

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

單板電腦自主式四足機器人

非連續路徑的規劃與控制

Gait Planning and Control of a Single Board Computer

Based Quadruped Robot Crossing a Discontinuous Terrain

研究生：簡漢嘉

指導教授：鄭璧瑩 博士


中華民國九十九年七月

單板電腦自主式四足機器人非連續路徑的規劃與控制  
Gait Planning and Control of a Single Board Computer Based  
Quadruped Robot Crossing a Discontinuous Terrain

研究生：簡漢嘉  
指導教授：鄭壁瑩 博士

Student : Han-Jia JIAN  
Advisor : Dr. Pi-Ying CHENG

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



A Thesis  
Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
In partial Fulfillment of Requirements  
For the Degree of  
Master  
in

Mechanical Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

# 單板電腦自主式四足機器人非連續路徑的規劃與控制

學生：簡漢嘉

指導教授：鄭壁瑩 博士

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

## 摘 要

本研究著重於建立一套具有影像式地形辨識與基本步態規劃功能的自主式跨越非連續河石地形能力的四足機器人軟硬體整合系統。所建造的四足機器人將結合嵌入式單板電腦與伺服機控制板，其中以單板電腦為核心控制器。經由系統整合與程式設計，完成可用 Windows Embedded 嵌入式系統的單板電腦控制架構與伺服馬達為機器人致動器的自主式四足機器人實作平台。

新型四足機器人 NC-F4-2010 實作平台是以本實驗室所開發具有十二個伺服馬達的高自由度四足機器人 NC-F4-09 為原型，改以嵌入式單板電腦 DM&P RoBoard RB-100 為主控電腦，取代機器人原型所採用的個人電腦或 Basic Atom 微晶片處理器。單板電腦主要負責處理複雜的高階運算，並可使用 USB 介面來連接各式的裝置，如無線網路卡或是其他感測器；而伺服機控制板 SSC-32 仍可經由 RS232 介面與單板電腦系統連接，控制伺服馬達之動作。

目前，本實驗已完成新型自主式四足機器人軟硬體系統 NC-F4-2010，

此系統結合機器人視覺模組的影像式地形辨識功能，配合本實驗室所發展之路徑規畫動作產生程式理論與技術，並整合伺服機控制而達成具有智能型行動步態規劃技術功能的可跨越河石地形的自主式四足機器人系統。具體為使用影像擷取裝置觀測地面地形，將地面之隨機地形影像資料經影像辨識處理後取得行走的河石踏點，並再轉換為具體實用之伺服機運動控制路徑規劃，成為機器人之連續行走動作，使機器人能達成跨越河石地形的自主式行走之目標。



關鍵字：四足機器人、河石地形、嵌入式系統、單板電腦、視覺辨識

# Gait Planning and Control of a Single Board Computer Based Quadruped Robot Crossing a Discontinuous Terrain

Student : Han-Jia JIAN

Advisors : Dr. Pi-Ying CHENG

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

This study focused on developing a quadruped robot system NC-F4-2010 which could autonomous across discontinuous terrain. The quadruped robot contains an embedded single board computer (DM&P RoBoard RB-100) and a servo controller. We have successfully installed the Windows Embedded System on the single board computer to control the autonomous quadruped robot. The new developed quadruped robot uses the single board computer as the main local controller, instead of a desktop PC, and uses servo motors as actuators to drive the four legs to move. The experimental platform also integrates several softwares for implementing motion control, image processing etc.

The new quadruped robot NC-F4-2010 is a new prototype, according to the design of the robot NC-F4-09. The NC-F4-09, designed by our laboratory, has 12 servo motors mounted on the four legs. In this study, the new robot's main controller is replaced by DM&P RoBoard RB-100 single board computer, instead of the original Basic Atom single chip. The single board computer can communicate with various types of device such as wireless network card through USB interface. The servo Controller SSC-32 with implements the command from the single board computer to control the servo motor's action via the interface of RS232.

In the study, the new robot system NC-F4-2010 has successfully demonstrated autonomous motion ability crossing a so called River-stone discontinuous terrain. The terrain pattern identified module of the robot-system provides the function of image capture and terrain recognition. The system can execute the developed path generating MATLAB program to calculate the gait processes of the quadruped robot through the terrain. The path generating program designed by our laboratory has integrated with motion control module.

The servo controllers perform the action of gait processes and drive the robot cross the discontinuous terrain. The results of these tests have proved the robot current developed theory and quadruped robot system can successfully perform an autonomous robot motion across a River-stone discontinuous terrain.

Keywords : Quadruped robot 、 River-stone Terrain 、 Embedded System 、  
Single-board Computer 、 Computer Vision



## 誌 謝

本文可順利完成，承蒙指導教授 鄭璧瑩博士的耐心指導與諄諄教誨，令我在研究所生涯的日子裡，不僅得到了許多的訓練與學習機會，更能發揮所長、探求新知。在研究內容方面，老師總是給予明確的指示及方向；在學習上面，老師亦會引導學生找出解決問題的方法，讓我體會了做研究必須努力不懈的態度；而研究之外，從日常相處中也讓學生感受到老師的平易近人與親切關懷，學生在此對老師由衷感謝。

此外，感謝從大學以來如同手足般的好朋友亮瑜、國銓、志元、喬方、秉翰；感謝實驗室每一位成員：學長嗣展、仲緣、家宏、俊融給予了我們最好的學習榜樣；在職專班的光耀、岳芳、勝龍總是不斷地對我們加油打氣；感謝一起努力的同學詩漢、軒丞、瑞昌、永修在研究過程中的相互砥礪和鼓勵；還有學弟維廷、首余、長懋、昱登在實驗室事務及各方面的協助。有大家的陪伴讓我這兩年的時光感到非常充實。

最需要感謝的，自然是我的家人，父母親對我辛苦的栽培，以及兄姊的鼓勵，給予各方面的支持，讓我在學業上能夠專心致力於研究，成就了今日的我。家人的支持是我完成學業最大的動力，在此獻上最深的感謝之意，願在此與你們共享這份喜悅與榮耀。

簡漢嘉 謹致

## 目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	xi
表目錄.....	xvi
一、 緒論.....	1
1.1. 研究背景與動機.....	1
1.2. 文獻回顧.....	3
1.3. 研究流程.....	9
1.4. 論文架構.....	9
二、 基礎理論.....	11





2.1	機器人學座標系轉換 .....	11
2.2	正反向運動學推導 .....	14
2.2.1	正向運動學 .....	14
2.2.2	反向運動學 .....	16
2.3	穩定度 .....	18
2.4	零力矩點 (ZMP) 定義 .....	19
2.5	影像處理 .....	22
2.5.1	影像二值化 .....	22
2.5.2	型態學影像處理 .....	23
2.5.3	影像分割 .....	24
三、	系統軟硬體說明 .....	26
3.1	機器人硬體設備 .....	26
3.1.1	單板電腦 DM&P RoBoard RB-100 .....	26

3.1.2	伺服機控制板 SSC-32 .....	29
3.1.3	四足機器人原型 NC-F4-09 介紹.....	30
3.2	軟體介紹.....	32
3.2.1	Microsoft Windows Embedded Standard.....	32
3.2.2	RoboRealm 機器人視覺軟體 .....	34
3.2.3	本實驗室所發展之路徑規畫動作產生程式.....	35
3.2.4	Visual Sequencer 機器人控制軟體 .....	37
四、	實驗方法與內容 .....	39
4.1	實驗方法說明 .....	39
4.1.1	視覺辨識地形模擬實驗.....	39
4.1.2	隨機地形設計與影像擷取配置規劃 .....	41
4.1.3	機器人實作架構規劃.....	42
4.1.4	實驗程式規劃流程.....	44



4.2	地形實作與裝置架設 .....	45
4.3	機器人實作組裝 .....	46
4.3.1	伺服馬達規格 .....	47
4.3.2	新型四足機器人 NC-F4-2010 機構設計及組裝 .....	50
4.4	Windows Embedded 嵌入式作業系統建構 .....	52
4.5	視覺辨識系統說明 .....	56
4.6	機器人行走路徑規畫動作產生程式說明 .....	60
4.6.1	將視覺辨識數據導入路徑規畫動作產生程式 .....	61
4.6.2	讀入變數轉為座標矩陣 .....	61
4.7	行走實驗結果 .....	63
4.7.1	直線非平坦地形行走實驗 .....	65
4.7.2	隨機非平坦地形行走實驗 .....	68
五、	結論與未來方向 .....	71

5.1	結論.....	71
5.2	未來目標.....	74
	參考文獻.....	76



## 圖目錄

圖 1-1 NCTU-CIDM-F4-2005 四足機器人.....	5
圖 1-2 具高度變化之不規則河石地形 動態模擬 [4].....	5
圖 1-3 在不規則斜坡移動之動作模擬 [5].....	6
圖 1-4 使用機器視覺辨識路面狀況的二足機器人 [6] .....	7
圖 1-5 DOC-2 機器人實體圖 [7].....	8
圖 1-6 五子棋多子辨識結果 [7] .....	8
圖 2-1 球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖 .....	11
圖 2-2 一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係 .....	13
圖 2-3 機器人腳部座標圖(側視) .....	15
圖 2-4 機器人腳部座標圖(上視) .....	15
圖 2-5 重心投影點與支撐點之穩定度示意圖 .....	18
圖 2-6 零力矩點位置概念圖 [9] .....	19

圖 2-7 二值化臨界值的選擇 [10] .....	22
圖 2-8 侵蝕範例 [10] .....	23
圖 2-9 膨脹範例 [10] .....	24
圖 2-10 影像分割效果 .....	25
圖 3-1 RoBoard RB-100 外觀與接腳說明 [11] .....	26
圖 3-2 SSC-32 接腳說明 [12] .....	29
圖 3-3 四足機器人原型 NC-F4-09 [13] .....	31
圖 3-4 Basic Atom 訊號源處理流程 .....	32
圖 3-5 桌上型 PC 訊號源處理流程 .....	32
圖 3-6 Roborealms 介面視窗 .....	34
圖 3-7 四足機器人座標系 [15] .....	36
圖 3-8 踏步順序 .....	36
圖 3-9 Visual Sequencer 軟體介面 [12] .....	38

圖 4-1 隨機地形上視圖 .....	39
圖 4-2 對 Webcam 擷取的影像 針對藍色過濾處理後之結果.....	39
圖 4-3 重心處理計算結果與原始畫面重疊比較圖 .....	40
圖 4-4 具有高度差之隨機地形 .....	41
圖 4-5 重新設計之四足機器人 NC-F4-2010 架構.....	43
圖 4-6 實驗程式規劃流程圖 [16] .....	44
圖 4-7 河石地形實作.....	46
圖 4-8 視覺系統裝置架設 .....	46
圖 4-9 HiTEC HS-485HB Servo Motor 尺寸圖.....	47
圖 4-10 伺服馬達脈波換算角度 (預設值) .....	49
圖 4-11 模型干涉檢查.....	50
圖 4-12 新型機器人 NC-F4-2010 模型建構成果.....	50
圖 4-13 組裝完成之四足機器人.....	51

圖 4-14 腳底防滑套.....	51
圖 4-15 系統開發工具與流程.....	52
圖 4-16 建立完成之目標裝置系統映像檔.....	55
圖 4-17 RoboRealm 視覺辨識程式流程與指令對照.....	57
圖 4-18 隨機河石地形的實際座標定義.....	59
圖 4-19 開啟 RoboRealm 中的 API Server.....	60
圖 4-20 隨機河石地形範例.....	62
圖 4-21 動作產生程式讀入座標轉換矩陣後輸出結果.....	62
圖 4-22 計算結果儲存的路徑檔案.....	63
圖 4-23 遠端遙控機器人之 Windows Embedded 系統.....	64
圖 4-24 機器人行進方向示意圖.....	64
圖 4-25 直線非平坦地形(僅河石地形基板部分).....	65
圖 4-26 直線非平坦地形實際行走完整步態(1).....	66



圖 4-27 直線非平坦地形實際行走完整步態(2).....	67
圖 4-28 隨機非平坦地形(僅河石地形基板部分).....	68
圖 4-29 隨機非平坦地形實際行走完整步態(1).....	69
圖 4-30 隨機非平坦地形實際行走完整步態(2).....	70
圖 5-1 本論文流程三大環節.....	74



## 表目錄

表 3.1 RoBoard RB-100 規格 [11].....	28
表 3.2 SSC-32 脈波產生器規格 [12].....	30
表 4.1 HiTEC HS-485HB Servo Motor 規格表.....	48
表 4.2 伺服馬達角度對應脈波長度.....	49
表 4.3 河石地形像素座標落點與實際座標對應.....	59



# 一、緒論

## 1.1. 研究背景與動機

20 世紀 60 年代，世界第一台的工業機器人從美國誕生，並以此為起點，在 90 年代時迅速蓬勃的發展。機器人結合了控制理論、機構學、計算處理、感測技術、仿生學與人工智慧等各種學科。機器是為了適應製造業的大量生產，解決重複而單調的勞動工作，工業機器人的出現提高了生產的品質與速度，因此工業機器人是最先產業化的機器人技術。

2005 年在日本愛知舉辦的萬國博覽會，日本展出了各式各樣的機器人，除了仿真機器人逼真的外型與流暢的肢體動作之外，比過去更複雜的人工智慧與人性化的人機互動，使人們發覺近幾年來，機器人的應用不再局限於特定的工業用途，這必須歸功於各種相關科技的大幅進步，因此開始出現各種不同應用的機器人，例如清潔、接待等工作均由機器人取代。行政院產業科技策略會議在 2005 年規劃機器人產業發展目標，預估台灣智慧型機器人產業在 2013 年前產值可以提升到新台幣 900 億元，而國內外許多大型企業也都投入了機器人軟硬體的研發。即使如此，機器人在人工智慧方面仍處於起步發展階段，但由於資訊科技的快速成長，電腦產品的微型化，使得機器人具備了複雜運算的能力，加上各種制動器的小型化，配合各式

感測器，令小型機器人得以做出更靈活複雜的動作。

在可移動式的機器人的相關研究中，雙足、四足乃至於多足機器人的構想來自於自然界生物的模仿與啟發。與這些步行式的機器人相比之下，雖然常見的輪式的可移動機器人架構具有移動速度快、結構簡潔和負重能力佳的優勢，但步行式機器人卻有較佳的地形適應能力，能夠較輕鬆的越過具有高度差之障礙環境，是輪式機器人所做不到的。步行式機器人可以應用在野外各種高低不平的地形環境，例如像在地震頻繁的台灣，步行式機器人可以在地震發生後搜救倒塌建築物中的人，或運送物資進入道路塌陷的災區。而在步行機器人中，四足為其中能在穩態下行走的最少足數，穩定度與負重能力又比二足機器人佳，而超過四足的機器人雖然亦有類似優點，但隨著腳的數目增加，反而會令機械結構、步伐分析與控制的複雜度大為增加。

機器人的研究是需要結合各種領域學科，雖然近年來資訊科技的迅速發展讓小型機器人的功能更強、成本降低，但是如何整合應用各項新技術也是值得研究的課題。當四足機器人面對非預先設定好之地形環境時，為了在此地形上順利行進，就必須依靠感測器對此未知地形做出感測，然後將感測外在環境的訊號轉為各項參數及座標，透過電腦的處理之後再控制機器人行進，整合單板電腦、嵌入式系統、視覺辨識、機器人的步態規劃

與控制，令機器人的行走路徑有效可靠而可以自主行走不需人為控制，就是本研究的目標。

## 1.2. 文獻回顧

由於四足機器人應用的範疇十分廣泛，如軍事、工業、娛樂以及甚至行星探測都是四足機器人應用的領域部份，因此四足機器人的相關研究文獻非常豐富，在過去的文獻中，步行機器人的研究基本可以分為機構、步態(Gait)以及避障規劃等方向，而後兩者與本研究欲達成之目標較為相關。

在避免機器人與障礙物碰撞的避障規劃中，使用組態空間(configuration-space, C-space)比使用工作空間較為容易解決問題，因為組態空間中機器人是位置與方向來表示的。由 Belen Curto, Vidal Moreno, 及 Francisco J. Blanco 等人提出的論文 [1]中，提出了新的一般性方法用來表示機器人的組態空間中障礙物的位置。以立體空間的數學為基礎計算障礙物表示方法。使用此方法並選擇適合的座標系，可以讓障礙物在組態空間的表示被視為兩函數的迴旋積(convolution)，分別代表機器人和工作空間。在此之前類似的方法只限用於車輛型機器人(mobile robot)，而用在機械手臂(articulated manipulator)時問題卻只有被粗略的解決。該方法可直接應用於車輛型機器人及關節式機器人(articulated robot)，並且機器人與障礙

物的形狀也沒有限制，所以這個方法相當適合用在動作規劃和控制的相關問題上。

Tim Bretl 等人於 [2]中提出了非步態式 (non-gaited) 的多步動作規劃 (multi-step motion planning)，是以單步動作(one-step motion)為基礎，發展一系列的單步運動完成一動作。它能使多足機器人能自由攀登垂直峭壁。並且實驗結果表示，若是有檢測單步步態動作不適宜的時機，也就是檢查兩個特徵間沒有連續的路徑可以連接的能力，機器人的動作規劃能有更好的效果。然而結論中提到了尚未解決的問題：感測地形，例如此處的地形假設是使用預先勘測的地形。若是機器人使用裝設在機身上的感測器時，則機器人必須逐步的探索環境，然後基於這些不完整或不確定的資訊規劃步伐。基於前述，Tim Bretl 於 2006 年發表的後續研究 [3]再次提到未來的計畫是機器人必須擁有感測器以自主檢測地形，而不是給予預先探測好的全部地形，並對常用的感測器做了一些評價：雖然視覺感測(Visual sensing)或許可行，但與許多其他電腦視覺的應用不同，通常地形中攀爬的支撐點是最難被看到的部分；而觸覺感測器(Tactile sensing)可能有助於解決這個問題，但卻需要花去太多的時間去探測整個地形，導致機器人在決定該爬往何處之外，還必須該探測何處有支撐點。

本實驗室長期以來亦持續投入對四足機器人的研究，圖1-1即為本實驗室開發之四足機器人NCTU-CIDM-F4-2005，為一套結合BASIC Stamp 2 和 89C51 的單晶片控制系統，能使四足機器人NCTU-CIDM-F4-2005脫離電腦系統而獨立運作，同時也還保留與電腦相連的控制方式。

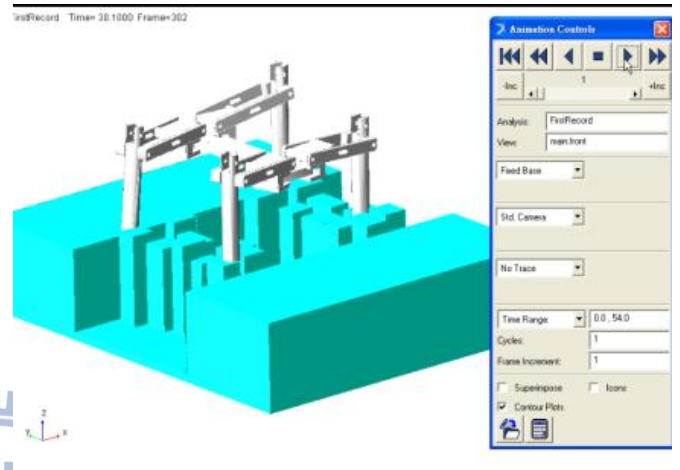
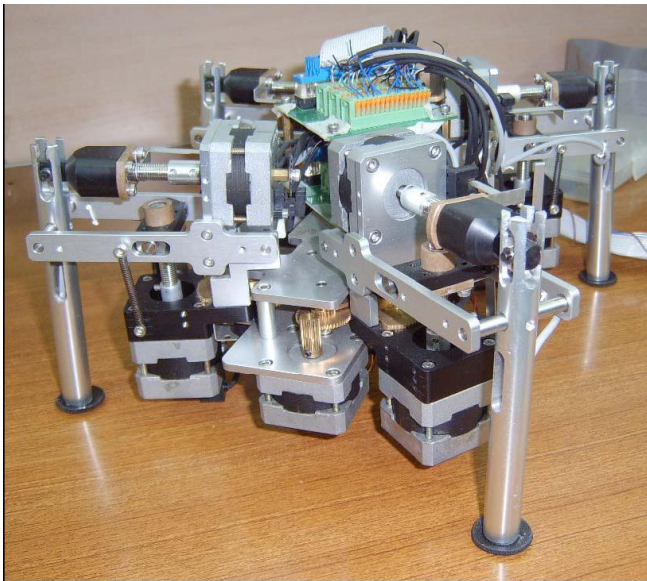


