

一、緒論

隨著工業自動化的過程，應用機器人代替人力為必然的趨勢。而對行走式機器人更是近來研究的重點。本研究針對以貓、狗等四足動物的運動行為為參考模型的仿生四足機器人，進行實際的步伐軌跡設計與控制，以周期性反覆的行走步伐為規劃基礎。加入穩定度分析與運動方程式的推導。建構四足仿生機器人穩定而靈活的運動步伐控制軌跡，使四足機器人能穩定、確實的到達目的地，為本研究的重點。

1.1 研究背景與動機

工業用機器人的歷史源自 1959 年美國英格伯格和德沃爾製造出世界上第一台工業機器人，機器人的歷史才真正開始。機器人為 20 世紀人類最偉大的發明之一。機器人的出現，帶給人類生活劃時代的改進。在產業中，由於各種的需求考量，從產量、品質、安全，以及人性上的考慮。對於單調且重複性高，或是危險的工作，都開始採用機器人做自動化的工作。

而後為了適應人類的生活環境，各種利用行走為運動模式的機器人相應而生。此方面的研究以二足、四足和多足為最常見的模式。二足機器人是為了能模仿人類行走，適應於較貼近人類的工作環境中，能代替人操作設備。四足機器人，能達到在穩定平衡狀態中行走的最少腳數。其運動的穩定性、可靠度、以及負重能力，相對於二足機器人來說，具有相當的優勢。多足機器人在這方面的優點類似，但若非特殊需求，較多的腳反而造成控制與步伐規劃上的複雜度。

針對四足步行機器人行走的研究眾多，步伐規劃研究最初將機器人的腳當作一種具有兩個開關的裝置，不是著地就是離地，而針對各腳的事件同時發生與否，便成為步伐。之後的發展從觀察四足動物的行走方式，得出理想的各腳移動順序。再其後的研究方向主要以靜態穩定與動態穩定做區分，像以數學分析建立了能保持在靜態平衡下行走的標準直行步伐與旋轉步伐的理論，利用電腦作模擬地形的直行步伐軌跡最佳化研究，使步伐值達到最大。也有研究旋轉步伐和直行步伐的轉換機制，讓機器人達成連續於各方向行走的可能，這方面的研究基礎多建立在理想的平面與已知地形的規劃上。

而在未知平面上行走進行的研究，主要倚靠著人工智慧的演進而發展。這種方式是將外來環境的變化轉成一項項的參數，藉由反覆訓練、或是歸納演算的過程，得出一套行走的方案。但是過程卻往往需要龐大的運動學及邏輯判斷的計算量，部份參數的調整與定義仍舊仰賴設計者的經驗，會因學習失敗、無法收斂種種的可能性導致花費長時間研究。本研究從步伐規劃着手，從工作空間尋找最佳的腳步著地點位置，進而設計數套行走方案互相配合。在運動方式上簡化演算過程，使其能以微處理機取代電腦的有線控制，並利用感測器做未知路面情況的判別，使機器人以數種最佳化的步伐，組合成一套完整的行走方式。

1.2 文獻回顧

機器人的歷史雖不長，但是因為具有相當的重要性，其相關的研究極多。而關於四足機器人，有幾個主要的研究方向。針對穩定度的研究分為動態穩定和靜態穩定[8]，為了不使機器人翻倒、傾斜，靜態穩定要求機器人行走時重心保持在穩定度多邊形之中。研究何種步伐方式能行走最快、花費最少步數；動態穩定另外考慮到重心受機器人本身速度、加速度，以及其他外加因素導致的重心偏移[3]。研究主要在尋找其最快、最省能量的運動軌跡，以及對應地形的穩定能力。

1966年，Wilson 定義波浪步為直線行走的標準步伐，波浪步是從一般生物行走的方式觀察而來，在四足上則是同一對角線的左前腳、右後腳會同時抬起，而另外的左後腳與右前腳此時會放下。而之後為了滿足靜態平衡下，四足機器人的波浪步伐變化為爬行步(crawl gait)。這是由在同一時刻原應兩腳抬起、兩腳放下的波浪步伐，變為一腳抬起、三腳放下的行走。步伐的設計中，有以反覆固定的動作來運動，這種周期性步伐的軌跡在工作空間來看是不變的。容易對步伐數、速度、耗能.....等方面做最佳化的評估。也因為行走姿勢位置固定、變化少，會發生的障礙情況也就少，容易考慮應對。相對於周期性的非周期性反覆步伐(Free Gait)，通常隨著設計演算法的不同，隨著障礙物和地形，改變著地點來移動，各有其特長。

