



國立中山大學機械與機電工程學系

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

六足機器人跨越非連續地形之行走策略

A Walking Strategy for Hexapod Robots on Discontinuous
Terrain

研究生： 魏光廷

Kuang-Ting Wei

指導教授： 何應勤 博士

Innchyn Her

中華民國 一 百 年 七 月

July 2011

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生魏光廷（學號：M983020044）所提論文

六足機器人跨越非連續地形之行走策略

於中華民國 100 年 7 月 26 日經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 蔡穎堅 蔡穎堅 委員 何應勤 何應勤

委員 程啟正 程啟正 委員 _____

委員 _____ 委員 _____

指導教授(何應勤) 何應勤 (簽名)

《著作權說明》

本研究為 何應勤教授執行國科會專題計畫之一部分，本文非經 何教授書面同意不得全部或部分複製或影印。

立書人 姓名：魏光廷

地址：台北市大安區樂業街 94 巷 17 號 4 樓

簽章：魏光廷

聯絡電話：(02)27383319

中華民國 一 百 年 九 月 二 日

目錄

目錄	i
圖次	iii
表次	vii
摘要	viii
Abstract.....	ix
第一章 緒論	1
1.1 六足機器人發展簡介	1
1.2 六足機器人與非連續地形	2
1.3 研究動機與重要性	5
第二章 機器人尺寸及工作範圍設計	6
2.1 機器人足部機構設計	6
2.2 機器人單足工作範圍設計	9
2.3 機器人尺寸及形態設計	10
第三章 非連續地形之建立	12
3.1 非連續地形之分類	12
3.2 非連續地形之建立	13
3.3 非連續地形之分析	14
3.4 非連續地形之修改與比較	15
3.4.1 調整圓個數改變地形覆蓋率	15
3.4.2 調整圓半徑改變可立足區域集中度	16
3.5 非連續地形之無因次設計參數	17
第四章 機器人行走步態設計	20
4.1 機器人直行步態初步構想	20

4.2	機器人直線前進步態程式設計	22
4.2.1.	機器人直線前進步態資料庫方法	22
4.2.2.	機器人直線前進步態結果分析	24
4.3	機器人旋轉步態設計	25
4.3.1.	機器人繞重心旋轉初步構想	25
4.3.2.	繞機器人中心旋轉程式設計	26
4.3.3.	機器人最大旋轉角度步態初步構想	27
4.3.4.	最大旋轉角度旋轉程式設計	28
4.3.5.	繞 C.G.旋轉與最大旋轉角度旋轉設計結果分析	29
4.3.6.	繞任意點旋轉步態初步構想與程式設計	29
4.3.7.	繞任意點旋轉設計結果分析	31
4.4	機器人步態變換	32
4.4.1	機器人步態變換初步構想	32
4.4.2	機器人步態變換程式實作	33
第五章	機器人行走策略	36
5.1	機器人在非連續地形上的行走策略	36
5.2	尋找立足點	38
5.3	地形邊緣檢測	38
5.4	機器人跨越非連續地形直線移動步態選擇法	40
5.5	機器人步態記錄方法	42
5.6	機器人行走策略程式實作	44
5.7	於無因次化地形之機器人行走實驗	45
第六章	結果與討論	51
Appendix	53
References	54

圖次

圖 1-1 跟隨前足步態設計, 1989[7]	2
圖 1-2 適應地形步態設計, 1993[24]	2
圖 1-3 使用搜尋法產生最佳步態, 2000[25]	3
圖 1-4 容錯步態跨越地形, 2000[26]	3
圖 1-5 容錯步態跨越地形, 2009[11]	3
圖 1-6 產生步態跨越限制區域, 2010[10]	3
圖 1-7 近年機器人相關研究期刊篇數	4
圖 1-8 六足機器人相關文獻	4
圖 2-1 竹節蟲中間足構造[19]	6
圖 2-2 仿竹節蟲式六足機器人模型[14]	6
圖 2-3 蟑螂後足構造[20]	6
圖 2-4 仿蟑螂式六足機器人[21]	6
圖 2-5 市面上的六足機器人商品(Lynxmotion BH3)	7
圖 2-6 機器人單足機構	8
圖 2-7 矩形與扇形工作範圍比較	9
圖 2-8 斜向角度 α 之定義	9
圖 2-9 機器人尺寸設定及各足工作範圍	11
圖 2-10 中足偏移對支撐形的影響	11
圖 3-1 地形分類[28]	12
圖 3-2 本研究所使用之地形形態	12
圖 3-3 非連續地形之建立	13
圖 3-4 非連續地形之分析	14

圖 3-5 非連續地形增加圓個數.....	15
圖 3-6 非連續地形增加圓個數之分析.....	15
圖 3-7 非連續地形改變圓半徑.....	16
圖 3-8 非連續地形改變圓半徑之分析.....	16
圖 3-9 無因次化地形參數輸入與輸出.....	18
圖 3-10 無因次化隨機非連續地形之建立.....	18
圖 3-11 隨機非連續地形之參數分析.....	19
圖 4-1 步態設計：產生移動終點曲線.....	20
圖 4-2 步態設計：機器人向前移動範圍.....	21
圖 4-3 步態設計：搜尋新的立足點.....	21
圖 4-4 機器人直行步態程式設計.....	22
圖 4-5 六足機器人往前 15 度直線移動矩陣.....	23
圖 4-6 機器人直線移動矩陣的參數定義.....	24
圖 4-7 繞重心旋轉之可旋轉角度.....	26
圖 4-8 繞重心旋轉後可立足範圍.....	26
圖 4-9 繞重心旋轉半徑.....	27
圖 4-10 繞重心旋轉角度.....	27
圖 4-11 繞 O_T 旋轉之可旋轉角度.....	28
圖 4-12 繞 O_T 旋轉後可立足範圍.....	28
圖 4-13 最大旋轉角度重心位置.....	28
圖 4-14 最大旋轉角度.....	28
圖 4-15 機器人繞任意點 O_T 旋轉.....	30
圖 4-16 5° 旋轉半徑矩陣.....	30
圖 4-17 5° 可旋轉角度矩陣.....	30
圖 4-18 10° 旋轉半徑矩陣.....	31

圖 4-19 10° 可旋轉角度矩陣	31
圖 4-20 機器人 2-3-6 足著地前進	32
圖 4-21 機器人步態變換方法	33
圖 4-22 機器人步態變換行走軌跡	34
圖 4-23 機器人步態變換：四足對稱步態	35
圖 4-24 機器人步態變換：回到三角步態	35
圖 5-1 機器人行走策略流程	37
圖 5-2 尋找立足點方法	38
圖 5-3 地形邊緣	38
圖 5-4 影像侵蝕所使用的結構元素	39
圖 5-5 原始地形	39
圖 5-6 影像侵蝕處理後地形	39
圖 5-7 影像侵蝕前後比較	39
圖 5-8 地形與機器人工作範圍重合矩陣圖	40
圖 5-9 機器人跨越非連續地形直線移動步態選擇流程	41
圖 5-10 旋轉判斷下一步有無立足點	42
圖 5-11 地形旋轉	42
圖 5-12 剪裁與尋找立足點	43
圖 5-13 機器人旋轉	43
圖 5-14 平移機器人座標軸	43
圖 5-15 將立足點貼回未旋轉的地形上	44
圖 5-16 機器人行走策略程式實作地形分析	44
圖 5-17 機器人移動軌跡	45
圖 5-18 機器人移動軌跡	46

圖 5-19 機器人上一步立足點至下一步立足點的範圍	48
圖 5-20 地形中大範圍不可立足區域	49
圖 5-21 標記地形中大範圍不可立足區域	49

表次

表 1 機器人直線移動矩陣參數	25
表 2 繞 C.G 及最大角度旋轉移動矩陣參數.....	29
表 3 旋轉角度為 5° 及 10° 之旋轉中心位置	31
表 4 機器人移動數值	46
表 5 標記地形中大範圍不可立足區域數值	50



摘要

本研究針對足式機器人相較於輪式機器人的最大優點：於非連續地形上移動，設定地形參數及擬定行走策略。首先建立一隨機分佈的參數化地形，並設定機器人形態及尺寸參數，據此建立六足機器人移動模型，其中包含斜向移動及旋轉移動的步態。此行走策略能依據地形選擇每一跨步的起點、終點及步幅。最後以程式驗證，並使用預先計算下一步有無立足點的方法以找尋較短路徑。此研究使用參數化的隨機地形，除了對地形有更詳盡的描述外，還可以依需求調整各地形參數，使足式機器人有更多的發展及應用。

關鍵字：六足機器人、地形、步態產生、行走策略

Abstract

This thesis sets up terrain parameters and locomotion strategies of a hexapod robot walking on variable and discontinuous terrain. Walking on this kind of terrain is the greatest advantage of legged robots compared with wheeled robots. First, establish a randomly distributed parameterized terrain. Second, set up morphological parameters and dimension parameters of the robot. Third, build kinematic model and generate continuous gaits of the robot, including crab gaits and turning gaits. The locomotion strategy can determine every AEP ,PEP and stride depending on terrain. Finally, verify the strategy through computer programming and find shorter path by calculating if foothold is available in advance. Because of applying randomly distributed parameterized terrain, in addition to describing the terrain more comprehensively, the terrain parameters can be adjusted easily according to different needs. This research will bring about more applications and developments of legged robots.

Keywords: hexapod robot, terrain, gait generation, locomotion strategy

第一章 緒論

1.1 六足機器人發展簡介

足式移動載具的移動形式，相較於輪式載具而言，對移動地形的限制較少，故有許多研究人員投入此領域研究。自然環境中，利用足部移動之生物以爬行昆蟲最為常見，故多足機器人之研究大都是以爬行昆蟲作為學習仿造的對象。爬行昆蟲除了具有優良的移動適應性可移動於崎嶇地形，足式機器人的研究包含了許多部份，從基本的步態、機構設計、控制系統、與特定功能整合開發等，都各有相關領域的學者投入研究。步態研究方面，Wilson 在 1966 [1]和 1967 [2]的文獻中指出，其藉由觀察蟑螂移動繪出其移動步態圖，並整理出昆蟲常用的主要三種步態，分別為波浪步(wave gait)、漣漪步(ripple gait)及三角步態(tripod gait)，此三種步態亦常被作為六足機器人的移動步態。

1979 年 McGhee[3]設計一套控制流程，使六足機器人跨越地形中的禁止方格區域，1984 年時更加入了視覺感測器[4]。配合特定地形也有各種不同型式的機器人被開發，例如 RHex[5]，其利用馬達直接轉動足部，可使其快速地在崎嶇不平的地形上移動。1995 年美國 NASA 發表之 Dante II 八足機器人[6]，其設計是以繩索作動力傳動，且其曾被使用於從事火山探勘之工作。2002 年 Pratiar 等人[8]運用及模糊控制理論，並以基因演算法最佳化其路徑，模擬六足機器人產生連續步態跨越地形障礙。2007 年 Gonzalez de Santos 等人[9]，以三角步態為移動步態作支撐負載分析，提出平面移動之六足機器人的最佳足部分佈型式，發展出 SILO-6 步行機器人，並於 2010 年於地形中加入障礙物，限制其足部運動範圍並測試[10]。2009 年 Yang 等人[11]模擬機器人一足故障狀況下跨越限制區域，使用其之前所提出能容許錯誤的步態規劃方法[13]。2010 年吳[14]用力回饋控制法方使六足機器人能跨越棧道及垂直攀爬網格地形。2011 年 Irawan 和 Nonami [16]則是研究六足機器人以橫行的方式在崎嶇地形上行走。

1.2 六足機器人與非連續地形

而針對之前所述足式機器人的優點：跨越非連續地形之相關研究，1989 年 Song 使用 continuous follow-the-leader (FTL) 步態讓六足機器人可以跨越如圖 1-1 中的斜線禁止區域[7]，此圖用來說明如何使用連續的 FTL 步態讓六足機器人在兩種地形上移動；1993 年 Shih 分別對四足及六足機器人研究其步態跨越如圖 1-2 的不連續地形[24]，值得一提的是此研究的地形是隨機產生的，其中禁止區域(黑色格子)佔整個地形的 50%；2000 年時 Prabir 使用圖形搜尋法使六足機器人能跨越如圖 1-3 中的不連續地形[25]，和 2010 年吳[14]所做的研究均是可立足區域為矩形的地形；圖 1-4 和圖 1-5 分別為 Yang 在 2000 年[26]和 2009 年[11]對六足機器人容錯步態 (Fault-Tolerant Gait) 的文章，比較兩篇間隔近十年的文章，其產生步態方法有改進，但皆對測試地形描述不多。Estremera 在 2010 年將所做的六足步行機器人 SILO-6 分成三篇文章發表，其中一篇文章重點是跨越限制區域(forbidden zones)，圖 1-6 中的黑色方塊即為限制區域，亦即機器人不可以此為立足點的區域。這其實和本研究所提的非連續地形是一樣的概念，此研究也有提到這些限制區域為隨機產生，而圖中灰色區域為可立足點，能以視覺感測器分辨黑色和灰色的區域[10]。

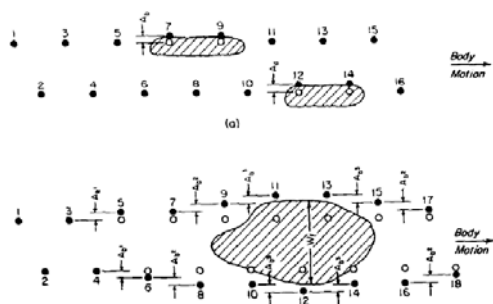


圖 1-1 跟隨前足步態設計, 1989[7]

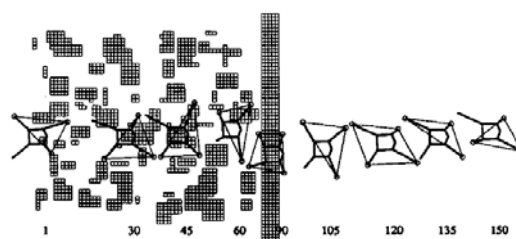


圖 1-2 適應地形步態設計, 1993[24]

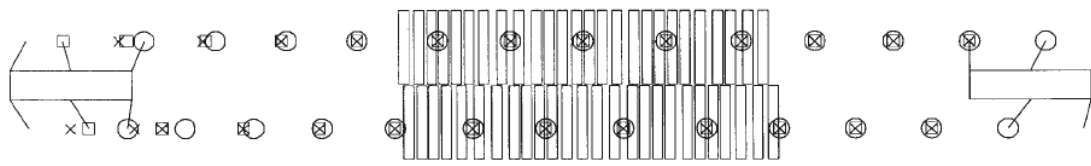


圖 1-3 使用搜尋法產生最佳步態, 2000[25]

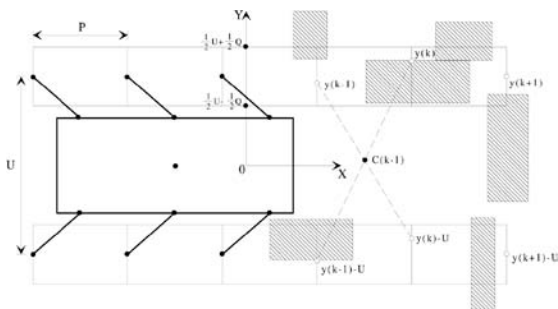


圖 1-4 容錯步態跨越地形, 2000[26]

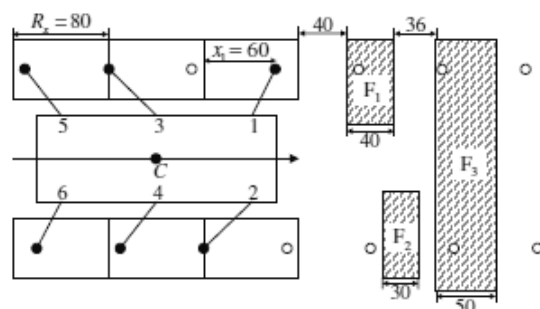


圖 1-5 容錯步態跨越地形, 2009[11]

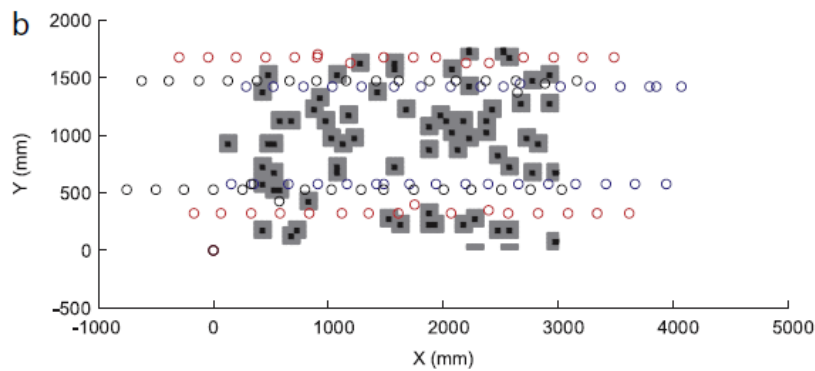


圖 1-6 產生步態跨越限制區域, 2010[10]

在 Engineering Village 資料庫上搜尋 Robot*和 Hexapod 這兩個關鍵字，由下圖中紅色長條圖可知近十年越來越多學者投入六足機器人的相關研究；若在加上 Terrain 這個關鍵字搜尋，可知也越來越多人發表有關六足機器人跨越地形的文章，尤其是在 2010 年共發表了 18 篇研究，是歷年之最。這顯示在六足機器人的基本步態產生及形態設定等相關理論成熟後，近年來轉變為挑戰跨越複雜地形等等的進階研究。

