

以CompactRIO 建構輪腳複合式機器人

■ 文 / 李政昕、陳慎強、沈宣諭、黃科融、林沛群

關鍵字 》 NI、CompactRIO、複合式機器人

此研究所使用LabVIEW 8.6軟體以及NI cRIO-9014 即時控制器、NI cRIO-9104嵌入式機箱、NI 9205 類比輸入模組、NI 9624 類比輸出模組、NI 9403 數位TTL 輸入/輸出模組、NI 9401 高速數位TTL 輸入/輸出模組等，進行嵌入式系統/機械的研究應用領域。

欲研究之問題及目的

機器人是一個高自由度的複雜系統，需涵蓋如機械、機電、控制、與程式等許多領域相互支援來進行系統性整合，以達到做動的目的。在規劃建構移動機器人的過程中，我們期望以單一的平台來達到多樣化的運動行為，希望機器人具有「輪」的模式使其在平坦地面上能有效率的運作，但同時也具有「腳」的模式使其擁有強大的越障能力，能恣意的上下如樓梯、步階等人造的場景或是無礙的運行在自然的崎嶇地上。在這樣的理念之下，於設計流程前段之機械設計，我們構想出輪腳複合式的機構，使機器人能以輪或是腳的模式在地面上面運行。而在設計流程後段方面，則仰賴完整的機電系統之硬體與控制（軟體）來使前述機構能有效的做動，具有運動上的協調性。在實際平台的建構中，致動器方面包含了DC直流馬達和RC伺服馬達的驅動與控制；在感測器方面則包含了編碼器、溫度感測器、霍爾效應感測器、慣性量測系統、傾斜儀、紅外線、電壓電流量測等各式感測器做為機器人感知能力的來源。最後，並仰賴完整的程式

架構來建置適當的控制法則與狀態設定，以接收感測器的訊號，產生適當的判斷，並將決策傳送至致動器產生動作，使機器人能達到預設的運動模式。

研究方法 / 應用方案

移動式的機器人需要輕巧且耐環境變異的即時控制系統，因此在硬體方面「CompactRIO系列」便是最佳的候選人，我們選用了當時最佳規格cRIO-9014嵌入式系統，具備400 MHz處理器、2 GB儲存空間、128 MB DRAM、乙太網路、USB、和RS232等功能。而選用的嵌入式機箱cRIO-9104具有3M Gate的FPGA和8個擴充槽，提供所需要的數位和類比的I/O介面，以橋接控制器和外端機電系統中的各式致動器和感測器。由於各式感測器和致動器的I/O需求不同，機器人上共使用了5張I/O模組，分別為(1)類比輸入模組NI 9205，主要作為類比感測器的輸入介面；(2)類比輸出模組NI 9264，提供馬達驅動電路所需之類比輸入訊號；(3)數位輸出入模組NI 9403，提供一般數位I/O所需；和(4)高速數位輸出入模組NI 9401，用以接收高頻率輸入的馬達編碼器訊號。。在軟體方面，LabVIEW擁有良好的圖形化介面，非常容易上手，並可以直接使用來撰寫即時端和FPGA端的程式，不需要針對硬體系統來學習不同的程式。由LabVIEW程式也可輕易的進行RT、FPGA、和擴充槽上模組的訊號進行傳輸與交換，以單一程式完成整個軟體系統的建構。除此之