圖 1-1 NCTU-CIDM-F4-2005

圖 1-2 具高度變化之不規則河石地形

四足機器人

動態模擬 [4]

鄭璧瑩、林建堯 [4]提出了一套四足機器人在非連續河石地形上的步態規劃法，利用投影的概念，將多維度的路徑規劃問題簡化為多個 2 維的問題組合，有效的降低多維度問題的限制，而用一較簡單的方式來描述問題，此外採用 NCTU-CIDM-F4-2005 建立之四足機器人河石地形跨步的模式，配合地形條件及 ZMP 穩定判斷法則，能夠迅速的建立跨越河石地形

的有效路徑，經由河石地形的路徑規劃模擬，如圖 1-2，並加以實作證實提出的規劃方法是簡單且有效的。

在 Christophe Grand 等人的論文 [5]中提到輪足混合 (wheel-legged robot) 機器人是一種能提高機器人運動能力的可能方式。文章控制輪足混合機器人 Hylos 在類似圖 1-3 的不規則的斜坡地形上移動時，透過動力學方程式推導這樣的冗餘驅動系統，配合穩定性的定義，提出一種方法增加機器人於斜坡上移動的穩定度；另外根據速度模型 (velocity model) 提出一關於姿態控制的演算法，只要加入一個雙軸感測器 (two-axis inclinometer) 量測機器人本體 pitch-roll 以及一些足部的位置感測器 (position sensors)，即能有效的控制機器人維持一平穩的姿態來移動。

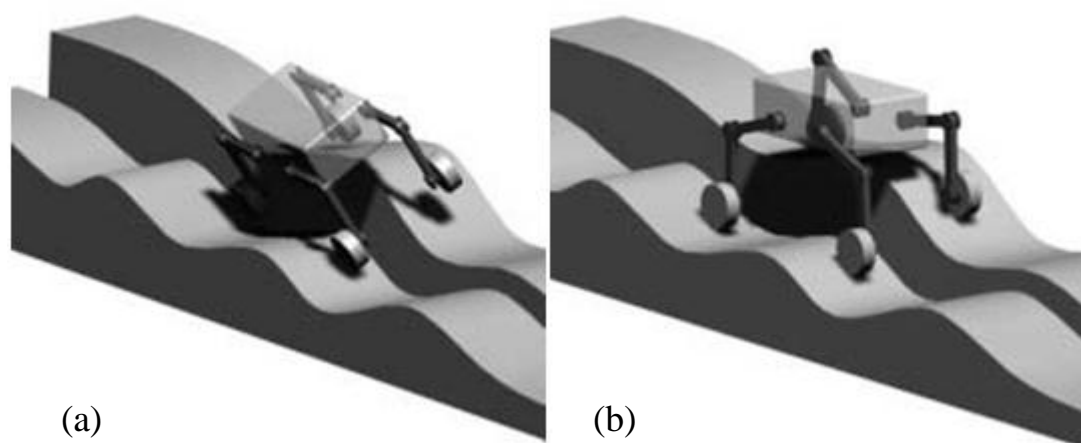


圖 1-3 在不規則斜坡移動之動作模擬 [5]

(a) 未加入姿態控制前可能發生翻倒 (b) 加入後系統穩定度增加



在 M. Anthony Lewis, Hyo-Kyung Lee 以及 Aftab Patla 提出的論文 [6] 中，研究了基於非幾何限制條件的踩踏點選擇問題。不論是人或機器人，在選擇踩踏點的時候，表面特徵非常重要，而此前的機器人研究焦點通常放在道路表面的幾何特性上，但是單單的幾何訊息不足以讓機器人順利行走。因為一般的道路表面可能有各種狀態，例如潮濕、泥濘或是結冰等等，這種情況下人類會在各種表面和步態之間協調：當沒有理想的踩踏點時，人會選擇次要的踩踏點，而且這個選擇不是隨機的。這裡提出一個動態神經網路(dynamical neural network)模型，並使用機器視覺辨識路面狀況，可以在任意複雜的表面選擇良好的踩踏點，圖 1-4 中的二足機器人將會優先選擇具有顏色特徵的部分為步伐的踩踏點，而白色部分的選擇優先程度較低，而這樣的選擇系統對真實世界應用的步行機器人是必要的。



圖 1-4 使用機器視覺辨識路面狀況的二足機器人 [6]

2006 年陳柏宗 [7]設計一機器人 DOC-2 之五子棋、象棋和西洋棋辨識整合系統，圖 1-5 為人與 DOC-2 機器人互動下棋的狀況。辨識系統利用特殊設計的定位點與棋子，由機器人頭上的 CCD 擷取棋盤影像後，傳回桌上型電腦做影像處理與分析，使棋盤得以定位與辨識。五子棋、象棋分別使用灰階值差異性與顏色過濾並加上遮罩來區隔辨識，西洋棋辨識是分別對棋盤位置判斷棋子可能處，再配合顏色過濾確定棋子位置，圖 1-6 為五子棋辨識結果之範例。三種棋盤辨識中，五子棋因為只使用二值化過濾辨識，最容易受到光線亮暗及陰影影響。最後利用模組化的五子棋演算法、象棋和西洋棋下棋軟體計算出最佳的棋路，機器人再以機器手臂來直接移動棋子。



圖 1-5 DOC-2 機器人實體圖 [7]

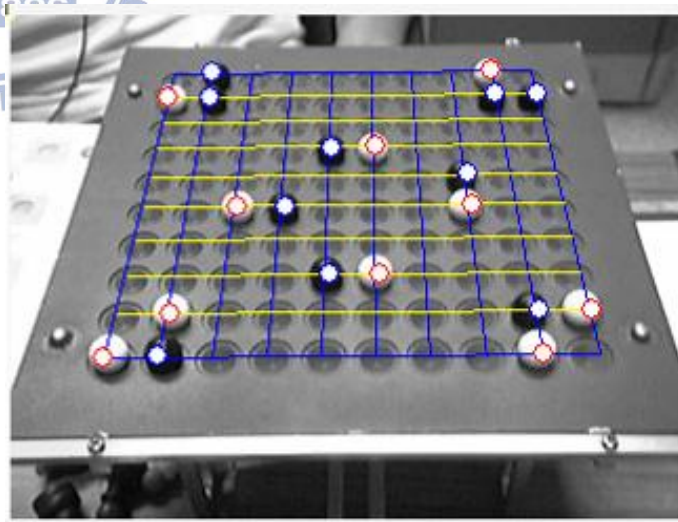


圖 1-6 五子棋多子辨識結果 [7]

### 1.3. 研究流程

本論文研究之目標在於發展一以單板電腦為基礎的具視覺之自主式四足機器人跨越隨機地形之控制方法，以下是研究大致的流程：

1. 研讀路徑規劃、嵌入式系統與機器視覺之相關文獻
2. 正反向運動學理論推導
3. 四足機器人控制架構設計變更與組裝實做
4. 整合視覺辨識與路徑規劃動作產生程式
5. 實驗的驗證與誤差修正
6. 結論與分析
7. 未來工作



### 1.4. 論文架構

第一章『緒論』：說明本論文研究之動機與背景、文獻回顧、研究流程與章節介紹。

第二章『基本理論』：闡述有關機器人原理介紹，如機器人學座標系轉換、正反向運動學、零力矩點定義以及影像處理的原理。

第三章『系統軟硬體』：介紹說明本實驗所使用的軟體及硬體設備、規格。

第四章『實驗規畫』：個別說明機器人控制系統架構、各主要的元件與裝置，實驗用程式流程等軟硬體介紹；以及如何規劃實驗與理論做配合與驗證。

第五章：『結論與未來方向』：闡述本研究之特色及未來的方向。



## 二、 基礎理論

### 2.1 機器人學座標系轉換

圖 2-1 為一參考座標系和移動座標系之間的位置相關圖，令 $i, j, k$ 為參考座標系 A 的三軸之單位向量，而 $u, v, w$ 為移動座標系 B 的三軸之單位向量，當以參考座標系 A 來描述 $u, v, w$ 這三個向量時，可以得到以下結果：

$${}^A\vec{u} = u_x\vec{i} + u_y\vec{j} + u_z\vec{k}$$

$${}^A\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k} \quad (2-1)$$

$${}^A\vec{w} = w_x\vec{i} + w_y\vec{j} + w_z\vec{k}$$

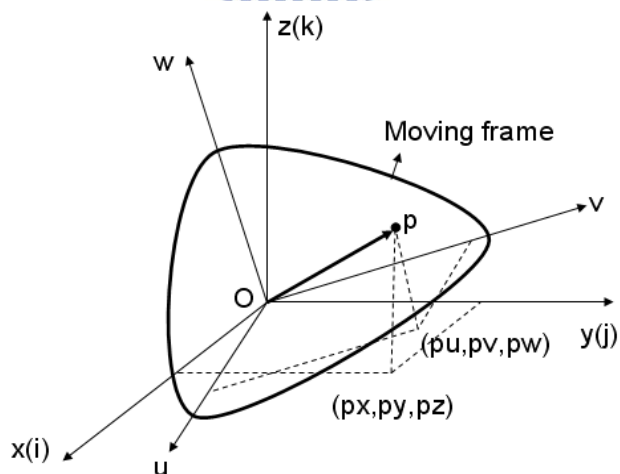


圖 2-1 球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖

該點 P 的位置向量由 A 來表示

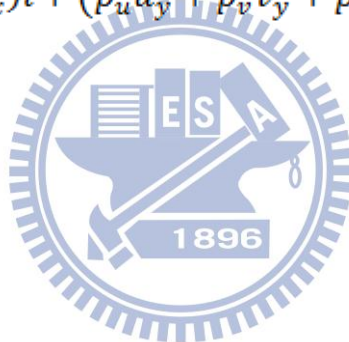
$${}^A\vec{p} = p_x\vec{i} + p_y\vec{j} + p_z\vec{k} \quad (2-2)$$

或是以移動座標系 B 表示

$${}^B\vec{p} = p_u\vec{u} + p_v\vec{v} + p_w\vec{w} \quad (2-3)$$

將(2-1)式帶入(2-2)式可以得到以參考座標系 A 所表示的 P 點的位置向量

$${}^A\vec{p} = (p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x)\vec{i} + (p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y)\vec{j} + (p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z)\vec{k}$$



(2-4)

比較(2-3)式與(2-4)式可得

$$p_x = p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x$$

$$p_y = p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y \quad (2-5)$$

$$p_z = p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z$$

將(2-4)式以矩陣表示

$${}^A\vec{p} = {}^A R_B {}^B\vec{P} \quad \text{其中} \quad {}^A R_B = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

因為為正交矩陣，所以  ${}^B R_A = {}^A R_B^{-1} = {}^A R_B^T$ ，反求  ${}^A\vec{p}$  對  ${}^B\vec{p}$  間的關係，可得

$${}^B\vec{p} = {}^A R_B {}^A\vec{p} \quad (2-7)$$

下面考慮一般性空間移動的座標轉換關係

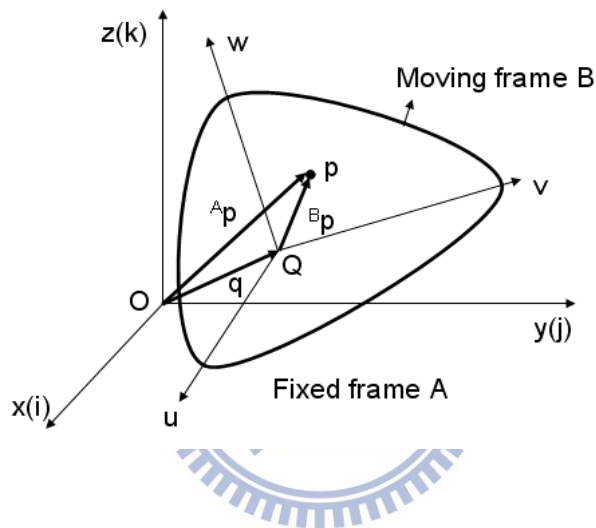


圖 2-2 一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係

根據圖 2-2，發現移動座標系除了轉動外還包含了移動  $q$ ，從圖中的向量關係圖可以得到兩座標系之間的關係

$${}^A\vec{p} = {}^A R_B {}^B\vec{p} + {}^A\vec{q} \quad (2-8)$$

將上式整理成齊次轉換矩陣(Homogeneous Transformation Matrix)可得

$${}^A\vec{p} = {}^A T_B {}^B\vec{p} \quad (2-9)$$

$$\text{其中 } {}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & \vdots & {}^A\vec{q} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

要反求  ${}^A\vec{p}$  對  ${}^B\vec{p}$  間的關係時，因為  ${}^A T_B$  並非正交矩陣 ( ${}^A T_B^{-1} \neq {}^A T_B^T$ )，將(2-8)

式等號兩邊同乘  ${}^A R_B^{-1}$ ，又  ${}^A R_B^{-1} = {}^A R_B^T$ ，可得  ${}^B\vec{p} = {}^A R_B^T {}^A\vec{p} -$

$${}^A R_B^T {}^A\vec{q} = {}^A T_B^{-1} {}^A\vec{p}$$

$$\text{其中 } {}^A T_B^{-1} = {}^B T_A = \begin{bmatrix} {}^A R_B^T & \vdots & -{}^A R_B^T {}^A\vec{q} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

有了上述的關係式，即可輕易的求得兩座標系之間的轉換關係。



## 2.2 正反向運動學推導

### 2.2.1 正向運動學

圖 2-3 為本研究所使用的四足機器人 NC-F4-2009 單腳側視圖，圖 2-4 為單腳上視圖，為了計算出腳底 A 點相對於座標系原點 O 位置，以這兩張圖對於機器人各關節之旋轉角度定義如下：



上臂旋轉自由度：旋轉角度 $\alpha$

上臂抬放自由度：旋轉角度 $\beta$

下臂抬放自由度：旋轉角度 $\gamma$

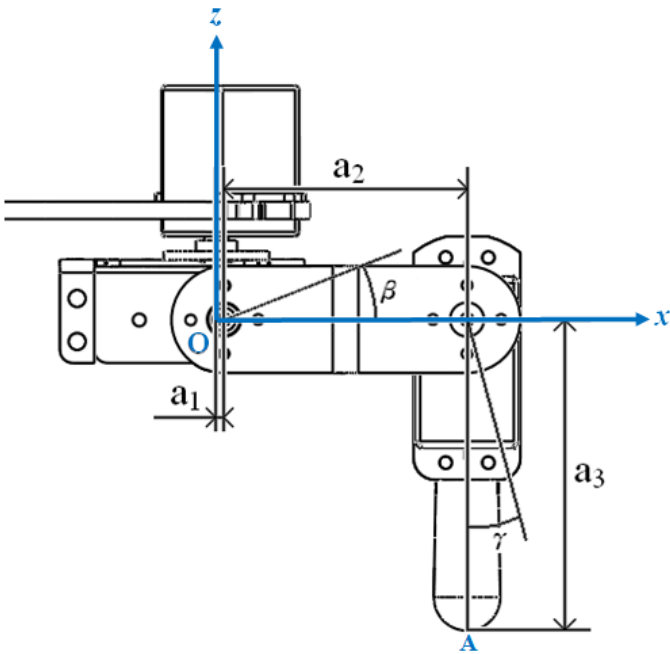


圖 2-3 機器人腳部座標圖(側視)

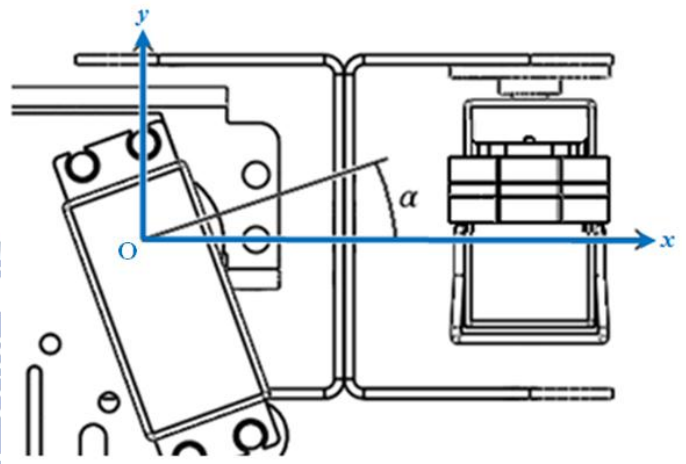


圖 2-4 機器人腳部座標圖(上視)

將圖 2-3 中的 O 點定義為座標原點，則腳底 A 點的座標則可以下列的公

式來表示：

$$A(x, y, z) = \begin{cases} x = [-a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\beta + \gamma)] \cos \alpha & (2-12) \\ y = [-a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\beta + \gamma)] \sin \alpha & (2-13) \\ z = a_2 \sin \beta - a_3 \cos(\beta + \gamma) & (2-14) \end{cases}$$

### 2.2.2 反向運動學

為了計算機器人行走動作過程中各關節的伺服馬達應該旋轉的角度，我們使用反向運動學推導端點座標、連桿長度與連桿角度間關係。由於單腳的參數為 $\alpha$ 、 $\beta$ 與 $\gamma$  3 個，此處將機器人足部工作空間投影至  $xy$  平面來簡化問題並進行分析。機器人的腳在  $xy$  平面的投影長度  $L$  為其它兩軸自由度 $\beta$ 及 $\gamma$ 的函數，而工作空間的投影則其實為機器人腳的投影長度  $L$  及 $\alpha$ 角度的變化所掃成的面積，即：

$$L = -a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\alpha + \beta) \quad (2-15)$$

再利用投影長度  $L$  及旋轉角度 $\alpha$ ，將端點座標改寫為：

$$x = L \cos \alpha \quad (2-16)$$

$$y = L \sin \alpha \quad (2-17)$$

將以上(2-16)、(2-17)兩式聯立，可以得知 $\alpha$ 與  $xy$  關係為：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2-18)$$

(2-14)與(2-15)經由移項整理，得到：

$$a_3 \sin(\beta + \alpha) = L + a_1 - a_2 \cos \beta \quad (2-19)$$

$$a_3 \cos(\beta + \gamma) = a_2 \sin \beta - z \quad (2-20)$$

再由(2-19)、(2-20)式平方相加整理出  $\beta$  與座標及桿件長度關係為：

$$a_3^2 \sin^2(\beta + \gamma) + a_3^2 \cos^2(\beta + \gamma) = (L + a_1 - a_2 \cos \beta)^2 + (a_2 \sin \beta - z)^2 \quad (2-21)$$

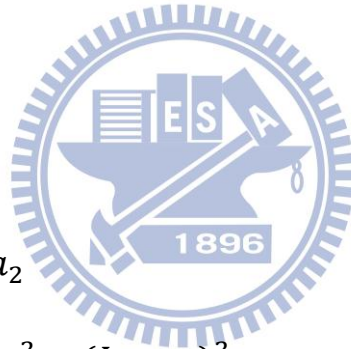
可再整理成 
$$\beta = 2 \tan^{-1} \frac{-D \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{F - E} \quad (2-22)$$

其中

$$D = 2a_2z$$

$$E = 2(L + a_1)a_2$$

$$F = a_3^2 - a_2^2 - z^2 - (L + a_1)^2$$



最後，把(2-22)代回(2-15)式，求得：

$$\gamma = \sin^{-1} \left( \frac{L + a_1 - a_2 \cos \beta}{a_3} \right) - \beta \quad (2-23)$$

由上述方程式推演，得到關節角度  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  與機器人腳底端點座標、機器人腳長度間關係，在後續實作過程中可以將視覺辨識獲得之地形座標經計算後轉化為各關節的伺服馬達角度。