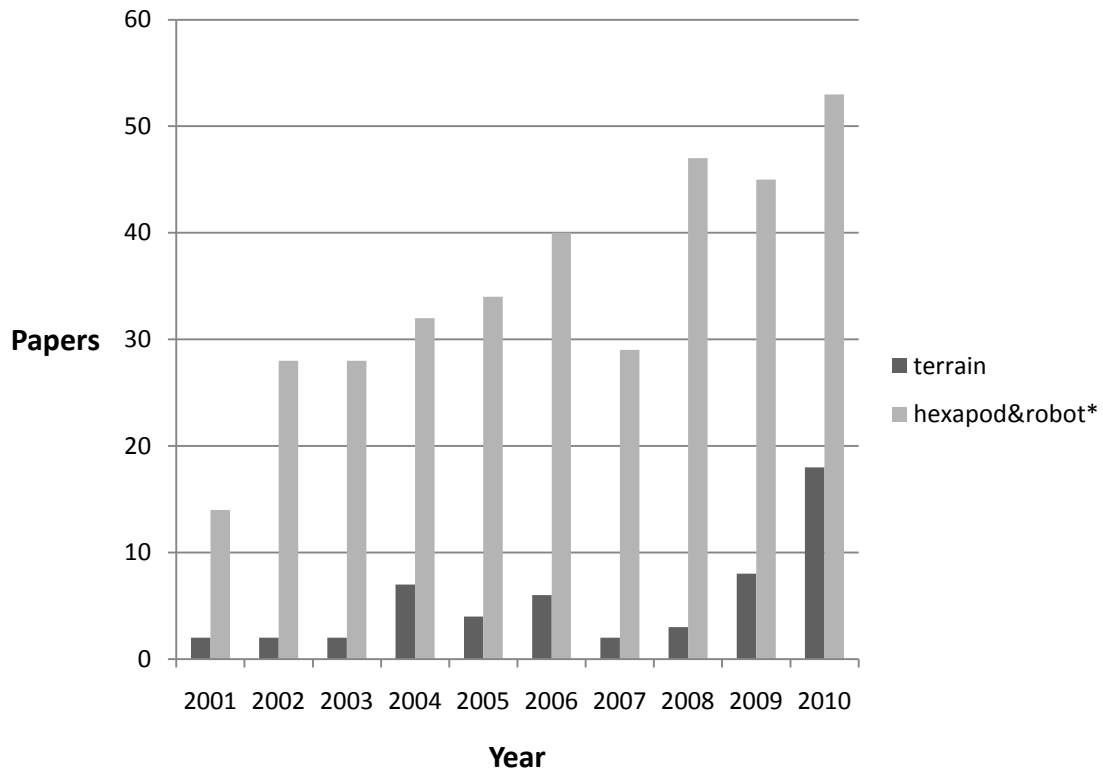


圖 1-7 近年機器人相關研究期刊篇數

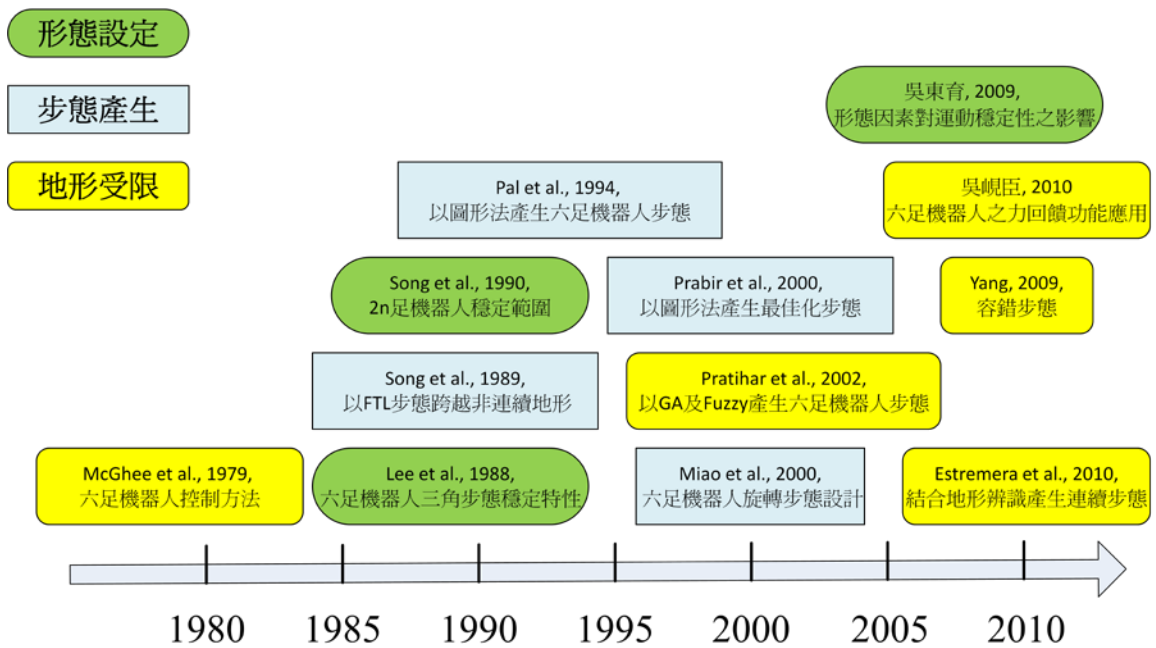


圖 1-8 六足機器人相關文獻

1.3 研究動機與重要性

雖然上節提到近年來機器人的相關研究蓬勃發展，尤其是針對克服各種不連續的地形，但這些研究多半是設定某種簡單或規則的禁止區域[3][7][8][10][14][24]，未曾有有研究去特別定義地形參數並以此檢驗六足機器人移動模型及行走策略之優劣，我們無法得知這些研究是否真能跨越自然環境中的各種隨機地形。有鑑於此，本研究預計設定一參數化的隨機地形，包括隨機可立足範圍及覆蓋率的設定，並設計一個六足機器人移動的步態模型，此模型包含身體移動軌跡和足部立足點，最後以這些工具設計六足機器人在非連續地形上的行走策略，依此策略產生步態跨越地形。由於可以在測試中調整各地形參數，因此實驗結果更能反應此六足機器人移動模型及行走策略優劣，倘若實驗結果不佳則能藉由修改微調移動模型及反覆測試直到達成目標。至今足式機器人在商業化上的應用仍十分稀少，希望能藉由這項研究使六足機器人未來能有更廣泛的應用。

第二章 機器人尺寸及工作範圍設計

2.1 機器人足部機構設計

六足機器人的足步機構設計方面，主要分為兩類：其一是仿竹節蟲足部構造的設計，圖 2-1 為竹節蟲中間足的構造，此種設計機器人姿態較高，且前中後足構造相同，圖 2-2 為此類機器人的整體模型示意圖。其二是仿蟑螂的設計，圖 2-3 為蟑螂後足的構造，此種設計機器人姿態較低，且前中後三對步足構造不盡相同，而圖 2-4 為此類型六足機器人的實體圖。

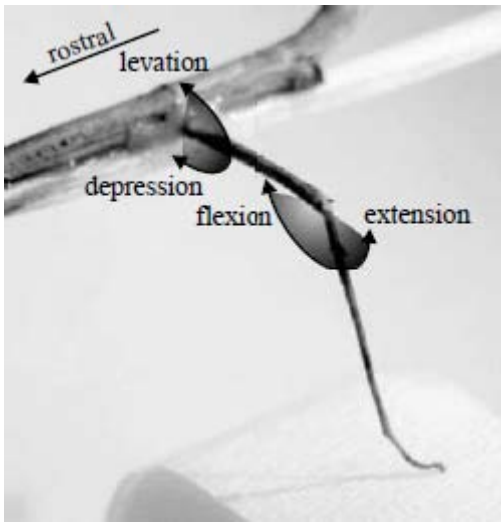


圖 2-1 竹節蟲中間足構造[19]

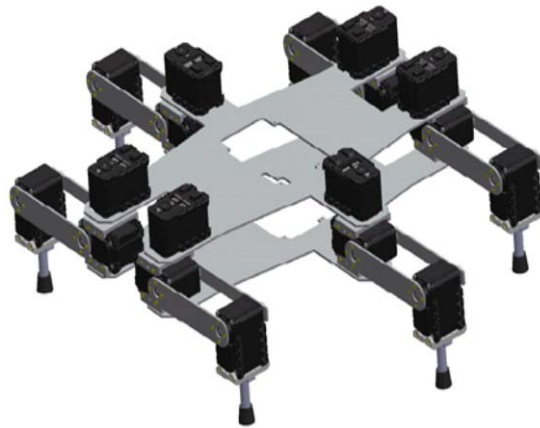


圖 2-2 仿竹節蟲式六足機器人模型[14]

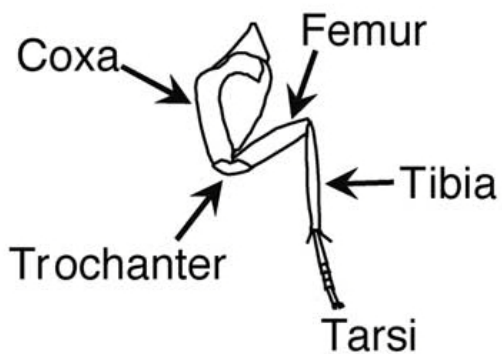


圖 2-3 蟑螂後足構造[20]

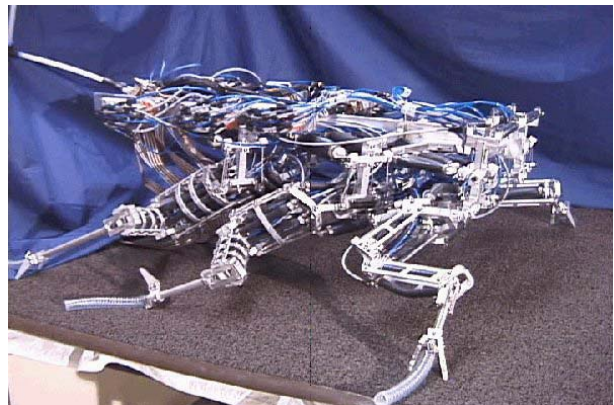


圖 2-4 仿蟑螂式六足機器人[21]

蟑螂跑得比竹節蟲快，轉向也更為靈敏[22]，若以行走為目的模仿蟑螂似乎比模仿竹節蟲更為合理。但由於本研究重點是六足機器人的行走策略，目前以仿竹節蟲式的六足機器人發展較為成熟，甚至市面上已有整隻組裝完成的在販售，圖 2-5 是由 Lynxmotion 公司生產型號為 BH3 的六足機器人。我們希望本研究的成果應用範圍能較廣，例如能應用到諸如此類的商品上。而仿蟑螂式的六足機器人不僅數量較少，且各足自由度與關節類型也未統一，若對此種六足機器人設計行走策略則應用將會受限。因此，本研究仍是針對如圖 2-2 的六足機器人模型設計其行走策略。

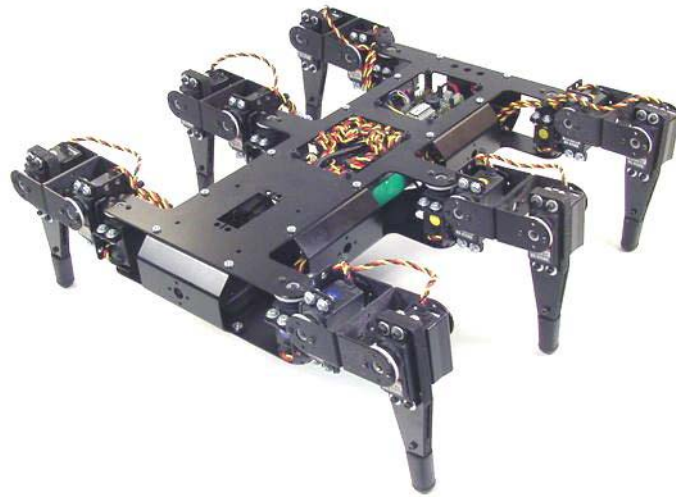


圖 2-5 市面上的六足機器人商品(Lynxmotion BH3)

本研究的足部機構設計採用仿竹節蟲的單足三自由度的機構，由圖 2-6 所示，其中 Motor 1 連接機器人身體與 L_C 桿並繞 Z 軸旋轉 θ ，主要控制身體的推進；Motor 2 為基節轉節關節(coxa-trochanter joint)，與 L_C 桿呈 90° 連接 L_F 桿並旋轉 φ ，主導機器人身體高度的上升(levitation)與下降(depression)；Motor 3 為股節-脛節間關節(femur-tibia joint)，與 Motor 2 同方向連接 L_T 桿並旋轉 ψ ，負責足部的屈曲(flexion)與伸張(extension)，。而 Motor 1 至足端點投影在 XY 平面上的距離定義為 R，在此

$$R=L_c+L_F\cos\phi+L_T\sin(\psi-\phi)$$

R 為定義機器人模型足部工作範圍之重要參數，將於下節詳述。

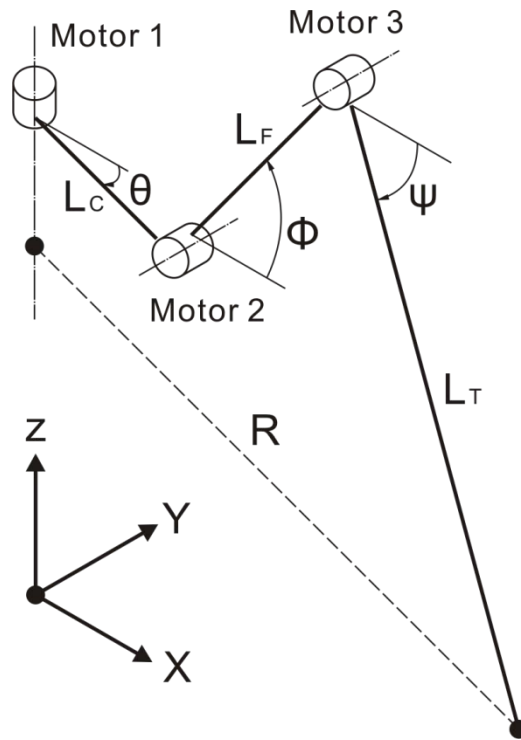


圖 2-6 機器人單足機構

2.2 機器人單足工作範圍設計

將前述機器人單足機構投影在 XY 平面上，即可清楚顯示其工作範圍。圖 2-7 中灰色矩形區域為許多相關研究所使用的機器人單足工作範圍[8][15][11]，此工作範圍的優點是計算容易且因範圍較小機器人馬達最大負載也較小。但本研究機器人需跨越不連續的隨機地形，故工作範圍越大就越有機會找到適當的立足點，因此本研究直接採用如圖 2-7 中的扇形區域為其工作範圍，在此

$$R_{\min} = L_c + L_F \cos \phi_{\max} + L_T \cos(\psi_{\max} - \phi_{\max})$$

$$R_{\max} = L_c + L_F \cos \phi_{\min} + L_T \cos(\psi_{\min} - \phi_{\min})$$

其中 ϕ_{\max} 、 ϕ_{\min} 、 ψ_{\max} 和 ψ_{\min} 為機器人足部 Motor2 和 Motor3 轉動角度之極限，與馬達最大力矩輸出值及機構是否干涉有關。而機器人單足之前端極限 AEP(anterior extreme position)和後端極限 PEP(posterior extreme position)之間的距離定義為步幅(stride)。扇形工作範圍的最大步幅比矩形工作範圍得最大步幅增加許多，益於跨越不連續的地形，但實際應用時必須注意是否超過各個馬達的負荷。而行走時也必須配合地形限制，如圖 2-8 中只有灰色圓形區域可當立足點時，必須尋找新的立足點，並產生新的步幅 S，AEP 至 PEP 的連線與 Y 軸的夾角定義為 α ，是機器人往斜向前進時必要的參數。

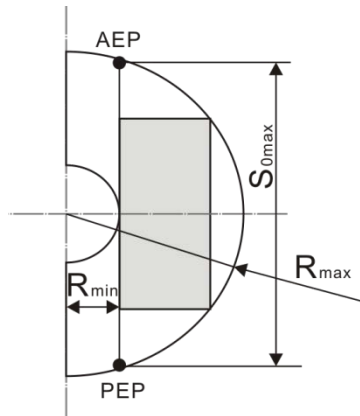


圖 2-7 矩形與扇形工作範圍比較

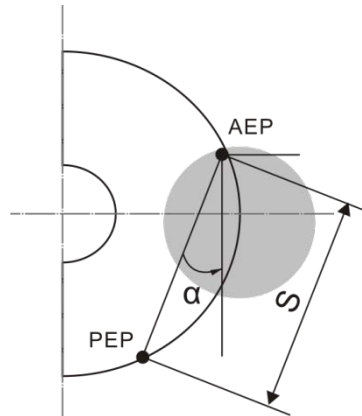


圖 2-8 斜向角度 α 之定義

2.3 機器人尺寸及形態設計

本節將定義機器人整體模型各尺寸參數，以利之後調整設計。如圖 2-9 所示，將機器人左右前足至對稱軸之距離設為 W ；前後二足之間距離設為 B ，且定義其單足工作範圍為一距身體最短 R_{\min} 、最長 R_{\max} 、角度為 180° 的扇形區域。機器人從上方垂直投影的重心至支撐形的最短距離稱為 Stability margin (S_m)[3]，本研究機器人模型參考了吳[15]的論文加入了中足偏移量 D ，是為了在使用三角步態行走時，機器人重心能一直維持在支撐三角型內，圖 2-10 為機器人三足皆運動至足端工作範圍最外側時的示意圖，由此圖可知適當中足偏移量 D 可使機器人在極限位置仍然 $S_m > 0$ ，達到盡量加大工作範圍的目的。而有另一派研究常針對 S_m 做最佳化，希望其越大越好[17]。本研究只使用了 $S_m > 0$ 的條件，將重點放在增加足部工作範圍上，使機器人更有機會跨越非連續地形，實際上只要機器人步態連續中間不停頓，在 S_m 最小時馬上使用另外三隻足當做支撐足，機器人仍然穩定。本研究將機器人足部工作範圍對 X 軸及 Y 軸均對稱，但沒有對 $x=y$ 的直線對稱[30]，是為了讓機器人向前方前進時步幅較大，將其與 Y 軸平行排列。此六足機器人足部工作範圍模型可說是同時考量到直行時的步幅大小與以中足偏移及對稱提高穩定性，增進在非連續地形中朝多方向移動時甚至旋轉時的效能。

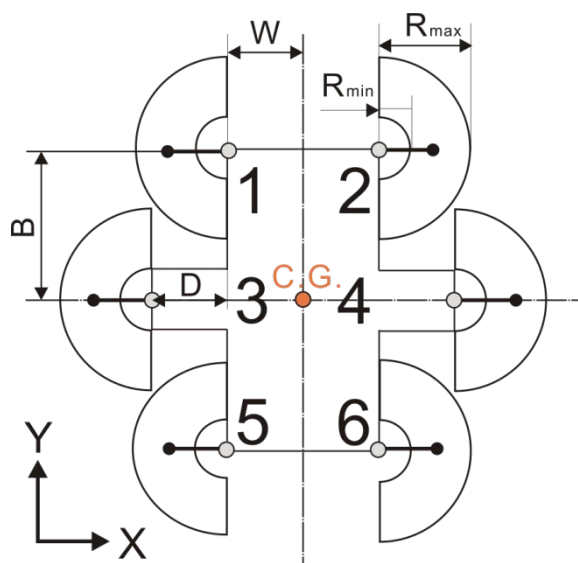


圖 2-9 機器人尺寸設定及各足工作範圍

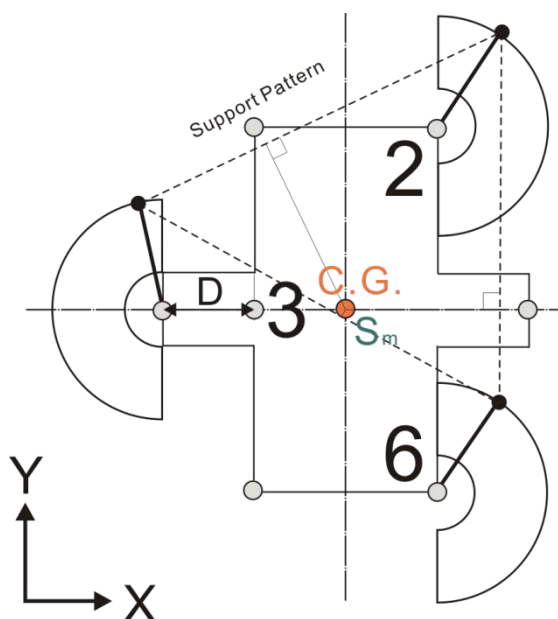


圖 2-10 中足偏移對對支撐形的影響

定義好各機器人型態尺寸參數後，即可產生機器人足部工作範圍，如圖 2-9 中各足向外延伸的半圓形區域。其中包含若干參數：足端最長距離 $R_{\max}=60(\text{pixels})$ 、足端最短距離 $R_{\min}=20(\text{pixels})$ ，機器人長 $B=100(\text{pixels})$ 、寬 $W=50(\text{pixels})$ ，中足偏移量 $D=50(\text{pixels})$ ，此設定可讓機器人各足工作範圍不重疊，避免干涉的情形，若用圖片表示機器人工作範圍大小，此圖為 $320 \times 320(\text{pixels})$ 的方形點陣圖。

第三章 非連續地形之建立

3.1 非連續地形之分類

在 1984 年 Hirose[28]對四足機器人的研究中將地形分為五大類，分別是：平坦的地面(O Type)、有凹陷區域的地形(H Type)、有凸出區域的地形(P Type)、結合 H 和 P 兩種特性的地形(HP Type)和由視覺感測器所得到的離散地形(G Type) 如圖 3-1 所示。其中 H 和 P 地形的不同是 H 地形不可作為立足點的限制區域是凹洞，機器人可跨越其上方，腳不要踩在上面即可；P 地形的限制區域為高聳的柱狀物，機器人無法跨越上空，只能繞過障礙。因此，若使用 P 地形六足機器人就喪失其最大優勢了，因此本研究所使用的地形為 H Type，但稍有不同的是我們是將可立足區域定義出來，並非將限制區域去除，用如圖 3-2 的「梅花樁」來描述會更貼切，並在地形完成後加入幾項地形參數測試比較。

