論為基礎，設計出一個自由度的機構，由馬達帶動 crank 旋轉，驅動機構運行。

首先將模擬馬漫步的步行足跡，利用機構合成方式合成出滿足符合曲線的機構尺寸，並進行重心位置的計算與平衡、中心的震動等運動分析，以取得最好的設計尺寸，最後藉由增加一平衡機構，調整重心的位置使機構更容易向前或爬坡。



1-4. 文獻回顧

針對四腿步行機器的研究，根據中外學者所發表的相關資料 [Song and Waldron, 1989] 的記載中 [1]，最早申請專利的步行機器是1893年由Rygg 所創作出以連桿及齒輪的步行機器馬(圖1.3)，其動力源可由人坐在機器馬上以腳踏的方式前進，但是這僅止於紙上談兵，而沒有實際的製作模型來做測試；

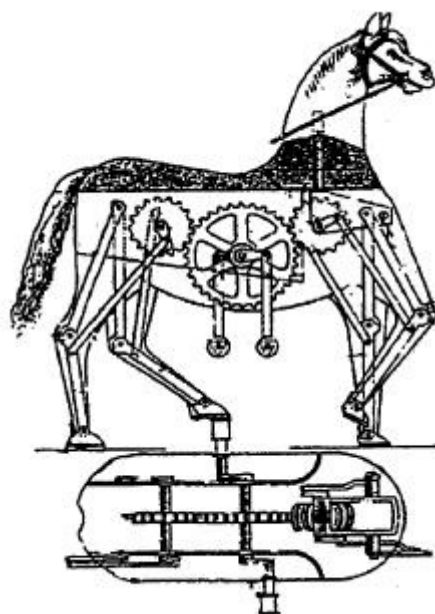


圖 1.3：1893 Rygg 的機械馬

1913 年Bechtolsheim 申請專利，亦是以連桿及齒輪創作出具腿部機構的步行機器，但是文獻中並無記載此物是否有實際的模型產出，故此時對於步行機器的設計，僅是考慮腿部機構與軌跡曲線而已；1960 年Shigley 創作出以連桿組設計四組腿部機構，並利用

一組雙搖桿機構來控制步行機器的步態，此時對於步行機器的設計，已經加入步態設計的理論。1966 年，McGhee and Frank[1968]創作出第一台完全以電腦控制的步行機器Phoney Pony，之後對於步行機器的設計，則廣泛的應用控制理論；有1978 年Hirose [1984]將水平控制器裝置於步行機器上，並在足部裝設了維持水平方向行走及修正方向的感應器；1986 年Raibert, Chepponis, and Brown [1986]以液氣壓缸及伺服馬達，製造出Running Machine 步行機器。

現今投入仿生機械研究的人越來越多，從貓、狗、馬到魚、蛇等，甚至是機器人都一一的在開發，但其中大多是以控制為手段。近年最成功的應該屬於美國軍方更是委託波士頓動力學工程公司（Boston Dynamics）製造形似機械狗的四足機器人被命名為“大狗”（Bigdog）。Boston Dynamics公司曾測試過BigDog，這只機器狗與真的大型犬一般大小，它能夠在戰場上發揮重要作用：為士兵運送彈藥、食物和其他物品。其原理是，由汽油內燃機驅動的液壓系統能夠帶動其有關節的四肢運動。陀螺儀和其他感測器幫助機載電腦規劃每一步的運動。機器人依靠感覺來保持身體的平衡，如果有一條腿比預期 更早地碰到了地面，電腦就會認為它可能踩到了岩石或是山坡，然後BigDog就會相應地調節自己的步伐。如圖1.4所示。



圖 1.4：美國軍用 BIGDOG

波士頓動力公司主席兼專案經理馬可·雷波特說：“內力感測器可探測到地勢變化，根據情況做出調整。而當我們‘騷擾’它時，‘大狗’的主動平衡性使其可以保持穩定。”這種平衡性通過四條腿維持，每條腿有三個靠傳動裝置提供動力的關節，並有一個“彈性”關節。這些關節由一個機載電腦處理器控制。

一般使用於仿生機械的機構還是以開迴路居多，對於尺寸的配合並不是很重要，而是以多個馬達控制，這樣不但增加重量與製造成本，在控制上更是需要複雜的配合。

但是，並非所有的研究都選擇以控制為手段，如 1986 年新疆工學院的王湍以單側十七連桿創作出可由人推動前進，並能載物的

王氏木牛流馬[林，1995](圖 1.5)；1992 年王湔更以單腿八連桿機構，加上馬車，創作出王氏木車馬[邱，1996]（圖 1.6）。



圖 1.5： 王氏木牛流馬 [林，1995]

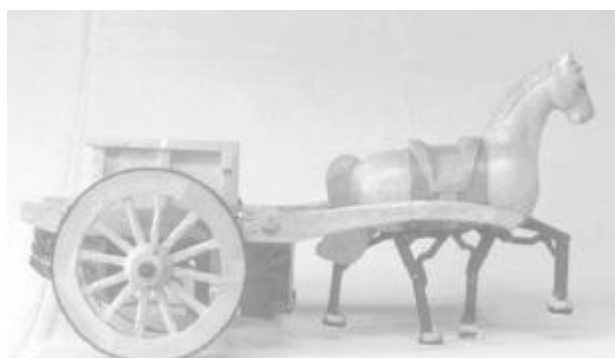


圖 1.6： 王氏木車馬 [邱，1996]

而國立科學工藝博物館與財團法人中華古機械文教基金會合作，將春秋時代傳說由魯班發明的木車馬模型(如圖 1.7、1.8)做出，桌上型的木車馬，主要特色在強調透過古書有限文字記載，以八連桿的金屬機械再現，藉由少許的動力即可仿真馬步態行走。



圖 1.7：木馬車

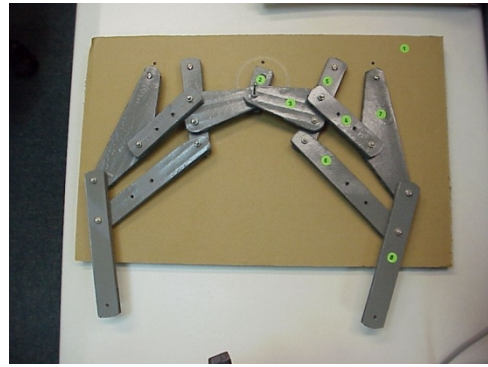


圖 1.8：單邊一對八連桿機構

並且也有沈煥文 [2] 也做過相同的研究，設計出八連桿型機器馬(見圖 1.9)，乃是由四組構造相同的腿部機構構成的步行機器及作為平衡用的拖車所組成，其單一腿部機構為八桿十接頭單一自由度的連桿組。其研究的目的，是要設計出具最佳足部軌跡與最小推力之八連桿型機器碼。理想的足部軌跡曲線，是參考王湔型木車馬及膝關節暫時鎖定原理所決定。接著建立推力分析與機械利益分析的數學模型。機構尺寸的合成以理想足部軌跡曲線為主要目的，以降低最大推力值為次要目的，找出各組腿部機構的最佳尺寸，並選擇推力最小的一組為代表。

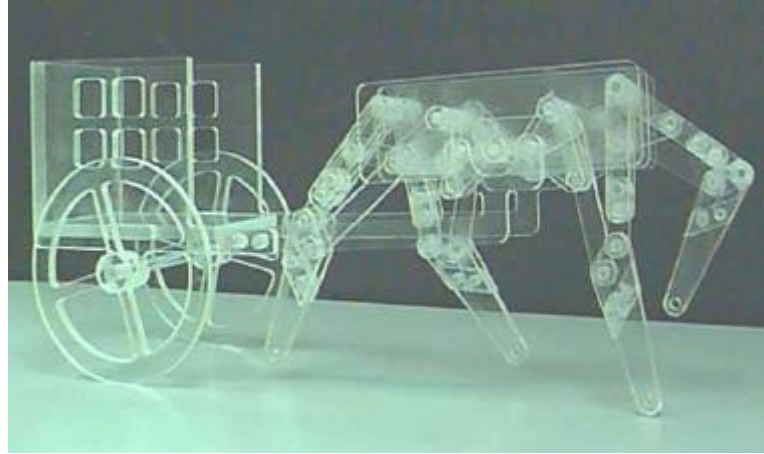


圖 1.9：沈氏八連桿

黃智勇[3]則是選取一組十連桿機構做合成，取得理想足部軌跡線後(見圖 1.10)，利用二段式速度控制的概念，調整腿部機構在支撐向與轉換向之間的時間比。並且為了保持隨時有三條腿接觸地面加強移動的穩定性，在某特定時間四條腿的足點都安置在特定的位置上以保持彼此波浪行部太的相位差。並且對動態特性及力量分析，做出原型機。

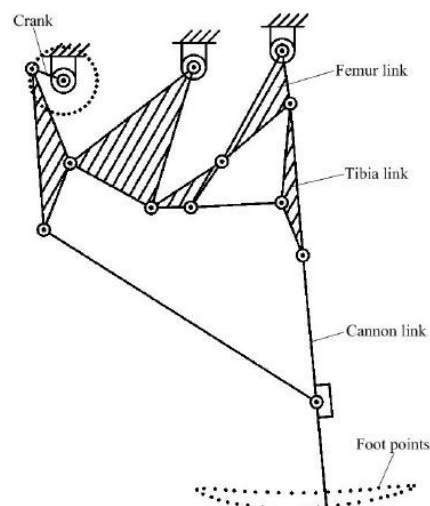


圖 1.10： the leg mechanism of chiang' swalking machine and its foot trajectory

類似的還有四連桿型、六連桿型、邱正平型、黃凱型以及洪芝青[4~7]等人，以四到十連桿機構為基礎設計出類似的步行機構，並就不同的目標值進行探討，以最基本的軌跡高度、水平寬度，到行進間最大推力值、換腿間的機械效益等考量。

另外還有荷蘭動力藝術雕塑家 Theo Jansen 的 Beach animal[8]更是創造了一群以風為食物的海灘生物(圖 1.11)。靠著撲翼接收風為動力，每個翼骨都連接一組曲柄搖桿機構作為動力(圖 1.12)藉由曲柄的轉動，帶動另一組八連桿機構運動(圖 1.13)，由耦點曲線的近直線運動部分推動整體前進。



圖 1.11：Theo Jansen 的海灘動物



圖 1.12：曲柄搖桿

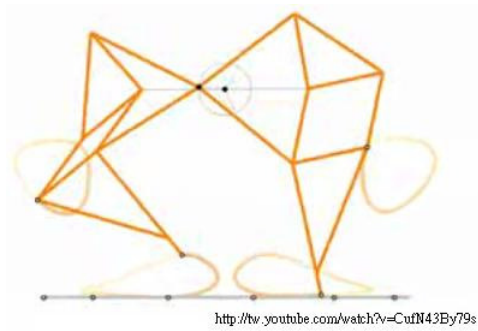


圖 1.13：八連桿機構

以上都是以純機構，以一曲柄驅動並達成理想足跡曲線的例子。



1-5. 論文架構

本論文著重於建立一個性能良好的步行機構，在某些地形如沙地或顛簸路面可以比輪子有更好的適應性。

經前文敘述，我們可以得知對於步行機構，很重要的的是在於曲線的規劃，以及省力和耦點接觸地面也就是支撐部分的時間長短。所以，本論文預計選取 1~3 個機構型態，透過分析馬的運動特性規畫出耦點曲線之特性，並以 Path Generation 配合 BCB(Borland C++ Builder)建立一尺寸合成程式，藉由輸入精確點位置建立解答平面，並從中針對耦點曲線之特性做篩選。如直線長表示該機構在一個迴圈內可以前進的距離，高低距離表示機構在移動時，最高可跨越的障礙高度，並計算機構之傳動比例及其他重要之特性。

