

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



非等徑圓柱體攀爬機器人之創新設計
與成效分析

Innovative Design and Performance Study of Worm
Type Robot for Nonuniform Pole Climbing

研究生：羅仲翔

指導教授：鄭璧瑩 博士

中華民國一〇一年六月

非等徑圓柱體攀爬機器人之創新設計與成效分析

Innovative Design and Performance Study of Worm Type Robot for
Nonuniform Pole Climbing

研究生：羅仲翔

Student: Zhong-Xiang Luo

指導教授：鄭璧瑩 博士

Advisor : Dr. Pi-Ying Cheng



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

Mechanical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年六月

非等徑圓柱體攀爬機器人之創新設計與成效分析

學生：羅仲翔

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

本論文旨在探討一針對非等徑桿柱新型攀爬機器人之設計創新與成效分析；此型提供高處作業用兼具攀爬功用升降平台的機器人，可進行沿桿柱升降等動作，協助垂直位移搬運與裝設任務；加裝輔助工具可進而替代人力，擔任清潔、維修、救災等危險性工作。

本研究首先進行各項攀爬機器人的元件設計分析與成效評估，選用各種摩擦係數的對應材料，提供手爪零組件材料選配，同時採用SolidWorks軟體進行成效分析與模擬，並選定機架參考點在X軸向偏擺位移量曲線與擺幅作為攀爬穩定性分析的評估指標。本研究模擬與分析項目分別為：(1)分析比較各設計影響參數對於攀爬穩定性的影響趨勢。(2)考慮其載重物重心位置與手爪夾角角度對於攀爬速度以及攀爬穩定性的關係。(3)藉由材料摩擦力學等分析模式評估各項參數與材料的選用配置對機器人穩定性的影響，以做為研究進行機構參數改良的依據與參考。本研究以非等徑圓柱攀爬機構的機構設計創新，機構參數最佳化等為研究目標，目前蠕動式攀爬機構之手爪經過改良設計後，並以田口法找出最佳參數組，且藉由分析模

擬與實作驗證所設計的成果，本研究所提出之優化後攀爬機器人的最佳組配機構經測試後其穩定性指標(即參考點的X軸平均偏移量)比優化前改善達60%，此研究成果可供設計手臂夾爪型蠕動式攀爬機器人的設計參考。



關鍵字：非等徑圓柱、攀爬機器人、田口法、攀爬穩定性

Innovative Design and Performance Study of Worm Type Robot for Nonuniform Pole Climbing

Student: Zhong-Xiang Luo

Advisor: Dr. Pi-Ying Cheng

ABSTRACT

This study proposes the innovative design and performance study of worm type robot for climbing nonuniform pole. The current robot provides the pole climbing function as load lifting platform. While installing with specified tool on grippers, it can assist to operate the tasks of cleaning, maintenance, disaster relief and other dangerous work at the height of working environment.

The study presents a new gripper model of the pole climbing robot, several design projects were assisted by mechanical analysis and simulation software system such as SolidWorks. Some typical topics of the study are expressed as follows: (1) analyzing and comparing the climbing stability while using different design concept and parameters. (2) evaluating the climbing performance and stability while changing the loading position and various gripper modules. (3) investigating the stability of column climbing while adopting various material in the gripper and palm. The simulation results of the study are evaluated and concluded assisted by Taguchi method for generating an optimal design model of the improved new nonuniform pole climbing robot. And the simulation data demonstrates that the new design module is improved with the 60% increasing of stability index than that before recreated.

Keyword: Nonuniform pole, Climbing robot, Taguchi method, Climbing stability

誌 謝

在研究所這兩年間，學習到對研究的思考方法與態度，這都要感謝我的恩師，我的指導教授 鄭璧瑩博士，老師不僅殷勤地給予研究上的訓練與建議，並極度有耐心地引領我進行研究。此外亦培養學生要具有遠見思考的能力，及平常待人處事的負責態度等，老師給予我們許多不只在學術的領域，更是在人生道路上的重要觀念。

另外要感謝的是 CIDM 實驗室中的所有成員，學長嗣展，同學惠君，學弟新喆、涵宇、呈祥、晏璋、國霖等，謝謝你們使我的研究生生活更為多采多姿，和在這兩年生活中的照顧與陪伴，及對於研究方面給予我的扶持與砥礪，還有關心與幫助我的容瑋以及大學與高中好友們一路相挺，讓我在學習路上不孤單。

最後感謝家人多年來在學業上支持我，供應我生活上所需的衣食住行，能夠專心在課業研究上面，順利完成學業取得碩士學位。

一路上我所受到的幫忙與鼓勵實在很多，無法一一向各位道謝。但是，大家的幫忙我會銘記在心裡，謝謝你們。

羅仲翔 謹誌

2012.7 交大

目錄

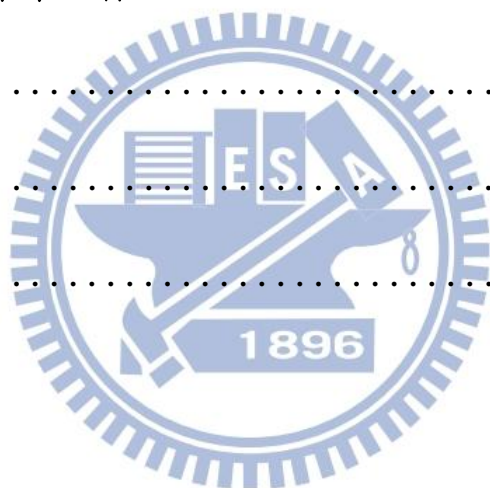
摘要	I
英文摘要	III
誌謝	IV
目錄	V
表目錄	X
圖目錄	XIII
第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	3
1.3 文獻回顧	5
1.3.1 輪式	6
1.3.2 履帶式	8
1.3.3 步行足式 (walking legs)	10
1.3.4 蛇形旋轉式	13
1.3.5 蠕動式	15
1.3.6 移動裝置設計探討	18
1.4 動機與目的	20

1.5 論文架構.....	22
第二章 研究理論與方法.....	23
2.1 摩擦力基本原理.....	23
2.1.1 摩擦力的應用.....	26
2.1.2 兩邊長度固定求與一圓相切之最小夾角推導.....	27
2.1.3 兩夾爪兩邊固定，求與一圓相切後不干涉之最小角度.....	29
2.1.4 力學分析.....	30
2.2 自鎖機構應用與介紹.....	34
2.3 品質機能展開(QFD).....	38
2.4 田口實驗方法.....	40
2.4.1 直交表的運用.....	41
2.4.2 因子反應 (Factor Response) 分析.....	43
2.4.3 品質計量法.....	44
2.4.4 資料分析.....	46
2.5 Solidworks2010 繪圖軟體介紹.....	47
第三章 可攀爬非等徑圓柱體機器人的機構設計.....	49
3.1 實驗需求.....	49
3.2 實驗規劃.....	50
3.3 實驗目標.....	52

3.4	QFD品質機能展開法運用	54
3.5	設計模型與動作分解	60
3.5.1	機構整體零件說明	60
3.5.2	攀爬機器人步態分解	62
3.5.3	攀爬機器人手爪類型探討	65
3.5.4	實驗步驟規劃	68
3.5.5	三種手爪分別於桿柱四個區段測試	70
3.6	觀察與比較	75
第四章	模擬與結果	77
4.1	夾角型手爪夾角最佳值深入探討	77
4.1.1	五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段一的穩定性分析	
	模擬	79
4.1.2	五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段二的穩定性分析	
	模擬	80
4.1.3	五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段三的穩定性分析	
	模擬	81
4.1.4	五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段四的穩定性分析	

模擬	81
4.4.5 歸納討論	83
4.2 載重位置深入探討	85
4.2.1 載重位置穩定性測試說明	85
4.2.2 載重位置影響 X 軸向偏擺位移量探討	89
4.2.3 歸納討論	94
4.3 攀爬機構重量與材料深入探討	94
4.3.1 改變重量測試說明	94
4.3.2 歸納討論	97
4.4 摩擦係數深入探討	97
4.4.1 改變摩擦係數測試說明	98
4.4.2 歸納討論	102
4.5 四個案例歸納討論	103
4.6 田口法輔助攀爬機構參數配置規劃	103
4.6.1 攀爬機構之優化目標與限制	104
4.6.2 參數設計規劃及分析	105
4.6.3 模擬結果與分析	108

4.6.4 確認模擬	117
4.7 手臂轉速的規劃	118
第五章 實驗與驗證模擬	121
5.1 重量與穩定性關係實驗.....	121
5.2 載重位置與機構穩定性關係實驗.....	124
5.3 實驗結論	128
第六章 結論與未來目標	121
6.1 結論	129
6.2 未來展望	131
參考文獻.....	132



表目錄

表 1.1 各種攀爬機構特性歸納表	20
表 2.1 $L_9(3^4)$ 直交表	42
表 2.2 $L_4(2^3)$ 的直交表	43
表 2.3 因子反應表	43
表 3.1 各種不同機構的優缺點比較表.....	50
表3.2 路燈尺寸表	53
表3.3 顧客需求表	54
表3.4 需求相對重要性表	55
表3.5 競爭評比之權值	56
表3.6 競爭評比之權值與需求	56
表3.7 顧客需求轉成工程需求表	57
表 3.8 各種攀爬機構 QFD 品質機能展開表	58
表 3.9 三種手爪於桿柱四個區段動作結束後 Q 點的 X 軸向偏擺末 位置整理表	74
表 3.10 三種手爪於桿柱四個區段於 3.5.4 節實驗的動作結束後 參考 Q 點的 Z 軸向末位移量比較表	75

表 4.1 六種夾角的手爪分別於桿柱四個區段進行所模擬分析的 X	
軸平均偏移量	84
表 4.2 擺放位置與 X 軸平均偏移量整理表格	88
表 4.3 載重物擺放位置與其相同時間內 Z 軸總移動距離	93
表 4.4 六種材料載重與 X 軸向偏擺平均位移整理表	96
表 4.5 六種材料在 Z 軸總移動距離	97
表 4.6 各種摩擦係數的 X 軸平均偏移量整理表	99
表 4.7 各種摩擦係數的 Z 軸移動總距離整理表	100
表 4.8 控制因子水準配製表	107
表 4.9 $L_9(3^4)$ 各因子直交表	107
表 4.10 $L_9(3^4)$ 各因子直交表	114
表 4.11 控制因子對 S/N 比反應表	114
表 4.12 各因子交互作用的反應表	116
表 4.13 優化前後比較	118
表 4.14 不同轉速所花費時間與 X 軸平均偏移震盪量整理表	119
表 5.1 重量與夾持穩定實測結果	123

表 5.2 載重位置與偏移角度整理表格..... 127



圖目錄

圖 1.1 民國 96~100 年之梯子重大職災件數圖.....	2
圖 1.2 從事高處維修人員示意圖.....	4
圖 1.3 運用於風力發電爬桿機構.....	5
圖 1.4 蛇型爬桿機構	5
圖1.5 六輪式爬桿機器人.....	7
圖1.6 傳統伐木工	7
圖 1.7 修剪機器人側視圖、上視圖.....	8
圖 1.8 修剪機器人質心位置圖.....	8
圖 1.9 船舶除鏽爬牆機器人.....	9
圖 1.10 (1)機械閥系統操作真空履帶輪的爬牆機器人模型 (2)機械閥系統操作真空履帶輪的爬牆機器人實體	10
圖1.11 快速爬桿四足機器人腿部設計	11
圖1.12 快速爬桿四足機器人整體構造	11
圖 1.13 真空裝置吸附型攀爬機器人整體構造.....	12
圖1.14 真空裝置吸附型攀爬機器人前後移動示意圖	13
圖1.15 真空裝置吸附型攀爬機器人左右移動示意圖	13
圖1.16 蛇形機器人(CSR)其關節構造	14

圖1.17 蛇形機器人(CSR)攀爬時摩擦力圖示	15
圖1.18 氣動蠕動式爬纜機器人構造示意圖	16
圖1.19 Climbing Omegabot示意圖	17
圖1.20 Climbing Omegabot運動表示圖	17
圖 2.1 攀爬機構力學示意圖.....	26
圖 2.2 與圓相切的兩切線及夾角示意圖.....	27
圖 2.3 與圓相切的兩切線及夾角示意圖	28
圖 2.4 兩夾爪兩邊固定與一圓相切示意圖.....	29
圖 2.5 機構單手抓取時自由體圖.....	31
圖 2.6 手爪 X、Y 平面受力示意圖	33
圖 2.7 手爪 Y、Z 平面受力示意圖	33
圖 2.8 螺桿給予手爪正向力分解於 Y、Z 方向示意圖	34
圖 2.10 蝸桿蝸輪示意圖.....	37
圖2.11 QFD 法品質屋	39
圖 2.11 因子反應圖	44
圖2.12 solidworks繪圖軟體操作介面	48
圖 3.1 一般路燈外型	52
圖 3.2 原篇論文機構示意圖.....	60

圖 3.3 本研究重新建模機構示意圖.....	60
圖 3.4 攀爬機構示意圖(1).....	61
圖 3.5 攀爬機構示意圖(2).....	61
圖 3.6 攀爬機構示意圖(3).....	62
圖 3.7 爬桿機構六個動作分解.....	63
圖 3.8 三種夾爪示意圖.....	66
圖3.9 桿柱分成四等分示意圖.....	67
圖 3.10 穩定性測試流程圖.....	69
圖3.11 攀爬機構基準點示意圖.....	69
圖3.12 三種手爪於桿柱區段一的X軸偏擺位移量曲線圖.....	70
圖 3.13 三種手爪於桿柱區段二的 X 軸偏擺位移量曲線圖.....	71
圖 3.14 三種手爪於桿柱區段三的 X 軸偏擺位移量曲線圖.....	72
圖 3.15 三種手爪於桿柱區段四的 X 軸偏擺位移量曲線圖.....	73
圖 4.1 手爪邊長以及角度示意圖.....	78
圖 4.2 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段一的穩定性分析時 X 軸向偏擺位移與時間關係圖.....	79

圖 4.3 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段二的穩定性分析時 X	
軸向偏擺位移與時間關係圖	80
圖 4.4 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段三的穩定性分析時 X	
軸向偏擺位移與時間關係圖	81
圖 4.5 同手臂兩手爪干涉情形示意圖	82
圖 4.6 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段四的穩定性分析時 X	
軸向偏擺位移與時間關係圖	83
圖 4.7 機構載重位置示意圖	86
圖 4.8 機構載重結合圖	86
圖 4.9 攀爬機構 11 個載重位置示意圖	86
圖 4.10 11 個擺放位置在 5 個連續標準動態之內 X 軸位移量與時 間關係圖	87
圖 4.11 擺放位置與 X 軸平均偏擺位移量	88
圖 4.12 攀爬機構載重位置與傾斜狀況示意圖 1	89
圖 4.13 攀爬機構三個載重位置與支撐點產生力矩示意圖 (1)偏擺位置(2)平衡位置	90

圖 4.14 攀爬機構載重位置與傾斜狀況示意圖 2	91
圖 4.15 攀爬機構三個載重位置與支撐點產生力矩示意圖 2 (1)偏擺位置(2)平衡位置	92
圖 4.16 同時間內 11 個不同載重位置與 Z 軸攀爬總距離關係圖 ..	93
圖 4.17 六種不同材料之 X 軸向偏擺位移與時間關係圖	95
圖 4.18 不同重量的材料與 X 軸向偏擺平均位移長條圖	96
圖 4.19 9 種摩擦係數的時間與 X 軸向偏擺位移量的關係圖	99
圖 4.20 摩擦係數與 X 軸向平均偏擺位移量關係圖	100
圖 4.21 摩擦係數與 Z 軸總攀爬距離關係圖	101
圖 4.22 九種摩擦係數之 Z 軸位置與時間關係圖	102
圖 4.23 minitab 軟體介面示意圖	108
圖 4.24 minitab 創建田口法實驗示意圖	108
圖 4.25 田口法設計選項	109
圖 4.26 田口法因子選項	109
圖 4.27 田口法儲存於工作表選項	109
圖 4.28 數據輸入後 minitb 介面顯示圖	110
圖 4.29 田口法匯入 X 軸平均偏移震盪量後示意圖	111
圖 4.30 運用 minitab 分析田口設計示意圖	111

圖4.31 分析田口法設計視窗	112
圖4.32 分析田口法設計分析選項示意圖	112
圖4.33 分析田口法設計選項示意圖	112
圖 4.34 minitab 運算過後 SN 比曲線圖以及數據	113
圖 4.35 各參數 SN 比趨勢圖.....	115
圖 4.36 各因子交互作用的反應圖	117
圖 4.37 不同手臂轉速 X 軸向偏擺位移與時間關係圖.....	119
圖 5.1 總重為 162g 的機構.....	122
圖 5.2 各種重量的機構攀持示意圖	122
圖 5.3 總重為 1580g 的機構.....	123
圖 5.4 機構加裝量角器示意圖	124
圖 5.5 攀爬機構其偏移角度示意圖(不載重時).....	125
圖 5.6 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 0 時).....	125
圖 5.7 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 3 時)	126
圖 5.8 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 6 時).....	126
圖 5.9 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 10 時).....	128

第一章 前言

1.1 研究背景

從古到今，人類為求搬運的方便與效率，運用智能與技術，已由獸力取代人力，再由物力取代獸力，加快搬運速度以及更加有效率，相傳大約公元前 3000 年，中亞地區就已經使用帶輪的車子，但當時文明發達的埃及並不知道，乃是用滾木為輪拖運貨物，公元前 1600 年時，北方的海克索斯人用馬拉戰車進攻埃及，埃及人大吃一驚。從此，埃及人也開始使用帶輪的車，並首先使用輪軸和輪緣來固定車輪，帶動陸路運輸科技的發展，連帶造就了今日富裕發達的新世紀。



到了現代，人們的生活水準提高，對於生活環境的品質更加重視，其中也包含工作場所的環境安全衛生相關議題。目前各先進國家皆致力改善施工作業的方式與環境的安全，同時也多制定相關的勞工安全衛生法令。在作業安全中，有關搬運與攀登作業的安全問題特別嚴重，其相關成本（包括技術、風險、設備費等）也較高。近年台灣職業災害中墜落問題嚴重，由 90 年至 95 上半年的職災統計結果，墜落佔重大職災 50% 以上，主要發生在鋼構組拆、施工架組拆、屋頂作業、運輸倉儲等作業。統計 96 年、97 年及 98 年全產

業適用勞工安全衛生法之工作場所勞工死亡人數分別為 298 人、330 人及 239 人，以災害媒介物分析顯示，96 年發生 21 人作業中因合梯、移動梯肇災死亡；98 年 19 人；99 年 20 人；100 年上半 7 人(圖 1.1)，另災害類型分析顯示 55 人發生墜落(含倒塌後墜落)災害(佔 93%) 4 人發生感電災害(佔 7%)，在行政院 233 減災的重大施政方針下，墜落災害的預防成為首要努力的目標。[1] 故以機械自動化取代人工，減少勞工攀緣之必要，防止勞工的意外墜落，實為現代化國家工程技術之指標，亦為現階段勞工安全防護工作的實施手法之一。

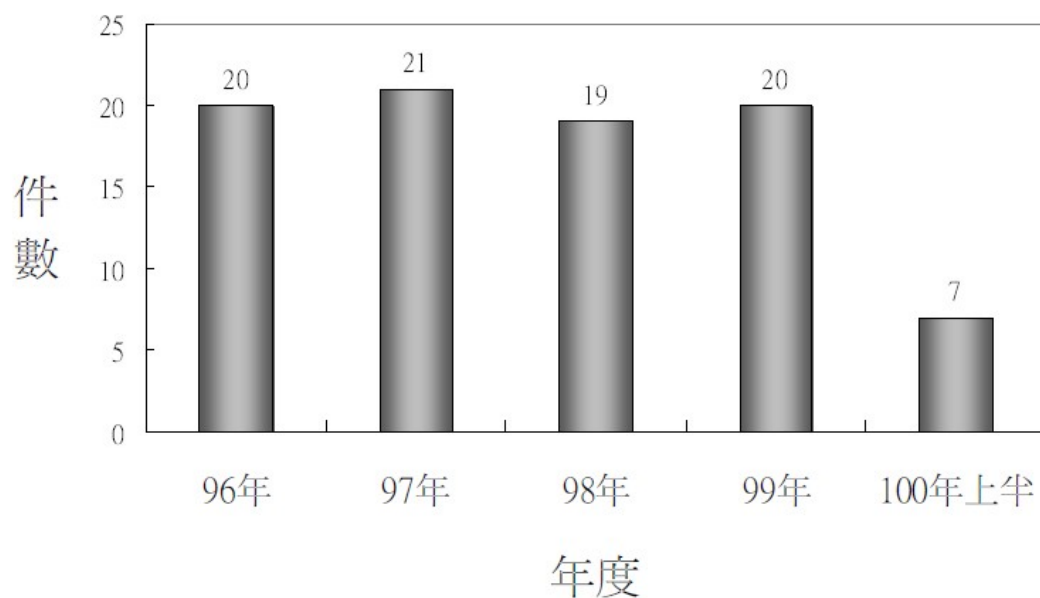


圖 1.1 民國 96~100 年之梯子重大職災件數圖[1]

1.2 研究動機

梯子可以使工作人員快速攀登，以利從事各種高處作業，而且由於梯子操作簡單、且易架設和搬運，所以梯子便成為臨時性上下設備的第一選擇，各種作業場所均有使用。但是，由於梯子作業高度有所限制，往往使勞工忽略梯子潛在的風險，而疏於安全防護工作，導致因梯子作業的墜落職業災害層出不窮，目前在五十公尺以上大樓的救援方式，雲梯已捉襟見肘，直昇機運補救援也常力有未遑。至於在各公園或校園中，仍多利用昇高機載人至高處剪修樹葉。而高壓電纜的維修工程師則憑藉其經驗與熟練的身手在電桿上工作如圖 1.2 所示。另有某些工廠內之油槽或煙囪亦採人工懸吊方式進行清潔工作等，此類的危險工作多可望在未來由爬桿機構所取代，以提昇勞工安全、便利與經濟性。本研究目的是要將機械自動化取代人工，運用爬桿機構登高進行維修、清潔甚至建築，抑或是載人穩固的上升至工作處，在二、三十年前，國際上即有研發機構針對這些具危險性的作業環境來開發專用的機台或設備，諸如適用於超高大樓的表面清潔機之懸吊裝備或工作平台、以及可在風力發電機或核電廠進行維修工作的設備，但有關自動攀爬機構的發展則較為落後。根據本研究所蒐集之各國文獻，尚無一款可以結合穩固、快速、便宜、安全並適應天氣與環境的爬桿機構，基於上述所列之優點成

為本研究發展非等徑圓柱體攀爬機構之創新設計重要考量，而大部分的機構主要是針對等徑圓柱進行攀爬的動作，但像是電線桿、路燈桿、風力發電塔柱這些桿柱有著一定的錐度，有了錐度可能會對攀爬機構造成更多的不平衡因素，因此本篇研究主要針對非等徑桿柱來進行攀爬，也針對目前各國文獻及專利，歸納出優缺點並截取優點作為本研究之參考，進而發展出非等徑圓柱攀爬機構之創新設計改良。



圖 1.2 從事高處維修人員示意圖[2][3]

1.3 文獻回顧

市面上已有很多類圓柱體攀爬機構，此類機構較常見於用來輔助在高處執行維修、修剪樹葉、清潔所使用如圖1.3圖1.4所示，在十年前有關垂直爬行機的相關文獻以壁面垂直爬行機的研究較為常見。從這些研究當中得知，固定吸附方式和移動裝置(locomotion devices) 兩者是影響此類爬行機械穩定度和性能表現的重要因素。固定方式常見者有真空吸附(vacuum pressure) 和電磁力吸附兩型；而負責移動機身的裝置以輪式、履帶式、步行足式(walking legs) 等較為常見[4]。各型爬壁機藉各種固定方式和移動裝置的組合設計，以適應不同的地形與環境，提供了不同的用途。

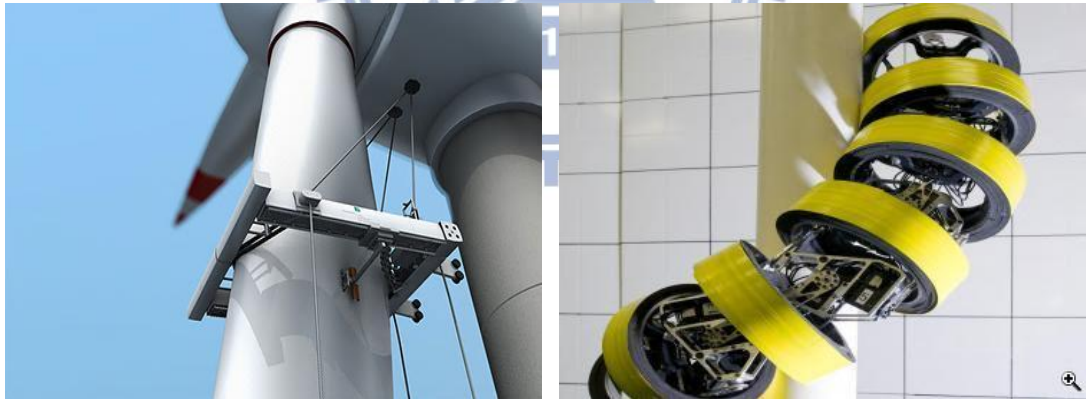


圖 1.3 運用於風力發電爬桿機構[5] 圖 1.4 蛇型爬桿機構[6]

而在這十年之間更多人致力於發明桿柱攀爬機構，固定吸附方式和移動裝置依舊是影響爬桿機構穩定度和性能表現的重要因素。但是因為攀爬物由平面牆壁改成桿柱，所以固定吸附方式與移動裝

置增加不少種方法，大致從已知文獻來看，固定方式有真空吸附、電磁力吸附、摩擦力、以及嵌入式，而移動機身的裝置以輪式、履帶式、步行足式、蛇形旋轉式、蠕動式等較為常見。

以下將針對近十年桿柱攀爬機構其中的移動裝置設計進行探討，作為將來論文研究的設計參考與應用。移動裝置會影響爬壁機器人的性能表現，因此須了解各式移動裝置的差異以搭配不同的吸附方式來克服不同的環境。一般常見的移動裝置計有輪式、履帶式、步行足式、蛇形旋轉式、蠕動式等。

1.3.1 輪式

由 Ali Baghani [7] 等人於 2005 年在德黑蘭大學發表的爬桿機器人 (UT-PCR) 的運動學模型如圖 1.5 所示。運用於清潔公路上的路燈，其構造主要由一個三角形的骨架和六個四肢與普通車輪以及連結彈簧，彈簧用於拉緊上下四肢，共有三對，其功能只要使六個輪子緊貼桿柱產生摩擦力。較低的三個車輪以直流電動機驅動推動整個機構。三個上肢被動輪主要為了增加爬桿機構的穩定性。實驗結果也顯示 UT-PCR 在爬桿的能力。其特色為重量輕，機動性高。

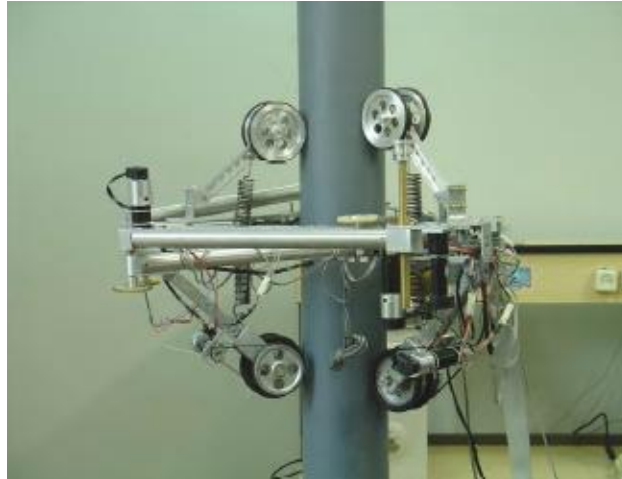


圖1.5 六輪式爬桿機器人[7]

Haruhisa Kawasaki [8](2008)等人提出新攀登方法的修剪機器人，他的攀登方式跟日本的伐木工很相似如圖1.6所示。主要功能包括最佳質心位置的機器人和創新的垂直攀登方式。四個輪子都設置圍繞樹，一對為上側，另對在下測。其質心在樹外如圖1.7圖1.8所示，藉此增加摩擦力並貼緊表面，而每個活動車輪是由直流伺服電機驅動，使其靠著摩擦力上升。這種新穎設計的特色除了輕巧還有高性能、高速度。



圖1.6傳統伐木工[8]

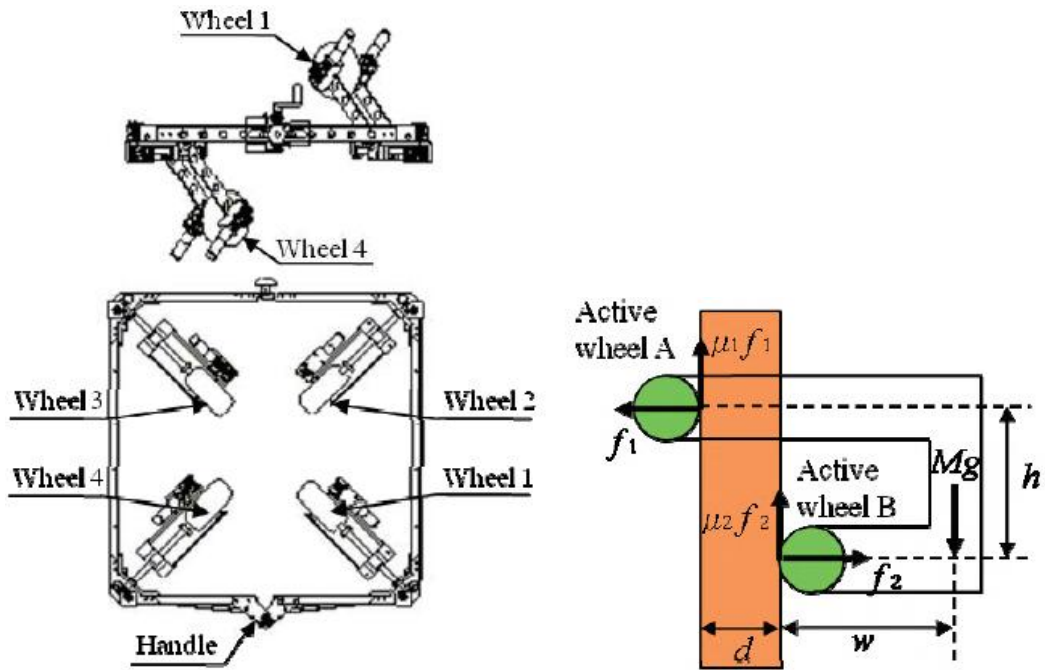


圖1.7修剪機器人側、上視圖[8] 圖1.8修剪機器人質心位置圖[8]

1.3.2履帶式

Zhengyao Yi[9]等人於2009年提出船舶除鏽爬牆機器人(WCRSRR)，主要用於清潔水下船身鐵鏽，爬牆機器人的結構設計如圖1.9所示，主要由四個主要的部分所組成：(1)吸附機構(2)行走機構(3)操控機構(4)構架，行走機構包含了履帶和扣練齒輪軸，它由兩個連接至減速器的馬達所驅動，吸附機構是由兩個配有72個永久磁鐵的履帶所組成，機器人的結構呈中心對稱，左右各有一條履帶，每個履帶上面有36個永久磁鐵，當行走時，每條履帶有15個永久磁鐵吸附於船身。機器的中央則是配了除鏽機的一些噴嘴，操控機構包含兩個裝置；相反方向的伺服馬達以及兩個減速器。整體的尺寸大概為735*752*280(mm³)，此款機器人具有高負重能力並且

有相當的穩定性，缺點是本身重量也重。

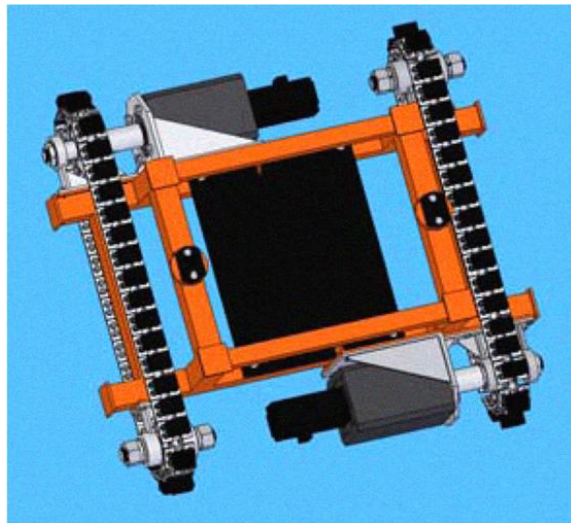


圖 1.9 船舶除鏽爬牆機器人[9]

由 Hwang Kiml[10]等人在 2006 年提出一個用機械閥系統操作真空履帶輪的爬牆機器人，其主體構造主要由驅動電機，真空履帶輪系統，真空泵，無線控制模塊和電池所組成如圖 1.10。其真空履帶輪系統主要由履帶輪、同步帶、吸盤所組成，每個履帶上面有 12 個吸盤，而機械閥則裝在吸盤上。由驅動電機驅動履帶輪，根據車輪的旋轉來控制機械閥，使其機械閥的開閉促使空氣流通與壁面產生強大吸附力，然後爬升。機器人體積大約是在 $460*460*200(\text{mm}^3)$ 。它的質量略超過 14 公斤，其速度可達到 $15\text{m}/\text{min}$ ，但因攀爬高度越高，真空吸盤的壓力可能會有所波動，這是其一缺點。

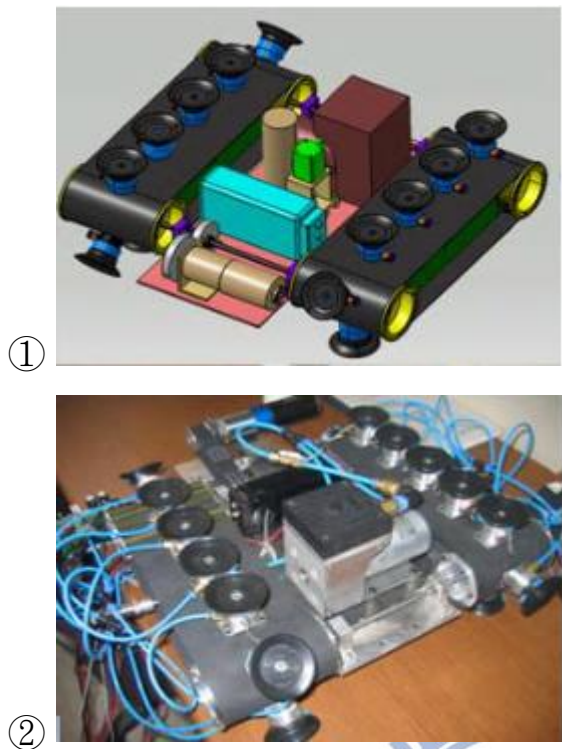


圖 1.10 ①機械閥系統操作真空履帶輪的爬牆機器人模型

②機械閥系統操作真空履帶輪的爬牆機器人實體[10]

1.3.3 步行足式 (walking legs)

由G. Clark Haynes[11]等人在2009年在日本發表的快速爬桿四足機器人，這篇論文的關鍵創新是一個腿部新穎聯動設計圖1.11，攀爬木製電線桿速度可達21mm/s，其構造主要模仿動物，有四足，每隻腿部有三個自由度，與桿柱接觸面佈滿微小鋼針有如爪子一般，碳纖維的外骨骼，及中央電子控制系統、尾巴如圖1.12所示，運動方式主要模仿動物，如壁虎在攀爬的步態，預計運用於搜救、監視操作、以及設定桿線，雖然他的攀爬速度很快，但是不夠穩定是他的一大缺點，能攀爬的桿柱表面材質更是被限制住。

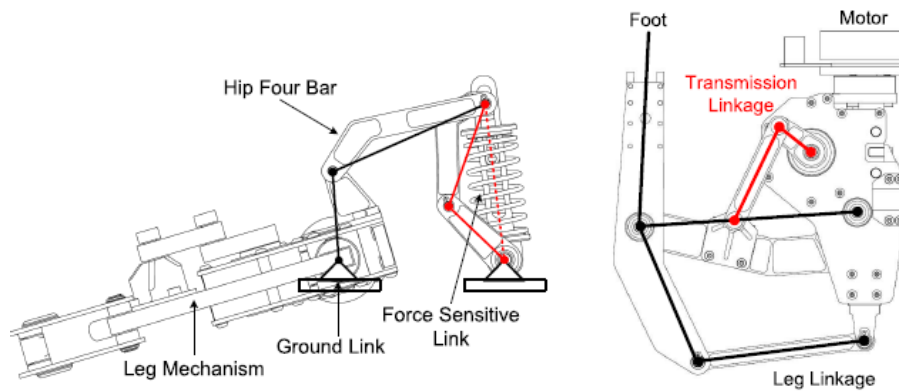


圖1.11 快速爬桿四足機器人腿部設計[11]

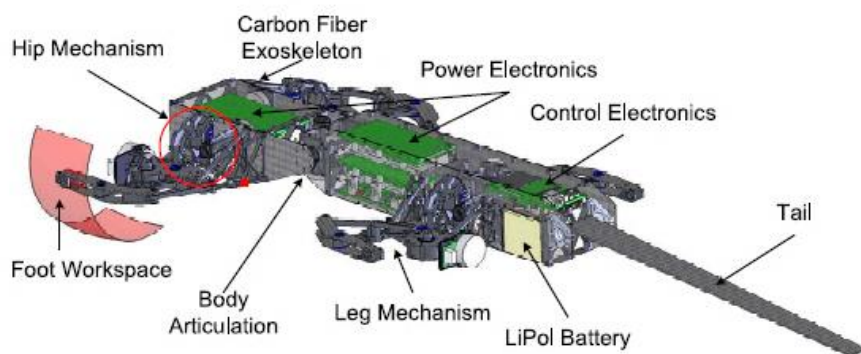


圖1.12 快速爬桿四足機器人整體構造[11]