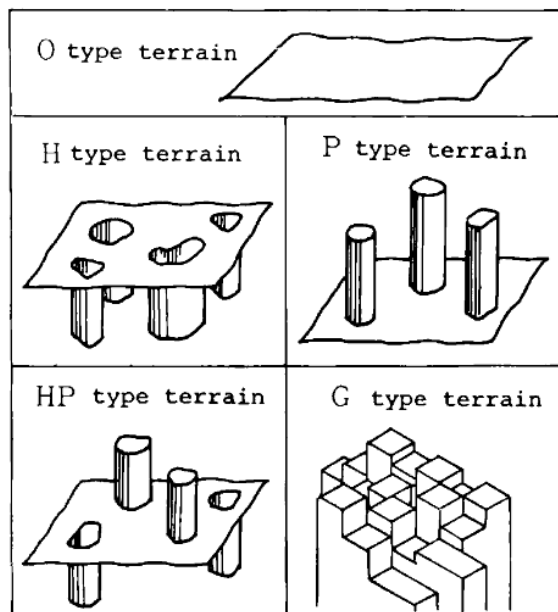


圖 3-1 地形分類[28]

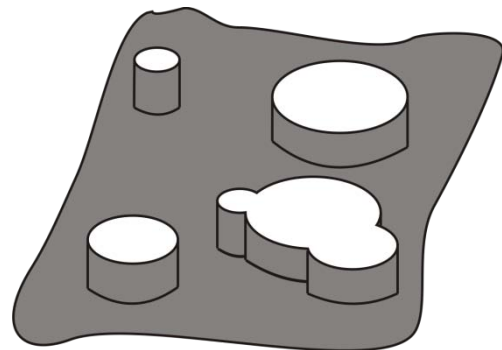


圖 3-2 本研究所使用之地形形態

3.2 非連續地形之建立

定義地形的形態後，即可產生如圖 3-3(左)的隨機非連續地形向量圖。首先定義地形大小，本例為 2000x2000 的方形矩陣，然後以圓形為可立足區域，其中圓形個數、圓心位置及半徑大小可依需求自訂，圖中的圓使用隨機方法決定，以 MATLAB 的均勻分佈亂數指令(rand)產生 2000x2000 的矩陣，並輸入期望值為 250 個的圓，經過計算後即可決定哪些點為圓心，而這些圓的半徑為 15、30、45、50、75 隨機選擇，再將圓畫出來完成如圖 3-3(左)的地形向量圖。將圓內的可立足區域填入 1(白色)，圓外的禁止區域填入 0(黑色)，就完成如圖 3-3(右)的地形點陣圖。

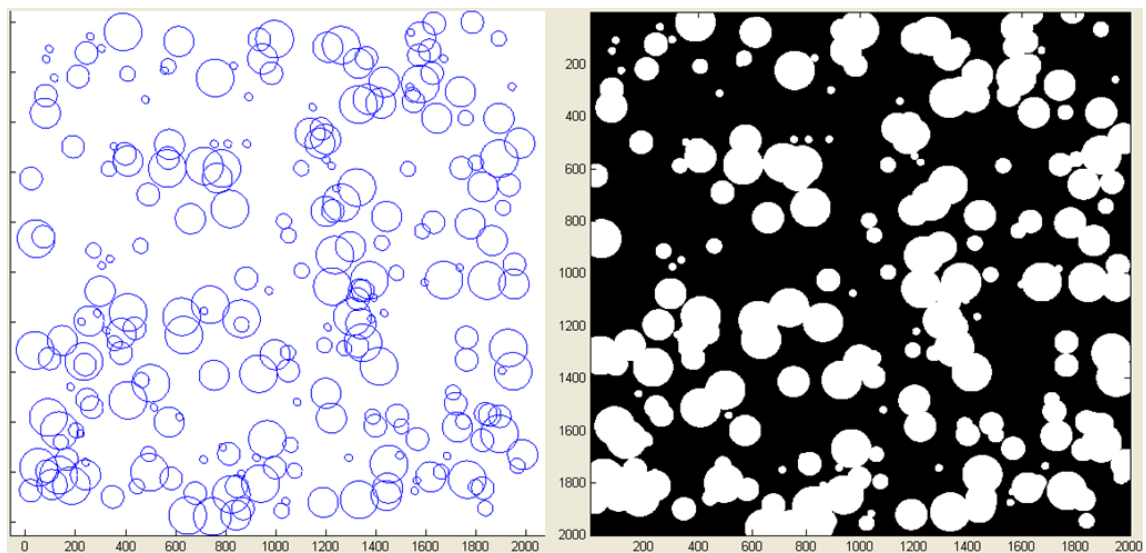


圖 3-3 非連續地形之建立

3.3 非連續地形之分析

對此非連續地形分析，如圖 3-4。所示，此地形中不可立足區域有 2525437 個點(pixels)，可立足區域有 1474563 個點(pixels)，因此可立足區域為全部面積的 36.864%，我們將此數值定義為地形的「覆蓋率」，可用於判斷機器人跨越地形的困難度。地形覆蓋率越小代表地形中可作為立足點的區域越小，因此就越困難，反之則越容易。而我們當初在設計地形時，圓個數的期望值為 250 個，實際上定義出了 242 個圓形的可立足區域。這些圓的半徑以 15、30、45、50、75 隨機選擇，實際做出的平均圓半徑為 45.186。用平均圓半徑求出平均可立足區域面積，除以第二章所訂定的機器人工作範圍面積，將此定義為機器人工作範圍比 CW，此例為 1.2761，CW 可用來衡量所訂定的立足點區域與機器人工作範圍的相對大小，CW 越大則機器人工作範圍相對於可立足區域就越小，機器人較困難從一個可立足區域跨越到另一個可立足區域。本研究希望能藉由這些地形參數的調整以測試六足機器人行走策略優劣。

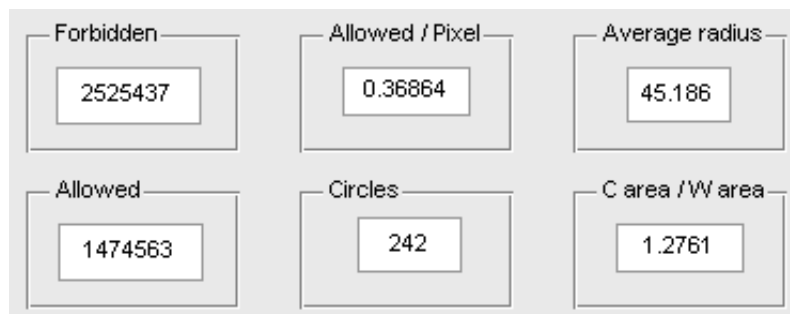


圖 3-4 非連續地形之分析

3.4 非連續地形之修改與比較

3.4.1 調整圓個數改變地形覆蓋率

針對之前建立的非連續地形分析後，我們可以再修改其參數。由於本研究地形建立是採用隨機的方法，因此較難直接指定圓的數量或地形覆蓋率，因此我們可以再手動隨機增加可立足的圓形區域，圖 3-5(左)是圖 3-3 再增加 8 個可立足圓形區域的結果，這些新增圓的圓心是由地形範圍內隨機決定，半徑一樣是 15、30、45、50、75 隨機選擇，以灰色外框表示，而圖 3-5(右)一樣是此地形的點陣圖。

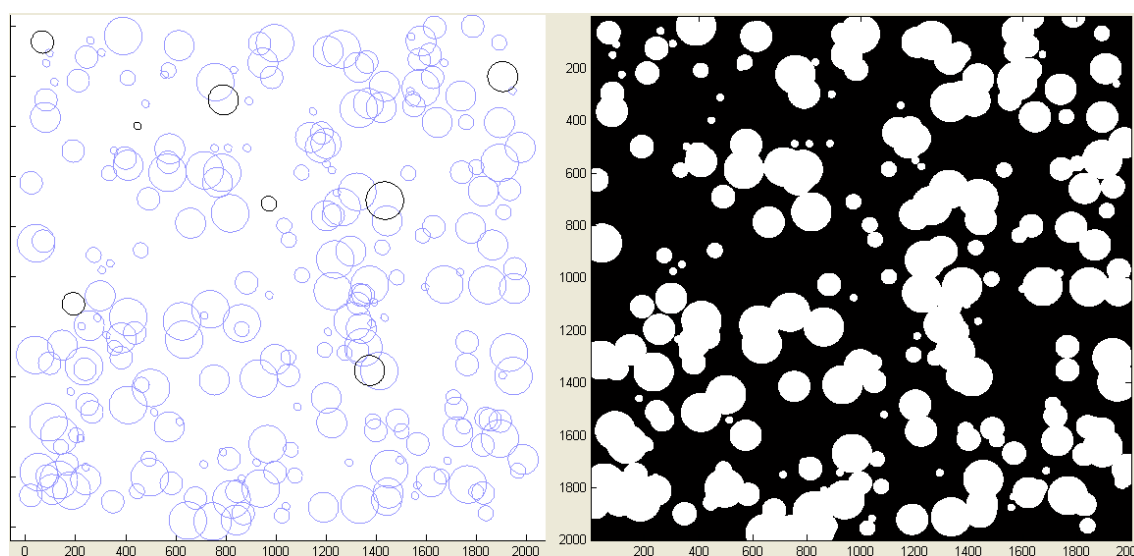


圖 3-5 非連續地形增加圓個數

我們一樣可以將修改後的地形分析比較，如圖 3-6 所示，本地形圓個數從 242 個變成了 250 個，地形覆蓋率從 36.864% 變成 38.046%，因此我們可以以維持隨機的特性而增加地形覆蓋率，當然，覆蓋率越高機器人移動就越容易。

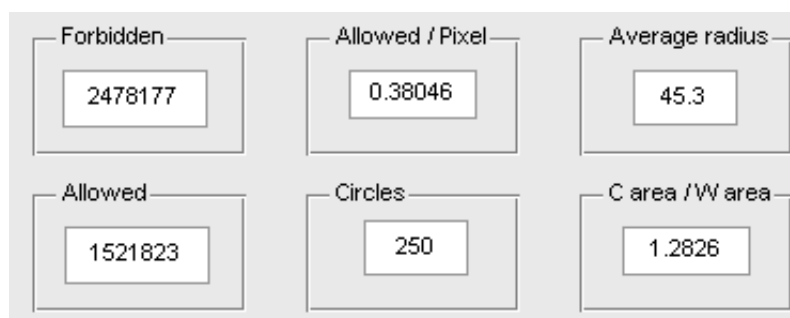


圖 3-6 非連續地形增加圓個數之分析

3.4.2 調整圓半徑改變可立足區域集中度

我們也可以試著改變可立足圓半徑，來分析其六足機器人在其上行走的困難度。圖 3-7 為改變後半徑 10、20、30、40、50 的地形，圖 3-8 為此地形之分析，與圖 3-3 的原始圖相比，兩地形的覆蓋率相近(36.864% vs.36.270%)，而平均圓半徑從 45.186 變為 30.193，平均圓面積比上機器人工作範圍也從 1.2761 變為 0.5698，固定地形覆蓋率的情況下，這兩項數值變小代表地形中的可立足區域分散了，若將圖 3-3 和圖 3-7 擺在一起比較，由於機器人工作範圍大小相同，圖 3-3 中有幾塊大範圍的黑色區域，機器人要在其上行走相當困難。所以，六足機器人在圖 3-7 中的地形移動會比圖 3-3 中的地形容易的多。

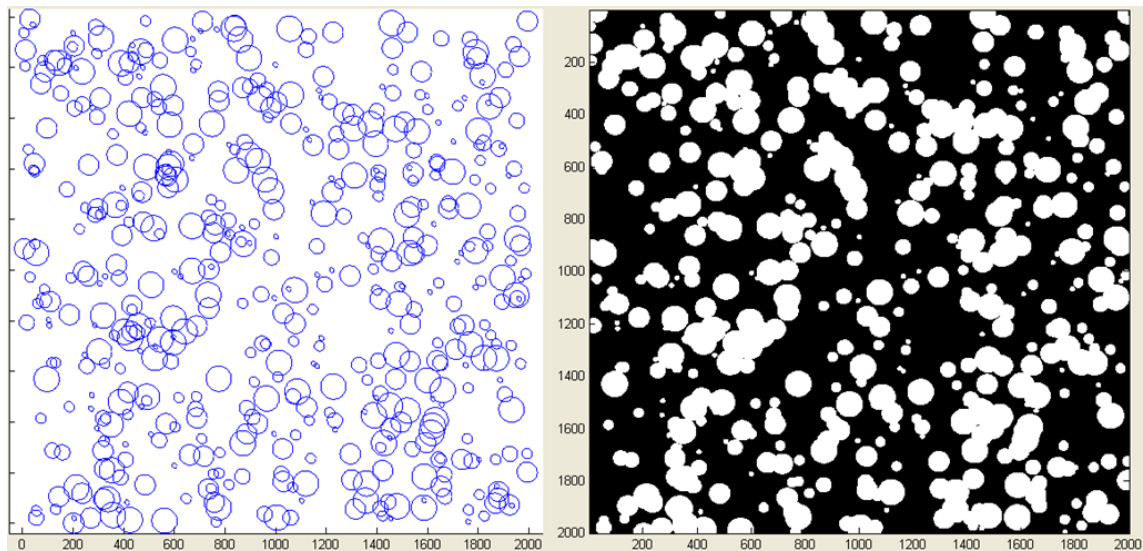


圖 3-7 非連續地形改變圓半徑

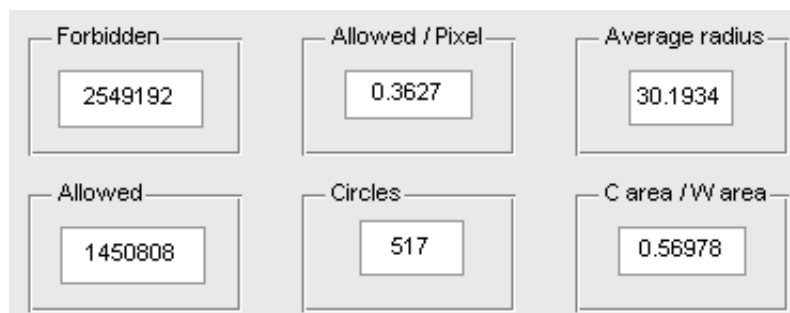


圖 3-8 非連續地形改變圓半徑之分析

3.5 非連續地形之無因次設計參數

本章前幾節中，我們使用了 10、20、30、40、50 和 15、30、45、60、75 這兩組數列為可立足區域的圓半徑，但為什麼是這些數字，講不出什麼道理。因此本節將產生地形的設計參數無因次化，目地是在設計地形參數時更具參考價值。

我們在第二章定義了機器人單足工作範圍為 180° 扇形：

$$\begin{aligned}\text{機器人工作範圍面積} &= \frac{1}{2} \pi (R_{\max}^2 - R_{\min}^2) \\ &= \frac{1}{2} \pi (60^2 - 40^2) \\ &= 1600 \pi\end{aligned}$$

而我們在本章定義了圓形的可立足區域，其平均圓面積為 πR_{avg}^2 ，因此機器人工作範圍比 CW：

$$CW = \frac{R_{\text{avg}}^2}{1600}$$

$$R_{\text{avg}} = 40\sqrt{CW}$$

在此我們假設圓半徑均勻分佈，令其為 N 個數值的等差數列，且公差為 a 。若 N 為 5，則圓半徑分別為 $R_{\text{avg}}-2a$ 、 $R_{\text{avg}}-a$ 、 R_{avg} 、 $R_{\text{avg}}+a$ 、 $R_{\text{avg}}+2a$ ，在此使用標準差公式：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N X_i^2 - \mu^2 \right)}$$

$N=5$ 代入

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{5} ((-2a)^2 + (-a)^2 + (0)^2 + (a)^2 + (2a)^2)} = \sqrt{2}a$$

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma$$

實際計算時我們發現一個巧合，就是當機器人單足工作範圍大小等於平均的可立足區域大小，也就是 $CW=1$ 時， R_{avg} 恰好為一整數 40，這是我們當初在訂定機器人工作範圍大小時沒有考慮過的。而若再令標準差 σ 為 10，產生 5 種圓半徑，則圓半徑 R 就分別為 25.8578、32.9289、40、47.0711、54.1422，在程式中的計算結果如圖 3-9 所示，而使用這些參數所產生的地形則如圖 3-10 所示。

圖 3-9 無因次化地形參數輸入與輸出

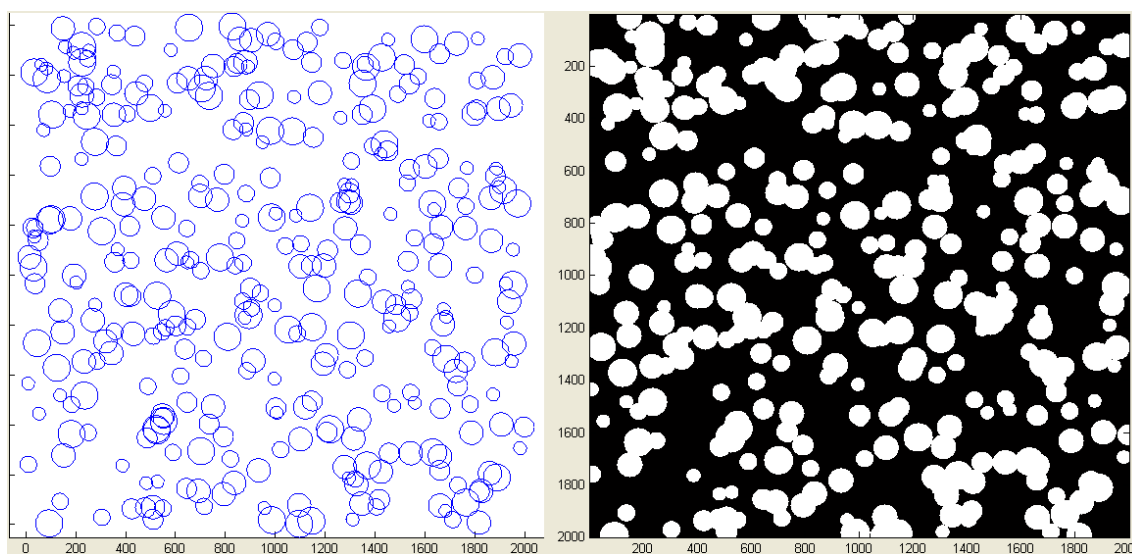


圖 3-10 無因次化隨機非連續地形之建立

分析圖 3-9 的地形點陣圖參數，結果如圖 3-11 所示。地形中的不可立足區域有 2525437 個點(pixels)，可立足區域有 1474563 個點(pixels)，因此地形覆蓋率為 36.864%。我們當初在設計時，圓個數的期望值為 300 個，圓半徑 25.8578、32.9289、40、47.0711、54.1422， CW 值為 1；實際上產生了 302 個圓形的可立足區域。平

均圓半徑為 38.6654，CW 為 0.93438。本研究的可立足區域圓心及半徑皆是以隨機的方法決定，所以結果會與設計參數有差距。

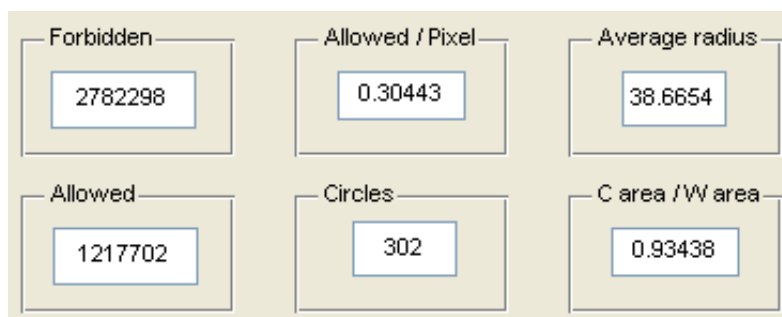


圖 3-11 隨機非連續地形之參數分析

上承前幾節所討論的結果，可知若地形中有大範圍的不可立足區域，則機器人較困難跨越此地形，而標準差 σ 越大則代表半徑變化越大，也可以說是地形變的較不「規則」，越容易產生大範圍的不可立足區域，因此若其他參數皆固定，標準差 σ 越大則機器人要跨越此地形就越困難。

