

皆可以從兩種左右恰好相反姿勢下開始，合計八種步伐轉換變化，以下為機器人的實際行走實驗。

4.3.1 從直行到左轉的步伐轉換

這裡每張圖中都分成數個小圖，小圖的號碼順序為機器人動作的流程，圖與圖的間隔時間為一步，每步花費時間皆相同，也就是 $(1/4)T$ 。圖中的紅實線標註的是機器人身體前緣的位置，綠虛線則為機器人上一步所在的位置，也就是前一張小圖的紅實線位置。藉由這兩條線，可以更方便的看出機器人的前進及旋轉。另外，圖中的黃圓圈則代表步伐轉換時位在的步伐共同著地點的腳。

圖 61、圖 62 為直行到左轉的步伐轉換，圖 61 (1)、圖 62 (1)分別為從直行步將要轉換前所可能的兩種姿勢，是為左右對稱的。當進入轉換時，共用步伐落腳點也在互相對稱的位置上。而第一種情形在步伐轉換時，保持著前進和旋轉，第二種情形只前進了一步，後來卻停止了一步(圖 62 (3))，從紅實線和綠虛線重合可得知。步伐轉換時間皆發生在(2)與(3)時，共計 $(1/2)T$ ，第一種情形順利的旋轉，第二種情形停止了一步，浪費 $(1/4)T$ 的時間才達到和情形一相同的轉彎角度。

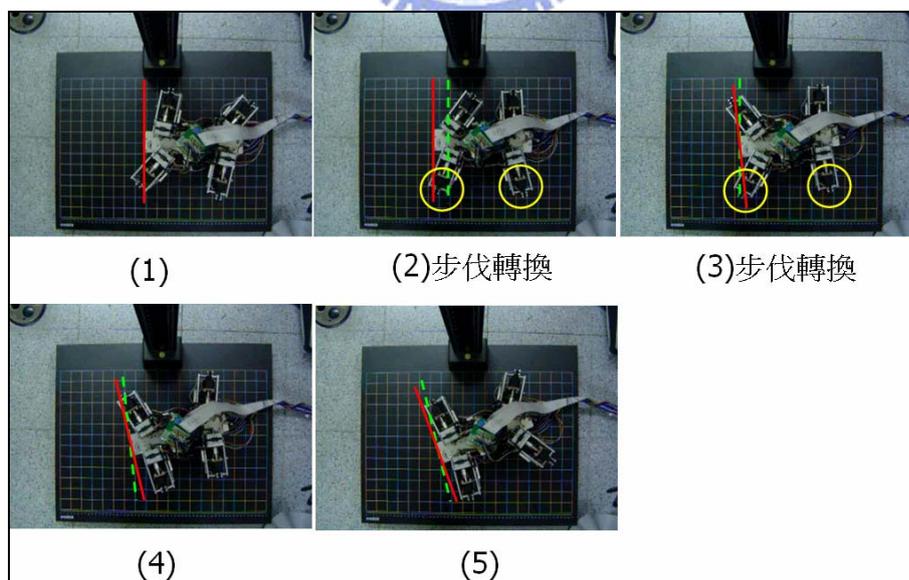


圖 61 直行到左轉的步伐轉換(情形一)

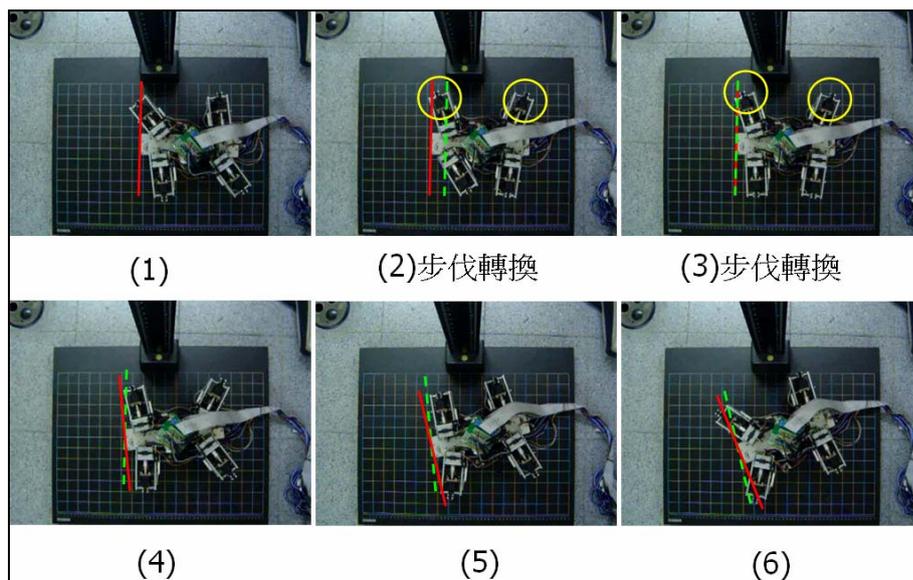


圖 62 直行到左轉的步伐轉換(情形二)

4.3.2 從直行到右轉的步伐轉換

直行到右轉的步伐轉換如圖 63、圖 64 所示，與左轉為類似的情況，轉換時間同樣為 $(1/2)T$ 。其中圖 64 (3)停止了一步，多浪費了 $(1/4)T$ 的時間。