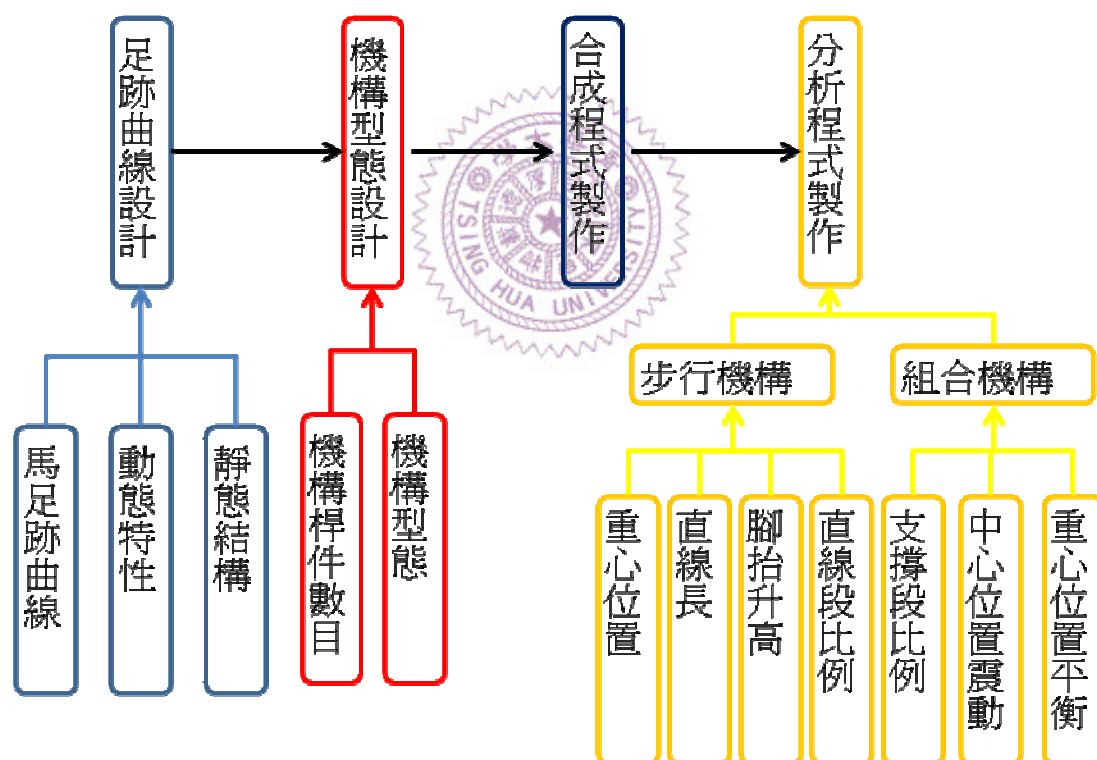
然後，組合 4 或 6 個單元仿足機構形成一個完整的移動載具，建立分析程式分析其動態特性，如中心位置的震動關乎承作的舒適性、重心的位置則可以用於平衡機構使移動更加省力。

鑑於前文中所提及的研究，均是一個自由度的曲柄由馬達帶動，卻無法轉彎，只能走直線。故本論文希望可以在達到上述期望的尺寸中，選取一組可以藉由改變其中某桿的長度，連帶改變接觸地面的直線部份的長度但不會對高度有過大影響，可得兩側速度不同而達到轉彎的效果。所以在未來的設計上，考慮在機架上將某個在機架上的結點轉接於滑行對，成為雙自由度的九連桿，增加機構的可控制性。

當然，由於在行進期間，每一個安裝於機架上的步行機構受力並不相等，且相差頗多。所以，如何增加並改善滑行對在直線行走

時的穩定度，將會在建構實體的部分做討論，在本文中僅以尺寸設計的觀點考量。

本文將在第二章中討論設計該機構的概念，以及建立一理想之足跡曲線，並在第三章以 Path Generation 推導公式輔以 BCB 建立一尺寸合成程式，取得大量解並在第四章做篩選與討論。接下來，在第五章會對這組機構做裝配組立的模擬並探討其相位差與動態特性，而後在第六章討論增加一組平衡機構，以調整重心位置與省力方法，最後在第七章會將經驗總結，評估未來的建立實體的可行性與商業價值。



第二章 設計概念

2.1 曲線設計

首先，本論文先對曲線的部分作一些定義，以便後續的描述。見圖 2.1，首先，支撐段即是機構實際做功的部分，在這個階段，機構接觸地面並產生推力使整體移動，而跨越段則是機構抬起移位的部分。插入點指的是機構與地面接觸的第一時間，而此時間會隨著曲線、每個步行機構的相位差和相對位置而有所變化。而耦點曲線上的黑點則是每 10 度一點，依據疏密可以大略判別各部位區段的速度差異。

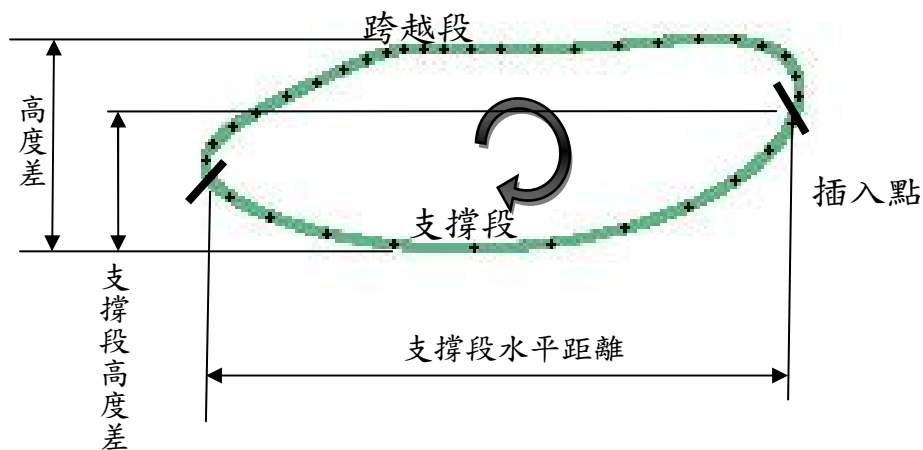


圖 14：耦點曲線

由於本論文的目標是在建立一個可以在少數環境下取代輪子的步行機構，所以該機構曲線除了在高度差上與支撐段的水平差要有一定的要求。在沙地與碎石地中，因為地質鬆軟與摩擦力小，機構會因為重量下壓，而增加插入地面的深度，所以會造成與地面的接

觸點將比預設的低。而在這個前提下，若是支撐段與跨越斷之間的高度差距過小如圖 2.2(a)所示，則在地下的比例過大造成阻力過大甚至干擾前進的狀況，而圖十二(b)則不會。由此可知，一個適當的高度除了避免干擾外，更可以提昇跨越障礙的能力，使機構之性能更佳。

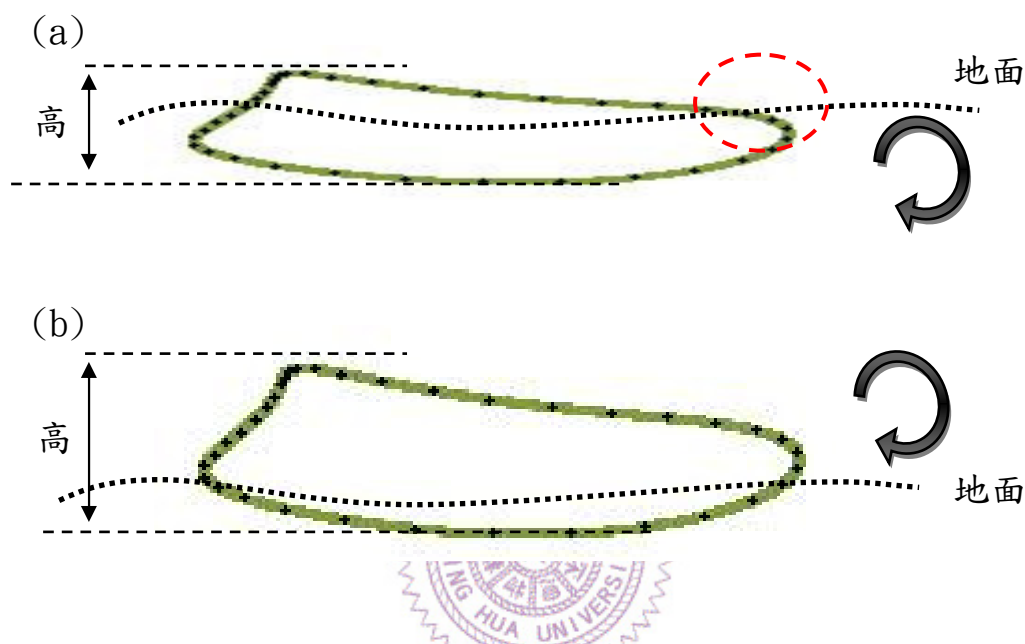


圖 15 : (a)高過小；(b)高適中

而支撐段的水平長度更為重要，代表了每次迴圈所帶動整體移動的距離，而支撐段的高度變化則表示了步行機構所架構的平台震動與搖擺狀況。所以，支撐段的水平長度是越長越好，而高度變化則是越小越好，提升了移動長度與穩定性。

而在插入點的位置，希望可以較為平緩的接觸地面，並且與交換負載的點也就是提起點，兩點在曲線中的相對高度差不要過大，使兩個單位步行機構在交換負載的同時不要過於劇烈的變化，如圖 2.3 所示。

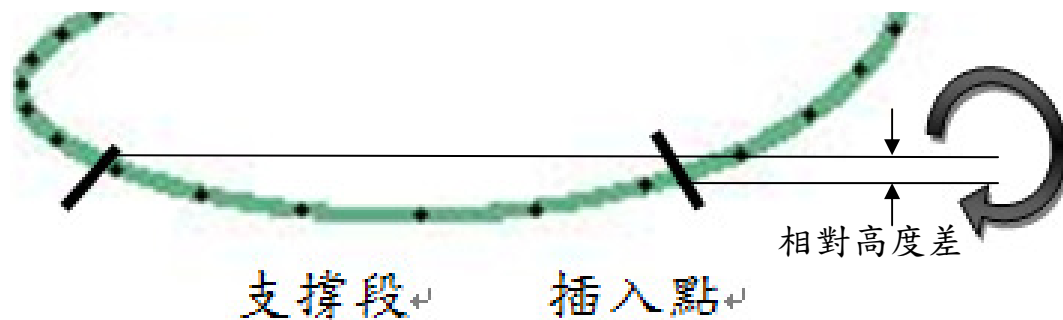


圖 16：相對高度差

本文的目的是模擬馬的移動步態，以機構的模式重建這個曲線，藉由觀測馬的漫步，取得以馬鞍某點為參考原點，描述前腳與後腳之相對座標。由於馬鞍與馬之間為固定接觸，且馬鞍也是人與馬接觸的工具，所以設定以馬鞍上的點作為參考原點，以其對應到馬蹄最前方之尖點做為馬前後腳足跡曲線的截取點。如圖 2.4 所示。



