

國立交通大學

電控工程研究所

碩士論文

擬人機械手臂基於影像之適應性抓取設計

Vision-Based Design for Adaptive Grasping of a
Humanoid Robot Arm



研 究 生：蔡仕晟

指導教授：宋開泰 博士

中 華 民 國 一 百 年 十 月

擬人機械手臂基於影像之適應性抓取設計

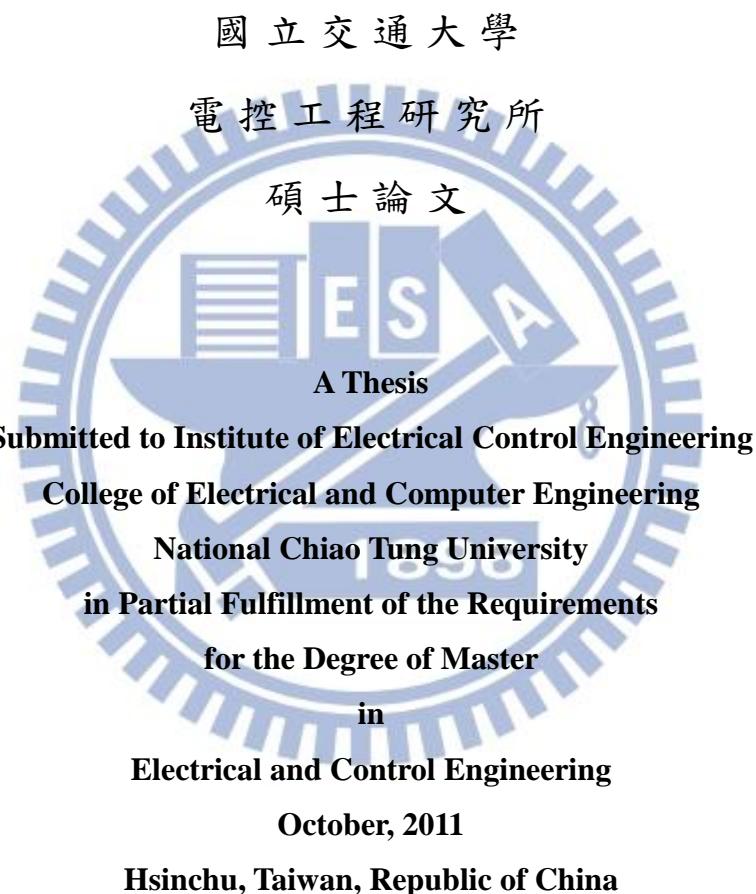
Vision-Based Design for Adaptive Grasping of a Humanoid Robot Arm

研究 生：蔡仕晟

Student: Shih-Cheng Tsai

指導教授：宋開泰 博士

Advisor: Dr. Kai-Tai Song



中華民國一百年十月

擬人機械手臂基於影像之適應性抓取設計

學生:蔡仕晟

指導教授:宋開泰 博士

國立交通大學電控工程研究所

摘要

本論文主旨旨在設計機器手臂之安全抓取控制系統。利用裝置於機器人頭部之 Kinect 攝影機做環境偵測，機器人能即時偵測環境中各個物體在空間中分佈位置，經由目標物，辨識及定位自主引導機械手臂至適當抓取位置，執行抓取任務。本論文發展出一個環境描述與特徵點比對的方法，利用 Kinect 之深度影像，將各個物體切割成數個平面來表示，簡化複雜環境的描述，縮減其偵測的時間。所發展之方法能在彩色影像中找到物體對應的平面，再藉由擷取各平面的特徵點，與所建立的資料庫進行比對，藉由縮小比對的範圍，相較於傳統對整張影像去比對，使比對的時間可以大為減少。此外，本論文提出一套手臂的安全行為控制策略；考慮到機械手臂在複雜居家環境之抓取過程中必須確保手臂的安全，我們設計了兩個安全指數，其中一個圓柱安全指標，定義出環境中各物體對於手臂移動的影響程度；另外一個區域安全指數，將環境分成安全、不確定與危險三種區域，使機械手臂能往空間中較安全區域移動。本論文發展出基於 Potential field 之路徑規劃演算法，將上述的安全指數加入 Potential field 的斥力與引力中，使手臂能閃避障礙物並完成抓取的任務。經由實驗驗證，所發站之方法卻能達成設定的功能。

Vision-Based Design for Adaptive Grasping of a Humanoid Robot Arm

Student: Shih-Cheng Tsai

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

Institute of Electrical and Control Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The objective of this thesis is to design a control of a humanoid robot arm for safe grasping. The robot uses Kinect to recognize and find the target object in the environment and grasp it in real-time. First, we use gradient direction in a depth image to segment environment to several planes. Then, speed up robust feature(SURF) is used to match features between those planes and locate the target object. This approach effectively speeds up the matching operation by decreasing the area to match. Moreover, this study proposes a design for safe operation of the robot arm. We design two safe indices, one defines the degree of influence of obstacles to the manipulator. Another index classifies the workspace in three regions , namely safe, uncertainty and danger region. The robot employs these indices to move to safe regions. Finally, we integrate these indices to repulsive and attractive force in a Potential field for motion planning. The robot arm can effectively avoid obstacles and complete the grasping task.

誌謝

謹向我的指導教授宋開泰博士致上感謝之意，感謝他兩年來在專業上和生活上待人處事的指導，以他豐富的學識與經驗，配合理論的應用，使得本論文得以順利完成。

也要感謝學長孟儒、嘉豪、格豪、信毅、允智、學姊巧敏在理論與實驗過程中的指導，以及感謝同學建宏、上畯、碩成在研究過程互相勉勵與打氣，同時要感謝學弟家昌、章宏、京叡、俊儒、昭宇、學妹依穎在生活上與課業中帶來的樂趣。

最後更要感謝我的父母，對我從小的辛苦栽培，他們在研究過程中給了我許多鼓勵與支持，生活上給予溫暖與關愛，是我促使向前的動力，在此我願以此論文獻給我最感激的父母親。



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖例.....	vi
表例.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 相關研究回顧.....	1
1.3 問題描述.....	5
1.4 系統架構.....	6
1.5 章節說明.....	6
第二章 環境偵測與目標物辨識.....	8
2.1 Kinect 深度攝影機.....	8
2.2 環境描述.....	9
2.3 目標物辨識.....	12
2.4 目標物姿態估測與定義障礙物參考點.....	15
2.4.1 目標物姿態估測.....	16
2.4.2 障礙物參考點.....	17
2.5 討論.....	19
第三章 機械臂逆向運動學及座標轉換.....	20
3.1 手腕運動學推導.....	20
3.1.1 手臂順向運動學.....	21
3.1.2 手臂前四軸之逆向運動學.....	23
3.1.2 手爪部分逆向運動學.....	28
3.2 影像定位與位置估測.....	29
3.2.1 座標轉換推導.....	29
3.2.2 座標校正.....	32
3.2.3 手臂與影像轉換矩陣校正.....	34
3.3 討論.....	36
第四章 即時閃避障礙物設計與控制.....	37
4.1 機械手臂安全抓取控制架構.....	38

4.2	Potential field 工作原理	39
4.3	安全指標的設計	40
4.4	Potential field	43
4.4.1	Attractive force	43
4.4.2	repulsive force	44
4.5	系統架構	47
4.6	安全策略之討論	50
	第五章 實驗結果	51
5.1	機械手臂之控制系統硬體架構	51
5.1.1	馬達控制系統之設計與實現	51
5.2	機械手臂自動偵測與抓取實驗	54
5.3	機械手臂即時避障實驗	55
5.4	機械手臂自主抓取實驗	58
	第六章 結論與未來展望	60
6.1	結論	60
6.2	未來展望	60
	參考文獻	62



圖例

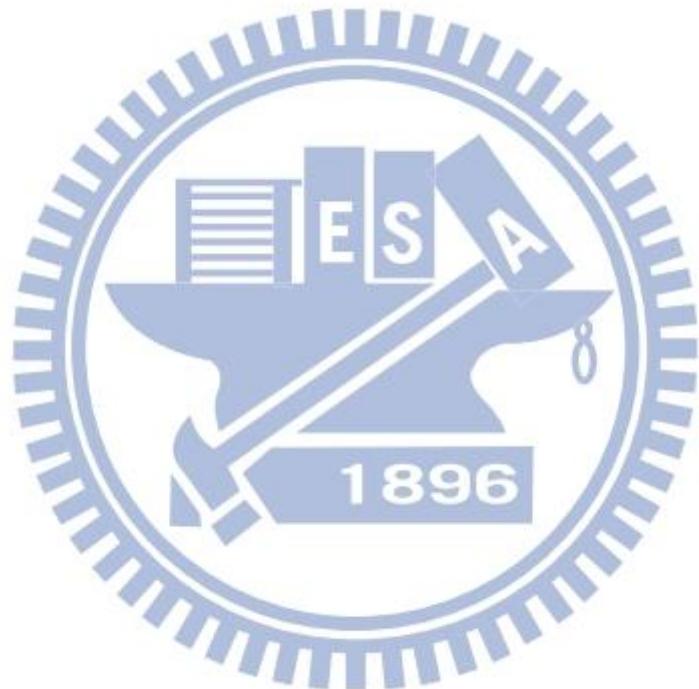
圖 1.1 (a)真實環境(b)在工作範圍內建立的 point cloud[3].....	2
圖 1.2 利用雷射獲得三維空間的資訊[4]	2
圖 1.3 將手前端兩個朝向角分開分析[5].....	3
圖 1.4 利用限制冗於角度來定出手肘姿態[5].....	4
圖 1.5 (A)沒有考慮手臂會撞到(B)(C)考慮手臂與障礙物最短距離(B)利用 end-effector 帶動手臂避開(C)利用最近距離排斥去避開[4]	4
圖 1.6 DRRT 路徑規劃的過程[12]	5
圖 1.7 實驗用之機器人阿拉丁.....	7
圖 2.1 Kinect 深度攝影機[18]	9
圖 2.2 (a)原始環境圖(b)深度灰階圖	10
圖 2.3 (a)對 XY 平面運算子(b)對 YZ 平面運算子	11
圖 2.4 切割環境影像與偵測目標物流程圖(a)原始環境彩色影像(b)距離攝影機不 同深度所形成的灰階圖(c)將環境切割成 XY 平面(深灰色)與 YZ 平面(白色)(d)標 記出不同大小的平面與框出目標物位置.....	11
圖 2.5 目標物辨識流程圖	12
圖 2.6 (a)SURF 特徵點比對(b)RANSAC 估側平面轉換矩陣	13
圖 2.7 左圖為一群分布不均勻的點集合，需要從這裡面決定出一條直線。右圖 為經過 RANSAC 計算後，得到符合條件的直線，不符合的點則被剔除在外[22]	14
圖 2.8 透過轉換矩陣 H 得到資料庫物件在目前影像平面中之位置.....	15
圖 2.9 目標物的姿態估測.....	17
圖 2.10 (a)攝影機擷取之影像(b)XY 平面二值化深度圖	18
圖 3.1(a)手臂各點代號位置(b)手臂投影到 XY 平面.....	20
圖 3.2 手爪之設計圖	21
圖 3.3 右手臂 D-H 座標系	22

圖 3.4 手臂座標系與冗餘圈示意圖.....	24
圖 3.5 由手臂構成的三角形.....	25
圖 3.6 手臂三角形裡各向量.....	25
圖 3.7 $\vec{\alpha}$ 向量與各向量關係	25
圖 3.8 β 向量與各向量關係	26
圖 3.9 α 向量與 β 向量型成 γ 向量.....	26
圖 3.10 機械手臂 θ_6 的姿態示意圖	29
圖 3.11 機械手臂轉換至原點的關係圖	30
圖 3.12 機器人前後旋轉座標轉換關係圖	30
圖 3.13 機器人頭部左右旋轉座標轉換關係圖	31
圖 3.14 校正板距離機器人 670mm 時攝影機取得影像	32
圖 3.15 校正後影像取得與實際 X 座標的誤差.....	33
圖 3.16 校正後影像取得與實際 Y 座標的誤差.....	33
圖 3.17 校正後影像取得與實際 Z 座標的誤差	34
圖 3.18 X 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差.....	35
圖 3.19 Y 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差	35
圖 3.20 Z 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差	36
圖 4.1 手臂控制架構圖.....	37
圖 4.2 機械手臂安全行為策略流程圖.....	38
圖 4.3(a)障礙物與目標點的示意圖(b)Potential field 所產生的梯度示意圖[26]	39
圖 4.4 (a)投影到 XY 平面的示意圖(b)投影到 YZ 平面的示意圖(c)投影到 XZ 平面的示意圖(d)分析障礙物投影至三平面的示意圖	41
圖 4.5 同心圓柱來判斷障礙物影響程度示意圖.....	42
圖 4.6 (a)藍色為障礙物對於手臂的斥力綠色為目標物對於手臂的引力(b)XY 平面視角(c)YZ 平面視角(d)XZ 平面視角	47
圖 4.7 控制系統架構圖.....	49

圖 5.1 控制系統硬體架構圖	51
圖 5.2 馬達控制器 EPOS24/1	52
圖 5.3 馬達控制器 EPOS24/5	52
圖 5.5 並聯控制器之電路分接板	54
圖 5.6 (a) 資料庫物件 (b) 特徵點擷取	54
圖 5.7 機械手臂抓取的過程	55
圖 5.8 攝影機擷取畫面及計算出目標物位置	56
圖 5.9 機械手臂遇障礙物即時避障過程	56
圖 5.10 閃避第一個障礙物各軸軌跡圖	57
圖 5.11 閃避第二個障礙物各軸軌跡圖	57
圖 5.12 機械手臂在複雜環境進行抓取過程	58
圖 5.13 機械手臂避開桌子到達目標點軌跡圖	59
圖 5.14 機械手臂避開桌上物品到達目標點軌跡圖	59

表例

表 2.1 Kinect 深度攝影機之規格[18]	9
表 2.2 環境辨識與特徵點比對時間表.....	16
表 3.1 左機械手臂各軸的 D-H 參數表	22
表 5.1 馬達控制器規格表.....	53



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

近幾年來，機器人技術日新月異，進展快速，從產業用機器人逐步擴展到協助社會服務、家庭生活等功能的服務型機器人。未來服務型機器人將會逐漸走入人類日常生活當中，與人類的互動會日漸頻繁，因此，有許多設計使機器人能夠幫助人類完成日常生活中之工作。由於一般環境是以適合人類型體活動所建構出來的，所以，人類外型相近的關節型機械手臂不但可以較容易在人類的環境下工作，並且人類也較容易接受機器手臂的活動空間。

在日常生活中使用機器人必須考慮機器人的安全性，如何使機器手臂安全並能自主的完成任務，成為重要的議題。在人類生活當中，常常會隨手將物品放置於不固定的地方。當機器人與人共處在日常環境中工作時。就要得知工作範圍內是否有障礙物，或人類的出現，同時，必須能閃躲並確保不傷害到環境周圍的人、物品或機器人本身，使能安全有效的完成任務。

本研究的目的是為了能讓機器手臂能在日常生活環境中，即時閃避障礙物，並自主的完成抓取任務。我們希望結合深度攝影機的偵測，使機器人能夠了解環境的狀態，並不斷更新環境的資訊，使機器手臂能在動態的環境中即時做出反應，能避免障礙物發生碰撞，確保人類和機器人本身的安全，並能成功抓取環境中之物品。

1.2 相關研究回顧

機器人為了要具有安全自主抓取能力，必須克服多方面的問題，例如：自主偵測環境、找尋物體、移動路徑規劃與抓取物體等能力。整合以上這些能力，才能確保機器人在環境中找尋到物體，並能透過適當的控制，安全的前往目標物所在之位置進行抓取。

在機器人安全設計方面，參考文獻[1]將安全機構或感測器設計於機器人本身，例如將感測器(例如:force sensor)裝於機器人身上，當機器人接觸到物體時，

在不傷害到人或機器人本身的情況下即時快速做出反應。另外一種為主動式安全避障[2]，機器人會利用身上的感測器(例如:雷射、立體攝影機等)獲得環境中的資訊，使機器人在接近到物體前能即時反應。

Jang等人 [3]提到居家服務機器人必須即時執行任務，因此他們提出空間推理的演算法來解決即時偵測環境的問題。此演算法利用立體攝影機擷取影像資訊建立手臂工作範圍內的環境(如圖1.1)，再利用此範圍找尋出目標物所在，並將其他在工作範圍內的各點設定為障礙物，了解整體環境情況之後就能針對抓取找出最適當的路徑。

文獻[4]是利用雷射作為感測器，去偵測二維的環境。此外，為了偵測到三維空間的資訊，作者們將雷射裝置於機器人手腕上(如圖 1.2)，利用手部移動來描繪出三度空間中的物體。所以，當機器人要進行工作之前，須藉由手部在空間中來回移動二十次，來獲得所需要的環境資訊。

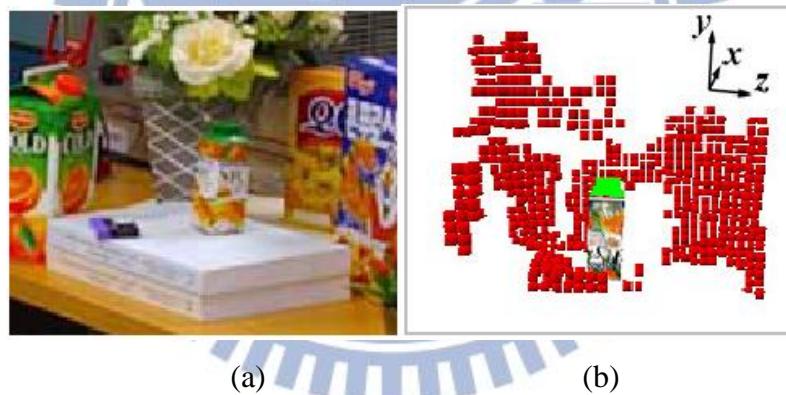


圖 1.1 (a)真實環境(b)在工作範圍內建立的 point cloud[3]

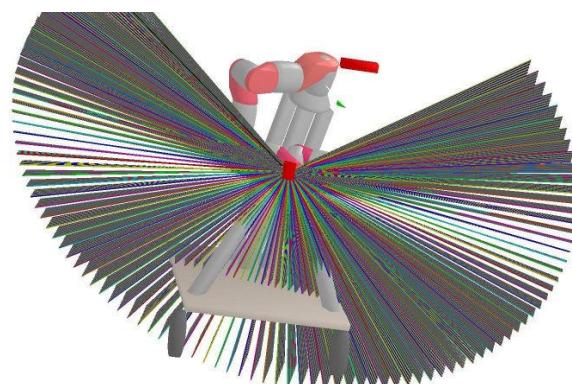


圖 1.2 利用雷射獲得三維空間的資訊[4]

當獲得環境資訊後，我們必須建立一路徑規劃策略，使手臂能自主尋找其安全路徑。近年來在路徑規劃方面常見的方法有Rapidly-exploring Random Tree(RRT)[9-14]和Potential field[5-8]，許多方法都以此兩測略為基礎延伸下去。由Ioannis等人發表的文獻[5]，裡面提到了對於手臂的各個自由度加以限制，並利用Potential field的方法來避開動態的障礙物。此篇文獻所使用的方法，藉由限制機械手臂前端的兩個朝向角，使機器手臂以接近直線移動(如圖1.3)，最後，他限制了機械臂手肘的姿態(如圖1.4)，使機械臂手肘在移動的過程中，不會碰到障礙物，此限制也確保了上臂可以避開障礙物。

由Park等人[7]認為Potential field除了利用物體間距離來產生斥力外，他們更加入了障礙物與機器人間的相對速度，作者們希望藉此來解決有關動態障礙物移動時的問題。他們在斥力的部分多乘上了終端效應器(End-effector)到障礙物之間的方向分量 $\cos\theta$ ，當速度與障礙物的角度為0度時，表示機器人朝向障礙物前進，這時候產生的斥力應該比較大，而當他們成90度時，表示機器人遠離障礙物，所以斥力會變成零。然而終端效應器避開障礙物，不代表整個手臂可以避開障礙物，所以，他們提出當手臂與障礙物最近的距離，太接近的時候，會產生斥力遠離障礙物，他們嘗試用最接近的點來當作輸入與終端效應器當作輸入，發現排斥終端效應器會較穩定的到達目標點(如圖1.5)。

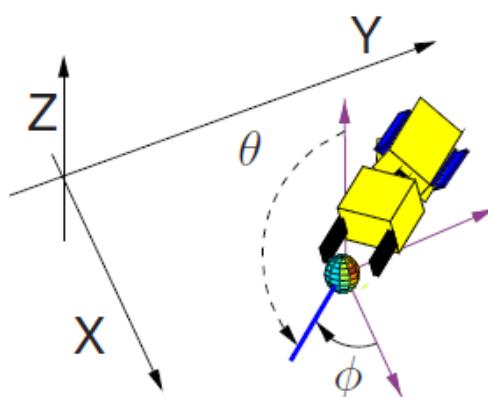


圖 1.3 將手前端兩個朝向角分開分析[5]

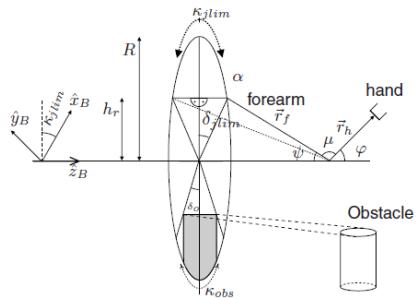


圖 1.4 利用限制冗於角度來定出手肘姿態[5]

基本上 RRT 的規劃方法是隨機去找資料庫樹狀上的點來達到目標點[9,10]，由於典型的 RRT 在遇到障礙物時，必須重新規劃新的 RRT，在規劃上將會消耗許多時間，所以，文獻[11]提出一個重新規劃的演算法即(Dynamic Rapidly-exploring Random Tree)DRRT，如圖 1.6 所示。[12]是利用 Sampling Domain 改善 RRT。[13]為將物體定義於姿態座標系中，並使用 RRT 尋找這些區域，目的是在找尋一個可以抓取物體的空間，並決定手臂抓取時的姿態。[14]是一種類似 RRT 的路徑規劃方法，此規劃是當手臂移動至下一點後，會重新針對周圍的環境做規劃，決定移動至下一點的方式，是找出一個最安全的點在手臂周圍附近，並以此規劃到目的地。

