

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master thesis

以基礎幾何模型搭配具主被動自由度和掌內壓力與近  
接感測之夾爪達到快速低計算成本之多樣化物體夾取  
A Fast and Low-Computation Object Grasping Method by  
Using Primitive-Shape Models and a Compliant Gripper  
with in-hand Proximity and Pressure Sensing

蔡謹容

Jin-Rong Tsai

指導教授：林沛群 博士

Advisor: Pei-Chun Lin, Ph.D.

中華民國 106 年 7 月

July 2017



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

以基礎幾何模型搭配具主被動自由度和掌內壓力與近接  
感測之夾爪達到快速低計算成本之多樣化物體夾取  
A Fast and Low-Computation Object Grasping Method by  
Using Primitive-Shape Models and a Compliant Gripper  
with in-hand Proximity and Pressure Sensing

本論文係蔡謹容君 (R04522817) 在國立臺灣大學機械工程學系  
完成之碩士學位論文，於民國 ~~96~~ 年 07 月 18 日承下列考試委員審查通  
過及口試及格，特此證明

106 蔡謹容

口試委員：

	<u>林 錦 群</u>	(簽名)
(指導教授)		
<u>黃光裕</u>		<u>黃 光 裕</u>
<u>顏炳郎</u>		<u>顏 炳 郎</u>
<u>連豐力</u>		<u>連 豐 力</u>
	<u>黃 菱 晴</u>	(簽名)

系主任

## 致謝



兩年做研究的時間，最感謝的是林沛群老師，老師對於研究的熱忱和為人的溫柔，一直都讓我非常非常的敬佩，在研究上，我有許多天馬行空和看似不切實際的想法，對於老師給予的包容和支持，非常非常的感謝。這段時間，有著筠萌、俊昇、瑋哲和智暉的幫忙和陪伴，從最一開始的徬徨到看著大家的研究慢慢成形以及最後的口試，很開心、也很感謝。碩二下學期，不論是 AIM 論文或者是畢業論文，David 和永修總是熬夜幫我做實驗和修改紙本論文，對於此有很多的抱歉，但有更多的是感謝，真的非常非常的感謝。也非常謝謝韋君總在我非常急迫的時候願意借我襯衫、謝謝霆霆幫忙處理了好多次送銑電路板的工作、謝謝番薯幫我解答了很多新代控制器的問題。最後，升上二年級之後，謝謝碩一的學弟妹張羅了實驗室大大小小的雜事，對於大家努力維持實驗室的秩序真的是太感謝了！

研究之餘，兩年來，爸爸媽媽總是擔心我壓力太大，總是跟我說，「延畢也沒有關係！」或者是「休學不想念了也沒有關係！」，雖然我每次都會用幾近崩潰的聲音吶喊說「也太浮誇了吧！」，但是每次想起，真的很溫暖、感動也很非常的感謝，謝謝你們讓我覺得、也確實一直一直支持著我。因為家裡三個小孩中有兩個都在北部生活，謝謝姊姊總是陪伴著爸爸媽媽，陪他們聊聊天，帶他們出去吃好吃的！謝謝培培，我們已經念同一間學校長達 9 年的時間，一直以來困難的時候你總是在，總有好多煩惱想跟你說，但是每次見到你就覺得煩惱都沒了，因為你一直以來也是這麼的努力，對於你、對於這 9 年的時間，真的好感謝。謝謝佳伶、謝謝淨瑜，在自己課業和工作繁忙之餘，仍然總是願意聽我聊聊研究上開心的、難過的事情，雖然我知道你們其實都聽不懂！但是，對於總是認真地傾聽和提出些可愛到不行的問題，真的是太感動和感謝了。

兩年做研究的時間，遇到的挫折很多，心情的起伏也一定比我想像中的大，謝謝身邊所有人的包容，一直以來我都非常的感謝。

## 摘要



本研究的目標是結合視覺定位、紅外線陣列、壓力陣列和自行設計的被動適應性夾爪，對欲抓取的目標物體進行於多障礙物之間的穩定夾取。

機械手臂和機械夾爪用於工業或自動化生產線上等制式化的控制已經非常普及，但若是場景假設在日常生活中，則需做較複雜、多變化、結合各式感測器的控制才可以達到對各種物體進行良好的夾取，此部分的困難之處在於，機械手臂不同於人體的皮膚，是柔軟但是富有彈性的，因此皮膚可以提供很好的包覆性，且能允許皮膚在碰觸物體後仍然能做夾取姿態的調整，因此能允許視覺判定上的誤差和輕易的夾取各式的形狀；相較於皮膚，機械夾爪材質堅硬且於控制上較難達到良好的包覆性，因此能容許的定位誤差小且需要在夾爪碰到物體前就決定好夾取姿態，無法在碰觸的過程中調整。

