

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

應用於非連續河石地形四足機器人的創新設計與實作

Innovative Design and Implementation of Quadruped Robot

Applying on Discontinuous River-stone Terrain

研究生：陳亮瑜

指導教授：鄭璧瑩 博士

中華民國九十八年七月

應用於非連續河石地形四足機器人的創新設計與實作
Innovative Design and Implementation of Quadruped Robot
Applying on Discontinuous River-stone Terrain

研究生：陳亮瑜

Student : Liang-Yu Chen

指導教授：鄭璧瑩 博士

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 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

應用於非連續河石地形四足機器人的創新設計與實作

學生：陳亮瑜

指導教授：鄭璧瑩 博士

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘 要

本研究針對非連續河石地形，設計輕量化、跨步靈巧的四足機器人，透過本研究規劃的平衡步驟，與足部摩擦的調整，完成可用單晶片嵌入式系統控制的跨越河石地形的足部規劃與實作平台，可提供自行訓練或擴增智能型地形偵查定位與跨步理論（例：ANFIS）的附加程式功能，逐步加強與增進四足機器人（NC-F4-09）跨越河石地形的功效。

隨著近代機器人的發展，開始走入生活之中，故接下來機器人設計所將面對，是越來越複雜的地形條件。本研究旨在發展具備高度地形適應能力之四足機器人，在兼顧機動性的前提下，適應廣泛的地面複雜度。

研究中先訂定快速動作、高地形適應性與輕量化為目標，分析先前開發之四足機器人（Quadruped Robot）NCTU-CIDM-F4-2005，運用 TRIZ 理論推導，提出新的四足機器人之設計架構，並對控制系統之架構與動作流程進行規劃。依據提出之設計架構，以 CAD 軟體 Solidworks 進行虛擬模型干涉檢查與零件強度分析，並尋找較佳的機器人工作空間配置。另對於

機器人行走動作規劃，透過地形資料座標化，應用反向運動學配合 ZMP 理論，建立機器人穿越非連續複雜地形的移動規則。

接著將所完成之設計結果，建立以單晶片 Basic Atom 為處理核心，致動器為伺服馬達之四足機器人原型，運用先前所規劃之跨越非連續地形移動規則所發展之路徑產生程式，對此四足機器人之非連續地形行走能力進行測試，經由穿越隨機產生之非連續非平坦地形，證明此研究所推導之設計架構，能夠滿足本四足機器人平台設計之目標。



關鍵字：四足機器人、萃思 (TRIZ)、機構設計、結構分析、河石地形

Innovative Design and Implementation of Quadruped Robot Applying on Discontinuous River-stone Terrain

Student : Liang-Yu Chen

Advisors : Dr. Pi-Ying Cheng

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

With the development of modern robots, they are involved in people's daily life. There is no doubt that more and more complex terrain conditions will be the most important challenge to be dealt with. The main target of this study is trying to develop a quadruped robot with wide range of terrain adaptability, and also high mobility.

In this study, we have set fast movement, wide range of terrain adaptability and light weight as our design goals. Through analyze our previous quadruped robot---NCTU-CIDM-F4-2005, we got new hints for design with TRIZ theory. The design hint will use in quadruped robot structure, control system structure and motion planning process. To establish an effective design of robot structure, a virtual robot has been use in structure adjustment and motion simulation. That is to avoid interference problems and optimize working space. And for path generation, by setup a coordinate on the terrain, here we use inverse kinematics and ZMP theory to build a system, which will be used to guide quadruped robot over through discontinuous terrain.

Follow-up with the above design results, a test prototype of quadruped robot was established with servo motor and Basic Atom processor. With the path generating system for discontinuous terrain, the terrain adaptability of this robot would be experimented by random discontinuous terrain test. The result of these test have prove the robot design could achieve our final goal.

Keywords: Quadruped robot, TRIZ, Mechanism Design, Structural Analysis, River-stone Terrain

誌 謝

必須優先感謝的，是我的指導教授 鄭璧瑩博士，在這為期兩年的時光中，老師不但透過參與產學合作案與國科會計畫案，給予我許多學習的機會，在研究方面除了指導進行研究的學術理論外，亦不厭其煩地教導我從事研究時所必需的正面思考與努力不懈等等的態度，讓我有格外充實的碩士班生涯。我想，我從 鄭老師身上學到的，不只是做學問的方法，更是做人處事的原則。

另外，也要感謝電腦整合設計與製造實驗室的所有成員，從學長健寶、皓光、俊宏、奕超、光耀對我在課業與實驗器材的操作上的指導，到同學志元、仲緣、家宏、俊融、岳芳在我研究遇到疑難時提供的許多寶貴意見，對我來說，都將成為未來寶貴的經驗與美好的回憶。

當然不能忘的是我從大學以來的老朋友，國銓、漢嘉、喬方、秉翰，總在身旁給與最大限度的幫忙，真的非常謝謝你們。

最後，我要感謝我的家人，沒有你們的栽培，就沒有今天的我，寸草春暉，此恩此情難以回報。真的要感謝的人實在太多了，對於至今一路走來，幫助過我的所有人，僅在此對各位聊表謝意。

陳亮瑜 謹致

目錄

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	iii
誌 謝.....	iv
目 錄	v
表目錄	viii
圖目錄	ix
一、 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究流程.....	7
1.4 章節架構.....	8
二、 研究方法	10
2.1 研究主題.....	10
2.2 基礎理論.....	10
2.2.1 TRIZ理論	10
2.2.2 動力學理論	16
2.2.3 機器人學座標系轉換理論	25
2.2.4 零力矩點 (ZMP) 定義	28
2.3 軟體介紹.....	30

2.3.1	SolidWorks 2008 繪圖軟體.....	30
2.3.2	Visual Sequencer軟體.....	32
三、	系統與機構設計	36
3.1	規劃流程說明.....	36
3.2	設計推演.....	37
3.3	機械架構說明.....	39
3.3.1	機構設計說明.....	39
3.3.2	機器人單足座標與角度轉換.....	42
3.4	控制規劃說明.....	46
3.4.1	控制架構說明.....	46
3.4.2	動作流程說明.....	47
四、	實驗方法與內容	49
4.1	模擬流程.....	49
4.1.1	建立模型.....	49
4.1.2	機構檢驗.....	54
4.2	機體實作.....	56
4.2.1	伺服馬達規格.....	56
4.2.2	BASIC Atom 28 晶片介紹.....	58
4.2.3	SSC-32 脈波產生器介紹.....	60



4.2.4	伺服馬達測試與微調.....	61
4.2.5	控制系統特性說明.....	62
4.2.6	原型組裝.....	64
4.3	踏步實驗.....	66
4.4	非連續地形設計說明.....	70
4.5	機器人行走路徑產生說明.....	71
4.6	行走實驗.....	76
4.6.1	直線平坦地形行走測試.....	76
4.6.2	直線非平坦地形行走測試.....	80
4.6.3	非連續平坦地形行走測試.....	84
4.6.4	非連續非平坦地形行走測試.....	90
五、	結論與未來方向.....	97
	參考文獻.....	100
附錄A	壓克力參數.....	102

表目錄

表 2.1	39 個工程參數分類表.....	12
表 2.2	前 10 項工程參數之矛盾矩陣表.....	13
表 4.1	HiTEC HS-475HB Servo Motor規格表	57
表 4.2	SSC-32 脈波產生器規格	60
表 4.3	伺服馬達角度對應脈波長度.....	62
表 4.4	偏移量K與踏步位置關係.....	68
表 4.5	踏點誤差測試	69
表A.1	壓克力物理性質	102
表A.2	壓克力機械性質	103
表A.3	壓克力熱性質.....	103



圖目錄

圖 1.1	SONY ERS-210	3
圖 1.2	銳角步伐與鈍腳步伐的比較圖	5
圖 1.3	在崎嶇路面移動之動作模擬 (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	6
圖 1.4	NCTU-CIDM-F4-2005 四足機器人	6
圖 2.1	TRIZ 流程圖	11
圖 2.2	質量慣性矩的定義	17
圖 2.3	空間中的平行軸定理	19
圖 2.4	初、末狀態衝量與動量的等效圖	20
圖 2.5	動量總合等效圖之 1	20
圖 2.6	動量總合等效圖之 2	21
圖 2.7	(a) 動能的計算 (b) 功的計算	23
圖 2.8	球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖	26
圖 2.9	一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係	27
圖 2.10	零力矩點位置圖	28
圖 2.11	SolidWorks 2008 操作畫面	31
圖 2.12	COSMOS Xpress 操作畫面	31
圖 2.13	Visual Sequencer	33

圖 2.14	SSC-32 伺服馬達設定介面	33
圖 2.15	動作編輯與播放介面	34
圖 2.16	匯出匯入介面與CSV檔案匯出範例	35
圖 3.1	實驗規劃流程	36
圖 3.2	四足機器人架構說明	39
圖 3.3	腿部單元結構	40
圖 3.4	腿部關節可動區域示意	40
圖 3.5	機身板配置圖	41
圖 3.6	機身板與電路元件組合架構	41
圖 3.7	機器人腳部座標圖(側視)	42
圖 3.8	機器人腳部座標圖(上視)	42
圖 3.9	機器人控制流程	46
圖 3.10	單循環動作流程圖	48
圖 4.1	機器人零件草圖	49
圖 4.2	腿部工作空間座標系定義	51
圖 4.3	xz工作空間分析圖	51
圖 4.4	旋轉角度對稱軸說明	52
圖 4.5	xy平面工作空間分析圖	53
圖 4.6	機器人模型建構成果	53

圖 4.7	四足機器人干涉檢查.....	54
圖 4.8	零件負載設定（機身板）	55
圖 4.9	應力與變形分析（機身板）	55
圖 4.10	分析流程	56
圖 4.11	HiTEC HS-475HB Servo Motor尺寸圖	57
圖 4.12	BASIC Atom 28	59
圖 4.13	Mini-ABB（Atom Bot Board）	59
圖 4.14	SSC-32 電路說明	61
圖 4.15	伺服馬達脈波換算角度（預設值）	62
圖 4.16	Basic Atom訊號源處理流程.....	63
圖 4.17	PC訊號源處理流程.....	63
圖 4.18	組裝完成之四足機器人.....	65
圖 4.19	中心偏移量K.....	67
圖 4.20	踩踏點位置	67
圖 4.21	踏點測試座標系	68
圖 4.22	踏點座標分布圖	69
圖 4.23	踏點偏移量變化圖	70
圖 4.24	測試用非連續河石地形.....	70
圖 4.25	步伐動作流程圖	71

圖 4.26	路徑產生用模型.....	73
圖 4.27	完成之地形模型.....	73
圖 4.28	動作量測過程.....	74
圖 4.29	穿越路徑動作資料.....	75
圖 4.30	測試用直線平坦地形.....	76
圖 4.31	直線平坦地形單一行走循環（電腦控制）.....	77
圖 4.32	直線平坦地形單一行走循環（獨立行走）.....	78
圖 4.33	直線平坦地形實際行走完整步態.....	79
圖 4.34	測試用直線非平坦地形.....	80
圖 4.35	直線非平坦地形單一行走循環（電腦控制）.....	81
圖 4.36	直線非平坦地形單一行走循環（獨立行走）.....	82
圖 4.37	直線非平坦地形實際行走完整步態.....	83
圖 4.38	測試用非連續平坦地形.....	84
圖 4.39	非連續平坦地形單一行走循環（電腦控制）.....	85
圖 4.40	非連續平坦地形單一行走循環（獨立行走）.....	86
圖 4.41	非連續平坦地形實際行走完整步態（1）.....	87
圖 4.42	非連續平坦地形實際行走完整步態（2）.....	88
圖 4.43	非連續平坦地形實際行走完整步態（3）.....	89
圖 4.44	測試用非連續非平坦地形.....	90

圖 4.45	非連續非平坦地形單一行走循環（電腦控制）	91
圖 4.46	非連續非平坦地形單一行走循環（獨立行走）	92
圖 4.47	非連續非平坦地形實際行走完整步態（1）	93
圖 4.48	非連續非平坦地形實際行走完整步態（2）	94
圖 4.49	非連續非平坦地形實際行走完整步態（3）	95
圖 5.1	應用DVT影像處理之自主型機器人架構.....	99



一、緒論

1.1 研究背景與動機

長久以來，機械技術的發展便不斷影響著人們的生活型態，尤其自工業革命以來，生產技術一直持續並快速地突破發展。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，由此為起點，機器人技術的突破與投入，使得工業產能與良率不斷獲得突破。

目前為止，機器人之應用仍僅侷限於特定的環境，但隨著近年來人工智慧及機電控制整合的快速發達，機器人將不再僅侷限於特定的環境，而開始多元化地朝各層面的應用發展，如保全監視、行動不便者的看護，乃至於軍事用途與人道救援用途之機器人設計。在進行這方面非工業用途機器人的設計發展時，與工業機器人最大的不同點，便是可移動的機器人平台架構。一般而言，可移動式機器人平台依其移動方式的不同大致上可分為輪式以及步行式機器人架構。前者具備了移動速度快、設計結構簡潔、負重能力較佳的優勢，故為常見的移動式機器人設計架構，但在複雜地形的適應性上則處於弱勢，相較之下，步行式機器人在複雜地形的適應則有較佳的表現，使其適用於地形條件未經特殊設計之一般環境。

能夠適應複雜非連續地形的機器人架構，所具備的潛在應用價值非常

廣泛。像臺灣在地震頻繁的地震帶上，威脅到生命財產安全的大地震隨時可能發生，如果我們能將機器人運用到深入災區及倒塌建築物中搜救人員的工作，一方面能避免救災人員冒險深入的危險性，另一方面也能增加搜救的時效性。面對惡劣的環境，如瓦礫堆、高低不平的地形，亦或充斥著障礙物，建構具備高度地形適應能力機器人架構，讓機器人能沿著可靠的路徑由安全地前進至目的地，便是本研究的目標。

1.2 文獻回顧

雖然機器人的實際發展歷史不長，但是因為有相當廣泛的應用價值，故相關的研究不少。對於步行機器人，從腳的數量而言，大致可分為雙足、四足以及多足機器人架構，主要的差異在於平衡控制的困難度，與系統的穩定度。

雙足機器人在結構上雖然是高度非線性的不易穩定系統，但具備似人外型與容易模仿人類動作的特點，使其發展定位成在高風險的場合代替人類工作，日本 Honda 公司目前最新的雙足機器人 ASIMO [1]，全身具備二十六個關節，並不斷研究提升動作穩定度，以及與人類的互動能力。腳數在六足以上的機器人，在穩定性上佔有絕對的優勢，但在機械結構與分析規劃上亦較複雜，Ozguner 等人於 [2] 所提出的六足機器人 Hexapod 便算是早期的代表。而四足機器人在穩定性上較雙足機器人高，在結構方面

則不似多足機器人複雜，故常見於步行機器人設計，日本 SONY 公司所發展的 AIBO 機械狗，算是四足機器人中最早商品化大量生產的產品，全身



圖1.1 SONY ERS-210


包含二十個關節，除了四肢可動外，頭部與尾巴亦可動作，以模仿動物的表情動作。

Tim Bretl 等人於 [3] 中提出了非步伐式 (non-gaited) 的多步步態規劃 (multi-step motion planning)，它能使多足機器人能自由的攀爬垂直的岩面。這種多步動作規劃器是以前述所提到的單步運動為基礎，來發展一系列的單步運動完成一動作。

另外，Y. Koga and J.-C. Latombe 於 [4] 提到多臂 (multi-arm) 機器人操作一可移動的物體在兩個不同特徵 (configuration) 間的自動動作路徑產生問題，這兩個特徵處於障礙物中。為了避免機器人會被碰撞，它們

必須改變抓取物體的位置，實驗顯示此方法不僅快速且能可靠的找出避免碰撞的路徑。

由 Belen Curto, Vidal Moreno, and Francisco J. Blanco 等人提出的論文 [5] 中，提到了一種新的一般性的方法，來在機器人的特徵空間中表示障礙物，這種方法是以立體空間的數學形式為基礎，來計算特徵-障礙物 (C-obstacle) 的表示，在工作空間與特徵空間使用這種方法，和選擇適合的座標系，會導致障礙物在特徵空間的表示法，可視為兩函數的迴旋積 (convolution)，分別代表機器人和障礙物。這種方法可以直接應用在車輛型機器人 (mobile robot) 及肘節機器人 (articulated robot)，而不需任何形式的轉化，且機器人和障礙物的形狀也沒有限制。因此，這種方法非常適合用在動作規劃與控制的問題。



在 Bo Huang, Lining Sun, Yufeng Luo 提出的論文 [6] 中，將四足機器人的步伐分為三類：(1) 銳角步伐 (acute angle gait) (2) 鈍腳步伐 (obtuse angle gait) (3) 直角步伐 (right angle gait)，並且指出銳角步伐能獲得最佳的穩定性。由圖 1.2 可以發現，銳角步伐的穩定三角型比鈍腳步伐的穩定三角型來的大，也因此會增加質心投影座標至穩定三角形各邊界的距離，穩定性會較高。為驗證上述的說法，這裡研究了兩種典型的攀階步伐：矩形步伐 (rectangle gait) 相對應於直角步伐，平行四邊形步伐則對應於銳

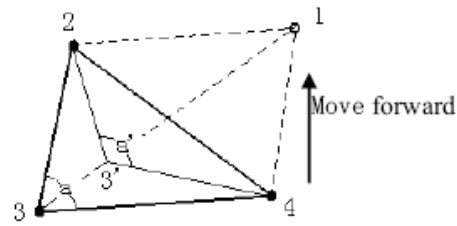
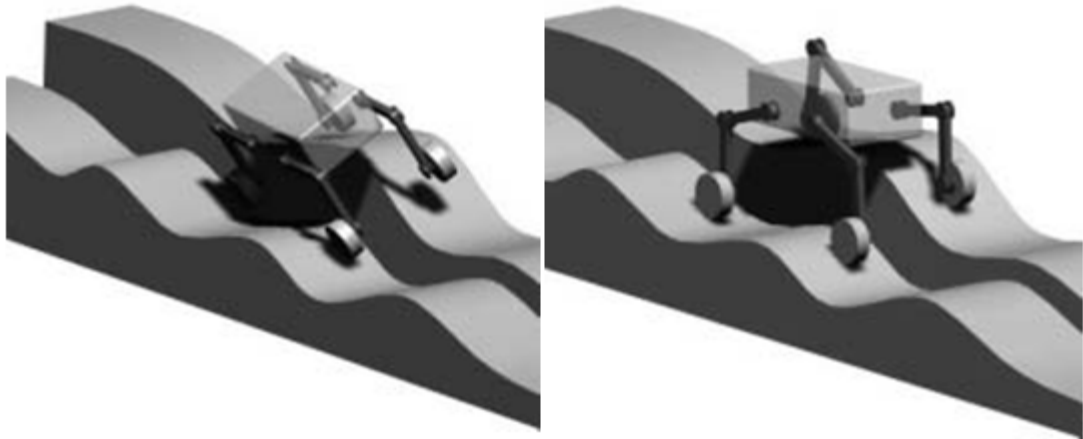


圖1.2 銳角步伐與鈍腳步伐的比較圖

角步伐。為了使機器人能夠穩定的行走，必須保證機器人的質心投影至地面上，在所有的時間內投影的位置，都必須落在支撐腳所構成之三角型內，且穩定性的餘裕（stability margins），也就是質心座標投影的位置相對於三角形各邊界的距離必須越大越好，經過了詳細的比較後，發現平行四邊形步伐會比直角步伐的穩定性餘裕來的大，更為穩定及有效率。

在 Christophe Grand, Faiz Benamar, Frédéric Plumet, Philippe Bidaud 等人的論文〔7〕中提到關於輪型—足部複合式機器人（wheel-legged robot）的在非平坦地形上移動的控制系統，可以將機器人移動時的受力加以平衡，以及增加機器人本體穩定度。透過動力學方程式推導，配合穩定性的定義，提出一種最佳化的方法，來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，只要加入兩個傾斜角感測器（inclinometer）於機器人本體的 pitch-roll 角以及一些姿態回授，即能有效的控制機器人維持一平穩的姿態來移動，如圖 1.3。最後以模擬及實驗的方式證實此法應用於自主式輪型—步行機器人於崎嶇路



(a)

(b)

圖1.3 在崎嶇路面移動之動作模擬 (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

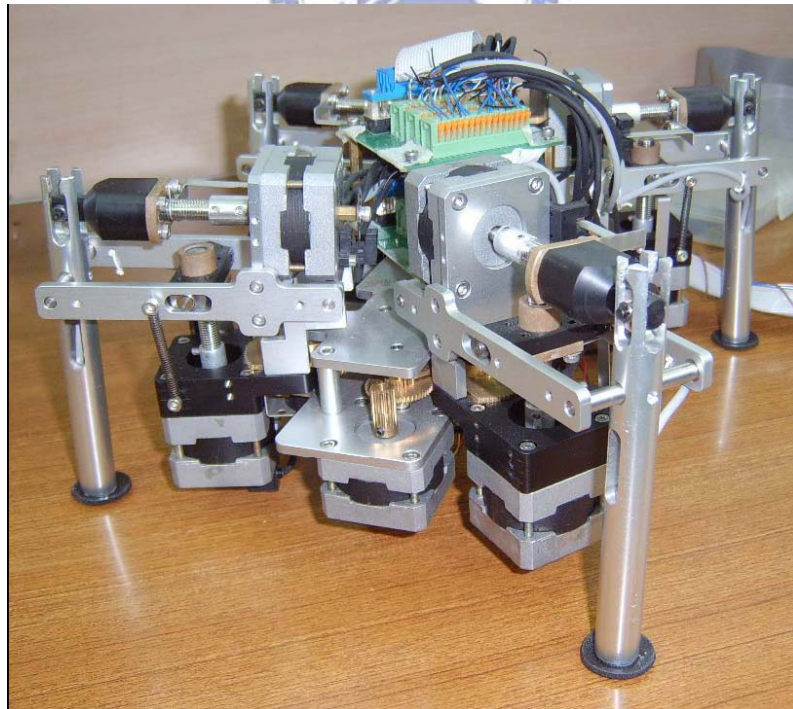


圖1.4 NCTU-CIDM-F4-2005 四足機器人

面下的安全性。

本實驗室近年來發展並持續改進四足機器人的機構與控制系統，如圖 1.4 所示，及針對河石地形等不連續地形的步伐規劃理論與程式 [8]。

鄭璧瑩、林建堯 [9] 提出了一套四足機器人在不連續河石地形上的步態規劃法，利用投影的概念，將三維的工作空間簡化為二維的特徵空間來作分析，再搭配 ZMP 原理為穩定判斷法則，能夠迅速的建立跨越河石地形的有效路徑。

除上述參考論文的研究主題討論外，本文中的機械人步態分析中，採用 D-H 座標轉換與反向運動學理論 [10]，進行各驅動軸運動參數的求解並應用於嵌入式四足機器人的控制實務，以驗證模擬分析的正確度。

1.3 研究流程

對於穿越複雜非連續性地形之機器人的設計目的，依據本實驗室之訂定的研究方向與功能需求，研發步驟將大致規畫為四個階段：

- (1) 分析實驗室前一代機器人設計與地形限制條件，定義設計目標。
- (2) 建立機構設計與系統架構，初步實作機器人架構。
- (3) 實際驗證機器人穿越地形運作情形。
- (4) 結合影像處理系統，導入影像路徑規劃。

此研究之宗旨在建立一輕巧快速，並具備非連續地形適應能力的機器人架構，配合實驗室先前發展之路徑規劃方法，輔以軟體分析設計結構的可靠度及穩定度，並加以實驗佐證，未來將再導入影像系統輔助路徑規劃。實驗室亦有規劃另一研究主題，結合類神經網路與基因演算法，發展更佳的路徑控制程式。在兩者相互輔助下，使四足機器人整體有完整發展。

1.4 章節架構

第一章『緒論』：說明本論文研究之動機與背景、文獻回顧、研究流程與章節架構的介紹。

第二章『基本理論』：闡述有關 TRIZ 創新設計理論，機器人座標轉換之原理介紹，如特徵空間及 PRM 的介紹，除此之外，也包含了 ZMP 與機器人穩定性及跨階步伐的分析。

第三章『機構與系統設計架構』：首先分析複雜非連續地形的限制並轉化為設計參數，並配合設計條件規劃出機器人設計架構輔以說明，最後是控制系統架構與程式流程說明。

第四章：『實驗規畫與實作』：利用 CAD 軟體以模擬四足機器人檢驗設計，觀察移動時的跨步動作進行調整，再以機器人實際穿越非連續地形，透過實驗來驗證所提出之設計架構。

第五章：『結論與未來方向』：歸納本研究的結果並簡述未來論文進行的發展方向。



二、 研究方法

2.1 研究主題

為了達成研究期望的動機，讓四足機器人能發展為一有效率的機器人平台，本研究規劃了兩個研究重點：

(1)輕巧快的機體架構—有鑑於實驗室前代機器人架構在移動速度上的不足，本次的設計將以此為第一項目標。

(2)正確的穿越動作—為了配合實驗室發展的非連續地形穿越路徑規劃法，新一代的機器人架構，亦必須準確地執行演算出的移動路徑。

能夠以迅速的動作，配合準確的移動路徑，展現穩定而有效率的地形穿越能力，便是此次的研究目標。



2.2 基礎理論

2.2.1 TRIZ 理論

TRIZ 理論是俄文創意問題解決理論 (Theoria Resheneyva Isobretatelskeuh Zadach) 的字首。創始人 Genrich Altshuller 從 200,000 件的專利中，挑出 40,000 件具有較佳創新方法的專利，從中歸納出基本原則與型態，發現具有創意的專利，都是在解決“需求衝突”的問題，也就是“矛

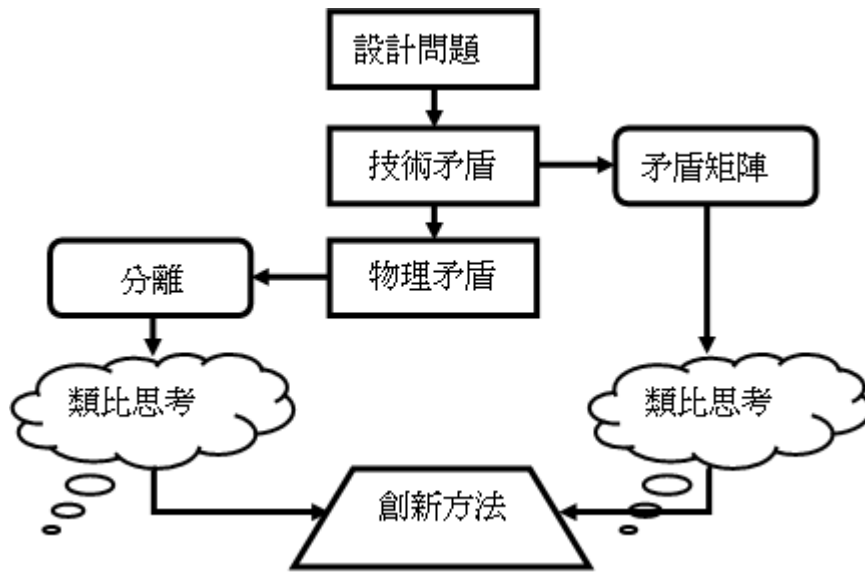


圖2.1 TRIZ 流程圖

盾”，而其被基本解重複的使用，若發明時參考前人的資料，創新的工作將更容易。



在處理工程問題時，可以分為“技術矛盾”與“物理矛盾”的問題。“技術矛盾”是指在一系統中，當一個參數被改善時，另一個參數即變差，例如重量對照強度等；“物理矛盾”則是指同一個參數相對的特性，例如冷和熱。當處理問題時，必須先判定這個問題的矛盾點是技術矛盾還是物理矛盾，如果此矛盾點是技術矛盾，則可以使用 TRIZ 中的「矛盾矩陣」來解決參數，利用參數間常出現的矛盾，用矛盾矩陣在 40 個創新法則中找出其中可能解決的規則，進而利用類比思考的方式找出方向。如果在矩陣中的工程參數找不到適合的，則須將技術矛盾轉換成物理矛盾，利用時間、空間或

表2.1 39 個工程參數分類表

幾何	3.移動件長度 4.固定件長度 5.移動件面積 6.固定件面積 7.移動件體積 8.固定件體積 12.形狀	資源	19.移動件消耗能量 20.固定件消耗能量 22.能量浪費 23.物質浪費 24.資訊喪失 25.時間浪費 26.物質數量	害處	30.物體上有害因子 31.有害的側效應
物理	1.移動件重量 2.固定件重量 9.速度 10.力量 11.張力、壓力 17.溫度 18.亮度 21.動力	能力	13.物體穩定性 14.強度 15.移動件耐久性 16.固定件重量 27.可靠度 32.製造性 34.可修理性 35.適合性 39.生產性	操控	28.量測精確度 29.製造精確度 33.使用方便性 36.裝置複雜性 37.控制複雜性 38.自動化程度

尺寸的分離原理將矛盾分離，再另行求解。

傳統上遇到的設計問題，常是為改善一個工程特性，卻可能導致另外一個工程特性惡化。據 Altshuller 的分析，常見的技術矛盾參數共 39 個，將其相互整理成矩陣，對應解決的法則，便為 TRIZ 中最關鍵的矛盾矩陣。矩陣的縱軸為可能劣化的參數，而橫軸則為欲改善的參數，依據矛盾問題的兩個參數，便可經由矩陣找到解決問題的方向。表 2.1 為 39 個工程參數之六大群組分類表，表 2.2 為前 10 項工程參數之矛盾矩陣表。

表2.2 前 10 項工程參數之矛盾矩陣表

矛盾參數	1.移動物體的重量	2.靜止物體的重量	3.移動物體的長度	4.靜止物體的長度	5.移動物體的面積	6.靜止物體的面積	7.移動物體的體積	8.靜止物體的體積	9.速度	10.力量
1.移動物體的重量	*	-	15, 8, 29, 34	-	29, 17, 38, 34	-	29, 2, 40, 28	-	2, 8, 15, 38	8, 10, 18, 37
2.靜止物體的重量	-	*	-	10, 1, 29, 35	-	35, 30, 13, 2	-	5, 35, 14, 2	-	8, 10, 19, 35
3.移動物體的長度	8, 15, 29, 34	-	*	-	15, 17, 4	-	7, 17, 4, 35	-	13, 4, 8	17, 10, 4
4.靜的長度	-	35, 28, 40, 29	-	*	-	17, 7, 10, 40	-	35, 8, 2, 14	-	28, 10
5.移動物體的面積	2, 17, 29, 4	-	14, 15, 18, 4	-	*	-	7, 14, 17, 4	-	29, 30, 4, 34	19, 30, 35, 2
6.靜止物體的面積	-	30, 2, 14, 18	-	26, 7, 9, 39	-	*	-	-	-	1, 18, 35, 36
7.移動物體的體積	2, 26, 29, 40	-	1, 7, 4, 35	-	1, 7, 4, 17	-	*	-	29, 4, 38, 34	15, 35, 36, 37
8.靜止物體的體積	-	35, 10, 29, 14	19, 14,	35, 8, 2, 14	-	-	-	*	-	2, 18, 37
9.速度	2, 28, 13, 38	-	13, 14, 8	-	29, 30, 34	-	7, 29, 34	-	*	13, 28, 15, 19
10.力量	8, 1, 37, 18	18, 13, 1, 28	17, 19, 9, 36	28, 10	19, 10, 15	1, 18, 36, 37	15, 9, 12, 37	2, 36, 18, 37	13, 28, 15, 12	*