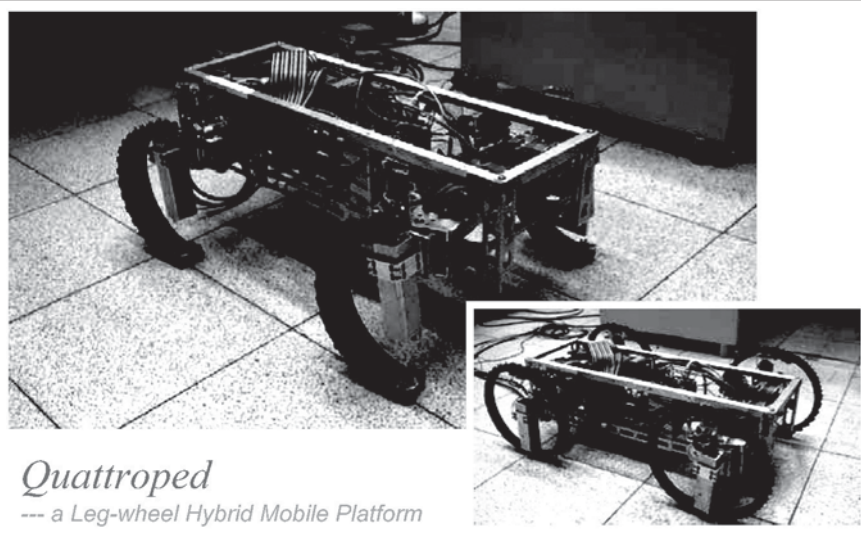
外，也由於LabVIEW具有完整的開發介面與後端技術支援，在程式撰寫和除錯方面可以很迅速的完成，減少軟體開發所需的時間，提升研發效能。

研究/實驗架構

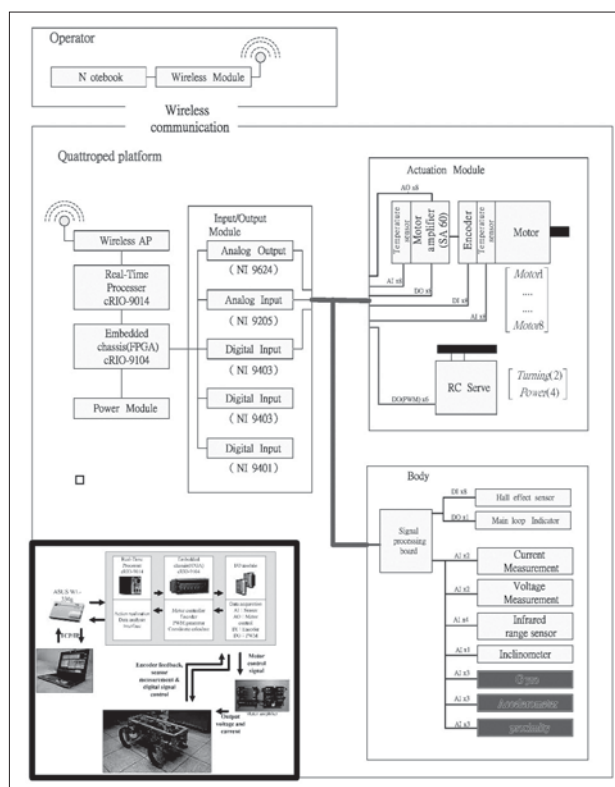
我們最初的設計理念的要建構一個可以到處移動的機器人，具有感測環境的能力，以在任何地形上運動。自然界中無論在任何地形演化出來的動物，大部分都具有快速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為，而很有趣的陸地上的生物除了蛇之外大多以「腳」的方式來達到運動的功能。而人類數千年的工程技術演化出以「輪」的方式來進行運動，在平坦地面上輪的運動效率無懈可擊。因此，若能建構輪腳雙模式的機器人，則能有效的適應外在環境：在平地時，能利用輪滾動的物理特性，使機器人在平面行駛可以達到快速且節能的效果；當遇到地形為不平整的路面或是樓梯時，則可以使用生物系統中演化出的腳的方式，克服地形，表現出生物系統中獨特的行為如行走、攀爬以及跨越等動作來克服阻礙。結合這些優點，我們發展出「輪腳複合式運動平台—Quattroped」（如圖1所示），來展現出對各式地形極高的適應性。

整體機電架構

我們所設計的機器人有四個主要驅動軸，輪模式為四輪驅動，腳模式為四足運動。每個驅動軸具有兩個自由度，一個是以驅動軸為旋轉中心的旋轉自由度，另一個是變化輪腳末端點和驅動軸之間長度的徑向線性自由度。每一驅動軸使用兩顆馬達來達到雙自由度的功能，因此機器人共使用八顆驅動用DC直流馬達，我們並自製馬達控制電路以驅動馬達。馬達的控制是以類比訊號輸出至功率晶片放大電壓電流來驅動馬達，於馬達後端並配置編碼器以數位訊號傳回馬達

