

六連桿式四足機械動物的機構設計與步態控制

余志成¹ 洪國凱²

¹ 國立高雄第一科技大機械與自動化工程系

² 國立高雄第一科技大學系統控制研究所

摘要

本文研究可變行程並聯式機器足的設計，以較少的六連桿機構，來達到具跨步與抬腳功能的圓滑軌跡，並結合髖部的滑動與旋轉機構，來變換跨步方向與步距，使此機器足具有三個自由度。本研究應用該機構於四足機器動物的設計，並進行步態分析與機構動作控制，使該四足機器動物具有直行、原地轉向及圓弧轉彎的行動能力。分析中採用ADAMS動態機構模擬軟體，針對前進、後退、轉彎及步長變換等動作進行分析，以估計馬達動力時序及測試動態平衡，並製作一原型機器動物，透過機電整合控制，以MATLAB的GUI環境設計介面，設計參數化的動作指令，並且應用遠端模組網路傳輸進行遠端控制，來驗證此四足機器動物設計與步態控制的可行性。

關鍵字：機器動物、動態模擬、步態分析、機電整合

1. 前言

一般的機器人研究分為輪行與足行兩種形式，輪行機器人具有機動性高、運動噪音低、結構簡單及成本也較低，有許多的學者投入無人式自走車[1]，自動導航車[2]與輪椅機器人等的研究，但輪行機器人在適應地形上較差，不易穿越大於輪子半徑的高度障礙，以及鬆軟的路面的行駛。而足行機器人是以前跨步的方式到運動的目的，因此較具有適應崎嶇地形的能力，可應用於複雜地形如：樓梯、沙漠、壕溝等，近來逐漸受到重視[3]。不過由於機構的自由度多，相對的控制上也比較複雜。

一般足行機器人的足部設計可分為串列式與並列式兩種。串列式機器足是單零件以單馬達控制的形式，此種機器人以型態控制為主，例如二足人型機器人與機器寵物等。因為在每個關節上均有動力的存在，所以在定位的自由度較佳，但在程式與電路上的控制比較的複雜。並列式足行機器人，是多零件以單馬達控制的形式，此類型機器人以機構型態為主體，利用連桿的方式可達到近似動物行走的規律與循環，以減少動力源的數目，所以在程式設計與電路控制較容易，但多為單純的反覆跨步機構，在步長控制上受到限制，常應用成本較低的機器動物玩具。

足行機器人依其行走足的數目大致可分成 (1) 二足機器人、(2) 四足機器人、(3) 六足及多足機器

人。由於二足機器人多模仿人形設計[4]~[7]，屬於串聯式的連桿機構，為高度非線性且不易穩定的系統，平衡的困難度較高，需使用多軸多自由度多伺服控制器，在運算上較為複雜，屬於足行機器人中成本與困難度較高。

六足機器人多模仿昆蟲的走路型式[3][8]，具有較高的穩定度，可在崎嶇不平的地形中活動。這種設計具有較高的穩定性，但由於足的數量與自由度太多，控制上隨著複雜，行進的速度相對變慢。

四足機器人[3][9]則介於兩足機器人及六足機器人之間，主要優勢在於具有高於兩足機器人的穩定度與高於六足機器人的行進速度。其中並列式四足連桿機構行走機器人，在步態控制上[10][11]最重要的考量是在重心平衡的問題與行進腳的機構分析，尤其在轉彎動作個別腳的跨距與角度協調，必須減少滑動量，如此才能應用在路徑控制上有良好的移動準確性與穩定度。

本研究提出可變行程的並聯式機器腳的設計，以六連桿機構的設計配合滑行動，運用於四足機器動物，並結合滑動機構來變換跨距，再配合髖部的旋轉機構使每隻腳具有三個自由度。應用步態分析與機構動作控制，讓四足機器動物具有直線運動、原地轉向及圓弧轉彎的移動能力。

2. 四足機械動物之結構設計

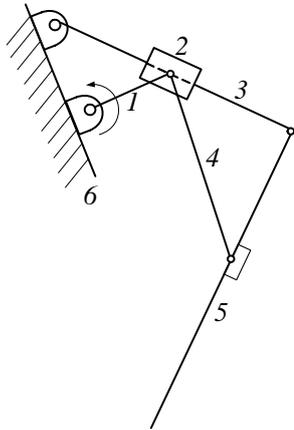
2.1. 機構設計

典型的四足機器動物基本的運動需求需要能達到，直線行進、原地轉向及圓弧轉彎的功能。就直線行進而言需能控制行進的速度，控制速度主要在於跨步的速度與步長的控制，並聯式機構的動作是以反復式跨步的方式，基本上，步長將決定移動距離的單位，也限制了距離的解析度，若具有步長的控制，則能使移動的距離更具有控制的彈性。而在圓弧轉彎上，外足的跨距要比內足的跨距大以避免滑動，此時步長的控制更為重要，而轉彎時每隻腳的轉彎角度不同，因此每隻腳的髖部上須具有一個旋轉的自由度，才能達到平滑轉向的功能。