在工程參數矛盾矩陣表中，依據提出的兩個矛盾參數，對應得到之數字代號即代表建議法則，並依據常用之順序排列。TRIZ 中歸納出的 40 項創新法則，便是解決矛盾問題的思考方向，詳列如下：

(1) 分割 (Segmentation)

(2) 萃取 (Extraction)

- (3) 局部特性 (Local Quality)
- (4) 不對稱 (Asymmetry)
- (5) 合併 (Combining)
- (6) 通用／普遍性 (Universality)
- (7) 依次套疊 (Nesting)
- (8) 平衡力 (Counterweight)
- (9) 預先抵銷 (Prior Counteraction)
- (10) 預先作用 (Preliminary Action)
- (11) 預先緩衝 (Beforehand Cushioning)
- (12) 等位性 (Equipotentiality)
- (13) 反向 (Inversion)
- (14) 球狀、曲線 (Spheroidality-Curvature)
- (15) 動態 (Dynamics)
- (16) 部分或過份的作動 (Partial or Excessive Actions)
- (17) 移至新的空間 (Moving to a New Dimension)
- (18) 機械振動 (Mechanical Vibration)
- (19) 週期運動 (Periodic Action)
- (20) 有效動作的連續性 (Continuity of Useful Action)
- (21) 急速通過 (Rushing Through)



- (22) 將害處轉換為好處 (Convert Harm into Benefit)
- (23) 回饋 (Feedback)
- (24) 媒介 (Mediator)
- (25) 自助 (Self-service)
- (26) 複製 (Copying)
- (27) 丟棄 (Dispose)
- (28) 取代機械系統 (Replacement of Mechanical Systems)
- (29) 氣壓和液壓 (Pneumatics and Hydraulics)
- (30) 撓性殼和薄膜 (Flexible Shells and Thin Films)
- (31) 多孔材料 (Porous Materials)
- (32) 改變顏色 (Color Changes)
- (33) 同質 (Homogeneity)
- (34) 拋棄與復原 (Discarding and Recovering)
- (35) 改變物質特性 (Transformation of Properties)
- (36) 相轉變 (Phase Transitions)
- (37) 熱膨脹 (Thermal Expansion)
- (38) 強氧化劑 (Strong Oxidants)
- (39) 惰性環境 (Inert Atmosphere)
- (40) 複合材料 (Composite Material)



當使用矛盾矩陣無法提供有用的解決方向時，則需將技術矛盾轉換為物理矛盾，透過時間、空間、狀態分離出衝突的因素，再套用 40 項創新法則求解〔11〕〔12〕。

2.2.2 動力學理論

(1) 質量慣性矩

考慮某一個小質量 Δm 之質點置於一可忽略質量的桿子上，此桿可對軸 AA' 自由旋轉。假設桿子與質點原先是靜止的，若旋加一力偶於這個系統，則桿子與質點將開始繞 AA' 旋轉。此系統要達到某一已知轉速所需的時間與質量 Δm 和距離 r 的平方成比例。因此，乘積 $r^2 \Delta m$ 可用來衡量系統的用來衡量系統的慣性 (Inertia)，也就是欲使系統運動時，系統所產生的抵抗。根據這個理由，乘積 $r^2 \Delta m$ 稱為質量 Δm 對於 AA' 軸的慣性矩 (Moment of Inertia)〔13〕。

現在考慮質量為 m 的物體，並使其繞著 AA' 軸旋轉。把這個物體分割成質量為 Δm_1 、 Δm_2 、 \dots 等許多元件，而整體系統發生的抵抗可以用 $r_1^2 \Delta m_1 + r_2^2 \Delta m_2 + \dots$ 的總和來衡量。因此這個總和定出此物體對於 AA' 軸的慣性矩。若再增加元件的數目，可以發現在極限時的慣性矩等於以下的積分，

$$I = \int r^2 dm \quad (2.1)$$

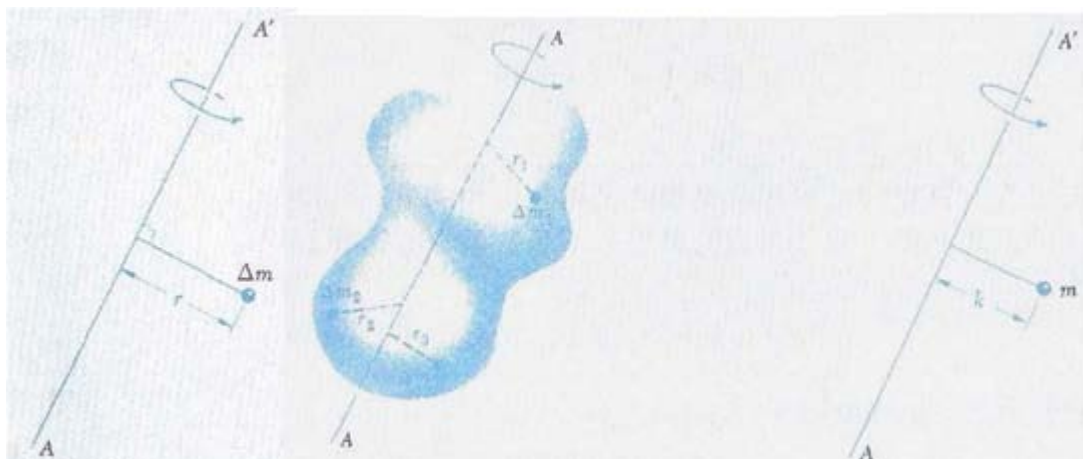


圖2.2 質量慣性矩的定義

此物體對於 AA' 軸的迴轉半徑 k 由下式的關係來定義：

$$I = k^2 m \quad \text{或} \quad k = \sqrt{\frac{I}{m}} \quad (2.2)$$

同理，一物體對於一座標軸的慣性矩將很容易以質量 dm 之元件的座標 x, y, z 來表示。例如由元件 dm 到 y 軸之距離平方為 $z^2 + x^2$ ，在這裡表示該物體對於 y 軸的慣性矩為

$$I_y = \int r^2 dm = \int (z^2 + x^2) dm \quad (2.3)$$

對於 x 和 z 軸的慣性矩也可以獲得類似的表示式如下：

$$\begin{aligned} I_x &= \int (y^2 + z^2) dm \\ I_y &= \int (z^2 + x^2) dm \\ I_z &= \int (x^2 + y^2) dm \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2) 平行軸定理

假設有一質量為 m 的物體，其 O_{xyz} 是原點在任意點 O 的直角座標系，

而 $G_{x'y'z'}$ 為一平行形心軸 (Centroidal axis) 的座標系統，也就是座標系的原點在物體的重心 G ，且座標軸 x' 、 y' 、 z' 分別平行於 x 、 y 、 z 。以 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 代表 G 對於 O_{xyz} 的座標，故可以寫出元件 dm 對於 O_{xyz} 之座標 x 、 y 、 z 與其對於形心軸 $G_{x'y'z'}$ 之座標 x' 、 y' 、 z' 的關係如下：

$$\begin{aligned}x &= x' + \bar{x} \\y &= y' + \bar{y} \\z &= z' + \bar{z}\end{aligned}\tag{2.5}$$

將(2.5)式代入(2.4)式中，可以得到該物體對於 x 軸的慣性矩表示如下：

$$\begin{aligned}I_x &= \int (y^2 + z^2) dm = \int [(y' + \bar{y})^2 + (z' + \bar{z})^2] dm \\&= \int (y'^2 + z'^2) dm + 2\bar{y} \int y' dm + 2\bar{z} \int z' dm + (\bar{y} + \bar{z}) \int dm\end{aligned}\tag{2.6}$$

上式中的第一項積分代表物體對於形心軸 x' 的慣性矩 $\bar{I}_{x'}$ ；第二、三項積分是分別代表物體對於 $z'x'$ 與 $x'y'$ 平面的一次矩，而且由於這兩個平面都包含了 G 點，故這兩項積分結果都是 0；最後一項積分等於該物體的總質量 m 。

因此由(2.6)式可以寫出：

$$I_x = \bar{I}_{x'} + m(\bar{y}^2 + \bar{z}^2)\tag{2.7}$$

同理，

$$\begin{aligned}I_y &= \bar{I}_{y'} + m(\bar{z}^2 + \bar{x}^2) \\I_z &= \bar{I}_{z'} + m(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)\end{aligned}\tag{2.8}$$

由以上的規則可以得知，某一物體對於 AA' 軸之慣性矩 I 與其對於 BB' 軸之慣性矩 \bar{I} 的一般關係式如下：

$$I = \bar{I} + md^2\tag{2.9}$$

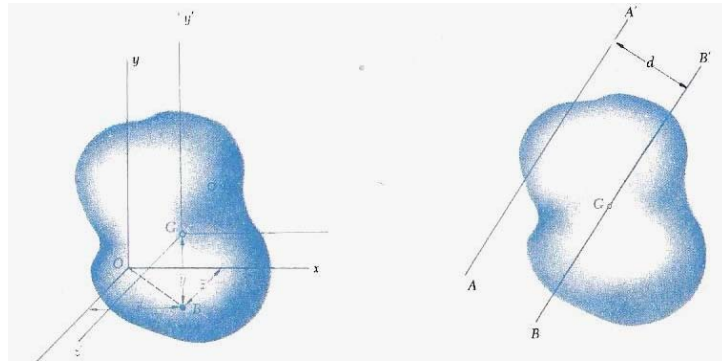


圖2.3 空間中的平行軸定理

(3) 剛體平面運動之衝量與動量原理

假設剛體由一大數目的質點 P_i 所組成，已知質點在時間 t_1 之動量所形成的系統和外力作用由 t_1 到 t_2 所生成的衝量系統，共同對等於質點在時間 t_2 之動量所形成的系統。由於和剛體相關聯的向量可以考慮為滑動向量，因而得知下圖 2.4 所示向量系統不僅是對等的，而且更精確的說法是等效

(Equivalent)，即可寫成下式：

$$\text{系統動量}_1 + \text{系統衝量}_{1 \rightarrow 2} = \text{系統動量}_2 \quad (2.10)$$

但這些質點的動量 $v_i \Delta m_i$ 可以化減為附著於 G 的一向量，且該向量等於質點動量總合：

$$L = \sum_{i=1}^n v_i \Delta m_i \quad (2.11)$$

以及化成一力偶，而其力偶矩等於質點動量對 G 之動量矩總和：

$$H_G = \sum_{i=1}^n r_i' \times v_i \Delta m_i \quad (2.12)$$

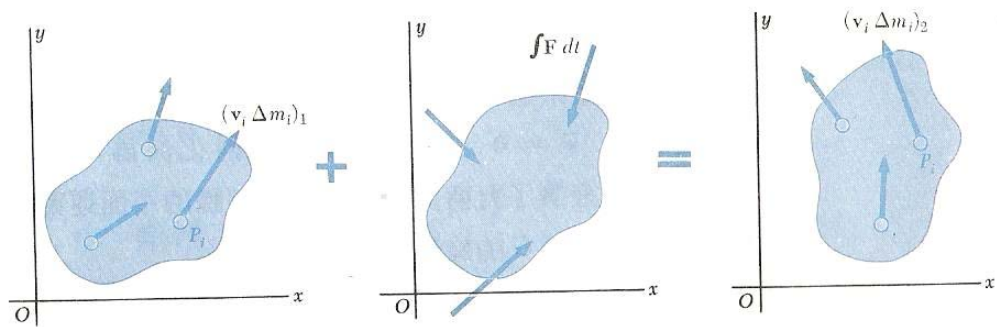


圖2.4 初、末狀態衝量與動量的等效圖

前兩式(2.11)和(2.12)中的 L 和 H_G 分別是定義構成剛體之質點系統的線動量與對 G 的角動量。由圖 2.5 可知，動量 $v_i \Delta m_i$ 的系統等效於附著在 G 的線動量向量 $m\vec{v}$ 及角動量偶 $\bar{I}\omega$ 。

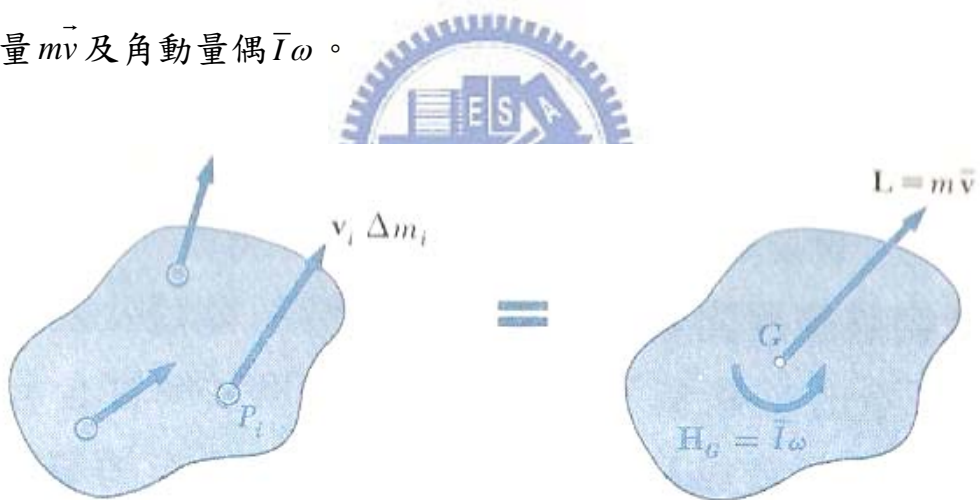


圖2.5 動量總合等效圖之 1

從以上的觀察發現，此動量系統在平移($\omega=0$)的特殊情況中化減為向量 $m\vec{v}$ ；而在形心旋轉($\vec{v}=0$)的特殊情況中則化減為向量偶 $\bar{I}\omega$ ，證實了對稱於參考平面之剛體的平面運動，可以分解為一隨質心 G 點的平移運動與一繞 G 點的旋轉運動，如圖 2.6 所示。

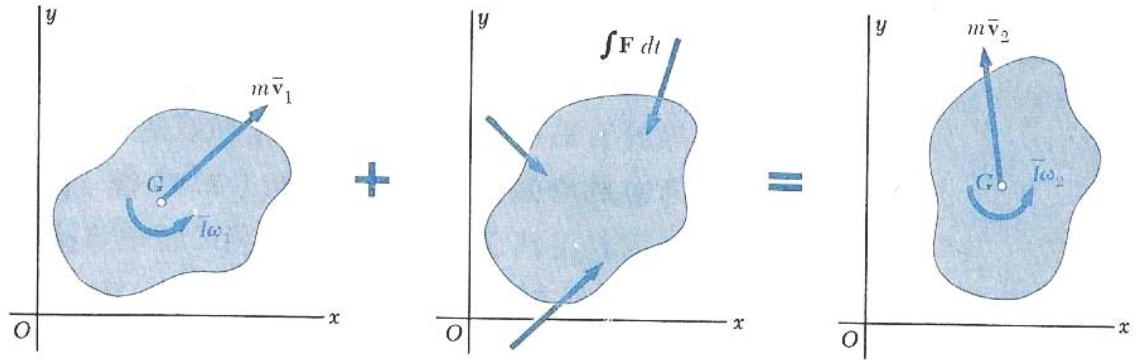


圖2.6 動量總合等效圖之2

(4) 剛體的角動量守恆

當沒有外力作用在一剛體或一剛體系統上時，外力的衝量為0，且在時間 t_1 時的動量系統是對等於時間 t_2 時的動量系統。依次相加並求出時間 t_1 和 t_2 時動量之x分量、y分量及動量矩的等式，故可結論為此系統的總線動量在任何方向上是守恆，又其總角動量對任意點也是守恆的。而對於許多工程應用上，線動量並非守恆，而其系統對一給定點O的角動量 H_O 則為守恆：

$$(H_O)_1 = (H_O)_2 \quad (2.13)$$

這種情形會發生在當所有外力之作用線通過O的時候，或者更一般化的說法是當外力對O的角衝量之和為0時。

(5) 功能原理

功能原理可以應用於質點系統中的每一個質點 P_i ，可寫成下式：

$$T_1 + U_{1 \rightarrow 2} = T_2 \quad (2.14)$$

上式對於每一個質點 P_i 皆成立，其中 $U_{1 \rightarrow 2}$ 表示內力 f_{ij} 和外力合力 F_i 對 P_i 作的功。對此系統各個質點的動能相加起來，並考慮所有相關的力所做的功，即可以將(2.14)式應用到整個質點系統。而以 T_1 和 T_2 代表整個系統的初、末狀態的線動能， $U_{1 \rightarrow 2}$ 則是所有作用於系統質點上的力所做之功。應注意雖然內力 f_{ij} 和 f_{ji} 相等且相反，但通常這些力的功並不能消去，此乃因為通常這些作用於 P_i 和 P_j 點上的力將會促使其產生不同的位移。因此，在計算 $U_{1 \rightarrow 2}$ 時，應該考慮內力 f_{ij} 的功和外力 F_i 的功。

假如作用在系統質點的所有力是保守力 (Conventional force)，則(2.14)

式可寫成如下：

$$T_1 + (V_1 - V_2) = T_2 \quad (2.15)$$

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2 \quad (2.16)$$

其中 V 是代表與作用於系統質點的內力和外力相關聯的位能。而剛體的功能原理也要質點的功能原理相似，只是在計算動能時，必須再考慮加入旋轉動能 (Rotational kinetic energy)，其餘的位能、功、線動能的計算則與質點功能原理相同。

1. 動能的計算

考慮質量為 m 之剛體在作平面運動，若物體各質點 P_i 的絕對速度 v_i 表示為物體質心 G 的速度 \bar{v} 與質點相對於附著於 G 且有固定方位之座標系 $G_{x'y'}$ 的速度 v'_i 之和，則構成剛體之質點系統的動能可寫成下式：

$$T = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta m_i v_i'^2 \quad (2.17)$$

但 P_i 之相對速度的大小 v'_i 是 $r'_i \omega$ 的乘積， r'_i 是 P_i 通過 G 且垂直於運動平面之軸的距離， ω 為物體在所考慮瞬時的角速度大小。將其代入上式，具可改寫為：

$$T = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n r_i'^2 \Delta m_i \right) \omega^2 \quad (2.18)$$

而(2.18)式中的括弧內的總和代表物體對通過 G 之軸的慣性矩 \bar{I}_G ，所以可以再改寫成更簡單的型式：

$$T = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \bar{I}_G \omega^2 \quad (2.19)$$

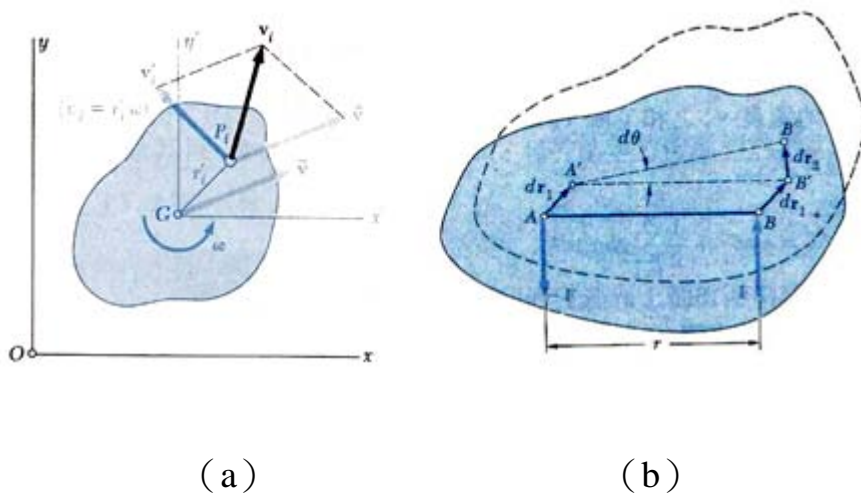


圖2.7 (a) 動能的計算 (b) 功的計算

2. 功的計算

如下圖，一力 F 在其作用點由 A_1 到 A_2 之位移期間所作的功為：

$$U_{1 \rightarrow 2} = \int_{A_1}^{A_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (2.20)$$

$$U_{1 \rightarrow 2} = \int_{s_1}^{s_2} (F \cos \alpha) ds \quad (2.21)$$

其中 F 是該力的大小， α 是該力與其作用點 A 之運動方向所成的夾角，而積分變數 s 為量度 A 沿其路徑所行的距離。若剛體上還有力矩 M 作用，則其力矩 M 使作用的功可寫為：

$$dU = Md\theta \quad (2.22)$$

其中 $d\theta$ 是物體旋轉的小角度，是以弧度來計算。而此力偶在剛體之有限旋轉期間所作的功可得自角度 θ 的初值 θ_1 到終值 θ_2 ，再對(2.22)式的兩邊作積分可得：

$$U_{1 \rightarrow 2} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} Md\theta \quad (2.23)$$

當此力矩 M 為定值時，可將上式再改寫成：

$$U_{1 \rightarrow 2} = M(\theta_2 - \theta_1) \quad (2.24)$$

3. 功能原理的通式

現今假設剛體是由一大數目 n 個質量為 Δm_i 的質點所組成，則可以對整個系統寫出功能原理的方程式如同(2.14)式，再將其展開為：

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_{G_i} \omega_i^2 \right)_1 + \left(\int_{A_1}^{A_2} \vec{F}_i \cdot d\vec{r}_i + \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_i d\theta_i \right) \right] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_{G_i} \omega_i^2 \right)_2 \quad (2.25)$$

2.2.3 機器人學座標系轉換理論

圖 2.8 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：

$$\begin{aligned} \vec{u}^A &= u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k} \\ \vec{v}^A &= v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \\ \vec{w}^A &= w_x \vec{i} + w_y \vec{j} + w_z \vec{k} \end{aligned} \quad (2.26)$$

該點 P 的位置向量由 A 來表示：

$$\vec{p}^A = p_x \vec{i} + p_y \vec{j} + p_z \vec{k} \quad (2.27)$$

或是以移動座標系 B 表示：

$$\vec{p}^B = p_u \vec{u} + p_v \vec{v} + p_w \vec{w} \quad (2.28)$$

將(2.26)式帶入(2.28)式可以得到以參考座標系 A 所表示的 P 點的位置向量：

$$\begin{aligned} \vec{p}^A &= (p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x) \vec{i} + (p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y) \vec{j} \\ &\quad + (p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z) \vec{k} \end{aligned} \quad (2.29)$$

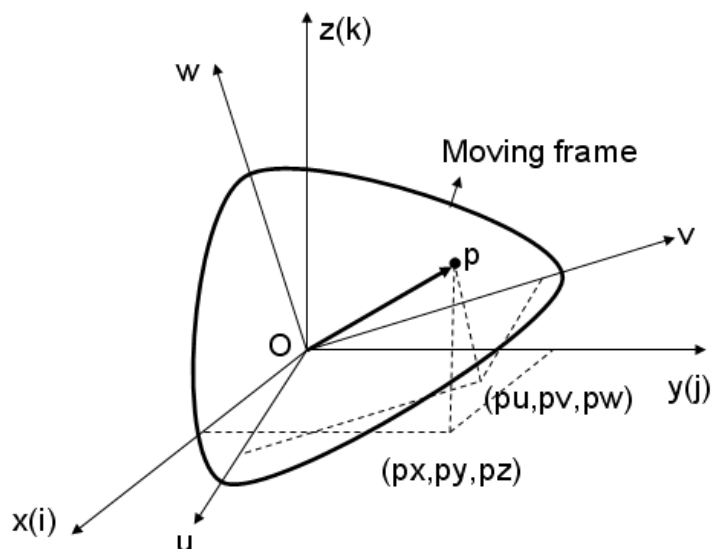


圖2.8 球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖

比較(2.29)式與(2.27)式可得：

$$\begin{aligned}
 p_x &= p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x \\
 p_y &= p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y \\
 p_z &= p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

將(2.30)式以矩陣表示：

$$\vec{p}^A = {}^A R_B \vec{p}^B \quad \text{其中} \quad {}^A R_B = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{pmatrix}
 \tag{2.31}$$

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

$$\vec{p}^B = {}^A R_B^T \vec{p}^A
 \tag{2.32}$$

下面考慮一般性空間移動的座標轉換關係，根據圖 2.10，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：

$${}^A\vec{p} = {}^A R_B {}^B\vec{p} + {}^A\vec{q} \quad (2.33)$$

將上式整理成均質轉換矩陣 (Homogeneous Transformation Matrix) 可得兩座標系之間的關係：

$${}^A\vec{p} = {}^A T_B {}^B\vec{p} \quad (2.34)$$

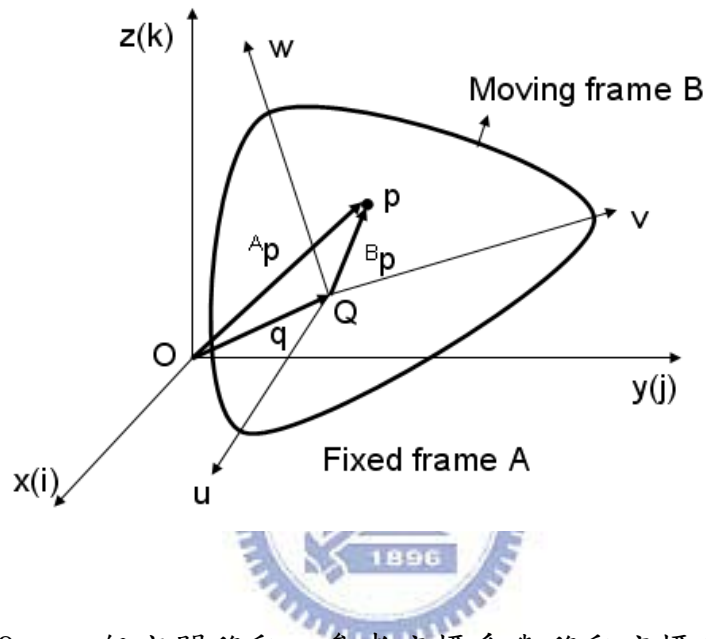


圖2.9 一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係

其中：

$${}^A T_B = \begin{pmatrix} {}^A R_B & \vdots & {}^A\vec{q} \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

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(2.33)

式等號兩邊同乘 ${}^A R_B^{-1}$ ，又 ${}^A R_B^{-1} = {}^A R_B^T$ ，可得：

$${}^B\vec{p} = {}^A R_B^T {}^A\vec{p} - {}^A R_B^T {}^A\vec{q} = {}^A T_B^{-1} {}^A\vec{p} \quad (2.36)$$

其中：

$${}^A T_B^{-1} = {}^B T_A = \begin{pmatrix} {}^A R_B^T & \vdots & -{}^A R_B^T \vec{q} \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ 0 \ 0 \ 0 & \vdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

有了上述的關係式，即可便利的求得兩座標系之間的轉換關係。〔10〕

2.2.4 零力矩點 (ZMP) 定義

零力矩點(Zero Moment Point, ZMP)的概念最初在1969年被Timcenko及Vukobratovic提出，在1984年，第一次被應用在人形機器人上，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

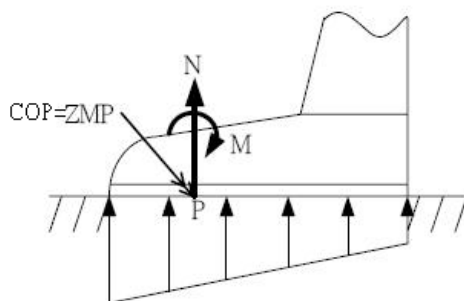


圖2.10 零力矩點位置圖

矩點是重疊的，如圖 2.10 所示。

ZMP 的計算公式如下：

$$\begin{aligned}
 x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{x}(z_i - z_{ZMP}) - \sum_{i=0}^n I_{iy} \ddot{\theta}_{iy} + F_{ext,x} z_f}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\
 y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{y}(z_i - z_{ZMP}) - \sum_{i=0}^n I_{ix} \ddot{\theta}_{ix} + F_{ext,y} z_f}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g)}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

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：

$$x_{ZMP} = x_G - \frac{\ddot{x}_G(z_G - z_{ZMP})}{\ddot{z}_G + g} \quad (2.39)$$

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

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：

$$x_{ZMP} = x_G - \frac{\ddot{x}_G z_G}{g} \quad (2.40)$$

$$y_{ZMP} = y_G - \frac{\ddot{y}_G z_G}{g}$$

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：

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= x_G \\ y_{ZMP} &= y_G \end{aligned} \quad (2.41)$$



2.3 軟體介紹

2.3.1 SolidWorks 2008 繪圖軟體

設計中所使用的 3D 機械設計軟體，是採用美國 Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 的 SolidWorks 2008 作為四足機器人機械結構設計的輔助。它可以接受多種從其他不同的 2D 和 3D 輔助設計軟體所建立的文件類型。超過十年的發展，與客戶意見的回饋，讓它提供了相當人性化的操作介面。在 SolidWorks 2008 中，除了機械設計工具外，更整合該公司發