想知道平均圓半徑大小對機器人行走難易度的影響，可使用機器人工作範圍比或標準差的觀點來探討。平均圓半徑越大工作範圍比就越大，因此越困難；由於平均圓半徑一定大於 0，因此平均圓半徑越大則標準差可能就越大，行走上也是越困難。綜合兩種觀點，地形的平均圓半徑越大則機器人行走就越困難。

整理以上結果，在無因次化的地形設計中，我們先設定機器人工作範圍比 CW，依此求得可立足區域的平均圓半徑 R_{avg} ，再設定標準差 σ 及 N 種圓，即可得到圓半徑的數列，最後就用這些圓半徑依照前幾節的方法產生隨機地形、由於在此提到的設計參數如 CW、 σ 及 N 皆無因次，因此本研究所產生的隨機地形可以是一個相對於機器人工作範圍大小的地形，方便使用。

第四章 機器人行走步態設計

4.1 機器人直行步態初步構想

機器人使用三角步態移動時，同時只需用三足支撐，利於在有限的區域內找到立足點，因此本研究使用此步態為預設步態。而在機器人準備向前跨步時，立足點不一定在預設的 AEP 位置，再者由於 PEP 位置及受限於工作範圍中的 R_{\min} 區域，我們必須設計解決此問題的邏輯判斷以產生步態。以圖 3-3(a)為例，首先判斷左側中間足可移動範圍，如圖中灰色區域，機器人足部工作範圍可至內側圓之切線，此時 α 為 12.7° ，再來判斷右前足可移動範圍，方法同前所述，可將 α 修正成 -9.5° 至 12.7° ，最後判斷右後足可移動範圍，此時 α 沒有改變依然是 -9.5° 至 12.7° ，如此便完成 PEP Zone，此範圍即是機器人往前推進時身體所能移動的範圍。

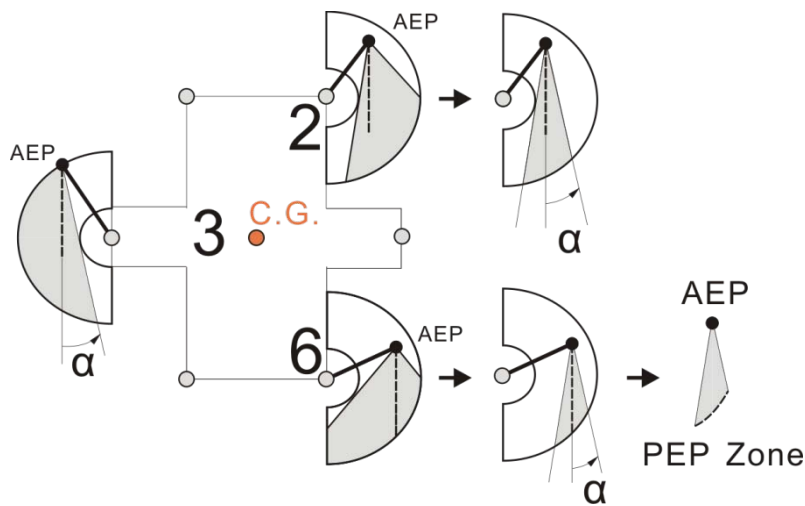


圖 4-1 步態設計：產生移動終點曲線

圖 4-2 中 2-3-6 足可移動的範圍為圖 4-1 的結果，而機器人中心推進的範圍為圖中 C.G. 至 C.G.' 的灰色區域，可由足部移動範圍水平鏡射後在垂直鏡射得到。

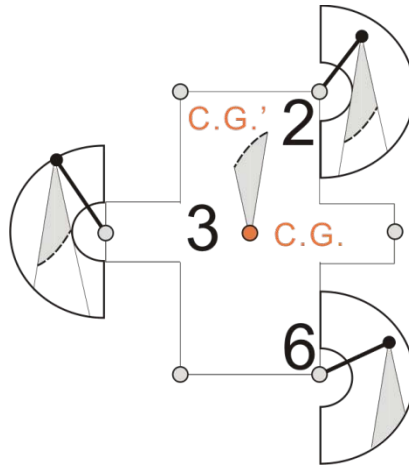


圖 4-2 步態設計：機器人向前移動範圍

找到身體能移動的範圍後，三個新的 AEP 範圍如圖 4-3 所示，由於前一步定義身體移動是一區域，而不是固定的一軌跡線，因此三足之 AEP Zone 將隨著之前的 PEP Zone 擴大。在 McGhee 的研究中[3]定義單足立足點至最遠的工作範圍距離為此足的 Kinematic margin(K_m)， K_m 越大代表可前進的距離越遠。因此我們可以用此觀念在尋找 AEP Zone 中選擇 K_m 值最大處使機器人可移動距離最大，也就越容易在非連續地形中找到下一步的立足點。三足皆找到立足點後，即可完成一個步態循環。值得一提的是，本研究採用的是非循環步態，因預設地形為不連續且不規則的隨機地形，即使找到循環步態也意義不大。

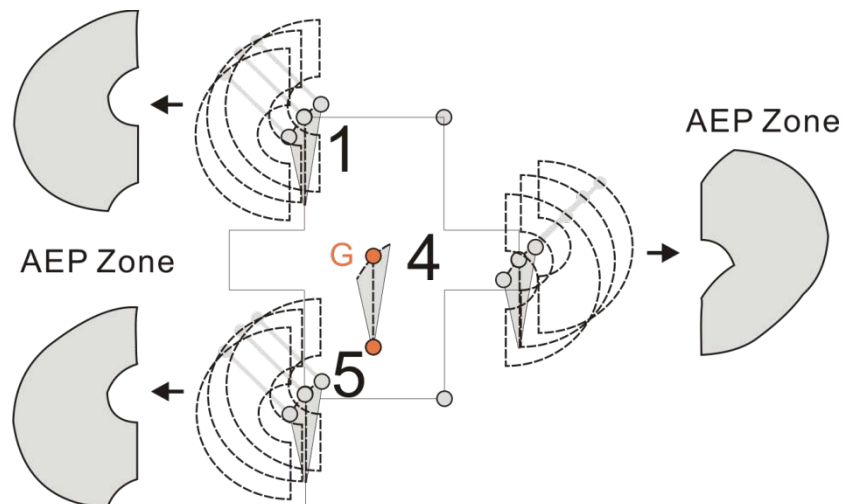


圖 4-3 步態設計：搜尋新的立足點

若挑出其中一種角度的工作範圍矩陣圖出來研究，以往右前方 15 度為例，如圖 4-5 所示，其實已經和之前的初步構想有些許不同，不同的地方是此資料庫的方法先決定移動的角度，然後就直接將以每個點為立足點可行走的距離都算出來，而之前的初步構想是先決定立足點，再由立足點決定可移動的角度範圍。而使用此資料庫的方法可以發現足部工作範圍很明顯的分成涇渭分明的兩個區域，一邊顏色淺(可移動距離長)，一邊顏色深(可移動距離短)，是由於工作範圍為扇形，幾何上為一種凹的圖形(concave)，圖形中任兩點的連線可能會經過圖形外。若使用初步構想的方法必須針對每個點去計算其與內側圓的切線，以決定可移動的角度範圍，而資料庫方法不需計算切線，而是把整個工作範圍中的 K_m 值皆算出來，因此會變成兩種顏色不同的區域，多計算了圖中較暗的區域但不用計算與內側圓的切線，實際程式執行時仍是一瞬間就能計算出結果。

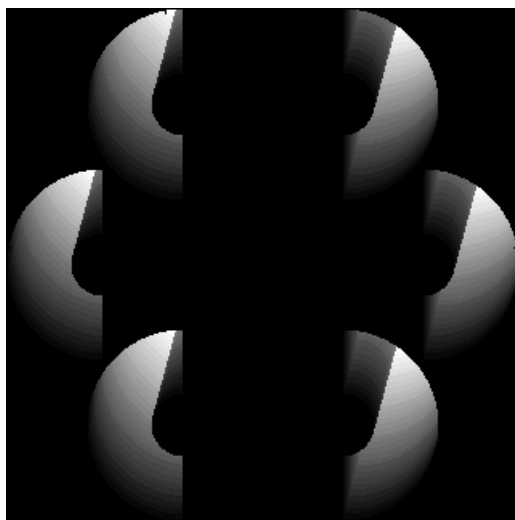


圖 4-5 六足機器人往前 15 度直線移動矩陣

4.2.2. 機器人直線前進步態結果分析

本研究在機器人直線前進方面建立了八個角度的直線移動矩陣資料庫，分別是 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 -15° 、 -30° 、 -45° ，實際上也可因需求而將角度間隔變小，方法皆相同，以建立更精確的行走模式。圖 4-6 為針對直線移動矩陣的參數定義，分別是前進角度 α ，步幅 S ，及 S 在 X 方向與 Y 方向的分量分別為 S_X 及 S_Y ，由於數位程式中使用矩陣及離散的特性，機器人使用 S_X 及 S_Y 定義移動的距離會較 α 及 S 精確。

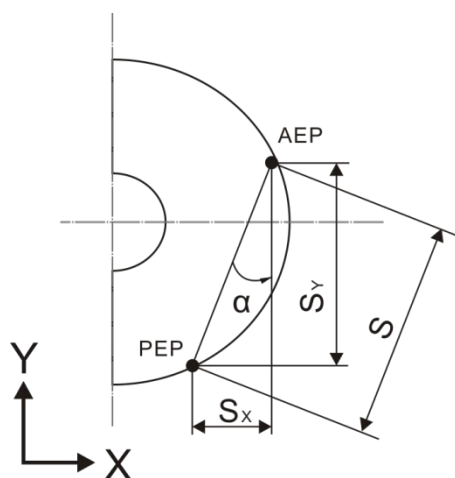


圖 4-6 機器人直線移動矩陣的參數定義

表 1 為詳細的機器人移動矩陣參數，由於機器人工作範圍為 180° 扇形，且對 Y 軸對稱，使得機器人向前移動步幅(S_Y)會較側向移動步幅(S_X)大，這也成為往後行走策略步態選擇時的一個依據。

表 1 機器人直線移動矩陣參數

α	S	S_x	S_y
0°	112	0	112
15°	111.5706	28	108
30°	101.2126	50	88
45°	83.4386	59	59
-15°	111.5706	-28	108
-30°	101.2126	-50	88
-45°	83.4386	-59	59

4.3 機器人旋轉步態設計

實際模擬機器人行走時，會遭遇須調整機器人角度的情況，Miao[17]曾對六足機器人使用三角步態繞某一曲率中心旋轉研究其較穩定的步態。本研究也有設計機器人旋轉步態，並期望能與直線步態搭配成為機器人行走策略。在此將機器人旋轉步態分為三部分介紹，分別為繞機器人重心旋轉步態、最大旋轉角度步態和繞任意曲率中心旋轉步態。

4.3.1. 機器人繞重心旋轉初步構想

本節使用機器人重心 G 即為旋轉之曲率中心，由初始位置繞其順時針方向旋轉，假設第二三六足為支撐足，分別可旋轉 θ_2 、 θ_3 、 θ_6 ，如圖 4-7 所示，並由 θ_2 、 θ_3 、 θ_6 中取最小角度 θ_2 ，約 30.1 度，為機器人在繞重心順時針自轉的最大角度。讓機器人旋轉 θ_2 後，可得旋轉後的一四五足工作範圍（圖中灰色區域），如圖 4-8 所示，從圖中灰色範圍尋找適當立足點，即可踏出並完成此自轉步態。

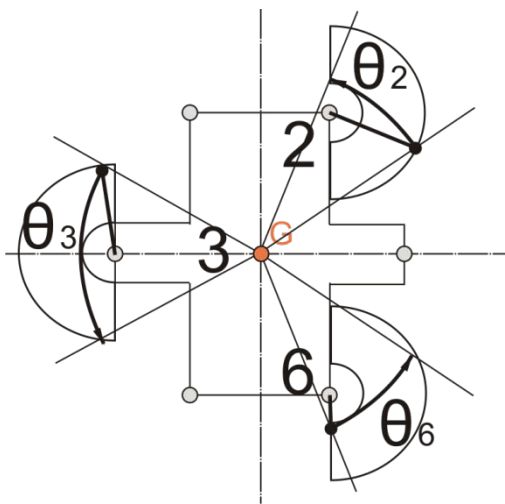


圖 4-7 繞重心旋轉之可旋轉角度

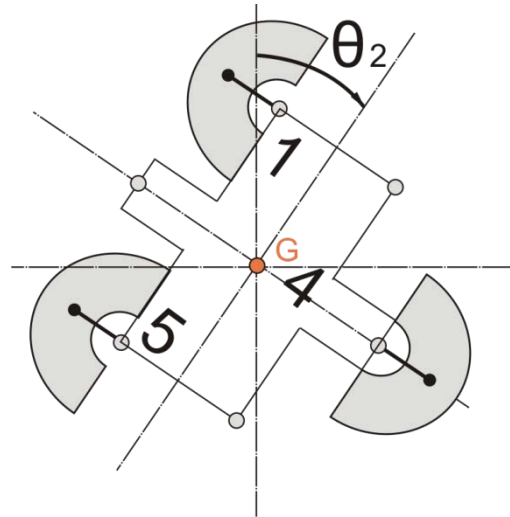


圖 4-8 繞重心旋轉後可立足範圍

4.3.2. 繞機器人中心旋轉程式設計

機器人旋轉步態的程式設計與 4.2 節方法相似，不過要分成兩步驟：先是計算出工作範圍內每一點至旋轉中心的距離，旋轉中心為圖中灰色菱形點，以一和工作範圍一樣大小的矩陣儲存，顯示時則是將離重心距離最遠的點定為 255(白色)，距離為 0 定為 0(黑色)，中間的範圍一樣等比例放大，即可做出如圖 4-9 的機器人繞重心旋轉半徑八位元灰階點陣圖。再來才能求得每一點可旋轉的角度，將工作範圍每一足中相同半徑的點逆時針方向尋找，再使用餘弦定理即可求出每一點可旋轉的角度，顯示時一樣是將最大的角度值定為 255，角度值 0 定為 0，可做出如圖 4-10 的繞重心旋轉角度點陣圖。

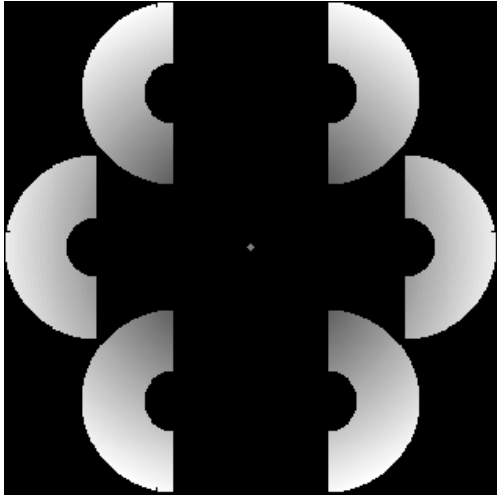


圖 4-9 繞重心旋轉半徑

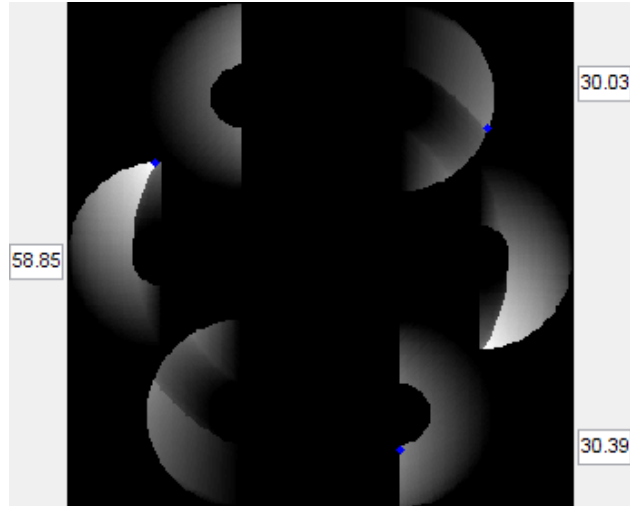


圖 4-10 繞重心旋轉角度

4.3.3. 機器人最大旋轉角度步態初步構想

由前節的結果可知當六足機器人繞重心旋轉時，會因工作範圍的排列方式無法以最大角度旋轉，在圖 4-7 中很明顯的 θ_3 最大，而在圖 4-10 中可知 θ_3 為 58.85° ， θ_2 和 θ_6 分別為 30.03° 和 30.39° 。當機器人以 2-3-6 足順時針旋轉時，若將旋轉中心向右移， θ_3 會越來越小， θ_2 和 θ_6 會越來越大，當 θ_2 、 θ_3 、 θ_6 相等時，即為圖 4-11 中 O_T 的位置，以此點為旋轉中心，可得機器人最大旋轉角度步態。而圖 4-12 為旋轉後的機器人示意圖，再從一四五足工作範圍中尋找立足點。此步態與繞機器人 C.G. 旋轉步態最大的不同是，此步態除了旋轉角度增大外，還可稍為往前移動一些距離，圖 4-12 中從機器人原本重心位置 G 指向旋轉後中心位置 G' 的箭頭即為機器人移動的軌跡，移動旋轉中心後機器人就不只是原地旋轉，能使機器人行走效率有所提升。

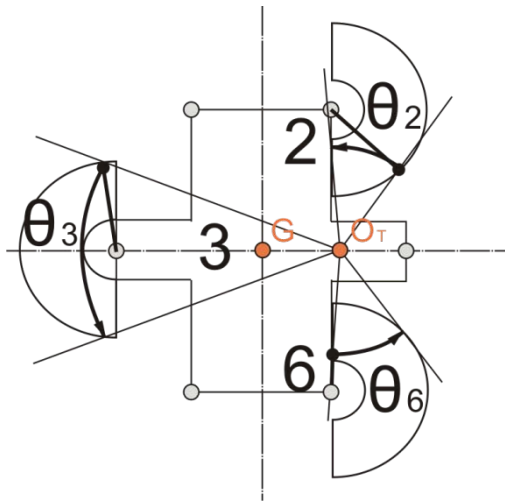


圖 4-11 繞 O_T 旋轉之可旋轉角度

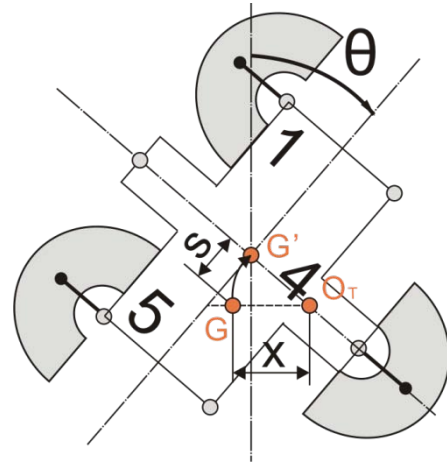


圖 4-12 繞 O_T 旋轉後可立足範圍

4.3.4. 最大旋轉角度旋轉程式設計

若移動旋轉中心，使用最大順時針旋轉角度步態，由程式試驗，可得旋轉中心為 C.G. 位置向右移 62 單位處，如圖 4-13 的灰色菱形方塊，其旋轉角度矩陣如圖 4-14 所示，可得機器人以 2-3-6 足旋轉之最大角度為 37.67 度。

