

國立臺灣師範大學機電科技學系
碩士論文

指導教授：陳美勇 博士

機械手臂結合影像系統之控制

Mechanical Arm Control Combined with Image System



研究生：葉傳文 撰

中華民國 一〇一年 七月

國立臺灣師範大學
機電科技學系

碩士論文

機械手臂結合影像系統之控制

葉傳文撰

中華民國一〇一年

摘要

本論文的研究內容為使用機械手臂結合影像辨識系統，取得工作空間中目標物件之座標，以進行物件的抓取或移動。由於機械手臂在現實生活當中的應用存在許多變數，不同的任務下針對物件姿態所能容許的移動方式可能有所限制，例如移動盛水的杯子要避免傾倒的姿勢。一般過去的研究僅強調物件定位的精確度，而並未考慮機械手臂的姿態，有鑒於此，本控制系統會在執行物件的抓取時，依據任務之目的切換不同的控制策略，以符合正確的任務目的與物件擺放姿態。

若要將機械手臂整合影像系統並成功應用於實作，則必須依照工作空間內的變化做出即時的運算，本研究除了利用影像處理進行物件的輪廓與顏色判別外，還配合夾爪上的雷射光模組所投影的光點作為回饋進行定位。在本研究當中所使用的機械手臂具有六軸關節存在運動學冗餘度的問題，因此本研究之系統必須事先進行 D-H 座標系統的順向與逆向運動學分析，推算出三維空間卡式座標系統與機械手臂各關節馬達轉動角度之間的關係，如此一來才能實現快速、靈活與準確的控制。本研究最後成功建立一套通用的多軸機械手臂控制方法，能夠應用到各種類似配置的機械手臂上，透過影像處理分析攝影機接收到的資訊，以應付各種不同的環境下更加複雜的應用與操作。

關鍵詞：機械手臂、影像辨識、D-H 座標系統、逆向運動學

Abstract

In this paper, we propose a general approach to control mechanical arm which combine an image identification system. Obtain the object's coordinate information in workspace, in order to move an object to a desire position. There are many situations when using mechanical arm in reality applications, the object's posture may be restricted in different tasks. Many past studies only emphasized the accuracy of object location, but did not consider the posture of the robot arm. Therefore, our control system will switch to different control strategy according to the purpose of tasks.

Mechanical arm has 6-DOF and can perform highly flexible action, analysis forward and backward kinematics equations from D-H coordinate system. After computed object coordinate, IK solution methods are applied to mechanical arm gripper position control. Finally, the mechanical arm can distinguish between difference figures and colors. Our study hopes to establish a general multi-axis mechanical arm control method which can be applied to mechanical arm with similar configuration. Analysis camera information received through the image processing to meet the more complex applications and operating in different environments.

Keyword : Mechanical arm 、 Vision classification 、 IK solution 、 D-H coordinate system

誌謝

很快地兩年過去了，又到了鳳凰花開高唱驪歌的季節，這代表著碩士生涯即將告一段落，隨之而來的是人生另一個階段的開始，我必須要感謝我的指導教授 陳美勇 老師這兩年來的言教與身教，老師讓我學到的不僅僅只有課業與學術層面上的知識，還有正確的研究觀念與解決問題、克服困難之方法，老師還給予我們許多團體參加競賽或研究專題的機會，讓我在碩士班的這短短兩年之間內培養了研究發現問題、自行解決問題與團隊合作的能力。除此之外更重要的是老師以自身的言教與身教讓我學習到了待人處事的最佳態度，因此老師除了是學業上的良師也是我人生旅途上重要的指標。最後還要感謝口試委員 蔡明忠 博士、林志哲 博士以及 林沛群 博士的協助，給予了我最佳的建議使我的研究以及論文能更為完整嚴謹。

此外也要感謝實驗室的學長、同學與學弟們，在我研究期間能彼此相互扶持勉勵，在研究上能互相討論解決問題，讓我的研究得以更為順利進行，每次報告時給予的建議也奠定了我日後對眾人報告的能力，有幸在求學的生涯裡遇到這群好友豐富了我的研究生生活，因此也期勉實驗室的各位能順利完成自己的目標。

葉傳文

壬辰年·仲夏夜

精密運動控制實驗室

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究動機與目的.....	8
1.4 本論文之貢獻.....	9
1.5 論文架構.....	9
第二章 理論基礎.....	11
2.1 座標系統轉換.....	11
2.1.1 旋轉轉換.....	12
2.2 D-H 座標系統定義.....	12
2.3 數位影像基本定義.....	15
2.4 濾波處理.....	17
2.5 邊緣偵測.....	18
2.5.1 Canny 邊緣偵測.....	22
2.6 影像二值化.....	23
2.7 形態學影像處理.....	23
2.7.1 膨脹與侵蝕.....	24

第三章 系統組成設計與配置.....	28
3.1 機械手臂系統設計目標.....	28
3.2 機械手臂機構設計.....	28
3.3 AI 直流伺服馬達.....	33
3.4 AI 直流伺服馬達控制器.....	36
3.5 影像模組.....	37
3.6 抓取策略切換之特色.....	38
3.7 控制系統流程敘述.....	40
第四章 系統設計原理.....	42
4.1 影像處理.....	42
4.2 投影平面原理.....	44
4.3 機械手臂系統.....	44
4.3.1 順向運動學.....	48
4.3.2 逆向運動學.....	49
4.3.2 垂直抓取法.....	54
第五章 實驗結果與討論.....	56
5.1 物件座標取得.....	56
5.2 機械手臂控制.....	60
5.2.1 定位準確度模擬.....	62
5.2.2 物件抓取實驗.....	64
第六章 結論與未來展望.....	71
參考文獻.....	72

圖目錄

圖1-1	Da Vinci 機械手臂微創手術系統.....	1
圖1-2	PUMA-500 工業用機械手臂系統.....	3
圖1-3	三軸機械手臂.....	4
圖1-4	多軸(六軸)機械手臂.....	4
圖1-5	機械手臂整合影像系統示意圖.....	4
圖1-6	擬人機械手臂關節示意圖.....	5
圖1-7	Pioneer 2 機械手臂移動軌跡圖.....	6
圖1-8	擬人形機械手臂結構圖.....	7
圖1-9	機械手臂幾何分析圖.....	7
圖2-1	空間座標系統示意圖.....	11
圖2-2	座標軸旋轉示意圖.....	12
圖2-3	D-H 座標系桿件示意圖.....	13
圖2-4	立體空間投影至平面示意圖.....	16
圖2-5	灰階值表示圖.....	17
圖2-6	色彩三原色表示圖.....	17
圖2-7	3×3遮罩示意圖.....	18
圖2-8	濾波處理示意圖.....	18
圖2-9	水平、垂直與對角線濾波器.....	19
圖2-10	影像強度與一階、二階微分示意圖.....	20
圖2-11	Sobel 遮罩圖.....	21
圖2-12	(a) Laplacian 遮罩(b)放大權重的 Laplacian 遮罩.....	21
圖2-13	灰階影像直方圖.....	23
圖2-14	集合理論(a)A 與 B 集合(b) $A \cup B$ (c) $A \cap B$ (d) $A - B$ (e) A^c	24

圖2-15	膨脹處理遮罩與平面影像.....	25
圖2-16	膨脹處理示意圖.....	25
圖2-17	侵蝕處理遮罩與平面影像.....	26
圖2-18	侵蝕處理示意圖.....	26
圖2-19	斷開處理示意圖.....	27
圖2-20	閉合處理示意圖.....	27
圖3-1	機械手臂架構示意圖.....	29
圖3-2	(a)底座支架機構圖(b)底座圓盤機構圖.....	30
圖3-3	基座上方支撐架機構圖.....	30
圖3-4	基座下方支撐架機構圖.....	31
圖3-5	下方支臂機構圖.....	31
圖3-6	上方支臂機構圖.....	32
圖3-7	上方支臂延伸桿件機構圖.....	32
圖3-8	夾爪支撐架結構圖.....	33
圖3-9	夾爪結構圖.....	33
圖3-10	伺服馬達外型圖.....	34
圖3-11	伺服馬達連線架構示意圖.....	35
圖3-12	伺服馬達與主控端連線示意圖.....	35
圖3-13	伺服馬達腳位圖.....	36
圖3-14	伺服馬達腳位連接示意圖.....	36
圖3-15	CM-2+控制器圖.....	37
圖3-16	指令包裝架構.....	37
圖3-17	影像模組攝影機示意圖.....	38
圖3-18	正常抓取模式示意圖.....	39
圖3-19	水平抓取模式示意圖.....	39

圖3-20	機械手臂控制系統流程圖.....	41
圖4-1	影像之灰階值分布情形.....	43
圖4-2	機械手臂 D-H 座標系統.....	45
圖4-3	垂直抓取模式示意圖.....	54
圖4-4	垂直抓取模式旋轉角度圖.....	55
圖5-1	工作空間建構之網格點架構.....	56
圖5-2	影像網格之二值化.....	57
圖5-3	網格中心點判定示意圖.....	58
圖5-4	工作空間網格中心點判定示意圖.....	58
圖5-5	(a)原始影像(b)物件提取影像(c)二值化影像(d)邊緣偵測.....	59
圖5-6	物件輪廓放大圖.....	60
圖5-7	封包格式示意圖.....	61
圖5-8	逆向運動學程式架構.....	61
圖5-9	控制程式迴圈架構.....	62
圖5-10	順向運動學之程式.....	62
圖5-11	抓取實驗輸入影像.....	64
圖5-12	黃球物件擷取影像.....	65
圖5-13	(a)二值化後影像(b)邊緣偵測後物件輪廓.....	65
圖5-14	(a)破損之輪廓(b)閉合處理後之輪廓.....	66
圖5-15	物件中心點像素座標圖.....	66
圖5-16	機械手臂待機圖.....	67
圖5-17	預備抓取任務目標.....	68
圖5-18	雷射光點與目標中心點差距.....	69
圖5-19	誤差補償後預備抓取姿態.....	69
圖5-20	機械手臂進行抓取.....	70

圖5-21 目標黃球抓取完成圖..... 70

表目錄

表3-1	機械手臂各關節與 AI 直流伺服馬達配置關係表.....	29
表3-2	Dynamixel 系列 RX 直流伺服馬達規格表.....	34
表4-1	D-H 座標系統參數表.....	45
表5-1	目標點座標位置表.....	63
表5-2	目標點之手臂關節角度表.....	63
表5-3	目標點之座標位置驗證表.....	64

第一章 緒論

1.1 前言

機械手臂是一種以人類的雙手為雛型，模仿真實手部功能的設備，設計目的是用來協助或取代傳統由人力執行的工作。機械手臂與人類相比具有高穩定性與高精確性等優點，並且可以進行長時間的操作，同時在危險性較高的工作環境改由機械手臂作業可降低人員受傷的可能性，因此廣泛的應用在工業加工或搬運等領域上。特別是高科技製造業廠商，裝配零件時需要龐大的人力執行重複性與高精確的操作，因此亟需取代人力的設備，例如富士康計畫要以百萬台的機器人來協助生產線加工以降低人力成本的支出並減少管理的麻煩。國內並有上銀科技等公司長期並大量的投入機器人相關研發且持有許多關鍵技術，在國際市場需求持續不斷之下產業前景相當樂觀。最近十年來在醫療界更進一步發展出機械手臂手術輔助系統，可協助醫生進行精密的微創手術[1]，其準確性的高度發展足可見一斑。

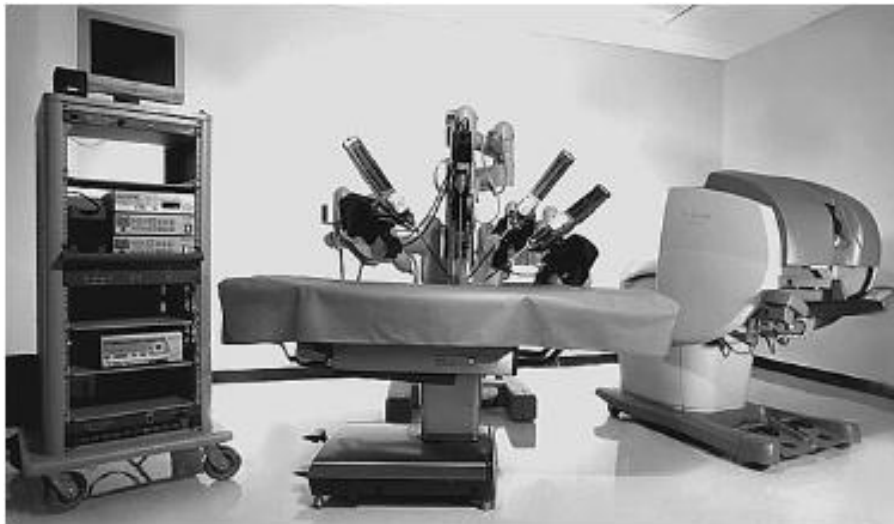


圖 1-1：Da Vinci 機械手臂微創手術系統

一般而言，工廠所使用的機械手臂系統大多是針對特定或重複執行的動作來設計運動路徑或配合已知的物件形狀進行抓取，若要能夠在未知環境中對任意物體進行抓取或移動便要結合影像辨識等感應系統[2]。一組機械手臂

所具有的自由度越多，就代表著能夠進行的動作複雜度就越高，可以呈現更多更靈巧的動作，但是提高手臂自由度所付出的代價就是要應付更複雜的正、逆向運動學分析與較困難的控制法則。

要取得目標物件的位置資訊，最常見的是使用非接觸式(non-contact)的方法避免碰觸物體而產生干擾，而根據所使用的感測器種類可分為主動式與被動式兩種，精密度越高的主動式感測元件其成本、體積與耗能通常會呈現等比級數增加的趨勢；而 CCD 與 CMOS 攝影機等被動式影像元件具有體積小、成本低與低耗能的優點，此外影像輔助最大的特點是可以辨識物件的顏色，在分辨一群相似物件時有更高的鑑別度，因此影像視覺是常見的機械手臂輔助工具。

進行機械手臂的運動控制時，其正、逆運動學轉換是最重要的課題，前者可由各關節角度推算取得手臂末端點座標位置；後者則是由目標位置座標進行轉換，計算手臂末端點欲到達該位置時各關節所需之角度。由於高自由度之機械手臂其逆向運動學方程式為線性相依具有齊性解，因此在控制機械手臂時便要考慮以增加幾何約束(geometric constraint)的方式來減少變數或是使用特殊演算法進行計算。一般而言，求解逆向運動學的方法不外乎代數法[3]、Jacobian 法[4]、類神經網路法[5]與基因演算法等等。本論文是使用代數法的方式，固定某些變數以求得機械手臂逆向運動學的解析解(analytical solution)。

1.2 文獻回顧

在近代工業逐步走向大規模生產與製造時，產生了許多危險且繁重的工作需求，而機械手臂便被發明用來替代傳統的人工作業，這不僅增加了生產效率還減少成本的支出。工業機器人的發明可以追溯到六十年前，George C. Devol 在西元 1954 年設計了全世界第一台工業用機械手臂 Unimate 並成功申請專利。Unimate 的設計用途是將壓鑄製成的工件從生產線中取出並焊接到

汽車車身之上，由於這些製程可能會產生有毒廢氣使工人中毒或是容易在壓鑄的過程中發生意外，因此就產生了機械手臂取代人力的需求。在這之後機械手臂快速發展，其中在西元 1978 年同樣由 Devol 所屬的 Unimation 公司所提出之通用工業機器人 PUMA(Programmable Universal Machine for Assembly)成為了最廣泛運用的機械手臂類型，此種機械手臂具備可程式功能，能夠適應各種不同的工作需求，代表著機械手臂技術已完全成熟發展[6]，而且其配置成為標準的多軸機械手臂設計準則，因此可堪稱為近代工業機器人的始祖，直到現今許多工廠與大學內仍然可以看到其衍生機種的存在。



圖 1-2：PUMA-500 工業用機械手臂系統

一個標準的機械手臂系統是由機械構件、控制器、伺服馬達與外部傳感器所組成。從關節數目上可分為三軸以下與四軸以上(通稱多軸)兩大分類。三軸以下的機械手臂可將動作按照三維座標軸區分，因此控制較為簡單且準確，通常應用於超高精密度的工作平台上[7]。四軸以上的多軸機械手臂對於空間中特定一點的定位具有許多組可能的姿態，在正向、逆向運動學的分析

與控制方法上較三軸手臂複雜許多[8]。



圖 1-3：三軸機械手臂



圖 1-4：多軸(六軸)機械手臂

機械手臂通常會利用外部傳感器作為回授以得知手臂是否按照預定工作路徑運行，近年來由於電腦處理速度的進步日新月異，有能力進行高解析度影像的即時運算處理，利用影像辨識的好處是可以輕易取得更多的工作空間內資訊，足以進行物件的色彩、形狀、姿態分析以及避開障礙物等較為複雜的任務，因此使用影像伺服系統作為回授訊號的機械手臂逐漸形成主流趨勢，吸引了許多專家學者投入進行研究。

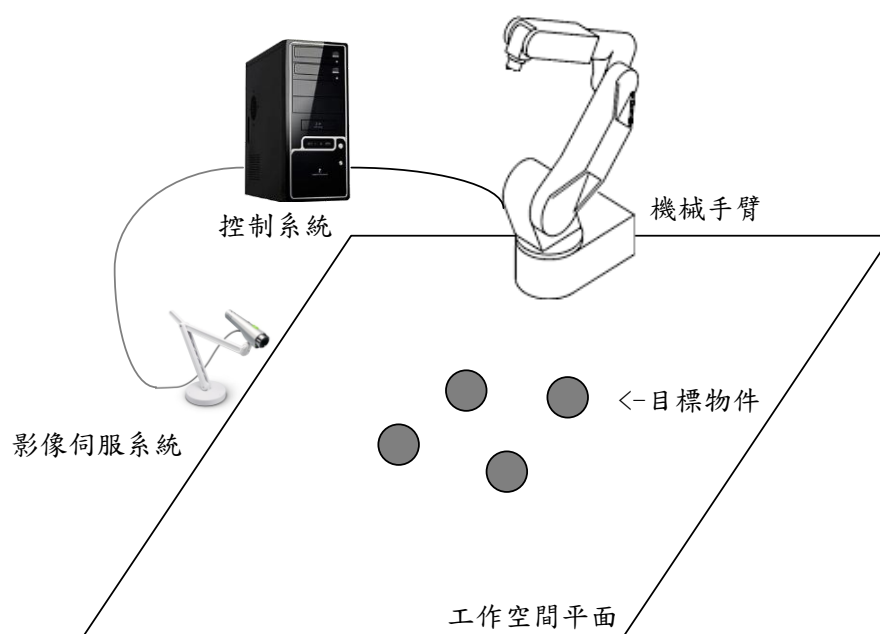


圖 1-5：機械手臂整合影像系統示意圖

接下來本章節將會介紹近年來研究機械手臂與相關應用的論文，以了解如何順利的分析並且控制機械手臂系統。

Mahmoud Tarokh, Mikyung Kim[9]等學者，提出一種快速的逆向運動學計算法，符合擬人機械手臂在作動態路徑規劃與高速移動時所需要的即時運算速度需求。其作法是將逆向運動學分解成兩步驟進行：離線的預處理階段和即時且快速的評估階段。

在預處理階段使用正向運動學，並由空間分解、資料分群、數據產生最佳化以及一個簡單的曲線擬合這些步驟所組成，預處理過程針對不同的機器手臂配置只需要執行一次。其具體作法是先將機械手臂之手腕關節固定不變，如此一來肩膀與手肘關節相對於參考座標 (x, y, z) 便只有一個冗餘度，接下來將肩膀至手腕一線的旋轉角度 ψ 定義為參考變數，以此方法解決逆向運動學當中最難纏的冗餘度問題。接下來將整個工作空間切分為許多的單元格，並隨機產生單元格內可能的手臂姿態製成索引，完成空間的分解。

在線上執行程式時，藉由查找離線階段製成的索引可以快速地找出至腕關節為止的關節角度，最後再調整腕關節來使末端點移動至較精確的位置。

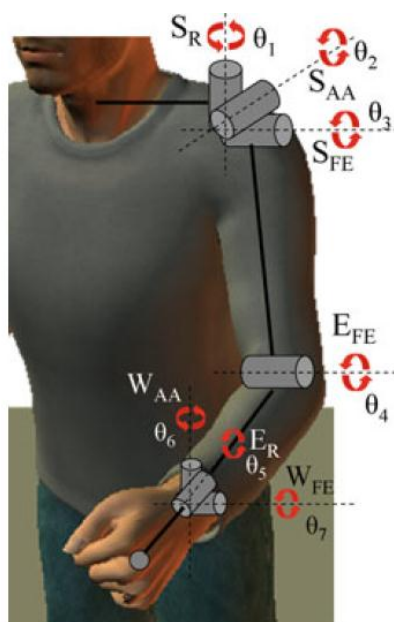


圖 1-6：擬人機械手臂關節示意圖

John Q. Gan, Eimei Oyama, Eric M. Rosales, Huosheng Hu[10]等學者，針對五軸的 Pioneer 2 機械手臂，提出一種完整的解析解算法，能夠控制機械手臂在非結構化(unstructured)的環境中到達任意可接觸的位置。雖然該解析解為針對特殊配置所求得的，僅可用於同樣配置的機械手臂上，但是其解法策略對於其他類型機械手臂的逆向運動學求解仍然有一定的幫助。

此篇論文所提出的算法首先使用 D-H 轉換法，用座標轉換矩陣將此機械手臂的順向運動學完全求得，如此一來就可以知道各關節轉動角度與手臂末端點位置之關係。在這之後使用反三角函數並將矩陣元素做適當分組、移項，分次將 θ_1 至 θ_5 與空間座標之間的關係逐一計算出來。

下圖所示為在該種算法之下，使其作固定高度的圓形移動時，雖然預定的位置受其配置所限制，是機械手臂到達不了的，但是此演算法仍然會得出一個盡可能接近的結果，故此篇論文所提出的方法具有一定的強健性。