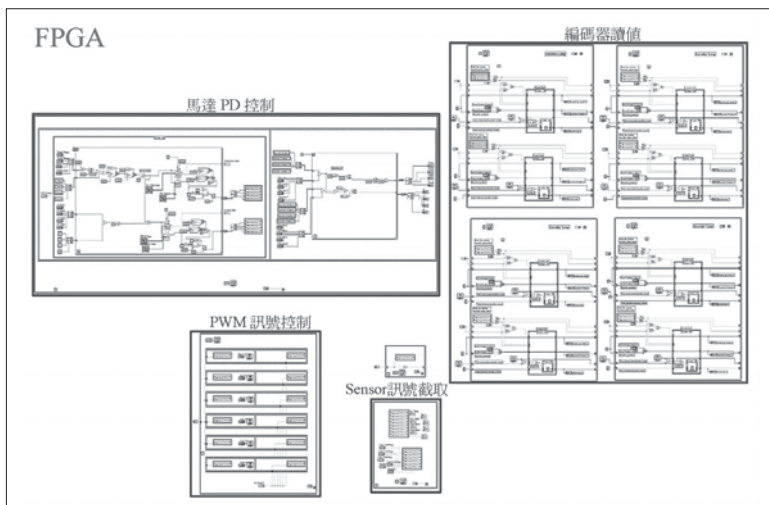


▲ 圖1 輪腳複合式機器人 Quattroped

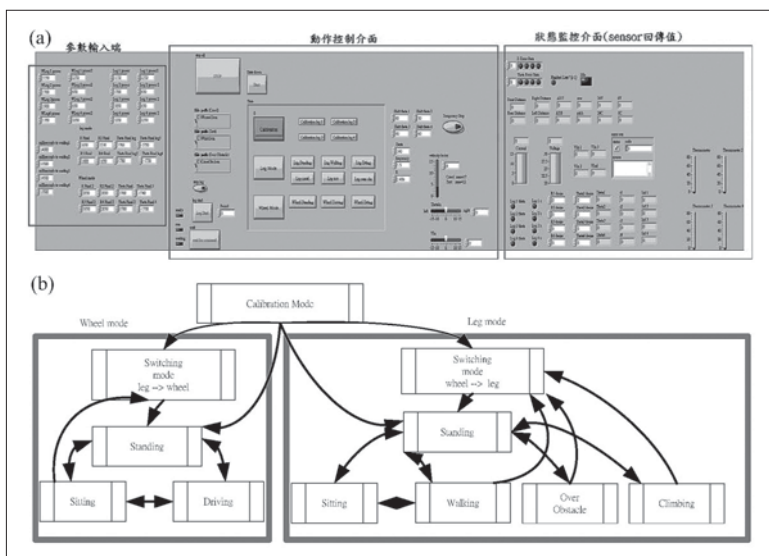


▲ 圖2 機器人機電系統架構

轉角，以進行回授控制。進行輪腳變換的機構是以RC伺服馬達來達成，程式中以脈衝寬度調變(PWM)訊號來驅動RC伺服馬達。感測器方面，如前述有溫度感測器以監控馬達和放電電路的溫度，有霍爾效應感測器進行馬達位置的校正，有慣性量測系統和傾斜儀監測



▲ 圖3 FPGA程式架構



▲ 圖4 (a)筆電端控制面板, (b)機器人狀態圖

本體的運動狀態，有紅外線量測地面的起伏，有電壓電流量測監控電力使用狀態。我們使用了一組NI 9205 類比輸入模組(32 channel)、一組NI 9264 類比輸出模組(8 channel)，以及兩組NI 9401(8 channel)、和一組NI 9403(32 channel)數位輸出 / 輸入模組來達到我們所需要的訊號輸入與輸出。如圖2所示。