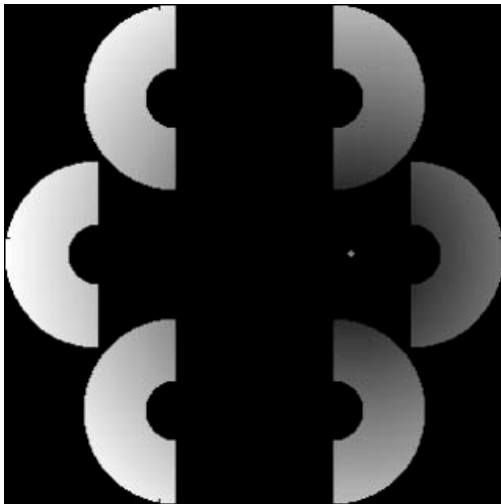


圖 4-13 最大旋轉角度重心位置

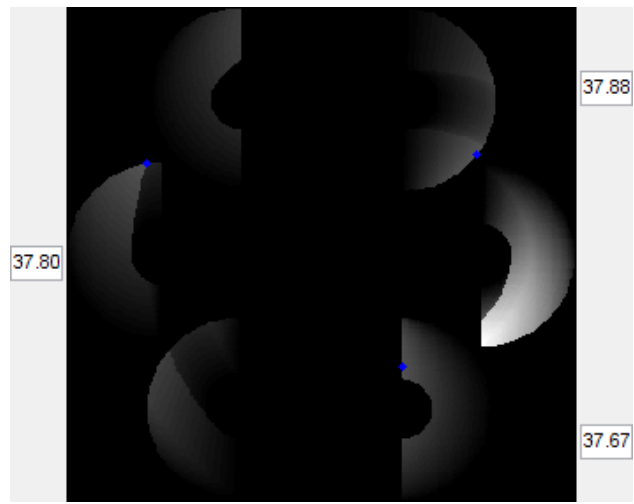


圖 4-14 最大旋轉角度

4.3.5. 繞 C.G.旋轉與最大旋轉角度旋轉設計結果分析

表 2 為以上兩種機器人旋轉方式參數一覽，其中繞 C.G 旋轉由於旋轉中心與機器人中心重合，因此旋轉時機器人無移動，而最大角度旋轉步態在旋轉 37.67° 的情況下，機器人中心能移動 40.16 單位，其中往 X 方向移動 13 單位，Y 方向移動 38 單位。

表 2 繞 C.G 及最大角度旋轉移動矩陣參數

	θ	S	S_x	S_y	R	X	Y
繞 C.G 旋轉	30.03°	0	0	0	0	0	0
最大角度旋轉	37.67°	40.16	13	38	62	62	0

在此必須注意的是，由於最大角度旋轉步態只適用於當機器人以 2-3-6 足為立足點時的情況，因此，若機器人以 1-4-5 足為立足點時，仍是使用繞 C.G 旋轉為其最大角度旋轉步態。

4.3.6. 繞任意點旋轉步態初步構想與程式設計

研究機器人旋轉步態的相關文獻中，多半是假設旋轉中心即為機器人中心[29]，或者為已知的任意點，再決定旋轉角度並設計較穩定的走法[17]。但我們想換個方式，將機器人旋轉中心 O_T 移到有道理的任意位置。不過這裡關鍵是究竟 O_T 要移到何處，由於本研究假設目標方向在機器人右前方，因此機器人的旋轉中心在右後方，每足工作範圍皆完整的情況下機器人可旋轉角度將被距離旋轉中心最遠的第 1 足和第 3 足所限制，如圖 4-15 所示，因此我們限制機器人每步至少能旋轉 θ 度，依此為條件希望機器人中心移動距離 S 能最大，並用程式找出此條件下的機器人旋轉中心 O_T 的位置。

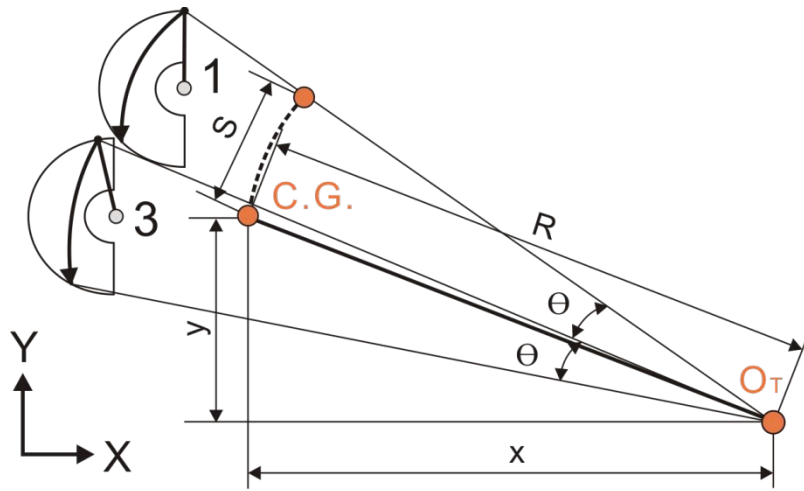


圖 4-15 機器人繞任意點 O_T 旋轉

找到旋轉中心後，方法就和前述相同，分別做出旋轉半徑矩陣和旋轉角度矩陣以供機器人行走時使用，圖 4-18 和圖 4-19 為旋轉 5° 步態的移動矩陣，圖 4-18 和圖 4-19 為旋轉 10° 步態的移動矩陣。

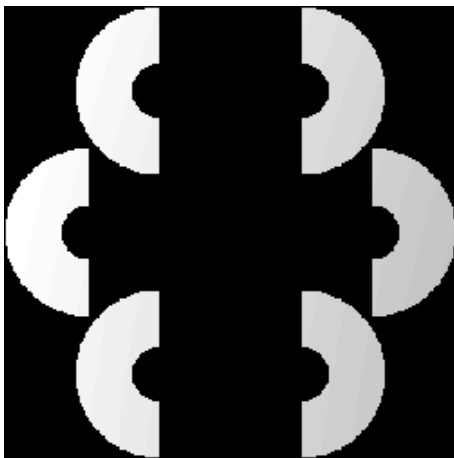


圖 4-16 5° 旋轉半徑矩陣

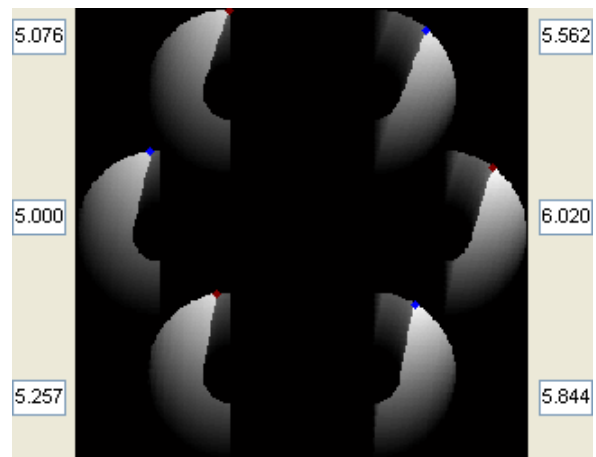


圖 4-17 5° 可旋轉角度矩陣

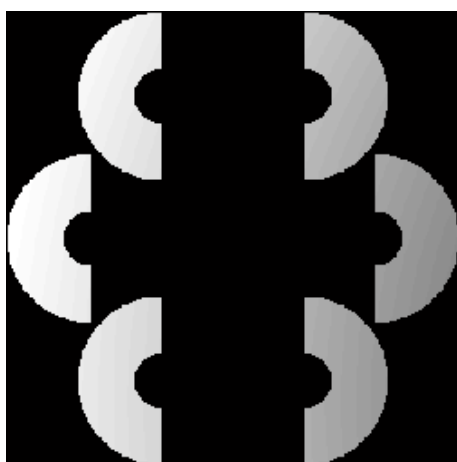


圖 4-18 10°旋轉半徑矩陣

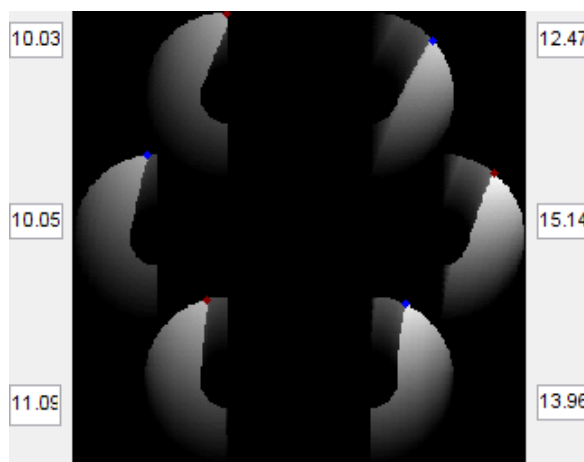


圖 4-19 10°可旋轉角度矩陣

4.3.7. 繞任意點旋轉設計結果分析

表 3 為限制 θ 分別為 5° 和 10° 的旋轉矩陣計算結果分析， O_T 距離 C.G. 點 X 方向 x 單位、Y 方向 y 單位，半徑大小為 R，機器人中心移動距離為 S，S 在 X 方向和 Y 方向的分量分別為 S_X 和 S_Y 。

表 3 旋轉角度為 5° 及 10° 之旋轉中心位置

θ	S	S_X	S_Y	R	X	Y
5°	101.92	28	98	1162.3	1130	272
10°	93.01	27	89	527.7	515	115

將表 3 的旋轉移動結果與表 1 直線移動結果相較，可發現旋轉 5° 的中心移動距離為 101.92，而往前 15° 直線前進的步幅為 111.5706，恰好是 Y 方向少移動了 10 個單位。雖然旋轉 5° 步態每步少移動了一些距離，但它有旋轉的附加價值，因此若機器人需要移動且希望能旋轉一些角度時，就應選擇此旋轉 5° 步態，若需要更大的旋轉角度，則可再稍微犧牲一些 Y 方向的移動距離選擇旋轉 10° 的步態。

4.4 機器人步態變換

4.4.1 機器人步態變換初步構想

前述六足機器人皆是使用三角步態(tripod gait)行走，原因是三角步態同時只需使用三足著地，且在符合靜態穩定的條件下($S_m > 0$)行走速度最快。不過，六足機器人還有許多不同的步態可以使用，尤其是在使用三角步態無法找到三個立足點時，勢必得變換步態走法。

當三角步態無法行走時，可使用四足為立足點的步態中繼，再轉換回三角步態。圖 4-20 是使用三角步態從 2-3-6 足變換為 1-4-5 足的例子，從圖中我們可知因第 6 足的緣故使得 2、3 足皆有餘裕可繼續前進，若下一步 1-4-5 足中只有第 1 足無可立足範圍，則讓 2、3 足先不離地，並使用 2-3-4-5 足的步態往前前進一段距離，再將第 2、3 足離地第 1 足著地換回 1-4-5 足的步態，度過這個難關。

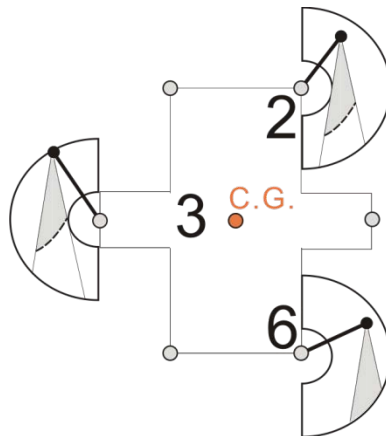


圖 4-20 機器人 2-3-6 足著地前進

圖 4-21 為整理出三角步態與四足步態變換的所有組合。中間上圖為第 3 足或第 4 足無立足點的情況；中圖為第 2 足或第 5 足無立足點的情況；下圖為第 6 足或第 1 足無立足點的情況。此圖中箭頭是雙向的，代表可從 1-4-5 足變到 2-3-6 足的途中使用此種步態，也可由 2-3-6 足變換回 1-4-5 足的途中使用。仔細研究圖 4-21 中間三圖，可知此為對稱步態(symmetrical gait)。不過在生物界中，大多數生物被觀察到使用另一種四足步態，稱為異相步態(metachronal gait) [1][33][34]，也可將此四足對稱步態分類為人工步態[15]。

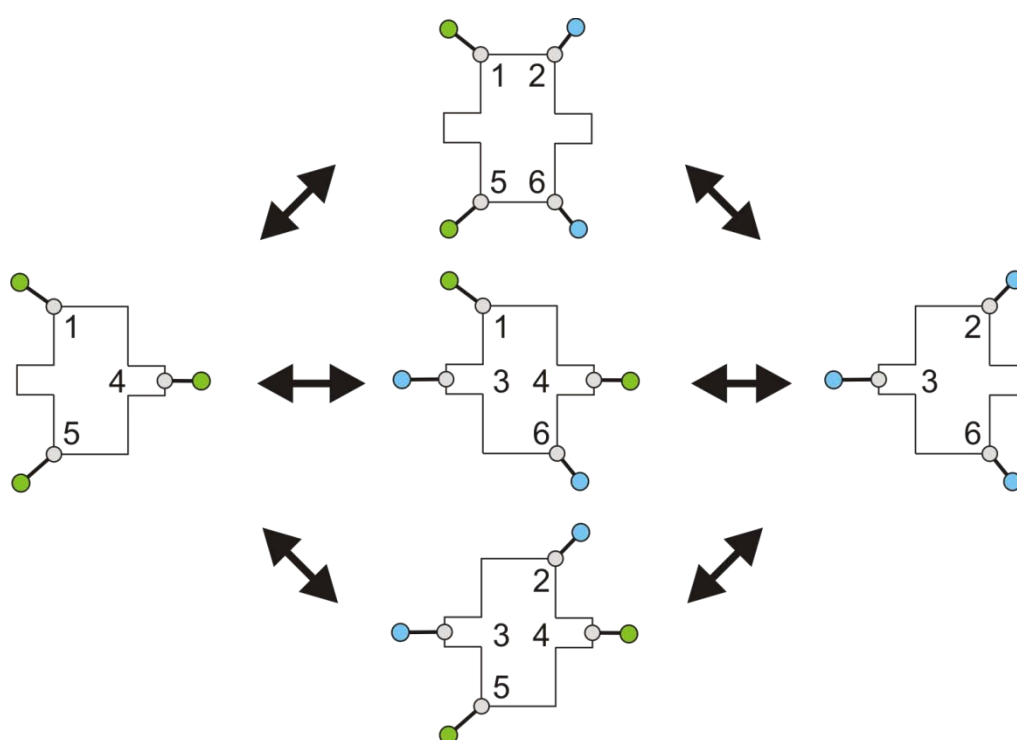


圖 4-21 機器人步態變換方法

4.4.2 機器人步態變換程式實作

程式中實作結果如圖 4-22 所示，此次實驗假設目標位置在機器人正前方，因此皆採用直線前進 0° 的步態。機器人由下往上走，前幾步使用三角步態皆可找到立足點並前進，圖中綠色方塊為 1-4-5 立足點、藍色方塊 2-3-6 足立足點。機器人在走了若干步後遇到瓶頸，機器人此步由 1-4-5 立足點轉換為 2-3-6 立足點的過程中，圖 4-23 右上方全為黑色區域，代表第 2 足無立足點，而 3-6 足有立足點。圖

4-23 和圖 4-24 機器人每足工作範圍旁上方表格數值為 k_m ，下方表格數值為上一步移動所產生的餘裕。因此第 3 足和第 6 足的最大 K_m 分別為 68 和 40，而由圖中可之第 1 和第 4 足仍有上一步所產生的餘裕， K_m 分別為 51 和 70，因此決定讓機器人由三角步態轉換為四足對稱步態，以 1-3-4-6 足為立足點並使機器人移動 40 單位，如圖 4-22 中的紫色線段所示。然後再確認第 2 足使否已有可立足點，如圖 4-24 的右上方區域，找到後即可令 14 足離地，轉換回以 2-3-6 足為立足點的三角步態。本例由於使用的四足對稱步態中最小的 k_m 是在第 6 足，為轉換回 2-3-6 足的三角步態後的其中一足，因此，轉換回三角步態後無法前進，必須要再找到以 1-4-5 足的立足點才能繼續前進。

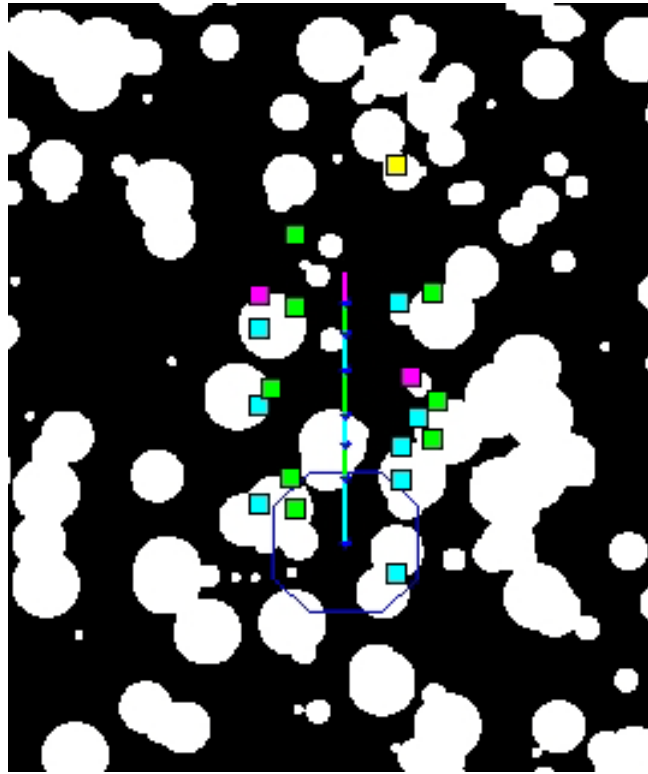


圖 4-22 機器人步態變換行走軌跡

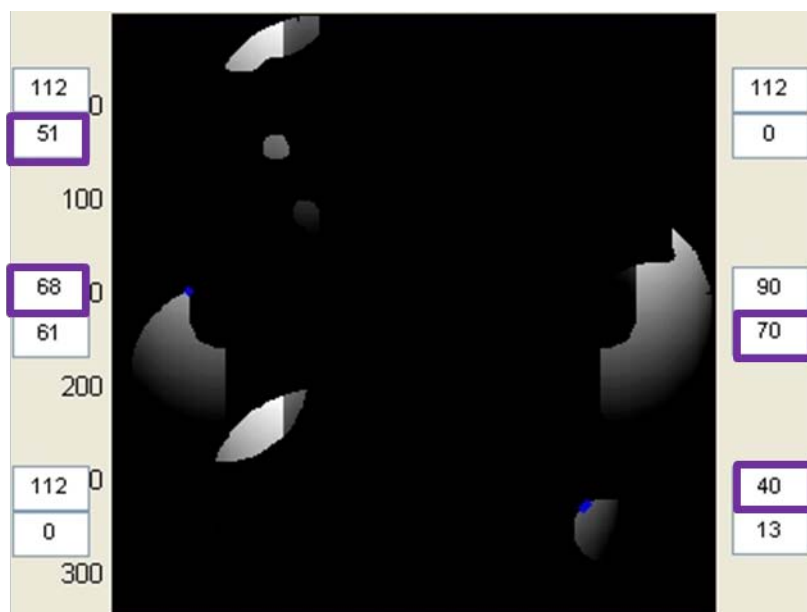


圖 4-23 機器人步態變換：四足對稱步態

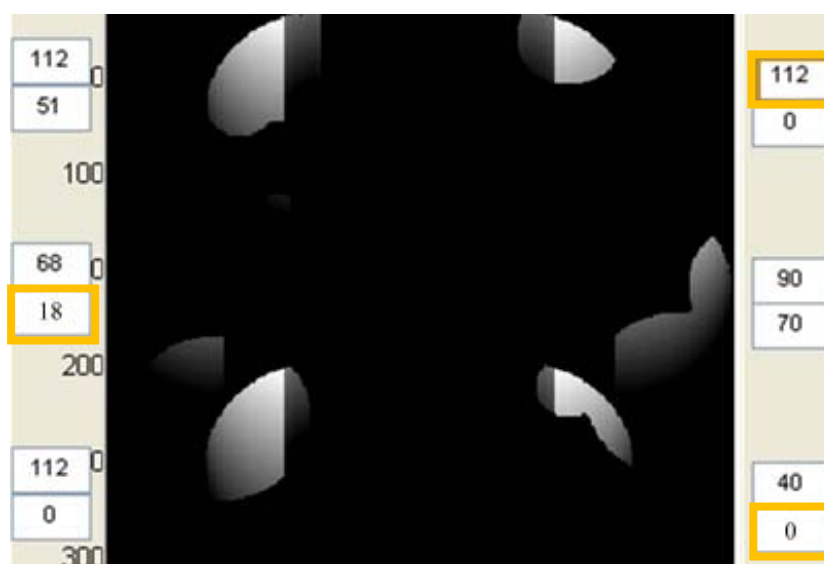


圖 4-24 機器人步態變換：回到三角步態

第五章 機器人行走策略

前幾章皆是機器人行走策略的準備工作，包括準備階段：設定機器人足部工作範圍（第二章）和建立非連續地形（第三章），以及機器人行走步態設計（第四章）。有了這些定義及工具後，終於可以研究機器人在非連續地形上的行走策略。