## 2.3 穩定度

穩定度的定義為：由機器人之重心往地面作投影，其投影點與機器人腳在地面上的支撐點連線所構成之多邊形(又稱穩定多邊形)。兩者間的最短距離(垂直距離)，稱為穩定度。為使機器人在整個運動的過程中保持穩定，不至於翻倒或倒下。穩定度必須大於或等於 0。

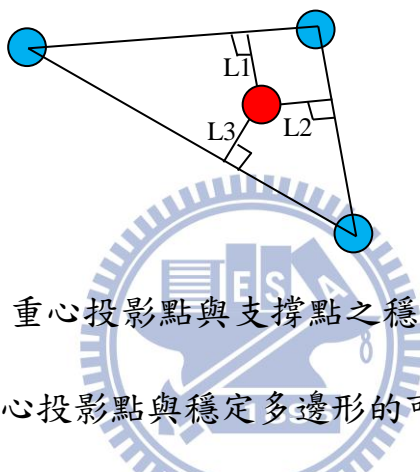


圖 2-5 重心投影點與支撐點之穩定度示意圖

如圖 2-5 所示，重心投影點與穩定多邊形的可能最短距離分別為  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 。同時  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  皆大於 0，表示此四足機器人為穩定狀態。在實際情況下，隨著機器人的移動而產生動量，重心位置還需要計算加速度所造成的力量使得投影點偏移。此為動態穩定度所考量的問題。而靜態穩定度假設機器人的動量的考量小到可以忽略的情況下，所以通常應用在移動慢、體型輕、加速度不大的機器人上。

## 2.4 零力矩點 (ZMP) 定義

在步行機器人的研究中，ZMP (Zero Moment Point) 佔了很重要的地位。零力矩點的概念最初在 1968 年被 Timcenko 及 Vukobratovic 提出 [8]，在 80 年代，早稻田的加藤一郎實驗室 (Ichiro Kato's laboratory at Waseda University) 製作了一系列的 WL 機器人，這些雙足機器人是將此概念實際應用到動態平衡的雙足步行。從那時開始，ZMP 就成為動態平衡步行的指標。

ZMP 的定義為地面上一點的慣性力和重力之淨力矩 (net moment) 無水平軸的分量  $M_x$  和  $M_y$  則稱此點為零力矩點，當 ZMP 落在人形機器人腳底所形成的支撐面內，則機器人可維持平衡不摔倒。而地面對機器人反作用力的合力所作用的點，則稱為壓力中心 (Center of Pressure)，當機器人步行維持平衡時，壓力中心和零力矩點是重疊的，如圖 2-6 所示。

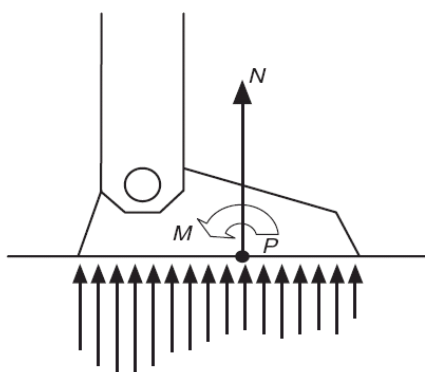


圖 2-6 零力矩點位置概念圖 [9]

ZMP 的計算公式如下：

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=0}^n m_i\ddot{x}(z_i - z_{ZMP}) - \sum_{i=0}^n I_{iy}\ddot{\theta}_{iy} + F_{ext,x}z_f}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g)}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=0}^n m_i\ddot{y}(z_i - z_{ZMP}) - \sum_{i=0}^n I_{ix}\ddot{\theta}_{ix} + F_{ext,y}z_f}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g)}$$

(2-24)

其中

$m_i$ ：第  $i$  桿的質量

$(x_{ZMP}, y_{ZMP}, z_{ZMP})$ ：ZMP 的座標

$(x_i, y_i, z_i)$ ：第  $i$  桿件質心座標

$g$ ：重力加速度

$F_{ext,x}, F_{ext,y}$ ：外力干擾的分力

$I_{ix}, I_{iy}$ ：第  $i$  桿件慣性力的  $x$  軸  $y$  軸分量

$\ddot{\theta}_{ix}, \ddot{\theta}_{iy}$ ：第  $i$  桿件的  $x$  軸和  $y$  軸的角加速度

$z_f$ ：外力力臂

為了簡化複雜的動態平衡問題，忽略掉各桿件的慣性力及外力干擾，假設所

有質量集中在質心，則 ZMP 公式可簡化為：



$$x_{ZMP} = x_G - \frac{\ddot{x}_G(z_G - z_{ZMP})}{\ddot{z}_G + g}$$

$$y_{ZMP} = y_G - \frac{\ddot{y}_G(z_G - z_{ZMP})}{\ddot{z}_G + g} \quad (2-25)$$

上式中 $(x_G, y_G, z_G)$ 為機器人質心位置的座標， $(\ddot{x}_G, \ddot{y}_G, \ddot{z}_G)$ 為質心加速度的分量。通常機器人的垂直加速度非常小可以忽略，且當機器人只步行在平坦的地面時 $z_{ZMP}$ 為0，則ZMP公式可簡化為下式：

$$x_{ZMP} = x_G - \frac{\ddot{x}_G z_G}{g}$$

$$y_{ZMP} = y_G - \frac{\ddot{y}_G z_G}{g} \quad (2-26)$$

當機器人移動緩慢，質心加速度 $\ddot{x}_G, \ddot{y}_G$ 也都為0，則零力矩點和質心座標，在xy平面有相同的投影點：

$$x_{ZMP} = x_G$$

$$y_{ZMP} = y_G \quad (2-27)$$

## 2.5 影像處理

### 2.5.1 影像二值化

影像二值化(Image Binarize)是設定一個臨界值 (Threshold)，將圖像中的灰階值與臨界值做比較，如圖 2-7，假設  $m$  為二值化之臨界值，大於臨界值  $m$  是設定 1 (白色)，小於臨界值則為 0 (黑色)。在影像處理時，臨界值的選擇可由影像灰階圖(Histogram)取其谷值而求得。影像二值化主要的目的一來是降低彩色影像所帶來的大量資料量，而降低了處理的速度，二來可以將影像的前景與背景分開，得以區分出圖像中的物件與背景，以獲得物件的資訊。

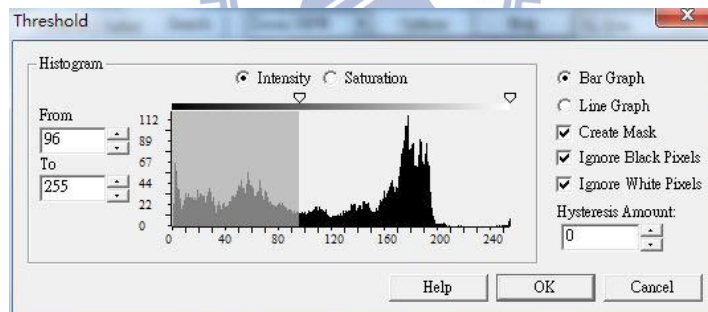


圖 2-7 二值化臨界值的選擇 [10]



## 2.5.2 型態學影像處理

型態學影像處理最基本的運算是膨脹(dilation)和侵蝕(erosion)。

侵蝕法:

從影像的輪廓處向內收縮若干像素，此動作能夠消除影像邊緣的細小突起及區塊之間細長的連接，圖 2-8(b)被侵蝕後的圖形可以看出字體變細之外，字母 e 的中央也被侵蝕消除。

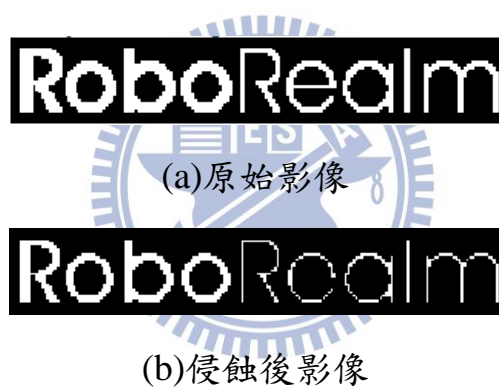


圖 2-8 侵蝕範例 [10]

膨脹法:

與侵蝕相反的理念，此動作則是補足影像常有的破碎或缺口處，填滿邊

緣的缺口使得區塊更為完整。



(a)原始影像



(b) 膨脹後影像

圖 2-9 膨脹範例 [10]

然而在對於侵蝕及膨脹的使用通常並不會單獨應用，而是組合在一起來使用，先對影像侵蝕，去除了邊緣突點與雜訊，平滑其表面，再而對影像膨脹，填滿邊緣的破碎處及缺口，並補足先前侵蝕的像素，來去除影像邊緣雜訊所造成的影響。

### 2.5.3 影像分割

影像分割(Segmentation)又被稱為作標記或標籤(Label)，也被稱作 Blob 分析。利用像素鄰近點(Neighbors)像素值相同來做相關性檢測，使得在同一區域相關聯相同的像素值代表屬於影像中同一物件，常以八相鄰或四相鄰點為基礎，由左而右再由上而下掃描影像中的每個像素，當找到某種子點像素值為 0 時，再以種子點出發向鄰近的各點去尋找，若找到的相鄰的點像素同

為 0 時則將它們編列同一個群組編號，等到確定所有連結在一起的點素均已被標記為同一群組編號後，即可再使用新群組編號對下一個目標實施掃描處理，直到掃描完整張影像，圖 2-10 是以四相鄰點方式掃描分割為 4 個群組的範例。

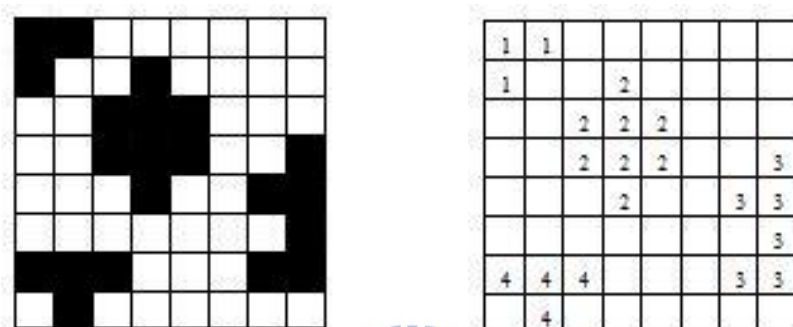


圖 2-10 影像分割效果

使用此方法的目的是在於 Blob 分析後的影像，可以方便對每個獨立的群組計算出特徵或指定的物理量，例如面積、邊長、重心等。

### 三、 系統軟硬體說明

#### 3.1 機器人硬體設備

##### 3.1.1 單板電腦 DM&P RoBoard RB-100

本研究用於控制四足機器人所使用之單板電腦為台灣瞻營全 DM&P 所推出之 RoBoard RB-100，此單板電腦使用的處理器 Vortex86 DX 是由瞻營全公司所推出的一顆 32 位元 x86 處理器，可相容於 Windows based、Linux 作業系統與大部分的 32 位元即時作業系統(Real-Time Operating System ,RTOS)。而且 Vortex86 DX 整合了 32KB L1 快取記憶體、256KB L2 快取記憶體、USB 2.0、PCI Bus、DDR II、ROM Controller、高速乙太網路以及 IDE Controller 成為一顆系統單晶片，相當適用於嵌入式系統、通訊產品或是機器人應用。

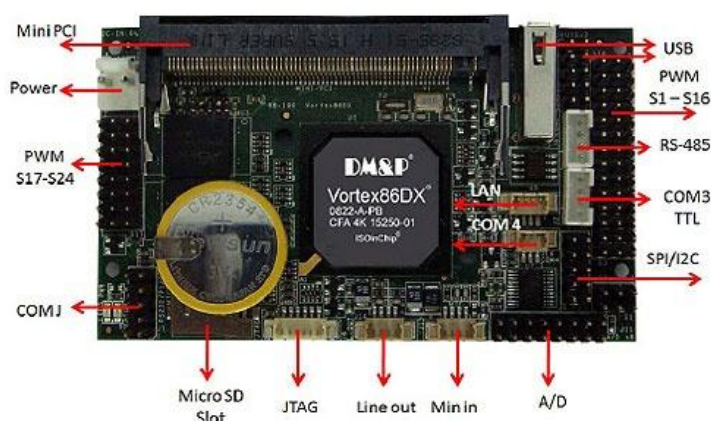


圖 3-1 RoBoard RB-100 外觀與接腳說明 [11]

因此瞻營全更以 Vortex86 DX 為基礎進行模組化的設計，整合通訊介面，

推出機器人專用 Vortex86DX RoBoard 模組 RB-100 單板電腦，RoBoard

RB-100 詳細規格如表 3.1。此單板電腦提供多種智慧型機器人產品發展所需的控制介面，其規格特色如下：

- 架構於 Vortex86DX 的基礎上，一種 32 位元的 x86 平台 CPU，速度可達 1000MHz，搭配 256MB 的記憶體
- 和 Windows，Linux ,DOS 皆完全相容
- 完全開放的 C++ 函式庫，包括像是 I/O，感測器等等
- 長寬只有 96 x 56 mm
- 內建 24 組 PWM 訊號，GPIO,RS-232，TTL serial，RS-485,USB V2.0 x 3，A/D convert，SPI/I2C bus，Audio out & Mic in，10/100M LAN，和一個 Mini PCI 插座。
- 輸入電源電壓範圍支援 6V 到 24V



表 3.1 RoBoard RB-100 規格 [11]

名稱	RB-100
處理器	DM&P Vortex86DX
BIOS	AMI BIOS
記憶體	256MB DDR 2 onboard
ADCs	Analog Devices AD-7918 10-bit
I/O 介面	Micro SD slot x1 **支援 class 2,4,6 SDHC , 任何容量 USB port x 1 (USB 2.0 version)
週邊連接裝置	2.54 mm 3-pin box header for PWM x 24 2.54 mm 10-pin box header for RS-232 x1 2.54 mm 10 -pin box header for USB x1 2.0 mm 4-pin header for RS-485 x1 2.0 mm 4-pin header for TTL serial x1 2.54 mm 10 -pin box header for SPI & I 2C x1 2.54 mm 16-pin header for A/D x1 1.25 mm 3 -pin wafer for TTL serial x 1 1.25 mm 4 -pin wafer for LAN x 1 1.25 mm 4-pin wafer for MIC-in x 1 1.25 mm 4-pin wafer for Line-out x1 1.25mm 6-pin wafer for JTAG x1 0.8mm 124-Pin Mini PCI Card connector 3.96 mm 2 pin for Power x 1
電源需求	+5V @ 400mA
可接受輸入電源	DC-in 6V to 24V
大小	96 x 56 mm
重量	40g
控制解析度	PWM : 20ns Serial : 115200bps I2C : 1Kbps ~ 3.3Mbps SPI : 10Mbps to 150Mbps Half-Duplex; CPOL=0/1,CPHA=1 Clock mode
支援的作業系統	DOS, Windows 98/ME, WIndows XP Windows Embedded CE 6.0 Windows Embedded Standard, Windows Embedded Stardand Linux distribution kernel 2.4.x, 2.6.x

### 3.1.2 伺服機控制板 SSC-32

為了讓單板電腦專注於計算處理，因此控制伺服馬達的工作將分割出來，在轉譯動作為伺服馬達所需脈波的部分，使用的是 Lynxmotion 公司所生產的 SSC-32 脈波產生器，圖 3-2 為伺服機控制板之電路接腳說明，此伺服機控制板利用 AVR 公司的 ATmega8 單晶片，結合 4 組 74HC595 晶片構成之模組，可以控制 32 個伺服馬達，詳細規格如表 3.2。

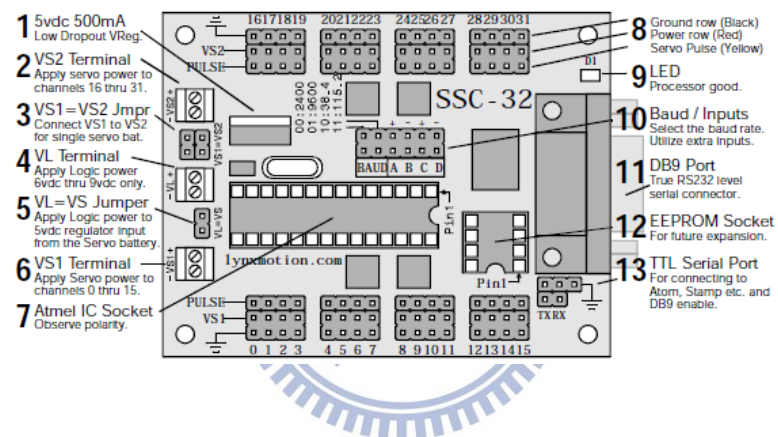


圖 3-2 SSC-32 接腳說明 [12]

表 3.2 SSC-32 脈波產生器規格 [12]

Microcontroller	Atmel ATMEGA8-16PI
EEPROM	24LC32P (Not supported on this release)
Speed	14.75 MHz
Internal Sequencer	12 Servo Hexapod (Alternating Tripod)
Serial input	True RS-232 or TTL , 2400 , 9600 , 38.4k , 115.2k , N81
Outputs	32 (Servo or TTL)
Inputs	(Static or Latching)
Current requirements	31mA
PC interface	DB9F
Microcontroller interface	Header posts
Servo control	Up to 32 servos plug in directly
Servo type supported	Futaba or Hitec
Servo travel range	~170°
Servo resolution	1uS , .11°
Servo speed resolution	1uS / Second
Servo motion control	Immediate , Timed , Speed or Synchronized

資料來源：Lynxmotion , Inc.