在行為控制方面，我們需要對馬達做即時控制，包括腳步軌跡的給予和馬達編碼器的讀回，以便知道目前馬達的位置。CompactRIO提供了即時控制的環境，在訊號的讀入和處理是可以依照所需要的時間間隔準確完成，只需要設定好迴圈的速度即可，非常方便。為了達到即時控制的效果，我們的主迴圈在RT下以1

KHz進行，進行軌跡產生與後續高階控制器架設。但在讀取如溫度感測器的數據方面，由於感測器本身響應較慢，因此在RT下以另一個10 Hz的迴圈來讀值，減少系統資源的使用。馬達控制用PD迴圈則是在FPGA下10 KHz進行，較快的控制迴圈使軌跡追尋(tracking)結果更為優化。馬達後端編碼器的讀值則以10 MHz最高速進行，以避免有漏讀造成控制上的誤差。

軟體架構

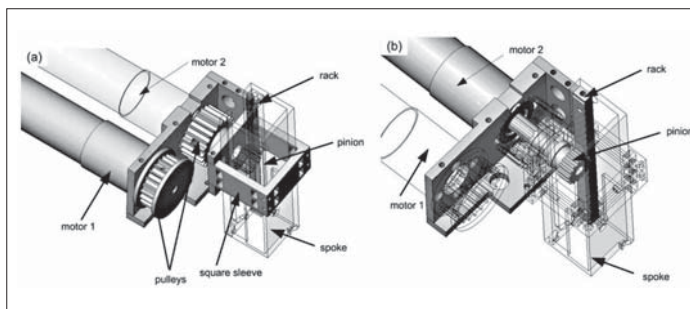
為了希望可以快速的開發程式，我們選用LabVIEW作為我們的主要開發程式。LabVIEW的好處是為圖形化介面，對於沒有寫過程式的人也可以很容易上手，且具有可以達到平行迴圈處理的功能。若是使用c語言來作主要撰寫工具的話，雖然擴充性很高，要達到所需要的性能是可以，不過我們會選用LabVIEW最重要是在和硬體溝通的方面。由於我們在開發的時候需要做馬達控制、擷取訊號、資料分析處理等等，我們將會使用到「元件可程邏輯閘陣列」(FPGA, Field Programmable Gate Array)如圖3所示。NI在軟硬體溝通方面擁有許多容易使用的方案，我們選用cRIO-9014和9104嵌入式即時控制系統做為我們主要的控制器，具有即時處理的功能及可重設組態FPGA，並具備內建訊號處理、可熱插拔的I/O 模組，可以直接連接至感測器及致動器，使用介面也只需要熟悉LabVIEW即可，非常的方便。對於快速的開發和機電整合有非常大的助益。