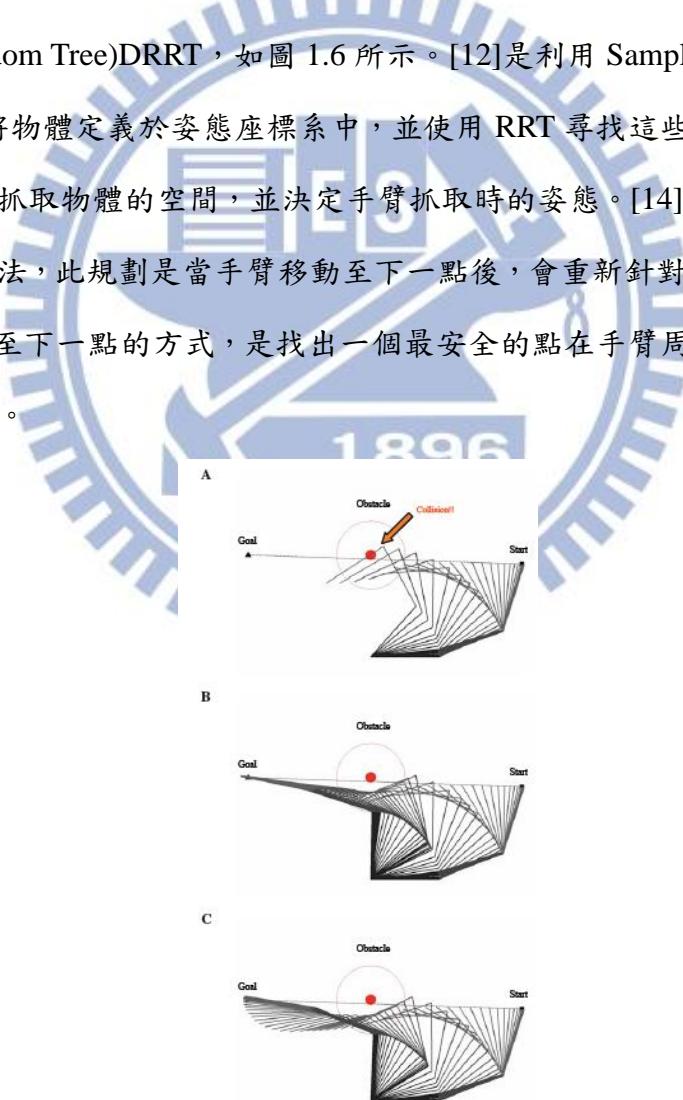


圖 1.5 (A)沒有考慮手臂會撞到(B)(C)考慮手臂與障礙物最短距離(B)利用 end-effector 帶動手臂避開(C)利用最近距離排斥去避開[4]

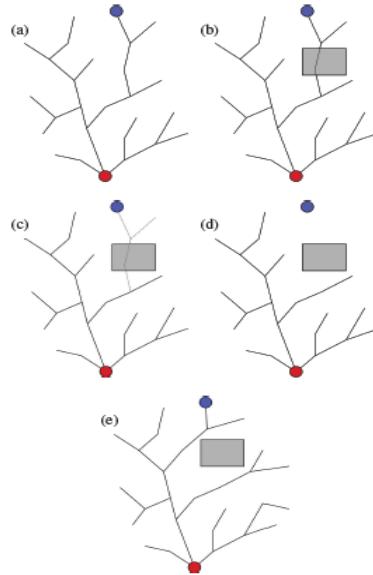


圖 1.6 DRRT 路徑規劃的過程[12]

文獻[16]當中提到，為了更準確知道移動障礙物，所以，多加了一個時間的維度，來預測障礙物的位置避免其碰撞。作者們嘗試去延伸樹狀結構，首先，必須先預測延伸出去點的時間，並且確認是否會與移動的物體產生碰撞，其次，為了增加路徑的安全與平順，增加了成本函數來計算結點之間安全的程度並定義出不確定的區域，用此方法來規劃出初始點與目標點之間的路徑。

1.3 問題描述

由以上文獻可以瞭解到機器人必須針對手臂工作區間內的環境，偵查其目標物的位置，例如[4]建立起 Point cloud。如此一來，將需要在較大範圍的環境找尋目標物，對 Point cloud 各點與手臂的關係建立 Potential field，但實際上空間中有些障礙物在機械手臂運動過程中，並無特別的影響，此外，Potential field 是針對機械手臂周圍障礙物與手臂的關係進行討論，並無對於障礙物在空間中分佈的情況與目前機械手臂所在空間進行分析，如此將有可能造成停滯於障礙物當中；而 RRT[16]則是從建立好資料庫找尋路徑，此種方法必須花費較長的時間建立資料庫，另外，在各結點間找尋可行的路徑，也需耗費較多的時間，較難達到即時反應。

因此，要如何縮小比對的範圍，去除不影響機械手臂移動的障礙物之描述與

規劃，以縮短機器人偵測的時間，加速機器人的反應，對於機器手臂的安全是件重要問題，另外，要如何分析物體在空間中的分佈，將機械手引導至不會與物體發生碰撞的區域，使機械手臂能安全執行任務，也是我們感興趣的問題。

本論文考慮的使用環境，預設為機器人在人類的生活環境下工作，人們常隨意在任何地方放置物品，因此在機械手臂工作的過程中，必須隨時面對可能發生的人員闖入或放置在工作區域內物品。為了可以感測到有障礙物進入工作區，設計上面臨幾個問題，第一是要如何即時的知道目前有障礙物進入，並有效、迅速的取得障礙物的資訊，第二要如何確保手臂不和障礙物產生碰撞，第三要找出適當的策略來反應進而繼續完成任務。本論文之設計即是要克服這三個問題來確保機器手臂與人類能安全在居家環境中工作。

在論文中，我們希望規劃兩種障礙物模式去避開，第一類情況為障礙物靜止，出現在手臂的工作區域內，第二類情況為障礙物突然出現，在機器手臂工作的狀態下，有一障礙物進入他運動規劃的範圍內。

1.4 系統架構

本論文使用實驗室研製的雙臂機器人阿拉丁(Aladdin)，如圖 1.7 所示，機器人裝置有兩自由度的頭部機構及六軸自由度機械手臂。所使用主要的感測器為深度攝影機(Kinect)，為了使機械臂適應各種不同環境規劃一條安全的路徑並進行抓取，所以，藉由影像辨識演算法描述環境中障礙物與擷取目標物，計算目標物與障礙物在空間中的座標位置，做為控制機械手臂抓取目標物的命令。藉由不斷更新環境資訊，以及讀取手臂所回傳之位置，使手臂能安全的執行抓取的任務，系統架構圖如圖 1.8。

1.5 章節說明

本論文一共分成六章，第一章介紹研究動機及其相關回顧並說明機器人之系統架構。第二章介紹環境偵測與目標物辨識。第三章則介紹機械臂逆向運動學及座標轉換與估測。第四章介紹機械手臂安全避障策略設計與控制。第五章為實驗結

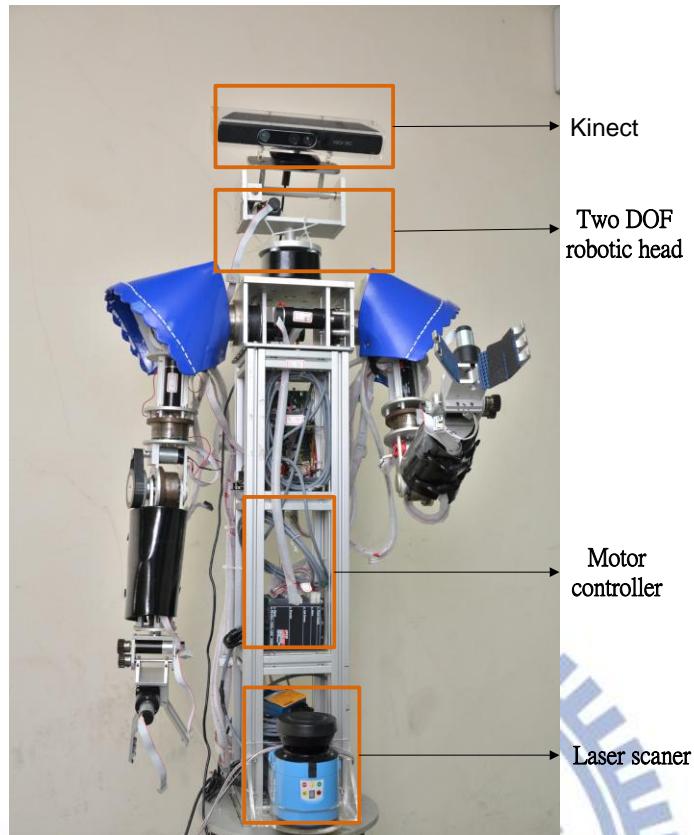


圖 1.7 實驗用之機器人阿拉丁

果，用以驗證各演算法的可行性與正確性。第六章為結論與未來工作。本論文之主要貢獻：

- 1、利用梯度變化決定物體影像中之平面。
- 2、將影像切割縮小比對範圍加速比對時間。
- 3、設計出安全指標以求得安全路徑。

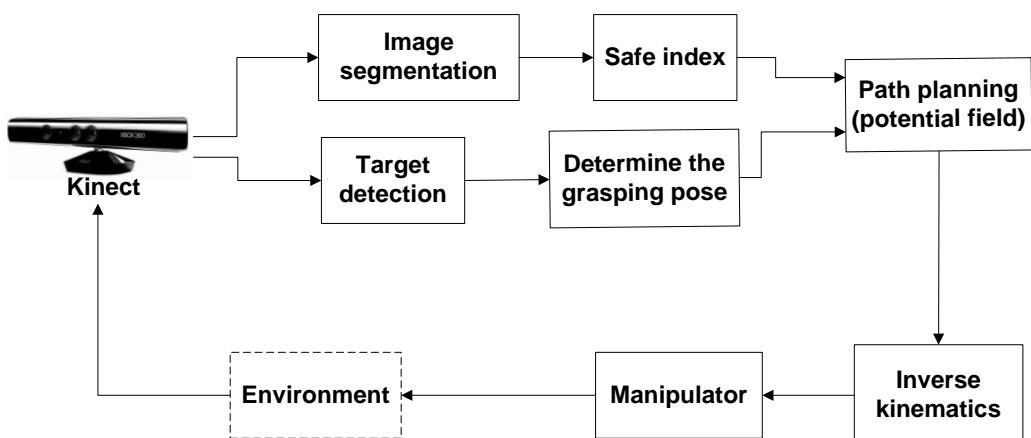


圖 1.8 系統架構圖

第二章 環境偵測與目標物辨識

本論文研究之對象主要是針對存在於一般人類活動的環境中之機械手臂，當此機械手臂被要求抓取一個目標物時，會因環境可能之改變，而有可能會和突如其來障礙物產生碰撞，因此，基於安全的考量，我們希望能使機械手臂偵測到這些障礙物，並能即時避開這些障礙物。此外，我們希望能在環境偵測的同時找尋到機器人所需要抓取的目標物，因此我們對此設計一個能立即描述環境的方法，讓機器人能和人一樣，可以知道外界環境的變化，並且隨著變化改變手臂運動模式，提高機械手臂在動態環境中的安全性。我們所使用的方法是，將深度攝影機(Kinect)放置於機器人頭部，利用不同平面有著不同方向的特性，將手臂工作範圍區域內的環境分類，再利用所分類之平面找尋機器人所需目標物所在位置。

在控制器輸入方面，本論文之設計需要一個在各物體上穩定的參考點，我們希望這些參考點能代表物體位置，以利於在整個影像伺服控制的過程中，給予機器人一個準確的控制命令，使其能夠準確的避開障礙物或移動到目標物前方，並抓取到目標物。

雖然以影像切割直接取得物體中心點可以做為控制用的參考點，但由於不同方向的平面會產生重疊，例如放置物品的桌面，桌面的中心點可能會因為物品而被遮蔽，使得影像中所取得物體的中心點，並非物體中心點的位置，而是遮蔽物體上的位置，於是為了取得物體實際上的位置，將平面依照長寬的比例切割數等份的棋盤格形狀，利用平面上的交點來回推出中心點的位置。

2.1 Kinect 深度攝影機

人類在活動中要取得環境的資訊，大部分必須依賴所看見的影像中人和物體的距離，來決定人的行為模式，所以，如果能在機器人上裝置具有影像與深度的感測器，那對於機器人偵察環境與執行任務會有相當大的幫助。因此我們選擇 Kinect 深度感測器做為我們偵察的感測器。如圖 2.1 所示，深度攝影機(Kinect) 上面裝置了兩個感測器，其中一個為一般攝影機，主要可藉由此攝影機獲得一張彩



圖 2.1 Kinect 深度攝影機[18]

表2.1 Kinect 深度攝影機之規格[18]

sensor	Color and depth-sensing lenses Voice microphone Tilt motor for sensor adjustment
Field of view	Horizontal field of view: 57 degrees Vertical field of view: 43 degrees Physical tilt range: 27 degrees Depth sensor range: 1.2m-3.5m
Data streams	320*240 16-bit depth at 30FPS 640*480 32-bit color at 30FPS

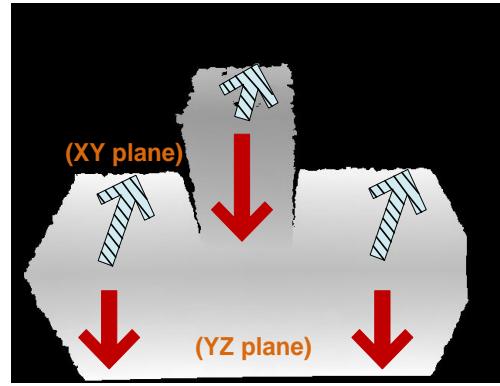
色影像，另一個為紅外線感測器，可以感測環境與攝影機之間的距離，來獲得一張具有深度資訊的影像，表 2.1 為 Kinect 的規格表。

2.2 環境描述

為了達到即時更新環境資訊，並藉由更新環境過程中，能縮小機器人找尋目標物的範圍，加速搜尋速度的目的，我們希望將環境簡化為一個較為簡單的模型，以提供給目標物比對與即時閃避策略時所需。由於攝影機裝置於機器人的頭部，當機器人以俯視方式偵察環境中物體時，可以觀察到環境中大部分物體的朝



(a)



(b)

圖 2.2 (a)原始環境圖(b)深度灰階圖

上平面與朝向機器人的垂直平面。如圖 2.2(a)所示，所以，我們希望此模型不需要獲得所有平面，只需依賴不同方向的幾個平面，即可描述其物體的大小，因此，我們將物體以長方體型態表現，將偵察物體分成兩種平面，如此一來，可以得到物體高度與寬度，同時也可以獲得物體深度(X 方向)的資訊。

我們觀察物體朝上的平面(XY 平面)與朝向機器人平面(YZ 平面)，如圖 2.2(b)所示，可以發現兩平面與攝影機的距離遠近，由近到遠會由兩個不同方向遞增：圖中斜線淺色的箭頭是往影像向上的方向遞增，相反的，深色向下的箭頭是往影像向下的方向遞增。因此，我們擷取紅外線感測器所得的深度資訊，再將所得深度依照距離的不同，轉換成灰階影像，並過濾手臂工作範圍以外的區域，其結果如圖 2.4(b)。

其次，我們使用 $3*3$ 梯度運算子(如圖 2.3)，將影像依據梯度方向的不同將灰階影像分成 XY 平面與 YZ 平面兩種，並進行二值化，透過型態學影像處理的方法[19]，使所得各個分割出來的區塊能更佳的平順，其結果如圖 2.4(c)。

最後，利用所得兩張影像，分別將區塊的邊緣找出，將形成封閉曲線的給與標記，切割成數個區塊，如圖 2.4(d)所示，將圖 2.4(c)中白色區塊與深灰色區塊，分別找出各個區塊邊緣。

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

(a)

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

(b)

圖 2.3 (a)對 XY 平面運算子(b)對 YZ 平面運算子

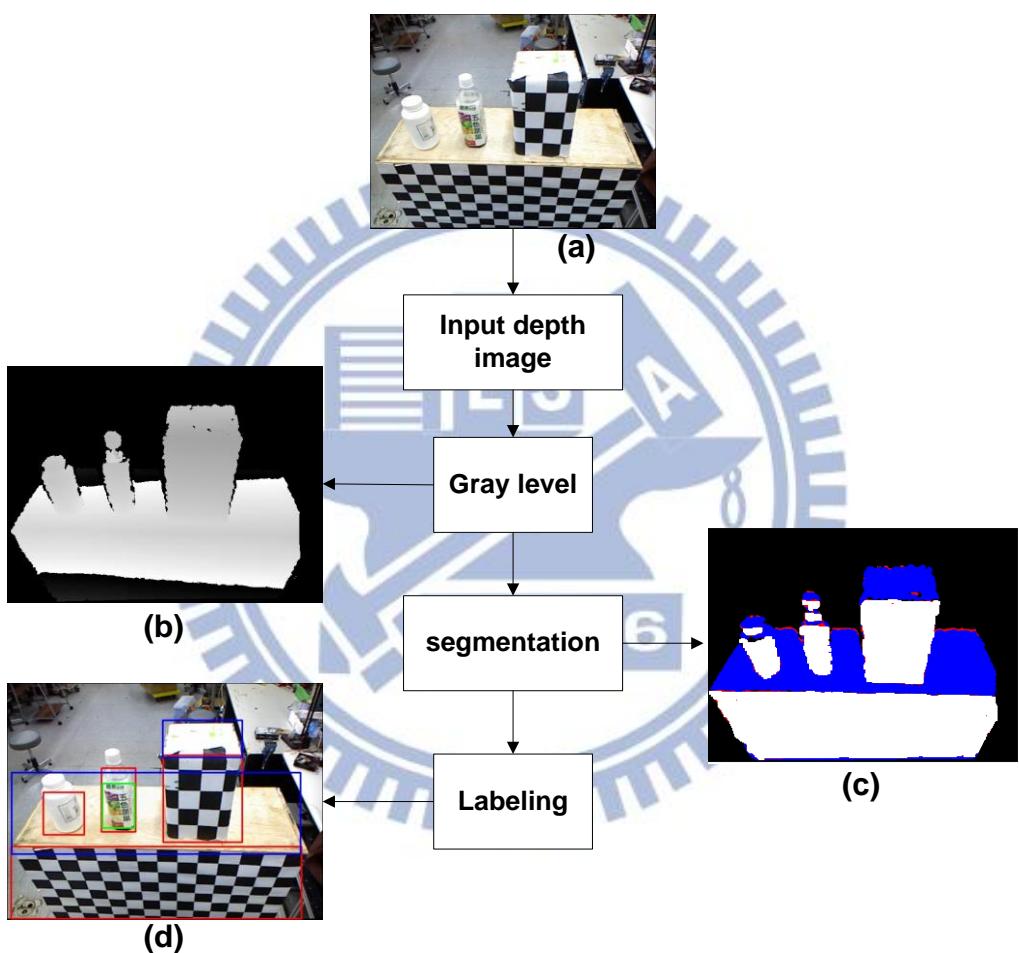


圖 2.4 切割環境影像與偵測目標物流程圖(a)原始環境彩色影像(b)距離攝影機不同深度所形成的灰階圖(c)將環境切割成 XY 平面(深灰色)與 YZ 平面(白色)(d)標記出不同大小的平面與框出目標物位置

切割後的平面不但能夠描述環境中的物體，並藉由原本 Kinect 所得彩色影像找出整張圖特徵點並進行比對，縮小成比對切割後平面區域內的特徵點，能加

速比對目標物的時間。傳統上 Speed up robust feature(SURF)的應用是針對整張影像去進行比對，或是文獻[9]為了使機器人能達到即時更新環境，只在手臂工作範圍內建立 point cloud 並利用此區域進行比對，而本論文所提出的方法中，當我們建立目標物的資料庫時，除了資料庫的影像之外，另外還會建立目標物面積，此面積會與深度成反比，當目標物越遠則所得面積越小，依據資料庫中的面積與所切割出來的平面大小進行比對，其面積大小越接近的平面，是目標物的機率越高，如此可以降低比對較大面積的物體，能更加迅速找到其目標物，並且能即時得知環境的變化。

2.3 目標物辨識

當機器人要執行抓取任務時，要能知道目標物為何，並從影像中即時尋找出目標物的位置，才能進行抓取的動作。所以，首先，對於不同的目標物先行建立資料庫，再將資料庫中目標物的特徵與機器人所觀察的影像進行比對，找到一個可以代表目標物的參考點，導引手臂到達目標物位置，完成抓取的動作，其目標物辨識流程如圖2.5。

在本論文引用張哲豪[20]所提出目標物比對方法，採用的是特徵點擷取，引用 SURF 來定義目標物體的特徵點，並藉由比對當前畫面的特徵點來判斷目標物是否存在於影像中。在 3D 座標的計算上比對成功的特徵點扮演著重要的角色，做完特徵點比對後的結果，往往會出現一些錯誤比對的特徵點，為了強化特徵比對結果並算出抓物控制所需的參考點，採用隨機取樣篩選演算法(RANdom Sample Consensus,RANSAC)[21]來估測平面轉換矩陣(Homography matrix)來做特徵點二次的篩選，以標出目標物的參考點。