### 3.1.3 四足機器人原型 NC-F4-09 介紹

本研究所使用的四足機器人將改良自本實驗室所設計開發，具有十二個伺服馬達的高自由度四足機器人原型 NC-F4-09 [13]。此四足機器人每隻腳有 3 個關節，由 3 顆伺服馬達所構成，各關節的伺服馬達排列方式如圖 3-3 所示。為了減輕整體機身重量，結構採用較輕的壓克力與鋁合金材料混合使用。



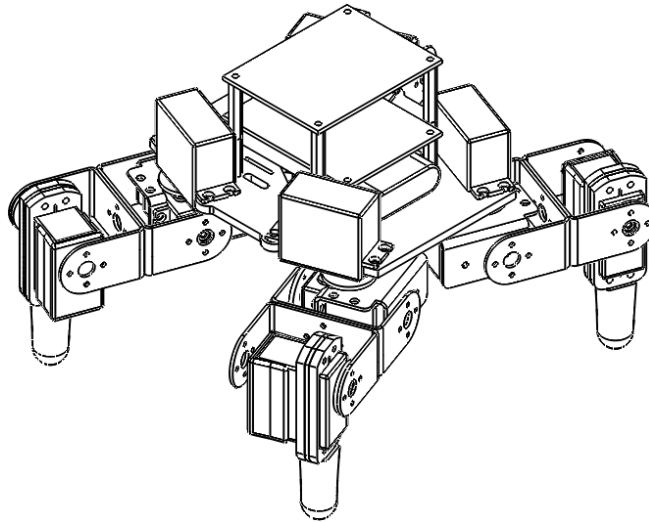


圖 3-3 四足機器人原型 NC-F4-09 [13]

原始設計的控制方式有兩種，一種是利用 Basic Atom 單晶片為主控制器，將使用 Visual Sequencer 所撰寫的程式燒錄進 Basic Atom 後，由 Basic Atom 送出控制訊號給 SSC-32 控制板，使得四足機器人得以獨立自主運作，如圖 3-4；而另一種是四足機器人的 SSC-32 控制板經由 RS232 纜線與個人電腦連接，直接由電腦程式控制，如圖 3-5。經由電腦直接控制 SSC-32 雖然活動範圍受到 RS232 纜線限制，且機器人動作亦被纜線重量影響，但運算能力較前種方式提高許多，程式執行速度也更為流暢。

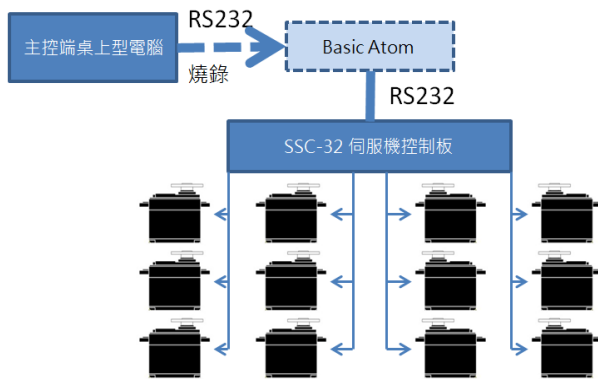


圖 3-4 Basic Atom 訊號源處理流程

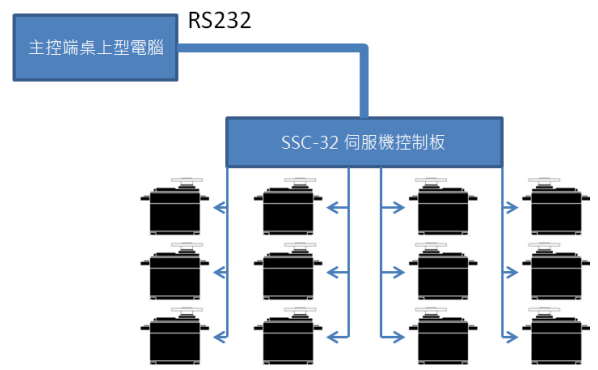


圖 3-5 桌上型 PC 訊號源處理流程

在本研究中，將重新製作組裝一新型四足機器人 NC-F4-2010，在 NC-F4-09 的足部機構基礎上，改以 RoBoard RB-100 嵌入式單板電腦取代 Basic Atom 及個人電腦，搭配 SSC-32 控制板控制機器人動作，與原先設計比較，可同時具有較佳的運算性能且不受纜線限制活動範圍兩項優勢。

## 3.2 軟體介紹

### 3.2.1 Microsoft Windows Embedded Standard

本實驗將以 Microsoft Windows Embedded Standard 2009 [14] 為單板電腦所使用之作業系統，Windows Embedded Standard 為微軟研發的嵌入式操作系統，是一個以元件模組展現出與 Windows XP Professional 作業系統一樣的介面與操作模式，可依各自需求組合出的作業系統映像檔案，確保有 Windows XP Professional 作業系統相依性以及完整的功能。Windows Embedded 基於將

Windows XP Professional 所有的功能和程式予以元件化，包含了超過 10,000 項以上的個別功能元件。使用 Windows Embedded Standard 可以讓程式開發人員先在個人電腦上的 Windows XP Professional 作業系統發展所需系統和應用軟體，然後，直接移轉到在 Windows Embedded Standard 嵌入式作業系統上執行，減少了許多驅動程式和應用程式開發的時間。可以應用在各種嵌入式系統，或是硬體規格層次較低的電腦系統（例如很少的記憶體，較慢的中央處理器等）。微軟嵌入式 Windows Embedded Standard 作業系統目前廣泛應用於資訊家電、工業控制等領域的技術和產品研發，例如：自動化、機器人、機上盒、POS、網路設備、辦公自動化、遊戲平台等。



特色：

- 含多個 x86 硬體平台驅動程式元件。
- 可利用多種作業系統開發工具建置、開發、客製及測試裝置。
- 支援隨插即用設備。
- 含多個 Windows XP Professional 作業系統內基本元件，包含 Bluetooth、DirectX、.NET Framework、Windows Media Player、Internet Explorer...等。
- 支援所有 x86 硬體平台設備。
- 可挑選所需的服務、應用程式及驅動程式建置系統映像檔，可縮減作業系統大小並減少系統資源消耗

在本研究中使用 Microsoft Windows Embedded Standard 搭配單板電腦 RB-100，除了可以達成機器人自主運作之目標外，還將可以讓所有原先在個人電腦中使用的軟體與程式直接移植至單板電腦上運行，減少機器人控制程式開發之負擔，進而專注於影像辨識等人工智慧問題上。

### 3.2.2 RoboRealm 機器人視覺軟體

本研究所採用之影像辨識軟體 RoboRealm [10]是一套免費下載的機器人視覺軟體應用程式，功能強大，可供使用者做為機器視覺、影像處理等複雜的影像分析，圖 3-6 為 RoboRealm 軟體的視窗操作介面，使用者可以從左側

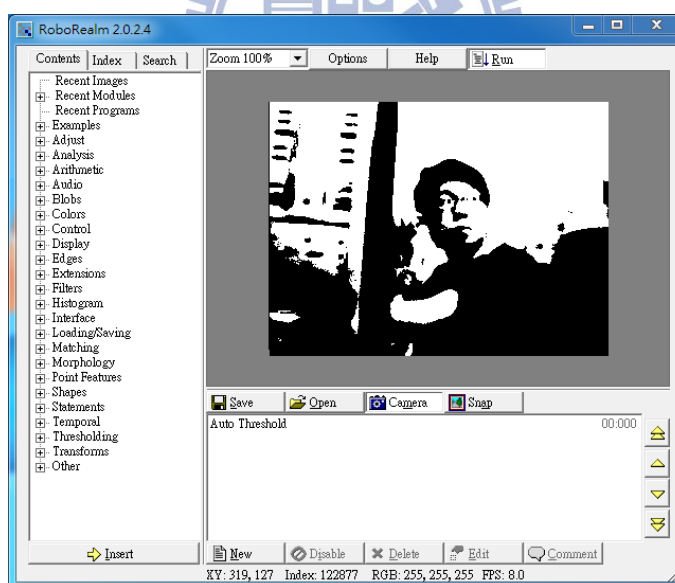


圖 3-6 Roborealms 介面視窗

加入各種影像處理函數模組，例如用來執行重心定位或提供顏色及幾何的統計資料等分析功能。此外 RoboRealm 還包含多種濾波器(Filter)可以被應用在

影像上處理去除背景，或尋找影像的最大、最小、平均或中間點等功能。

舉例來說，使用者可以利用 RoboRealm 來達成如數位量表判讀，物件定位或路徑追蹤的工作。除了軟體中內建的影像處理函數之外，RoboRealm 還可以透過 Extensions 讓使用者自行建立函數。另外 RoboRealm 中也提供了 API Server (Application Program Interface Server)，讓使用者在使用其他程式語言撰寫程式時可以接收 RoboRealm 提供的影像資料。

### 3.2.3 本實驗室所發展之路徑規畫動作產生程式

本論文中所使用的路徑規畫動作產生程式是由本實驗室所發展之理論 [15]，該理論使用適應性網路模糊推論系統(ANFIS)演算法，應用於四足機器人實驗模組(NC-F4-09)跨越非平坦河石地形(River-stone Terrain)之路徑規畫。由於四足機器人具有 12 個自由度，若欲計算行走時各關節馬達之角度，使用正反向運動學公式皆相當複雜與冗長，因此本實驗室便發展一套程式理論，以 MATLAB 為開發環境，利用 ANFIS 理論取代運動學函數，並搭配靜態 ZMP 穩定性分析，使機器人隨著不同地形做不同姿態調整，提高人工智慧步伐規畫的層次。

建立四足機器人之坐標系定義如圖 3-7 所示，由於此機器人為對稱式架構，因此可將 12 個自由度的四足機器人簡化為 4 個 3-DOF 空間三連桿。而

四足機器人之踏步順序為右前腳→左後腳→左前腳→右後腳，如圖 3-8，此種舉腳順序是目前各種四足機器人研究中，直走時的最佳步態順序。

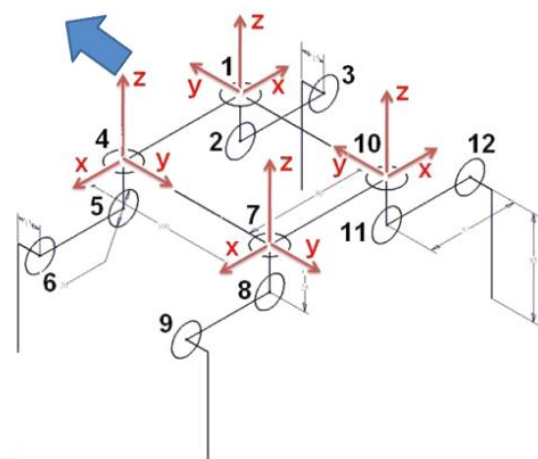


圖 3-7 四足機器人座標系 [15]

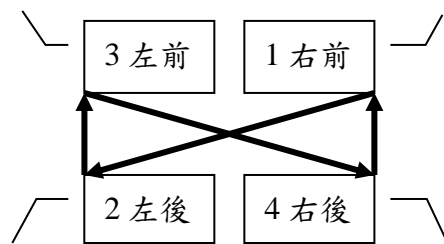


圖 3-8 踏步順序

機器人踏步過程中的重心調整方式，則是採用簡化的計算方法，將機身中心投影至地面，當抬起其中一腳時，中心在地面的投影點必須落在仍在地上的三足所形成的三角形內，機器人才不至於傾倒。而此程式將依照上述理論計算出踏步及調整重心等行走循環程序中的各軸運動數據如馬達轉動角度，並匯出成伺服馬達控制軟體 Visual Sequencer 可用的路徑檔案格式，得以配合實驗匯入控制軟體實際進行驗證。


此動作產生程式同時擁有以 MATLAB 為基礎所建立的步伐規劃自動產生的圖控式界面系統(GUI)，有助於簡化四足機器人跨越河石地形的步伐規劃

與實際控制驗正。

### 3.2.4 Visual Sequencer 機器人控制軟體

本研究中，為進行控制機器人伺服馬達的動作測試與規劃，使用了 Lynxmotion 公司 [12]開發的 Visual Sequencer，這是一套配合 SSC-32 脈波產生器，針對伺服馬達控制所撰寫的一套圖形化界面控制軟體。在本研究中，主要會使用到這套軟體的三項功能，以下將個別就此三項功能進行介紹：

#### (1) SSC-32 設定



一般進行控制伺服馬達，首先便會遇到伺服馬達校準的問題，雖然現今來說，各家公司所生產之伺服馬達皆已定義其接收脈衝對旋轉位置的定義，但實際上每顆伺服馬達對此皆有差異，使得一般在使用時，若是直接給予脈波來進行控制，會需要個別換算角度而使得操作相當繁瑣，但若是透過 Visual Sequencer 的 SSC-32 設定，可以直接對個別伺服馬達工作脈波區間，並可自行定義對應角度，使得在完成設定後，使用 Visual Sequencer 控制時可以直接給予角度讓軟體換算成脈波長度，簡化控制流程。

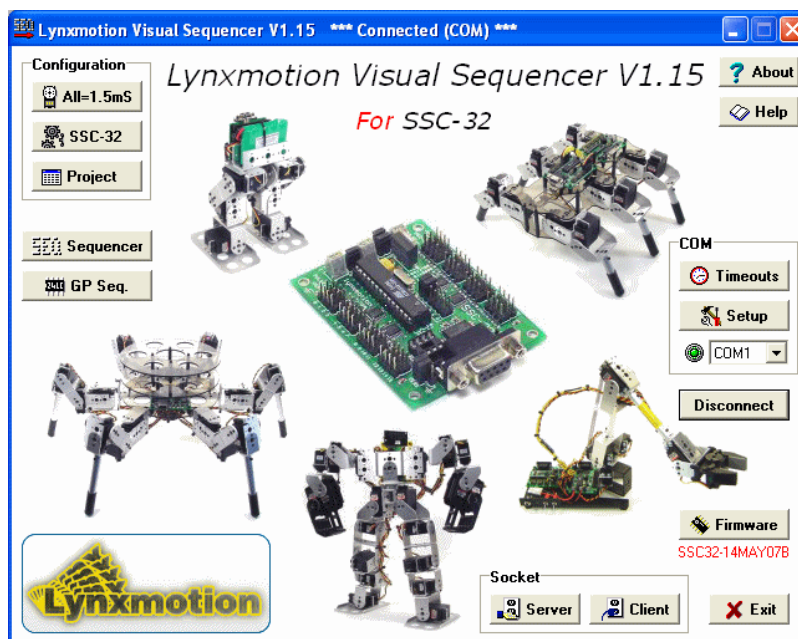


圖 3-9 Visual Sequencer 軟體介面 [12]

## (2) 動作編輯與播放

在這個功能中，能指定動作的伺服馬達與角度位置，以及動作時間。透過這個功能，使用者能夠直接調整動作，並儲存下來連續撥放，作為動作快速設定與測試的輔助。另外在進階播放模式中，可以直接調整動作速度的倍率，協助找出較佳的動作速度進行調整。

## (3) 匯出與匯入功能

Visual Sequencer 支援了匯出與匯入功能，能夠將設定完成的動作資料，轉換為以純文字格式編寫的機器人動作角度檔案匯出，或將由其他軟體產生之相同格式檔案匯入產生動作。



## 四、 實驗方法與內容

### 4.1 實驗方法說明

#### 4.1.1 視覺辨識地形模擬實驗

在實驗規劃初期，我們先使用一般市售之網路攝影機(Webcam)做為攝影機搭配 RoboRealm 軟體做視覺辨識可行性的初步測試。此處以一模擬隨機地形 CAD 上視圖為原始圖形，如圖 4-1，以網路攝影機在地形垂直方向擷取影像後，使用 RoboRealm 對擷取到的影像做處理，透過顏色過濾、侵蝕以及影像分割成群組之後，可以獲得隨機地形上同顏色的各點在畫面中的座標，圖 4-2 是針對藍色河石踏點做色彩過濾後的範例。

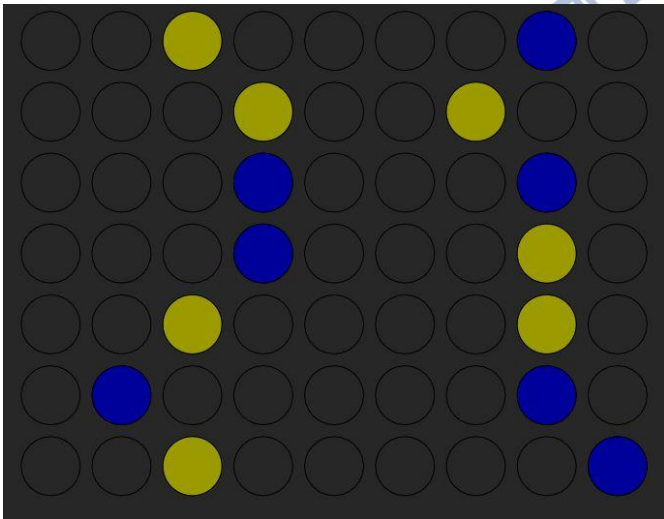


圖 4-1 隨機地形上視圖

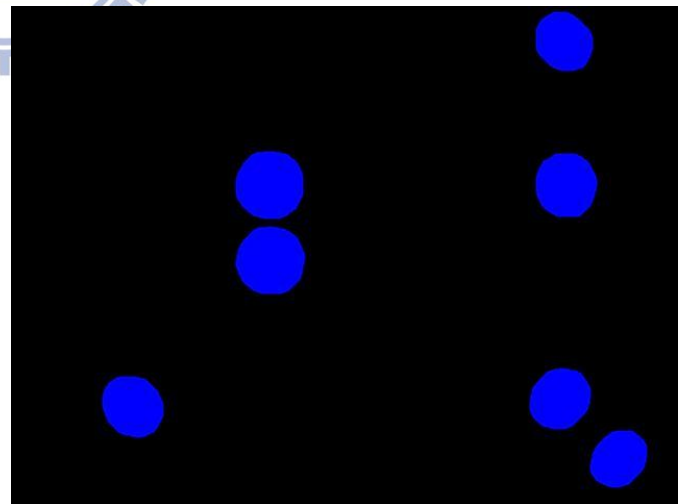


圖 4-2 對 Webcam 擷取的影像  
針對藍色過濾處理後之結果

過濾出藍色河石踏點的圖形之後，再用 RoboRealm 做影像分割，將不相鄰的藍色河石踏點分割為獨立的群組，進而可以個別算出每個藍色河石踏點的面積與圖形重心，以及每個藍色圖形重心分別在畫面上的位置座標。此處設定以計算後之重心位置為圓心標示出藍色圓形方便觀察，從圖 4-3 的重心計算結果與 WebCAM 所截取到的畫面重疊比較，可以看到辨識結果完全的與原始擷取影像重合，表示可以有效的計算出每個河石踏點在畫面上的位置。

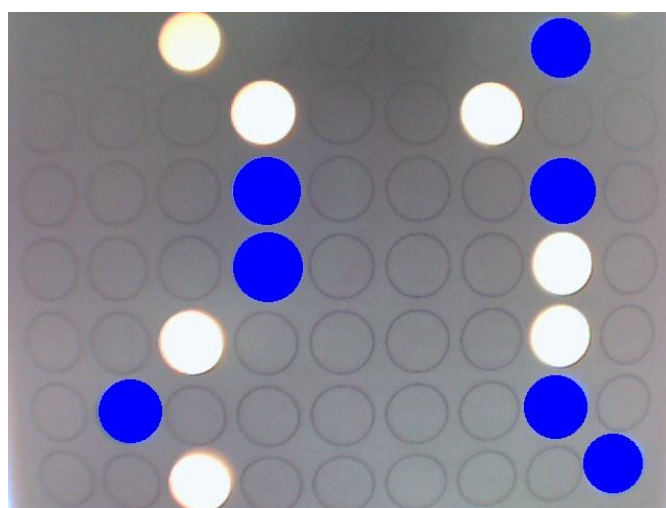


圖 4-3 重心處理計算結果與原始畫面重疊比較圖

由於影像辨識會受攝影角度及攝影機鏡頭好壞的影響，造成影像產生梯形或筒形的變形，而必須在程式中手動修正影像角度參數不會在辨識時產生誤差。另外，光線的明暗也會影響辨識的效果：當採用顏色過濾法時，亮度的變化會讓物體被拍攝的顏色產生改變，如黃色河石踏點在圖 4-3 中看起來

接近白色，故後期的實作實驗改以紅藍為踏點顏色；而過亮或過暗造成影像在二值化時難以選擇臨界值。因此當機器人系統與攝影機整體架構組裝完成時，還必須考慮攝影機架設位置與實驗環境光線加以修正影像辨識程式參數，以減少誤差的產生。

#### 4.1.2 隨機地形設計與影像擷取配置規劃

論文中的隨機步態，是表示當機器人試圖穿越隨機河石地形時，由於地形中可供落腳的河石踏點的位置與高度是不固定的，機器人必須利用影像擷取裝置偵測地形狀態，經由視覺辨識程式處理辨識可供踩踏的河石位置並計算路徑，因此機器人將在面對不同地形下做步伐步態的轉變，才得以踩著這些點，沿著計算好的路徑前進。在這個過程中，機器人必須能正確的辨識地形。

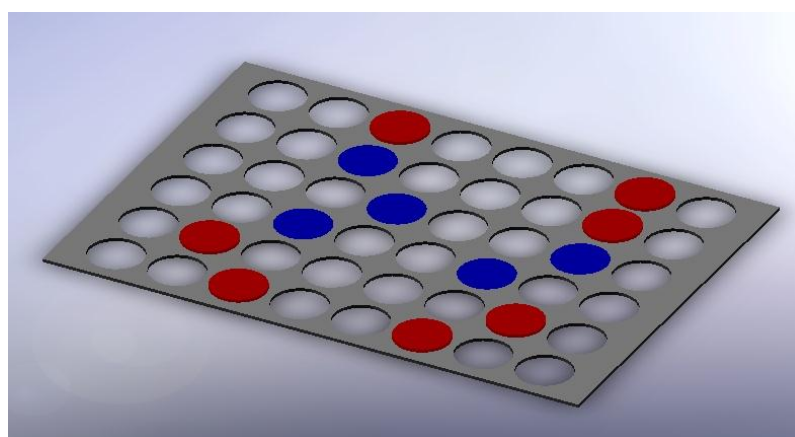


圖 4-4 具有高度差之隨機地形

在使用視覺辨識方式探測地形的實驗規劃中，為了簡化計算模型，並方便配合影像擷取裝置拍攝畫面，我們設計了圖 4-4 的梅花樁隨機地形。地形中的圓盤表示是可供機器人踩踏的河石踏點，並分為 2mm 與 4mm 兩種高度差，由前一節的模擬實驗考慮到光線對顏色的影響，在外觀上以藍色與紅色做為視覺辨識時的區別。