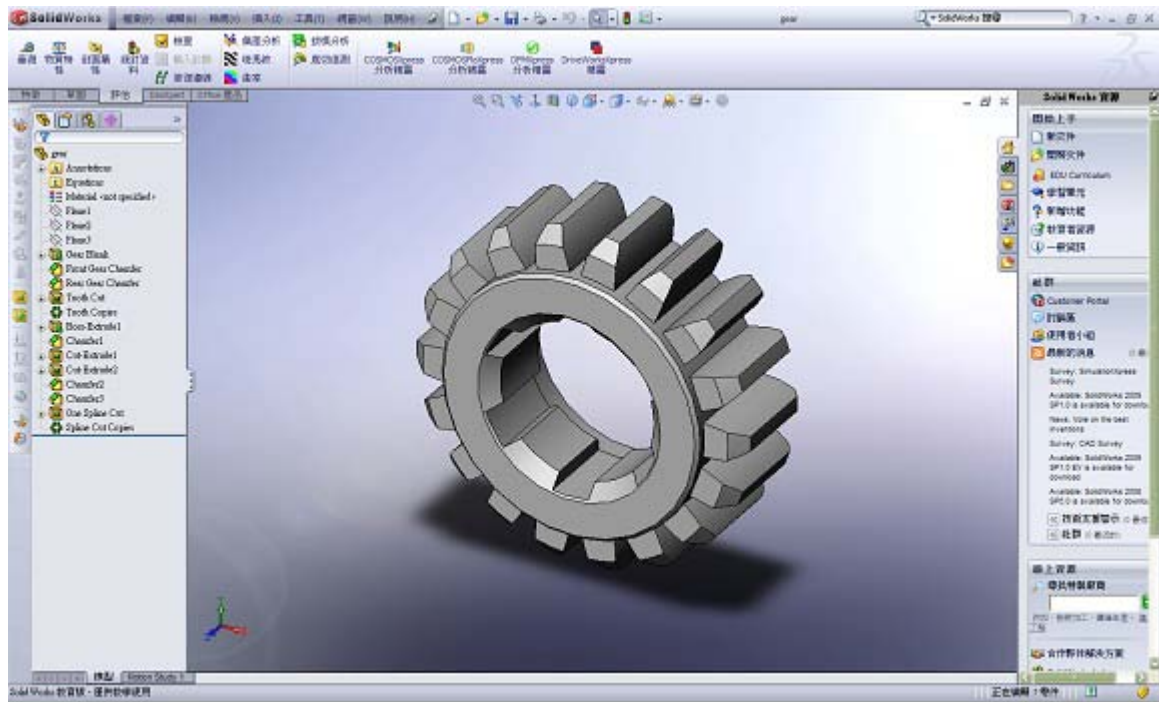


圖2.11 SolidWorks 2008 操作畫面

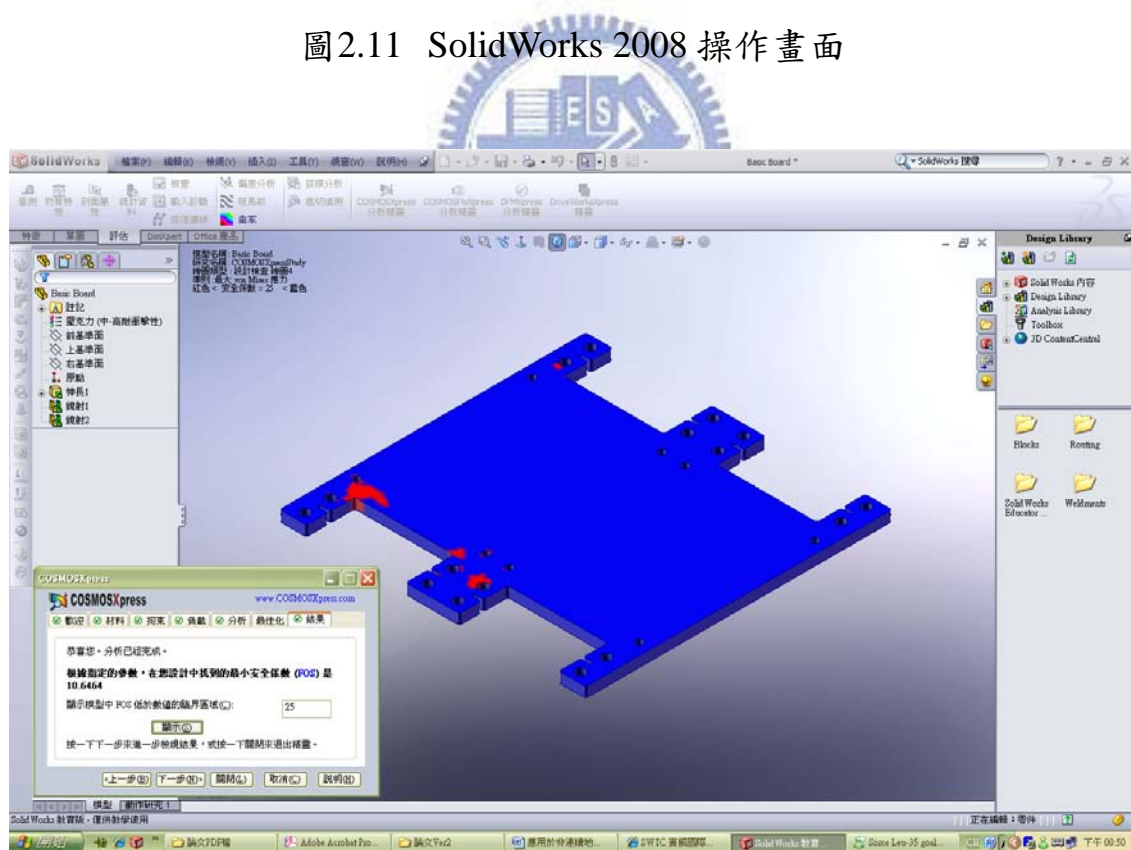


圖2.12 COSMOS Xpress 操作畫面

維建模、鈹金、材質設定、零件裝配等，並可將建立的虛擬模型檔案轉存為其他檔案類型，方便提供其他軟體利用。在建立虛擬模型的同時，除了建立快速瀏覽的外觀外，也能指定零件的特性，如密度、彈性、強度等，可以配合建立出的模型估算出實際成品的機械特性。建立出的組零件亦可給予動作設定，產生模擬動畫，給予更完整的設計輔助。COSMOS 模擬軟體方面，分別包含 COSMOSXpress 與 COSMOS Motion，藉由與 Solidworks 整合的介面，使得建立完的零件與組零件可以快速的完成應力、應變分析，以及機械運作模擬，節省在傳統設計流程中可能浪費的時間與成本，提升了設計工作時的效率。在這次設計工作中，將先以模型建立功能，完成初步機器人架構，輔以模擬分析功能，進行結構分析，完成機器人結構設計 [14]。



2.3.2 *Visual Sequencer* 軟體

本研究中，為配合進行機器人動作的測試與規劃，使用了 Lynxmotion 公司開發的 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。在本次實驗中，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

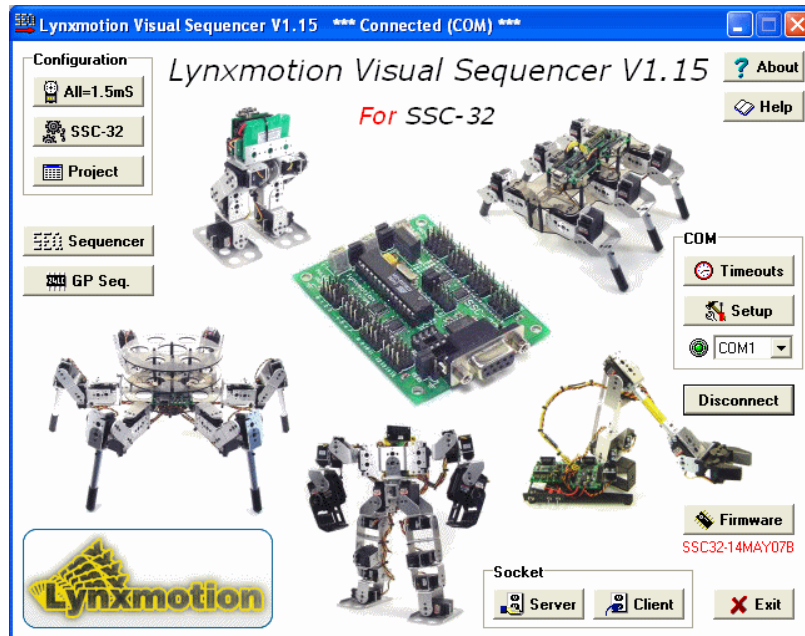


圖2.13 Visual Sequencer

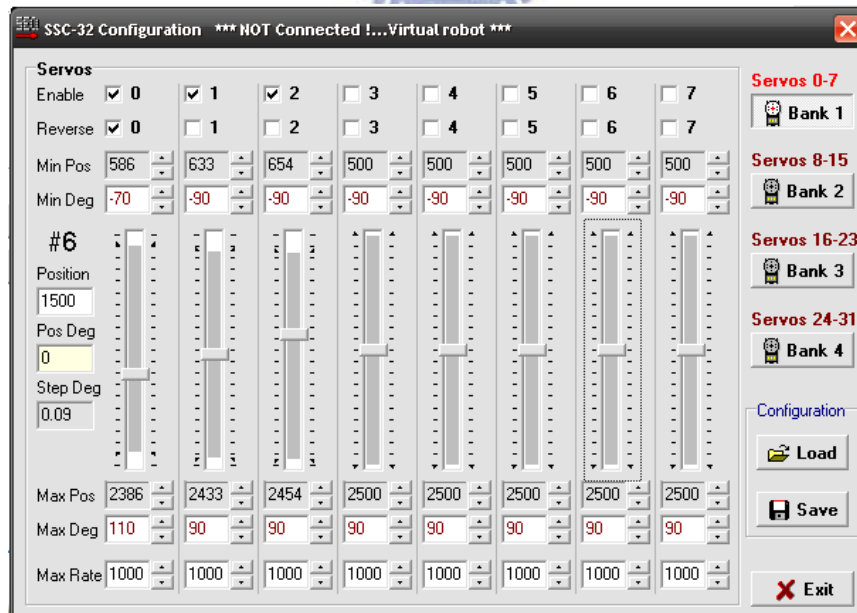


圖2.14 SSC-32 伺服馬達設定介面

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。

(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。

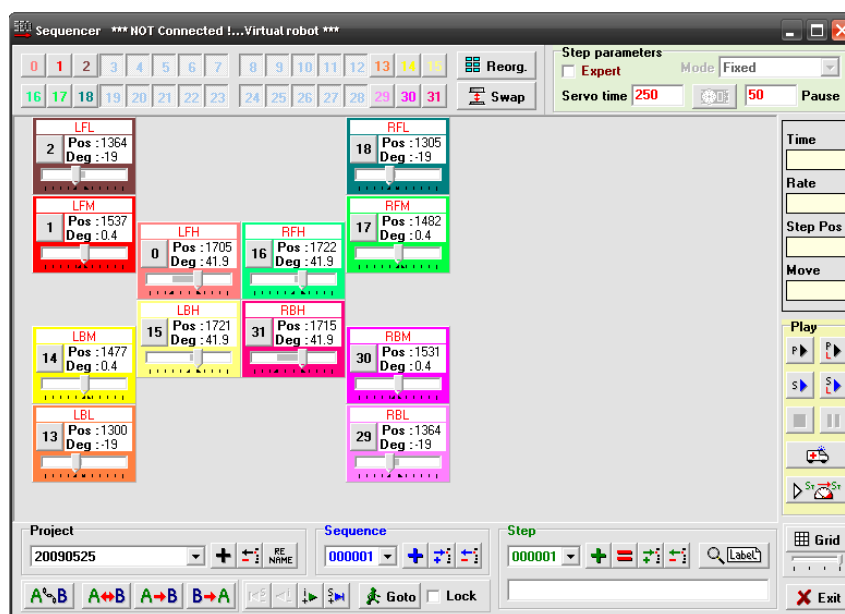


圖2.15 動作編輯與播放介面

三、 系統與機構設計

3.1 規劃流程說明

為了完成機器人的設計，本文規劃之設計流程，將先建立初步的機器人機械與電路架構，隨後已完成之設計架構為基礎，建立機器人虛擬模型，並以此虛擬模型先進行機構動作與干涉檢驗，調整現階段設計架構，並以模擬軟體進行應力與安全係數分析，修改零件造型。隨後將先進行伺服馬

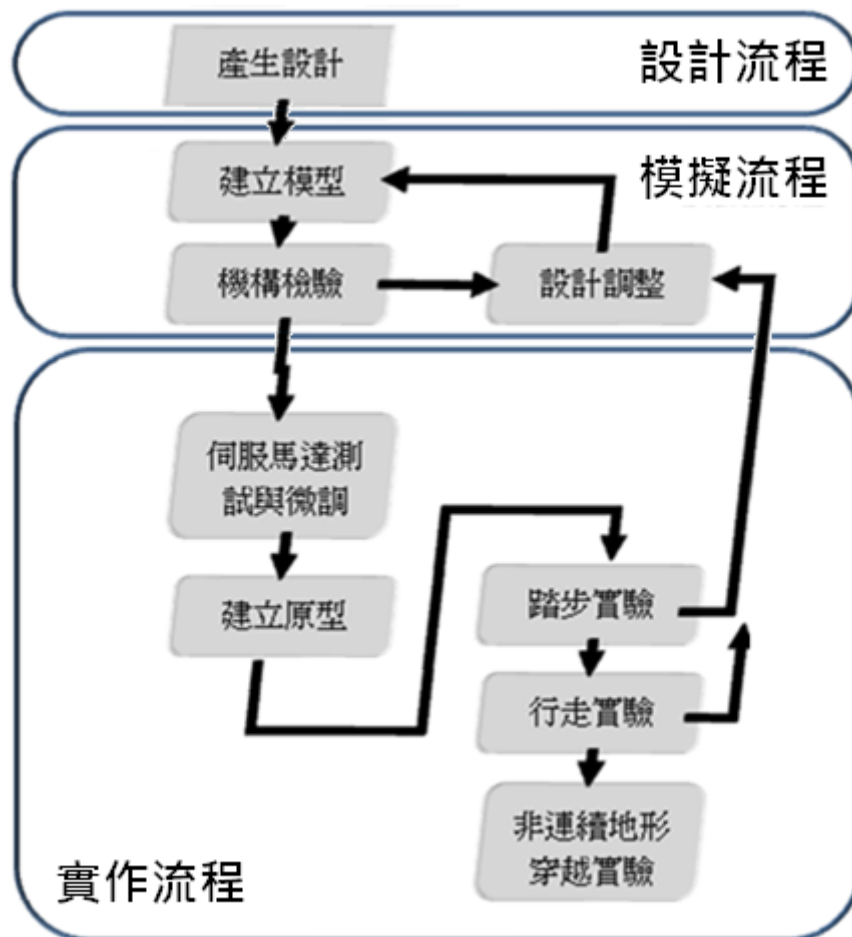


圖3.1 實驗規劃流程

達動作測試與微調。次一階段的實驗，將依先前調整所完成之四足機器人模型，建立實際機器人測試用原型，進行足部實際踩踏實驗，驗證機器人之工作空間設計，並結合實驗室另行應用 ANFIS 理論，所發展之跨越類河石非連續地形路徑規劃系統，進行機器人跨越連續地形以及複雜非連續地形之測試，證明此四足機器人之行走能力與對複雜非連續地形之適應性。

3.2 設計推演

依據本實驗室的研究主題、非連續性地形的特性、以及前代機器人的架構，規劃出下列的設計目標：

- (1) 高地形適應性
- (2) 快速準確動作
- (3) 機體重量輕



依上述的設計目標，與機器人的基本功能需求相互參照，便會浮現幾個設計問題。是故在此依據 TRIZ 創新理論，將這些設計問題歸納，整理為下列的矛盾問題：

- (1) 想要機器人有高地形適應性，但希望不用提高致動器的使用數量。
- (2) 想要四足機器人的動作迅速，但致動器有一定的出力需求。
- (3) 想要機器人減輕重量，但減輕重量可能影響強度。

將這些矛盾問題對照表 2.1 中的 39 個工程參數，可以轉化成工程參數間的矛盾，再對照 TRIZ 提供的矛盾矩陣表，便可得到解決設計問題的方向提示。參照矛盾問題所得到的結果如下：

13.物體穩定性 + 36.裝置複雜性

= 2.萃取, 35.改變物質特性, 22.將害處轉為好處, 26.複製

9. 速度 + 10. 力量

= 13.反向, 28.取代機械系統, 15.動態, 19.週期運動

1.移動件重量 + 14.強度

= 28.取代機械系統, 27. 丟棄, 18. 機械振動, 40.複合材料

根據得到的所有創新方向，在此分別挑出萃取、取代機械系統、複合材料三項，作為尋求解答的方向，並對三項矛盾問題提出改善方法：

(1) 萃取：將機器人足部工作空間進行整理，改善致動器配置進而使工作空間增加。

(2) 取代機械系統：將原來之步進馬達系統更換為伺服馬達系統，減輕機身重量並簡化電路設計，提高動作反應速度。

(3) 複合材料：更換機器人結構件，改採壓克力加工件及鋁合金鈹金件，並在部分結構直接使用伺服馬達本體作為結構的一部分，減少較厚重的金屬銑削件的使用。

依據在此所推導而出的改善方法，將運用於本研究後續的機器人架構設計中。

3.3 機械架構說明

3.3.1 機構設計說明

機器人設計架構〔18〕分為軀幹、腿部與電路部分，如圖 3.2 所示。

依據在 3.2 節中整理出的設計目標與設計方向規劃，針對前一代四足機器人架構存在的問題進行修正。更換為伺服馬達系統，減輕機身重量並簡化電路設計，提高動作反應速度，整體腿部架構如圖 3.3 與圖 3.4 所示。機器人足部致動器詳細配置將於下一章中進行調整，使達到較佳工作空間。

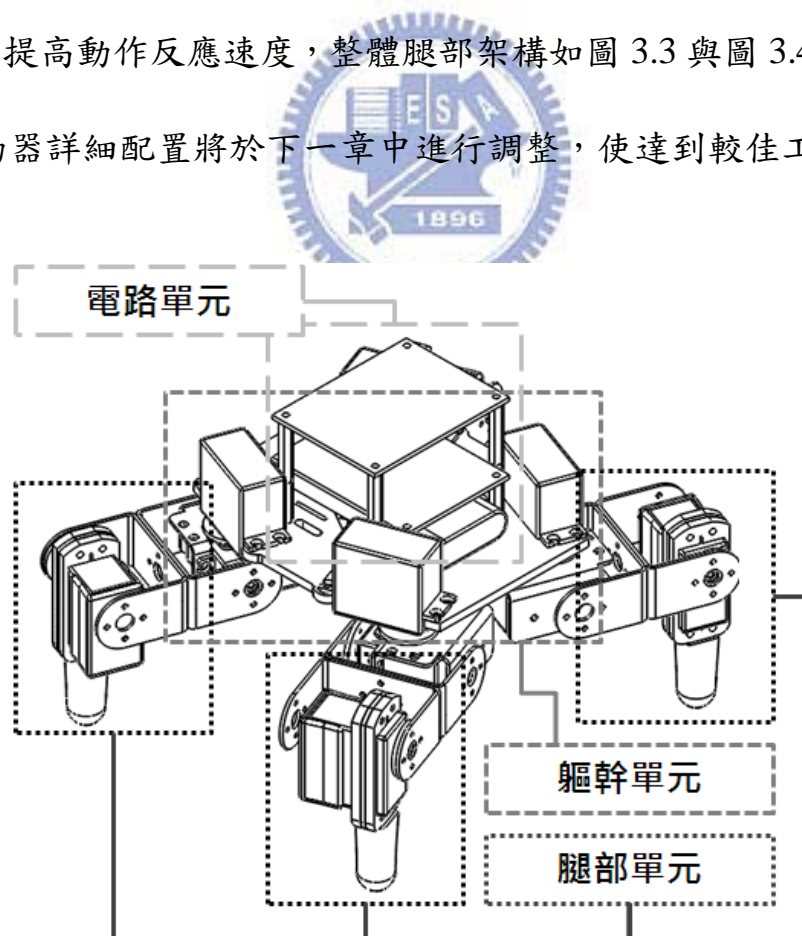


圖3.2 四足機器人架構說明

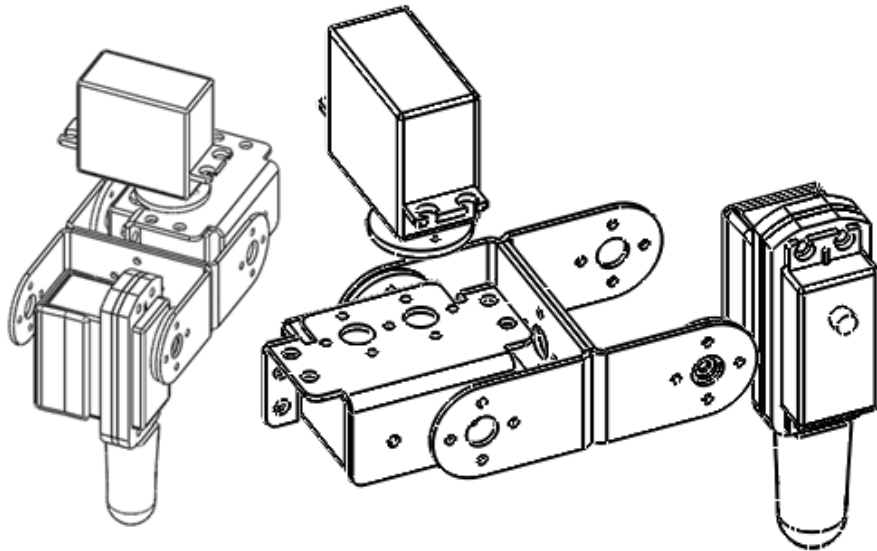


圖3.3 腿部單元結構

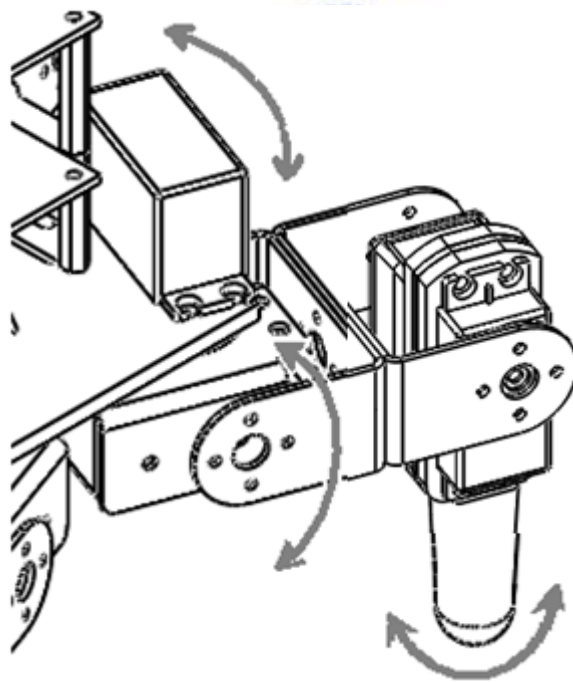


圖3.4 腿部關節可動區域示意

由於考量到後續零件加工將以壓克力板材為主，整體零件之設計將配合此條件進行設計。軀幹設計的部分，包含電路系統與腿部控制線的配置。

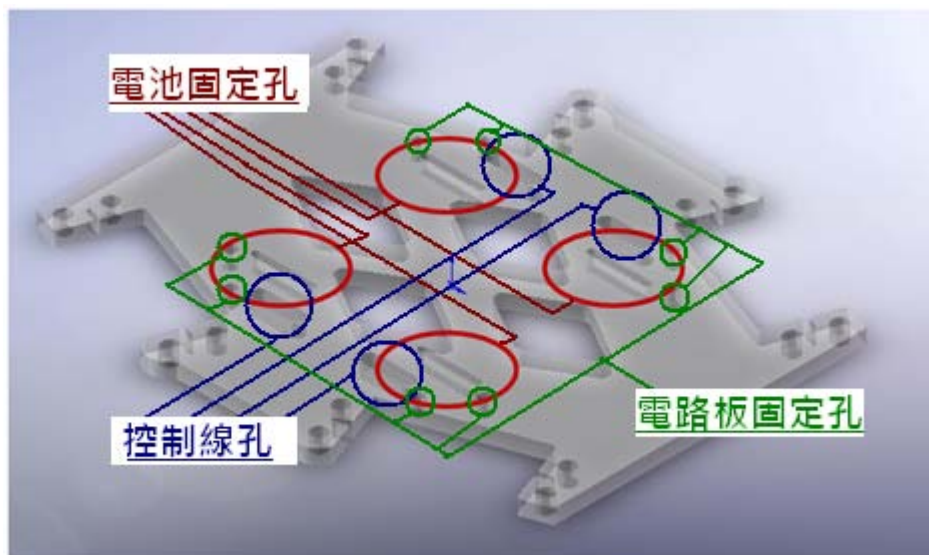


圖3.5 機身板配置圖

電路板與電源模組置於機身上側中心位置，這是考量到機器人穩定性，並避免機器人行進中碰撞到此部分導致錯誤，機身板之孔位配置如圖 3.5 所示，在與電路元件組合後大致架構則如圖 3.6。

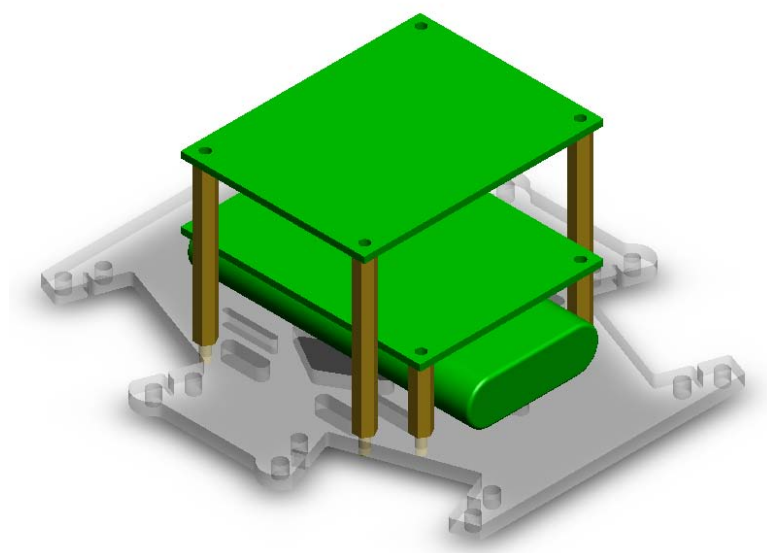


圖3.6 機身板與電路元件組合架構

3.3.2 機器人單足座標與角度轉換

圖 3.7 為機器人腳的側視圖，圖 3.8 則為上視圖，從這兩張圖，可以定義出機器人腿部座標系，並根據正向運動學計算，就能夠推算出腿部踩踏

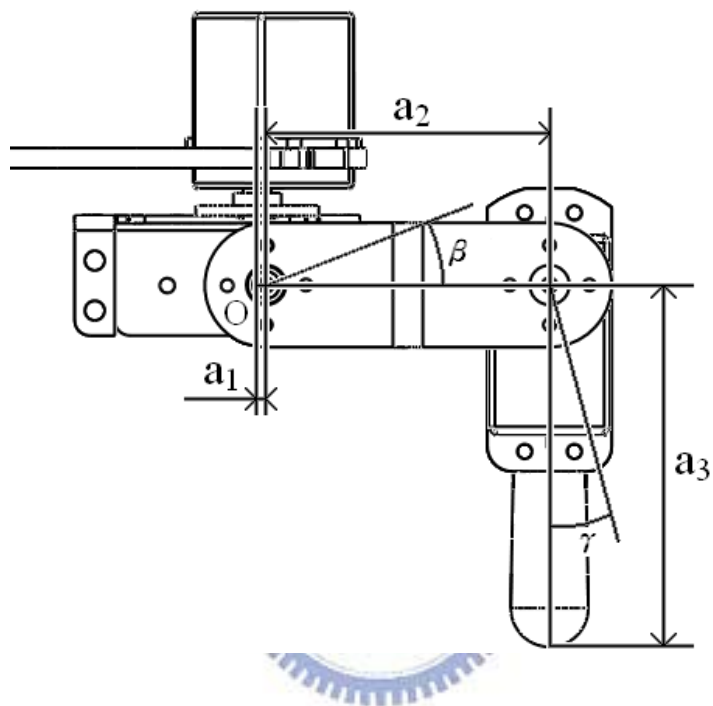


圖3.7 機器人腳部座標圖(側視)

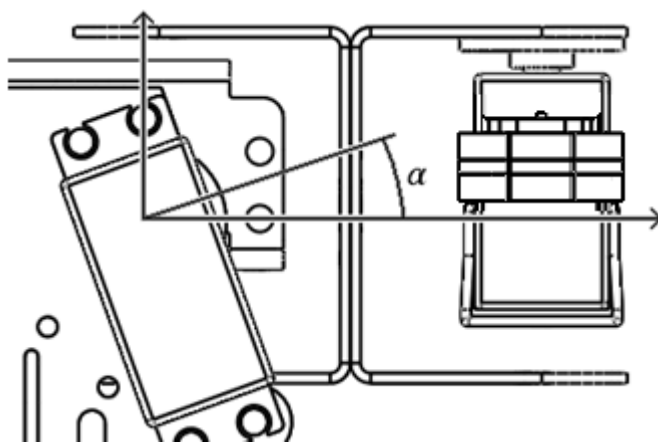


圖3.8 機器人腳部座標圖(上視)

點相對於座標系原點位置，現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 α

上臂抬放自由度：旋轉角度 β

下臂抬放自由度：旋轉角度 γ

將 O 點定義為座標原點，則關節臂下方 A 點的座標則可以下列的公式來表示：

$$A(x, y, z) = \begin{cases} x = [-a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\beta + \gamma)] \cos \alpha & (3.1) \\ y = [-a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\beta + \gamma)] \sin \alpha & (3.2) \\ z = a_2 \sin \beta - a_3 \cos(\beta + \gamma) & (3.3) \end{cases}$$

在進行位置分析前，必須建立兩組座標系，其一為系統的參考座標系 O_{XYZ} 以大寫 XYZ 表示，用以描述在機器人和地形在空間中的絕對位置和 ZMP 的計算；另一個是以機器人中心為原點，以機器人本體法向量為 z 軸，本體前方為 y 軸的座標系 O_{xyz} 以小寫 xyz 來表示，此一座標系隨四足機器人本體移動、旋轉而改變，主要用以描述機器人的四足相對於機器人中心的位置及特徵空間的計算。此二座標系，在後面即是用來連結地形與機器人間相對位置的工具。

在描述機器人的位置時，除了每一足中三個自由度 α 、 β 與 γ 的值等

12 個參數，還必須包括了機器人中心點的座標 $O_C (X_C, Y_C, Z_C)$ ，為了配合複雜地型而放大機器人限制條件的情況下，還加上一 x 軸的旋轉角 θ_C ，使機器人有前傾後仰的動作。

當在分析機器人的位置時，必須面對的第一個問題就是多參數的問題。由於單腳的參數個數為 3 個，為了能達到簡化進行位置分析的需求，使用 O_{xyz} 座標系的 xy 平面(以下以 xy 平面簡稱)之工作空間投影來進行分析。此 xy 平面的工作空間投影，其實為腳的投影長度 L 及 α 角度的變化所掃成的面積，而腳的投影長度 L 則為其它兩軸自由度 β 及 γ 的函數，即：

$$L = -a_1 + a_2 \cos \beta + a_3 \sin(\beta + \gamma) \quad (3.4)$$

再利用投影長度 L 及旋轉角度 α ，將端點座標改寫為：

$$x = L \cos \alpha \quad (3.5)$$

$$y = L \sin \alpha \quad (3.6)$$

將以上兩式聯立，可以得知 α 與 xy 關係為：

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (3.7)$$

(3.3)與(3.4)經由移項整理，得到：

$$a_3 \sin(\beta + \gamma) = L + a_1 - a_2 \cos \beta \quad (3.8)$$

$$a_3 \cos(\beta + \gamma) = a_2 \sin \beta - z \quad (3.9)$$

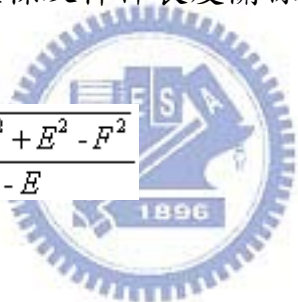
再將(3.8)與(3.9)平方相加，可知：

$$\begin{aligned} a_3^2 \sin^2(\beta + \gamma) + a_3^2 \cos^2(\beta + \gamma) &= (L + a_1 - a_2 \cos \beta)^2 + (a_2 \sin \beta - z)^2 \\ 2a_2 z \sin \beta + 2(L + a_1)a_2 \cos \beta + a_3^2 - a_2^2 - (L + a_1)^2 - z^2 & \end{aligned} \quad (3.10)$$