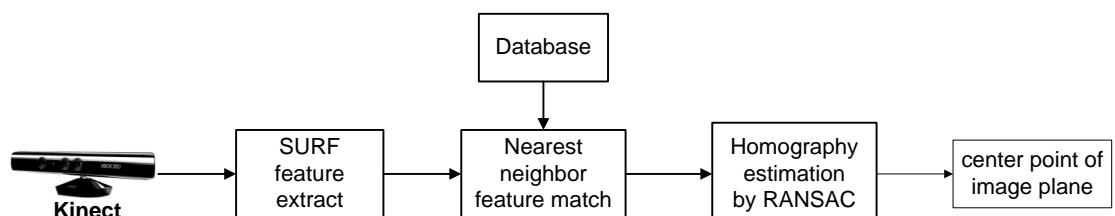


圖 2.5 目標物辨識流程圖

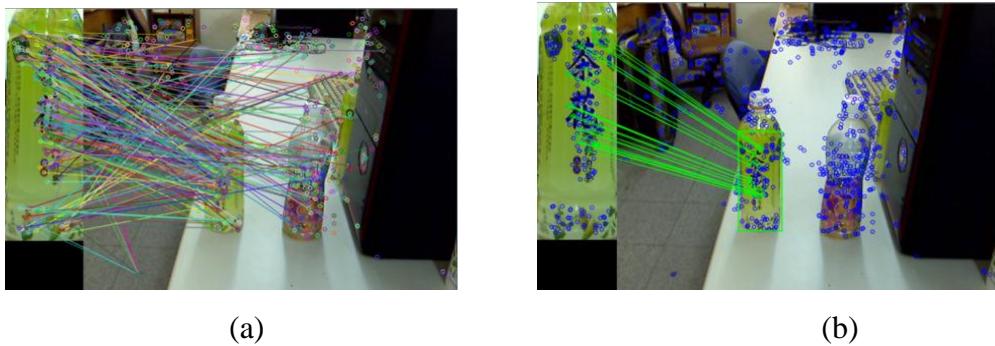


圖 2.6 (a)SURF 特徵點比對(b)RANSAC 估側平面轉換矩陣

在做完特徵點比對之後，經常出現一些比對錯誤的特徵點，在3D座標的計算需要依賴成對的特徵點，我們必須提高這些特徵點的品質，追求更加穩定跟準確的結果。本論文採用RANSAC跟homography來做特徵點的二次篩選加強最後辨識的結果。而其結果如圖2.6，圖2.6(a)參雜雜訊的資料樣本為第一次特徵比對的結果，可以看出有部分的特徵點比對錯誤，而經由RANSAC計算轉換矩陣(Homography matrix)，如此就可以得到對應正確比例最高的一群特徵點，可以使homography來所框出在目前影像平面上的目標物的位置更加準確，如圖2.6(b)，去除比對錯誤的特徵點後，再將剩餘成功比對特徵點拿來求出轉換矩陣，就可以準確框出目標物的位置。

其中的RANSAC 演算法，其主要精神在於從一群分布不均勻或是參雜雜訊的資料中，隨機挑選數個樣本，算出參考的模型，之後再把其他資料逐次拿進來運算，留住符合模型的大多數，排除少數不符合者，以符合大眾資料的模型為最後結果。舉例來說[22]，如圖 2.7 所示，運用此演算法能夠從一群分布不均勻的點集合之中找出一條直線，符合大多數的點，而少數不符合的點則被剔除在外。

RANSAC 演算法，為一個條件中止式的隨機演算法，當算出來的結果合乎我們所設定的閾值時，表示此結果已經合乎大部分的特徵對應關係了。其演算步驟簡述如下：

1. 隨機挑選4 對以上在第一階段比對成功的對應點，求出目前影像跟資料庫影像之間的平面轉換矩陣H。
2. 將所有對應點使用步驟1 求得的平面轉換矩陣進行位置轉換，將資料庫影像

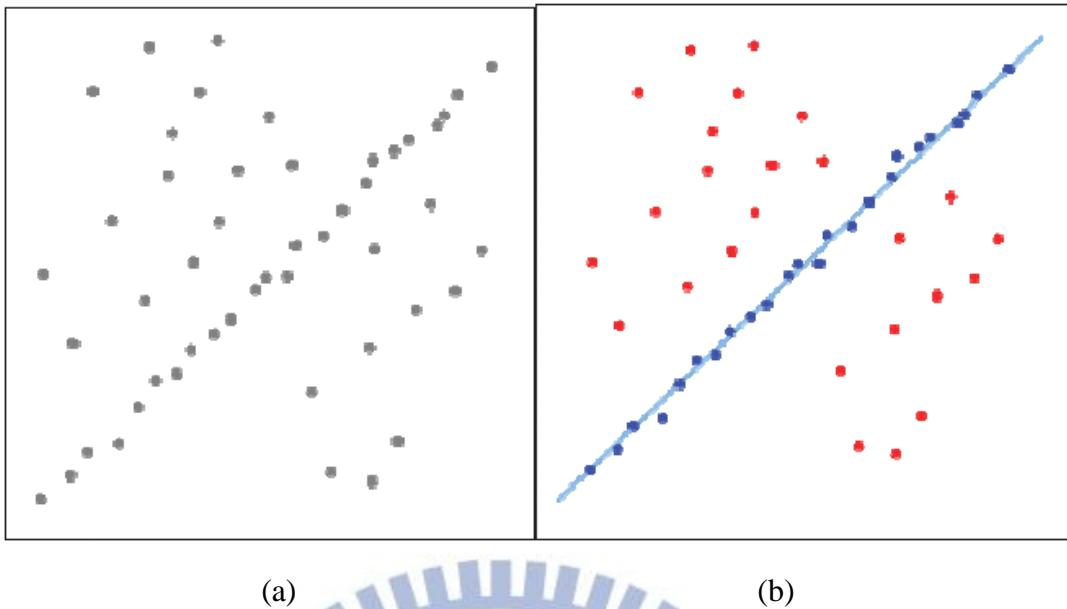


圖 2.7 左圖為一群分布不均勻的點集合，需要從這裡面決定出一條直線。右圖為經過 RANSAC 計算後，得到符合條件的直線，不符合的點則被剔除在外[22]

的對應點代入轉換矩陣得到另一組配對點，之後計算這些經過轉換的配對點座標與原本目前影像中的配對點座標之間的距離。

3. 統計步驟2 中所有配對點間的距離，其配對點的距離若小於某個自訂的臨界距離 D_t ，則表示此組配對點符合這個平面轉換矩陣，然後統計這個平面轉換矩陣的正確配對數量。

重複上述步驟N 次之後，若某次的正確配對點數量最多，且大於某個自訂的臨界數量 S_t 時，則採用此次的平面轉換矩陣，再將這些配對點拿去求得最終的平面轉換矩陣。

Homography 的功用在於找到兩個影像平面中，點跟點之間的對應關係。在影像平面上，一組對應的特徵點之間，存在著一種線性變換的關係，而對應矩陣 (Homography) 定義為其中一個影像平面上的點 P_a 轉換到另一個影像平面上的點 P_b 之間的線性轉換。Homography 是由一 3×3 的非奇異矩陣 (Non-singular) 矩陣所決定，因為具有縮放因子 ω 的關係，能夠反映出目標物在影像平面上，跟資料庫影像相比，尺度大小的變化倍率。它具有 8 個自由度 (degree of freedom)，因為

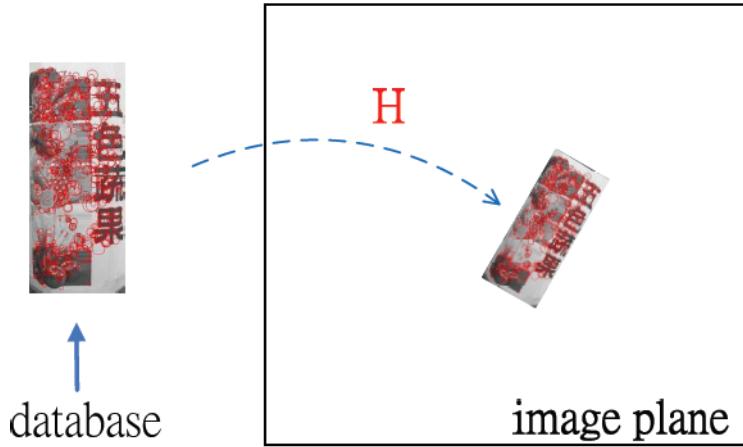


圖 2.8 透過轉換矩陣 H 得到資料庫物件在目前影像平面中之位置

平面上一個點 (x, y) 具有兩個自由度，所以決定一個Homography至少需要四點以上的對應關係。

因為homography 具有對應旋轉及尺度變化的特性，所以即使目標物在不同距離或是不同角度，我們都可以準確的框出目標物在目前影像平面上的位置。如圖 2.8所示，左邊是資料庫影像，首先藉由所擷取到的特徵點，求得資料庫影像跟目前影像平面之間的轉換矩陣，接著透過轉換矩陣 H ，我們可以得到目標物在目前影像平面(image plane)中的位置。

我們所使用的電腦為Intel Core 2 CPU T7200，解析度為640*480進行實驗。利用2.2節提出的方法先從環境中分出數個區域，在從數個區域與資料庫影像進行比對，找出目標物所在的位置。表2.2是以圖2.4(a)為環境，利用上述每個步驟所執行的時間，我們可以由表看出，由於我們是針對各個區域由目標物的距離與物體的大小，判定物體大小與目標物相似的程度，在根據可能性的大小，依序進行比對，所花費的時間會相對的降低，也加速了物件辨識時比對的時間。

2.4 目標物姿態估測與定義障礙物參考點

利用 2.3 節的方法標示出目標物後，再將 2.2 節所取得各區域去除目標物所在區域後，其他區域被標示為障礙物，在標示出障礙物與目標物後，我們將定義所標示出物體參考點，藉由這些參考點來表示障礙物與目標物的位置，此外，為

表2.2 環境辨識與特徵點比對時間表

Sub-modules	Average time(ms)
SURF feature calculation	108
Object recognition	149
Environment segmentation	99
total	356

了安全的考量，仍須記錄其物體的面積，使機器人能夠了解障礙物在其手臂工作區域內分部的狀況，提高機械手臂執行任務的安全性。

2.4.1 目標物姿態估測

要描述一個物體的姿態(位置及朝向)通常會用六個自由度表示：其中三個自由度用來表示位置，另外三個則來表示朝向。因此，目標物的姿態可以被表示為 $p = (X, Y, Z, \phi, \theta, \varphi)^T$ ，其中 X、Y、Z 代表位置， Φ 、 θ 、 φ 則是尤拉角代表朝向。當計算出 homography 之後，我們可以取得目標物與目前影像之間的平面轉換關係，並以長方形來表示目標物。首先，我們取得轉換後平面四個角的座標位置，此四個角為表示目標物長方形的四個角，將此四個座標平均，取得參考座標 (X, Y, Z)，其次，由於我們需要找出一個方向向量來表示目標物的方向，所以，我們將目標物長方形 Z 方向的邊長分成三等份，取得 a、b 兩點，取 a、b 兩點連線的中點，表示為目標物的位置，而 a、b 兩點所形成的向量則代表目標物平面的向量，如圖 2.9 將所得 a、b 連線的向量投影至 XZ 平面(V_x)與 YZ 平面(V_y)，並求出與 XZ 兩軸的夾角，另外，我們利用所得平面的法向量投影至 XY 平面(V_n)，求出與 YZ 平面的法向量夾角，即可得知目標物相對於世界座標軸，分別旋轉了幾度，其公式如下(2.1)、(2.2)、(2.3)

$$\vec{V}_y = \vec{V}_t - \frac{\vec{V}_t \cdot \vec{n}_y}{\|\vec{n}_y\|} \vec{n}_x \quad \varphi = 90 - \cos^{-1} \left(\frac{\vec{V}_y \cdot \vec{n}_y}{\|\vec{V}_y\| \|\vec{n}_y\|} \right) \quad (2.1)$$

$$\vec{V}_x = \vec{V}_t - \frac{\vec{V}_t \cdot \vec{n}_y}{\|\vec{n}_y\|} \vec{n}_y \quad \phi = 90 - \cos^{-1} \left(\frac{\vec{V}_x \cdot \vec{n}_x}{\|\vec{V}_x\| \|\vec{n}_x\|} \right) \quad (2.2)$$

$$\vec{V}_n = \vec{n}_t - \frac{\vec{n}_t \cdot \vec{n}_z}{\|\vec{n}_z\|} \vec{n}_z \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{V}_n \cdot \vec{n}_x}{\|\vec{V}_n\| \|\vec{n}_x\|} \right) \quad (2.3)$$

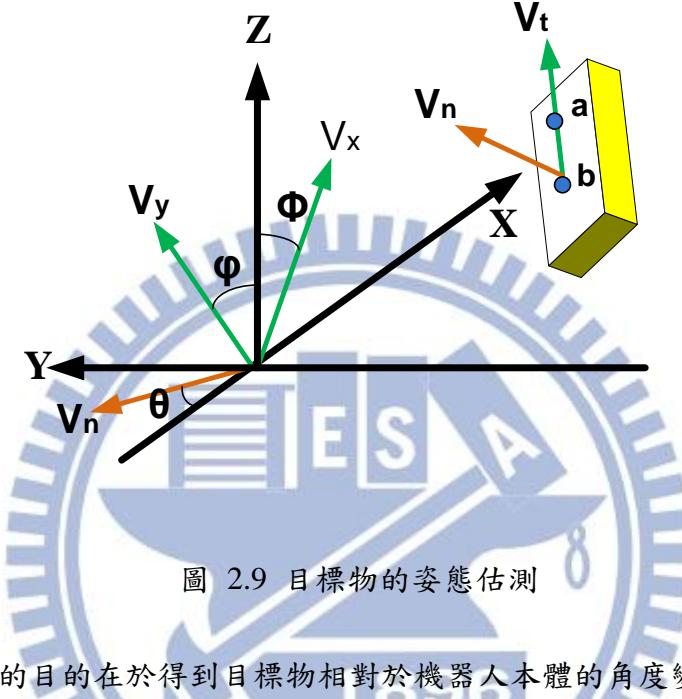
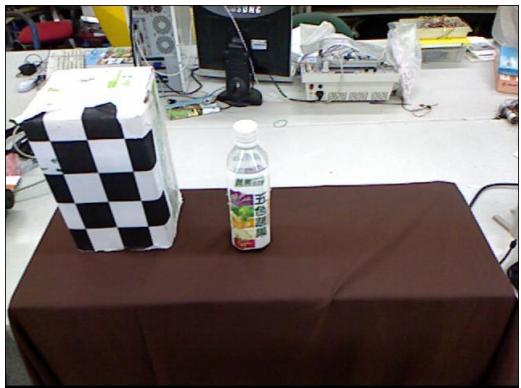


圖 2.9 目標物的姿態估測

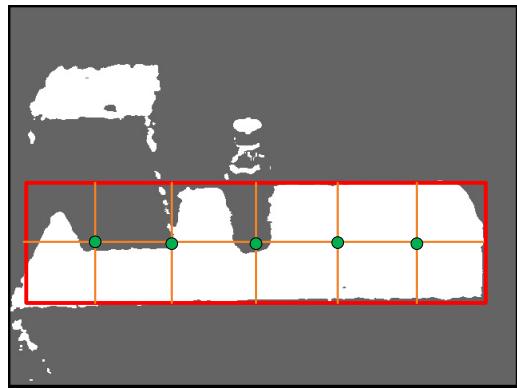
這個設計的目的在於得到目標物相對於機器人本體的角度變化，可以更進一步決定抓取的姿態，當目標物不是直立於桌面時，他可能會有不同的姿態，例如；左右傾斜或前後傾斜等情況，若機器人可以獲得目標物姿態的相關資訊時，便可以調整機械手臂抓取的姿態，以最適當的方式進行抓取的任務。

2.4.2 障礙物參考點

我們利用 2.2 節所取得各區塊的中心點是為障礙物位置的參考點，並用參考點與面積大小來表示障礙物。雖然我們可以將切割後每區塊在影像的中心點定為參考點，然而如果障礙物在影像中的中心點被其他物體遮蔽，我們轉換後所得障礙物的參考點，就不會為世界座標上障礙物的中心點，而會計算到所占據物體的位置。為了推得實際障礙物的中心點做為參考點，我們提出一個方法來解決障礙物被其他物體重疊住中心點的問題。我們希望能結合上述 2.1 最後所標記影像的區



(a)



(b)

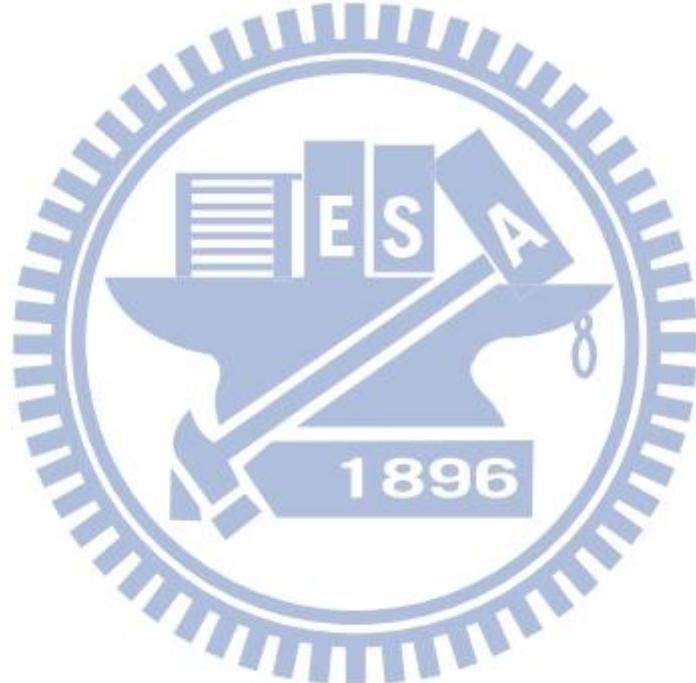
圖 2.10 (a)攝影機擷取之影像(b)XY 平面二值化深度圖

域，與利用深度影像所切割出 XY 平面，如圖 2.10(b)為 XY 平面二值化的結果。以由圖 2.10(a)中桌子的中心點會因物體放置上面而被遮蔽，在影像當中，中心點座標位置為瓶子上某一點的位置，而非桌面的中心點，所以，如圖 2.10(b)所示，將標記後的區域以棋盤格的方式，依據長與寬的比例，以水平、垂直方向切割數等份，本論文中將長切割成 5-8 等份、寬切成 3-5 等份。不論平面是否傾斜，只要在同一平面垂直線上，相鄰的兩點 Z 座標(實際物體上下方向)會有等差的特性，也就是說，當平面上如果沒有任何東西的時候，影像上的各點，在轉換後的 Z 座標應該成等差的關係，所以先求出各個相鄰兩點的 err_z ，並判斷相同 err_z 個數最多的值，找出所產生其值的各點，推論這些點是在平面上的點，所以才會佔大多數，最後，當我們想找出此平面區域的中心點，利用所獲得的任一點與中心點的 Y 座標的差值，和相鄰兩點 Y 座標的差值，用等比例的關係，回推至中心點的 Z 座標，而在 X 方向(實際物體前後方向)，將各點 X 座標，由於水平線上各點和中心點是同一條線上，表示所獲得的這些點，其深度要相同，所以，我們利用此特性將統計所獲得的各個 X 座標值，找出相同 X 座標值中做多的，做為中心點的 X 座標。

當獲得每個區域的中心點後，並取得各障礙物長和寬，即可描述出物體在空間中的分佈情況和物體的大小，我們就可以利用這些參考的位置與大小，來進行路徑規劃。

2.5 討論

本論文提出一個環境描述的方法，同時結合目標物的偵測，利用環境中不同平面有不同梯度方向的特性，將物體相鄰兩個不同平面標記出來，我們知道一個長方體只要知道相鄰的兩個平面，即可知整個長方體的特性，所以，藉由本論文提出的方法，可以瞭解物體在空間中分佈的狀態，有利於之後 Potential field 的建立，使其不只針對一個參考點，可以利用整個面建立出對應的磁場。此外，利用環境切割所取得的各平面，將與目標物依序進行比對，縮小比對的範圍，不但可以縮減比對時間，並由於比對個數減少，可以使比對得更加準確。



第三章 機械臂逆向運動學及座標轉換

本章節的主要目的在說明如何將第二章所算出的參考點，轉換成在空間中實際的三維座標，當作控制輸入的重要資訊來源。此外，本論文延續許傑巽所推導手臂前四軸的逆運動學公式[23]，推導最後兩軸手腕之逆運動學，完成 6 軸機械臂之逆向運動學。最後，我們會針對機械手臂座標系與攝影機座標系做校正，我們會以攝影機做為校正的基準，找出兩座標系之間的關係。

3.1 手腕運動學推導

本論文中所使用的機械手臂一共是六個自由度，其設計重點在於使其靈活度與動作模式可以類似人類，為了機構設計上得以簡化與動作控制的複雜度得以降低，所以，我們選擇肩膀到手腕是四個自由度，手爪部分是兩個自由度，使用最少但符合靈活度要求的自由度，如圖 3.1(a)所示。手掌的設計上，具有旋轉跟上下轉動兩個自由度，此設計目的即是為了能用不同姿態進行抓取的任務。

在手臂運動學方面，由於手爪的姿態較容易因為任務不同有不同的姿態，我們將採用 wrist partitioned 的類型[24]，將逆運動學的分析從手腕部位分開處理，使機械手臂能以符合人體自然姿態方式，進行抓取的任務。另一方面，為了達到適應各種不同的抓取姿態，我們設計讓手爪能抓取多種不同姿態的物體，並可針對環境中物體的擺設些許的微調，以利於手臂能更加容易的閃躲障礙物，達到安全執行任務的效果。

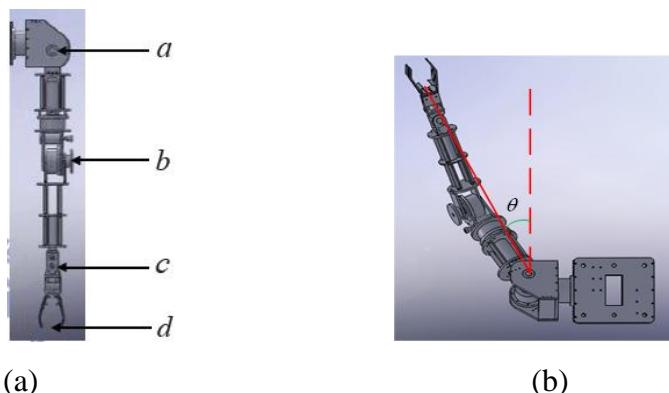


圖 3.1(a)手臂各點代號位置(b)手臂投影到 XY 平面

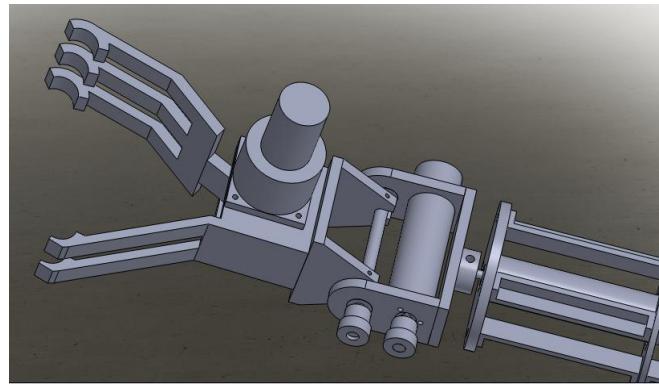


圖 3.2 手爪之設計圖

手爪設計部分(如圖3.2)，為了達成人類最常使用的手掌與手指功能(例如:握筆、拿瓶子、拿杯子等等...)，在爪子尖端使用了凹槽設計，是為了從桌面上拿起筆，而手指中間的曲折，是為了抓起一般外型簡單物體，而從減速機直驅手指的設計，也是為了有強壯的握力，能夠達成功能。