FPGA容量只有2MB，雖然空間是最小的，但是速度最快，預設時脈為

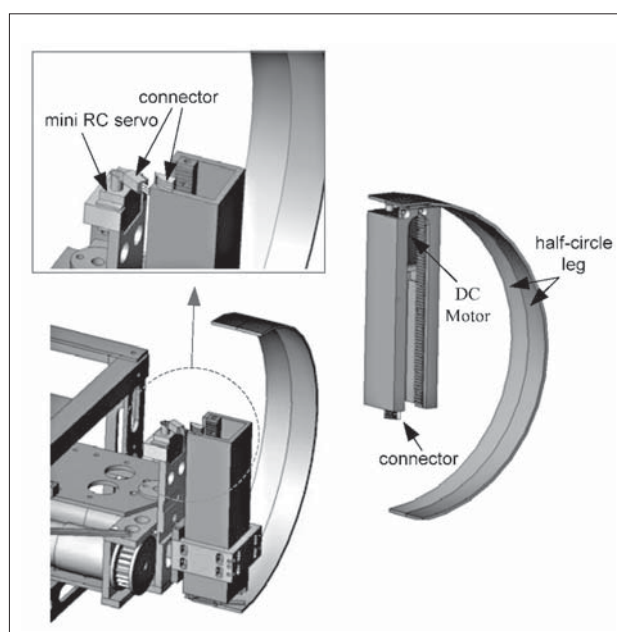
40MHz，每一個機器運算的時間(tick)為 $1/40\text{MHz} = 25\text{ns}$ ，最重要的是FPGA以硬體取向為目的，所有的指令皆是靠邏輯閘的切換達成，故設定迴圈速度將會很準確，機器人所有核心功能將會在FPGA做處理；缺點則是每次修改過程式後皆需要做燒錄的動作才可以執行，燒錄的時間依程式複雜度大約為十分鐘到一個半小時之間；RT的容量大約有2GB，內建處理器，迴圈速度最高可以到達1KHz，能和FPGA溝通進行即時控制，若資料量在處理器的允許範圍內，迴圈時間也能夠準確按照預設的時脈執行，能夠和FPGA做重要資訊交換及調整參數。我們主要使用的高階指令程式，如狀態切換(state transition)等，是在RT端進行，如圖4(a)所示。目前機器人完成了數種基本運動的步態規劃，採用狀態機器的設計架構(state machine)，包括狀態包含一開始的校正(Calibration mode)、輪腳兩種模式間的切換，而在進入輪模式(Wheeled mode)後，則具有站立(standing)、行駛(driving)和坐下(sitting)等狀態，行駛時也具有前輪轉向的功能。若進入腳的模式(Legged mode)，除了標準的站立、行走、和坐下之外，也開發出階梯越障(step passing)和上樓梯(stair climbing)的步態。而在行走方面，也有開發出較快速的trot步態（右後左前兩足一組，左後右前兩足一組，輪流觸地）、較慢速的walking步態（一次動一足，穩定前進）、和身體會微微振動舞動行走步態(dance walking)。以上各模式均以模組化的方式建構在RT主迴圈下，整體狀態如圖4(b)所示，相連的線段代表可以相互切換的狀態。目前也持續開發各式不同的步態，如下樓梯、快跑、慢跑等、越障等行為，因架構已模組化，新步態均可輕易附加在目前程式架構下。

輪腳變換機構

輪腳混合平台透過一轉換機制切換輪模式及腳模式。我們將分別介紹機器人兩個自由度的機構設計，以及輪腳變換機構。



▲ 圖5 雙自由度機構 (a)旋轉自由度 (b)線性自由度



▲ 圖6 輪腳變換機構—由RC伺服馬達作輪腳變換的控制一半輪框位置使其靠近或遠離另一半輪框，電源及訊號由另一顆RC伺服馬達作為開關控制

雙自由度機構介紹

雙自由度機構包含兩個在輪腳部分的運動控制：旋轉驅動桿以及由「驅動桿」調整髖關節與輪框的距離。換句話說，如果我們定髖關節為原點則雙自由度為控制極座標中的旋轉 θ 以及半徑 r 。旋轉的自由度也就是 θ 是旋轉一方形套統，套桶由馬達一透過兩個皮帶輪（不含減速比）及皮帶驅動。方形套桶的軸向及為髖關節的軸。其CAD模型如圖5所示。驅動桿的長度變化用於改變自由度 r ，由驅動桿以及方框套桶的滑軌操作，並且安裝16顆軸承在驅動桿和方框套桶之間使驅動桿可以平順移動。並且裝置一齒條安裝於驅動桿內由馬達二上的小齒輪驅動。其運動學的輸入

(馬達旋轉)和輸出(腿部運動)關係表示為， $\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a-a \\ 1 \ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$ 其中 $\dot{\phi}_1$ 和 $\dot{\phi}_2$ 分別為馬達一和二的轉速， a 為小齒輪的半徑是徑向自由度的轉換常數。當機器人在輪模式時，輪框的旋轉必須保持與髖關節等距也就是輪框半徑，此位置控制需要兩顆馬達以等速度運轉。在腳模式下， $\dot{r}$ 和 $\dot{\theta}$ 變化頻繁因此兩顆馬達都在運作。因此，設計上避免馬達電流超載及馬達過熱造成運動過程中失速的情況發生。此外馬達安裝在機身上減少了腳的重量以及轉動慣量，增加並改善了腳的動力及控制特性。