令

$$\begin{aligned} D &= 2a_2 z \\ E &= 2(L + a_1)a_2 \\ F &= a_3^2 - a_2^2 - z^2 - (L + a_1)^2 \end{aligned}$$

則由(3.10)式可整理出 β 與座標及桿件長度關係為：

$$\beta = 2 \tan^{-1} \frac{-D \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{F - E} \quad (3.11)$$


最後，把(3.11)代回(3.4)式，求得：

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{L + a_1 - a_2 \cos \beta}{a_3} \right) - \beta \quad (3.12)$$

由上述方程式推演所得(3.7)、(3.11)、(3.12)式，得到端點座標、連桿長度與連桿角度間關係，作為後續計算機器人行走動作資料之用。

3.4 控制規劃說明

3.4.1 控制架構說明

在機器人之控制流程中，將會先擷取地形資料，把可用之踩踏點座標輸入電腦，透過一機器人路徑產生程式進行前處理，產生機器人穿越非連續地形之動作，隨後匯入作為機器人的核心處理器存放。當機器人實際行走時，先前所存放的路徑與動作會由處理核心送出，同時，為了提升機器人處理動作的速度，在系統的規劃上會先將發出的動作訊號傳輸到中繼控制器，負責再將動作訊號分離並解譯成伺服馬達定位信號後，傳送到機器人四肢進行控制。

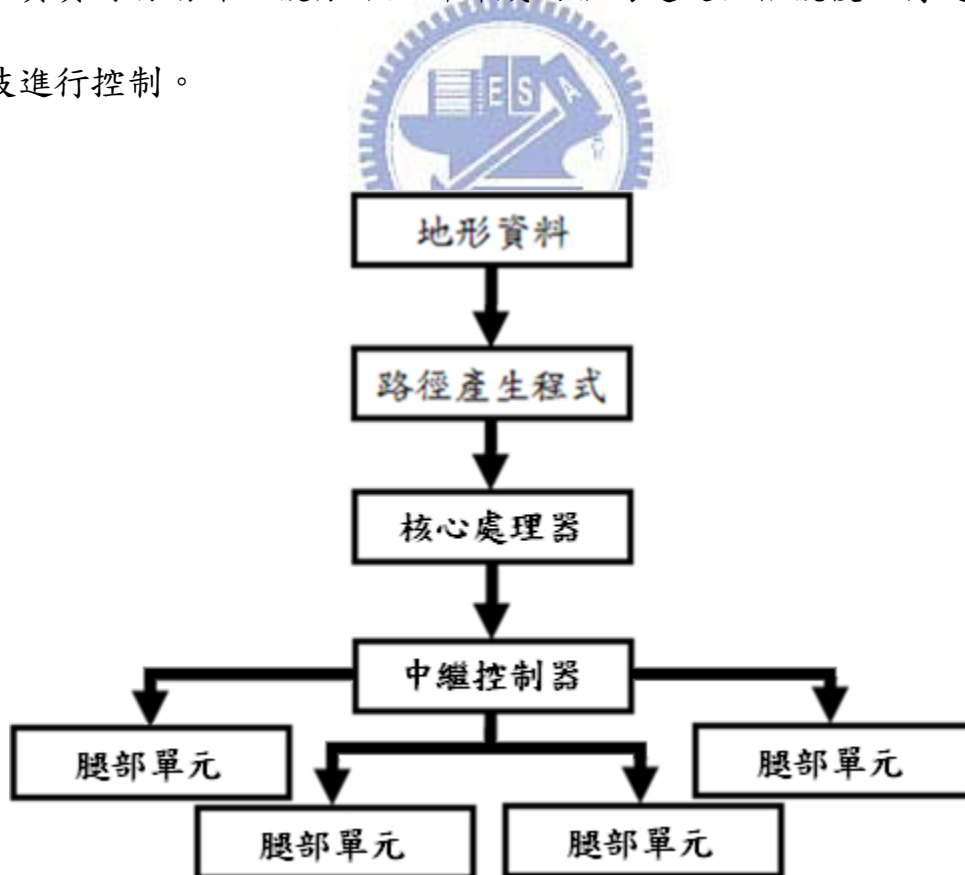


圖3.9 機器人控制流程

3.4.2 動作流程說明

在路徑程式執行的過程中，因為本研究分析的四足機器人目的為跨越河石地形，其移動速度較緩慢，所以選擇了靜態 ZMP 來作為機器人的穩定準則，這是一個相當簡易的判斷準則，當機器人的質心座標投影在另外三隻支撐腳的連線三角形中，即判定為穩定，但為避免在機器人跨步時，抬腳動作的慣性，使機器人傾斜翻倒，在本設計之應用中，會對此連線三角形向內側作偏移修正，以提高抬腳時的機身穩定度。

整個程式的詳細流程。首先，定義機器人中心點的初始點，並給定機器人的初始姿態，接著進行抬第一足前的 ZMP 檢測，若不符合則進入移動重心的模式，固定四隻腳的位置，依照 ZMP 規則對機身平衡進行修正，透過反向運動學求得四足各軸的角度，將機器人中心點位置移動至符合抬第一足前 ZMP 的中心點的位置。隨後抬升第一足，並將之移至目標踩踏點，完成單足踩踏動作，依此類推，接著第二、三、四足都進行同樣的步驟各跨一步，完成移動循環，如圖 3.10。

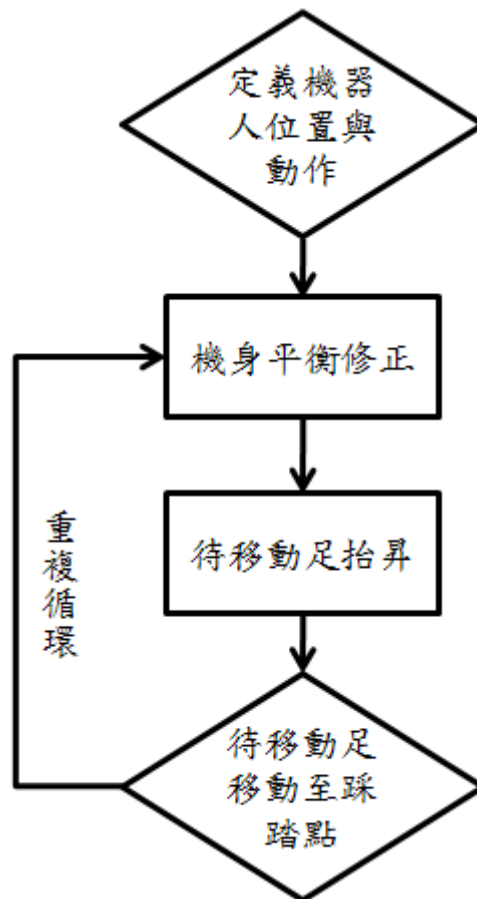


圖3.10 單循環動作流程圖

四、 實驗方法與內容

4.1 模擬流程

4.1.1 建立模型

模擬流程的第一階段，是先將產生的設計概念，以電腦輔助繪圖軟體 SolidWorks 建立初步的機構模型。建構零件模型時，使用市售零件的部分直接依照資料規格建立即可，而需要加工零件的部分，如機器人機身板與腿部上下臂的部分，在繪製時必須以可調整的參數為中心進行，如臂長及伺服馬達軸心間距，以便後續的設計變動。在完成零件的尺寸繪製後，同時指定零件的材質與密度等基本參數，以供後續計算出此機器人之物理特性進行模擬。零件繪製結束後，依照設計架構，將其附加限制條件進行組

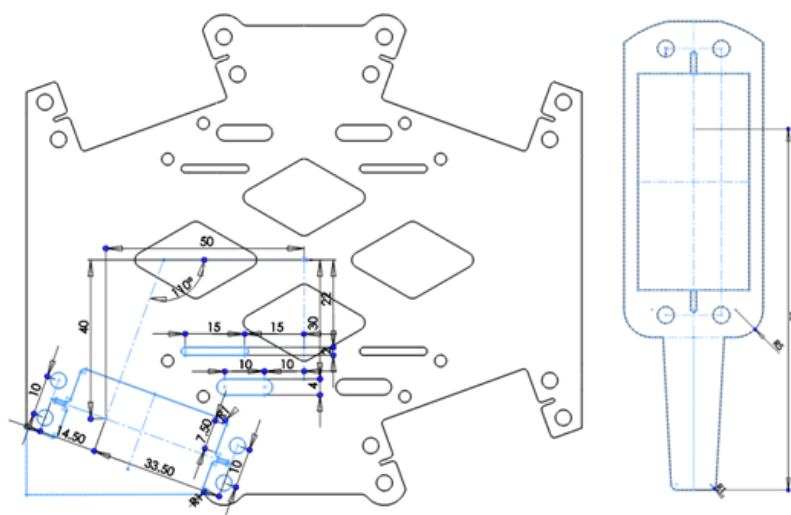


圖4.1 機器人零件草圖

合，完成機器人基礎模型的建構。

為了改善工作空間的配置，提供較廣的動作範圍，首先對上下臂桿件長度比例與工作空間進行分析，隨後將對肩部關節的旋轉角度上下限配置進行最佳化。對於上下臂桿件長度比例與工作空間分析，分為上下臂長度比值大於、小於及等於 1 進行工作空間比較。分析中，對機器人腿部的條件限制如下：

- a. 上下臂總長度為定值 100mm。
- b. 上下臂比例分別為 5:4、1:1、4:5。
- c. 依機器人人現存架構於動作所可能發生之干涉條件，將各伺服馬達之旋轉角度加以限制，上側為 $-90^{\circ}\sim 24^{\circ}$ ，下側為 $-38^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，角度方向定義請參照第三章中說明。
- d. 機器人腿部接地點必須為整體機身中最低點。

透過上述的條件限制，將保證所得工作空間被限制於可以實際應用的範圍。依照上敘之限制條件，並依圖 4.2 所設定之座標系，透過前一章所推導之座標轉換方程式，可以得到一工作空間分析圖，如圖 4.3。

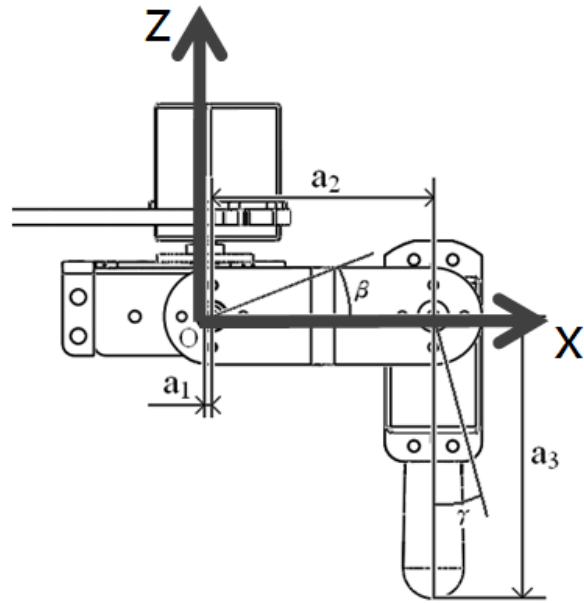


圖4.2 腿部工作空間座標系定義

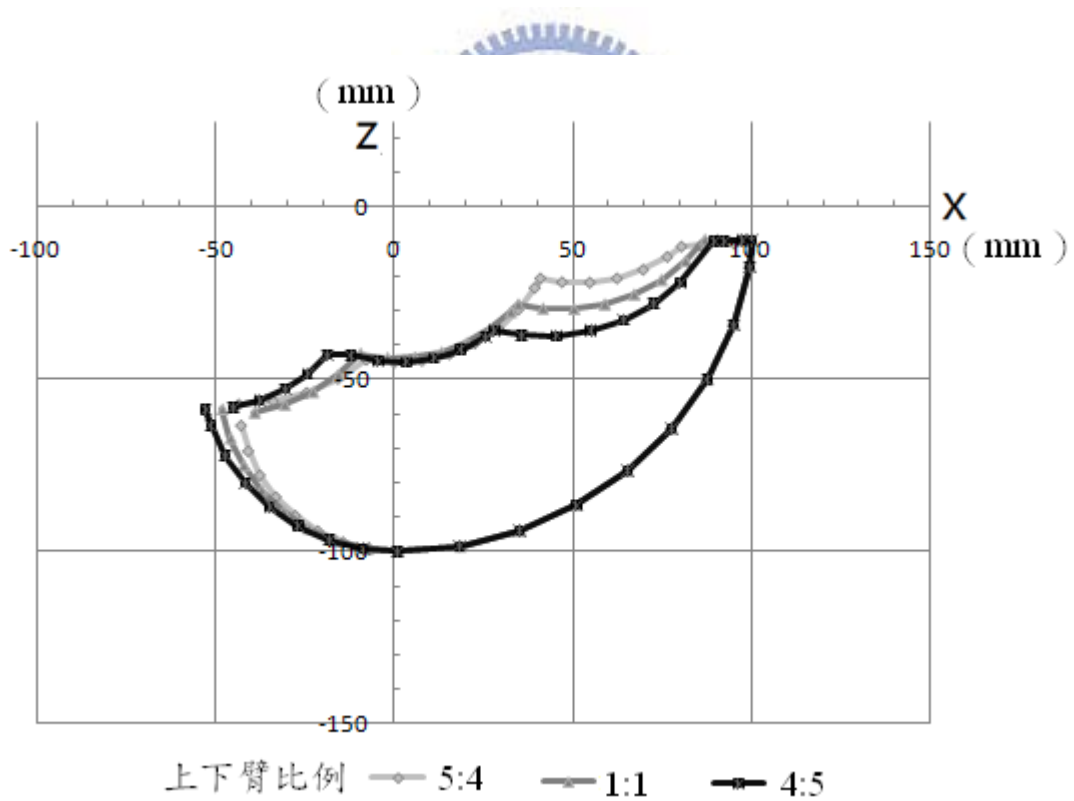


圖4.3 xz 工作空間分析圖

由工作空間分析圖可得知，下臂的比例越長，在 X 向所橫跨的區間越

長，且在 Z 向的分布較集中，因此越容易運用於機器人行走運用。是故依據分析結果，機器人之腿部配置，將採用上下臂比例 4:5 為設計基準。

對於機器人單足之工作空間，相當於將前面所得之 x-z 平面工作空間，以肩關節軸心為準，所旋轉掃出之空間。而掃出範圍之限制，則取決於機器人腿部旋轉時所可能產生之機構干涉。對於此位置之旋轉角度設計，一般常以圖 4.4 中 X 軸為中心對稱配置，但此配置在行走時會與同側腿部工作區域相干涉，使實際可使用範圍約在 $-30^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ，故在此改採一旋轉了 θ 角度之 X' 軸為配置中心，使腿部能獲得最大工作空間設計，如圖 4.5。模型建構流程最後完成之機器人模型如圖 4.6，隨後將運用於下節進行測試。

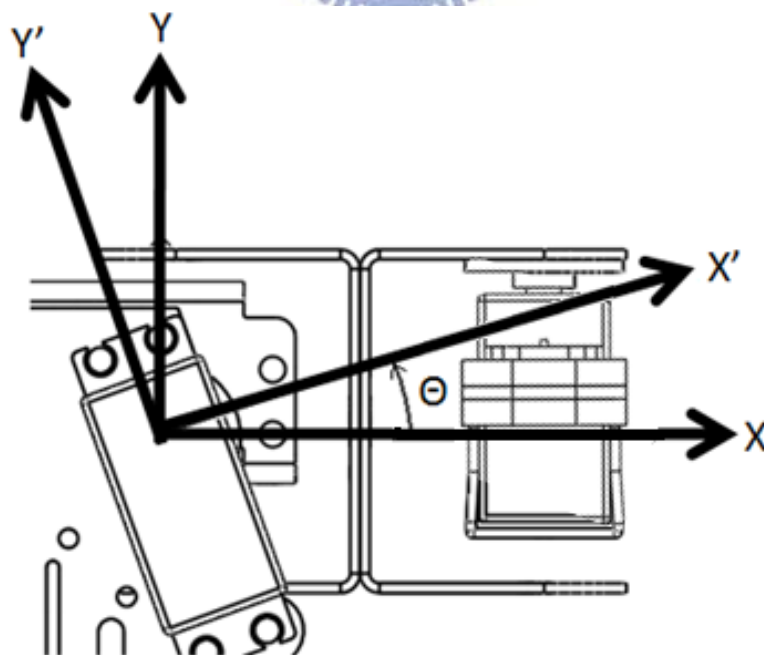


圖4.4 旋轉角度對稱軸說明

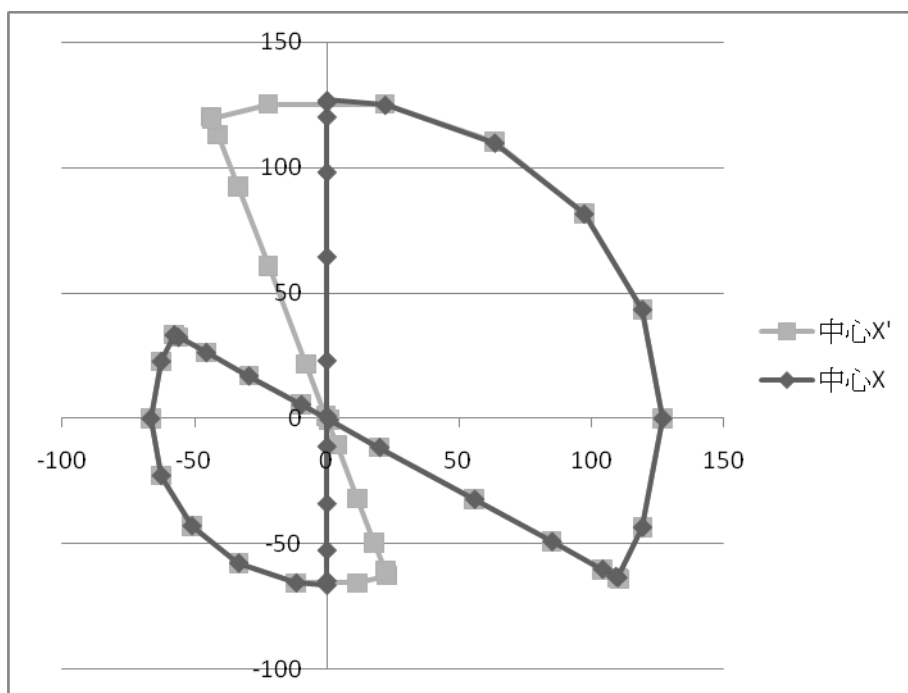


圖4.5 xy 平面工作空間分析圖

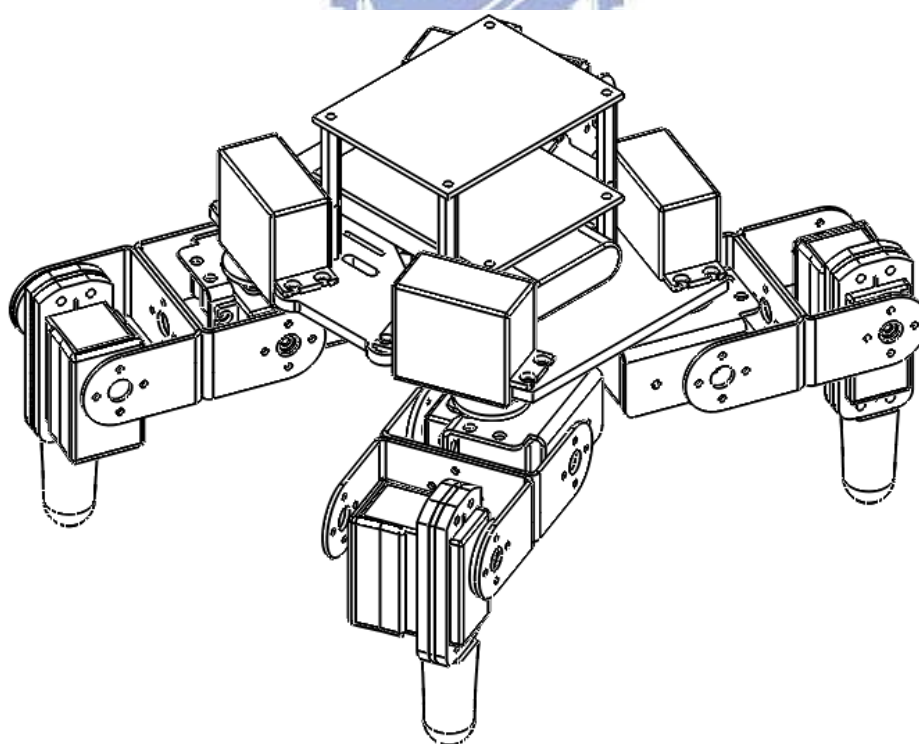


圖4.6 機器人模型建構成果

4.1.2 機構檢驗

模擬流程的第二階段，將對機器人模型進行動作空間干涉檢驗與個別零件的安全系數及應力應變分析。運用 SolidWorks 的組套件干涉檢查，先對零件組合間的干涉進行修正，再利用移動零件的碰撞偵測，設定為碰撞時停止，藉此檢驗動作時的干涉情形調整伺服馬達的旋轉角度上下限。

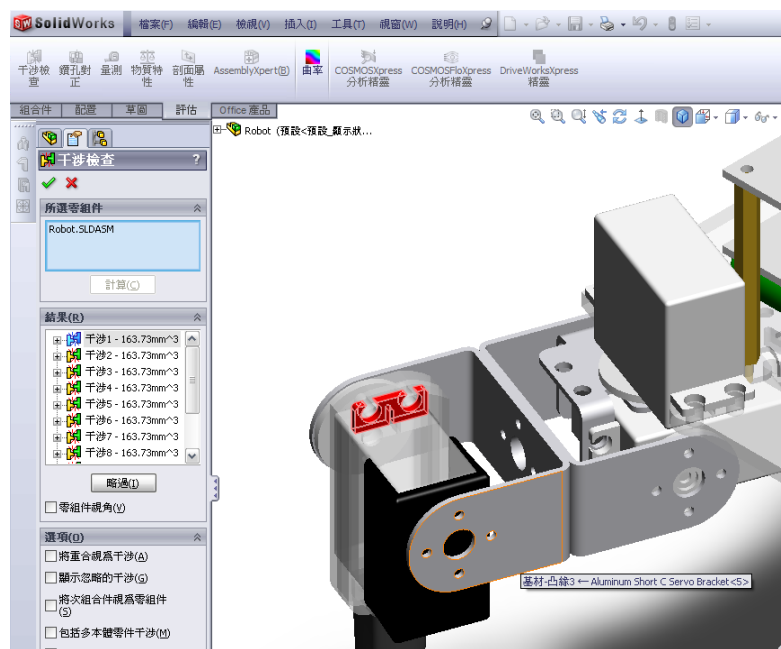


圖4.7 四足機器人干涉檢查

在前面建立模型時，已經先對零件輸入了材質與密度的物理特性，依據這些參數，可以計算出機器人各關節在動作中所承受的最大負載，藉由這些負載的資料，找出機器人桿件在運作中所可能承受之最大負載，將這些受力狀況進行模擬，如圖 4.8，施加於個別零件上，進行安全系數評估與

應力應變分析，如圖 4.9，檢查負載下各零件受力情形加以調整，整個分析流程如圖 4.10。至此，完成了一個滿足設計目標的機器人架構。

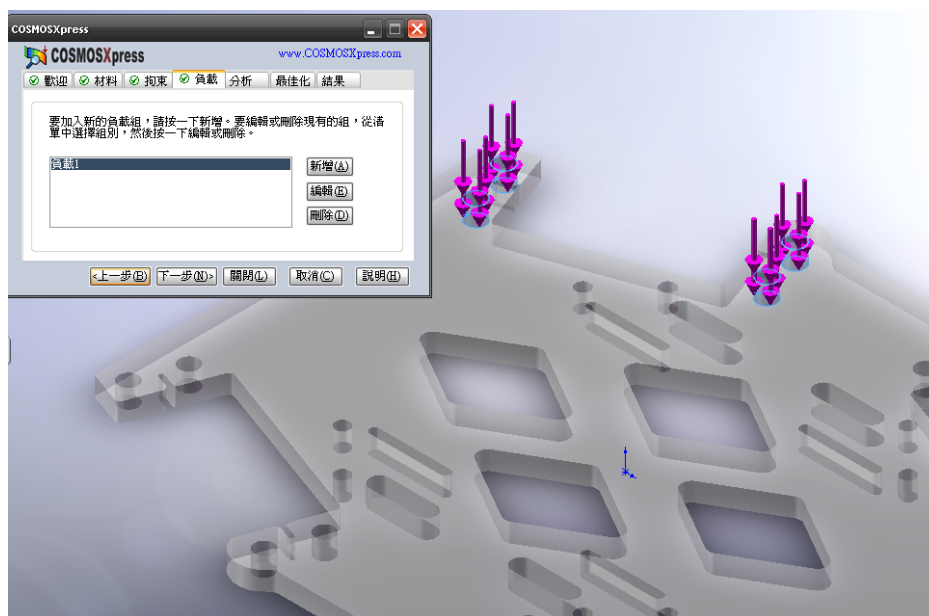


圖4.8 零件負載設定（機身板）

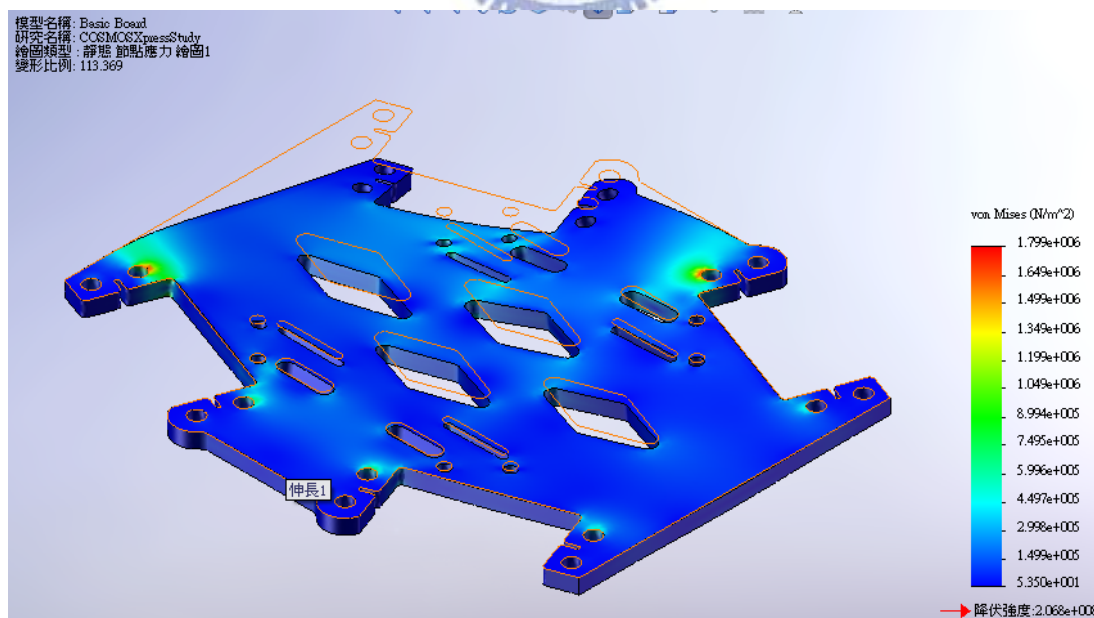


圖4.9 應力與變形分析（機身板）

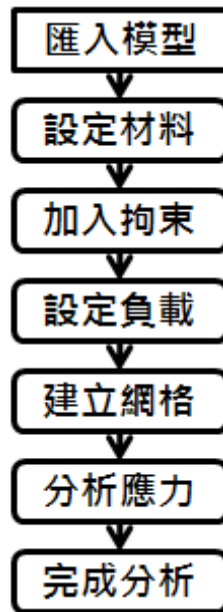


圖4.10 分析流程

4.2 機體實作

4.2.1 伺服馬達規格



為改善機器人的動作反應速度，並簡化驅動系統的控制流程，標準的微型伺服馬達有三條線，分別為：電源、接地及控制。電源線與地線用於提供內部的直流馬達及控制線路所需的能源，控制線則接收週期性的正向脈波訊號作為旋轉定位。本四足機器人架構將採用韓國 HiTEC 公司所生產之伺服馬達 HS-475HB，作為機器人平台上主要致動器系統，總共將使用十二個。表 4.1 將對此伺服馬達之規格進行說明：

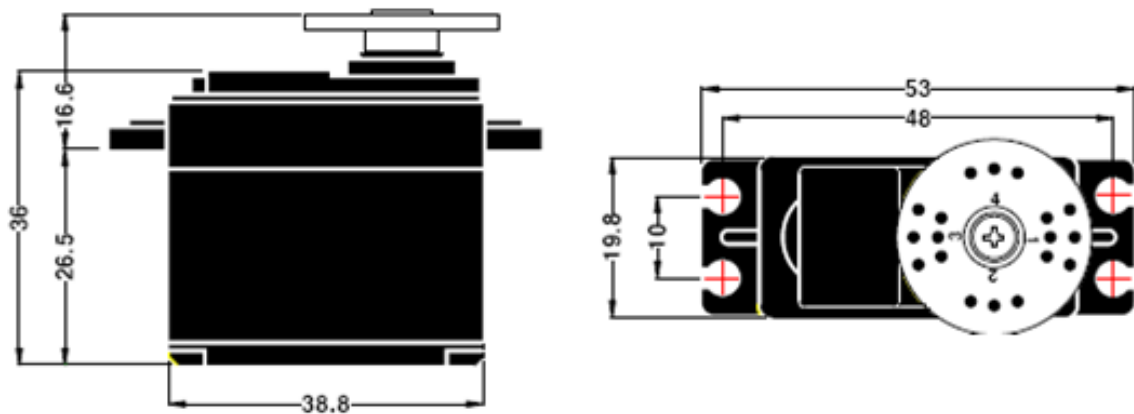


圖4.11 HiTEC HS-475HB Servo Motor 尺寸圖

表4.1 HiTEC HS-475HB Servo Motor 規格表

Control System	+Pulse Width Control 1500usec Neutral	
Operating Voltage Range	4.8V to 6.0V	
Test Voltage	at 4.8V	at 6.0V
Operating Speed	260°/sec at no load	333°/sec at no load
Stall Torque	4.4kg.cm	5.5kg.cm
Idle Current	7.4mA at stopped	7.7mA at no load
Running Current	160mA/60° at no load	180mA/60° at no load
Stall Current	900mA	1100mA
Operating Travel	One Side Pulse Traveling 900usec	
Direction	Clock Wise/Pulse Traveling 1500 to 2400usec	
Motor Type	Cored Metal Brush	
Potentiometer Type	6 Slider/Indirect Drive	
Amplifier Type	Analog Controller & Transistor Driver	
Dimensions	38.8x19.8x36mm	
Weight	40g	
Ball Bearing	Top/MR106	
Gear Material	Heavy Duty Resin	

資料來源：HITEC RCD KOREA INC [16]

4.2.2 BASIC Atom 28 晶片介紹

BASIC Atom 28 是由 BASIC MICRO 公司開發的微控制器，共有 28 個腳位，詳細定義如圖 4.12。內建有儲存單元與邏輯運算單元，有別於一般的微控制器，其本身便內建了對其編程的所需要的程式，且與現在廣為使用的 Basic Stamp 2 微處理器的腳座相容。其內部並建有迴路偵錯器，可以節省下在程式開發時，花費在規劃防錯程序的時間。下為 BASIC Atom 28 的特性：

- (1) 14K of Program Space
- (2) 368 Bytes of User / System RAM
- (3) 256 Bytes of User EEPROM
- (4) 33,000 Plus Instruction Per Second
- (5) Three Hardware Timers
- (6) Two Capture/Compare modules
- (7) Two PWM modules (10-bit)
- (8) Analog-to-Digital converter(4 channels)
- (9) Buffered Serial Port
- (10) Built in hardware
- (11) Interrupt Capable



(12) 32bit Integer Bit Math

(13) 32bit Floating Point Math

(14) NTSC Video display generation

在本設計中，為將此微處理器與其他控制架構連接，另外使用了

Lynxmotion 公司的 Mini-ABB (Atom Bot Board) 電路板作為連接。

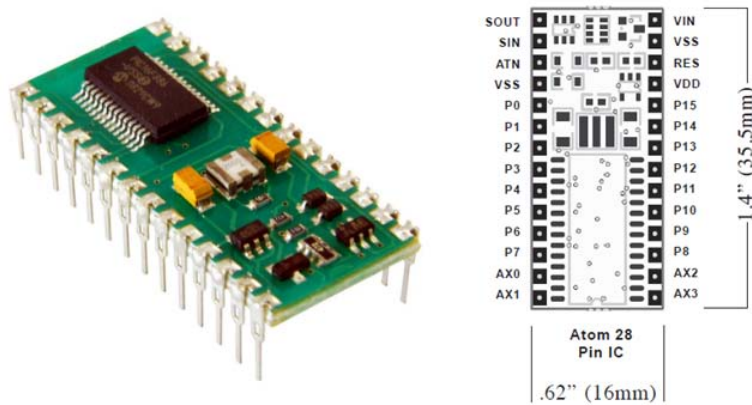


圖4.12 BASIC Atom 28

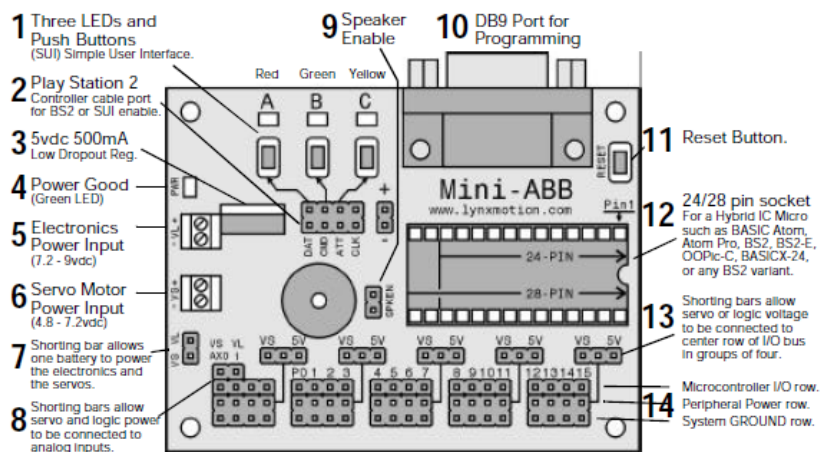


圖4.13 Mini-ABB (Atom Bot Board)

4.2.3 SSC-32 脈波產生器介紹

為了分割程序處理與伺服馬達控制兩個部分，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，如圖 4.14，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 4.2。

表4.2 SSC-32 脈波產生器規格

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.