3.1.1 手臂順向運動學

順向運動學為給定各關節軸之旋轉角度，進而求得末端終端效應器(End-effector)在絕對座標系中的空間位置；而逆向運動學則是以給定末端桿件在絕對座標系中的空間位置，反過來求解各軸關節的旋轉角度。若已知各桿件向量和各關節旋轉角的資料，可利用順向運動學方程式推導出各關節點之空間座標，也可由連續的終端效應器座標形成運動軌跡。本論文採用的是D-H model 建立機器人運動學模型，用以進行順向運動學以及逆向運動學的計算。D-H model 是一種針對連桿運動設計的運動學分析法，可以對連桿在 3 度空間的移動與轉動有著簡單而完整的描述。

利用D-H model 來建立運動學模型，建立順序為由肩膀部位到手腕部位，如圖3.3所示，表3.1 為雙臂機器人之右D-H model 的參數表，其中每4個D-H 參數 (θ 、 α 、 a 、 d) 可決定出一個手臂自由度的座標轉換矩陣。整個手臂有多少自由度就有幾個座標轉換矩陣作為代表，將所有自由度的代表矩陣照順序乘積起來即可得知操作手臂末端的姿態與位置的矩陣。

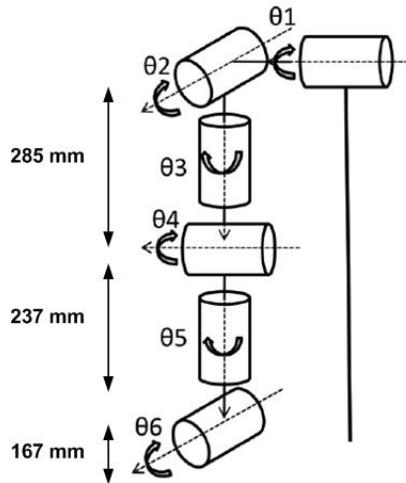


圖 3.3 右手臂 D-H 座標系

表3.1 右機械手臂各軸的D-H參數表

	θ	α	a	d
Joint1	θ_1	-90	0	0
Joint2	$\theta_2 - 90$	90	0	0
Joint3	$\theta_3 + 90$	-90	0	285
Joint4	θ_4	90	0	0
Joint5	θ_5	90	0	237
Joint6	$\theta_6 + 90$	-90	167	0

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - 90) & 0 & -\sin(\theta_2 - 90) & 0 \\ \sin(\theta_2 - 90) & 0 & \cos(\theta_2 - 90) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 + 90) & 0 & -\sin(\theta_3 + 90) & 0 \\ \sin(\theta_3 + 90) & 0 & \cos(\theta_3 + 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 285 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 237 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6 + 90) & 0 & -\sin(\theta_6 + 90) & 167 \cos(\theta_6 + 90) \\ \sin(\theta_6 + 90) & 0 & \cos(\theta_6 + 90) & 167 \sin(\theta_6 + 90) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.1.2 手臂前四軸之逆向運動學

肩膀至手腕前四軸($\theta_1 \sim \theta_4$)的逆運動學推導上，我們必須先由目標點經由手腕逆運動學推導出腕部 c 點的位置(如圖 3.4)之逆向運動學，再推前四軸的部分。首先，我們先將手爪至手臂肩膀連線投影至 XY 平面，並求出 X 軸與投影連線的夾角 θ ，其次，我們無法確保在每次執行抓取過程中，目標物都直立放置於桌面上，所以，我們希望當目標物姿態改變時，手爪能與目標物擺設姿態平行，以便手臂能穩定抓取目標物，所以，根據 2.2 節所計算出目標物的姿態，我們可以定義出手腕所需調整的角度 Φ ，我們由公式(3.7)推導出 c 點的座標，其中 P_x 、 P_y 和 P_z 表示手爪位置， W_x 、 W_y 和 W_z 表示手腕的位置， L_w 則為手爪的長度。在得到手腕的座標後，接下來我們參考許傑巽[23]論文所推導的步驟計算出肩膀到手腕間四軸的逆運動學。

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_w \cos \phi \cos \theta \\ \frac{-P_y}{|P_y|} L_w \cos \phi \sin \theta \\ L_w * \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

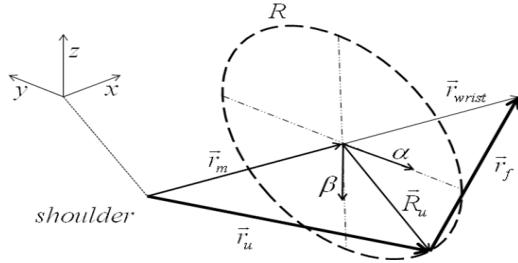


圖 3.4 手臂座標系與冗餘圈示意圖

Step 1：求 θ_4

在已知手腕點的卡式座標 (W_x, W_y, W_z) 後， \vec{r}_{wrist} 就可以得到，我們就可以利用三角關係來求出 θ_4 ，如 3.8 式。

$$\theta_4 = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{\|\vec{r}_u\|^2 + \|\vec{r}_f\|^2 - \|\vec{r}_{wrist}\|^2}{2\|\vec{r}_u\|\cdot\|\vec{r}_f\|}\right) \quad (3.8)$$

其中 \vec{r}_u 和 \vec{r}_f 跟是上臂跟下臂的向量，而

$$\|\vec{r}_{wrist}\| = \sqrt{(p_{wx})^2 + (p_{wy})^2 + (p_{wz})^2} \quad (3.9)$$

也就是從肩膀到手腕點的距離。

Step2：求手肘的位置

對右手的結構來說，手肘的位置通常會在從肩膀到手腕連線的右下方。所以首先須要先求得 \vec{R}_u 向量的長度 $\|\vec{R}_u\|$ ，而 $\|\vec{R}_u\|$ 就為冗餘圈的半徑長度 R ，如圖 3.5 所示，我們可以根據海龍公式來求得由 \vec{r}_u 、 \vec{r}_f 和 \vec{r}_{wrist} 構成的三角形的面積 $\Delta_{\vec{r}}$

$$\Delta_{\vec{r}} = \sqrt{s \cdot (s - \|\vec{r}_{wrist}\|) \cdot (s - \|\vec{r}_u\|) \cdot (s - \|\vec{r}_f\|)} \quad (3.10)$$

而其中 $s = \frac{(\|\vec{r}_{wrist}\| + \|\vec{r}_u\| + \|\vec{r}_f\|)}{2}$ ，而我們要求的 $\|\vec{R}_u\|$ 就為

$$\|\vec{R}_u\| = \frac{2 \cdot \Delta_{\vec{r}}}{\|\vec{r}_{wrist}\|} \quad (3.11)$$

\vec{r}_m 向量：

$$\vec{r}_m = t_{rm} \cdot \vec{r}_{wrist} \quad (3.12)$$

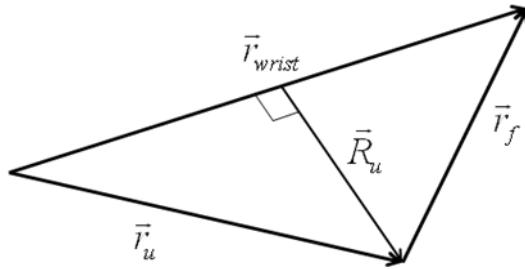


圖 3.5 由手臂構成的三角形

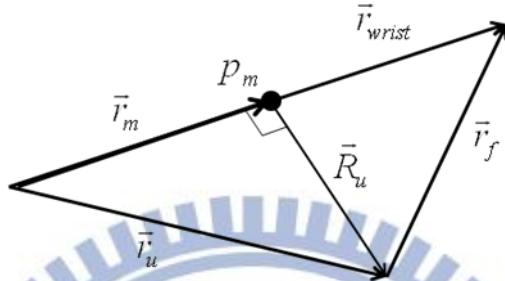


圖 3.6 手臂三角形裡各向量

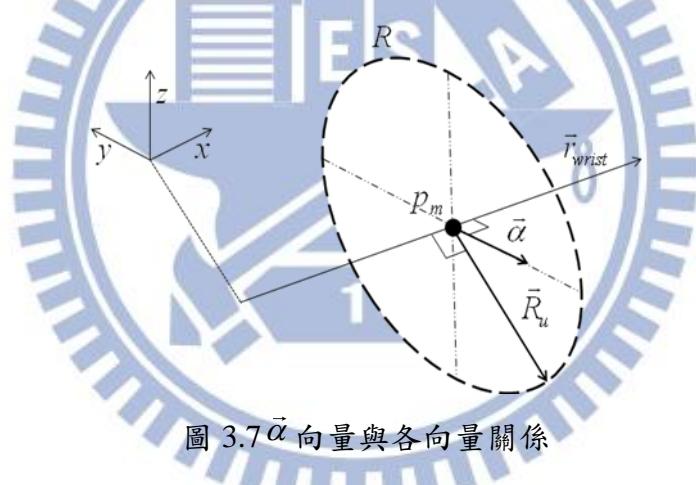


圖 3.7 $\vec{\alpha}$ 向量與各向量關係

接著藉由 \vec{R}_u 作為媒介算出 \vec{r}_m 向量與 \vec{r}_{wrist} 的比例關係，得到了 \vec{r}_m 向量後，我們就可以得到肘位置到肩膀與手腕連線的的直線上面的正交的點 p_m (如圖 3.6)。其中

$$t_{rm} = \frac{(\|\vec{r}_u\|^2) - (\|\vec{r}_f\|^2) + (\|\vec{r}_{wrist}\|^2)}{2 \cdot \|\vec{r}_{wrist}\|^2} \quad (3.13)$$

$\vec{\alpha}$ 向量：

$$\vec{\alpha} = \left[-\left(\frac{p_{wy}}{p_{wx}} \right) \cdot C_{factor}, C_{factor}, 0 \right] \quad (3.14)$$

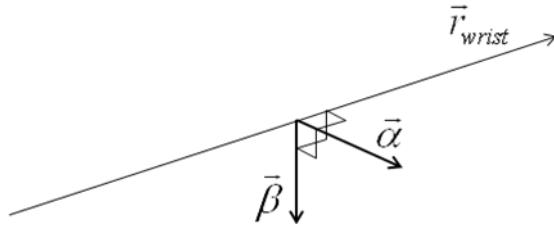


圖 3.8 β 向量與各向量關係

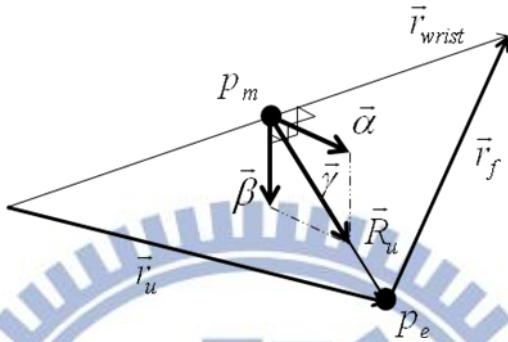


圖 3.9 α 向量與 β 向量型成 γ 向量

接著定義通過 p_m 且平行於水平面的 α 向量(如圖 3.8)。而定義的考量為，首先由於是平行於水平面的向量，所以 z 分量一定為零。再來，y 分量為 C_{factor} ，由於我們目前為右手結構的推導，而 Y 軸正向的定義是朝左邊(如圖 3.8 所示)，所以 C_{factor} 定義為”-1”，(如果是左手的話 C_{factor} 定義為”1”)，而我們定義 α 向量要垂直 \vec{r}_{wrist} ，因此就可以求出 α 向量的 x 分量，如 3.14 式。

如圖 3.9 所示，由於 β 向量同時垂直於 α 向量與 \vec{r}_{wrist} 向量，所以利用 α 向量與 \vec{r}_{wrist} 向量做外積就可以求得 β 向量

$$\vec{\beta} = \vec{\alpha} \times \vec{r}_{wrist} \quad (3.15)$$

$(p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}) :$

由 α 向量與 β 向量做向量加法後可得到 γ 向量，我們可以透過 α 向量與 β 向量的係數 A 與 B 來控制 γ 向量的方向，而由前面已知 $\|\vec{R}_u\|$ 的長度，可以算出 γ 向量與 \vec{R}_u 向量的倍數關係，因此就可以求得手肘的位置 (p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}) 。

Step3：求 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

算出我們需要的手肘的位置後， $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 就可以接續算出來。由肩膀座標原點推導到手肘座標的順向運動學已知

$$R_y(\theta_1) \cdot R_x(\theta_2) \cdot T_z(-L_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \sin \theta_2 L_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

而

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \sin \theta_2 L_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{ex} \\ n & o & a & p_{ey} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{ez} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

因此我們可以得到下列聯立方程式

$$\begin{cases} -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 = p_{ex} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \sin \theta_2 L_1 = p_{ey} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{cases} -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 = p_{ez} \end{cases} \quad (3.20)$$

將 3(3.18)式除以(3.20)式可得

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{-p_{ex}}{-p_{ez}} \quad (3.21)$$

利用 atan2 函式可求得

$$\theta_1 = \text{atan2} \left(\frac{-p_{ex}}{-p_{ez}} \right) \quad (3.22)$$

將 (3.19)式除以(3.20)式可得

$$\tan \theta_2 = \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} = \frac{p_{ey} \cos \theta_1}{-p_{ez}} \quad (3.23)$$

利用 atan2 函式可求得

$$\theta_2 = \text{atan2} \left(\frac{p_{ey} \cos \theta_1}{-p_{ez}} \right) \quad (3.24)$$

再由肩膀座標原點推導到手腕座標的順向運動學

$$R_y(\theta_1) \cdot R_x(\theta_2) \cdot R_z(\theta_3) \cdot T_z(-L_1) \cdot R_y(\theta_4) \cdot T_z(-L_2) = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{wx} \\ n & o & a & p_{wy} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{wz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

將上式整理可得下式

$$R_z(\theta_3) \cdot T_z(-L_1) \cdot R_y(\theta_4) \cdot T_z(-L_2) = R_x^{-1}(\theta_2) \cdot R_y^{-1}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{wx} \\ n & o & a & p_{wy} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{wz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

整理可得到下列聯立方程式

$$\left\{ -\sin \theta_3 \sin \theta_4 L_2 = \sin \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} + \cos \theta_2 p_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz} \dots \right. \quad (3.28)$$

$$-\cos \theta_4 L_2 - L_1 = \cos \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_2 p_{wy} + \cos \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz} \cdots (3.29)$$

將 3.27 式和 3.28 式可得

$$\tan \theta_3 = \frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3} = \frac{\sin \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} + \cos \theta_2 p_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz}}{\cos \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_1 p_{wz}} \quad (3.30)$$

利用 atan2 函数可求得

$$\theta_3 = a \tan 2 \left(\frac{\sin \theta_2 \sin \theta_1 P_{wx} + \cos \theta_2 P_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 P_{wz}}{\cos \theta_1 P_{wx} - \sin \theta_1 P_{wz}} \right) \quad (3.31)$$

3.1.2 手爪部分逆向運動學

另一方面，在手腕旋轉與上下兩軸的逆運動學上，我們利用上述求出 c 點位置，與已知原點 a 點與 b 點行程三角形平面，並利用向量內積求出法向量 $\vec{n} = \vec{r}_1 \times \vec{v}_1$ 。由於我們設定手臂由目標物正向去抓取，所以我們希望 θ_5 (3.32) 能轉到使手臂虎口與 Z 軸平行， θ_6 (3.33) 則是能與目標物姿態平行。故當我們求出與地面法向量 ($\vec{Z} = (0, 0, 1)$) 的夾角，即可得到手腕旋轉軸 θ_5 。 θ_6 則需經由 2.4.1 節所得目標物與 XY 平面的夾角 ϕ 手肘到手腕間的向量 \vec{v}_1 來決定。

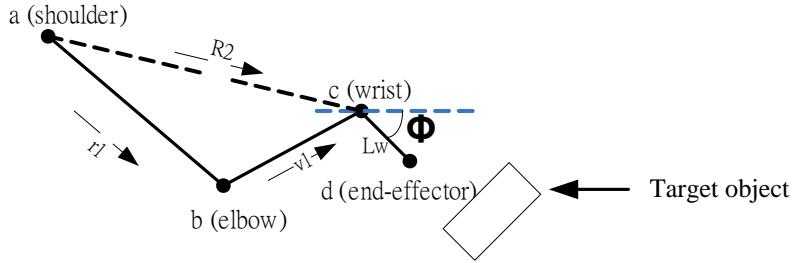


圖 3.10 機械手臂 θ_6 的姿態示意圖

$$\theta_5 = \left| \sin^{-1} \frac{\vec{n} \cdot \vec{Z}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{Z}|} \right| \quad (3.32)$$

$$\theta_6 = \left| \sin^{-1} \frac{\vec{V}_1 \cdot \vec{Z}}{|\vec{V}_1| \cdot |\vec{Z}|} \right| - \phi \quad (3.33)$$

3.2 影像定位與位置估測

本論文中所使用的實驗平台是由深度攝影機、機器人頭部與機械手臂組合起來，為了整合機器人的各個部份需要知道每一個座標系間的轉換關係，以利於整體的控制設計。當我們得知機器人各部位的座標轉換關係之後，就能針對控制的需求，將命令轉換到適當的座標系，例如；當影像偵測到目標物後，我們就必須將攝影機的座標轉換至機械手臂的座標系，給出適當的命令，將機械手臂引導到達目標位置。

3.2.1 座標轉換推導

我們將機器人座標系的原點定於機器人胸口部位如圖 3.11 所示，在雙肩關節連線與位於身體中央的 Z 軸交叉，我們必須推導出轉換矩陣，使獲得環境資訊的深度攝影機座標系，與手臂座標系轉換到機器人的座標系。

在頭部座標系部分，由於機器人頭部具有兩個自由度，前後旋轉 α 跟左右旋轉 β ，機器人頭部擺設較高的關係，在尋找物體方面，機器人必須旋轉一個角度 α 以俯視來找尋物體，如圖 3.12 所示。(3.34)式中式攝影機座標系到機器人頭部座標系的座標轉換，其中，因為攝影機所獲得深度的資訊是由攝影機鏡頭的平面算起，所以必須將平面到旋轉軸的長度 37mm 算進去，此外，89mm 為攝影機到

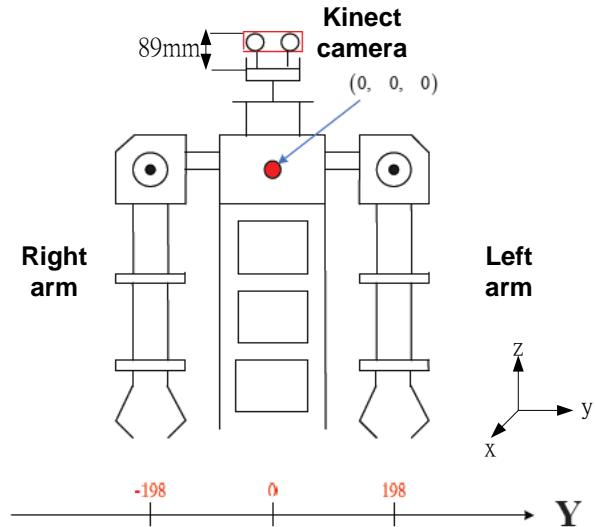


圖 3.11 機械手臂轉換至原點的關係圖

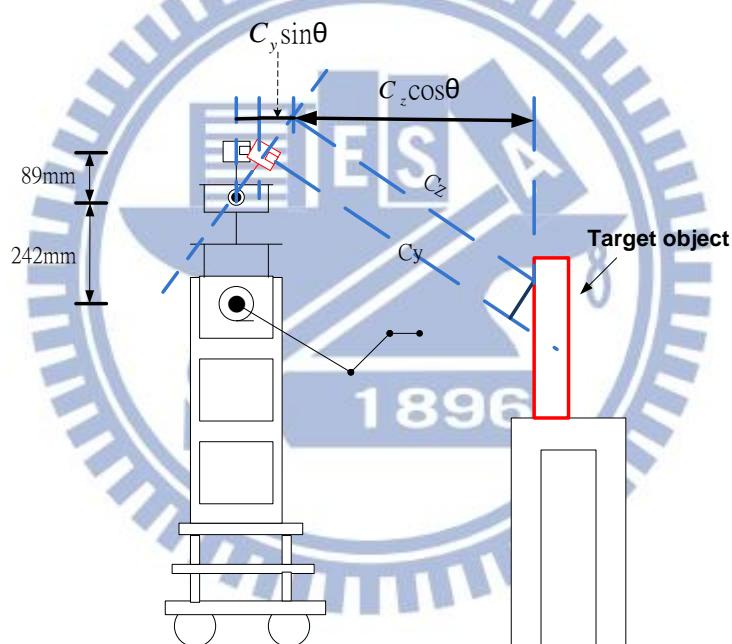


圖 3.12 機器人前後旋轉座標轉換關係圖

頭部軸心的距離，可由圖中獲得相對應關係。

camera → *head* :

$$\begin{bmatrix} head_x \\ head_y \\ head_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \\ 0 & -\cos \alpha & -\sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z + 37 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 89 \cos \alpha \\ 89 \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

而(3.35)式是機器人頭部到機器人原點的座標轉換，如此一來，即可將深度攝影機所得障礙物與目標物等環境資訊，轉換成機器人座標系。

head → robot:

$$\begin{bmatrix} robot_x \\ robot_y \\ robot_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} head_x \\ head_y \\ head_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 242 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

此外，當目標物或手臂不在正前方使攝影機無法偵測到時，機器人可以旋轉另一個自由度 β ，使攝影機能夠看到手臂周圍環境或找到目標物，如圖 3.13。當機器人出現旋轉的情況，根據當時攝影機旋轉的角度與量測出來的位置，我們可以由(3.35)將攝影機的座標系轉成機器人頭部座標系，在將頭部左右旋轉考慮進去，經由轉換成目標物與機器人間的相對關係。