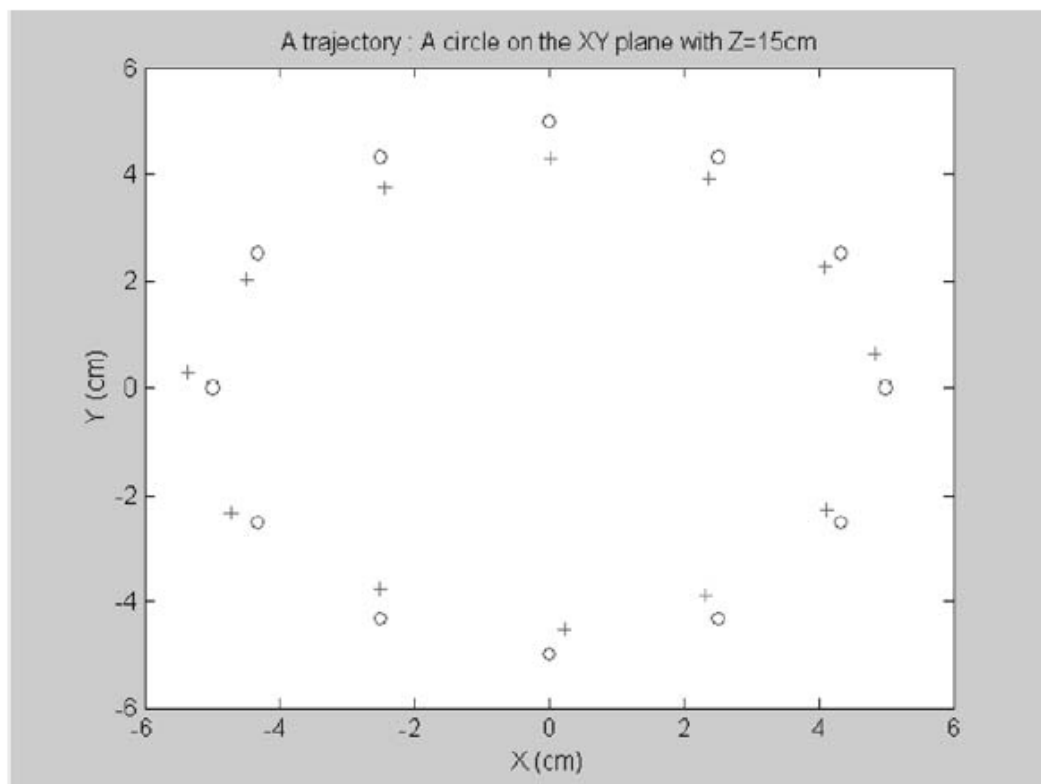


圖 1-7：Pioneer 2 機械手臂移動軌跡圖

Deok Hui Song, Seul Jung[11]等人，利用機械手臂的幾何拘束進行人形機械手臂的逆向運動學分析。使用卡式座標系統參數而省略了方向資訊，由此解析人形機械手臂的所有關節值。此種方法對於擬人形機械手臂結構的關節控制特別有用，此外還模擬使用模糊控制器來進行卡式座標軌跡追蹤任務以研究與驗證此篇論文所進行的運動學分析是否正確。

如下圖 1-8 與 1-9 所示，此篇論文將機械手臂的幾何拘束設定出來後，就可以利用圖中各參數的相對關係來求得所有關節角度與已知參數之間的方程式，利用此方程式作為控制系統的依據。

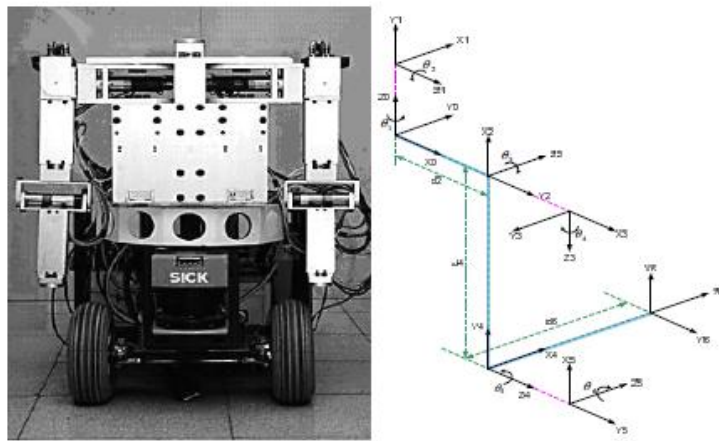


圖 1-8：擬人形機械手臂結構圖

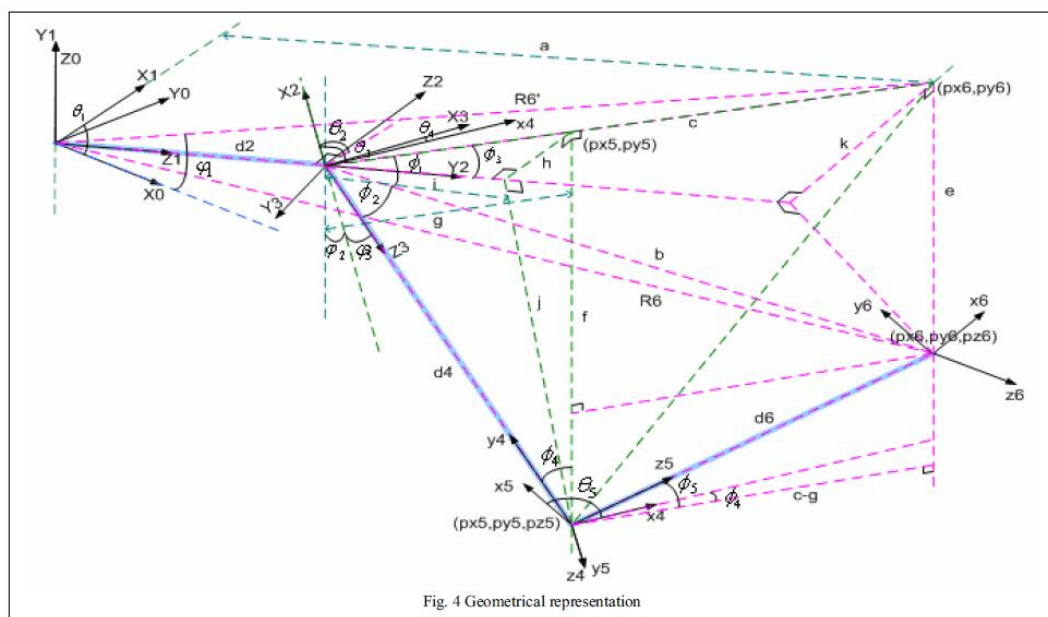


圖 1-9：機械手臂幾何分析圖

1.3 研究動機與目的

雖然機械手臂的發展已經行之有年，不管是工業還是生活當中都可以見到其蹤跡，但一般最常見的機械手臂控制方法大多是對已知物體在已結構化的空間當中進行操作，預先排定其工作路徑；或是有如錄影一般，將動作事先儲存於控制器內，在操作時再依據程式的條件設計依序執行。較少有結合視覺系統作為物件資訊取得與操作期間回饋的設計，這是由於視覺系統受光線的影響甚大，且焦距等參數的校正準確與否對於精準度佔了決定性的因素，因此穩定性還有待商榷。即使有結合了影像模組的機械手臂，其功能也僅止於提供目標座標供機械手臂抓取，較少有利用影像模組做定位精準度的回饋，或者必須利用昂貴的雷射測距儀來進行物件距離的回授偵測。此外如果欲抓取的目標必須要平穩的移動，比如盛水的杯子等等，一般的機械手臂的演算法並不注重夾持物體於操作過程中的水平性，無法滿足特殊的需求。

因此本研究欲開發結合影像模組的機械手臂系統，能夠快速的辨別未知物體之顏色、形狀與位置資訊，同時配合夾爪上安裝的雷射光模組，發射光點至工作空間利用攝影機取得夾爪於空間平面之位置，作為平面定位精準度的回饋。同時對於移動過程有特殊需求的目標，系統能夠切換抓取模式，從單純的點對點路徑移動模式改為夾爪垂直移動模式，確保抓移物體的過程當中目標物件永遠保持水平。根據上述的需求，我們選擇 D-H 座標轉換、IK Solution 法以及影像平面與空間座標轉換法作為機械手臂系統的開發基礎。而本研究所想要達成的目標如下所列：

1. **快速辨識目標資訊**：能夠以影像處理與快速的空間座標轉換法取得目標物的資訊，提供機械手臂執行抓取與移動之用。
2. **夾爪座標定位回饋**：利用夾爪上裝置的雷射光模組，取得移動過程中夾爪的位置，藉以確認機械手臂的實際控制位置與預定目標位置是否有誤差產生。

3. **能夠切換抓取模式**：與一般過去的研究不同，依據目標物件是否有保持水平度的需求，能夠切換抓取模式，確保物件的平穩度。同時若無特殊需求則以一般的點對點移動模式來取得最大工作範圍的優勢。
4. **設備簡單成本低廉**：本研究僅需使用一台攝影機與一組雷射模組配合機械手臂，便可進行目標的擷取與定位的回饋，而機械手臂架構為自行加工，因此比一般市面常見的模組化機械手臂成本低廉許多，必要時也可依需要自行改變機械手臂的長度或馬達等配置，因此應用十分靈活。

1.4 本論文之貢獻

本研究之貢獻為，僅需一組攝影機與雷射模組便可達成目標物件的形狀、顏色與位置資訊的取得，以及機械手臂夾爪位置的回饋，不需要使用昂貴的儀器，而且由於使用解析解處理逆向運動學問題，因此運算時間相當快速。而一般的研究並不會考慮到移動過程的平穩度問題，本研究能夠根據目標物件的需求切換抓取模式，若物件是盛水的杯子或是釋放時需要擺正的物件，可以使用夾爪垂直模式，確保移動過程當中夾爪永遠與地面保持垂直，使物件不會傾倒或溢出內部物體，但垂直模式不可避免的會縮小損失一部份工作空間，因此針對一般無特殊需求的物件還是使用平常的抓取模式以得到最大的工作範圍。

1.5 論文架構

本論文一共分為六章節，各章節內容依序如下。

【第一章】- 緒論

本章節介紹機械手臂的源起與近年來的研究發展，並且敘說本論文的研究動機、目的與貢獻。

【第二章】- 理論基礎

於此章節講解於本研究當中，欲建構之系統架構其基本原理，並以此為

基礎發展後續章節之研究方法。

【第三章】- 系統組成設計與配置

在本章節當中將會介紹機械手臂的整體架構與各項硬體設備規格，以及執行任務時的流程圖。

【第四章】- 系統設計原理

本章節依據第二章中所介紹的基礎理論，應用發展為本論文所使用的研究方法並逐一詳述，共分影像伺服與馬達控制兩部份。

【第五章】- 實驗結果與討論

此章節主要為應用第四章所發展之研究方法，結合影像模組與機械手臂系統進行實驗，並且對實驗結果作討論與分析。

【第六章】- 結論及未來展望

最末章將針對本研究所獲得的成果進行結論，同時敘說此研究之未來發展與期望。

第二章 理論基礎

本章節將講述本研究系統架構所須之基本原理，其中包含了有 D-H 座標系統定義、數位影像處理、影像濾波原理、邊緣偵測原理以及形態學原理，以作為後續章節機械手臂系統設計之基礎原理。

2.1 座標系統轉換[12]

若三維空間中有兩座標系統 $F(F_1, F_2, F_3)$ 與 $G(G_1, G_2, G_3)$ ，而 F 與 G 均為正交座標系。當空間中存在一點 P ，將其座標值分別以兩座標系統表示為 P^F 與 P^G ，如圖 2-1 中所示，此兩座標系間存在一轉換關係，令矩陣 M 定義為 $M_{ij} = F_i \cdot G_j$ ， $1 \leq i, j \leq 3$ ，則點 P 之座標值存在下列轉換關係，可將 G 座標系之座標值轉換至 F 座標系統上。

$$P^F = M \cdot P^G \quad (2-1)$$

反之亦然，若要將 F 座標系上之座標值轉換至 G 座標系則存在一轉換矩陣 M^{-1} 如下式所示，且存在 $M^{-1} = M^T$ 之關係。

$$P^G = M^{-1} \cdot P^F \quad (2-2)$$

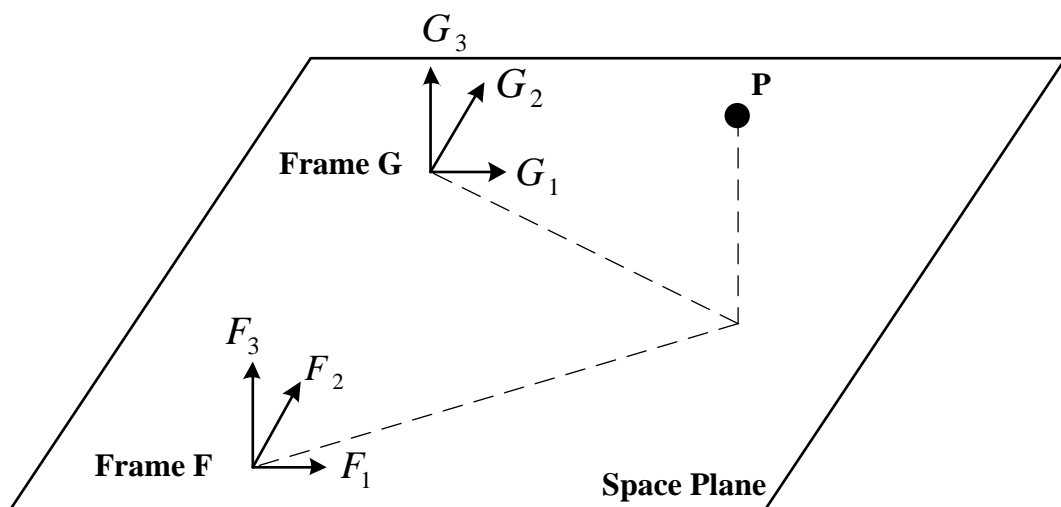


圖 2-1：空間座標系統示意圖

2.1.1 旋轉轉換[13]

若 F 與 G 兩座標系統間僅存在旋轉關係如圖 2-2 所示，則根據轉換矩陣 M 的定義 $M_{ij} = F_i \cdot G_j$ ， $1 \leq i, j \leq 3$ ，可得知兩座標系統間沿著 F_3 軸旋轉的旋轉矩陣 $R(F_3, \theta)$ 如 Eq. (2-3) 所示。並可依此類推得出其餘兩軸旋轉時之旋轉矩陣。

$$R(F_3, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$R(F_2, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$R(F_1, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

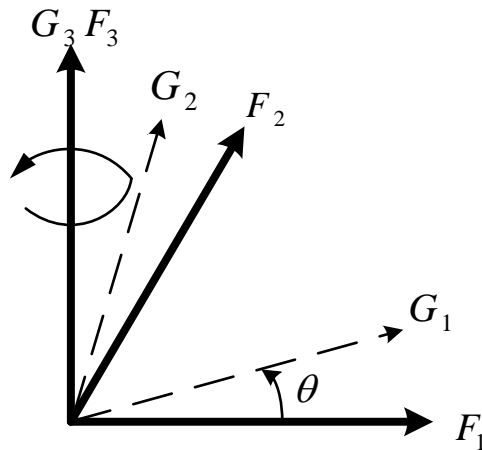


圖 2-2：座標軸旋轉示意圖

2.2 D-H 座標系統定義

D-H(Denavit-Hartenberg)座標系統[14][15]被廣泛的應用在多維連桿座標系統上，其與一般的平面座標系統或是圓柱座標系統不同的是，只要取得

各桿件的四個參數就可以推算出各關節的座標轉換矩陣[16]，藉以解決剛性機械手臂的順向與逆向運動學問題。順向運動學問題是要解決機械手臂各自獨立關節與末端點的位置及方向的關係。若現有兩關節 Joint i 與 Joint $i+1$ ，設兩關節之間的桿件之長度為 a ，連桿旋轉角 α ，連桿偏移長 d ，關節旋轉角為 θ ，連桿之參數關係如圖 2-3 所示。

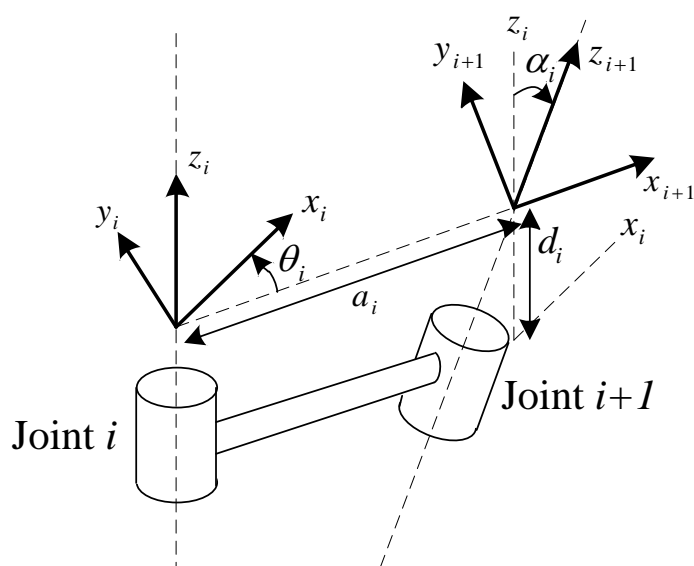


圖 2-3：D-H 座標系桿件示意圖

在 D-H 座標系統中，通常是令關節的旋轉軸為 z 軸，而 x 軸的初始面向永遠保持不變，以操作機械手臂時 x 軸沿著 z 軸轉動的角度作為控制的依據，圖 2-3 中各參數其實際代表意義分別如下：

a_i ： z_i 與 z_{i+1} 兩軸之間沿著 x_{i+1} 平移的距離。

α_i ： z_i 至 z_{i+1} 兩軸之間沿著 x_{i+1} 旋轉的角度。

d ： x_i 與 x_{i+1} 兩軸之間沿著 z_i 平移的距離。

θ ： x_i 至 x_{i+1} 兩軸之間沿著 z_i 旋轉的角度。

因此由上述各參數的意義可以得知，Joint i 座標系統經過一系列的平移與旋轉可以轉換成 Joint $i+1$ 座標系統，而這中間的關係可以利用轉換矩陣來進行計算， z_i 與 z_{i+1} 兩軸之間沿著 x_{i+1} 平移的距離 a_i 其轉換矩陣為：

$$T(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

而沿著 x_{i+1} 軸使 z_i 軸旋轉 α_i 角度後會與 z_{i+1} 軸平行，這兩軸之間相對關係的轉換矩陣為：

$$T(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

接下來則是將 x_i 與 x_{i+1} 兩軸沿著 z_i 軸平移 d_i 的距離的話，將會使 x_i 與 x_{i+1} 兩軸重合，其轉換矩陣如下：

$$T(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

最後沿著 z_i 軸將 x_i 軸旋轉 θ_i 角度的話，將會使得 x_i 軸與 x_{i+1} 軸重合在一起，這兩軸之間的關係可以由轉換矩陣取得：

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

結合 Eq. (2-6)至 Eq. (2-9)共四個矩陣，我們可以取得 Joint i 座標系統與 Joint $i+1$ 座標系統之間的 D-H 轉換矩陣為：

$$A_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

若 $p^{i+1} = (x, y, z, 1)^T$ 為 Joint $i+1$ 座標系當中一點 $p(x, y, z)$ 的位置，則將其代入 Joint $i+1$ 與 Joint i 座標系的轉換矩陣可以得到該點 p 在 Joint i 座標系當中的位置，如 Eq. (2-11)所示。

$$p^i = A_i^{i+1} p^{i+1} \quad (2-11)$$

因此我們可以得知，當機械手臂每增加一軸的自由度，便會出現一個新的轉換矩陣，若要得知機械手臂末端點移動時，相對於原點的座標位置，只要將各項參數代入所有轉換矩陣依序相乘就可以計算出來，這種由機械手臂配置參數與旋轉角度求得特定端點座標的方法就被稱為順向運動學。

2.3 數位影像基本定義

由於本研究結合了影像處理技術來取得工作空間中的目標物件形狀、顏色、距離等資訊，因此有必要事先了解數位影像成像的基本定義。在傳統影像輸出時，是將現實空間中物體表面反射的光線，透過相機的鏡頭投影至投影面，也就是底片上曝光成像，藉此產生平面二維影像[17]。在此時影像的最小組成單位就是底片上的感光分子，但是我們一般不透過高倍數顯微鏡是無法分辨出色彩的單位，因此可以將傳統成像視為連續的類比訊號輸出。而數位影像不同的地方在於成像方式，將原本的底片改為 CCD 或 CMOS 感光元件，利用掃描或是投影成像的方式將原本現實世界的類比影像轉成數位影像；數位影像的解析度(resolution)受到感光元件個數的限制，感光元件越多解析度就越高，影像也更清晰；單一感光元件僅會記錄一種顏色，其單位便

稱為像素(pixel)，像素的多寡影響了數位影像的品質與大小。

在數位影像中，立體空間可以被視為包含深度資訊的三維函數 $g(x, y, z)$ ，經過投影至感光元件後產生平面二維影像，平面影像可以用二維函數 $f(x, y)$ 來表示。參照圖 2-4 所示，可以得知平面影像中 x 、 y 是兩座標軸，代表了平面像素的編號，而在 (x, y) 座標點的函數值 f 就稱為該像素的強度值。

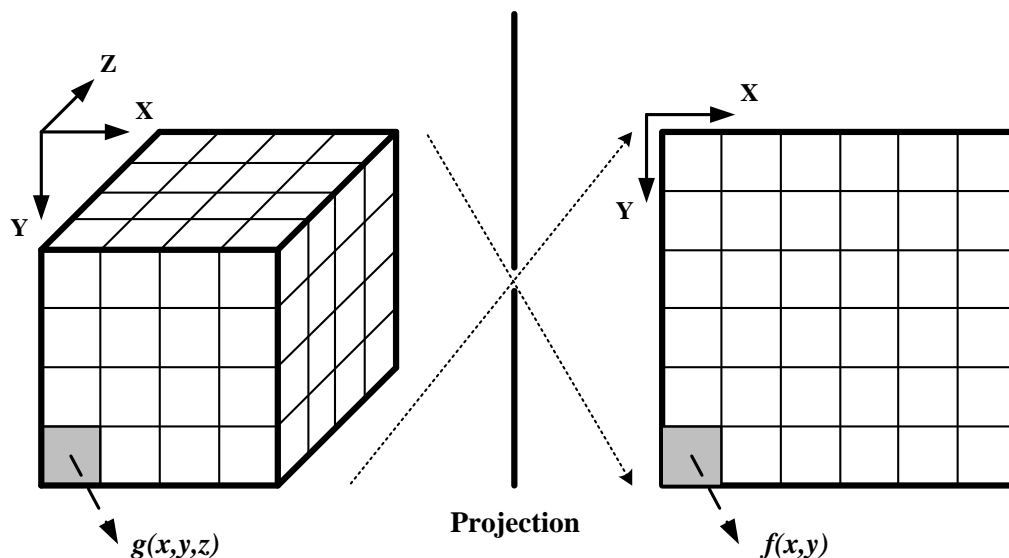


圖 2-4：立體空間投影至平面示意圖

數位影像理論將像素中色彩的有無分成兩大種類：黑白影像與彩色影像。在黑白影像中是以灰階值(gray scale)來表示該像素之強度值(intensity)，其範圍由 0~255 為止，通常令像素之亮度越高其強度值也越高，如圖 2-5 所示。而彩色影像以 19 世紀時英國人 Tomas Young 提出的色彩三原色理論為基礎，令每個像素均包含三種類的強度值，分別是紅色(red)、綠色(green)與藍色(blue)，經過混合調配便可以產生各種顏色，因此又稱為 RGB 色彩表示法，如圖 2-6 中所表示。

因此從基本定義我們可以發現，彩色影像的數據量會是黑白影像的三倍之多。同時越清晰、解析度越高的影像所需要的儲存數據也越多，在我們進行數位處理時需要斟酌影像大小以免影響計算速度。



圖 2-5：灰階值表示圖

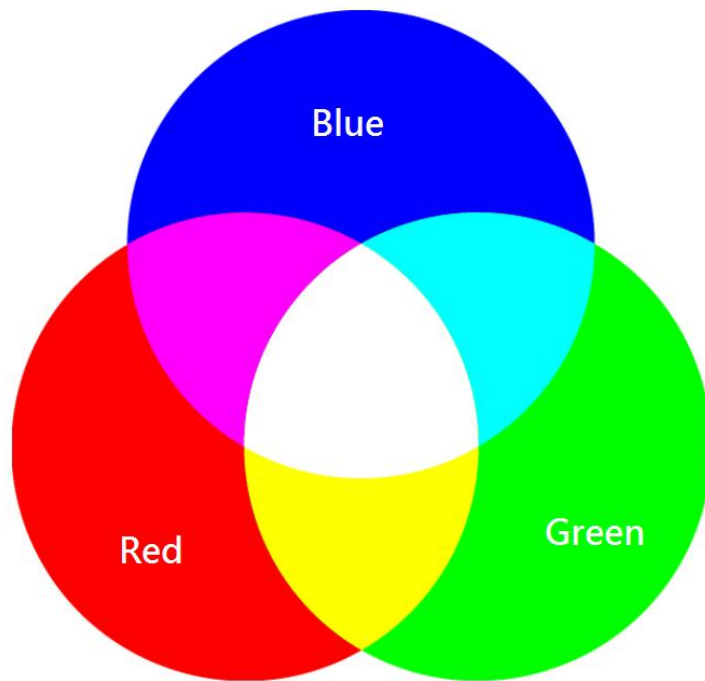


圖 2-6：色彩三原色表示圖

2.4 濾波處理[18]