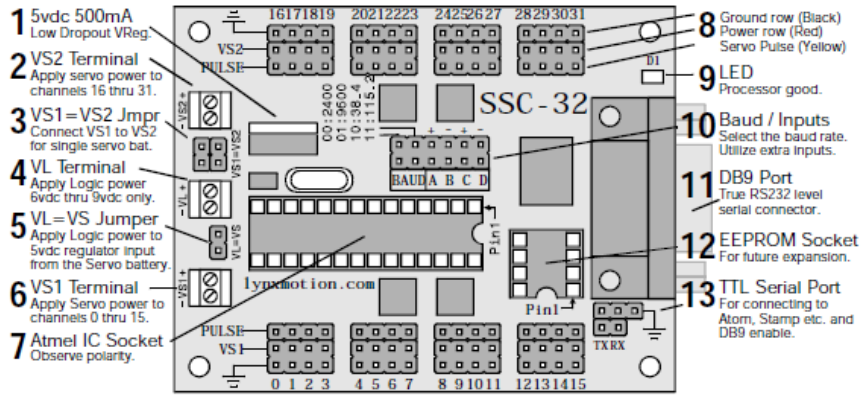


圖4.14 SSC-32 電路說明

4.2.4 伺服馬達測試與微調

關於伺服馬達的實際工作脈波與角度的換算，在原廠規格上皆已定義，但個別伺服馬達仍存在差異，需要經由測試與微調的動作進行修正。測試流程一開始，先將共計 12 顆的伺服馬達進行編號，接著使用 Visual Sequencer 軟體，透過 SSC-32，自 550usec 至 2450usec 依序送出脈波，同時量測伺服馬達角度加以記錄，隨後依照結果重新定義各伺服馬達旋轉角度的中間值與極值所需脈波長度。經過實際測試的結果，得到了表 4.3 各伺服馬達角度對應脈波時間長度資料，依據這些資料，本研究將運用 Visual Sequencer 中的 SSC-32 設定功能，對各伺服馬達重新進行定位，在經過校正後，伺服馬達便能夠直接給予旋轉角度轉換為正確的脈波長度，將供後續控制角度做為動作輸出使用。

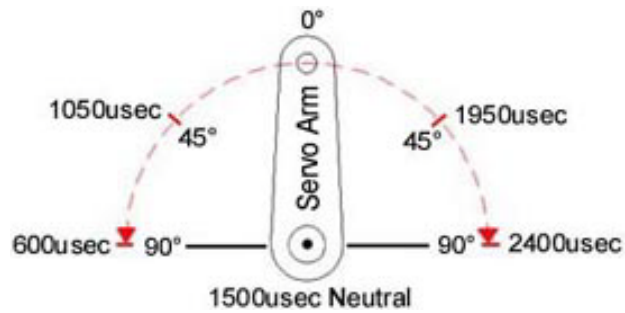


圖4.15 伺服馬達脈波換算角度（預設值）

表4.3 伺服馬達角度對應脈波長度

伺服馬達編號	角度對應脈波時間(μsec)		
	-90°	0°	90°
預設值	600	1500	2400
1	614	1514	2414
2	633	1533	2433
3	654	1554	2454
4	610	1510	2410
5	627	1527	2427
6	602	1502	2402
7	603	1503	2403
8	622	1522	2422
9	605	1505	2405
10	654	1554	2454
11	627	1527	2427
12	604	1504	2404

4.2.5 控制系統特性說明

依照在前一章中對於控制系統的規劃，在機器人實作時，本研究採用了兩種訊號的控制流程，其一是以電腦端作為動作訊號來源，在此狀態下對於訊號之運算較為快速，同時可以應用電腦的其他資源，如 Matlab 或

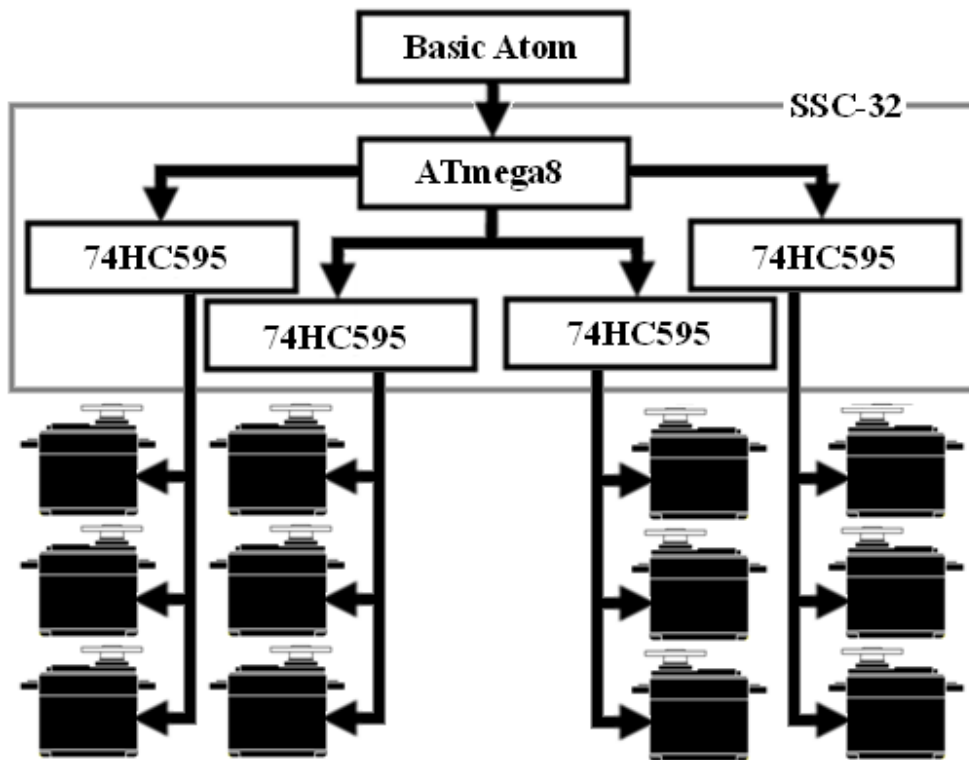


圖4.16 Basic Atom 訊號源處理流程

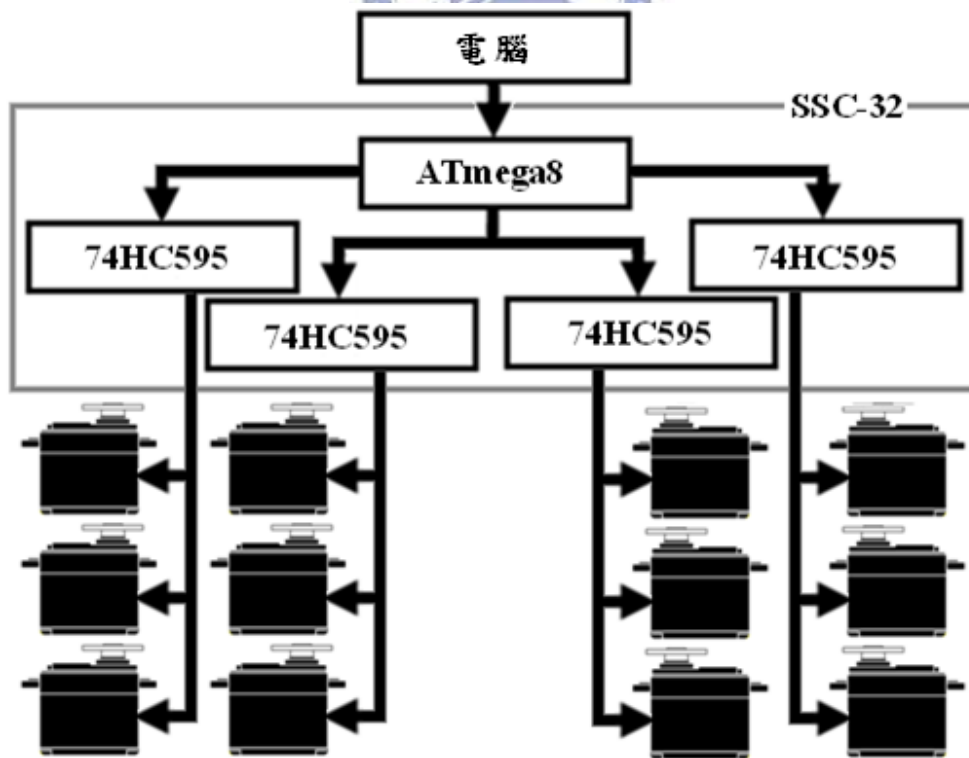


圖4.17 PC 訊號源處理流程

Labview 等軟體，以及其他硬體設備，但缺點是機器人的移動距離會受到訊號纜線的長度限制，且電纜本身的重量會影響機器人動作。其二是將之前介紹的 Basic Atom 裝設於機器人本體，由於 Basic Atom 微處理器本身具備存程式與邏輯運算能力，故可對其撰寫程式，作為動作訊號產生的核心，使機器人能夠獨立運作，不受電纜的限制，若配合感測元件，結合其他控制理論，便能夠提供即時的訊號回饋即時修正機器人的動作，使機器人進行自主控制，但在程式架構與運算速度上，受限於 Basic Atom 的能力，則是其主要缺點。以上兩者所產生的動作訊號，將經由作為機器人控制系統中繼控制器的 SSC-32，分離並解譯為脈波長度，發送至各關節的伺服馬達。依照前述之訊號處理流程，機器人運作時的控制架構可以整理為圖 4.16 與圖 4.17。



4.2.6 原型組裝

此機器人之原型建立，除前述之電路與致動元件外，部分將使用市售鋁合金鈹金結構件，及自行加工之壓克力加工件。

壓克力加工件的部分，是使用了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加工，由於受限於雷射切割機具僅具兩軸自由度，故加工零件的設計亦已配合此特性加以設計。

伺服馬達直接裝配於機器人關節部位，軸心對稱關節軸，使關節部位的動力由伺服馬達直接驅動。為了確保各關節受力準確通過軸心，在伺服馬達盤面相對側旋轉軸心位置加裝軸承，與各機械臂連接，避免因不當受力造成損壞。

最後進行安裝的是電路系統部分的線路，分別包含電源線路、伺服馬達控制線路、控制電路板訊號線，其中必須特別注意會出現在機身下側的伺服馬達線路，必須拉緊加以固定，以免在行走時拉扯到地面障礙物，妨礙機器人行走。最後組裝完成之四足機器人如圖 4.18，共十二個自由度，可直接由 PC 端以 RS-232 連線直接進行動作控制，或將設定完之路徑程式輸入微控制器獨立運作。

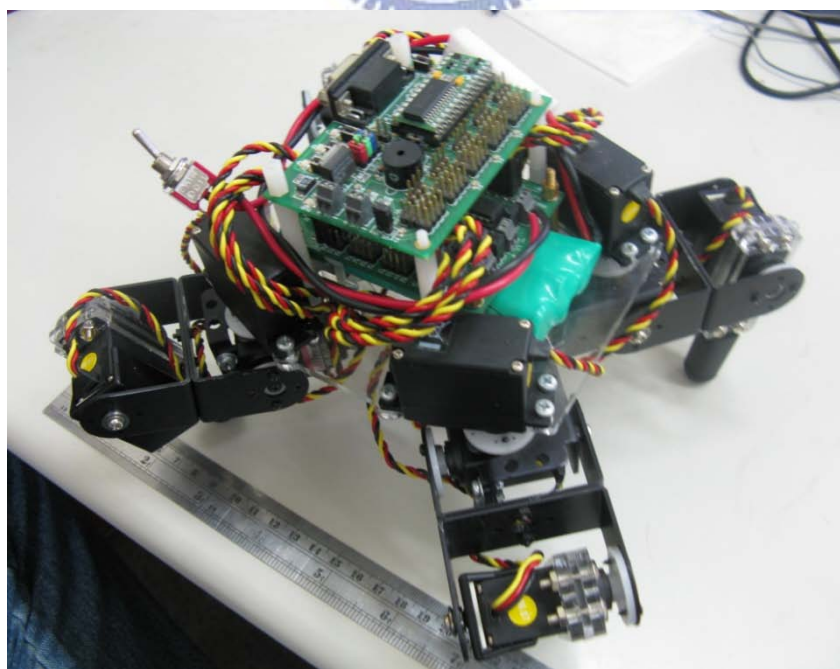


圖4.18 組裝完成之四足機器人

4.3 踏步實驗

為了檢驗此機器人架構能滿足行走所需之踏步需求，實驗第一階段先針對機器人踏步動作進行測試，基於機器人之腿部架構為中心對稱，是故在此以機器人之右前足為測試樣本，以之說明測試與動作流程。

(1) 重心偏移量 K 測試

如同第三章末所定義，機器人在移動時的動作順序，是先將機身板中心視同重心位置進行偏移，再將預定移動的腳動作。中心偏移目標點 G 位於左前一右後足連線的中垂線上，距離其中點為 K 的位置，如錯誤! 找不到參照來源。所示，設定機器人以右前足之初始位置為中心，即圖 4.20 中 5 的位置，依編號逐步移動，進行單足八方位踏步翻覆測試，以找出較佳的偏移量 K 。測試時，機器人之不動三足踏點被調整至所構成之三角形較為狹長的位置，這是因為這同時是一種較易翻覆的位置。實際測試結果如表 4.4，可知在 K 值大於 8 的情況下，有較佳的穩定性。

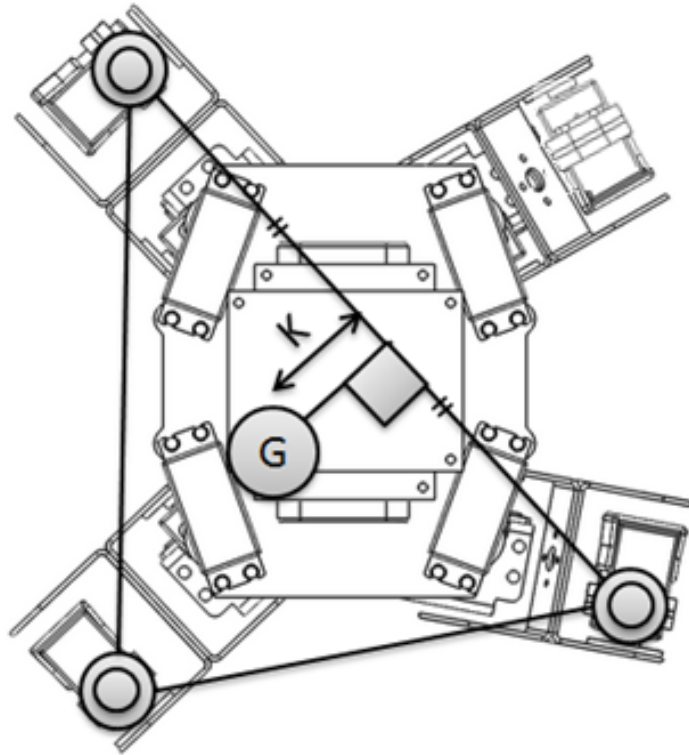


圖4.19 中心偏移量 K

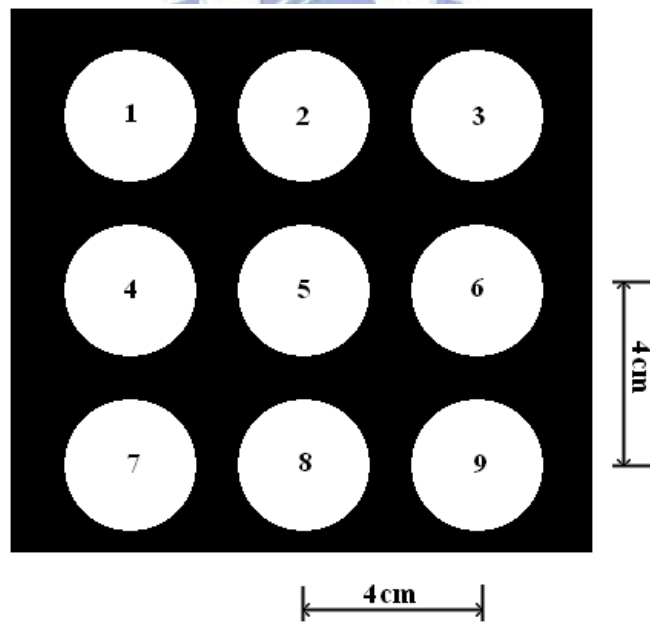


圖4.20 踩踏點位置

表4.4 偏移量 K 與踏步位置關係

K(mm) \ 位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	O	X	X
6	X	X	X	O	X	X	O	O	X
7	O	X	X	O	O	X	O	O	O
8	O	O	O	O	O	O	O	O	O
9	O	O	O	O	O	O	O	O	O
10	O	O	O	O	O	O	O	O	O

(2) 同點踩踏測試

此測試之目的為找出機器人移動時，可能產生的偏移誤差，作為後續行走動作的誤差補償基準。因此，在測試時的動作流程上，比照一般踏步方式，依次偏移重心與挪動步伐，完成後再移回預備動作，重複進行 10

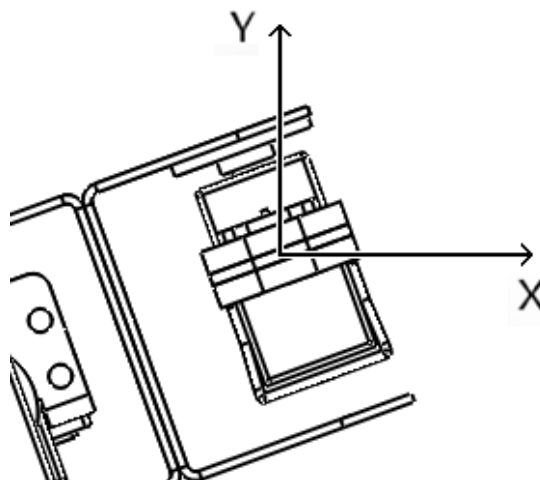


圖4.21 踏點測試座標系

次測試。測試中設定起始位置為原點，整體座標系配置參照圖 4.21。

實驗所得之測試結果如表 4.5。由表中可看出誤差之趨勢，大致上是向重心偏移方向產生，應為機器人偏移重心之動作所造成，是故在後續產生機器人行走動作時，應對部分動作造成之誤差進行補償。

表4.5 踏點誤差測試

次數 \ 偏移	X(mm)	ΔX (mm)	Y(mm)	ΔY (mm)	$r = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)}$
1	0.0		0.0		
2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0.36
3	-0.6	-0.3	-0.6	-0.4	0.50
4	-1.0	-0.4	-0.9	-0.3	0.50
5	-1.4	-0.4	-1.3	-0.4	0.56
6	-1.7	-0.3	-1.5	-0.2	0.36
7	-2.1	-0.4	-1.9	-0.4	0.56
8	-2.4	-0.3	-2.2	-0.3	0.42
9	-2.7	-0.3	-2.4	-0.2	0.36
10	-3.0	-0.3	-2.7	-0.3	0.42

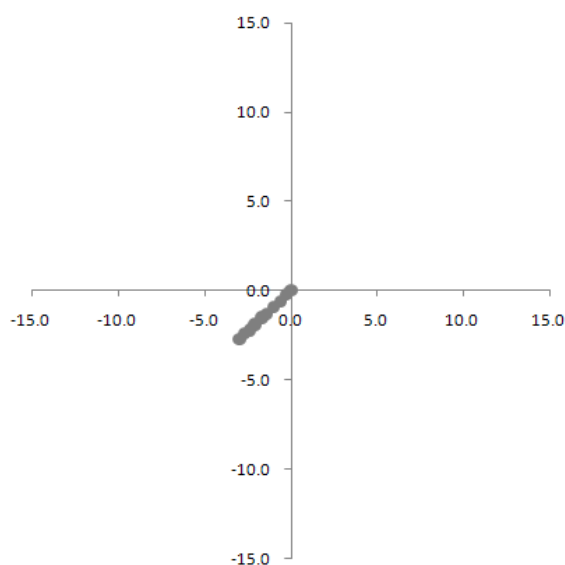


圖4.22 踏點座標分布圖

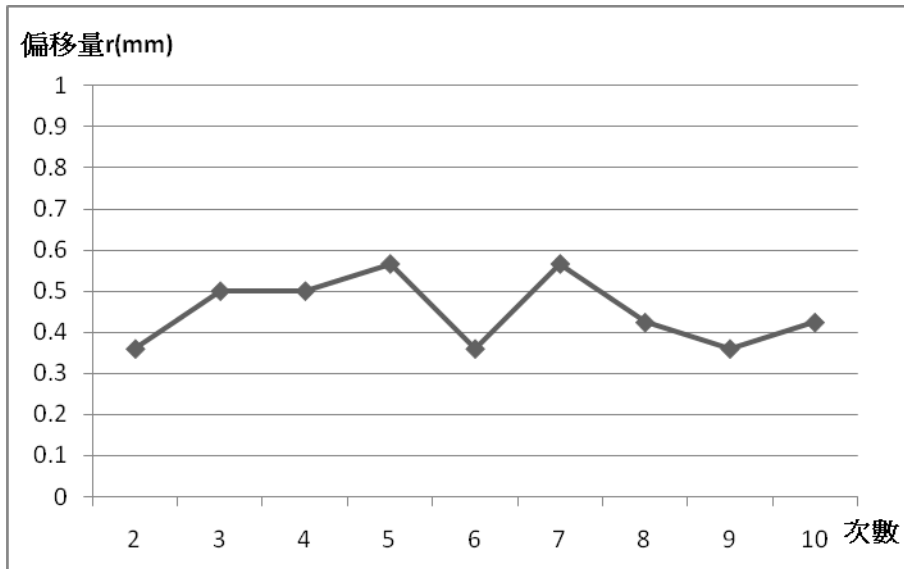


圖4.23 踏點偏移量變化圖

4.4 非連續地形設計說明

為了驗證機器人穿越非連續地形的能力，本研究設計了一非連續河石地形，如圖 4.24。在此河石地形中，取白河石為可踩踏的點，隨機安置於地形中的圓孔，作為非連續的踩踏地形。河石有兩種尺寸，直徑同樣是



圖4.24 測試用非連續河石地形

35mm，厚度分別為 4mm 與 8mm 的圓盤，河石地形板為 250mmX350mm 的白色壓克力板，上有 8X6 個圓孔，其圓心之間距離為 40mm。在行走測試中，會將河石依測試目標，隨機置於河石地形板上，作為模擬機器人行走時，可能遇到的非連續地形。

4.5 機器人行走路徑產生說明

對於機器人的行走型式，在本文中的步態為爬 (crawl)，這是一種靜態穩定的走法，基於機器人主要是在非連續的河石地形上移動，而本研究的目的是希望機器人能順利跨越河石地形，故選擇這種最穩定的步態作為機器人移動的方式。圖 4.25 為爬行流程的的步伐動作流程圖，此為波浪步態 (wave gait)，橫軸為一次循環中的動作順序，縱軸為各足編號及中心，實線表示在移動中，而虛線則表示支撐在地上接地點不動的狀態。

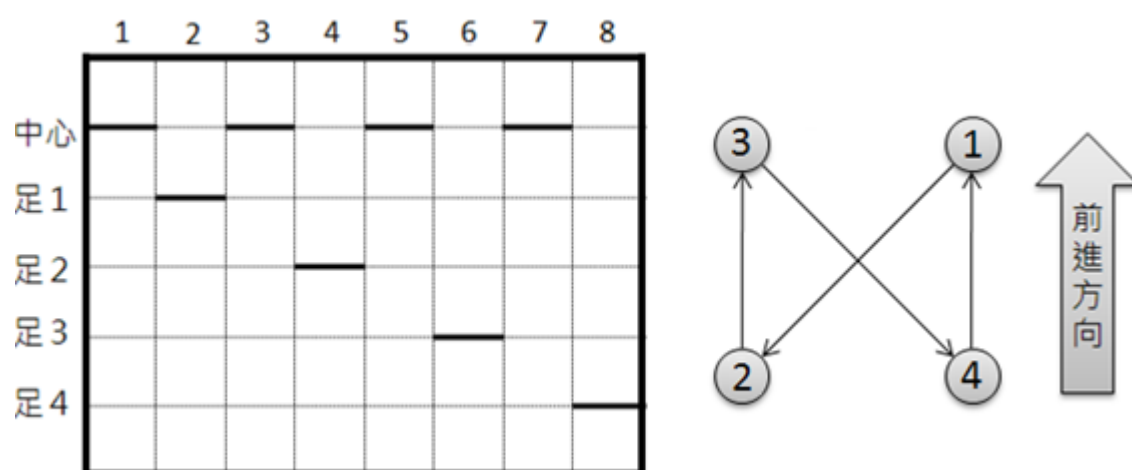


圖4.25 步伐動作流程圖

在中心移動的時候則是四隻腳支撐於地面，利用地面的磨擦力來偏移，機器人的重心必須移動到支撐腳所構成的三角形範圍內，使得在跨步的時候，機器人能夠維持靜態的穩定。當一個循環完成時，機器人中心點所移動的距離為四次移動中心的距離總和。

針對連續的路徑產生，本文中規劃了兩種路徑產生方式，分別以不同的流程產生。第一套路徑產生方式，是先將機器人在初始位置時，左後腳的踩踏點定義為座標原點，依機身方向定義座標系，將目標地形上可踩踏點之座標輸入路徑產生系統，隨後依前一章所建立機器人座標與旋轉角度轉換規則，建立座標與動作轉換程式，輔以之前實驗所得之誤差資料，以輸入之座標資料計算出機器人行走於地形時，各關節的角度動作，依序組合為機器人穿越地形的行走動作。第二套路徑產生方式，則是先依機器人機構建立簡化的骨架模型，同時附加機身中心相對於地面之投影點於機身上，並按照測試用地形架構建立虛擬的地形模型，如圖 4.26。隨後根據地形資料，排列作為踏點的河石模型，同時一並將行走時的機身中心偏移路徑投影點產生於地形上，完成如圖 4.27 的地形，再利用 SolidWorks 中的結合功能，將機器人模型方向設定與行走方向相同，並將機器人機身板設定與地面保持水平，接著依照步伐，將機器人之中心投影點、四肢端點與地面模型上的河石及機身中心移動路徑結合，在每次結合動作完成後，使用 SolidWorks 的量測功能，將各關節之角度記錄下來，把所有步伐依序登錄