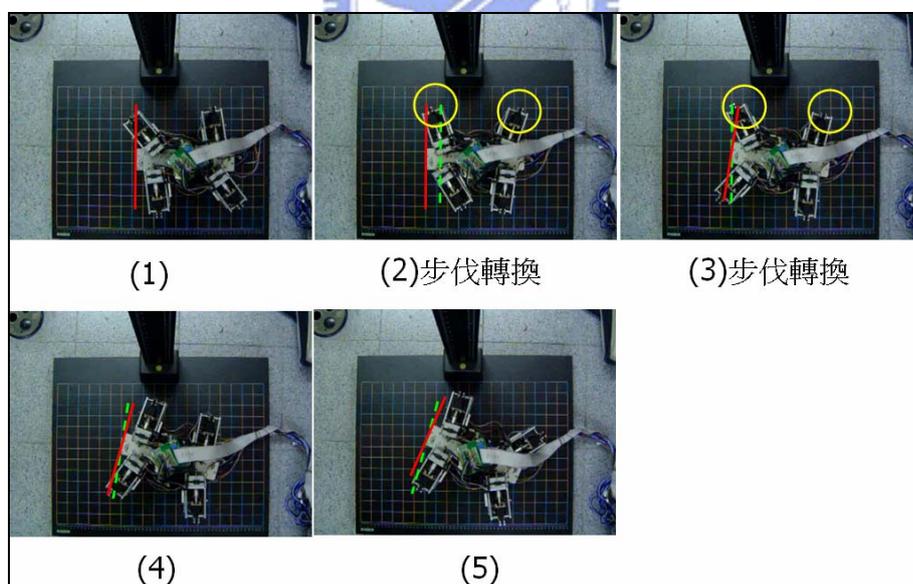


圖 63 直行到右轉的步伐轉換(情形一)

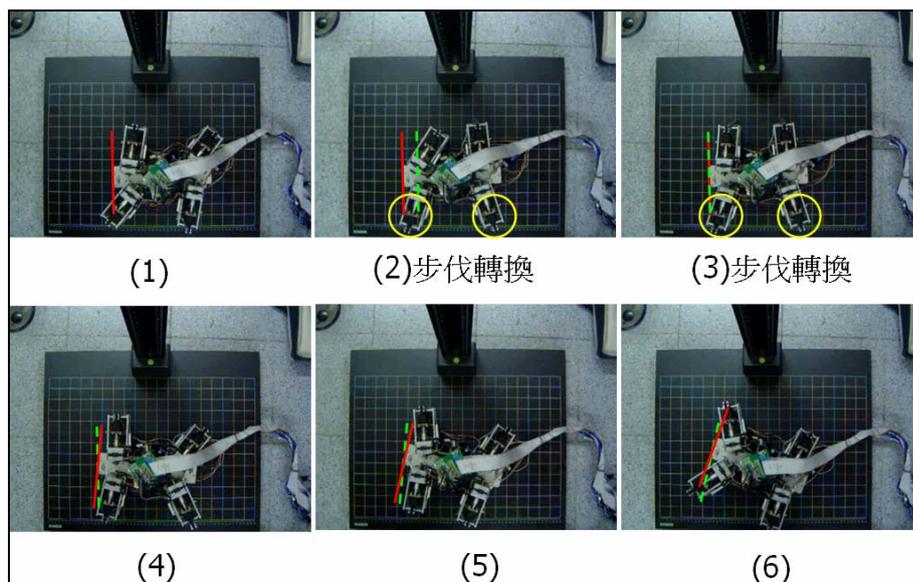


圖 64 直行到右轉的步伐轉換(情形二)

4.3.3 從左轉到直行的步伐轉換

左轉到直行的情形如圖 65、圖 66 所示。轉換前的姿勢，同樣是左右對稱的。第一種情形在轉換時保持旋轉及前進各一步，第二種情形在(4)停止了一步將左後腳作調整，多花了 $(1/4)T$ 的時間。而步伐轉換時間同樣皆為二步 $(1/2)T$ 。

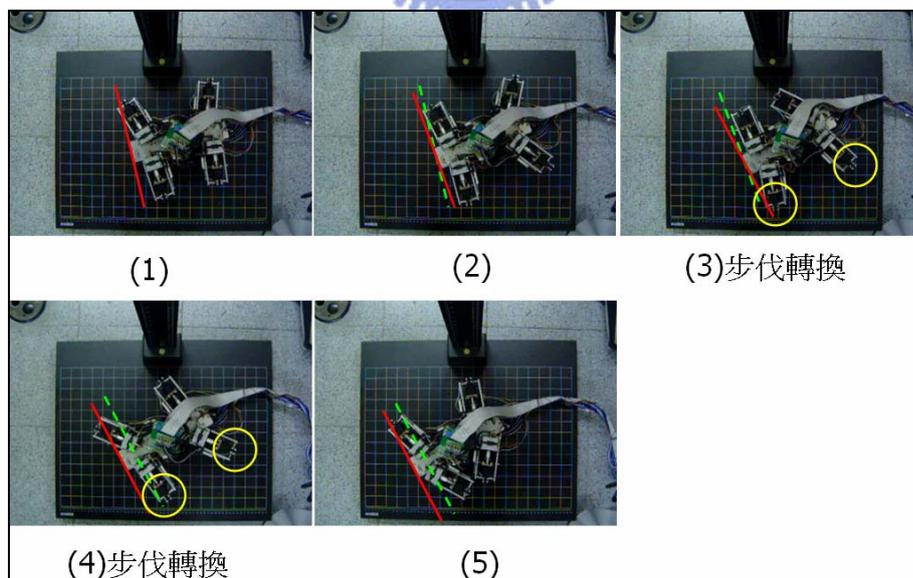


圖 65 左轉到直行的步伐轉換(情形一)