由陳心睿[12]2006年提出真空裝置吸附型攀爬機器人，機器人機構之實體模型設計如圖1.13所示，此機器人主要係以六組四連桿機構所構成，其中含一彈性伸縮機構以適應不平整的行進平面，而在各腳部末端則附裝真空吸盤組成。

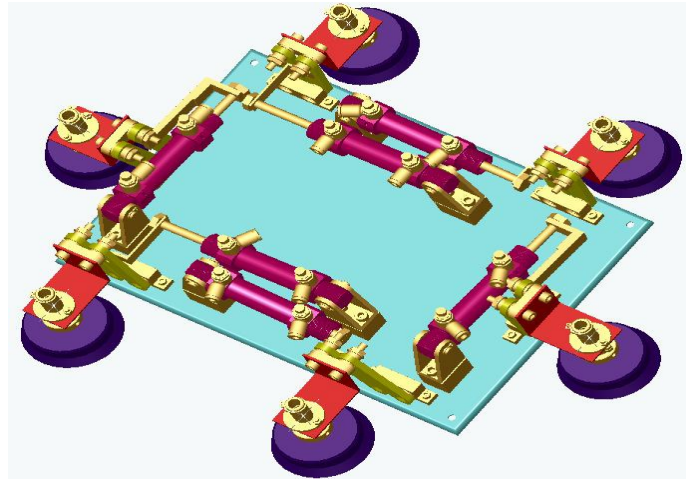


圖1.13 真空裝置吸附型攀爬機器人整體構造[12]

各腳部的運動分別由一個氣壓缸驅動四連桿產生弧形往復運動，亦即讓腳部可平行離地提高前移再平行接近地面，同時另外搭配交互執行吸盤如圖1.11所示機器人機構之實體模型設計圖的吸吐氣，亦即吸盤部分由真空產生器與真空破壞器交互構成吸盤吸附與自由釋放的動作，行動控制器將讓機器人的對角雙足於任何時段皆處於負壓的吸附狀態，而另外的對角雙足則自由產生弧形往復以達到腳部運動的動作，因此經由左右兩側四足之擺動與真空吸盤之交替運作，進而產生具有一維直線的前進或後退位移運動如圖1.14圖1.15所示[12]。

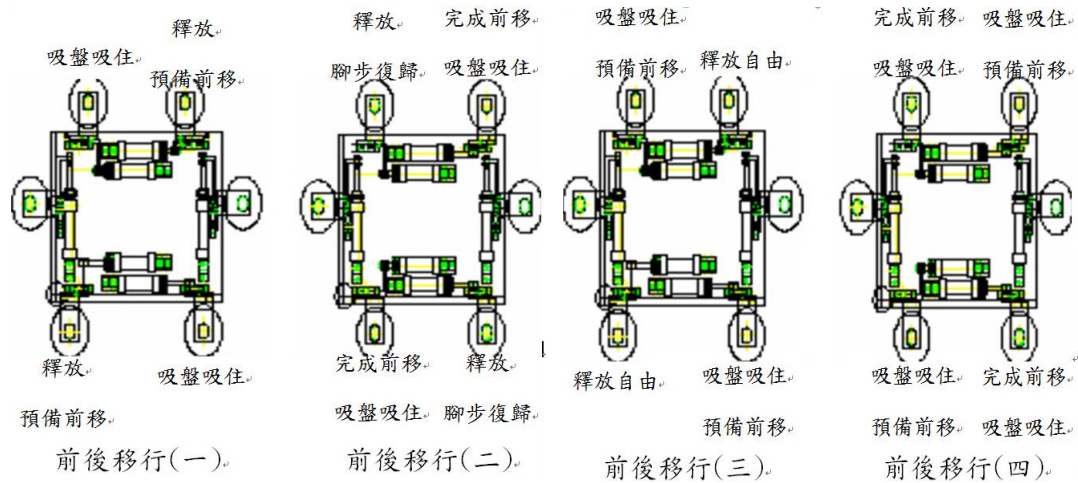


圖1.14 真空裝置吸附型攀爬機器人前後移動示意圖[12]

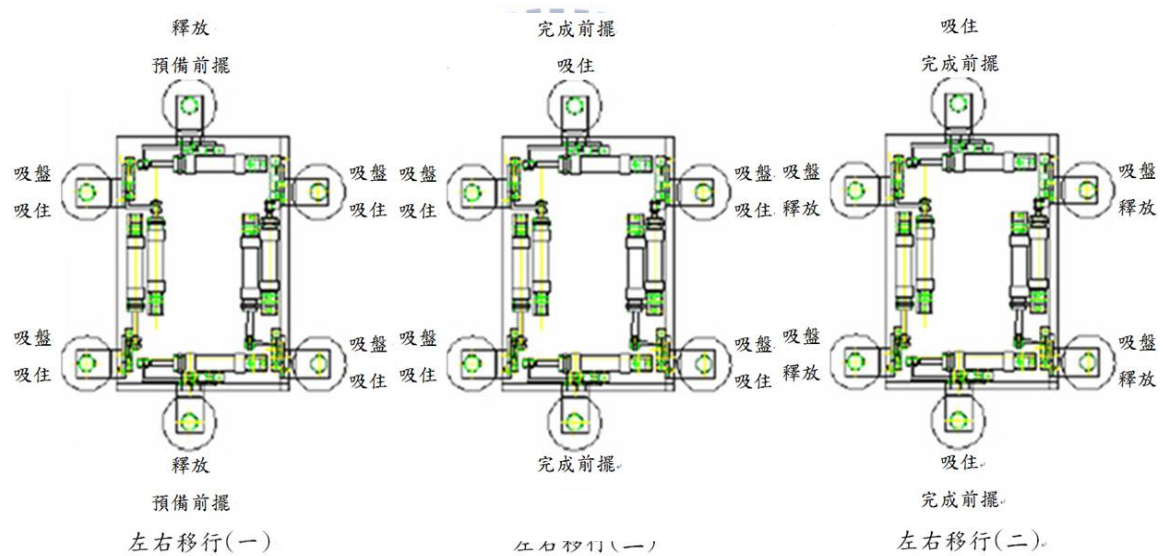


圖1.15 真空裝置吸附型攀爬機器人左右移動示意圖[12]

1.3.4 蛇形旋轉式

其實在1972年日本東京工業大學的廣瀨教授研製出第一台至今，相繼有數十台蛇形機器人樣機問世。這些樣機能實現蜿蜒爬行，側滑，翻滾，避障等二維平面運動，大部分已經具備抬頭，爬台階，翻越較低障礙等在三維空間中的運動能力[13]。

由孫洪[14]等人於2008年發表在垂直外攀爬方面有較大優勢的
攀爬蛇形機器人(CSR)，提出一種具有萬向節功能的P2R
(pitchroll) 模塊，其機構主要15個P-R模塊組成，每個長度
54mm，總質量約為180g，其頭端包含控制驅動裝置，尾端連接控制
線如圖1.16所示，選擇PVC管作為管套以減輕模塊質量，並在外面包
一層橡膠來增大摩擦係數，CSR以等距螺旋狀為初始姿態，纏繞在半
徑和表面粗糙度均為常數的樹幹上，採用尺蠖一般的蠕動步態，在
第一個運動產生移動步距，然後透過部分關節的依次起伏向上傳遞
運動波，其他部分，則纏繞在樹幹上，產生摩擦力以抵消整體所受
重力如圖1.17所示。一個運動波由尾至首傳遞完成後，CSR向上到達
一個新位置，其攀爬軌跡始終以等距螺旋為基礎。其缺點主要為每
個P-R模塊的長度會跟欲攀爬桿柱半徑相關，較長則無法攀爬較細半
徑桿柱，且假使較粗的桿柱；則整個機器人長度則必須很長才有辦
法環抱住。

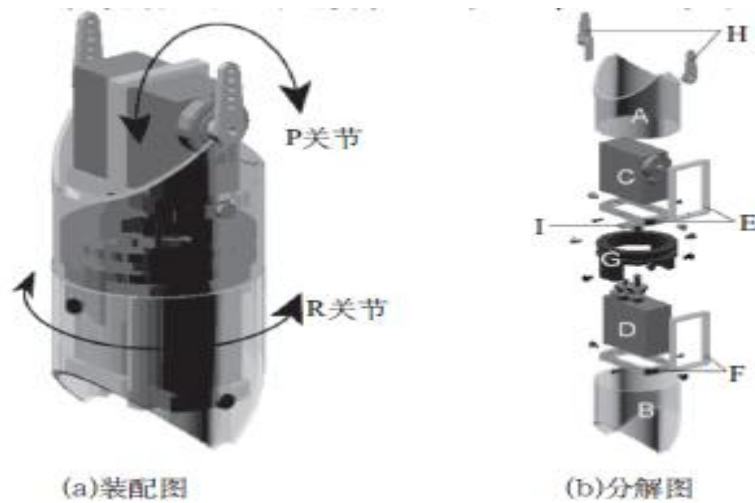


圖1.16 蛇形機器人(CSR)其關節構造[14]

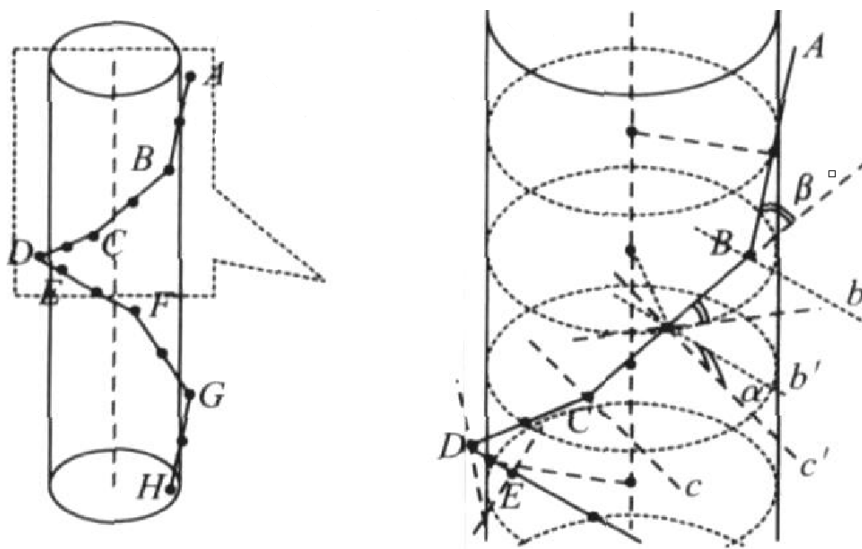


圖1.17 蛇形機器人(CSR)攀爬時摩擦力圖示[13]

1.3.5 蠕動式

由呂恬生，張家梁[15]在2000年在上海交通大學機器人研究所研製的氣動蠕動式爬纜機器人如圖1.18所示，可在各種斜度的斜拉橋纜索上爬行，能完成斜拉鎖的檢測、清洗、噴塗油漆等工作。氣動蠕動式爬纜機器人運動中至少保證上下兩組夾緊爪中有一組夾緊

於纜索上。爬杆機構向上爬升時，首先下爪夾緊於纜索上，上體夾緊爪鬆開，驅動氣缸活塞桿伸出，上體向上運動；然後上爪夾緊，下爪鬆開，驅動氣缸活塞桿縮回，下體向上運動；重複以上運動，機器人實現不斷向上爬行。改變氣缸動作順序，爬杆機構則可以完成下降功能。對於氣動蠕動式爬纜機器人，其上升和下降運動由氣壓控制，需要氣源和氣動控制系統，設備成本較高。

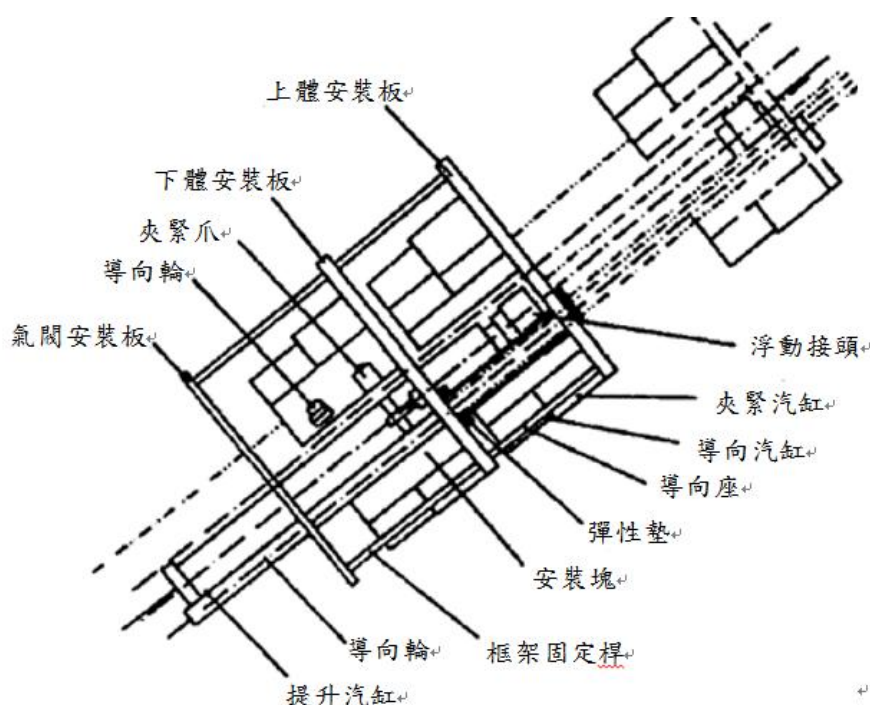


圖1.18 氣動蠕動式爬纜機器人構造示意圖[15]

由毛毛蟲得到靈感設計而成的攀爬機器人演化至今也出現了多種類型，大致上有以真空吸附方式附著在牆上並以氣動方式推動機器產生與肌肉相同的作用使之前進；還有以伺服馬達產生推力，並以被動吸盤來產生吸附力這兩大類型。極小型的攀爬機器人可以使用壓電的技術來完成。

由Je-Sung Koh, Kyu-Jin Cho[16]在2010發表靈感來自毛毛蟲的爬行機器人(Climbing Omegabot)，提出一個手指大小而且有脊椎為基礎的夾子型爬樹機器人，機器人的靈感是由尺蠖所得來，尺蠖可以在樹上用簡單的omega形狀彎曲運動；蠕動爬行。此種運動方式讓機器人可以變得更小、更容易控制。此機器人是藉由智能複合微結構材料以及記憶形狀合金彈簧促動器所構成如圖1.19所示。此份研究描述了對” Climbing Omegabot” 的設計以及製造，以及選擇適當的SMA彈簧促動器來增進促動的能力。最後證明顯示Omegabot可以在樹幹上執行蠕動、旋轉、攀爬等運動如圖1.20所示。此種機器人可以用來搜尋或是救援，並且可以進入只有小型機器人可以進入的區域蒐集資料。

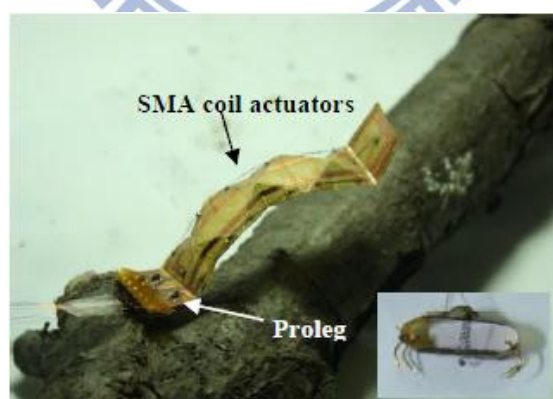


圖1.19 Climbing Omegabot示意圖[16]

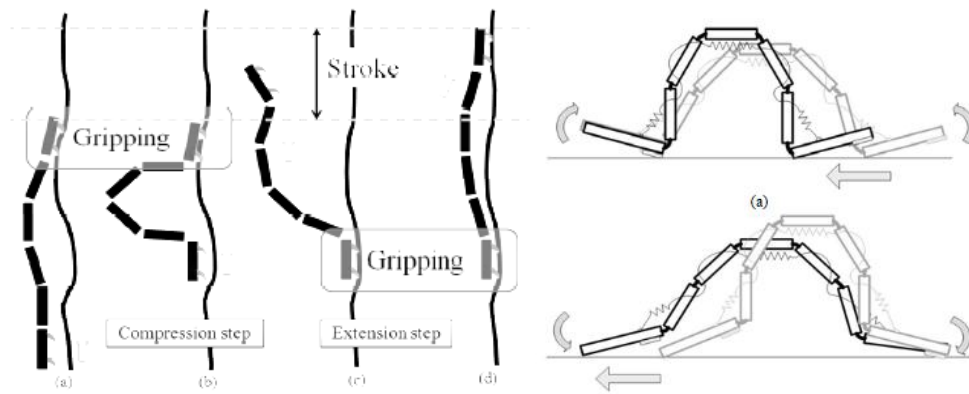


圖1.20 Climbing Omegabot運動表示圖[16]

1.3.6 移動裝置設計探討

移動裝置會影響爬壁機器人的性能表現，因此須了解各式移動裝置的差異以搭配不同的吸附方式來克服不同的環境。一般常見的移動裝置計有輪、履帶和步行足等。

一、輪式移動裝置(包含蛇型)

輪子具有容易操控且連續運轉的表現特性，因此被廣泛應用於陸地上的交通工具。然而輪子與物體的接觸面積很小（相對於履帶或步行足），若將輪本身也作為吸附腳，則輪子和接觸面間將承受很大的壓力；尤其是當輪在做變換方向的動作時，易使接觸面受損。且輪在長期使用後會造成一定的磨損，而影響其爬行的能力，輪子也常在通過不平地形時喪失推進力甚至造成脫落。

二、履帶式移動裝置

履帶亦被廣泛地應用在陸上的交通工具，和輪子比起來，履帶和接觸面的接觸面積大得多。因此若將履帶作為吸附腳使用，則可較輪

子穩固，且較輪子不傷害接觸表面。基於以上特點，使得履帶在爬壁機器中成為比輪子更佳的選擇。其共通優點是可以快速移動；共通缺點則是轉彎時會造成滑動現象，容易損傷吸附表面，且可能因此滑落。

三、步行足式移動裝置(包含蠕動)

步行足比起傳統移動裝置如輪、履帶、軌道等，其可移動性與效率表現均較佳，多由連桿系統所組成。根據Song[17]等人的研究，當步行足在崎嶇地形上移動時，其所消耗的能量是輪或履帶所消耗能量的10%。且加裝於步行足上的吸附腳可依需要而加大，因此更能提供強大的吸附力，使其在壁面上行走時有較佳的穩定性。步行足式爬壁機器人的另一項特性是採間接式 (intermittent) 運動。一部份的步行足固定於牆面，其餘未吸附者則進行運動 (以帶動機身前進)，於適當接觸面進行吸附後，再由其負責固定牆面，此時原本吸附著的步行足便可進行運動，如此週而復始形成間接而略為緩慢的移動方式。步行足運動規劃的研究也是各團隊的研發重點，且步行足是爬壁機中最常見的移動裝置，確實佔有重要地位。[18]

從這些文獻回顧與專利可以得知，爬攀爬機構主要考慮下列幾點：

- (1) 體積小，安裝方便與節省電力；機器人應該是結構緊湊，重量輕。
- (2) 有足夠的載重能力。
- (3) 平衡能力；穩定性，需要有良好的穩定性，因為在高處風較大容易影響平衡。
- (4) 攀登障礙的能力，有些表面不一定是平坦的，也有可能因為颶風下雨，使得表面會打滑。
- (5) 必須要有良好的剎車能力，不然要往下的時候有可能墜毀。[19]

根據市面上可查詢到的文獻和商品、文章大致上可把各種攀爬的特性做個歸納，再將五種攀爬機構做個整理如表 1.1

表 1.1 各種攀爬機構特性歸納表

	輪式	履帶式	步行足式	蛇形旋轉式	蠕動式
爬行能力	強	強	弱	強	較強
重量	較輕	較重	重	重	輕
結構	簡單	較複雜	複雜	較複雜	較複雜
越障能力強	較差	差	較好	差	好
操作穩定性	較好	好	差	好	較好
承載能力	中	高	低	無法	高
控制模式	簡單	簡單	複雜	複雜	簡單
價格	低	較高	高	較高	低

1.4 動機與目的

- (1) 運用方向：回顧文獻後發現，攀爬機構運用非常廣泛，而適用範

圍如電線桿燈罩清理，假使高速公路上的路燈需要清理，為了防止交通堵塞，可使用攀爬機構，風力發電機葉片檢測以及桿柱維修，往往風力發電塔柱都非常高，想運用人力上去檢測是一件勞師動眾的事情，有了爬桿機構則可解決這些麻煩，另外像是核電廠塔柱維修救護，日本發生核電廠火災，假使以攀爬機構取代人，上去進行維修的任務，則可以省去很多後續的影響，如輻射等。

(2) 設計目的：整篇研究的目的主要為設計或改良出一種可以穩定攀爬非等徑圓柱攀爬機構，經過整理各種類型機構的各種特性後，為了追求穩定、重量較輕、操作穩定性好、承載能力佳等優點，本研究以蠕動式攀爬機構為目標，並且改良使其可以適應於非等徑的桿柱，且維持原有的穩定性。

(3) 模擬對象：模擬對象主要為平常在高處做清潔工作的工人、或者消防救災的消防隊員、風力發電機維修人員、核電廠維修人員。

1.5 論文架構

第一章『序論』：說明本論文研究之背景、動機、文獻回顧、研究概念

第二章『研究理論與方法』：主要在闡述機構創新、應用力學摩擦理論、田口法實驗理論、QFD品質屋法、solidworks軟體介紹、自鎖螺桿應用與介紹。

第三章『非等徑圓柱攀爬機構設計』：本章說明所需達到的設計需求以及設計規範和闡述如何設計出本論文所需的機構，並且經過模擬來說明如何決定改良後的手爪類型。

第四章：『模擬與比較』：本章說明經選定的夾角手爪測試其不同角度之間的差異，不同的載重位置與攀爬的穩定性及時間關係，不同的總重量對攀爬穩定性及時間的關係，不同的摩擦係數對攀爬穩定性影響，之後以田口法從不同變數中找出優化後參數，並且以此組參數進行模擬驗證田口法，最後探討手臂轉動速度所節省時間與整體穩定性的關係，以供往後設計攀爬機構的參考。

第五章『結論與建議』：本章說明此機構經模擬比較後試圖歸納出一個此機構適合使用的條件，並找出值得未來繼續改進研究的地方。

第二章 研究理論與方法

本篇研究重點在於應用機構設計理論，改良一非等徑圓柱體攀爬機器人的機構系統，採用應用力學推導的摩擦力理論、動力學等為基礎，並以QFD品質機能展開法、田口法、Solidworks、COSMOS Motion軟體動力分析模擬設計改良與數據整理、同時並考慮攀爬機構手爪角度與摩擦力之間關係，觀察是否能達到穩定安全的效果及各項參數與材料的配置影響、最終驗證所設計成果的可行性。

2.1 摩擦力基本原理

早在西元1508年，科學家達文西(Leonardo da Vinci, 1452~1519)就對摩擦力進行了一系列的研究，關於二個接觸面之間的摩擦力，他提出二個規則，(1)摩擦力與其負載成正比(2) 摩擦力與接觸面積大小無關。

繼達文西之後，有三位法國科學家對摩擦力做了定量的研究。法國科學家阿蒙頓(Amontons, 1663~1705)重新研究摩擦力，於西元1699年加入第三條：(3)摩擦力與二表面的相對速度無關。這時離達文西提出摩擦力規則的年代約有200年之久。

摩擦力與負載成正比，看起來說明很合理，也容易接受。但是，二

個平行滑動表面之間的摩擦力，並不會隨著接觸面積的增加而增大，則很難令人接受。因此，當阿蒙頓在1699年向法國科學院提出報告時，引起了相當的震撼，人們都感到相當驚訝而紛紛提出質問。約50年後，西元1750年，法國數學家尤拉(1707~1783)用數學式把阿孟頓實驗的主要結果寫下來： $F = f \cdot N$ ，其中F是摩擦力，f 是摩擦係數，N是正壓力。不管是阿孟頓還是尤拉，對於這個公式都還是沒有給出確切的含意。

又過了約30年，法國科學院懸賞一個關於摩擦定律和繩索牢固有關的問題。1781年，一位法國軍事工程師以他優秀的研究成果獲得了這項法國科學院獎。他對摩擦現象作了詳細的分析，設計實驗，經過精確的操作與仔細的觀測，使得錯綜複雜的現象顯現出基本規律。他是誰？這位科學家就是在電磁學領域中鼎鼎大名的庫倫。

1781年，庫倫研究摩擦力，參加法國科學院的徵文，提出《簡單機械的理論》的論文，指出影響摩擦力的因素有接觸面表面的性質及塗層、表面承受的壓力、接觸時間、表面滑動的速度、空氣的濕度或乾燥程度等等條件，共有12項之多。他逐項進行試驗，寫下了下面的經驗公式：

(1) 對於滑動面之間的摩擦：

$$F = A + \frac{N}{\mu} \quad (1)$$

(F代表摩擦力、N代表正壓力、 μ 是摩擦係數的倒數，A代表一個大小不變的定力。)

(2) 對於傾斜的滑動面：

$$F = \frac{A \cdot \mu + N(\cos n + \mu \cdot \sin n)}{\mu \cdot \cos m + \sin m} \quad (2)$$

(n為斜面和水平面的夾角，m是F的作用方向與斜面的夾角。)

(3) 對於滾動摩擦：

$$F = k \frac{N}{r} \quad (3)$$

(F代表摩擦力、N代表正壓力、r為圓桶半徑，k為滾動摩擦係數。)



2.1.1 摩擦力的應用

如圖2.1示，其中 W 為機構重量， F_A 為A手爪摩擦力， F_{AN} 為A手爪正向力， f 為摩擦係數， γ 為手臂傾斜角度，當爬桿機器人在桿柱上固定的時候，上、下兩爪緊壓在桿柱上，上爪的摩擦力 $F_A = F_{AN} \cdot f$ ，下爪的摩擦力 $F_B = F_{BN} \cdot f$ ，要保證機器人手臂不會滑落，並且可以單手抓住整體的重量，就要滿足條件 $F_A + F_B \geq W$ ，而 F_{AN} 、 F_{BN} 與整體重量 W 有相對關係，當 W 為定值時， F_{AN} 、 F_{BN} 也是定值，為了使 $F_A + F_B \geq W$ ，除了改變摩擦係數外，為了要使此機構可以在有錐度的桿柱攀爬，爪子的型式、整體重量、載重位置、摩擦係數都是可以探討。

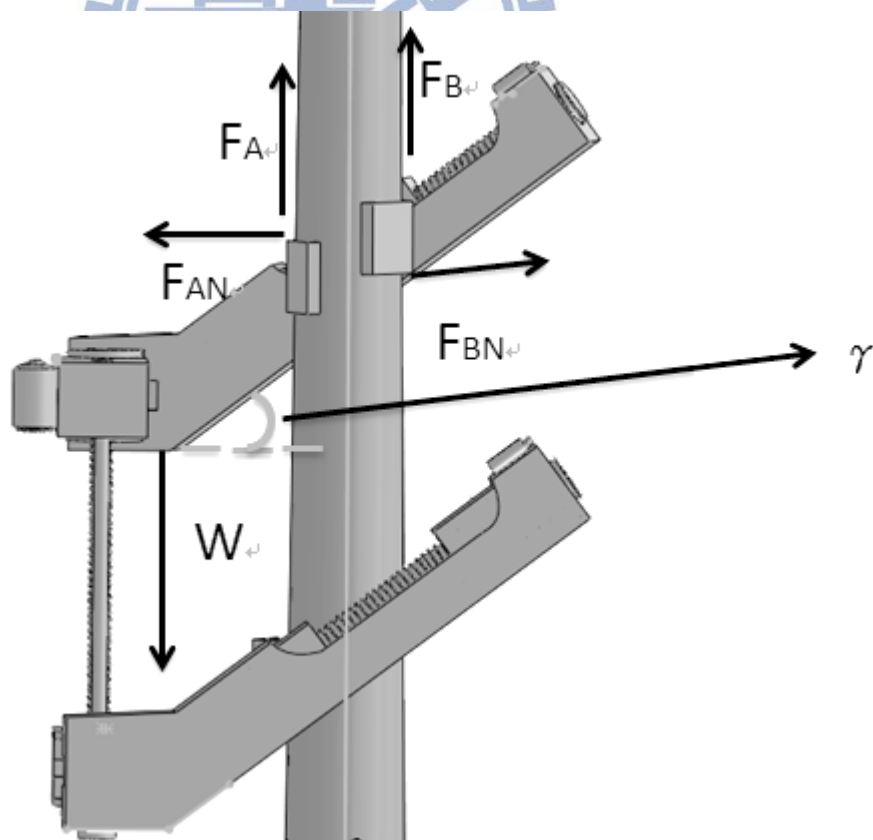


圖2.1 攀爬機構力學示意圖

2.1.2 兩邊長度固定求與一圓相切之最小夾角推導

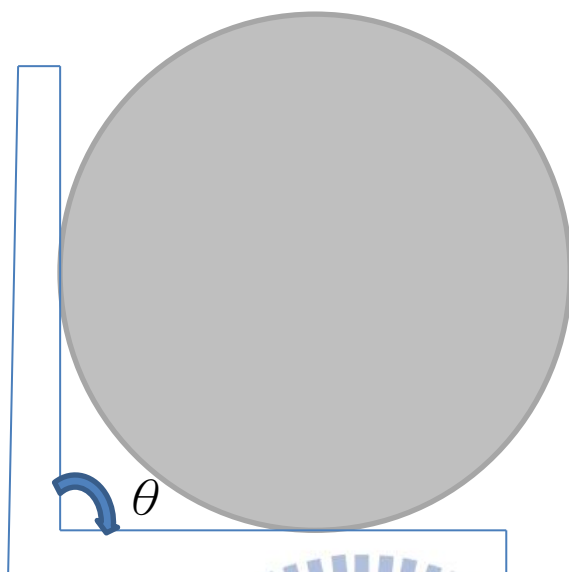


圖 2.2 與圓相切的兩切線及夾角示意圖

假使想知道兩個邊夾一角度，與一圓相切，並且兩邊的長度固定，圓的半徑也是固定，且圓必須和兩邊相切，要得到 θ 最小為多少？可以用餘弦定理，餘弦定理是三角形中三邊長度(a、b、c)與其中一邊c的對角(例： γ)的餘弦值(cos)的數學式，餘弦定理指的是：

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma) \quad (4)$$

同理，也可以將其改為：

$$b^2 = c^2 + a^2 - 2ca \cos(\beta) \quad (5)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos(\alpha) \quad (6)$$

其中是角與分別為邊長 a 與 b 的對角。

畢氏定理可由餘弦定理的推導得到，當三角形為直角三角形，其中c邊的對角為直角，即 γ 為 90° 時， $\cos(\gamma) = 0$ ，(4)式可被簡化為

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (7)$$

當知道三角形的兩邊和一角時，餘弦定理可被用來計算第三邊的長，或是當知道三邊的長度時，可用來求出任何一個角。

為了找出夾角的最小角度如圖 2.3 所示 θ ，先求出相切邊與圓垂直的半徑之間所圍成三角型第三邊的長度

依公式(7) $C^2=100^2+(104.85)^2$ ，可得 $C=144.8935872$

再利用餘弦定理公式(4)

$$104.853^2+144.8935^2-2 \cdot 104.853 \cdot 144.8935 \cdot \cos(\frac{1}{2}\theta)=100^2$$

其中 $\cos(\frac{1}{2}\theta)=0.72365$

$$\frac{1}{2}\theta = \cos^{-1}(0.7365)=43.64^\circ$$

所以 θ 的最小角度約為 87.28°

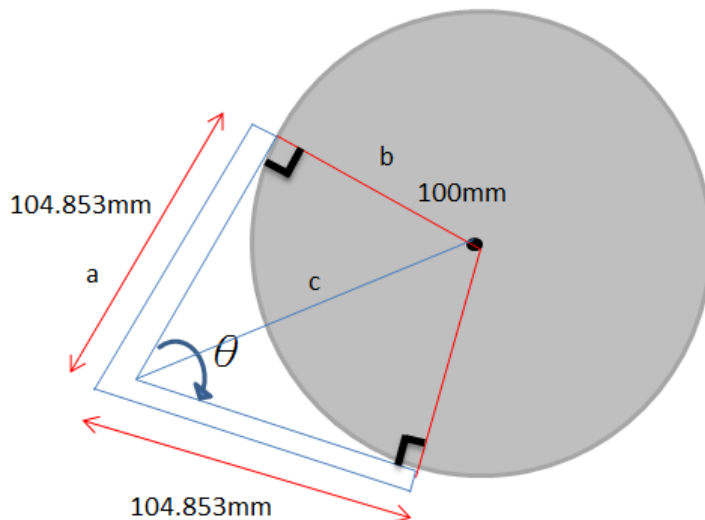


圖 2.3 與圓相切的兩切線及夾角示意圖

前述2.1.2章節推導內容若增加切線開放端點連線須經過圓心的條件時，假設與半徑 b 的圓相切的兩個切線邊長為 a ，兩切線夾角 θ 的最小值即為2.1.3節擬分析推導的目標。

2.1.3 兩夾爪兩邊長固定，求與一圓相切後不干涉之最小角度

攀爬機器人的手爪所夾的圓柱越高處，意謂圓柱半徑越小。當此圓柱的半徑 b 的最小值為35mm時，設定其兩個手爪夾取一個圓，各邊與圓相切而不互相干涉，那麼單邊手爪兩邊所夾的角度 θ ，將成為整個由較大半徑至較小半徑的攀爬過程中最小角度的限制條件。此角度 θ 由圖2.4所示說明並加以推導。圖2.4僅運用來推導幾何角度，不是力學示意圖，而左右兩組夾爪為幾近接觸，並未接觸。

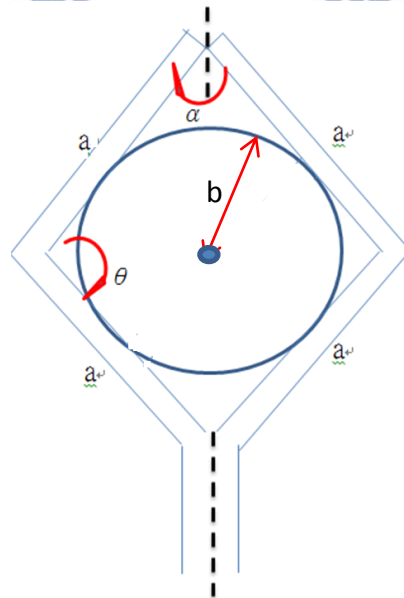


圖 2.4 兩夾爪兩邊固定與一圓相切示意圖

四個邊等長且均為 a ，四邊均與圓相切，圓半徑已知為 b ，依照幾何條件可推導得 θ 值。

假設兩組再夾爪再接觸兩邊的夾角為 α ，單邊夾爪的夾角為 θ

$$\text{因為 } \sin \alpha = \frac{2b}{a} \quad \text{其中 } (b \leq a) \quad (8)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{2b}{a} \quad (9)$$