步伐規劃便是在進行步伐的最佳化，最佳化的方向通常是要求用最短的時間走最大的步伐，從直行步[15]、旋轉步[16]到兩者間步伐轉換時間的優化[14]是針對一次步伐循環所能達成的步伐大小而設計。其它有利用改變行

走時腳步在空中與地面的時間比做行走速度的調整[13]。也有利用參數轉換使機器人動作平滑[17]，為的是讓機器寵物的動作更加的靈活。

機器人的智慧則隨著人工智慧演算法的進步與改良而發展，不論是模糊理論，類神經網路[9]、基因演算法[10][11]，都有其應用之實例。專家系統則以資料庫的方式，從各個條件中作篩選判斷；模糊理論將二元邏輯的基礎，擴展到連續值上來，以各種因素造成影響程度的差異來調配動作的反應程度；類神經網路藉由反覆的訓練、收斂後得到一套通用的模組；基因演算法透過交配、突變的方式，製造更多的可能解，再經選擇後刪去。而留下的解則可以產生更有競爭力的後代，反覆運算直到符合所需的限制為止。視覺系統使得機器人能從外界獲得更大量的資訊，從一般的觸碰式開關、紅外線、超音波的片面資訊擷取，到利用攝影機獲得較齊全的環境參數做機器人行為條件的輸入 [12]，配合演算法使機器人適應環境，進行智慧型反應的動作輸出。

Hirose [1]從機構動力學的觀點出發，將機器人的驅動方式，依照能量消耗分類為三種模式，如表 1 所示：(1)正面作動模式(the positive mode)：必須輸出力或力矩，才能使機器人產生動作的能量消耗。(2)協調作動模式(the isometric mode)：必須同時輸出力或力矩及牽制力〈或力矩〉，才能使機器人保持當前的動作不變。(3)牽制作動模式(the negative mode)：動作提供相反或牽制於運動的力或力矩，才能使機器人保持當前的動作。

表 1 機器人於各種工作狀態的耗能分類。

Work mode Actuator	Positive	Isometric	Negative	Example
Type 1	+	+	+	Muscle
Type 2	+	0	0	Motor with break
Type 3	+	0	-	Motor with regeneration break