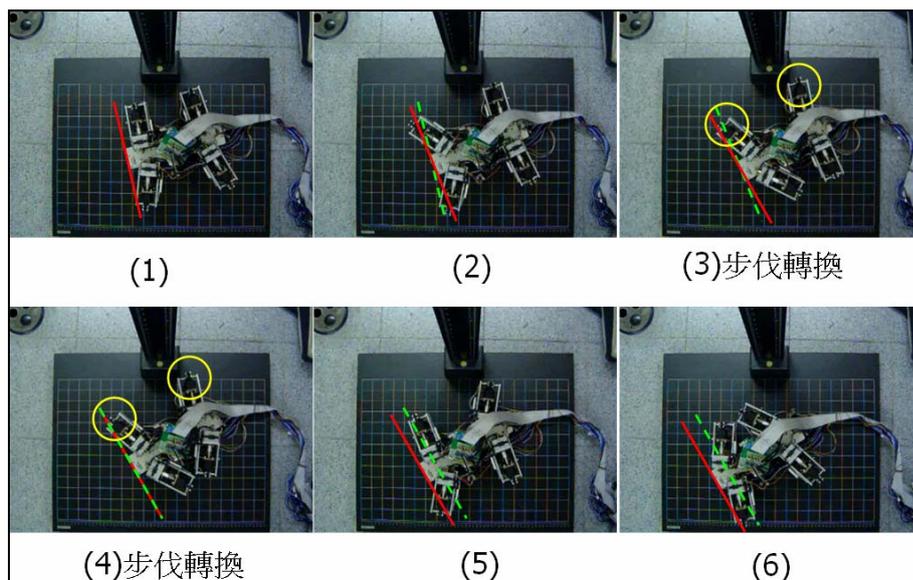


圖 66 左轉到直行的步伐轉換(情形二)

4.3.4 從右轉到直行的步伐轉換

右轉到直行的情況與左轉對稱，如圖 67、圖 68 所示。步伐轉換時間 $(1/2)T$ ，第二種情形時，身體在(4)的地方停止讓右後腳墊步，費時 $(1/4)T$ 。

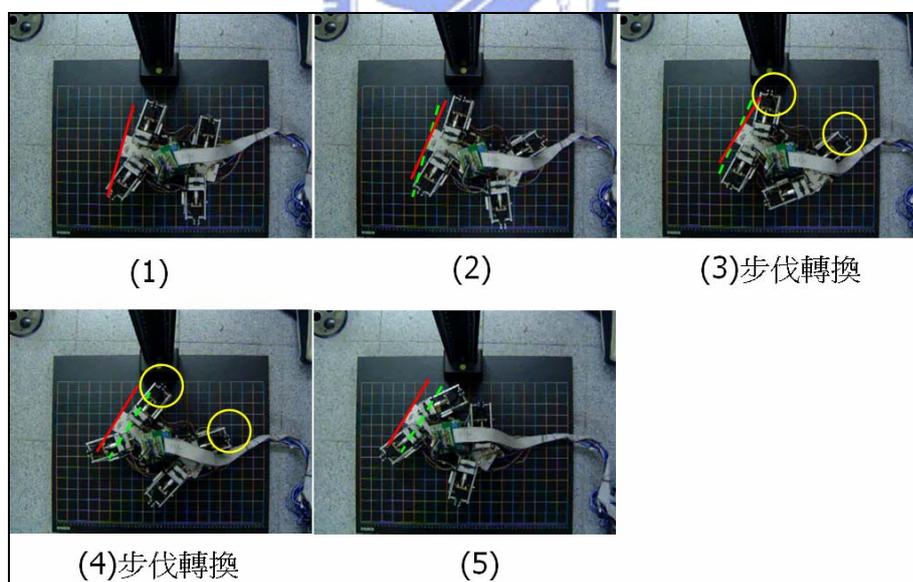


圖 67 右轉到直行的步伐轉換(情形一)

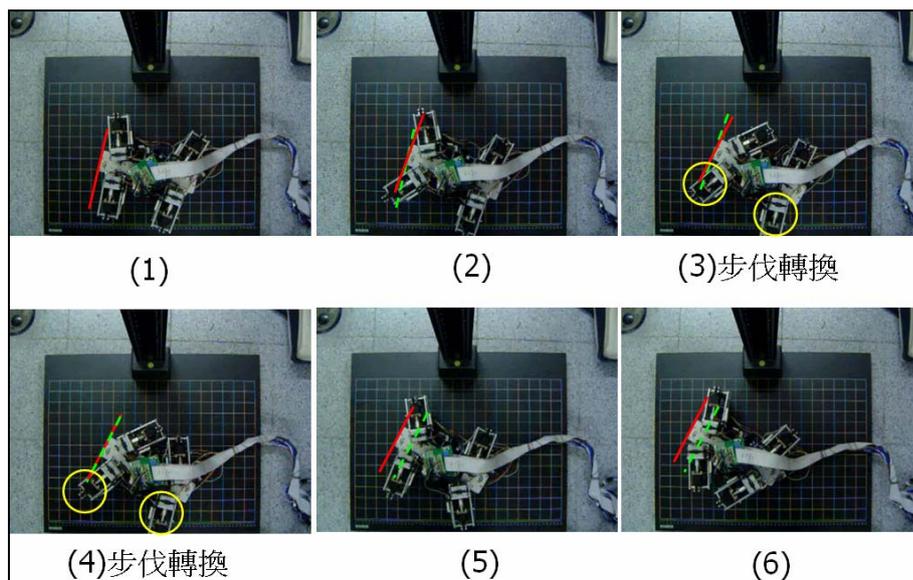


圖 68 右轉到直行的步伐轉換(情形二)