本文所提出的機構設計仿照鴛鴦的腿部結構如圖一所示，以六連桿機構與滑行動的方式結合而成[13]，優點是利用較少的連桿，達到一良好的封閉曲

¹ 聯絡作者: jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

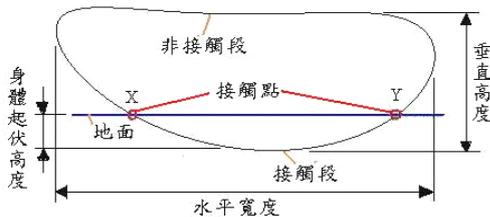
線。而5連桿連分別為：大腿(L_1)、小腿(L_4)、腱(L_3)，曲柄(L_2)及固定底座(L_0)等5個桿件所組成。在大腿上有一滑動鍵結，供曲柄與腱的接觸點滑行，而拉動小腿，使形成一封閉曲線的移動。



圖一 六連桿機構足部設計示意圖

2.2. 足部的軌跡

足部的軌跡乃是足部機構完成一循環動作所產生的封閉曲線，這封閉的曲線將會影響到四足機器動物在行進時的穩定性、越障能力及行進速度。一般足部軌跡，在行進期間可分成離開地面(非接觸段)與接觸地面(接觸段)兩個階段如圖二所示，非接觸段為圖中地面以上的曲線，表示腿部在空中移動行進的軌跡，而接觸段為圖中地面以下的曲線，表示身體會移動從X到Y的直線距離。Y點為跨越時的起點，X點則為終點，當圖中的軌跡垂直高度越高，相對的越障能力越佳，而水平寬度越大則表示動物的跨步距離越長，但在接觸段曲線低於地面的部份，便會形成四足機器動物行進時身體起伏的高度，一般的四足動物行走時身體也會有些許的起伏現象。而在非接觸段較為平緩可便於跨越障礙。此軌跡的基本移動步長距離為圖二中接觸段直線XY的長度。



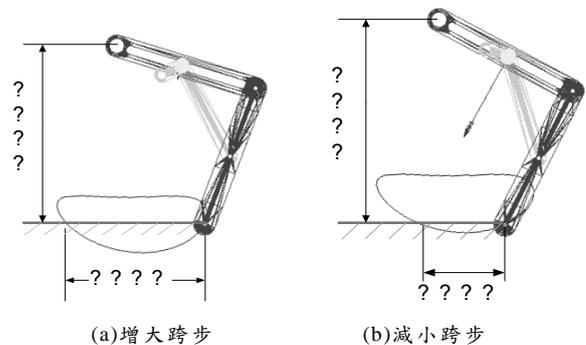
圖二 足部軌跡

2.3. 變換步長機構的設計

一般由連桿機構設計而成的機器動物，足部的循環軌跡是一個固定的封閉曲線，機器動物只能以固定步長的方式移動。本研究以兩種形式來改變步長，一是變動連桿機構軌跡與地面接觸起始點的位置，可使步長小幅度的變換，另一種是在腕部加設一線性滑動機構，在步態移動時可較靈活控制步長。

2.3.1. 機構本體的步長變換

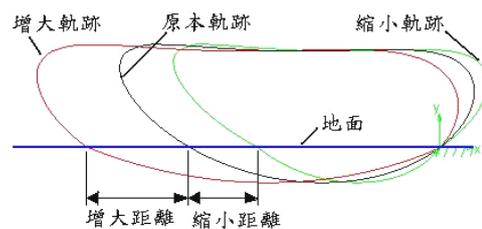
此機構變換的步長方式將不會改變足部原本的軌跡曲線，只是改變跨越起始點如圖二中Y點的位置，步長移動的距離為圖中的XY線段中，當機構腳改變初始位置的形式，如圖三(a)時，此狀態將會把原本跨越起始點Y點提升，步長移動的距離變為比原本的XY線段更長，也因為跨越點提升的結果，會導致足部向前推動時身體起伏的高度增加。相反的，當機構腳改變的初始位置形式為(b)時，跨越起始點會下降，步長移動的距離將縮短，而腳的基線高度也將增大，機器動物身體的起伏變小。跨越起始點的位置，可由機器動物足部運動週期的相位差來控制，最大的移動距離可控制在軌跡行程的最大位置，而最短距離，可使機器動物在原地的踏步。此機構控制的缺點是在控制初始點時，必須四隻腳同時進行，且位置均要相同整體改變四足的基線高度，否則將會造成機器動物的四足高低不同而不平衡。