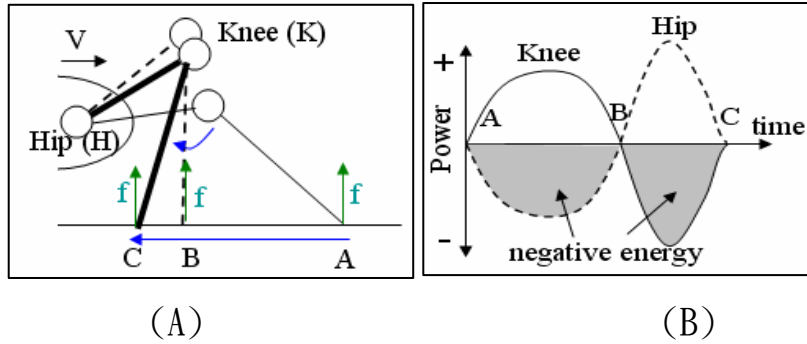


圖 1 (A)一般機器人的關節運動以及(B)動作所造成的能量損失

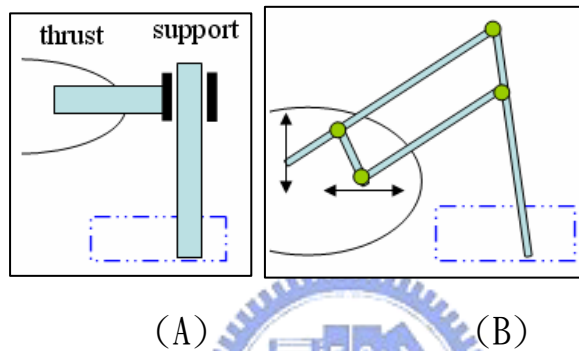


圖 2 (A)機構上鎖型機械臂(B)增添機構放大與腳部輕量化

如圖 1 所示，一般的設計通常直接從關節角度做施力點控制，在足底從 A 移動到 B 點時，髋關節(Hip)消耗負功(髋關節施與足底的反作用力 f 相反的順時針力矩，腳臂 HK 相對於髋關節為逆時針運動)，膝關節(Knee)消耗正功。足底由 B 移到 C 時則相反。如運動關節採用一般伺服馬達，則需在靜止時持續輸出能量來維持姿勢，這種類似人類肌肉運動的方式是表 1 上所述第一類，也是最為消耗能量的。因此如表 1 第二類的新設計被提出。如圖 2(A)，在動作靜止時，利用機構上鎖方式，使機器人不需要花費多餘能量來保持固定位置。且施力與動作方向一致，無負功的消耗。圖 2 (B) 則以相同的方法，配合機構放大，提高工作範圍且減輕腳的重量。

而後 Hirose 和 Kunieda [2]提出穩定度三角形對角線交換點(Diagonal Triangle Exchange point, DTE point)的觀念(參考第 2-4 節說明)，建立起一種四足機器人直行步的步伐規範，考量機器人在任何工作空間情況下，根據行進方向及跨步時間比做篩選，找出可行的最大移動步伐距離與腳步的落地點。

Vincent HUGEL 和 Pierre BLAZEVIC [3]，考慮實際機器人在運動時，受到本身速度、加速度與其他不穩定因素使重心偏移，經由觀察後假設偏移量隨時間呈一正弦函數變化。利用偏移造成的重心力矩，與平衡所需的最小運動速度，導出偏移幅度與穩定多邊形內角的關係以及保持動態穩定之邊界限制條件近似公式。

Shugen Ma、Takashi Tomiyama、Hideyuki Wada [4]，將 Hirose 提出的標準直行步伐和旋轉步伐結合。讓各種步伐在移動後，有一或二隻腳保持於身體座標中相同的位置稱為共用步伐落腳點(Common foot position)，如圖 3 所示。X 方向直行步在運動過程中，左上及右下兩足與 Y 方向直行步保持同樣的位置，旋轉時也至少有一足與其相同。兩種步伐在轉換時，只要調整不同位置的腳步，便能用最少的步伐數完成動作。

控制方面將各種步伐假設成圓弧運動，於步伐轉換前預先計算出新的曲率中心，步伐依照曲率中心的位置作判別，以直行—橫行、直行—旋轉—直行……等交互變換的方式達成目的，讓機器人可以在各個方向連續性的行走。