圖 17：曲線截取示意圖

所以，我們可以藉由前文所述之概念，取得前腳與後腳之足跡曲線如下圖 2.5 所示。

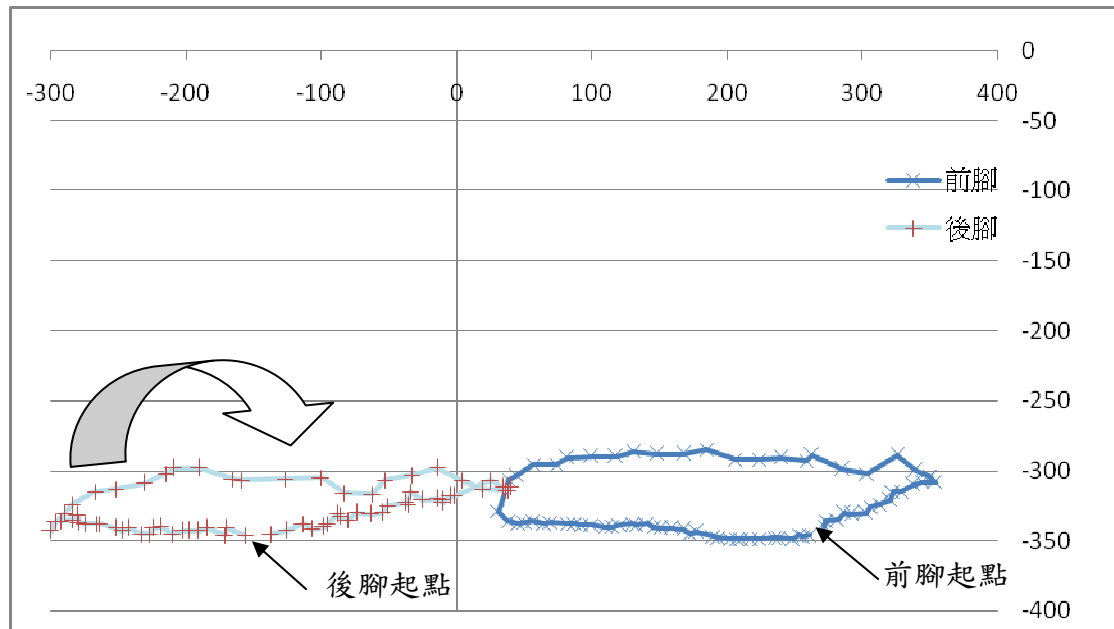


圖 18：截取之足跡線

由圖 2.5 可觀察到，在下半部的位是支撐段，而且大約占了 $\frac{2}{3}$ 的比重，且後腳領先前腳約 70° 。而圖中的縱軸代表了足與中心的垂直高度差，所以數值越大代表距中心越遠。

將圖 2.5 對應至機構時，原點代表了曲柄的軸，橫軸代表地桿也就是機架，而前後腳的曲線則對應到前後腳機構的偶點曲線。

2.2 機構選取

以一個自由度的閉迴路機構來說，有四連桿、六連桿、八連桿及十連桿以上，但在一般設計上較少使用超過十連桿，不單增加了機構運行的困難度，在製造的成本也將大幅提升。故本文中僅討論四到八連桿的合成可能。

在選取連桿數目時，自然從較低開始考慮，故先考慮四連桿。四連桿的桿件少，可以降低機構設計的複雜度。但也由於四連桿機構簡單，所能生成之耦點曲線過於單純，不足以模仿出腳的軌跡。

而六連桿所合成出的機構具有較大的跨越能力，但是步行速度緩慢，且重心位置變化較大。於加工時，為使與曲柄相鄰接的桿件運動時不會發生干涉，必須將每一個與曲柄相鄰的桿件安排在不同的層排列中，因此曲柄的零件數增加，而使整個機構的零件數與層數較八連桿型多。

而八連桿雖然需要考慮的尺寸多，但是在配合上有更多的選擇，若是將其中部分的三接頭簡化，則可以降低需要配合的桿長，在加上桿件多，則重心的變化則會小很多。考慮八連桿的拓樸機構運動鏈(見圖2.6)，排除四接頭桿難以製造與配合，只考慮有三接頭桿的運動鏈。

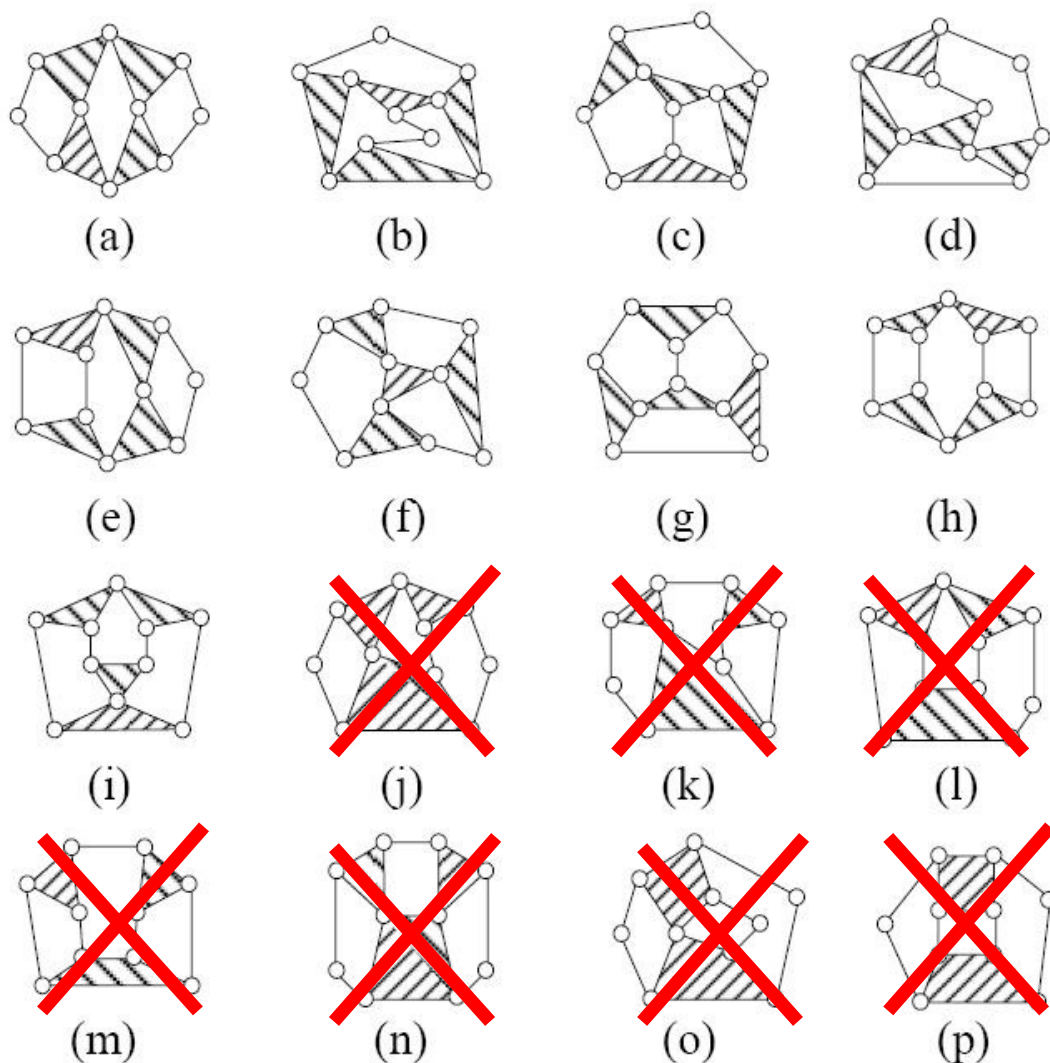
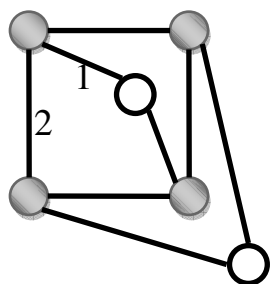


圖 19：八連桿運動鏈目錄

接下來考慮簡化尺寸數量的可能，簡化機構除了在提升機械的效率有所貢獻外，更可以減少尺寸的數量與計算量，只是在三接頭節點所代表的軸會受到更大更複雜的負載剪力。所以選擇可以將三接頭簡化但不會退化的機構，規則就是不能將連接四桿件的迴路簡化，故可以將以上機構簡化並分類，以[三接頭點/三接頭數]為區分，且兩者合為四。因為要求的是簡化，故只討論到[3/1]。

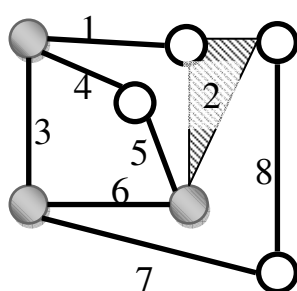
甲、 [4/0]



圖中●代表三接頭點

○代表二接頭點

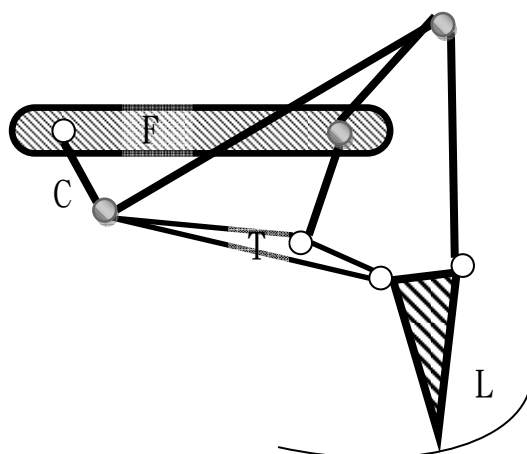
乙、 [3/1]



透過簡化以及地桿的選擇，我們可得到10組機構型態。而前文所提到的Theo Jansen所使用的機構就是乙-5型。接下來本論文將討論作為步行機構所需條件與限制。首先，裝設曲柄的位置是所有步行機構所共用的，四個步行機構的曲柄都將安裝在此，若是此處還有三接頭點，則在實際安裝上層數會過高，因此必須考慮地桿與曲柄之間的接點為二接頭，所以就排除了甲-2、乙-1、3、6型可以成為地桿的可能。