為了使機械夾爪能增加更多的包覆性，研究中設計了一具有被動包覆性的夾爪，其原理是利用行星齒輪的特性達到一輸入兩輸出的控制，且因其為機構驅動，因此可以透過一旋轉式電位計輕易的知道整個夾爪的姿態。除了夾爪的設計之外，為了增加包覆和適應性，預計在夾爪上安裝紅外線陣列和壓力陣列。安裝紅外線的原因是，不同於肌膚，機械夾爪能允許的定位誤差和所提供對於形狀的微調性很差，因此需要紅外線陣列於夾取前作適當的調整，校正定位誤差和讓夾爪更趨於物體的形狀。而壓力陣列是目前許多夾爪都會選擇安裝的感測器，原因是壓力陣列能於夾取的過程中可以判斷夾取狀態的好壞，例如物體是否有滑動的現象並藉此還調整夾取不同物體的力量、或夾取時力中心的位置是否恰當、又或者是可以透過力和壓力陣列受力面積之間的關係判斷物體的軟硬等，因其能提供的資訊多元，因此目前被大量的選擇安裝於機械夾爪上。

為了讓壓力陣列能有好的表現，壓力陣列上通常需要覆蓋一層軟墊，其功能有增加壓力陣列覆蓋於不同曲面的覆蓋能力和提供緩衝，也可以較好的分散受力以及提供夾取時所需的摩擦力。在選擇軟墊上面，雖然較厚的軟墊可以較好的均勻分散受力，但是較厚的軟墊同時也會吸收較多的力使壓力陣列的解析度下降。原先實驗室的壓力陣列使用的是 1mm 厚矽膠材質的軟墊，但是實驗後發覺其仍然無法很好的反映出接觸的面積形狀，因此決定嘗試製作軟墊，並在軟墊上設計突起點，材料選擇的是 PDMS。

影像定位的部分，結合 OpenCV、CUDA、SIFTGPU 函式庫，完成可以自行建模，並對此模型的物體透過特徵點比對進行六軸姿態的定位。其允許於混亂的背景中和物體部分被遮蓋的情況進行定位。定位誤差在正負 4mm 以內。有了物體的模型，可以想像成機器人即了解這個東西的樣子、外觀，但是了解其外觀之後和要決定如何夾取此物體之間仍有一大段的距離。

許多的研究都指出，人在抓取各式的物體時，只有用少數的幾個主要姿態，再配和細微的調整即能抓取各種幾何形狀的物體。因次，相較於其他研究是將模型加以分析後去決定夾取的姿態和位置，本研究所選擇的方法是，將模型簡化至某幾個特並的幾何形狀，以此幾何形狀決定主要的夾取姿態，再搭配紅外線陣列以及夾爪設計上的被動包覆性在夾取前進行細微的調整後對目標物體進行夾取。簡化物體模型不只可以節省大量為不同物體設計夾取姿態的時間，除此之外，建立在這個假設之上，研究中還提出了一個低計算量的夾取姿態演算法，其將夾取姿態壓縮至二維空間中作運算因此減少了大量的計算時間。

關鍵字： 通用型夾爪、視覺定位，低計算量夾取姿態演算法、壓力陣列、近接感測器

# Abstract



For a robot to grasp a randomly placed irregular object is a challenging task. The process includes several steps. First, the robot needs to be capable of identifying the shape, position, and posture of the object. Second, the robot needs to determine a grasping posture. Next, even when the robot can achieve the previous two tasks, the success of grasping relies on adequate contact between the gripper and the object. This issue is especially crucial when the dimensions or positioning of the object have uncertainties or when the object is fragile or soft, because the mechanical gripper has less compliance unlike the human hand. In short, the grasping task requires delicate coordination between the hand, eye, and arm.

This study reports on a novel low-computation object grasping method that can classify complex objects into primitive shapes and then select the object grasping posture based on predefined grasping postures associated with the approximated primitive shapes. In this approach, the object is not precisely modeled, and the grasping posture is selected from a small number of candidates without massive search; thus, the grasping posture for the object can be quickly derived. Because the object and primitive shape have geometrical discrepancy, the gripper is compliant and equipped with infrared proximity sensors on the fingers to compensate for the geometrical uncertainties and provide adequate contact between the object and the grippers. Furthermore, the gripper also equipped with the pressure array for detecting the slipping and adjusting the grasping force. The methodology is experimentally evaluated with several types of objects in different postures.