4.4 障礙路面行走實驗

圖 69 為 NC-F4 利用調整步伐長度進行的轉向避障示範圖例，機器人需在碰到左端的牆壁之前轉向。而因為機器人到達牆壁前的距離，與目前的步伐長度並非是整數倍數的關係，這種情況在行走時常會發生，要是依舊保持步伐長度不變，最後會造成太早或是太晚進行轉向避障動作。因此如圖所見，藉著在行走中適當調整步伐的長度，最後便恰好可在路面邊緣進行轉向的動作，完成避障。

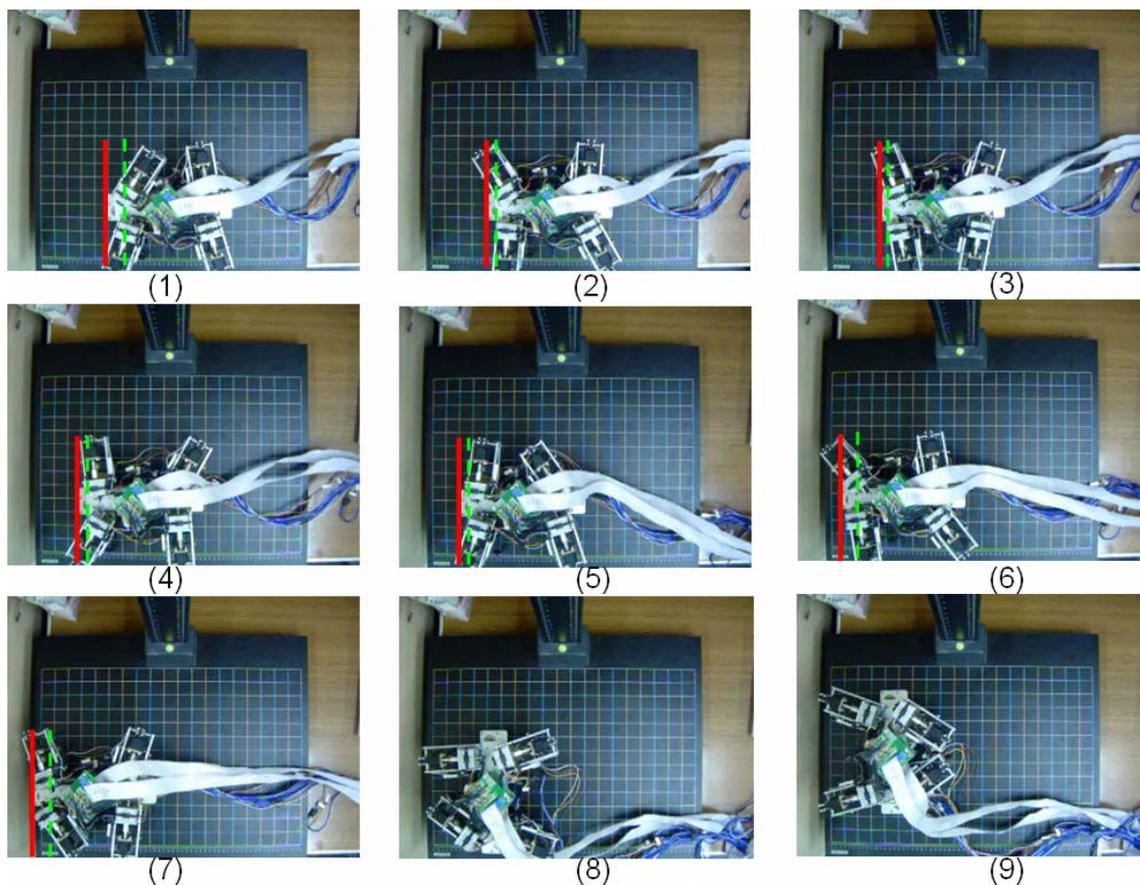


圖 69 步長調整避障實驗

圖 70 為 NC-F4 在有障礙的路面上的行走實驗，被設置的障礙有兩種。第一種是圖中白色長方形區域，如圖 70 (1)所示，是利用壓克力片所疊成的凸起地形，機器人需從上方走過，進行高低地形的避障；第二種是最左邊的牆，代表不可通過，需轉向的道路轉角處，並在前方設置一個 RFID 標籤。實驗是從左下的起點出發，首先利用足底的感測器，在判別地面起伏後，調整腳的擺放高低，維持身體平衡的通過。當到達牆邊時，NC-F4 上的 RFID 讀取機接收到道路障礙資訊〈讀取機上的接收燈號從圖 70 (4)代表等待訊號輸入的紅燈，轉為圖 70 (5)已收到訊號的綠燈〉。然後開始步伐轉換，向右旋轉後，避開障礙繼續前進。