若是地桿到連接接地點的桿件之間的相隔過少，會使機構的曲線退化而無法滿足需求，故無法滿足需求的甲-1、乙-2、8不列入考慮。可得兩個機構概念圖如下：

乙-4



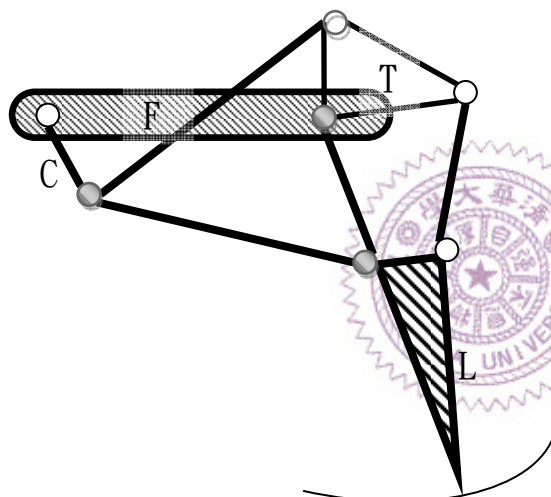
C：曲柄(Crank)

T：三接頭桿(Ternary)

L：接地桿(Leg)

F：機架(Frame)

乙-5



C：曲柄(Crank)

T：三接頭桿(Ternary)

L：接地桿(Leg)

F：機架(Frame)

乙-4與乙-5型中，乙-5型即為荷蘭動力藝術家Thep Jansen所採用之機構，是已經作為實體出現的機構，也有部分學者對其機構作結構與動力分析。故在論文中將採用乙-4機構作為合成之目標，進行合成與分析等程序。

第三章 研究構想

首先，本文將以左培倫教授所提出的解答平面方法[9-10]，以 Path Generation 與 Function Generation 透過提供精確點的方式產生解集合。但在可用之解中，並非所有的解都適用，故提供機構特性要求作為篩選指標有助於最終選曲機構尺寸。並且依據特性所代表之優劣或差異以顏色做區分表現於解答平面上，更可以輕易的在眾多解中選出少數較佳解。以下將討論各種選曲指標即實現方式。

首先，本文將針對單步行機構之特性作探討，再將四個步行機構組合並架構於平台上，進一步探討之間的配合與動態特性。

3.1 機構合成

對於單一的步行機構，我們的要求是按照理想曲線的特徵去篩選，承前文敘述，其中重要的指標有接地部分抬升高度、水平移動的長度與速度、直線部分所佔總循環的比例可達 1/4 以上、運行過程中機構的重心保持在一定的範圍內。

然而如果希望以程式作為工具輔助分析，必須先對這些指標作數值上的定義。抬升高度可以定義為最高與最低點的 Y 軸差距。而直線的定義則可以沿用數學上定義直線為線段上任兩點間之斜率均相同，當然對於機構的近直線並不需要如此嚴苛，可以將誤差定義在一個範圍之內做為近直線，並對應到希望直線部分占總循環的 1/4，可以定義在這個範圍之內，數據之 Y 值 RMS 不超過一定值，藉此判別直線。而速度與加速度更是可以藉由對向量式微分求得。

重心也可以透過提供桿件材質計算出重心變化，而在未來如有進一步計畫製作模型也可以運用此結果將機構的重心作一定程度的調整。

3.2 機構配合

在這個階段會將所挑選出來的步行機構作組合，將四組步行機構組裝於機架上，並討論其相位差、相對位置等關係。其中相位差代表四組步行機構之間的相互配合，相對位置則代表了機構之間支撐狀態的交替。在決定相對位置與相位差之後可以透過計算轉換得知機構實際接觸地面的支撐段的真實分布，並可以在此部分討論機械效益、重心位置、平衡問題以及平台的晃動等動態特性。




第四章 建立合成程式-單元八連桿

在本章節的規劃中，將會依序介紹合成規劃、合成程式的推導以及在 C++ 中建立一合成程式的方式與構思。在過程中盡可能降低輸入與選取的次數，以提升合成結果的客觀程度。

在合成規劃的部分，將分析原始八連桿機構之運動機制，在公式推導的部分則會將分析的運動機制依據對於偶點的影響比例依序推導，而 C++ 的程式則會使用 Borland C++ Builder(簡稱 BCB)做為環境，依照推導公式所產生的需求、限制條件、連桿機構的背景知識與物理意義幫助合成的過程順利與客觀。

4.1 合成規劃



在本小節中，將分析乙-5 型的機構特性。一般在合成多連桿機構時，為避免求解複雜的非線性方程式，通常會將多連桿機構拆開分解為數個小的子機構分別依據要求的功能作合成。故本文意採用相同的想法，首先將該機構分解為三個向量迴圈，分別標示為 Loop1~3，如圖 4.1 所示。其中 Loop1 為桿 1、2、3、5 所圍成的，而 Loop2 為桿 1、2、4、6 所圍成的，Loop3 則是桿 5、6、7、8 所圍成。以桿 1 為機架桿(Frame)2 為曲柄(Crank)推動 5、6 桿作為搖桿(Rocker)，且 Loop3 為五連桿之變型，自由度為二。見圖 4.1~4.4。

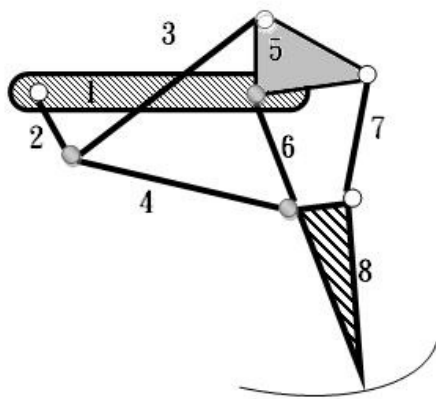


圖 20：乙-5 型八連桿機構

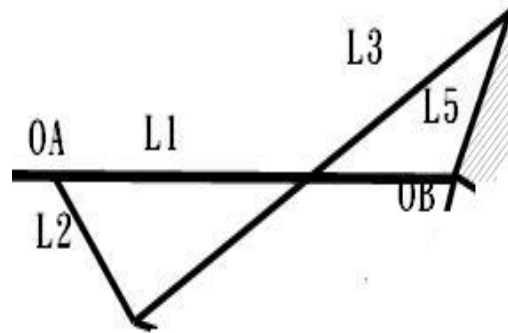
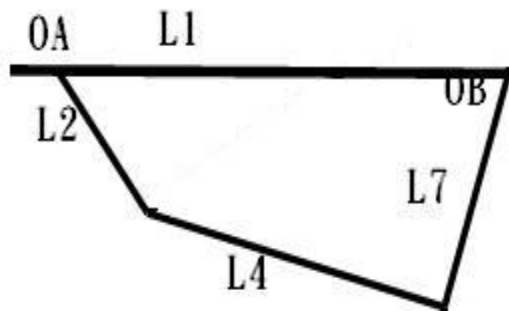


圖 21：Loop 1



Loop 2

圖 22：Loop 2

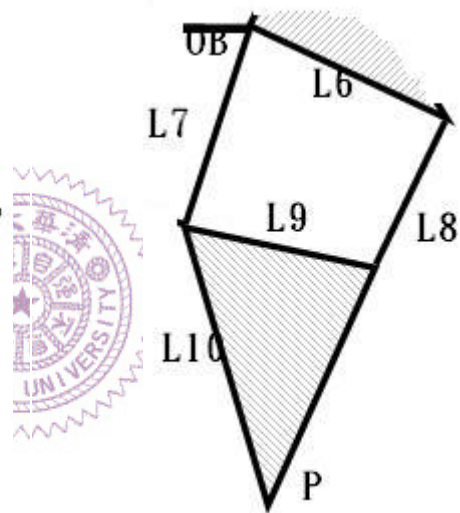


圖 23：Loop 3

在一開始，我們首先將所有的參數作定義。其中， $L1 \sim L10$ 為長度的尺寸，而桿件 5 與桿件 8 為剛體三接頭桿，定義 $L5$ 與 $L6$ 之夾角為 $\theta_{5,6}$ ， $L9$ 與 $L10$ 之夾角為 $\theta_{9,10}$ 。其中 $L1$ 為機架， $L2$ 為曲柄，此為單一自由度之機構，當 $L1$ 與 $L2$ 之夾角確立，則偶點 P 與原點 O_A 之間的相對位置即可確定。當曲柄旋轉一個迴圈 360° ， P

點亦可在平面上畫出一軌跡線。

在設計上，考慮以四組機構結合做為仿生馬的主要結構，其中兩前腳尺寸相同，兩後腳尺寸相同，前後腳與左右腳之間的相位差以計算模擬求得。

由於機構組合後必須要可以站立，且在停止運動時可以停放，所以在設計時必須考量在某一個狀態是四足同時接地且靜平衡，故在某一個瞬間，四足的必須位於同一平面。

由於本機構合成的最終目標，是找出一組機構尺寸可以模擬出馬漫步的足跡，可知最重要的合成條件應該是 P 點的位置。因為曲柄是唯一的輸入端，曲柄角度將透過 L7 影響 P 點位置，見前圖 4.3 與圖 4.4(LOOP 2、3)。而 LOOP1 的 L3、L5，LOOP3 的 L6、L8 與 L9 則是配合著調整 L10 的角度。

由於希望取得近似度較高的偶點曲線，故採取以四精確點的目標合成出所有尺寸，與透過條件的篩選選擇出有限數量的解集合。

4.2 公式推導

在本小節中，將推導單元八連桿機構的合成公式，盡可能的降低可能解的數量。

4.2.1 第一步：決定主要參數(L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$)

合成的第一步，開始於 L_1 、 L_7 與 L_{10} 的長度合成，在這裡所要考慮的是 P 點的座標，見下圖 4.5。

向量式：

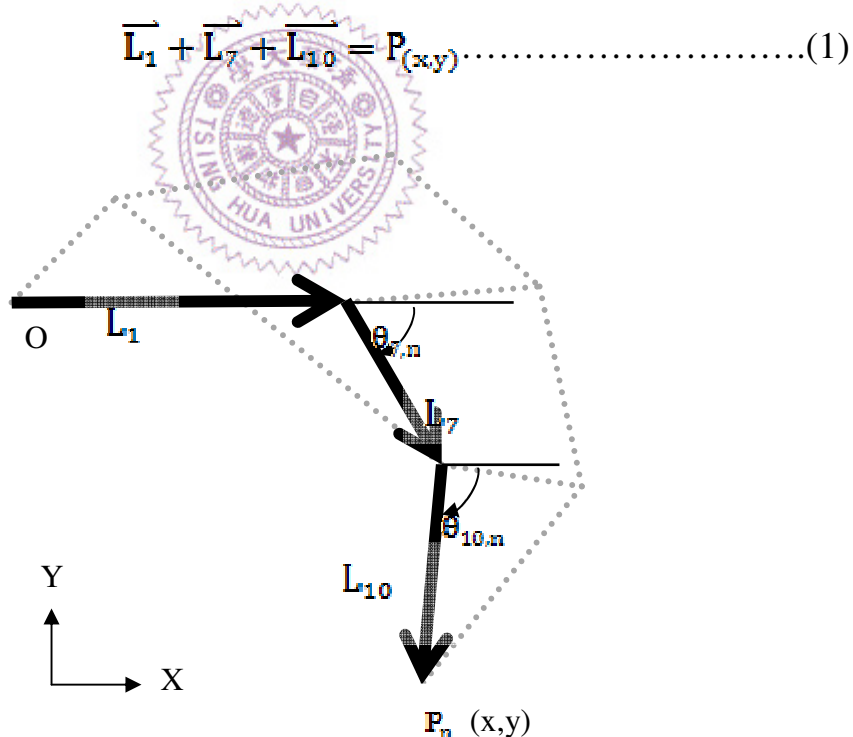


圖 24：第一步示意圖

將(1)分解至 X,Y 兩方向(n=1~4)

$$X: L_1 + L_7 \times \cos \theta_{7,n} + L_{10} \times \cos \theta_{10,n} = X_n \dots \dots \dots (2)$$

$$Y: L_7 \times \sin \theta_{7,n} + L_{10} \times \sin \theta_{10,n} = Y_n \dots \dots \dots (3)$$