由(3.36)可得機器人與目標物在 X 方向的距離，也就是目標物距離機器人正前方的距離(如圖 3.13 中的 d_1)，而(3.37)可以得到目標物距離機器人正前方的左右距離(如圖 3.13 中的 d_2)，我們可以根據所量測距離，使機器人進行抓取的動作。

$$X = C_z \cos \beta - C_y \sin \beta \quad (3.36)$$

$$Y = C_z \sin \beta + C_y \cos \beta \quad (3.37)$$

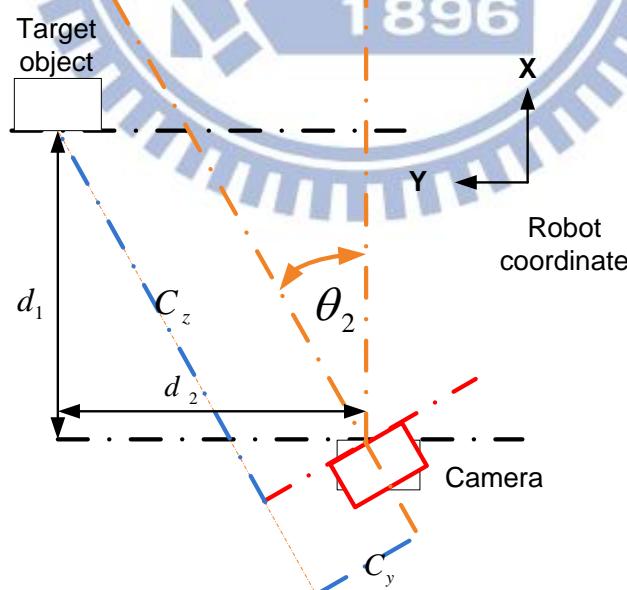


圖 3.13 機器人頭部左右旋轉座標轉換關係圖

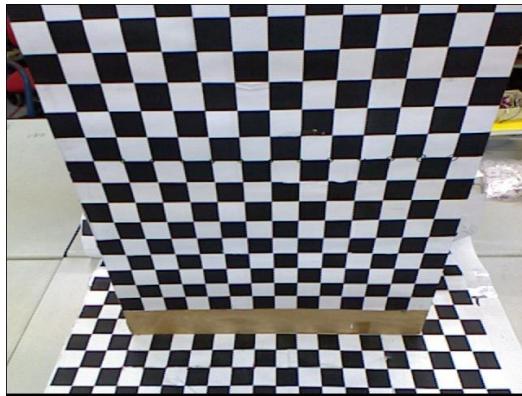


圖 3.14 校正板距離機器人 670mm 時攝影機取得影像

3.2.2 座標校正

為了校正我們推導的旋轉矩陣，我們使用每格 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$ 的校正板，如圖 3.14 所示。將深度攝影機固定於機器人上，校正板每次往後退 45mm 的距離，針對校正板上黑白相間的交點做記錄，直到板子離開手臂的工作範圍外，此校正的目的在於找出影像的誤差公式，減小機器人所觀測到物體位置與實際位置的誤差，並有利於在接下來做為手臂與攝影機之間校正的基礎。

我們利用攝影機轉換後所得在世界座標系的座標與與實際座標求出兩者之間的關係曲線，其中實際座標是利用每格為 45×45 的校正板量出與校正板與機器人之間的距離。我們採用一次方程式來做為此漸進曲線，在將各點帶入此方程式求得校正後的座標，在於實際座標比較後，所得 X 、 Y 、 Z 在各個位置上的誤差值。 X 、 Y 、 Z 三個方向的校正方程式分別為(3.38)、(3.39)、(3.40)，其中 x 、 y 、 z 是由 Kinect 取得的座標，而 X_c 、 Y_c 、 Z_c 則是校正後的座標。

$$X_c(x) = 0.9458x + 30.372 \quad (3.38)$$

$$Y_c(y) = 0.9834y + 1.3503 \quad (3.39)$$

$$Z_c(z) = 1.0192z - 2.3659 \quad (3.40)$$

校正實驗中我們 X 、 Y 、 Z 方向取 734 個點。 X 誤差方面，我們測量由距離機器人 470mm 到 670mm ，經由校正之後，如圖我們可以將平均誤差控制於 2mm 之內，由圖我們可以看出， X 方向的誤差不會隨距離的遠近產生較大的誤差。

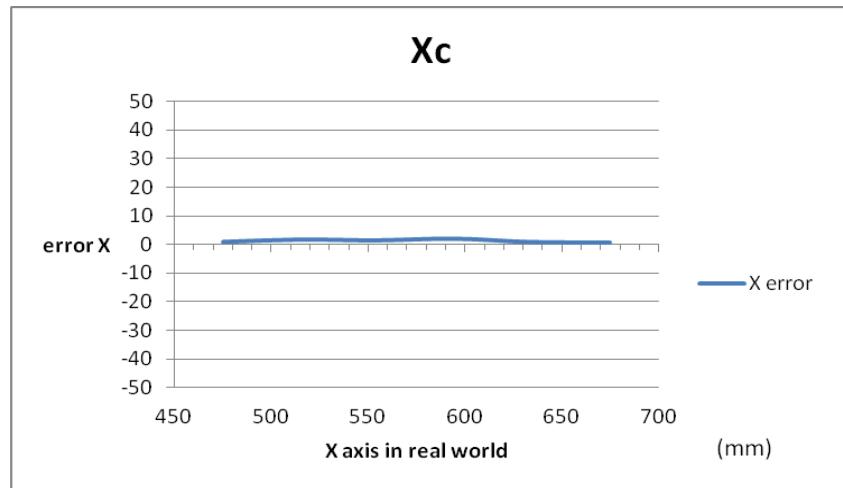


圖 3.15 校正後影像取得與實際 X 座標的誤差

在 Y 方向誤差方面，如圖可以看出，經過以上求出來的誤差方程式，可以修正 Y 座標的誤差達到 5mm 以內，其中，左右兩邊平均誤差約為 2mm，中間誤差約在 1mm 左右。

Z 為轉換後機器人上下的方向，我們可以由圖中看出，當座標越往下，由於攝影機傾斜角度較大的關係，造成誤差較大，而越往上誤差則越小，但整體平均誤差仍可控制於 2mm 左右。

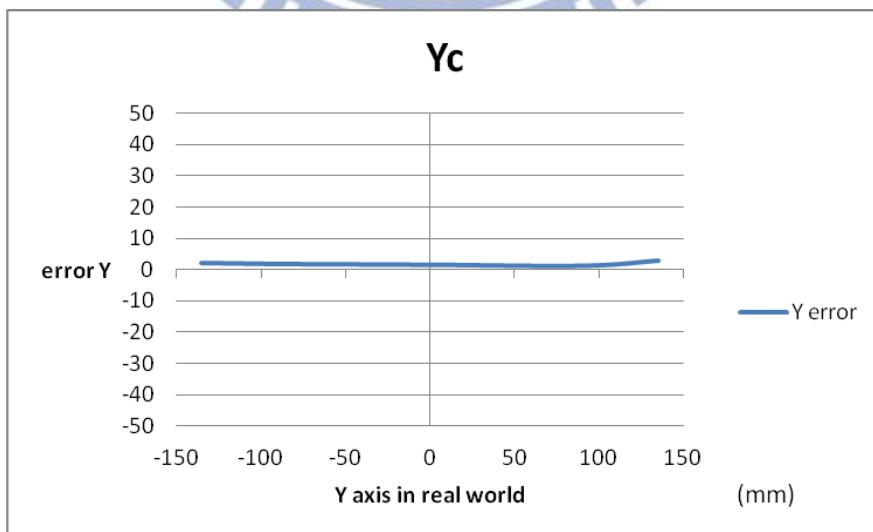


圖 3.16 校正後影像取得與實際 Y 座標的誤差

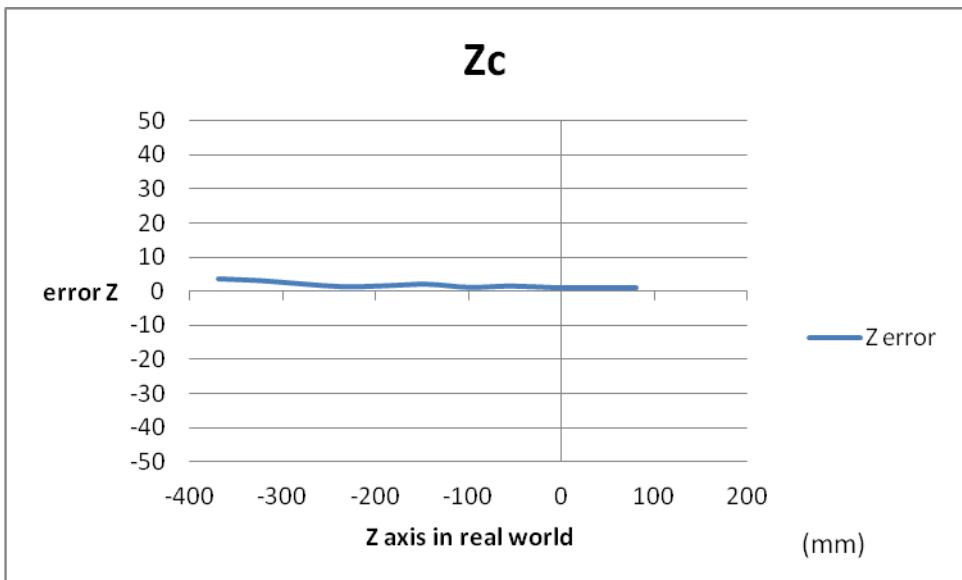


圖 3.17 校正後影像取得與實際 Z 座標的誤差

3.2.3 手臂與影像轉換矩陣校正

在手臂抓取的過程中，機器人必須先由影像獲得目標點位置，再根據攝影機所給的環境資訊進行路徑規劃。雖然可以直接由 3.2.1 所提及的公式由攝影機所得座標轉換到機器人上，但將攝影機所獲得座標，與實際機械手臂所到達的實際位置仍然有些許的誤差，也就是說，當攝影機定位經過校正後得到一個準確的座標，將這座標下命令給機械手臂，透過手臂逆運動學轉換，使機械手臂移動至此座標，此時機械手臂可能因為機械結構上的誤差或攝影機安裝無法準確與平台密合，不一定會準確的到達攝影機所定位的目標點，所以，我們希望透過校正的動作，使機械手臂能移動至攝影機所觀察到的目標點。

我們所設計的實驗是利用機械手臂抓取一個校正球，手臂每次會向前(X 方向)或向左(Y 方向)移動 30mm，針對校正球上的同一個點做記錄，把在影像中所看到的點記錄下來，直到移動手臂超出其工作範圍。移動的各點表示攝影機看到目標物的位置，影像所記錄下來的各點表示機械手臂所移動到的位置，把過程中記錄下來的座標點，於實際值進行比較，找出其關係方程式。

(3.41)、(3.42)、(3.43)為我們所求得的校正公式，當攝影機取得位置資訊 x 、

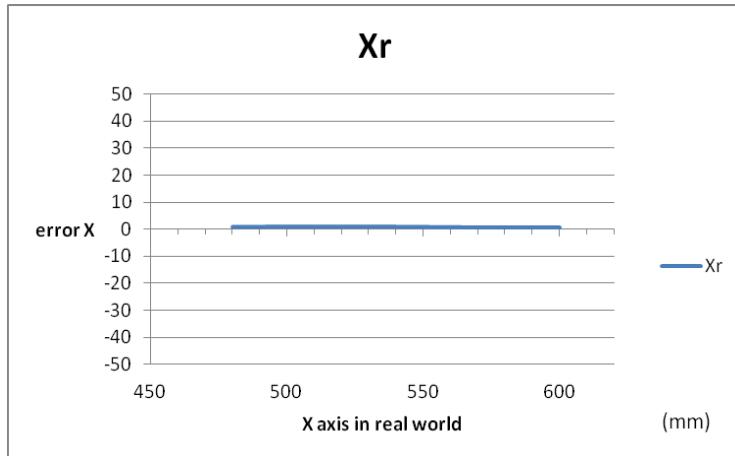


圖 3.18 X 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差

y、z 後，為了使機械手臂能順利到達此目標點，我們將轉換成機械手臂的位置 X_r 、 Y_r 、 Z_r ，如此，機械手臂可以準確到達抓取的目標點。

$$X_r(x) = 1.0637x + 27.513 \quad (3.41)$$

$$Y_r(y) = 1.0515y + 2.0126 \quad (3.42)$$

$$Z_r(z) = 0.9922z - 0.2881 \quad (3.43)$$

圖 3.18 為影像取得目標物位置經校正後與手臂實際移動到座標的誤差， X_r 是與機器人前後的距離，我們讓機械手臂由距離機器人 480mm 移動到 600mm，所測得的結果，經過校正後，平均誤差在 1mm。

在 Y 方向部分，是往機器人左右的方向，我們讓機械手臂由 -120mm 移動至 120mm，所獲得結果，平均誤差 1.5mm。

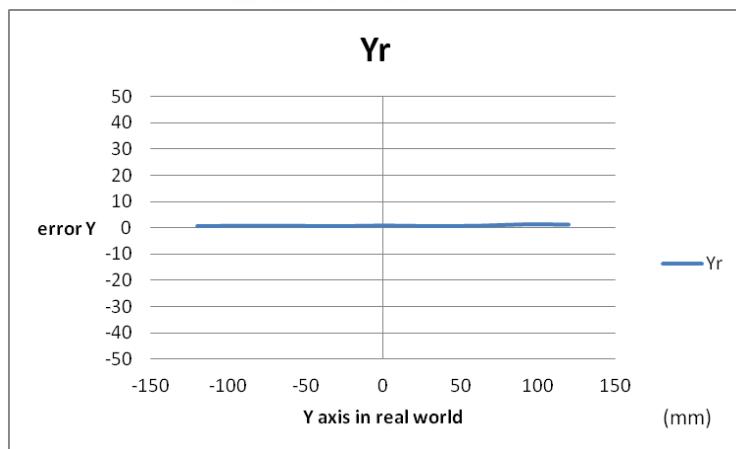


圖 3.19 Y 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差

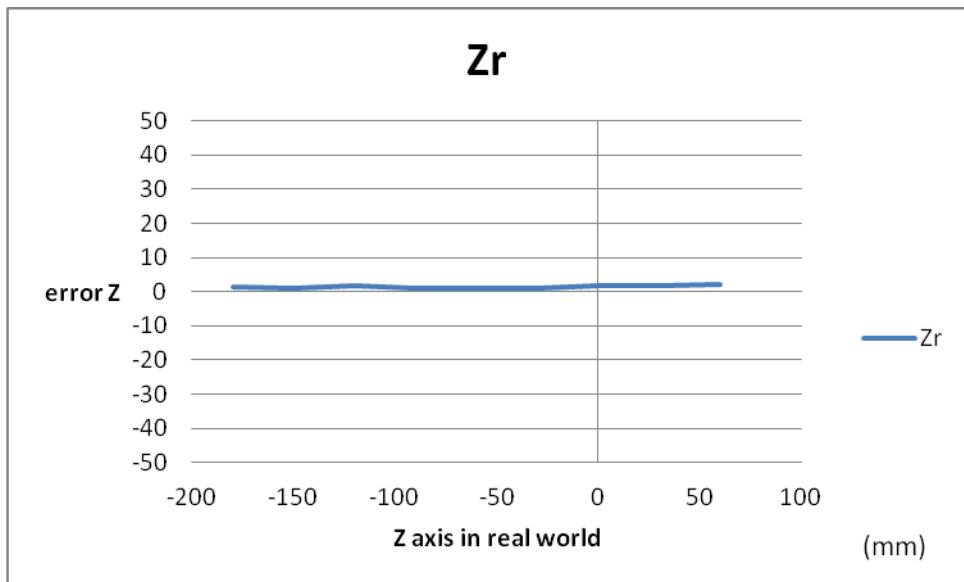


圖 3.20 Z 影像取得目標物位置校正後與手臂實際移動誤差

在 Z 方向部分，是往機器人上下的方向，我們讓機械手臂由-180mm 移動至 60mm，所獲得結果，平均誤差 1.2mm。

3.3 討論

為了使機械手臂能被引導到影像所偵測到的目標位置，我們希望在各個座標轉換的過程中，修正兩個不同座標系轉換所造成的誤差，所以，本論文提出了一個手眼協調的校正方法。首先取得影像校正的結果，以此為基礎，在透過手部的移動，記錄下手臂移動到達的位置，與影像所記錄的位置，找出其誤差值，此誤差值表示其兩個不同座標系，經由不同的轉換所造成的誤差，將其誤差修正回來，使手臂移動位置能與影像偵測位置一致。

第四章 即時閃避障礙物設計與控制

當機械手臂於一般的人類活動的環境中操作時，環境中之物品會變動位置與方向(例如；物體會因人為的移動，擺設的位置產生改變)或是手臂在執行抓取任務時，有突如其來的物體出現於手臂的工作範圍內，與傳統工業用機械手臂只針對欲抓取之目標物設定程式，執行抓取的任務的情況不同，對於在居家環境中執行任務的機器人來說，機械手臂有可能因而產生碰撞。此時基於安全性的考量，我們希望機械手臂避免任何的碰撞，並能經由變換的路徑順利執行抓取任務，因此我們對此設計一即時避障的方法，並進行抓取物品，讓機器人能像人類一樣，可以自主偵測本身活動的環境，避開碰撞，以提高機械手臂在一般人類活動環境中的安全性。圖 4.1 為擬人手臂控制架構圖，我們所使用的方法是，安裝深度感測器(Kinect)於機器人頭部，並將所得環境資訊轉換成各種參考點記錄下來，當攝影機偵測到目標物開始執行抓取任務時，機械手臂使用 Potential field 來規劃路徑，將目標物以外的物體視為障礙物，使手臂能安全執行任務。不同於傳統的 Potential field 對於引力與斥力的大小只根據距離物體的遠近，並只針對手臂周圍的障礙物進行規劃，本論文所提出 Potential field 會根據物體面積的大小，與在機械手臂空間中分佈的情況來決定出 Potential field 引力與斥力的大小和方向，其設計的目的使機械臂能依據整體的環境進行規劃，使手臂能直接經由環境空曠的區域到達目標點。

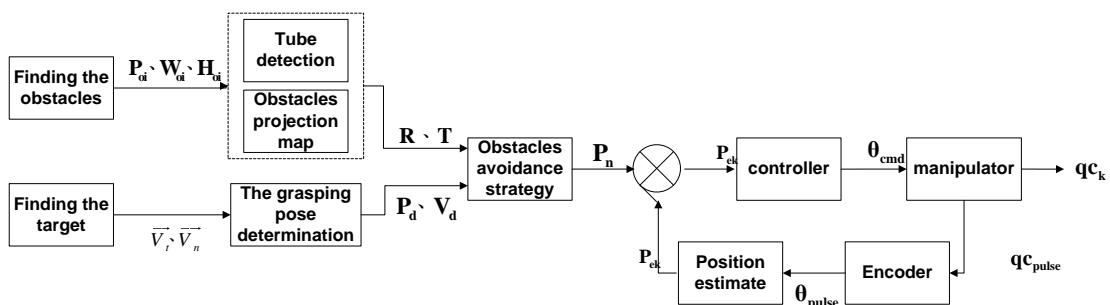


圖 4.1 手臂控制架構圖

4.1 機械手臂安全抓取控制架構

圖 4.2 為本論文提出之機械手臂安全抓取控制流程，當深度攝影機偵測到有障礙物於手臂工作範圍內時，機器人會先判斷障礙物在環境中分佈的情況，並根據判斷的結果將環境分成數種不同的區域，使機械手臂可以往障礙物較少、較安全的空間移動。此外，我們假設機器手臂在沒有障礙物的狀態下，會以直線方式移動至目標物的位置，所以，我們會針對直線的路徑進行規劃，當障礙物出現於環境中，我們會判斷障礙物與此直線路徑的相對關係，並建立出不同權重值，來調整 Potential field 的大小。在藉由 Potential field 算出環境對於機械手臂的引力和斥力，最後由機械手臂讀回編碼器訊號在經由數值轉換成每軸角度，然後再經由順向運動學得到現在的位置資訊，算出此刻須給各軸多少位置命令。

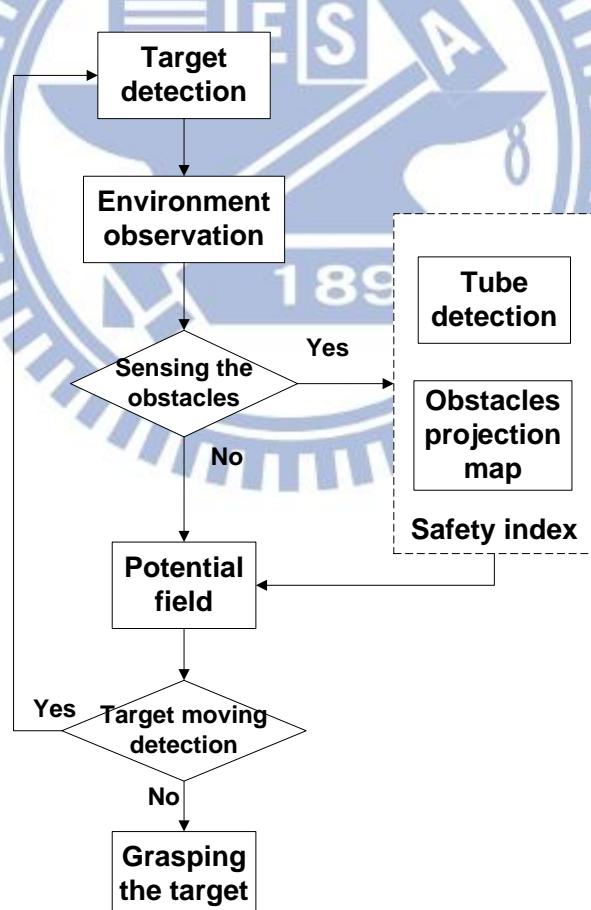


圖 4.2 機械手臂安全行為策略流程圖

4.2 Potential field 工作原理

Potential field 應用於機器人路徑規劃的主要概念是將環境模擬成一個磁力場，假設將機械手臂磁極設定為負極，環境中的障礙物磁極則會被視為與機器人相同的負極，兩者之間會產生排斥的力量，而目標物的磁極會被設定為相反的正極，讓機械手臂能藉此吸力到達目標點。磁場的大小會因與障礙物與目標物距離的不同，產生一個梯度的磁場，而障礙物會是磁場梯度最高的點，而目標物則是環境中磁場梯度最低的一點，此時，機械手臂就會受到障礙物的排斥並順應到達目標點。

圖 4.3 為 Potential field 的一個範例，在圖 4.3(a)有三個直立的障礙物與一目標點，而圖 4.3(b)為環境中所建立的磁場，可以由圖中看出，此時障礙物所產生的磁場梯度為最高，而目標物則是最低點，機械手臂會順應所建立的磁場，到達梯度最低的目標點。