**Keywords:** passive gripper, proximity sensor, pressure array, low-computation grasping method

# 目錄



口試委員審定書 .....	I
致謝 .....	II
摘要 .....	III
Abstract.....	V
目錄 .....	VI
圖目錄 .....	IX
表目錄 .....	XVII
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 研究動機 .....	1
1.3 文獻回顧 .....	2
1.4 貢獻 .....	7
1.5 論文架構 .....	8
第二章 實驗平台設計 .....	9
2.1 機械夾爪設計 .....	9
2.1.1 被動彈性設計 .....	10
2.1.2 機構設計 .....	14
2.1.3 機械夾爪設計結果 .....	19
2.2 感測系統設計 .....	22
2.2.1 近接感測器設計 .....	22
2.2.2 壓力陣列軟墊設計 .....	31
2.3 機電系統架構 .....	42
2.3.1 手臂控制機電架構 .....	43
2.3.2 視覺定位機電架構 .....	44

2.3.3 夾爪控制機電架構 .....	44
2.4 手臂逆運動學推導 .....	48
2.5 本章結論 .....	51
第三章 視覺定位與計算夾取姿態 .....	52
3.1 視覺定位 .....	52
3.1.1 Scale-invariant feature transform(Sift)演算法介紹 .....	53
3.1.2 介紹 VisualSFM 與 SiftGPU .....	58
3.1.3 建模與定位流程 .....	59
3.2 模型簡化 .....	62
3.2.1 模型分類 .....	63
3.2.2 模型簡化流程 .....	64
3.3 夾取姿態的計算 .....	72
3.3.1 演算法基本假設與概念介紹 .....	72
3.3.2 最佳的夾取姿態的計算 .....	76
3.3.3 定義基準向量與基準座標系 .....	81
3.3.4 定義重心夾取姿態與邊緣夾取姿態 .....	83
3.3.5 目標理想的夾取姿態 .....	92
3.3.6 可行夾取姿態的計算 .....	102
3.3.7 獲取障礙物資訊 .....	103
3.3.8 研究中夾取姿態的計算流程 .....	107
3.4 夾取軟體介紹 .....	113
3.4.1 拍攝建模照片 .....	114
3.4.2 建立模型 .....	114
3.4.3 校正模型 .....	115
3.4.4 偵測模型 .....	115
3.4.5 定位模型 .....	116

3.5 本章結論 .....	119
第四章 結合多感測器之夾取應用 .....	120
4.1 夾爪包覆實驗結果 .....	120
4.2 物體定位實驗結果 .....	121
4.3 模型簡化實驗結果 .....	122
4.4 夾取姿態計算實驗結果 .....	126
4.4.1 單一物體夾取姿態計算實驗結果 .....	126
4.4.2 多物體夾取姿態計算實驗結果 .....	143
4.5 滑動偵測與調整夾取力量實驗結果 .....	148
4.5.1 夾取力道與滑動相關性實驗 .....	150
4.5.2 滑動偵測實驗 .....	151
4.5.3 夾取調整實驗 .....	156
4.6 近接感測器實驗結果 .....	158
4.7 本章結論 .....	159
第五章 結論與未來展望 .....	160
5.1 結論 .....	160
5.2 未來展望 .....	160
參考文獻 .....	161

## 圖目錄



圖 1-1 多指機器人 (a)Utah / M.I.T hand (b)Gifu Hand (c)Shadow Dexterous Hand (d) DLR Hand.....	3
圖 1-2 機構驅動式通用型夾爪 (a) BarrettHand[10] (b)SDH Hand[11] (c) 3-Finger Adaptive Robot Gripper[12].....	3
圖 1-3 其他著名的通用型夾爪 (a)Flexible manufactor (b)FinGripper[13].....	3
圖 2-1 機械夾爪三指(左)和兩指(右)外觀圖 .....	9
圖 2-2 行星齒輪組示意圖 .....	11
圖 2-3 行星齒輪組結合平行四邊形機制示意圖 .....	11
圖 2-4 夾爪包覆過程示意圖 .....	11
圖 2-5 機械夾爪數學模型 .....	12
圖 2-6 單指簡單機構概念示意圖 .....	14
圖 2-7 單指機構設計圖(以 Finger2 為例).....	14
圖 2-8 伺服馬達軸(擺臂)連接行星架並與馬達同心的設計爆炸圖 .....	17
圖 2-9 太陽齒輪連接桿 1 並與馬達軸同心的設計爆炸圖 .....	17
圖 2-10 環齒連接桿 2 並與馬達軸同心的設計爆炸圖 .....	17
圖 2-11 夾爪手腕(底座)部分的上視圖 .....	18
圖 2-12 夾爪兩指三指的轉換示意圖 .....	18
圖 2-13 夾爪體圖 .....	19
圖 2-14 第一代夾爪外觀[32] .....	21
圖 2-15 第二代夾爪外觀.....	21
圖 2-16 第一代夾爪包覆示意圖[32] .....	21
圖 2-17 第二代夾爪包覆示意圖 .....	21
圖 2-18 第一代夾爪數學模型 .....	22
圖 2-19 第二代夾爪數學模型 .....	22