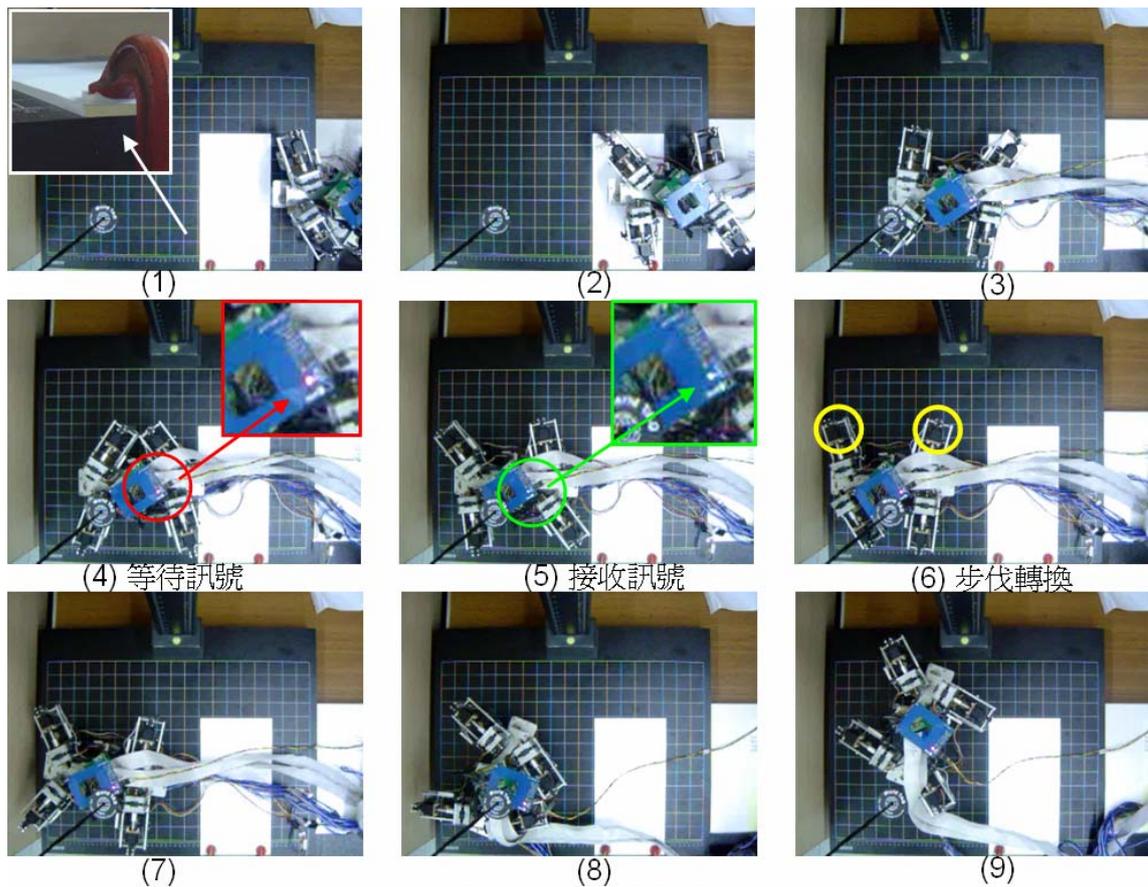


圖 70 障礙路面行走

4.5 機器人行走誤差分析

本節的誤差分析為針對機器人運動程式的設計誤差，以及步進馬達的動作解析度來討論。不考慮機器人本身製造、結合、材料應力.....等硬體方面的誤差因素。雖然機器人各腳底的運動軌跡，從機器人重心觀點來看，多為直線，或是曲率半徑不變的圓弧。但是各軸馬達所需的理論輸出，是利用反向運動學所推得的結果，造成數學公式繁雜，難以使用 89C51 晶片直接運算。因此，程式控制上是將理想的馬達輸出曲線，分成數段後以直線作近似的模擬輸出，這樣的結果勢必與理想的運動曲線有異。所以，在這裡利用 Excel 軟體分別對理想馬達脈波輸出曲線和利用實驗模擬所用的近似值方程式的輸出曲線，在各個輸出結果上來比較。另外由於步進馬達轉動角度受到解析度影響，轉動角度由脈波控制，輸出動作必為最小轉動角度值的整數倍數，這種情況下僅管能輸出最近似的整數脈波數，仍有誤差產生。將這種因素所產生的誤差當作對照組，評估使用近似直線模擬的方式，造成的誤差影響程度。

4.5.1 直行步時的誤差分析

直行時的軌跡比較如圖 71 所示，誤差如圖 72。X 方向的誤差約在正負 0.1mm 之間，誤差最大在 Y 方向，有正負 0.2mm，Z 方向的誤差最小，在正負 0.07mm 之間，對照組的誤差約只有一半。另外，馬達輸出角度誤差圖 73，可以看出 Y 方向主要受 α 角的誤差影響，誤差圖形十分相似，從機構上也的確是 α 角馬達主要影響了 Y 方向的移動。但另外觀察模擬的輸出脈波圖圖 74 發現， α 角馬達的脈波誤差與 β 、 γ 相比，小了許多，與理想值差不到 2 個脈波。