其中 $\theta_{7,n} = \theta_{7,0} + \theta'_{7,n}$ ，且 $\theta'_{7,n}$ 、 X_n 與 Y_n 為已知。求解 L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$ 。在設計變數的時候， L_7 的角度只有決定四個瞬間的相對角度 $\theta'_{7,n}$ ，而將絕對角度定義為 $\theta_{7,0} + \theta'_{7,n}$ 減少計算參數的局限。



將(2) (3)式整理後平方相加，可得

$$L_{10}^2 = L_1^2 + L_7^2 + X_n^2 + Y_n^2 + 2(L_1 L_7 \cos \theta_{7,n} - L_1 X_n - L_7 X_n \cos \theta_{7,n} - L_7 Y_n \sin \theta_{7,n}) \dots \dots \dots (4)$$

(n=1~4)

而其中 L_{10} 是固定的，故(4)可以兩兩相等，將 L_{10} 消除整理可得

$$L_1 A_n = -B_n + L_7 \cos \theta_{7,0} (L_1 C_n + D_n) + L_7 \sin \theta_{7,0} (L_1 E_n + F_n) \dots \dots (5)$$

(n=1, 2, 3)

其中 $A_n = X_n - X_{n+1}$

$$\begin{aligned}
B_n &= \frac{-1}{2} (X_n^2 + Y_n^2 - X_{n+1}^2 - Y_{n+1}^2) \\
C_n &= \cos \theta_{7,n} - \cos \theta_{7,n+1} \\
D_n &= -X_n \cos \theta_{7,n} + X_{n+1} \cos \theta_{7,n+1} - Y_n \sin \theta_{7,n} + Y_{n+1} \sin \theta_{7,n+1} \\
E_n &= -\sin \theta_{7,n} + \sin \theta_{7,n+1} \\
F_n &= X_n \sin \theta_{7,n} - X_{n+1} \sin \theta_{7,n+1} - Y_n \cos \theta_{7,n} + Y_{n+1} \cos \theta_{7,n+1}
\end{aligned}$$

將公式(5)在不同的 n 下相除，可得(6-1)(6-2)兩式

$$\frac{L_1 A_1}{L_1 A_2} = \frac{-B_1 + L_7 \cos \theta_{7,0} (L_1 C_1 + D_1) + L_7 \sin \theta_{7,0} (L_1 E_1 + F_1)}{-B_2 + L_7 \cos \theta_{7,0} (L_1 C_2 + D_2) + L_7 \sin \theta_{7,0} (L_1 E_2 + F_2)}$$

.....(6-1)

$$\frac{L_1 A_2}{L_1 A_3} = \frac{-B_2 + L_7 \cos \theta_{7,0} (L_1 C_2 + D_2) + L_7 \sin \theta_{7,0} (L_1 E_2 + F_2)}{-B_3 + L_7 \cos \theta_{7,0} (L_1 C_3 + D_3) + L_7 \sin \theta_{7,0} (L_1 E_3 + F_3)}$$

.....(6-2)

再將 $\sin \theta_{7,0}$ 與 $\cos \theta_{7,0}$ 整理至等式一側，可得

$$-\tan^{-1} \theta_{7,0} =$$

$$\frac{L_1^2 (A_2 C_1 - A_1 C_2) + L_1 (A_2 D_1 + B_2 C_1 - A_1 D_2 - B_1 C_2) + (B_2 D_1 - B_1 D_2)}{L_1^2 (A_2 E_1 - A_1 E_2) + L_1 (A_2 F_1 + B_2 E_1 - A_1 F_2 - B_1 E_2) + (B_2 F_1 - B_1 F_2)}$$

.....(7-1)

$$-\tan^{-1} \theta_{7,0} =$$

$$\frac{L_1^2(A_3C_2 - A_2C_3) + L_1(A_3D_2 + B_3C_2 - A_2D_3 - B_2C_3) + (B_3D_2 - B_2D_3)}{L_1^2(A_3E_2 - A_2E_3) + L_1(A_3F_2 + B_3E_2 - A_2F_3 - B_2E_3) + (B_3F_2 - B_2F_3)}$$

.....(7-1)

將(7-1)與(7-2)合併消除 $\tan^{-1}\theta_{7,0}$ ，整理後可得一 L_1 之四次方程式，透過數值方法求解及反推可求得有限組符合物理意義之

L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$ 解。

4.2.2 第二步：決定次要參數(L_2 、 L_4)

在決定 L_1 、 L_7 的長度之後，loop1 的尺寸也可以確定，再給定曲柄的起始與結束角度後，可以帶入 loop1 的向量中求得 L_2 、 L_4 的長度以及另外兩的瞬間的曲柄角度。見圖 4.6。

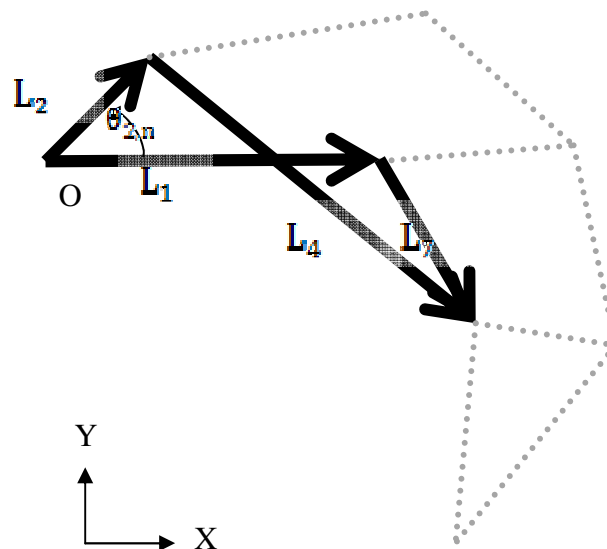


圖 25：第二步示意圖

向量式：

$$\overrightarrow{L_2} + \overrightarrow{L_4} = \overrightarrow{L_1} + \overrightarrow{L_7} \dots \dots \dots (8)$$

將(8)分解至 X,Y 兩方向(n=1~4)

$$X: \cos \theta_{2,n} + L_4 \cos \theta_{4,n} = L_1 + L_7 \cos \theta_{7,n} \dots \dots \dots (9-1)$$

$$Y: L_2 \sin \theta_{2,n} + L_4 \sin \theta_{4,n} = L_7 \sin \theta_{7,n} \dots \dots \dots (9-2)$$

(n=1~4)

將(9-1) 與(9-2)整理後平方相加，可得(10)如下

$$L_4^2 = L_2^2 + L_1^2 + L_7^2 + 2L_1L_7 \cos \theta_{7,n} - 2L_2 [\cos \theta_{2,n} (L_1 + L_7 \cos \theta_{7,n}) + L_7 \sin \theta_{2,n} \sin \theta_{7,n}] \dots (10)$$

其中， $\theta_{2,1}$ 與 $\theta_{2,4}$ 為已知，帶入(10)式後可得

$$L_2 = \frac{L_1 L_7 (\cos \theta_{7,1} - \cos \theta_{7,4})}{\cos \theta_{2,1} (L_1 + L_7 \cos \theta_{7,1}) + L_7 \sin \theta_{2,1} \sin \theta_{7,1} - \cos \theta_{2,4} (L_1 + L_7 \cos \theta_{7,4}) + L_7 \sin \theta_{2,4} \sin \theta_{7,4}}$$

$$L_4 = \sqrt{(L_2 \cos \theta_{2,1} - L_1 - L_7 \cos \theta_{7,1})^2 + (L_2 \sin \theta_{2,1} - L_7 \sin \theta_{7,1})^2}$$

將已知 L_2 、 L_4 的帶入(10)式後，整理後可求得 $\theta_{4,n}$ ，其中($n=1, 2$)

$$\theta_{4,n} = \tan^{-1} \frac{L_7 \sin \theta_{7,n} - L_2 \sin \theta_{2,n}}{L_1 + L_7 \cos \theta'_{7,n} - L_2 \cos \theta_{2,n}}$$



4.2.3 第三步：決定次要參數(L_3 、 L_5)

由圖 4.7 可見，由曲柄出發至 P 點共有 2 個路徑，路徑 1(實線)如圖所示路徑較短，所以傳遞的力量也就比較大，路徑 2(長虛線)表示，路徑越長也表示在傳遞過程中抵銷的力越多，傳達的力比例也會降低。在此限制住 L_3 、 L_5 的長度比例，使 loop2 的傳動角介於 $\pi/3 \sim 2\pi/3$ ，盡可能的使路徑 2(長虛線)減少損失所傳遞的力。

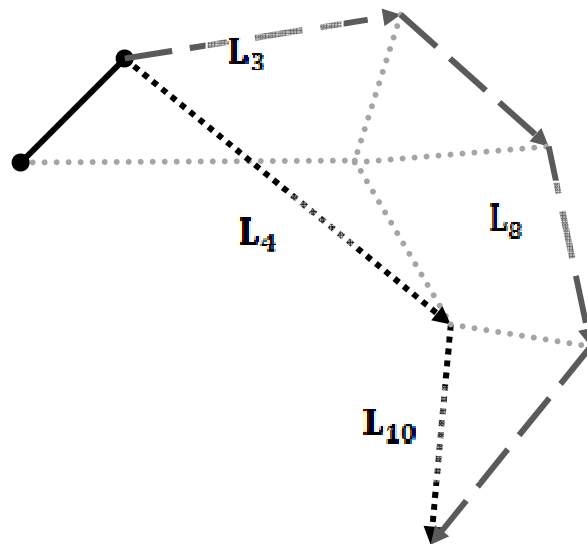


圖 26：第三步示意圖



4.2.4 第四步：決定次要參數

$(L_6, L_8, L_9, \theta_{5,6}$ 與 $\theta_{9,10})$

由於過程中均以四精確點推導，而此階段有五個未知數需要求解，所以必須先假設一未知數為已知。作為被假設的參數，當然希望是對整個方程式影響較小的。 L_6 、 L_8 與 L_9 是長度的尺寸，若限制