圖 2-20 夾爪坐標系、模式轉換示意圖 .....	23
圖 2-21 夾爪被動自由度觸發示意圖 .....	24
圖 2-22 紅外陣列偵測示意圖 (a)兩顆紅外線 (b)三顆紅外線 .....	24
圖 2-23 三顆紅外線能判別的狀況 .....	24
圖 2-24 模式轉換觸發示意圖 .....	25
圖 2-25 紅外線列偵測控制模式轉換示意圖 .....	25
圖 2-26 (a)近接感測器設計結果示意圖 (b)進階感測器實體圖 .....	26
圖 2-27 近接感測器軟式電路板舊版與新版實體圖比較 .....	27
圖 2-28 近接感測器訊號傳輸示意圖 .....	28
圖 2-29 新版近接感測器電路設計概念圖 .....	28
圖 2-30 包覆模式判斷示意圖 .....	29
圖 2-31 兩指與三指模式轉換判斷示意圖 .....	30
圖 2-32 壓力陣列實體圖 .....	32
圖 2-33 兩種突起狀與四個設計方向示意圖 .....	32
圖 2-34 軟墊上視圖規格 (單位為 mm) .....	33
圖 2-35 軟墊設計方向示意圖 .....	35
圖 2-36 圓頂和平頂最終選擇的柱狀長度示意圖 .....	35
圖 2-37 軟墊模具實體圖 .....	35
圖 2-38 軟墊實體圖 .....	35
圖 2-39 實驗設置圖 .....	36
圖 2-40 力規與壓力陣列值和關係圖(所有軟墊) .....	38
圖 2-41 力規與壓力標準差關係圖(所有軟墊) .....	38
圖 2-42 力規與壓力陣列值和關係圖(圓頂和平頂軟墊) .....	39
圖 2-43 力規與壓力陣列值和關係圖(圓頂軟墊) .....	39
圖 2-44 力規與壓力陣列值和關係圖(平頂軟墊) .....	39
圖 2-45 力規與壓力標準差關係圖(圓頂和平頂軟墊) .....	40

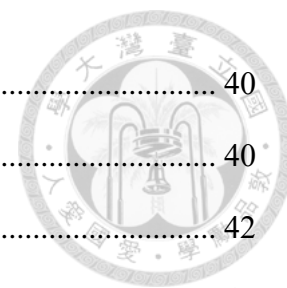


圖 2-46 力規與壓力標準差關係圖(圓頂軟墊) .....	40
圖 2-47 力規與壓力標準差關係圖(平頂軟墊) .....	40
圖 2-48 系統的整體機電系統架構圖 .....	42
圖 2-49 PXI 實體圖 .....	43
圖 2-50 (a) RA605 實體圖 (b)新代控制器實體圖 .....	43
圖 2-51 電源分配版實體圖 .....	44
圖 2-52 PXI 訊號分配版實體圖 .....	45
圖 2-53 伺服馬達版實體圖 .....	46
圖 2-54 數位類比轉換版實體圖 .....	46
圖 2-55 數位類比轉換分配版實體圖 .....	47
圖 2-56 紅外線陣列訊號分配版實體圖 .....	47
圖 2-57 世界座標系的定義 .....	48
圖 2-58 機械手臂前三軸數學模型 .....	49
圖 2-59 數學模型後三軸數學模型 .....	50
圖 3-1 高斯金字塔[42] .....	54
圖 3-2 極值點的偵測示意圖[42] .....	55
圖 3-3 生成描述子的示意圖[42] .....	58
圖 3-4 VisualSFM 軟體介面[40] .....	59
圖 3-5 建模與定位流程圖 .....	59
圖 3-6 建模成功示意圖 .....	61
圖 3-7 幾何形狀有各自「擺正」的定義 .....	61
圖 3-8 模型簡化之流程圖 .....	64
圖 3-9 分類投影面形狀之流程圖 .....	65
圖 3-10 去角質霜各投影面點雲狀態 .....	67
圖 3-11 去角質霜實體圖與各投影面分析結果 .....	67
圖 3-12 三角巧克力各投影面點雲狀態 .....	68