圖三 機構本體的步長變換與基線高度的關係

2.3.2. 螺桿機構輔助步長變換

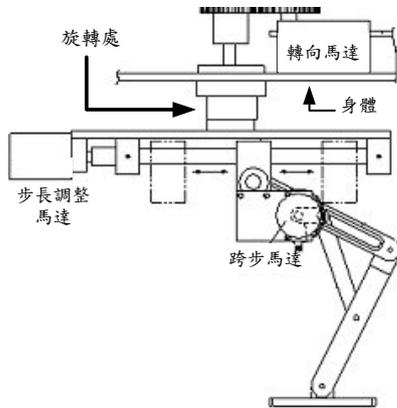
以機構變換的步長的方式將改變足部跨步的軌跡，利用螺桿轉動來平移固定連桿機構腳的滑塊如圖五所示，可增加或縮減曲線的軌跡。在跨越階段同時轉動螺桿使滑塊向前，可增加跨步的長度；而在推進身體的階段，同時反向旋轉螺桿使滑塊回到起始點。反之，螺桿若使滑塊先向後再向前，步長將會縮短如圖四所示。此機構的優點是不需改變足部軌跡的初始點，也能增大或縮減步長，此種形式足部基線高度將不受到動作的影響。而在行進時也可將上述的兩種步長變換機構合併使用，此時的步長範圍將會變大許多，總長度將為螺桿的長度再加上軌跡的最大距離。



圖四 以滑動螺桿變換步長

2.4. 轉向機構的設計

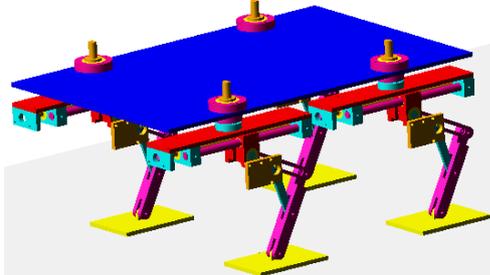
本研究在機器動物腳的腕部設置了轉向自由度。使機器動物能達到轉向動作，圖五為整合三種機構的機器動物足部設計概念圖。



圖五 機構設計示意圖

2.5. 四足機械動物原型設計

本文所提出的四足機器動物整體結構分成五個部份，如圖六所示，包括中間的主要身體及四個相同的六連桿式機械腳，不含馬達總長度約 450mm、寬 325 mm、高 220 mm，前後腳相距 240 mm。前後腳採用同的機構設計，其優點在於行走時的平衡狀態，較容易控制機器動物的穩定性。而身體上部留空的部份，將放置機電系統與後續發展的視覺系統等。



圖六 四足機器動物的組合圖

3. 步態分析

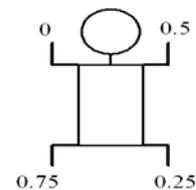
在步態的控制與應用上，需藉由上述足部軌跡的接觸段，加以推算出步長，再配合步態的分析，應用於直行、後退及轉彎等行進動作，轉彎上又可分為原地轉向與圓弧轉彎兩種形式。

3.1. 直行步態

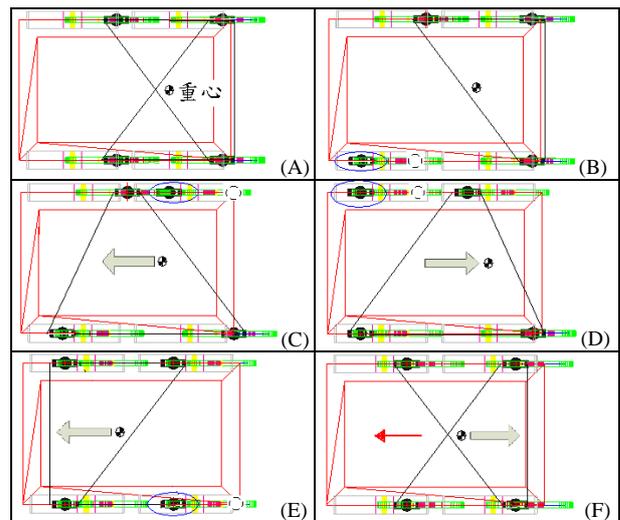
在直行的步態上本研究採用慢步(amble or walk)的移動方式[10]，主要是因為此種步法在行進時有三點著地，在平衡的考量上，優於其他形式的步法。慢步的移動方式是以連續四拍子的循環節奏進行，以工作係數(duty factors)來相對應的話，如圖七腳分別舉起與落到地面依序為左前、右後、右前、左前的方式