了其中之一，會使得方程式局限較大，所以考慮在 $\theta_{5,6}$ 與 $\theta_{9,10}$ 之間

選取一角度作為已知或可控變數，又 $\theta_{9,10}$ 是直接影響到 P 點的參

數，所以選取 $\theta_{5,6}$ 做為已知的參數推導公式。

如圖 4.8 所示，由於桿件 5 是剛體， $\theta_{5,6}$ 的角度固定可藉由

$\theta_{6,n} = \theta_{5,6} + \theta_{5,n}$ 得知 $\theta_{6,n}$ 在 (n=1~4) 的數值。又 $\theta_{7,n}$ 是初始給定的，

$\theta_{10,n}$ 可藉由第一步各瞬間的相關幾何位置推得，所以針對迴圈的向

量式為

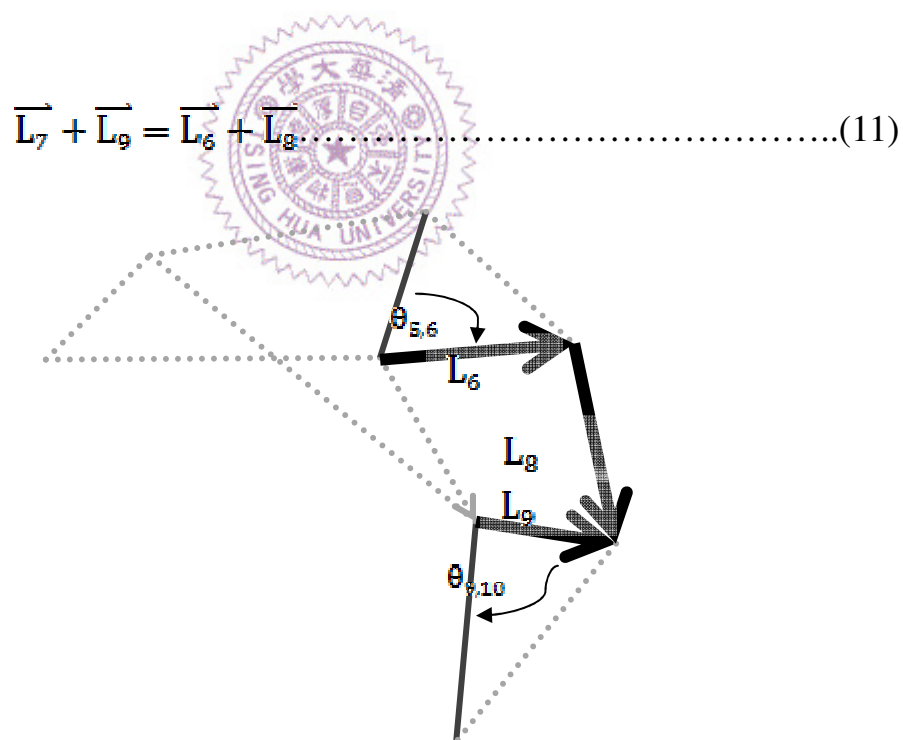


圖 27：第四步示意圖

經過整理後可得兩分式(11-a)(11-b)

$$X: \quad L_7 \cos \theta_{7,n} + L_9 \cos \theta_{9,n} - L_6 \cos \theta_{6,n} = L_8 \cos \theta_{8,n} \dots \dots \dots (11-a)$$

$$Y: \quad L_7 \sin \theta_{7,n} + L_9 \sin \theta_{9,n} - L_6 \sin \theta_{6,n} = L_8 \sin \theta_{8,n} \dots \dots \dots (11-b)$$

$\theta_{9,n} = \theta_{10,n} + \theta_{10,9}$ 帶入， $\theta_{6,n}$ 以 $\theta_{5,n} - \theta_{5,6}$ 帶入後，將 X、Y 向平方相加，整理後可得

$$L_8^2 = L_7^2 + L_9^2 + L_6^2 + 2L_7L_9 \cos(A_n - \theta_{10,9}) - 2L_7L_6 \cos(B_n) - 2L_6L_9 \cos(C_n + \theta_{5,6}) \dots \dots \dots (12)$$

其中，

$$A_n = \theta_{7,0} + \theta_{7,n} - \theta_{10,n}$$

$$B_n = \theta_{7,0} + \theta_{7,n} + \theta_{5,6} - \theta_{5,n}$$

$$C_n = \theta_{10,9} + \theta_{10,n} - \theta_{5,n}$$

(n=1~4)

而 L_6 、 L_7 、 L_8 與 L_9 在任一瞬間均為定值，即可將方程式兩兩相等化簡相消，如式(13)所示

$$L_7L_9[\cos(A_n - \theta_{10,9}) - \cos(A_{n+1} - \theta_{10,9})] = L_6 \left\{ \begin{array}{l} L_7[\cos B_n - \cos B_{n+1}] \\ + L_9[\cos(\theta_{10,9} + C_n) - \cos(\theta_{10,9} + C_{n+1})] \end{array} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

(n=1~3)

將(13)式兩兩相除消去等號左邊的 $L_7 L_9$ ，與等號右邊的 L_6 。結果如下(14-a)(14-b)所示。並且由於 $\cos B_n - \cos B_{n+1}$ 為常數，而令其為 D_n 。

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{-L_7 [\cos(A_1 - \theta_{10,9}) - \cos(A_2 - \theta_{10,9})] + L_9 [\cos(\theta_{10,9} + C_1) - \cos(\theta_{10,9} + C_2)]}{-L_7 [\cos(A_2 - \theta_{10,9}) - \cos(A_3 - \theta_{10,9})] + L_9 [\cos(\theta_{10,9} + C_2) - \cos(\theta_{10,9} + C_3)]}$$

.....(14-a)

$$\frac{D_2}{D_3} = \frac{-L_7 [\cos(A_2 - \theta_{10,9}) - \cos(A_3 - \theta_{10,9})] + L_9 [\cos(\theta_{10,9} + C_2) - \cos(\theta_{10,9} + C_3)]}{-L_7 [\cos(A_3 - \theta_{10,9}) - \cos(A_4 - \theta_{10,9})] + L_9 [\cos(\theta_{10,9} + C_3) - \cos(\theta_{10,9} + C_4)]}$$

.....(14-b)

且由於將(14-a)除以 $\frac{D_1}{D_2}$ ，(14-b)除以 $\frac{D_2}{D_3}$ ，而後合併整理，可得

(15)式，並以數值法求解 $\theta_{10,9}$ 。並且透過 $\theta_{10,9}$ 帶入(14)式可求

L_9 ，再將 $\theta_{10,9}$ 與 L_9 帶入(13)可反推求得 L_6 ，最後再帶回(12)可求得 L_8 。

$$\frac{D_2 C(A_1 - \theta_{10,9}) + D_1 C(A_3 - \theta_{10,9}) - (D_1 + D_2)C(A_2 - \theta_{10,9})}{D_3 C(A_2 - \theta_{10,9}) + D_2 C(A_4 - \theta_{10,9}) - (D_2 + D_3)C(A_3 - \theta_{10,9})}$$

$$= \frac{D_2 C(\theta_{10,9} + C_1) + D_1 C(\theta_{10,9} + C_3) - (D_1 + D_2)C(\theta_{10,9} + C_2)}{D_3 C(\theta_{10,9} + C_2) + D_2 C(\theta_{10,9} + C_4) - (D_2 + D_3)C(\theta_{10,9} + C_3)}$$

.....(15)

4.3 BCB 合成程式介面規劃

在上個小節中，建立了單元八連桿機構的推導順序與方程式，並將在在本小節中介紹合成程式的規劃。如下圖 4.9 所示，並在各步驟中介紹與討論輸入與輸出的數值。

下一個動作：

第一步：請輸入精確點相關數值，並點擊合成尺寸

輸入精確點 (步驟一)

曲柄的起始角度 合成尺寸

最終角度 未合成.....

桿 θ 的角度 相對應的點 θ 位置

$\theta 7,1=0$	$\times 8,1=28.886$	$Y 8,1=-66.241$
$\theta 7,2=8.3636$	$\times 8,2=34.811$	$Y 8,2=-66.871$
$\theta 7,3=14.1434$	$\times 8,3=42.337$	$Y 8,3=-66.666$
$\theta 7,4=15.3077$	$\times 8,4=44.95$	$Y 8,4=-66.351$

L3·L5 解答平面選項 藍→傳動角優 (步驟二)

原始範圍 刷新 新範圍

L3

☐ 選取放大範圍 L5

選取 $\theta 5,6$ (步驟三)

$\theta 5,6$ 的範圍= ~ $\theta 5,6 =$

未合成..... 決定 完成合成

合成輔助標示

☒ 節點編號 ☐ 桿件編號 ☐ 尺寸定義

合成尺寸

L1=
L2=
L3=
L4=
L5=
L6=
L7=
L8=
L9=
L10=
9,10=

Load Save

圖 28：合成程式介面

第一步：決定主要參數(L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$)

在第一個步驟中，所要輸入的是精確點參數，其中包括 $\theta'_{7,1\sim 4}$ 與相對應之 P 點位置，如此可求得最多四組的解(L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$)。如圖 4.10、11 所示。

輸入精確點 (步驟一)

曲柄的起始角度 20

最終角度 -15

合成尺寸

未合成.....

桿6的角度	相對應的點8位置	
$\theta_{7,1}=0$	$X_{8,1}=28.886$	$Y_{8,1}=-66.241$
$\theta_{7,2}=8.3636$	$X_{8,2}=34.811$	$Y_{8,2}=-66.871$
$\theta_{7,3}=14.1434$	$X_{8,3}=42.337$	$Y_{8,3}=-66.666$
$\theta_{7,4}=15.3077$	$X_{8,4}=44.95$	$Y_{8,4}=-66.351$

圖 29：輸入精確點

下一個動作：

第二步：選取第N組解答，並在解答平面中選取L3、L5之尺

輸入精確點 (步驟一)

曲柄的起始角度 20

最終角度 -15

合成尺寸

共有 2 組解答

第 1 組

第 2 組

桿6的角度	相對應的點8位置	
$\theta_{7,1}=0$	$X_{8,1}=28.886$	$Y_{8,1}=-66.241$
$\theta_{7,2}=8.3636$	$X_{8,2}=34.811$	$Y_{8,2}=-66.871$
$\theta_{7,3}=14.1434$	$X_{8,3}=42.337$	$Y_{8,3}=-66.666$
$\theta_{7,4}=15.3077$	$X_{8,4}=44.95$	$Y_{8,4}=-66.351$

圖 30：求得 2 組解

第二步：決定次要參數(L_2 、 L_4)

在輸入曲柄的起始角度與最終角度後，點選合成尺寸下方之下拉式表單後，將會計算出該組尺寸之 L_2 、 L_4 值，並顯示於右方示意圖中，如下圖 4.12 所示。

合成尺寸

合成輔助標示

節點編號 桿件編號 尺寸定義

合成尺寸

L1= 43.0325050354004
L2= 13.3002910614014
L3= 72.5917129516602
L4= 68.6250991821289
L5= 2.25253129005432
L6= 10.35584
L7= 140.06090
L8= 119.64100
L9= 87.33758
L10= 10.35584

Load	Save	n=2	n=3	n=4
θ 2,n=	20.00000	1.94792	-11.79528	-15.00000
θ 3,n=	---	---	---	---
θ 4,n=	---	---	---	---
θ 5,n=	---	---	---	---
θ 6,n=	---	---	---	---
θ 7,n=	256.20610	8.36360	14.14340	15.30770
θ 8,n=	---	---	---	---
θ 9,n=	---	---	---	---
θ 10,n=	10.35584	140.06090	119.64100	87.33758

圖 31：第二步驟之程式介面

這是只有單一組解(L_2 、 L_4)的過程，每一組(L_1 、 L_7 、 L_{10} 與 $\theta_{7,0}$)只會對應一組(L_2 、 L_4)。並且在完成的同時， L_3 、 L_5 的選取範圍

也同時計算完成。另外將在右邊顯示計算機構之型態，如 LOOP1 是 GCRR，Crank-Rocker 的機構型態。

第三步：決定次要參數(L_3 、 L_5)

在前小節提到過，將會以傳動角(Transmission angle)來決定參數 L_3 與 L_5 。在界面上顯示如圖 4.13，最外圍的深色區式較差的傳動角，而中間的深色區則是代表即使最差的傳動角也處於 $\pi/3$ 到 $2\pi/3$ 之間，如此一來在選擇上也有了基本的限制，也使得可能解的範圍進一步的縮小。另外方框內的白色區則是不為機構的解集合。

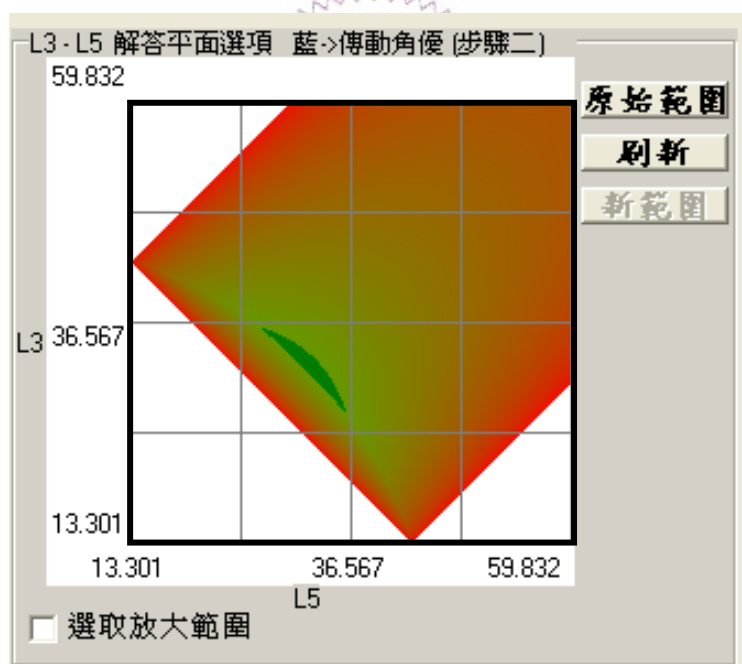


圖 32： L_3, L_5 解答平面

第四步：決定次要參數(L_6 、 L_8 、 L_9 、 $\theta_{5,6}$ 與 $\theta_{9,10}$)

經由拖曳滑桿，可以選取 $\theta_{5,6}$ 並預覽解答數量與前兩組數據

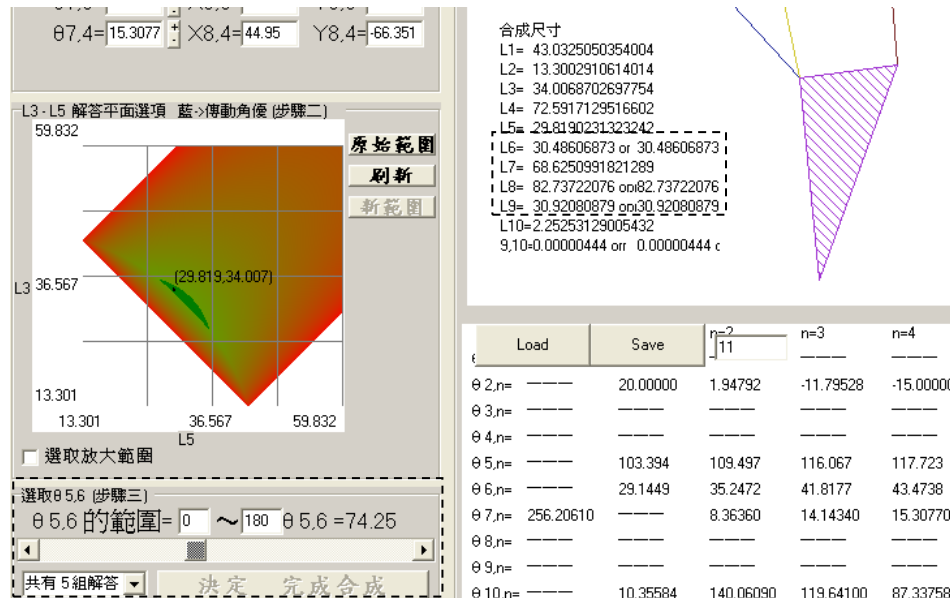


圖 33：最後結果顯示

如圖 4.14 所示。相較於只單純給定 $\theta_{5,6}$ 之值，拖曳從 $0 \sim \pi$ 更可以使選擇更加全面。

4.4 本章小結

在本章所推導的公式，由於必須配合公式中的方程式數量，所以在合成參數的過程中對某些參數使用指定數值或是提供一定數量並經過篩選的解，使得合成的過程還是產生了 ∞^3 的解，除了 L_3 、 L_5 與 $\theta_{5,6}$ 是選取的之外其餘的解都是透過公式計算在求解過程中自然產生的有限個數解，但是相較於三精確點的 ∞^6 組解相對要客觀的多。

而在使用了合成程式進行合成，目標是合成出的尺寸可以接近先前在第二章圖 2.5 所截取之馬足跡曲線。在前後腿的曲線中各選取四個精確點放入程式中進行合成，我們可以取得以下之成果。其中前腳之尺寸如下表一所示，所產生之偶點曲線與馬前腳的足跡曲線比較如圖 4.15 所示。

表 一：前腿合成尺寸表

參數名稱	參數值	參數名稱	參數值
L_1	20.50779688	L_7	13.2368378
L_2	9.428627109	L_8	12.44361776
L_3	20.20115434	L_9	14.51532639
L_4	20.64735353	L_{10}	22.0052237
L_5	10.94264207	$\theta_{5,6}$	85.375°
L_6	10.83961073	$\theta_{9,10}$	92.43749911°

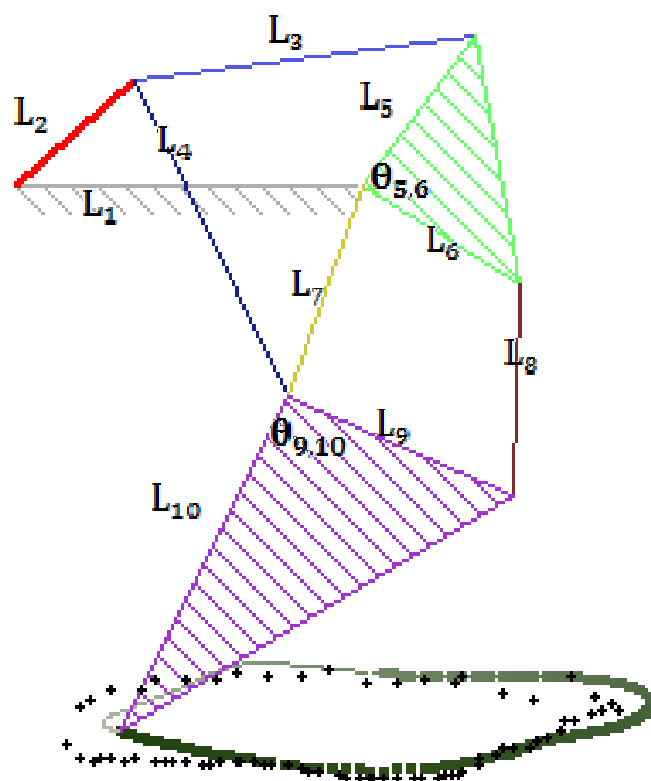


圖 34：足跡曲線與偶點曲線比較圖(前腳)

後腳之尺寸如下表二所示，所產生之偶點曲線與馬後腳的足跡曲線比較如圖 4.16 所示。

表 二：後腿合成尺寸表

參數名稱	參數值	參數名稱	參數值
L_1	15.38180491	L_7	13.49352013
L_2	6.575362502	L_8	14.55400814
L_3	16.12263406	L_9	13.84991854
L_4	16.6551848	L_{10}	21.67211195
L_5	10.14602929	$\theta_{5,6}$	95.375°

L_6	10.75525156	$\theta_{9,10}$	80.71094107°
-------	-------------	-----------------	---------------------

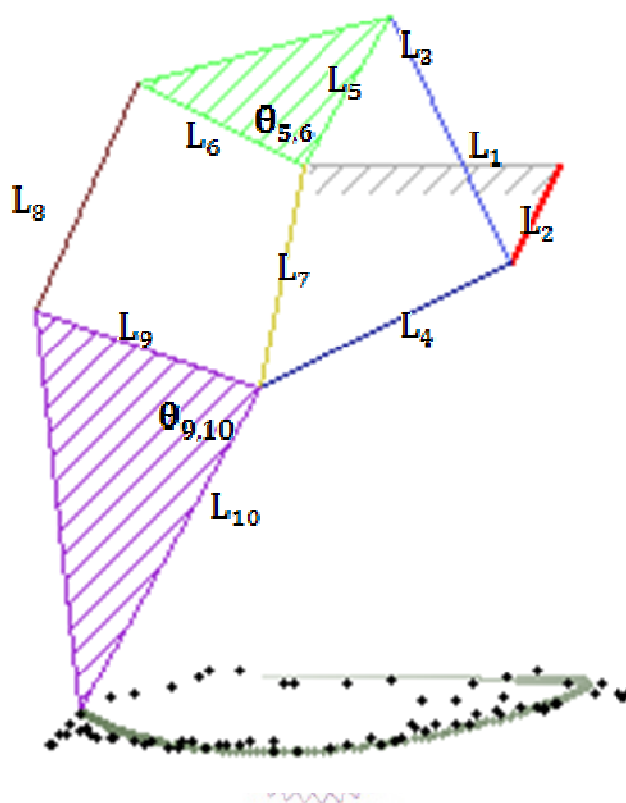


圖 35：足跡曲線與偶點曲線比較圖(後腳)