輪腳變換系統

在驅動桿安裝一微型伺服馬達作為完整輪圈(輪模式)及半圓輪框(腳模式)的切換開關，如圖6所示。DC馬達的一端安裝於驅動桿內，另一端與待旋轉的半圓輪框固定。DC馬達作 180° 旋轉控制半輪框與另一半圓框接合(腳模式)或遠離另一半圓框(輪模式)。由於驅動桿繞著髖關節連續轉動，電源線與訊號線必須透過滑環否則不能直接連到驅動桿內的DC馬達；由於寬關節週遭的機構已經相當複雜，故無法安裝滑環。因此透過一小型伺服馬達作觸碰式開關如圖4所示。開關公頭在軀幹部裝有電源線與訊號線的微型RC上，開關母頭裝於驅動桿上連結到輪腳變換的DC馬達上。除非開關開啓，否則輪腳變換的機構不會啟動。

研究 / 應用介紹

機器人類備輪和腳兩種模式的切換，在行為接續的部份必須是要連續且平順。目前機器人完成了基本的運動行為規劃，包括一開始的校正(Calibration mode)，還有輪腳兩種模式間的切換，而在輪(Wheel)的模式和腳(Leg)的模式下都設計了轉換起立、運動和坐下等的狀態，且每種狀態都可以自由的切換成另一種狀態或是接回校正模式。各模式均以模組化的方式建構在RT主迴圈下，目前正在持續開發出各式不同的運動行

為，如爬樓梯、跑、跳、越障等行為，後續均可以直接附加在主迴圈內。

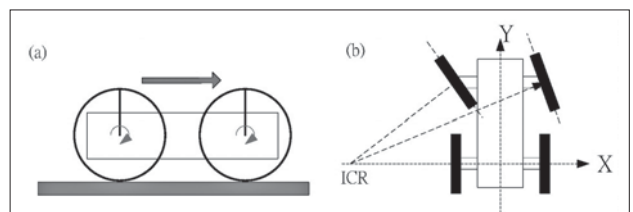
輪模式

在平面地形上，運動平台會進入「四輪模式」，以四輪驅動的方式前進，如圖7(a)所示。先將「輪腳變形機構」以完整的圓形輪框展開，如同四輪驅動車一樣，具有前進、後退以及轉向的運動。由於本論文馬達是以位置控制做為基準，於是輪子前進主要是使用連續的位置控制，在固定的時間內，當控制的間隔變大，前進的速度也會跟著變快。

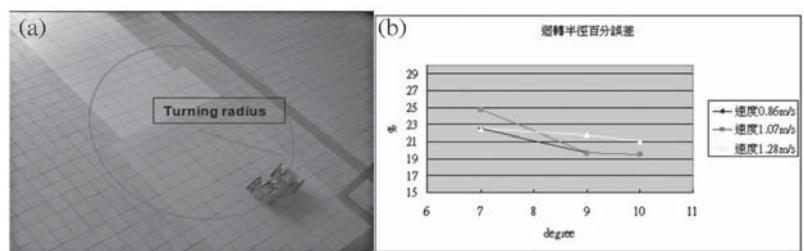
四輪車在轉向時，因為四輪皆為主動驅動輪，為了使輪胎與地面不發生打滑，其四輪的轉速與轉向角度，有著特定的關係。如圖7(b)所示，以運動學的瞬心法作運動分析，若要使四輪不發生打滑，其四輪的瞬心作用線須交在同一點，亦即運動平台的瞬時轉動中心ICR (Instant center of rotation)。迴轉半徑的實驗驗證如圖8所示。而機器人在輪模式下於平面上的運動特性則如表1所示。

腳模式

在四足的模式裡，我們先做了一個初步的步態構想：模仿四足哺乳類在慢速走路時的動作，規劃一個簡易的步態來測試四足的功能。此步態為：每次動對



▲ 圖7 四輪模式運動：(a)直線前進(b)前輪轉向運動



▲ 圖8 (a)瞬心法實驗驗證(b)量測理論值與實際值差異

▼ 表1 輪模式下運動特性

速度(設定速度) (m/s)	0.43 (0.436)	0.64 (0.654)	0.87 (0.872)
平均功率(W)	131.05	143.00	143.89
Specific resistance	2.09	1.42	1.12
<PD error (encoder)>			
Leg 1	-1.06	-1.89	-2.16
Leg 2	1.57	2.42	2.69
Leg 3	-1.52	-2.24	-2.43
Leg 4	1.48	2.37	2.62
Mean	1.41	2.23	2.47
<Body Orientation>			
Pitch (deg)	0.101	0.166	0.153
Row (deg)	0.147	0.211	0.323