循環，每隻腳的動作時間均為相等，所以在移動過程的穩定性較佳。

圖八為直行慢步步態搭配圖七工作係數之移動順序，從初始狀態(A)，因重心座落於後腳與右前腳所圍成的底面積範圍內，因此可移動左前腳(B)，之後利用腕部的機構將身體向前(C)，使重心落於著地三腳所圍成的範圍內，箭頭代表重心移動的方向。此時可移動右後腳，(D) 利用身體的機構將重心後移使落於三角型所圍成的範圍內，如箭頭移動的方向，此時可移動左前腳，(E) 同理的方式移動左後腳，(F) 四腳同時動將身體推向前，如細箭頭方向。在一般狀態下該機構腳的跨步距離為 7 公分，配合跨步起始點與腕部滑動螺桿的調整，行進步長最大可達 20 公分，而最短距離為可在原地踏步。



圖七 慢步的工作係數(duty factors)



圖八 直行慢步步態

3.2. 原地轉向

轉彎的方式參考四輪車的轉彎方式[12]，以車體後輪的連線中心為轉彎的圓心O點如圖九，此時每個輪子的軸線交叉在同一點O點，因為O點位於後輪連線的中心點，所以角1與角2相等，而從O點到兩前輪子距離相等的，O點到後輪的距離相等，所以只要搭配前後輪的速度，就能達到以O點為圓心的原地轉向。

但在此四足機器動物是四足分別直線的跨步移動，並非如同四輪車可同時且連續的在圓弧軌跡上滾動，所以在計算上除了圓心到腳的角度外，還需考慮到每個軌跡行進的距離。本文考慮每隻腳在在跨步後

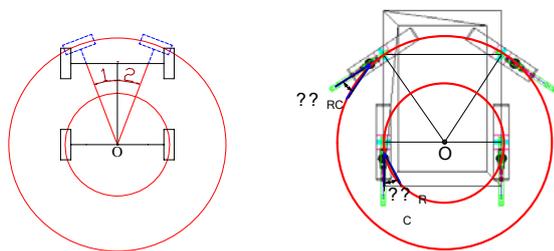
落在圓弧上的移動量，使動物做出近似於圓形的轉向，首先將前腳轉向如式(1)的角度，每隻腳的跨步量與身體轉向角度間的關係可經由(2)(3)式推算出來：

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{L}{W/2} = \tan^{-1} \frac{2L}{W} \quad (1)$$

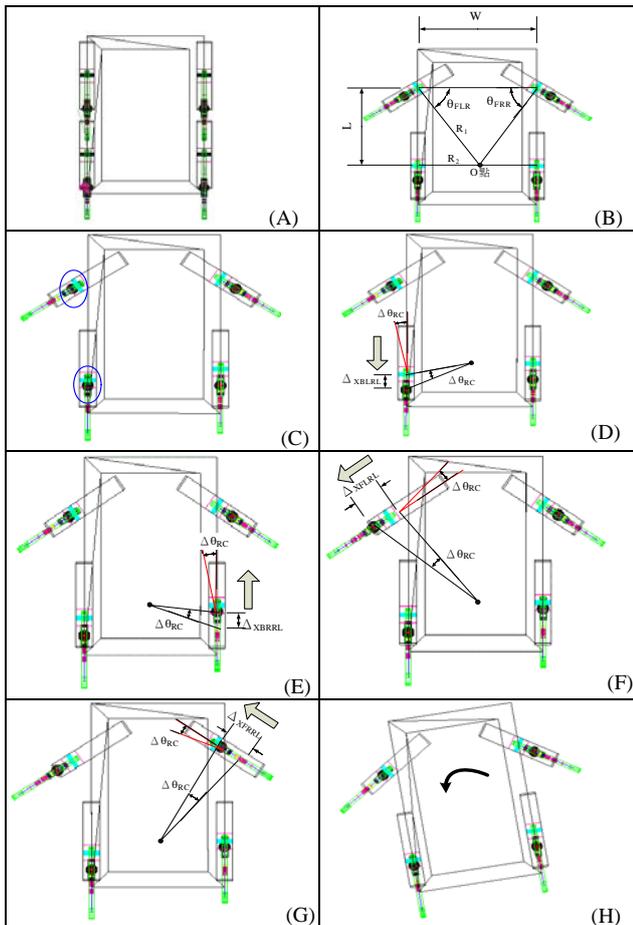
$$\Delta X_{FLRL} = -\Delta X_{FRRL} = \sqrt{R_1^2 + R_1^2 - 2R_1^2 \cos \Delta\theta_{RC}} \quad (2)$$