然而 Potential field 主要的問題在於當機械手臂移動至梯度相對較小值(local minima)[23]時，這會使機器人或機械手臂在到達目標點前就停滯不動或原地擺動，此問題的起源來自於 Potential field 的規劃路徑都是區域規劃，並非全域規劃，所以會造成，機械手臂進入磁力平衡的區域時，會使得機械手臂離開此區域到達目

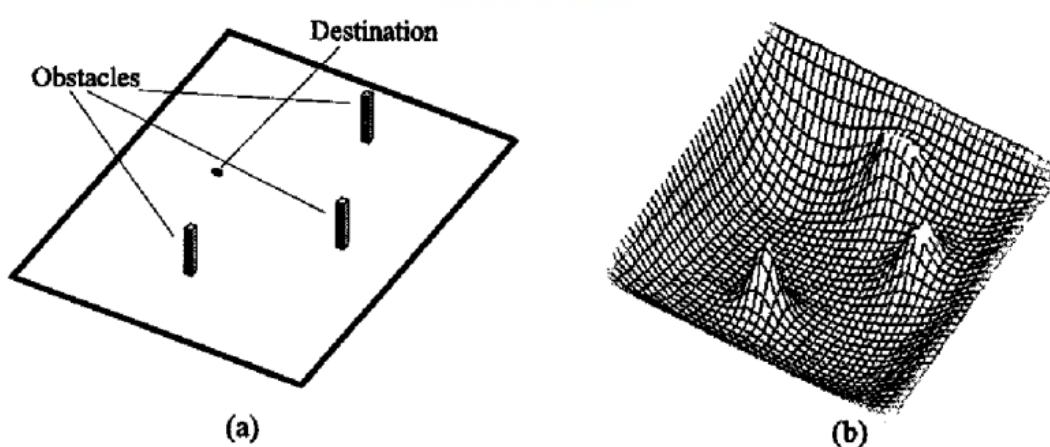


圖 4.3(a)障礙物與目標點的示意圖(b)Potential field 所產生的梯度示意圖[26]

標點，為了解決 local minima 的問題，本論文提出一個方法，先將空間的各個區域分類，每一個區域都有屬於該區域的權重，權重的越大表示該區域越安全，所產生至此方向的斥力越大，利用分析全域的方法，來解決 local minima 的問題。

4.3 安全指標的設計

由於傳統的 Potential field 在路徑規著作法中，當環境確定後，障礙物與目標物的磁場會立即確定，環境中的各個位置不會因為機械手臂的移動而產生改變，換句話說，當目標物與障礙物確認後，手臂的斥力與引力會根據移動到區域內周圍磁場而定，機械手臂的移動路徑也隨之確定。如前所述此種區域規劃可能會產生 local minima 等問題，為了解決此問題，我們希望能針對影像中所能看到的環境，進行全域規劃，本論文建立了兩個安全指標，此安全指標用於 Potential field 中斥力的部分，使 X、Y、Z 三個方向產生不同大小的斥力，來調整手臂路徑。這些指數是根據環境的狀況與障礙物在空間中的分布，將環境劃分成數個區域，並將各個區域都定義出他們安全程度，使機械手臂可以根據這些區域所獲得的安全值來進行規劃。傳統上 Potential field 只針對手臂與障礙物之間關係產生斥力，而我們建立安全指標表示障礙物在空間分佈情況，進行手臂全域的路徑規劃，能避免因為區域規劃所產生 local minima 的問題。

我們想在機械手臂的工作區域與攝影機所能觀察到範圍內，將環境劃分成安全、不確定與危險三種區域，使機械手臂能經由安全的區域到達目標點。首先，我們將目標點設為原點，建立 XY、YZ 和 XZ 平面，分別由機械手臂工作範圍最上緣、最右邊緣與最靠近身體的邊界將障礙物投影至三個平面。其次，分析障礙物在此三個平面上分佈的位置，如圖 4.4(b)，我們先找出各障礙物投影後的邊界，由上至下記錄邊緣的各數，將所遇到奇數條的邊界記錄為正緣，偶數條邊緣記錄為負緣，記錄下每個障礙物所對應的一組正緣與負緣，相同的，由左至右，記錄下障礙物左右的正緣與負緣，最後找出其交集的地方為危險的區域，而在這些區域外的為安全的區域，如此，將各個區塊分成白色斜線區域為安全、深色為

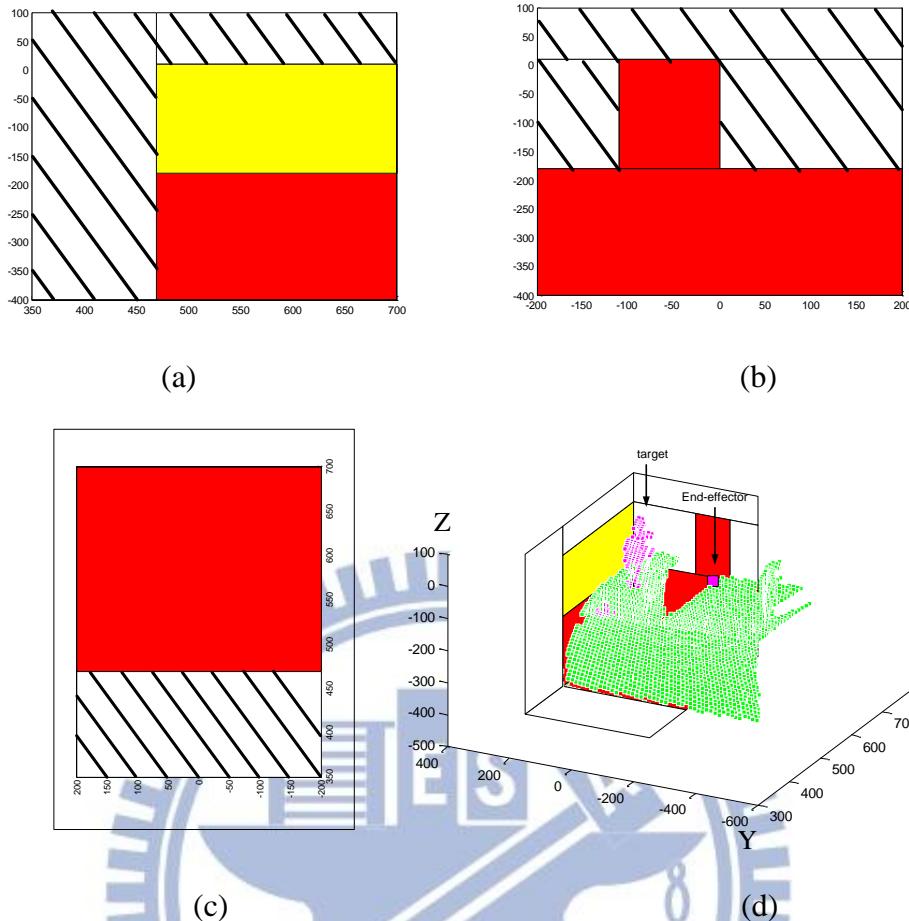


圖 4.4 (a) 投影到 XY 平面的示意圖 (b) 投影到 YZ 平面的示意圖 (c) 投影到 XZ 平面的示意圖 (d) 分析障礙物投影至三平面的示意圖

不確定以及危險等區域。就安全的區塊而言，將比較障礙物到手臂工作範圍邊界之間安全區域的大小，利用區域大小定義出各個區塊各別的安全指數，安全指數會與空間中體積大小成正比，以手臂為基準的 $+X$ 、 $-X$ 、 $+Y$ 、 $-Y$ 、 $+Z$ 、 $-Z$ 六個方向的安全區域的大小做比較，我們將此安全指數應用於我們所建立的 Potential field 上(詳見下節說明)，判斷 Potential field 所產生之斥力方向朝向與此六個方向的安全指數相乘，(4.1)式中 P_a 為手部的位置， P_o 為障礙物的位置， P_r 為區域的位置，當判斷式大於零表示斥力方向朝向安全區域，安全指數較大，相反的，斥力指向危險區域時，則會產生較小的斥力，如此一來，可以將手臂引導至較安全區域，避免碰撞的發生。另外，除了偵測到危險的區域，還有一些區域是深度攝

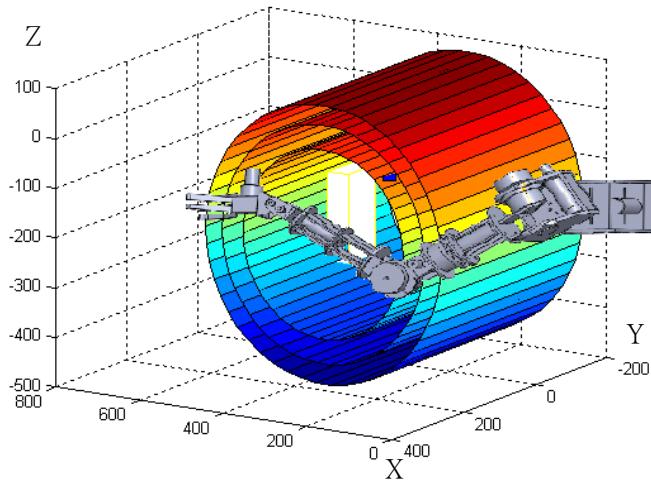


圖 4.5 同心圓柱來判斷障礙物影響程度示意圖

影機無法偵測到(例如；被障礙物或目標物擋住)或超出攝影機範圍的區域，將這些區域我們將視為不確定區域。對於不確定區域，我們將不會放大或減小指向此區域的斥力。

$$R = \begin{cases} \sum_n \frac{\mu A_{reg}}{d_{reg}} & (P_r - P_a)(P_a - P_o) > 0 \\ 1 & (P_r - P_a)(P_a - P_o) \leq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

另外，為了使機器人能夠達到即時更新資訊並做出反應以達到安全的功能，我們希望能減少機器人的運算量，並能針對障礙物在不同的位置，會產生不同大小的權重值來調整 Potential field 的斥力。我們假設當機械手臂與目標物之間沒有障礙物存在時，機器手臂會以直線方式前往目標點，所以我們以此直線為基礎，根據與直線路徑的距離來定義此權重值的大小。然而，除了判斷機械手臂末端的移動外，我們仍須考慮其整體手臂是否會有碰撞產生，所以，我們希望將一個直線的路徑擴張至一個圓柱體，如此可以覆蓋整隻機械手臂移動的範圍，若障礙物出現於此圓柱體內時，影響手臂移動的程度為最大，當距離此圓柱體越遠時，影響的程度會越小，其中 R_l (mm)為我們所定義最外層圓柱的半徑， r_i (mm)則為目前障礙物所在的那層圓柱半徑， l (mm)是圓柱的高， ρ 是一個常數。

$$T(r) = \rho l (R_l^2 - r_i^2) \pi \quad (4.2)$$

如圖 4.5，我們以機械手臂下手臂的長度為圓柱的直徑，在手臂與目標物間建立一個同心圓柱，藉由判斷同心圓柱與障礙物的交集來計算各個障礙物的權重，與最內側同心圓柱有交集的，表示此障礙物對於手臂移動至目標物的過程中影響最大，且會發生碰撞，而沒有與這些同心圓柱接觸到的障礙物，表示在手臂執行任務時，不會影響手臂的移動。

4.4 Potential field

在建立 Potential field 之前，我們首先觀察當人類手臂要避開障礙物去抓取物體時，會經由距離手臂較短的路徑，或往較空曠的空間去移動，所以，為了使機械手臂能仿照人類的行為去執行安全抓取任務，我們可以由此原則來定義 Potential field。而要建立 Potential field 首先要建立出斥力(Repulsive force)與引力(Attractive force)，希望藉由斥力與引力將機械手臂引導至較靠近手臂和空曠的地方。我們將引力與斥力分解成三個方向來看，分別為機器人前後方向(X 方向)、左右方向(Y 方向)和上下方向(Z 方向)，如此一來，我們可以分別分析三個方向與路徑選擇之間的關係，調整引力與斥力在這方向的影響，來符合上述的原則。

4.4.1 Attractive force

在 Potential field 引力的部分，當機械手臂距離較遠時候，可能會因為遇到較大障礙物的阻擋，使得引力小於斥力，造成無法收斂至目標物，所以，我們設計一個函數 $f_a(A, d_t)$ 如 4.3 式，其中的 A 為是個變數，根據障礙物的大小和 4.3 節所提及的安全指數，來定義出 A 的大小，藉此可以使機械手臂能夠避開各種不同大小的障礙物。此外，當機械手臂距離目標物較遠的時候，能較快接近目標物，而當手臂接近目標物時，如果引力太大，反而會在目標物周圍震盪，無法收斂於目標點前面，所以，我們利用機械手臂與目標物的距離 d_t ，將引力設計成指數函數的型式，距離越遠引力越大，距離越近引力越小， γ_0 為常數。(4.4)是目標物對於機械臂的引力，而式子中 \vec{V}_{tar} 表示機械手臂手爪到目標物的向量， \vec{f}_{tar} 則

是目標物所產生的引力向量。

$$f_a(A, d_t) = A - A e^{(-d_t/\gamma_0)} \quad (4.3)$$

$$\overrightarrow{f_{tar}} = \frac{f_a(A, d_t) \overrightarrow{V_{tar}}}{d_t} \quad (4.4)$$

4.4.2 repulsive force

在斥力的部分，首先，當機械手臂越靠近障礙物，表示機械手臂發生碰撞的機率提高，(4.5)式中，利用機械手臂與障礙物的距離 d_{obs} ，當距離越遠，斥力越小，距離越接近，斥力則會越大， λ 為一個常數。

$$f_{obs} = \lambda e^{(-d_{obs}/\gamma_0)} \quad (4.5)$$

其次，我們將斥力分成 X、Y 和 Z 方向來討論，其中在 X 方向，我們可以知道，當障礙物把前後的空間分成兩邊時，由於機械手臂在較靠近機器人身體的一側會有較大的活動空間，所以，我們在設計上利用(4.6)減弱遠離身體方向的斥力，如此一來，可以使手臂較符合人類的姿態進行避障的動作，並可以避免手臂有超出工作範圍的可能性，而公式中將機械手臂到障礙物的向量投影到 XY 平面 $\overrightarrow{V_{obs_xz}}$ ，找出與 -X 方向 $\overrightarrow{e_x}$ 的夾角，藉由角度變化來判斷機械手臂與障礙物之間在 X 方向的相對關係，使機械手臂能以一自然的姿態來避開障礙物。

$$\theta_{obs_x}(x, y) = \frac{\overrightarrow{V_{obs_xz}} \cdot \overrightarrow{e_x}}{|\overrightarrow{V_{obs_xz}}| |\overrightarrow{e_x}|} \quad (4.6)$$

我們將 X 方向的斥力表示成(4.7)，我們希望當機械手臂在障礙物之前時，能夠產生適當的斥力，使機械手臂能安全避開障礙物，所以當夾角在 -90 與 90 度之間，手臂會有一個正向的斥力，而其餘的角度，表示機械手臂在於障礙物的側面或後面，則產生較小的使手臂遠離身體斥力，避免手臂形成不自然的姿態或超過手臂的工作範圍。

$$f_{Rx} = \begin{cases} \frac{f_{obs} V_{obs_x}}{d_{obs}} & -90 < \theta_{obs_x} < 90 \\ \frac{f_{obs} V_{obs_x}}{\rho d_{obs}} & otherwise \end{cases} \quad (4.7)$$

同樣的在 Y 方向中，我們所使用為機器人左手，所以，機械手臂在機器人左邊的活動空間相對會比在右邊來的大，因此，我們在設計上我們利用(4.8)減弱了機械手臂被排斥到機器人右邊方向的斥力，如此一來，機械手臂的活動範圍將會被控制於手臂活動範圍較大的空間中，我們利用手臂與障礙物向量投影至 YZ 平面 \vec{V}_{obs_yz} ，找出與 y 方向 \vec{e}_y 的夾角，藉由角度變化來判斷機械手臂與障礙物之間在 y 方向的相對關係，當機械手臂在障礙物的左邊時，可以產生較大的移動，而在右邊時，機械手臂的動作相對的會比較小。

$$\theta_{obs_y} = \frac{\vec{V}_{obs_yz} \cdot \vec{e}_y}{|\vec{V}_{obs_yz}| |\vec{e}_y|} \quad (4.8)$$

當我們得到機械手臂與障礙物相對位置的關係後，我們可以針對所獲得的關係來定義 y 方向的斥力，我們將斥力表示成(4.9)，我們會針對手臂可活動的空間加以定義，當 θ_{obs_y} 在-90~90 度之間時，表示機械手臂在障礙物的左邊，手臂會有一個正向的斥力，而其餘的角度，可能會因為受到排斥，產生較不自然的姿態或超出機械手臂的工作範圍，所以，我們設計減小其斥力。

$$f_{Ry} = \begin{cases} \frac{f_{obs} V_{obs_y}}{d_{obs}} & -90 < \theta_{obs_y} < 90 \\ \frac{f_{obs} V_{obs_y}}{\rho d_{obs}} & otherwise \end{cases} \quad (4.9)$$

而對於 z 方向的斥力而言，由於機械手臂上下各有其活動的空間，所以，我們在設計上，只針對與障礙物的距離來定義 z 方向的斥力(4.10)。

$$f_{Rz} = \frac{f_{obs} V_{obs_z}}{d_{obs}} \quad (4.10)$$

當我們建立好基本 Potential field 的引力與斥力後，接著將 4.3 節之安全指數加入於斥力當中，使機械手臂能移動至安全的區域，並過濾掉對手臂執行任務過程中較無影響障礙物所產生的斥力。我們將使用 4.3 節所提出的安全指數，針對不同區域所產生的安全指數(R)，由於這些區域會依據不同斥力方向會有不同大小，所以，將安全指數定為成三個方向(R_x 、 R_y 、 R_z)，是根據安全區域的大小與距離遠近所定義，所以，我們將區域安全指數定義為(4.9)。同樣的我們將手臂與障礙物所產生的斥力向量投影至 4.3 所求得的三個平面上，並分成 X、Y 和 Z 三個方向，每一個方向都有兩個平面可以投影，投影到平面後，我們找到與此機械手臂最短距離(d_{reg})的安全區域，為了使機械手臂能選擇最短路徑來移動，所以，我們可以由公式中看出，距離機械手臂越近的區域安全指數會越高，另外，我們可以知道，當安全區域面積(A_{reg})越大，表示此區域可活動的空間越大，所以，利用面積的大小來決定各個區域安全指數的大小，最後，我們將各平面所求的安全指數相加，找出適合移動的區域。

$$R_x = \sum_n \frac{\mu A_{reg}}{d_{reg}} \quad R_y = \sum_n \frac{\mu A_{reg}}{d_{reg}} \quad R_z = \sum_n \frac{\mu A_{reg}}{d_{reg}} \quad (4.9)$$

另外，斥力的大小會根據障礙物對於機械手臂影響程度而有所改變，我們利用 4.3 節同心圓柱的概念，將機械手臂到目標物的路徑由內圓到外圓分成不同的等級，我們利用障礙物占據於第幾層圓柱來判定其障礙物影響的大小，同時也定義出障礙物所產生斥力的大小，(4.2)為我們所定義圓柱安全指數 T ，我們可以由公式中知道，若障礙物在最外層，表示距離機械手臂較遠，手臂的活動範圍也較廣，所以影響力相較會比較小，如果障礙物在內層，表示手臂活動當中，較容易會發生碰撞，所以安全只是會比較高。

最後，我們綜合上述的方法，我們最後得到障礙物所產生的斥力向量為(4.11)，利用此方法，可以將手臂往較為安全與活動空間較大的地方移動，確保機械手臂能安全執行任務。

$$\vec{f}_R = [R_x T(r) f_{Rx}, R_y T(r) f_{Ry}, R_z T(r) f_{Rz}] \quad (4.11)$$

圖 4.6 為障礙物與目標物對於手臂斥力與引力的關係，紅色為手臂目前的位置與受到 Potential field 影響移動到的下一個位置，其中藍色為障礙物所產生的合力，而綠色為目標物所產生的引力，兩者所形成的合力，會將手臂推至下一個位置。

4.5 系統架構

本論文採用視覺伺服的架構，藉由計算出空間中實際座標關係來對機器人做位置控制，對於機械手臂來說，深度攝影機(Kinect)所獲取的資訊是機器人控制器的控制命令來源。從第二章我們得知，如何去描述機器人所在環境與特徵點比對後所求出的姿態，當取得影像中各個物體的參考點後，在第三章中計算出 3D 座標，接著由第四章來決定機械手臂的移動，並控制手臂抓取目標物。整體的系統架構，如圖 4.7 所示，將輸入一個深度影像與彩色影像，利用深度影像切割出

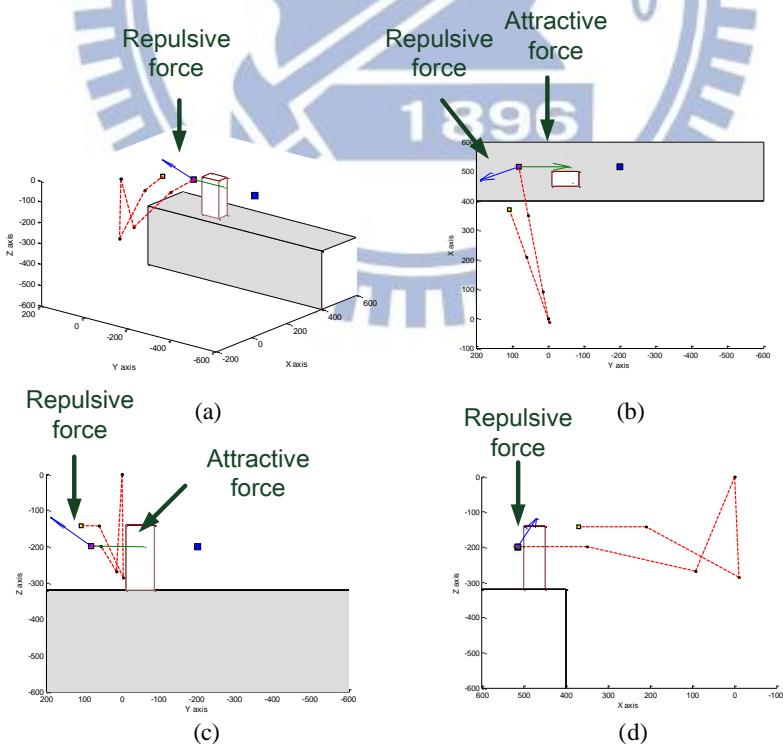


圖 4.6 (a)藍色為障礙物對於手臂的斥力綠色為目標物對於手臂的引力(b)XY 平面視角(c)YZ 平面視角(d)XZ 平面視角

影像中環境的各個區塊，在彩色影像中依序找出各個區塊的特徵點($\mathbf{p}_{\text{image_i}}$)，接著和資料庫特徵點($\mathbf{p}_{\text{image_d}}$)做比對，得到一組比對成功的特徵點，經由這組特徵點計算出轉換矩陣之後，即可框出目標物在影像平面中的位置，並將此區塊的中心做為目標物參考點(\mathbf{p}_d)，並計算出目標物目前的姿態(\mathbf{V}_d)，接著利用各區塊的位置與大小等資訊與目標物姿態，並利用同心圓柱的概念與尋找安全區域求出兩個安全指數 \mathbf{R} 與 \mathbf{T} ，最後，把計算出的安全指數帶入我們所建立的 Potential field，得到障礙物產生的斥力 $[f_{Rx} \ f_{Ry} \ f_{Rz}]$ 與目標物的引力 $[f_{tar_x} \ f_{tar_y} \ f_{tar_z}]$ ，在由斥力與引力所產生的合力的大小與方向做為機械手臂的控制命令，在控制迴路中，將手臂末端位置的誤差輸入轉換成修正誤差所需的命令 θ_{cmd} 。最後，機器人會判斷目標物是否有被移動，來進行尋找或抓取目標物，當抓取完成時，各軸的位置會與估測位置一致，誤差趨近於零，來達成任務。