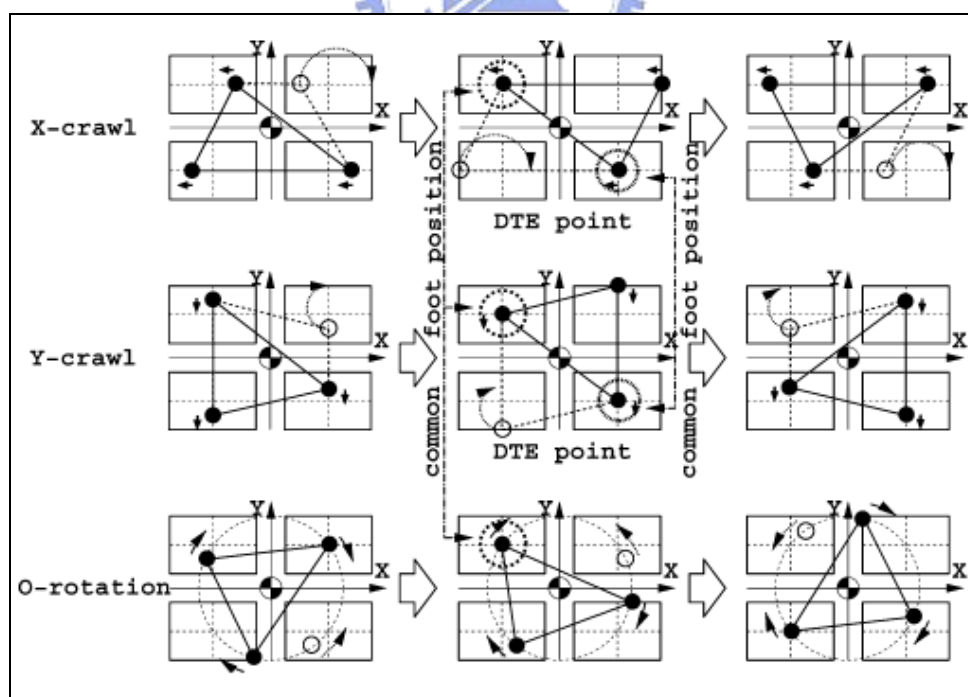


圖 3 共用步伐落腳點(Common Foot Position)的示範

說明：由上而下分別為 X 方向直行、Y 方向直行、順時針旋轉步伐

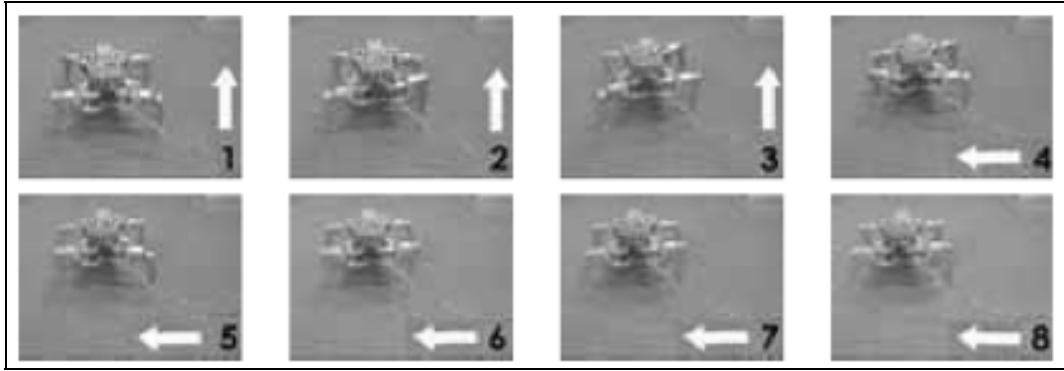


圖 4 直行與橫行間的連續步伐轉換。

1.3 研究流程

本研究利用微處理機作為控制器，使其具有脫離電腦而獨立運動的能力。以數學分析的方式建立步伐產生機制。結合機構運動學及步伐規跡篩選法，針對行進速度、及步伐間轉換時所需步伐數為目標函數，進行步伐參數最佳化處理，進而產生最佳的步伐程序與步伐長度值。而控制系統上，配合感測器達成在未知地形上行走的能力。根據此目標，訂立以下研究流程：

1. 四足機器人控制結構改變與架設

本研究利用單晶片微處理機，包括四組 89C51 及一組 BASIC Stamp 2 創新開發四足機器人之群組控制單元控制器，取代原有以電腦控制卡同時針對每個馬達做輸出控制的方式，使具有脫離個人電腦的獨自運作能力。

2. 機構運動學方程式計算

進行四足機器人之工作空間，座標系統、位移、速度及加速度分析。

3. 步伐規劃演算法的建立

應用 Hirose 的 DTE 法則，發展出電腦輔助的四足機器人步伐軌跡歸劃系統，計算本研究機器人在直行各方向的最佳步伐。

4. 步伐轉換的設計

針對共用步伐落腳點的選擇，改進 Shugen Ma[4]的旋轉步伐等異步步伐互相變換的規則，減少所花費的步伐數，使轉換過程的步伐更為流暢。

5. 步伐規劃與電腦模擬

利用新的步伐規劃設計結果與過去研究者之研究資料做模擬比較，並以感測器進行避障機制的開發。

6. 實際實驗

將設計的步伐讓本實驗開發的”NC-F4”仿生四足機器人做實際行走的測試與驗證。

1.4 章節架構

第一章：『緒論』說明本篇論文研究動機與背景、文獻回顧、研究流程，以及章節編排的架構。

第二章：『基本理論』闡述四足步行機器人步伐規劃研究所牽涉之專有名詞定義，包含穩定度、步伐跨步時間比例、基本步伐順序、穩定三角形對角線交換以及機器人各部分機構的位移、速度運動方程式分析。然後舉例講解從最大步伐軌跡規劃法，到如何藉此建立步伐轉換的原理來由，推到對應各種路線行走方式的設計。

第三章：『實驗設備』；機器人控制系統架構、各主要的元件與裝置，包含單晶片微處理機原理以及目前測試用程式流程等軟硬體介紹。

第四章：『實驗結果』；各階段的實驗成果與實際的機器人行走實驗，並將結果與理論值做誤差分析，以探討此研究的成效。

第五章：『結論』；總和二、三、四章內容，獲得最後結論。