圖 3-13 三角巧克力實體圖與各投影面分析結果.....	68
圖 3-14 一日蔬果實體圖與各投影面分析結果.....	70
圖 3-15 一日蔬果重心與邊緣夾取可行性判斷結果.....	70
圖 3-16 品客波卡實體圖與各投影面分析結果.....	71
圖 3-17 品客波卡重心與邊緣夾取可行性判斷結果.....	71
圖 3-18 夾爪在預備位置和夾取位置以及在夾取位置時需要的偵測範圍.....	72
圖 3-19 四類重心夾取姿態.....	73
圖 3-20 四類邊緣夾取姿態.....	73
圖 3-21 計算夾取姿態的主要流程.....	75
圖 3-22 手臂各軸與座標系示意圖.....	76
圖 3-23 夾取姿態推至正極限的一個例子.....	77
圖 3-24 計算最理想夾取姿態的座標.....	77
圖 3-25 物體擺放在定義範圍內不同位置下的夾取姿態正極限示意圖.....	77
圖 3-26 物體擺放在兩個不同位置時的正負極限示意圖.....	78
圖 3-27 圖 3-26(a)物體擺放位置的 J2 及 J3 負極限示意圖.....	78
圖 3-28 圖 3-26(a)各軸最適中的夾取姿態.....	80
圖 3-29 最理想夾取姿態在不同位置時之示意圖.....	81
圖 3-30 四個定義的幾何形狀適合的夾取路徑(圓適合的夾取路徑為無線多個)...	81
圖 3-31 以兩個例子示意圓柱在不同姿態下定義的基準向量.....	82
圖 3-32 基準座標系的定義方法示意圖.....	82
圖 3-33 夾爪手指區與手腕區的分割示意圖.....	84
圖 3-34 四類夾取姿態手指區與手腕區的搜尋範圍示意圖.....	84
圖 3-35 A 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖.....	85
圖 3-36 B 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖.....	86
圖 3-37 C 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖.....	87
圖 3-38 D 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖.....	88

圖 3-39 一組 D 類重心夾取姿態 approach path 的調整範圍示意圖 .....	88
圖 3-40 A 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖 .....	90
圖 3-41 B 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖 .....	90
圖 3-42 C 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖 .....	90
圖 3-43 D 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖 .....	91
圖 3-44 由後往前的夾取姿態在手臂運動上的限制 .....	93
圖 3-45 尚未加入 J5 行程極限條件時手臂位於空間中可能的位置 .....	94
圖 3-46 加入 J5 行程極限條件後手臂的位置示意圖 .....	94
圖 3-47 將障礙物分為三區的示意圖 .....	96
圖 3-48 手臂夾取的 motion space 範圍以內分割八區的示意圖 .....	97
圖 3-49 長方體的夾取姿態 .....	99
圖 3-50 直立圓柱的夾取姿態 .....	100
圖 3-51 躺下圓柱的夾取姿態 .....	100
圖 3-52 直立三角柱的夾取姿態 .....	101
圖 3-53 躺下三角柱的夾取姿態 .....	101
圖 3-54 A 類重心夾取姿態手指區搜尋範圍 .....	102
圖 3-55 B 類重心夾取姿態手指區搜尋範圍 .....	102
圖 3-56 B 類重心夾取姿態手腕區搜尋範圍 .....	102
圖 3-57 旋轉障礙物示意圖 .....	102
圖 3-58 減少 360 次至 90 次搜尋的方法示意圖 .....	102
圖 3-59 四個簡易形狀在本研究中所生成的點雲示意圖 .....	105
圖 3-60 桌子於基準坐標下的平面方程式計算示意圖 .....	105
圖 3-61 裁切模型時點雲搜索示意圖 .....	106
圖 3-62 裁切模型時點雲轉化示意圖 .....	106
圖 3-63 裁切後模型之點雲投影至平面以計算夾取姿態之示意圖 .....	107
圖 3-64 在基準坐標系中物體上方有物體之三種可能 .....	108