因此可以求出 α 角度

又因為四邊形內角和為 360°

$$\text{所以 } \theta = (360^\circ - 2\alpha) \div 2$$

可求出 θ

現在已知 $a=104.853\text{mm}$, $b=35\text{mm}$ ，帶入公式(9)後可得

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{70}{104.853} = 41.882^\circ$$

$$\text{解得 } \theta = (360^\circ - 2 \cdot 41.882) \div 2 = 138.1^\circ$$

求出 θ 的最小值約為 138 度

2.1.4 力學分析

欲得知手爪的角度 α 大小與手爪受到的正向力 N_A 、 N_B 之間的關係，

可以先從如圖 2.5 所示機構單手抓取時來觀察，在本研究假設 A 爪

不發生滑動，我們要觀察爪角度與手爪受到正向力的關係，以及機

構單手抓取與重量的關係式。

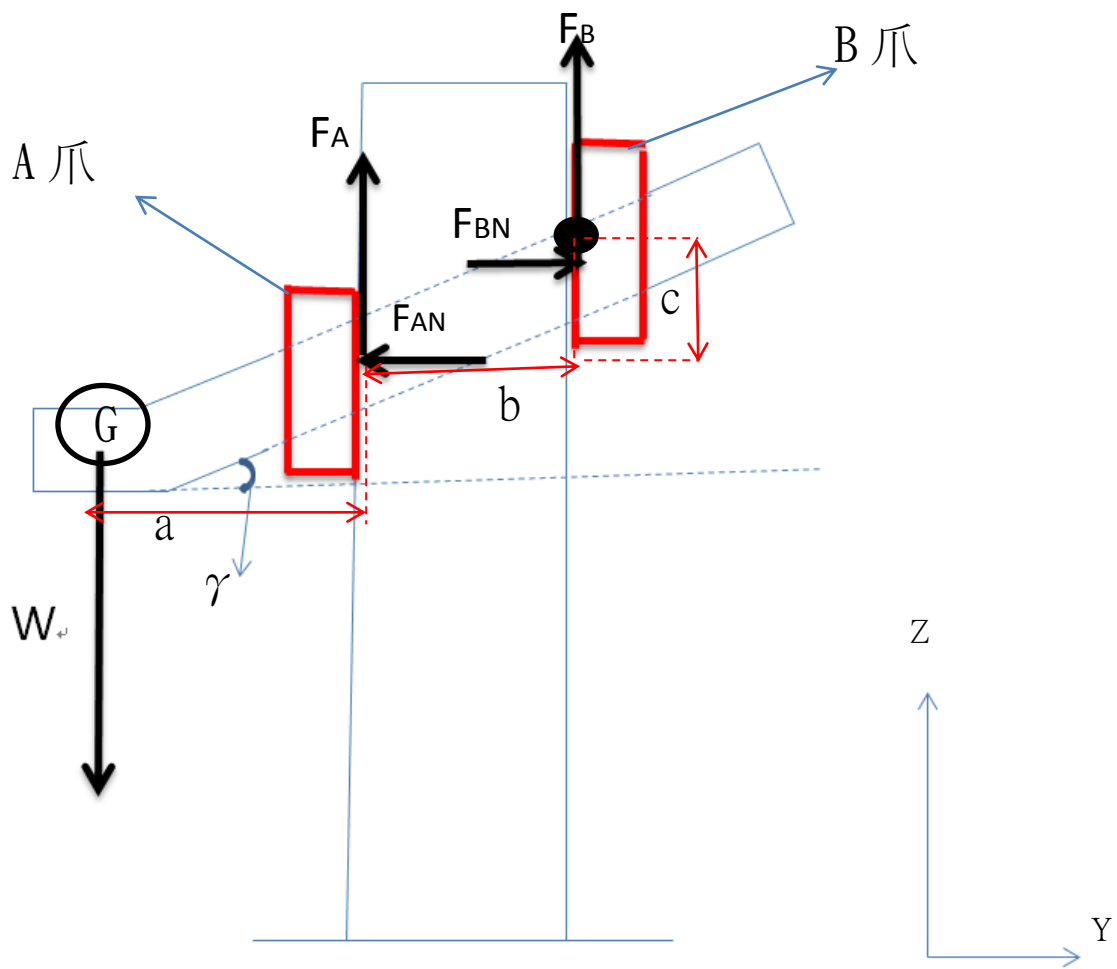


圖 2.5 機構單手爪取時自由體圖

首先本研究以 B 爪的摩擦力 F_B 與正向力 F_{BN} 的交會點當作支點，而 A、B 爪的正向力主要是假設 A 爪與桿柱之間不滑動，靠著機構重量給手爪 A 支點一個力矩，而使得 B 爪與桿柱之間有一個正向力，其中去計算總機構重量 W 、 F_A 、 F_{AN} 三個力矩對此點進行力矩平衡 經過力矩平衡後可得

$$W \cdot (a+b) - F_A \cdot b - F_{AN} \cdot c = 0 \quad (10)$$

在進行 Y 軸方向的平衡可得

$$F_{BN} - F_{AN} = 0 \quad (11)$$

Z 軸方向的平衡

$$F_B + F_A = W \quad (12)$$

從式子 10 可整理得

$$F_A = W \cdot (a + b) - F_A \cdot b - F_{AN} \cdot c = 0 \quad (13)$$

將式 13 帶回式 12 可得

$$F_B = W - \frac{W \cdot (a + b) - F_{AN} \cdot c}{b} \quad (14)$$

因為 F_{BN} 、 F_{AN} 在 Y 軸平衡得到兩個正向力相等，所以少了一個聯立的方程式，只能得到 F_A 、 F_B 與正向力、重量之間的關係式。所以如果我們要以機構單手抓取桿柱並且維持平衡要滿足 Z 軸方向平衡的式子，也就是 $F_B + F_A \geq W$ 。

如圖 2.6 所示，其中 N_B 、 N_A 為桿柱給手爪在座標 XY 面的正向分力，而 α 則為手爪的夾角角度， F_{c1y} 與 F_{c2y} 分別是螺桿給予手爪 y 軸的正向力如下圖 2.7 圖 2.8，將 B 爪 y 軸的合力定為 F_{BN} ，因此

$$2N_B \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = F_{c2y} \quad (15)$$

相同的 A 爪 y 軸合力為

$$2N_A \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = F_{c1y} \quad (16)$$

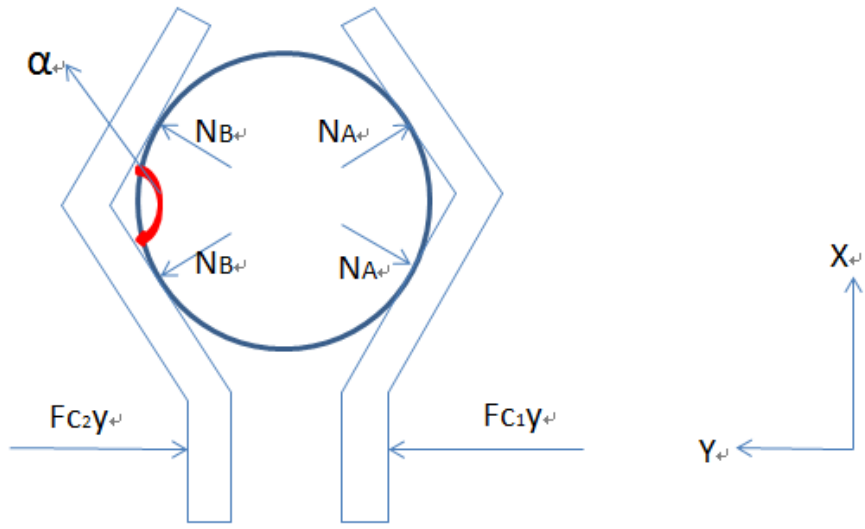


圖 2.6 手爪 X、Y 平面受力示意圖

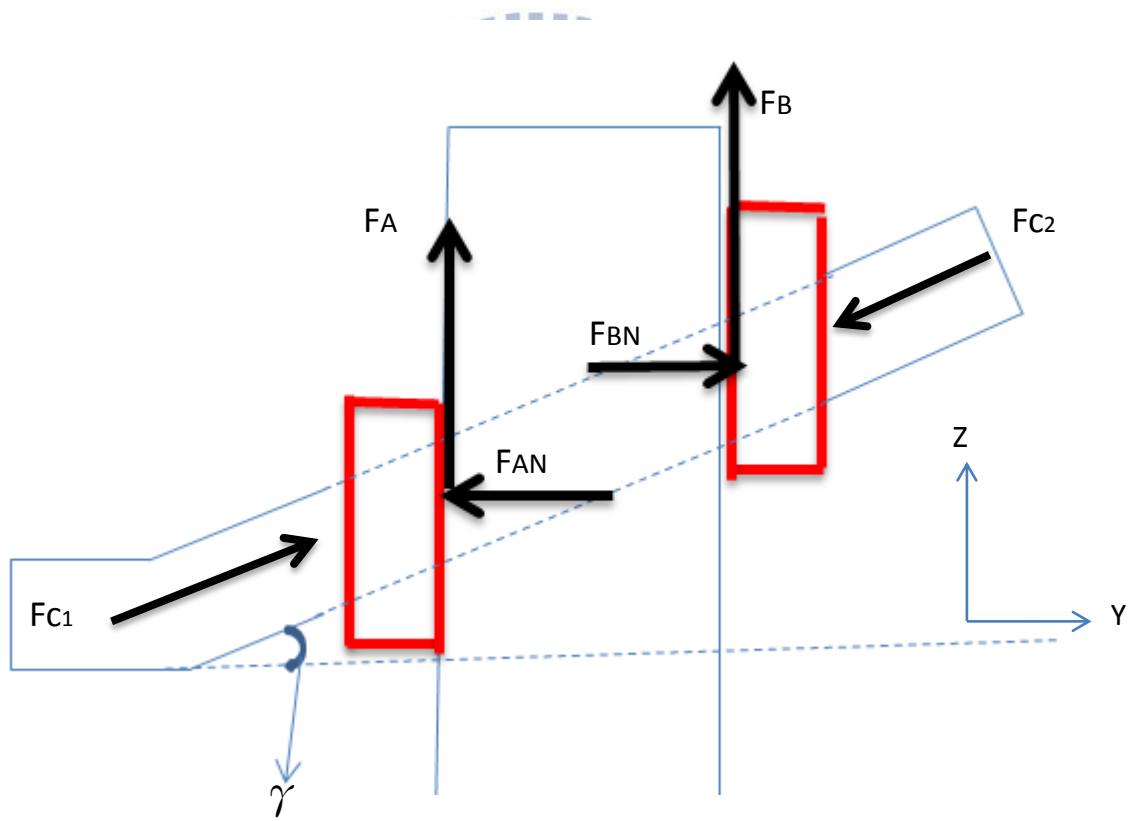


圖 2.7 手爪 Y、Z 平面受力示意圖

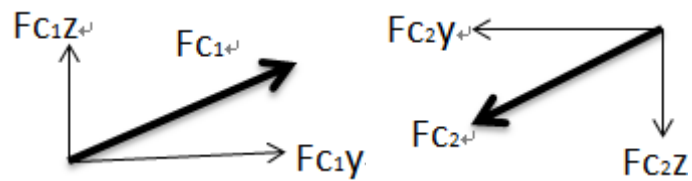


圖 2.8 螺桿給予手爪正向力分解於 Y、Z 方向示意圖

由式(15)(16)可知當機構重量、桿柱錐度、兩爪距離固定時，帶回式 12 可得 $2N_A \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot f + 2N_B \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot f = W$ ，而 $0 < \alpha < 180$ ， $0 < \sin\frac{\alpha}{2} < 1$ ，可以從這個推導知道假如 α 介於 0° 與 180° 之間， α 越小，那桿柱給予手爪正向力 N_A 、 N_B 會較大，兩者成反比。

2.2 自鎖機構應用與介紹

在本研究改良的機構中，在手爪移動、手臂旋轉、上升等動作皆有運動到螺桿的自鎖機構等，因此在這裡也要進一步介紹自鎖機構。

由於在螺紋與螺紋之間，有大面積的滑動接觸面，大多數螺旋機械會具有「自鎖性質」——施加力矩於桿軸會促使桿軸旋轉，但是逆反過來，對著軸桿施加軸向負載力，並不會促使螺桿逆旋轉。這性質與其它一些簡單機械明顯不同，那些簡單機械不具自鎖性質，假若負載力足夠大，則那些簡單機械會朝逆反方向運動，那些簡單機械可以雙向運作。[20]

可自鎖機構大致上可以分成三類

- (1) 螺旋轉動自鎖
- (2) 蝸桿自鎖
- (3) 變速器

這三種自鎖裝置在現實生活中都運用在很多不同的地方，而本篇論文則主要運用到前兩者，在下面也會詳細介紹。

1. 螺旋轉動自鎖：

(1)定義:螺旋傳動主要是利用螺旋桿與螺母組成的系統來實現傳動要求的。其主要為將傳動便為平動，同時傳遞動力

(2)常見的螺旋轉動裝置

<1>機床的進給機構

<2>活動板手

<3>螺旋千斤頂:主要為螺母固定，傳動螺桿，螺桿在螺母上平動，此種也是本論文機構運用的裝置

(3)螺旋轉動的工作原理

螺旋的自鎖條件是螺紋升角 $\alpha < \theta$ ，如果螺桿與螺母的靜摩擦係數 $\mu = 0.1$ ，則 θ 為 $5^{\circ} 43'$ 為了保證螺旋千斤頂自鎖，一般取螺紋升角 $\alpha = 4^{\circ} \sim 4^{\circ} 43'$ 。

(4)螺旋轉動的優缺點

結構簡單，製造方便，易於自鎖，但是摩擦力大，傳動效率低，磨損快

(5)螺旋傳動的特點

<1>傳動比大

傳動比大，從而可用較小的轉矩得到較大的軸向推力。

常用於起重、夾緊等。


<2>精度較高的距離與位置

常用於精密機械和測量儀器，特別適用於一些機構的
細調節

<3>能夠實現自鎖

適用於垂直舉起重物的機構。對於水平推力的運動機構
也能在任意位置得到精確定位。

2. 蝸桿與蝸輪自鎖



蝸桿與蝸輪的傳動是屬於空間交錯之嚙合運動如圖 2.9 所示，通常交錯角為 90 度，具有高轉速比之傳動，它可以減速增扭及改變扭矩旋轉方向，尤其在需要速差很大的調節時，蝸桿蝸輪減速器更可以發揮效用。蝸桿與蝸輪傳動時恆以蝸桿為主動件，蝸輪為從動件，因此為一很好的防止倒轉裝置，此項特有的自鎖特性。主要優點有：

(1)結構緊湊：

因單級之傳動轉速比大，可替代多級式的齒輪減速機構。

(2)高轉速比：

由於蝸桿齒數少，而蝸輪相對齒論較大，固可實現較大的傳動轉速

比。

(3)工作穩定、噪音小：

因為在同一時間內，蝸桿蝸輪之嚙合齒數不少於 2。

(4)具自鎖(Self-locking)功能：

如果設計蝸桿導程角小於蝸輪之摩擦角，即可達到自鎖功能，具有防止反轉之安全措施。

缺點：傳動效率低、功率低、磨耗嚴重。

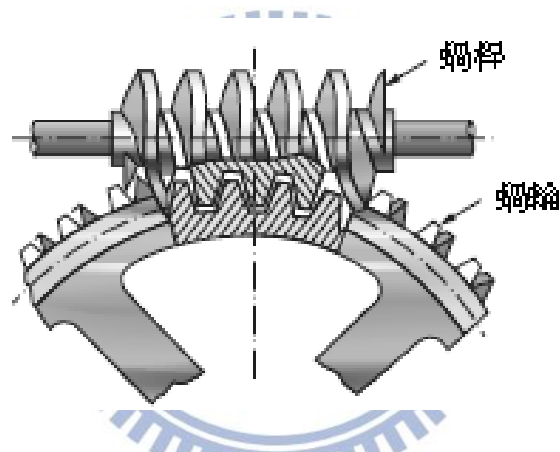


圖 2.9 蝸桿蝸輪示意圖

2.3品質機能展開(QFD)

在產品設計開發的流程中，研發人員可使用品質機能展開方法 (Quality Function Deployment, QFD) 來釐清設計案的各種需求，評估產品性能以決定相關技術，是一種系統化與結構化的方法，能使產品從研發初期即兼顧到市場需求與研發技術的相互配合。其

主要概念是將產品的需求進行多層次的演繹分析，轉變為產品設計要求、零組件的特性、製程設計要求、生產要求的品質工程管理技術。一般以客戶需求與產品品質特性及工程管理措施之間的關係進行矩陣展開和重要度評估分析，找出對產品需求影響最大的產品品質特性及工程管理措施，把握重點，使研發資源放在關鍵的地方，以確實滿足客戶需求而獲得實值的效益[21]。

QFD 法可使用品質屋如圖2.10所示介面工具來輔助，品質屋左側列出客戶設計需求，上方為研發人員所使用或具備的技術，中間為兩者所互相建構出來的相關矩陣，右側為評估市場競爭力的項目，下方則列出技術規範等資訊。

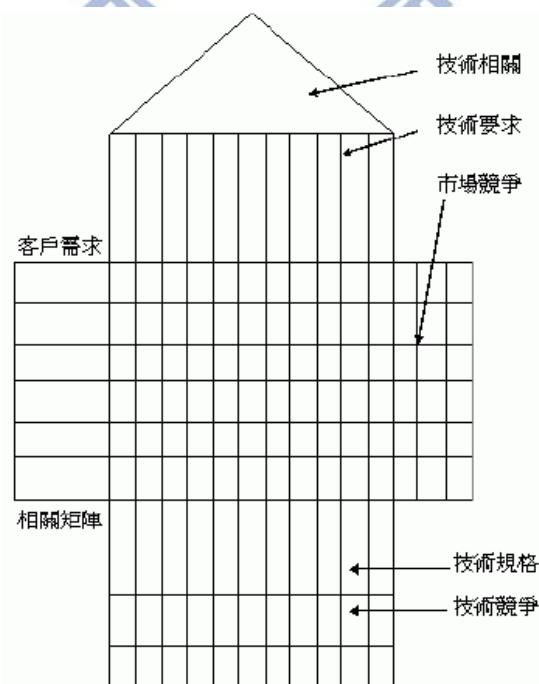


圖2.10 QFD 法品質屋

在整合以上各種設計考慮之因素後，即能預先制定產品規格，以逆向工程理念推求設計開發流程。

可分為以下步驟

步驟1. 認識顧客、確認顧客需求

步驟2. 決策需求相對重要性

步驟3. 競爭評比

步驟4. 顧客需求轉成工程需求

步驟5. 顧客需求轉換成工程需求之關係

步驟6. 產品設計之工程目標之設定

步驟7. 工程需求間之關係

2.4 田口實驗方法

田口實驗法 (Taguchi Experimental Method): 又稱實驗計畫法 (Design of Experiment, DOE) 原係英國統計學大師費雪

(Ronald Fisher) 先生於 1920 年所創。其分析資料的方法稱作變異數分析法 (Analysis of Variance, ANOVA)，原本應用在農產品產量之提昇作業上[22]。1947 年勞博士 (Rao, C. R.) 建議使用直交表 (Orthogonal Array) 規劃具有數個參數的實驗計畫

(Experimental Plan)。而到了 1949 年，日本電信實驗室的田口玄一博士 (Dr. Genichi Taguchi) 結合上述的變異數分析法和規劃實

驗的直交表，發展出田口實驗計畫法（田口法），又稱為穩健性設計（Robust Design）。這套為縮短實驗次數、迅速降低成本、改善品質，而發展出一個實驗設計法。傳統的實驗設計法為了實驗精確，故常以完全實驗法來進行，一旦當控制因素及各因素的水準值增加，則實驗次數也跟著成倍數增加。田口式實驗設計法規劃以直交表進行，其目的在於以較經濟的方式即可進行部份要因實驗，雖然犧牲了小部份因素間交互影響作用的解析能力，但卻減少許多實驗次數且可達系統最低要求，並且能夠允許某些程度被外界干擾，同時能保持品質穩定性，且又能對各自身的影響性作出合理的分析，並找出最優品質控制的參數。

2.4.1 直交表的運用

直交表（Orthogonal）的基本表示方法為 $L_A(B^C)$ ，其中L為直交表的代號，字母A表示整個系統所需要的實驗次數，B為每個控制因子（Control Factor）的水準數（Level），C則為控制因子的數量[23]。為了選用能夠滿足系統的直交表，需先行計算出系統的自由度（Degrees of Freedom, d.f），利用自由度的計算選用對應足夠自由度且最少試驗次數的直交表，係依據因素數量、每個因素的水準數、以及欲調查的交互作用數量等，加以累加後產生實驗計畫的自由度來決定的，而自由度的計算方法如下：

系統的總自由度 = (每一個控制因子水準數 - 1) × 控制因子的數量

以符號表示即為：

$$d. f = (B - 1) \times C \quad (17)$$

舉例來說，假設所設定的控制因子有四個，而每種因子又各自具有三種水準。則系統所對應的自由度為：

每個三水準因素具有 $3-1=2$ 的自由度

$$\text{總自由度 } d. f. = (4 \text{ 個因素} \times 2 \text{ d. f.}) = 8 \text{ d. f.}$$

因此 8 為獲得期望資料數量所必須的自由度，直交表 $L_9 (3^4)$ 其自由度為：

$$\text{總自由度 } d. f. = (4 \text{ 個因素} \times (3-1) \text{ d. f.}) = 8 \text{ d. f.}$$

$L_9 (3^4)$ 的自由度與系統的自由度相同。因此直交表 $L_9 (3^4)$ 可以滿足該實驗條件。(直交表 $L_9 (3^4)$ 如表 2.1 所示)

表 2.1 $L_9(3^4)$ 直交表

因子 No.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

本研究採用直交表作為此次實驗計畫法的表格，只要進行 9 次的實驗，分析所得到的結果即可取代原本全部實驗所需的 $3^4=81$ 次，能夠節省相當多花費的分析時間。

2.4.2 因子反應 (Factor Response) 分析

在田口實驗法中，會將規劃好各組實驗的結果記錄於直交表之後， $L_4(2^3)$ 的直交表如表 2.2 所示：

表 2.2 $L_4(2^3)$ 的直交表

因子 No.	A	B	A × B	Data
1	1	1	1	20
2	1	2	2	40
3	2	1	2	25
4	2	2	1	10

為了瞭解每一個控制因子對於實驗的影響，進而找出最佳解的因子組合，可以使用因子反應表與因子反應圖來得到所需要的答案，

以表 2.2 的實驗規劃為例，必須先求得每個因子在不同等級下實驗結果的平均值，如等級 1 的 A 的平均響應為直交表中，A 為等級 1 的實驗結果的平均值，即為實驗 1 與實驗 2 的平均值；將各個控制因子的平均值整理成反應表 (Response Table) 如表 2.3 所示，在繪製成反應圖 (Response Graphs) 如圖 2.11 所示，藉此得知每個因子的影響程度多寡與所需條件之最佳組合。

表 2.3 因子反應表

Level	A	B	A × B
1	30	22.5	15
2	17.5	25	32.5

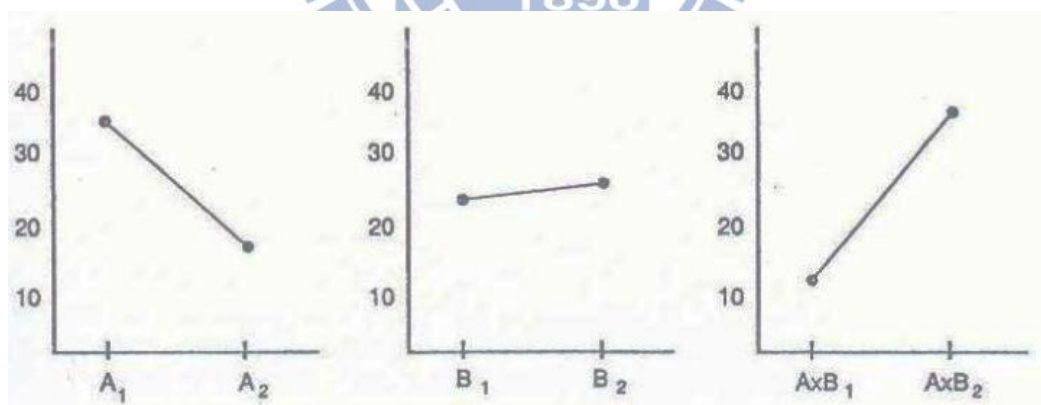


圖 2.11 因子反應圖

2.4.3 品質計量法

參數設計 (Parameter Design) 又稱穩健設計[24]，其目的在於決定產品與製程的參數值，以求得產品機能的穩定，使其在高水準下運作，而受干擾影響程度為最低。

運用因素非線性與線性的一些關係，找出控制因素與誤差因素間的交互作用，利用非線性關係減少變異，再利用線性關係提高水準，使製程或產品達到堅耐性 (Robustness)。品質工程的首要步驟就是選定合適的量測品質特性。

品質特性分為三類：

1. 計量特性 (Measurable Characteristics)

能以連續尺度量測。

2. 計數特性 (Attribute Characteristics)

不能以連續尺度量測，但能按不連續分級尺度分類，常依主觀判定。

3. 動態特性 (Dynamic Characteristics)

是「系統」的機能品質特性，取決於該系統的投入及其造成的結果。

而計量特性又分為三類：

1. 望目特性 (Nominal-the Best , N.B.)：此特性具有一特定目標值。



2. 望小特性 (Smaller the Better , S.B.) : 目標極端值是零。

3. 望大特性 (Bigger-the Better , B.B.) : 目標值為無限大。

由模擬分析結果可得到均方偏差 (Mean Square Deviation , M.S.D) 與訊號雜訊比 (Signal to Noise Ratio , S/N) 。訊號雜訊比是用來衡量產品品質的一種統計量度，它可以表示製程或產品的水準及其誤差因素影響的程度。對於不同的品質特性目標，S/N 比有不同計算方式，本文選定的品質特性是運動過程的基準點的 X 軸平均偏移量，偏移量越小代表品質越佳，因此選定望小特性作為品質的計量法。MSD 和 S/N 公式定義如下：

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (18)$$

$$\text{MSD} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = (\bar{y})^2 + \sigma^2 \quad (19)$$

$$S/N = -10 \log(\text{MSD}) = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (20)$$

其中 y 代表第 i 個品質特性， n 值代表實驗資料數目，因此本研究 $n=1$ ， \bar{y} 為平均值品質特性， σ^2 為 y 的變異數，S/N 比愈大，表示品質特性變異愈小。

2.4.4 資料分析

實驗執行完成後，接著是要對實驗結果分析和解釋，進一步利用實驗數據進行估計控制因子的主效果和變異，及如何計算最佳條件下系統績效預測值，以改善系統效能。利用反應表及反應圖來進行直交表數據分析，可以從反應表或反應圖中得到各實驗因子水準平均 S/N 比個別效果的大小，找到對變異影響較大的因子水準，從而決定最佳水準組合。從各因子的水準效果差中，選出大約一半最大差值的因子水準，作為計算最佳 S/N 比推定值。

$$\text{預測值 } y = \bar{y} + (y_{i1} - \bar{y}) + (y_{i2} - \bar{y}) + \cdots + (y_{in} - \bar{y}) \quad (21)$$

y_{i1} ：第 1 個因子第 i 次實驗 S/N

n ：最後一個因子

2.5 Solidworks2010 繪圖軟體介紹

SolidWorks 是一種由美國 Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 所開發，可應用在微軟視窗介面下的一種電腦輔助設計軟體(CAD)如圖 2.12 所示，目前已被世界上超過十三萬家的公司一百三十萬的工程師和設計師所採用，在眾多的用戶群和豐富的內容、技術和專業經驗的支持下，透過使用 CAD、模擬、數據管理、文檔和環境影響評定，可將腦中的靈感轉化為創新設計，除了能快速地繪製出零件的外觀外，也能利用它內建的資料庫指定零件的機

械性質如強度、密度等，可進一步分析零件的特性。建立模型後，需確定其能否實地有效執行，如果欠缺分析工具，只能透過產品開發週期進行這項確認，但這在金錢及時間上均所費不貲。

而產品開發週期一般包含下列步驟：


建立模型。

建立設計原型。

實地測試原型。

評估實地測試結果。

根據實地測試結果修改設計。



Solidowrks 內建的 Simulation 功能可免除昂貴的實地測試，而改在電腦上模擬進行模型測試，藉此降低成本、減少產品開發週期的重複次數，以加快產品上市的時間。且能在做出最終決策前能快速測試許多概念及方案以改良產品，因此本研究從第三章開始將運用 Solidowrks 的繪圖以及 Simulation 功能來評估模擬並且確認本研究機構的可行性。

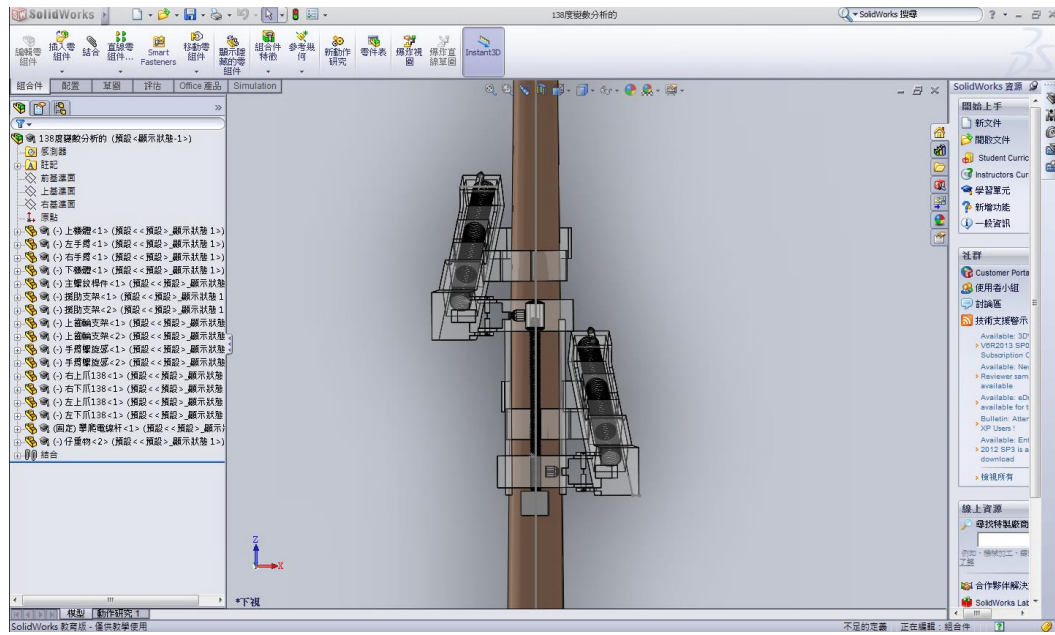
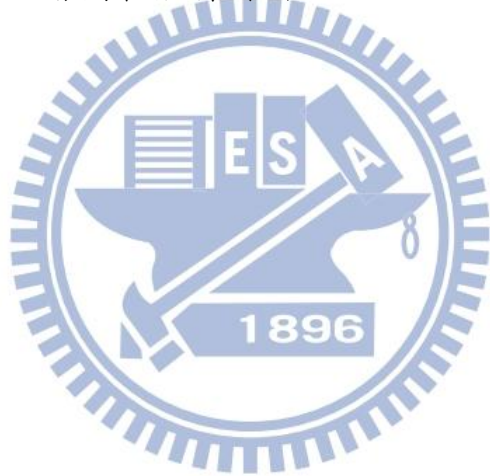


圖2.12 solidworks繪圖軟體操作介面



第三章 可攀爬非等徑圓柱體機器人的機構設計

在開始設計之前首先評估相關文獻之各個設計後，然後以機構與力學理論觀點切入整理並探討現有設計上的特點，接著定義本文設計需求，整合概念進而產生一個設計構想，從這個構想配合應用力學以及摩擦力理論的推導，最後利用軟體分析驗證其省力效果。

3.1 模擬需求

為求設計出符合本論文研究的非等徑圓柱體攀爬機構，得先了解本研究欲設計出的非等徑圓柱體攀爬機構的需求：

- (1) 體積小，機器人應該是結構密實，重量輕。
- (2) 安裝方便與節省電力
- (3) 有足夠的載荷能力，有時候必須要有配載人員上去維修的能力。
- (4) 穩定性，需要有良好的穩定性，因為在高處風較大容易影響平衡。
- (5) 攀登障礙的能力，有些表面不一定是平坦的，像是樹木，也有可能因為颶風下雨，使得表面會打滑。
- (6) 必須要有良好的安全自鎖裝置，通常攀爬機構都必須上下移動，所以必須要有好的自鎖裝置，不然要往下的時候有可能墜毀。

(7)必須符合此篇研究標題，可攀爬非等徑圓柱體。

3.2 模擬規劃

將規劃針對各種不同參數進行穩定度模擬，而穩定性本研究將其定義為本文機構之一基準點在攀爬過程中於X軸方向的平均偏移量為參考依據，得知不同參數於X軸向偏擺平均位移量的趨勢後，再運用田口法每種參數的level，來找到最佳的一組參數。在進行模擬前，有幾項事務必須仔細研究：

1. 廣泛蒐集論文，並探討各種不同機構的優缺點表3.1。

表3.1 各種不同機構的優缺點比較表

移動方式	優點	缺點
輪式	移動速度快，控制方便	接觸面積小，越障能力差，容易打滑
履帶式	接觸面積大，承載能力大，移動速度快，適應力強	履帶磨損大，結構複雜，機動性差
步足式	越障能力強，承載能力大，機動性好，具有好的壁面適應能力	結構複雜，間歇移動，速度慢，關節和足數多，控制複雜
蠕動式	承載能力大，運動平穩，控制簡便，適應能力強	運動速度慢，結構複雜
蛇行式	移動速度快，機動性好，控制簡便	越障能力差，結構複雜，容易受到桿柱半徑影響

2. 材質評估

此攀爬機構主要用於維修、清潔作業，平常可能不需要載人上去檢查，但如有問題仍然需要有人可以上去維修，因此必須使用足夠

強度的材質，且可以組裝、輕量化為此機構之重點，所以材質選購方面也非常重要，此外除了強度問題，還必須探討夾爪材質與欲攀爬桿柱之間的關係，假使使用夾爪，那材質是一個必須探討的項目

3. 各種可變參數

各種可變參數主要是此篇論文研究的重點，包括了夾爪尺寸、整體材質、夾爪與桿柱之間摩擦力、重心位置等等，這都會影響到馬達所需出力、攀爬的速度、以及整體穩定性，未來將用solidworks以及 COSMO motion來進行模擬，一個參數變動其他固定，找出參數變動的趨勢，再以田口法來找出優化的參數組。

4. 市場分析

此篇論文主要目的是為了使高處作業可以自動化，取代人力施工，達到作業安全與便利的目的。本篇論文攀爬機構主要希望運用在以下這些環境，所以必須事先去調查各種不同攀爬環境的半徑。

- (1) 運用於椰子樹上的樹葉修剪
- (2) 運用於工廠煙囪、核電廠斜管維修作業
- (3) 運用於路燈燈罩清潔
- (4) 運用於風力發電塔葉片檢測工作
- (5) 其他高處作業、救火或救災用

研究的開始必須去調查各種環境，然後確定要運用的環境，因為運

用的每一種環境其構造都會有些許的不一樣，每種爬桿機構也有其適合的環境。

3.3 模擬目標

本研究目的在於開發或者改良一種新型的非等徑攀爬機構，非等徑攀爬機構比等徑攀爬機構較為困難的點在於非等徑攀爬機構有著一個錐度，想對來說它的表面是傾斜的，可能會產生不平衡，以及夾取的地方必須跟著桿徑來改變，所以機構夾取部位是必須配合桿柱變化。因此在眾多欲攀爬的柱體當中，以路燈桿柱的高度，半徑變化以及其表面粗糙度，作為新機構尺寸參數的設計依據，而經過調查路燈桿柱的相關資料如下。

1. 一般路燈大致形狀如圖3.1所示。



圖 3.1 一般路燈外型

2. 路燈桿柱長度以及其半徑調查如表3.2[25]

表3.2路燈尺寸表

燈桿種類	H1 (公尺)	H2 (公尺)	D1 (mm)	D2 (mm)
雙臂桿型	5	3.8	160	69
	6	4.8	160	69
	7	5.5	167	69
	8	6.5	179	69
	9	7.5	191	69
	10	8.35	203	69
單臂桿型	5	3.8	160	69
	6	4.8	160	69
	7	5.5	167	69
	8	6.5	179	69
	9	7.5	191	69
	10	8.35	203	69

H1 為桿柱長度，H2 為頂部延展至燈泡長度，D1 為底直徑，D2 為頂部直徑，此表格為經濟部「路燈設計規定」參考表格，其 7 公尺以下燈桿其 H1、H2、D1 及 D2 詳細尺寸，並無制式規格，主辦單位視工程需要自行訂定之。

經過調查後，將欲攀爬桿柱定為長度為 7M，底直徑為 200mm，上直徑為 70mm 為攀爬桿柱。

3.4 QFD品質機能展開法運用

依據前兩節所述，先訂定攀爬目標，並且以QFD品質屋法來探討顧客需求，以及不同攀爬機構之間的競爭評比，以及各項需求之間的相對重要性，來找出本研究可以改良的方向以及最適合本研究欲加以設計改良的機構以節省選取欲改良機構的時間。

步驟1. 認識顧客、確認顧客需求

透過顧客需求之描述，分析並了解設計問題之所在，並將顧客需求轉換成以技術形式描述的工程需求。本步驟首要工作是正確的決定顧客之所在。並不能正確辨認顧客之需求，品質機能展開就失去其意義而表3.3所示為本研究探討出主要顧客需求表，以及相關的內容。

表3.3顧客需求表

需求項目	內容
1. 安全性	高處維修如有載人，安全性是最重要的一項
2. 爬升速度	有些是針對緊急突發狀況，必須快速爬升
3. 輕量化	假使輕量化，可以減少馬達出力及降低價格
4. 控制方便	工人大部分是社會底層員工，較不會使用複雜控制
5. 結構簡單	結構簡單也可以使組裝更加簡單
6. 整體品質	品質好，外觀好可以增加觀感
7. 價格低	價格太高，購買意願就會降低
8. 體積小	可以省去搬運的難度

步驟2. 決策需求相對重要性

當顧客需求清單決定後，接下來須評估各項需求之相對重要性，已決定需求之權值如表3.4所示為步驟1所列出8個需求之間相對重要性的表格。

表3.4需求相對重要性表

總和	8	7	6	5	4	3	2	1	需求
							0	1	R1R2
						0		1	R1R3
					0			1	R1R4
				0				1	R1R5
			1					0	R1R6
		1						0	R1R7
	0							1	R1R8
						0	1		R2R3
					0		1		R2R4
				0			1		R2R5
			1				0		R2R6
		1					0		R2R7
	0						1		R2R8
					0	1			R3R4
				0		1			R3R5
			1			0			R3R6
		1				0			R3R7
	0					1			R3R8
				1	0				R4R5
			1		0				R4R6
		1			0				R4R7
	0				1				R4R8
			1	0					R5R6
		1		0					R5R7
	1			0					R5R8
		0	1						R6R7
	0		1						R6R8
	0	1							R7R8
28	1	6	7	1	1	3	4	5	總和
100%	4%	21%	25%	4%	4%	10%	14%	18%	權值