本研究計劃的影像擷取裝置與四足機器人位置架設配置方案採用一般市售之 USB 網路攝影機(Webcam)，優點在於網路攝影機成本較低且容易取得，透過 USB 方便與電腦連接傳輸資料，不須外加影像擷取卡。

假若攝影機裝設在機器人身上缺點是會造成拍攝角度過低，造成影像變形、色偏而必須調整參數修正誤差，同時因為攝影機與地面距離較近，視覺觀測範圍僅有機器人前方部分區域，若是在觀測範圍之外有死路將無法預先規劃避開路徑，另外攝影機的重量還會影響機器人的重心平衡。因此本論文將攝影機架設在隨機地形正上方，從高處觀測可檢測大範圍地形。

#### 4.1.3 機器人實作架構規劃

本研究的另一目標將以本實驗室所開發 NC-F4-09 [13]為設計原型，新製作一台新型四足機器人 NC-F4-2010，圖 4-5 為新設計之四足機器人控制架構，其中最大的差異之處是改以單板電腦 DM&P RoBoard RB-100 為機器人端控

制電腦，利用嵌入式系統的可攜式之特點，取代在原始設計中的 Basic Atom 單晶片或連接桌上型電腦的有線控制，以單板電腦負責複雜的運算，並可使用 USB 介面來連結擴充各式的裝置，如安裝無線網路卡以達成無線控制的功能。

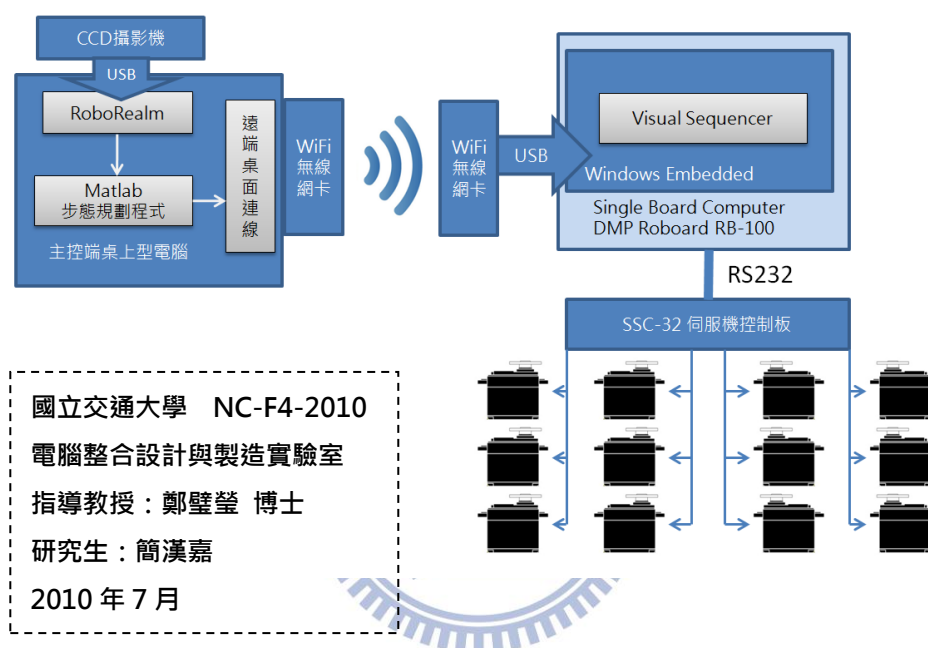


圖 4-5 重新設計之四足機器人 NC-F4-2010 架構

單板電腦上運行的嵌入式作業系統為 Windows Embedded，相容 Windows XP，可以直接相容執行 Windows 的軟體，使其可搭配本實驗室前代機器人所應用的伺服機控制軟體，因此新型四足機器人 NC-F4-2010 的伺服馬達控制將以 Visual Sequencer 軟體做為機器人伺服機控制之動作編輯與播放。另外，雖然單板電腦 RB-100 上具有 24 組 PWM 訊號輸出可以控制伺服馬達，但為了配合本實驗室所開發之動作產生程式理論，因此仍沿用 Visual Sequencer

搭配伺服機控制板 SSC-32 作為本實驗的控制方式。而伺服機控制板 SSC-32 經由 RS232 介面與單板電腦連接，負責控制伺服馬達之運動動作。

#### 4.1.4 實驗程式規劃流程

本研究的主軸之一，在於結合視覺模組的影像擷取功能，建立視覺辨識系統探測地形座標資料的能力，整合單板電腦與新型四足機器人 NC-F4-2010 取代以往的有線控制及單晶片控制架構。而實驗從程式規劃設計的角度來看，將可分為視覺辨識→動作計算產生→運動控制三大環節。

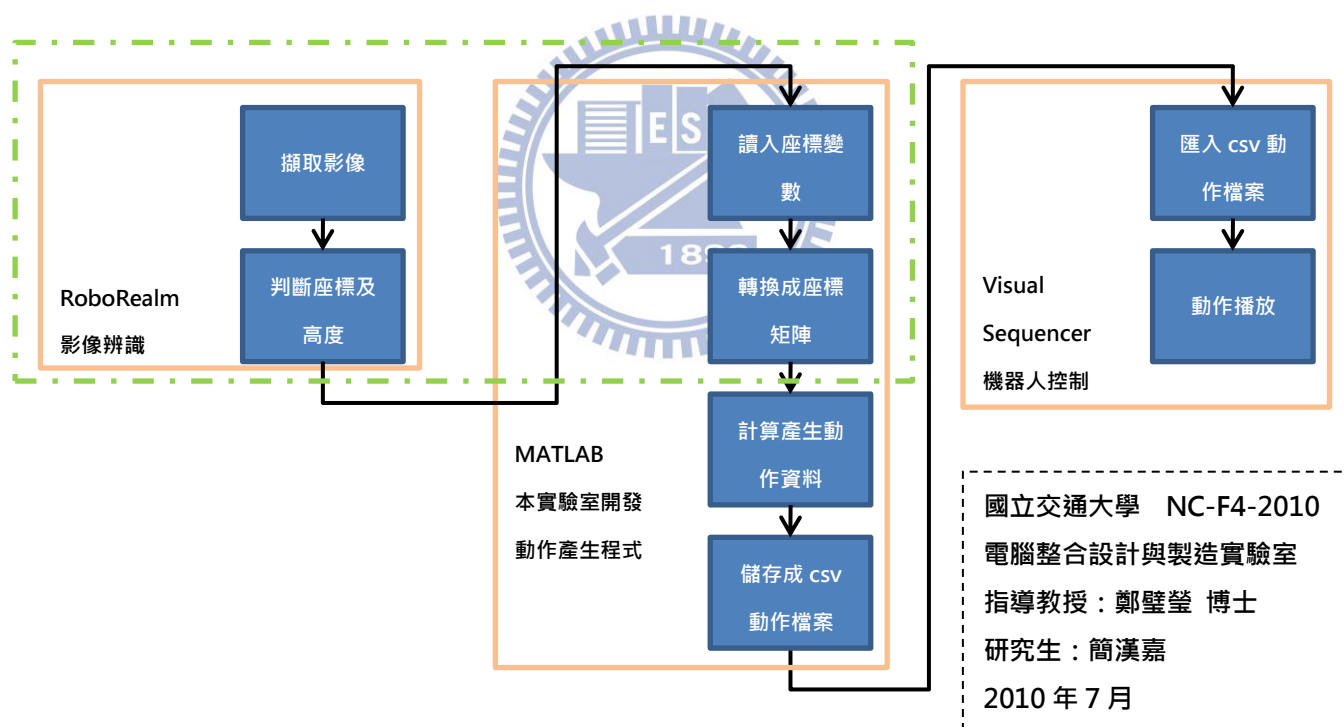


圖 4-6 實驗程式規劃流程圖 [16]

圖 4-6 為本實驗所規劃的實驗程式流程圖，在實驗操作過程中，我們將主要會使用到三套軟體用來撰寫不同需求的程式，同時還必須將三套程式串

聯起來，組成一個連續的實驗程式規劃流程。而與本實驗室過去團隊所開發的 NC-F4-09 機器人系統比較，這次研究新加入的部分主要是使用 RoboRealm 對地形作影像辨識處理，以及將視覺辨識的結果與 MATLAB 的動作產生程式相結合，即為圖 4-6 的虛線框起部分，本論文將會對此詳細說明。

## 4.2 地形實作與裝置架設

我們將前述 4.1.2 節所設計的非連續河石地形，以壓克力材料加工，用以在實際實驗中驗證機器人 NC-F4-2010 穿越非連續地形的能力。在此河石地形中，作為河石踏點的河石直徑為 35mm，分別有 2mm 與 4mm 兩種厚度，2mm 圓盤上貼有藍色色紙，4mm 圓盤貼有紅色色紙作為視覺辨識分辨高度之用。河石地形基板為 250mm × 350mm 透明壓克力板，其上挖有 8 × 6 個圓孔，圓心間距為 40mm，加工完成之河石地形如圖 4-7。

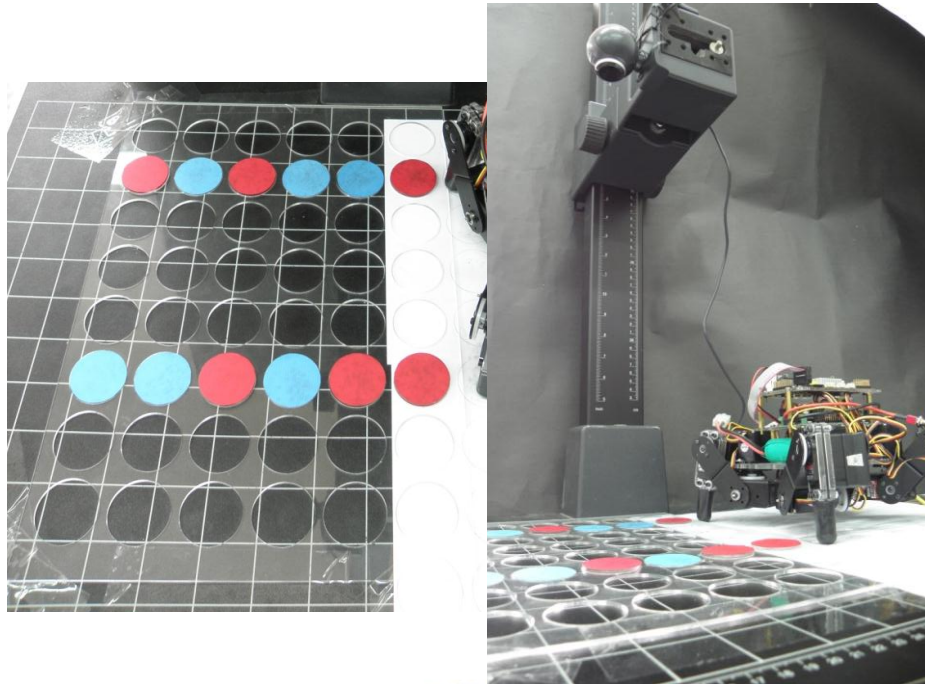


圖 4-7 河石地形實作

圖 4-8 視覺系統裝置架設

河石地形與影像擷取裝置安裝固定在德國 KAISER 翻拍台上，影像擷取裝置垂直於河石地形正上方，並調整翻拍台懸臂高度在 38cm，得以完整拍攝整體河石地形畫面，如圖 4-8 所示。在後續的實驗中，河石圓盤將可隨機放置於河石地形基板上，經視覺辨識取得座標與高度資料。

### 4.3 機器人實作組裝

本實驗所使用的新型四足機器人 NC-F4-2010 雖然是以本實驗室所開發之 NC-F4-09 機構為原型，但為了搭配本實驗規劃安裝的單板電腦，仍重新



製作加工組裝了一新型四足機器人。機器人的四足關節機構配置與尺寸維持與前代保持一致，用以搭配路徑規畫動作產生程式，但機身上方配合單板電腦尺寸而修改組裝孔位。同時因應新馬達及電池等零件尺寸變化而與前一代的機器人有些許的差異。

#### 4.3.1 伺服馬達規格

圖 4-9 為本新型四足機器人 NC-F4-2010 所使用的伺服馬達，採用韓國 HiTEC 公司 [17]所生產之伺服馬達 HS-485HB，相較前代機器人所使用的 HS-475HB，HS-485HB 有著更高的速度與輸出扭力，但耗電與尺寸略微增加。

表 4.1 為此伺服馬達之規格：

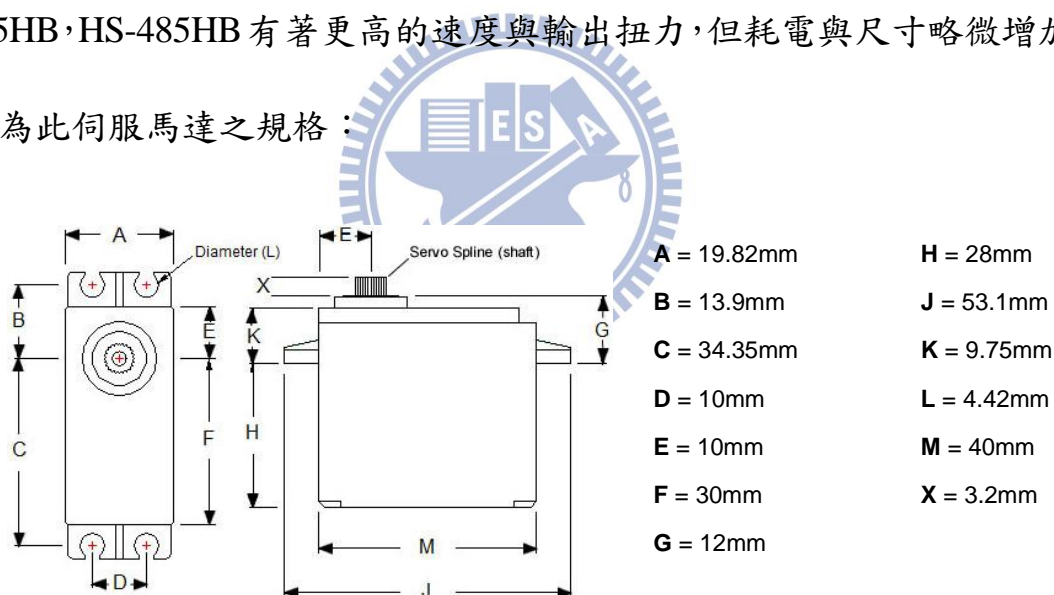


圖 4-9 HiTEC HS-485HB Servo Motor 尺寸圖

表 4.1 HiTEC HS-485HB Servo Motor 規格表

Control System	+Pulse Width Control 1500usec Neutral	
Operating Voltage Range	4.8V to 6.0V	
	at 4.8V	at 6.0V
Operating Speed	0.20 sec /60° at no load	0.17 sec /60° at no load
Output Torque	5.18kg.cm	6.41kg.cm
Idle Current	8mA/idle	8.8mA/idle
Running Current	150mA no load operating	180mA no load operating
Operating Travel	45 Deg. one side pulse traveling 400usec	
Direction	Clockwise/Pulse Traveling 1500 to 1900usec	
Motor Type	3 Pole Ferrite Motor	
Potentiometer Type	Indirect Drive	
Dimensions	39.88x19.81x37.85mm	
Weight	45.08g	
Bearing Type	Top Ball Bearing, Lower Bushing	
Gear Type	Karbonite Gears	

資料來源：HITEC RCD KOREA INC. [17]

伺服馬達在原廠出廠時皆有預設定義工作脈波與輸出角度的換算，如圖 4-10，但實際上每個伺服馬達仍會存在差異，因此在組裝機器人前必須從控制軟體去進行修正，經由測試與微調，對馬達重新定位。我們使用 Visual Sequencer 軟體搭配 SSC-32 控制板，對 12 顆伺服馬達分別校正，從軟體送出 500usec 至 2500usec 的脈波訊號，同時量測馬達角度並加以記錄，針對本研究所規劃的機器人經過實際的測試，得到表 4.2 的結果。

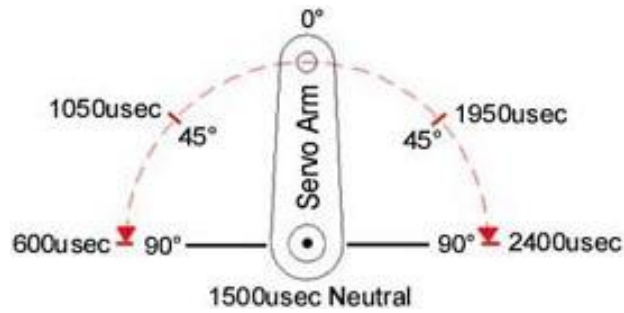


圖 4-10 伺服馬達脈波換算角度（預設值）

表 4.2 伺服馬達角度對應脈波長度

馬達在 Visual Sequencer 的編號		角度對應脈波時間(μsec)		
		-90°	0°	90°
預設值		600	1500	2400
左前腳	0	561	1449	2337
	1	537	1438	2339
	2	516	1432	2348
左後腳	13	516	1397	2278
	14	508	1401	2294
	15	640	1550	2460
右前腳	16	562	1488	2414
	17	549	1475	2401
	18	537	1426	2315
右後腳	29	502	1401	2300
	30	554	1488	2422
	31	682	1549	2416

隨後依照量測的結果，運用 Visual Sequencer 中的 SSC-32 設定功能，將各伺服馬達角度與脈波的關係對應重新定義。伺服馬達校正後，使用者便能從軟體中直接給予想要的馬達的旋轉角度，而軟體將會轉換我們實際測試的脈波長度輸出，進而得到正確的實際馬達旋轉角度結果，如此在後續的實驗中才能正確的做出我們規劃的動作。

#### 4.3.2 新型四足機器人 NC-F4-2010 機構設計及組裝

本論文所使用之四足機器人 NC-F4-2010 由於伺服馬達、電池等新替換的零件尺寸與前代機器人相比之下有所增加，同時還需加入安裝單板電腦的支架，因此必須在前代機器人的基礎上修改模型。在實際加工製作之前，先以電腦輔助繪圖軟體 SolidWorks 建立初步的機構模型。模型建構完成後對機器人模型進行干涉檢驗，如圖 4-11，再修正零件組合間的干涉。圖 4-12 為模型設計流程最後完成之機器人模型。

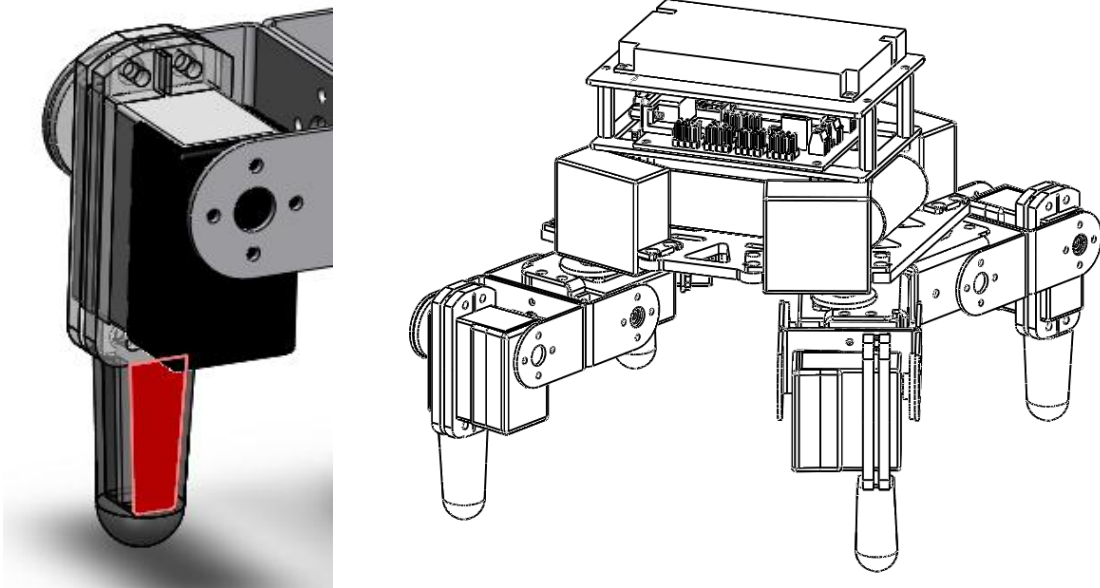


圖 4-11 模型干涉檢查 圖 4-12 新型機器人 NC-F4-2010 模型建構成果

本論文所製作之新型四足機器人 NC-F4-2010，除了控制電路與伺服馬達之外，一部份機構是使用市售的鋁合金鈹金結構件，一部分採用壓克力材料自行加工而成。加工壓克力是運用雷晟科技公司所生產之 ILS-II 精巧型雷射