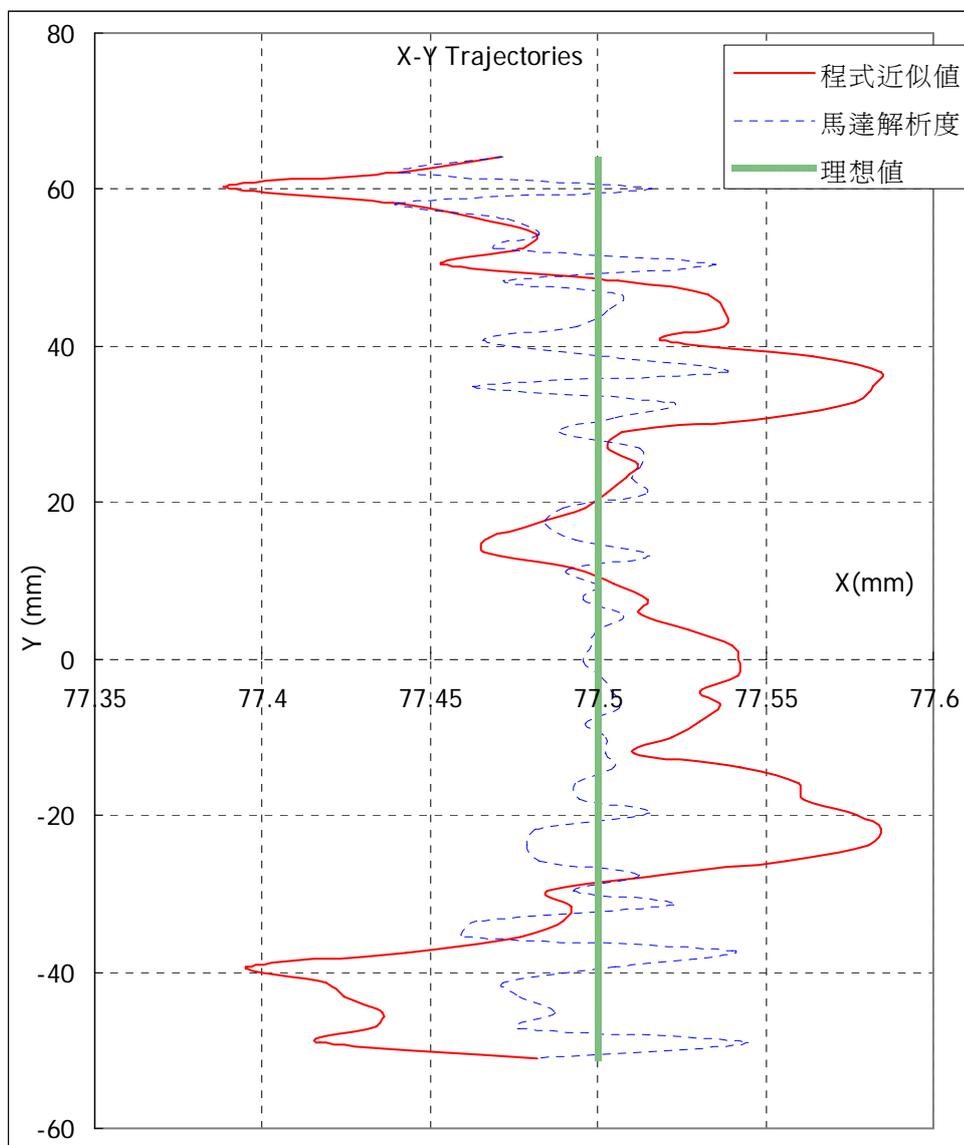


圖 71 理想與模擬機器人足底運動軌跡(直行步)

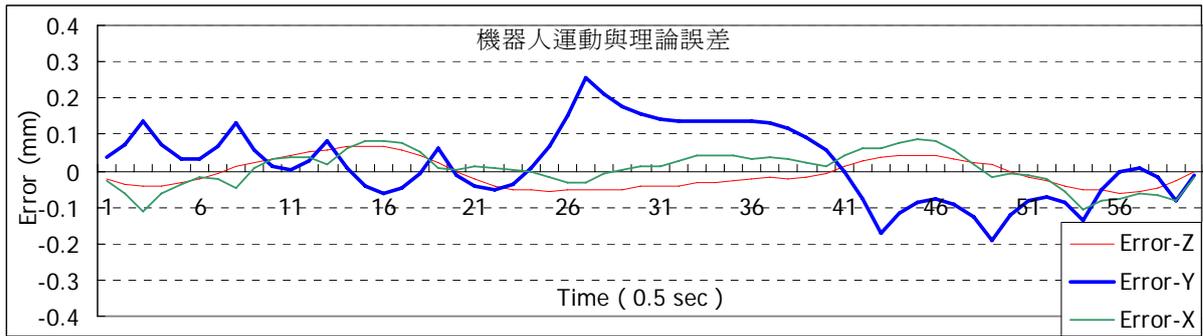


圖 72 理想與模擬機器人運動軌跡誤差(直行步)

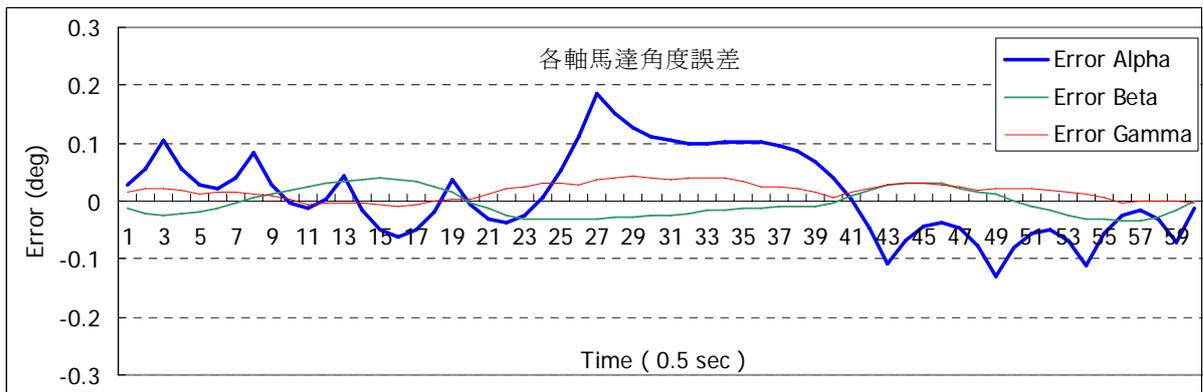


圖 73 各軸馬達運動角度誤差(直行步)