步驟3. 競爭評比

此步驟主要目的在決定各種攀爬機構在顧客需求上之能力，以了解攀爬機構在市場上之競爭優勢及產品可能改進之方向，最終因此了解設計問題之所在，這個項目主要依據參考許多文獻後所整理的特性比較來評比各種攀爬機構的權值表如表3.5表3.6所示，而各種攀爬機構的分類在1.3文獻回顧有分類的說明。

表3.5競爭評比之權值

權值	給定條件
1	設計完全不符合需求
2	設計稍微符合需求
3	設計多少符合需求
4	設計大部分符合需求
5	設計完全符合需求

表3.6競爭評比之權值與需求

需求	輪式	履帶	步足	蠕動	蛇型
安全性	3	4	2	5	2
爬升速度	5	4	2	5	4
輕量化	4	1	2	4	2
控制方便	4	4	2	4	2
結構簡單	5	1	2	2	2
整體品質	3	3	2	4	3
價格低	4	2	3	4	1
體積小	2	1	4	4	3

步驟4. 顧客需求轉成工程需求

本步驟主要目的在發展一組可量測之工程需求，做為後續產品設計依循或評估之用如表3.7所示。

表3.7顧客需求轉成工程需求表

高科技材料	防滑系統	重量控制	爬行能力	結構簡單程度	銷售價格
↑	↑	↓	↑	↓	↓
N	N	N	N	N	N

步驟5. 顧客需求轉換成工程需求之關係

顧客需求與工程需求之間不一定以一對一關係存在，一項顧客需求可能與多項工程需求間存有不同等級之關聯性。

⊙=強烈關係

○=中等關係

△=微弱關係

空白=彼此之間毫無關係

步驟6. 產品設計之工程目標之設定

品質機能展開的最後步驟是確定工程量測之目標值，並以此目標質評估所設計之產品是否滿足顧客需求。

步驟7. 工程需求間之關係

將任兩個工程需求間之關係表示於對角線交叉之空格中。

以”++”表示強烈正關係、”+”表示正關係、空格表示毫無關係、”-”表示負關係、”--”表示強烈負關係。

最後統計得到如表 3.8 所示。

表 3.8 各種攀爬機構 QFD 品質機能展開表

													
		WHO	HOW					NOW					
○=9 ○=3 △=1		高處維修工人	高科技材料	防滑裝置	重量控制	爬行能力	結構複雜度	銷售價格	1=very bad 5=very good * =輪式 • =履帶 ※ =步足 ◆ =蠕動 ◇ =蛇型				
WHAT			↑	↑	↓	↑	↓	↓	1	2	3	4	5
優秀的攀爬機器人	安全性佳	18	△	○		○				※◇	*	•	◆
	爬升速度快	14		○	○	○				※		◇•	◆*
	輕量化	10	○		○	△	△		•	※◇		*◆	
	控制方便	4					○			◇※		◆•*	
	結構簡單	4		○			○		•	※◆◇			*
	整體品質	25	△	△	△	△		○		※	•*◇		◆
	價格低	21	○					○	◇	•	※	*	◆
	體積小	4			○		△		•	*	◇	◆※	
Importance			14	22	22	14	20	12					
輪式			2	3	2	4	1	2					
履帶			3	4	5	4	5	4					
步足			4	2	4	3	4	3					
蠕動			4	5	2	5	4	2					
蛇型			5	2	4	2	4	5					
Target			3	3	3	4	3	2					
Disgusted			0	2	5	2	4	3					

經由QFD法表格找出對使用者需求影響最大的攀爬機構，使研發資源放在關鍵的地方，例如防滑裝置主要是觀察整個機構是否有自鎖安全裝置、重量控制則是整體機構的重量為何、結構複雜度則是希望結構可以較為簡單，可以讓使用者更快熟悉使用方法以確實滿足使用者需求而獲得實值的效益，在表3.8所示可以看出，蠕動型機構在整體最符合本研究模擬需求，因為有安全性好、攀爬速度快、輕量化這幾個良好的特性，因此希望可以從蠕動型機構探討是否有可改良的地方，甚至研發出創新的機構。

依目前資料收集前人論文結果以及QFD品質屋法後發現，要討論載重、安全、適應力好，以蠕動式為目標，透過solidworks以及COSMO motion模擬來做創新或者改良。

3.5 設計模型與動作分解

本研究以2010年由Lixiu Ma,Boxue Tan,Jin Shen,Wei Liu等人發表的一篇論文The study of Pole-climbing Robot[26]文內機構當作基礎，此型蠕動式攀爬機構當作改良的基礎如圖3.2所示，首先以solidworks重新建模，如圖3.3所示並探討其所有機構之功能與作用。

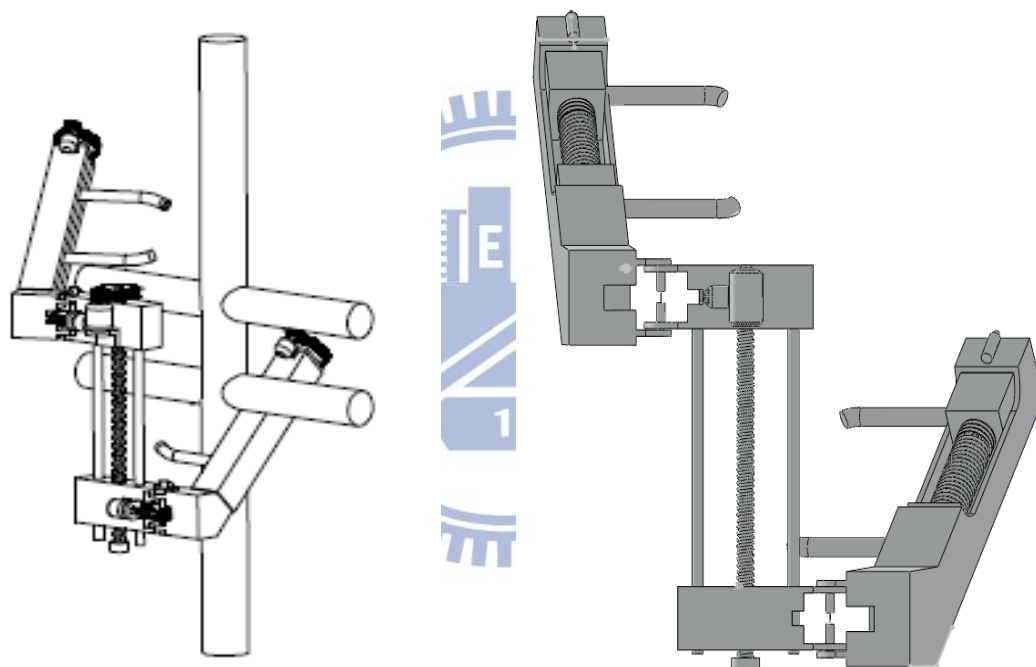


圖3.2原篇論文機構示意圖[26] 圖3.3本研究重新建模機構示意圖

3.5.1 機構整體零件說明

主要包括了上下兩個機體，左右兩個手臂，四隻手爪，五顆驅動馬達，而上機體各個零件示意圖如圖3.4圖3.5圖3.6所示。

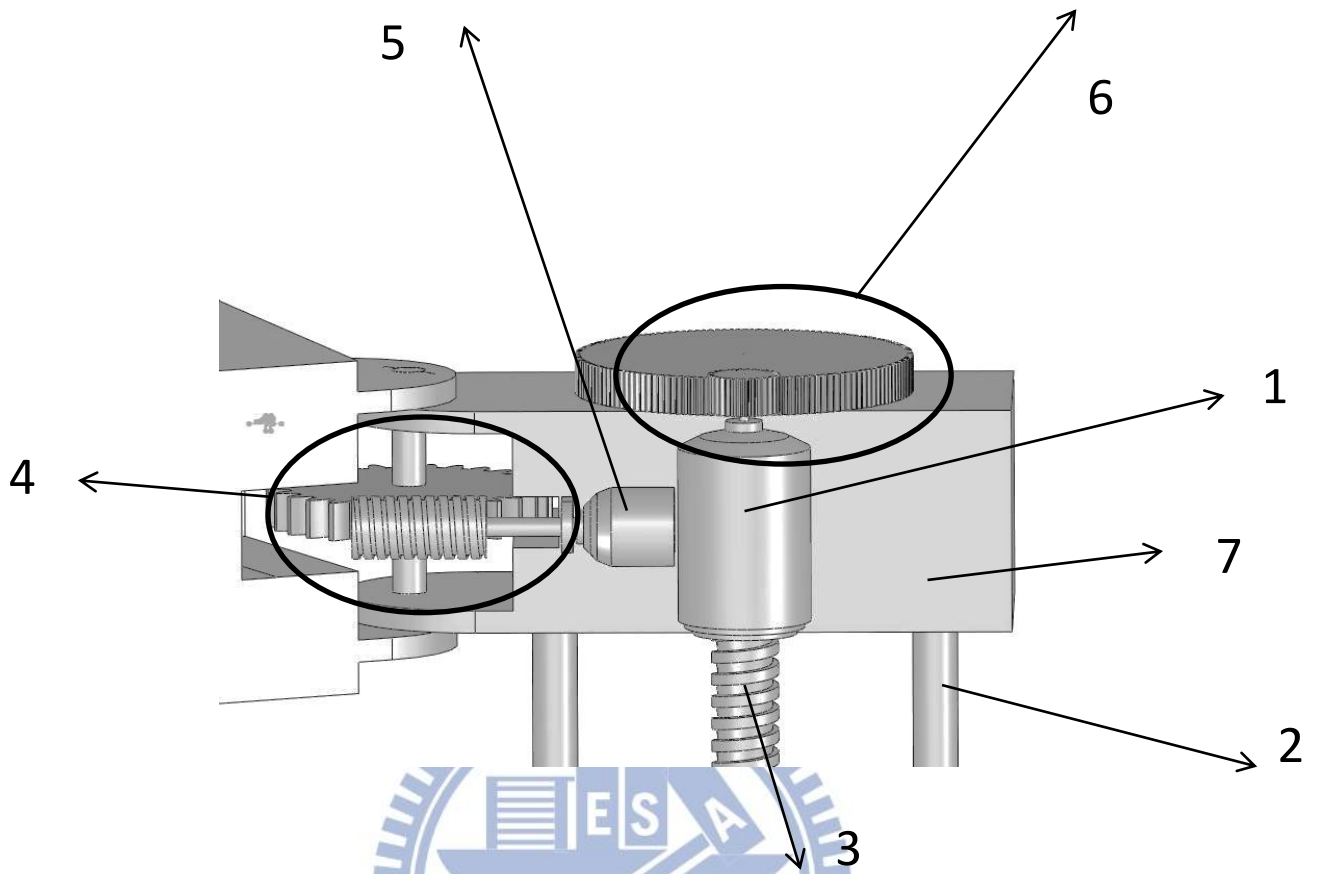


圖3.4 (1)主螺桿驅動馬達(2)上下機體固定桿柱(3)主螺旋桿(4)蝸桿齒輪組(5)手臂馬達(6)主螺桿齒輪組(7)上機體主體

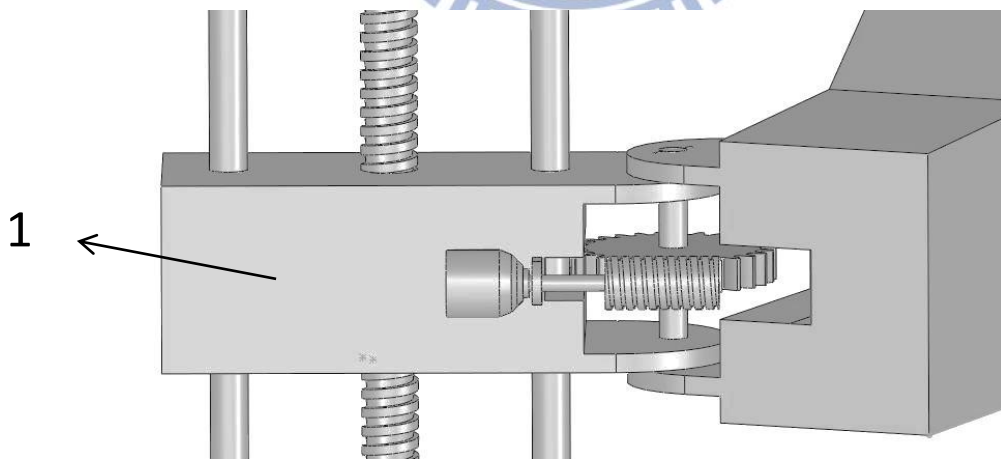


圖3.5 (1)下機體與上機體大致上相同只是少了主螺旋驅動馬達

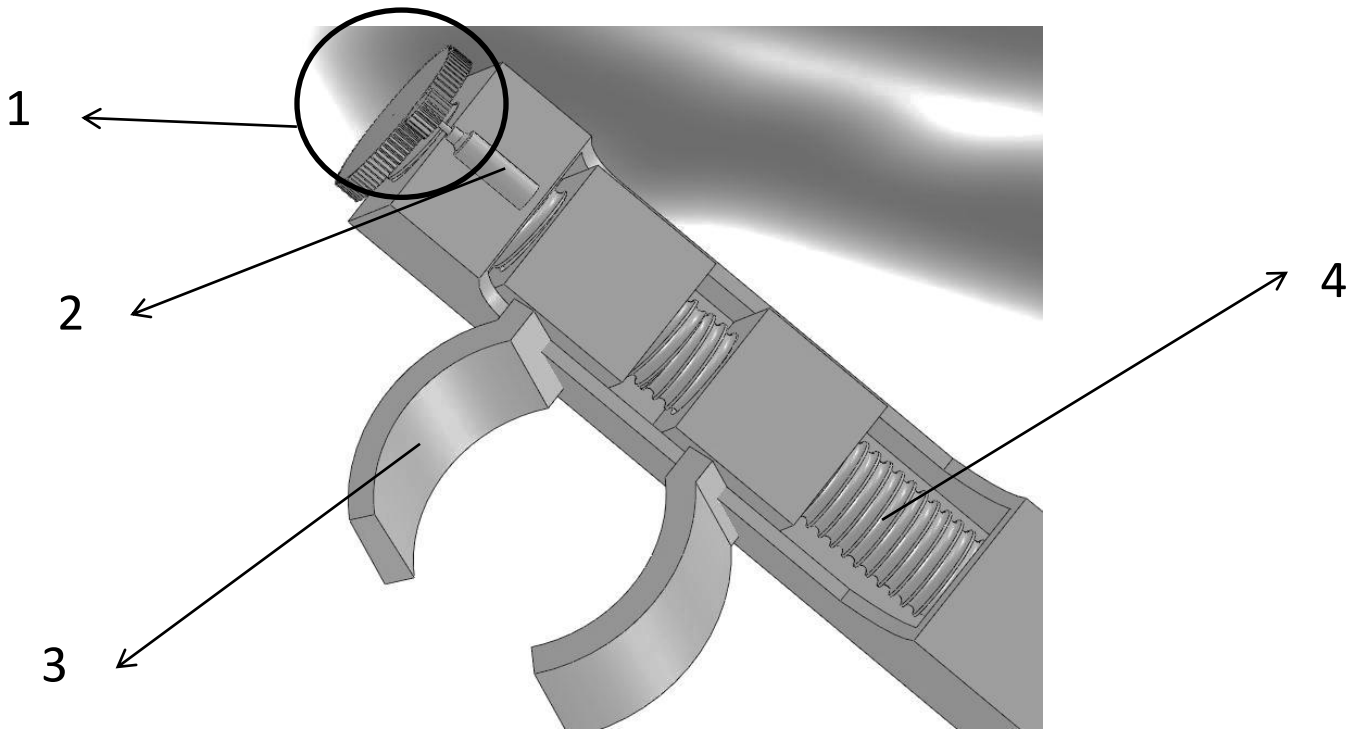


圖3.6(1)手臂螺桿齒輪組(2)手臂小馬達(3)手爪(4)手臂螺桿

3.5.2 攀爬機器人步態分解

此機構為模仿人類攀爬樹木運用左右手臂與手臂上的手爪，因為手爪夾取時機構整體的重心在桿柱外面，因此藉由偏心的原理，使手爪與桿柱之間產生一扭矩而有更大的正向力使得摩擦力也更大來卡住桿柱，以左手臂與右手臂各往上前進一步為一個標準的步態，並且定起始步態為兩手臂抓緊桿子可以分解成六個動作如圖3.7所示。

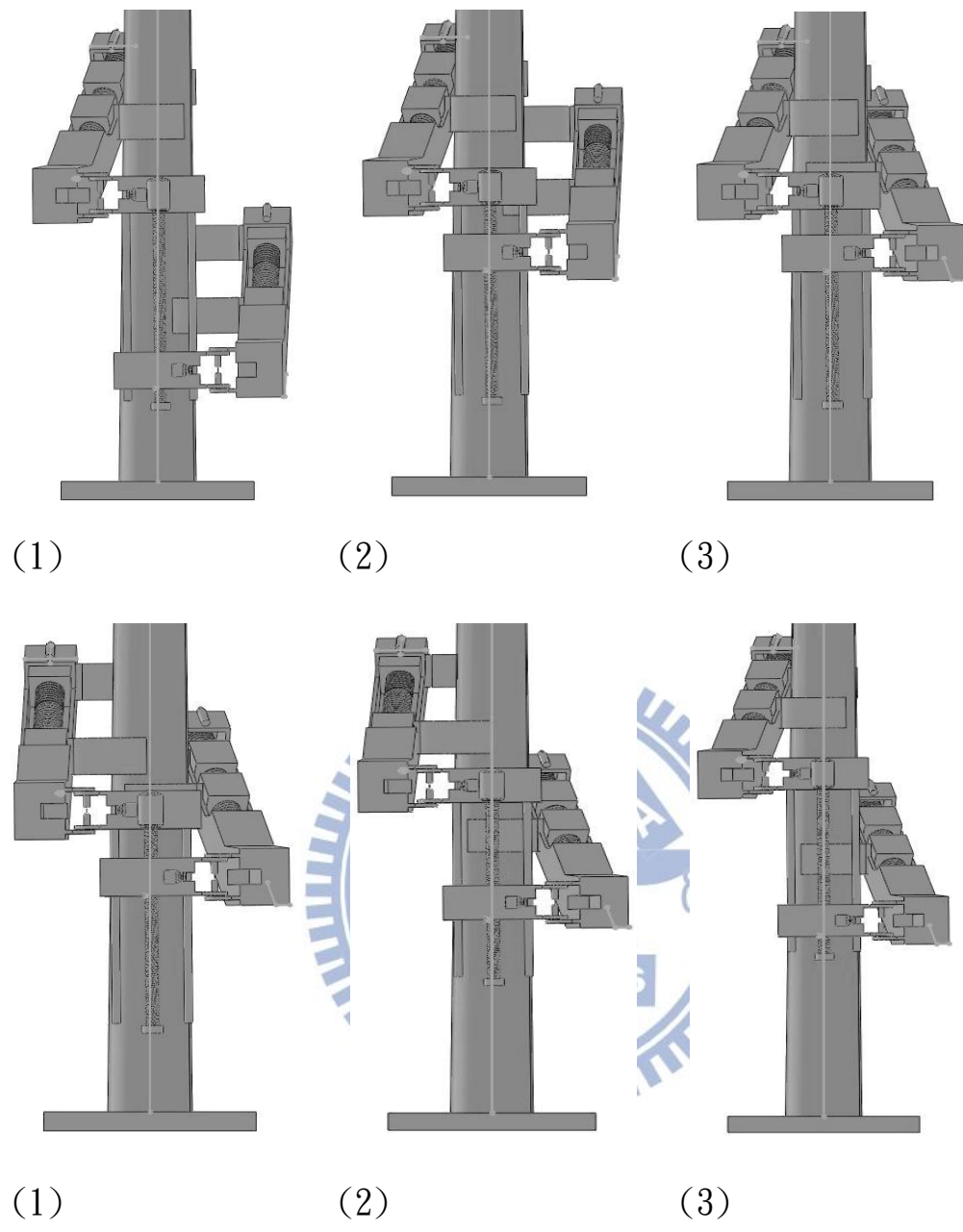


圖3.7 爬桿機構六個動作分解

圖3.7(1)原本兩隻手臂上的手爪是抓緊桿柱，靠著右手臂上的小馬達旋轉使得兩隻手爪張開，之後下機體手臂馬達旋轉將右手臂順時針(由上視觀察)轉開。

圖3.7(2)上機體主要螺桿的馬達旋轉使得整個下機體因為螺桿與螺母的作用上升。

圖3.7(3)下機體手臂馬達旋轉將右手臂逆時針(由上視觀察)轉回，靠著右手臂上的小馬達旋轉使得兩隻手爪靠近桿柱夾緊

圖3.7(4)靠著左手臂上的小馬達旋轉使得兩隻手爪移開桿柱，之後上機體手臂馬達旋轉將右手臂逆時針(由上視觀察)轉開。

圖3.7(5)上機體主要螺桿的馬達旋轉使得整個上機體因為螺桿與螺母的作用上升。

圖3.7(6)上機體手臂馬達旋轉將左手臂順時針(由上視觀察)轉回，靠著左手臂上的小馬達旋轉使得兩隻手爪靠近桿柱夾緊

3.5.3 攀爬機器人手爪類型探討

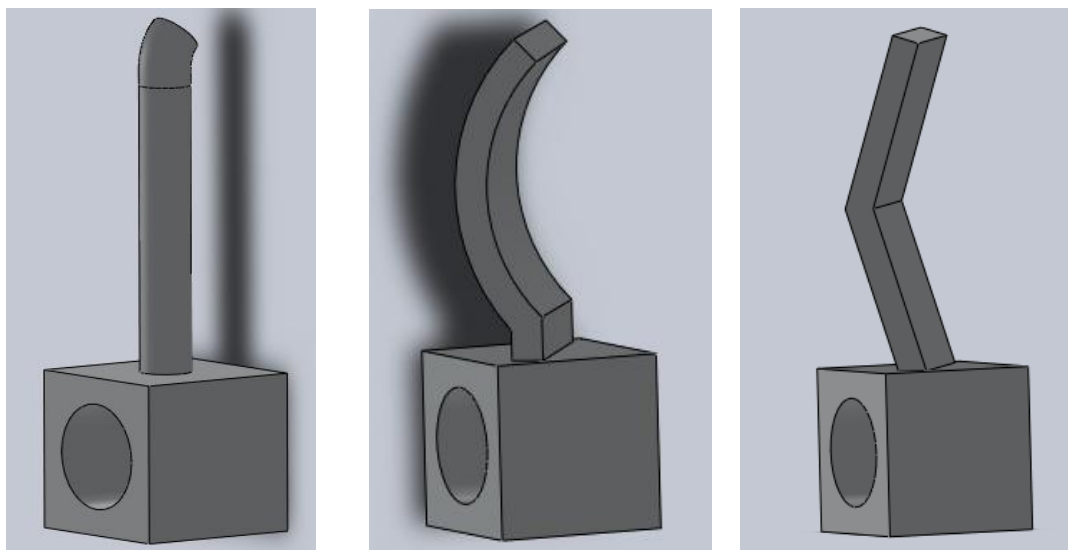
本研究選用的爬桿機構主要是運用手爪夾取後，因為偏心產生更大的摩擦力，而使機構可以維持平衡，因此先從手爪來探討是否有無改良的可能性，如圖3.8所示款式一為原機構所設計的手爪，款式二、款式三兩型則為本研究設計後加入的兩種手爪，針對這三種手爪來模擬測試。

(1)圖3.8款式一為原文獻內機構所採用的手爪，當手爪組裝上機械手臂後，運用兩個手爪與手臂有三點共面的接觸來攀爬，原機構主要用於等徑圓柱或者是正多邊形圓柱，尚未運用於非等徑圓柱上。

(2)圖3.8款式二為考慮到本論文欲攀爬桿柱為非等徑圓柱，設計出的圓弧手爪，主要為了使手爪在夾取時有更大的接觸面，而其圓弧的半徑必須要大於要攀爬桿柱的最大半徑，否則無法執行夾取這個動作。

(3)圖3.8款式三為後續設計出的新構想為一夾角形手爪，為兩面夾著一個角度，讓一對手爪夾取時有四個地方與桿柱接觸，除了增加其摩擦力還希望可以達到更加固定位置的功能。

接下來研究將在三種不同類型手爪之間來做穩定性比較，而所謂的穩定性測試本研究在後面一節將會說明，最後再使用最佳的種類，來找出整個機構的最佳參數。



(a)款式一:原設計 (b)款式二:圓弧形 (c)款式三:夾角型

圖3.8 三種夾爪示意圖

首先把欲攀爬的非等徑柱體由solidworks建模之後，並且分成四個區段來探討如圖3.9所示，規劃考量有兩點1.此桿柱為非等徑圓柱體，在不同的高度有不同的半徑，為分別比較在區段一、區段二、區段三、區段四等不同區段變化範圍對手爪抓持穩定性的影響，2.分別評估爬桿機構在四種高度區段上的穩定度狀況後，在考慮完整單一區段的攀爬狀況模擬分析。以方便釐清半徑與連續動作等參數對攀爬穩定性的影響。

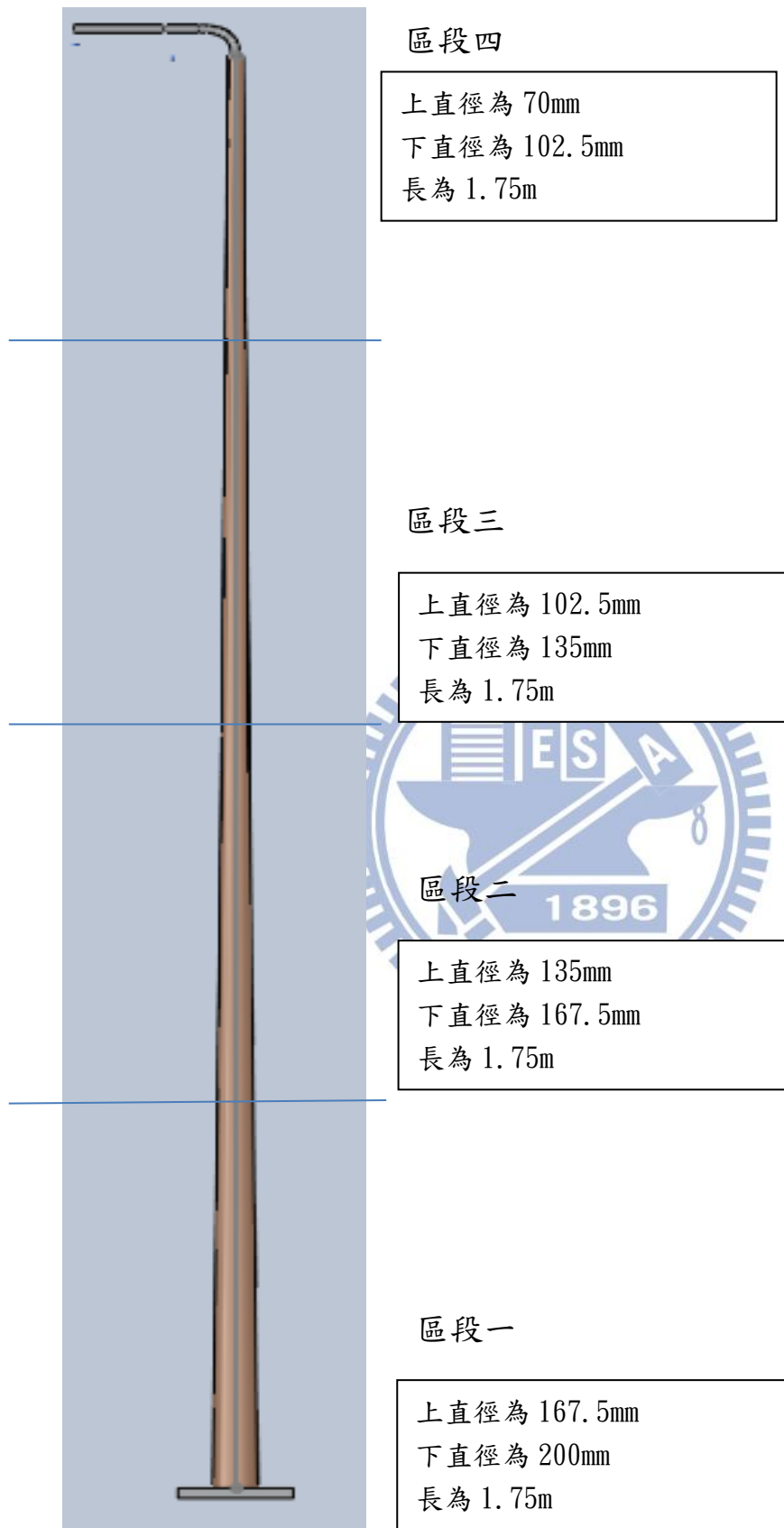
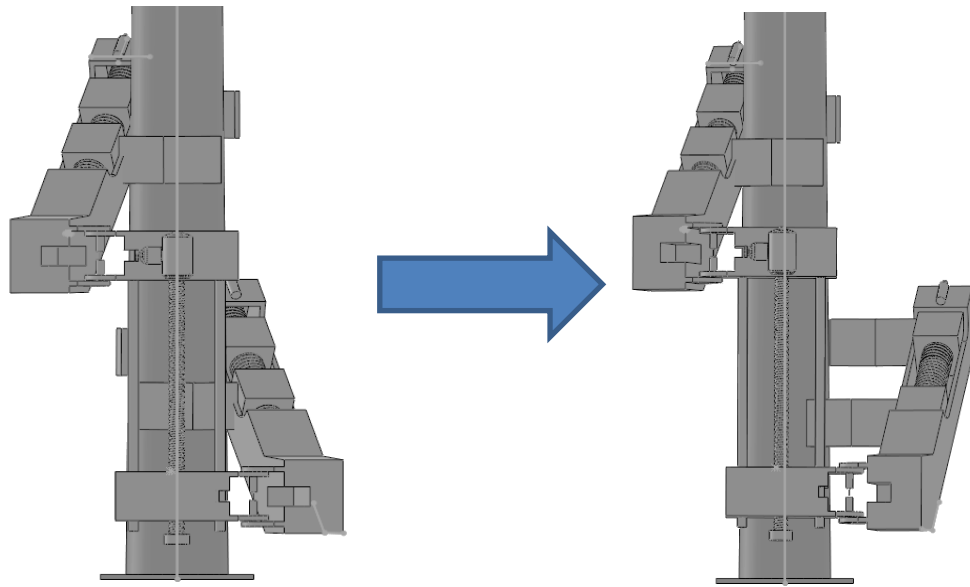


圖3.9 桿柱分成四區段示意圖

3.5.4 模擬步驟規劃

本研究所探討的穩定性，主要是針對在攀爬時機構是否會有傾斜以及滑動程度為評估目標，例：原先考慮的基準有整個機構本體的傾斜角度、Z軸總攀爬距離、產生類似鐘擺效應的X軸震盪偏移量等。由於機構本體傾斜角度與基座的X軸鐘擺偏移量有關，因此本節的穩定性評估主要是以X軸鐘擺偏移量為觀測重點，並以垂直方向(Z軸)的攀爬距離為參考數據，用以確定是否有發生滑落的情形。

模擬首先將三種爪子分別安裝至攀爬機構上並且設定其重量187KG、載重材料為鋼材、手臂旋轉速度3rpm，手爪移動距離均為相同，而測試方法為整個攀爬機構在一個步態過程中觀測，整個機構沿著X軸產生偏移的狀況並加以分析，而根據偏移距離的變化值得分析標準來判斷其整體穩定性，起始狀態為雙手臂都抓住桿柱如圖3.10a所示，右手臂手爪放開後，手臂旋轉開如圖3.10b所示，本模擬將X軸偏擺的觀測點Q設置在主螺旋桿的最下方如圖3.11所示，由此點當作原點來觀察，當手不鬆開，旋轉至抬昇準備位置後15秒時量測相對於X軸以及Z軸的位移，藉此看出整個機構的穩定狀況，以了解三種不同的手爪在欲攀爬桿子四個部分其穩定性如何，藉此選擇最適合的手爪。



(a)

(b)

圖3.10 穩定性測試流程圖(a)機構初始位置(b)手臂鬆開後至15秒時之位置

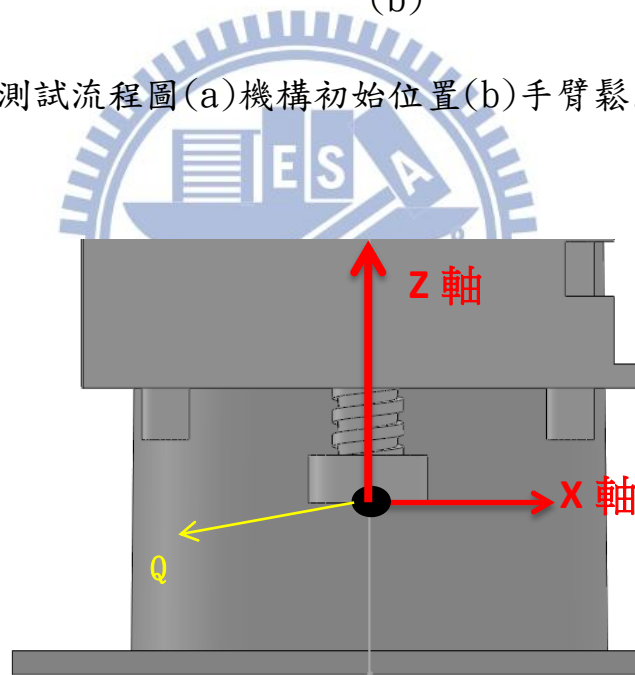


圖3.11 攀爬機構基準點示意圖

本模擬採用 Q 點為參考點是考慮到手爪擺動過程相對於機器人本體而言，Q 點不會變動，量測位置明確，會比觀測質量的數據來得易於分辨，也更好觀察差異。但是除了觀測 X 軸方向偏移，還需同時注意 Z 軸是否有較大變化。

3.5.5 三種手爪分別於桿柱四個區段測試

首先從圖3.9a圖3.9b所示於區段一桿柱進行三種手爪圖個別的測試，測試結果如圖3.12所示，這張圖主要在說明三種不同手爪經過夾緊，鬆開後固定，直到15秒時間結束，可以看出款式一手爪並無法保持穩定夾持與平衡，經過1~2秒後手爪即因左右震盪而滑落，手爪款式二的夾角型以及款式三圓弧形，其X軸偏擺曲線則呈現較為平穩，款式三圓弧形手爪的高低震盪值又略大於夾角型。

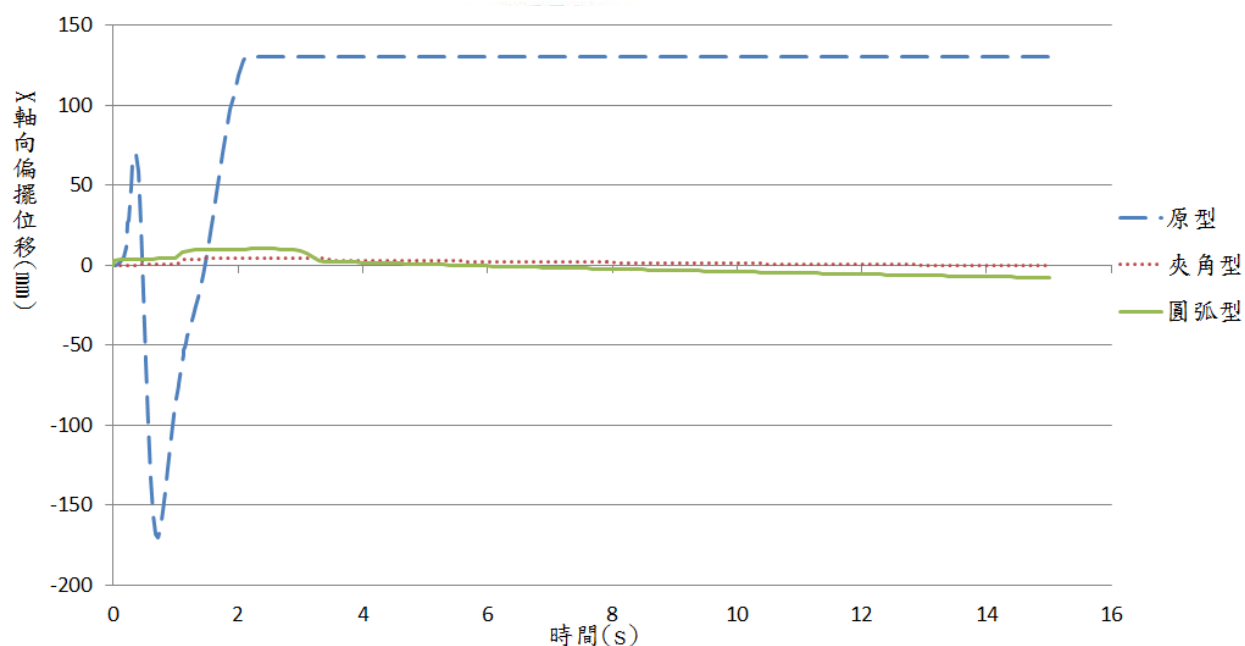


圖3.12 三種手爪於桿柱區段一的X軸向偏擺位移量曲線圖

圖3.13所示這是圖3.9區段二部分三種手爪的曲線圖，很明顯的原設計(款式一)手爪依然無法完成攀爬動作，而款式二圓弧形手爪因為桿柱半徑變小，偏移在三秒過後有逐漸增大的趨勢，而款式三夾角型手爪依然維持的較為穩定而少量的曲線。