5.1 機器人在非連續地形上的行走策略

在針對地形的行走策略方面，已有普遍應用於遊戲程式中針對連續地形的 A* 演算法，但此連續地形的演算法遇到障礙物是「繞過」物而非「跨越」，所以在根本上就完全不同，無法直接套用。因此，本研究希望能找出適用於機器人跨越非連續地形的流程，由其是在前幾章所述的許多工具及移動資料庫，如何適當的運用就相當重要。

前文中有提到機器人可先判斷下一步有無立足點，再決定是否前進，也就是預先知道下一步工作範圍內的地形，而也有許多相關研究重點是在讓機器人辨識周遭地形的視覺系統[4][31]。本研究所建立的機器人移動資料庫共有直線移動八種，旋轉四種，以及三角步態與四足對稱步態的變換，由於機器人的工作範圍設定上前進 0° 步幅最大， $\pm 15^\circ$ 次之，因此以流程圖中以旋轉為優先，希望先轉到與目標方向夾角為 0° 之後再直線前進。至於要選擇何種的旋轉步態，若與目標夾角大於 35° ，則使用最大旋轉角度步態，先以旋轉角度為優先；若與目標夾角小於 35° ，則使用旋轉 5° 或旋轉 10° 的步態，邊旋轉邊向目標前進。旋轉完成後，使用直線前進步態配合 5.4 節的方法選擇前進角度，無法前進時還可嘗試將三角步態轉換為四足對稱步態，依此前進直至終點，詳細的流程圖如圖 5-1 所示。

值得一提的是依照此流程三角步態轉換為四足對稱步態使用到的機會很少，因為在選擇前進角度時就已避開許多無法找到立足點的情況了，雖然機會不多，但遇到時將就代表機器人可跨越只用三角步態時無法跨越的地形。

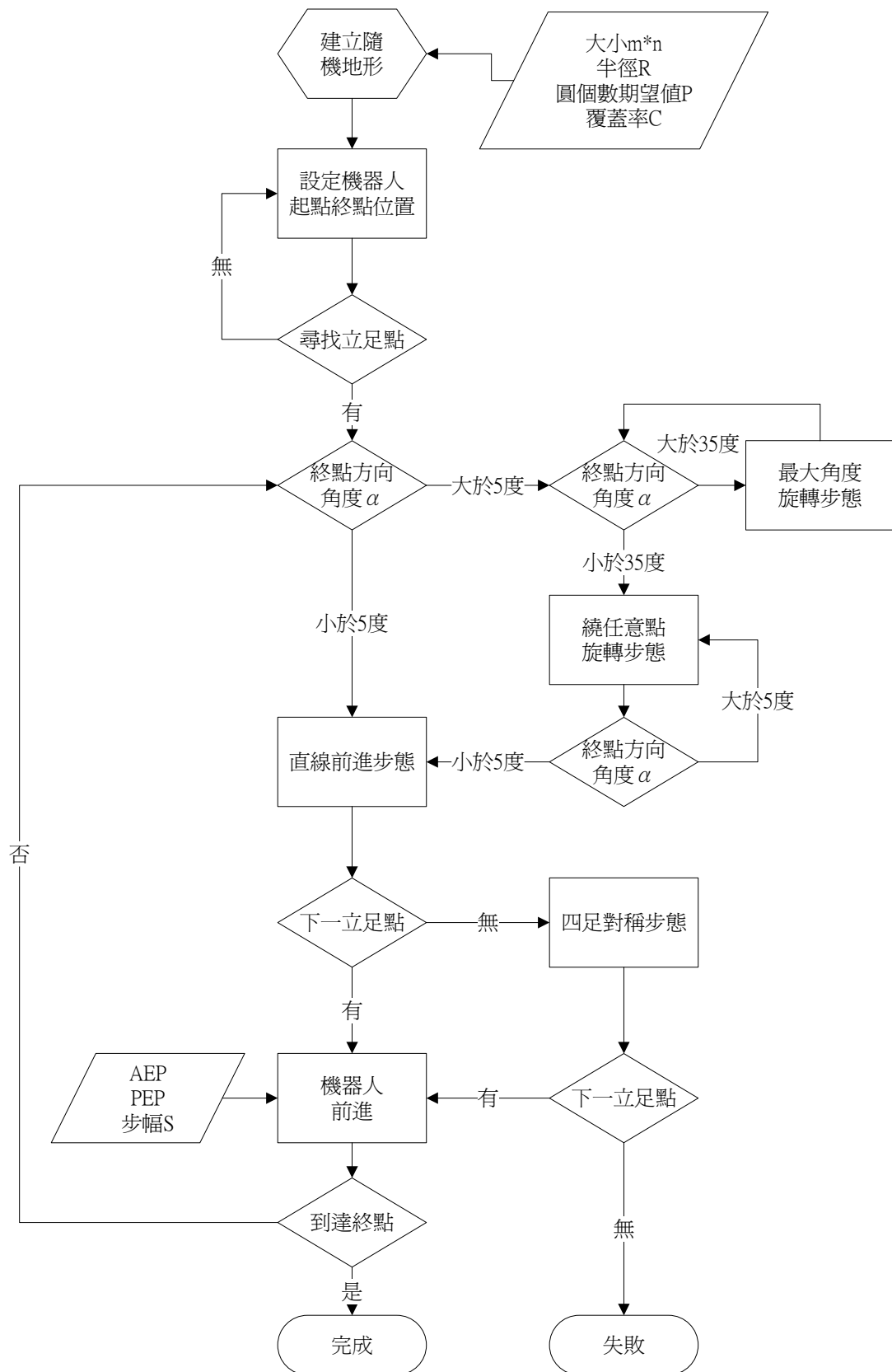


圖 5-1 機器人行走策略流程

5.2 尋找立足點

我們決定機器人初始位置後，就可開始尋找在這位置上是否有立足點。尋找立足點的方法就是將機器人工作範圍與地形重疊，如圖 5-2 所示，圖中灰色區域為機器人足部工作範圍與地形可立足區域的交集，即為機器人在起始位置的可立足區域。

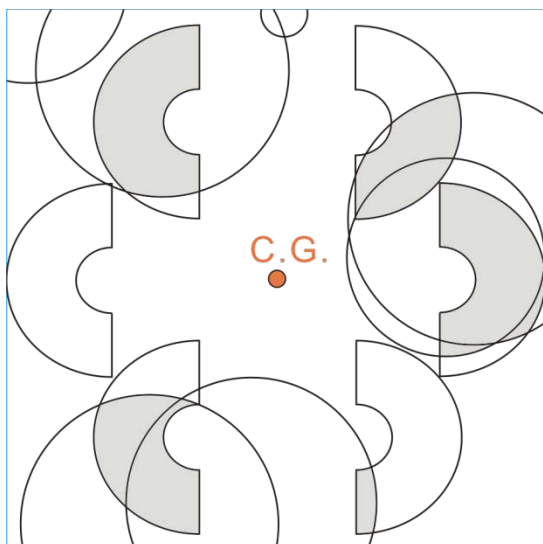


圖 5-2 尋找立足點方法

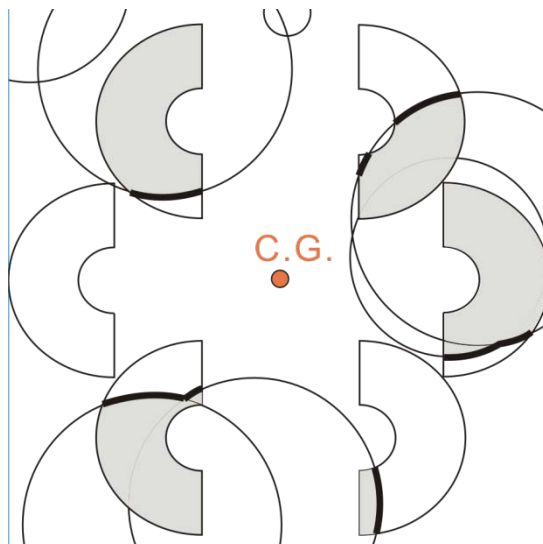


圖 5-3 地形邊緣

5.3 地形邊緣檢測

先前學長六足機器人跨越棧道地形的研究中[14]，有特別提到機器人踩到棧道邊緣容易打滑甚至跌倒的情形，因此我們希望能夠找出地形的邊緣，並讓機器人避開這些區域，如圖5-3所示。本研究針對地形使用影像處理中的影像侵蝕(erosion)方法[32]，將地形邊緣部分侵蝕掉。本例使用的結構元素(structuring elements)為7×7大小的圓，如圖5-4所示，也可配合實際機器人足底機構而改變其大小，或者因應地形形態而改變其形狀。圖5-5為原始地形，圖中白色部分為可立足區域，黑色部分為不可立足區域，圖5-6為影像侵蝕後的結果，可看到白色區域範圍變小了，圖5-7為影像侵蝕前後的比較，可知確實有將地形的邊緣部分轉變為不可立足區域。

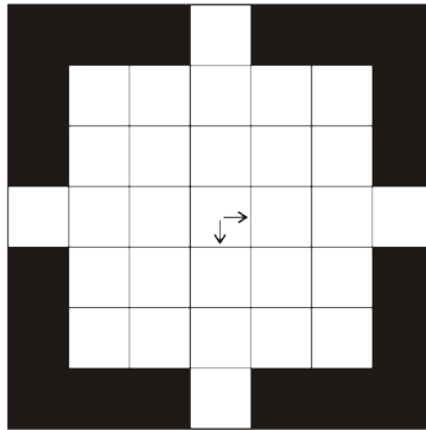


圖 5-4 影像侵蝕所使用的結構元素

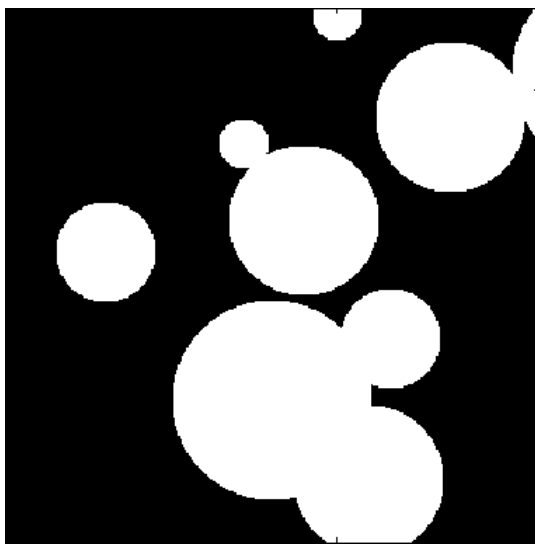


圖 5-5 原始地形

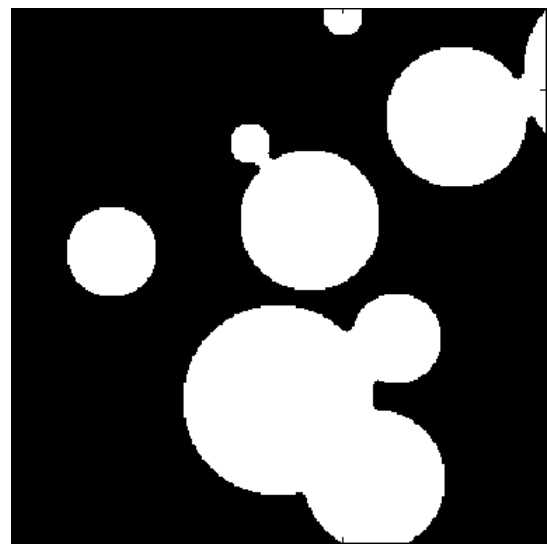


圖 5-6 影像侵蝕處理後地形

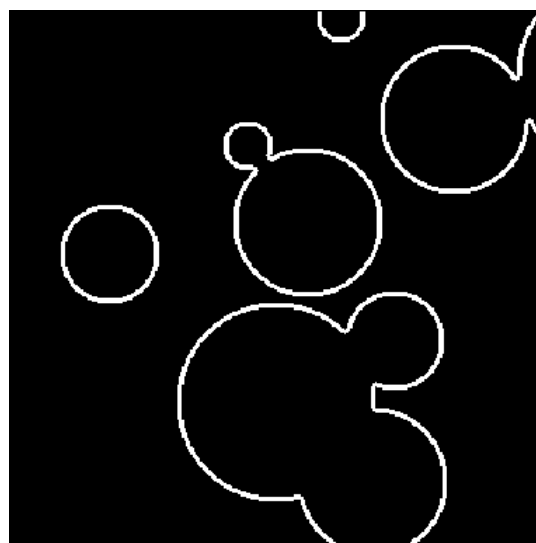


圖 5-7 影像侵蝕前後比較

圖 5-8(右)為尋找立足點的程式運算結果，是可立足區域的地形與機器人工作範圍重合的結果，由圖可判斷機器人第 3 足無可以足區域，因此只可選擇以 1-4-5 為立足點的步態，並且選擇工作範圍中數值最大(顏色最白)的點為立足點，以便之後機器人推進時能移動距離最遠。



圖 5-8 地形與機器人工作範圍重合矩陣圖

5.4 機器人跨越非連續地形直線移動步態選擇法

本研究在機器人直線移動資料庫中共有八種移動角度，配合預先知道下一步有無立足點的判斷方法則共有 64 種步態的排列組合，若每走一步便計算各種組合則曠日廢時，因此本研究設計的方法先計算以往前 0° 度為優先，且方向改變較小的組合，將 64 種組合分為 3 組計算，計算結果若與目標點減少距離大於表 1 中步幅(S)的 80%，則以此種步態移動，若小於 80%則往繼續計算其他方向改變較大的組合，若全部組合皆計算完則直接選擇與目標點減少距離最大的步態，本方法詳細流程圖如圖 5-9 所示。

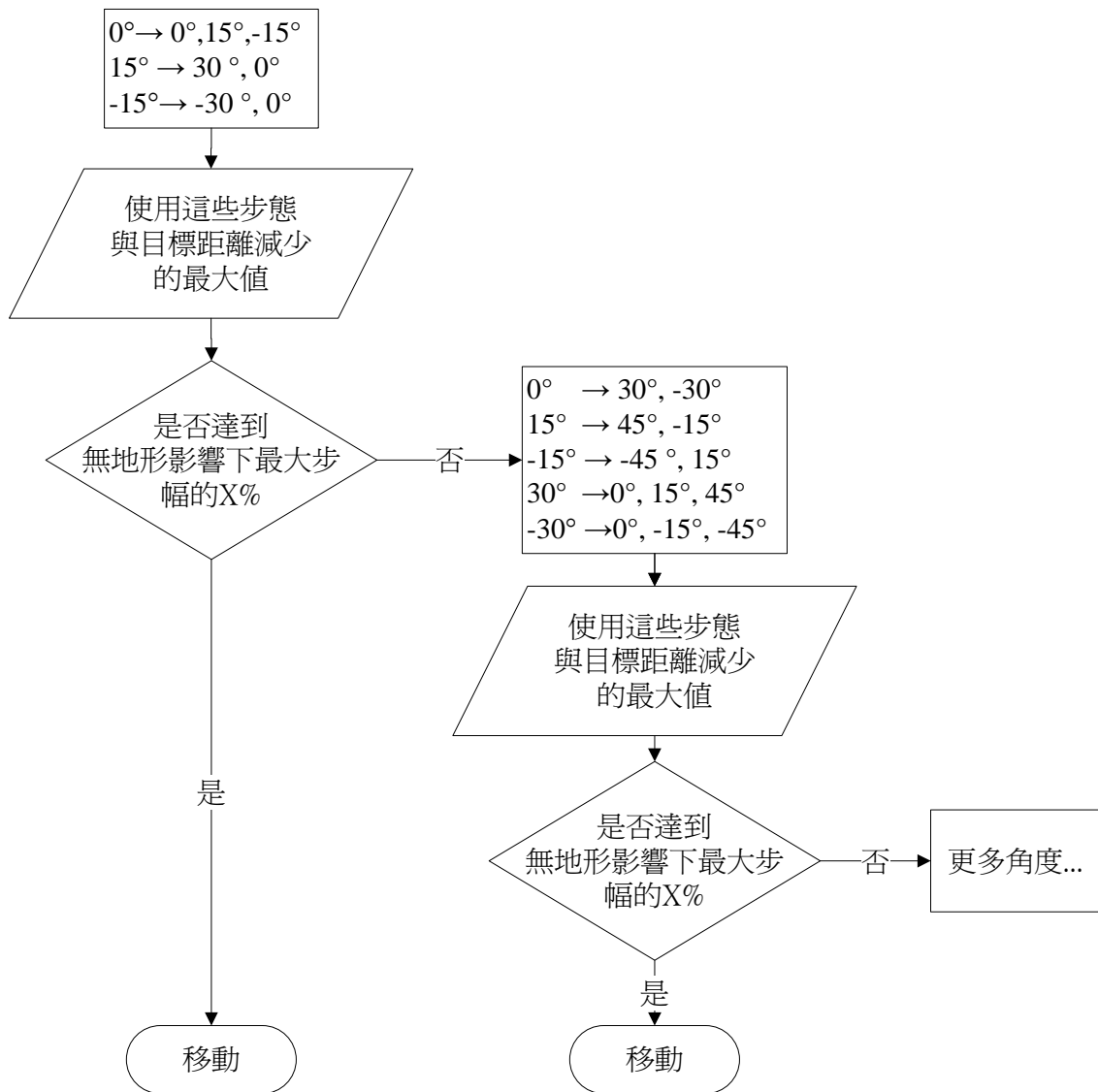


圖 5-9 機器人跨越非連續地形直線移動步態選擇流程

若不欲機器人頻繁地改變前進角度，則可於程式判斷條件中除了與目標點減少距離外，另外針對方向改變時加入懲罰參數，當機器人方向改變時程式計算的移動距離便較實際移動距離短，使程式選擇方向改變較小的步態，以避免機器人發生蛇行的情況。

5.5 機器人步態記錄方法

我們希望能將行走過程中機器人的位置、立足點、步態等等的參數都記錄下來，往後可讀取之前行走的記錄甚至以動畫呈現，不過在旋轉時遇到一個問題，因為旋轉的過程中會轉到地形，若直接記錄位置則已經和原本未旋轉前的位置不同了，因此就需要多幾個步驟來記錄行走的過程。

首先在旋轉前判斷下一步有無立足點，避免轉完後無法再繼續前進，如圖 5-10 所示，綠色圓點為目前機器人位置，紅色圓點為目標點。若旋轉中心不在機器人中心，則機器人會移動一段距離，圖 5-10 中的虛線圓即是機器人下一步的中心位置，而由虛線所構成的機器人工作範圍即是預先判斷有無立足點的區域。然後是旋轉，在此我們使用如圖 5-11 旋轉地形的方​​法，並找到旋轉後機器人的位置及目標點，依舊以綠色圓點及紅色圓點表示。由於圖片旋轉的關係，地形變大，必須剪裁使得機器人目前位置和圖 5-10 中虛線圓的機器人位置相同，如圖 5-12(左)所示，接下來就可以繼續尋找下一個立足點，如圖 5-12(右)所示。