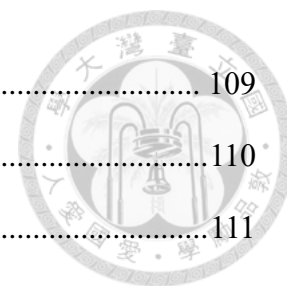


圖 3-65 判斷物體上方是否有障礙物的流程圖 .....	109
圖 3-66 計算夾取姿態的流程圖 .....	110
圖 3-67 挑選合適夾取姿態的流程圖 .....	111
圖 3-68 各類夾取姿態排序示意圖 .....	111
圖 3-69 計算夾取姿態完整流程圖 .....	112
圖 3-70 功能選擇介面 .....	113
圖 3-71 「Take Pictures」和「Build Model」介面示意圖 .....	114
圖 3-72 「Model Calibration」介面示意圖 .....	115
圖 3-73 「Detect Model」介面示意圖 .....	116
圖 3-74 「Locate Model」介面示意圖 .....	117
圖 3-75 「Locate Model」展開介面示意圖 .....	118
圖 3-76 夾取姿態計算狀態介面詳細示意圖 .....	119
圖 4-1 被動自由度被啟動的過程 .....	121
圖 4-2 被動自由度啟動過程的各項實驗數值 .....	121
圖 4-3 物體定位實驗結果 .....	122
圖 4-4 定位成果 .....	122
圖 4-5 模型簡化結果 .....	123
圖 4-6 模型簡化的各項詳細數值 .....	124
圖 4-7 模型簡化的各項詳細數值 .....	125
圖 4-8 站立品客波卡(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果 .....	127
圖 4-9 站立品客波卡(圓柱)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	128
圖 4-10 站立品客波卡之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果 .....	128
圖 4-11 躺下品客波卡(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果 .....	129
圖 4-12 躺下品客波卡(圓柱)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	130
圖 4-13 躺下品客波卡之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果 .....	130
圖 4-14 站立三角巧克力(三角柱)的夾取姿態計算實驗結果 .....	131

圖 4-15 站立三角巧克力(三角柱)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	132
圖 4-16 站立三角巧克力之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果 .....	132
圖 4-17 躺下三角巧克力(三角柱)的夾取姿態計算實驗結果 .....	133
圖 4-18 躺下三角巧克力(三角柱)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	134
圖 4-19 躺下三角巧克力之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果 .....	134
圖 4-20 一日蔬果(長方體)第一種情形的夾取姿態計算實驗結果 .....	135
圖 4-21 一日蔬果(長方體)第一種情形的最終各類夾取姿態計算結果 .....	136
圖 4-22 一日蔬果(長方體)第一種情形的最終選擇夾取姿態計算結果 .....	136
圖 4-23 一日蔬果(長方體)第二種情形的夾取姿態計算實驗結果 .....	137
圖 4-24 一日蔬果(長方體)第二種情形的最終各類夾取姿態計算結果 .....	138
圖 4-25 一日蔬果(長方體)第二種情形的最終選擇夾取姿態計算結果 .....	138
圖 4-26 側躺泡麵(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果 .....	139
圖 4-27 側躺泡麵(圓柱)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	140
圖 4-28 側躺泡麵(圓柱)的最終選擇夾取姿態計算結果 .....	140
圖 4-29 直立蝴蝶餅乾(長方體)的夾取姿態計算實驗結果 .....	141
圖 4-30 直立蝴蝶餅乾(長方體)的最終各類夾取姿態計算結果 .....	142
圖 4-31 直立蝴蝶餅乾(長方體)的最終選擇夾取姿態計算結果 .....	142
圖 4-32 目標品客波卡的夾取姿態計算實驗結果 .....	143
圖 4-33 目標品客波卡的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖 .....	143
圖 4-34 目標品客波卡的最終各類夾取姿態計算結果 .....	144
圖 4-35 夾取姿態擷取的障礙物資訊 .....	144
圖 4-36 目標品客波卡(圓柱)被倚靠的夾取姿態計算實驗結果 .....	145
圖 4-37 目標品客波卡的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖 .....	145
圖 4-38 目標上方面積投影圖 .....	146
圖 4-39 更改目標三角巧克力的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖 .....	146
圖 4-40 目標蝴蝶餅乾的夾取姿態計算實驗結果 .....	147

圖 4-41 目標蝴蝶餅乾的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖.....	147
圖 4-42 目標上方面積投影圖.....	148
圖 4-43 自動夾取流程示意圖.....	149
圖 4-44 夾取力道與相關性(correlation)關係實驗結果.....	150
圖 4-45 滑動實驗結果(負重 250g；壓力陣列初始總值 50).....	152
圖 4-46 滑動實驗結果(負重 250g；壓力陣列初始總值 100).....	152
圖 4-47 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 100).....	154
圖 4-48 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 150).....	154
圖 4-49 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 200).....	155
圖 4-50 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 250).....	155
圖 4-51 調整夾取力到實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 80).....	156
圖 4-52 調整夾取力到實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 80).....	157
圖 4-53 觸發被動包覆過程.....	158
圖 4-54 觸發模式轉換過程.....	158