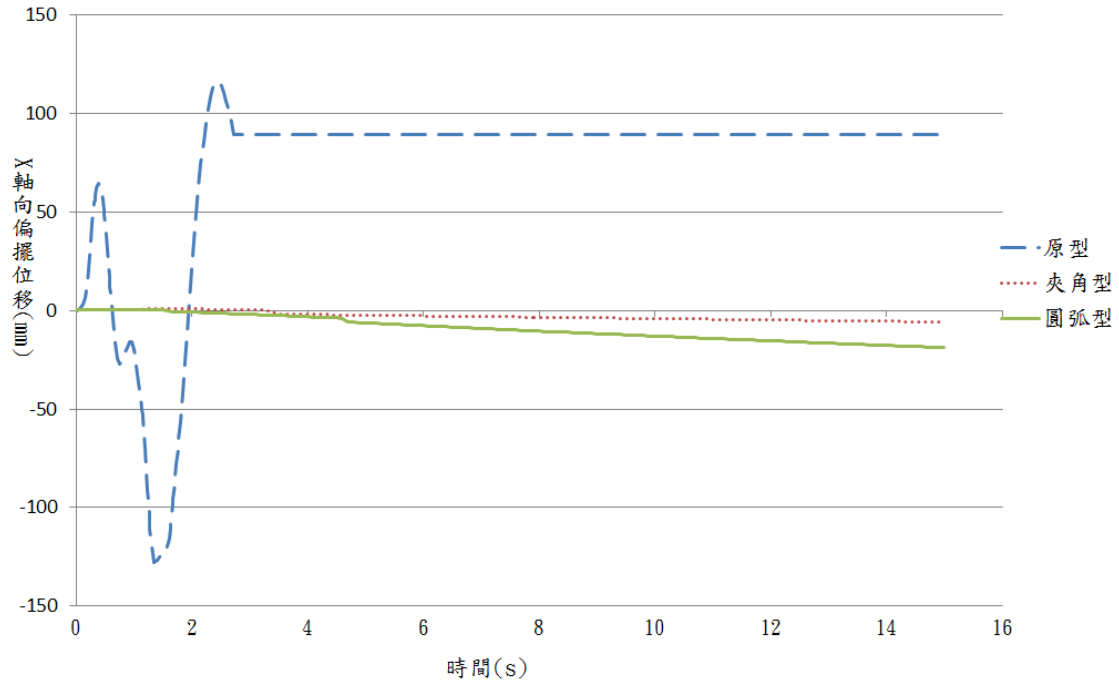


圖 3.13 三種手爪於桿柱區段二部分的 X 軸向偏擺位移量曲線圖

圖 3.14 所示為三種手爪攀爬區段三桿柱的曲線圖，因為經過模擬結果，原本形狀的手爪在桿的四個區段均無法攀爬，所以桿柱區段區段三、區段四的模擬結果曲線圖只針對款式三夾角型以及款式二圓弧型進行討論。圓弧型手爪在手爪開閤及手臂旋轉期間雖無較大偏移，但動作結束以後似乎無法穩定，偏移越來越明顯到模擬結束已經有接近 14mm 的偏移量了，夾角型在三秒之前經過手爪開閤以及手臂旋轉除了有較快速度回復原位置的小震盪外，之後呈現較圓弧型為穩定的曲線。

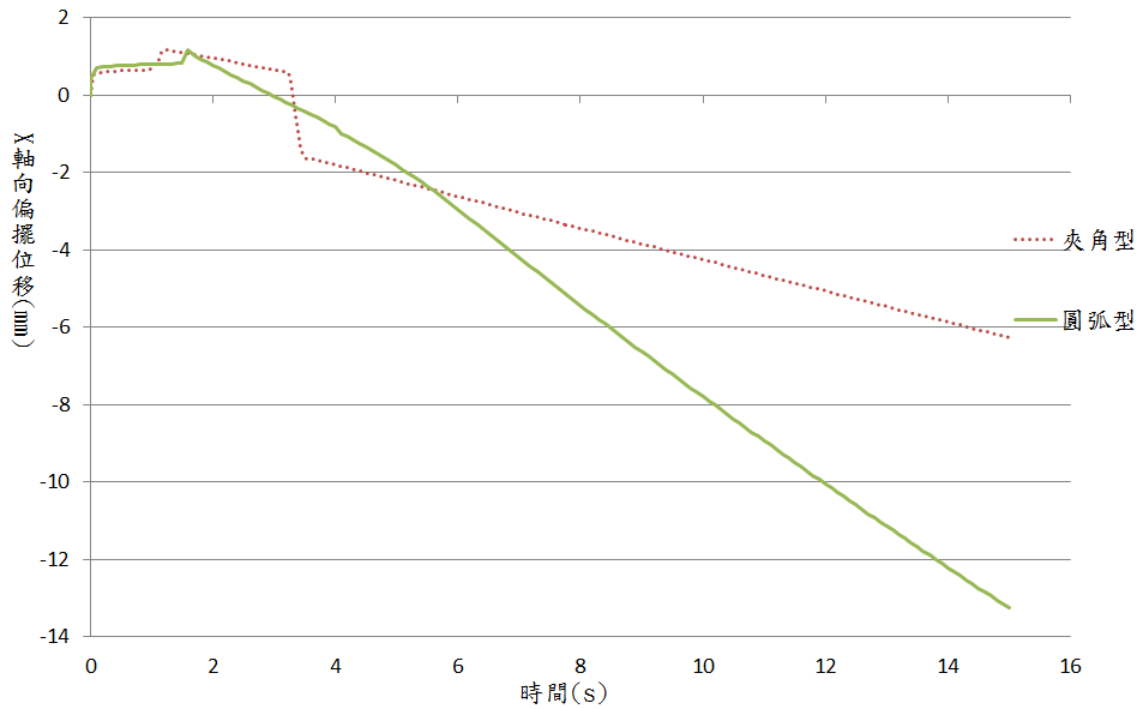


圖 3.14 三種手爪於桿柱區段三的 X 軸偏擺位移量曲線圖

圖 3.15 所示為三種手爪攀爬桿柱區段四部分，到了整根桿柱半徑最小的部分，款式三夾角型的偏移量的幅度和前三區段的模擬結果相去不遠約在 7mm 附近；但是款式二圓弧型因為手爪與桿柱接觸面積大幅減少，圓柱與手爪之間幾乎呈點接觸，變得非常不穩定，偏移量在 15 秒時已漸增加趨近 20mm。

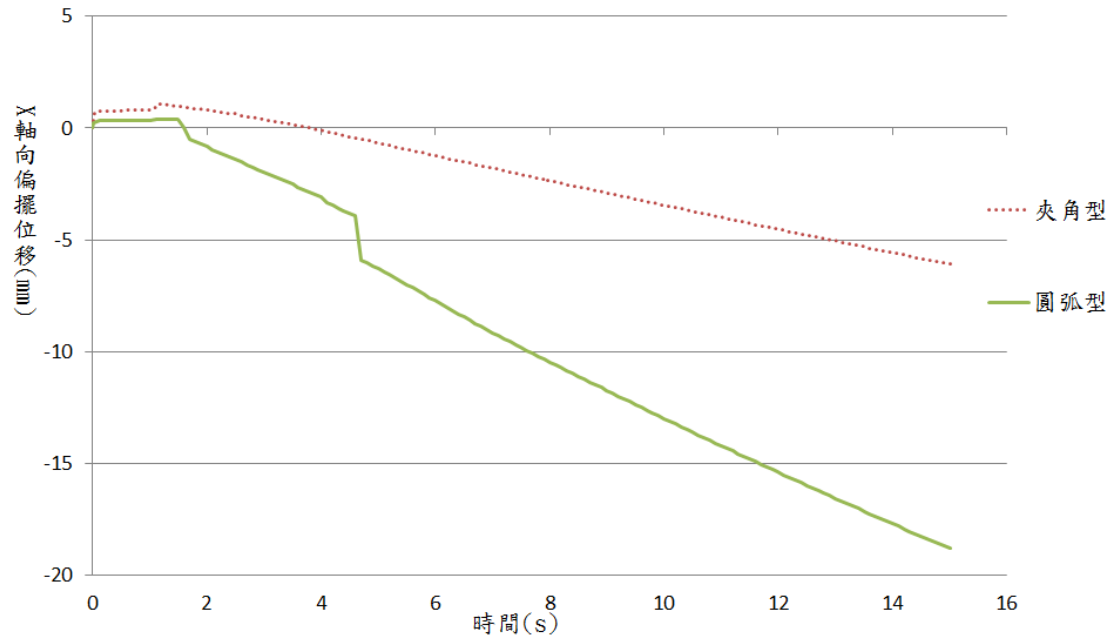


圖 3.15 三種手爪於桿柱區段四的 X 軸偏擺位移量曲線圖

以下表格 3.9 所示為將桿柱四個部分和三種手爪分別於四部份模擬數據做整理，表格數據為各種手爪於相同動作結束後末位置。從這個表格可以看出，款式二圓弧型在桿柱較底層半徑較大時，偏移量與款式三夾角型相去不遠，但是越往上桿柱半徑越小，款式二圓弧型手爪接觸面積越小，穩定性也越來越差，反觀款式二夾角型則在四個部分雖有微小偏移，而相較之下較為穩定。

表 3.9 三種手爪於桿柱四個區段動作結束後 Q 點的 X 軸向偏擺末位置整理表

手爪 \ 攀爬區段	參考點 Q 的 X 軸向偏擺最大位移量			
	區段一 (φ 200mm~167.5mm)	區段二 (φ 167.5mm~135mm)	區段三 (φ 135mm~102.5mm)	區段四 (φ 102.5mm~70mm)
一、原設計	不能攀爬	不能攀爬	不能攀爬	不能攀爬
二、圓弧型	-7mm	-11mm	-13mm	-20mm
三、夾角型	-7mm	-3.5mm	-6mm	-6mm

Z 軸攀爬位移量曲線比較統整於表 3.9 所示，表 3.10 為三種不一樣的手爪分別在桿柱四個區段位置攀爬穩定性測試的 Z 軸向爬升為移量的測試；數據為 Z 軸方向的初始位置與末位置差，正值為機構順時針偏移而造成基準點上揚所造成，而負值則代表有滑落情形發生，圓弧型手爪區段一時參考點 Q 的 X 軸向偏移量與夾角型的量測結果幾乎相同，但隨著桿柱半徑慢慢變小，在區段二~四等三個桿柱高度區開始有滑落的情況，而夾角型則呈現較為穩定爬升的情形。

表 3.10 三種手爪於桿柱四個區段於 3.5.4 節模擬的動作結束後參考 Q 點的 Z 軸向末位移量比較表

手爪 \ 攀爬區段	參考點 Q 相對於起始位置 Z 軸向的位移量			
	區段一 ($\phi 200\text{mm}\sim 167.5\text{mm}$)	區段二 ($\phi 167.5\text{mm}\sim 135\text{mm}$)	區段三 ($\phi 135\text{mm}\sim 102.5\text{mm}$)	區段四 ($\phi 102.5\text{mm}\sim 70\text{mm}$)
一、原設計	不能攀爬	不能攀爬	不能攀爬	不能攀爬
二、圓弧型	4.12mm	-3.3mm	-4.183mm	-5.988mm
三、夾角型	4.389mm	4.057mm	4.655mm	4.425mm

3.6 觀察與比較

從 3.5.4 節模擬的模擬結果可觀察出如果把原設計的直桿型手爪運用在本研究範例的非等徑圓柱上，結果顯示是無法攀爬的；手爪款式二與三分別為圓弧型與夾角型為本研究提出的改良型的手爪。經過改良設計以及模擬測試後，發現在相同條件下其穩定性比原機構穩定許多。而針對兩種新型的手爪攀爬機器人比較下，圓弧型手爪在半徑較大的區段一時，因為其接觸面積大，可能具有跟夾角型相同的穩定性，但當桿柱直徑慢慢變小，他的接觸面積也會跟著縮小，模擬顯示越來越不穩定，所以本研究後續評估則採用較為穩定的夾角型手爪作為基本手爪的選擇。論文接著第四章模擬與結果的

章節內容則主要針對以夾角型手爪為基本組件的攀爬機構進行模擬分析，深入探討夾角手爪角度、手爪摩擦係數、整個攀爬機構載重、載重物位置等進行模擬與分析，並且找出最佳參數。



第四章模擬與結果

本章主要針對配裝的攀爬機器人的夾角型手爪各項影響攀爬穩定性的參數規劃進行模擬分析，同時探討夾角型手爪所夾角度對穩定性而言的最佳值設計方法，接著探討對整體機構攀爬穩定性、速度產生影響的參數種類與數值，如摩擦係數、載重大小、載重擺放位置等參數的影響。最後運用田口方法定義各種參數的項數與數值分布值 Level，來定義所規劃模擬的控制因子水準配置表與直交表，並且找出一組最優化的參數來與其他九組比較，並由預測 S/N 比值選擇驗證各組模擬結果的效果。

4.1 夾角型手爪夾角最佳值深入探討

為了探討本論文所設計的夾角手爪，本研究所歸化測試的手爪其夾角請參考圖 4.1 所示，爪部指端段長度各為為 104.85mm，指端長度的決定是採用可容納攀爬桿柱最大直徑 200mm 並且暫定角度為 145，究竟其最佳的手爪角度為多少，本節將進行模擬與分析。此模擬一樣以本研究欲攀爬的桿柱的底部半徑為目標，經過式 13 要攀爬本研究設定桿柱兩邊所夾之角度越小，如果手爪出力相同，那麼正向力會越大，相對摩擦力也會越大，穩定性更高，但是所夾之夾角度數過小，則夾爪在桿柱最底部時，則無法容納整個桿柱半徑，因

此算出式 4 要可容納底部最小的角度圖 4.1 所示 θ 最少必須大於 87.28° 。

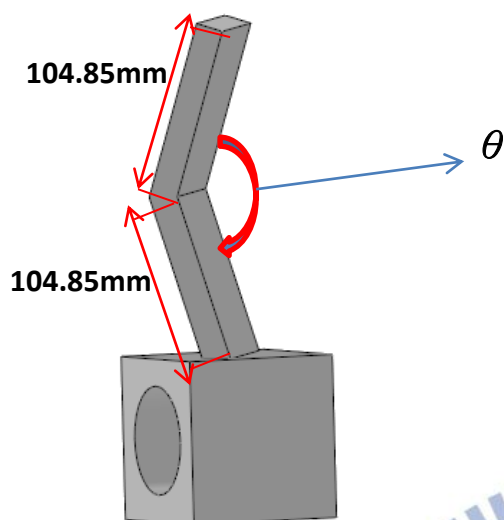


圖 4.1 手爪邊長以及角度示意圖

首先設定手爪夾角的起始度數為 88° ，並且將 $88^\circ \sim 180^\circ$ 分成五組，每組度數相差 23° ，進行穩定性模擬，針對此五組夾角度數分別應用於桿柱四區段進行攀爬穩定性模擬，模擬方法與 3.5.4 相同，為整個攀爬機構在手臂以 3rpm 回轉 15 秒的步態過程中，觀測攀爬機構的參考點 Q 是否會產生 X 軸向偏擺位移，而根據最大偏移量與曲線分布來歸納判斷其整體穩定性。

4.1.1 五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段一的穩定性分析模擬

首先來觀察五種不同夾角度數的手爪在圖 3.9 區段一桿柱的穩定性模擬的 X 軸向偏移圖如圖 4.2 所示，桿柱區段一為整根桿柱平均半徑最大的部分，其中 88°、111°、134° 的 X 軸向偏移分析結果相差不遠，而 157° 手爪在 4 秒過後開始有較大的傾斜，180° 手爪則在右手臂上的手爪鬆開時即開始有較大的左右震盪。

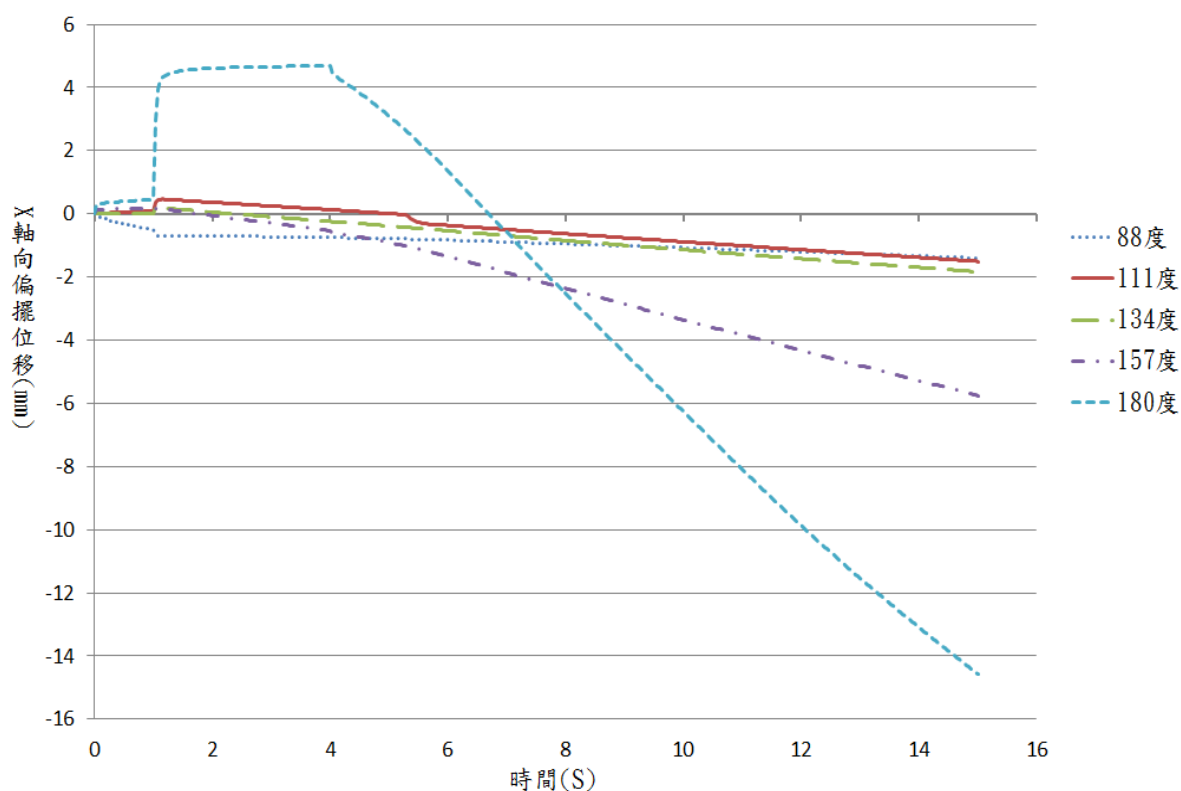


圖 4.2 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段一的穩定性分析時 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

4.1.2 五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段二的穩定性分析模擬

從圖 4.3 所示可以看出 111°、134°、157°於 X 軸向偏擺位移開始有變大的趨勢，而 88 度則與桿柱區段一時差不多，還是維持著微小的偏移量，180°雖然偏移量區段一相差不多，但是 X 軸向偏擺位移量與其他度數相比則明顯較大。

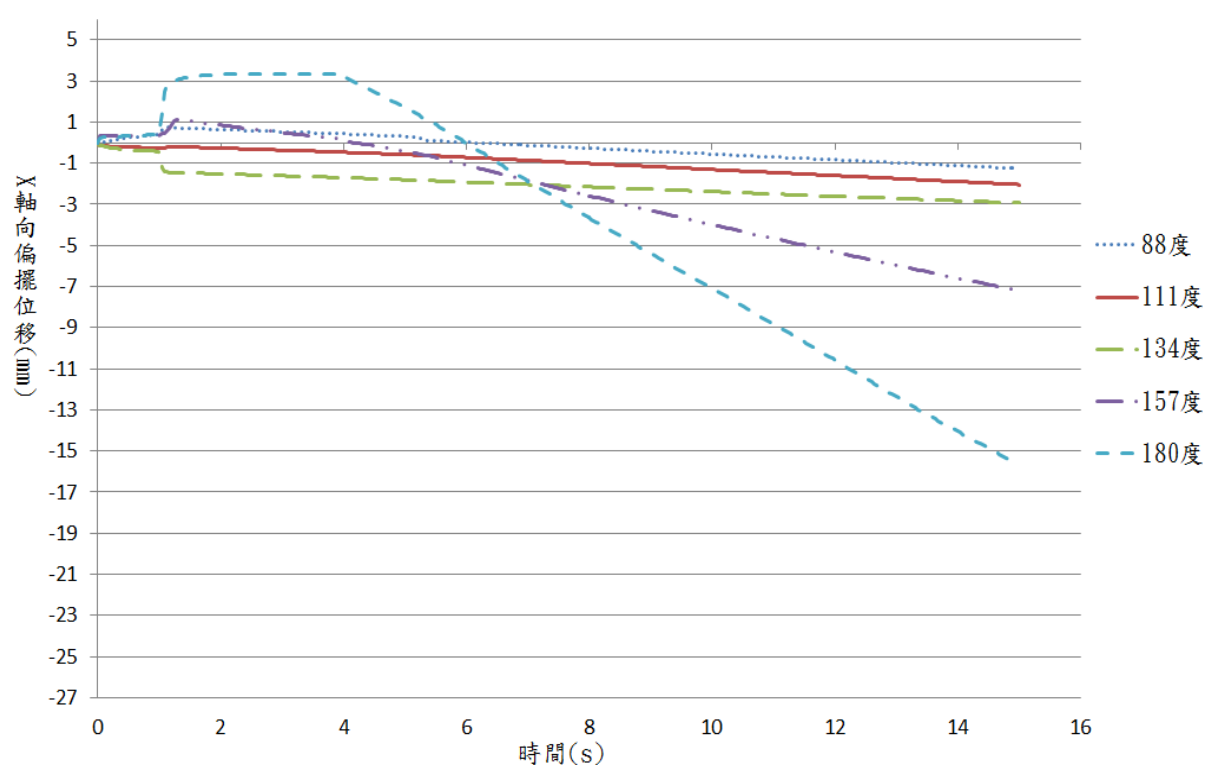


圖 4.3 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段二的穩定性分析時 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

4.1.3 五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段三的穩定性分析模擬

桿柱區段三 X 軸向偏擺位移較為明顯的改變是 180° 的手爪偏移量已經達到 27mm，遠遠比其他的偏移量多如圖 4.4 所示，而另外四組與區段二部分則無太大的改變。

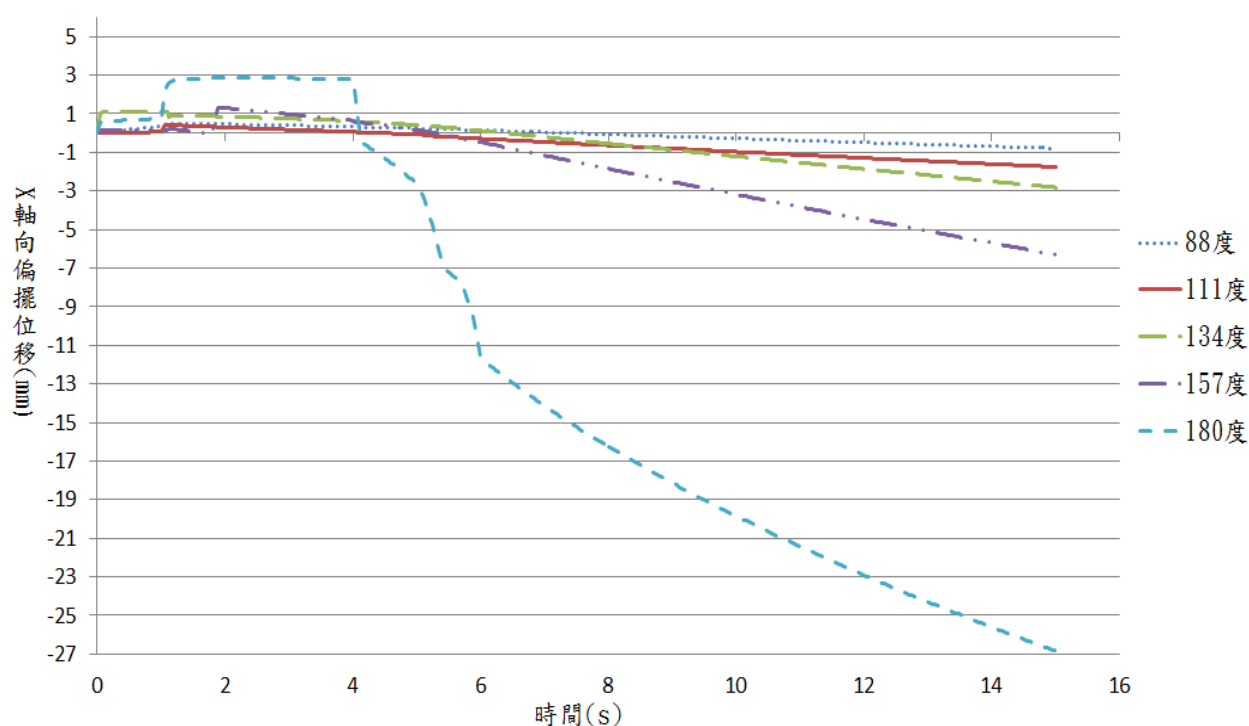


圖 4.4 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段三的穩定性分析時 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

4.1.4 五種夾爪角度的攀爬機構於桿柱區段四的穩定性分析模擬

桿柱區段四條件為上直徑為 70mm，下直徑為 102mm，長為 1.75m，其中為何 88° 與 111° 曲線消失了呢？因為在桿柱區段四 88° 與 111° 手爪都會發生干涉情形如圖 4.5 所示，同個手臂的兩手爪在

夾取的時候發生干涉，因為這種情況，所以本研究重新推導如章節 2.1.3 所推導出夾爪在本研究預設攀爬桿柱最小半徑的時候，得知手爪至少 138 度才不會發生干涉的情形，所以區段四剩下三個角度 134°、157°、180°如圖 4.6 所示，因為計算最小度數主要是針對整個桿柱最高處，而測試 134°時雖然是在桿柱區段四，但高度尚未到達最高點，因此還未發生干涉。除了 180°X 軸向偏擺位移持續增大外，另兩個則無太明顯改變。

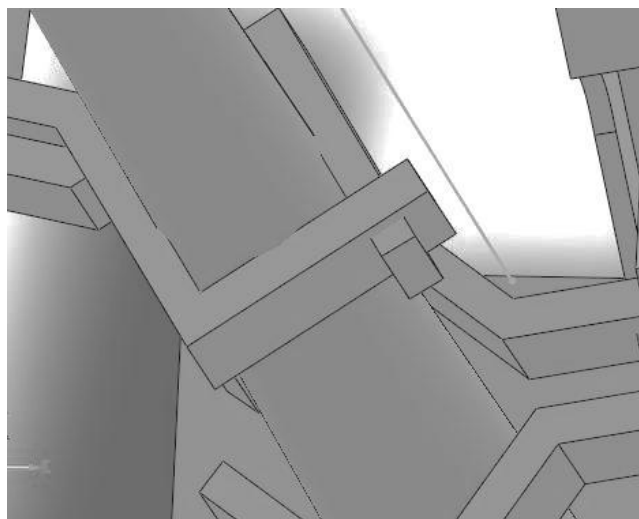


圖 4.5 同手臂兩手爪干涉情形示意圖

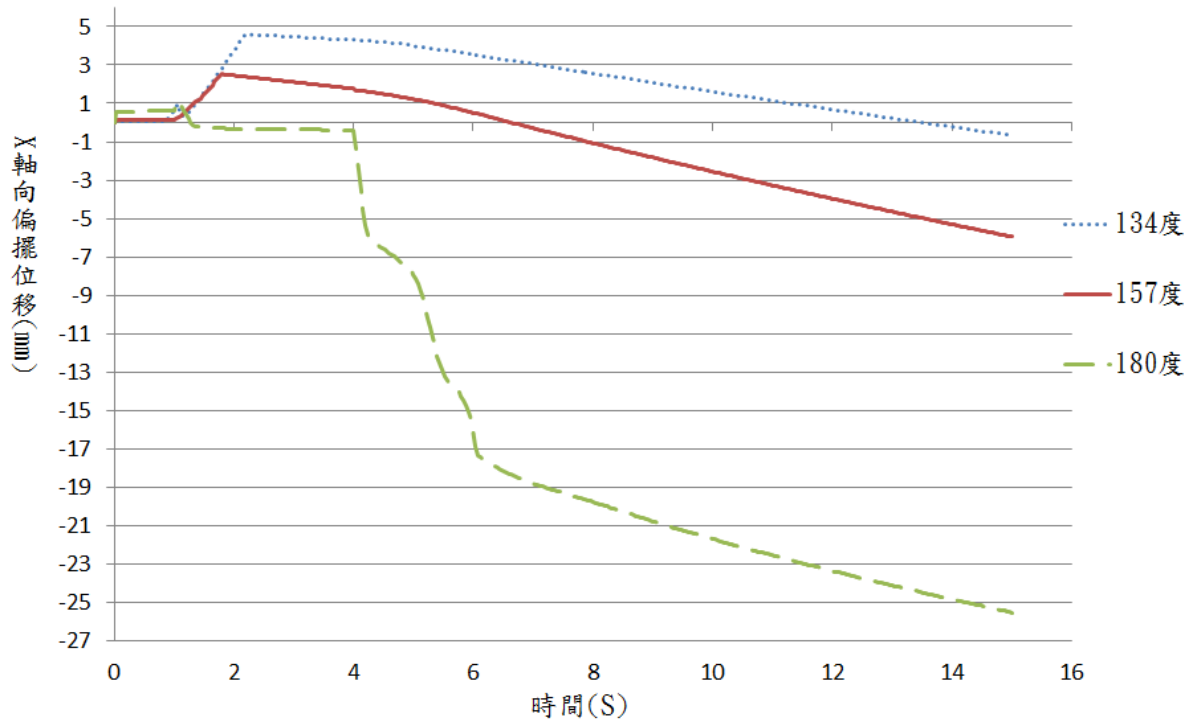


圖 4.6 五種夾爪角度的攀爬機構在桿柱區段四的穩定性分析時 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

4.4.5 歸納討論

依據幾何條件所推導出手爪夾角在最小半徑時不干涉的最小角度為 138° ，因此只增加一組夾角數據 138° 加入討論，歸納出的表格數據如表 4.1 所示，本節所採用的 X 軸平均位移是將各角度 X 軸直線位移曲線與位移為 0 時的軸線之間所夾面積取平均值即為 X 軸的平均偏移量。

表 4.1 六種夾角的手爪分別於桿柱四個區段進行所模擬分析的 X 軸平均偏移量

夾角度數 爬區段	參考點 Q 的 X 軸向偏擺位移植(mm)			
	區段一 (φ 200mm~167.5mm)	區段二 (φ 167.5mm~135mm)	區段三 (φ 135mm~102.5mm)	區段四 (φ 102.5mm~70mm)
88	0.8	0.4713	0.3094	產生干涉
111	0.64	0.979	0.6805	產生干涉
134	0.787	2.025	1.0988	2.15
138	1.254	2.541	1.9831	2.130
157	2.3025	2.734	2.2412	2.25
180	5.552	5.605	13.1496	14.34

從本章節所做的模擬可以得到，夾角角度跟偏移量有成正比的關係，也就是如果夾爪受到螺桿反作用力相同，那麼夾爪角度愈小的話，所受到的正向力是越大且機構是會較為穩定的，可以證明章節 2.1.4 推導是正確的，而 180° 相當於直桿，與其他有角度的手爪比較，發現有夾角是會更穩定的。另外一點就是某一特定夾角的手爪分別在桿柱四個不同區段的穩定性分析比較下，雖然有影響，可是差距不大。

4.2 載重位置深入探討

做這個項目的模擬，是希望了解載重的位置是否會影響到整個機構的平衡以及穩定性，就如同一個攀岩者，如果背包分別放在上中下三個位置，是不是會影響到他整個人的平衡或者施力大小，而此偏移量在一個動作下可能並不明顯，所以讓機構攀爬 5 個周期的標準步態如圖 3.7 所示，再來觀察整個 X 軸以及 Z 軸的變化，來推算哪個載重位置最佳。

4.2.1 載重位置穩定性測試說明

本節針對載重位置對攀爬穩定性的影響，模擬過程為，首先把總長為 640mm 的主螺桿區分成 10 個等分，有 11 個位置，每一個位置相距為 64mm，在位置上設置一個連接處如圖 4.7 所示，一個總重為 40kg 的方形物體連接圖 4.8，分別在 11 種不同的載重擺放位置如圖 4.9 所示，總共有 11 組分別進行攀爬 5 個標準步態的動態模擬，本研究所定義的一個標準步態代表圖 3.7 所示一個完整的週期。

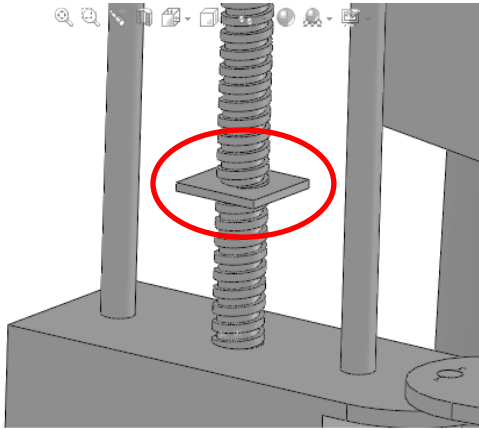


圖 4.7 機構載重位置示意圖

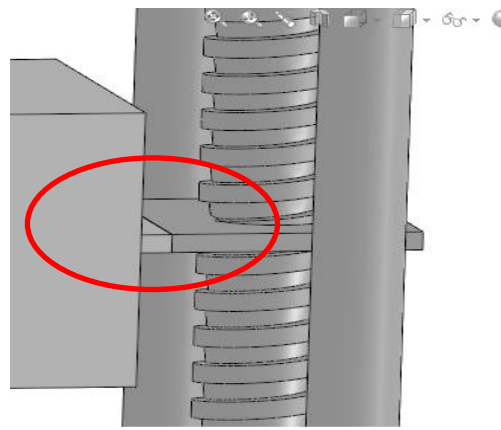


圖 4.8 機構載重結合圖

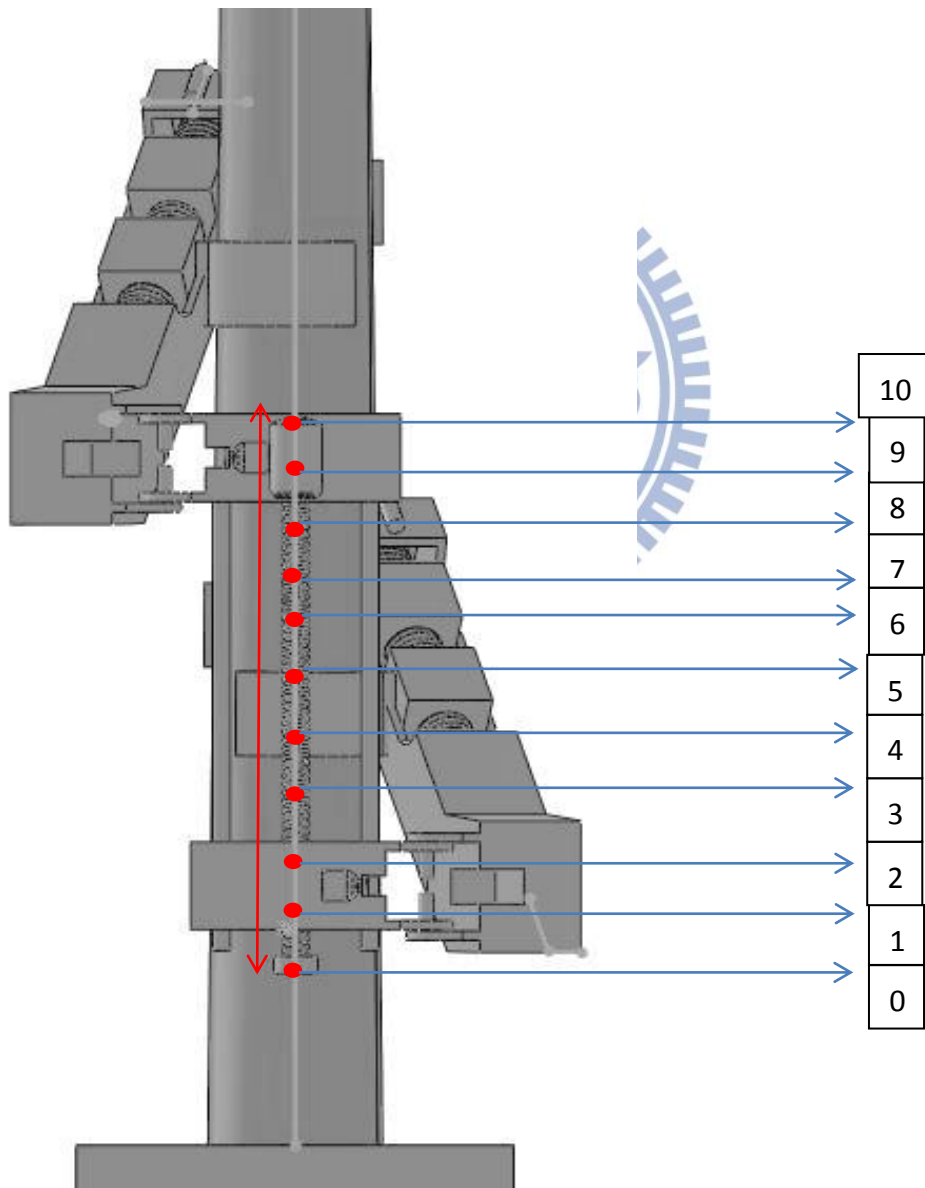


圖 4.9 攀爬機構 11 個載重位置示意圖

從圖 4.10 的曲線，此圖主要是 11 種不同擺放位置分別是 0 到 10，經過五個完整標準步態後的 X 軸偏擺量與時間的關係圖，可以約略看出來放置位子越接近機構底部，整體曲線是越接近 X 軸為 0 的軸線，但是以這張圖來判定好壞其實並不明顯，因此將曲線與 X 軸為 0 的軸線之間所夾的面積取絕對值平均如圖 4.10 所示，希望從中可以更明顯的看出趨勢。