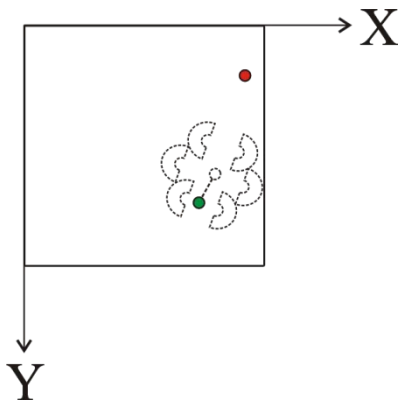


圖 5-10 旋轉判斷下一步有無立足點

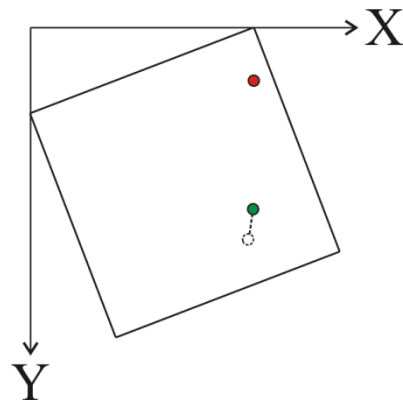


圖 5-11 地形旋轉

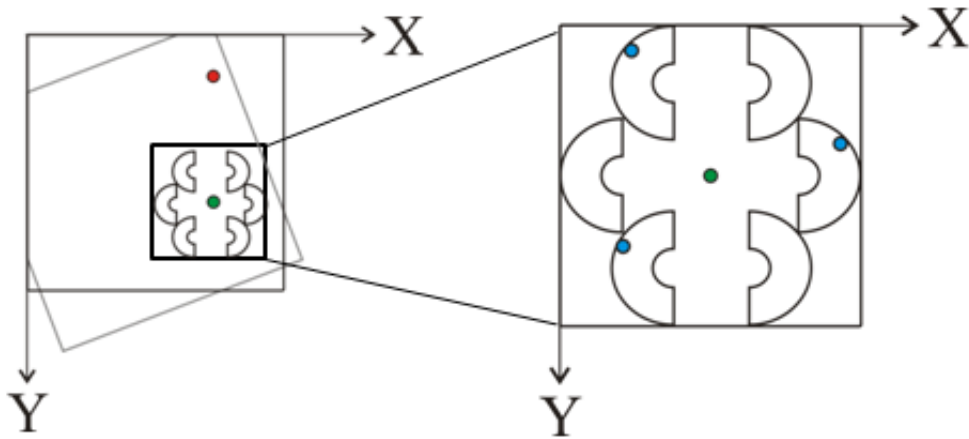


圖 5-12 剪裁與尋找立足點

雖然已經完成旋轉且可以繼續尋找下一個立足點了，但由於地形是旋轉過的，我們若要以站在地上的第三人稱觀點來記錄機器人的移動軌跡，因找到的立足點位置和原始地形位置並不相同，所以需要多幾個步驟。方法是旋轉機器人，並將座標軸移到機器人的中心，如圖 5-13 及圖 5-14 所示，最後再將圖 5-14 中的三個立足點貼回未旋轉的原始地形中，如圖 5-15 所示，如此一來即可得到第三人稱視角的機器人移動軌跡。

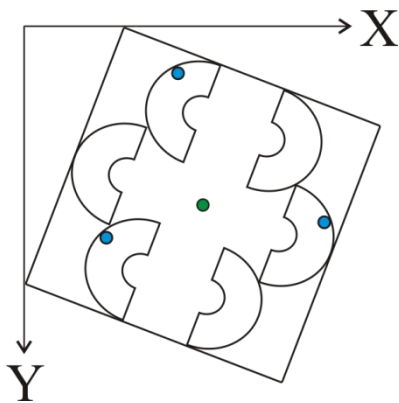


圖 5-13 機器人旋轉

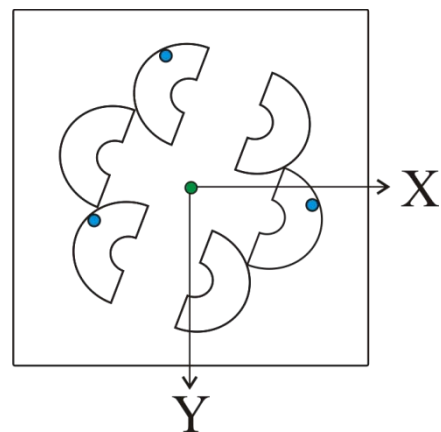


圖 5-14 平移機器人座標軸

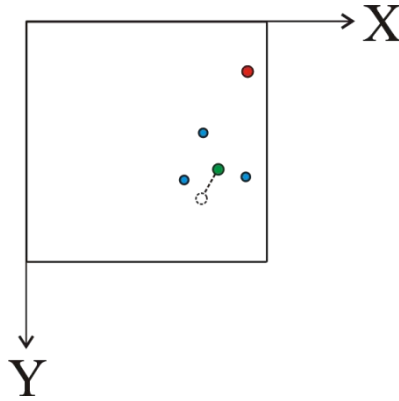


圖 5-15 將立足點貼回未旋轉的地形上

5.6 機器人行走策略程式實作

本節將實際使用前述流程設計程式。首先，建立隨機地形，本次建立的隨機地形分析如圖 5-16 所示，可立足區域為 715 個圓，半徑分別為 10、20、30、40、50 隨機挑選，平均半徑為 29.7063，覆蓋率為 41.158%，而平均可立足區域面積與機器人工作範圍面積的比為 0.55154。使用機器人在上述地形中行走，走完後儲存移動記錄，之後再讀取移動記錄，就能呈現如圖 5-17 的機器人移動軌跡。本程式採用如圖 5-1 的流程，先使用旋轉 5° 步態前進，直到與目標方向夾角為 0° 後，便改用直線前進步態配合 5.4 的選擇方法移動到終點。

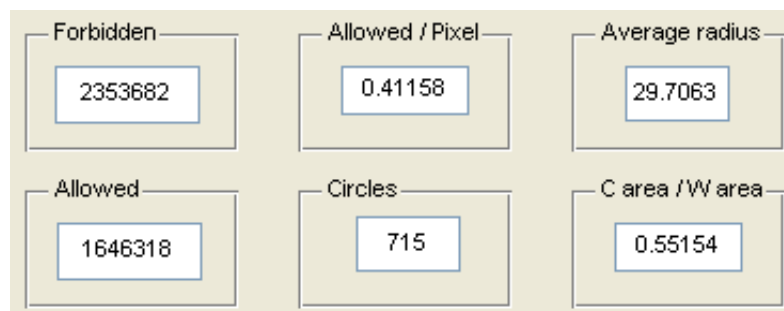


圖 5-16 機器人行走策略程式實作地形分析

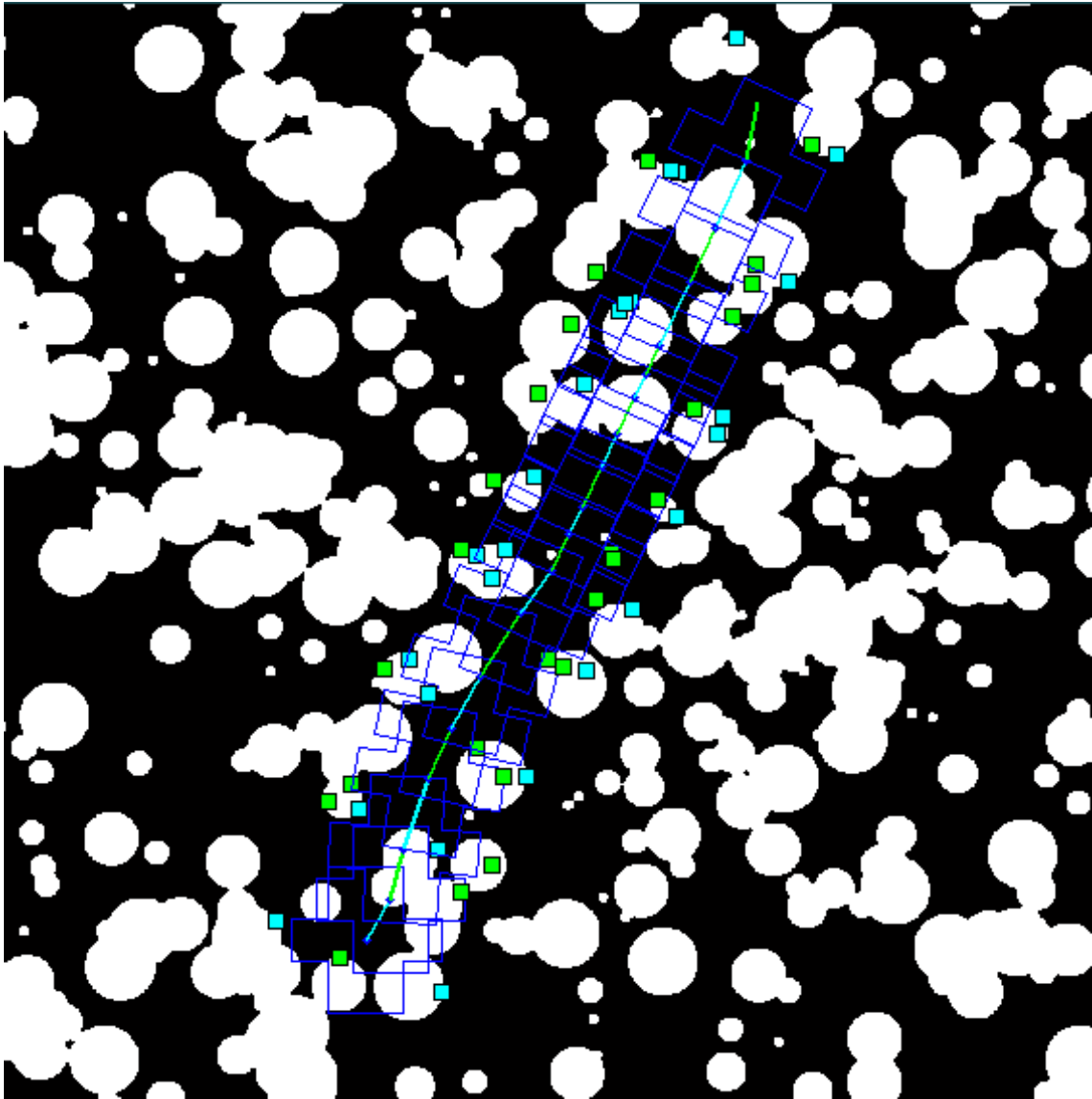


圖 5-17 機器人移動軌跡

5.7 於無因次化地形之機器人行走實驗

使用如前述相同的行走策略，不同的是本例使用的是圖 3-10 使用無因次化參數所產生的隨機地形，圖中以紅色菱形方塊分別表示起始位置及終點位置，分別為(641,1642)和(1443,256)，1-4-5 足著地以綠色方塊表示，2-3-6 足著地以藍色方塊表示。本次實驗機器人一共走了 27 步，如表 4 所示，position 為機器人目前中心位置，Gait 為機器人此步所選擇的步態，有旋轉步態及直線移動步態等選擇，由於使用三角步態，因此 Foothold 為 1-4-5 足及 2-3-6 為足輪流使用，最右邊的 angle 欄為目前機器人與 Y 軸的夾角，當機器人使用旋轉步態時，下一步的角度即會改

變。而由表中最後一列中機器人位置可知最後機器人並沒有走到目標位置，而是在中途就找不到下一步的立足點而停止了，對照圖 5-18 可發現最後機器人左前方有一大塊的黑色不可立足區域，因此機器人移動無法找到下一步的立足點。

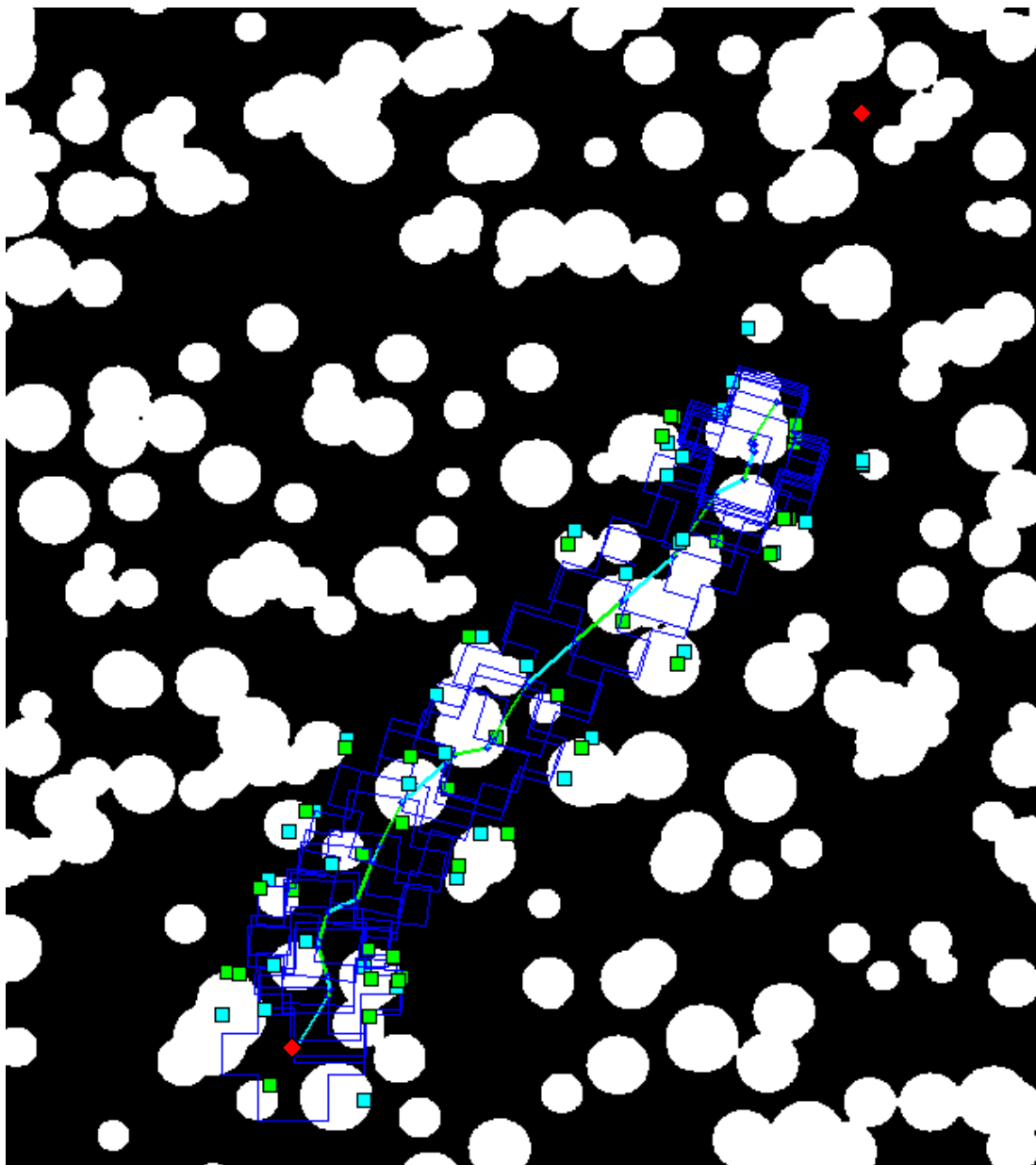


圖 5-18 機器人移動軌跡

表 4 機器人移動數值

	Position	Gait		Foothold			angle
1	(641,1642)	30	2-3-6	(742,1512)	(540,1584)	(742,1712)	0
2	(691,1554)	Turn5°	1-4-5	(640,1396)	(764,1525)	(608,1687)	0

3	(693,1544)	-15	2-3-6	(744,1484)	(547,1520)	(748,1586)	0.4945
4	(688,1522)	-15	1-4-5	(604,1380)	(789,1542)	(601,1577)	0.4945
5	(677,1481)	Turn10°	2-3-6	(739,1340)	(565,1523)	(753,1528)	0.4945
6	(680,1467)	Turn10°	1-4-5	(630,1309)	(786,1495)	(615,1511)	1.9497
7	(690,1428)	60	2-3-6	(780,1285)	(590,1402)	(799,1519)	6.2533
8	(729,1405)	Turn5°	1-4-5	(653,1280)	(865,1358)	(664,1477)	6.2533
9	(744,1346)	Turn10°	2-3-6	(831,1222)	(638,1288)	(795,1482)	9.2275
10	(750,1320)	Turn5°	1-4-5	(671,1174)	(866,1273)	(690,1363)	12.0757
11	(768,1252)	30	2-3-6	(869,1222)	(667,1194)	(869,1322)	15.5522
12	(818,1164)	60	1-4-5	(768,1084)	(977,1155)	(768,1222)	15.5522
13	(859,1141)	Turn10°	2-3-6	(935,1039)	(759,1183)	(922,1257)	15.5522
14	(862,1126)	15	1-4-5	(803,984)	(997,1084)	(804,1168)	17.1277
15	(887,1033)	30	2-3-6	(988,903)	(787,990)	(988,1103)	17.1277
16	(933,952)	30	1-4-5	(882,794)	(1084,922)	(878,1009)	17.1277
17	(977,875)	30	2-3-6	(1076,751)	(876,817)	(1078,945)	17.1277
18	(1025,791)	15	1-4-5	(966,633)	(1158,746)	(968,835)	17.1277
19	(1054,683)	45	2-3-6	(1136,581)	(954,625)	(1154,751)	17.1277
20	(1085,652)	0	1-4-5	(1021,567)	(1186,689)	(1026,770)	17.1277
21	(1085,629)	0	2-3-6	(1136,570)	(963,593)	(1163,691)	17.1277
22	(1085,610)	-45	1-4-5	(1024,560)	(1237,583)	(1028,763)	17.1277
23	(1083,608)	0	2-3-6	(1134,562)	(963,593)	(1159,693)	17.1277
24	(1083,602)	-45	1-4-5	(1025,520)	(1237,582)	(979,680)	17.1277
25	(1079,598)	0	2-3-6	(1130,554)	(959,594)	(1155,695)	17.1277
26	(1079,594)	15	1-4-5	(1023,436)	(1236,577)	(993,648)	17.1277
27	(1096,531)						

於是我們想找出如圖 5-18 中的大範圍的不可立足區域(forbidden zones)，並懷疑此為機器人移動困難的原因。在此一樣以影像侵蝕的方法[32]找出地形中的不可立足區域，首先建立結構元素(structuring elements)，在此使用機器人直行的兩倍步幅大小，亦即機器人單足前後立足點之間的範圍，惟因地形影響無法每步皆使用最大步幅，因此以最大步幅的 80% 做成如圖 5-19 的結構元素，再將圖 3-10 的隨機非連續地形做影像侵蝕，結果如圖 5-20 所示，在此圖中只要出現一個黑點即是比對出如圖 5-19 的不可立足區域，大小為 180x189(pixels)，因此可藉由計算黑點的多寡來判斷地形行走難易，也可在路徑規劃時使機器人避開黑點附近的區域，以提升穿越地形的成功率。