## 表目錄



表 2-1 行星齒輪不同模式下的機械運作狀態.....	12
表 2-2 環齒輪固定下行星架驅動太陽輪旋轉的關係.....	13
表 2-3 太陽輪固定下行星架驅動環齒輪旋轉的關係.....	13
表 2-4 夾爪致動器規格表.....	15
表 2-5 電位計規格表.....	15
表 2-6 環齒輪規格表.....	16
表 2-7 夾爪各桿件長度.....	17
表 2-8 蝸桿蝸輪規格表.....	19
表 2-9 夾爪規格表.....	20
表 2-10 APDS-9130 規格表.....	28
表 2-11 所有設計軟墊的規格表.....	35
表 3-1 夾取模式和其對應適合的夾取形狀.....	63
表 3-2 手臂各軸行程極限.....	76
表 3-3 四類重心夾取姿態的整理.....	90
表 3-4 手臂 motion space 以內障礙物分布位置對應須移除的夾取姿態.....	98
表 3-5 長方體的夾取姿態整理.....	99
表 3-6 直立圓柱的夾取姿態整理.....	100
表 3-7 躺下圓柱的夾取姿態整理.....	100
表 3-8 直立三角柱的夾取姿態整理.....	101
表 3-9 躺下三角柱的夾取姿態整理.....	101
表 4-1 站立品客波卡(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目.....	127
表 4-2 站立品客波卡(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角.....	127
表 4-3 躺下品客波卡(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目.....	129
表 4-4 躺下品客波卡(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角.....	129

表 4-5 站立三角巧克力(三角柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	131
表 4-6 站立三角巧克力(三角柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	131
表 4-7 躺下三角巧克力(三角柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	133
表 4-8 躺下三角巧克力(三角柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	133
表 4-9 一日蔬果(長方體)第一種情形限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	135
表 4-10 一日蔬果(長方體)第一種情形候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	135
表 4-11 一日蔬果(長方體)第二種情形限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	137
表 4-12 一日蔬果(長方體)第二種情形候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	137
表 4-13 側躺泡麵(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	139
表 4-14 側躺泡麵(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	139
表 4-15 直立蝴蝶餅乾(長方體)限制判斷後的理想夾取姿態數目 .....	141
表 4-16 直立蝴蝶餅乾(長方體)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角 .....	141
表 4-17 目標品客波卡的倚靠或被倚靠判斷情形 .....	146
表 4-18 目標蝴蝶餅乾的倚靠或被倚靠判斷情形 .....	148

# 第一章 緒論



## 1.1 前言

現今機械手臂和機械夾爪已經大量的被應用到自動化產業線中，在自動化產業線中的機器人追求的是高重複性、高精準性的工作。然而，隨著科技的不斷進步，如今不只在工業上，生活中對於使用夾爪取放物件的任務要求也越來越高。多用途的任務要求也使得夾爪不只在機構設計上和控制上都需要提升適應不同物件的能力，不同於在工業中對於高重複性和高精準性的追求，生活中的機器人更多的要求是在於高適應性和高彈性，如何面對多變的狀況與產生自我應變的能力將是未來機械夾爪所具備的能力。

## 1.2 研究動機

機械手臂和機械夾爪用於工業或自動化生產線上等制式化的控制已經非常普及，但若是場景假設在日常生活中，則需做較複雜、多變化、結合各式感測器的控制才可以達到對各種物體進行良好的夾取。

使用機械夾爪夾取物體的困難之處在於，從選定一個目標到選擇出夾取姿態最後穩定夾取的整個過程漫長、步驟繁多且環環相扣。首先，機器人需要有能辨別物體形狀、位置、和夾取可行性的能力；接下來，機器人需要決定一個對物體與機器人夾取能力接合適的夾取姿態；最後，即使機器人有完成以上兩個步驟的能力，夾取的成功與否仍然與夾爪和物體之間的接觸是否充足、力道是否適當有決定性的關係。然而，機械手臂不同於人體的皮膚，是柔軟但是富有彈性的，因此皮膚可以提供很好的包覆性，且能允許皮膚在碰觸物體後仍然能做夾取姿態的調整，因此能允許視覺判定上的誤差和輕易的夾取各式的形狀；相較於皮膚，機械夾爪材質堅硬且於控制上較難達到良好的包覆性，因此能容許的定位誤差小且需要在夾爪碰到物體前就決定好夾取姿態，無法在碰觸的過程中調整。