在影像處理中最常使用到的就是濾波處理技術，其方法為定義一遮罩 (mask) 並決定核心像素與鄰域像素，如圖 2-7 所示。將遮罩內所包含之像素透過預設的函數進行運算，使計算結果取代原有核心像素之值，並將遮罩移至下一點進行計算，重複直至整張影像處理完畢。遮罩的大小依使用者而定，通常會依需求決定適當的大小，一般最常見的是 3×3 的遮罩。而將遮罩與函數結合後便稱為濾波器，在進行濾波處理時遮罩上的所有元素均要與對應的影像像素相乘並將結果相加，取得新的核心像素值，如圖 2-8 所示。透過各

種不同的濾波器我們可以實現模糊化、銳利化、去雜訊、邊緣偵測、侵蝕與膨脹等，各種不同的影像處理手法。

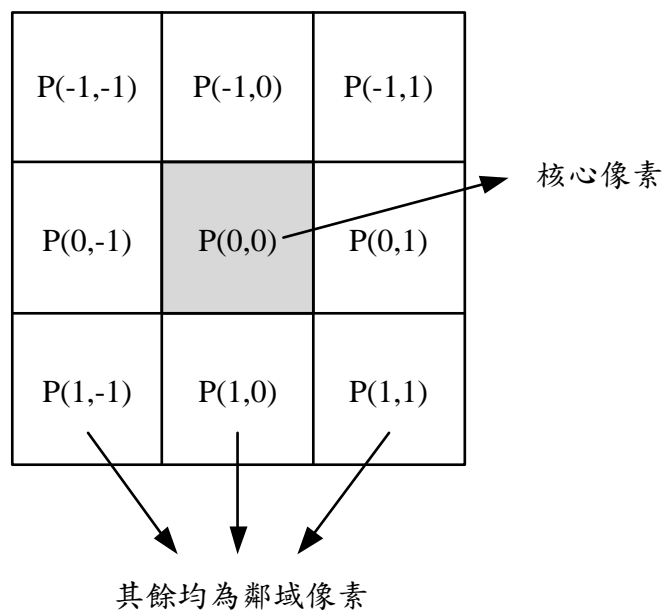


圖 2-7：3×3遮罩示意圖

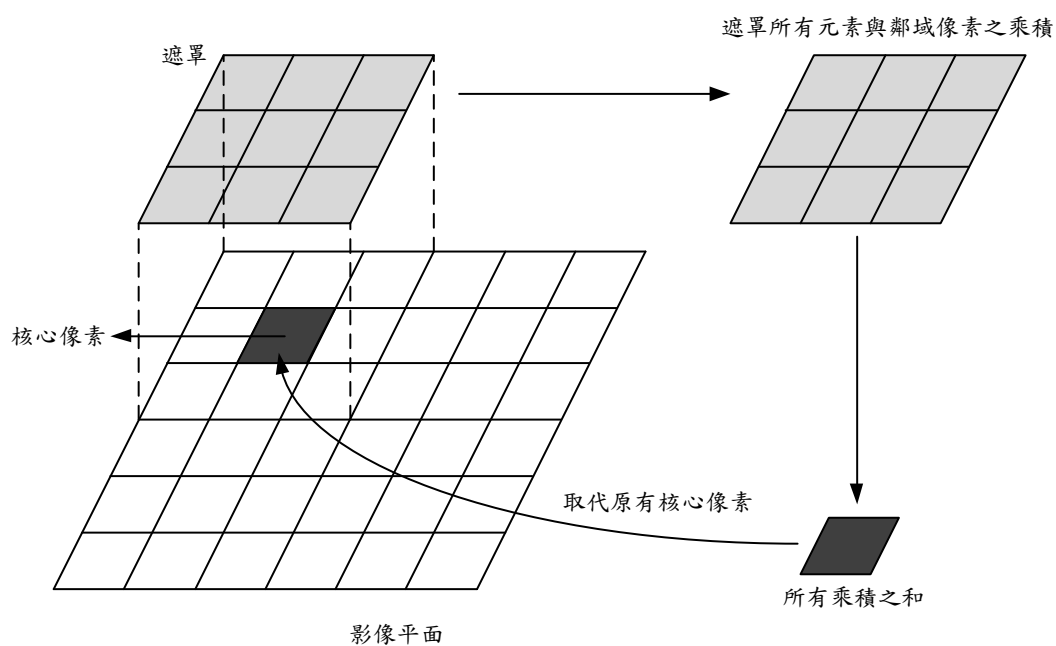


圖 2-8：濾波處理示意圖

2.5 邊緣偵測(Edge detection)

邊緣偵測的技術是濾波處理的一種衍伸方法，其目的主要為尋找平面影像中強度值變化較大的邊界，如此一來就可以區隔影像中的物體與背景，同

時能夠辨識物體的形狀與結構等特徵[19][20]。我們以濾波處理中最簡單的3×3遮罩為例，定義出水平、垂直與對角線濾波器如圖 2-9 所示。此時當濾波器計算至上述特定線條邊緣時強度值會有明顯的變化，而在平滑區域則不會有明顯的改變。

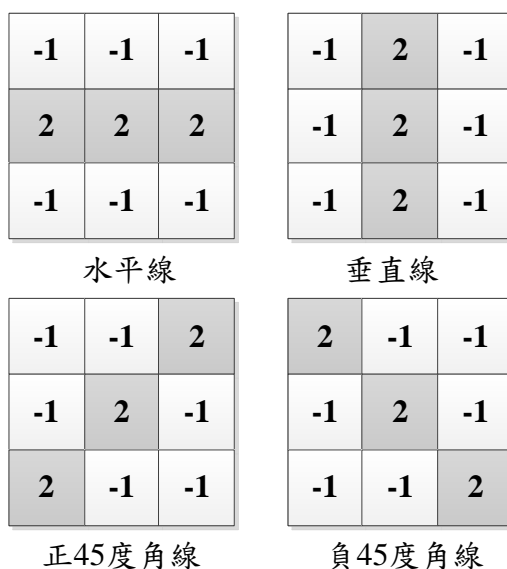
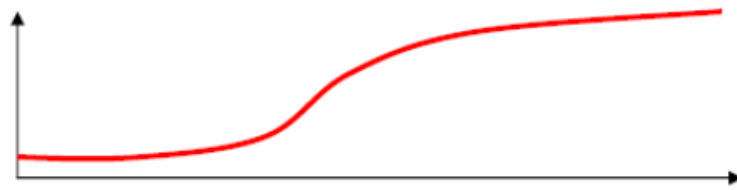
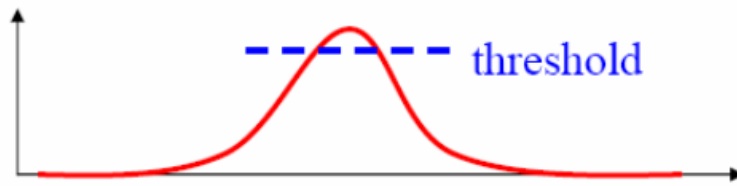


圖 2-9：水平、垂直與對角線濾波器

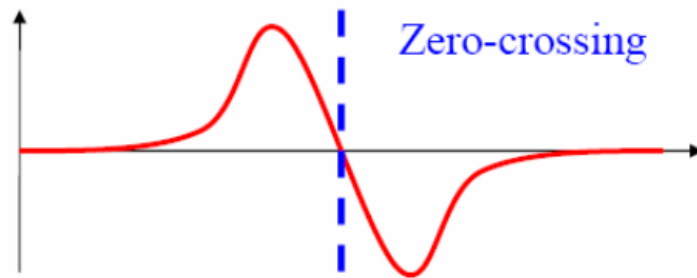
但是上述濾波器僅能偵測特定線條，若要分辨出完整的影像邊緣，最適合的方法是觀察像素間強度值之梯度的變化，因此可以使用一階與二階微分的方法來進行偵測，如圖 2-10 所示。



(a) 影像強度值函數



(b) 一階微分函數



(c) 二階微分函數

圖 2-10：影像強度與一階、二階微分示意圖

在一階微分運算中最常見的是 Sobel 濾波器，其遮罩如圖 2-11 所示，分別將兩遮罩代入影像求得 G_x 與 G_y 值，再將 G_x 與 G_y 代入 Eq. (2-12) 求得梯度值，此時設定一閾值(threshold)，超過閾值則視為邊緣像素，而邊緣的方向可由 Eq. (2-13) 求得。然而使用一階微分計算來判定邊緣點的方法，在強度值呈現斜坡狀變化的邊緣，如漸層式的陰影區域時，由於可能會有許多超過閾值的點，因此濾波所得的邊緣線其寬度將超過一個像素而變得不明顯。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

G_X

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

G_Y

圖 2-11：Sobel 遮罩圖

$$\nabla f(x, y) = |G_X| + |G_Y| \quad (2-12)$$

$$Direction\ of\ \nabla f(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_Y}{G_X}\right) \quad (2-13)$$

在邊緣較和緩的區域，使用二階微分計算較能得到良好的結果，其判定邊緣點的依據是有無產生零交錯點(zero-crossing point)，因此對於邊緣點的偵測更為敏感。最常見的二階微分運算子是 Laplacian 濾波器，其數學含意如 Eq. (2-14)所示，應用在濾波器上則會產生如圖 2-12 的遮罩，有時為了提高偵測率也會將核心像素之權重值予以適度調整。但是微分運算會使影像中的雜訊放大，因此經過兩次微分運算的 Laplacian 濾波器非常容易受到雜訊干擾，在實際運用上會在進行邊緣偵測前加入雜訊濾除的前處理，以得到最好的結果。

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (2-14)$$

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

(a)

1	4	1
4	-20	4
1	4	1

(b)

圖 2-12：(a) Laplacian 遮罩(b)放大權重的 Laplacian 遮罩

2.5.1 Canny 邊緣偵測[21][22]

Canny 在 1986 年提出邊緣偵測濾波器的評比原則，首先他認為良好的濾波器必須在影像的平坦區域產生零響應，並且具備等向性(Isotropy)，也就是濾波器響應不受邊緣方向性影響，同時應該產生單一響應(single response)避免實際邊緣周圍可能產生的雜訊影響偵測結果，為達到以上目的 Canny 發展了往後被稱為 Canny 邊緣偵測的演算法。其運算步驟如下：

1. 首先為了去除雜訊的影響，使用高斯濾波器將影像模糊化，藉此去除單一像素的雜訊，如 Eq. (2-15)與 Eq. (2-16)所示，此時 I 為輸入的原始影像， G 為高斯函數，標準差參數 σ 會影響邊緣偵測器的大小，因此必須視影像細節與需求決定，將原始影像與高斯函數作迴旋積分後可得到平滑的影像 I_g 。

$$I_g = I * G \quad (2-15)$$

$$G = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2-16)$$

2. 由於邊緣可能有各種不同的方向，因此 Canny 偵測法使用四種遮罩分別將水平、垂直與對角線的邊緣偵測出來，對於影像上的每個像素均標示在此像素上之梯度最大值與邊緣方向，如此便產生梯度大小影像。
3. 此時梯度值較高的點較可能為邊緣點，於是我們將這些點定義為邊緣點並令其他像素為 0，再運用滯後閾值的方法定義兩閾值 $T1$ 與 $T2$ ，而 $T1 < T2$ ，若邊緣點大於 $T2$ 則分類為強邊緣像素，若介於 $T1$ 與 $T2$ 之間則分類微弱邊緣像素；閾值設定過高可能偵測不到邊緣，反之閾值設定過低則會偵測到不必要的雜訊。
4. 最後將強邊緣像素周圍的弱邊緣像素合併後完成邊緣線的連接，至此完成 Canny 邊緣偵測的運算。

2.6 影像二值化

一般影像處理在進行形態處理時會先進行二值化的轉換，同時可以取得去除背景或雜訊的效果。黑白的影像其灰階值介於 0~255 之間，因此我們透過設定一閾值將其轉換為僅由 0 與 1 組合而成的平面陣列。如圖 2-13 所示，此影像之像素主要集中成兩群集，透過指定閾值的方法，我們便可以把兩群集區分開來或是濾除掉，令閾值為 T ，二值化處理可表示為 Eq. (2-17) 之方程式。

$$I \begin{cases} 1 & \text{if } I \geq T \\ 0 & \text{if } I < T \end{cases} \quad (2-17)$$

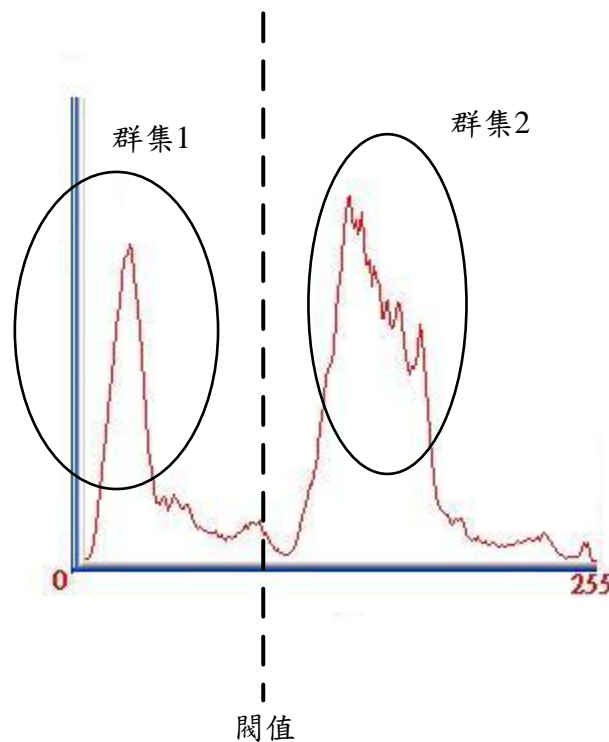


圖 2-13：灰階影像直方圖

2.7 形態學影像處理(Morphology)

在影像處理中的形態學[23]最主要是利用遮罩與數學中的集合理論將平面影像作型態的處理，取得區域間斷開或閉合的效果，此時會用到膨脹與侵蝕等處理，而形態學的基礎是集合理論，因此於本節介紹各種集合如圖 2-14

所示。(a)為 A 與 B 集合；(b)為兩集合之聯集；(c)為兩集合之交集；(d)為兩集合之差集；(e)為 A 集合之補集。

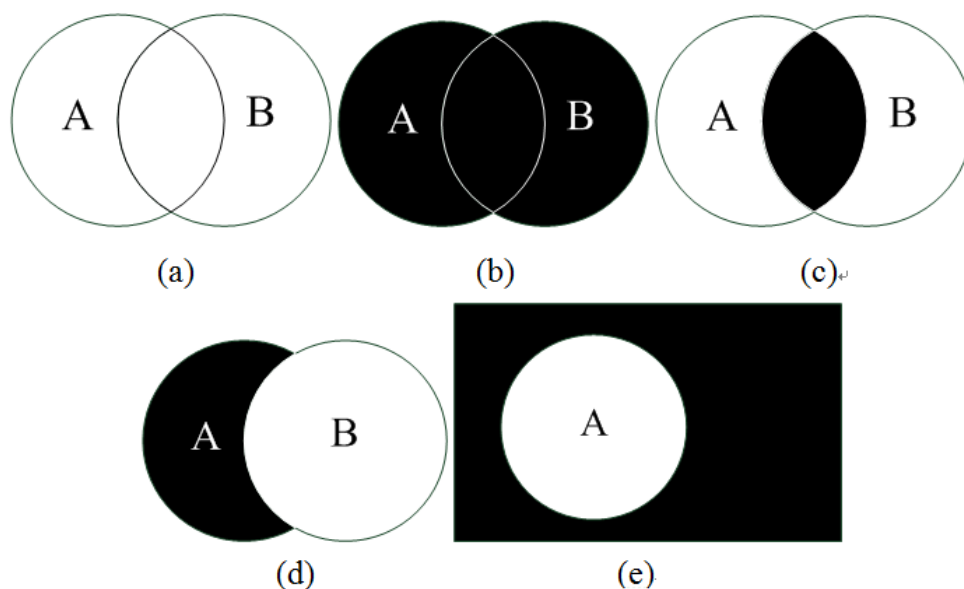


圖 2-14：集合理論(a)A 與 B 集合(b) $A \cup B$ (c) $A \cap B$ (d) $A - B$ (e) A^c

2.7.1 膨脹與侵蝕

膨脹(Dilation)處理可以被視作數位邏輯當中的 OR 運算，也就是集合理論當中的聯集；首先定義一遮罩並且令其強度值為 1 的元素集合為 A 集合，平面影像經過二值化處理後需經膨脹處理的像素令為 B 集合，如圖 2-15 所示。當遮罩的核心像素偵測到 B 集合中的元素時兩者進行聯集，則平面影像中的物件將會膨脹使其產生輪廓平滑的效果，如圖 2-16 所示，進行此膨脹運算的方程式可表示為 Eq. (2-18)的形式。

$$A \oplus B = \{x + w \mid x \in A, w \in B\} \quad (2-18)$$

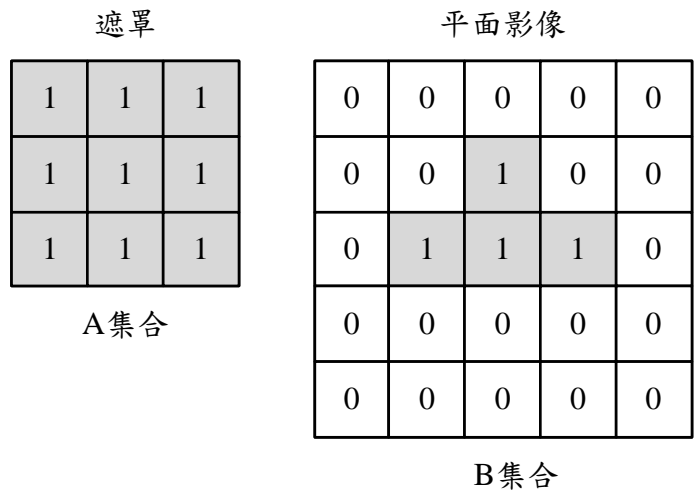


圖 2-15：膨脹處理遮罩與平面影像

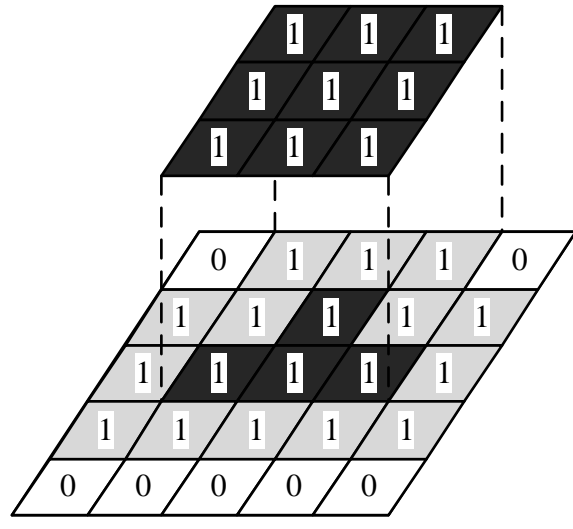


圖 2-16：膨脹處理示意圖

而侵蝕(Erosion)處理可以被視為數位邏輯當中的 XOR 運算，當利用侵蝕遮罩對平面影像進行侵蝕處理時可以使影像中的物件結構收縮或斷開，其原理是利用遮罩的 A 集合與影像的 B 集合進行比對，兩集合如圖 2-17 所示，當遮罩與平面影像完全重合時，令此時遮罩之核心像素對應之平面像素為 1 其餘為 0，直至整張影像比對完畢為止，侵蝕過程如圖 2-18 所示，而進行侵蝕處理之方程式可表示為 Eq. (2-19)。

$$A \ominus B = \{w \in A \mid B_w \subseteq A\} \tag{2-19}$$

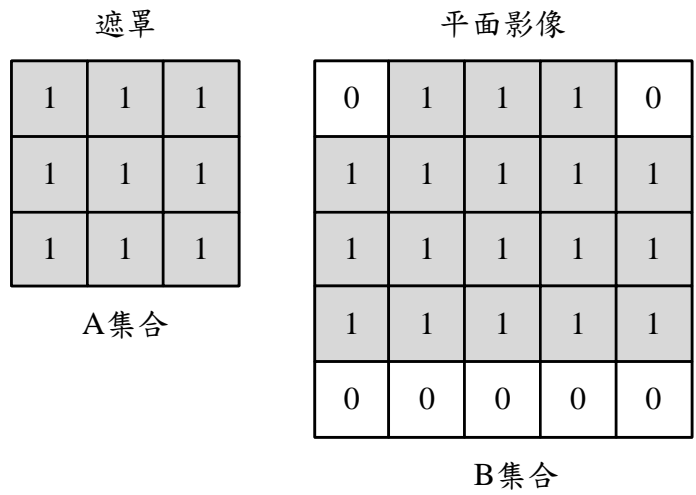


圖 2-17：侵蝕處理遮罩與平面影像

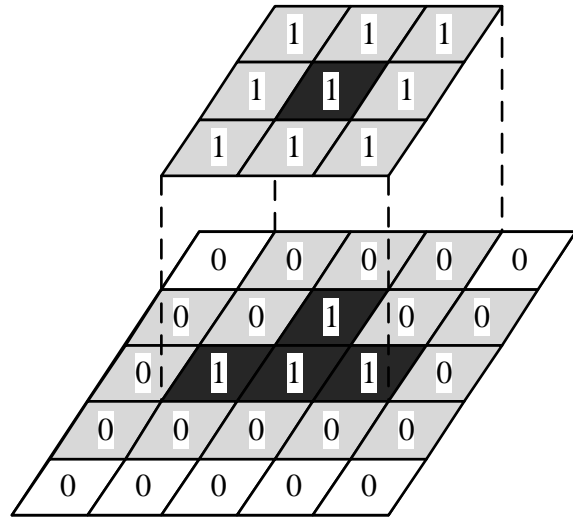


圖 2-18：侵蝕處理示意圖

運用膨脹與侵蝕兩種技術，我們可以成功的實現將影像中物件的斷開 (opening)或閉合(closing)等特殊處理[24][25]。以斷開為例，是先將影像進行侵蝕處理使結構收縮在進行膨脹使邊緣平滑化，如圖 2-19 所示，而其表示式 $A \circ B$ 如 Eq. (2-20)所示。相反的，閉合處理則是先進行膨脹使兩原本分離的兩區域結合之後再進行侵蝕，可以使原本的不連續處連接起來，如圖 2-20 所示，而其表示式 $A \bullet B$ 如 Eq. (2-21)所示。

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \tag{2-20}$$

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \tag{2-21}$$

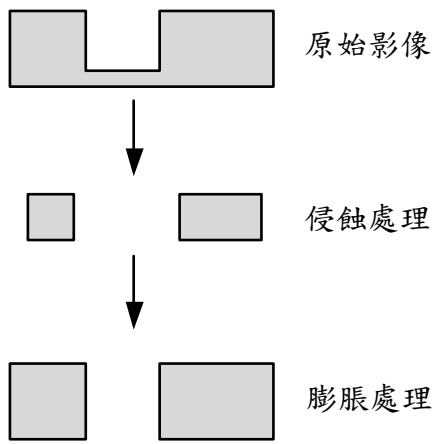


圖 2-19：斷開處理示意圖

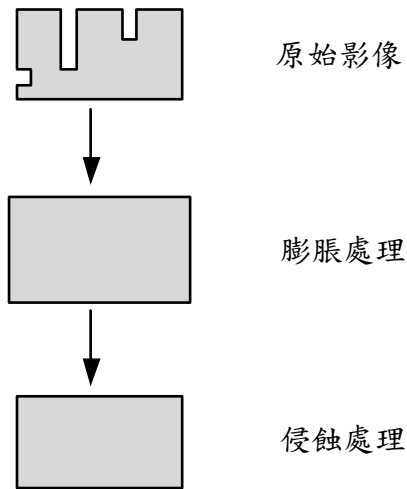


圖 2-20：閉合處理示意圖

除了斷開與閉合之外，利用不同的膨脹與侵蝕組合或者改變遮罩的形狀，還可以達到濾除雜訊、邊緣偵測、線條化、骨架化等等各種不同的特殊效果。

第三章 系統組成設計與配置

在本章節當中主要闡述本研究當中，所使用的機械手臂系統主體架構與硬體設備規格介紹，以及系統執行任務時流程。在硬體組成介紹方面共有外部機構設計、AI 直流伺服馬達、伺服馬達控制卡以及影像模組。

3.1 機械手臂系統設計目標

本論文的研究目的是欲設計一組結合影像視覺的機械手臂系統，使其能夠在任意空間當中取得目標物件的形狀、顏色、位置等資訊，以供機械手臂判斷進行抓取，因此經過應用第二章所介紹的各項基礎理論，本研究預定達成以下目標：

1. 快速辨識目標資訊。
2. 夾爪座標定位回饋。
3. 能夠切換抓取模式。
4. 設備簡單成本低廉。

3.2 機械手臂機構設計

本研究中使用的機械手臂架構為自行設計，配合 AI 直流伺服馬達組合而成，共具有六軸自由度以及以夾爪來執行抓取的動作，較靠近基座的 Joint 1 與 Joint 2 為了具備較高的出力能夠支撐手臂伸長時產生的力矩，因此為雙馬達的配置，而其他 Joint 則為單馬達配置。此外較靠近末端的 Joint 不需要強大的扭力，所以在配置上使用較小型號的馬達以減少重量與節省成本，機械手臂的各關節與馬達配置如表 3-1 所示，總共使用了九顆 AI 直流伺服馬達。組裝完成之後的機械手臂架構就如同圖 3-1 所示。

表 3-1 機械手臂各關節與 AI 直流伺服馬達配置關係表

關節(Joint)	馬達個數	馬達型號
0	1	RX-64
1	2	EX-106
2	2	RX-64
3	1	RX-28
4	1	RX-28
5	2	RX-10

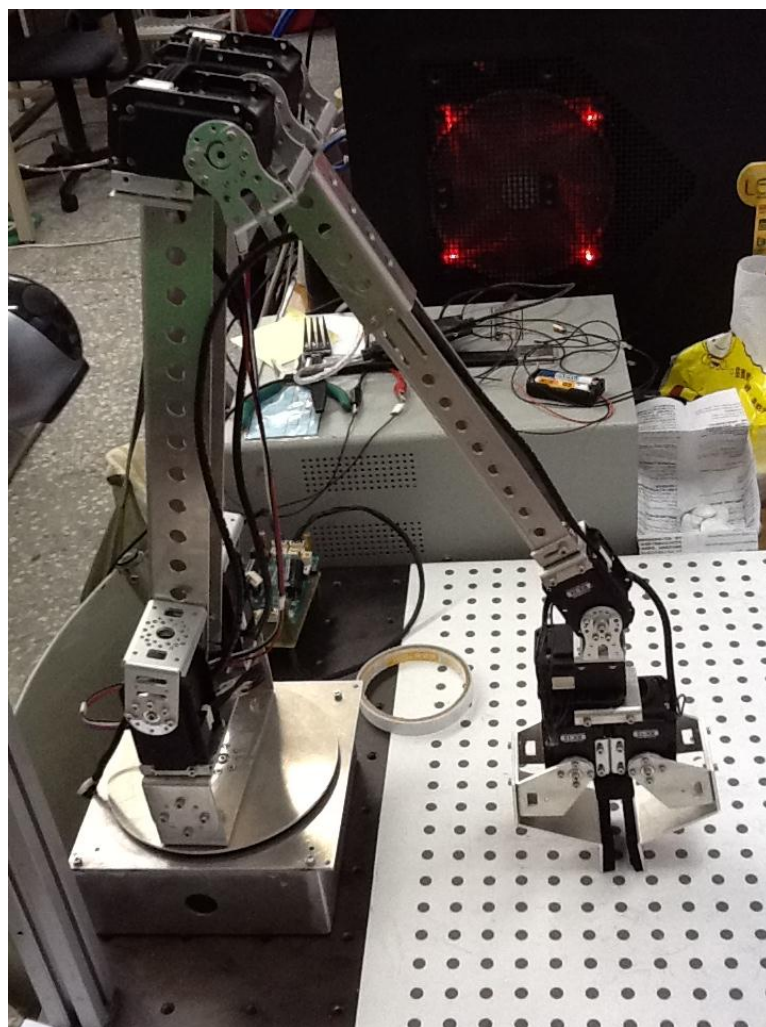


圖 3-1：機械手臂示意圖

機械手臂其各組件加工製作時需要以 Auto CAD 進行設計，設計圖展示如下。圖 3-2 之(a)與(b)分別為底座支架與圓盤之結構圖，其功用為安裝 Joint 0 之馬達並使基座能夠旋轉增加工作範圍。

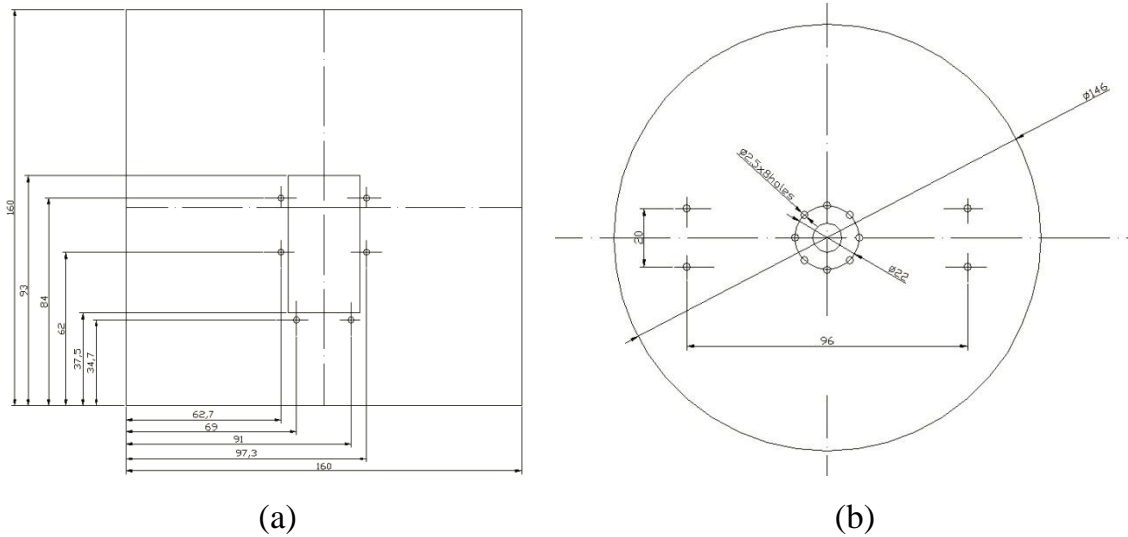


圖 3-2：(a)底座支架機構圖(b)底座圓盤機構圖

圖 3-3 與圖 3-4 分別為基座上方與下方的支架機構圖，其功用為支撐 Joint 1 並排配置的伺服馬達，並且支架之間以呈圓環分布的螺孔配置來組合，因此可依情況需要改變 Joint 1 的傾角，使機械手臂的運用更加靈活。

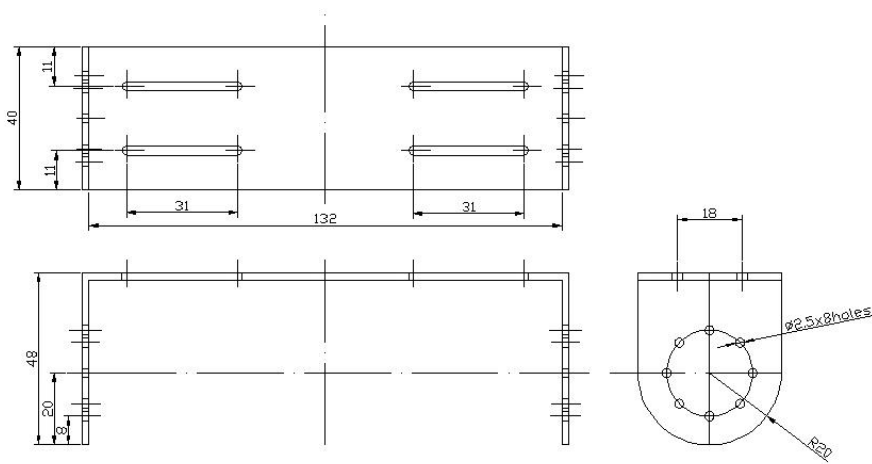


圖 3-3：基座上方支撐架機構圖

延伸桿件以滑套形式嵌於主桿件中，因此重量比起固定式桿件要輕一些，同時也不易造成應力變形。

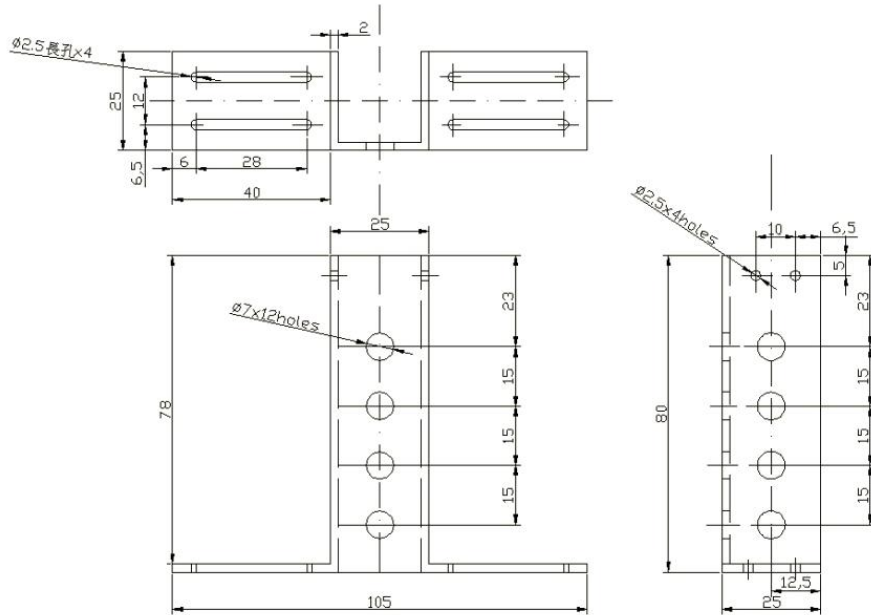


圖 3-6：上方支臂機構圖

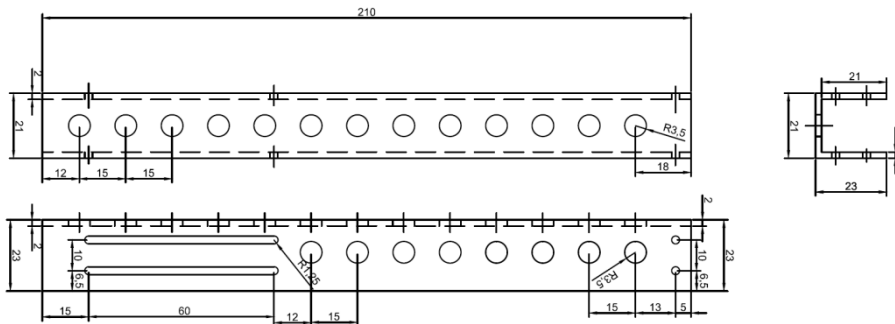


圖 3-7：上方支臂延伸桿件機構圖

圖 3-8 與圖 3-9 分別為夾爪支撐架與夾爪本身的結構圖，夾爪是依靠兩個 RX-10 伺服馬達帶動，以並排向內的方式合攏抓取物體。夾爪支撐架設計的目的是可依需求更換不同大小的夾爪，不必從馬達端拆卸，避免還要額外校正馬達的刻度，如此一來若任務的目的改變即可靈活變換夾爪配置。而夾爪採取向內傾斜的方式是為了能夠同時以尖端夾取細小片狀物體，並善用後端較大的空間固定圓形或方形等大型物體。

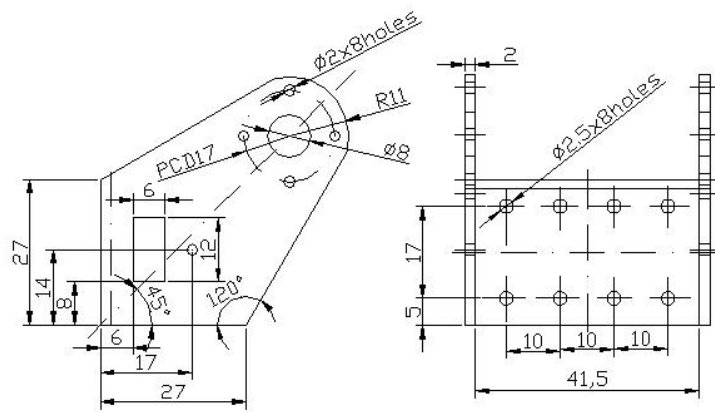


圖 3-8：夾爪支撐架結構圖

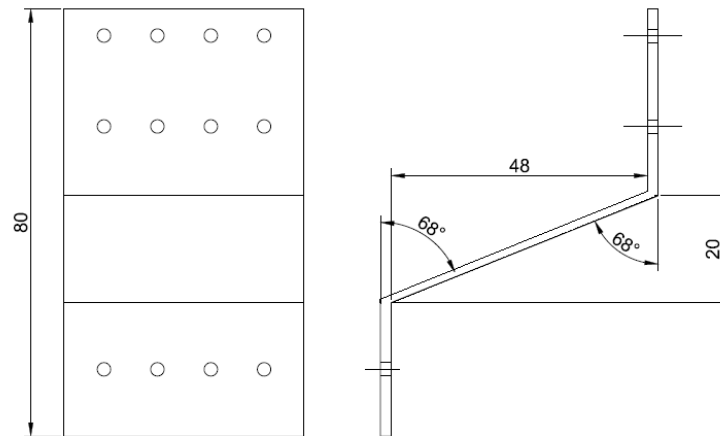


圖 3-9：夾爪結構圖

3.3 AI 直流伺服馬達

本研究中所使用的馬達製造商為 ROBOTIS 公司，型號為 Dynamixel 系列 AI 直流伺服馬達。Dynamixel 代表的意義是一種新型的智慧驅動器概念，整合了減速機構、控制器、驅動器以及主機連線功能的模組。我們依據軸關節的需求共使用四種不同型號的馬達，分別為 EX-106、RX-64、RX-28 與 RX-10。型號越大的馬達除了最大扭力增高之外，其負載電壓也隨之提升，各馬達的外型如圖 3-10 所示。而其各自的相關詳細規格則如同表 3-2 所列。



圖 3-10：伺服馬達外型圖

表 3-2 Dynamixel 系列 RX 直流伺服馬達規格表

馬達名稱	EX-106	RX-64	RX-28	RX-10
重量(g)	154	125	72	64.5
尺寸(mm)	40.1 x 65.3 x 50.1	40.2 x 61.1 x 41.0	35.6 x 50.6 x 25.5	35.6 x 50.6 x 25.5
減速比	1/184	1/200	1/193	1/193
使用電壓(V)	18.5V	18.5V	18.5V	12V
最大扭矩 (kgf.cm)	107	52	37	13
轉速(rpm)	91	64	85	54

Dynamixel 系列伺服馬達之間的連線採取的是離菊鏈式(Daisy Chaining)連結架構，如圖 3-11 所示。這種連結方式的特點是匯流排先連接第一個裝置，在連線下一個裝置，以此類推而不論順序，裝置之間的辨別以 ID 設定

做為依據。此種配置的優點是通訊協定較為簡單，因為匯流排在同一時間內僅允許單一裝置進行傳輸資料。

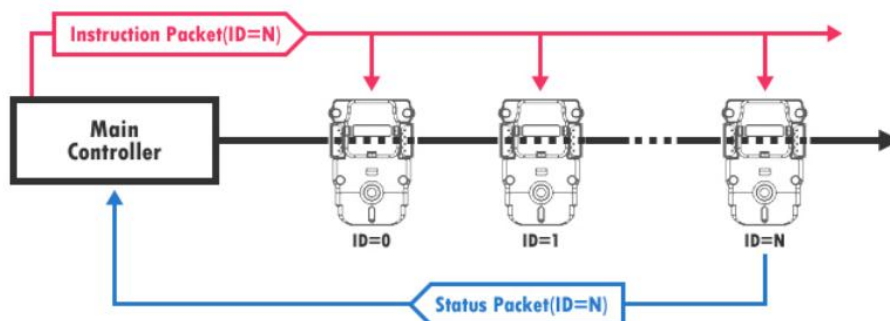


圖 3-11：伺服馬達連線架構示意圖

Dynamixel 伺服馬達在與電腦主控端進行連線時，可以藉助專用的 Dynamixel-only 控制卡控制，也可透過 USB 轉接頭由電腦直接進行控制，但透過電腦主控端直接進行控制時必須使用專用的通訊協定，伺服馬達才有辦法讀取訊號進而作動，其連線示意圖如圖 3-12 所示。

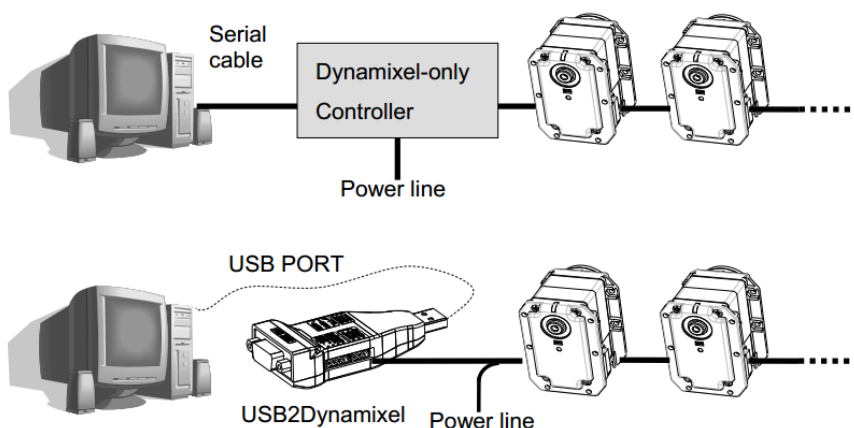


圖 3-12：伺服馬達與主控端連線示意圖

Dynamixel 伺服馬達的腳位共分四組，Pin 1 與 Pin 2 分別為接地與電源輸入，而 Pin 3 與 Pin 4 則用來傳輸伺服馬達的轉動與速度訊號，相對的兩馬達間腳位是上下相反的，如圖 3-13 所示，因此連結時需要特別注意避免短路，馬達之間相互連結時的線路示意於圖 3-14 中表示。

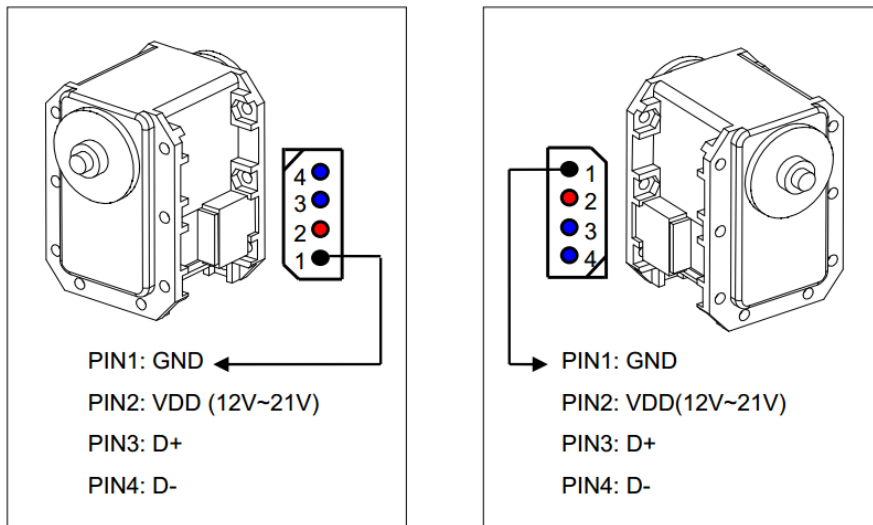


圖 3-13：伺服馬達腳位圖

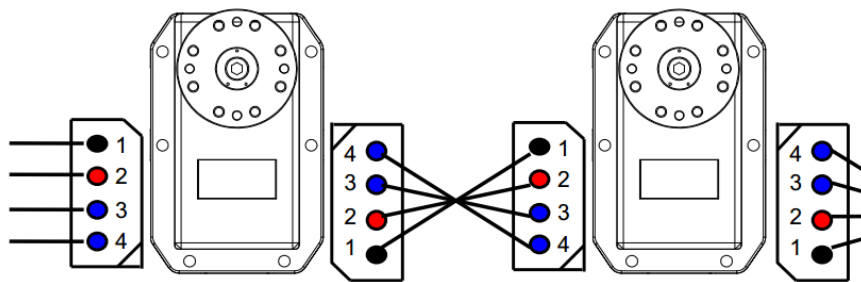


圖 3-14：伺服馬達腳位連接示意圖

3.4 AI 直流伺服馬達控制器

本研究中所使用的控制器同樣為製造商 ROBOTIS 公司所出品的 Dynamixel CM-2+ 控制器，控制卡上共有 8 個連接埠，每個連接埠皆可以雛菊鏈式架構最多連結 8 個伺服馬達，因此控制卡本身最高可以同時連結 128 個伺服馬達，控制卡如圖 3-15 所示。

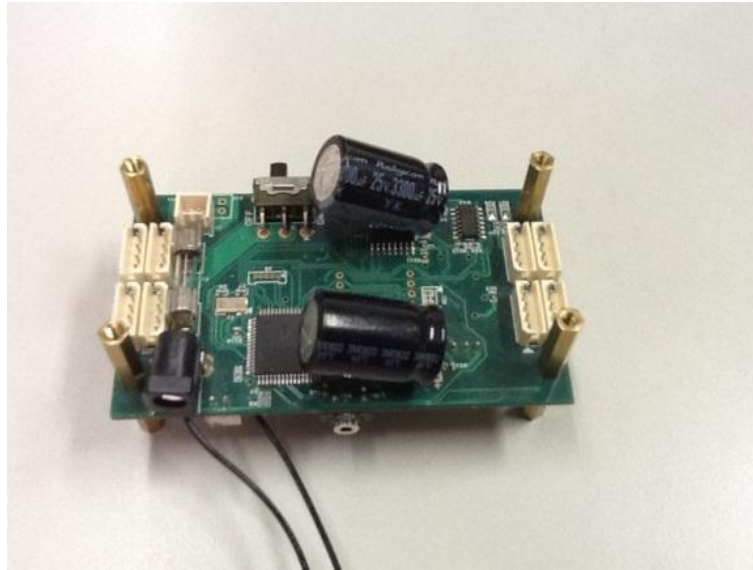


圖 3-15：CM-2+控制器圖

控制卡與伺服馬達之間需要透過通訊協定將訊號以指令包裝(Instruction Packet)的方式傳輸，才能夠順利的控制各伺服馬達，指令包裝的架構如圖 3-16 中所示。其各自代表意義於下方列出：

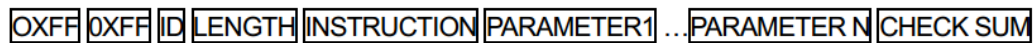


圖 3-16：指令包裝架構

0XFF：重複兩次代表通知指令之封裝開始。

ID：指定控制的伺服馬達 ID，從 0 至 253 為止(0X00 至 0XFD)。

LENGTH：封包的參數長度資訊，用以得知參數個數。

INSTRUCTION：代表此封包傳輸的命令種類。

PARAMETER：若封包命令中需要參數則於此位址提供。

CHECK SUM：將封包總長加總，藉以驗證封包是否受損。

3.5 影像模組

理論上解析度越高之攝影機能夠呈現越詳細的目標資訊，所取得的物件座標位置也越準確，但其價格也較為高昂，故需在成本與實用性兩者作出取捨。我們經過多方考量後，在價格與需求間取得平衡，選用的影像模組為

Logitech 公司所出產的 V-UAX16 型號 Webcam，其動態影像解析度最高可達 640 x 480 像素，而靜態照相解析度則可達到 130 萬畫素品質，並具有自動對焦功能，其外觀如圖 3-17 所示。

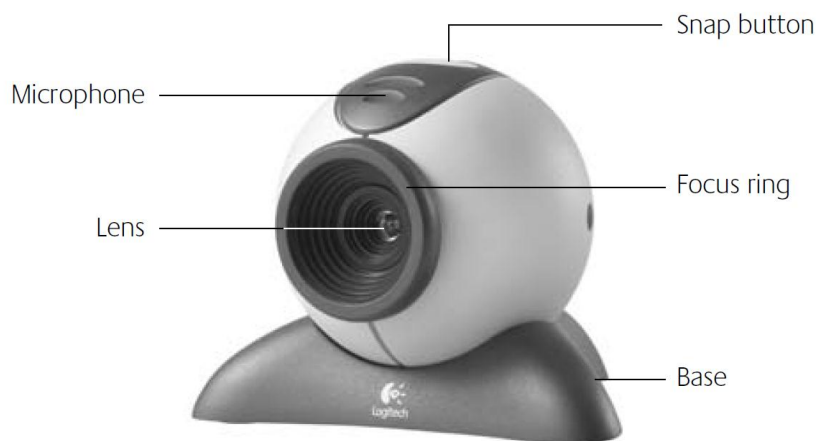


圖 3-17：影像模組攝影機示意圖

3.6 抓取策略切換之特色

本研究的目的除了致力於目標偵測與物件抓取之外，對於有特別需求如不能傾倒或特定擺放姿勢之物體，將會改變演算法策略，使夾爪部位永遠與地面保持垂直以符合要求。

如圖 3-18 所示，在一般情況下對於抓取姿勢沒有要求，系統會使用正常模式的 IK Solution 法，直接求取當夾爪到達目標點 $p(x, y, z)$ 時的各關節角度，因此在移動的過程當中並不會考慮夾爪的垂直傾斜問題，此種控制法以得到最大的工作範圍為目的，能夠最有效率的使用機械手臂。

當欲夾取的目標需要保持水平狀態時，系統則會切換使用夾爪垂直模式的 IK Solution 法，計算當 Joint 4 到達目標點 $p(x, y, z)$ 正上方時的各關節角度，使夾爪與 Joint 4 之間永遠保持垂直狀態，如圖 3-19 所示，如此一來在移動的時候目標物件會永遠保持水平狀態，但是採取這種模式的代價就是減少機械手臂的工作空間，因為 Joint 4 至夾爪之間的連桿必須永遠保持垂直，

增加了幾何限制，使得機械手臂的最大工作範圍減少 d_5 的長度，是使用此種夾取策略的缺點，因此除非有必要，系統仍然會以正常模式的 IK Solution 法進行計算。

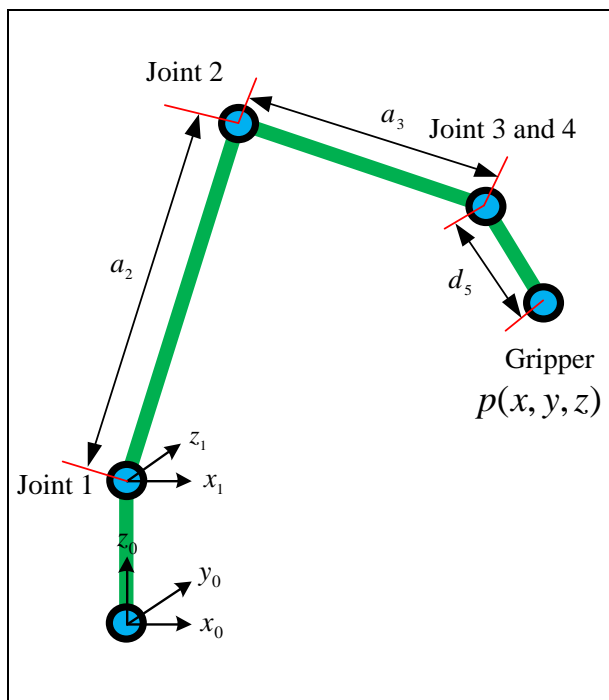


圖 3-18：正常抓取模式示意圖

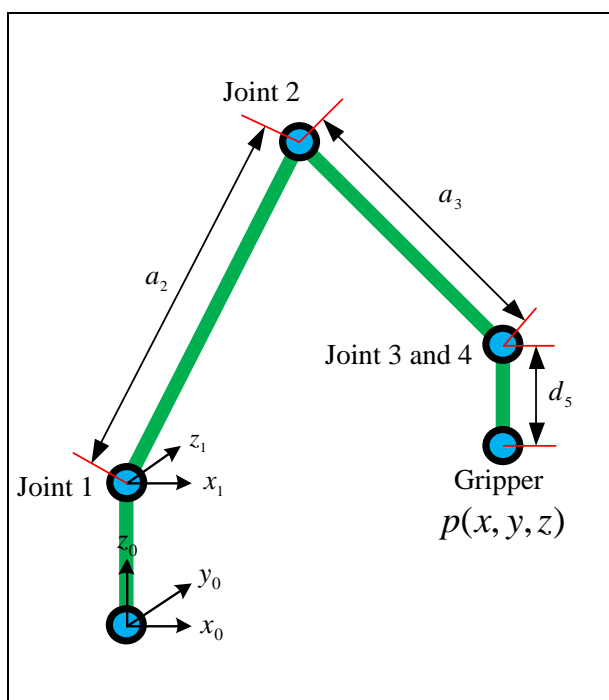


圖 3-19：水平抓取模式示意圖

3.7 控制系統流程敘述

本研究中機械手臂控制系統之整理流程如圖 3-20 所示，總共分七個階段，各階段過程詳述如下列出。

1. 投影平面建構階段：校正相機各項參數後，使用攝影機事先擷取工作空間影像，並建立立體空間投影至影像平面之轉換，以便後續階段偵測到物體之後得知其空間當中相對攝影機之座標位置。
2. 影像擷取階段：透過攝影機擷取操作時工作空間內影像，並透過有線傳輸至電腦內進行後續計算。
3. 影像處理階段：利用各種影像處理如二值化，邊緣偵測等得知目標物件之輪廓，並利用事先建構好之投影平面來計算物件的位置資訊，之後並依目標物件的任務目的判定抓取模式。
4. IK Solution 計算階段：得知目標物件資訊後規劃移動之路徑，並以逆向運動學法求解機械手臂欲移動至目標點時各關節角度值之解析解，提供機械手臂系統控制之用。
5. 操作機械手臂階段：利用 LabVIEW 程式撰寫控制法並透過通訊協定直接由晶片卡端傳輸控制訊號操作機械手臂。
6. 夾爪回授階段：觀察夾爪上安裝之雷射光模組所發射的光點是否落於目標輪廓之內，以判別機械手臂夾爪所目前所在位置，以提供補償移動量之參考。
7. 抓取物件階段：確定夾爪回授正確後即可執行抓取動作，完成任務目標。

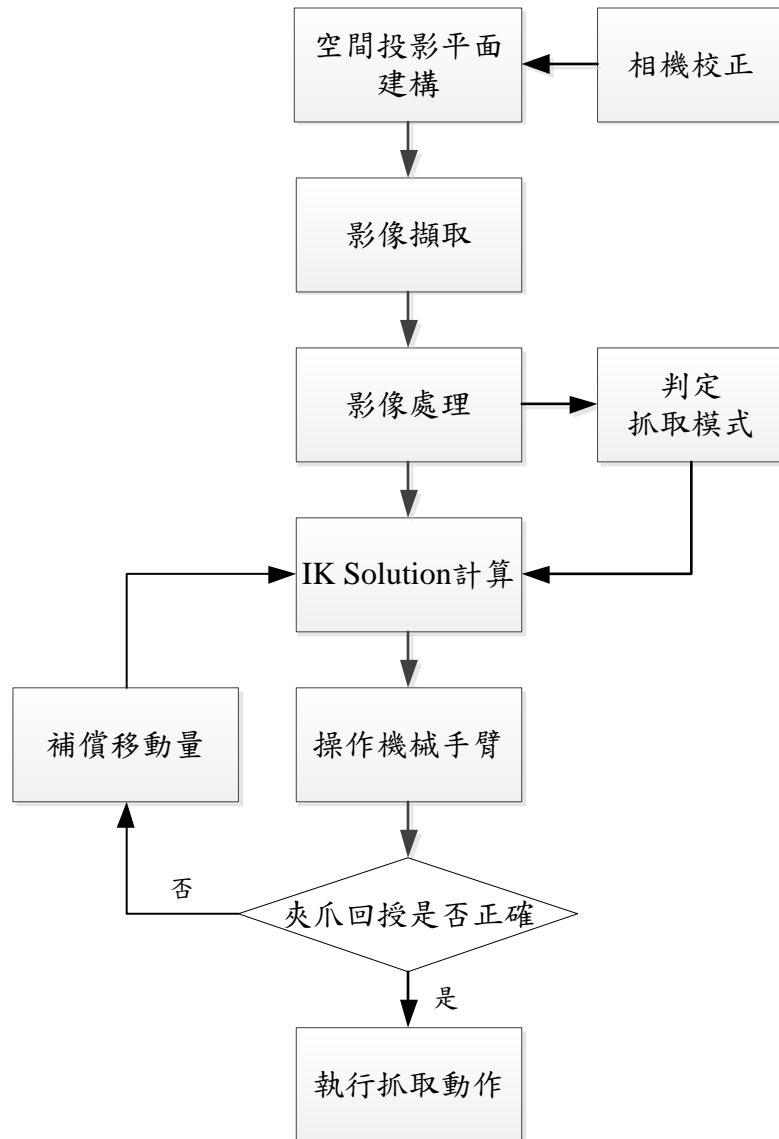


圖 3-20：機械手臂控制系統流程圖

第四章 系統設計原理

在本章節當中根據第二章所提到的基礎理論，將機械手臂系統執行流程中所使用的實驗方法逐一詳述。本系統共分為兩大部分，第一部分為影像伺服系統，其中包含影像的前處理以及利用投影平面判別目標物件的座標資訊。第二部分為機械手臂之順向、逆向運動學之推導，用以計算控制機械手臂時的伺服馬達旋轉參數，得以規劃機械手臂操作時的路徑。

4.1 影像處理

A. 提取物件

由於本研究目標是取得目標物件之座標資訊，因此有必要將物件之影像從背景當中提取出來，並且濾除其他非任務目標之物件避免干擾，進行提取時我們使用 HSV 色彩空間來過濾，根據任務目標所指定的顏色選擇色相(hue)區間之閾值，如此一來便能完成目標物件之提取。

B. 灰階處理

在第二章理論基礎時我們提到，彩色影像所需的儲存量是黑白影像的三倍，因此完成提取目標物件之後為了提升運算速度並方便之後的影像處理，我們對影像作灰階化的處理。

C. 邊緣偵測(edge detection)

若要將目標影像中物件的輪廓偵測出來，我們介紹過許多種邊緣偵測演算法，包括 Sobel、Laplacian 以及 Canny 等，各有各的優缺點。在本研究使用偵測較為全面且強健的 Canny 演算法來進行邊緣偵測，此種演算法可以自由地調整閾值來取得較好的結果，因此較能取得最佳的輪廓。

D. 二值化

二值化能夠簡化影像並且方便我們進行之後的形態學影像處理，進行二值化運算時最重要的就是設定適當的閾值，而閾值的大小則依影像像素之分

布而定，如圖 4-1 所示，若群集 1 屬於背景或雜訊像素之集合，群集 2 為物件像素之集合，則可利用處於兩者之間的閾值將兩者區分開來，再令屬於物件之群集其像素值為 1，其餘為 0，就可成功的將物件進行二值化，而閾值設定的好壞會影響物件形狀的完整度。

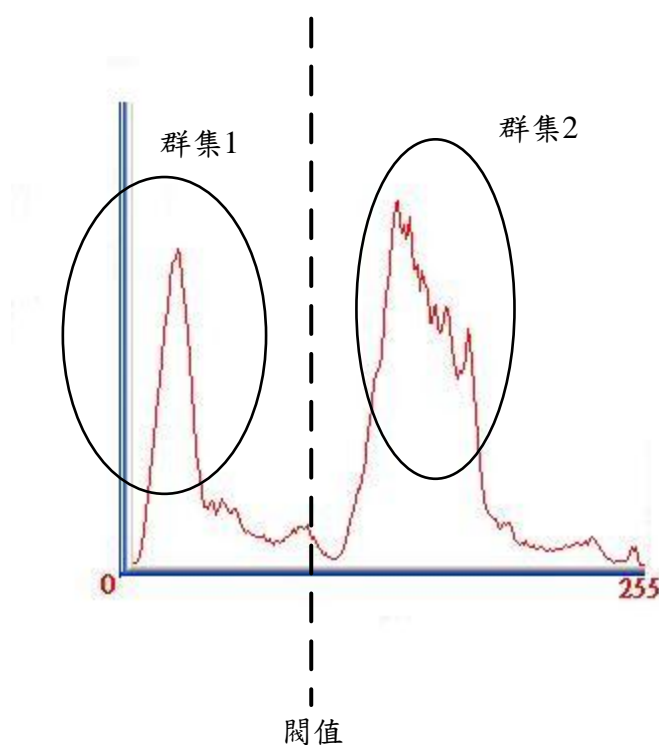


圖 4-1：影像之灰階值分布情形

E. 形態學影像處理(Morphology)

影像形態學可依照不同的目的利用遮罩將物件之影像進行膨脹或是侵蝕等處理，使用形態學處理一方面可以產生濾除雜訊的效果，另一方面也可強化邊緣偵測之效果，將膨脹與侵蝕交互搭配使用也可產生其他效果，在本研究中使用形態學處理之主要目的是將經過邊緣偵測與二值化處理後得到的物件輪廓可能破損區域還原成封閉的輪廓，因為實驗過程中若受到光線的干擾或是閾值設定不當時，可能會導致輪廓失真或破損，此時利用形態學處理便能修補這類失誤。

進行修正時先將邊緣影像進行膨脹處理將原本斷掉的線條修復起來，之

後再使用相同的遮罩進行侵蝕處理將膨脹物件還原至原始大小，此時便可得到封閉的物件輪廓，需要注意的是此種方法僅能修補一定大小之缺口，過於破損的輪廓無法成功回復，需要改變之前的影像處理調整閾值來修正取得的輪廓大小或是使用其他的方法。

4.2 投影平面原理

本研究中使用的投影平面原理，其理念是先將攝影機擷取到的機械手臂之工作空間影像，以一預先建構之網格點模型將影像空間進行索引化處理，稱之為網格索引。

由於我們已知網格點模型其各點的現實空間位置，因此將擷取到的空間影像作影像處理求得各網格點中心於影像內的像素位置之後，即可於系統中建立一組影像平面像素座標與空間平面實際座標關係之索引，以此索引可於後續實驗過程中做為參考座標。

當實驗中取得物件於影像中之位置後，即可由物件之中心點其像素位置與鄰近網格點之像素位置使用內插法求得目標物件於現實空間平面上的座標資訊，進而提供機械手臂以逆向運動學進行動作路徑規劃之計算。

4.3 機械手臂系統

本研究所使用的機械手臂系統，藉由第二章中所介紹的 D-H 座標系統建構出空間座標與機械手臂之軸座標系統之間的轉換關係，並以此為根據推導順向與逆向運動學。D-H 座標系統中每一關節間只要經過兩次的平移與旋轉即可轉換成下一關節之座標系統，而這之間的轉換可以透過 D-H 轉換矩陣來完成，並且具有疊加關係，因此若機械手臂的關節數越多，欲推算末端點夾爪之位置所需使用的座標轉換矩陣就越多，計算也就更加繁複。本研究所使用機械手臂的 D-H 座標系統配置如圖 4-2 所示，為一組六軸關節式機械手臂，其中最後一軸為夾爪轉動軸，因此在推算時需要計算前五軸之座標轉

換矩陣，各軸關節的 D-H 座標系統參數如表 4-1 中所示。

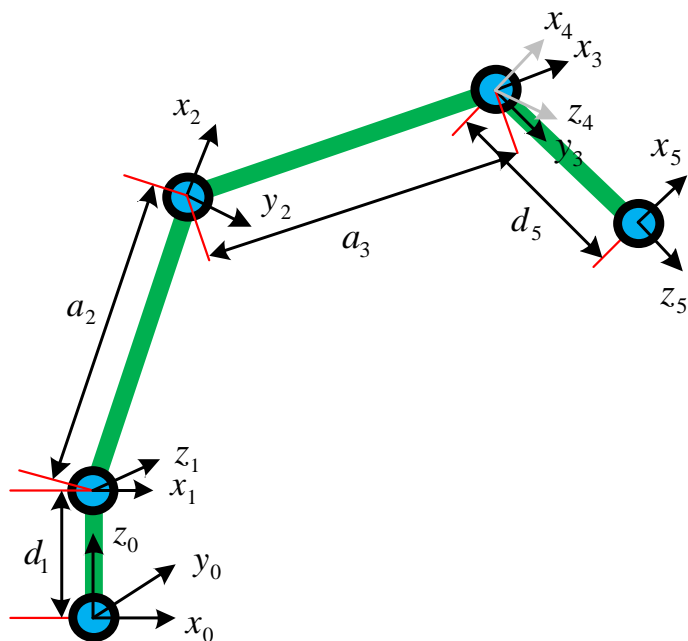


圖 4-2：機械手臂 D-H 座標系統

表 4-1：D-H 座標系統參數表

關節	a_i	α_i	d_i	θ_i
0	0	0	0	0
1	0	-90°	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	0	-90°	0	θ_4
5	0	0	d_5	θ_5

根據表 4-1 中所提供的參數，我們可以利用第二章中的原理將各桿件之座標轉換矩陣求出，Joint 0 至 Joint 5 之座標轉換矩陣如 Eq. (4-1)至(4-5)所示。

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$A_3^4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$$A_4^5 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

其中 a_2 、 a_3 、 d_1 、 d_5 為已知參數， c_i 為 cosine 函數、 s_i 為 sine 函數。

則 Joint 0 與 Joint 2 至 Joint 5 之間各轉換矩陣 A_0^2 、 A_0^3 、 A_0^4 、 A_0^5 各分別代表 Joint 2 至 Joint 5 與原點之相對關係，其轉換矩陣各分別如 Eq. (4-6)至(4-9)所示。

$$A_0^2 = A_0^1 A_1^2 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & a_2 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & a_2 s_1 c_2 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & d_1 - a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$A_0^3 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -c_1 c_2 s_3 - c_1 s_2 c_3 \\ s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ -s_2 c_3 - c_2 s_3 & s_2 s_3 - c_2 c_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

$$\begin{bmatrix} -s_1 & a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_2 c_3 - a_3 c_1 s_2 s_3 \\ c_1 & a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_2 c_3 - a_3 s_1 s_2 s_3 \\ 0 & d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_2 c_3 - a_3 c_2 s_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_0^4 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 c_4 - c_1 s_2 s_3 c_4 - c_1 c_2 s_3 s_4 - c_1 s_2 c_3 s_4 & s_1 \\ s_1 c_2 c_3 c_4 - s_1 s_2 s_3 c_4 - s_1 c_2 s_3 s_4 - s_1 s_2 c_3 s_4 & -c_1 \\ -s_2 c_3 c_4 - c_2 s_3 c_4 + s_2 s_3 s_4 - c_2 c_3 s_4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -c_1 c_2 c_3 s_4 + c_1 s_2 s_3 s_4 - c_1 c_2 s_3 c_4 - c_1 s_2 c_3 c_4 \\ -s_1 c_2 c_3 s_4 + s_1 s_2 s_3 s_4 - s_1 c_2 s_3 c_4 - s_1 s_2 c_3 c_4 \\ s_2 c_3 s_4 + c_2 s_3 s_4 + s_2 s_3 c_4 - c_2 c_3 c_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_2 c_3 - a_3 c_1 s_2 s_3 \\ a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_2 c_3 - a_3 s_1 s_2 s_3 \\ d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_2 c_3 - a_3 c_2 s_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
A_0^5 &= A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 A_4^5 \\
&= \begin{bmatrix}
c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 - c_1 s_2 s_3 c_4 c_5 - c_1 c_2 s_3 s_4 c_5 - c_1 s_2 c_3 s_4 c_5 + s_1 s_5 \\
s_1 c_2 c_3 c_4 c_5 - s_1 s_2 s_3 c_4 c_5 - s_1 c_2 s_3 s_4 c_5 - s_1 s_2 c_3 s_4 c_5 - c_1 s_5 \\
-s_2 c_3 c_4 c_5 - c_2 s_3 c_4 c_5 + s_2 s_3 s_4 c_5 - c_2 c_3 s_4 c_5 \\
0 \\
-c_1 c_2 c_3 c_4 s_5 + c_1 s_2 s_3 c_4 s_5 + c_1 c_2 s_3 s_4 s_5 + c_1 s_2 c_3 s_4 s_5 + s_1 c_5 \\
-s_1 c_2 c_3 c_4 s_5 + s_1 s_2 s_3 c_4 s_5 + s_1 c_2 s_3 s_4 s_5 + s_1 s_2 c_3 s_4 s_5 - c_1 c_5 \\
s_2 c_3 c_4 s_5 + c_2 s_3 c_4 s_5 - s_2 s_3 s_4 s_5 + c_2 c_3 s_4 s_5 \\
0 \\
-c_1 c_2 c_3 s_4 + c_1 s_2 s_3 s_4 - c_1 c_2 s_3 c_4 - c_1 s_2 c_3 c_4 \\
-s_1 c_2 c_3 s_4 + s_1 s_2 s_3 s_4 - s_1 c_2 s_3 c_4 - s_1 s_2 c_3 c_4 \\
s_2 c_3 s_4 + c_2 s_3 s_4 + s_2 s_3 c_4 - c_2 c_3 c_4 \\
0 \\
a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_2 c_3 - a_3 c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3 s_4 d_5 + c_1 s_2 s_3 s_4 d_5 - c_1 c_2 s_3 c_4 d_5 - c_1 s_2 c_3 c_4 d_5 \\
a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_2 c_3 - a_3 s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3 s_4 d_5 + s_1 s_2 s_3 s_4 d_5 - s_1 c_2 s_3 c_4 d_5 - s_1 s_2 c_3 c_4 d_5 \\
d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_2 c_3 - a_3 c_2 s_3 + s_2 c_3 s_4 d_5 + c_2 s_3 s_4 d_5 + s_2 s_3 c_4 d_5 - c_2 c_3 c_4 d_5 \\
1
\end{bmatrix} \quad (4-9)
\end{aligned}$$

本實驗欲求之夾爪位置即位於 Joint 5 座標軸上，因此針對 A_0^5 進行推導，

經過化簡得到 Eq. (4-10) 之矩陣。其中 $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 。

$$A_0^5 = \begin{bmatrix}
s_1 s_5 + c_1 c_{234} c_5 & s_1 c_5 - c_1 c_{234} s_5 & -c_1 s_{234} & a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} - c_1 s_{234} d_5 \\
-c_1 s_5 + s_1 c_{234} c_5 & -c_1 c_5 - s_1 c_{234} s_5 & -s_1 s_{234} & a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} - s_1 s_{234} d_5 \\
-s_{234} c_5 & s_{234} s_5 & -c_{234} & d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} - c_{234} d_5 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix} \quad (4-10)$$

4.3.1 順向運動學

若 Joint 5 座標系統原點透過轉換矩陣轉換成 Joint 0 座標系統之座標為 $p(x, y, z)$ ，則其關係可表示為 Eq. (4-11) 所示。因此我們可以得到機械手臂的順向空間座標數學式如 Eq. (4-12) 至 (4-14) 所示。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = A_0^5 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} - c_1 s_{234} d_5 \\ a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} - s_1 s_{234} d_5 \\ d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} - c_{234} d_5 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

$$x = a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} - c_1 s_{234} d_5 \quad (4-12)$$

$$y = a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} - s_1 s_{234} d_5 \quad (4-13)$$

$$z = d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} - c_{234} d_5 \quad (4-14)$$

4.3.2 逆向運動學

逆向運動學的目的是將機械手臂末端點之座標位置，透過座標轉換矩陣逆向求得機械手臂各關節與末端點之相對關係，具體作法於下方逐一推導。首先令順向運動學當中得知的座標轉換矩陣為 Eq. (4-15) 之各參數。

$$A_0^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

將所有參數各自單獨提出並列為 Eq. (4-16) 至 (4-26)，之後即利用此十二項方程式聯立並經過移項轉換求出機械手臂之旋轉角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 。

$$p_x = a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} - c_1 s_{234} d_5 \quad (4-16)$$

$$p_y = a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} - s_1 s_{234} d_5 \quad (4-17)$$

$$p_z = d_1 - a_2 s_2 - a_3 s_{23} - c_{234} d_5 \quad (4-18)$$

$$n_x = s_1 s_5 + c_1 c_{234} c_5 \quad (4-19)$$

$$n_y = -c_1 s_5 + s_1 c_{234} c_5 \quad (4-20)$$

$$n_z = -s_{234} c_5 \quad (4-21)$$

$$o_x = s_1 c_5 - c_1 c_{234} s_5 \quad (4-22)$$

$$o_y = -c_1 c_5 - s_1 c_{234} s_5 \quad (4-23)$$

$$a_x = -c_1 s_{234} \quad (4-24)$$

$$a_y = -s_1 s_{234} \quad (4-25)$$

$$a_z = -c_{234} \quad (4-26)$$

欲求 θ_1 時，令 Eq. (4-16) 與 Eq. (4-17) 化簡為 Eq. (4-27) 與 Eq. (4-28)。

$$p_x = c_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23} - s_{234} d_5) \quad (4-27)$$

$$p_y = s_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23} - s_{234} d_5) \quad (4-28)$$

若 $(a_2 c_2 + a_3 c_{23} - s_{234} d_5) > 0$ 則 θ_1 經過可以經過反三角函數如 Eq. (4-29) 求得。

$$\theta_1 = a \tan 2(p_y, p_x) \quad (4-29)$$

反之，若 $(a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23} - s_{234} d_5) < 0$ 則 θ_1 之值則會如 Eq. (4-30) 所示。

$$\theta_1 = a \tan 2(-p_y, -p_x) \quad (4-30)$$

欲求 θ_3 時，令 Eq. (4-24) 代入 Eq. (4-27) 中，則可得到 Eq. (4-31)。並且令 Eq. (4-25) 代入 Eq. (4-28) 中之後可以得到 Eq. (4-32)。此外將 Eq. (4-26) 代入 Eq. (4-18) 則可得到 Eq. (4-33)。

$$\frac{p_x}{c_1} - \frac{a_x}{c_1} d_5 = a_2 c_2 + a_3 c_{23} \quad (4-31)$$

$$\frac{p_y}{s_1} - \frac{a_y}{s_1} d_5 = a_2 c_2 + a_3 c_{23} \quad (4-32)$$

$$d_1 - p_z + a_z d_5 = a_2 s_2 + a_3 s_{23} \quad (4-33)$$

若 c_1 很小，令 Eq. (4-34) 成立；否則若為 s_1 很小，則令 Eq. (4-35) 成立，
 避免除以零的情況發生，並且將 Eq. (4-33) 改寫為 Eq. (4-36)，可將 Eq. (4-31)
 至 Eq. (4-36) 處理成為 Eq. (4-37) 與 Eq. (4-38) 兩方程式。

$$\frac{p_y}{s_1} - \frac{a_y}{s_1} d_5 = r \quad (4-34)$$

$$\frac{p_x}{c_1} - \frac{a_x}{c_1} d_5 = r \quad (4-35)$$

$$d_1 - p_z + a_z d_5 = r_z \quad (4-36)$$

$$a_2 s_2 + a_3 s_{23} = r_z \quad (4-37)$$

$$a_2 c_2 + a_3 c_{23} = r \quad (4-38)$$

將 Eq. (4-37) 與 Eq. (4-38) 合併之後可以得到 Eq. (4-39)，其中由於 Eq.
 (4-40) 的緣故，我們可以求得 θ_3 為 Eq. (4-41) 所示。

$$r_z^2 + r^2 = a_2^2 + 2a_2 a_3 (c_2 c_{23} + s_2 s_{23}) + a_3^2 \quad (4-39)$$

$$c_2 c_{23} + s_2 s_{23} = \cos(\theta_3) = \cos(-\theta_3) = -\cos(\pi - \theta_3) = -\cos(\theta_3 - \pi) \quad (4-40)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \pm a \cos\left(\frac{r^2 + r_z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}\right) \\ &= \pm \left[\pi - a \cos\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r^2 - r_z^2}{2a_2 a_3}\right) \right] \end{aligned} \quad (4-41)$$

接下來欲求 θ_2 時，令 Eq. (4-37) 與 Eq. (4-38) 展開移項成為 Eq. (4-42) 與

$$\text{Eq. (4-43)，並將兩式同除 } \sqrt{r^2 + r_z^2} \text{，並假設 } \cos\theta = \frac{a_2 + a_3 c_3}{\sqrt{r^2 + r_z^2}} \text{，} \sin\theta = \frac{a_3 s_3}{\sqrt{r^2 + r_z^2}} \text{，}$$

此假設可由 $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ 而接受，此處之 θ 為一臨時指定參數，則可將
 Eq. (4-42) 與 Eq. (4-43) 轉變成為 Eq. (4-44) 與 Eq. (4-45)。

$$s_2(a_2 + a_3c_3) + c_2(a_3s_3) = r_z \quad (4-42)$$

$$c_2(a_2 + a_3c_3) - s_2(a_3s_3) = r \quad (4-43)$$

$$\sin(\theta + \theta_2) = \frac{r_z}{\sqrt{r^2 + r_z^2}} \quad (4-44)$$

$$\cos(\theta + \theta_2) = \frac{r}{\sqrt{r^2 + r_z^2}} \quad (4-45)$$

因此我們可以得知 $\theta + \theta_2 = a \tan 2(r_z, r)$ ，而將 Eq. (4-39) 經過移項可得 Eq.

(4-46)，代入 $\cos\theta$ 的定義可以推導出 Eq. (4-47)，由於 $\sin\theta = \frac{a_3s_3}{\sqrt{r^2 + r_z^2}}$ 的關係，

θ 會受 θ_3 而影響，當 $0 \leq \theta_3 \leq \pi$ 時 $\sin\theta_3 > 0$ ， $\sin\theta > 0$ 所以 $0 \leq \theta \leq \pi$ ，而

$-\pi \leq \theta_3 \leq 0$ 時 $\sin\theta_3 < 0$ ， $\sin\theta < 0$ 所以 $-\pi \leq \theta \leq 0$ 。

$$a_2 + a_3c_3 = \frac{r_z^2 + r^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2} \quad (4-46)$$

$$\theta = \pm a \cos\left(\frac{a_2 + a_3c_3}{\sqrt{r^2 + r_z^2}}\right) = \pm a \cos\left(\frac{r_z^2 + r^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2\sqrt{r^2 + r_z^2}}\right) \quad (4-47)$$

當 $\theta_3 = \pi - a \cos\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r^2 - r_z^2}{2a_2a_3}\right)$ 時，令 $0 \leq \theta_3 \leq \pi$ 且 $0 \leq \theta \leq \pi$ ，則可求

得 θ_2 如 Eq. (4-48) 所示， m_1 為 -1、0 或 1，使 $-\pi \leq \theta_2 \leq \pi$ 。

$$\theta_2 = a \tan 2(r_z, r) - a \cos\left(\frac{r_z^2 + r^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2\sqrt{r^2 + r_z^2}}\right) + 2m_1\pi \quad (4-48)$$

但當 $\theta_3 = -\pi + a \cos\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r^2 - r_z^2}{2a_2a_3}\right)$ 時，令 $-\pi \leq \theta_3 \leq 0$ 且 $-\pi \leq \theta \leq 0$ ，可

求得 θ_2 如 Eq. (4-49) 所示， m_1 為 -1、0 或 1，使 $-\pi \leq \theta_2 \leq \pi$ 。

$$\theta_2 = a \tan 2(r_z, r) + a \cos\left(\frac{r_z^2 + r^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2\sqrt{r^2 + r_z^2}}\right) + 2m_1\pi \quad (4-49)$$

如要求取 θ_4 之角度，首先令 Eq. (4-24)至 Eq. (4-26)分別展開成為 Eq. (4-50)至 Eq. (4-52)，將上列三式結合可得 Eq. (4-53)。

$$a_x = -c_1(s_{23}c_4 + c_{23}s_4) \quad (4-50)$$

$$a_y = -s_1(s_{23}c_4 + c_{23}s_4) \quad (4-51)$$

$$a_z = -c_{234} = -c_{23}c_4 + s_{23}s_4 \Rightarrow s_4 = \frac{a_z + c_{23}c_4}{s_{23}} \Rightarrow c_4 = \frac{s_{23}s_4 - a_z}{c_{23}} \quad (4-52)$$

$$s_{23}c_4 + c_{23}s_4 = \frac{c_4 + a_z c_{23}}{s_{23}} = \frac{s_4 - a_z s_{23}}{c_{23}} \quad (4-53)$$

若 c_1 很小，避免除以零的情況發生，將 Eq. (4-53)代入 Eq. (4-51)可得 Eq. (4-54)，並更進一步求得 θ_4 ，為 Eq. (4-55)所示。

$$a_y = -s_1(s_{23}c_4 + c_{23}s_4) \Rightarrow s_4 = -\frac{a_y c_{23}}{s_1} + a_z s_{23} \Rightarrow c_4 = -\frac{a_y s_{23}}{s_1} - a_z c_{23} \quad (4-54)$$

$$\theta_4 = a \tan 2(-a_y c_{23} + a_z s_1 s_{23}, -a_y s_{23} - a_z s_1 c_{23}) \quad (4-55)$$

若 s_1 很小，避免除以零的情況發生，將 Eq. (4-53)代入 Eq. (4-50)可得 Eq. (4-56)，並更進一步求得 θ_4 ，如 Eq. (4-57)所示。

$$a_x = -c_1(s_{23}c_4 + c_{23}s_4) \Rightarrow s_4 = \frac{-a_x c_{23}}{c_1} + a_z s_{23} \Rightarrow c_4 = \frac{-a_x s_{23}}{c_1} - a_z c_{23} \quad (4-56)$$

$$\theta_4 = a \tan 2(-a_x c_{23} + a_z c_1 s_{23}, -a_x s_{23} - a_z c_1 c_{23}) \quad (4-57)$$

最後由於 θ_5 影響的是夾爪旋轉時的面向，其數值將對逆向運動學不產生影響，僅於實驗中若有需要改變物件旋轉方向時才需額外設定，因此不必於

此處求出，至此完全將逆向運動學其解析解求得。

值得注意的是，雖然本研究中所提出的逆向運動學解法僅適用於本實驗所使用的機械手臂架構，因此無法用於其他類型之機械手臂，但其解題技巧可提供不同配置之機械手臂求解逆向運動學參考之用。

4.3.3 垂直抓取法

由於本研究針對有特殊需求的物件能夠進行使夾爪永遠與地面保持垂直的抓取，因此有必要另外推算此種模式的逆向運動學，由於此時控制夾爪面向的第四關節被與地面垂直的條件拘束住，而第五與第六關節分別控制夾爪的軸向旋轉與開合，與夾爪之座標值並無直接關係，因此於垂直抓取模式時反而沒有冗餘度的問題，三維空間座標對應三個關節角度值。我們可以由圖 4-3 推算出 Eq. (4-58)與 Eq. (4-59)，並且很快地計算出圖 4-4 中之各關節角度數值。

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (4-58)$$

$$p = \sqrt{r^2 + (d_5 + h - d_1)^2} \quad (4-59)$$

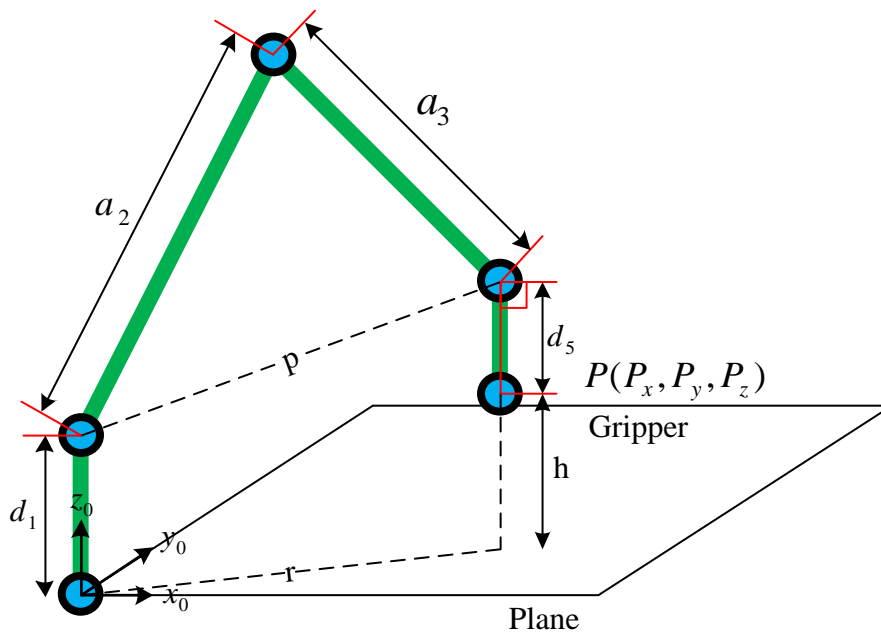


圖 4-3：垂直抓取模式示意圖

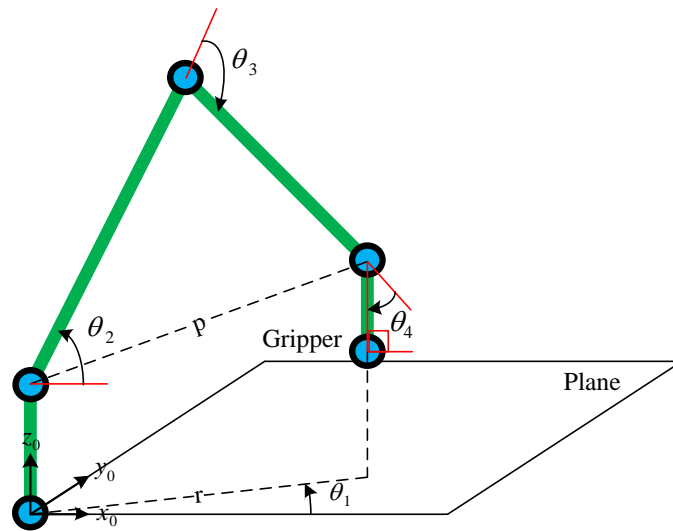


圖 4-4：垂直抓取模式旋轉角度圖

首先利用反三角函數可以直接求得 θ_1 如 Eq. (4-60)所示。而另外三關節之角度值 θ_2 、 θ_3 與 θ_4 均可以用餘弦定理分別求出，如 Eq. (4-61)至(4-63)所示。

$$\theta_1 = \text{atan}(P_y, P_x) \quad (4-60)$$

$$\theta_2 = -\text{acos}(r, p) - \text{acos}\left(\frac{p^2 + a_2^2 - a_3^2}{2 \cdot p \cdot a_2}\right) \quad (4-61)$$

$$\theta_3 = 180 - \text{acos}\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - p^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}\right) \quad (4-62)$$

$$\theta_4 = 180 - \text{acos}\left(\frac{p^2 + a_3^2 - a_2^2}{2 \cdot p \cdot a_3}\right) - a \sin(r, p) \quad (4-63)$$

雖然使用垂直抓取法模式的運算較一般逆向運動學計算速度更快，並且能夠使目標物件移動時永遠與地面保持垂直，但是因為與地面垂直拘束的關係，不可避免地將失去一部分原本可達到的工作空間，因此本研究僅在任務或物件有特殊需求時才切換至垂直抓取模式，平常仍使用一般的逆向運動學方法以取得機械手臂最大的工作範圍。

第五章 實驗結果與討論

本章節主要內容為應用第四章所提出的實驗原理，透過影像模組擷取目標空間之影像，並利用影像處理與投影平面轉換取得目標物件之座標位置，再提供機械手臂來規畫操作路徑。在進行物件座標取得與機械手臂控制之前，我們必須先進行前處理，將工作空間的平面投影建立起來，此處理僅需操作一次且攝影機位置與參數若沒有改變就不需重作。因此實驗共分兩部分，第一部分為物件座標取得，其中包含前處理的投影平面建構，第二部分為機械手臂控制。

5.1 物件座標取得

本實驗使用 MATLAB 作為影像處理之程式，在開始進行物件座標取得之前需要先進行投影空間平面建構，因此於工作空間中置入一組預先設定好之網格點架構，如同圖 5-1 中所示，圖中每一點彼此之間的時間距為 5 mm。

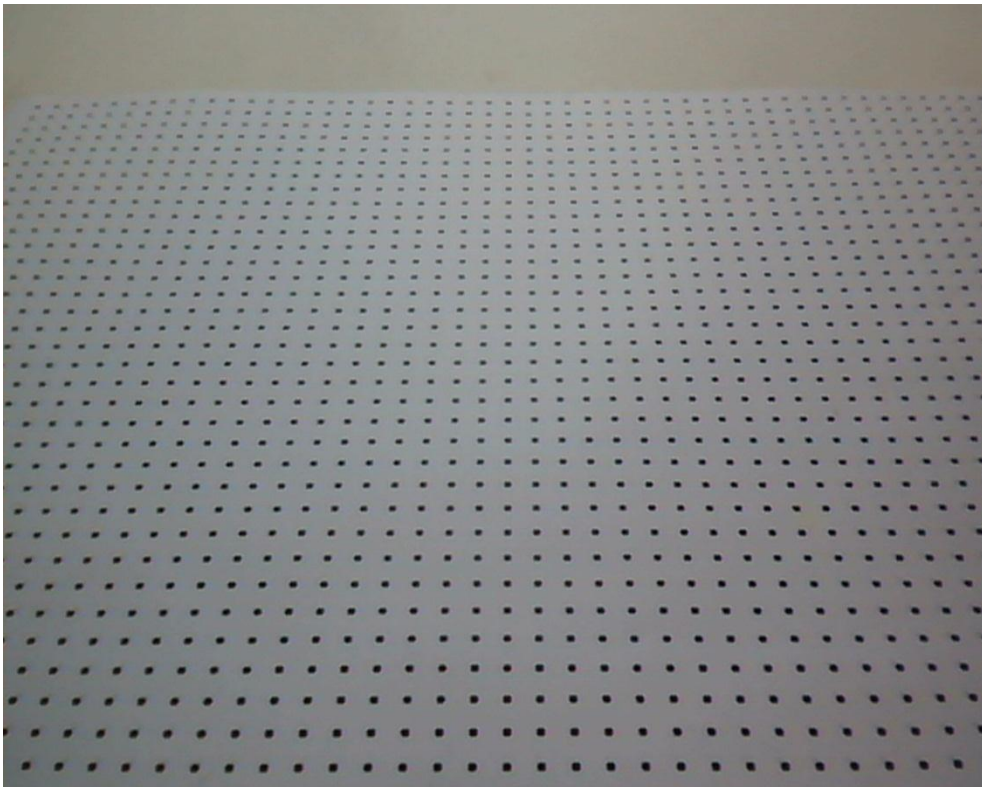


圖 5-1：工作空間建構之網格點架構。

取得網格點架構之後，必須使用影像處理來取得各網格點於影像像素當中之位置，由於光源以及對焦因素會造成影像遠端之網格點模糊之現象，欲解決此種現象必須使用亮度補償對照明不均之部分進行增強，再進行二值化之處理才能成功的完整取得每一個網格點，如同圖 5-2 所示。

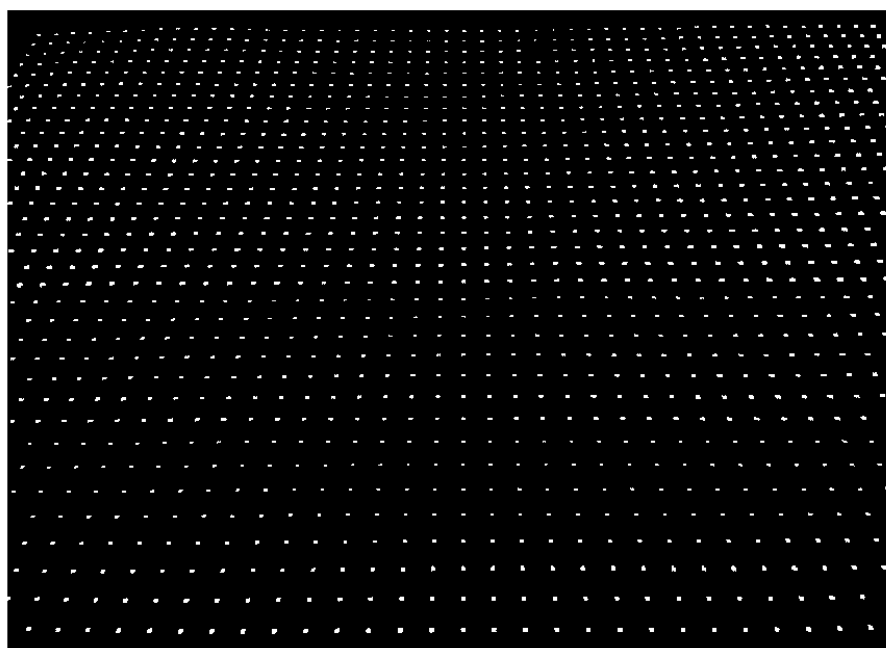


圖 5-2：影像網格之二值化

我們可以發現經過二值化之後取得之網格點有大小不均之情形，一部分是因為越遠的物體在影像中呈現出來會較小，另一部分是光源不均，經過補償之後仍無法完全消除影響之故，因此若我們欲取得網格點之中心位置，需要使用分段侵蝕的方法，依照距離的遠近分段改變侵蝕之參數，如此一來才能將所有網格點處理成近似之大小。