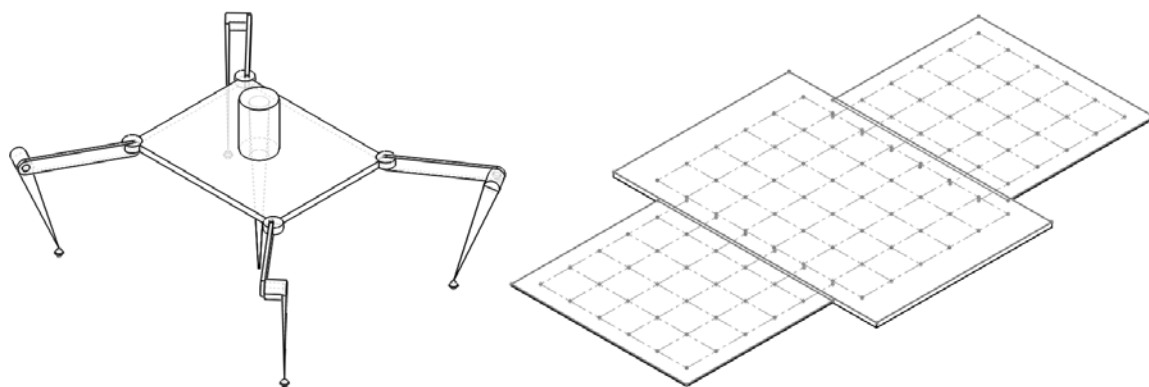


圖4.26 路徑產生用模型

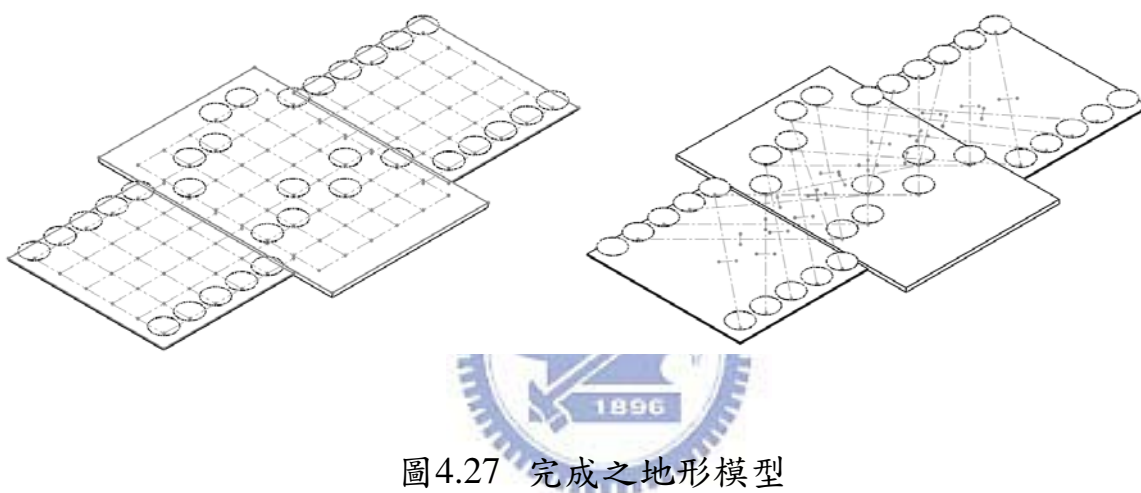


圖4.27 完成之地形模型

完成後，得到機器人穿越路徑動作資料。

實驗室另有一團隊在研發不同的路徑產生系統，則是以第一套系統為基礎，運用 ANFIS 理論，將大量機器人動作資料預先匯入系統，使系統自動學習動作邏輯，隨後將學習完成之系統，經由類似於前一套路徑產生程式之操作流程，以較快的速度將地形資料轉換為穿越動作，將於未來與本研究建構之四足機器人系統結合。

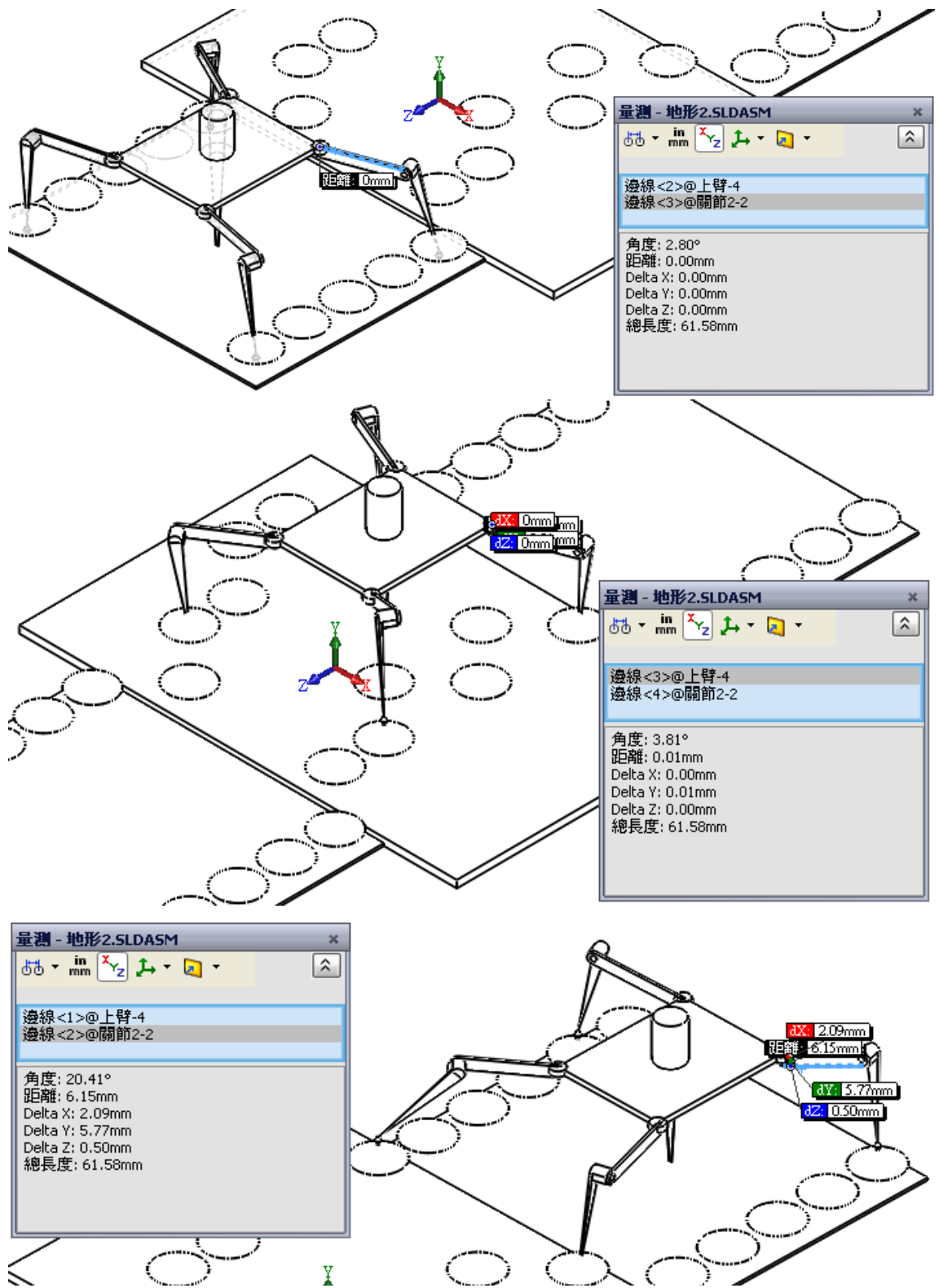


圖4.28 動作量測過程

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O															
1	PROJECT;	SEQUENCE;	STEP;	PIN0;	PIN1;	PIN2;	PIN3;	PIN14;	PIN15;	PIN16;	PIN17;	PIN18;	PIN29;	PIN30;	PIN31;	T0;	T1;	T2;	T13;	T14;	T15;	T16;	T17;	T18;	T29;	T30;	T31;	TMAX;		
2	20090713;	000001;	000001;	26.50;	-0.47;	-6.43;	-6.43;	-0.47;	26.50;	26.50;	-0.47;	-6.43;	-6.43;	-0.47;	26.50;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
3	20090713;	000001;	000002;	21.89;	-2.51;	-13.42;	-6.75;	-0.53;	37.93;	16.07;	-0.23;	4.56;	1.72;	-0.03;	31.11;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
4	20090713;	000001;	000003;	21.89;	-2.51;	-13.42;	-6.75;	-0.53;	37.93;	16.07;	-0.23;	4.56;	-15.48;	20.29;	31.11;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
5	20090713;	000001;	000004;	21.89;	-2.51;	-13.42;	-6.75;	-0.53;	37.93;	16.07;	-0.23;	4.56;	27.57;	19.92;	-13.64;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
6	20090713;	000001;	000005;	21.89;	-2.51;	-13.42;	-6.75;	-0.53;	37.93;	16.07;	-0.23;	4.56;	9.55;	-1.13;	-13.64;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
7	20090713;	000001;	000006;	14.37;	-3.02;	-14.46;	-3.17;	-0.11;	41.42;	10.87;	-0.55;	6.90;	9.40;	-1.09;	-8.78;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
8	20090713;	000001;	000007;	14.37;	-3.02;	-14.46;	-3.17;	-0.11;	41.42;	10.87;	20.34;	24.65;	9.40;	-1.09;	-8.78;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	
9	20090713;	000001;	000008;	14.37;	-3.02;	-14.46;	-3.17;	-0.11;	41.42;	44.60;	17.49;	-0.39;	-9.40;	-1.09;	-8.78;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
10	20090713;	000001;	000009;	14.37;	-3.02;	-14.46;	-3.17;	-0.11;	41.42;	44.60;	-2.15;	16.87;	9.40;	-1.09;	-8.78;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
11	20090713;	000001;	000010;	8.78;	-1.09;	9.40;	16.87;	-2.15;	44.60;	41.42;	-0.11;	3.17;	-14.46;	-3.02;	14.37;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
12	20090713;	000001;	000011;	8.78;	-1.09;	9.40;	-0.39;	17.49;	44.60;	41.42;	-0.11;	3.17;	-14.46;	-3.02;	14.37;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
13	20090713;	000001;	000012;	8.78;	-1.09;	9.40;	-24.65;	20.34;	10.87;	41.42;	-0.11;	3.17;	-14.46;	-3.02;	14.37;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
14	20090713;	000001;	000013;	8.78;	-1.09;	9.40;	-6.90;	-0.55;	10.87;	41.42;	-0.11;	3.17;	-14.46;	-3.02;	14.37;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
15	20090713;	000001;	000014;	-14.56;	-0.89;	-8.58;	4.56;	-0.23;	16.07;	37.93;	-0.53;	6.75;	-13.42;	-2.51;	21.89;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
16	20090713;	000001;	000015;	-14.56;	20.11;	-26.49;	4.56;	-0.23;	16.07;	37.93;	-0.53;	6.75;	-13.42;	-2.51;	21.89;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
17	20090713;	000001;	000016;	29.58;	20.27;	-15.18;	4.56;	-0.23;	16.07;	37.93;	-0.53;	6.75;	-13.42;	-2.51;	21.89;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;
18	20090713;	000001;	000017;	29.58;	-0.04;	2.01;	4.56;	-0.23;	16.07;	37.93;	-0.53;	6.75;	-13.42;	-2.51;	21.89;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;	500;

圖4.29 穿越路徑動作資料



4.6 行走實驗

實驗的第二階段，是針對完成的機器人進行測試，內容將針對機器人的行走能力、高度變化適應能力、非連續地形適應能力進行測試。同時，為了驗證本研究之控制架構具備獨立行走的能力，在各項測試中將分別就電腦控制與 Basic Atom 控制兩種情況進行測試，將其間差異將以討論。

4.6.1 直線平坦地形行走測試

直線平坦地形行走測試所使用的地形如圖 4.30，實驗一開始先將地形資料加以座標化，套用至前一節所說明的路徑產生規則，並依此所產生之

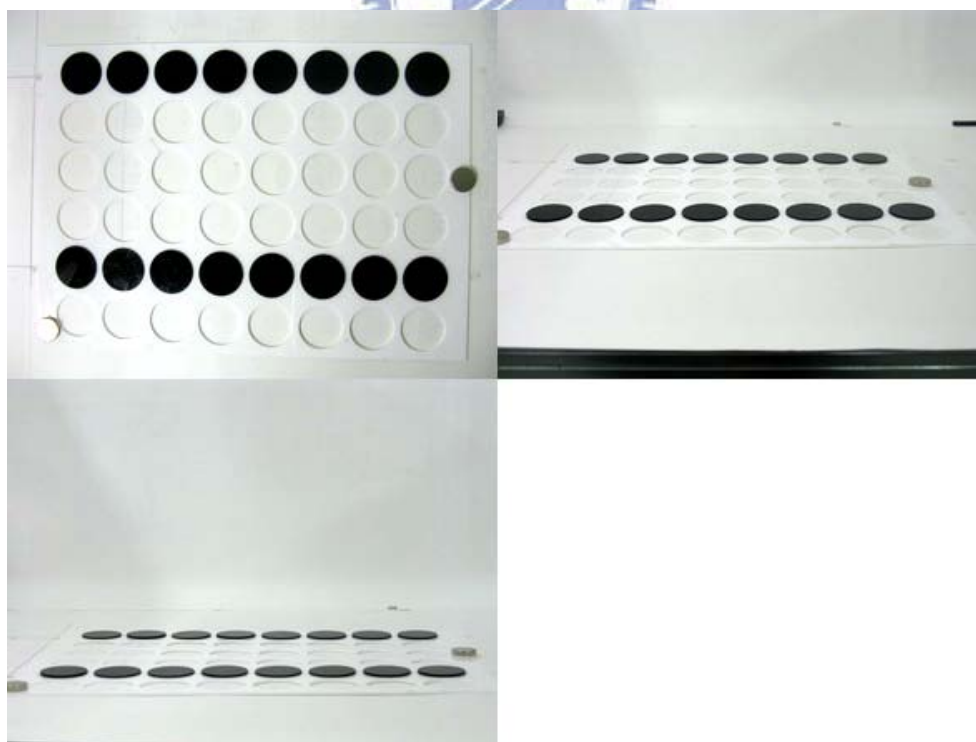


圖4.30 測試用直線平坦地形

機器人行走動作資料，進行直線平坦地形實際行走測試。首先進行的電腦控制測試結果如圖 4.31，行走之步伐大致正確。隨後進行將測試過之步伐匯入機器人處理器進行獨立行走測試，測試結果如圖 4.32，與前次測驗大致相同，證實在此架構下，機器人可完成平地直線行走的目標。

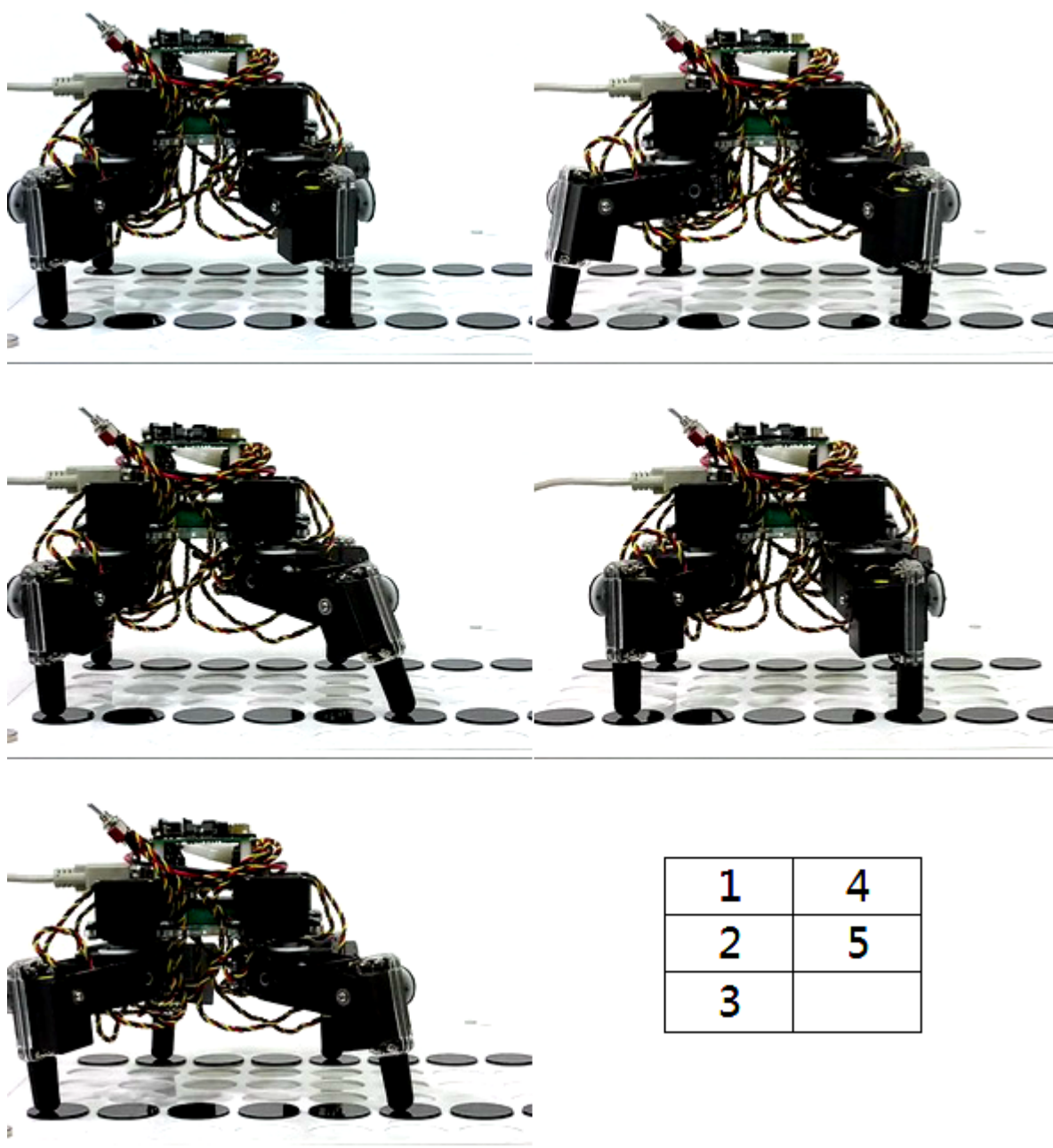


圖4.31 直線平坦地形單一行走循環（電腦控制）

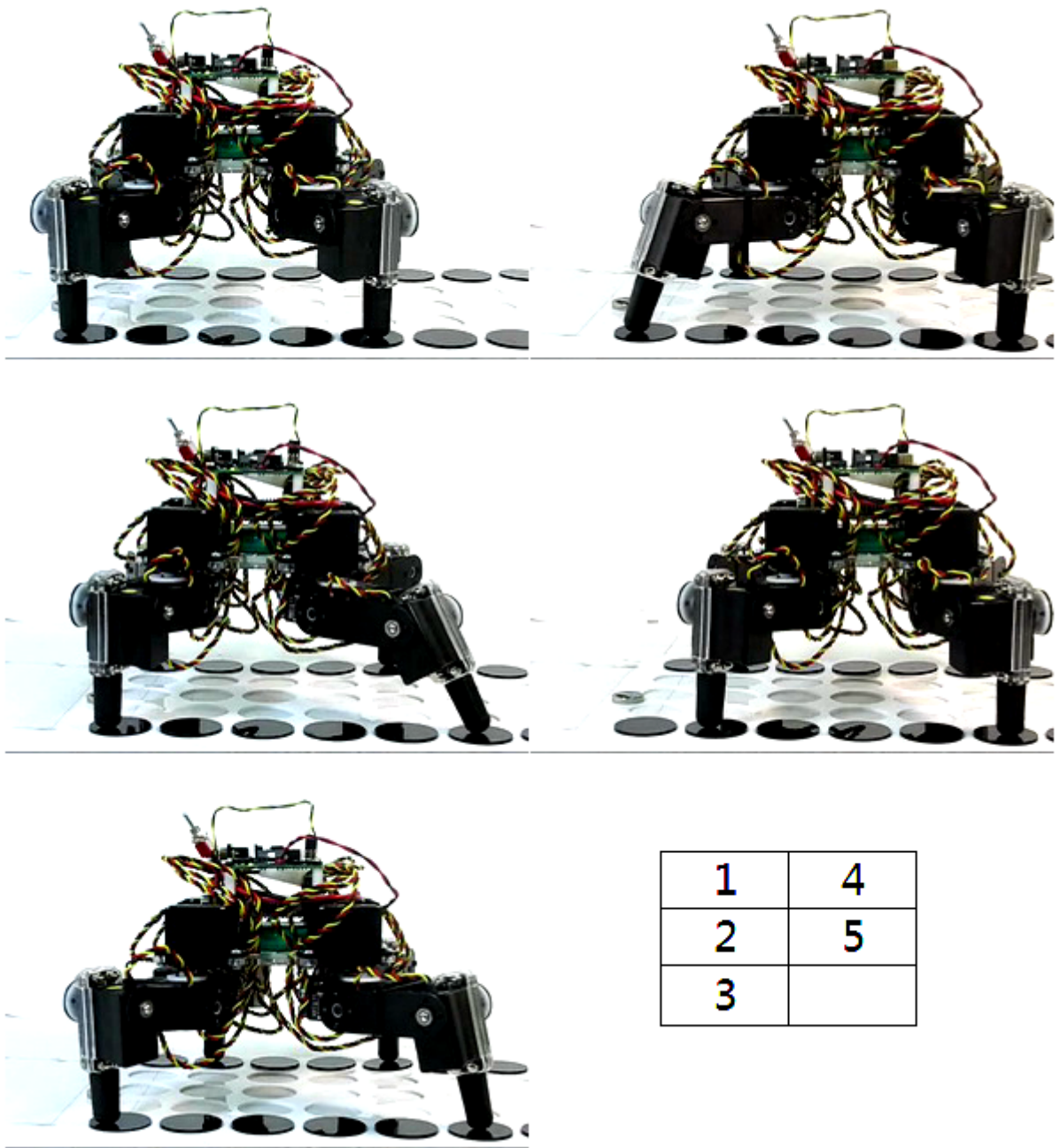


圖4.32 直線平坦地形單一行走循環（獨立行走）

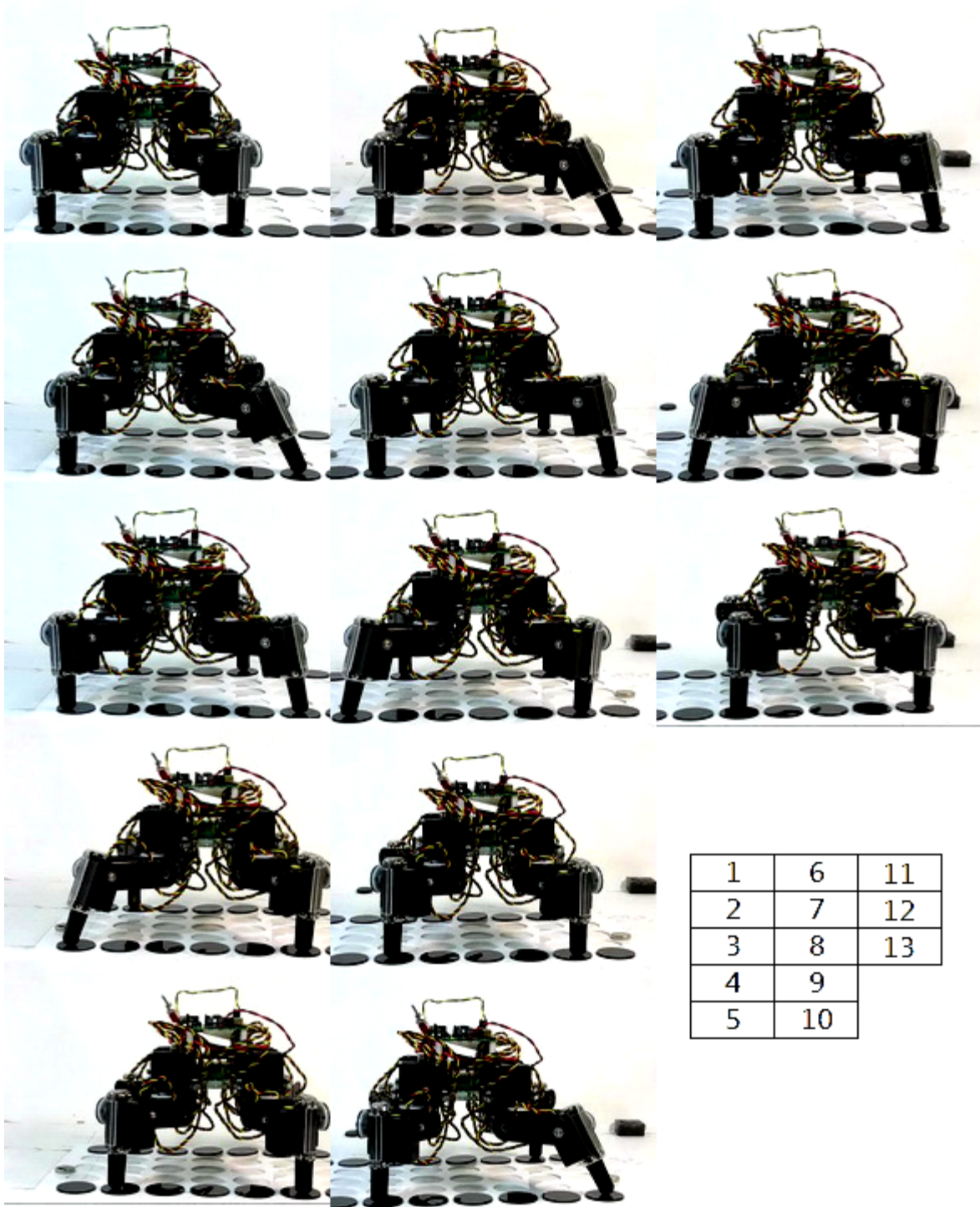


圖4.33 直線平坦地形實際行走完整步態

4.6.2 直線非平坦地形行走測試

本測試所使用之直線非平坦地形如圖 4.34，大致上與前項測試流程相同，但為驗證機器人於不同地形高度下之行走能力，故將部分河石之高度進行更換，進行直線非平坦地形行走測試。

由於此測試中，地形存在高度變化，是故需注意機器人穿越動作時的足部軌跡，避免造成跨步中與地面擦撞的問題。考量到這個問題，對於機器人的踏步軌跡規劃，在此選用了口字形軌跡，以避免發生碰撞問題。先行完成之有線實驗結果如圖 4.35，在確認動作無誤後，進行獨立行走實驗，實驗結果如圖 4.36，動作與由電腦控制時幾乎相同。