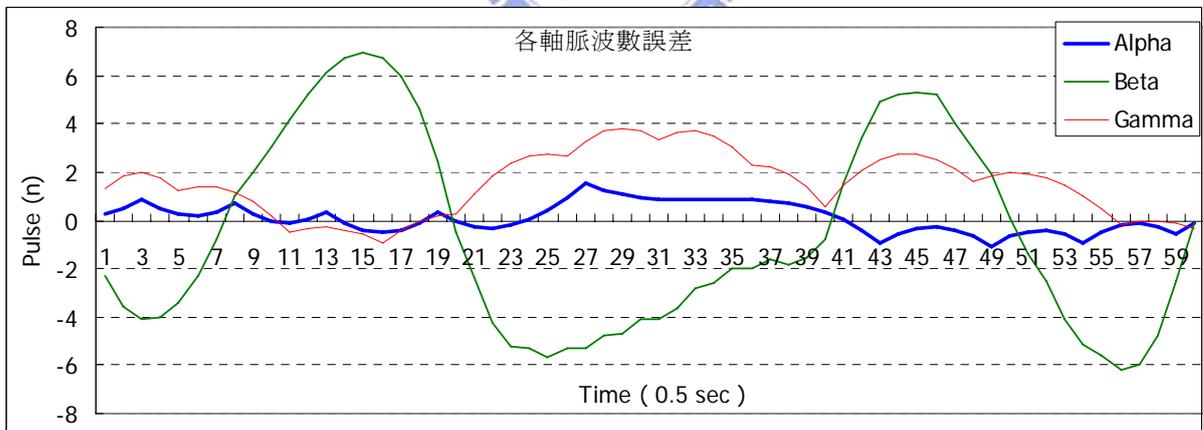


圖 74 各軸輸出脈波數誤差 (直行步)

4.5.2 旋轉步時的誤差分析

旋轉時的軌跡比較如圖 75、圖 76 所示，誤差最大仍然在 Y 方向，有正負 0.4mm 的誤差，X、Z 方向的誤差相對來說比直行時小了很多。由圖 78 可以看出各軸脈波數誤差範圍皆在正負 2 個脈波間，圖 73 所反應出來的角

度誤差卻極大。與直行步比較可以判斷這是因為 α 角齒輪減速不夠，和 β 角、 γ 角的螺桿高減速相比，同樣的脈波有較大的產生，誤差容易偏大。

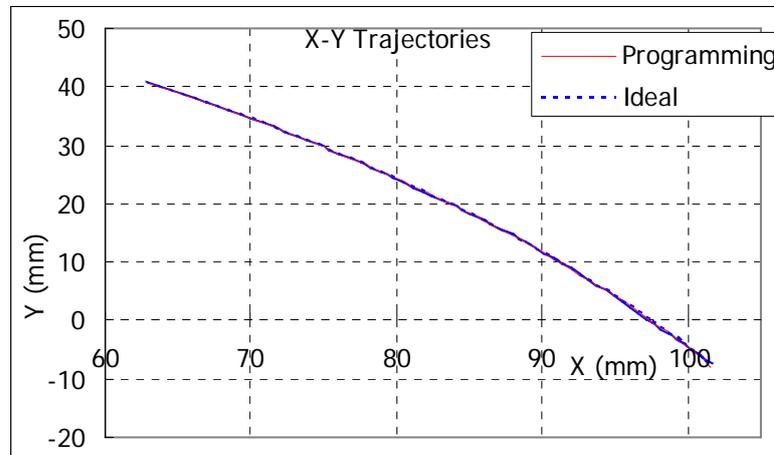


圖 75 理想與模擬機器人足底運動軌跡(旋轉步)

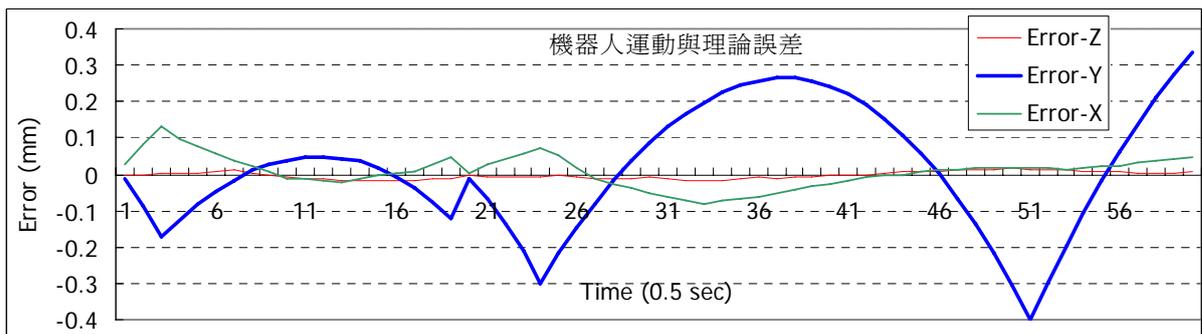


圖 76 理想與模擬機器人運動軌跡誤差(旋轉步)