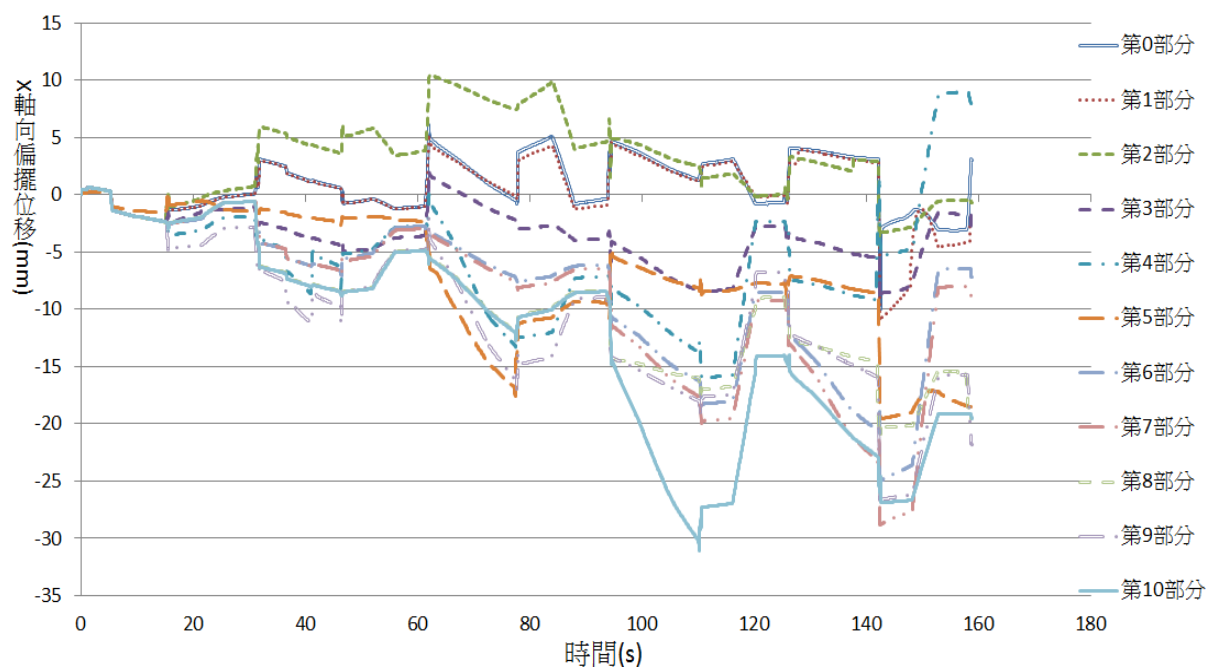


圖 4.10 11 個擺放位置在 5 個連續標準動態之內 X 軸位移量與時間關係圖

從整理過的表格 4.2 以及曲線圖 4.11 就可以很明顯的看出擺放位置對 X 軸平均偏擺位移量的趨勢了，發現在擺放位置越低的時侯參考點 Q 的偏移量其實是比较其他位置更少的，但是為什麼會產生這樣的情形呢？將在 4.3.1 節針對機構攀爬時較易發生傾斜的兩種情

形來做探討。

表 4.2 擺放位置與 X 軸平均偏擺量整理表格

擺放位置	X 軸平均偏擺量 (mm)
0	1.9839mm
1	2.18511mm
2	3.57975mm
3	3.65117mm
4	6.5282mm
5	7.050378mm
6	8.3858mm
7	9.1559mm
8	9.57406mm
9	10.70337mm
10	12.2403mm

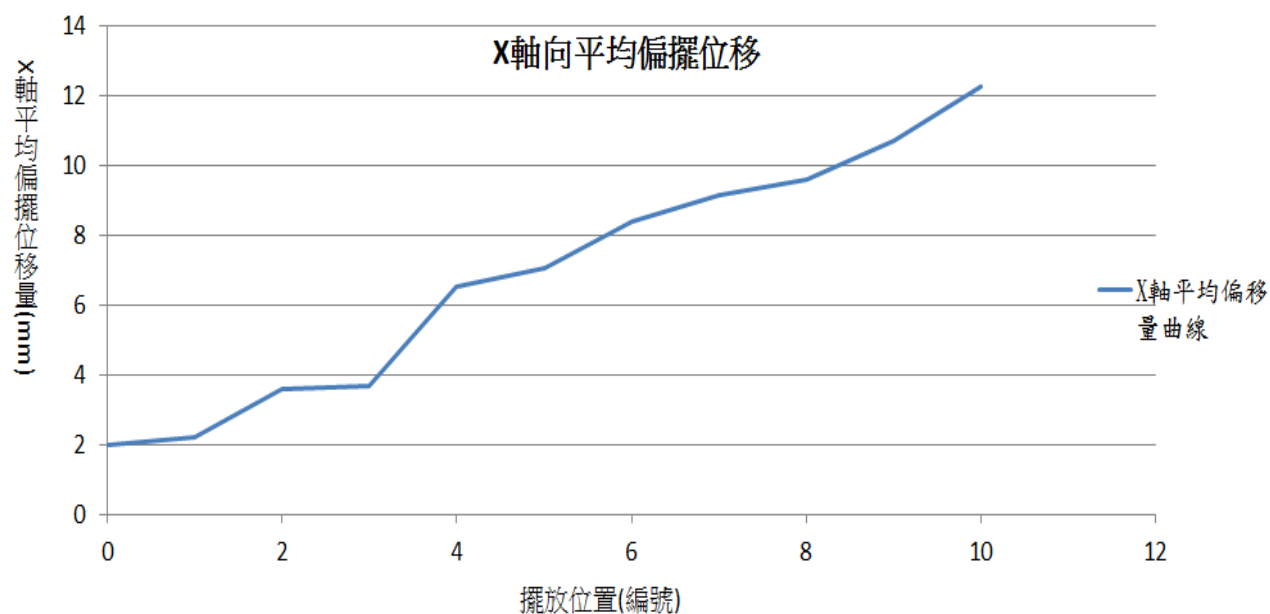


圖 4.11 擺放位置與 X 軸平均偏擺位移量

4.2.2 載重位置影響 X 軸向偏擺位移量探討

第一種情況為當右手臂手爪鬆開準備下一個動作時，因為整體重心的改變，整個機構會產生一個順時針的偏轉如圖 4.12 所示(此圖為誇大表示偏轉用以解釋此現象)，在這個時候本研究將載重位置分生三個部分為上、中、下三點如圖 4.12 所示紅點假設為三個載重的位置，而星號則表示手爪夾取桿柱的支撐點位置，將此部分另外移出討論。

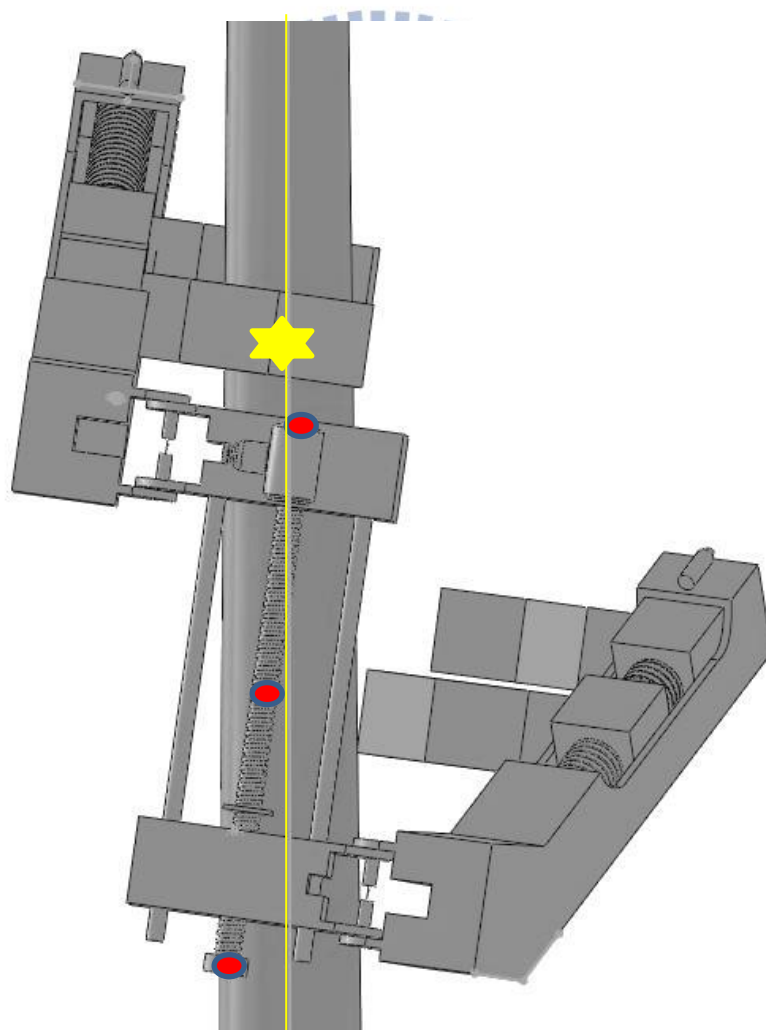


圖 4.12 攀爬機構載重位置與傾斜狀況示意圖 1

把支撐點以及載重位置移出後如圖 4.13(1)所示，其中 G 代表重心位置，星號(★)為支撐點位置，紅點(●)分別為三個擺放載重的位置，黑線表示中心線，紅線則分別表示三個載重位置與中心線的垂直線段，當攀爬機構產生 X 軸向偏擺時根據幾何條件線段 c 大於 a 或 b ，很明顯的假如把載重物放置於 C 時，對於支撐點產生的力矩大於 B 點所產生的力矩，而 A 點產生的力矩則與其他兩點不同方向，也就是當整個機構產生偏擺時，放置於 C 點的載重會較容易將整個機構修正回來，重新回到三點均在中心線上不對支撐點在 Y 軸產生力矩的狀況如圖.13(2)所示。

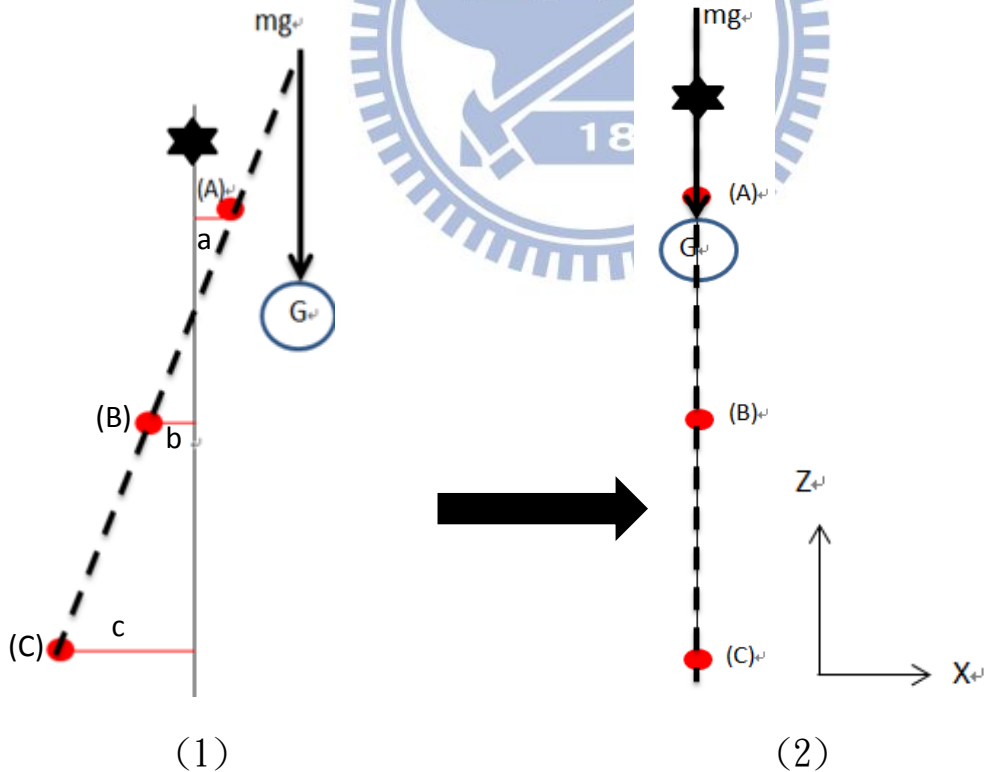


圖 4.13 攀爬機構三個載重位置與支撐點產生力矩示意圖 1

(1)偏擺位置(2)平衡位置

第二種情況為當左手臂手爪鬆開準備下一個動作時，因為整體重心的改變，整個機構會產生一個逆時針的偏轉如圖 4.14(此圖為誇大表示偏轉用以解釋此現象)，在這個時候將載重位置分生三個部分為上、中、下三點如圖 4.14 所示紅點假設為三個載重的位置，而星號則表示手爪夾取桿柱的支撐點位置，此部分另外移出討論。

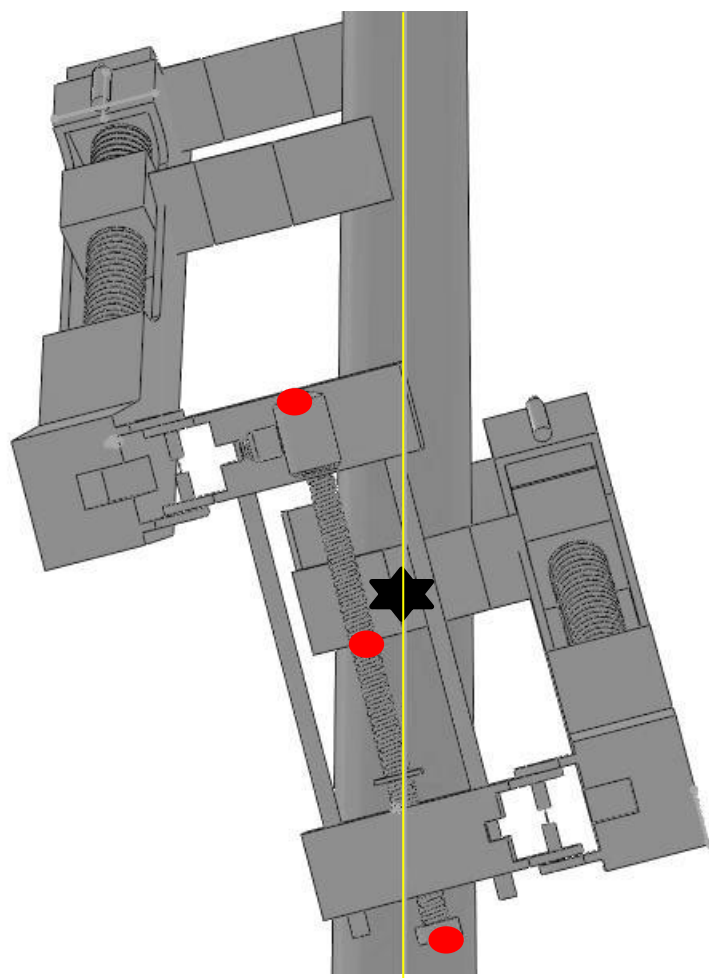


圖 4.14 攀爬機構載重位置與傾斜狀況示意圖 2

把支撐點以及載重位置移出後如圖 4.15(1)所示，此圖標示符號與圖 4.13 案例相同，載重物放在 C 處的話整體會產生順時針的旋

轉，但是相反的如果把物體放在 A、B 兩處的話則是產生逆時針旋轉，既使偏移情況沒有那麼嚴重 B 點在中線右邊，放置 B 處所產生的力矩也沒有 C 處來得大，此案例中 C 是擁有最大的力矩使整個機構回復到三點都不產生力矩的狀態如圖 4.15(2) 所示。

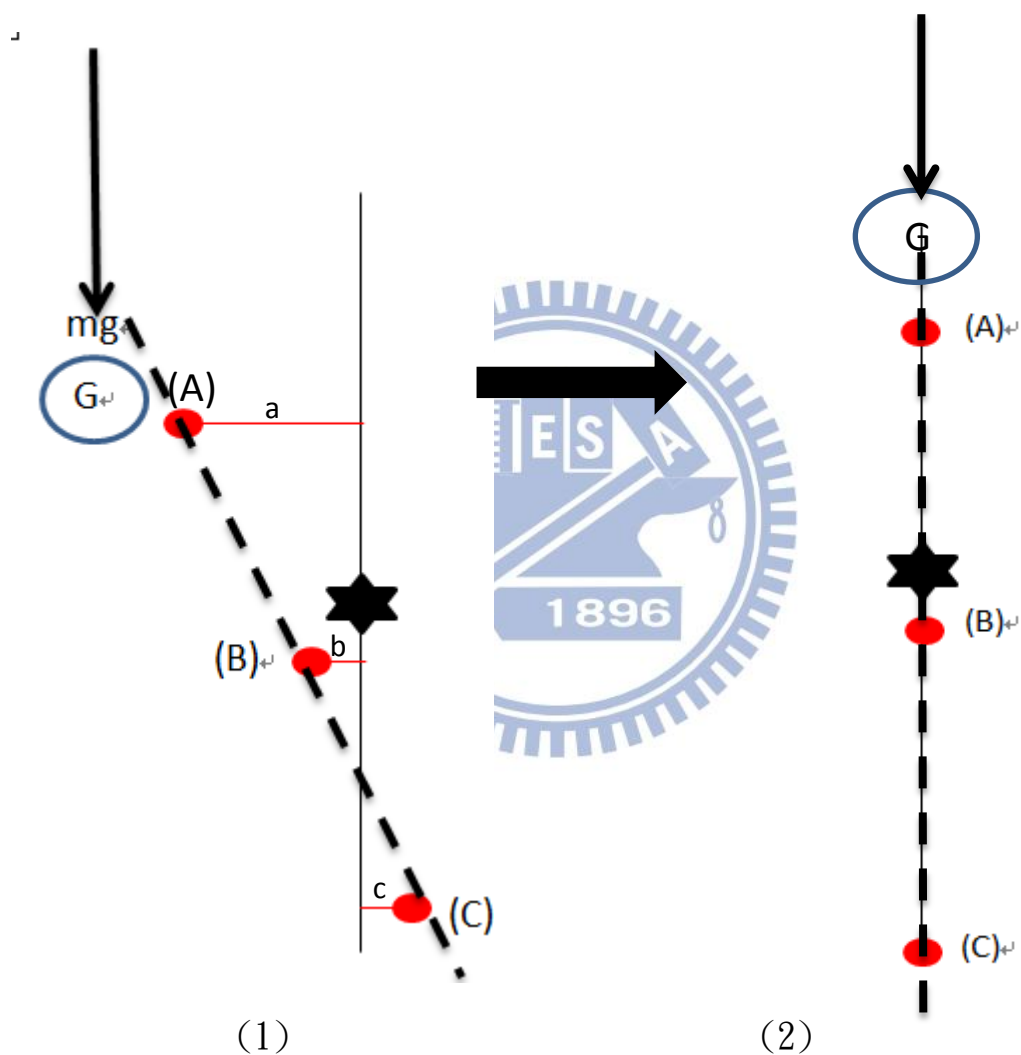


圖 4.15 攀爬機構三個載重位置與支撐點產生力矩示意圖 2

(1)偏擺位置(2)平衡位置

另外本研究也要觀察 Z 軸方向是不是有滑落的情形，但因為這個測試是屬於攀爬 5 個標準的步態，所以將從相同時間內總攀爬距

離來觀察是不是有明顯的滑落情形，因此本研究將 11 個擺放位置與其不同位置在相同時間內的 Z 軸攀爬總距離列出如表 4.3 所示再將表格繪製成曲線圖如圖 4.16 所示。

表 4.3 載重物擺放位置與其相同時間內 Z 軸總移動距離

擺放位置	Z 軸總移動距離(mm)
0	1656.871
1	1655.248
2	1654.221
3	1652.07
4	1649.856
5	1647.864
6	1647.78
7	1645.513
8	1643.572
9	1643.161
10	1640.128

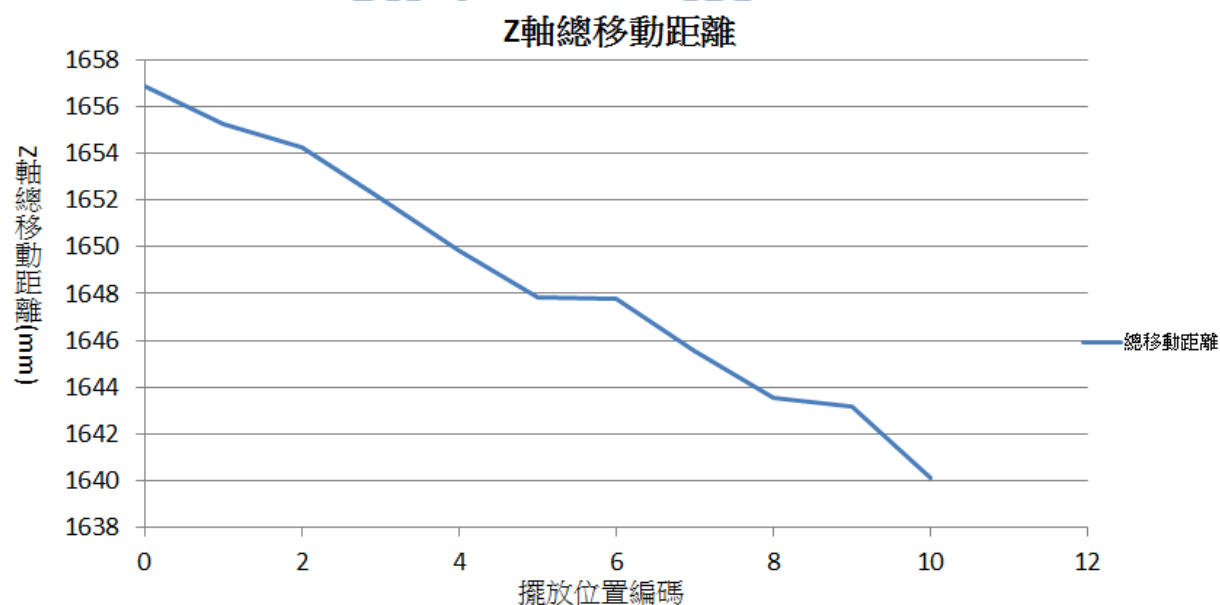


圖 4.16 相同時間內 11 個不同載重位置與 Z 軸攀爬總距離關係圖

從表 4.3 與圖 4.16 來看位置 0 是最佳的，也就是攀爬距離最長，10 則為最短。

4.2.3 歸納討論

經過模擬數據顯示以及本研究探討過後，發現載重位置在攀爬機構最下面的時候，對整個機構的平衡是較有幫助的，假使物體 X 軸向位移，載重位置會影響到產生多大的力矩來回復位移前的位置。

4.3 攀爬機構重量與材料深入探討

因為本研究整個機構主要是運用重心在桿柱外面而產生偏心的方法，此方法會讓手爪產生更大的正向力，有更大的摩擦力可以來平衡進而產生穩定，載重只要越大整個摩擦力也會更大，但是相對的重力會使得重量更重，因此本研究在這個地方希望探討載重輕到甚麼程度會使得整個運用偏心產生更大摩擦力的作用越來越不穩定，而載重到多大會使得手爪受力過大或者開始下滑。

4.3.1 改變重量測試說明

本研究規劃利用機構不同的材料來改變重量來探討重量對整體機構的穩定度影響，規劃機構材料以木材、壓克力、鋁合金、氧化鋁、鈦合金、鋼材，來測試當不同重量時穩定度的差異，以 4 個連續標準步態來觀察整個 X 軸偏移的變化。

經過模擬結果輸出各種材料於 X 軸向偏擺位移量與時間的數據後，繪製 X 軸向偏擺位移對時間的關係圖如圖 4.17 所示，從這張圖看出很明顯的差異，重量較輕的木材壓克力鋁合金，以及鈦合金、鋼材的機構，X 軸向偏擺位移量都比氧化鋁的機構要大。

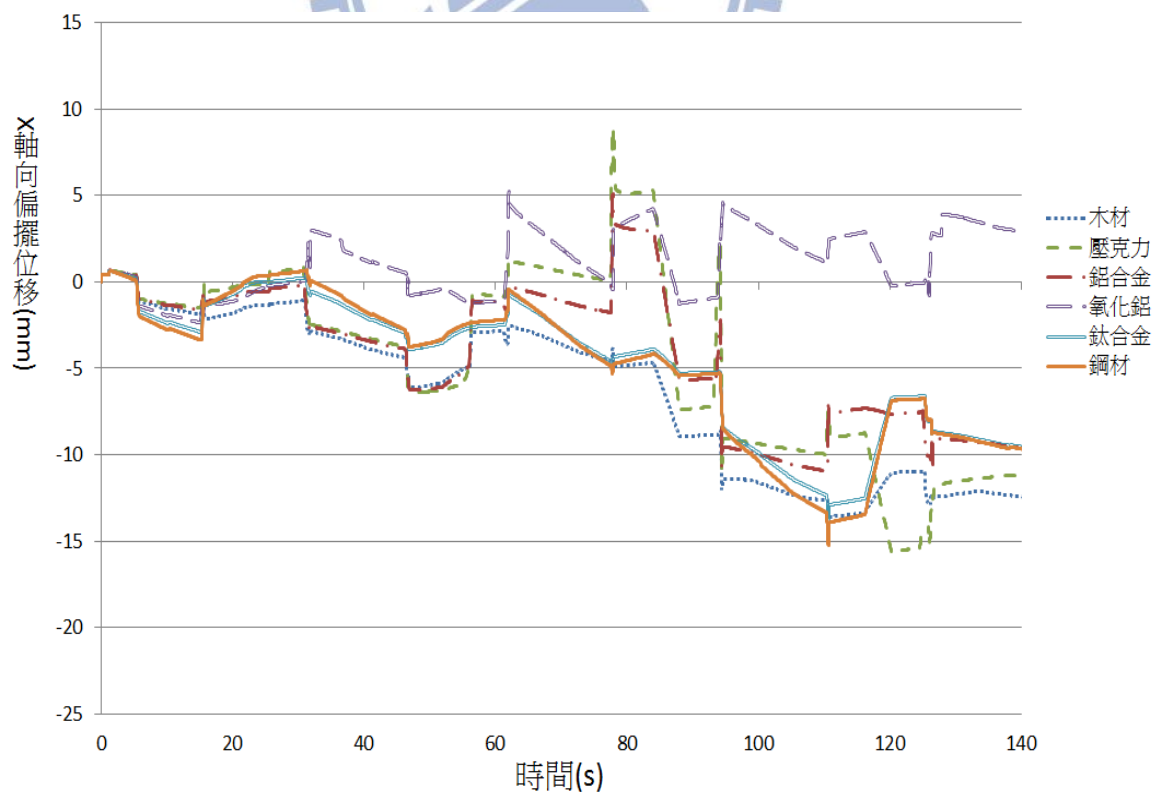


圖 4.17 六種不同材料之 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

表格 4.4 所示為該模擬案例的表格，將其繪製成圖 4.18 所示，可以很明顯的看出，X 軸向偏擺平均位移量最少的是氧化鋁，而鈦合金、鋼材，其偏移量則無較明顯的變化，反觀材料如果選要過輕的材料，穩定性反而沒有載重好。

表 4.4 六種材料載重與 X 軸向偏擺平均位移整理表

載重	X 軸向偏擺平均位移(mm)
木材(12KG)	7.172336
壓克力(29.8KG)	5.385071
鋁合金(68KG)	5.126809
氧化鋁(107KG)	2.185119
鈦合金(148KG)	4.870616
鋼材(187KG)	4.895034

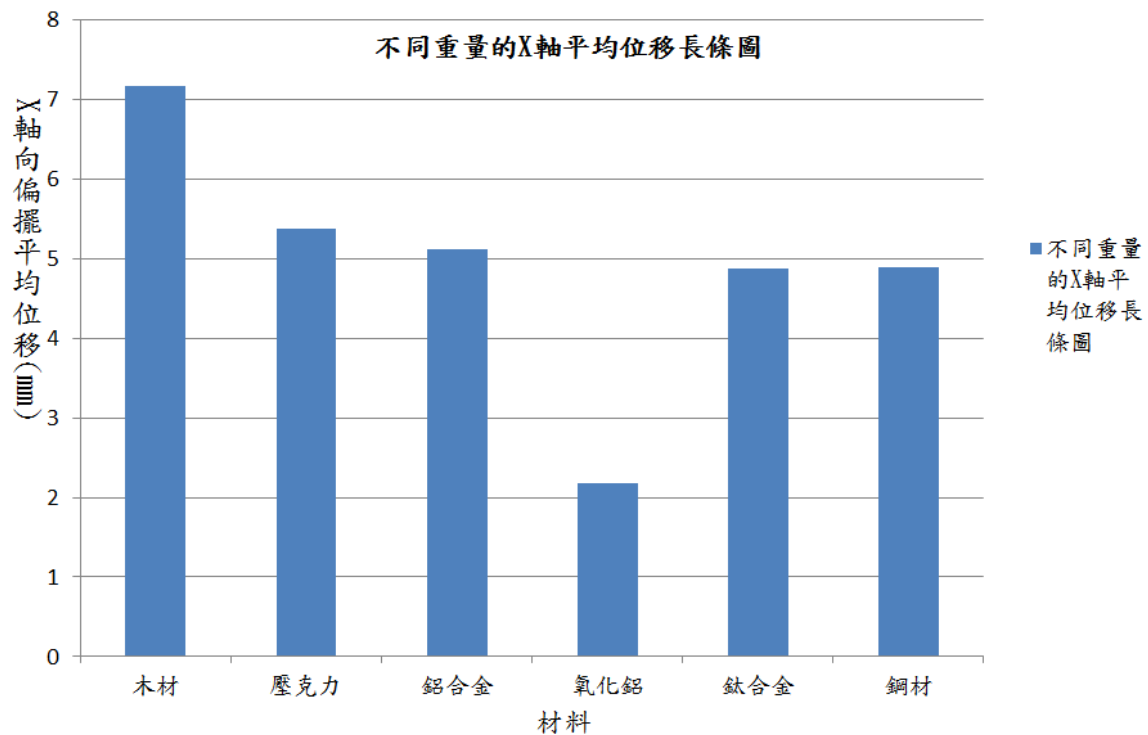


圖 4.18 不同重量的材料與 X 軸向偏擺平均位移長條圖

另一方面再來觀測 Z 軸攀爬的總距離，因為這個測試是屬於攀爬 4 連續標準步態，所以本研究從相同時間內總攀爬距離來觀察是不是有滑落情形。從表 4.5 所示看出 Z 軸變化差距較小，但是也可以約略看出氧化鋁材料是較佳的。

表 4.5 六種材料在 Z 軸總移動距離

擺放位置	Z 軸總移動距離
木材(12KG)	1601.4205mm
壓克力(29.8KG)	1604.3169mm
鋁合金(68KG)	1604.6616mm
氧化鋁(107KG)	1615.7579mm
鈦合金(148KG)	1609.8563mm
鋼材(187KG)	1606.1052mm

4.3.2 歸納討論

如 4.3.1 節所講的，此機構要穩定必須要有一定的正向力，也就是整體機構偏心所造成的力矩，從此研究可以得知重量也是整體機構穩定性的一個關鍵，太輕則機構雖然較為省力，但是相對的也失去了一些穩定，太重則有可能因為機構的動作而產生其他影響偏移的因素，所以載重也是一個影響穩定的關鍵因素。

4.4 摩擦係數深入探討

大家普遍都知道如果要增加摩擦力，摩擦係數越大摩擦力會越

大，也就是說用更高摩擦係數的材料會更穩固，但是如果只是要維持整個機構的穩定，在不同的載重情況底下因為正向力不同，可能不需要特別大的摩擦係數就可以達到平衡，另一方面如果摩擦係數不夠大，也可能造成整個機構產生滑落，所以本研究在這個地方也要進行摩擦係數的探討，觀察 5 個連續標準步態的運動過程。

4.4.1 改變摩擦係數測試說明

經由模擬過後，由軟體輸出數據 9 種摩擦係數與 X 軸向偏擺位移量的曲線圖如圖 4.19 所示，先來觀察九種不同摩擦係數，大致上可以分成三個部分來看，其中 0.1、0.2 幾乎無法攀爬，在 X 軸向的偏擺的位移量非常大，最後大約 130 秒後墜落地面，而 0.3、0.4 雖然可以攀爬，但是還是相當不穩定偏擺位移量較大，直到摩擦係數大於 0.5 後整體的偏移量僅剩 0.3、0.4 的 $\frac{1}{4}$ 左右，而摩擦係數繼續加大後，雖然可以從圖 4.19 發現偏移量慢慢減少，但是並不向前面兩個階段明顯，因此從 X 軸向平均位移表格和曲線圖來觀察

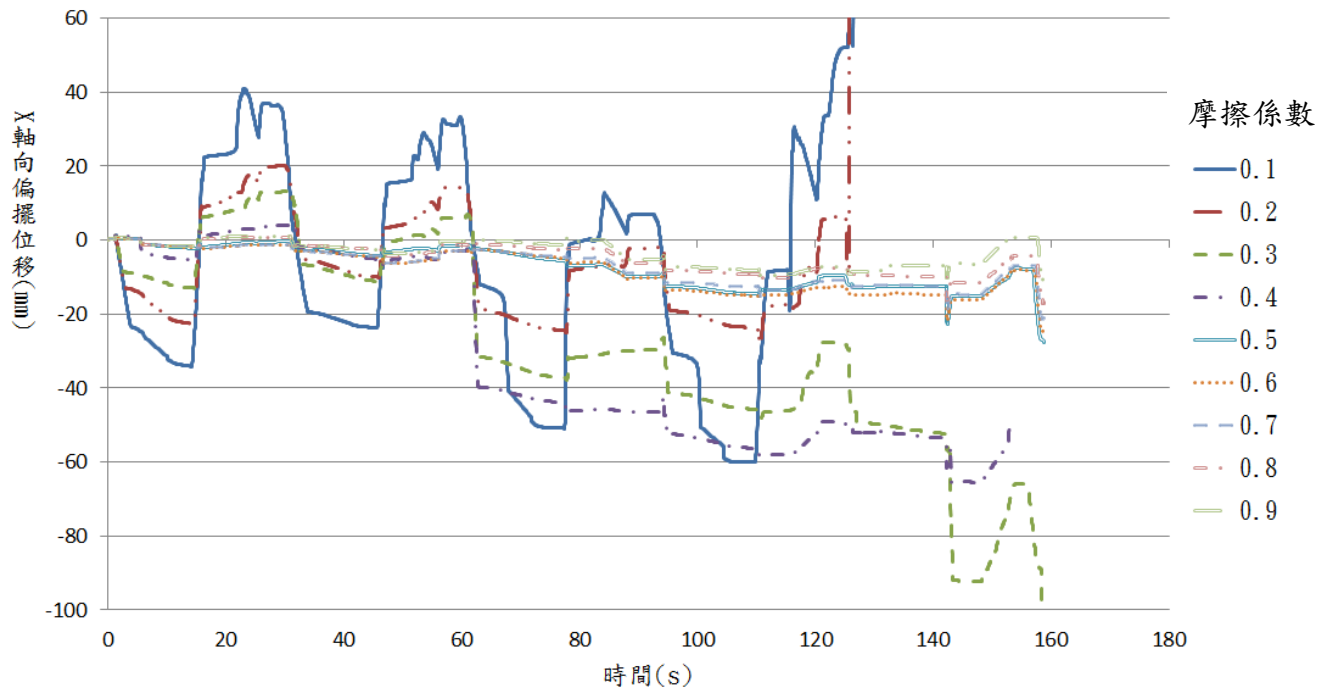


圖 4.19 9 種摩擦係數的時間與 X 軸向偏擺位移量的關係圖

而 X 軸向偏擺位移量如表格 4.6 所示，繪製成 X 軸向平均偏擺位移量與摩擦係數的關係如圖 4.20 所示，此圖可明顯看出，摩擦係數在 0.3、0.4 X 軸偏移量偏高，到了 0.5 時偏移量迅速減少，之後呈現穩定減少，摩擦係數 0.1、0.2 後面已經墜落，所以不納入此圖。

表 4.6 各種摩擦係數的 X 軸平均偏移量整理表

摩擦係數	X 軸向偏擺位移量
0.1	無法攀爬
0.2	無法攀爬
0.3	33.41247
0.4	32.28567
0.5	8.1534
0.6	7.288449
0.7	7.172336
0.8	5.03438
0.9	3.977