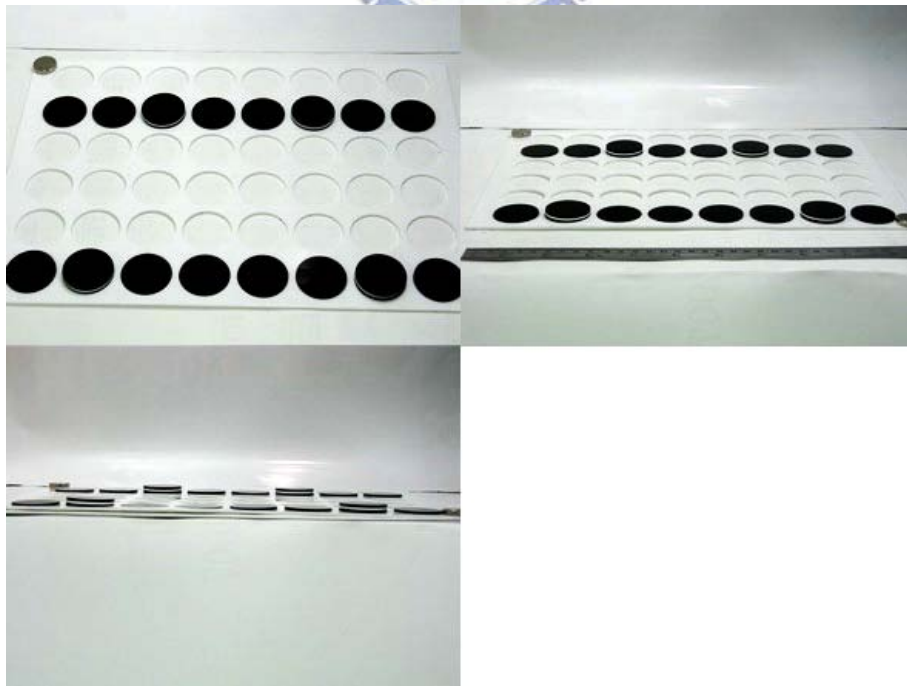


圖4.34 測試用直線非平坦地形

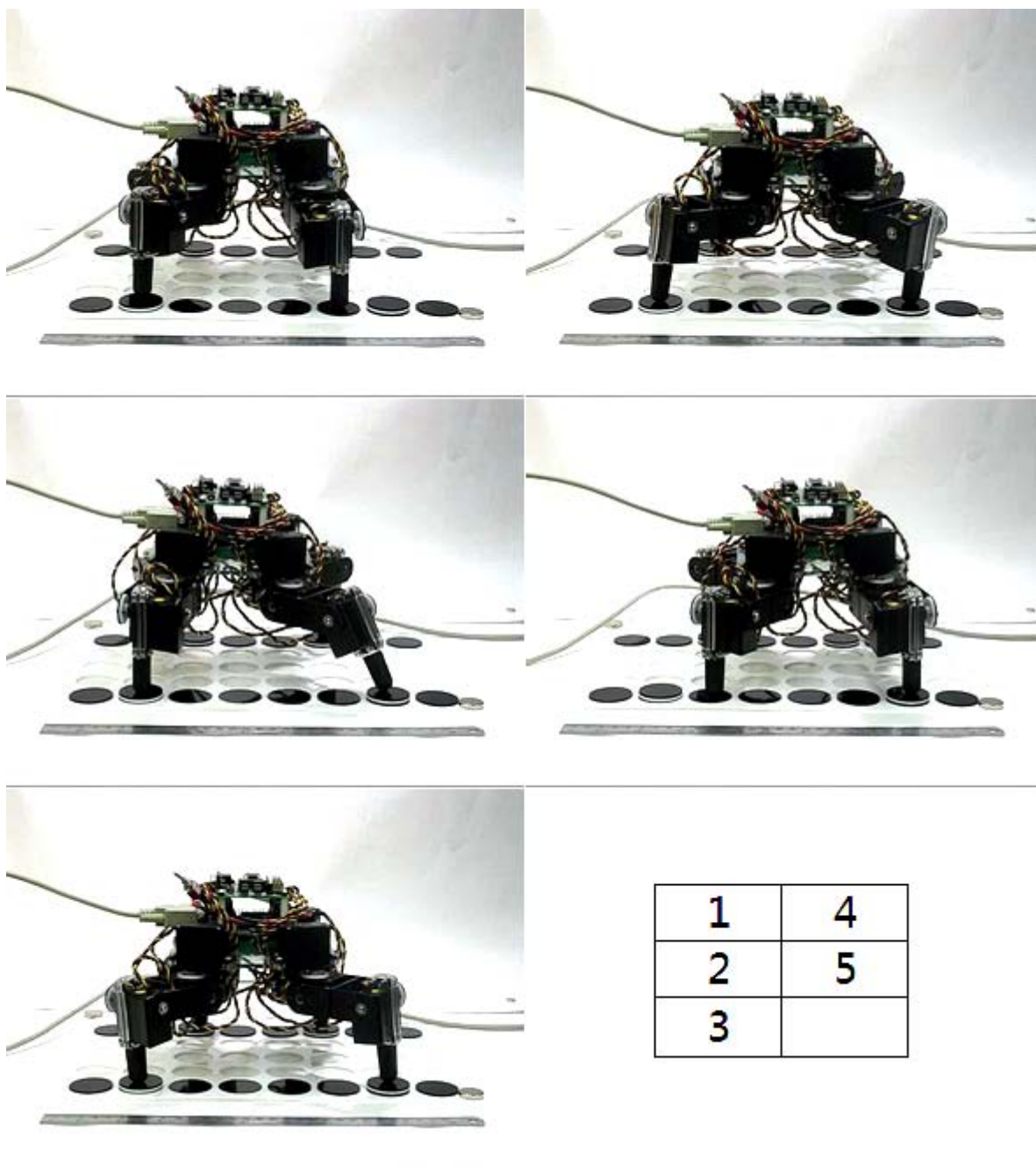


圖4.35 直線非平坦地形單一行走循環（電腦控制）

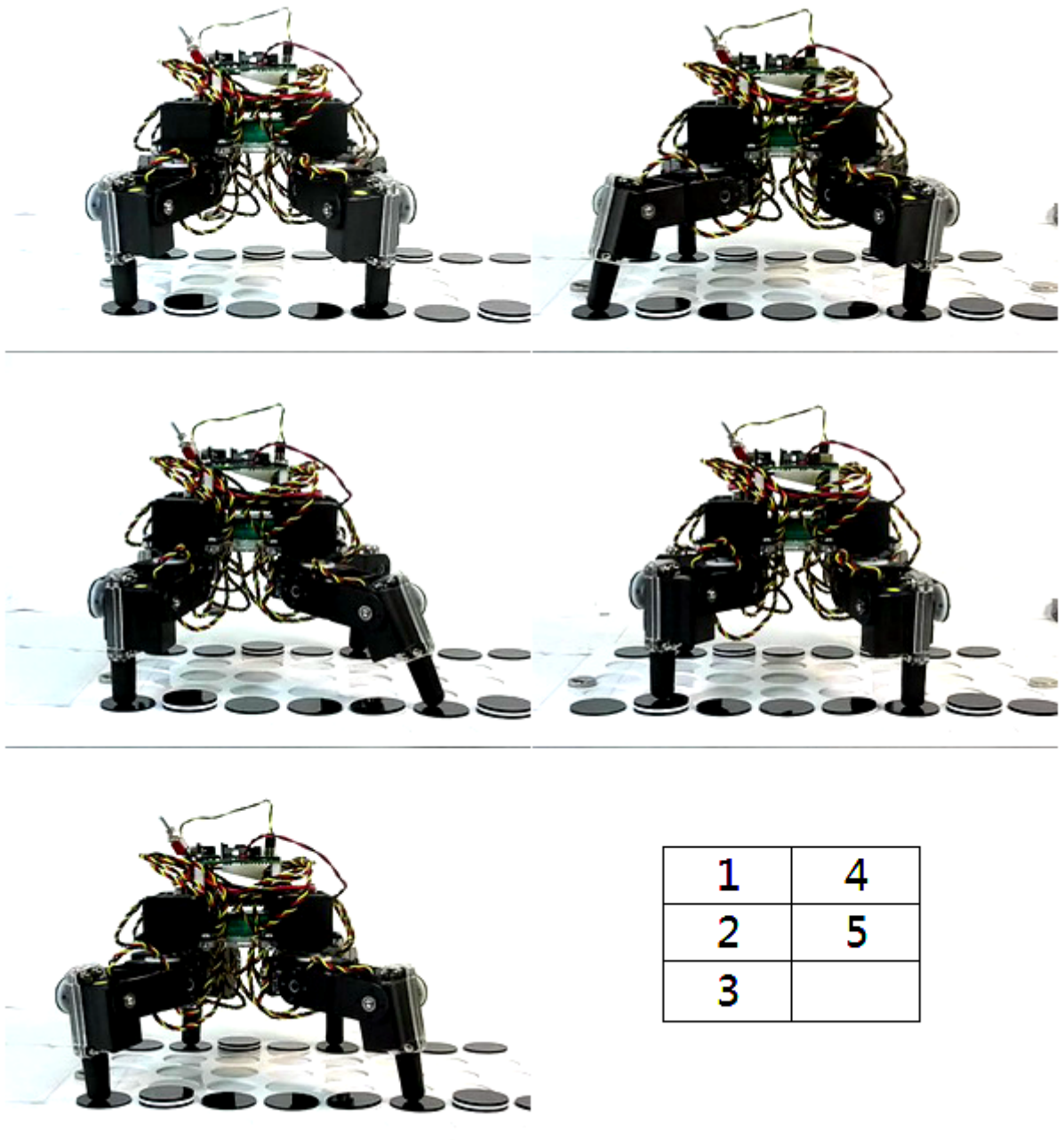


圖4.36 直線非平坦地形單一行走循環（獨立行走）

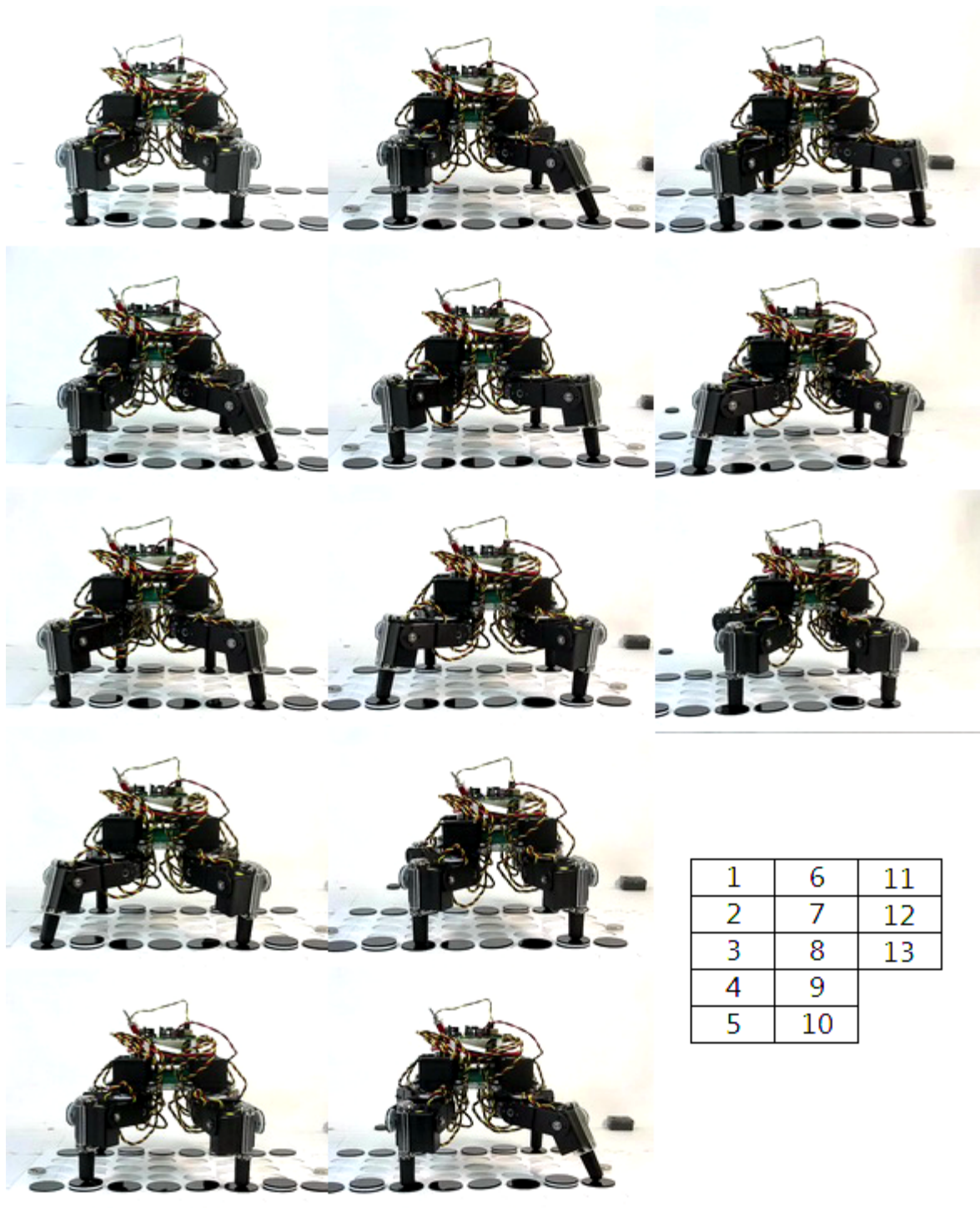


圖4.37 直線非平坦地形實際行走完整步態

4.6.3 非連續平坦地形行走測試

非連續平坦地形的行走測試，所使用的地形為隨機插入河石所產生，如圖 4.38，同樣在將地形資料依流程處理後進入路徑產生流程，得到穿越此地形之動作規劃。將完成之穿越動作由電腦端直接進行控制實驗，得到結果如圖 4.39，雖然由於動作循環次數較多，導致動作的累積誤差造成踩踏偏移偏離原先設計的踏點，但大致上還在可容許的誤差範圍內，完成了行走流程，隨後依前項測試動作進行獨立行走測試，得到的結果如圖 4.40，與電腦端控制測試結果相近。

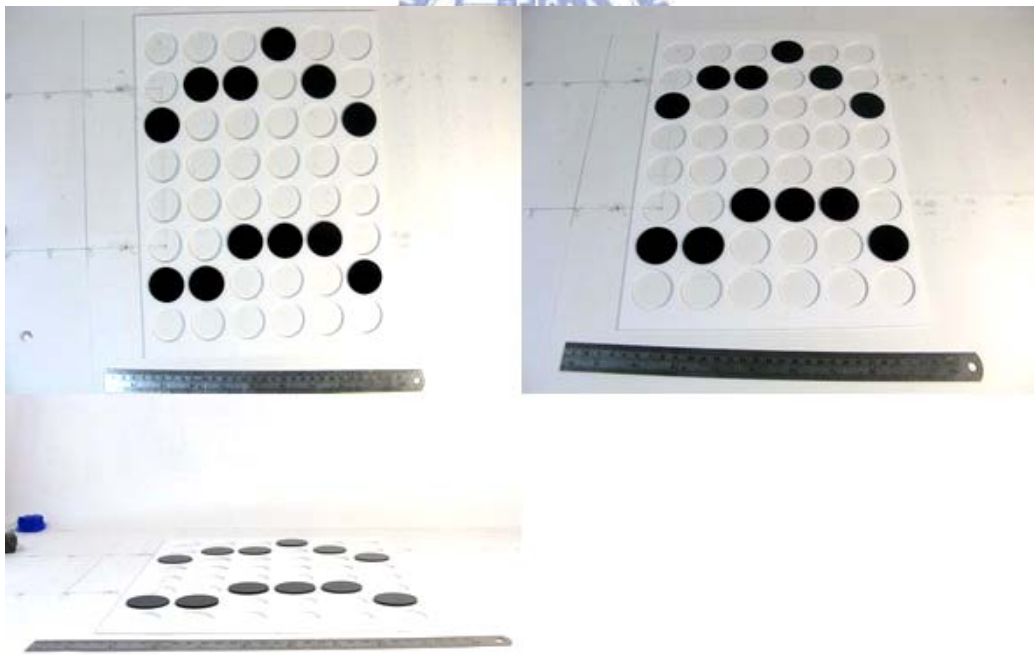


圖4.38 測試用非連續平坦地形

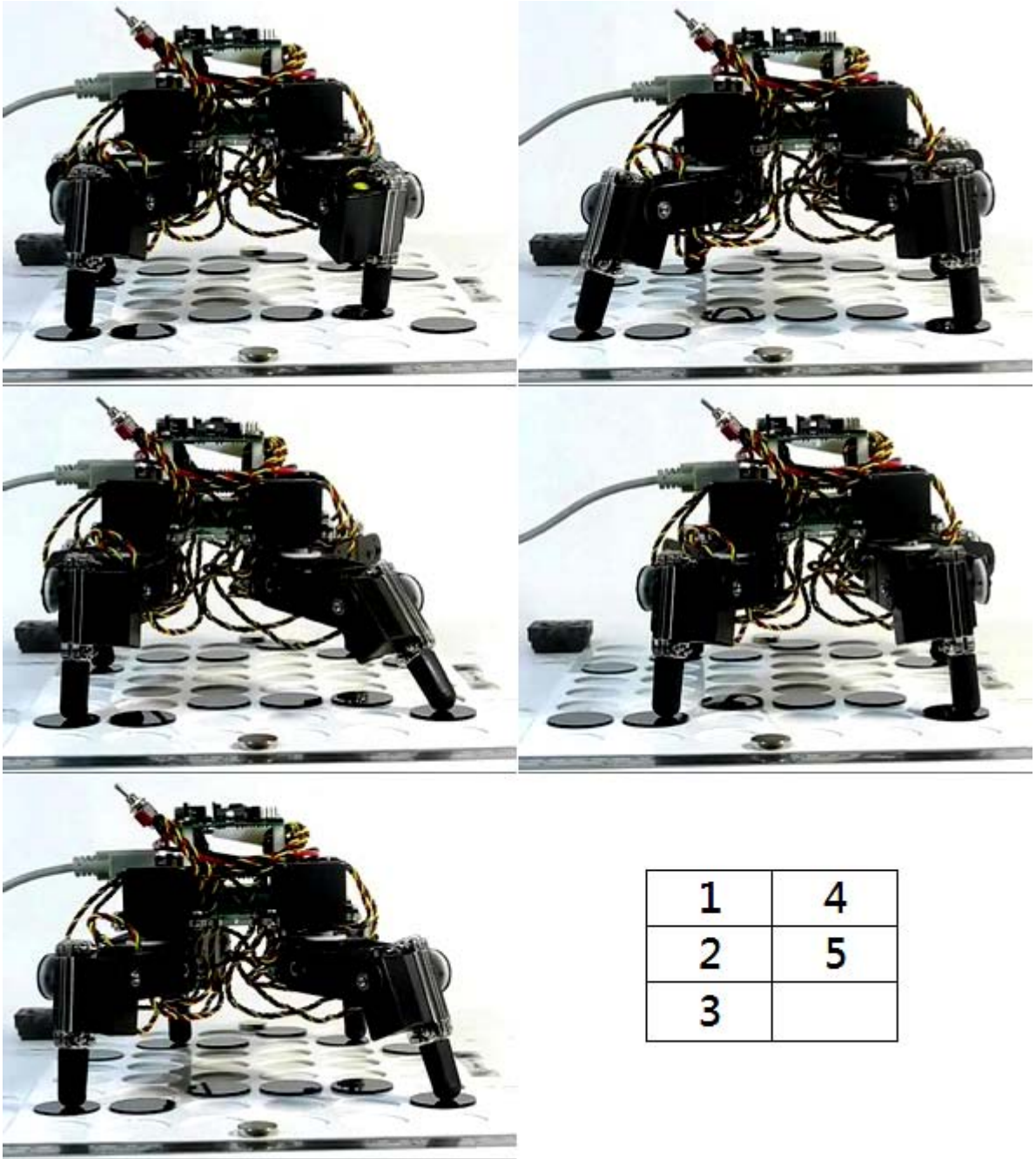


圖4.39 非連續平坦地形單一行走循環（電腦控制）

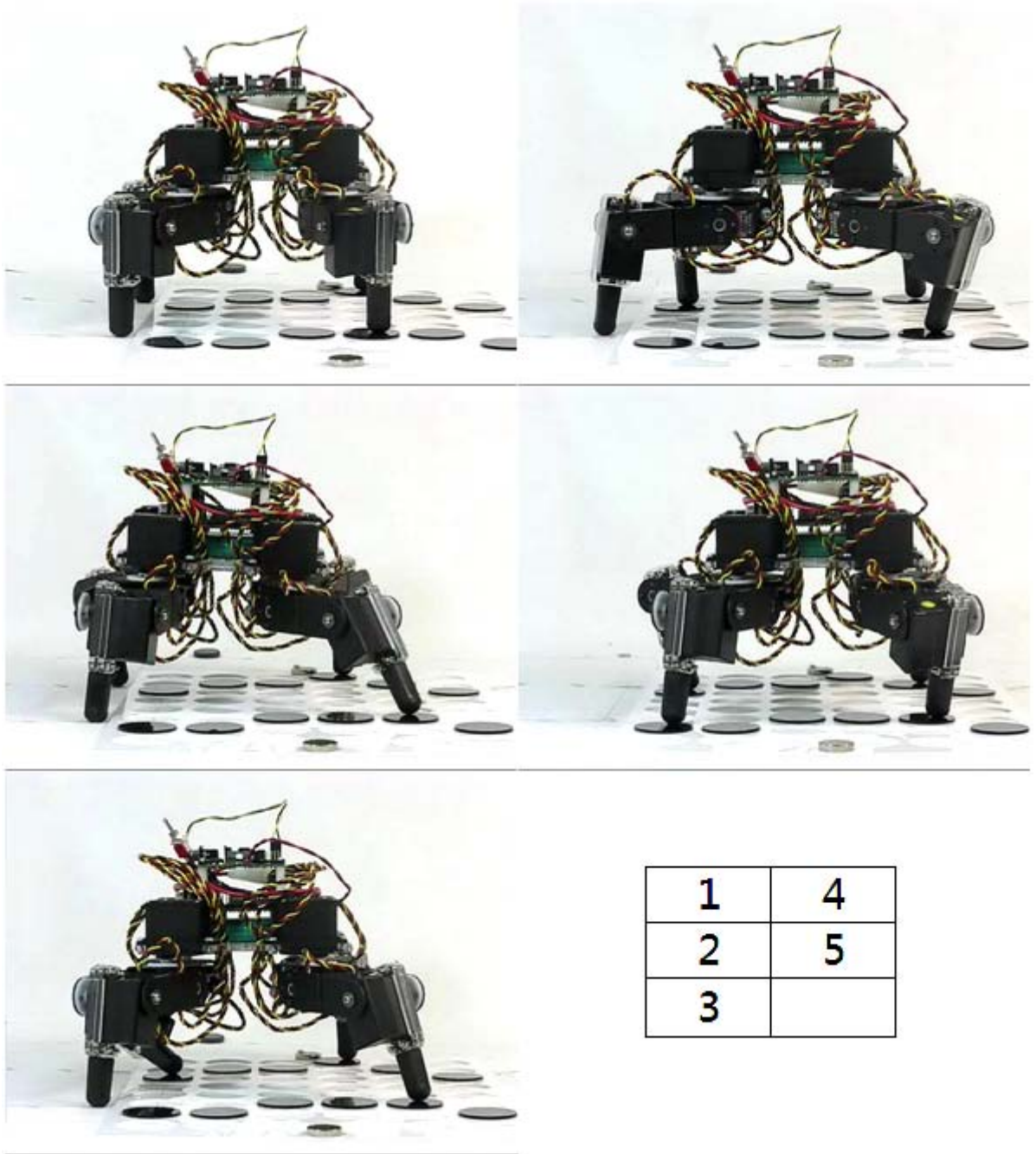


圖4.40 非連續平坦地形單一行走循環（獨立行走）

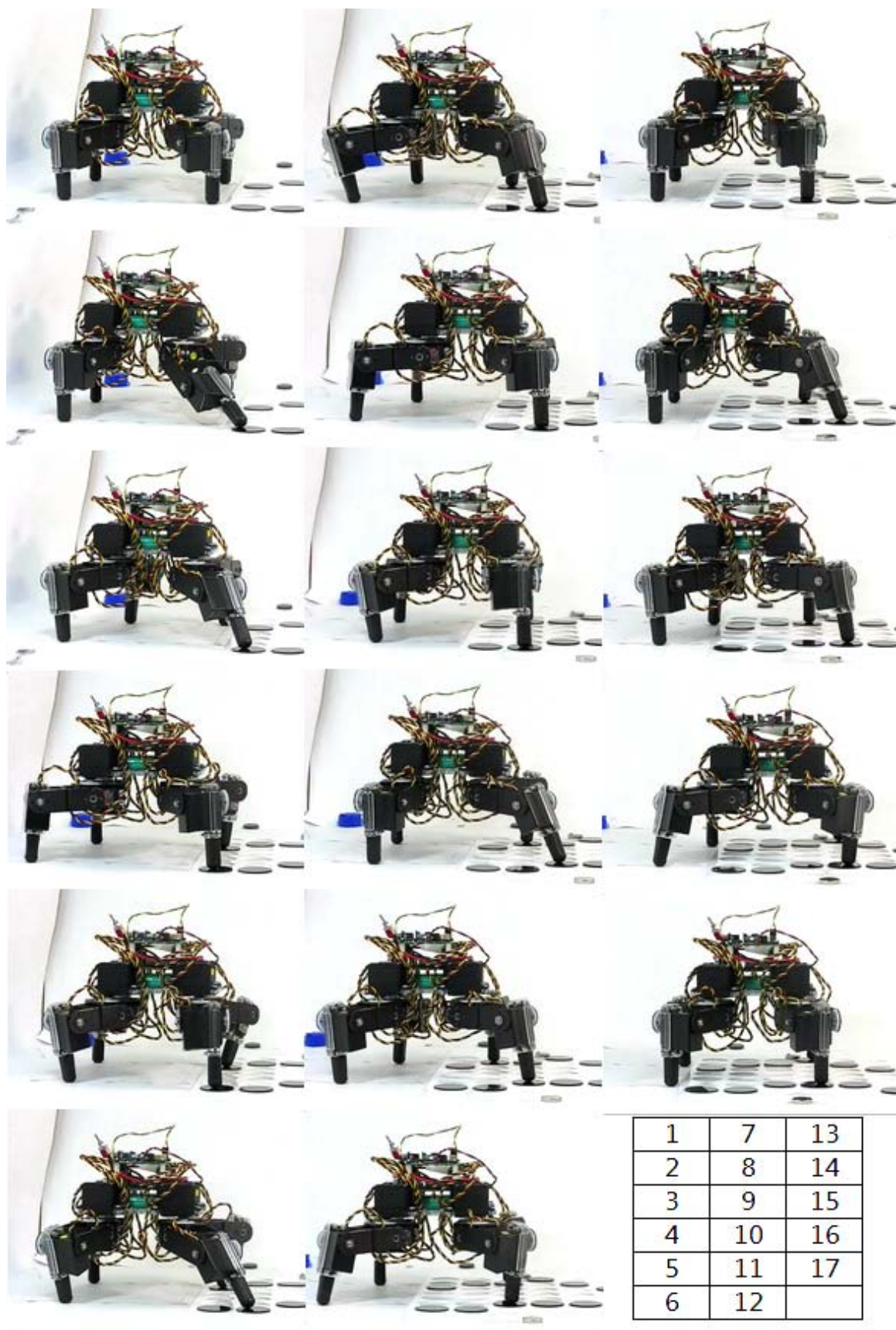


圖4.41 非連續平坦地形實際行走完整步態（1）

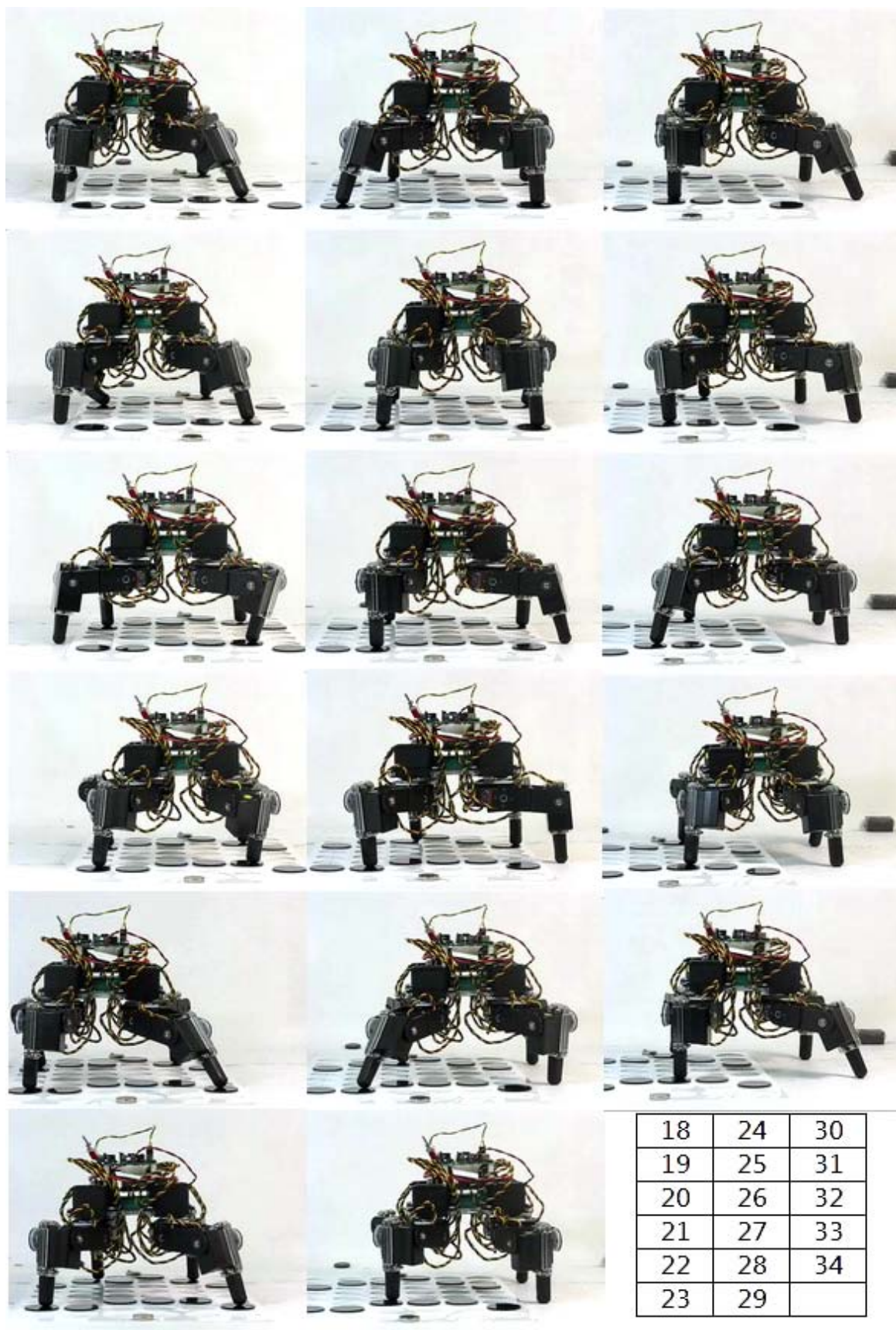


圖4.42 非連續平坦地形實際行走完整步態 (2)

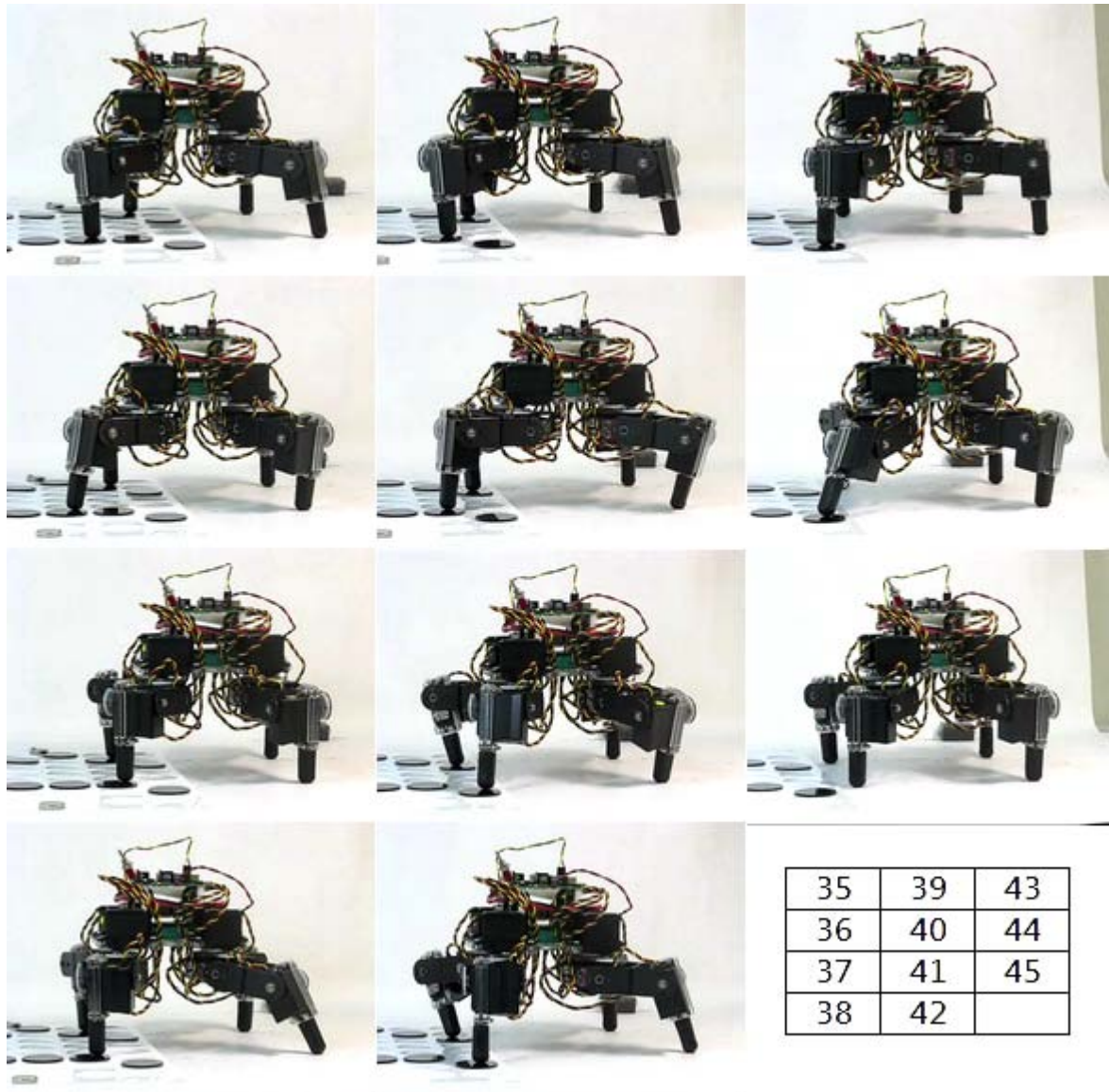


圖4.43 非連續平坦地形實際行走完整步態 (3)

4.6.4 非連續非平坦地形行走測試

最後進行的測試為非連續非平坦地形的行走測試，是將前三項實驗的內容加以整合，測試機器人在複合地形架構下的行走狀況，測試所使用的地形除擺放位置外，高度同樣為隨機產生，如圖 4.44。隨後把具有高度變化的隨機地形資料輸入路徑產生流程，將得到之穿越動作規劃進行測試。由電腦端控制完成之穿越動作測試結果如圖 4.45，由 Basic Atom 控制所完成之測試結果如圖 4.46，在此非連續非平坦地形下，兩者的測試皆成功完成穿越的目標。