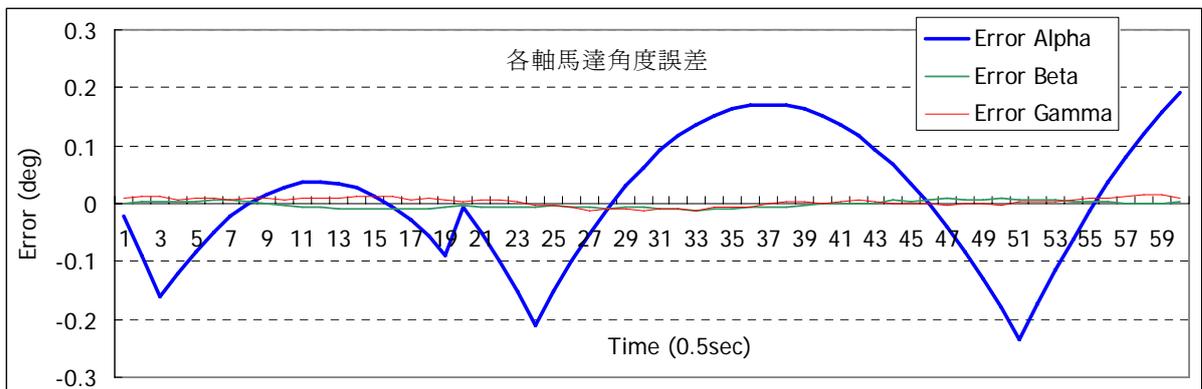


圖 77 各軸馬達運動角度誤差(旋轉步)

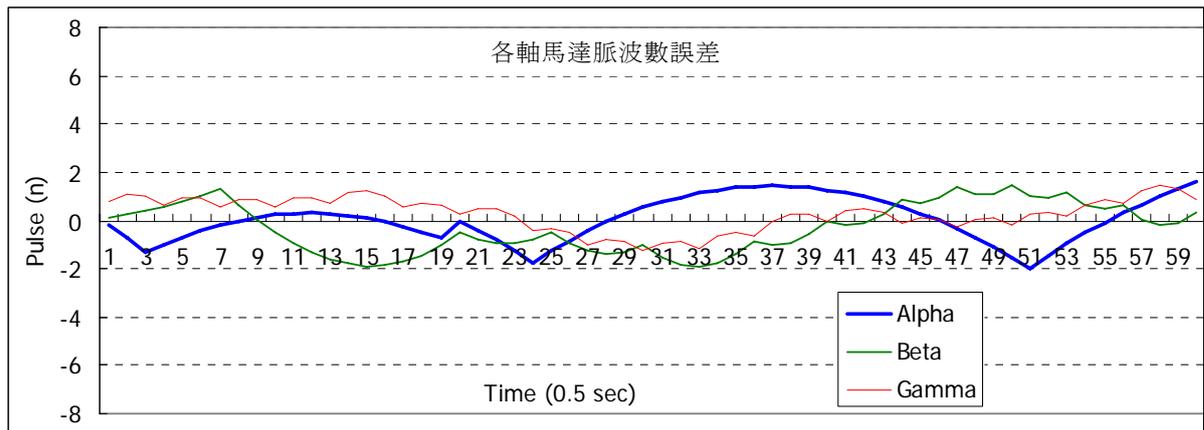


圖 78 各軸輸出脈波數誤差 (旋轉步)

4.6 實驗數據與結果討論

在最大直行步伐的規劃中，由於 NC-F4 機器人的工作空間根據重心相互對稱。所以在各個行進方向上，從步伐長度等高線圖到 DTE 點位置，皆是對稱的情形。因此，不容易有各腳工作空間雖大，但卻因其範圍互相限制，而使步伐長度變得十分短的情況發生。由於 NC-F4 的工作空間形狀類似彎月型，最大步伐的軌跡線會朝著彎月的圓心的方向貼近(圓上的最長直線為通過圓心之直徑)，而容易貼近彎月內圓的工作空間邊界。這種情況下，擺臂勢必要張到最大或縮到最小，不但容易出現歧異，也可能使得角度變化量增大，造成馬達轉數增加而時間拉長。

從此得之，最大步伐軌跡不代表最大速度軌跡。要避免這種情況的發生，可以將工作空間設為圓形，還能在各角度的直行步伐上發揮最大的直徑長度。此外，軌跡演算法的結果並不一定是唯一解。實際應用上，還可以從速度或耗能等方面從中挑選出一組最適合的解，來彌補此方法的不足之處。

步伐轉換在直行步和旋轉步間的轉換，皆有兩種可能的情形。當共用步伐落腳點在機器人的某一側時，往那一側的直行或旋轉就不需要多餘的墊步，身體不會停止運動。改變後的設計，減短了步伐轉換的過程，從三步減少為二步，流程精簡使控制上更容易、靈活。多餘的墊步也減少至一步甚至零步的情況，過去的研究則為一或二步。利用個假設來進行比較，若當機器人到達轉角時剛好是可以進行步伐轉換姿勢的情況，而左或右轉

的機率各為一半，NC-F4 有 3/4 的機率花費比文獻[4]發表的結果具有更少的步數，也就是行走更快。剩下的 1/4 的機率則是會花相同的步數。

利用感測器進行的避障判斷，在地形起伏時利用足底的接觸式感測器判斷出著地與否。但因為腳底面與地面不是完全平貼接觸的，使得接觸開關沒有直接受到擠壓，反應不夠靈敏，也造成地面準位的誤判。可利用球狀或活動式的接觸面來達到改進。藉由 RFID，機器人可以識別道路進行避障，訊號的接收範圍最大約在三英吋。

運動控制的精細度，也造成誤差產生。機構放大縮小的比例，同時放大或縮小了誤差的多寡。實驗的理論誤差，直行步在正負 0.2mm 間，約為最大直行長度的 0.17%，旋轉步誤差在正負 0.4mm 間，佔旋轉步弧長的 0.63%。