摩擦係數與X軸向偏擺平均位移關係圖

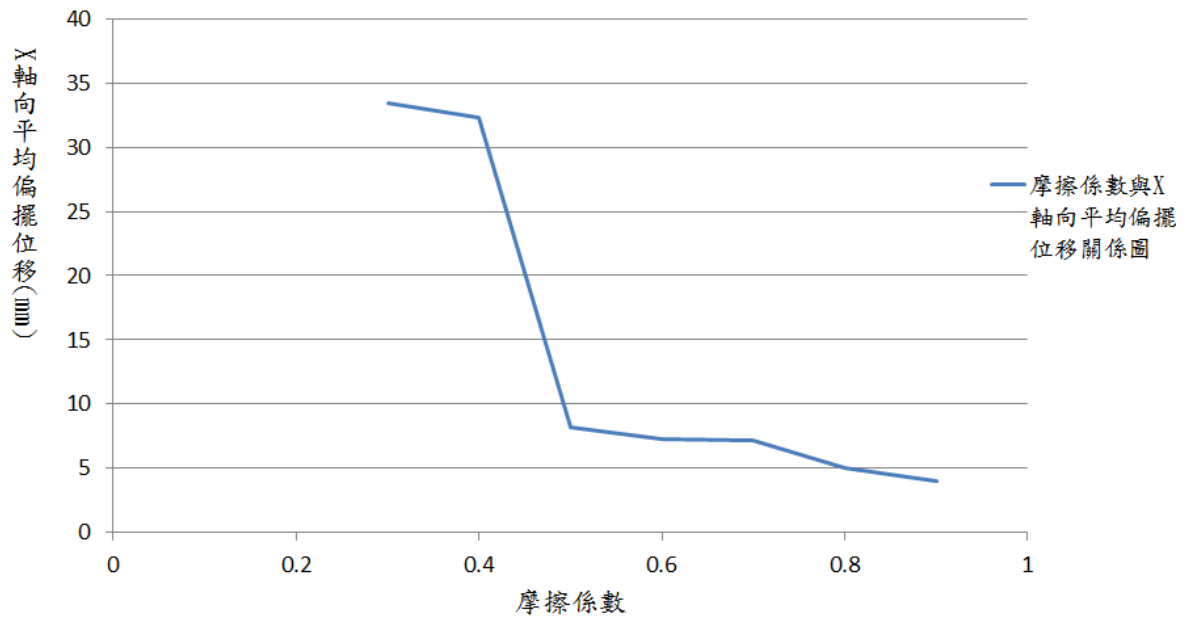


圖 4.20 摩擦係數與 X 軸向平均偏擺位移量關係圖

另一方面觀察 Z 軸的攀爬總距離，模擬分析結果如表格 4.7 所示。

表 4.7 各種摩擦係數的 Z 軸移動總距離整理表

摩擦係數	Z 軸總移動距離
0.1	無法攀爬
0.2	無法攀爬
0.3	1627.598mm
0.4	1634.267mm
0.5	1640.029mm
0.6	1641.075mm
0.7	1644.317mm
0.8	1646.971mm
0.9	1649.75mm

本研究在 Z 軸攀爬總距離看到了較為明顯的差異除了摩擦係數為 0.1、0.2 時無法攀爬，0.3、0.4 和 0.5 之間的總移動距離似乎

差異較大，因此先將表格 4.7 繪製成曲線圖 4.21 後，另外再去觀察攀爬機構 Z 軸位置與時間的曲線圖 4.22，首先從圖 4.22 看起摩擦係數 0.1、0.2 是有墜落的情形，而 0.3、0.4 雖然可以攀爬但是似乎較不穩定，摩擦係數 0.5 以上整個攀爬總距離雖然有差異但是差異較小，再從圖 4.21 所示看來，就非常的明顯的摩擦係數為 0.1、0.2 的機構在約莫攀爬 1250mm 之後墜落，而這途中相較其他摩擦係數也有較大的起伏，而 0.3、0.4 則是在整個攀爬過程中稍有起伏，0.5 過後則無較明顯的高低起伏。

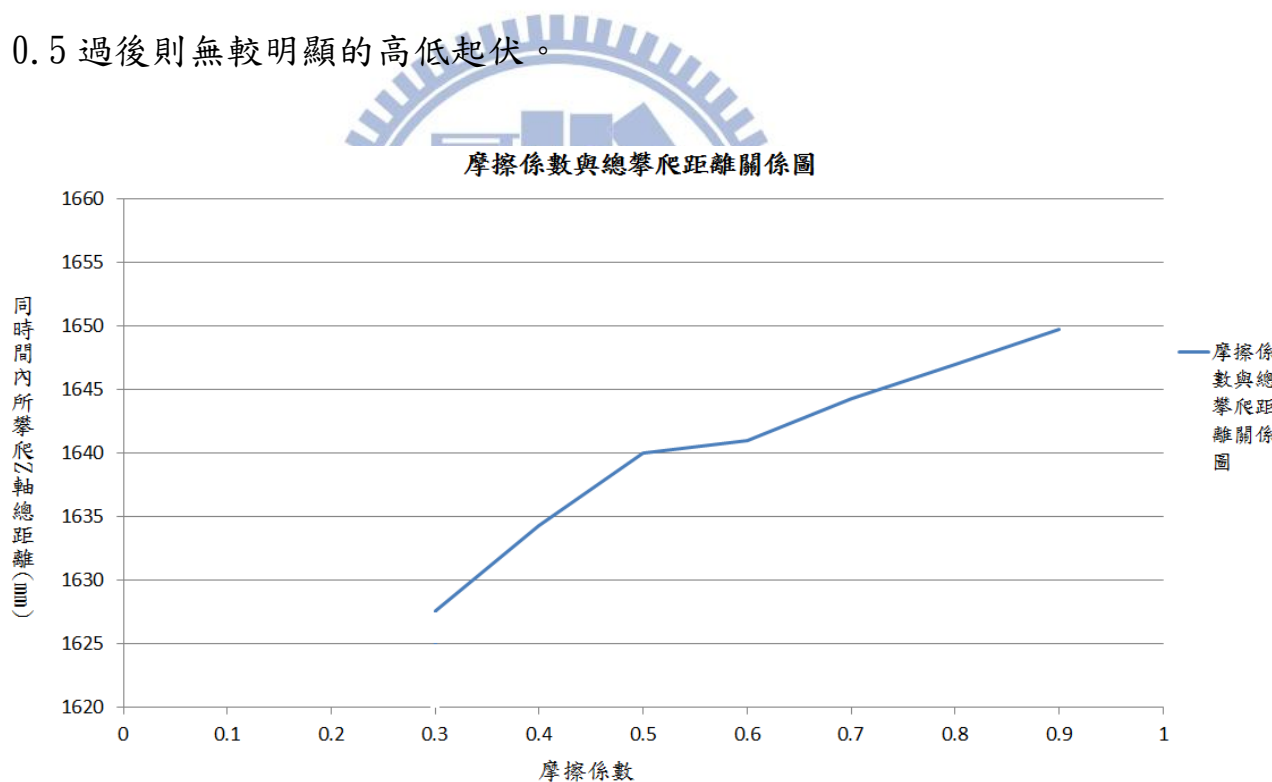


圖 4.21 摩擦係數與 Z 軸總攀爬距離關係圖

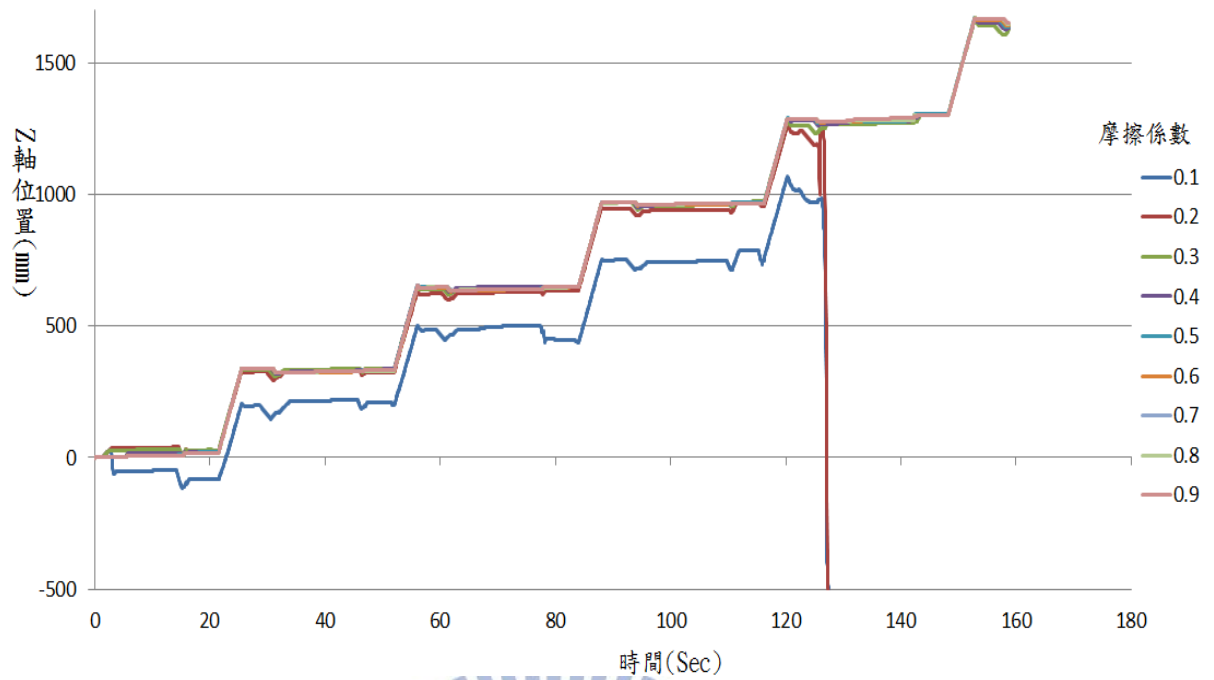


圖 4.22 九種摩擦係數之 Z 軸位置與時間關係圖

4.4.2 歸納討論

從數據以及關係圖可以發現摩擦係數小於 0.5 時整體機構是較不穩定的，大於 0.5 後機構穩定度則大大提升，此後摩擦係數對偏移量影響力逐漸變小。

4.5 四個案例歸納討論

經過前面四個案例，本研究已經大概得知這四個參數分別對整個攀爬過程中的 X 軸向偏擺位移量以及 Z 軸位移量有甚麼影響以及趨勢，因此這些案例可以幫助在接下來 4.6 節田口法運用，讓本研究更快的訂定最適合的 Level，進而達到運用田口法找到最佳的參數組，再進行驗證。

4.6 田口法輔助攀爬機構參數配置規劃

田口實驗方法最大的特點在於以較少的模擬組合，取得有用的資訊，以少數模擬便能指出最佳化趨勢，可行性遠大於全因子法。前面4.1-4.4節已經針對各種參數進行單項模擬，為了能使套用個別參數的的機構的 X 軸向偏擺位移量更小，而且更穩定，整體機構的重量使用材料、載重位置、摩擦係數、夾角角度均需再做調整。本節將利用田口實驗法搜尋各參數對穩定性的影響程度，從四項參數中迅速找出最佳組合，並分析優化後的參數趨勢。

本研究之田口實驗法設計規劃流程可分為下列八項：

- (1) 攀爬機構之功能、優化目標與限制敘述。
- (2) 參數規劃模擬設計，控制因子及其水準敘述。
- (3) 直交表配置列出所有影響此品質特性的因子。
- (4) 繪出因子反應圖及反應表，分析各因子S/N比。
- (5) 分析因子交互作用關係，得到最佳水準組合。
- (6) 最佳水準組合之機構品質特性分析確認。
- (7) 確認模擬結果。

重覆以上步驟，直到達到最佳的品質及性能為止。

4.6.1 攀爬機構之優化目標與限制

在設計機構時不僅只是完成機構改良，還必須考慮到所改良的機構是否符合某些要求的目標特性及限制，以提高產品品質降低成本增加競爭力，進行符合目標特性及限制條件的最佳參數設計。以下進行優化目標與限制的說明。

而現在本研究找到了四個主要影響攀爬機構穩定性的四個參數，分別是改良過後的手爪夾角角度、載重位置的擺放位置、載重量的範圍、摩擦係數的範圍。

(1)優化目標:

攀爬機構在攀爬時整個機構有可能產生X軸向偏擺位移，如果偏擺太大會影響到多個標準步態之後攀爬的距離，以及整體的穩定性，本研究希望可以使機構的X軸向偏擺位移量越小越好，因此由機構動作4個標準步態後的X軸向偏擺位移量越小越好定為優化目標。

(2)限制條件:

攀爬機構中手爪夾角角度、載重位置的擺放、載重量的範圍、摩擦係數的範圍都會與攀爬的速率以及穩定性有關係，但是除了這些因素以外，手臂旋轉的速度以及上下機體上升的速度也會影響到整個攀爬機構的攀爬速度和穩定性，因此先將攀爬機構手爪移動速度、手臂旋轉速度、上下機體上升速度設為相同，等到最後決定出最佳參數時，可再依照不同的馬達速度進行調整來達到最快速且穩定的機構。

4.6.2參數設計規劃及分析

田口實驗方法中，不同參數對品質特性的變異有不同的影響，如何選擇參數水準進行模擬尋得一組好組合，對產品品質在期望目標值附近有最小變異的穩健設計是相當重要。有了對優化目標及限制的描述之後，必須將這些描述轉換成田口實驗參數設計的因子水

準以便模擬，從中找尋出最佳水準組合。

(1) 控制因子及水準

整個攀爬機構的參數，只能在合理範圍內做調整，依照前面 4.1-4.4 節針對各個機構所進行單項測試的結果，總共有四個主要影響的因子，第一個為夾角的角度，基本上夾角的角度是越小越好，但是小於 88° 則無法容納桿柱最底部的直徑 200mm，而小於 138° 手爪之間又會產生干涉，且手爪如果完全無夾角將無法攀爬，因此將角度範圍為 $138^\circ < \theta < 176^\circ$ ，而載重物的擺放位置測試結果雖然是擺在越下面越好，但是擺放位置有可能與載重以及摩擦係數之間有交互作用，所以分別取上中下三個位置，重量因為並非是越小越好也不是越大越好，本研究為重量定了一個範圍為 $28.9\text{kg} < W < 187\text{kg}$ ，最後一個因子摩擦係數，本研究測試過摩擦係數 0.1、0.2 時並無法攀爬因此將範圍定為 $0.3 < \mu < 0.9$ 。

(2) 直交表選擇配置

在直交表的應用上，利用因子水準自由度可選用最小且最合適的直交表，依據因子數量及每個因子水準數，以及所知交互作用的數量，三者計算總自由度來選擇最適直交表。直交表亦因控制因子及水準配置不同，有各別的選用直交表配置。四個控制因子中每一因子各有三水準，其總自由度由式 (23) 算出為 8，因此四個因子每

因子三水準，選擇 $L_9(3^4)$ 直交表配置足夠8個自由度使用，將各項因子以英文代碼方便表示並繪成表格4.8表，其控制因子水準配置如表4.9所示。

表 4.8 控制因子水準配製表

控制因子		Lv1	Lv2	Lv3
A	手爪夾角角度 θ	138	157	176
B	擺放位置(編號)	0	5	10
C	總重量(kg)	29.8	107	187
D	摩擦係數	0.3	0.6	0.9

表 4.9 $L_9(3^4)$ 各因子直交表

模擬次數	A	B	C	D	X軸向偏擺位移量(mm)
1	138	0	29.8	0.3	
2	138	5	107	0.6	
3	138	10	187	0.9	
4	157	0	107	0.9	
5	157	5	187	0.3	
6	157	10	29.8	0.6	
7	176	0	187	0.6	
8	176	5	29.8	0.9	
9	176	10	107	0.3	

4.6.3 模擬結果與分析

首先本研究使用minitab軟體來進行田口法統計分析如圖4.23所示，運用此套軟體是希望在計算時可以更節省時間。

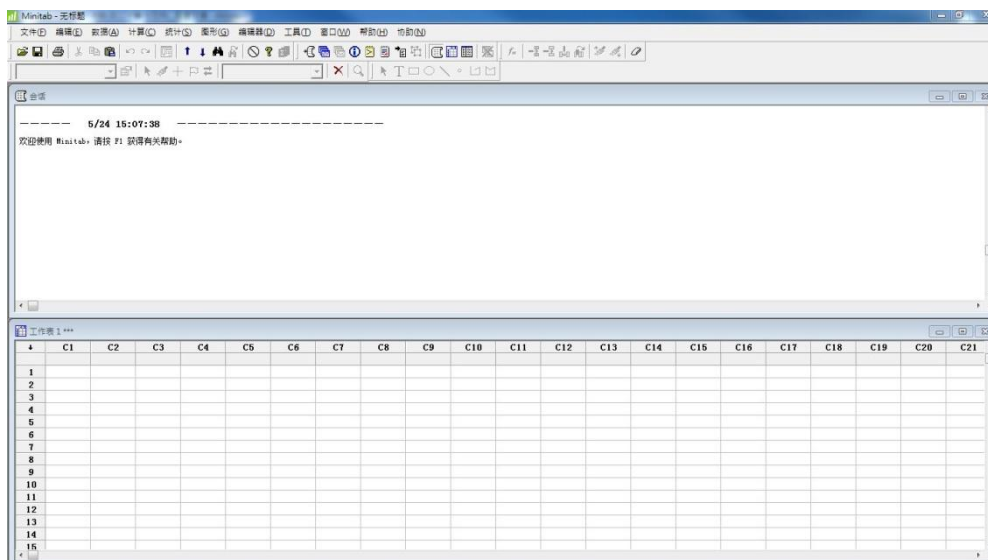


圖4.23 minitab軟體介面示意圖

先從介面上面選項選擇統計->DOE->田口->創建田口設計，從這邊載入一個新的田口參數組合如圖4.24所示。

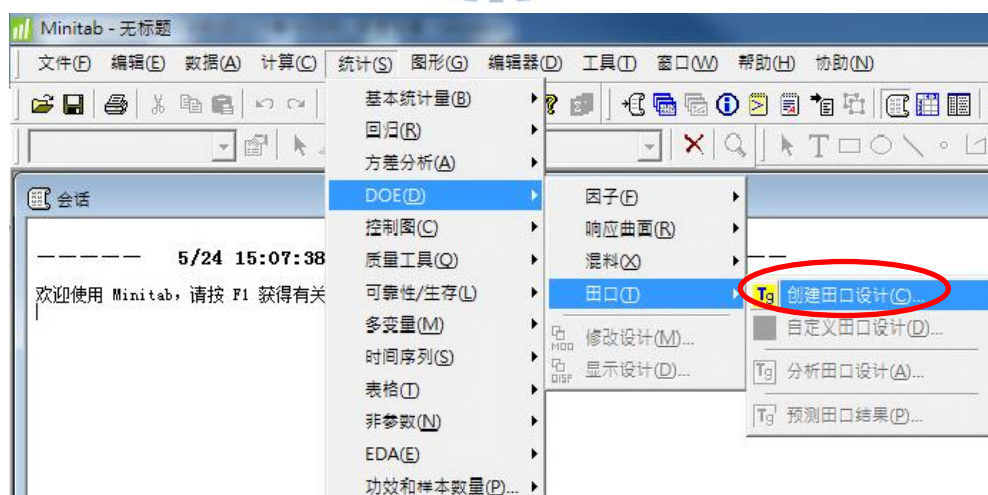


圖4.24 minitab創建田口法實驗示意圖

選擇後會出現如圖4.25所示的視窗，本文所運用的為四個控制

因子三個水平，選擇完畢點選設計如圖4.26所示點選L9參數組，確定後點選因子設定因子名稱以及水平值，再點選選項打勾後確定出現 $L_9(3^4)$ 的工作格，確定後選擇因子，並且填入因子名稱和level數值，將設計儲存在工作表格中後確定如圖4.27所示，即匯入資料。

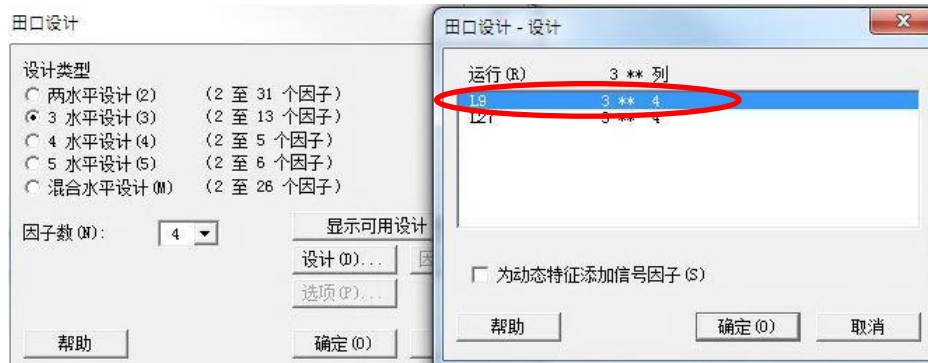


圖4.25 田口法設計選項



圖4.26 田口法因子選項

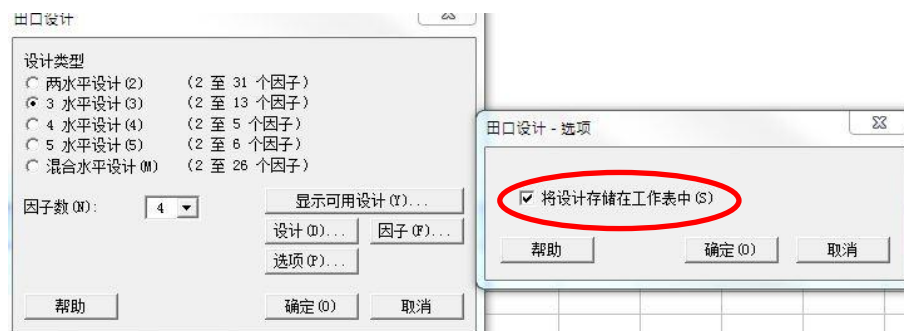


圖4.27 田口法儲存於工作表選項

完成後介面會如圖4.28所示。

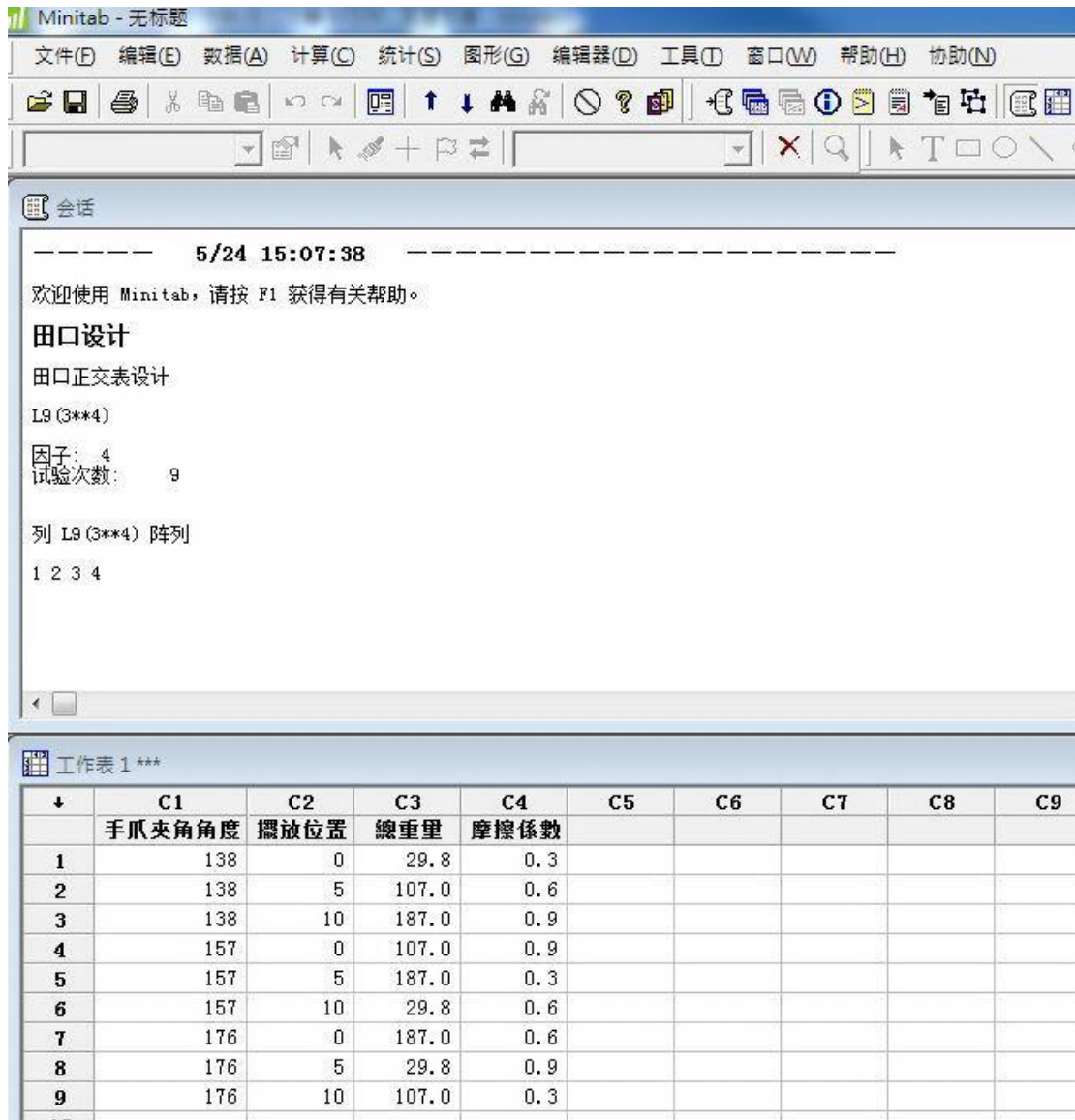


圖4.28 數據輸入後minitb介面顯示圖

根據上述直交表模擬設計進行9個模擬，經由SolidWorks繪製模型，並利用SolidWorks Motion分析模組分析即可得到模擬結果，依照整個攀爬機構攀爬四個標準的步態後，運動分析結果之後，得到X軸向偏擺位移量與時間得圖表，匯出每個模擬圖表的數值到Excel，並絕對值計算X軸向偏擺平均位移量，將模擬過後得到的X軸向偏擺平均位移量填入於C5列如圖4.29所示。

夾角角度	擺放位置	總重量	摩擦係數	X軸平均偏移震盪量
138	0	29.8	0.3	4.1411
138	5	107.0	0.6	2.5620
138	10	187.0	0.9	4.7642
157	0	107.0	0.9	5.8540
157	5	187.0	0.3	21.2328
157	10	29.8	0.6	10.1536
176	0	187.0	0.6	15.3943
176	5	29.8	0.9	13.6144
176	10	107.0	0.3	21.1863

圖4.29 田口法匯入X軸平均偏移震盪量後示意圖

再重新選擇一次統計->DOE->田口->分析田口設計如圖4.30所示。

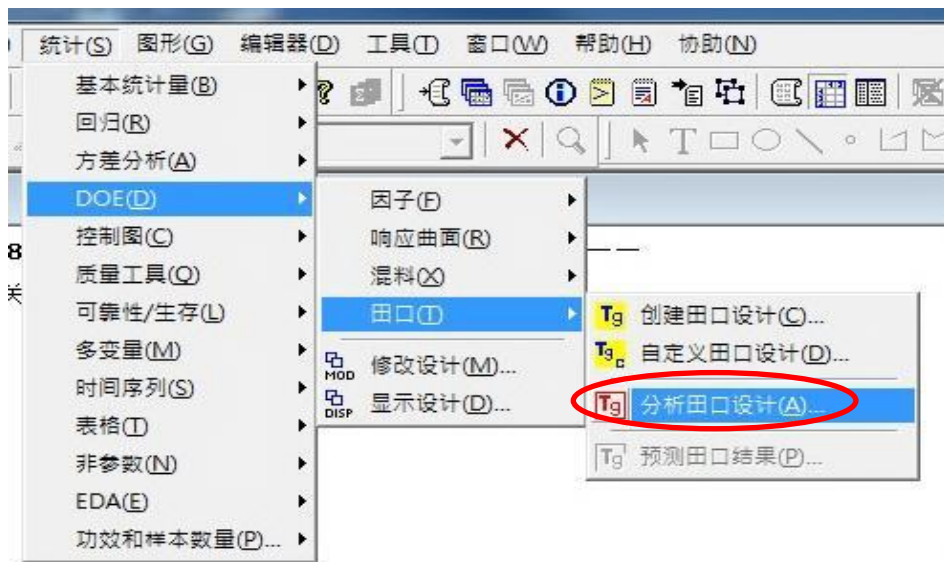


圖4.30 運用minitab分析田口設計示意圖

選擇後會彈出如圖4.31視窗，選擇分析彈出圖4.32視窗後將信噪比(SN比)以及均值打勾，確定後再點選選項如圖4.33所示選擇本文所需的望小特質，確定之後即可得SN比曲線圖以及數據如圖4.34所示。

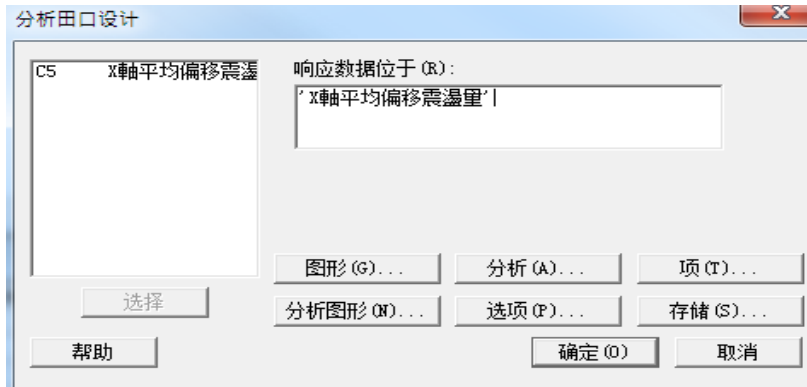


圖4.31 分析田口法設計視窗

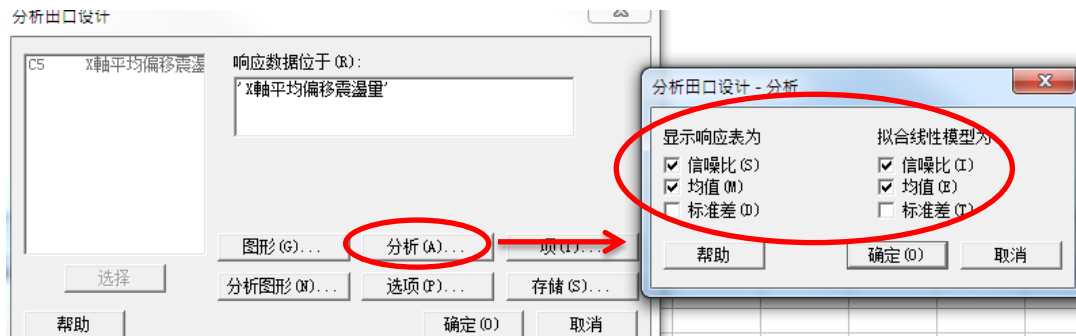


圖4.32 分析田口法設計分析選項示意圖

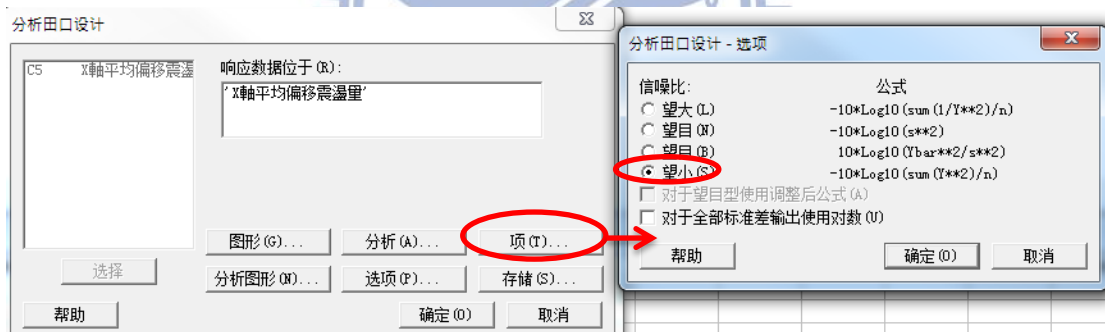


圖4.33 分析田口法設計選項示意圖

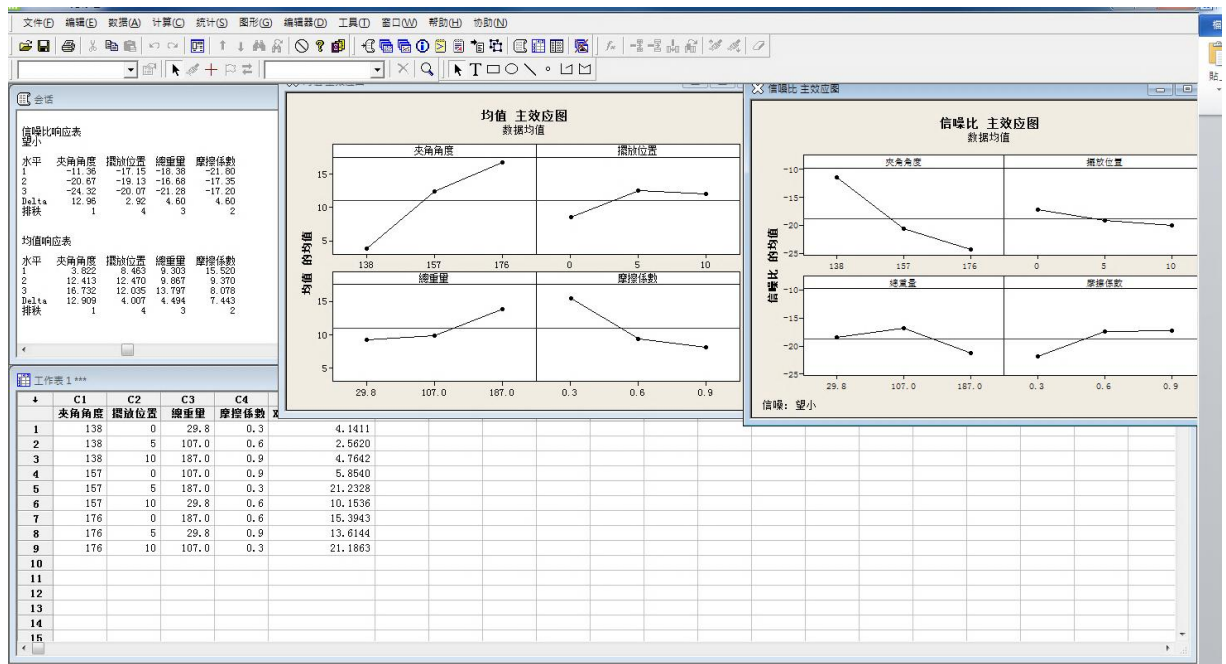


圖4.34 minitab運算過後SN比曲線圖以及數據

衡量標準以攀爬機構攀爬4個標準步態後X軸向偏擺平均位移量，X軸向偏擺平均位移量愈小為愈佳，因此品質特性為X軸向偏擺平均位移量望小，計算9個模擬的S/N比，結果如表4.10最右欄所示，接著便可以計算各因子之各水準的S / N比平均值，將結果填入控制因子對S/N比之反應表以及minitab輸出的反應圖如圖4.35所示，表4.11所示中因子效應為 $S/N_{max} - S/N_{min}$ ，反應表中最後一列為各因子對X軸向偏擺平均位移量的影響程度由大至小依序為A、D、C、B，即手爪夾角角度、摩擦係數、總重量、載重擺放位置，由田口法建議，挑選可使S/N比較大之水準，以進行確認模擬。

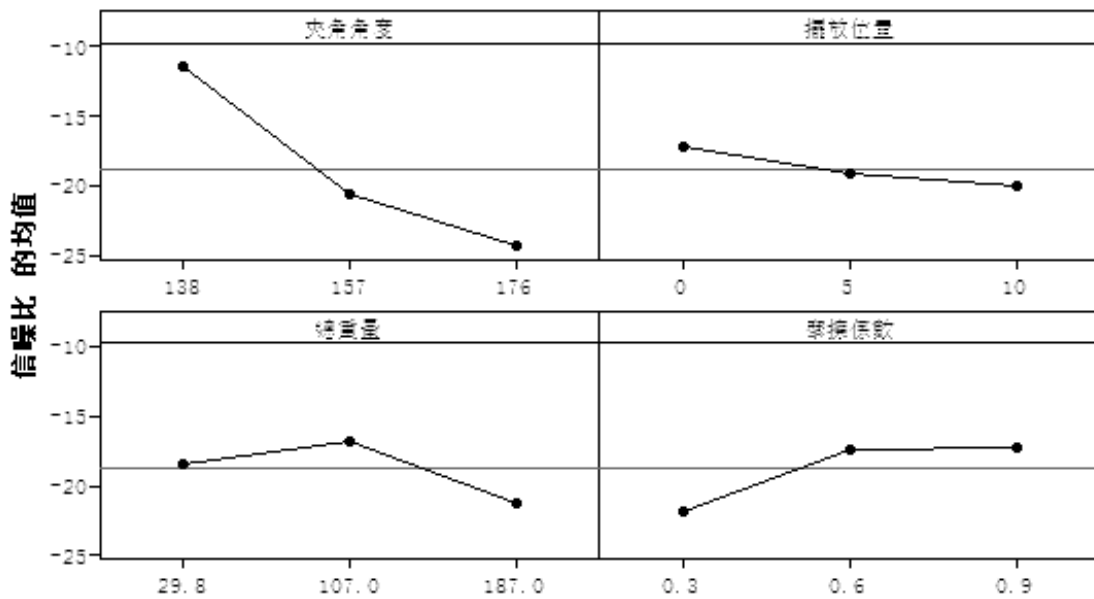
表 4.10 $L_9(3^4)$ 各因子直交表

模擬次數	A	B	C	D	平均偏移量 (mm)	S/N
1	138	0	29.8	0.3	4.141097	-12.3421
2	138	5	107	0.6	2.561971	-8.1714
3	138	10	187	0.9	4.7642	-13.559
4	157	0	107	0.9	5.85395	-15.3475
5	157	5	187	0.3	21.23281	-26.5401
6	157	10	29.8	0.6	10.1536	-20.132
7	176	0	187	0.6	15.39427	-23.747
8	176	5	29.8	0.9	13.6144	-22.6799
9	176	10	107	0.3	21.1863	-26.5210