$$\Delta X_{BLRL} = -\Delta X_{BRRL} = \sqrt{R_2^2 + R_2^2 - 2R_2^2 \cos \Delta\theta_{RC}} \quad (3)$$

但機器動物腕部與足部並未落在同一垂線上，且足部與地面的接觸點也不是點的接觸，而是面的接觸，因此在轉向的過程中，腳與地面接觸點無法避免會發生滑動的現象，其旋轉誤差量將在下一節中藉由動態模擬來分析，其步態時序如圖十。



(a) 四輪車原地轉向 (b) 四足動物原地轉向
圖九 原地轉向

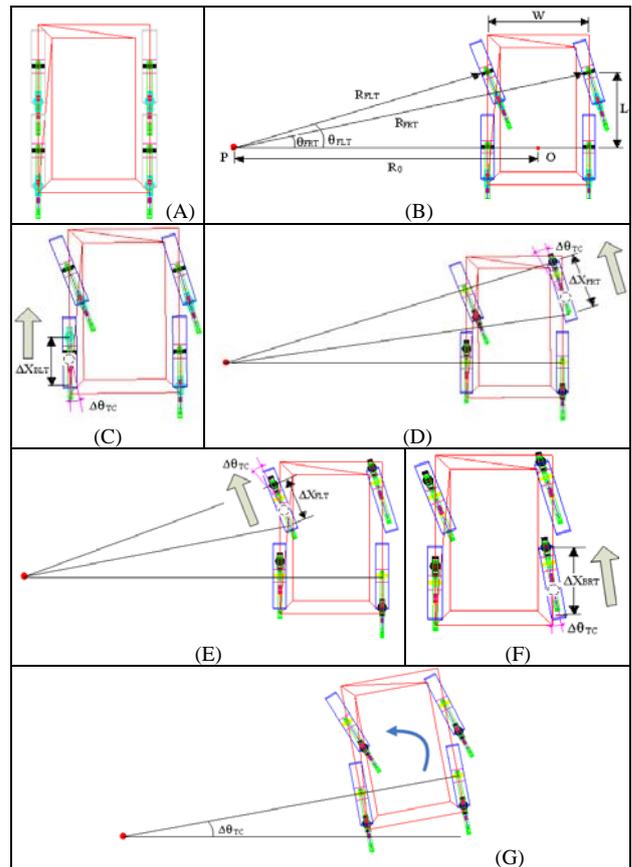


圖十 四足機器動物原地轉向

3.3. 圓弧轉彎步態控制

本研究利用Ackerman轉向原理，使機器動物能在行進時做圓弧轉彎的動作，各腳分別使用獨立的動力，跨步行進方向的法線是交叉在同一點上。在圓弧左轉彎步態時，先給定旋轉圓心的位置 P 點，即可知 P 點到每隻腳的距離，再給定每次跨步循環所要轉彎的角度 $\Delta\theta_{TC}$ ，即可推算出每隻腳需跨越的步長。從初始狀態(A)，計算出沿 P 點圓弧轉彎前腳所需轉動的角度(B)如式(4)與(5)，由於 P 點位於後腳的延伸線上，所以後腳不需轉動。

圓弧左轉步態如圖十一，依序為左後腳(C)、右後腳(D)、左前腳(E)及右前腳(F)，由於每隻腳到圓心 P 點的距離不同，所以當同時移動 $\Delta\theta_{TC}$ 的角度時，每隻腳的移動量也均不相同，跨步的大小由式(6)~(9)可知，四腳分別跨步後同時向後推動身體向前，同時使身體旋轉(G)。由於每隻腳的移動量均不相同，所以滑動量也均不相同。當 ΔX 移動量越小， $\Delta\theta_{TC}$ 越小，則滑動量會越小。