▼ 表2 機器人於腳模式下在平面上的運動特性

速度(設定速度) (m/s)	0.46	0.45	0.42	0.56
平均功率(W)	192.35	221.38	237.20	238.95
Specific resistance	2.83	3.35	3.86	2.92
<Body Orientation>				
Pitch (deg)	1.12	2.01	2.89	2.39
Row (deg)	1.45	1.86	3.38	1.64

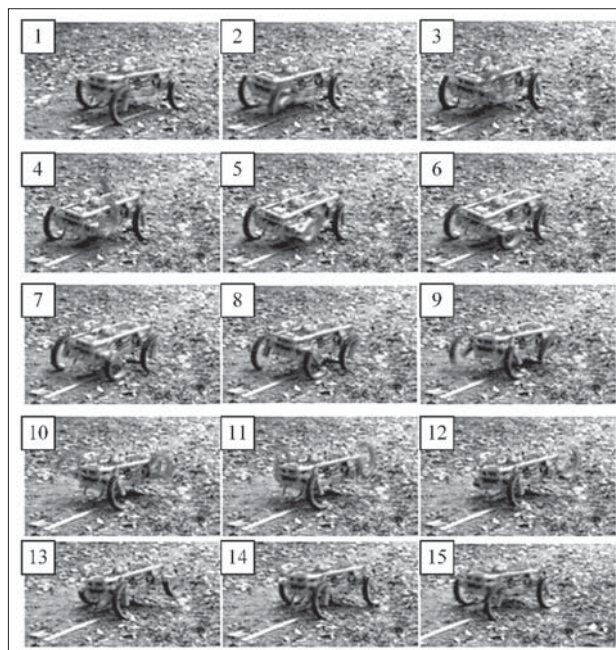
角線的兩隻腳（左前與右後腳、右前與左後腳），每次換腳時將會有兩隻腳在空中，兩隻腳在地面，交錯進行運動步態，為了避免機器人只有兩個支撐點而傾倒的狀況，此步態頻率必須夠快，且為了簡單的實現。腳在接觸地面的時候為了設定機身平行地面移動，而在懸空往前跨時以一個懸空的大不乏向前跨步，如圖9所示。機器人於腳模式下在平面上的運動特性則如表2所示。

機器人越障

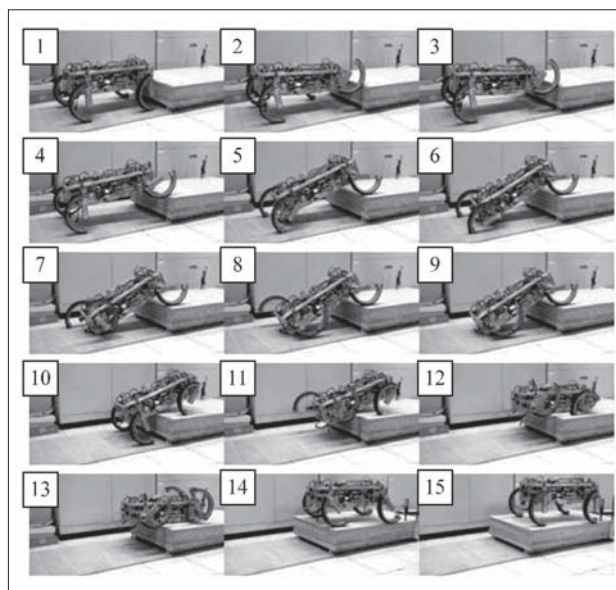
在四足的模式裡，我們可以利用腳的特性克服特別崎嶇或者特異的地形，例如讓機器人攀爬一階平台，如圖10所示，或是進行樓梯的攀爬，如圖11所示。