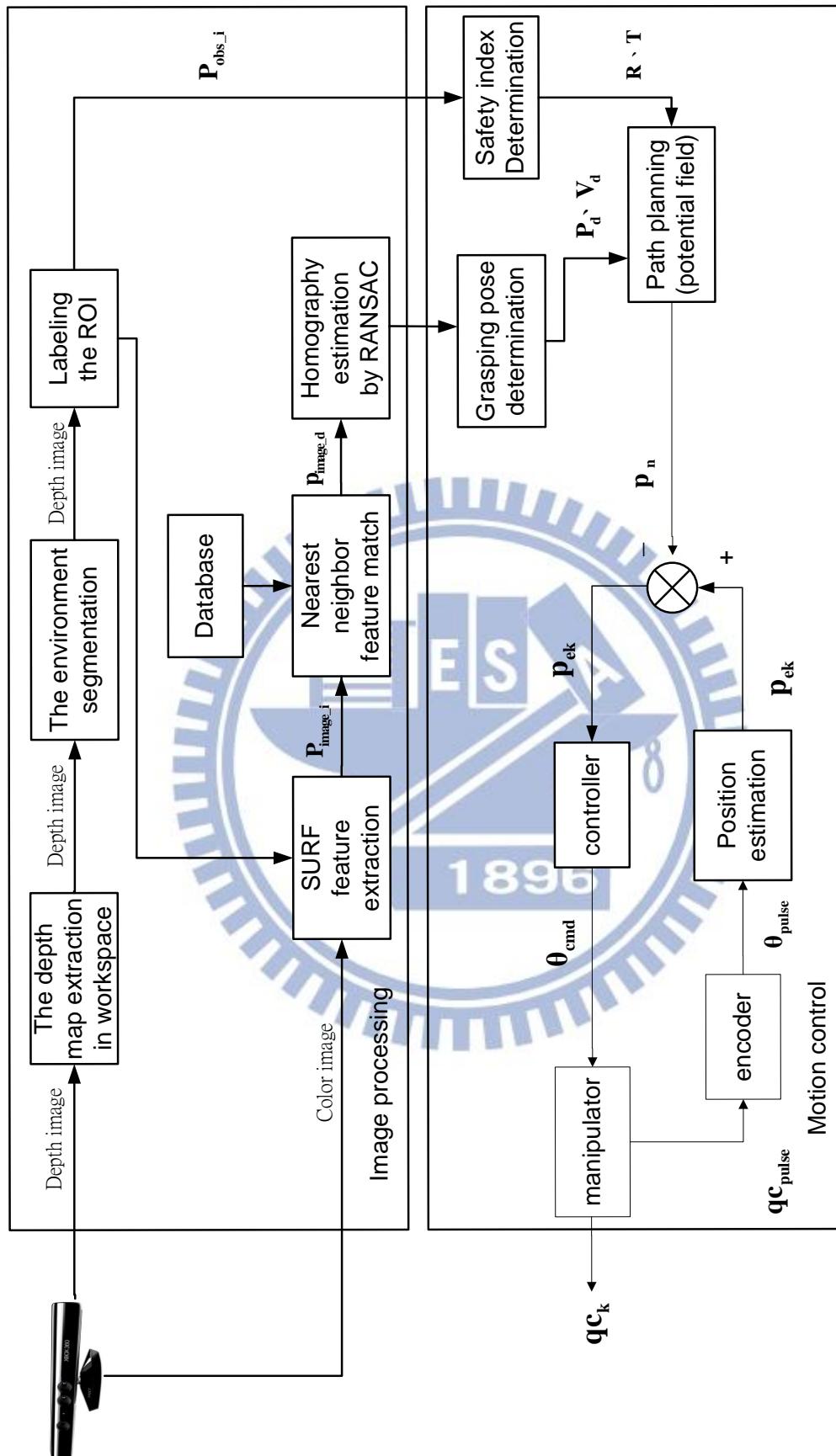


圖 4.7 控制系統架構圖

4.6 安全策略之討論

本論文提出了機械手臂的安全策略，使用 Potential field 進行路徑規劃，加入了兩個安全指數，分別為區域安全指數與同心圓安全指數。本論文提出的區域安全指數，是 Potential field 不只是藉由手臂與障礙物之間的關係，並加入了空間的概念來規劃其路徑，將手臂導引至安全的區域，使機械手臂可以做整體的規劃，並保障機械手臂能安全執行任務。另外，為了確保整隻手臂的安全，我們不只要考慮終端效應器(end-effector)一點，要把整隻手臂的移動考慮進去，因此，我們加入同心圓柱的安全指數，偵測到整隻手臂活動空間內的障礙物，並能排除對手臂運動沒有影響的障礙物，減少其建立斥力場的時間。透過本設計的實現，可以確保手臂在運動過程中的安全性考量。



第五章 實驗結果

本章節主要的目的在驗證第二章與第三章對於環境與目標物偵測的確可以使機械手臂辨識出目標物在空間位置，並能安全執行抓取任務。並對於第四章所提出能即時偵測障礙物進行閃避加以驗證。最後，經由移動目標物，及在環境中放置障礙物，以驗證重新規劃路徑的功能。

5.1 機械手臂之控制系統硬體架構

圖 5.1 為機器人之控制系統硬體架構圖，在本論文中的機械手臂的設計中，在機器人肩膀以下的身體部位除了用來支撑起手臂的高度外，主要的是用來放置 12 個直流伺服控制器，和 CAN-bus 介面的電路分接板以及 CAN-bus 介面控制器。工業電腦與電池則放置於機器人底盤上。Kinect 感測器則安裝置頭部平台上。

5.1.1 馬達控制系統之設計與實現

本論文機器人採用的是直流伺服馬達，具備定位的高精準度。在馬達的選用

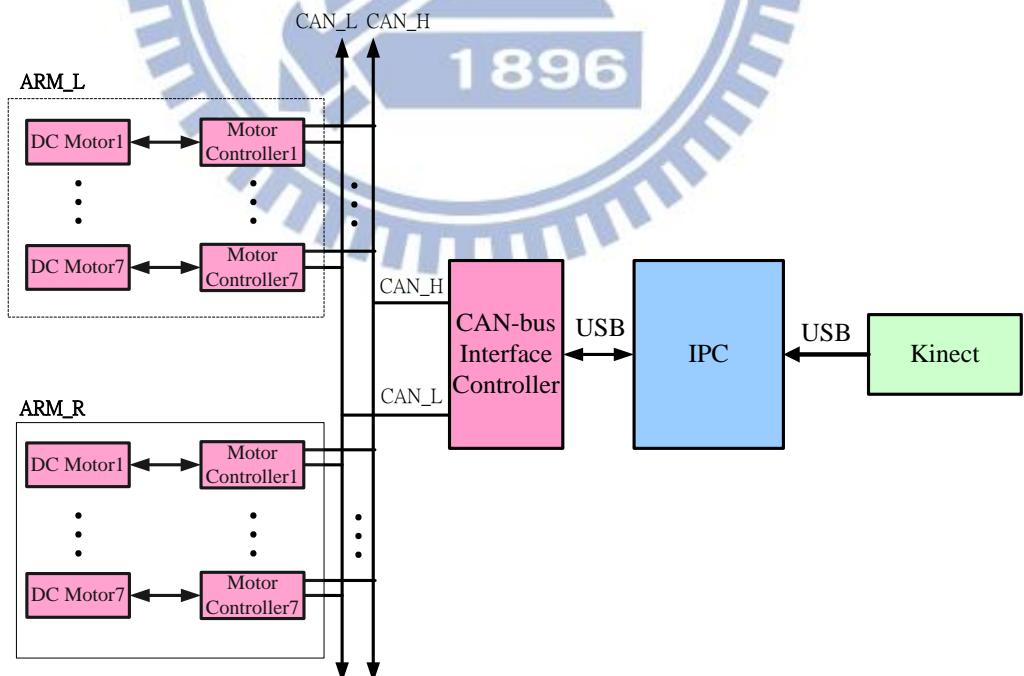


圖 5.1 控制系統硬體架構圖

方面，是採用 MAXON 公司所生產的直流伺服馬達，包含了直流馬達、減速機和編碼器三部分。目前的手臂設計則是將馬達區分成 4 種不同大小扭力的等級，分別為(肩部兩軸)RE-35(93.3mNm)、(肘部)RE-max29(26.9mNm)、(腕部兩軸)RE-max21(6.89mNm)和(夾爪)RE-max24(11.2mNm)。

在馬達控制器的部分，使用的是 MAXON 所生產的直流伺服馬達控制器 EPOS24/1 與 EPOS24/5，實體如圖 5.2 與圖 5.3，規格表如表 5.1，可藉由排線直接讀取編碼器數值並控制馬達進行位置控制、速度控制和電流控制等數種控制，在本論文中，我們所使用的控制方式為位置控制，其控制方式如同一閉迴路，在下達一位置命令後，控制器會不斷讀取編碼器讀值並加以控制馬達誤差修正以

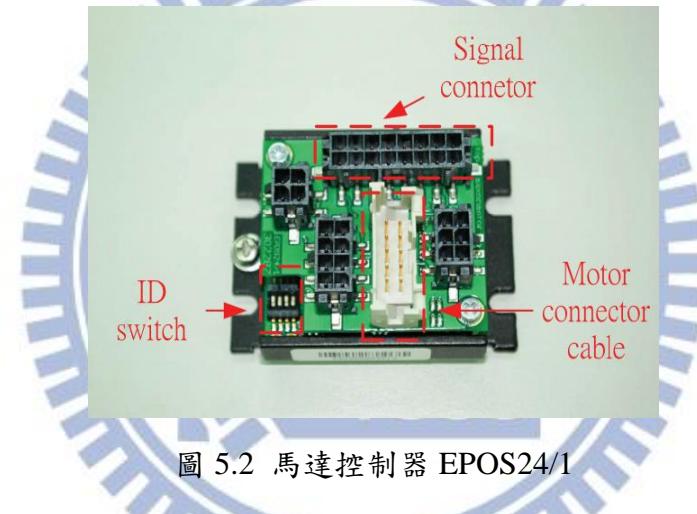


圖 5.2 馬達控制器 EPOS24/1

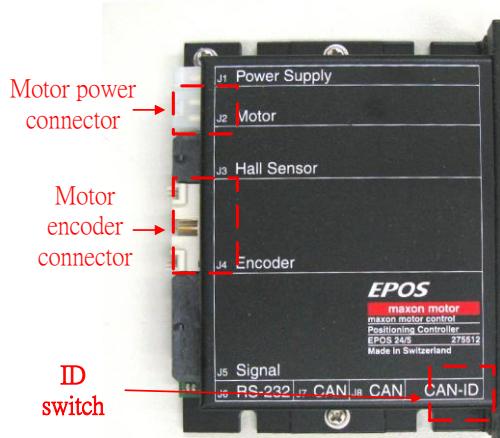


圖 5.3 馬達控制器 EPOS24/5

達成所設定之命令，而修正之方式為 PID 控制，我們可藉由調整 PID 各參數，使控制器的誤差修正效能有適當的表現。

而在分配控制器命令的方面，是由 CAN-bus 介面負責傳輸，CAN-bus 介面可以更輕意的連接多個節點與有著更高的傳輸速度。我們在此所選用 National Instrument(NI)所生產的 CAN-bus 介面控制器，實體如圖 5.4，可藉由 USB 傳輸介面與電腦相連接，並將電腦端所發出的命令藉由 CAN-High 與 CAN-Low 兩條訊號線傳輸到各個控制器結點，如圖 5.5 為將馬達電源與 CAN 匯流排連接至各個並聯控制器之電路分配板。

表5.1 馬達控制器規格表

	EPOS 24/1	EPOS 24/5
Supply voltage(Vcc)	9V~24V	11V~24V
Max output voltage	0.98*Vcc	0.9*Vcc
Max output current(<1s)	2A	10A
Continuous output current	1A	5A
Max speed	25000 rpm	25000 rpm



圖 5.4 NI CAN-bus

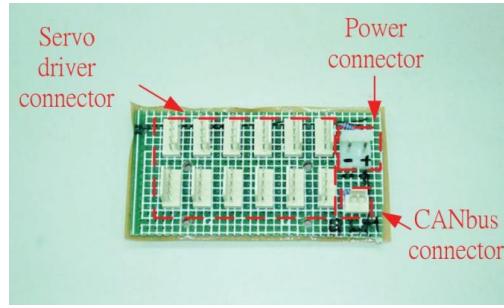


圖 5.5 並聯控制器之電路分接板

5.2 機械手臂自動偵測與抓取實驗

本實驗的目的主要是驗證由前述方式所設計能即時取得目標物在影像中的位置，以及包含座標轉換與校正後的位置是否正確。本實驗將使用機械手臂左臂，將手臂移動至(250,0,-600)處，等待影像開啟後執行任務，實驗環境方面，我們會擺設兩個不同的瓶子在桌面上，距離機器人約為 550mm 的位置上。圖為建立目標物資料庫之影像(如圖 5.6)。

本實驗的過程如圖 5.7 所示，當機械手臂達到預設的準備點(250,0,-600)後，透過攝影機擷取目前的影像，並將影像進行切割，依據所切割出的區域的大小依序取得特徵點與資料庫的影像進行比對，算出對應特徵點後，由 RANSAC 得到平面轉換矩陣，框出目標物於影像中的位置，藉由座標轉換求出目標物的位置。

圖 5.8 所顯示的是攝影機所觀察到目標物在影向平面的位置。



圖 5.6 (a)資料庫物件(b)特徵點擷取

5.3 機械手臂即時避障實驗

本實驗的目的在於驗證即時偵測障礙物並進行避障的功能，機械手臂在行進的過程中，若有障礙物出現於路徑當中，根據本論文之設計機械手臂會依據安全指標立即尋找出安全的區域，重新規劃路徑並在繼續往目標物前進。本實驗會使機械手臂進行點到點的移動，在機械手臂活動的範圍內，隨機放置障礙物，來驗證即時避障策略是否可以避開障礙物到達目標點，在此我們將會從起始點(500,-200,-200)到(550,500,-200)來回六次，並給定不同大小的障礙物放置於手臂路徑中。

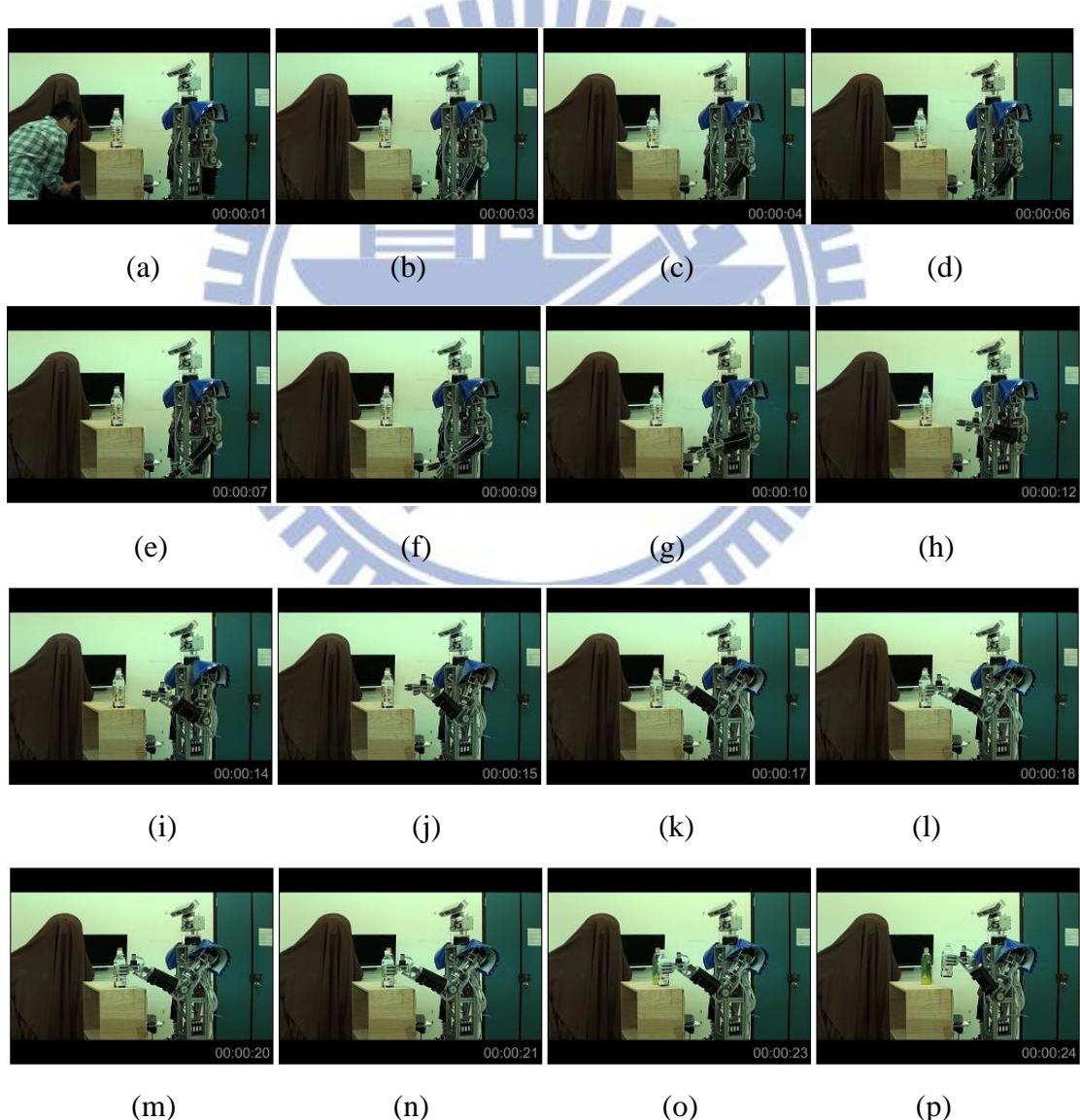


圖 5.7 機械手臂抓取的過程

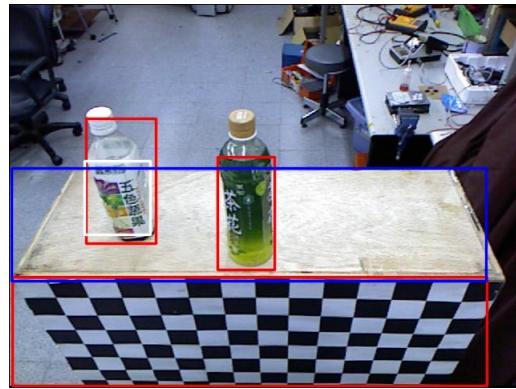


圖 5.8 攝影機擷取畫面及計算出目標物位置

本實驗情況如圖 5.9 所示，我們將實驗分成三種情況，首先圖當環境無障礙物時，機械手臂從(500,-200,-200) 到(550,500,-200)的原始軌跡，手臂由起始點到終點的軌跡，可以看出經本論文方法的實現，機械手臂可以避開障礙物順路到達目標點，圖 5.10 為手臂靠近障礙物時所產生的斥力示意圖，而圖 5.11 為不同障礙物所產生的軌跡。

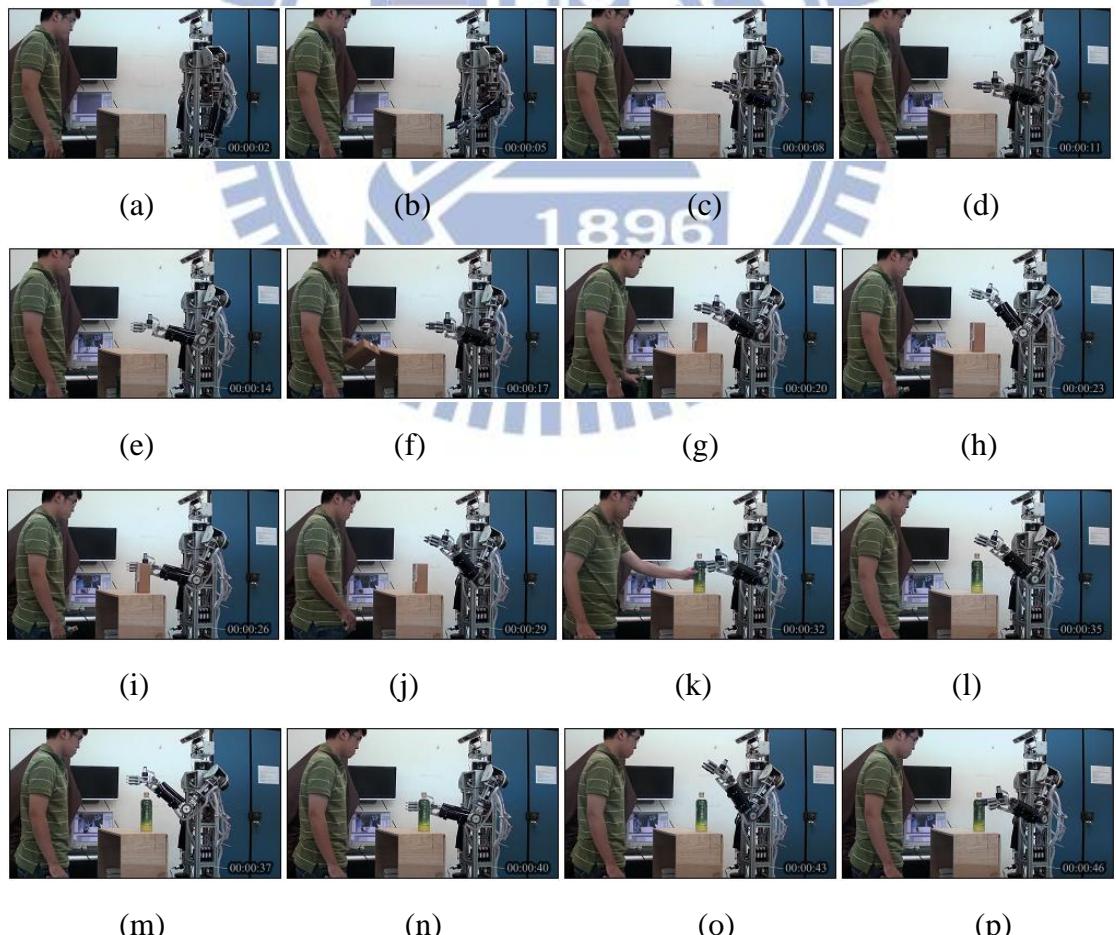


圖 5.9 機械手臂遇障礙物即時避障過程

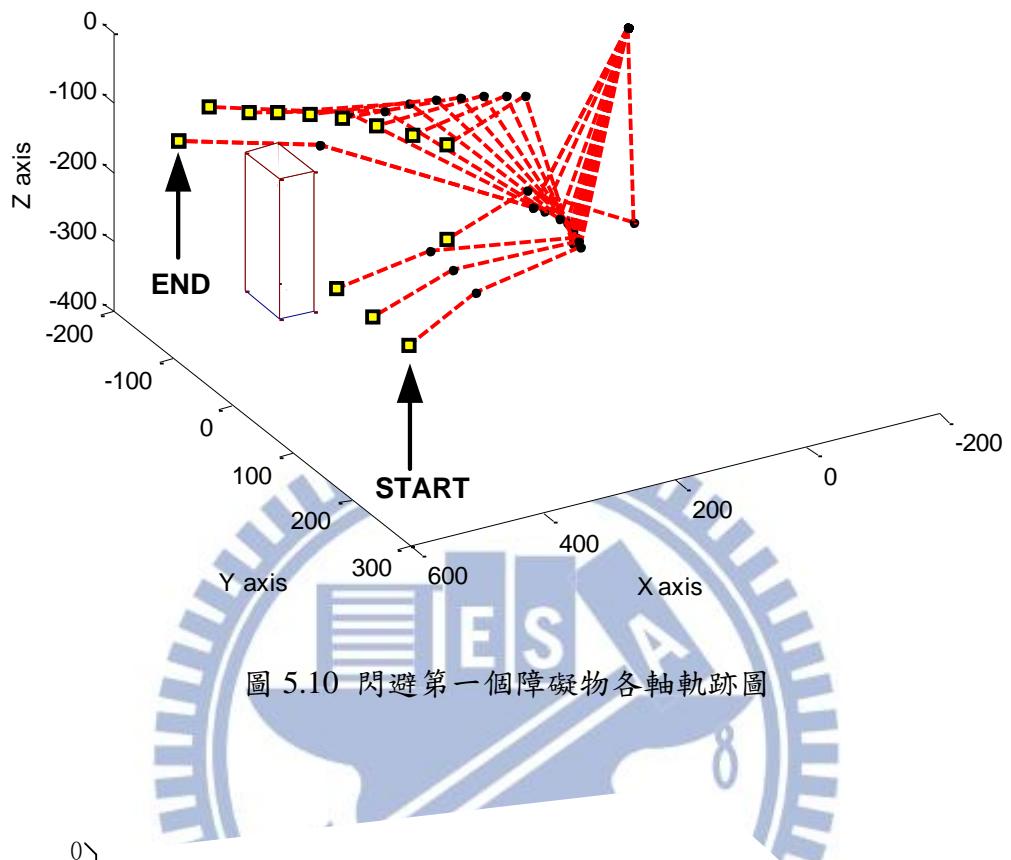


圖 5.10 避障第一個障礙物各軸軌跡圖

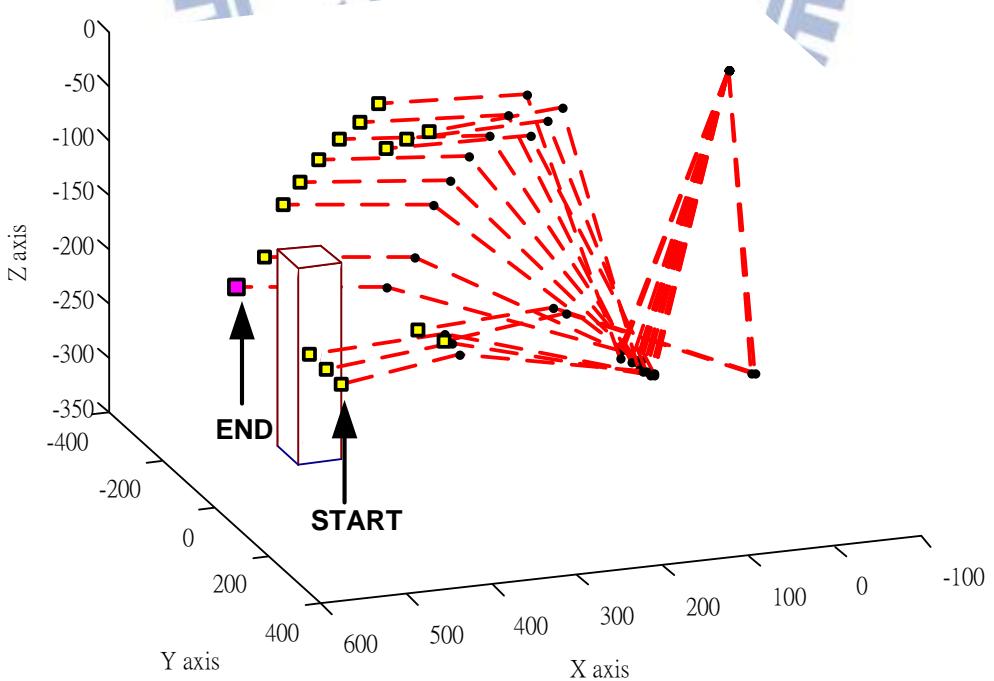


圖 5.11 避障第二個障礙物各軸軌跡圖

5.4 機械手臂自主抓取實驗

本實驗的目的在於驗證在複雜環境進行自主抓取的可能性，首先，機械手臂必須能自主偵測出環境中物體的位置，當手臂在執行任務時，會避開空間中的障礙物(例如:桌子、盒子等物體)，到達目標物所在的位置，並判斷目標物是否仍在原處，若被移動則須重新規劃，移動至目標物目前所在位置。本實驗由機器人自主判斷目標物的位置，並透過移動目標物來驗證機械手臂重新規劃並能適應環境中物體擺設，避開障礙物到達目標點的可能性。

本實驗情況如圖 5.12 所示，首先，機械手臂偵測環境與目標物後進行抓取的任務，手臂會避開桌子到目標物放置的位置，其次，我們移動目標物，手臂會重新規劃路徑，避開盒子等障礙物，移動致目標物新的位置，再次移動後，機器人判斷物體穩定沒有被移動，手臂進行抓取的動作，並完成任務。圖 5.13 為機械手臂避開桌子到達第一次目標點軌跡圖，圖 5.14 為機械手臂離開第一次目標點避開桌上物品到達第二次目標點完成抓取物品之軌跡圖。

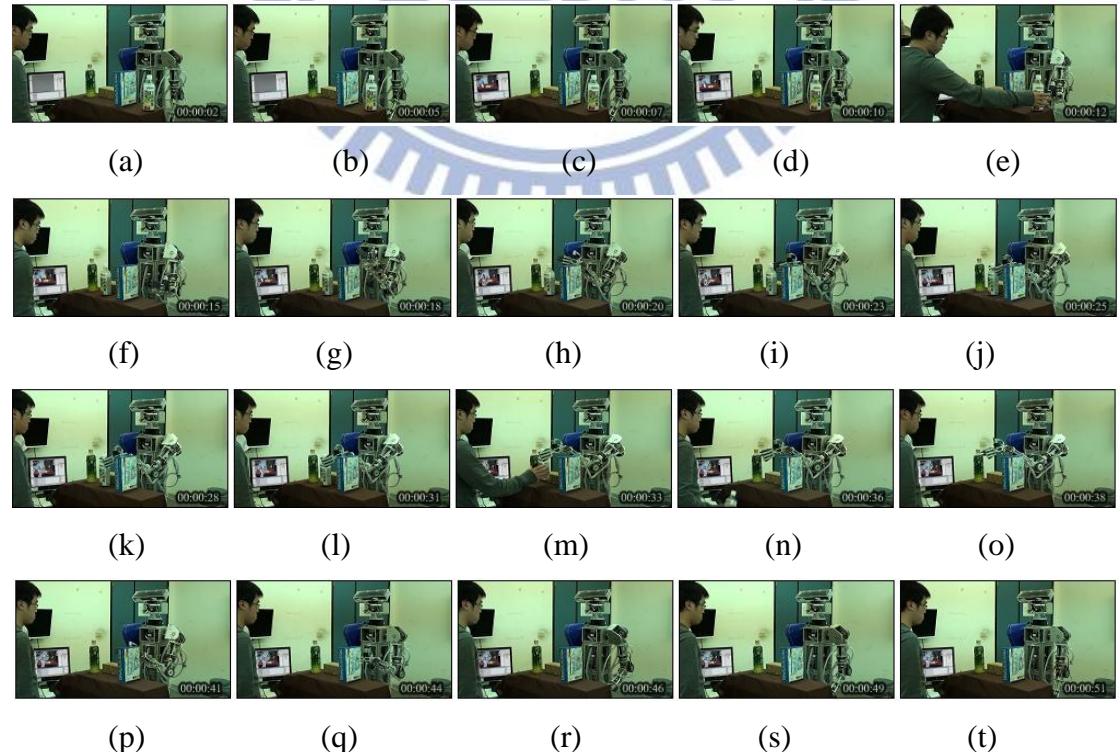


圖 5.12 機械手臂在複雜環境進行抓取過程

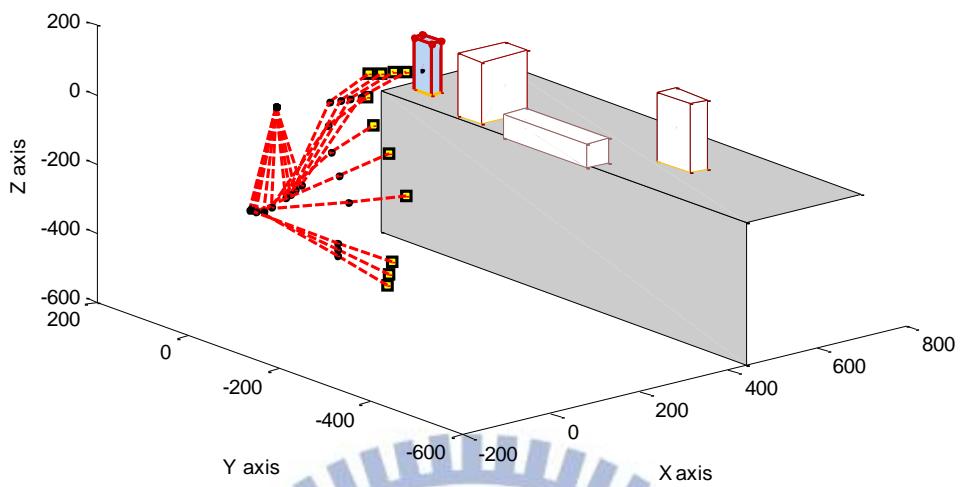


圖 5.13 機械手臂避開桌子到達第一次目標點軌跡圖

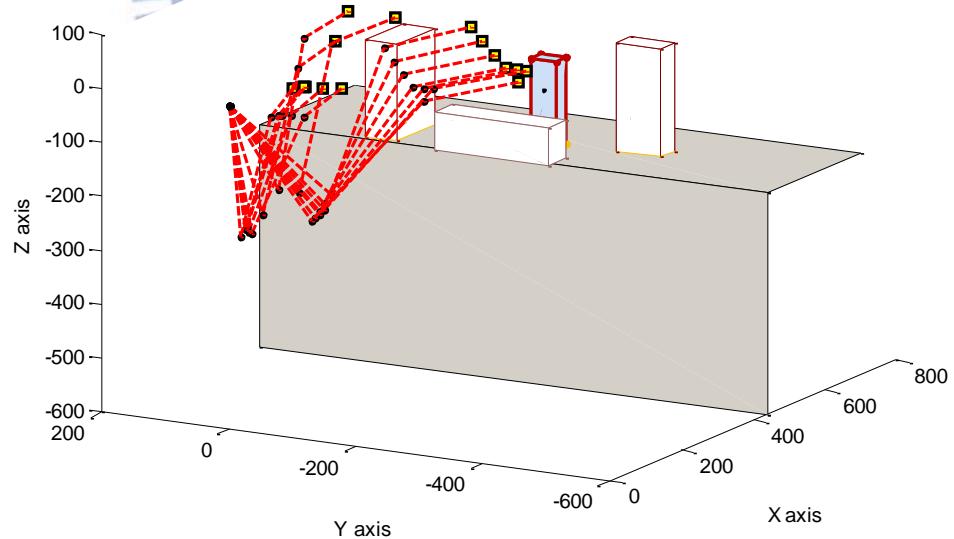


圖 5.14 機械手臂離開第一次目標點避開桌上物品到達第二次目標點完成抓取物品之軌跡圖

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本論文主要的目標在於使機器人能自主偵測並安全進行抓取任務之方法與研究。論文中設計一影像伺服控制的演算法可以利用影像取得環境資訊，使其在執行任務時可以安全的反應並閃避環境中物體，並完成所需執行的任務。本論文藉由環境中物體平面與攝影機距離的梯度方向不同的特性，將環境切割成數個不同平面來表示，同時利用所得平面藉由 SURF 的演算法進行比對，經由縮減比對的區域，可以大大縮減比對的時間，使機器人能即時偵測出環境中的目標物與障礙物的位置，並經由座標轉換，取得 3D 的資訊。此外，本論文也針對手臂安全的考量，設計了一套機械手臂的安全行為策略，利用同心圓柱的概念，由物體占據同心圓柱的層級，來判斷物體對機械手臂在運動中影響的程度，此影響的指數由內到外來遞減，並利用投影的方式，將環境投影至三個平面上，藉此將空間分成安全、不確定與為顯三種區域，找出此三種區域與手臂目前位置的相對關係，定義出手臂往各個方向的安全指數。在規劃路徑上，我們設計是依據手臂可活動空間的範圍與使手臂移動較短距離來建立 Potential field，在將所得的兩個安全指數應用於 Potential field 上，使機械手臂能選擇較安全的區域移動，並透過對整體空間的規劃，改善了 Potential field 只針對區域規劃而產生的 local minima 的問題。

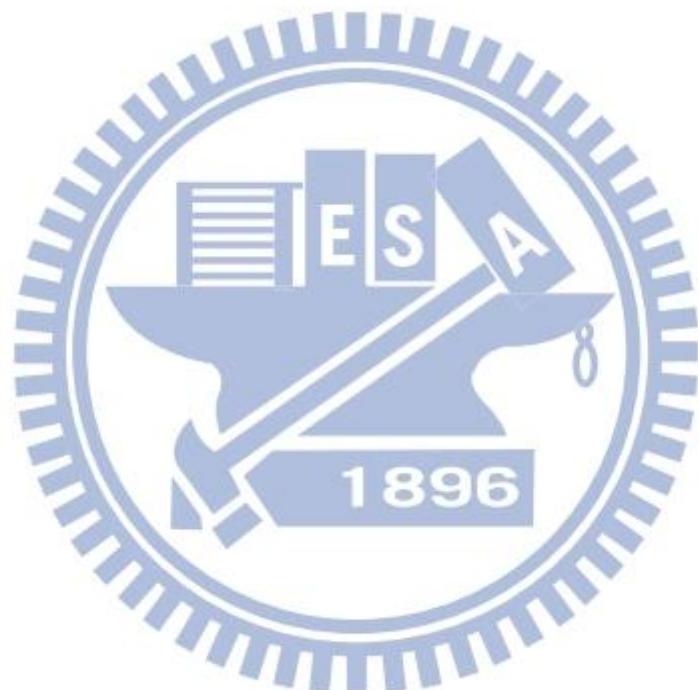
在實驗的驗證之下，我們可以確認機器手臂能即時避開障礙物，並能引導機械手臂至目標物所在位置，完成抓取的任務。

6.2 未來展望

本論文在感應器使用方面，由於只使用深度攝影機來取得外界資訊，所觀察到的環境有限，因此未來可以整合順應性控制的部分，已達到主動避障與被動避障同時進行，能使機器人對於反應不及或攝影機無法偵查到的碰撞也能做出反應，如此可以大幅提升機械手臂的安全性與實用性。

對於機器人的應用方面，目前已完成自主安全抓取在環境中指定物品的任務，若能整合移動平台，使機器人能自主導航至物體擺設的位置，並交付給指定的人，機器人的功能會更佳的完善，且大大的提升了人類生活的便利性。

此外，由於本論文所使用的機器人為雙臂的設計，將來可以研究雙手臂的協調合作，不但能擴大手臂工作的範圍，並可以完成更多元的任務。



參考文獻

- [1] A. De Luca, A. Albu-Schaffer, S. Haddadin and G. Hirzinger, “Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm,” in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006, pp. 1623-1630.
- [2] Lucian Balan and Gary M. Bone, “Real-time 3D Collision Avoidance Method for Safe Human and Robot Coexistence,” in *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006, pp.276-282.
- [3] Han-Young Jang, Hadi Moradi, Suyeon Hong, Sukhan Lee, JungHyun Han, “Spatial Reasoning for Real-time Robotic Manipulation,” in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006, pp. 2632-2637.
- [4] Nikolay Jetchev and Marc Toussaint, “Trajectory Prediction in Cluttered Voxel Environments” in *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA)* ,Alaska,USA,2010, pp. 2523-2528.
- [5] I. Iossifidis and G. Schoner, “Dynamical Systems for Autonomous Avoidance of Obstacles and Joint-limits for an Redundant Robot Arm” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and systems*, Beijng, China, 2006, pp. 580-585
- [6] H. Reimann, I. Iossifidis and G. Schoner, “Generating Collision Free Reaching Movements for Redundant Manipulators Using Dynamical Systems” in *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and systems*, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 5372 – 5379.
- [7] D. H. park, H.Hoffmann, P. Pastor and S.Schaal “Movement Reproduction and Obstacle with Dynamic Movement Primitives and Potential Field,” in *Proceedings of RAC international Conference* ,Daejeon,Korea, 2008, pp. 91-98.
- [8] Riccardo Schiavi, Antonio Bicchi and Fabrizio Flacco, “ Integration of Active and Passive Compliance Controlfor Safe Human-Robot Coexistence, ” in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009, pp.259-264.
- [9] S. M. LaValle, “Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning,”*Technical Report*, Computer Science Dept, Iowa State University, 1998.
- [10] J. Bruce and M. Veloso, “Real-time Randomized Path Planning for Robot Navigation,” in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , Lausanne, Switzerland, 2002, pp. 2383-2388.
- [11] D. Ferguson, N. Kalra and A. Stentz, “Replanning with RRTs,” in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, pp.

1243-1248, 2006.

- [12] *L. Jaillet, A.Yershova S. M. LaValle and T. Simeon*, “Adaptive Tuning of the Sampling Domain for Dynamic-Domain RRTs,” in *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp.2851-2857.
- [13] Dominik Bertram, James Kuffner, Ruediger Dillmann and Tamim Asfour,“ An Integrated Approach to Inverse Kinematics and Path Planning for Redundant Manipulator,”in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, 2006, pp.1874-1879.
- [14] Bakir Lacevic and Paolo Rocco, “Towards a Complete Safe Path Planning for Robotic Manipulator,”in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010, pp.5366-5371.
- [15] Dmitry Berenson, Siddhartha S. Srinivasa, Dave Ferguson, Alvaro Collet and James J. Kuffner, “ Manipulation Planning with Workspace Goal Regions, ” in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009, pp.618-624.
- [16] Yi-Chih Tsai, and Han-Pang Huang,“Motion Planning of a Dual-Arm Mobile Robot in the Configuration-Time Space, ” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA)*,Louis, USA, 2009, pp.2458-2463.
- [17] Kimitoshi Yamazaki, Masayuki Inaba, Takemitsu Mori and Takashi Yamamoto, “Online Collision and Occlusion Detection Based on 3D Cuboid Maps for a Daily Assistive Robot with a Tilting LRF, ” in *Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA)* , Beijing, China, 2011, pp. 767-772.
- [18] <http://www.play.com/Games/Xbox360/4-/10296372/Project-Natal/Product.html>
- [19] Rafael C. Gonzalez and Richard E. woods, “Digital Image Processing,” prentice Hall, 2008.
- [20] 張哲豪, “基於立體視覺之移動式機械臂影像伺服設計” 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, 2010.
- [21] M. Fischler and R. Bolles, “Random Sampling Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography,” *Commun. Assoc. Comp. Mach.*, 1981, vol. 24, pp. 381-395.
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/RANSAC>
- [23] 許傑巽, “一種機械手臂順應性控制與安全設計, ”國立交通大學電機工程研究所碩士論文, 2010.
- [24] R. P. Paul, “Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, the Computer Control of Robot Manipulators,” MIT Press, 1981
- [25] 王衍翔, “擬人型雙手臂機器人之機電設計、運動規劃與合作, ” 國立中興大學電機工程學系碩士論文, 2009.

- [26] Min Gyu Park and Min Cheol Lee, "A New Technique to Escape Local Minimum in Artificial Potential field Based Path Planning, " *KSME International Journal*, Vol. 17 No.12. pp. 1876-1885, 2003.
- [27] Paraskevas Dunias, "Autonomous Robots Using Artificial Potential fields," Technische Universiteit Eindhoven, 1996.