圖十一 四足機器動物圓弧轉彎

$$\theta_{FLT} = \tan^{-1} \frac{L}{R_0 - W/2} = \tan^{-1} \frac{2L}{2R_0 - W} \quad (4)$$

$$\theta_{FRT} = \tan^{-1} \frac{L}{R_0 + W/2} = \tan^{-1} \frac{2L}{2R_0 + W} \quad (5)$$

$$\Delta X_{FRT} = \sqrt{2R_{FRT}^2 - 2R_{FRT}^2 \cos \Delta \theta_{TC}} \quad (6)$$

$$\Delta X_{FLT} = \sqrt{2R_{FLT}^2 - 2R_{FLT}^2 \cos \Delta \theta_{TC}} \quad (7)$$

$$\Delta X_{BRT} = \sqrt{2(R_0 + \frac{W}{2})^2 - 2(R_0 + \frac{W}{2})^2 \cos \Delta \theta_{TC}} \quad (8)$$

$$\Delta X_{BLT} = \sqrt{2(R_0 - \frac{W}{2})^2 - 2(R_0 - \frac{W}{2})^2 \cos \Delta \theta_{TC}} \quad (9)$$

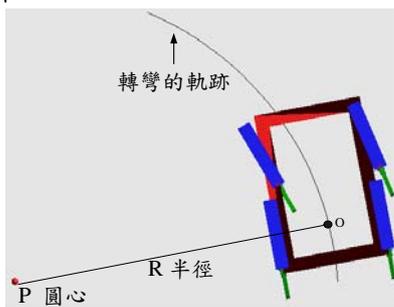
$$\text{其中 } R_{FLT} = \sqrt{L^2 + (R_0 - \frac{W}{2})^2} \quad (10)$$

$$R_{FRT} = \sqrt{L^2 + (R_0 + \frac{W}{2})^2} \quad (11)$$

4. 機構動態模擬

4.1. ADAMS 動態模擬與分析

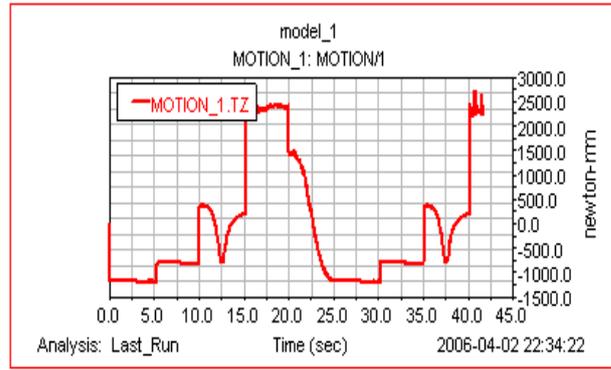
四足機器動物主要的基本功能為前進、後退及轉彎等，本研究以動態模擬分析軟體ADAMS 作為分析工具，檢測機構的正確性、運動方式的機構動作程序與驅動馬達控制配合，並且驗證四足機器動物在行走時的平衡狀態。以圓弧轉彎為例說明，圓心在後腳連線向外延伸，且四腳均交於同一點上，在行進時必需給定圓心的位置，再代入3.3節的公式(4)~(11)，則可得知每隻腳須先轉動對準圓心的角度，再由給定所要行進的角度 θ ，換算出行走的步數，如圖十二所示，為本研究的四足機器動物利用ADAMS模擬的圓弧左轉彎，所模擬出來行走60度的圓弧曲線，由於有些許的滑動現象產生，使旋轉半徑產生變動，以旋轉半徑為1200 mm 為例，其轉10度半徑偏差為10 mm左右，而旋轉的誤差量，在每次圓弧轉彎10度模擬誤差量僅在1度以下。



圖十二 ADAMS 模擬圓弧轉彎

4.2. 驅動系統的設計

四足機器動物的總重量約為四公斤，再增加馬達、電池與其他電路設備的負載，估計整體的總重量約為六公斤，經由ADAMS的動態模擬分析軟體，可得到在各種運動模式下，每個關節自由度所受到的扭力變化如圖十三所示，利用負載模擬結果可看出最大扭力需求為2700 (N.mm)，藉以決定出每個動力所適用的馬達與減速機構。