表 4.11 控制因子對 S/N 比反應表

水準	A	B	C	D
lv1	-11.36	-17.15	-18.38	-21.80
lv2	-20.67	-19.13	-16.68	-17.35
lv3	-24.32	-20.07	-21.28	-17.20
因子效應	12.96	2.92	4.63	4.60
影響程度	1	4	3	2

信噪比 主效应图
数据均值



信噪：望小

圖 4.35 各參數 SN 比趨勢圖

而再挑選可使S/N比較大之水準之前，因為各別因子間之交互作用(interaction)會影響水準之判定，故再針對影響較大的前三個因子A、D、C，分析其交互作用之程度，表4.12分別為因子A與D、C與D、A與C之S/N比，乃由望小特性之S/N比選取而來，圖4.36為其交互作用的反應圖，圖中A、D圖的曲線並無相交，因子間無交互作用，由於A、C圖與D、C圖的曲線均有相交，可確認A、C與D、C因子間相互存在著交互作用，因此進行以下之修正方式。

- (1) 觀察表4.12，S/N比最大的組合為 A_1D_2 ，其值為-8.1714。
- (2) 觀察表4.12，S/N比最大的組合為 A_1C_2 ，其值為-8.1714。

(3) 觀察表4.12，S/N比最大的組合為 D_2C_2 ，其值為-8.1714。

A：原本選擇 A_1 ，(1)建議 A_1 ，(2)建議 A_1 ，故挑選 A_1 。

B：原本選擇 C_2 ，(2)建議 C_2 ，(3)建議 C_2 ，故挑選 C_2 。

C：原本選擇 D_3 ，(1)建議 D_2 ，(3)也建議 D_2 ，故挑選 D_2 。

因此最後選定 A_1 、 C_2 、 D_2 ，其餘一個因子 B，則以 4.6.3 之判斷為原則，選定為 A_1 、 B_1 、 C_2 、 D_2 ，由田口法建議，即以此參數條件進行望小法則之確認模擬，而預測方程式則預測確認模擬之 S/N 比為， \bar{y} 為 9 個模擬平均值的 S/N 比：

$$\begin{aligned}
 y &= \bar{y} + (A_1 - \bar{y}) + (B_1 - \bar{y}) + (C_2 - \bar{y}) + (D_2 - \bar{y}) \\
 &= -18.7822 + (-11.36 - (-18.7822)) + (-17.15 - (-18.7822)) \\
 &\quad + (-16.68 - (-18.7822)) + (-17.35 - (-18.7822)) \\
 &= -18.4342 + 7.422 + 1.632 + 2.1 + 1.432 = -5.8482
 \end{aligned}$$

表 4.12 各因子交互作用的反應表

A 與 D 交互作用			
	A_1	A_2	A_3
D_1	-12.3421	-26.5401	-26.5210
D_2	-8.1714	-20.132	-23.747
D_3	-13.559	-15.3475	-22.6799

D 與 C 交互作用			
	D_1	D_2	D_3
C_1	-12.3421	-20.132	-22.6799
C_2	-26.5210	-8.1714	-15.3475
C_3	-26.5401	-23.747	-13.559

A 與 C 交互作用			
	A_1	A_2	A_3
C_1	-12.3421	-20.132	-22.6799
C_2	-8.1714	-15.3475	-26.5210
C_3	-13.559	-26.5401	-23.747

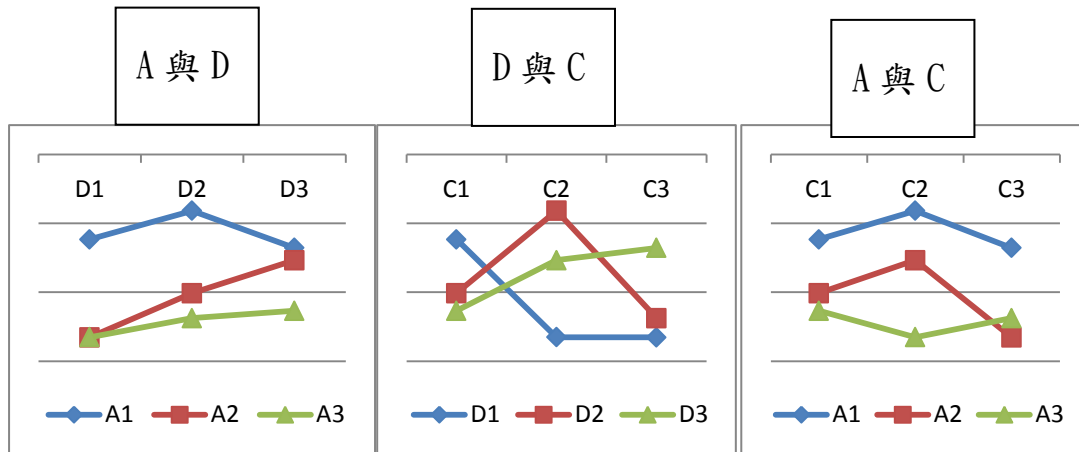


圖 4.36 各因子交互作用的反應圖

4.6.4 確認模擬

最後以結果選定的組合 A_1 、 B_1 、 C_2 、 D_2 進行確認模擬，藉此驗證資料分析所獲得的結果是否正確，模擬結果之最佳因子組合的X軸向平均偏擺位移量為1.9294(mm)，比9個模擬中的結果都來的小，S/N比為-5.7，由模擬結果發現S/N比比原先預測的更大但是接近，且為9個模擬條件中最佳的。

本研究將此機構從不能攀爬，到修改手爪後未經選擇變數之原機構，手爪夾角角度138、載重位置為編號10、總重量為187KG、摩擦係數為0.9， A_1 、 B_3 、 C_3 、 D_3 進行效益評估比較。原機構X軸向平均偏擺位移量S/N比為-13.559，改善後S/N以最佳預估值與原機構比較增加了7.859，X軸向平均偏擺位移量減少60%，經控制因子優化與未優化品質特性值比較結果如表4.13所示。

表 4.13 優化前後比較

優化前後	X軸平均偏移震盪量(mm)	S/N比
原機構($A_1B_3C_3D_3$)	4.7642	-13.559
優化後機構($A_1B_1C_2D_2$)	1.9294	-5.7

以上結果顯示採取望小特性之參數設計，確實減小X軸向平均偏擺位移量，達到優化的目標，顯示所進行的優化參數選擇，對改善目標品質特性確實能達到效果，經由田口實驗法可以得到參數優化的趨勢與結果，大幅節省模擬次數和時間。

4.7 手臂轉速的規劃

由 4.6 節運用田口法，將此機構不同的參數組找出優化的一組，本研究要探討的是整體機構的穩定性足夠之後，那接下來就是要改良整體的速度，將從手臂的旋轉速度來進行規劃，找到較為快速且不影響到整個機構平衡的旋轉速度，在這裡將手臂的旋轉速度分成 3rpm、6rpm、12rpm、24rpm 來探討，並測試後觀察各種不同手臂旋轉速度在完成一個標準的步態後所節省的時間以及其 X 軸向平均偏擺位移量。

首先將優化後的參數固定，只改變手臂的轉速，並且假設 X 軸向平均偏擺位移量超過 0.1 即超過本研究原先設定標準，如圖 4.37 所示觀察在手臂轉速為 3rpm 時整個 X 軸向平均偏擺位移量是較為平順的，

當轉速增加為兩倍 6rpm 後 X 軸偏移量雖然有起伏但是也並不明顯，轉速增加到 12rpm、24rpm 之後整個起伏量開始變大，從表格 4.14 的數據來看 3rpm 到 6rpm 減少了 4 秒而 X 軸向平均偏擺位移量只增加了 0.099 mm，6rpm 到 12rpm 減少了 2 秒 X 軸向平均偏擺位移量卻增加了快 0.4 mm，12rpm 到 24rpm 減少了 1 秒 X 軸向平均偏擺位移量又增加了快 0.22mm。

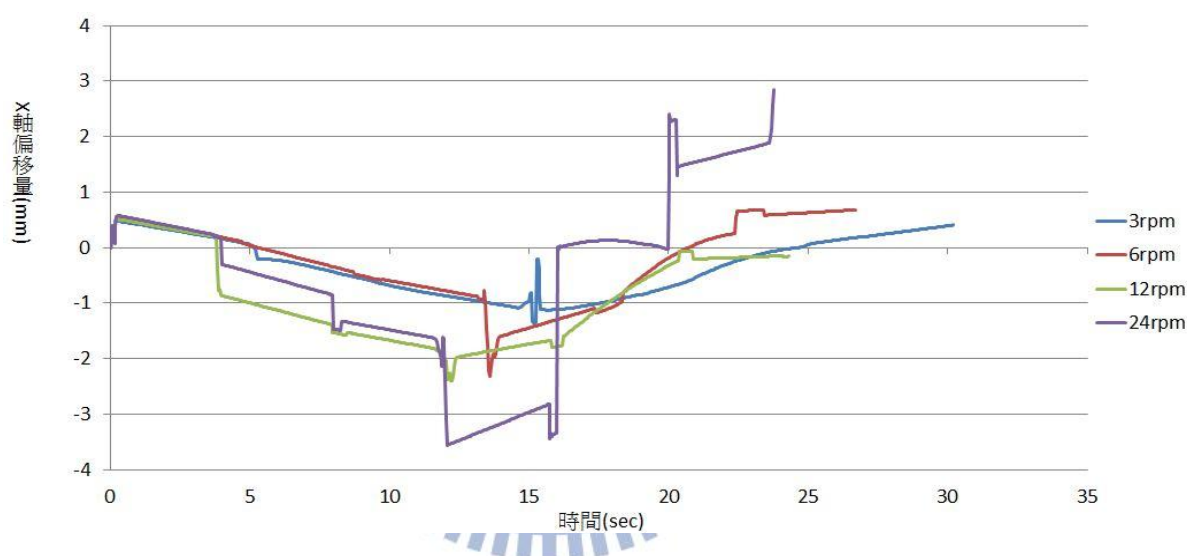


圖 4.37 不同手臂轉速 X 軸向偏擺位移與時間關係圖

表 4.14 不同轉速所花費時間與 X 軸平均偏移震盪量整理表

轉速	3rpm	6rpm	12rpm	24rpm
花費時間(s)	30.16	26.16	24.16	23.16
X 軸向平均偏擺位移量(mm)	0.50	0.599	1.04	1.26

從此案例可以得知 3rpm 雖然 X 軸向平均偏擺位移量較小，但是每個步態比 6rpm 多了將近 4 秒，12rpm 以及 24rpm 雖然時間分別比 6rpm 快了 2 秒以及 3 秒，但是偏移量卻分別增加了 0.4 和 0.62，因此往後的機構研究，可以將手臂的轉速設定為 6rpm 以增加整體的效率。



第五章 實驗與驗證模擬

在進行模擬之後，本研究在這個章節主要進行了兩個靜態的實驗，分別是測試重量是否會影響到整個機構的平衡，以及測試載重物的擺放位置是否會影響到攀爬機構的攀柱穩定性，其中測試的桿柱為直徑 3.5 公分，而機構則是用壓克力切出的等比例縮小 4.5 倍的模型，機構總重量為 380g。

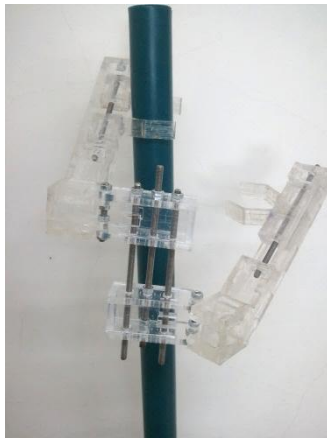
5.1 重量與攀柱穩定性關係實驗

這個實驗主要來驗證本研究在第四章的模擬結果，只針對整體重量是不是會影響機構的攀柱穩定性做驗證比較，本實驗機構主要以壓克力材質為主，螺桿則以螺絲替代，以單隻手臂抓持，測試能否抓持住，重量則主要以最輕的 162g 直到增重至 1579g，載重物則以水瓶，並且陸續加水增加重量。

重量最輕的為單隻手臂的重量 162g 如圖 5.1 所示，主要因為機構本身重量無法再減輕因此以單隻手臂較輕的重量來做測試，因為重量太輕，並無法夾持住。而接下來的如圖 5.2 所示 380g、660g、810g、960g、1110g、1210g 均可以攀持住，直到加重至 1580g 如圖 5.3 所示機構開始下滑，因此我們將結果整理成表 5.1。



圖 5.1 總重為 162g 的機構



380g



660g



810g



960g



1110g



1210g

圖 5.2 各種重量的機構攀持示意圖



圖 5.3 總重為 1580g 的機構

表 5.1 重量與夾持穩定實測結果

總重量(g)	162	380	660	810	960	1110	1210	1580
夾持穩定	不可	可	可	可	可	可	可	不可

而此實驗結果表 5.1 拿來與 4.3 章所做的重量模擬產生的結果如圖 4.18 來做比對，發現本章節所做的實驗結果與模擬的結果趨勢是相符合的，結果表示機構總重有一個對平衡最有利的範圍。

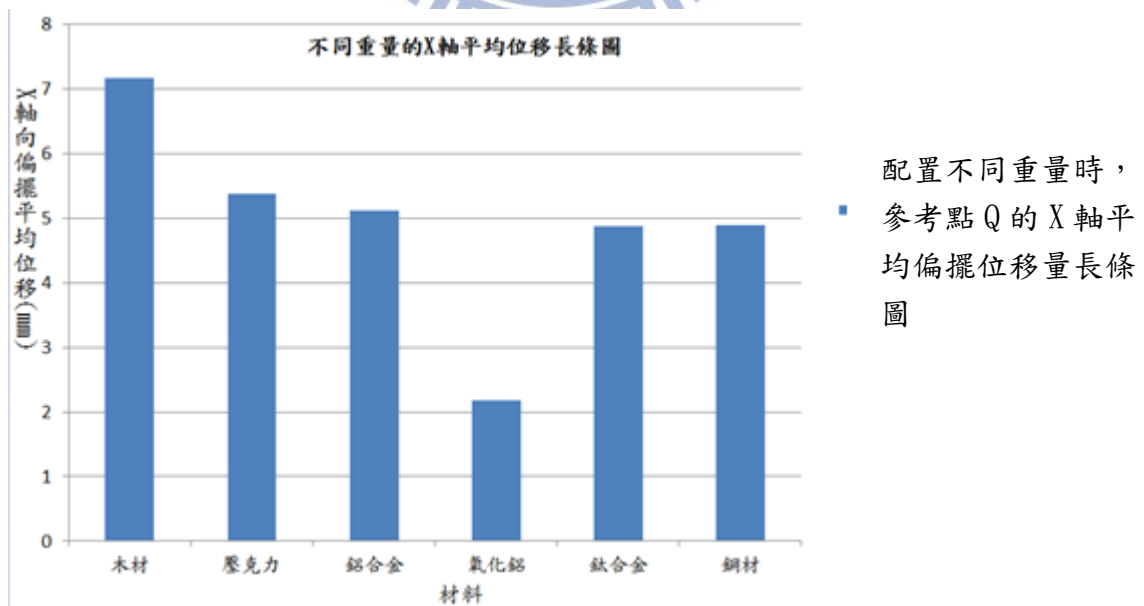


圖 4.18 不同重量的材料與 X 軸向偏擺平均位移長條圖

5.2 載重位置與攀持穩定性實驗

第二個驗證實驗主要是看當載重物在不同的位置時(參考圖 4.9)，是否會影響到機構的整體穩定性，而載重物為 320g 的載重物，將機構下緣加裝一量角器如圖 5.4 所示，並且以一條線放置有小重量的物品來測量量角器偏移角度，而載重位置則參考圖 4.9 為由下到上分別標示為 0，3，6，10 等四個載重位置，以便確定實驗結果。

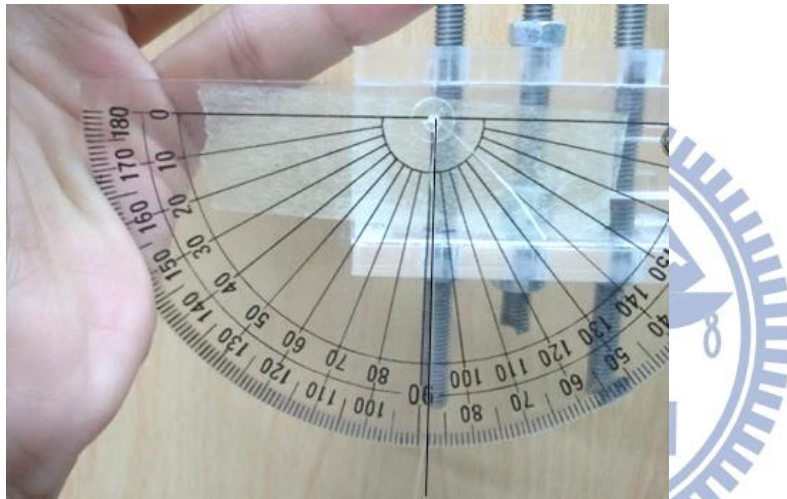


圖 5.4 機構加裝量角器示意圖

首先是以不載重的機構，左手手爪夾取後測量其偏移角度為 7° 如圖 5.5 所示。

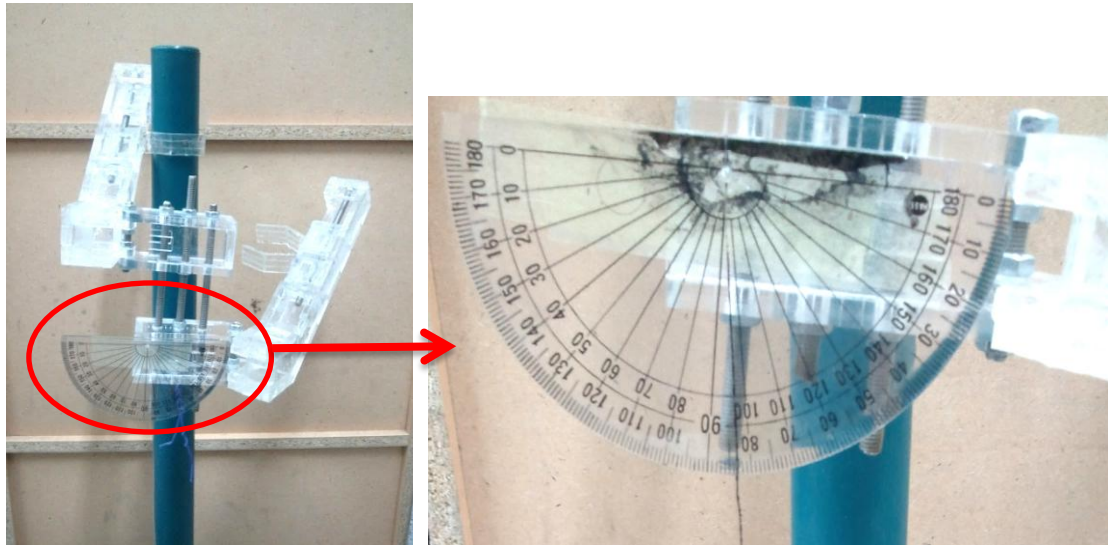


圖 5.5 攀爬機構其偏移角度示意圖(不載重時)

而下圖 5.6~5.9 分別是載重物分別放在由下到上的四個位置，其中圖 5.6 偏移角度為 4.5° 、圖 5.7 為 5.5° 、圖 5.8 為 6° 、圖 5.9 為 8° 。

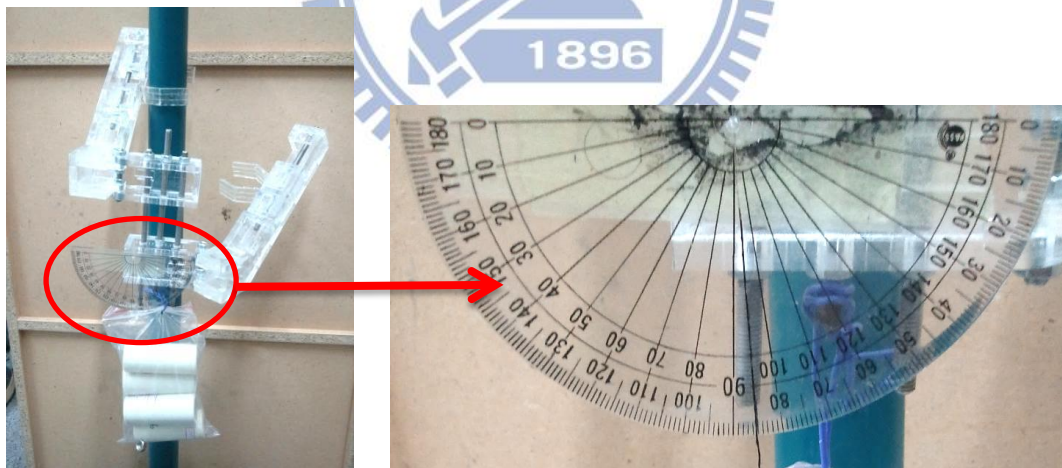


圖 5.6 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 0 時)

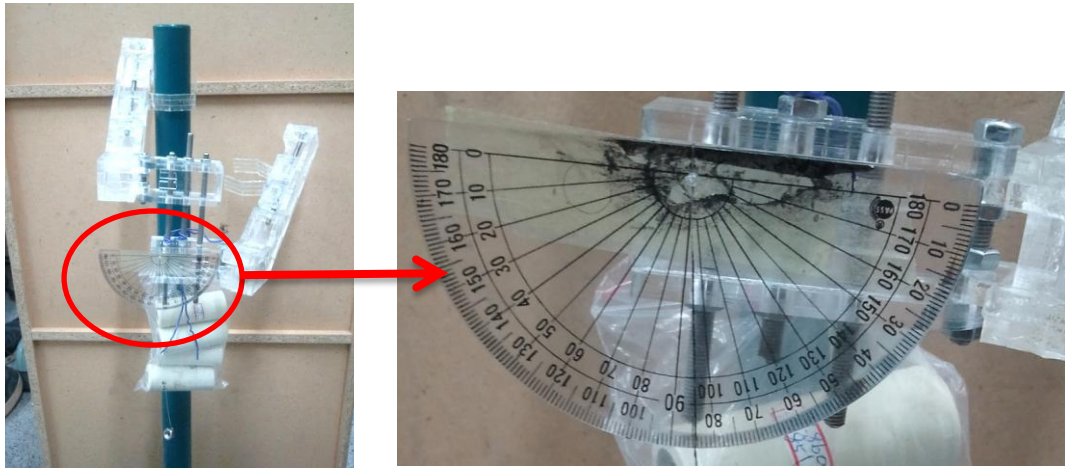


圖 5.7 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 3 時)

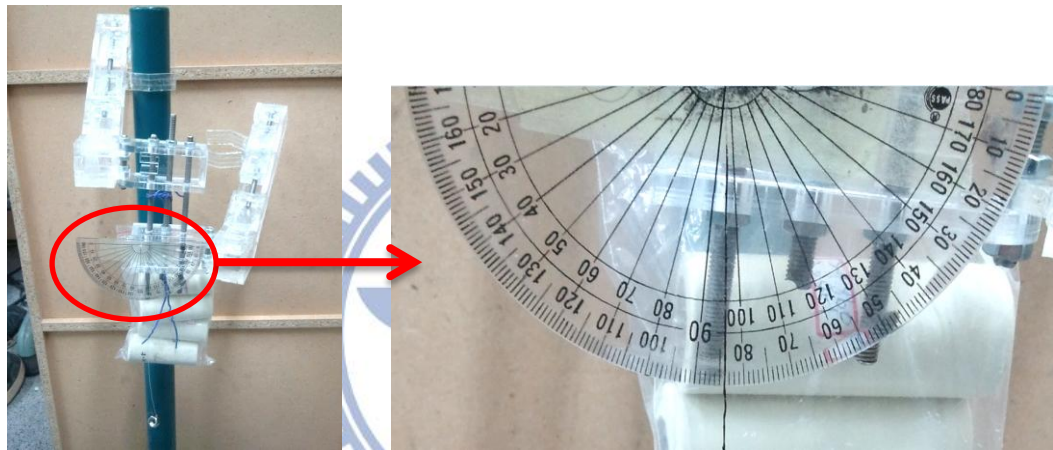


圖 5.8 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 6 時)

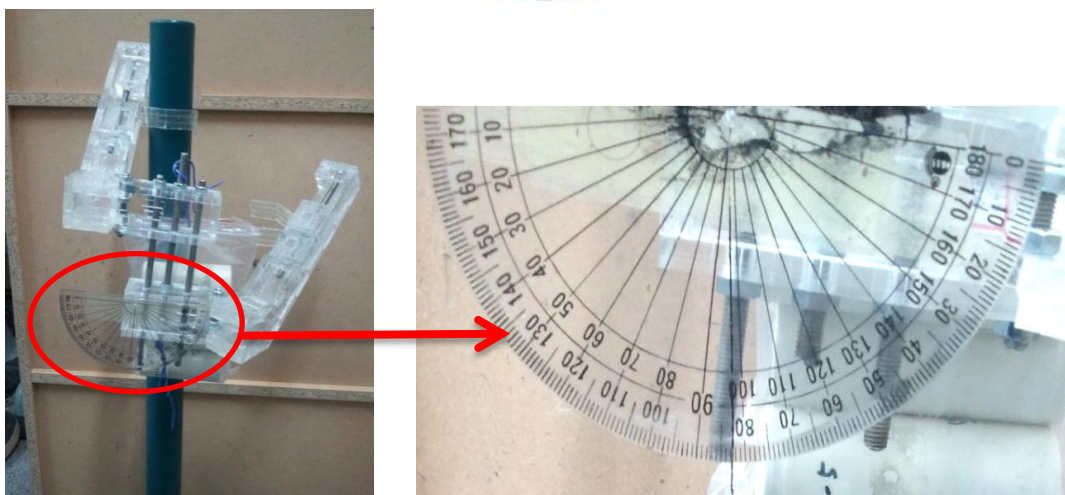


圖 5.9 攀爬機構其偏移角度示意圖(擺放於位置 10 時)

因此本研究歸納整理於表 5.2 分別是無載重、載重物擺放在最下方到最上方(位置下至上)的攀柱穩定情況。可以看出趨勢是放置越下面越佳，而第四個載重位置偏移度數比無載重物時更大，主要是因為載重位置在整體機構偏移時，超過質量中心與桿柱的中心線而產生順向的力矩，讓機構更加偏移。

表 5.2 載重位置與偏移角度整理表格

載重位置	無載重	0	3	6	10
偏移角度	7°	4.5°	5.5°	6°	8°

而此實驗結果表 5.2 拿來與 4.2 章所做的重量模擬產生的結果如圖 4.11 來做比對，發現本章節所做的實驗結果與模擬的結果趨勢是相符合的，載重物的擺放位置在越下面是越能幫助機構平衡的。

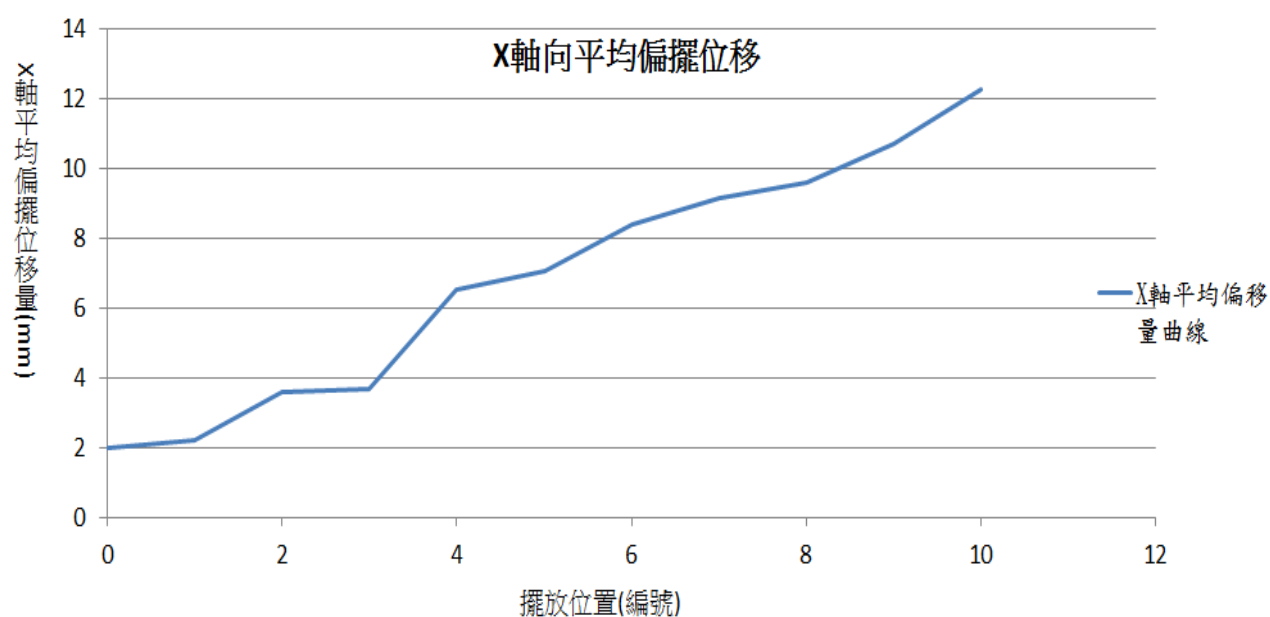


圖 4.11 擺放位置與 X 軸平均偏擺位移量

5.3 實驗結論

第一個實驗主要是用來驗證本研究機構重量與穩定性的模擬，而實驗的結果趨勢與本研究 4.3 章所做的模擬是相同的，證明要維持一個機構的穩定性，重量太大或太小都不一定最佳，可能會有一個最佳值的重量。而第二個實驗主要是用來驗證 4.2 章所做的載重位置與機構穩定性的模擬，這個實驗最後得到的趨勢與模擬所得到趨勢也相符，數據顯示載重位置如果放置在機構最下方對維持機構穩定性是比較有幫助的。



第六章 結論與未來目標

6.1 結論

本論文首先對常見的爬桿機構閱讀文獻後作個初步歸納，將攀爬機構分成履帶型、輪型、步足型、蠕動型、蛇型，並依不同的類型及特性予以說明且分析整理，經整理文獻後歸納出其優缺點，並且運用 QFD 品質屋法依照不同的需求，將使用者需求轉換成工程需求，歸納各種工程需求之間的關係後選定其中一種可以拿來設計改良的類型，提供有興趣的設計者決定設計主題的參考程序與方法，針對使用者需求以一蠕動型攀爬機器人機構當作研究改良的目標。此型機構的特色為運用偏心原理，使得手爪與桿柱間的作動基於較大力矩作用而有更大的摩擦力，具有省能的效果。經過重建原機構模型，並且透過 SolidWorks 的運動分析功能，對此攀爬機構原型機構作運動模擬測試後，發現該機構並非此項工作應用的最佳型式，尤其手爪的形狀並不利於桿柱的抓取與固持。本研究在第三章中，首先以 7 公尺高路燈桿柱尺寸等相關規範來確立蠕動型攀爬機器人設計需求與設計限制。分析評估階段首先採用參考文獻的機構造型進行模擬，逐步考慮攀爬穩定性而加入其他兩種手爪設計，其間依據機構參考基準點來觀察其 X 軸向平均偏擺位移量作為定義其穩定性的評估數據。模擬測試後選擇夾角型手爪進行新機構手爪的改良，

於第四章主要為深入探討會改變整體機構穩定性的參數及其最佳值，影響參數主要有四大項分別為，手爪夾角角度、載重位置、機構重量(材質)、摩擦係數，四個參數項目均分別規畫進行模擬測試，並推論產生攀爬不穩定的原因與趨勢，又經由幾何尺寸與材料重量推算決定田口方法所使用各參數的數值級距(Level)，最後運用田口方法與變異數分析法，在限制機構各馬達的轉動速度以及機架上升速度的前提，對於影響穩定性的各個參數進行最佳化分析，以得到一組優化後的設計參數。接著針對這組參數模擬後進行分析驗證，確定達到增加穩定性的目標。此外並進行手臂旋轉速度對整體穩定性以及攀爬速度的影響測試，進一步分析得到提高攀爬效率的最適合手臂旋轉速度。本研究所設計改良的夾角手爪以及得到的優化參數，經模擬驗證可取代參考文獻所設計的機構手爪模擬，證實可完成攀爬非等徑桿柱之動作，機架參考點的 X 軸向平均偏擺位移量可減少 60%，可保持較佳的穩定性，進而達到增快攀爬速度的效果；而在本研究最後也做了兩個實驗來驗證結果，分別是機構重量與穩定性的關係以及載重物擺放位置與穩定性的關係，實驗後得到的數據其趨勢與模擬數據的趨勢是相同的，本研究成果相信可提供一般爬桿機構設計與節省研發成本的應用參考。

6.2 未來展望

(一) 本研究的目標為可攀爬非等徑桿柱之機構設計改良，並未在材質及結構強度進行完整的分析與評估，以後擬進行結構強度的分析，以更符合現實環境的使用需求。於本論文之第四章中以SolisWorks軟體模擬其運動狀態，雖然可證明本研究設計蠕動式夾爪機器人已符合要求，但是離商品化的目標還有很長的距離，因此希望在下一階段研究中，能將業界現有製造技術、常用之材質及成本考量進去，以更能符合業界生產之需求。

(二) 本論文只作爬桿機構手爪的設計，並探討影響較大的幾個參數，之後可繼續探討其他影響的參數如螺桿摩擦係數、馬達放置位置等其他參數的影響，使設計爬桿機構時有更多參考依據。

文獻回顧

- [1] 曹常成, 徐正會.” 懸空作業職災情境分析及作業輔助平台之研發.” 行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告(2011).
- [2] <http://www.cut-grass.com/cuttree.htm>
- [3] <http://scitech.people.com.cn/BIG5/10719360.html>
- [2] 黃廣森.” 水下可移動機器人之研究.” 國立中山大學機械工程研究所碩士論文(1993).
- [5] <http://www.treehugger.com/renewable-energy/new-rope-climbing-robot-inspects-wind-turbines-better-than-humans.html>
- [6] <http://thefutureofthings.com/pod/6902/serpentine-climbing-robots.html>
- [7] A. Baghani, M. Nili, Ahmadabadi and A. Harati.” Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot (UT-PCR).” Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran(2008).
- [8] H. Kawasaki¹, S. Murakami, H. Kachi, and S. Ueki.” Novel Climbing Method of Pruning Robot.” SICE Annual Conference 2008 August 20-22.
- [9] Z. Y. Yi, Y. J. Gong, Z. W. Wang and X. R. Wang.” Development of a Wall Climbing Robot for Ship Rust Removal.” Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2009 August 9- 12, Changchun, China.
- [9] H. Kim, D. M. Kim, H. J. Yang, K. H. Lee, K. C. Seo, D. Y. Chang and J. W. Kim.” A wall climbing robot with vacuum caterpillar wheel system operated by mechanical valve.” Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots Brussels, Belgium, 2006.
- [10] G. C. Haynes, A. Khripiny, G. Lynch, J. Amoryy, A. Saundersy, A. A. Rizziy, and D. E. Koditschek.” Rapid Pole Climbing with a Quadrupedal Robot.” IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center, kobe, Japan, May 12-17, 2009.
- [11] 陳心睿.” 攀爬機器人之研製與控制.” 國立雲林科技大學電機工程系碩士班碩士論文(2006).
- [12] 陳麗, 王越超, 李斌.” 蛇形機器人研究現況與進展.” 中國科學院瀋陽自

- 動化研究所機器人學重點實驗室, 北京, 2002.
- [13] 孫洪, 劉立祥, 馬培蓀.” 一種新型的攀爬蛇形機器人.” 上海交通大學機器人研究所, 上海, 2008.
- [14] 呂恬生, 張家梁.” 氣動蠕動式纜索爬昇機器人的基本結構.” 上海交通大學機器人研究所, 2000.
- [15] J. S. Koh, K. J. Cho.” Omegabot: Crawling Robot Inspired by Ascotis Selenaria.” IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA.
- [16] S. M. Song, K. J. Waldron and G. L. Kinzel.” Computer-Aided geometric design of legs for a walking vehicle.” Mechanism and machine theory 1985 20(6): 587-596.
- [17] 潘建豪.” 類圓柱體爬昇機之設計與開發.” 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所碩士論文(2004).
- [18] F. Y. Xu, X. S. Wang and P. P. Cao.” Design and Application of a New Wheel-Based Cable Inspection Robot.” IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center May 9-13, 2011, Shanghai, China.
- [19] [http://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%9E%BA%E6%97%8B_\(%E7%B0%A1%E5%96%AE%E6%A9%9F%E6%A2%B0\)](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%9E%BA%E6%97%8B_(%E7%B0%A1%E5%96%AE%E6%A9%9F%E6%A2%B0))
- [20] 卓聰吉.” 水產養殖用多功能微感測器之設計研究.” 國立台灣大學農業機械工程學研究所碩士論文(2000).
- [21] G. Taguchi.” Introduction to quality engineering. ” McGraw-Hill, New York, 1990.
- [22] G. S. Peace” Taguchi Methods: A Hands-On Approach. ” Addison-Wesley, USA, 1993.
- [23] 張季娜.” 田口式品質工程導論. ” 再版, 中華民國品質管制學會出版委員會, 中華民國品質管制學會, 1990.
- [24] 經濟部, 交通部「路燈設計規定」及「交通工程手冊」(1986)(1980)
- [25] L. X. Ma, B. X. Tan, J. Shen, W. Liu and X. M. Ming.” The study of Pole-climbing Robot China.” 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering.