

淡江大學電機工程學系機器人工程碩士班

碩士論文

指導教授：翁慶昌 博士

許駿飛 博士

機械手臂之基於圖像的繪圖系統

Picture-Based Drafting System for
Robot Manipulators

研究生：李冠廷 撰

中華民國 104 年 6 月

論文名稱：機械手臂之基於圖像的繪圖系統

頁數：61

校系(所)組別：淡江大學 電機工程學系 機器人工程碩士班

畢業時間及提要 103 學年度第 2 學期 碩士學位論文提要

研究生：李冠廷 指導教授：翁慶昌博士

許駿飛博士

論文提要內容：

本論文依據影像處理演算法以及 B-Spline 曲線演算法來設計實現一個六軸機械手臂繪圖系統，讓使用者可以簡單、快速有效的控制 KUKA KR6 R900 六軸機械手臂來實際的描繪出使用者想要的圖形。本論文所提出的方法同時可用來解決一個機械手臂畫圖的路徑規劃問題，該問題是依據「上銀科技」所舉辦之「上銀智慧機械手實作競賽」之「機械揮毫」比賽項目所設定的比賽項目，即在指定的紙張範圍內完成以「智慧自動畫」為主題的繪圖。為了達到更佳的效果，本論文主要探討繪圖系統，然而在傳統方法上，需人工選取畫圖座標點、人工編輯機械手臂畫圖路徑規劃與編輯手臂移動路徑，以上流程會耗費大量時間與設計繁瑣困難，因此本論文提出結合影像處理方法，辨識繪圖影像資訊，擷取出圖形輪廓並且由外而內的方式，編排畫圖輪廓的順序，經由 B-Spline 曲線演算法修正圖形輪廓，使繪圖曲線更加平順，最後透過網路傳送 XML 架構之 KUKA 機械手臂命令，控制機械手臂末端點移動速度，完成畫圖任務最後，經由實驗結果可知，所提的方法確實是控制機械手臂繪圖之一個簡單、快速的方法。

關鍵詞：機械手臂、連續線段畫圖、輪廓擷取、自適應性二值化、自適直方圖均化

表單編號：ATRX-Q03-001-FM030-02

Title of Thesis**Total pages:61**

Picture-Based Drafting System for Robot Manipulators

Keywords:

Robot Manipulator, Coherent Line Drawing, Contour Extraction, Adaptive Binarization, Adaptive Histogram Equalization

Name of Institute:

Master's Program in Robotics Engineering, Department of Electrical Engineering, Tamkang University

Graduate date: June 2015**Degree conferred:** Master**Name of student:** Guan-Ting Li**Advisor:** Dr. Ching-Chang Wong

李冠廷

翁慶昌博士

Dr. Chun-Fei Hsu

許駿飛博士

Abstract:

In this thesis, we use image processing and B-Spline to design and implement a six-axis robot manipulator for drawing system which can make user more easy and efficient to control KUKA KR6 R900 robot manipulator. And draw picture out what user wanted. The proposed method is applied to solve picture drawing on path planning for robot manipulator. In this thesis, we focus on drawing system. In traditional method, it needs user to choose drawing points, edit robot manipulator drawing path and edit moving path all by manual, the procedure is time consuming and it's hard to design. So we propose using image processing technique to recognize image information and extract image contour. And using B-Spline, to curve more smoothly. Last step is transmit drawing command to robot manipulator based on XML structure, And finish drawing task. According to experiment, this method is simple, easy and efficient to control KUKA robot manipulator drawing picture.

表單編號：ATRX-Q03-001-FM031-01

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	VI
表目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	3
1.3 論文架構	6
第二章 KUKA KR6 R900 機械手臂	7
2.1 系統架構	7
2.2 KUKA KR C4 Compact 控制器	8
2.3 硬體規格	9
2.4 手持式教導器	11

第三章 機械手臂之運動分析.....	12
3.1 KUKA KR6 R900 正運動學.....	12
3.1.1 運動學鏈.....	13
3.1.2 D-H 連桿參數表.....	15
3.2 逆運動學.....	17
3.2.1 位置逆運動學.....	18
3.2.2 方位逆運動學.....	20
3.3 B-Spline 曲線.....	22
3.4 XML 封包傳輸.....	24
第四章 影像處理.....	25
4.1 灰階.....	26
4.2 直方圖.....	27
4.2.1 直方圖均化.....	28
4.2.2 自適應直方圖均化.....	31
4.3 濾波.....	33
4.3.1 均值濾波.....	33
4.3.2 中值濾波.....	33

4.3.3 高斯模糊濾波.....	34
4.4 二值化與自適應二值化.....	35
4.5 邊緣偵測.....	36
4.6 侵蝕與膨脹.....	38
4.7 輪廓擷取及排序.....	39
第五章 實驗結果.....	44
5.1 實驗一：比較 B-Spline 曲線處理之小叮噹繪圖.....	45
5.2 實驗二：背景單純之圖像繪圖.....	50
5.3 實驗三：背景複雜之圖像繪圖.....	52
5.4 實驗四：照片圖像繪圖.....	54
5.5 系統處理時間的比較.....	57
第六章 結論.....	59
參考文獻.....	60

圖目錄

圖 1.1、KUKA 機械手臂	2
圖 1.2、ABB 機械手臂	2
圖 1.3、第五代機械手臂	3
圖 1.4、「機械揮毫」比賽項目模擬示意圖	4
圖 1.5、傳統之機械手臂繪圖系統的處理流程	4
圖 1.6、本論文所提之機械手臂繪圖系統的處理流程	5
圖 2.1、KUKA KR6 R900 機械手臂的系統架構圖	8
圖 2.2、KUKA KR C4 Compact 控制器	8
圖 2.3、KUKA KR6 R900 各軸馬達角度旋轉範圍與最大速度 ..	9
圖 2.4、KUKA KR6 R900 工作範圍示意圖	10
圖 2.5、KUKA KR6 R900 機械手臂末端點的距離與可承受負載	11
圖 3.1、(a) KUKA KR6 R900 之外觀及	13
(b) KUKA KR6 R900 之尺寸規格[1]	13

圖 3.2、KUKA KR6 R900 之連桿參數示意圖[1].....	14
圖 3.3、符合 DH1 和 DH2 條件之座標系示意圖.....	16
圖 3.4、 α_i 和 θ_i 之示意圖.....	16
圖 3.5、運動學解耦合及手腕中心示意圖.....	18
圖 3.6、前三軸關節連桿的幾何關係圖.....	19
圖 3.7、尤拉角 roll-pitch-yaw 的旋轉示意圖.....	20
圖 3.8、B-Spline 示意圖.....	22
圖 3.9、KUKA XML 傳送命令格式.....	24
圖 3.10、KUKA XML 接收命令格式.....	24
圖 4.1、影像處理之系統架構圖.....	25
圖 4.2、用 0~255 表示由黑到白的灰階圖.....	26
圖 4.3、灰階處理之前後對照圖：(a)灰階處理前的彩色圖像及(b) 灰階處理後的灰階圖像.....	27
圖 4.4、灰階圖與其直方圖比較：(a)灰階圖像及(b)灰階圖像的直 方圖.....	28

圖 4.5、直方圖均化處理之前後對照圖：(a)直方圖均化處理前的灰階圖像、(b)直方圖均化處理後的灰階圖像、(c)直方圖均化處理前之灰階圖像的直方圖及(d)直方圖均化處理後之灰階圖的直方圖	30
圖 4.6、自適應直方圖均化原理示意圖：(a)直方圖均化及(b)自適應直方圖均化.....	31
圖 4.7、直方圖均化與自適應直方圖均化對照圖比較：(a)直方圖均化處理的灰階圖像、(b)自適應直方圖均化處理的灰階圖像、(c)直方圖均化處理後的直方圖及(d)自適應直方圖均化後的直方圖	32
圖 4.8、二值化處理之前後對照圖：(a)二值化處理前的灰階圖像、(b)固定閾值二值化處理後的灰階圖像、(c)自適應中值二值化處理後的灰階圖像及(d)自適應高斯二值化處理後的灰階圖像 ...	36
圖 4.9 輪廓擷取之流程圖[19].....	42
圖 4.10 小叮噹輪廓擷取之流程分鏡圖	43
圖 5.1、機械手臂之繪圖系統的系統架構圖	45

圖 5.2、小叮噹圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理及(c)自適應直方圖處理	46
圖 5.3、小叮噹圖像繪圖的分鏡圖：(a)濾波處理、(b)自適應二值化處理之調整參數前的圖像及(c)自適應二值化處理之調整參數後的圖像	47
圖 5.4、小叮噹圖像繪圖的分鏡圖：(a)輪廓擷取及排序、(b)確認實際機械手臂繪圖範圍及(c)顯示機械手臂實際繪圖路徑	48
圖 5.5、圖像模擬繪圖與機械手臂繪圖的比較：(a)模擬繪圖及(b)機械手臂繪圖結果	48
圖 5.6、圖像模擬繪圖之鋸齒狀現象	49
圖 5.7、B-Spline 曲線前後處理繪圖之結果：(a)B-Spline 曲線處理前的實驗模擬繪圖、(b)B-Spline 曲線處理後的實驗模擬繪圖、(c)B-Spline 曲線處理前之實驗機械手臂的繪圖結果及(d)B-Spline 曲線處理後之實驗機械手臂的繪圖結果	50
圖 5.8、背景單純之圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值	

化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)顯示畫圖座標點及(l)機械手臂繪圖結果.....51

圖 5.8、背景單純之圖像繪圖的分鏡圖(續).....52

圖 5.9、背景複雜之圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)顯示畫圖座標點及(l)機械手臂繪圖結果.....53

圖 5.9、背景複雜之圖像繪圖的分鏡圖(續).....54

圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)

顯示畫圖座標點及(I)機械手臂繪圖結果.....	55
圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖(續).....	56
圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖(續).....	57
圖 5.11、測試實驗流程所需時間的繪圖樣本	58



表目錄

表 3.1、KUKA 機械手臂 D-H 連桿參數表	17
表 4.1、父邊界找到新邊界 B 之決定規則	41
表 5.1、傳統與本論文之繪圖處理方法所需時間的比較表.....	58



第一章 緒論

1.1 研究背景

自從 1959 年由有「機械手臂之父」之稱的 Joseph F. Engelberger 利用 George Devol 所授權的專利技術發明，第一台應用於美國汽車產業的壓鑄作業上名為「Unimate」，而選擇使用機械手臂做為應用，其在於機械手臂可以重複性地及長時間性地執行工作任務，使用壽命與靈活自由度是人類手臂無法比擬的，隨著工業自動化的進步，加工方式也日漸複雜化與多元化，因此機械手臂的結構也由三個關節(Joint)發展到多個關節以達到自動化產業的需求，機械手臂的運用範圍從物件搬運、包裝等簡單的作業，到汽車結構焊接、汽車擋風玻璃塗膠和手機金屬外殼曲面切削等複雜的作業，因此對於機械手臂的自由度、靈活性有更高的需求。近日機械手臂的快速發展，其應用領域從汽車工業、模具製造延伸到電子產品、醫療、服務和軍事各種領域，其後更拓展到娛樂產業的應用，如機械手臂的雲霄飛車、機械手臂彈奏樂器、機械手臂寫字與機械手臂繪圖等等的娛樂產業。各個產業對於機械手臂的應用需求都強調，需具有控制能力、負重能力、重複精度與穩定度，因此可以長時間地執行重複性工作任務而不會出現問題。目前全球知名製造的工業機械手臂的公司有德國製的 KUKA(Keller und Knappich Augsburg) [1]工業手臂和瑞士製的 ABB(Asea Brown Boveri Ltd.) [2]工業手臂。KUKA 公司在機械手臂被應用於物料搬運、自動化產業、金屬加工和點焊弧焊等方面，並且在娛樂方面 KUKA 工業手臂展現出書寫英文字的書寫能力如圖 1.1 所示，顯示出機械手臂具有高穩定、高精度的控制能力，以及手臂的曲線軌跡規劃的能力。ABB 公司是電力和自動化技術領先的全球領導廠商之一，

致力於化學、金屬、汽車工業和電力行業自動化等產業，ABB 機械手臂如圖 1.2 所示。



圖 1.1、KUKA 機械手臂

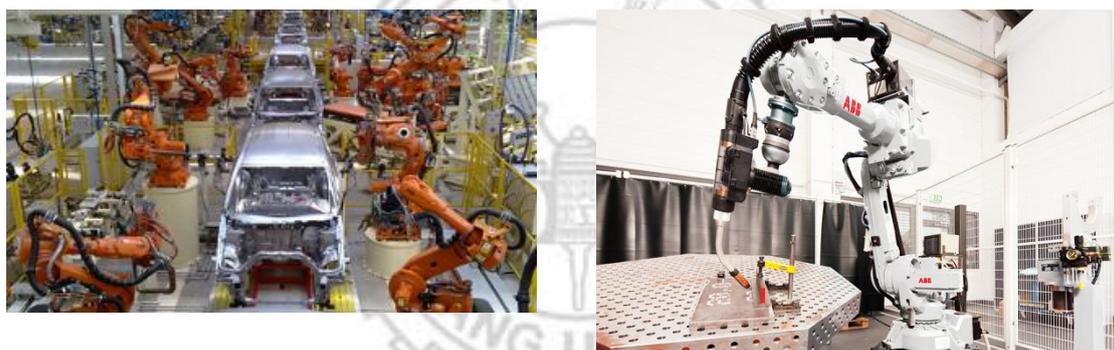


圖 1.2、ABB 機械手臂

1.2 研究動機

在「上銀智慧機器手實作競賽」中，機械手臂必須在規定的時間內，完成比賽所規定的各種項目。此實作競賽主要包含有 4 個比賽項目，分別是(1)骨牌效應、(2)機械揮毫、(3)眼明手快以及(4)拍球入洞[3]。本論文針對「機械揮毫」這個比賽項目來做研究與探討，利用影像處理演算法以及 B-Spline 曲線演算法，來設計實現一個可以產生畫圖路徑以及機械手臂移動路徑的機械手臂繪圖系統，其可以有效率的縮短比賽項目的開發時間。

「上銀智慧機器手臂實作競賽」比賽過程中必須使用自行設計開發的機械手臂而且需要具備視覺自主的能力，不能使用市面上可購得的機械手臂。圖 1.3 為實驗室所設計實現的機械手臂。



圖 1.3、第五代機械手臂

「機械揮毫」比賽項目規則為，在斜度介於20~40度之桌面，抓取多隻彩色筆在指定的紙張範圍內完成以「智慧自動畫」為主題的繪畫，並

以毛筆沾墨後在畫圖紙左下方書寫出「上銀」兩字，才算完成任務，並依據繪圖作品、字體的美觀、工整、可辨識度等項目，作為評分參考，

「機械揮毫」比賽項目示意圖如圖1.4所示。

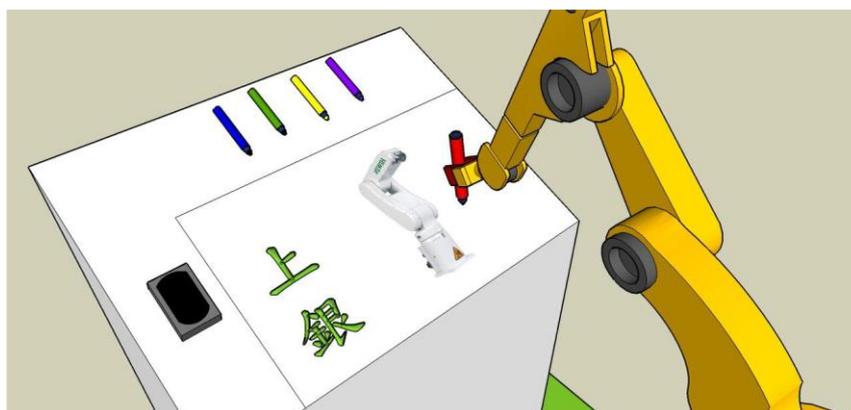


圖 1.4、「機械揮毫」比賽項目模擬示意圖

實驗室在開發「機械揮毫」這個比賽項目上，傳統的方法是人工選取繪圖座標點、人工編輯機械手臂畫圖路徑規劃與編輯手臂移動路徑，圖 1.5 為傳統之機械手臂繪圖的系統流程示意圖，這個流程設計是繁瑣困難的，並且會耗費大量時間與人力資源。



圖 1.5、傳統之機械手臂繪圖系統的處理流程

因此本論文提出結合影像處理方法，辨識繪圖影像資訊，擷取出圖

形的畫圖座標，並且編排畫圖路徑，圖 1.6 為本論文所提之機械手臂繪圖系統流程示意圖這個，可以有效的減少開發時間及人力資源。

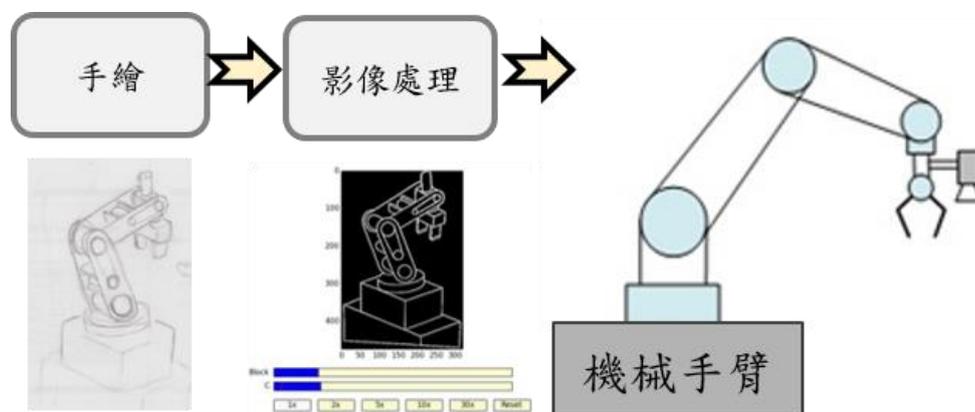


圖 1.6、本論文所提之機械手臂繪圖系統的處理流程



1.3 論文架構

本論文之主要目的為設計與實現一個基於圖像之機械手臂繪圖系統，論文架構一共有六個章節。第一章為緒論，說明研究的動機與目的，「機械揮毫」比賽項目之規則介紹以及本論文的架構。第二章介紹本論文所使用的 KUKA KR6 R900 工業型六軸機械手臂，其動作敏捷、重量輕量化和高重複精度，為實驗的理想選擇。第三章介紹 KUKA KR6 R900 機械手臂的運動分析，包含正運動學(Forward Kinematic)與逆運動學(Inverse Kinematics)的分析以及 B-Spline 曲線演算法，正運動學是運用 D-H(Denavit-Hartenberg)連桿參數表，轉換座標系的方法，透過機械手臂各關節角度來推算出機械手臂末端點的座標位置；逆運動學可分為位置逆運動學和方位運動學兩部分討論，由機械手臂末端點的座標位置計算出機械手臂之各關節的角度；B-Spline 曲線演算法則用來規劃繪圖曲線。第四章介紹一些影像處理的方法來擷取圖像資訊輪廓，並轉換成機械手臂畫圖路徑。第五章介紹本論文的繪圖系統架構，並基於影像處理與 B-Spline 曲線演算法則透過機械手臂繪製圖像之實驗結果。第六章為結論。

第二章 KUKA KR6 R900 機械手臂

本論文所使用的機械手臂為德國 KUKA 公司所生產之型號為 KR6 R900 的工業型六軸機械手臂，由於配置輕型鋁合金馬達外殼，重量輕量化僅約 52 公斤，因此結構輕巧且功率強可實現機械手臂高加速度運動行為，並具有優異的重複精度與路徑精度；迴轉半徑極小，可以任何角度安裝在任何地方，如生產線上或機械設備上皆可；這些特性使 KUKA KR6 R900 工業型六軸機械手臂廣泛用於電子、食品製造、機械、醫療和研究等領域，對於 KUKA KR6 R900 工業型六軸機械手臂的介紹主要有四個部分：(1)系統架構、(2)KUKA KR C4 Compact 控制器、(3)硬體規格以及(4)手持式教導器。其分別介紹如下：

2.1 系統架構

KUKA KR6 R900 工業型六軸機械手臂的系統架構圖如圖 2.1 所示，主要有三大部分：(1)手持式教導器(smartPAD)、(2)KUKA KR C4 Compact 控制器以及(3)KUKA KR6 R900 機械手臂本體。其分別簡介如下：

第一部分是手持式教導器，介面是圖形化菜單式的彩色觸碰螢幕，具用戶友好性，並有一個六軸遙控桿，可對機械手臂進行直觀式的微調控制，亦可在教導器上進行簡易程式編輯。另外可透過在電腦上進行程式撰寫，計算能力更強、軟體工具更廣和編輯程式效率更高，更可利用 SimPro 系統進行機械手臂移動狀態的虛擬模擬；第二部分是 KUKA KR C4 Compact 控制器，是機械手臂的運算核心控制部分，內部由一個控制模組和一個驅動模組組成，用來執行控制機械手臂的移動演算法；第三部分是 KUKA KR6 R900 機械手臂本體，機械結構具有高剛性以及減速

機具有低背隙等特性，使得機械手臂擁有輕巧敏捷以及高重複精度等性能。



圖 2.1、KUKA KR6 R900 機械手臂的系統架構圖

2.2 KUKA KR C4 Compact 控制器

KUKA KR C4 Compact 控制器以其小巧的結構提供高效、可靠，並具有靈活的設計結構和可擴展性等特性，能夠大大減少硬體組件、電纜及插頭的數量，安全、機器人、邏輯、運動及過程控制，KUKA KR C4 Compact 控制器集所有功能於一身，KUKA KR6 R900 機械手臂的模組化控制核心，如圖 2.2 所示，KUKA KR C4 Compact 控制器主要有兩大模組：(1)控制模組以及(2)驅動模組。其分別介紹如下：



圖 2.2、KUKA KR C4 Compact 控制器

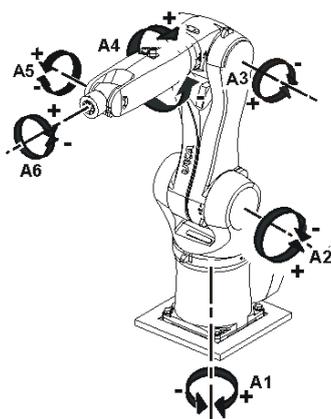
控制模組為 KUKA KR C4 Compact 控制器的主要運算核心，其內部

配置一顆多核心處理器的電腦，其功能為路徑規劃、序列式控制、安全保護機制、網路通訊以及使用者介面操作等，可透過手持式教導器來操控機械手臂移動、設定機械手臂相關參數以及監控機械手臂狀態。

驅動模組內部具有各軸馬達驅動器、控制卡、電子煞車，能同時計算與控制多顆伺服馬達的位置與角度，並且同時傳送回授資訊，經由控制模組傳至手持式教導器並顯示給使用者。

2.3 硬體規格

KUKA KR6 R900 機械手臂為高精度的六軸機械手臂，硬體規格上是配置輕型鋁合金馬達外殼，並搭配皮帶輪機械設計來減輕馬達負載重量，機械手臂重 52 公斤，結構輕巧、功率強勁，可執行高速移動，其各軸馬達旋轉角度範圍和最大速度，如圖 2.3 所示，而每軸的角度解析度大約 0.01° 。機械手臂的工作範圍達 901mm，其詳細的工作範圍示意圖如圖 2.4 所示。機械手臂末端之最大負載值為 6 公斤，即可安裝 6 公斤的負載於機械手臂末端平面上，機械手臂末端點的負載值如圖 2.5 所示。



軸	角度範圍	最大速度(°/s)
第 1 軸	-170°至+170°	360
第 2 軸	-190°至-45°	300
第 3 軸	-120°至+156°	360
第 4 軸	-185°至+185°	381
第 5 軸	-120°至+20°	388
第 6 軸	-350°至+350°	615

圖 2.3、KUKA KR6 R900 各軸馬達角度旋轉範圍與最大速度

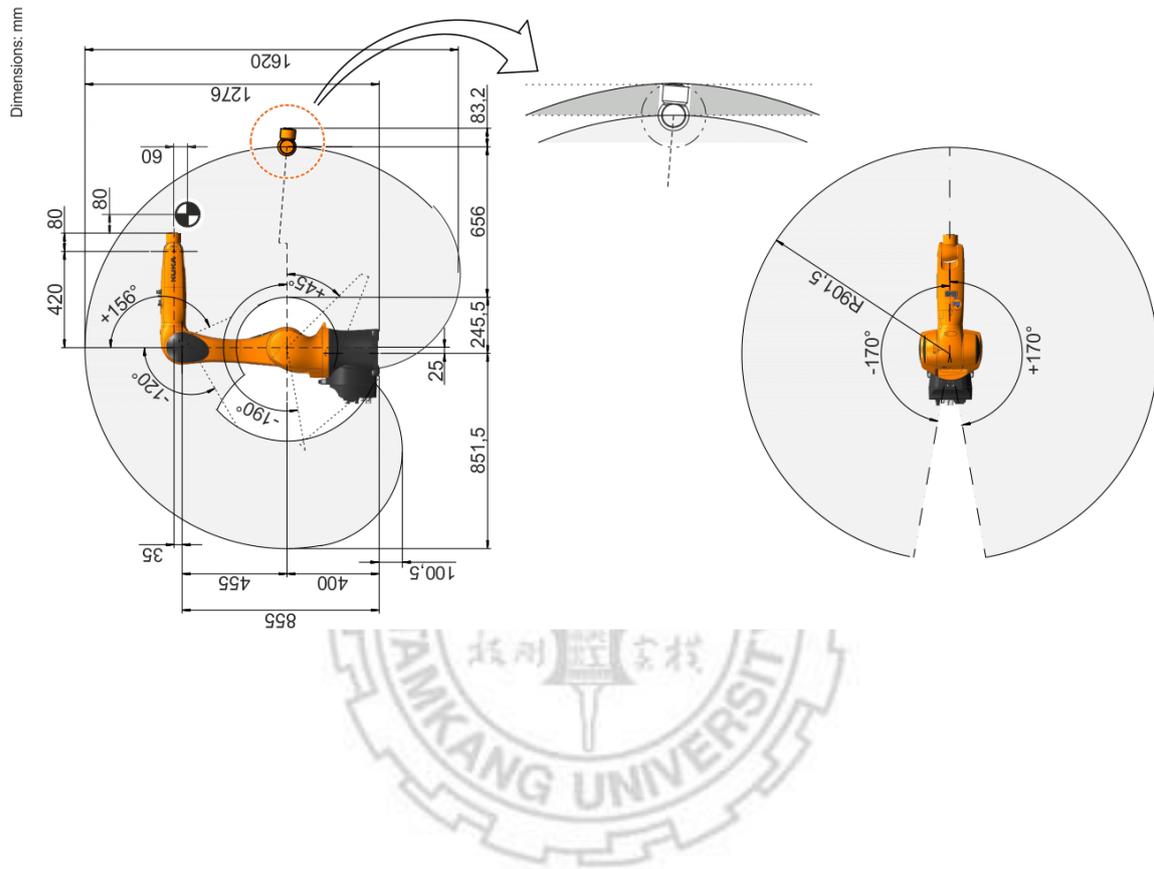


圖 2.4、KUKA KR6 R900 工作範圍示意圖

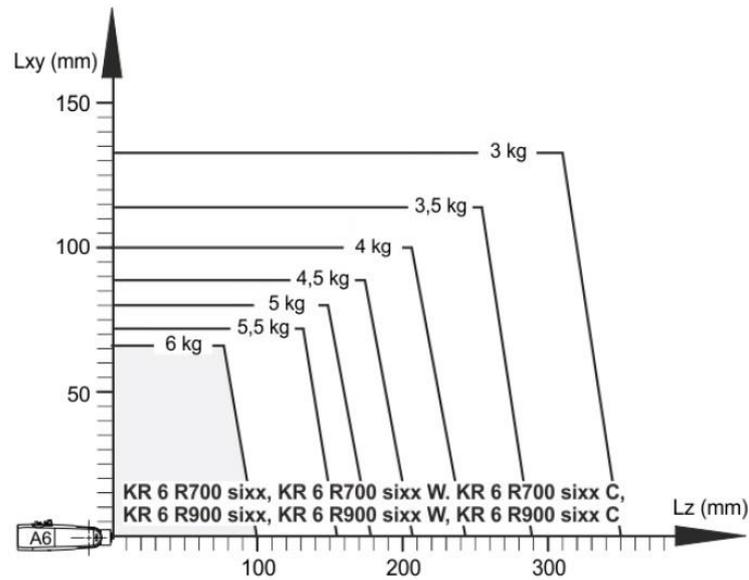


圖 2.5、KUKA KR6 R900 機械手臂末端點的距離與可承受負載

2.4 手持式教導器

當使用者想控制 KUKA 機械手臂移動時，可以使用手持式教導器來操作，利用六軸搖桿或按鈕去微調機械手臂末端點的座標位置或各軸馬達的角度，也可以在手持式教導器的觸碰螢幕上撰寫簡易程式，讓機械手臂執行程式任務。換而言之，可以透過手持式教導器進行機械手臂的末端點移動操作、編寫程式、相關參數配置以及監控狀態。

第三章 機械手臂之運動分析

機械手臂的運動學分析是指對機械手臂關節於空間的角度資訊變數，與機械手臂末端點在工作空間的方位和位置之間的關係進行分析。機械手臂是由一組連桿與關節所組合的機構，連桿間以旋轉或滑動等的方式產生運動行為，關節以馬達驅動產生轉動。機械手臂主要任務是幫助人類執行物件組裝等複雜的工作、物件焊接等危險性工作和物件搬移等重覆性的工作等等，都與物件的位置有密切關係，必須考慮在工作空間中機械手臂末端點和物件的相對位置方向資訊，因此機械手臂進行座標系轉移計算，讓機械手臂末端點接近物件位置並進行一連串預定的設定動作。機械手臂末端點的運動是以工作空間座標系描述，亦即以卡式座標系描述，但是機械手臂末端點的方位和位置是以連桿和關節組合的連桿座標系描述。本章節將對機械手臂進行運動學分析[4, 5]，即對兩個座標系的轉換問題進行分析，包含正運動學、逆運動學、B-Spline 曲線以及 XML 封包傳輸。分別介紹如下：

3.1 KUKA KR6 R900 正運動學

正運動學是指給予機械手臂各軸的關節馬達的角度變數，欲求得機械手臂末端點的位置和方向(Orientation)。機械手臂的各個關節與連桿的組合方式不同，在每個連桿上建立座標系用以描述相鄰兩個連桿間平移與旋轉問題，本論文採用 D-H 連桿參數表的轉換矩陣來解決機械手臂各連桿座標系如何轉換至相同空間座標系的問題，將會對運動學鏈 (Kinematic Chains)、D-H 連桿參數表和實際地以 KUKA 公司所生產型號為 KR6 R900 的工業型六軸機械手臂進行正運動學分析[6]，圖 3.1(a)

為機械手臂的外觀，圖 3.1(b)為機械手臂之每個連桿和關節的尺寸規格，分別介紹如下。

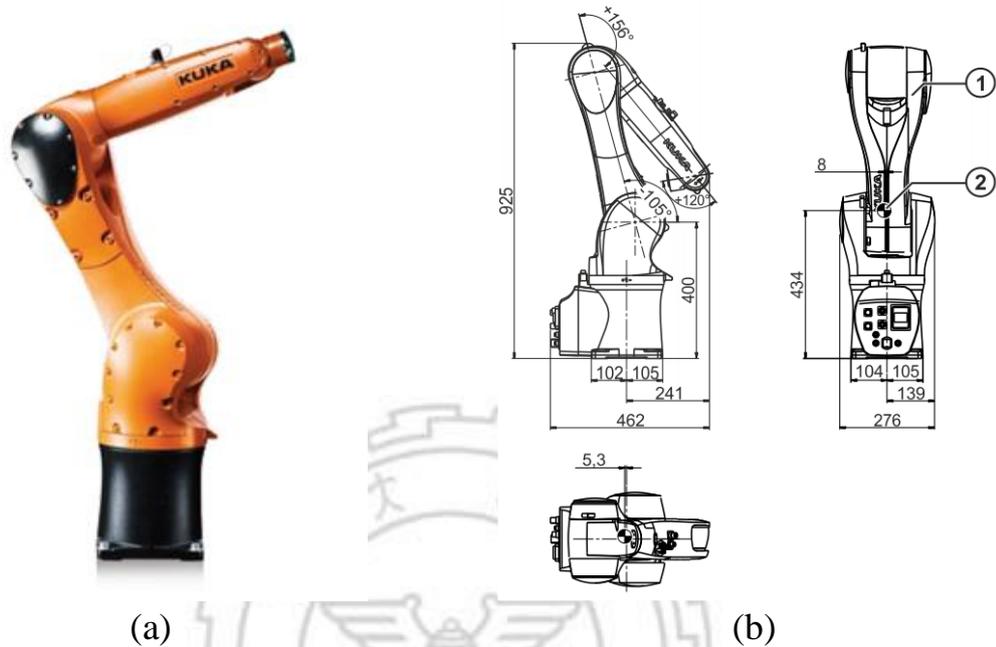


圖 3.1、(a) KUKA KR6 R900 之外觀及
(b) KUKA KR6 R900 之尺寸規格[1]

3.1.1 運動學鏈

運動學鏈是由一組連桿和關節所構成的機械手臂。關節是指連桿之間的角度。關節可被區分為二種類型：簡單型和複雜型。簡單型關節如旋轉關節(Revolute Joint)和滑動關節(Prismatic Joint)等皆只具有一個自由度(Degree Of Freedom,DOF)，旋轉關節是指可以關節為旋轉軸做旋轉，滑動關節可沿著單一軸做線性運動。複雜型關節如球關節(Ball Joint)和窩關節(Socket Joint)等皆具有兩個自由度。本論文所使用的 KUKA KR6 R900 六軸機械手臂是由六個旋轉關節組成，其運動學公式[7]可以表示為：

$$\mathbf{T}_6^0 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_6^0 & \mathbf{o}_6^0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中 \mathbf{T}_6^0 可以得到兩個非常重要的資訊，其中 \mathbf{o}_6^0 表示末端點的位置向量，而 \mathbf{R}_6^0 表示末端點的方位矩陣，如式(3.1)所示，其中包含三個方向向量 $[\mathbf{n} \ \mathbf{s} \ \mathbf{a}]$ ， \mathbf{a} 為靠近向量 (approach vector)，其用來表示夾具靠近物體前進的移動向量； \mathbf{s} 為滑動向量 (sliding vector)，若夾具為兩指式，則 \mathbf{s} 可用來表示夾具手指開合的方向向量； \mathbf{n} 為正交向量 (normal vector)，是 \mathbf{a} 及 \mathbf{s} 的正交法向量，其各連桿的座標系，如圖 3.2 所示。

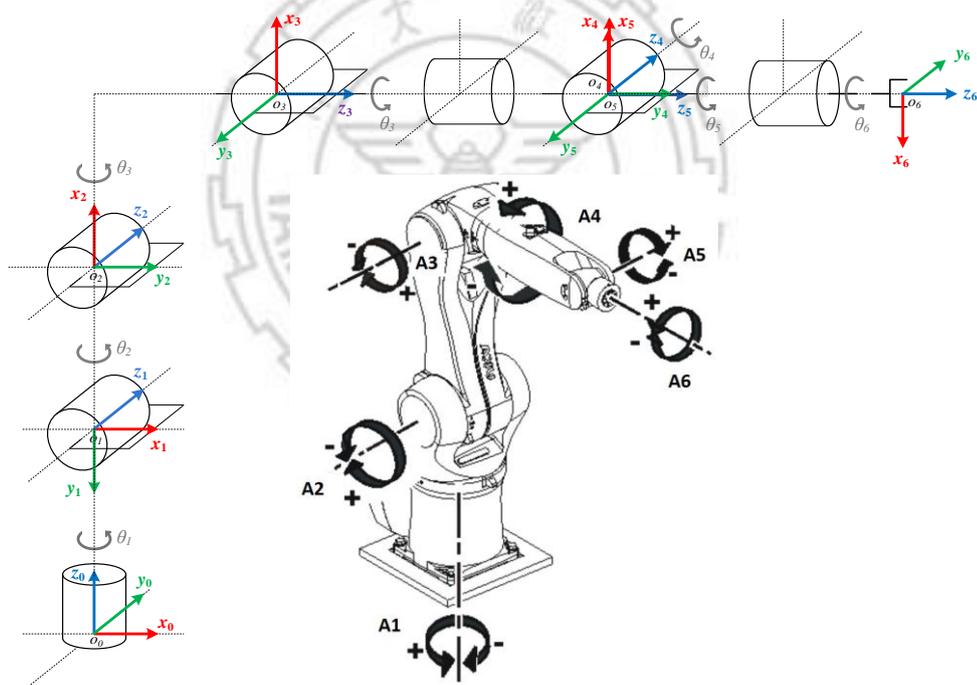


圖 3.2、KUKA KR6 R900 之連桿參數示意圖[1]

3.1.2 D-H 連桿參數表

D-H 連桿參數表是將機械手臂相鄰兩連桿間連桿座標系之間的轉換方式，選擇使用轉換矩陣來解決。如圖 3.3 所示，假設給予兩個座標系 O_0 和 O_1 ，兩個座標系之間存在一個唯一的齊次轉換矩陣 (homogeneous transformation matrix) A_i ，其方程式可表示為：

$$\begin{aligned}
 A_i &= R_{O_0}^{O_1} \quad T_{z_i}^{z_{i-1}} \quad T_{x_i}^{x_{i-1}} \quad T_{x_i}^{z_i} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & \alpha_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & \alpha_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

其中， a_i 是指連桿的長度 (Link Length)， z_{i-1} 軸和 z_i 軸之間的距離，方向是沿著 x_i 軸； α_i 是指連桿的扭角 (Link Twist)，繞 x_i 軸所量的 z_{i-1} 軸和 z_i 軸之間夾角，方向是由 z_{i-1} 軸往 z_i 軸； d_i 是指連桿的偏置量 (Link Offset)， x_{i-1} 軸和 x_i 軸之間的距離，方向是沿著 z_{i-1} 軸； θ_i 是指關節角度 (Joint Angle)，繞 z_{i-1} 軸所量的 x_{i-1} 軸和 x_i 軸之間夾角，方向是由 x_{i-1} 軸往 x_i 軸，方向由右手定則而決定，如圖 3.4 所示。觀察式 (3.2) 中，我們可以得知該齊次轉換矩陣且具有兩個特性，(DH1) x_1 軸垂直於 z_0 軸，及 (DH2) x_1 軸相交於 z_0 軸。基於 DH1 和 DH2 特性下，D-H 的轉換矩陣 A_i ，如表 3.1 所示，每個 A_i 代表 4 個基本轉換矩陣的乘積轉換矩陣有 4 個參數分別是 a_i 、 α_i 、 d_i 和 θ_i 是具有獨特性且與連桿 i 和關節 i 是有相關的。

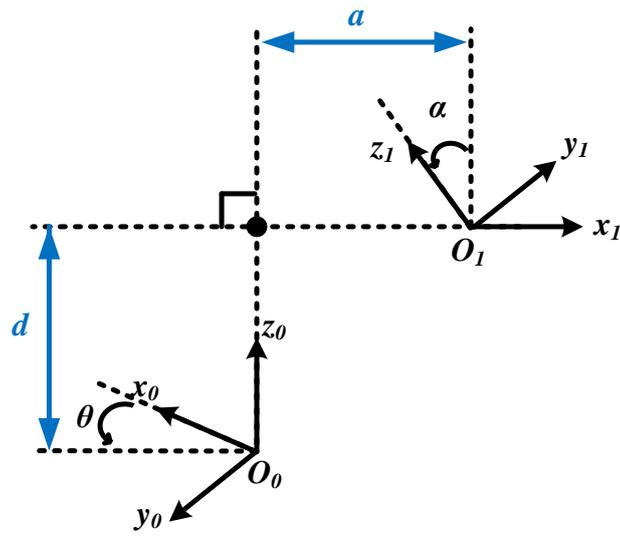


圖 3.3、符合 DH1 和 DH2 條件之座標系示意圖



圖 3.4、 α_i 和 θ_i 之示意圖

表 3.1、KUKA 機械手臂 D-H 連桿參數表

Link	a_i (mm)	α_i (deg)	d_i (mm)	θ_i (deg)
1	23	90°	400	θ_1
2	456	0°	0	$\theta_2 - 90^\circ$
3	36	90°	0	θ_3
4	0	-90°	420	θ_4
5	-1	90°	0	θ_5
6	0	180°	80	$\theta_6 + 180^\circ$

3.2 逆運動學

逆運動學(Inverse Kinematic)[8]是指給予機械手臂末端點的位置和方位，可以求得機械手臂各軸關節馬達的角度。本論文使用 KUKA KR6 R900 六軸機械手臂，經過連桿座標分析後，發現 KUKA 機械手臂在關節 4 到關節 6 為球關節，即為後三軸相交於手腕部分，因此使用運動學解耦(Kinematic Decoupling)方法簡化逆運動學問題的複雜度，將位置和方位問題獨立討論，位置逆運動學(Inverse Position Kinematic)，由於前三軸的角度變化會影響機械手臂的末端點位置，利用幾何逼近(Geometric Approach)方法找出關節 1 到關節 3 的角度以解決位置問題；關節 4 到關節 6 的角度變化僅會影響機械手臂末端點的方位，利用方位逆運動學(Inverse Orientation Kinematic)方法找出關節 4 到關節 6 的角度以解決方位問題，亦稱為尤拉角度 φ 、 θ 和 ϕ [9, 10]。關於位置逆運動學和方位逆運動學，分別介紹如下。

3.2.1 位置逆運動學

在位置逆運動學方面，由於第 4 關節到第 6 關節為球關節的關係，這三軸的 z 軸會相交於第 5 軸的座標原點上，因此，可令此座標原點為手腕中心(wrist center) \mathbf{o}_c ，如圖 3.5 所示，在根據手腕中心將機械手臂分解為前三軸與後三軸。接著，因為期望的末端點位置矩陣與方位矩陣已知，因此手腕中心的位置可透過末端點位置與靠近向量 \mathbf{a} 求得，其表示如下：

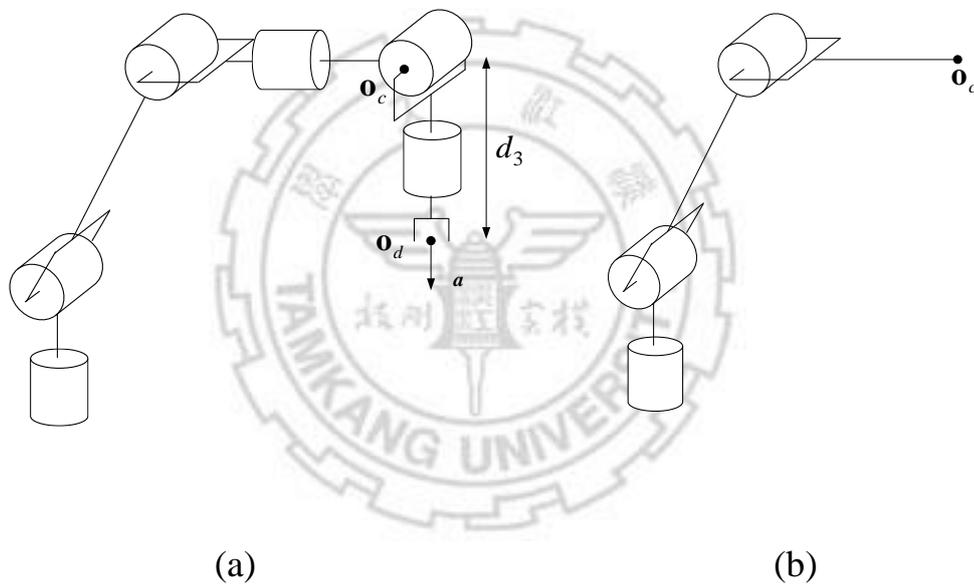


圖 3.5、運動學解耦合及手腕中心示意圖

$$\mathbf{o}_c = \mathbf{o}_d - d_3 \cdot \mathbf{R}_d \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

其中 \mathbf{o}_d 與 \mathbf{R}_d 分別表示為期望的末端點位置與方位矩陣， d_3 則手腕中心到

末端點的連桿長度，如圖 3.5(a)所示。所以，在得到手腕中心 o_c 的位置之後，前三軸的可以被簡化為雙連桿的問題，如圖 3.5(b)所示。最後，根據機械手臂前三軸的連桿關係，如圖 3.6 所示，即可以透過三角幾何的方法求得前三軸的關節角度，其分別求解如下：

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_c, x_c) \quad (3.4)$$

$$\cos \theta_D = \frac{x_c^2 + y_c^2 + (z_c - L_1)^2 - (L_2^2 + L_3^2)}{2L_2L_3} \quad (3.5)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\pm\sqrt{1 - \cos^2 \theta_D}, \cos \theta_D) \quad (3.6)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(z_c - L_1, \sqrt{x_c^2 + y_c^2}) - \text{atan2}(L_3 \sin \theta_3, L_2 + L_3 \cos \theta_3) \quad (3.7)$$

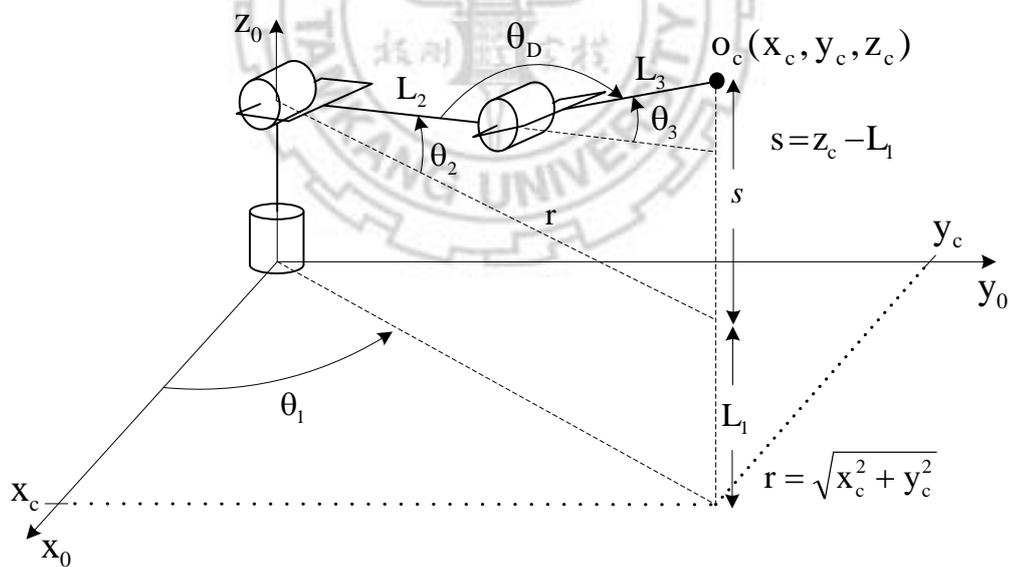


圖 3.6、前三軸關節連桿的幾何關係圖

3.2.2 方位逆運動學

方位逆運動學(Inverse Orientation Kinematic)用以求得六軸機械手臂末端點之三軸的角度，是因為末端點之三軸的角度變化會影響末端點的方位。末端點的旋轉姿態以尤拉角(Euler Angle)來描述，是指在空間中對三個軸的旋轉角度，可以分為 pitch(θ)對 x 軸旋轉、roll(ψ)對 y 軸旋轉、和 yaw(ϕ)對 z 軸旋轉如圖 3.7 所示，且 $\theta_6 = \psi$ 、 $\theta_4 = \phi$ 和 $\theta_5 = \theta$ 。

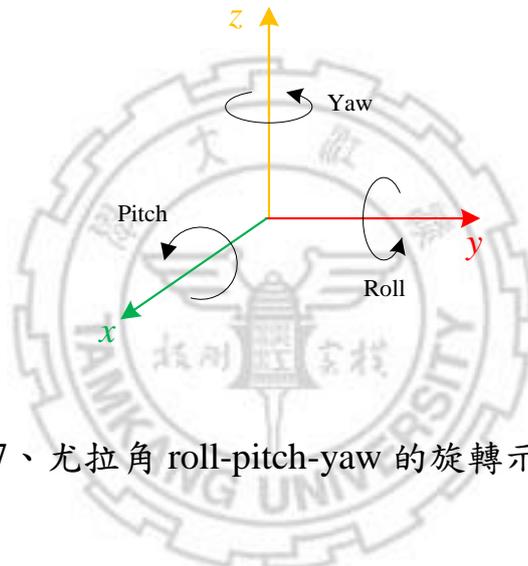


圖 3.7、尤拉角 roll-pitch-yaw 的旋轉示意圖

求得 θ_4 、 θ_5 和 θ_6 可利用 $A_4 A_5 A_6 = (A_1 A_2 A_3)^{-1} T_6^0$ 式子，對旋轉矩陣部分展開如式(3.8)所示， $c_i = \cos \theta_i$ ， $s_i = \sin \theta_i$ ，利用等式相等關係可得式(3.9)和式(3.10)，可先求得兩個 θ_5 的值，選擇角度值較小的 θ_5 ，如式(3.11)，再依序求出 θ_4 和 θ_6 ，如式(3.12)~ 式(3.13)所示。

$$\begin{bmatrix} -c_4c_5c_6 + s_4s_6 & c_4c_5c_6 + s_4c_6 & -c_4s_5 \\ -s_4c_5c_6 - c_4s_6 & s_4s_5s_6 - c_4c_6 & -s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1s_2c_3 + c_1c_2s_3 & s_1s_2c_3 + s_1c_2s_3 & c_2c_3 - s_2s_3 \\ s_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1s_2s_3 + c_1c_2c_3 & -s_1s_2s_3 + s_1c_2c_3 & s_2c_3 + c_2s_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} c_i c_j - s_i s_j &= c_{i+j} \\ s_i c_j + s_i c_j &= s_{i+j} \\ -c_i s_j - s_i c_j &= -s_{i+j} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} -c_4s_5 &= (c_1a_x + s_1a_y)s_{23} + a_zc_{23} \\ -s_4s_5 &= s_1a_y - c_1a_x \\ c_5 &= -a_zs_{23} + (c_1a_x + s_1a_y)c_{23} \\ -c_6s_5 &= -n_zs_{23} + (c_1n_x + s_1n_y)c_{23} \\ s_6c_5 &= -s_zs_{23} + (c_1s_x + s_1s_y)c_{23} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \theta_5 &= \\ \arctan(s_5, c_5) &= \\ \arctan\left(\sqrt{1 - (-a_zs_{23} + (c_1a_x + s_1a_y)c_{23})^2}, -a_zs_{23} + (c_1a_x + s_1a_y)c_{23}\right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \\ \arctan\left(\frac{s_4s_5}{s_5}, \frac{c_4s_5}{s_5}\right) &= \\ \arctan\left(\frac{-(s_1a_y - c_1a_x)}{s_5}, \frac{-((c_1a_x + s_1a_y)s_{23} + a_zc_{23})}{s_5}\right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \theta_6 &= \\ \arctan\left(\frac{s_6s_5}{s_5}, \frac{c_6s_5}{s_5}\right) &= \\ \arctan\left(\frac{-s_zs_{23} + (c_1s_x + s_1s_y)c_{23}}{s_5}, \frac{-(-n_zs_{23} + (c_1n_x + s_1n_y)c_{23})}{s_5}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.3 B-Spline 曲線

B-Spline 曲線[11, 12]是由一組控制點 $(P_0, P_1, P_2, \dots, P_n)$ 與基底函數相乘總合得來，如圖 3.8 所示。當曲線越複雜時，曲線若只用一個數學方程式或有理(Rational)多項式插值法求得，易使多項式的次數變的很大，因此會有計算量龐大且曲線不易逼近的問題。解決方法通常是將曲線分割成數個小線段，這些小線段稱為曲線線段(Curve Segment)，每一個曲線線段即可用較低次的多項式來逼近，最後將所有的曲線線段連接起來變成一個完整的曲線。若 $C(t)$ 為曲線上的位置向量，則沿著參數 t 的 B-Spline 曲線演算法定義為：

$$C(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(t) P_i, \quad t_{\min} \leq t < t_{\max}, \quad 2 \leq k \leq (n+1) \quad (3.14)$$

其中 $P_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$ 為控制點位置向量(Position Vector)，簡稱為控制點(Control Points)，個數為 $(n+1)$ 。 k 定義為 B-Spline 曲線的階數(Order)，即 $(k-1)$ 次(Degree)多項式。 $N_{i,k}$ 是 B-Spline 基底函數(Basis Function)。若將每個曲線線段以參數 $t \in [0,1]$ 表示，由於一條 B-Spline 曲線是由數曲線線段組合而成，因此參數 t 變化由 t_{\min} 至 t_{\max} 。對於 B-Spline 曲線之基底函數和節點向量，其分別介紹如下。

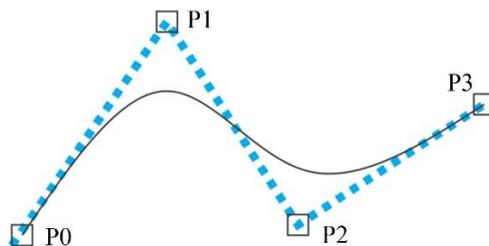


圖 3.8、B-Spline 示意圖

最古老的基底函數為多項式基底，由 $1, t, t^2, \dots, t^n$ 所組成；B-Spline 基底函數 $N_{i,k}(t)$ 是以步階函數 $N_{i,1}(t)$ 為基礎，在 $t \in [t_i, t_{i+1})$ 之間有值，其餘值為零如式(3.15)。 $\{N_{i,k}(t), i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ 是指 B-Spline 曲線階數為 k 的第 i 個 B-Spline 基底函數 (Basis Functions)，基底函數可讓 B-Spline 曲線具可微分的連續性 (Continuity)，即使當控制點被改變位置時也不影響 B-Spline 曲線的連續性，還具備一些重要特點，如片段多項式 (Piecewise Polynomial)、局部控制的能力、凸包性 (Convex Hull) 和幾何不變性 (Geometry Invariability) 等。

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1, & \text{if } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

節點向量 (Knot Vector) 是將每段曲線線段的範圍規範在 $[0,1]$ 之間，而每個曲線線段的分段稱為節點 (Knots)。節點向量的選擇方式與 B-Spline 曲線的曲線形狀有決定性的影響，在曲線具有相同控制點的狀況下，若節點向量不同，則曲線形狀會不同。節點向量的各元素必須為非遞減的分布，即 $t_i \leq t_{i+1}$ 的遞增條件。節點向量的形式可分為均勻 (Uniform) 和非均勻 (Nonuniform) 兩大類。

均勻節點向量是指，節點沿參數 t 軸上平移一個相同的增量值，即節點與相鄰節點間的差值為固定的常數，即以等差級數的方式排列，會使 B-Spline 曲線全部的基底函數形狀相同。反之，若節點與相鄰節點間的差值並非為固定的常數，或內部結點有重複的情況，皆稱之為非均勻節點向量，其基底函數的形狀較不規則。

3.4 XML 封包傳輸

XML (Extensible Markup Language) 是一套資料儲存工具，可以用來建立包含結構化格式資料的文件。除了資料之外，還可以包含一組定義資料架構的詳細規則。這些規則是由 XML 文件的建立者負責定義。

本論文透過 XML 結構格式，傳送給 KUKA KR6 R900 機械手臂，並控制末端點的速度，並回傳機械手臂末端點之絕對位置，以此資訊來得知現在機械手臂所繪製的線段，當每個線段繪製完畢時，將跳至下一個線段繼續繪圖。KUKA XML 傳送命令格式如圖 3.9 所示，其中 RKorr 為控制 KUKA 機械手臂末端點之六軸速度命令與角速度命令，分別為 X、Y、Z 方向的速度，與 Pitch、Roll、Yaw 的角速度。

```
<Sen Type="ImFree">
  <RKorr X="4" Y="7" Z="32" A="6" B="" C="6" />
  <AK A1="2" A2="54" A3="35" A4="76" A5="567" A6="785" />
  <EK E1="67" E2="67" E3="678" E4="3" E5="3" E6="7" />
  <DiO>123</DiO>
  <IPOC>123645634563</IPOC>
</Sen>
```

圖 3.9、KUKA XML 傳送命令格式

此外，KUKA XML 接收命令格式如圖 3.10 所示，其中，RIst 為接收機械手臂實際末端點六軸座標位置命令與角度命令，其中 X、Y、Z 為末端點位置，A、B、C 為末端點角度。

```
<Rob TYPE="KUKA">
  <RIst X="0.0" Y="0.0" Z="0.0" A="0.0" B="0.0" C="0.0" />
  <AIPos A1="0.0" A2="0.0" A3="0.0" A4="0.0" A5="0.0" A6="0.0" />
  <MACur A1="1.0" A2="1.0" A3="1.0" A4="1.0" A5="1.0" A6="1.0" />
  <Delay D="" />
  <Tech T11="0.0" T12="0.0" T13="0.0" T14="0.0" T15="0.0" T16="0.0"
    T17="0.0" T18="0.0" T19="0.0" T110="0.0" />
  <IPOC>123645634563</IPOC>
</Rob>
```

圖 3.10、KUKA XML 接收命令格式

第四章 影像處理

在傳統方法上，需人工選取畫圖座標點、人工編輯機械手臂畫圖路徑規劃與人工編輯機械手臂移動路徑，以上流程是繁瑣困難，並且會耗費大量時間的，為了改善此缺點，本論文依據影像處理演算法以及 B-Spline 曲線演算法來設計實現一個六軸機械手臂繪圖系統，讓 KUKA KR6 R900 六軸機械手臂可以實際的描繪出使用者想要的圖形。本論文所提出的方法被用來解決一個機械手臂畫圖的路徑規劃問題，本論文主要探討繪圖系統，結合影像處理方法，辨識繪圖影像資訊，擷取出圖形輪廓並且以外而內的方式來編排畫圖輪廓的順序，使用 B-Spline 曲線演算法來修正圖形輪廓，使畫圖曲線更加平順，最後透過網路傳送 XML 架構之 KUKA 機械手臂命令，控制機械手臂末端點移動速度，完成畫圖任務。本論文使用影像前處理包含灰階、自適應直方圖、濾波、自適應二值化、邊緣偵測、侵蝕、膨脹、輪廓擷取與排序、等九種方法。

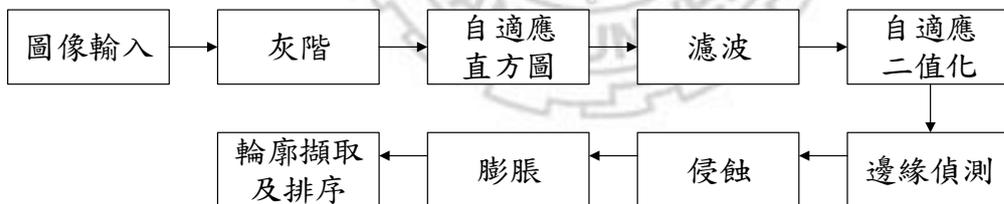


圖 4.1、影像處理之系統架構圖

本章將介紹影像處理之整個系統架構的流程，包含如何處理圖像資訊並且交給機械手臂繪圖，過程中會用到的影像處理技術及處理過程。本章節內容有六個章節：第一節介紹影像灰階處理；第二節介紹影像的直方圖處理；第三節介紹影像的濾波；第四節介紹影像的二值化；第五節介紹影像的邊緣偵測；第六節介紹影像的侵蝕與膨脹；第七節介紹影

像的輪廓擷取與排序。

4.1 灰階

灰階(Grey)處理是將彩色影像中每個像素點(Pixel)，根據紅色、綠色、藍色分配比例不同，相加權重而得到的結果，其計算公式為：

$$Gray = 0.229 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (4.1)$$

其中 R 代表紅色，G 代表綠色與 B 代表藍色。經由上述公式即可將彩色影像轉換成一個從最暗黑色到最亮白色之間的一種灰度，將彩色影像轉換為灰階影像，以減少之後影像處理的運算時間。灰階處理通常使用 8 位元，表示每個像素點從黑到白分割成 255 等份，即為用 0~255 來表示黑與白之間的變化，0 代表全黑，255 代表全白，其灰階如圖 4.2 所示。

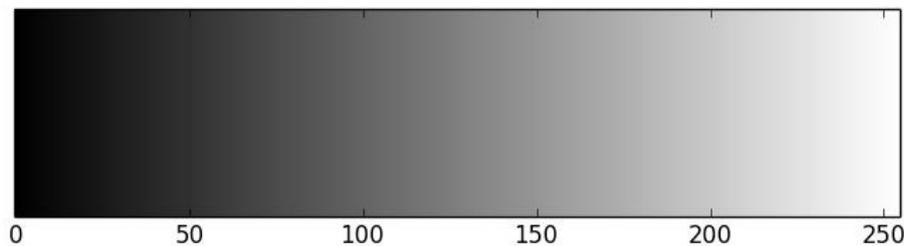


圖 4.2、用 0~255 表示由黑到白的灰階圖

灰階處理從彩色圖像三原色轉換為由黑到白的灰階，由於資訊量從 24 位元降至 8 位元，所以大量降低影像資訊的複雜度，因此灰階處理可以很有效的提高影像運算速度，影像中的輪廓及亮度也不會因灰階處理而受到影響，透過轉換公式，將彩色影像中光的強度之函數 $f(x,y)$ 轉換，而 x 與 y 代表此影像中某一點，Gray 為灰階值，並且取代原來的彩色資訊，其轉換彩色圖像與灰階圖像對照圖，如圖 4.3 所示。

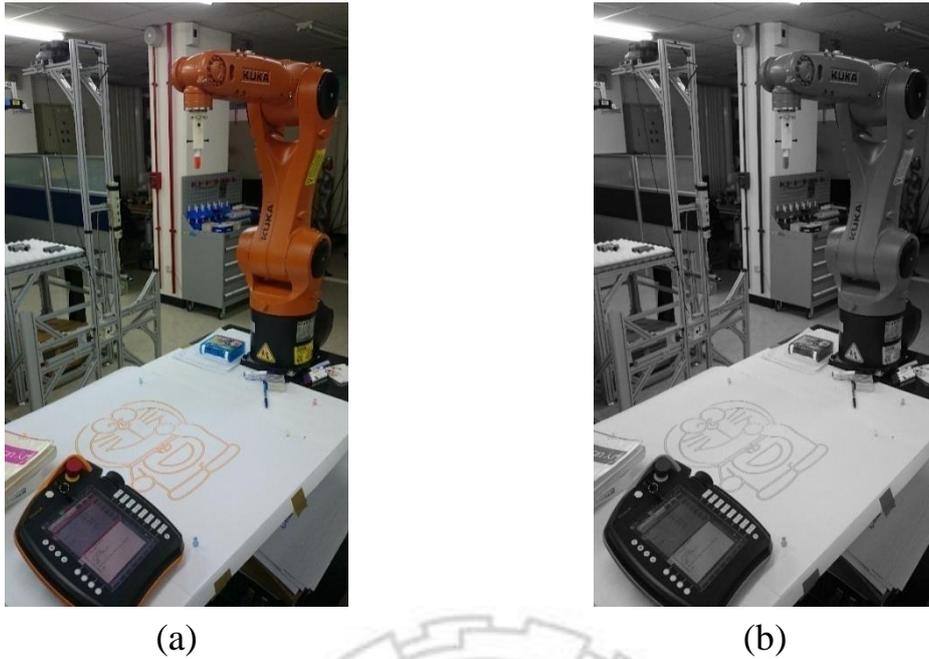


圖 4.3、灰階處理之前後對照圖：(a)灰階處理前的彩色圖像及(b)灰階處理後的灰階圖像

4.2 直方圖

直方圖(Histogram)是一種可以有效的分析圖形組成結構的方法，範圍從 0 到 255，一般使用灰階影像作為輸入，統計在圖像中每一個灰階值出現的次數，根據圖像的直方圖可以了解圖像中的亮度(Brightness)、對比(Contrast)、強度分布(Intensity Distribution)等，圖 4.4 為灰階圖與灰階圖像的直方圖，由圖中可知灰階值為 202 的地方，出現的次數最多。

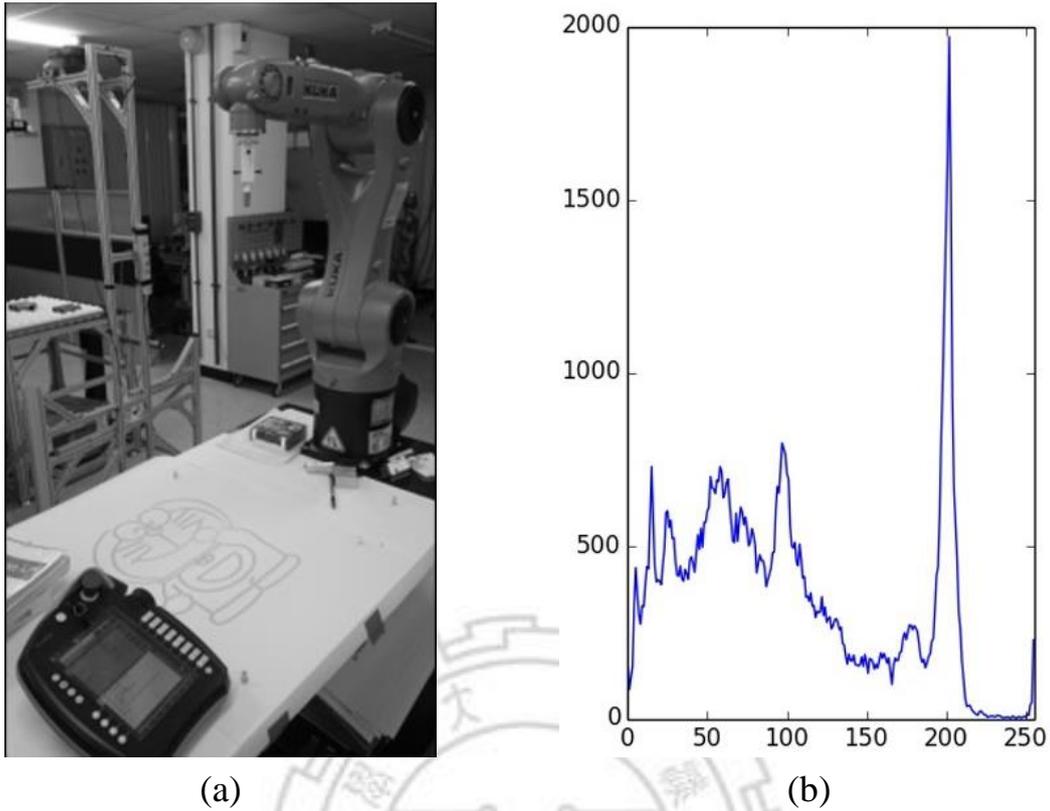


圖 4.4、灰階圖與其直方圖比較：(a)灰階圖像及(b)灰階圖像的直方圖

4.2.1 直方圖均化

直方圖均化(Histogram Equalization)用於加強整張影像的全域比對度以及將亮度標準化，將直方圖擴展至整個論域內，此方法處理背景和前景太亮或太暗的圖案效果顯著，將灰度個數平均分配，將直方圖灰度次數較高的分配給附近的灰度值，調整相對的比例，因此不會受到影響，處理步驟為，首先將灰階影像轉換成直方圖，並利用式(4.2)將直方圖內的灰度值做加總，得到累積分布函數(Cumulative Distribution Function)，其方程式可表示為：

$$CDF(x) = \sum_i^x h(i) \quad (4.2)$$

其中 x 是灰度值， h 是影像的直方圖陣列，計算完累積分布函數之後，計算直方圖均化，其方程式可表示為：

$$eh(i) = round\left(\frac{CDF(i) - \min(CDF)}{M * N * \min(CDF)} * (L - 1)\right) \quad (4.3)$$

其中 eh 為直方圖均化， $\min(CDF)$ 是取累積分布函數的最小值， M 是影像中的列數， N 是影像中的行數， L 是灰階數， i 是次數，一般設定為 256，並將結果四捨五入。直方圖均化方法可以有效的提高影像對比度與調整亮度，圖 4.5 為直方圖均化處理前後的灰階圖像及其直方圖，由圖可知經過直方圖均化處理後的峰值從 202 擴展延伸至 220 到 250 之間，而經由圖 4.5(a)及(b)的對照可知直方圖均化處理確實可以提高圖像的對比度。

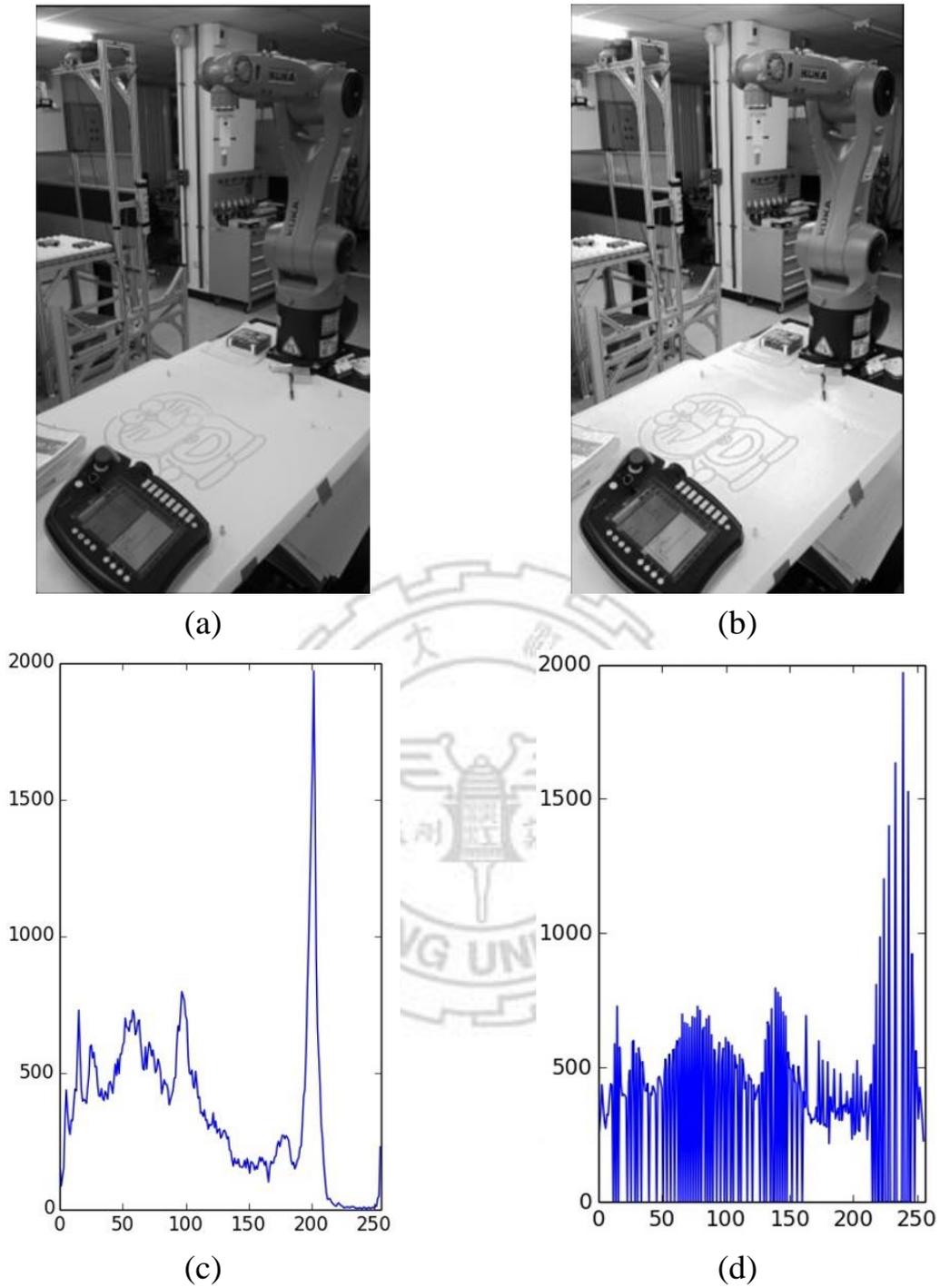


圖 4.5、直方圖均化處理之前後對照圖：(a)直方圖均化處理前的灰階圖像、(b)直方圖均化處理後的灰階圖像、(c)直方圖均化處理前之灰階圖像的直方圖及(d)直方圖均化處理後之灰階圖的直方圖

4.2.2 自適應直方圖均化

自適應直方圖均化(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)[16]方法原本是應用在醫學影像，可以很有效的加強低對比度的影像，因為直方圖均化方法是對整體影像做直方圖擴展，往往會導致有些時候明亮處會過度曝光，導致輪廓不明顯以及會放大雜訊，為了解決此問題，因此，使用自適應直方圖均化透過 CDF 來計算要剪裁直方圖的閾值，來達到限制放大比例的目的，因此也限制了 CDF 的斜率與變換函數的斜度，被剪裁掉的值，即為剪裁限制，取決於直方圖的分布，其如圖 4.6 所示。

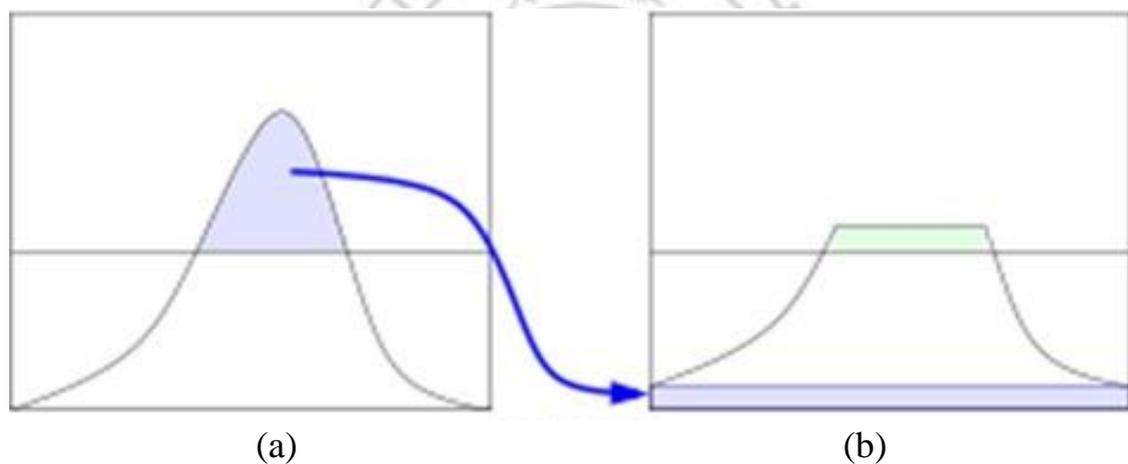


圖 4.6、自適應直方圖均化原理示意圖：(a)直方圖均化及(b)自適應直方圖均化

透過區域掃描的方式來建立直方圖，以避免因整體直方圖擴展導致過度曝光的問題，並且為了防止直方圖均化會放大雜訊問題，其過度曝光的問題在於當圖像中的直方圖集中在灰暗的部分時，經過直方圖均化處理，會對整體直方圖做擴展處理，但因集中在灰暗的地方導致原本直方圖明亮地區擴展導致分佈間隔變大造成過度曝光的問題，因此設定一個

特定的對比限制閾值，將超過閾值的次數重新分配加到原來的直方圖上，處理完後再將數值交給 CDF 運算，其實驗結果如圖 4.7 直方圖均化與適應性直方圖均化比較所示。

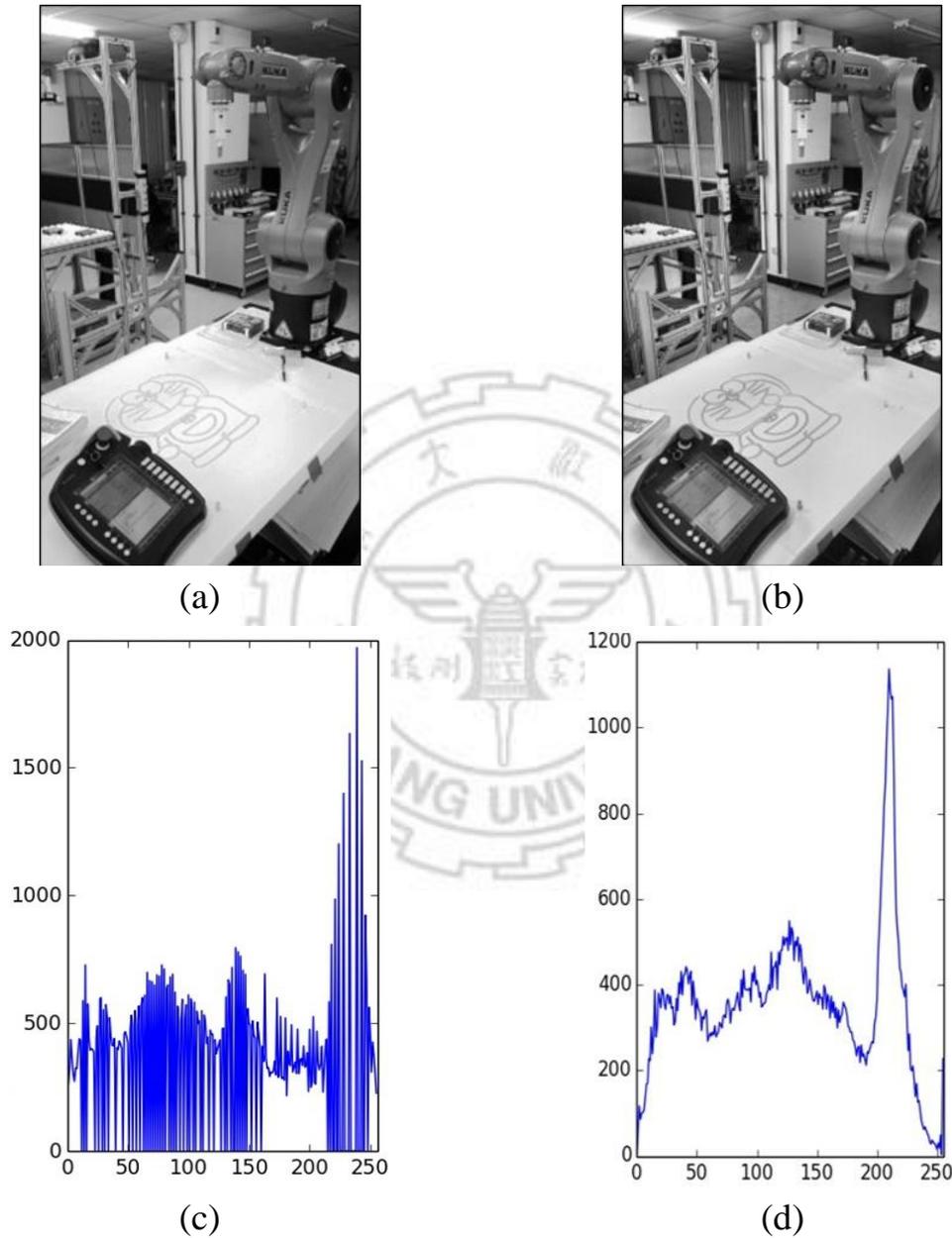


圖 4.7、直方圖均化與自適應直方圖均化對照圖比較：(a)直方圖均化處理的灰階圖像、(b)自適應直方圖均化處理的灰階圖像、(c)直方圖均化處理後的直方圖及(d)自適應直方圖均化後的直方圖

4.3 濾波

濾波(Filter)主要是降低訊號中的雜訊，在影像處理過程中會有許多因素造成雜訊，進而影響到影像品質，其中包含熱雜訊、相機晃動、強光引起的光害等都會對影像品質造成影響，大幅降低化圖品質、影像處理與機械手臂畫圖的複雜度與作畫時間，故需盡可能的抑制雜訊，已得到品質比較好的影像，目前影像處理中，去除雜訊的方法有很多種，例如均值濾波、中值濾波與高斯模糊濾波。

4.3.1 均值濾波

均值濾波(Mean Filter)主要是將一個 3*3 遮罩如式(4.4)，在輸入影像上取 3*3 的範圍的平均值，意思為某點(x,y)為中心，平均周圍的像素點，並取代中心數值，藉此降低影像中高頻的成分，如此可以達到抑制雜訊的效果，使輸入訊號變得平滑，強化低頻的部分，抑制變化較快的部分，又稱為低通濾波(Low Pass Filter)，但卻往往很容易造成影像模糊。

$$M = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$M = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \frac{P_{mn}}{9} \quad (4.5)$$

4.3.2 中值濾波

中值濾波(Median Filter)可以用來去除胡椒式的雜訊，並且保持影像

的銳利度，中值濾波器也是一種典型的低通濾波器，目的是在保護影像的邊緣，同時去除雜訊，以某點(x,y)為中心點，並將圖像中的灰階從大到小做排序，取除雜訊干擾，將中值取代影像中過大的值。

4.3.3 高斯模糊濾波

高斯模糊濾波(Gaussian Blur Filter)[17]是一種圖像模糊濾波器，它用常態分布來計算圖像中每個像素的變換。N 維空間常態分布方程式可以表示為：

$$G(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}^N} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (4.6)$$

其中 r 是模糊半徑， σ 是常態分布的標準偏差。而二維空間常態分佈方程式可以表示為：

$$G(u,v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

其中 $r = u^2 + v^2$ ，在二維空間中，這個公式生成的曲面的等高線是從中心開始呈常態分布的同心圓。分布不為零的像素組成的卷積矩陣(Convolution Matrix)與原始圖像做變換。每個像素值都是周圍相鄰像素值的加權平均。原始像素的值有最大的高斯分布值，所以有最大的權重，相鄰像素隨著距離原始像素越來越遠，其權重也越來越小，高斯模糊濾波能有效的保留邊緣效果。

4.4 二值化與自適應二值化

二值化(Binarization)主要是將影像處理成黑與白兩個數值，為了要做分割物件，最常做的方法是，設定一個閾值，若大於閾值，則將其設定為 255(白色)，若小於閾值，則將其設定為 0(黑色)，如式(4.8)所示：

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{if } f(x, y) \geq T \\ 0, & \text{if } f(x, y) < T \end{cases} \quad (4.8)$$

其中 $g(x,y)$ 為二值化後的影像， $f(x,y)$ 為原始影像， T 為調整二值化的閾值。

自適應二值化(Adaptive Binarization)會根據影像中灰度直方圖，計算出適合此影像的閾值，以解決一般的二值化中，設定的閾值往往只針對一張影像做處理，若更換成其他影像，則必須重新調整閾值，或是當影像中的亮度有變動，或是在不同環境時，都需要重新調整閾值，在應用上變得十分麻煩，如圖所示 4.8 所示。

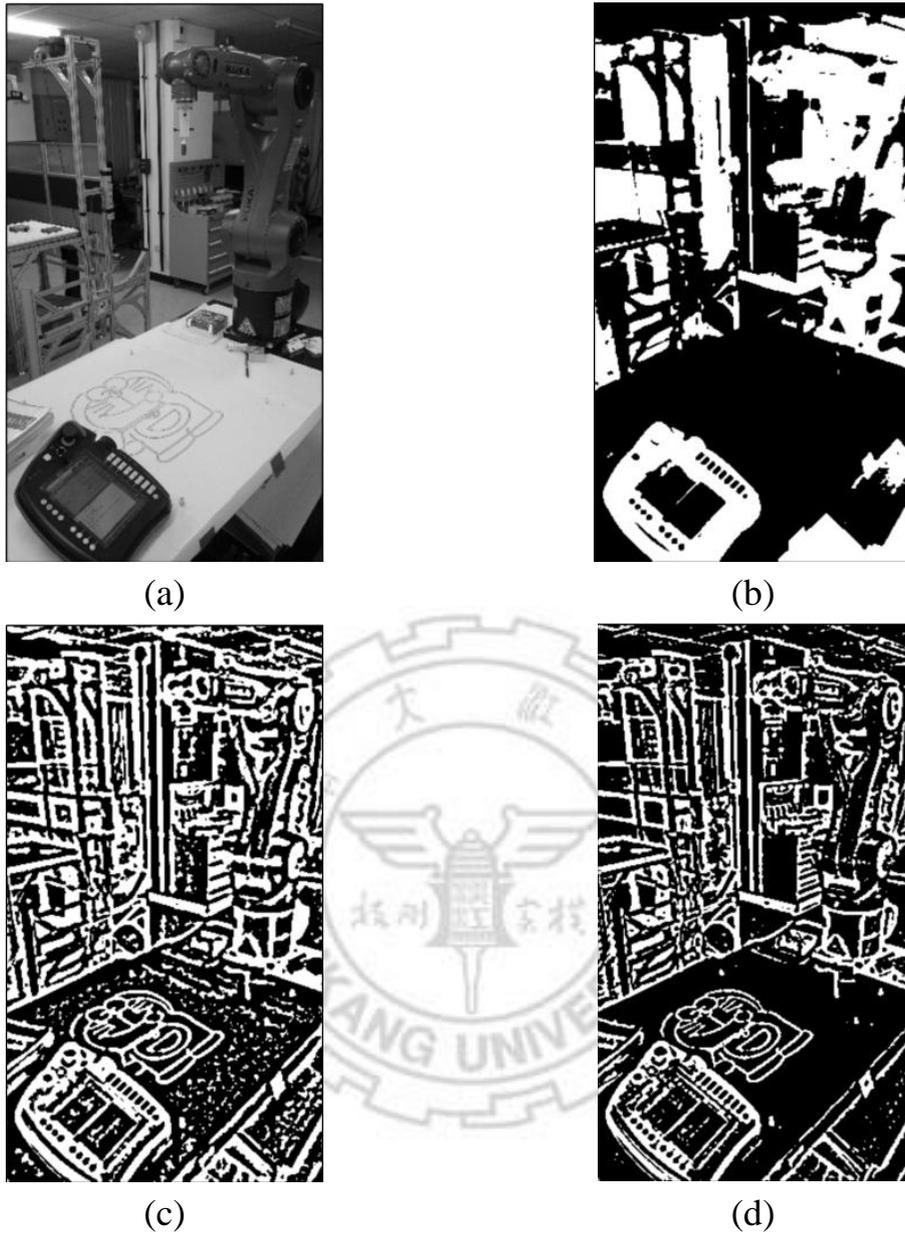


圖 4.8、二值化處理之前後對照圖：(a)二值化處理前的灰階圖像、(b)固定閾值二值化處理後的灰階圖像、(c)自適應中值二值化處理後的灰階圖像及(d)自適應高斯二值化處理後的灰階圖像

4.5 邊緣偵測

Canny 邊緣偵測(Edge Detection)[18]利用高斯函數的一階導數來求出影像梯度的最大值進而找出邊緣點，是相當通用且強健的一種邊緣偵測

法，其可分為四個步驟：

步驟一：(使用高斯濾波器來平滑影像)

將欲平滑的影像與高斯濾波器做迴旋積分(Convolution)以去除雜訊，如式(4.9)、(4.10)所示：

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.9)$$

$$g(x, y) = G(x, y) * f(x, y) \quad (4.10)$$

其中 $G(x,y)$ 為高斯濾波器， σ 為平滑因子， $g(x,y)$ 為平滑後的影像， $f(x,y)$ 為欲平滑的影像。

步驟二：(計算平滑後影像的梯度大小及方向)

根據影像中的變化找到 x 軸的梯度方向以及 y 軸梯度的方向，綜合以上 x 、 y 方向及為邊緣強度，可以找出圖形中的明顯的邊緣線段

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (4.11)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \frac{g_y}{g_x} \quad (4.12)$$

其中 $M(x,y)$ 為 $g(x,y)$ 之梯度大小， $\alpha(x,y)$ 為 $g(x,y)$ 之梯度方向， g_x 及 g_y 可用 Sobel、Prewitt 等不同遮罩來計算得到。

步驟三：(非最大抑制)

非最大抑制(Non-maxima suppression)就是在梯度影像中，對每一個被找到的邊界點做梯度方向的搜尋，即與梯度方向上的兩側像素點做比較，如果該像素點之梯度值不是兩側鄰居的最大值，則將這個像素點之梯度值給定為 0，達到抑制的效果，而經過此過程會達到似細線化(Thinning)的效果。

步驟四：(雙閾值判斷邊緣)

若要判斷某像素點是否為邊緣，通常只採用一個閾值，但通常會造成連續斷裂、誤判，因此 Canny 邊緣偵測法在此使用名為 Hysteresis thresholding 的雙閾值方法來判斷邊緣，其設定兩個閾值：高閾值 T_H 與低閾值 T_L ；首先，若某像素點之梯度值大於 T_H ，則判定為邊緣點；接著若梯度值介於 T_H 與 T_L 之間的像素點其八鄰近中有邊緣點，則也視為邊緣點；最後，梯度值小於 T_L 的像素點則視為非邊緣點。

4.6 侵蝕與膨脹

形態學(Morphology)是圖學處理的基本理論，針對從機器視覺中所的到的資訊，要從這些資訊中求得物體形狀必需先經過適當的二值化，但由於處理完的影像某些區塊可能出現雜訊、凹凸不平的地方，當周圍只有一個像素點其設為 1 時則為雜訊，反之則不是。我們可以利用形態學中的侵蝕(Erosion)、膨脹(Dilation)，修補其物體使得物體邊緣平滑化，甚至對辨識的物體給予特定的結構元素，這樣也能將其物體外型表現出

來。侵蝕與膨脹皆為一個遮罩運算，各利用一個 3×3 的遮罩矩陣對影像二值化後的結果做處理。

假設圖像出現一個像素點時，則侵蝕的運算原理為判斷目標點周圍的八個像素點若皆為 1 時，則目標點(E_5)的像素設為 1，否則將其設為 0，其方程式可表示如下：

$$E_5 = E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4 \cap E_5 \cap E_6 \cap E_7 \cap E_8 \cap E_9 \quad (4.13)$$

其中 E_5 表示目前判斷的目標點， \cap 代表 AND 運算，因此只要周圍有一個像素點為 0，則目標點的像素輸出為 0。另一方面，膨脹的運算與侵蝕剛好相反，當目標點周圍八個像素點皆為 0 時，則目標點(D_5)的像素設為 0，否則為 1，其方程式可表示如下：

$$D_5 = D_1 \cup D_2 \cup D_3 \cup D_4 \cup D_5 \cup D_6 \cup D_7 \cup D_8 \cup D_9 \quad (4.14)$$

其中 D_5 表示目前判斷的目標點， \cup 代表 OR 運算，因此只要周圍有一個像素點為 1，則目標點的像素輸出為 1。

4.7 輪廓擷取及排序

輪廓擷取及排序[19]主要介紹了兩種算法，用來對數字二值圖像進行拓撲分析。總共有兩種方法，第一種算法是在確定二值圖像邊界的圍繞關係，即確定外邊界、孔邊界以及他們的層次關係，由於這些邊界和原圖的區域具有一一對應關係（外邊界對應像素值為 1 的連通區域，孔邊界對應像素值為 0 的區域）。

利用編碼的方式，給不同的邊界賦予不同的整數值，因此我們就可以確定邊界以及層次關係。輸入的二值圖像即為 0 和 1 的圖像，用 $f(i,j)$ 表示圖像的像素值。其方法如圖 4.9 所示，輪廓擷取流程如下：

步驟一：選擇以下其中一種狀態

(a)如果 $f_{i,j}=1$ 和 $f_{i,j-1}=0$ ，那就決定 (i,j) 是外邊界的起始點，NBD 累加 1 以及 $(i_2,j_2) \leftarrow (i,j-1)$ 。

(b)如果 $f_{i,j} \geq 1$ 和 $f(i,j+1)=0$ ，那就決定 (i,j) 是孔邊界的起始點，NBD 累加 1， $(i_2,j_2) \leftarrow (i,j+1)$ 並且如果 $f_{i,j} > 1$ ， $LNBD \leftarrow f_{i,j}$ 。

(c)如果都不是，移至步驟四

步驟二：根據新找到的邊界種類，和邊界的序列號碼 LNBD，來決定線在邊界的父子關係，如表一父邊界找到新邊界 B 之決定規則所示。

步驟三：從起始點 (i,j) 開始，步驟 3.1 到 3.5 完成邊界偵測。

(3.1)以起始點 (i,j) 開始順時針搜尋相鄰的非零像素點， (i_1,j_1) 為第一個找到的像素點，如果沒有設定 -NBD 給 $f_{i,j}$ ，並且跳至步驟四。

(3.2) $(i_2,j_2) \leftarrow (i_1,j_1)$ 以及 $(i_3,j_3) \leftarrow (i,j)$ 。

(3.3)下個像素起始點 $f(i_2,j_2)$ 逆時針搜尋，逆時針測試相鄰的像素點

(i_3,j_3) ，搜尋非零像素點，並設定第一個非零像素點為 (i_4,j_4) 。

(3.4)改變像素點 $f(i_3,j_3)$ 值步驟如下：

(a)如果經由步驟 3.3 測試， (i_3,j_3+1) 為 0-像素，則 $f_{i_3,j_3} \leftarrow -NBD$ 。

(b)如果經由步驟 3.3 測試， $f(i_3,j_3+1)$ 不是 0-像素，並且 $f_{i_3,j_3}=1$ ，

則 $f_{i_3, j_3} \leftarrow -\text{NBD}$ 。

(c)其餘的狀態，不改變 f_{i_3, j_3} 。

(3.5)如果 $(i_4, j_4) = (i, j)$ 且 $(i_3, j_3) = (i_1, j_1)$ 回到起始位置然後跳到步驟四，其餘的 $(i_2, j_2) = (i_3, j_3)$ ， $(i_3, j_3) = (i_4, j_4)$ 並跳至步驟 3.3。

步驟四：如果 $f_{i, j} \neq 1$ 則 $\text{LNBD} \leftarrow |f_{i, j}|$ ，並且假設像素 $(i, j+1)$ 是掃描名單得來的，當演算法掃描到圖像的最右下角時演算法將終止。

其輪廓擷取實驗結果如圖 4.10 所示，在掃描圖像由外而內的方式，擷取輪廓的過程中同時也是排列之後機械手臂的繪圖順序，將輪廓擷取及排序兩個步驟結合為一，省略掃描完成後圖形輪廓排序的步驟，此方法可減少電腦的計算時間。

表 4.1、父邊界找到新邊界 B 之決定規則

B'種類並包含 連續數字 LNBD	外邊界	孔邊界
外邊界	B'邊界的父邊界	B'邊界
孔邊界	B'邊界	B'邊界的父邊界

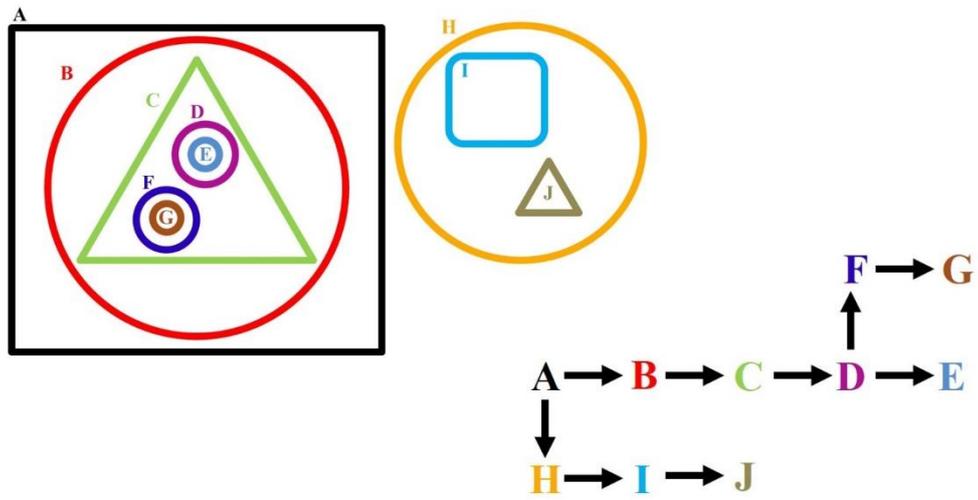
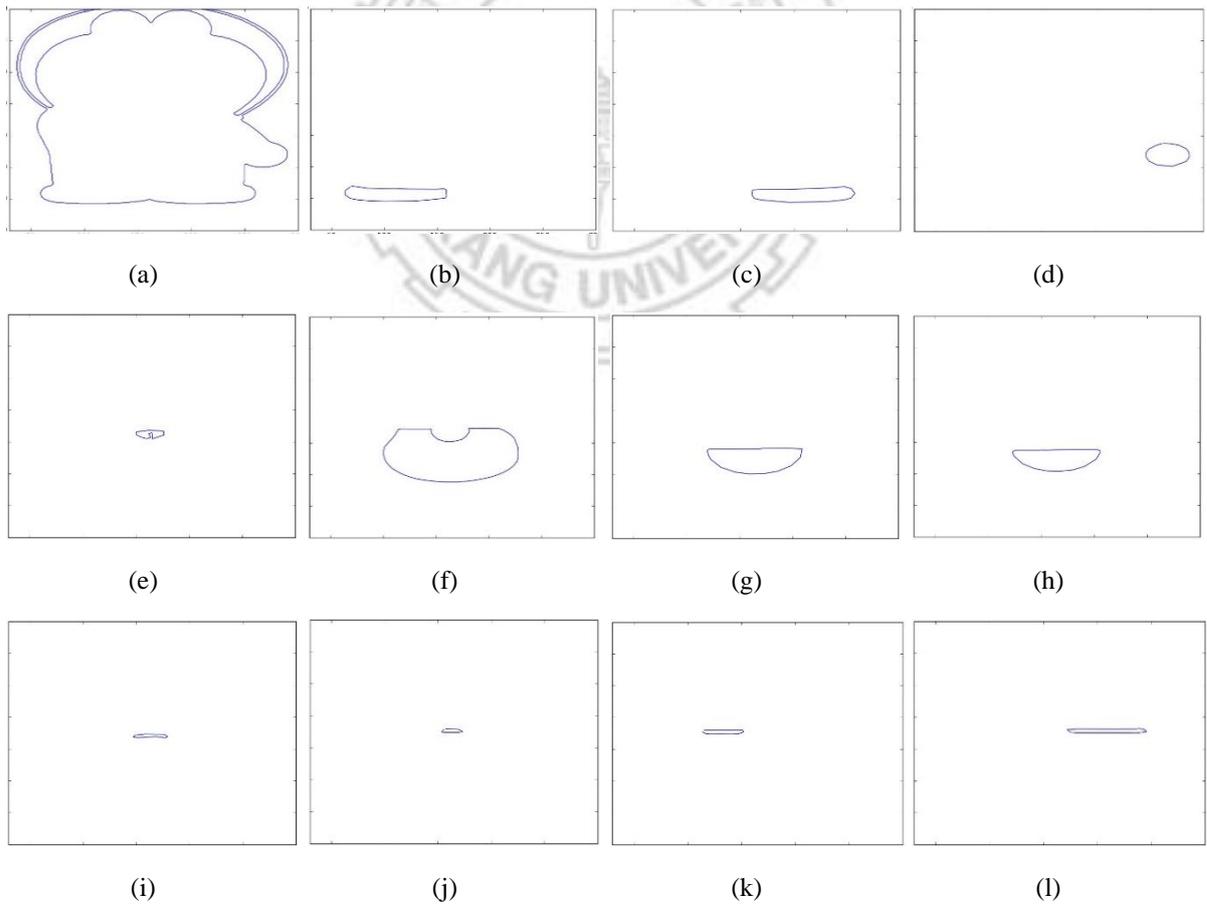


圖 4.9 輪廓擷取之流程圖[19]



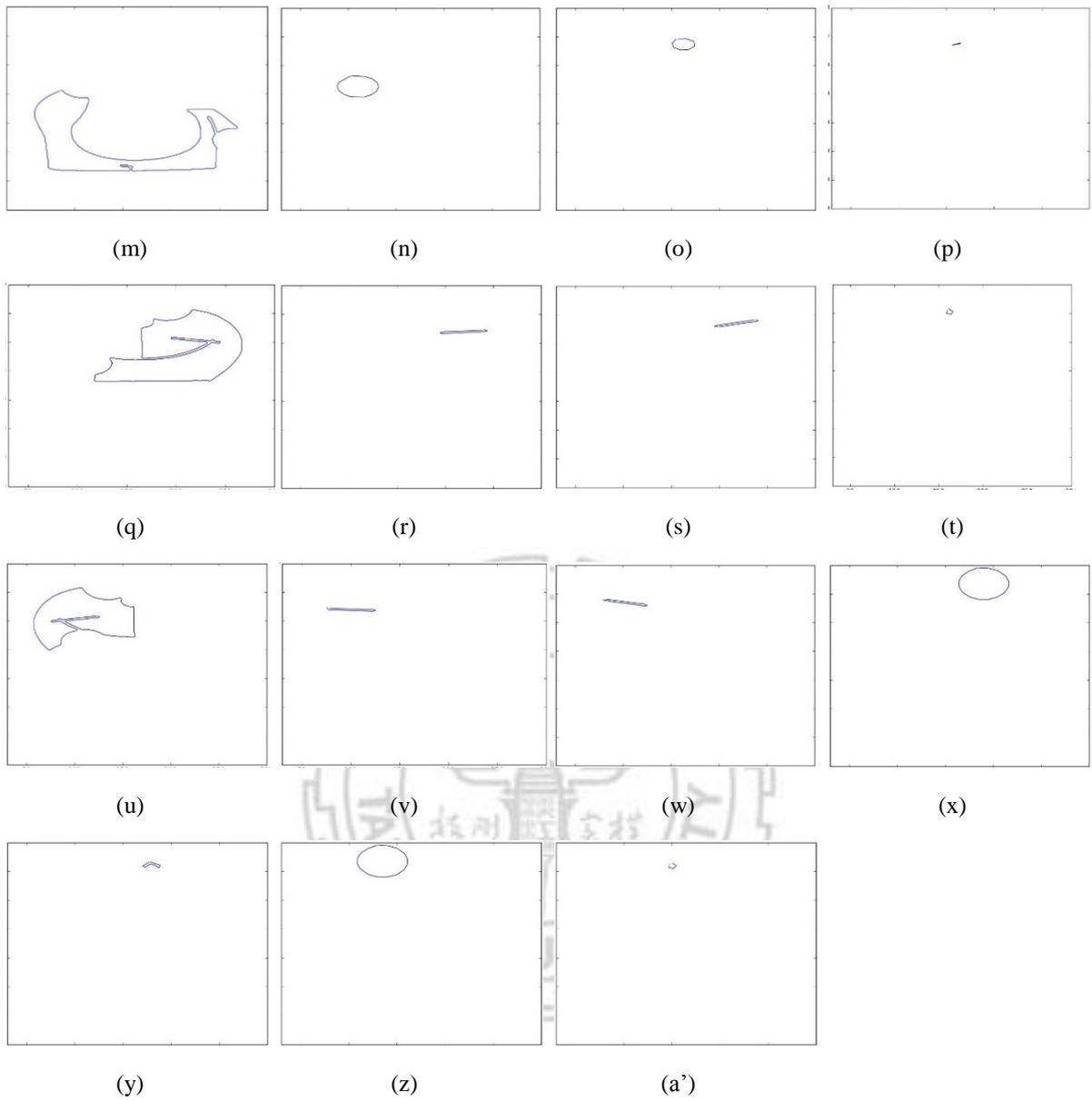


圖 4.10 小叮噹輪廓擷取之流程分鏡圖

第五章 實驗結果

本論文依據影像處理演算法以及 B-Spline 曲線演算法來設計實現一個六軸機械手臂的繪圖系統，所建構之繪圖系統的系統架構圖如圖 5.1 所示。使用者先將圖像輸入至軟體中，經過第四章影像處理所述，自適應二值化後因圖像背景雜訊不同，產生的結果而有所不同。若背景有雜訊或不要的線段，可以藉由調整介面 C 拉桿，而取得想要的影像效果。若影像中的線段有斷裂的狀況，可以藉由調整 Block 拉桿，調整影像遮罩大小，使線段更加完整。

自適應二值化處理後的圖像，再經由輪廓擷取演算法，來擷取輪廓及排序，並將輪廓的像素點當作 B-Spline 的控制點來產生 B-Spline 曲線。因此修正鋸齒狀的輪廓線條，便繪製 3D 圖像顯示機械手臂路徑，確認無誤後用 KUKA 機械手臂連線至繪圖系統程式進行資料傳輸，利用 XML 架構傳送機械手臂末端點的絕對位置與繪圖系統程式之手臂末端點的速度命令，來控制機械手臂繪圖。

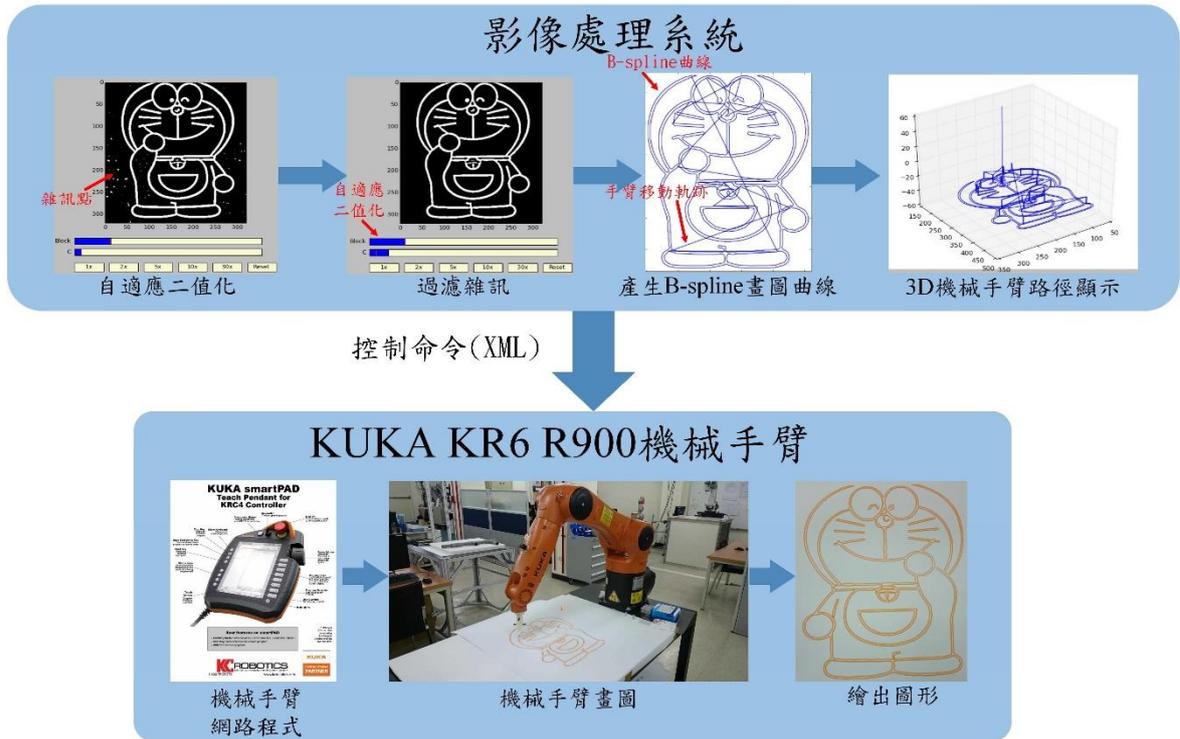


圖 5.1、機械手臂之繪圖系統的系統架構圖

5.1 實驗一：比較 B-Spline 曲線處理之小叮噹繪圖

實驗一為未使用 B-Spline 曲線處理之小叮噹繪圖，其動作流程分別介紹如下：

首先以手動輸入的方式，將原始圖片輸入至繪圖系統，如圖 5.2(a) 所示，再由 4.1 節所介紹的方法，先將原圖做灰階處理來降低運算的複雜度，如圖 5.2(b)所示，再利用 4.2 節所介紹的自適應直方圖均化處理來加強影像中的對比度，如圖 5.2(c)所示。

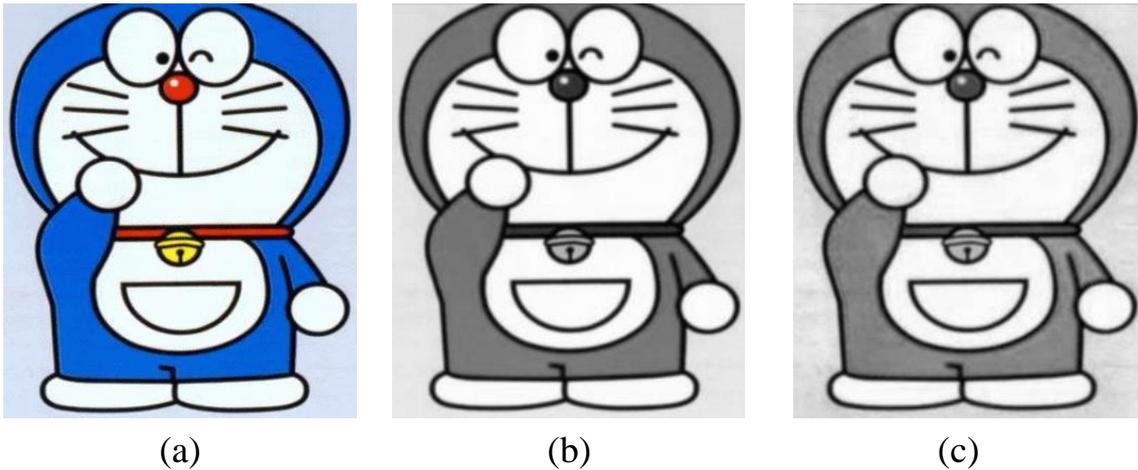


圖 5.2、小叮噹圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理及(c)自適應直方圖處理

接著用 4.3 節所介紹的方法，過濾影像中不必要的雜訊，降低之後影像處理的問題難度，方便後面的影像處理，如圖 5.3(a)所示，利用 4.4 節所介紹的方法，自適應二值化則會根據影像中灰階直方圖，計算出適合此影像的閾值，圖 5.3(b)為自適應二值化處理之調整參數前的圖像，因每張影像的背景不同，有時會有雜訊點，因此可以透過 GUI 即時調整參數來過濾一些不需要的像素點，如圖 5.3(c)所示，自適應二值化處理之調整參數後的圖像以濾除掉圖 5.3(b)的一些不需要的像素點。

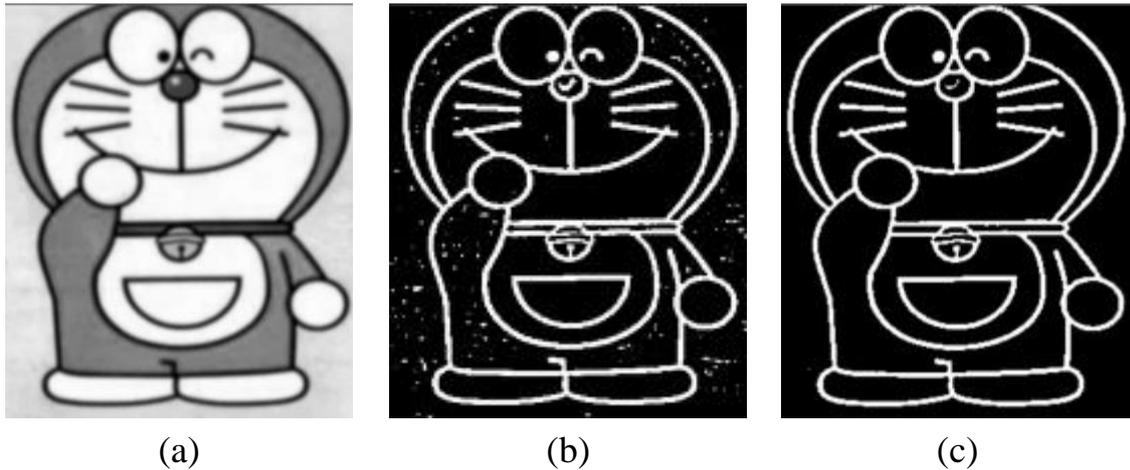


圖 5.3、小叮噹圖像繪圖的分鏡圖：(a)濾波處理、(b)自適應二值化處理之調整參數前的圖像及(c)自適應二值化處理之調整參數後的圖像

最後，利用 4.7 節所介紹的輪廓擷取及排序，其圖如 5.4(a)所示，不同的顏色代表不同的輪廓，擷取影像中的輪廓邊緣並由外而內掃描，將每個輪廓依序排入陣列中，並將每個輪廓的像素點當作機械手臂的畫圖命令點，將命令透過 XML 傳送給機械手臂畫圖繪製而出，其圖 5.4(b) 確認實際機械手臂繪圖範圍，紅色線條為 KUKA KR6 R900 可以畫圖範圍，若圖像出過範圍，則需要再重新調整影像大小，其圖 5.4(c)顯示機械手臂實際繪圖路徑，為了要確認整體手臂的路徑，是否會撞到桌子平面，或是每個輪廓開始與結束，機械手臂提筆動路徑是否正確。

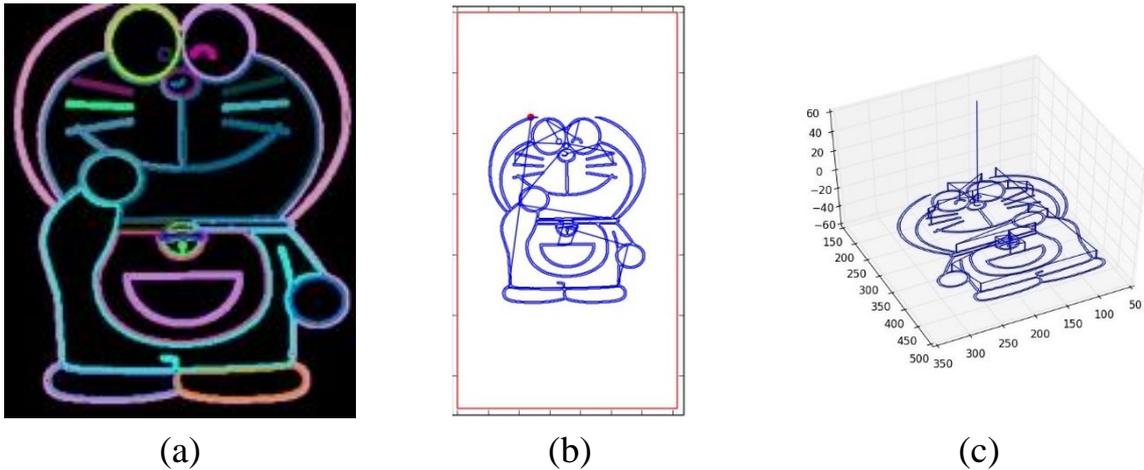


圖 5.4、小叮噠圖像繪圖的分鏡圖：(a)輪廓擷取及排序、(b)確認實際機械手臂繪圖範圍及(c)顯示機械手臂實際繪圖路徑

繪圖系統處理結果如圖 5.5 所示，圖 5.5(a)為機械手臂模擬繪製圖，圖 5.5(b)為機械手臂實際繪出結果，可看出圖像模擬繪圖與實際機械手臂繪圖結果，其繪圖路徑皆有鋸齒狀的現象。

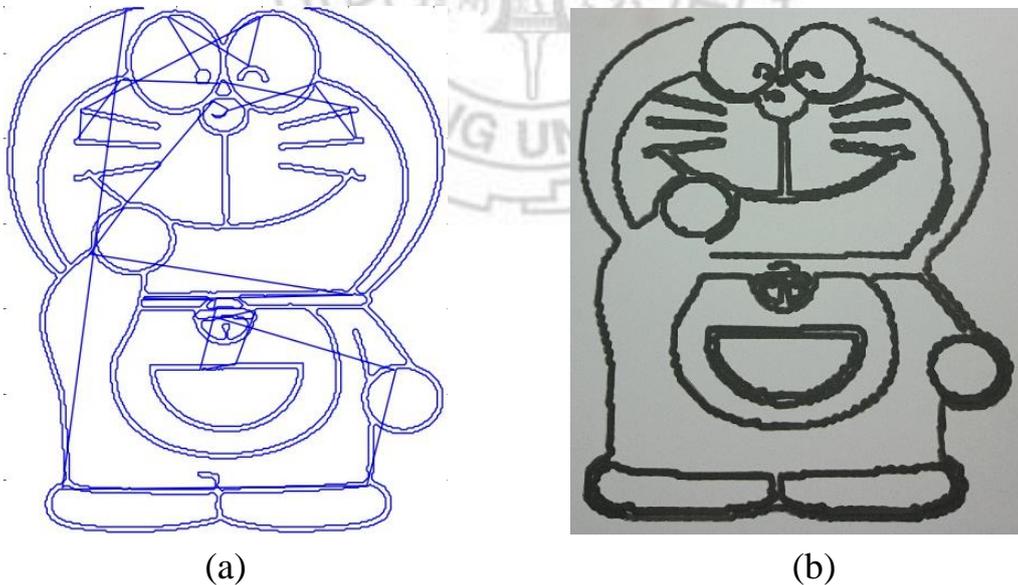


圖 5.5、圖像模擬繪圖與機械手臂繪圖的比較：(a)模擬繪圖及(b)機械手臂繪圖結果

由於繪圖系統處理方法是將輪廓擷取後其像素點，直接當成手臂末端命令點，像素點皆為整數，故會有鋸齒狀的線條發生，如圖 5.6 所示，為了改善此狀況，需要有補差的方法，在兩個整數的座標點中，額外加上多個點，讓一條線段變成曲線，為了達成此目的，本論文提出使用 B-Spline 曲線演算法，將小叮噹繪圖實驗的繪圖座標點當作 B-Spline 曲線的控制點，透過 B-Spline 方程式產生連續平滑曲線，以解決鋸齒狀問題。

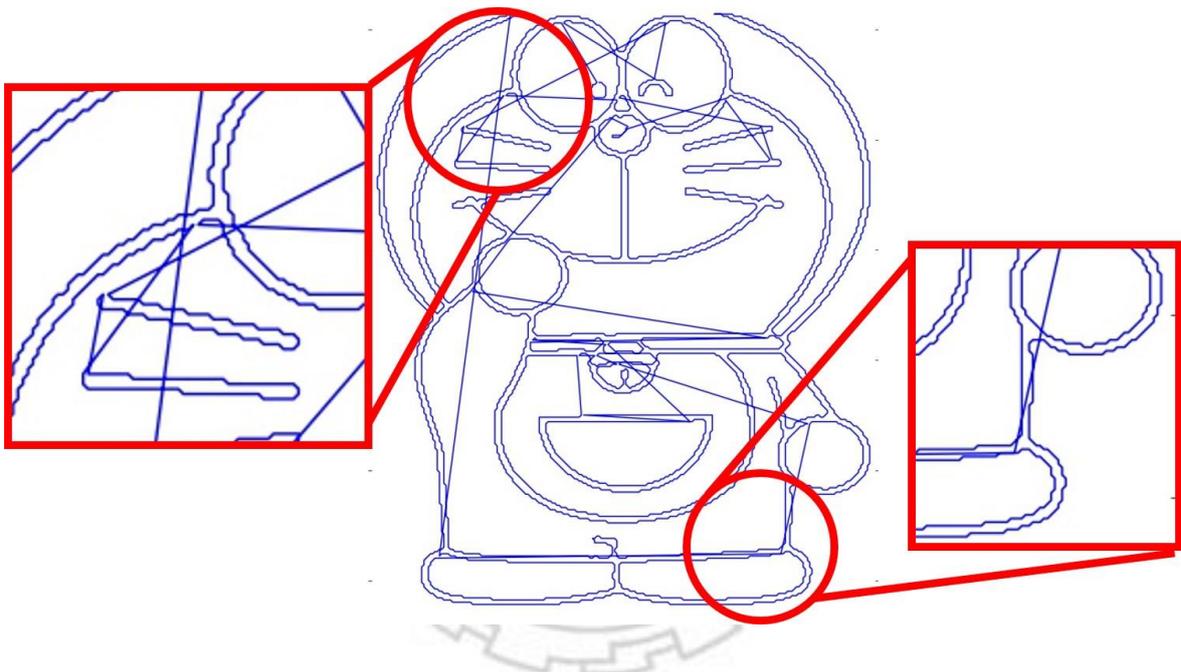


圖 5.6、圖像模擬繪圖之鋸齒狀現象

使用 B-Spline 曲線處理的改善結果，如圖 5.7 B-Spline 曲線前後處理繪圖的結果，圖 5.7(a)為輪廓擷取後直接輸出影像模擬，圖 5.7(b)為輪廓擷取後，將其當作 B-Spline 曲線的控制點而產生的路徑點，圖 5.7(c)為輪廓擷取後直接使用機械手臂畫圖的結果，圖 5.7(d)為輪廓擷取後，經由 B-Spline 曲線處理後，將資料點傳給機械手臂所畫出的結果圖。

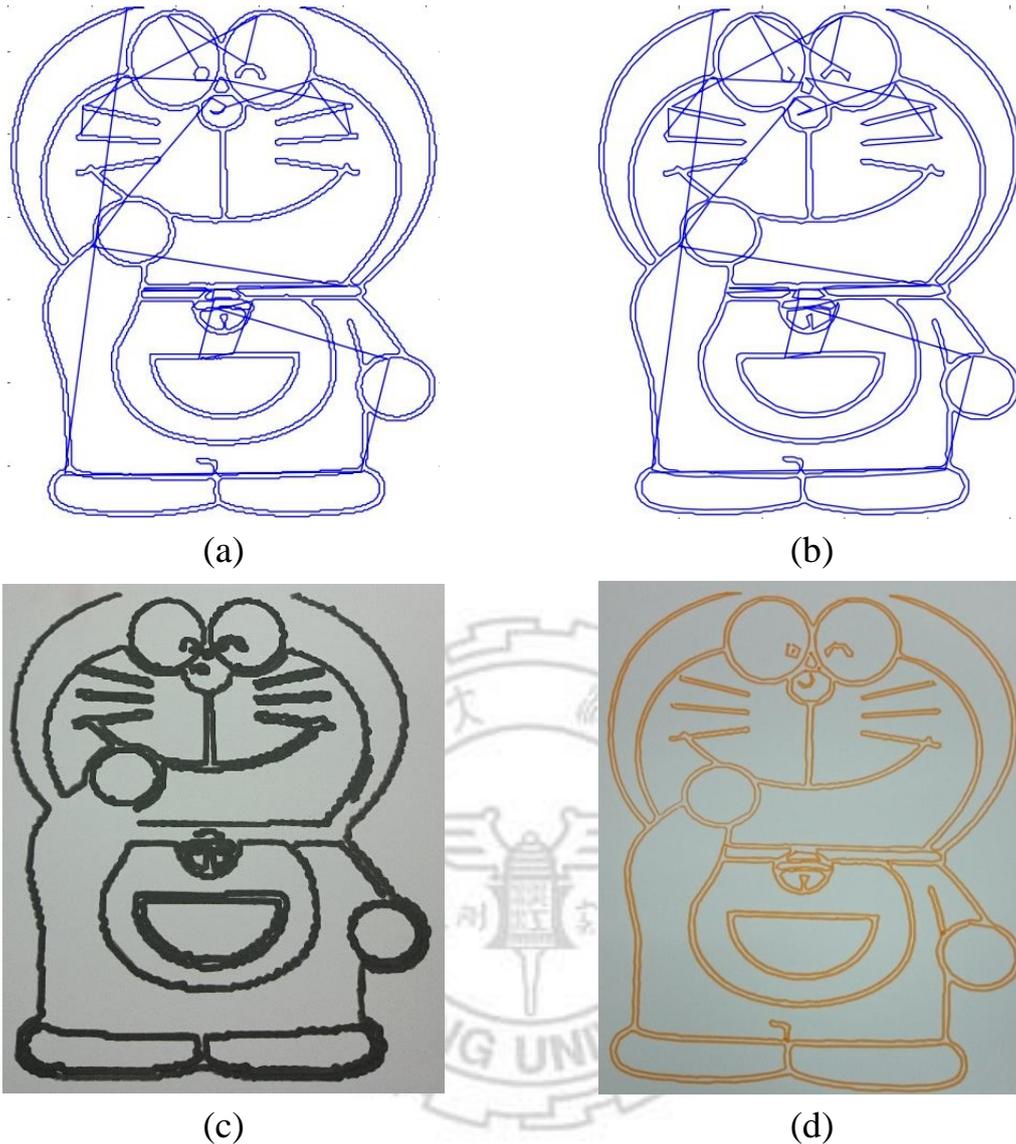


圖 5.7、B-Spline 曲線前後處理繪圖之結果：(a)B-Spline 曲線處理前的實驗模擬繪圖、(b)B-Spline 曲線處理後的實驗模擬繪圖、(c)B-Spline 曲線處理前之實驗機械手臂的繪圖結果及(d)B-Spline 曲線處理後之實驗機械手臂的繪圖結果

5.2 實驗二：背景單純之圖像繪圖

圖 5.8 為所提方法依據一張背景單純之圖像的處理結果，因線條簡單、背景單純與乾淨，沒有太多干擾，此圖很適合用來測試系統的處理效果，

其影像處理的流程如同實驗一，先進行灰階處理、自適應直方圖處理來加強對比，並使用濾波來去除雜訊，使用自適應二值化去除多餘的雜訊，找到完整的線段，並且從圖形由外而內搜尋輪廓，並依照搜尋到的輪廓依序排進陣列中，最後將陣列中的輪廓依序送到 B-Spline 演算法將曲線平滑化，最後將畫圖座標點資訊轉換成 KUKA KR6 R900 末端點的速度命令，控制機械手臂繪製圖形。所以由圖 5.8(l)的輸出結果可知，本論文所提出之方法，確實可以有效地與快速地讓機械手臂，依照輸入圖像繪出一張圖像之繪圖結果。其機械手臂繪製結果如圖 5.8(l)輸出結果所示。

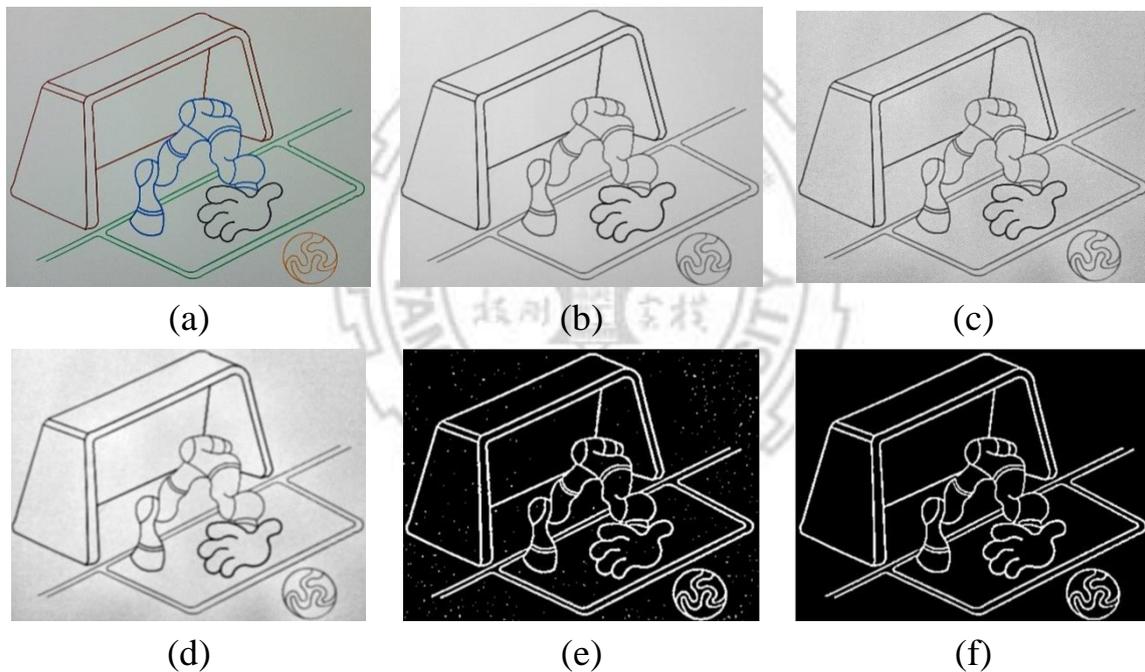


圖 5.8、背景單純之圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)顯示畫圖座標點及(l)機械手臂繪圖結果

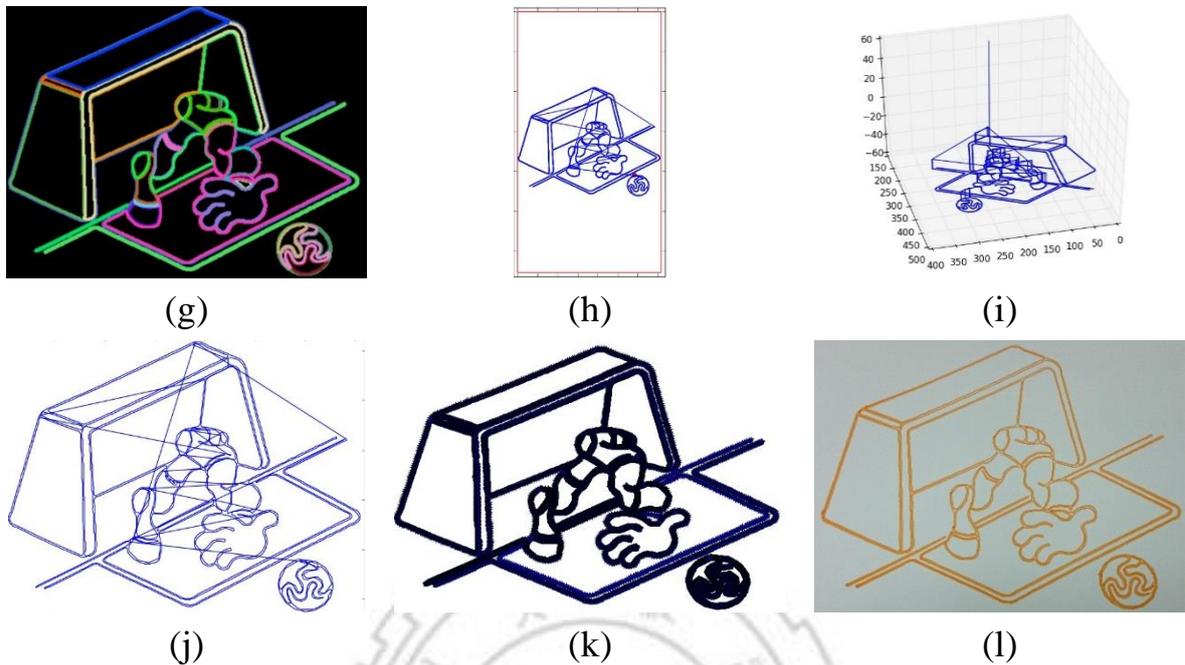


圖 5.8、背景單純之圖像繪圖的分鏡圖(續)

5.3 實驗三：背景複雜之圖像繪圖

圖 5.9 為所提方法依據一張背景複雜之圖像繪圖的處理結果，所使用的圖像是一張背景複雜得手繪圖像。如圖 5.9(a)所示，因為這個圖像是在方格紙上作圖的，所以背景相較於前面的實驗是比較複雜的。此圖像可以用來測試自適應二值化處理的效果。如圖 5.9(f)所示，經過自適應二值化處理之參數調整後，可以將背景之方格紙的直線濾除掉。此外，如圖 5.9(g)所示之輪廓擷取及排序，可以看出大部分的線段都是連續完整的線段輪廓。而一些不是連續完整的線段輪廓均是由素描的虛線所造成的。所以由圖 5.9(l)的輸出結果可知，本論文所提之機械手臂繪圖系統確實可以讓機械手臂可以依照一張手稿圖像來繪圖。其機械手臂繪製結果如圖 5.9(l)輸出結果所示。

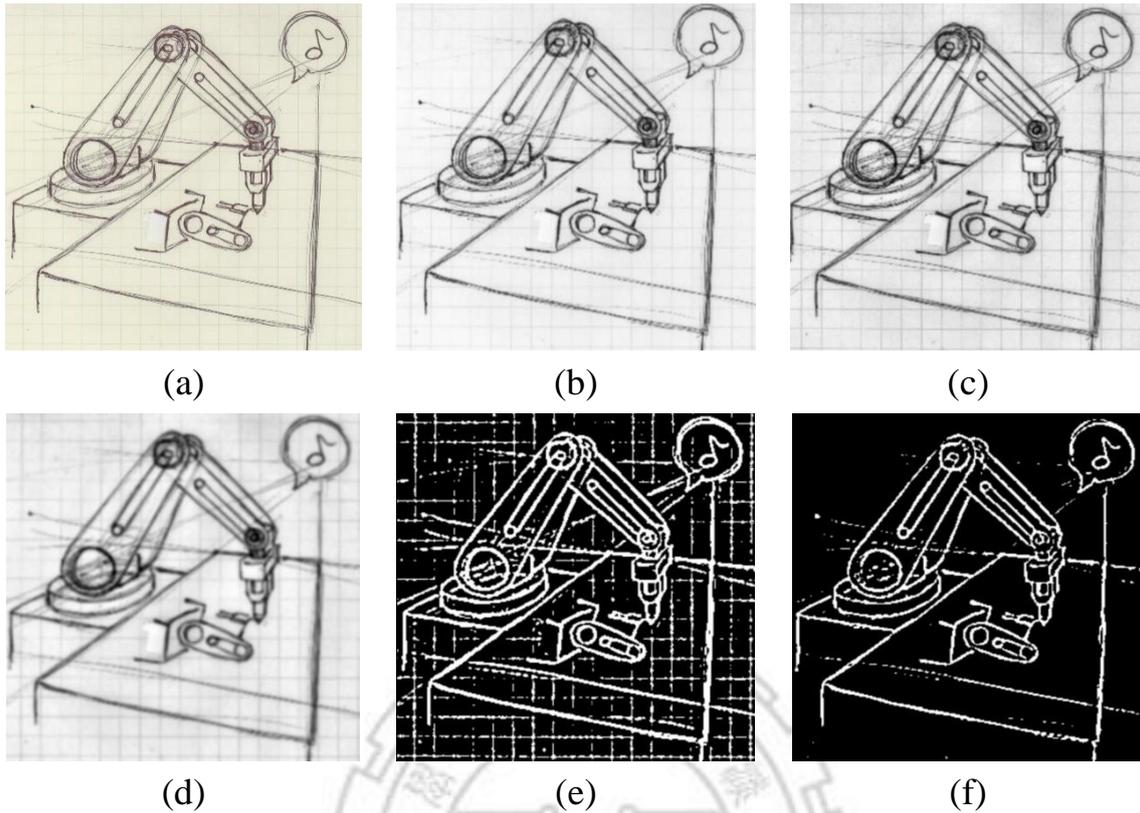


圖 5.9、背景複雜之圖像繪圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)顯示畫圖座標點及(l)機械手臂繪圖結果

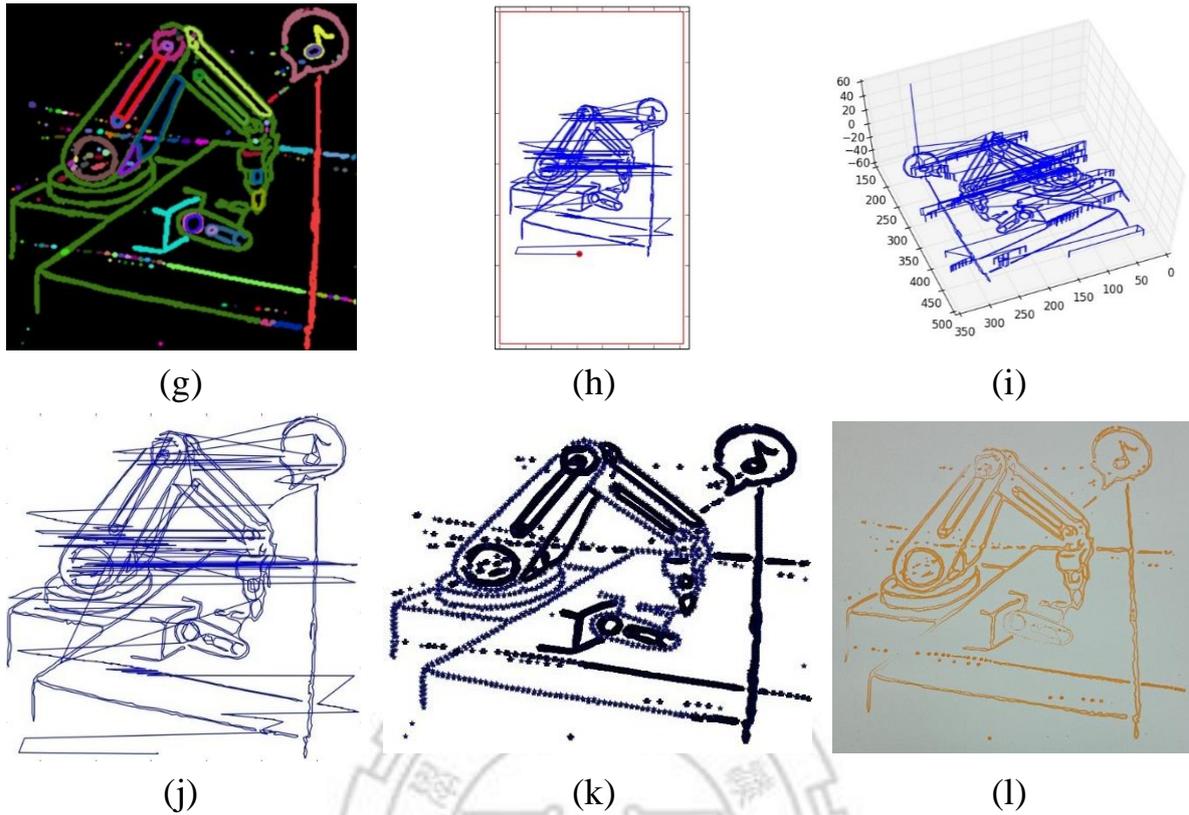


圖 5.9、背景複雜之圖像繪圖的分鏡圖(續)

5.4 實驗四：照片圖像繪圖

在傳統方法上，繪製簡單圖形，如實驗二的背景較單純之機械手臂守球門的圖片，將圖片轉檔匯入 AutoCAD 機械設計輔助軟體，並依照圖片繪出直線與曲線，再將每個線段，每個一段距離擷取一個座標點，此步驟需花費 12 小時以上，還不包含擷取座標點後，撰寫程式控制機械手臂移動程式，以及讀取圖片座標命令點，轉換至手臂畫圖移動路徑命令等工作均是非常耗時的，而照片圖像的組成是更為複雜的，很難用人工方式來有效率的辨別，所需要繪製那些線段，來讓人很快的了解繪製出圖畫所代表的意義。本論文所設計實現的機械手臂繪圖系統除了可以畫出簡單的曲線及圖案之外，還可以規劃複之照片圖像的繪圖座標點，以

及擷取適當的輪廓邊線。如圖 5.10(a)為實驗室機械手臂工作並且按照順序繪製，所以由圖 5.10(l)的輸出結果可知，本論文所提出之方法，確實可以有效地與快速地讓機械手臂，依照輸入圖像繪出一張照片圖像之繪圖結果。其機械手臂繪製結果如圖 5.10(l)輸出結果所示。

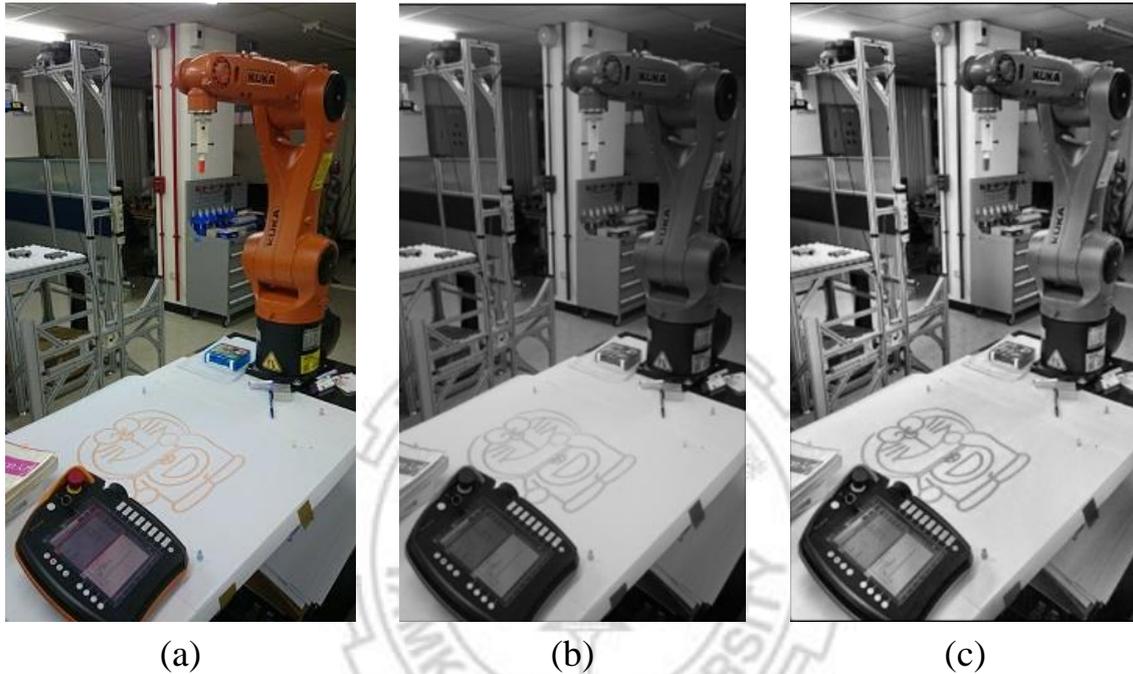


圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖：(a)原始彩色圖像、(b)灰階處理、(c)自適應直方圖處理、(d)濾波處理、(e)自適應二值化處理之調整參數前的圖像、(f)自適應二值化處理之調整參數後的圖像、(g)輪廓擷取及排序、(h)確認實際機械手臂繪圖範圍、(i)顯示機械手臂實際繪圖路徑、(j)顯示機械手臂平面繪圖路徑、(k)顯示畫圖座標點及(l)機械手臂繪圖結果



(d)



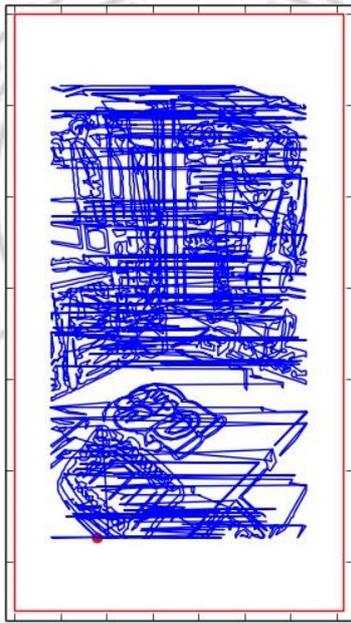
(e)



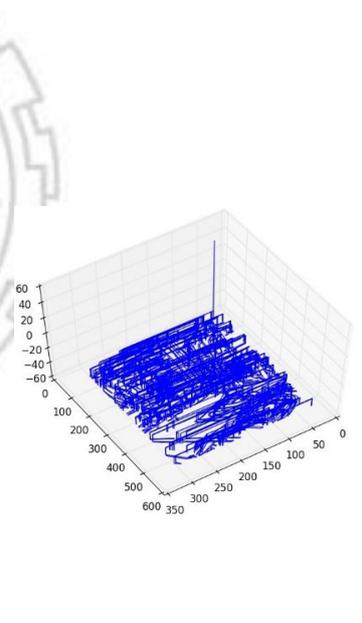
(f)



(g)



(h)



(i)

圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖(續)

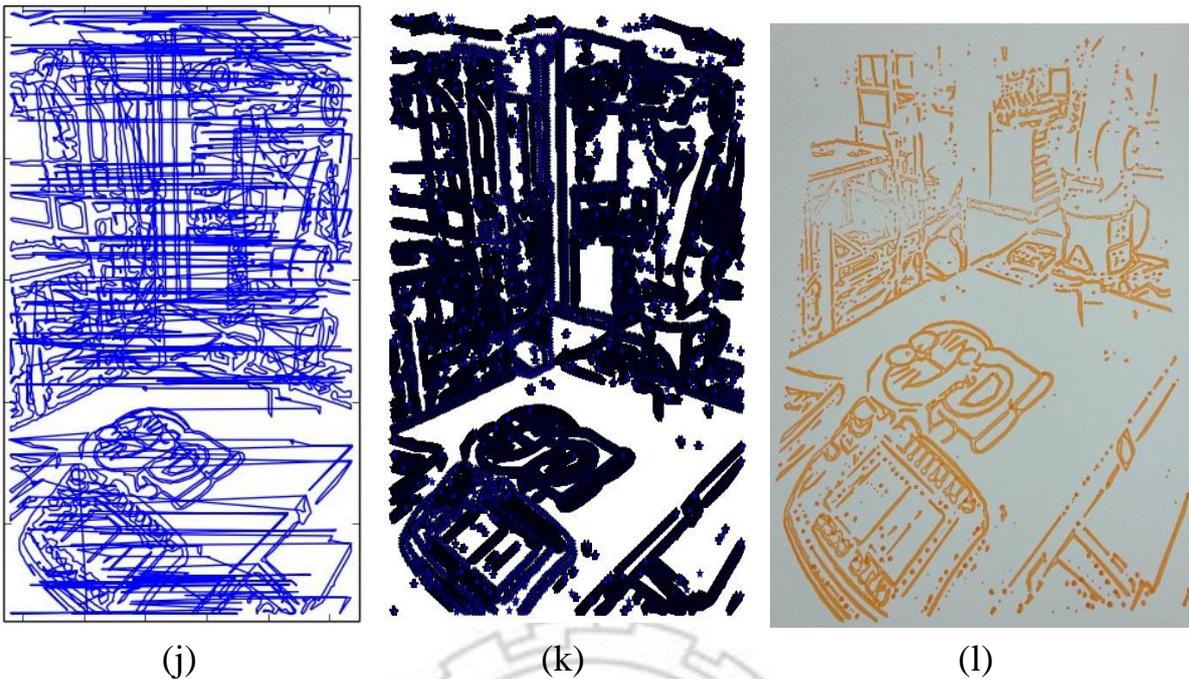


圖 5.10、照片圖像畫圖的分鏡圖(續)

5.5 系統處理時間的比較

本節主要針對圖 1.6 傳統之機械手臂繪圖系統處理流程與本論文繪圖處理流程，如圖 1.7 本論文所提之機械手臂繪圖的系統流程，進行處理流程時間的比較。圖 5.11 為測試實驗流程所需時間的繪圖樣本，其實驗結果數據如表 5.1 所示。相較於傳統處理流程，從擷取影像座標點到機械手臂繪圖路徑規劃，將上述兩個主要流程，透過影像軟體計算，本論文所提方法將時間從 16 小時，所短至 3 分鐘內，其中包含影像自適應二值化調整參數的時間，因動作流程簡單以及 GUI 即時顯示輸出結果，可以加快調整參數的時間。

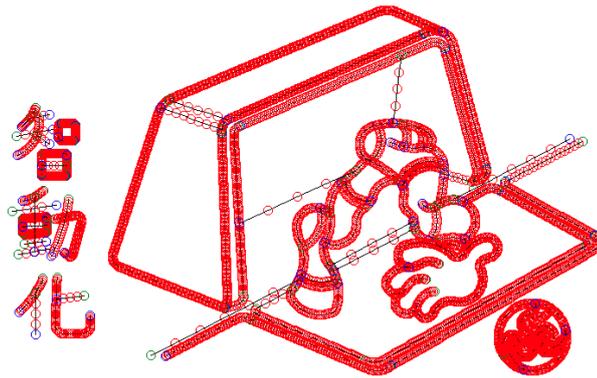


圖 5.11、測試實驗流程所需時間的繪圖樣本

表 5.1、傳統與本論文之繪圖處理方法所需時間的比較表

繪圖處理方法	傳統處理方法	本論文所提繪圖處理方法
擷取影像座標點	約 12 小時	<3 分鐘 (包含調整參數時間)
機械手臂繪圖 路徑規劃	約 4 小時	
總時間	約 16 小時	<3 分鐘

第六章 結論

本論文依據影像處理演算法以及 B-Spline 曲線演算法來設計實現一個六軸機械手臂繪圖系統，提出之方法具有省時、快速開發之優點。相較於傳統方法，所提方法可以節省至少 320 倍的開發時間。此外，若以人工方式擷取圖像畫圖座標點，則開發者必須接受教學訓練及熟悉機械繪圖軟體才可以讓機械手臂繪圖。也會因不同開發者的不同經驗，擷取畫圖座標點的品質與速度而有所差異但是若用本論文所提出之方法，則即使沒有開發程式及影像處理相關經驗之開發者，仍然可以透過本論文所開發的 GUI 來即時調整機械手臂模擬繪圖結果，機械手臂便能將輸入照片圖像繪製而出。此外，對複雜的照片圖像做畫圖座標的擷取，相較於傳統人工擷取的方法，本論文所提出的方法可以更容易與快速繪出一張相對於照片圖像之繪圖結果。

參考文獻

- [1] KUKA Manipulator, <http://www.kuka.com/>.
- [2] ABB Manipulator, <http://www.abb.com/>.
- [3] 上銀智慧機器手實作競賽
http://www.hiwin.org.tw/Awards/HIWIN_Machine/Regulation.aspx
- [4] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control - Second Edition*, Jan. 2004.
- [5] T. Lehtla, *Introduction to Robotics*, Department of Electrical Drives and Power Electronics, Tallinn Technical University, 2008.
- [6] T. J. Carter, *The Modeling of a Six Degree-Of-Freedom Industrial Robot for the Purpose of Efficient Path Planning*, Master of Science, The Pennsylvania State University, May 2009.
- [7] 沈宜郡，基於 B-Spline 曲線之六軸機械手臂繪圖系統，淡江大學電機工程學系碩士論文(指導教授：翁慶昌)，2013。
- [8] Z. Gou, Y. Sun, and H. Yu, "Inverse kinematics equation of 6-DOF robot based on geometry projection and simulation," *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, pp. 125-128, 2010.
- [9] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [10] L. Bonev, *GPA546 Robots Industriels*, ÉTS.
- [11] 宋文財，在虛擬環境中發展一整合式電腦繪圖系統-Bézier, B-Spline 和 NURB 演算法之研究，中央大學電機工程研究所碩士論文(指導教授：歐石鏡)，2000。
- [12] 吳新逸，空間中具曲率連續的 B-Spline 封閉曲線建構，成功大學機械工程學系碩士論文(指導教授：許來興)，2004。

-
- [13] 李健璋，供機器手臂即時繪製之人臉圖像產生系統，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文(指導教授：林其禹)，2009。
- [14] 莊力文，供人形機器人手臂繪製之人臉肖像產生系統，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文(指導教授：林其禹)，2008。
- [15] 方冠中，機械臂運動軌跡規劃與控制及其於機械素描之應用，成功大學航空太空工程研究所碩士論文(指導教授：陳介力)，2012。
- [16] J. A. Stark, "Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization," *IEEE Image Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 889-896, 2000.
- [17] M. Teutsch, P. Trantelle, and J. Beyerer, "Adaptive real-time image smoothing using local binary patterns and gaussian filters," *20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 1120-1124, 2013.
- [18] W. Xiao and X. Hui, "An improved canny edge detection algorithm based on predisposal method for image corrupted by Gaussian noise," *World Automation Congress (WAC)*, pp. 113-116, 2010
- [19] S. Suzuki and K. Abe, "Topological structural analysis of digitized binary images by border following," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 3, No. 1, pp. 32-46, 1983.