在處理完網格點之大小之後就要進行網格點中心之取得，我們採取的是分群技術，設定網格兩點距離之中間值為門檻值，並在偵測到一點之後將門檻值內全部具有值之點判定為同一群組，判定其為單一網格點，再將每一群組之中心點設定為該網格點之中心點，如同圖 5-3 所示，而全體網格點之中

心點建構如圖 5-4 所示。

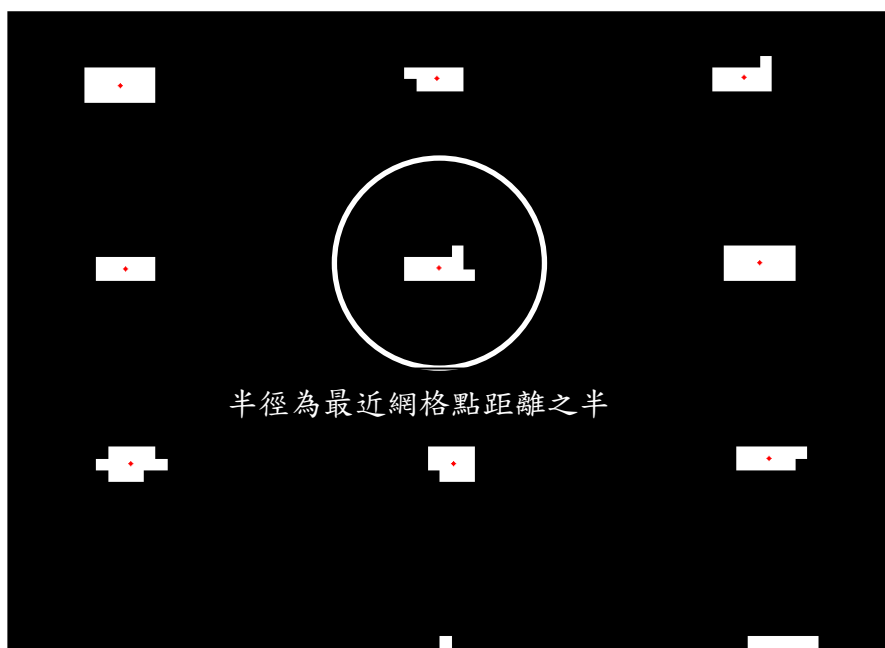


圖 5-3：網格中心點判定示意圖

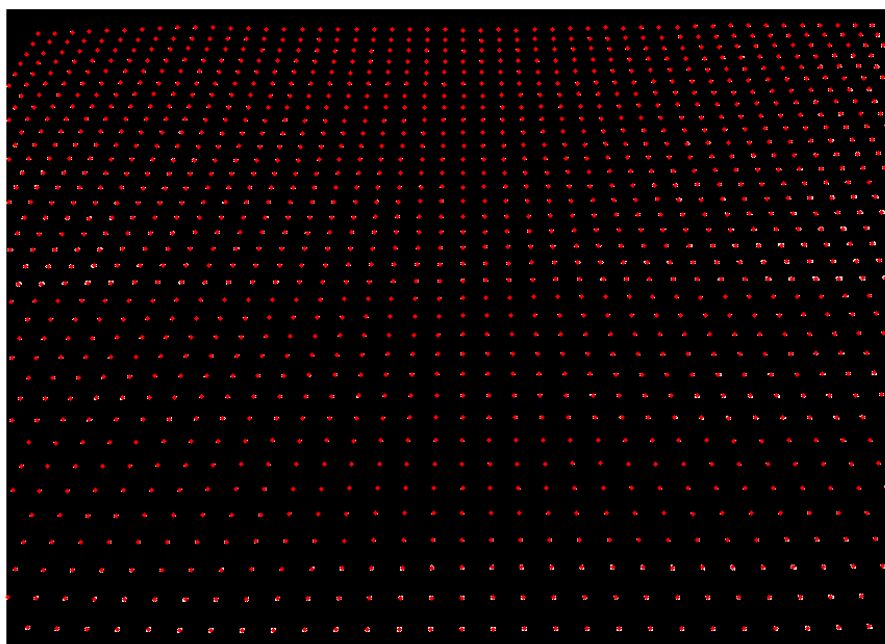


圖 5-4：工作空間網格中心點判定示意圖

取得所有網格中心點位於影像像素中之位置之後，便可由其在空間當中

實際之座標位置與影像像素中之位置取得一組轉換關係，在工作空間網格結構化建構完成之後我們便可將事先布置之網格點移除，當目標物件出現在工作空間當中時，計算出物件之底部對應之中心點並使用建構好的平面座標轉換法用內插法求得座標值，即可取得物件影像其像素在實際空間當中之對應位置，使用此方法的優點是可保證定位的精準度，絕對不會超過網格點的間距。

將工作空間之投影建立完畢之後，我們就可以進行目標物件座標之取得，首先如圖 5-5 所示將目標球置入工作空間當中，然後經過提取物件的處理將紅球提取出來，並透過二值化的處理與邊緣偵測法取得目標物件的輪廓，由圖中我們可以看出，由於陰影的影響因此取得之輪廓並不是完美圓形。

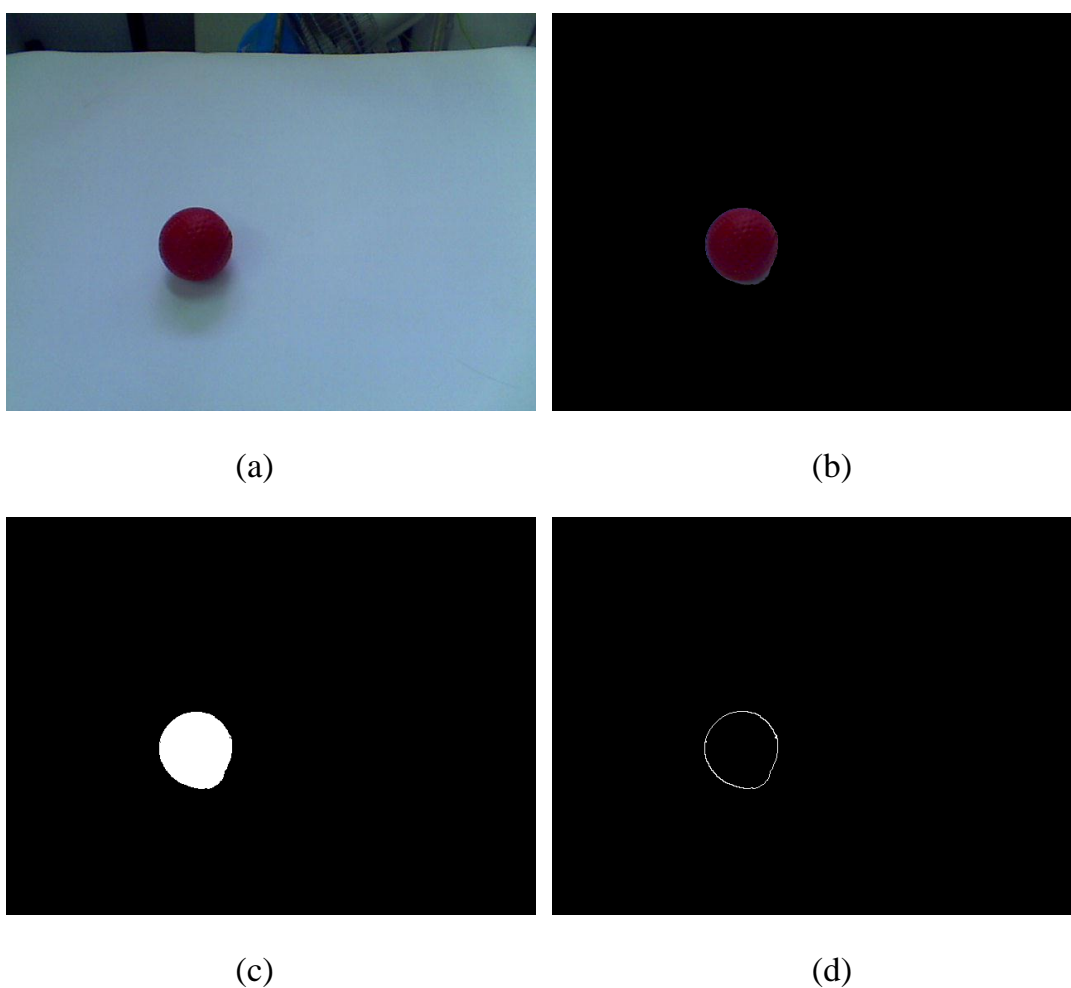


圖 5-5：(a)原始影像(b)物件提取影像(c)二值化影像(d)邊緣偵測之輪廓

取得目標物件之輪廓後，我們要決定物件於之中心點與地面接觸的位置，將球之輪廓放大來看，尋找所有代表輪廓像素之橫軸座標值 Y 並令其最大值與最小值差距為球之寬度，取平均值設為球之中心點，再以此中心點尋找縱軸座標 X 上的最大與最小值，令中心底端點向上兩者差距之三分之一之位置為球的重心同時設為中心與地面接觸之像素位置，由此取得中心點像素之座標值。最後代入前處理所建立的空間平面投影網格，使用內插法取得該接觸點像素座標對應實際空間中之位置，即可取得物件座標來進行夾取。

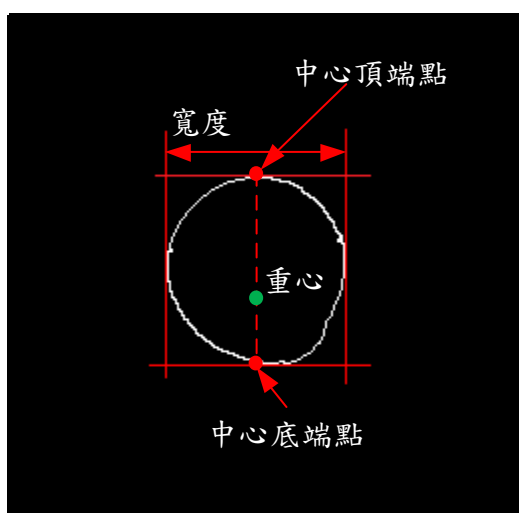


圖 5-6：物件輪廓放大圖

5.2 機械手臂控制

本研究使用 Lab VIEW 作為機械手臂之控制程式，Lab VIEW 程式之優點為圖形化介面方便使用者撰寫程式，在我們使用的 Lab VIEW 直接控制機械手臂之前必須先建立通訊協定之資料封包內容格式。封包格式如圖 5-7 所示，由於控制卡讀取之封包只有 2byte 長度因此我們將其按照需求切割為三部分，首先將封包中十進位大小為 16384 與 32768 之 2 bit 定義為儲存操作模式資訊 UseData，若 UseData 為 0 則為速度控制模式，否則為位置操作模式。接下來將封包中十進位大小為 1024、2048、4096、8192 之 4 bit 定義為儲存伺服馬達 ID 資訊，用以辨別此封包內含資訊所代表的馬達編號。最後

將封包中剩餘之 10 bit 作為儲存控制馬達轉動角度之資訊，將馬達可操作之 300° 切割為 1023 份，如此一來我們在控制機械手臂時，馬達之精度可高達 0.3°。

```

{
  AllData = Remocon RXD
  Data = AllData & 0000 0011 1111 1111
  IDData = AllData & 0011 1100 0000 0000
  UseData = AllData & 1100 0000 0000 0000
  IDData = IDData / 1024
  UseData = UseData / 16384
  IF ( IDData == 1 )
  {
    IF ( UseData == 0 )
      ID[1]: Moving speed = Data
    ELSE
      ID[1]: Goal position = Data
  }
}

```

圖 5-7：封包格式示意圖

在處理完畢通訊協定之封包結構後，我們便可將影像模組取得之物件座標代入機械手臂之逆向運動學程式，求取機械手臂欲達到物件座標時各關節之轉動角度。如圖 5-8 所示，輸入為物件之 X、Y、Z 座標位置，使用第四章所建構之逆向運動學方法規劃出之程式即可求取各關節之轉動角度。以此架構我們便可撰寫出整體程式如圖 5-9 所示，為了要依序控制每個伺服馬達因此控制程式整體採取了迴圈架構來撰寫。

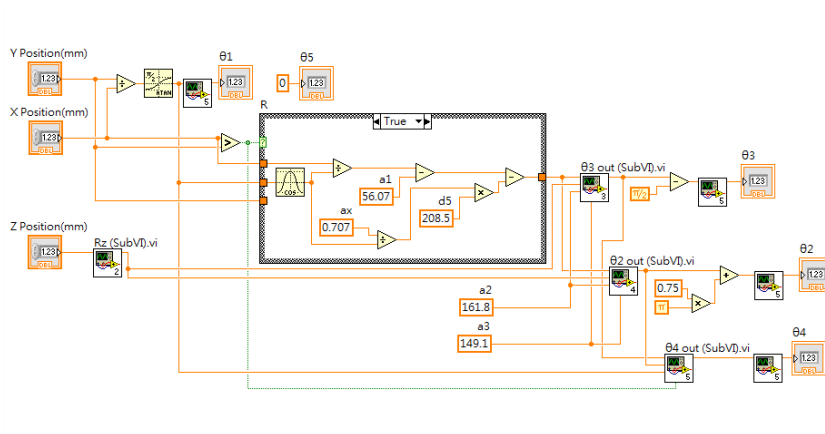


圖 5-8：逆向運動學程式架構

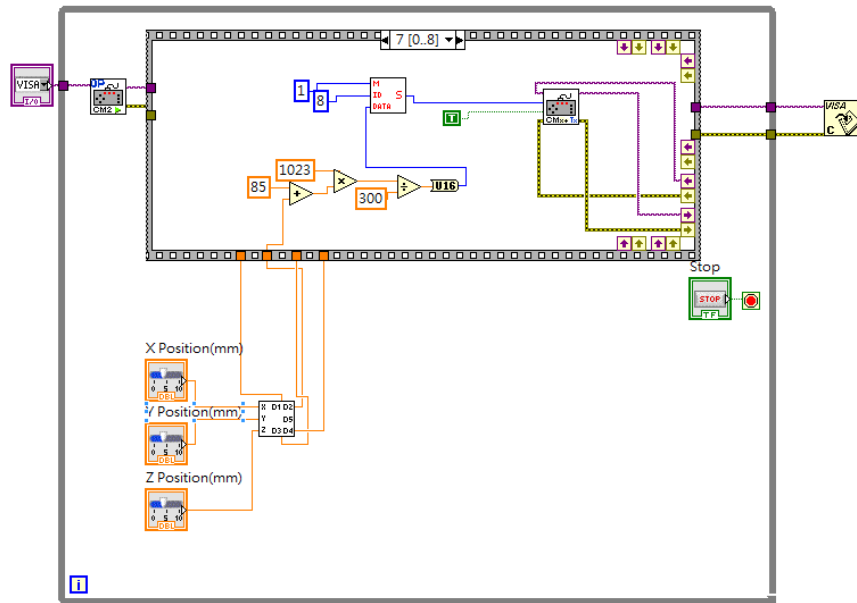


圖 5-9：控制程式迴圈架構

5.2.1 定位準確度模擬

以機械手臂之逆向運動學控制程式操作機械手臂時，我們需要驗證計算之角度結果是否符合正確之位置，因此我們利用第四章中提到的順向運動學方法撰寫了機械手臂角度至空間座標轉換之順向運動學程式。如圖 5-10 所示

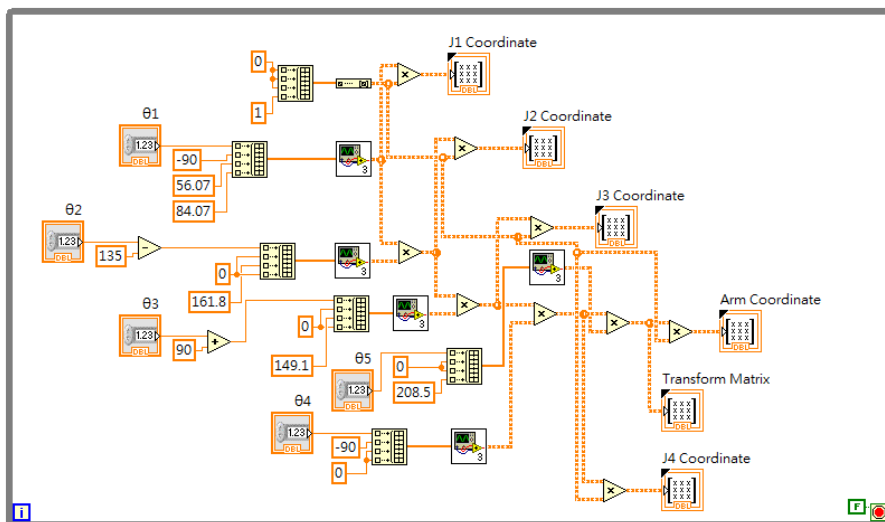


圖 5-10：順向運動學之程式

設目前有五點 A、B、C、D、E 為機械手臂欲到達之目的地，其座標位置如表 5-1 所示，因此先利用程式求出當夾爪欲到達此五點時各關節之角度位置，如表 5-2 所示。最後再以順向運動學之程式驗證實際到達位置，並進行誤差的計算，其結果如表 5-3 所示。

表 5-1：目標點座標位置表

	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
A	209.79	22.378	241.958
B	220.979	32.168	213.986
C	234.965	11.189	186.014
D	213.986	41.958	227.972
E	227.972	27.972	212.587

表 5-2：目標點之手臂關節角度表

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
A	6.089	35.867	-68.337	32.308	0
B	8.282	23.294	-36.698	13.104	0
C	2.726	17.834	-17.819	-0.048	0
D	11.094	27.843	-49.322	20.938	0
E	6.995	24.386	-35.993	11.393	0

表 5-3：目標點之座標位置驗證表

	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Error(mm)
A	209.395	22.337	242.353	0.56
B	220.227	32.057	214.738	1.07
C	234.905	11.185	186.077	0.09
D	212.613	41.69	229.349	1.96
E	227.442	27.906	213.116	0.75

5.2.2 物件抓取實驗

在前段實驗我們證明了本研究演算法的精確度，接下來本實驗進行實際的機械手臂操作，利用影像模組接收的工作空間影像判別目標物件之位置，再將位置資訊傳送給機械手臂進行抓取，同時利用夾爪上的雷射光模組發射雷射光點至工作平面，經過影像模組接收回授判別誤差量，再進行補償。

首先進行影像的擷取，在本次實驗當中工作空間內共有紅色與黃色兩球，如圖 5-11 所示，但任務目標是要抓取黃球，因此先進行物件的擷取將其餘背景與紅球濾除，結果如圖 5-12 所示。



圖 5-11：抓取實驗輸入影像

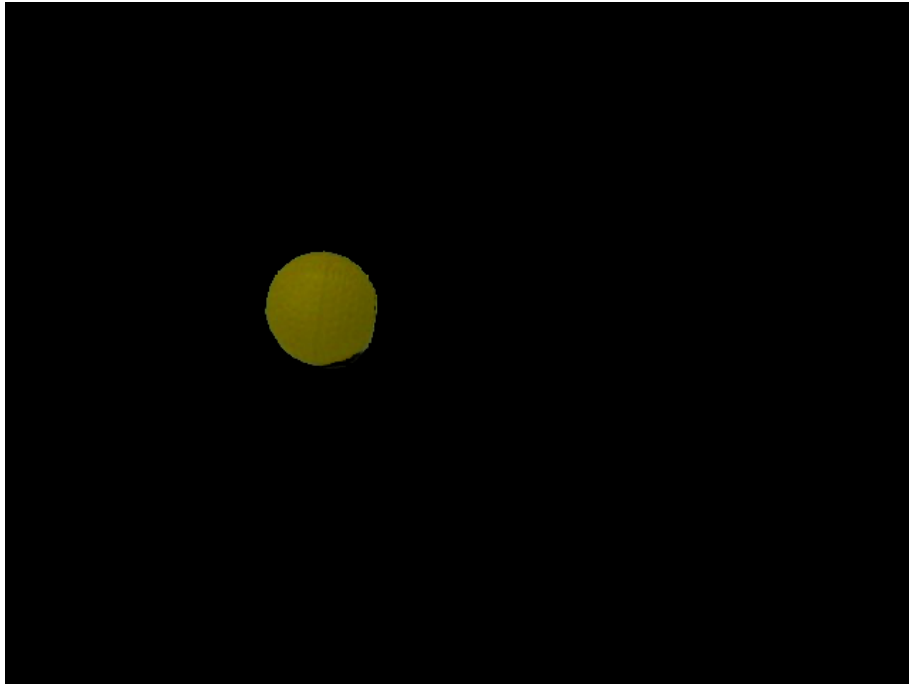


圖 5-12：黃球物件擷取影像

將目標物件完成提取之後，接下來進行的是灰階化與二值化等處理，以方便後續影像分析，處理完畢後再進行邊緣偵測取得物件之輪廓，如圖 5-13 所示。但是當我們將邊緣偵測後的結果放大來看，發現輪廓線有破損的情形，這是因為受到光線的不均以及陰影的干擾等因素導致。為此我們進行兩次的膨脹之後再進行兩次侵蝕，也就是說利用形態學中閉合的方法來修補輪廓，完成之結果如圖 5-14 所示。