雕刻機，以二氧化碳雷射進行平面切割加工。

圖 4-13 即為最後實作組裝完成之四足機器人 NC-F4-2010，具有十二個自由度。四足機器人之腳底套上橡膠防滑套，如圖 4-14，增加摩擦力以減少行走時打滑產生的誤差。此新型四足機器人 NC-F4-2010 可使用機身上的單板電腦連接顯示器及輸入裝置作直接的動作控制；也接有 USB 無線網路卡，可使用無線網路搭配 Windows 系統之遠端桌面連線，從主控端電腦無線遙控單板電腦之作業系統傳輸檔案與執行動作控制，取代有線的輸出輸入裝置。

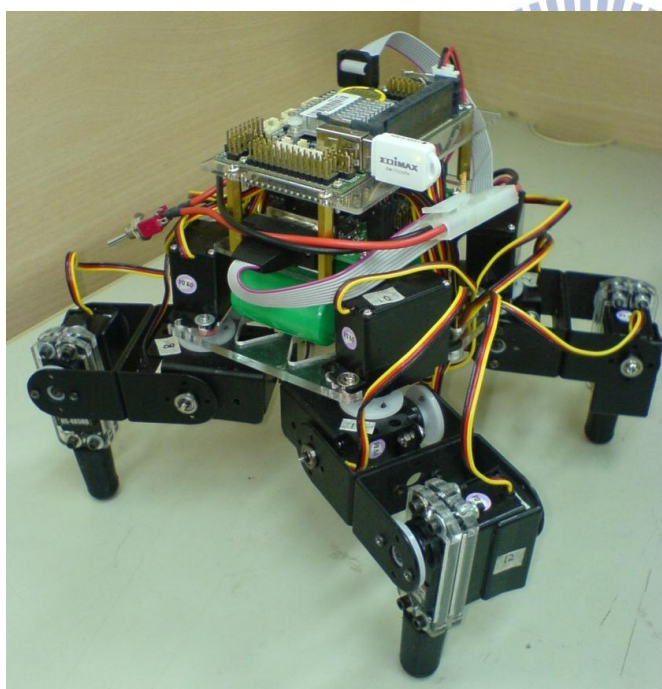


圖 4-13 組裝完成之四足機器人

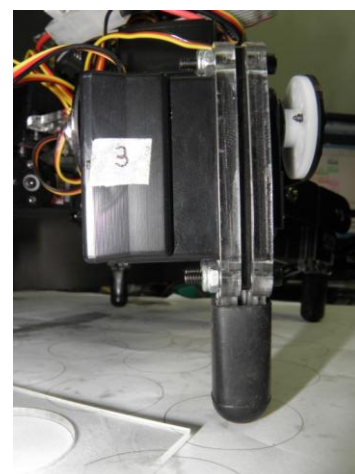


圖 4-14 腳底防滑套

#### 4.4 Windows Embedded 嵌入式作業系統建構

由於本論文之機器人端是透過 Windows Embedded 嵌入式系統建立在單板電腦之上，此處我們採用 Microsoft Windows Embedded Standard 2009 開發工具，利用此 Windows Embedded 模組化依據的特性，加入我們實驗所需的硬體驅動及功能元件。圖 4-15 為一般建立 Windows Embedded 嵌入式系統的流程。

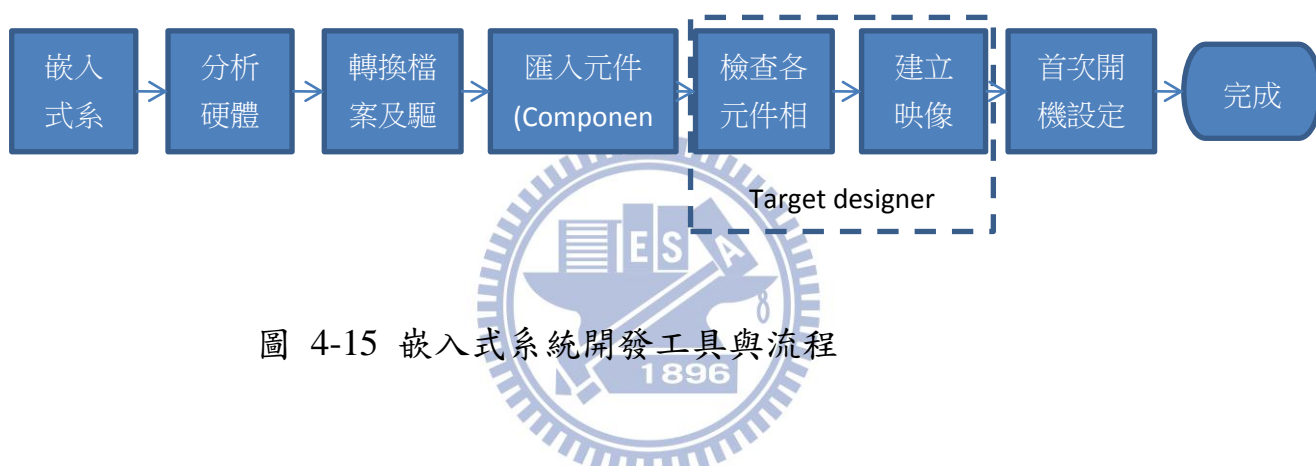


圖 4-15 嵌入式系統開發工具與流程

本文 Windows Embedded 嵌入式系統除了搭配 RoBoard RB-100 單板電腦之外，單板電腦上的儲存裝置使用 microSD 卡模擬成硬碟使用，另外加上了 Edimax EW-7711UTn USB 無線網路卡，綜合以上設備作為本嵌入式系統開發平台之硬體。下面將詳細說明如何建構一個新的 Windows Embedded 作業系統映像檔：

0. 前置工作：開始之前的前置工作在於單板電腦必須有已經安裝好的

Windows 作業系統，是為了後續過程中取得硬體裝置資訊用途。此

Windows 作業系統版本最好是 Windows XP 或是相關衍生分支版本，以避免未來發生相容性問題。在一尚未裝有任何系統的單板電腦 RoBoard

RB-100 上安裝 Windows 作業系統之方法有下列幾種：

- 透過 USB 外接光碟機安裝完整的 Windows XP 作業系統，但必須使用 USB 軟碟機載入驅動程式，並且受限於單板電腦執行效率，此安裝過程將花費 5~6 小時。
- 透過光碟或隨身碟載入 Windows PE (Windows Preinstallation Environment, Windows, 預先安裝環境)，此方式不需安裝過程即可直接進入預先安裝好的 Windows 作業系統，但是自行建置 Windows PE 環境的過程複雜。
- DM&P 原廠提供已製作好給 RoBoard RB-100 用的 Windows Embedded Standard 2009 評估版映像檔，但此映像檔僅包含 RoBoard RB-100 本體之驅動程式及部分基本元件，若直接使用此映像檔做實驗將可能會遇到後續無法加入其他硬體驅動，或安裝軟體時缺少檔案而軟體無法使用的問題。

所以此處將以 DM&P 原廠提供的 Windows Embedded 為基礎，依照本實驗的軟硬體需求再重新製作適合的 Windows Embedded 環境。

1. 取得目標裝置上的個別硬體裝置資訊（此處目標裝置即是指本論文所使用的 RoBoard RB-100 單板電腦）：在 Microsoft Windows Embedded Standard 2009 開發環境工具組中附有公用程式 Target Analyzer（Tap.exe），將此程式複製至已經裝有 Windows 作業系統的單板電腦 RoBoard RB-100 上執行此公用程式，可容易取得目標硬體分析檔.pmq 檔案，該檔案記載著目標裝置的硬體資訊，因此執行此步驟前最好將預計使用的各項硬體裝置皆接在單板電腦上以取得完整硬體資訊，所以此步驟我們就把 USB 無線網路卡接上，以令網路卡硬體被正確辨識。

2. 加入元件：回到 Windows Embedded 開發環境中使用 Component Designer 中將上一步驟取得的 pmq 裝置分析檔匯入，轉換成.sld 檔，再開啟 Component Design Manager 匯入.sld 檔及所需驅動程式檔案成為系統元件，之後便可使用 Target designer 加入或移除各種裝置或軟體元件。由於我們已經匯入了前一步驟取得的 pmq 檔案，因此目標裝置所需要的驅動及相關元件都已被預設選取加入，例如網路卡驅動以及網路通訊協定，此外還可以依照需求加入其他元件，例如：遠端桌面連線、繁體中文作業環境.....等元件。但必須注意加入元件數量過多時將會拖慢單板電腦的執行效能，因此如何選擇要加入的額外元件必須依賴測試經驗以及視需求而定。



3. 相依性檢查：使用 Independent Check 檢查工具，此過程系統會檢測目前已經加入的元件作相依性分析，若出現錯誤則表示有某些元件是已加入的元件所需要，但在上一步驟遺漏而並未加入的。必須更正所有發現的錯誤才得以繼續下一步。
4. 建立並部署系統映像(Image): 執行 build 將建立 Windows Embedded Image，圖 4-16 為建立完成的系統映像檔，然後將此映像檔部署至目標裝置上。由於本論文所使用的 RoBoard RB-100 單板電腦是以 microSD 記憶卡模擬為硬碟使用，因此將此處建立之 Windows Embedded 系統映像複製至 microSD 卡，再移至 RoBoard RB-100 開機。首次開機需要等待 First Boot Agent (FBA)組織系統環境，等待 FBA 完成重新啟動單板電腦，Windows Embedded 系統便建立完成。

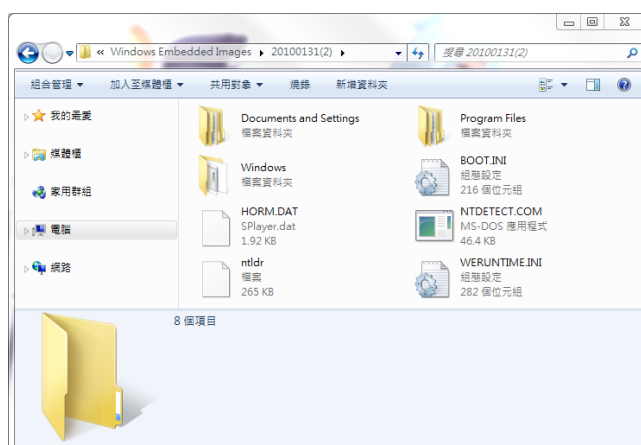


圖 4-16 建立完成之目標裝置系統映像檔

5. 除錯：若操作 Windows Embedded 系統之過程中仍出現缺少檔案錯誤，則必須思考或查詢所缺少之檔案與元件之關係，然後重新執行 2~4 步，補齊所缺的元件。

#### 4.5 視覺辨識系統說明

由 4.1.1 節的模擬實驗，已初步了解到視覺辨識在本實驗的可行性與辨識過程中將會遇到的問題。實驗驗證利用顏色組合設計出特殊的地形河石踏點，藉由顏色辨識與分群，我們可以很快的得到踏點位置座標與高度。

本論文採用的影像擷取裝置為 USB 傳輸介面，與主控端桌上型電腦相連接，視覺辨識系統所使用的影像擷取裝置為羅技 130 萬像素網路攝影機 C300，連接在主控端桌上型電腦主機，擷取影像的解析度設為 320x240。因為影像擷取裝置連接在主控端電腦，所以 RoboRealm 視覺辨識程式亦由主控端電腦執行。由於視覺辨識系統的影像擷取裝置座標是以像素為單位，因此必須把座標數據轉換成實際長度(以公分為單位)，才能搭配本實驗室所開發之動作產生程式。視覺辨識程式流程如下圖 4-17，其中流程圖左側標示代表在 RoboRealm 中所使用的處理函數模組名稱。

RoboRealm 視覺辨識程式內容說明如下：

1. RoboRealm 程式啟動時自影像擷取裝置取得地形完整拍攝畫面，為了分辨出可踩踏的河石圓盤，使用 RGBFilter 將紅色與藍色過濾出來，由於拍攝畫面易受光線影響，此處過濾的閾值參數由經驗法選擇。然後對影像作侵蝕(Erode)與平滑處理(Smooth Hull)以消除雜訊幫助判斷。

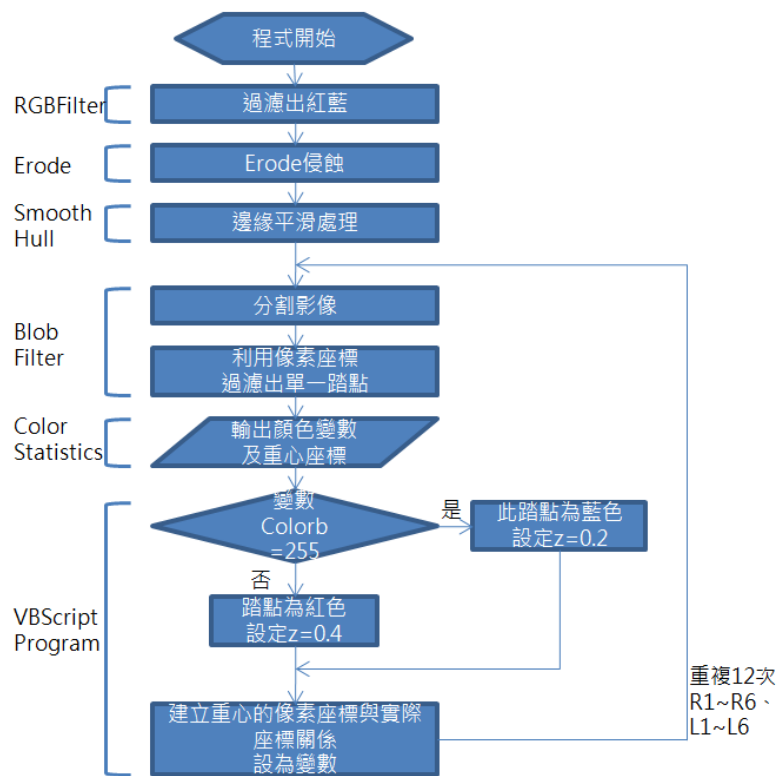


圖 4-17 RoboRealm 視覺辨識程式流程與指令對照

2. 使用 Blob Filter 模組，此模組除了 Blob 影像分割群組的功能之外，亦包含各種過濾功能：顏色、兩點距離、位置、尺寸、形狀等過濾方式，本實驗在此使用位置(Location)座標過濾，依照靠左側或右側及重心之 y 座標落點，

自 12 個踏點中過濾出單一獨立的踏點，以便分析資訊。

3.透過 Color Statistics 可以產生影像與色彩相關的各項變數統計資料，並以 RGB 分別表示，例如最多的顏色或某顏色的值，這些變數可以在後續被使用。

4.用 VBScript 模組做位置與高度之判斷轉換：RoboRealm 可以用 VBScript 語法撰寫程式以便對各項參數做計算或判斷，本程式實作在此處進行了兩樣判斷：

● 判斷高度：以自 Color Statistics 取得的 Colorb 變數判斷，若值為 255 即代表此踏點為藍色，令其高度變數  $z$  為 0.2，代表厚度 0.2cm 的壓克力河石踏點；反之則為紅色，設定高度變數  $z=0.4$ 。

● 座標轉換：由於本實驗所用之河石地形基板與影像擷取裝置位置固定，且河石踏點間距為已知，所以此處 VBScript 程式使用落點區間判斷方式，可避免影像誤差並簡化計算數據。落點區間判斷表示若重心座標變數 COG\_X、COG\_Y 的值落在某範圍區間內即判定對應實際座標長度之值，例如當 COG\_X 的像素座標值介於 125-160 之間，就表示此點的實際座標  $X=4(\text{cm})$ ，我們定義隨機河石地形的座標如圖 4-18，則當視覺辨識時像素座標落點與實際座標對應如下表 4.3。

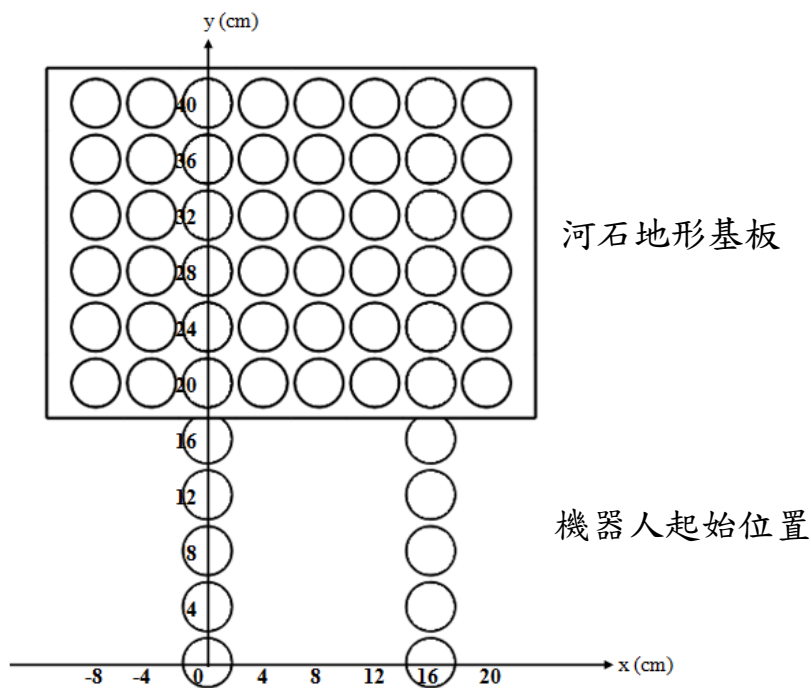


圖 4-18 隨機河石地形的實際座標定義

表 4.3 河石地形像素座標落點與實際座標對應  
(不包含機器人起始位置)

X 像素座標	X 實際座標(cm)	Y 像素座標	Y 實際座標(cm)
0-50	-8	0-45	20
50-90	-4	45-80	24
90-125	0	80-115	28
125-160	4	115-150	32
160-200	8	150-185	36
200-235	12	185-225	40
235-270	16		
270-310	20		

5. 重複以上 2~4 步驟，依序分別判斷出共 12 個河石踏點的實際座標，分別令左半為  $L_{nx}$ 、 $L_{ny}$ 、 $L_{nz}$ ；右半為  $R_{nx}$ 、 $R_{ny}$ 、 $R_{nz}$  ( $n=1\sim 6$ ) 共 36 個值，

至此視覺辨識系統已透過影像裝置及 RoboRealm 視覺處理取得河石踏點的實際座標資料。

取得河石踏點的實際座標資料後，除了可以將變數儲存成檔案之外，更可以利用 RoboRealm 中提供的 API Server，如圖 4-19，讓使用者在使用其他程式語言撰寫程式時可以接收 RoboRealm 提供的影像資料，因此本實驗開啟了 API Server 的功能，讓 MATLAB 可以直接讀取到 RoboRealm 的變數資料，進一步省去人工操作的步驟。

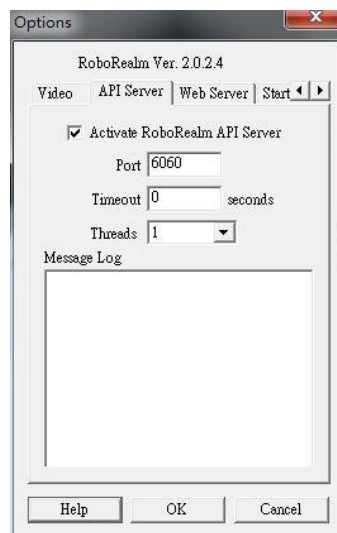


圖 4-19 開啟 RoboRealm 中的 API Server

#### 4.6 機器人行走路徑規畫動作產生程式說明

本研究所使用的路徑規畫動作產生程式源自於本實驗室過去開發之動作理論與技術，該理論使用 MATLAB 為程式開發環境，將 ANFIS 演算法應用於四足機器人實驗模組 NC-F4-09，同時此路徑規畫動作產生程式擁有 GUI

圖形介面得以點選河石踏點座標並自動產生步伐規劃，但此動作產生程式仍需先手動鍵入各踏點高度之矩陣。本論文便是為了改良上述的不便，改以視覺辨識的方式取得地形資料，免去人工輸入的繁雜過程。

#### 4.6.1 將視覺辨識數據導入路徑規畫動作產生程式

在前述 4.5 節中，我們已經利用視覺辨識系統取得地形的高度、座標資訊，並把這些資訊在 RoboRealm 中以變數的形式存在著。本論文為了要將取得的數據與路徑規畫動作產生程式結合，則必須修改此動作產生程式的 MATLAB 程式碼，去除原本使用的手動鍵入加 GUI 點選踏點位置的輸入方式，改使用 RoboRealm 所提供的 API Server 與 MATLAB 的 MEX (Matlab EXternal interface) 功能 [18]，把兩者整合起來，讓我們能直接從 MATLAB 透過 `get_variables` 函數將 RoboRealm 的各座標變數讀入 MATLAB 中。另外由於實驗的四足機器人是從起始位置走過河石地形，而實驗設定的機器人起始位置皆為固定，因此我們在 MATLAB 中把起始位置的實際座標直接加入設定變數中。

#### 4.6.2 讀入變數轉為座標矩陣

直接從 RoboRealm 讀入的變數會以字串(string variables)格式儲存，因此需要先用 `eval` 函數把字串轉換並合併為 2 組  $1 \times 33$  矩陣；再用 `reshape` 函數分別把 2 組矩陣重新安排成 2 組  $3 \times 11$  的矩陣，這 2 組矩陣代表左半側與右半側

踏點座標，用以符合此動作產生程式原始計算格式。此處以下圖之隨機河石地形為例：圖 4-20 為影像擷取裝置拍攝到的地形影像，經 RoboRealm 視覺辨識座標並導入 MATLAB 中轉換成矩陣的結果如圖 4-21。

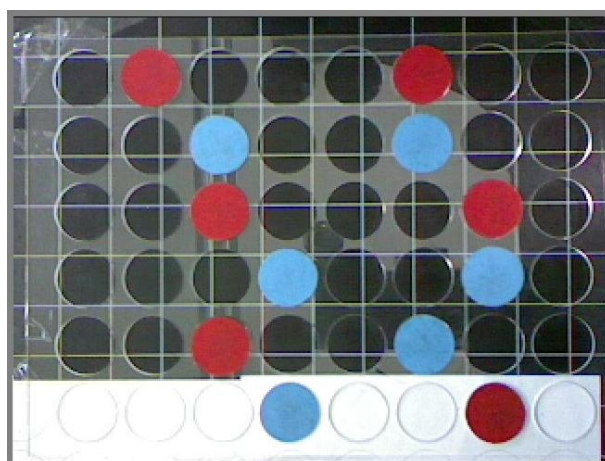


圖 4-20 隨機河石地形範例

L =			R =			
x	y	z	x	y	z	
0	0	0	16.0000	0	0	機器人
0	4.0000	0	16.0000	4.0000	0	起始位置
0	8.0000	0	16.0000	8.0000	0	
0	12.0000	0	16.0000	12.0000	0	
0	16.0000	0	16.0000	16.0000	0	
4.0000	20.0000	0.2000	16.0000	20.0000	0.4000	欲跨越之 河石地形
0	24.0000	0.4000	12.0000	24.0000	0.2000	
4.0000	28.0000	0.2000	16.0000	28.0000	0.2000	
0	32.0000	0.4000	16.0000	32.0000	0.4000	
0	36.0000	0.2000	12.0000	36.0000	0.2000	
-4.0000	40.0000	0.4000	12.0000	40.0000	0.4000	

圖 4-21 動作產生程式讀入座標轉換矩陣後輸出結果





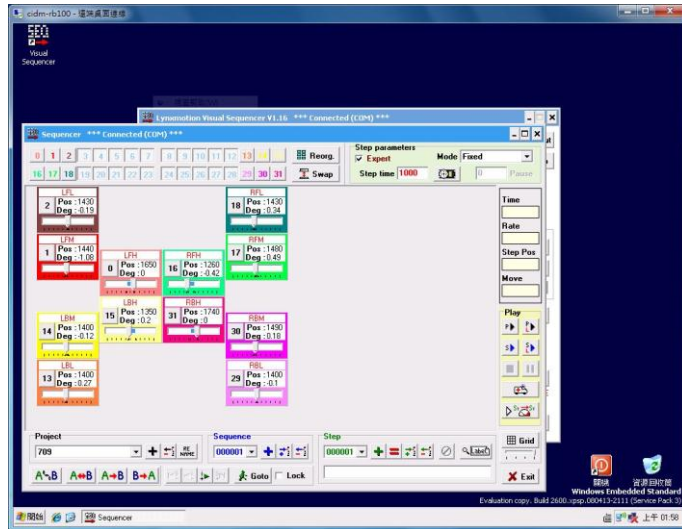


圖 4-23 遠端遙控機器人之 Windows Embedded 系統

實驗地形分為簡單與複雜地形兩個階段，分別為直線非平坦地形與隨機非平坦地形。圖 4-24 為機器人 NC-F4-2010 行進方向示意圖，四足機器人由固定的起始位置出發，踏著河石沿計算好的步伐前進，直到行走到河石地形盡頭停止，河石地形基板上的踏點可以隨意擺放，但每步都必須有踏點。

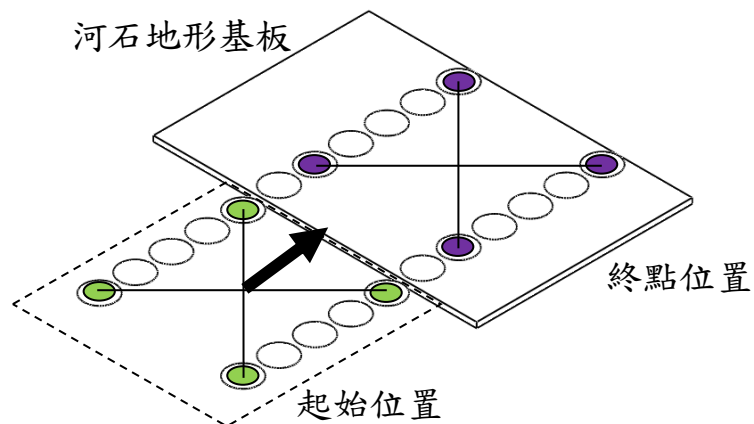


圖 4-24 機器人行進方向示意圖

#### 4.7.1 直線非平坦地形行走實驗

直線非平坦地形的河石踏點位置保持與起始位置為一直線，屬於較為簡單的地形，僅有河石踏點高度具有隨機變化，圖 4-25 為本次實驗的直線非平坦地形範例。

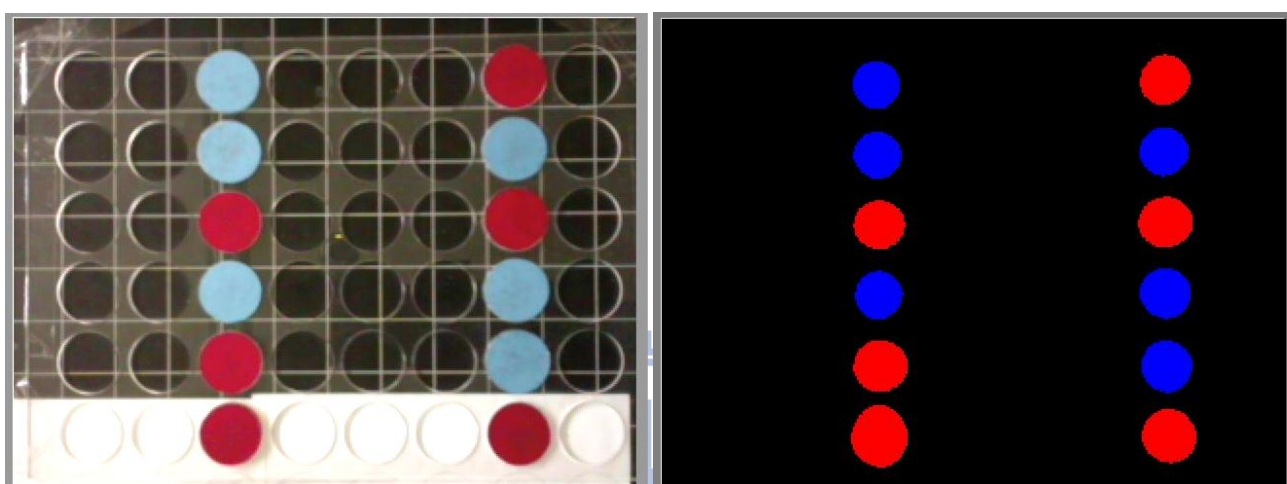


圖 4-25 直線非平坦地形(僅河石地形基板部分)

左：影像裝置擷取之影像 右：視覺辨識過程擷取之影像

由於實驗地形具有高度變化，因此若機器人在行進動作中足部軌跡的抬腳不夠高時，會造成跨步中與河石踏點碰撞的問題，對此，我們在動作產生程式中設定機器人 NC-F4-2010 機身高度距離河石踏點 10cm、抬腳高度 2cm、重心偏移距離 1cm 以避免這個問題。四足機器人 NC-F4-2010 跨越直線非平坦地形實驗得到的完整步態結果為圖 4-26、4-27。

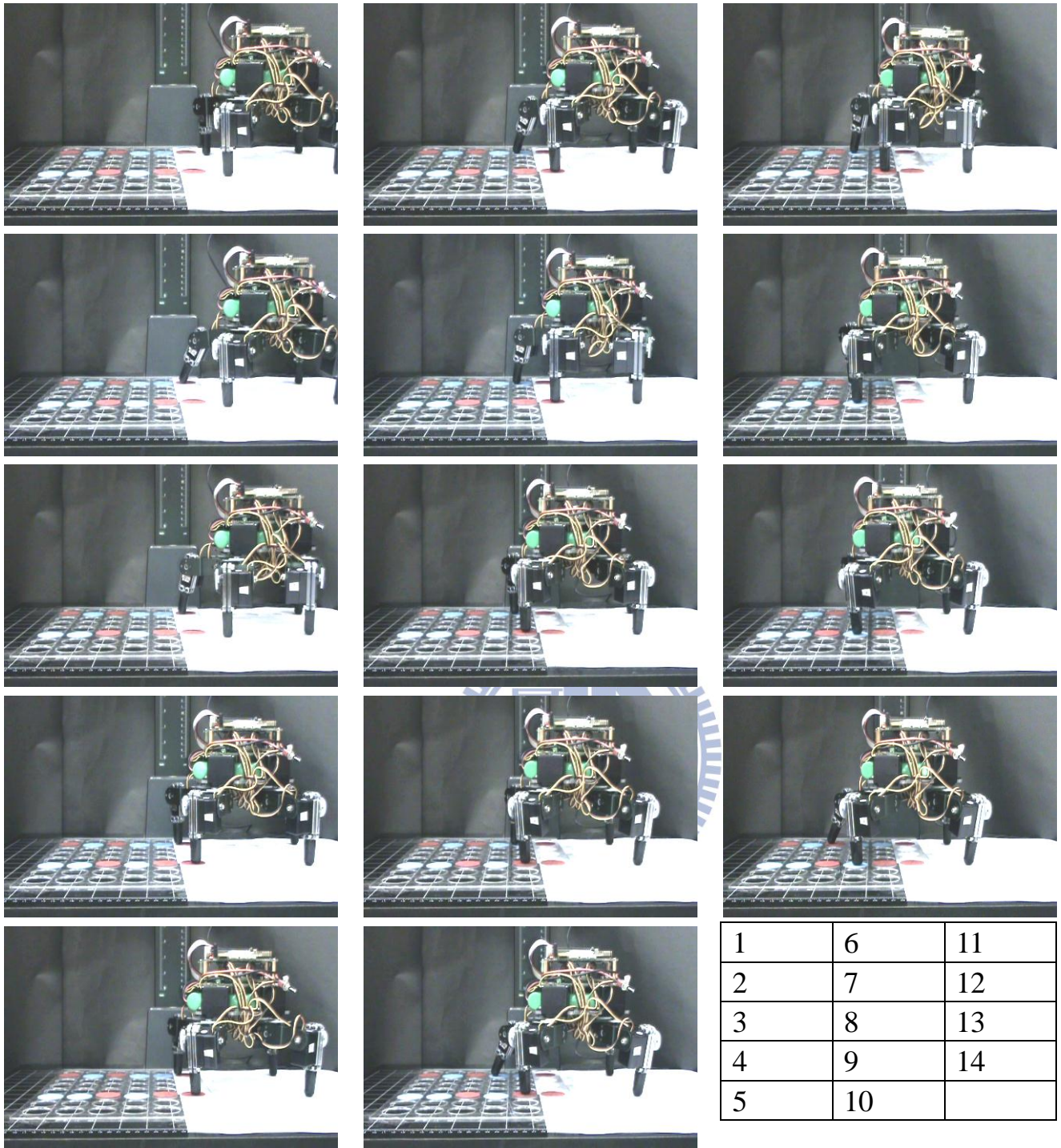
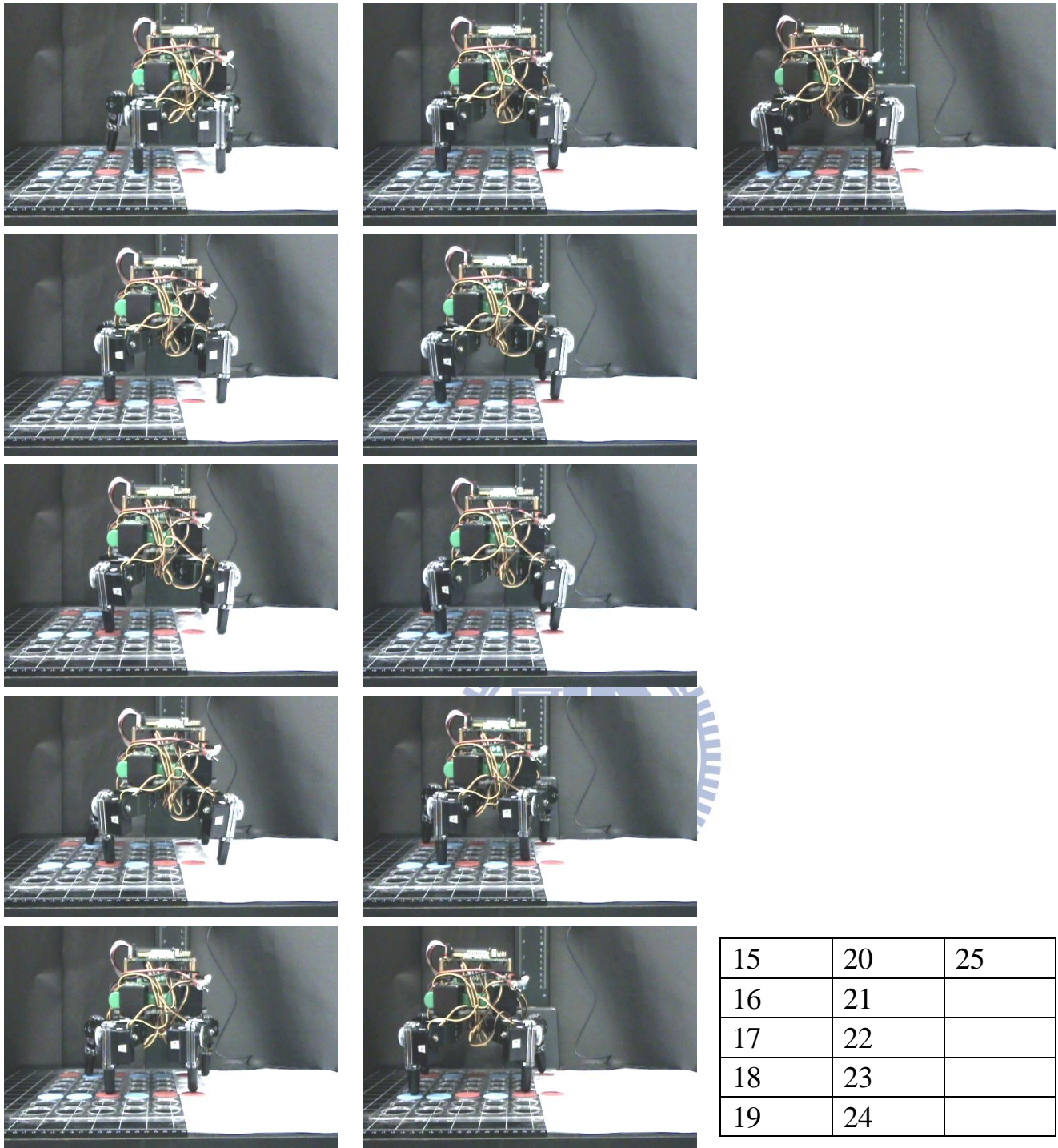


圖 4-26 直線非平坦地形實際行走完整步態(1)



15	20	25
16	21	
17	22	
18	23	
19	24	

圖 4-27 直線非平坦地形實際行走完整步態(2)

當動作循環次數增加時，動作產生的誤差會不斷累積，使得踩踏位置會逐漸偏離的踏點的中心位置，但在本實驗中，誤差仍在可容許的範圍，能完整走完所設計的地形而未踩空。

#### 4.7.2 隨機非平坦地形行走實驗

圖 4-28 的隨機非平坦地形為本研究的最終目標地形，河石踏點位於隨機方向且不同高度，同樣的此地形經視覺辨識地形資料後，經由路徑規畫動作產生程式產生跨越路徑步態。在此種地形下，動作產生程式所計算出的四足機器人步態姿勢會有較大的動作變化，照理說重心偏移的距離也應該要隨之增加以避免傾倒，但是當偏移量過大時也會讓機器人腳部伸長的外側最大範圍變小，故此實驗仍維持重心偏移量保持預設的 1cm。