結論與建議

我們設計製作出一部輪腳複合式移動平台，此平台具有四輪驅動的模式，在平地上能平穩快速的運



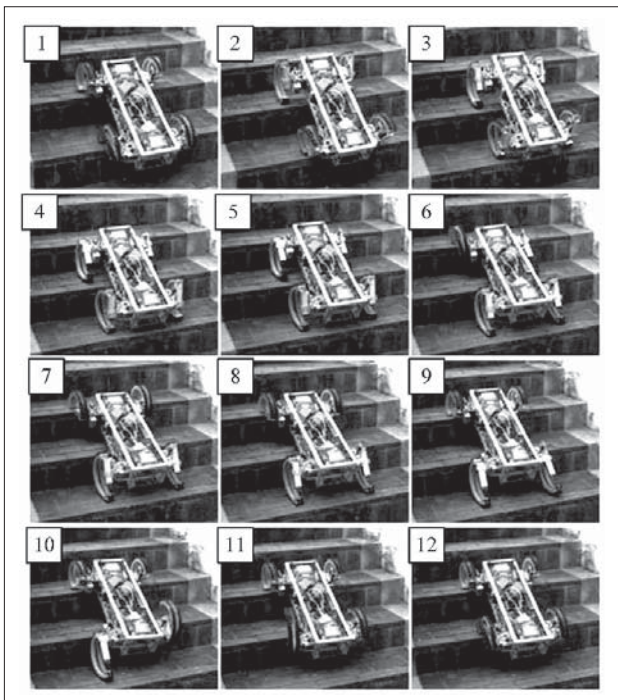
▲ 圖9 腳模式步態實驗



▲ 圖10 平台攀爬實驗

動，以及具有四足運動的模式，在崎嶇地面上也具有強大的移動能力。機器人可依地形的現況切換不同的運動模式，達到我們原本預設在各式地形能順利移動的目的。過程中並進行了幾項測試，確認變形機構的有效性以及機器人依各式步態運作時的特性展現。

本研究選用NI的CRIO嵌入式系統，由於NI的產品



▲ 圖11 樓梯攀爬實驗

軟硬體周邊的整合上非常完善，LabVIEW程式本身也因圖形化介面使學習和撰寫程式上簡單且容易上手，使開發複合式機器人的過程能快速進行，節省了許多寶貴的研發時間。目前這部機器人在各式運動行為的開發以及控制法則的驗證上還有很大的發展空間，而我們團隊也持續朝著這一個方向持續邁進中。

未來期待NI會提供CPU運作時脈更高、更輕量化、且更小型化的嵌入式系統，以及在機電整合部分具有更多樣化且模組化的周邊產品可供選擇，使CRIO系列的應用，能從純粹是「大腦」的部分（如同LEGO的NXT一樣），能開始具有周邊相關的馬達和感測器等，為未來進行更複雜機器人的研發上提供更完整的開發工具。 ■

MET 機電整合邀稿專題

● 投稿格式：

請以MicroSoft Office Word編排之電子檔為主(敬請附上原始圖片及表格)、稿件可用E-mail或是郵寄至全亞文化編輯部收
賜稿請註明姓名與聯絡電話，稿件一經採用稿費從優
※ 備註：若您希望配合某月主題刊登，請於當期主題前二個月投稿以便進行審核與編輯作業

● 來稿請寄：

台北縣三重市重新路四段97號8樓之一 機電整合收
Tel:(02)2977-7656 ext.159 葉小姐 Fax:(02)6625-0090
E-mail: mre@asia-info.net
全亞文化網址 <http://www.asia-info.net>

● 2011 邀稿專題

月份	期別	專輯
2月	150	新能源
3月	151	馬達控制技術
4月	152	新式演算法
5月	153	自動駕駛
6月	154	微控制器應用
7月	155	量測技術
8月	156	系統整合
9月	157	輸入 / 輸出技術
10月	158	功率元件技術
11月	159	辨識技術
12月	160	資料傳輸與儲存技術

※ 2011年專題主題若有更動將在本雜誌做更正說明