圖十三 動態模擬與馬達扭力曲線

5. 四足機械動物機電系統

5.1. 機電系統規劃

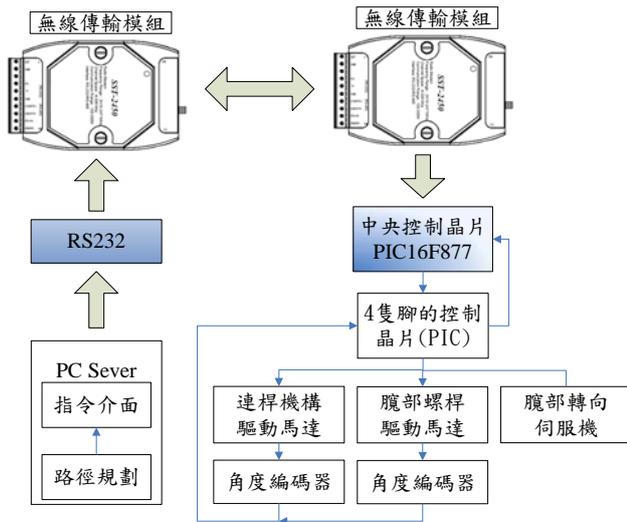
四足機器動物之機電系統如圖十四所示，利用電腦作為伺服器，從伺服器傳送訊號，而訊號傳輸將透過RS232給無線傳輸模組，經由另一個無線傳輸模組接收訊號，給單晶片控制器，本研究使用五個PIC單晶片作為動作控制，一個中央控制器，其他四個分別為四隻腳的控制器，經中央控制器來命令其他四個控制器，再由這四個控制器來控制每隻腳的兩個直流馬達，及一個伺服馬達，使四足機器動物能有多種形式的移動方式及定位控制。

5.2. 機器動物動作控制

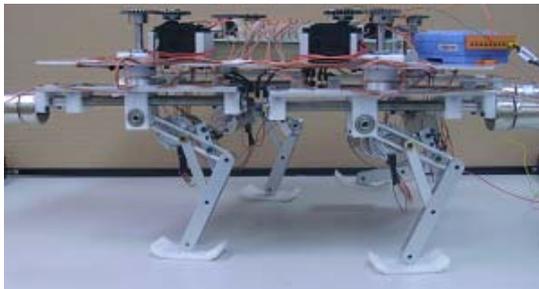
電腦傳輸介面係藉由MATLAB裡的GUI控制面板設計，來定義四足機器動物的模組化移動指令如表1所示，當輸入指令及參數後，四足機器動物會跟著指令而決定行進的動作，且依據參數來決定移動的方向與距離或角度，將動作序列的規劃以字串的方式經連接RS232傳輸，將字串訊號由無線傳輸模組 (Master)，傳輸到無線傳輸模組 (Slave)，再由單晶片接收此字串訊號，單晶片再利用這些字串訊號轉換為控制四足機器動物的指令動作。當編碼器傳回指令動作完成時，再經由無線傳輸模組回傳一訊息到MATLAB，再由MATLAB傳出下一個動作指令直到完成所有動作。

表 1 四足機器動物動作指令與參數

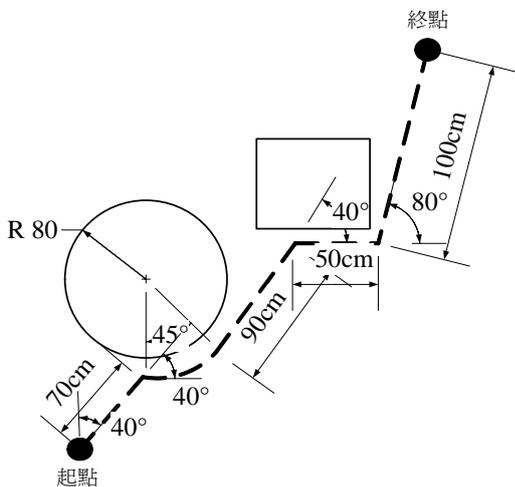
動作	指令	描述	參數
直行慢步	AMBLE	慢步前進或後退	方向與距離
直行快步	TROT	對角線快步前進或後退	方向與距離
原地轉向	SPIN	以身體為中心原地轉向	方向與角度
原地轉彎	ROTATE	以後腳連線為中心原地轉向	方向與角度
圓弧轉彎	ARC	圓弧轉彎	半徑與角度



圖十四 機電系統



圖十五 原形四足機器動物實體圖



圖十六 測試環境路面

5.3. 實體動作驗證

我們依設計建構原型實體如圖十五，用以驗證動作為直行、原地轉向及圓弧轉彎動作，在一個已知的環境如圖十六所示，使四足機器動物從起點移動到終點，途中會遇到圓形障礙及方形障礙，利用直行配合圓弧轉彎及原地轉向來避過障礙直到終點，由於在移動過程時，均要控制重心的位置，此時會有滑動誤差