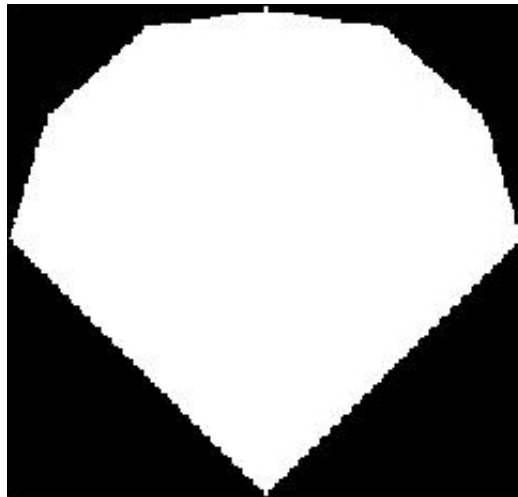


圖 5-19 機器人上一步立足點至下一步立足點的範圍

接著可使用影像處理中標記(labeling)方法[32]，標記出每個大範圍不可立足區域，如圖 5-21 使用由深至淺的灰階值，標記了 16 塊區域。

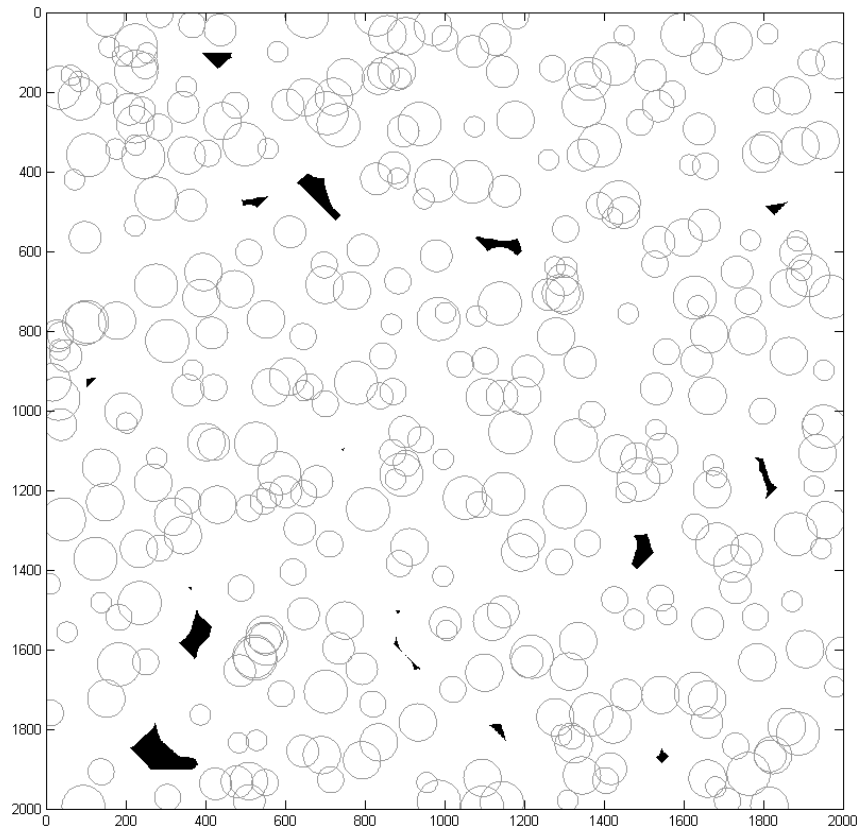


圖 5-20 地形中大範圍不可立足區域

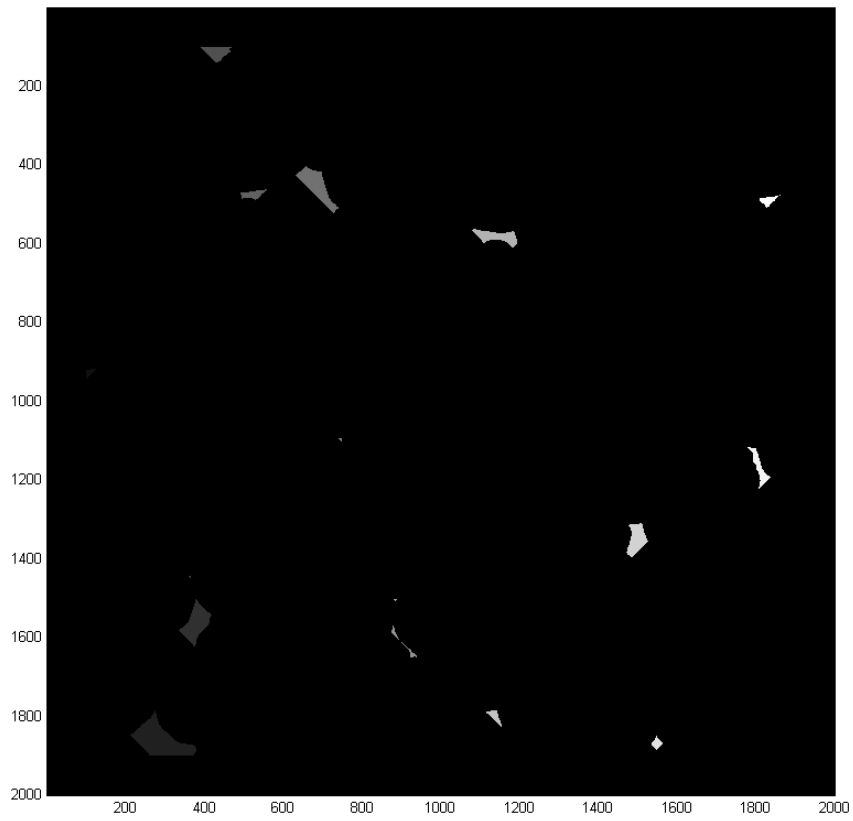


圖 5-21 標記地形中大範圍不可立足區域

我們計算出每塊大範圍不可立足區域的面積(單位：pixel)，並求出其中心與各端點位置，如表 5 所示，表中序號由小到大乃是對應圖 5-21 中標記區域的顏色由深至淺，端點則是由左至右分別為區域的上、下、左、右各端點。機器人在每次決定移動的方向及距離時應參考此表，越大塊的區域機器人選擇路徑時越應避免經過，而中心及端點位置則可以讓機器人由簡單計算即可分辨目前位置與各大範圍不可立足區域之間的距離，以及早改變方向。

表 5 標記地形中大範圍不可立足區域數值

序號	面積	中心	端點			
1	321	(115,924)	(128,916)	(943, 101)	(101,921)	(916,128)
2	8685	(282,1855)	(274,1785)	(1900,261)	(211,1847)	(1887,380)
3	4298	(376,1563)	(379,1501)	(1623,372)	(335,1583)	(1543,417)
4	31	(363,1445)	(363,1443)	(1450, 365)	(359,1444)	(1443,365)
5	1815	(419,111)	(390,101)	(140, 429)	(390,101)	(101,468)
6	937	(534,471)	(558,462)	(490, 529)	(491,471)	(462,558)
7	4449	(689,466)	(657,404)	(522, 726)	(631,428)	(509,740)
8	32	(746,1097)	(747,1095)	(1101, 746)	(741,1096)	(1095,749)
9	463	(904,1613)	(879,1569)	(1650, 923)	(874,1584)	(1648,940)
10	44	(882,1504)	(878,1502)	(1509, 883)	(878,1502)	(1503,889)
11	2549	(1134,585)	(1084,563)	(611, 1182)	(1076,565)	(599,1194)
12	653	(1140,1808)	(1141,1785)	(1828,1154)	(1110,1790)	(1827,1154)
13	2781	(1495,1362)	(1503,1311)	(1397,1482)	(1470,1385)	(1356,1524)
14	533	(1546,1869)	(1545,1849)	(1886,1545)	(1532,1871)	(1868,1562)
15	1588	(1789,1163)	(1777,1117)	(1223,1805)	(1777,1117)	(1194,1834)
16	730	(1839,487)	(1861,475)	(509,1827)	(1805,487)	(475,1861)

第六章 結果與討論

本研究針對六足機器人的最大優點：跨越非連續地形設計其行走策略。首先是實驗前的準備工作，一是設定六足機器人的尺寸及工作範圍，包含中足偏移的設定；二是建立隨機的非連續地形，地形參數方面，使用覆蓋率、平均圓半徑、工作範圍比及標準差等參數設計及分析地形，除了對地形有更深入的描述外，也更容易以修改地形參數的方式，來測試比較不同機器人行走策略的優劣。以下更挑出覆蓋率、機器人工作範圍比、標準差及平均圓半徑這四個重要參數討論其對地形行走難易的影響：

1. 覆蓋率(C)

我們將可立足區域對全部面積的比定義為地形的覆蓋率(coverage)，覆蓋率越高則機器人移動就越容易。而以下各參數對地形行走難易度的影響皆是以固定覆蓋率來討論的。

2. 機器人工作範圍比(CW)

CW 可用來衡量所訂定的立足點區域與機器人工作範圍的相對大小，CW 越大則機器人工作範圍相對於可立足區域就越小，機器人較困難從一個可立足區域跨越到另一個可立足區域。

3. 標準差(σ)

若地形中有大範圍的不可立足區域，則機器人較困難跨越此地形，而標準差越大則代表半徑變化越大，地形變得較不「規則」，因此就越容易產生大範圍的不可立足區域，因此標準差越大則機器人要跨越此地形可能就越困難。

4. 平均圓半徑(R_{avg})

想知道平均圓半徑大小對機器人行走難易度的影響，可使用機器人工作範圍比的觀點來探討。平均圓半徑越大機器人工作範圍比就越大，因此行走越困難。

整理以上各地形參數對機器人行走難易度的比較，若要使機器人行走容易，則地形覆蓋率要增加、平均圓半徑要減少、工作範圍比要減少、標準差要減少。

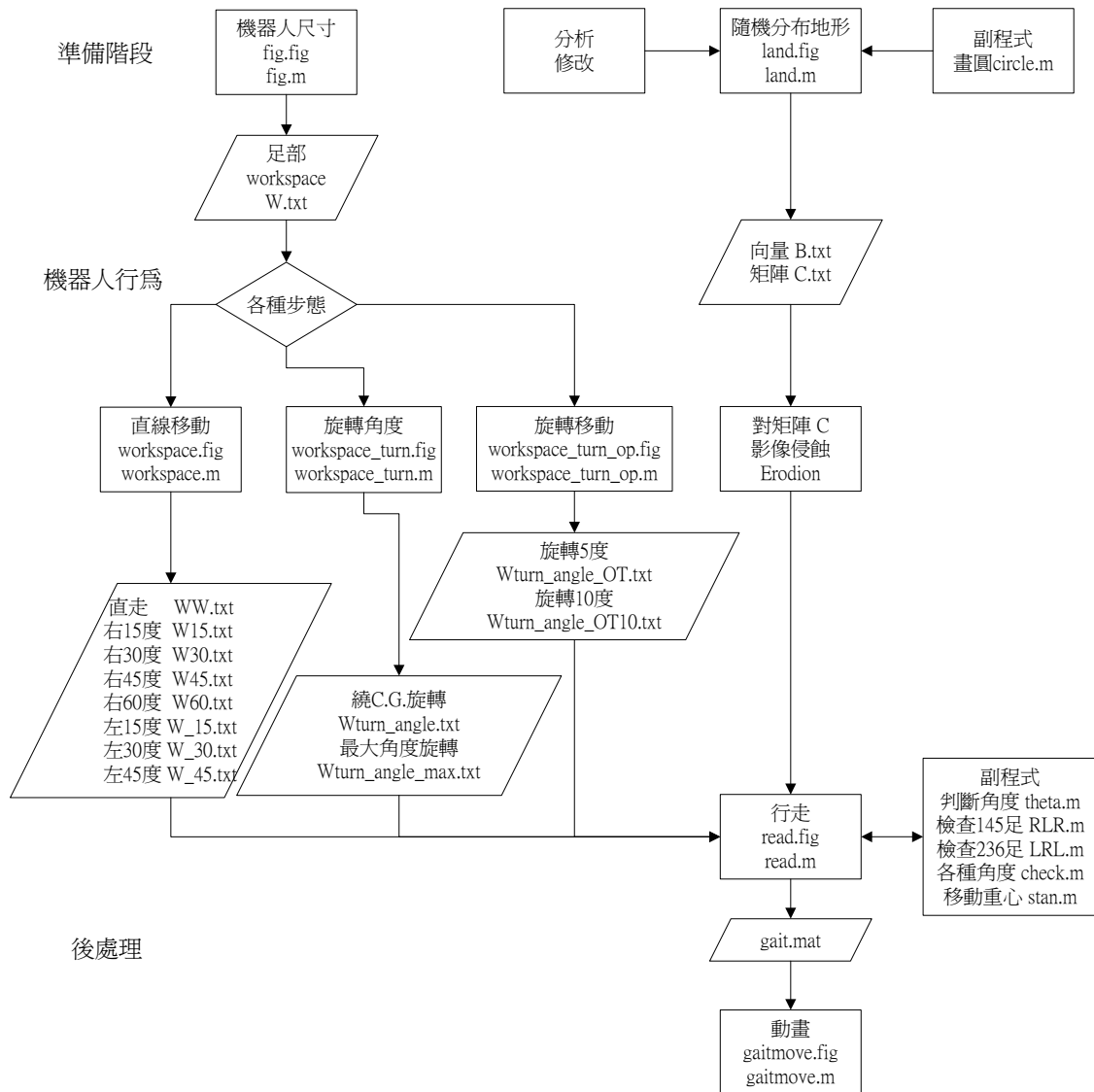
其次是設計步態，包括各方向的直線移動步態、旋轉最大角度步態、旋轉兼移動步態，以及三角步態與四足對稱步態間的轉換。以上為準備工作，可在實驗前先計算，建立地形及機器人步態資料庫，實際行走時再從資料庫中讀取資料以減少即時運算所花費的時間。

準備工作完成後，是實際的行走實驗程式。機器人在非連續地形上行走時，工作範圍將被地形所限制，因此設計以移動距離 K_m 為依據以選擇步態和立足點的方法，並根據步態將身體推進，週而復始地前進。設計預先判斷下一步的立足點及可移動距離才決定目前這步的立足點及移動方向的方法，以減少前進後發現無可立足點才再退回上一步的情形。最後，應用以上幾項工具，規劃詳細流程而成為本研究的機器人跨越非連續地形的行走策略。

將本研究成果與其他相關研究比較，地形建立方面，本研究使用了多項參數來建立、修改及分析地形，結果較易取信於人；步態產生方面，本研究包含了直線移動及旋轉移動的步態，直線移動中有往斜向角度前進的設計，旋轉步態中也有以任意點為旋轉中心的設計，可謂是有較為完整的步態移動工具，因此才能跨越自己所建立的地形。本研究使用矩陣資料庫的方法結合影像處理，行走中的判斷與機器人移動軌跡皆易於以圖片呈現，使讀者較易了解其內容。最後，希望這套建立地形及六足機器人步態產生的方法及行走策略，能提供給往後進行相關研究的學者參考，甚至改良或應用在他們的機器人上。

Appendix

程式架構



References

- [1] Wilson, D. M., 1966, "Insect walking," *Annual Review of Entomology*, **11**, pp. 103-121.
- [2] Wilson, D. M., 1967, "Stepping patterns in tarantula spiders." *J Exper Biology*, **47**(1), pp. 133-151.
- [3] McGhee, R. B. and Iswandhi, G. I., 1979, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain," *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics*, **9**(4), pp. 176-182.
- [4] Ozguner, F., Tsai, S. J., and McGhee, R. B., 1984, "An Approach to the Use of Terrain-Preview Information in Rough Terrain Locomotion by a Hexapod Walking Machine," *International Journal of Robotics Research*, **3**(2), pp. 134-146.
- [5] Saranli, U., Buehler, M., and Koditschek, D. E., "RHex: a Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," *The International Journal of Robotics Research*, **20**(7), pp. 616-631, 2001.
- [6] Apostolopoulos, D., 1995 "Locomotion Configuration of a Robust Rappelling Robot," *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, **3**, pp. 280-284.
- [7] Song, S. M. and Choi B. S., 1989, A Study on Continuous Follow-The-Leader (FTL) Gaits: An Effective Walking Algorithm over Rough Terrain," *Mathematical Biosciences*, **97**, pp. 199-233.
- [8] Pratiar, D. K., Deb, K., and Ghosh, A., 2002, "Optimal Path and Gait Generations Simultaneously of a Six-Legged Robot using GA-fuzzy Approach," *Robotics and Autonomous Systems*, **41**, pp. 1-20.

- [9] Gonzalez de Santos, D., Garcia, E., and Estremera, J., 2007 “Improving Walking-robot Performances by Optimizing Leg Distribution,” *Auton Robot*, **23**(4), pp. 247-258.
- [10] Estremera, J., Cobano, J. A., and Gonzalez de Santos, P., 2010, “Continuous free-crab gaits for hexapod robots on natural terrain with forbidden zones: an application to humanitarian demining,” *Robotics and Autonomous Systems*, **58**, pp. 700-711.
- [11] Yang, J. M., 2009, “Fault-Tolerant Gait Planning for a Hexapod Robot Walking over Rough Terrain,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **54**(4), pp. 613–627.
- [12] Cobano, J. A., Estremera, J., and Gonzalez de Santos, P. G., 2010, “Accurate Tracking of Legged Robots on Natural Terrain,” *Autonomous Robots*, **28**(2), pp. 231-244.
- [13] Yang, J. M. and Kim, J.H., 1999, “Optimal Fault Tolerant Gait Sequence of the Hexapod Robot with Overlapping Reachable Areas and Crab Walking,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, **29**(2), pp. 224-235.
- [14] 吳峴臣, 2010, 六足機器人之力回饋功能應用, 碩士論文, 國立中山大學機械與機電工程研究所
- [15] 吳東育, 2009, 六足機器人形態因素對其運動穩定性之影響, 碩士論文, 國立中山大學機電研究所
- [16] Irawan, A. and Nonami, K., 2011, “Optimal Impedance Control Based on Body Inertia for a Hydraulically Driven Hexapod Robot Walking on Uneven and Extremely Soft Terrain,” *Journal of Field Robotics*, **28**(5), pp. 690–713.

- [17] Miao, S. and Howard, D., 2000, "Optimal Tripod Turning Gait Generation for Hexapod Walking Machines," *Robotica* **18**(6), pp. 639–649.
- [18] Song, S. M. and Choi, B. S., 1990, "The Optimally Stable Ranges of 2n-legged Wave Gaits," *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, **20**(4), pp. 888-902.
- [19] Gabriel, J. P. and Büschges, A., 2007, "Control of Stepping Velocity in a Single Insect Leg during Walk," *Phil. Trans. R. Soc.*, **365**, pp. 251-271.
- [20] Ritzmann, R. E., Quinn, R. D., and Fischer, M. S., 2004, "Convergent Evolution and Locomotion through Complex Terrain by Insects, Vertebrates and Robots," *Arthropod Structure and Development*, **33**(3), pp. 361-379.
- [21] Kingsley, D. A., Quinn, R. D., and Ritzmann, R. E., 2003, "A Cockroach Inspired Robot with Artificial Muscles" *International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Kyoto, Japan.
- [22] Bell, W. J., Roth, L. M., and Nalepa, C.A., 2007, "Cockroaches: Ecology, Behavior, and Natural History," Johns Hopkins University Press, Baltimore, Chap. 6.
- [23] Song, S. M. and Choi, B. S., 1989, "A Study on Continuous follow-the-leader (FTL) gaits: an Effective Walking Algorithm over Rough Terrain," *Mathematical Biosciences*, **1**(97), pp. 199-233.
- [24] Shih, C. L. and Klein, C. A., 1993, "An Adaptive Gait for Legged Walking Machines over Rough Terrain," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, **23**(4), pp. 1150-1155.
- [25] Prabir, K. P. and Kar, D. C., 2000, "Gait Optimization through Search," *The International Journal of Robotics Research*, **19**(4), pp. 394-408.

- [26] Yang, J. M. and Kim, J. H., 2000, "A Fault Tolerant Gait for a Hexapod Robot over Uneven Terrain," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics B*, **30**(1), pp. 172-180.
- [27] Wang, Z. Y., Ding, X. L., and Rovetta, A., 2010, "Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot," *Robotica*, **28**, pp. 893-907.
- [28] Shigeo Hirose, 1984, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," *International Journal of Robotics Research*, **3**(2), pp. 113-133.
- [29] Yang, J. M., 2006, "Fault-tolerant crab gaits and turning gaits for a hexapod robot," *Robotica*, **24**(2), pp. 269–270.
- [30] Seipe, Justin E., Holmes, Philip J., and Full, Robert J., 2004, "Dynamics and stability of insect locomotion: a hexapedal model for horizontal plane motions," *Biological cybernetics*, **91**(2), pp. 76-90.
- [31] Ponticelli, R. and Gonzalez de Santos, P., 2010, "Obtaining Terrain Maps and Obstacle Contours for Terrain-recognition Tasks," *Mechatronics*, **20**, pp. 236-250.
- [32] Haralick, R. M. and Shapiro, L. G., 1992, *Computer and Robot Vision Volume I*, Addison-Wesley.
- [33] Frantsevicha, L. I. and Cruse, H., 2005, "Leg Coordination During Turning on an Extremely Narrowsubstrate in a Bug, *Mesocerus marginatus* (Heteroptera, Coreidae)," *Journal of Insect Physiology*, **51**, pp. 1092–1104.
- [34] Jeck, T. and Cruse, H., 2007, "Walking in *Aretaon asperrimus*," *Journal of Insect Physiology*, **53**, pp. 724–733.