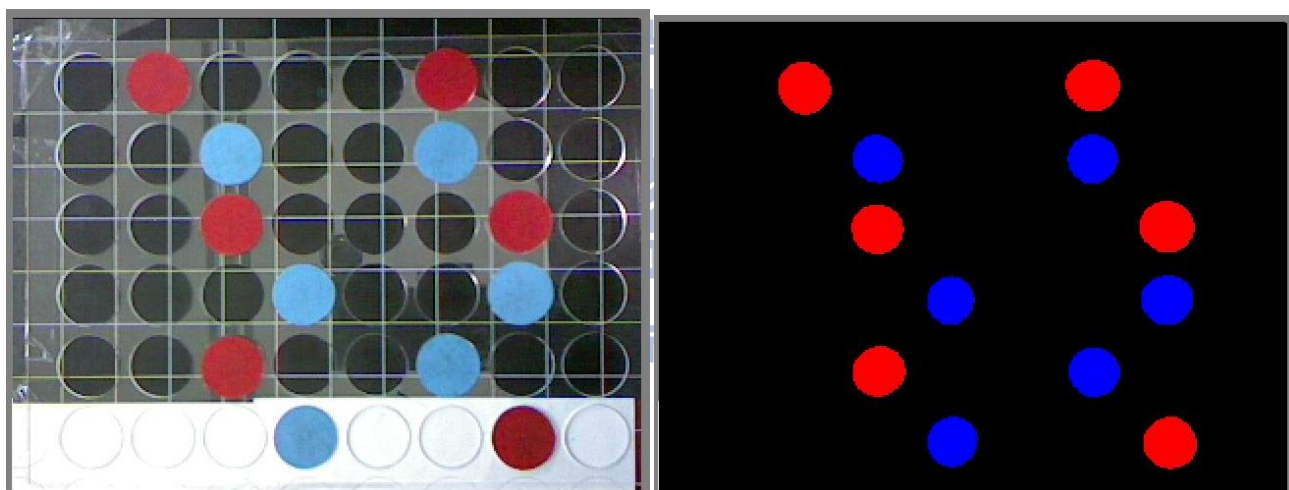
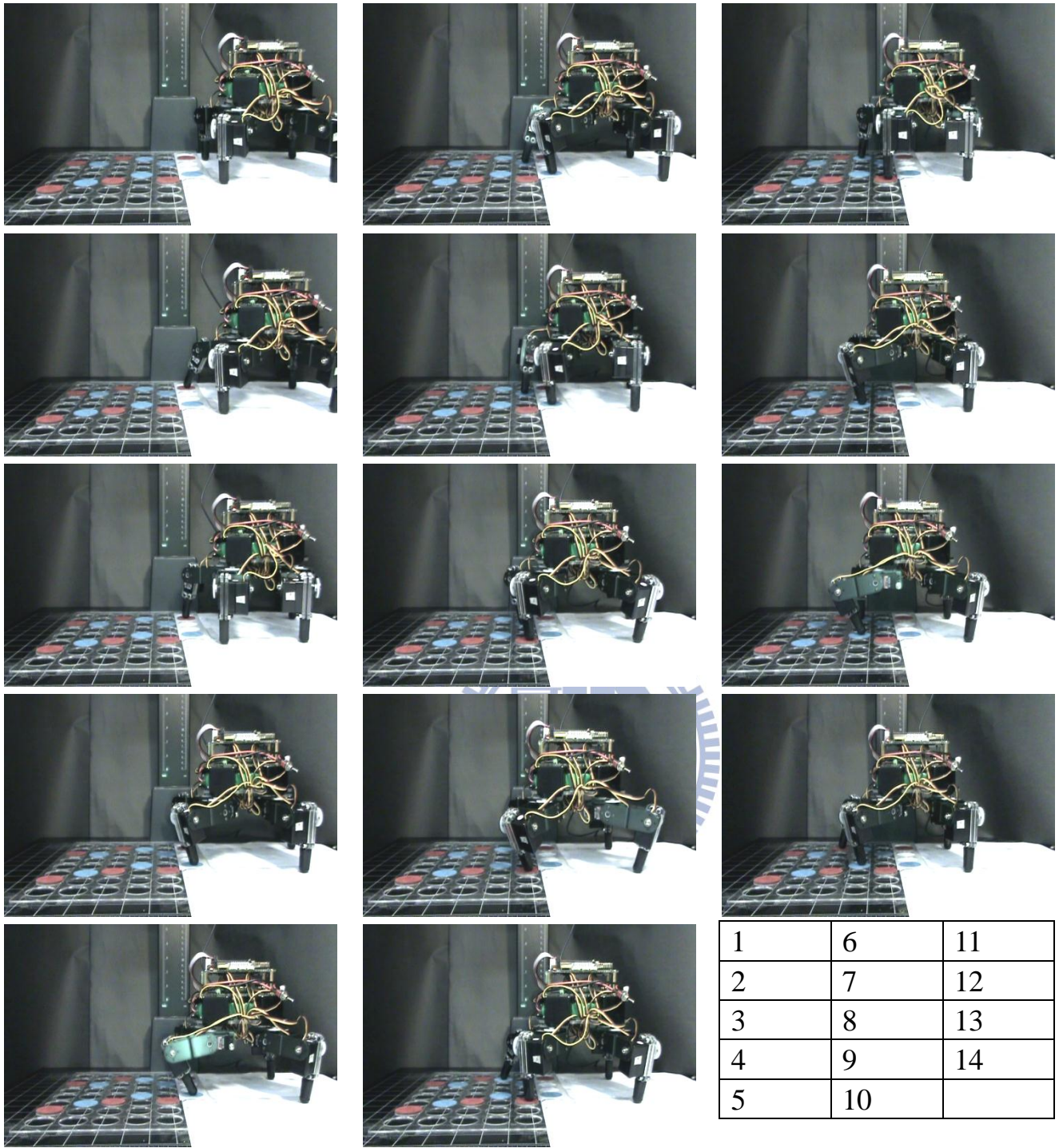


圖 4-28 隨機非平坦地形(僅河石地形基板部分)

左：影像裝置擷取之影像

右：視覺辨識過程擷取之影像

實驗結果如圖 4-29、4-30，可以看出即使河石踏點位置與踏點高度皆為隨機的情況下，本論文所規劃的新型四足機器人 NC-F4-2010 系統仍能完整的跨越此地形，重心偏移量 1cm 仍能維持行走時的穩定而不會傾倒。



1	6	11
2	7	12
3	8	13
4	9	14
5	10	

圖 4-29 隨機非平坦地形實際行走完整步態(1)

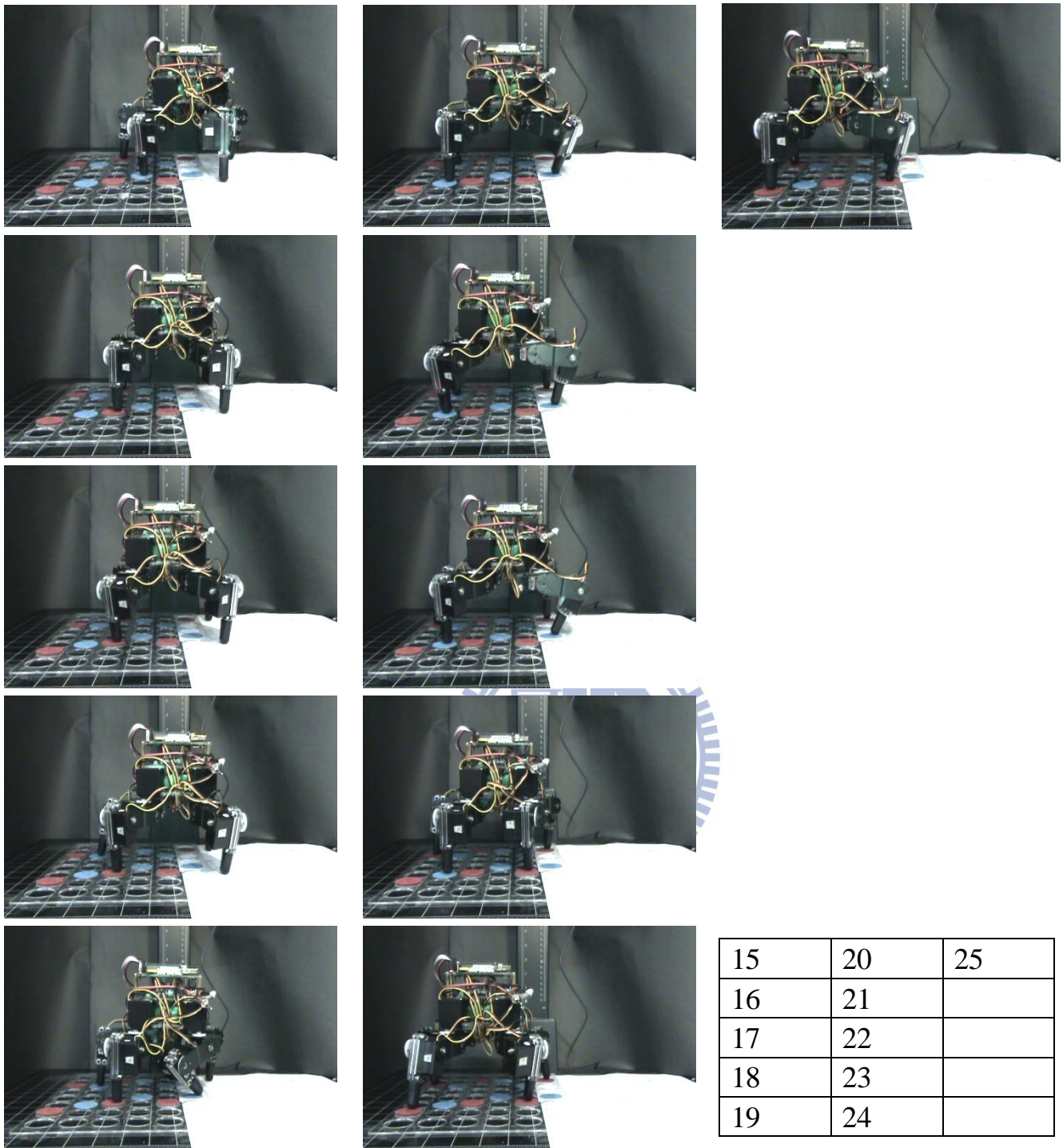


圖 4-30 隨機非平坦地形實際行走完整步態(2)



## 五、 結論與未來方向

### 5.1 結論

本實驗室一直以來不斷持續投入機器人之研究與實際應用，過去所開發之四足機器人不僅具備高度的地形適應能力、輕量化的機身及靈敏的動作能力，在人工智慧計算的路徑規劃與控制動作產生方面亦有相當程度的發展。但步行機器人在未知地形的探索方面仍然處於發展階段，其中使用視覺辨識的方式辨識地形資料與其他感測器比較之下，具有感測範圍較大的優勢。

本研究已完成四足機器人跨越隨機河石地形研究的主軸，在於結合視覺模組的影像擷取功能，建立影像視覺辨識系統探測地形座標資料的能力；整合單板電腦與新型四足機器人 NC-F4-2010，取代以往的單晶片控制架構，並為單板電腦開發一套嵌入式系統作為無線遙控與執行動作控制的開發平台，讓機器人不受纜線限制移動範圍；最後結合實驗室所發展的快速規劃跨越隨機河石地形的路徑規劃動作產生程式理論，整合伺服機控制智能型行動步態規劃技術，實作一套能夠達成本研究跨越隨機河石地形目標的自主式四足機器人系統，並經由跨越不同河石地形的實驗驗證設計之可行性。目前本研究完成之成果，可歸納為下列幾項重點：

## (1) 使用影像式視覺辨識探測地形座標資料

本研究發展出一套視覺辨識系統流程與程式架構，可以使用影像擷取裝置拍攝具特殊色彩設計之地面河石地形影像，將地面之隨機地形影像資料經程式分析、辨識可供機器人踩踏的河石踏點並判斷踏點重心在影像中的座標，再轉化為機器人工作空間平面座標系上的實際長度座標資料。相較於前一代四足機器人系統仍必須使用人工方式輸入地形座標資料矩陣，本研究新增的使用影像式視覺辨識探測地形座標資料，可省去人工方式輸入之不便，也提升了新型機器人系統之自主能力。

## (2) 實作新型四足機器人並整合單板電腦

本研究已重新製作一套新型四足機器人 NC-F4-2010，此新型機器人的四足機構以實驗室過去所發展的四足機器人 NC-F4-09 為基礎，但新型機器人改以 DM&P 嵌入式單板電腦 RoBoard RB-100 作為執行動作控制之電腦，以取代 NC-F4-09 所使用的單晶片，或以 RS232 纜線連接桌上型電腦的控制方式。單板電腦不僅運算能力較單晶片優秀許多，也具備獨立自主運作的能力，在擴充能力上，更可以加入各種周邊裝置以增加其功能。在本研究中便為單板電腦加上了 USB 無線網路卡，透過無線訊號傳輸，使得使用者可以無需連接纜線，便從能遙控單板電腦上之作業系統，取代如螢幕、滑鼠或鍵盤等有線的輸出輸入裝置，使得機器人整個操作控制過程不受纜線長度範圍限制。

### (3) 建立嵌入式作業系統實驗平台

使用 Microsoft Windows Embedded Standard 2009 開發環境套件，在單板電腦 RoBoard RB-100 的硬體裝置基礎上，建立一套專用的 Windows Embedded 嵌入式系統，不僅能支援本實驗所需之各項裝置，精簡後的 Windows Embedded 嵌入式系統比起完整 Windows XP 更節省系統資源與儲存空間，但又保有程式運作執行的相容性。過去原本在桌上型個人電腦中使用的 Visual Sequencer 機器人控制軟體與程式也能直接移植至單板電腦上運行，減少機器人控制程式開發之負擔，同時系統整合了遠端桌面與網路元件作為無線遙控的基礎。從長遠的角度來看，本次建立 Windows Embedded 系統實驗平台所擁有的軟硬體彈性擴充能力也為未來加入更多功能奠定了基礎。

### (4) 整合動作產生程式理論

配合實驗室以前所發展之人工智慧動作產生程式理論，本論文將視覺辨識與動作產生程式結合，透過 API server 與 MEX 介面將視覺辨識取得的地形數據導入程式中，無須人工輸入地形座標，並能把座標數據轉換成矩陣運算，讓動作產生程式的人工智慧得以推算出四足機器人行走跨步時每個關節的伺服馬達輸出角度。

## (5) 具備無線遙控自主跨越隨機地形的能力

動作檔案可以經由無線傳輸至單板電腦上的伺服機控制軟體中，轉換為具體實用之伺服機運動控制，成為機器人之連續行走動作。由實際運行的測試實驗，可以看出四足機器人 NC-F4-2010 正確的按照河石踏點步伐前進，表示從視覺辨識→動作計算產生→運動控制三大環節皆可正確運作，使機器人能達成跨越隨機河石地形的行走之目標。

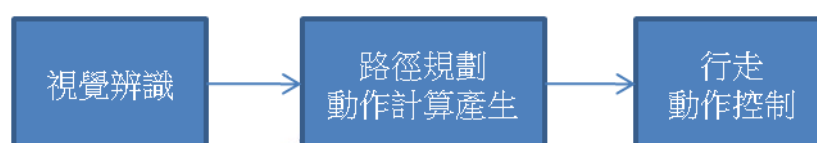


圖 5-1 本論文流程三大環節

## 5.2 未來目標

本研究的目標為自主式四足機器人，目前的研究成果已將感測地形、路徑規劃、動作產生以及運動控制等複雜計算交由人工智慧計算及程式軟體執行，僅有少部分檔案傳輸、匯入動作需要人工操作。長程的未來方向除了研究四足機器人穿越更複雜的隨機地形之外，還規劃將程式和控制系統做更緊密的整合，讓整體機器人系統達到完全自主動作不需要人工操作的目標。

此外並計畫加入其他種類的感測器同時使用，像是在機器人腳底加上觸覺壓力感測器，或者是使用紅外線、超音波距離感測器探索環境，可以彌補

視覺辨識易受光線影響且只有二維座標之不足，並能強化機器人探測複雜的未知地形狀況的能力，例如走在更複雜的地形起伏高度變化或跨越各種障礙，讓機器人能應用在更多場合。同時，加入人工智慧運算步態及河石踏點的選擇亦將會是未來研究的方向之一。研究成果將可應用於其他有關隨機地形為基礎的各種多足機器人工作控制系統。



## 參考文獻

- [1] Belén Curto , Vidal Moreno , and Francisco J. Blanco , "A General Method for C-Space Evaluation and its Application to Articulated Robots," IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol. 18, pp. 24-31, Feb 2002.
- [2] Tim Bretl , Sanjay Lall , Jean-Claude Latombe , and Stephen Rock , "Multi-Step Motion Planning for Free-Climbing Robots," Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, pp. 217--232, 2004.
- [3] Tim Bretl, "Motion planning of multi-limbed robots subject to equilibrium constraints: The free-climbing robot problem," International Journal of Robotics Research, vol. 25, no. 4, 2006.
- [4] 鄭璧瑩、林建堯，「自主型四足機器人跨越河石地形的路徑規劃」，第十屆全國機構與機器設計學術研討會，2007年。
- [5] Christophe Grand , Faiz Benamar , Frédéric Plumet , and Philippe Bidaud , "Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot," International journal of robotics research, vol. 23, pp. 1041-1058, Oct-Nov 2004.
- [6] M. Anthony Lewis , Hyo-Kyung Lee , and Aftab Patla , "Foot Placement Selection Using Non-geometric Visual Properties," International journal of robotics research, vol. 24, pp. 553-561, Jul 2005.
- [7] 陳柏琮，「智慧型機器人之五子棋、象棋及西洋棋對奕影像辨識技術」，機械工程系，國立台灣科技大學，2006年。

- [8] M. Vukobratovic , B. Borovac , D. Surla , and D. Stokic , Biped Locomotion, Springer-Verlag, 1990.
- [9] 機器人大寶，ZMP 零力矩點 Zero Moment Point，2007 年。  
[http://cilab.csie.ncu.edu.tw/mt/tab0/archives/2007/05/zmp\\_ece\\_zero\\_mo\\_1.html](http://cilab.csie.ncu.edu.tw/mt/tab0/archives/2007/05/zmp_ece_zero_mo_1.html)
- [10] RoboRealm, <http://www.roborealm.com/>
- [11] 瞻營全電子有限公司 DMP ELECTRONIC, <http://www.dmp.com.tw/>
- [12] Lynxmotion Robot Kit, <http://www.lynxmotion.com/>
- [13] 鄭璧瑩、陳亮瑜，「應用於非連續河石地形四足機器人的創新設計與實作」，第十二屆機構與機器設計學術研討會論文集，2009 年。
- [14] Microsoft. Windows Embedded Standard 2009 概觀，  
<http://www.microsoft.com/windowseembedded/zh-tw/products/westandard/default.aspx>
- [15] 鄭璧瑩、曾俊融，「ANFIS 應用於四足機器人跨越非連續河石地形路徑規劃之研究」，中國機械工程學會第二十六屆全國學術研討會論文集，2009 年。
- [16] 鄭璧瑩，視覺整合機器人系統設計備忘錄 2010，國立交通大學，CIDM Lab.，2010 年。

- [17] HITEC RCD, <http://www.hitecrcd.com/>
- [18] Steven. (2009, Feb.) RoboRealm Matlab Mex Integration.  
<http://www.mathworks.de>
- [19] LUNG-WEN TSAI, ROBOT ANALYSIS - The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, JOHN WILEY & SONS, INC., 1999.
- [20] 巫憲欣, 「以系統晶片發展具機器視覺之機械手臂運動控制」, 國立台灣科技大學, 碩士論文, 2006 年。
- [21] 張峻華、楊劭文、王傑智, 「行動型機器人的環境感知」, 財團法人精密機械研究發展中心 機器人世界情報網, 2009 年。  
[http://www.robotworld.org.tw/index.htm?pid=10&News\\_ID=3413](http://www.robotworld.org.tw/index.htm?pid=10&News_ID=3413)
- [22] Sara Morgan 著, Microsoft Robotics Studio 程式開發, 康仕仲等譯, 悅知文化, 2008 年。
- [23] 褚文和、陳義誠、陳啟成、林建成, 「Windows XP 嵌入式診斷系統製作」, 中華民國第十四屆車輛工程學術研討會論文集, 台灣雲林, 2009 年。
- [24] 鄭璧瑩、黃仲緣, 「智能型舞伴機器人平台與舞步規劃系統之研究」, 中國機械工程學會第二十六屆全國學術研討會論文集, 2009 年。



- [25] Joaquin Estremera and Pablo Gonzalez de Santos , "Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain," IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 6, pp. 1067-1076, DECEMBER 2005.
- [26] Jung-Min Yang , "Two-phase discontinuous gaits for quadruped walking machines," Robotics and Autonomous Systems, vol. 59, pp. 728-737, Sep. 2008.
- [27] 賴一翔，「具搜尋與避障之自動跟隨機器人」，電機工程學系，國立中央大學，碩士論文，2009 年。
- [28] 林岱峯，「具影像測距之二足步行機器人」，電機工程學系，國立台灣科技大學，碩士論文，2007 年。
- [29] 柳高陵，「以視覺為基礎之小型人形機器人階梯步行」，電機工程學系，國立臺灣科技大學，碩士論文，2006 年。
- [30] 王志浩，「以 RFID 定位的室內機器人管理系統」，資訊工程學系，南台科技大學，碩士論文，2009 年。
- [31] 許孝友，「具視覺與遠端監控之自主式機器人」，機械工程學系，大同大學，碩士論文，2007 年。
- [32] 李匯宗，「設計與實作一輛具無線傳輸能力之多功能自走車」，資訊工程

學系，國立中央大學，碩士論文，2008 年。