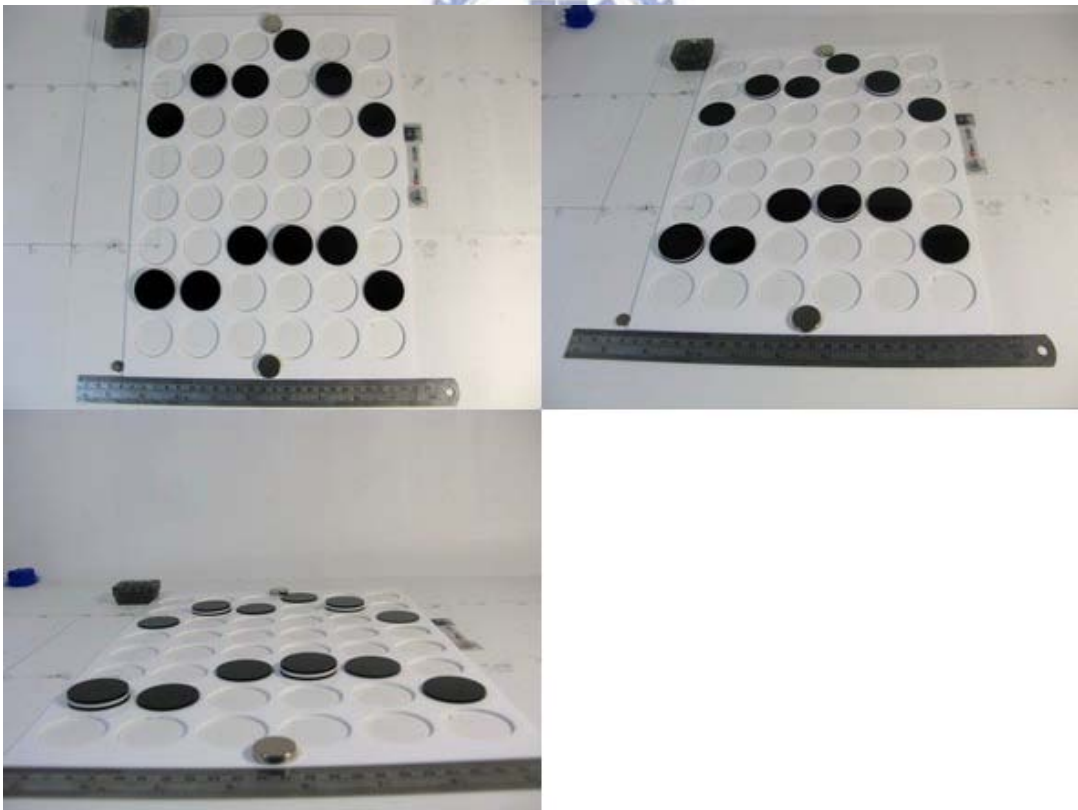


圖4.44 測試用非連續非平坦地形

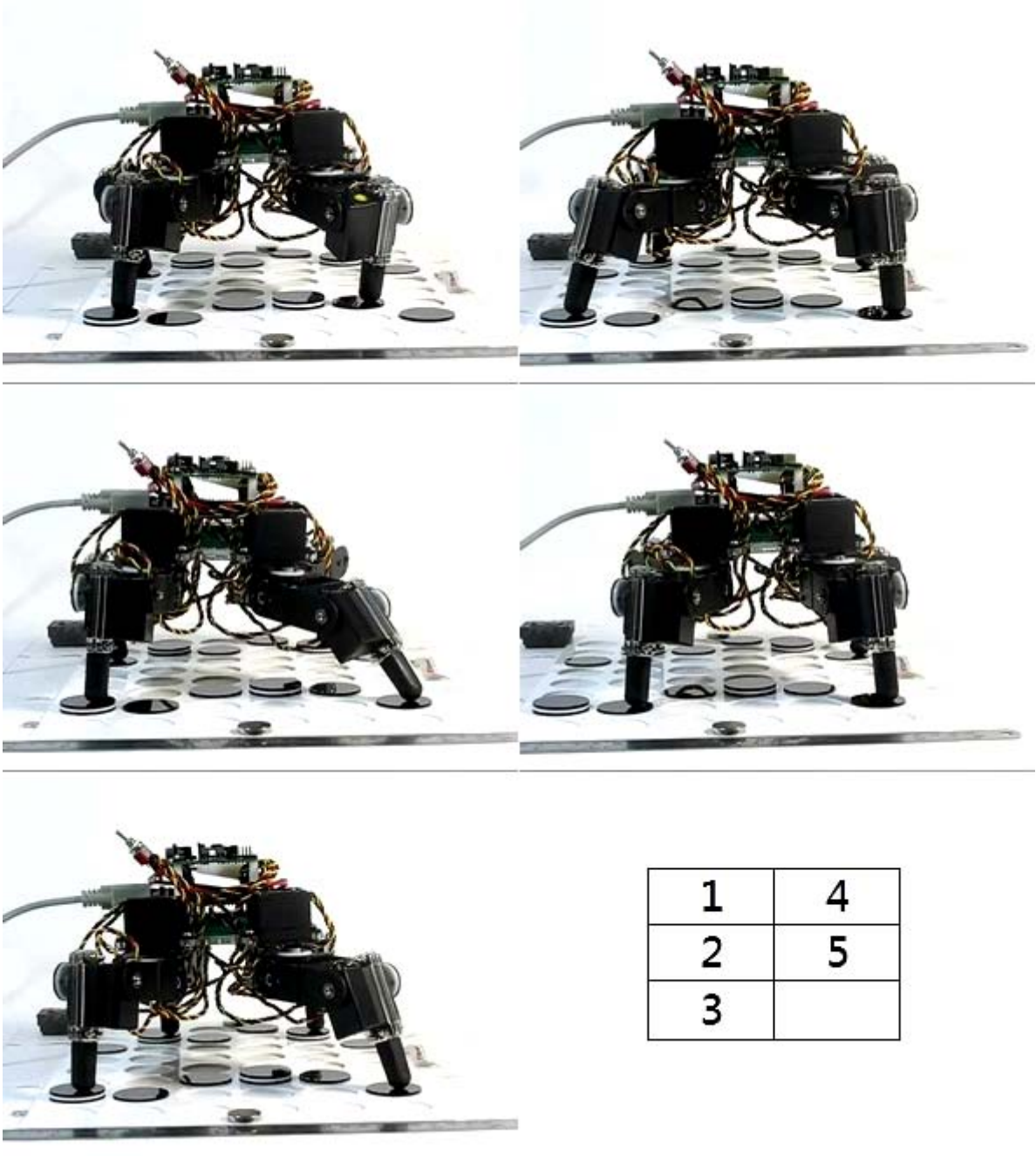


圖4.45 非連續非平坦地形單一行走循環（電腦控制）

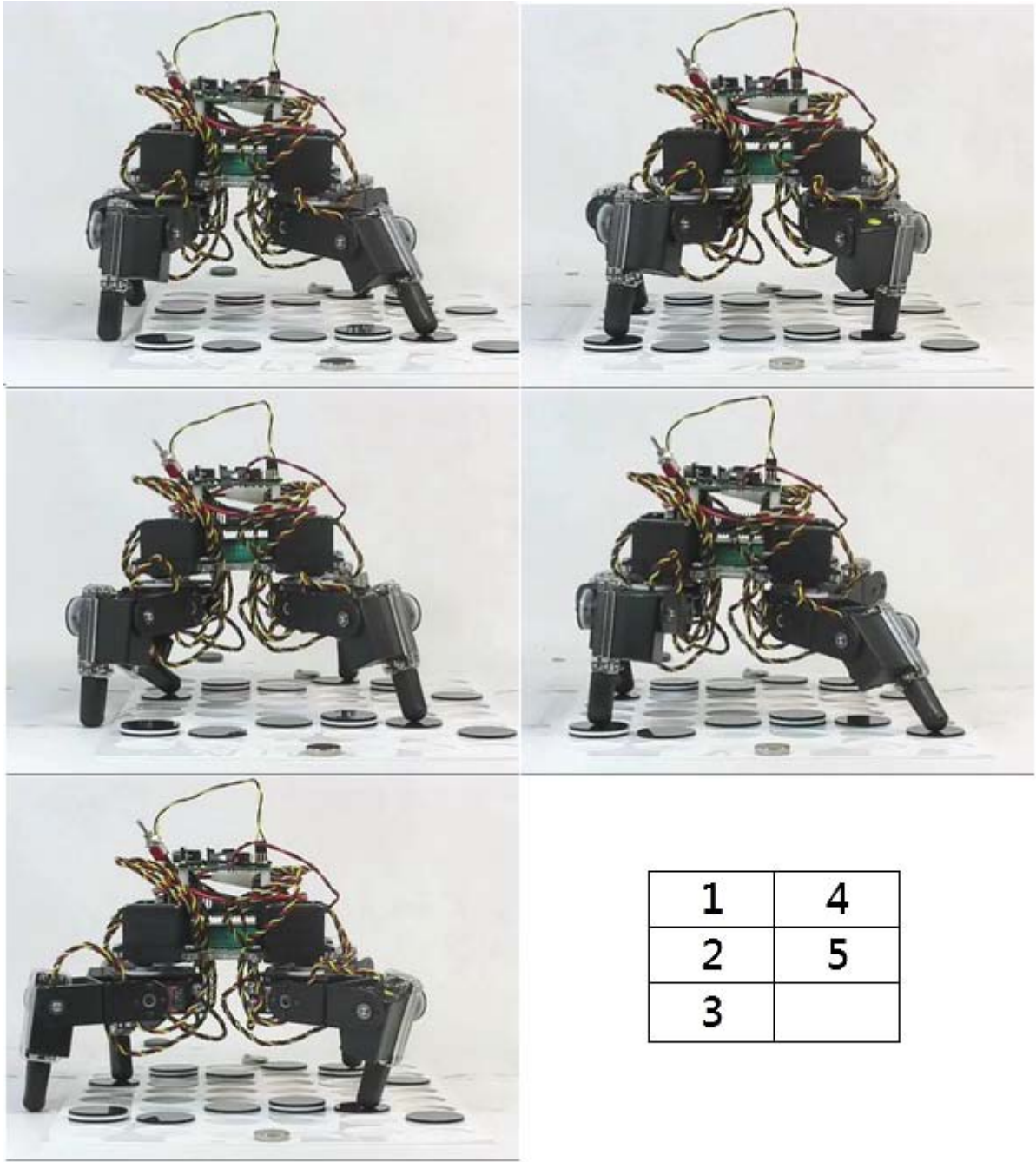


圖4.46 非連續非平坦地形單一行走循環（獨立行走）

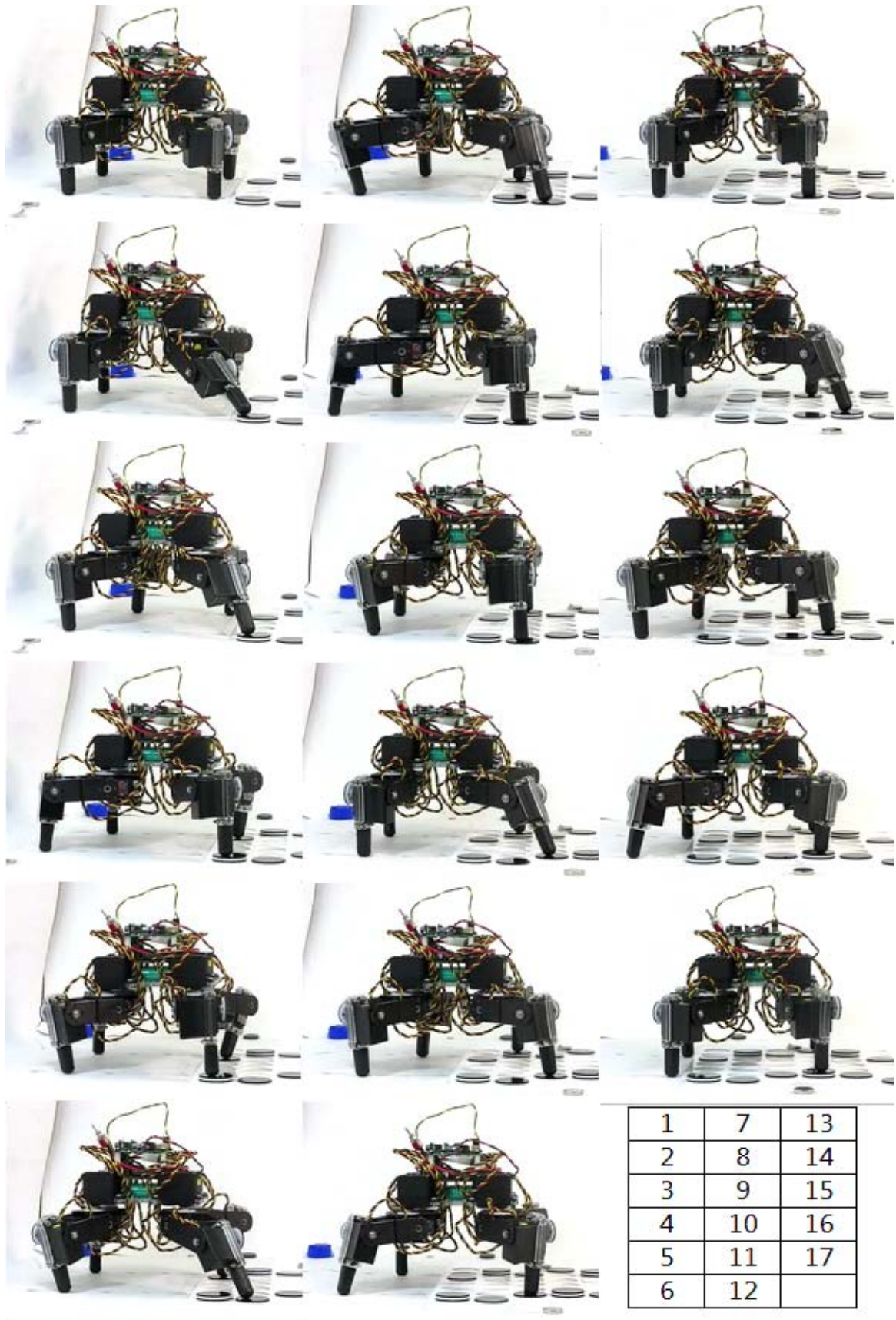


圖4.47 非連續非平坦地形實際行走完整步態（1）

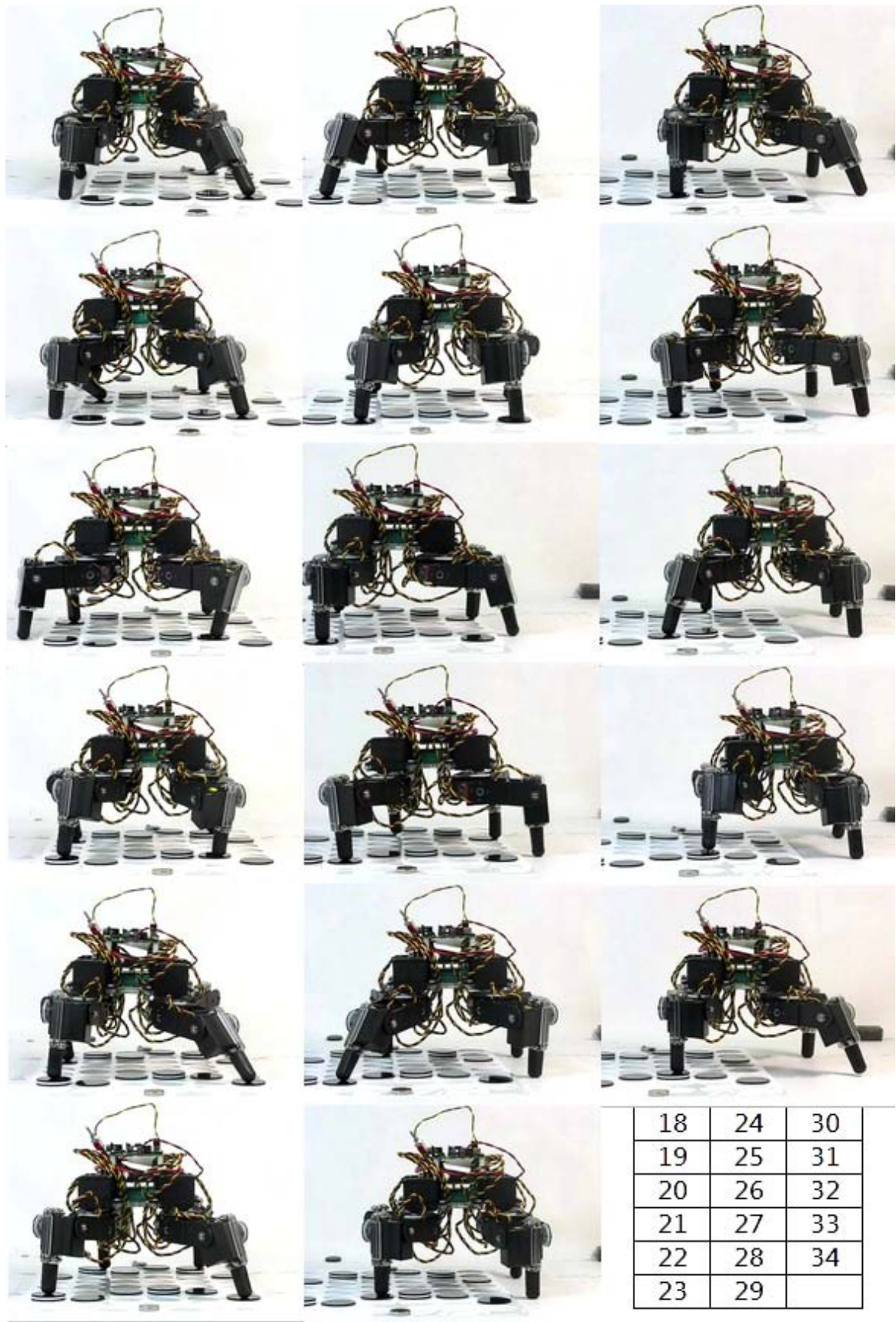


圖4.48 非連續非平坦地形實際行走完整步態（2）

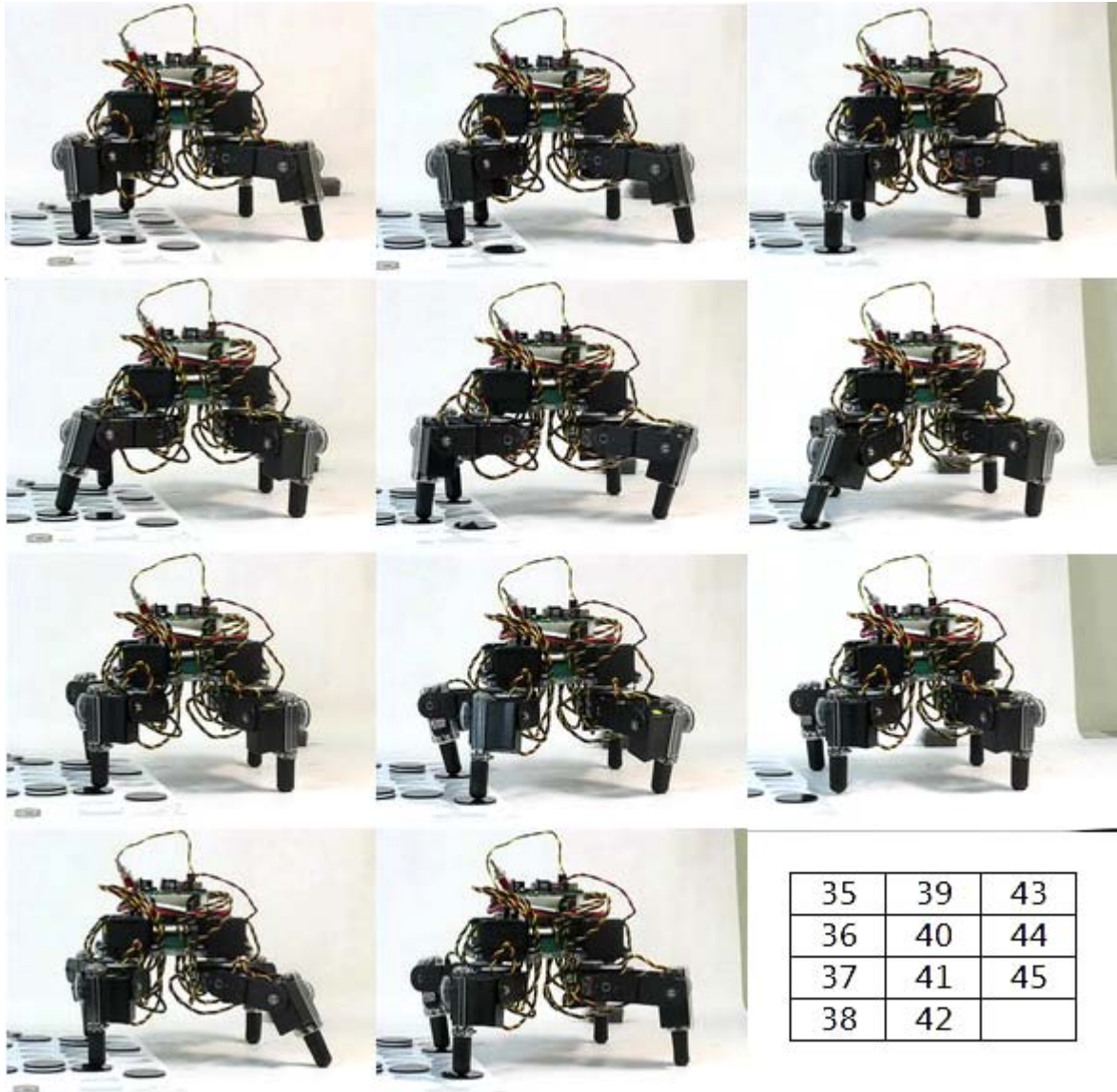


圖4.49 非連續非平坦地形實際行走完整步態（3）

在整個行走測試中，可以注意到，同樣的動作資料下，無論是由電腦端主控或是由 Basic Atom 自行控制，對於動作的呈現幾乎相同，這顯示出機器人在同樣的動作流程下，訊號源並不會影響機器人的動作。另一方面也指出行走時的動作誤差，可能為計算動作資料時有不足的參數，使得計算結果與實際動作間的誤差，在連續運作中不斷累積而影響了最終的行進


路徑，關於這部分誤差的修正，導入感測元件對機器人進行即時的誤差補償，應該是較為有效的改善方式。



五、 結論與未來方向

開發具備高度地形適應與負重能力，並能實際運用之四足機器人系統，是本實驗室長期的研究目標。本次四足機器人創新設計研究的主軸，是以提高動作靈敏度以及機身輕量化為主，輔以控制系統的改善，最後結合實驗室發展的快速規劃跨越河石地形的路徑規劃法，以圖實現足以達成目標之設計。透過連續的設計規劃與分析，建立具備跨越非連續河石地形能力的自主型四足機器人系統，並分別經由模擬分析與實機測試展示的方式，驗證設計可行性。目前本研究完成之成果，可歸納為以下幾項重點：

(1) 輕巧快速的機器人架構：



研究中首先設定了機器人的設計目標—高地形適應性、快速準確動作、機體重量輕，以此與實驗室前一代機器人的設計進行比對分析，運用 TRIZ 理論的推演，依此產生了三個新的設計修正方向，即萃取、取代機械系統、複合材料。對於機器人上下臂比例，與肩部關節可驅動範圍，做出了分析，改善了腿部關節的配置，從而將機器人的工作空間進行調整得到較大運作範圍；更換了機械系統以提高機器人工作空間大小並減輕機器人重量，對於動作速度亦有大幅改善；另外，將主要的結構件以複合材料取代，大幅減輕機器人的重量。經由後續的測試，證明本設計成功達成了機身輕巧與動作快速的目標。

(2) 建構四足機器人的模擬模型：

以電腦輔助設計軟體 SolidWorks 完成之四足機器人虛擬模型，並在模型中導入參數化設計，使機器人模型架構能隨桿件長度的調整，快速產生新的模型，這些模型除可應用於機器人架構進行快速修正、檢驗機構干涉外，亦可對個別零件進行安全係數與應力應變分析，提供後續模擬測試，改善設計之使用。

(3) 四足機器人原型：

本文所設計之機器人架構，能夠以電腦或 Basic Atom 微處理器兩種方式，產生動作控制訊號，經脈波產生電路，驅動各部位關節的伺服馬達，由於使用了具備邏輯運算與訊號處理能力的微處理器，故機器人能夠獨立運行，並能建構程式發展自主運行系統。在致動器方面使用了伺服馬達，取代舊有結構所使用之步進馬達與蝸桿結構，除減輕機體重量外，同時也提高了各關節之工作範圍，使得機器人單一步伐距離延長，從而提高了行走速度。另外在結構零件的部分，也以較輕的壓克力與鋁合金鈹金零件取代了重且加工成本高的金屬銑削件，同時透過將伺服馬達本體作為部分支撐結構，大幅減輕機器人的重量，並提高了機器人的運動速度。

(4) 完成具有跨越非連續地形的功能：

四足機器人之中的參數非常多個，除各足之三軸角度之外，另有機

器人中心點的座標及機器人本體的傾斜角等等。本研究中透過正向與反向運動學的計算，根據所取得之踩踏點座標資料，找出機器人穿越地形的可行路徑，並配合事先的誤差分析進行修正，推算出機器人的移動方式。經由實際運行測試，可以看出四足機器人穩定的挪動足部機構，逐步跨越非連續地形，完成非連續地形的穿越功能，並證實其實用且可行。

關於本研究之後續進度，本實驗室將發展一智慧型地形遙測定位系統，使用影像裝置由高處觀測地面地形，將地面之地形資料處理為可利用之行走路徑。另配合實驗室發展之模糊動作產生程式，將所取得之行走路徑轉換為機器人之連續行走動作，使機器人能完全自動達成穿越非連續河石地形之目標。

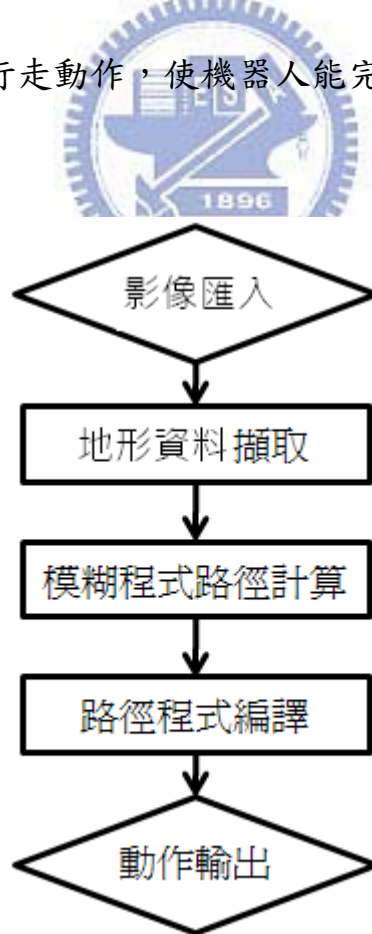


圖5.1 應用 DVT 影像處理之自主型機器人架構

參考文獻

- [1] Yoshiaki Sakagami, Ryujin Watanabe, Chiaki Aoyama, Shinichi Matsunaga, Nobuo Higaki, Kikuo Fujimura, “The intelligent ASIMO: system overview and integration”, Intelligent Robots and System, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, Volume 3, Page 2478 – 2483, 30 Sept.-5 Oct. 2002
- [2] Ozguner, F., Tsai, S.J., and McGhee, R.B., “An Approach to the Use of Terrain Preview Information in Rough Terrain Locomotion by a Hexapod Walking Machine”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 2, page134-146,1984
- [3] Tim Bretl, Sanjay Lall, Jean-Claude Latombe, and Stephen Rock, “Multi-Step Motion Planning for Free-Climbing Robots”, To appear in WAFR, Zeist, The Netherlands, 2004
- [4] Y. Koga and J.-C. Latombe, “On multi-arm manipulation planning”, In IEEE Int. Conf. Rob., Aut. 1994
- [5] Belen Curto, Member, IEEE, Vidal Moreno, IEEE, and Francisco J. Blanco, Member, IEEE, ”A General Method for C-Space Evaluation and its Application to Articulated Robots Robots”, IEEE Tr. Rob. Aut., Vol.18, No.1, Feb. 2002
- [6] Bo Huang, Lining Sun, Yufeng Luo, ”Statically Balanced Stair Climbing Gait Research for A Hybrid Quadruped Robot ”, Proceedings of the IEEE, International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, July 2005
- [7] Christophe Grand, Faiz Benamar, Frédéric Plumet, Philippe Bidaud, “Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot”, Laboratoire de Robotique de Paris(LRP), Université Pierre et Marie Curie, CNRS FRE2507
- [8] 鄭璧瑩，「創意機器人系統設計備忘錄 2005」，交大 CIDM Lab，2005

- [9] 鄭璧瑩、林建堯，「仿生四足機器人跨越河石地形的路徑規劃」，第十屆中華民國機構與機器原理研討會，2007 年 11 月
- [10] Tsai, L.W., “Robot Analysis- The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [11] “Tools of classical TRIZ”, Ideation International Inc, 1999
- [12] Orloff, Michael A., “Inventive thinking through TRIZ :a practical guide”, Springer, 2006
- [13] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston，「動力學」，李文彬·林崇民，五版，曉園出版社，台北，民國 80 年 2 月。
- [14] 實威科技股份有限公司，「COSMOS 電腦輔助工程分析－入門篇 Designer」，全華圖書股份有限公司，民國 96 年 4 月初版
- [15] <http://www.chimeicorp.com/tw/>，奇美實業股份有限公司
- [16] <http://www.hitecrcd.com/>，Hitec RCD USA,Inc.
- [17] 鄭璧瑩、李皓光，「自主式四足機器人跨越非平坦河石地形之路徑規劃與動態模擬」，中國機械工程學會第二十五屆全國學術研討會，2008 年 11 月
- [18] 鄭璧瑩，「創意機器人系統設計備忘錄 2008」，交大 CIDM Lab，2008

附錄 A 壓克力參數

壓克力為聚甲基丙烯酸甲酯 (Poly Methyl Meth Acrylate, PMMA) 的別稱，是一種熱塑性塑膠，尺寸安定、可利用加熱的方式，來改變其形狀，容易加工。壓克力具有穩定之物理、化學、光學與電學，高耐衝擊性、高表面硬度並具有相當強度。是故本研究中，將配合高精度雷射切割機具，以壓克力加工件作為機器人主要構件來源，表 A.1、表 A.2 與表 A.3 列出壓克力塑膠的各項性質。

表A.1 壓克力物理性質



特性	數值	單位
比重	1.19	
流動系數	1.8	g / 10min
假密度	0.77	g / cm ³
成型收縮率	0.2-0.6	%
硬度	M-97	
吸水率	0.3	%
燃燒率	1/16" HB	

表A.2 壓克力機械性質

特性	數值		單位	
引張強度	10200	720	PSI	kg/cm ²
彎曲強度	15600	1100	PSI	kg/cm ²
延伸率	5.0		%	
抗衝擊力	0.37 / 2.0		ft-lbs/in ² kg-cm/cm	

表A.3 壓克力熱性質

特性	數值	單位
熱變形溫度	100 / 212	°C / °F
軟化點	113 / 235	°C / °F

資料來源：奇美實業有限公司 [15]