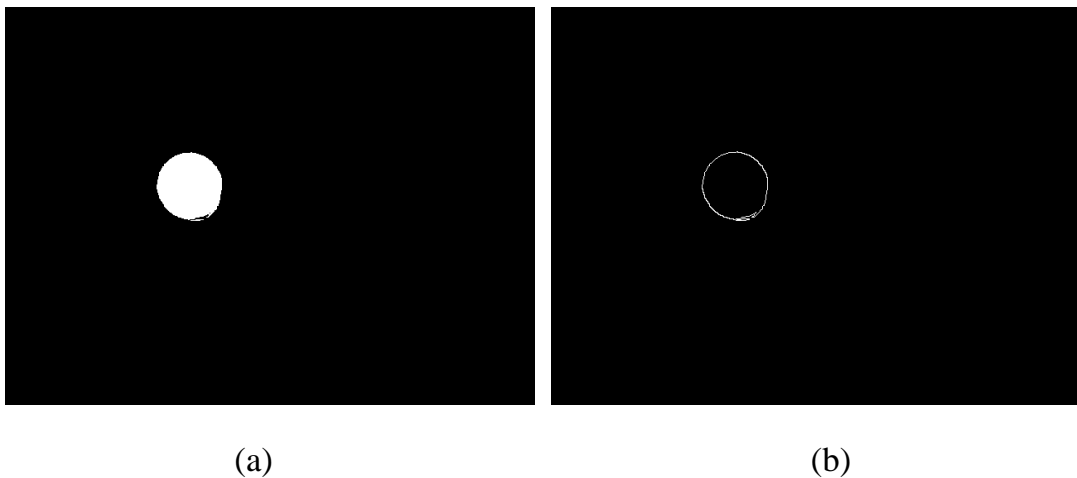


圖 5-13：(a)二值化後影像(b)邊緣偵測後物件輪廓

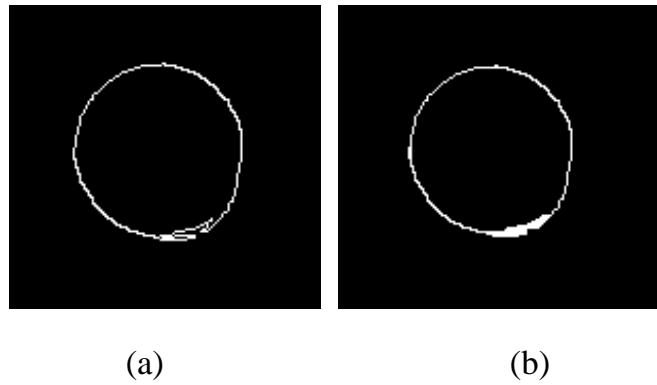


圖 5-14：(a)破損之輪廓(b)閉合處理後之輪廓

取得物件完整的輪廓後，我們就可以進行物件中心點的判定，決定待抓取黃球之中心點與地面接觸的位置處於影像中的哪一像素，如圖 5-15 所示，而當得知像素座標值之後我們就可以參照前處理建立的投影平面網格點結構，以內插法的方式取得實際空間當中此像素的真實座標，在本實驗中黃球的實際中心座標位置經過內插法計算為 $P(x, y, z) = (355.6, -42.7, 35)$ ，單位為 mm，其中球的直徑已知為 70 mm，因此可以求得中心點之高度為 35 mm，之後將此座標輸入給機械手臂控制器進行抓取的動作。

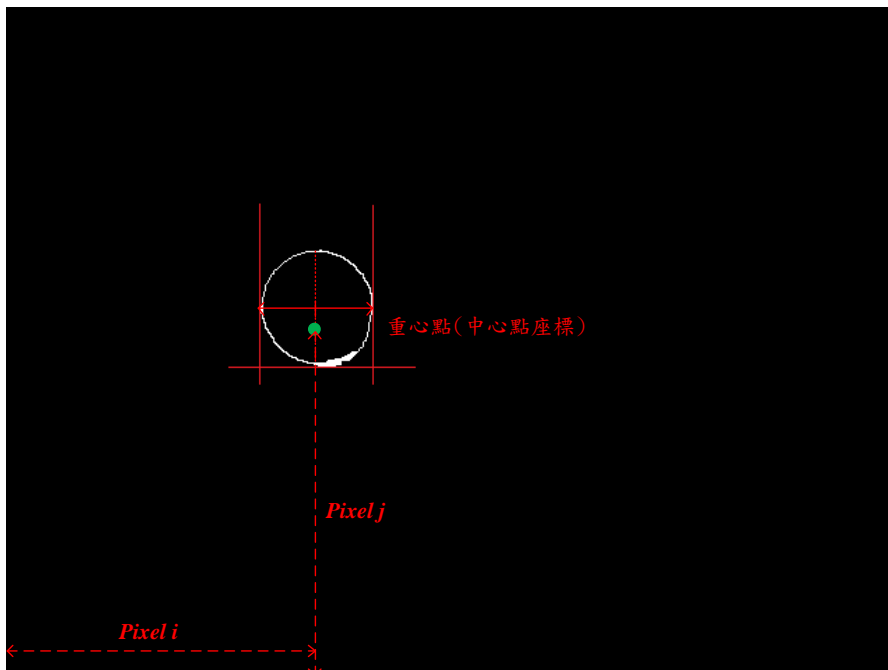


圖 5-15：物件中心點像素座標圖

首先我們可以看到圖 5-16 是機械手臂處於待機之狀態，右側是用於視覺回授的攝影機模組，而下方為本系統的控制卡，工作空間當中有紅、黃兩球，此時正在進行影像處理與傳送目標物件座標資訊給予控制程式進行計算移動路徑。

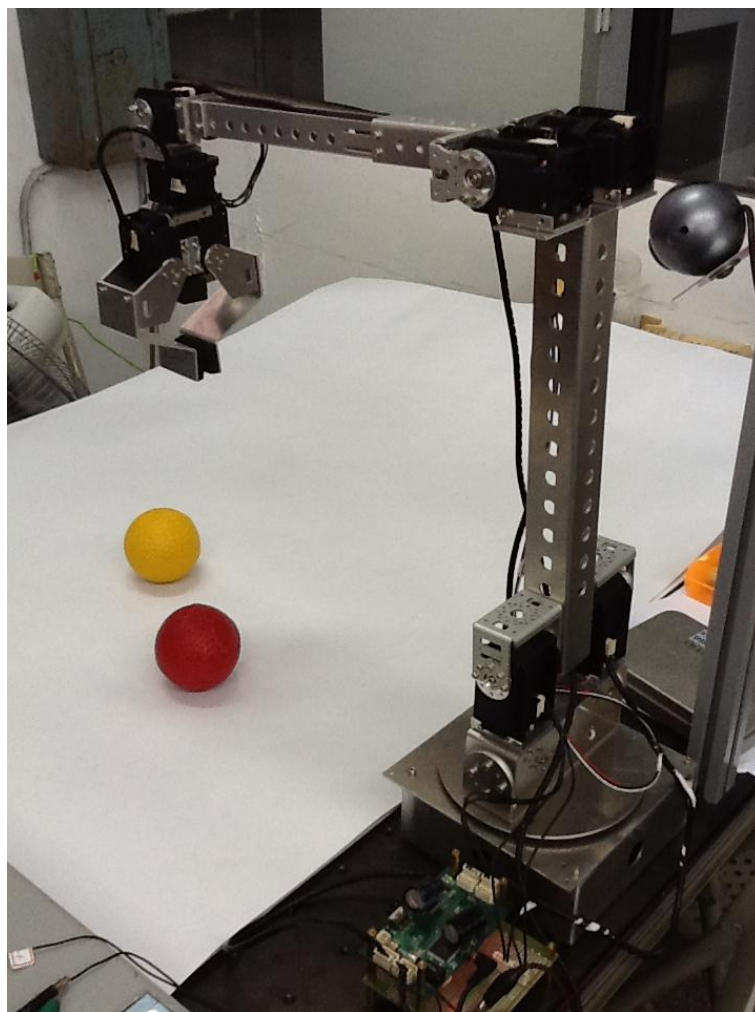


圖 5-16：機械手臂待機圖

當控制程式取得目標物件之座標資訊並進行逆向運動推算之後，就可操控機械手臂先移動至目標物件之正上方準備抓取，此時我們給予的夾爪末端點座標會高於計算出來的目標中心座標 50 mm，如此一來才能從物件之正上方進行抓取，如圖 5-17 所示。

圖 5-17 是從攝影機直接取得的影像，從圖中我們可以看出安裝於夾爪上的雷射光模組發射之紅點並沒有投影在目標黃球輪廓內，因此發生了誤差

需要進行補償。判定是否需要補償的準則是比對影像中物件重心點與雷射光點之座標間距，分別搜尋雷射光點像素在垂直與水平方向，朝物件重心點前進是否有輪廓線像素存在，若無則表示雷射光點落在物件輪廓內，表示機械手臂之夾爪大致位於目標物件正上方，可以進行抓取動作；若有則表示雷射光點落在物件輪廓之外，也就是在操作機械手臂過程中發生了誤差。

進行補償之前必須先行計算誤差量，將此時的影像作目標物件與雷射點的提取並給予二值化及邊緣偵測後，可以得到如圖 5-18 所示，物件中心點與雷射光點中心的像素位置，將此兩像素代入預先建立的網格點結構以內插法求得需補償之座標移動量，再傳送給控制系統進行二次逆向運動學計算並操控機械手臂做出補償。

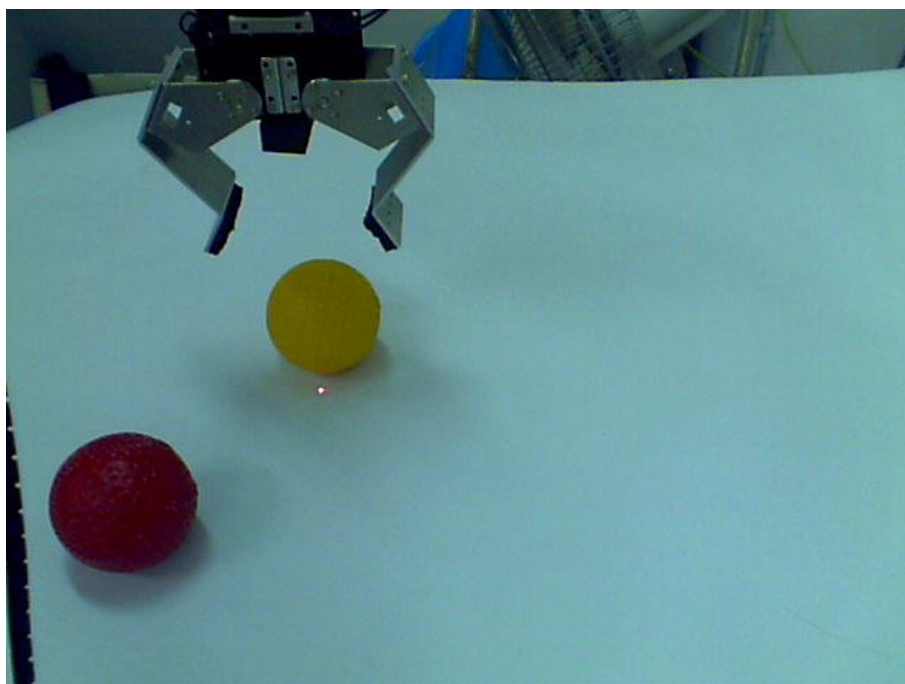


圖 5-17：預備抓取任務目標

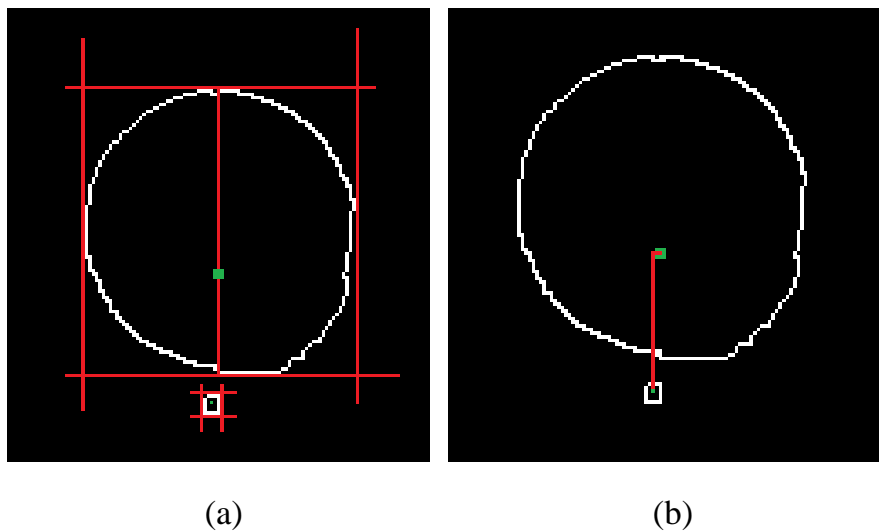


圖 5-18：雷射光點與目標中心點差距

由圖 5-19 與 5-20 可以看出經過補償後的移動，夾爪上之雷射模組發射的紅光已經投影在球的輪廓之內，此時便不必進行補償，而可直接進行抓取。若經過二次補償而雷射光點仍然不在物件輪廓之內，則繼續進行補償量計算與操作直至雷射光點處於物件輪廓之內為止。而抓取成功之後的機械手臂就如同圖 5-21 中所看到的，能夠成功的將指定顏色物件進行抓取的動作。

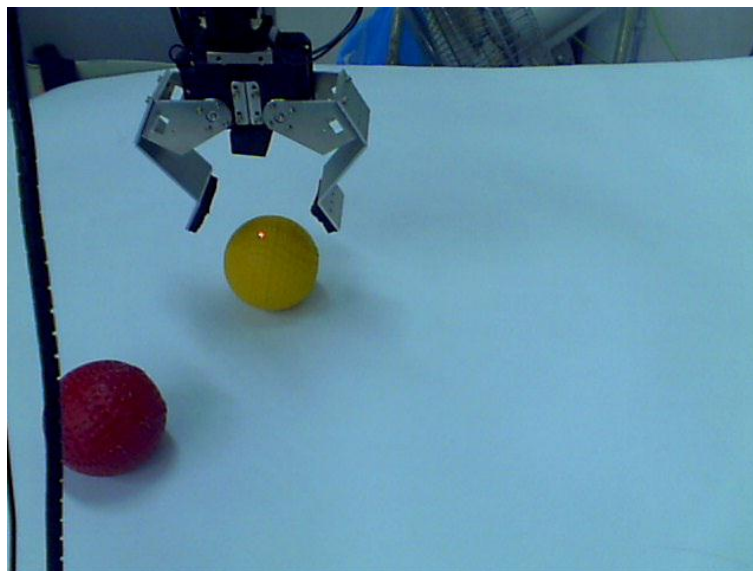


圖 5-19：誤差補償後抓取前姿態

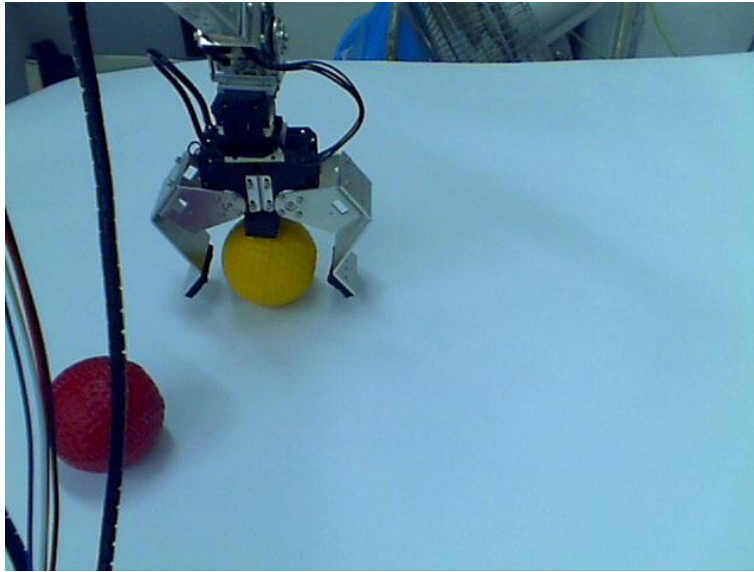


圖 5-20：機械手臂進行抓取

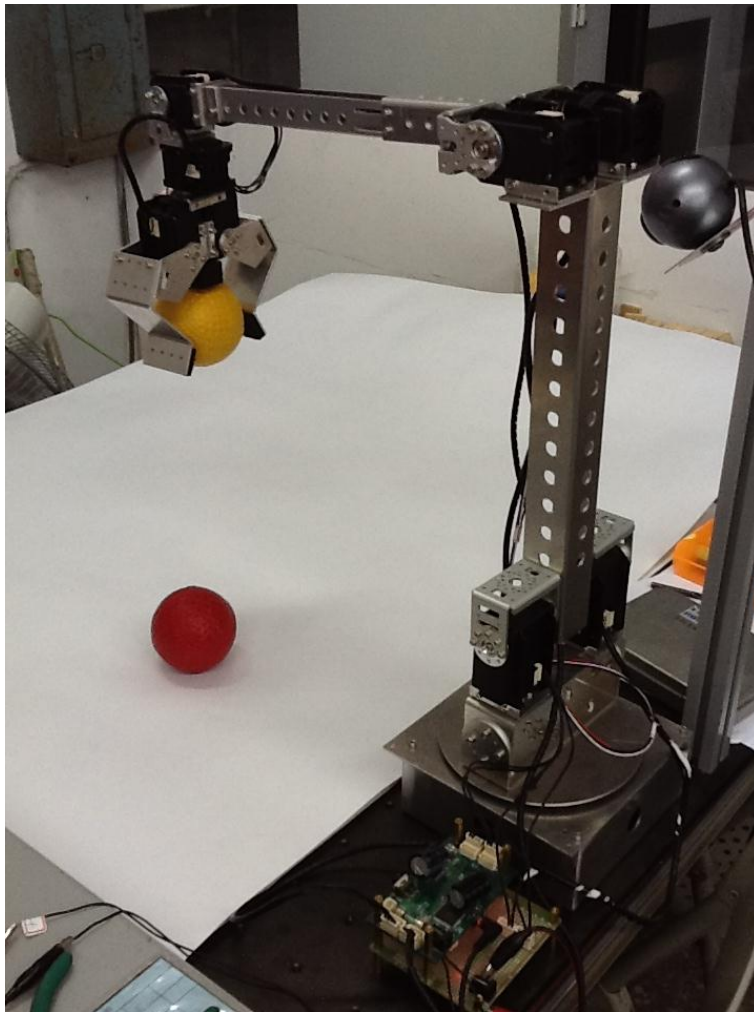


圖 5-21：目標黃球抓取完成圖

第六章 結論與未來展望

本研究希望能發展結合影像模組的機械手臂系統，能夠快速的辨別未知物體之顏色、形狀與位置資訊，同時配合夾爪上之雷射光模組，投影至工作空間利用攝影機取得夾爪當前位置，作為定位精準度的回饋。在影像模組方面，由於使用的預處理的空間網格點建構，將實際的座標位置投影轉換至攝影機取得的平面影像上。用此種方式能夠快速地利用內插法將目標物件中心點像素與實際空間座標位置計算出來，同時可以保證誤差量必定小於網格點間距，因此若攝影機解析度越高，能夠應用的網格點間距也就越小，定位精度也越準確。

而為了應付特殊需求的目標物件，採用切換一般或水平夾取模式的方法，得以實現移動過程當中不傾倒物體的要求，這是與一般研究不同的特點，而當任務或物件沒有此類特殊需求時，仍然使用一般的逆向運動學算法，以期取得最大的工作範圍。透過使用本研究中使用的 IK Solution 法，可以快速的計算機械手臂其逆向運動學推導，實現即時運算處理的效果。

本研究未來希望不僅僅只能將論文中提到的研究方法應用於論文中所使用的機械手臂上，而能使用在更複雜、更大型具備影像功能之機械手臂上。

參考文獻

- [1] L. W. Sun, F. Van Meer, Y. Bailly, C. K. Yeung, “Design and Development of a Da Vinci Surgical System Simulator,” *IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1050-1055, 2007.
- [2] J. Dastur, A. Khawaja, “Robotic Arm Actuation with 7 DOF Using Haar Classifier Gesture Recognition,” *IEEE, International Conference on Computer Engineering and Applications*, vol. 1, pp. 27-29, 2010.
- [3] D. Tolani, A. Goswami and N. Badler, “Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs,” *Graph. Models*, vol. 62, pp. 353-388, 2000.
- [4] D. E. Whitney, “The mathematics of coordinated control prosthetic arm and manipulators,” *Trans. ASME J. Dyn. Syst., Meas. Control*, vol. 94, pp. 303-309, 1972.
- [5] De Lope, R. Gonzalez-Careaga and T. Zarrionandia, “Inverse kinematics of humanoid robots using artificial neural networks,” in *Proc. Int. Workshop Comput. Aided Syst. Theory*, pp. 216-218, 2003.
- [6] H. F. Fauadi, M. S. Jumali, “Modeling and simulation of programmable universal machine for assembly (PUMA) industrial robot for automotive-related assembly process,” *IEEE, International Symposium on Information Technology*, vol. 3, pp. 1-5, 2008.
- [7] R. Behrens, C. Kuchler, T. Förster and N. Elkmann, “Kinematics analysis of a 3-DOF joint for a novel hyper-redundant robot arm,” *IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3224-3229, 2011.
- [8] H. P. Huang, Y. T. Chen, R. J. Wang and M. K. Chi, “Development of the multi-axis control platform for robot arm,” *IEEE, Proceedings of Annual Conference*, pp. 2326-2331, 2010.
- [9] M. Tarokh and M. Kim, “Inverse Kinematics of 7-DOF Robots and Limbs by Decomposition and Approximation,” *IEEE, Transactions on Robotics*,

vol. 94, pp. 591-600, 2007.

- [10] J. Q. Gan, E. Oyama, E. M. Rosales, H. Hu, "A Complete Analytical Solution to the Inverse Kinematics of the Pioneer2 Robotic Arm," *J. of Robotica*, vol. 23, pp. 123-129, 2005.
- [11] D. H. Song and S. Jung, "Geometrical analysis of inverse kinematics solutions and fuzzy control of humanoid robot arm under kinematics constraints," *IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1178-1183, 2007.
- [12] G. W. Collins, *The Foundations of Celestial Mechanics*, Pachart Foundation dba Pachart Publishing House, 2004.
- [13] J.M. Selig, "Active versus passive transformations in robotics," *IEEE, Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, pp. 79-84, 2006.
- [14] P. I. Corke, "A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit–Hartenberg Parameters," *IEEE, Transactions on Robotics*, vol.23, pp. 590-594, 2007.
- [15] H. Zhuang, Z.S. Roth and F. Hamano, "A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators," *IEEE, Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, pp. 451-463, 1992.
- [16] M.F. Robinette, R. Manseur, "Robot-Draw, an Internet-based visualization tool for robotics education," *IEEE, Transactions on Education*, vol. 44, pp. 29-34, 2001.
- [17] J. Chen, K. Venkataraman, D. Bakin, B. Rodricks, R. Gravelle, P. Rao, and Y. Ni, "Digital Camera Imaging System Simulation," *IEEE, Transactions on Electron Devices*, vol. 56, pp. 2496-2505, 2009.
- [18] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, *Digital Image Processing, Second Edition*, Prentice Hall, 2002.
- [19] S. Ghosal, R. Mehrotra, "Detection of composite edges," *IEEE, Transactions on Image Processing*, vol. 3, pp. 14-25, 1994.

- [20] S. Konishi, A. L. Yuille, J. M. Coughlan and S. C. Zhu, "Statistical edge detection: learning and evaluating edge cues," *IEEE, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, pp. 57-74, 2003.
- [21] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE, Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, pp. 679-698, Nov 1986.
- [22] P. Bao, L. Zhang and X. Wu, "Canny edge detection enhancement by scale multiplication," *IEEE, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, pp. 1485-1490, 2005.
- [23] P. Maragos, "Differential morphology and image processing," *IEEE, Transactions on Image Processing*, vol.5, pp. 922-937, 1996.
- [24] Su Chen, R. M. Haralick, "Recursive erosion, dilation, opening, and closing transforms," *IEEE, Transactions on Image Processing*, vol. 4, pp. 335-345, 1995.
- [25] J. Y. Gil, R. Kimmel, "Efficient dilation, erosion, opening, and closing algorithms," *IEEE, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, pp. 1606-1617, 2002.
- [26] 洪維恩 編著，「Matlab 7 程式設計」，旗標出版股份有限公司，中華民國 95 年。
- [27] 繆紹綱 編著，「數位影像處理：運用 matlab」，台灣東華書局股份有限公司，中華民國 94 年。