第五章 建立組合分析

本章將會針對組合四個單元機構的各參數與指標做規劃。本文的目的是藉由機構合成的概念設計出一可以模擬馬步行軌跡的機構，由四個單元八連桿模擬出各個足點的軌跡，而四個八連桿機構的交集除了地桿均位於同一機架(Frame)上之外，最重要的就是所有單元機構的曲柄均由同一顆馬達帶動。所以，在確立了代表前後腳的八連桿機構尺寸後，還需要進一步考慮各機構曲柄之間的相位差。

對於選取參數的指標，在本章節做了以下的規劃。不同的指標所對應之最佳參數大多不同，也無法將這些指標混為一談，故未來將在各小節中分別討論不同的指標在如此的機構參數下表現之最佳結果。



5.1 支撐足的高低間距

當曲柄的相位不同時，每一瞬間的各桿建足點的位置也不盡相同。如圖 5.1 所示，圖中的縱軸代表將機架固定於空中，各足點一個迴圈內劃過的相對高度，橫軸代表絕對角度。

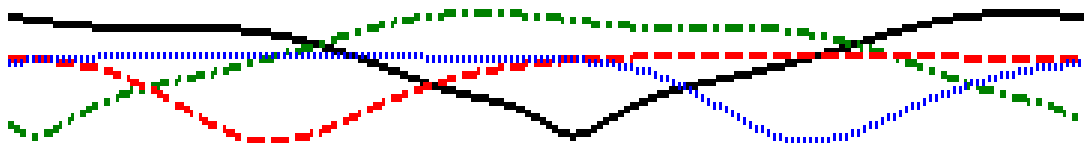


圖 36：足點高度與絕對角度

圖 5.1 中實線與鏈線所代表的桿件尺寸是同一組，但相位相差 180 度，短虛線與長虛線亦是如此，而實線相較短虛線落後了 72 度。如此一來，可以很明顯的觀察出四個足點之間的相對高低位置。

當我們再考慮三個點即可建立一平面的觀念後，也就代表了若是將此機構置於地面，則會自動以最低的三個足點做為支撐，也代表了若是最底的三個足點在同一瞬間的間距過大，會造成機架的嚴重傾斜，使整個機構翻覆，所以在選取指標時，這是一個必須考慮的條件。

為了使觀察更加簡單，本文對此指標做更進一步的分析，如圖 5.2 所示，表示支撐足的高低間距，而其中最大間距表示在一個完整的迴圈中最大的間距。當然，最大間距只代表了一個相對的值，適用於該組機構尺寸在不同的相位差條件下比較，只要不改變尺寸的比例，間距的值就具有比較性。目的是在同組機構尺寸中尋找到一較佳的相位差。

最小間距為零則表示將會有某一瞬間 3 個支撐足將會位於同一高度，此角度也可以做為停放角度。



圖 37：支撐足的高低間距

5.2 中心位置的震動

承接前一小節所討論之內容，若是支撐足有高低落差，同時也就代表了中心位置甚至是機架絕對不會維持在水平的狀態。本文討論此模擬的最終目的，還是希望未來有機會可以使此機制在某些特殊地形成為載具，如此一來，中心的震動就有討論的必要性，也在此當作指標之一討論。

而計算中心位置的震動，即是將中心點設為空間中的參考點，以距離中心的高度最大的三個足點(支撐足的位置)定為空間中決定平面的點，而此平面即為機構所接觸的地面，藉此反推參考點與平面的距離即為中心的高度。如圖 5.3 所示，展示了中心的最高(離地面最遠)與最低(離地面最近)位置以及震動的範圍。而其中不連續的狀況則是支撐足改變所造成的，因為轉換的點並非整數角度而使得圖形看起來像是有不連續的狀況。

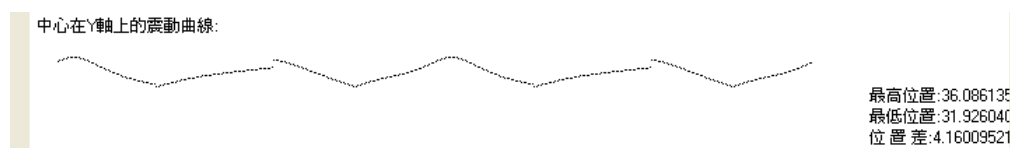


圖 38：一個回圈內中心震動

5.3 本章小結

將本章所討論之指標同樣以 BCB 製作分析程式，並借用其迴圈功能尋求在指標下之最佳解。程式介面如圖 5.4 所示，藉由輸入前後腳相位差、(前)左右腳相位差、(後)左右腳相位差經過計算可求得兩指標之數值。

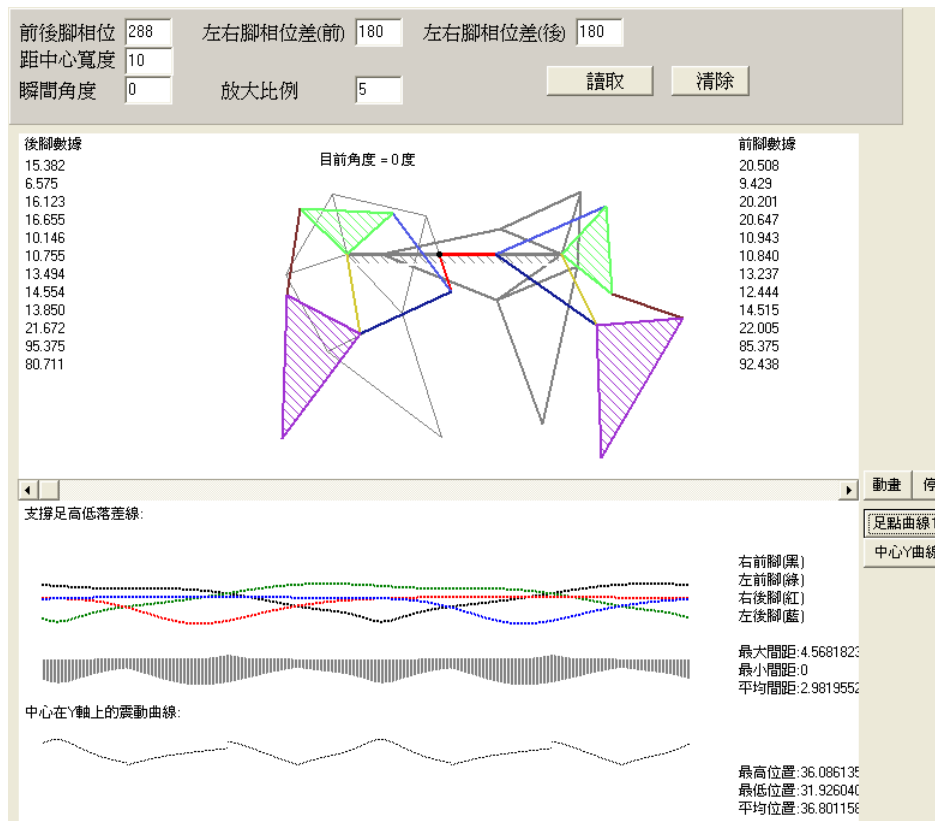


圖 39：組合分析程式介面

為了尋找最佳解，在找尋過程使用迴圈地毯式搜索，其中前後腳相位差的範圍是 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ ，每次迴圈加 1° ，(前)左右腳相位差、(後)左右腳相位差的範圍是 $60^{\circ} \sim 300^{\circ}$ ，每次迴圈加 3° 。如此一來，搜尋結果如下表三、四。

表 三：各區域之最大間距的最小值

區塊	前後腳	前左右腳	後左右腳	最大間距	最小間距
0°~90°	81°	300°	60°	3.409	0
90°~180°	147°	300°	300°	3.409	0
180°~270°	196~236°	60°	300°	3.409	0
270°~360°	288°	180°	180°	3.409	0

表 四：各區域之最高位置的最小值

區塊	前後腳	前左右腳	後左右腳	最高位置	位置差
0°~90°	48°	72°	210°	35.216	4.511
90°~180°	136°	300°	60°	34.311	4.305
180°~270°	189°	60°	300°	34.531	3.641
270°~360°	288°	180°	180°	36.086	4.160

第六章 結論與未來之展望

本論文的研究目的在於利用解答平面的理論設計應用於機構合成上，機構的種類繁多，實際上實現一個通用的程式可以解決所有合成的機會很低，以往的作法除了圖解法之外，就是推導公式求解，卻因為計算能力受限而必須控制精確點的數量。而解答平面的方法卻是在針對某種機構進行合成的過程中，為設計者提供大量的解。

大量的解有時會有選擇的困擾，本文中對機構尺寸的合成，對各參數做了詳細的了解，並歸納主次順序，並提高精確點的數量降低輸入參數的設定，為設計者提供較少卻較佳的解，試圖以精簡的設定參數合成尺寸，降低設定參數對合成結果的不必要影響。

本文中所開發的尺寸目標只是為了符合馬漫步的足跡，當然在同樣的合成程式下，我們可以針對各種步行軌跡進行合成，但是最終目的還是希望藉由開發這個合成的平台，做為將來開發雙自由度的基礎，使此仿生機構除了前進後退外，可以在一定範圍內改變偶點的軌跡曲線，並歸納如下：

- 平衡機制：由於整個機構整體均是由曲柄帶動，而帶動曲柄的則是定轉速馬達，也讓整個機構的平衡性很差。原因是機構本身的偶點曲線若是要維持跨越過程的高度，基於機構本身的結構特性決定了在支撐段的直線狀態過程只佔了迴圈的 $1/3$ ，這與馬在維持直線狀態的比例接近 $2/3$ 比較，還是相差不少，曲線形狀可以無限接近，但是所佔的比例卻是很難改變。若是純粹以單自由度的機構想要完成此目標，只有從機械設計上面著手，但那是另一個專業領域的部分，在此

就不深入討論。

以上是單自由度機構難以達成的目標，若是要解決以上兩點問題，還是必須考慮以雙自由度的機構，但由於此仿生機構是以四個單元八連桿機構所組合而成，必須考慮四個機構之間的配合，再加上雙自由度的機構在設計上難度急遽增加，這也是現今仍未有此種類機構面式的緣故吧。



Reference :

- [1] Venkat Krovi , Modeling and Control of a Hybrid Locomotion System
- [2] 沈煥文，八連桿型機器馬之機構設計，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國八十八年五月
- [3] 黃智勇，可自行平衡具十連桿型腿部機構四足步行機器之設計，

碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國九十五年五月

[4] 陳柏宏，四連桿與六連桿型木車馬之機構設計碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國八十七年五月

[5] 邱正平，波浪型步態機器馬之設計，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國八十五年五月

[6] 黃凱，最佳八連桿型機器馬之研究，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國八十六年五月

[7] 洪青芝，混合八連桿型步行機器馬之機構設計，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，民國九十一年五月

[8] Theo Jansen, at the website :

<http://www.interactivearchitecture.org/theo-jansens-evolving-species.html>
1

[9] Barker C.R, and Pei-Lum Tso, "Three Position Path Generation Synthesis of Planar Four-Bar Mechanisms Using Syntra ", ASME Mechanism Conference, 1988

[10] Barker C.R, and Pei-Lum Tso, "Characteristic Surfaces for Three Position Function Generation With Planar Four-Bar Mechanisms"