的產生，以及馬達控制的解析度誤差和實體製作之間的機構餘隙(backlash)，將造成實際機構動作的誤差比ADAMS所估計的誤差值為大。原形機測試在直行運動上，當每次基本步長移動量為7公分，在直行時可能產生正負1公分的誤差。而在原地轉向運動上以每次旋轉的角度為23度時，其角度的偏轉誤差在正負3度左右。而轉彎半徑為80cm的圓弧轉彎時，以每次轉彎角度為5度時，大約會有1度左右的誤差。

6. 結論

本研究為設計製作六連桿四足機器動物，以較少的六連桿機構而能達到機械腳所需的跨步軌跡，再加上髖部平移與旋轉機構，使四足機器動物達到進行前進、後退、轉彎的步長變換要求。而透過ADAMS動態模擬驗證馬達的控制時序以及四足機器動物的步態，作為驅動系統設計與動作程式的設計參考。雖然理論估計與機構模擬因為滑動的關係有些誤差，但模擬結果驗證了所提出之步態與機構動作的合理性。

在原形製作上，本研究以PIC單晶片將四足機器動物的行進動作參數化與模組化的機電整合，MATLAB透過RS232經由無線傳輸模組的訊號後，進行指定的動作。原形四足機器動物的運動情況與模擬的結果有些差異性，主因來自製作成本限制所造成的機構餘隙與定位誤差，未來可藉由機構與定位編碼器控制，提升精度來減低其動作誤差量。但現有原型已達到直線行進、原地轉向及圓弧轉彎等功能的預期需求，也驗證了機構概念的可行性。

7. 參考文獻

- [1] Maxwell, W. L. and Muckstadt, J. A., 1982, "Design of automatic guided vehicle systems", *IIE Transaction*, 14(2), 114-124.
- [2] Volpe, R., Balam, J., Ohm, T., and Ivlev, R., 1997, "The Rocky 7 Mars Rover Prototype", *Advanced Robotics*, Vol. 11, No. 4, pp. 341-358
- [3] Song, S. M. and Waldron, K. J., 1989, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, The MIT Press, Cambridge, and Massachusetts. London, England.
- [4] Rosheim, M. E., 1994, *Robot Evolution - The Development of Anthrobotics*, New York.
- [5] Koganezawa, K., Takanishi A., and Sugano S, 1991, <http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/katobok.html>
- [6] Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., and Fujimura, K. 2002, "The intelligent ASIMO: System overview and integration", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2478-2483,
- [7] Arkin, R. C., Fujita, M., Takagi, T., and Hasegawa, R. 2003., "An ethological and emotional basis for human-robot interaction," *Robotics and*

- Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 191-201
- [8] Russell, M. 1983, "Odex I: The First Functionoid," *Robotics Age*, Vol. 5, No. 5, pp. 12-18
- [9] Yan, H. S., 1998, *Creative Design of Mechanical Devices*, Springer Singapore.
- [10] Alexander, R. M., "The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 49-59, 1984.
- [11] Alexander, R. M., 1992, "Exploring Biomechanics – Animals in Motion", W. H. Freeman and Co.
- [12] 李顯宏、余志成，2003，適形越障探測車之行動規劃與機電整合，第二十屆機械工程研討會論文集，國立台灣大學，台北，台灣
- [13] 余志成、洪國凱，2006，“可變步長的步行裝置”，中華民國專利，專利申請中，申請案號 95133400

Mechanism Design and Gait Control of a Five-bar Linkage Quadruped Robot

Jyh-Cheng Yu¹ and Kuo-Kai Hong²

¹Department of Mechanical and Automation Engineering

²Department of Systems and Control Engineering

National Kaohsiung First University of Science and
Technology

This paper proposes a quadruped walking machine using the mechanism of a six-bar linkage and a sliding pair. The mechanism design provides a smooth foot trajectory with less number of linkages. The leg linkage is attached to a sliding joint and a rotating mechanism at the hip to control the step span and direction, which allows the quadruped machine to coordinate the motion of each leg to accomplish the locomotion of advancing, spinning, and turning. This study uses a dynamic mechanism simulation software, ADAMS, to verify the kinematics of each locomotion, and to estimate driving torque of the walking machine. At last, a prototype of the quadruped-walking machine is fabricated. A control interface using Matlab is proposed to realize the parametric motion commands and to coordinate the locomotion kinematics. The remote control system combines with the wireless motion control. We adopt a microchip to be the central processing unit to control another four chips for leg movement. The prototype demonstrates the feasibility and kinematics analysis of the proposed concept.

Keyword: Walking Robot, ADAMS, Quadruped,
Gait Analysis