因此，一個夾取的任務需要「手、眼、力」之間良好且細緻的協調。如何使夾爪具有充分的適應性同時不需要太複雜的控制難度來夾取多樣性的物體具有實際的研究價值。



### 1.3 文獻回顧

人類的雙手可以完成的任務非常多，簡單如爪握一顆蘋果到複雜如雕刻一顆蛋，那是因為人類的雙手上具有各式的感測器與良好的接觸材質——皮膚。一直以來，許多研究都試圖模仿人類的雙手與人類抓握的方式以達到爪取各式物體的目標。機械夾爪方面，各式不同理念與設計的夾爪相繼出現，其中有模仿人類雙手的多指機器人、工業中常見的平行夾爪(Parallel gripper)，以及介於以上兩者複雜與簡單夾爪之間的通用型夾爪。

自 1980 年代麻省理工學院開發了 Utah / M.I.T hand[1]之後，各式多指機器人也相繼被開發出來，例如日本岐阜大學於開發的 Gifu Hand[2]、英國 Shadow Robot Company 研發的 Shadow Dexterous Hand[3]、德國航空太空中心(DLR)開發的 DLR Hand[4]。雖然多指夾爪因為多自由度可以做出靈巧且複雜的動作，然而多自由度的協同控制困難且開發與製造本都高，不適用任務較單純且重複性較高的工業或自動化生產線上，因此簡單的平行夾爪被設計應用於工業生產之中，平行夾爪的優點在於設計單純與控制簡單且還十分穩定，其中德國 FESTO 以及 SCHUNK 製造的平行夾爪較出名。然而，若希望抓取多樣化形狀和尺寸的物品，平行夾爪的適應性又不足，因此，具備適應能力之通用型夾爪的概念在 2000 年被提出[5]，通用型及爪在機構設計上多有巧思使其能具備順應性(Compliance)且通常含有多感測器來提高夾取時的穩定性。

通用型夾爪主要分為拉線驅動、機構驅動與其他驅動三種類別。拉線驅動式通用型夾爪較著名的有，耶路大學團隊設計開發的 SDM Hand[6]、哈佛大學與 iRobot 合作的 i-HY Hand[7]和 Willow Garage 設計的 Velo 2G Gripper[8]。而機構驅動式之通用型夾爪較著名的有，美國 Barrett Technology 開發出產的 BarrettHand、德國 SCHUNK 設計的 SDH Hand 和加拿大 ROBOTIQ 設計生產的 3-Finger Adaptive Robot Gripper。最後介紹其他較著名且特別的通用型及爪，日本橫濱大學研發了以 Flexible microactuator(FMA)驅動的手指，能做出如軟體動物觸手運動般的動作，還

能組合成足類機器人做出動物走路的動作[9]、德國 FESTO 開發的 FinGripper，其順應包覆物品的設計靈感是來自於魚鰭的運動，魚鰭在運動時可以變化形狀但其主要的骨架不會改變。

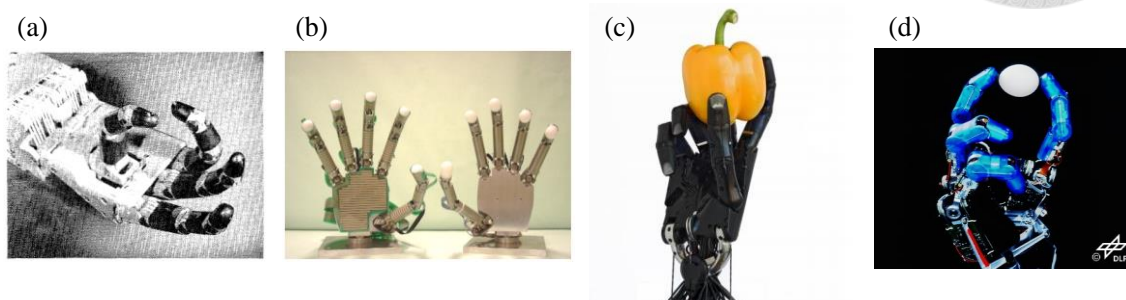


圖 1-1 多指機器人 (a)Utah / M.I.T hand (b)Gifu Hand (c)Shadow Dexterous Hand (d) DLR Hand



圖 1-2 機構驅動式通用型夾爪 (a) BarrettHand[10] (b)SDH Hand[11] (c) 3-Finger Adaptive Robot Gripper[12]

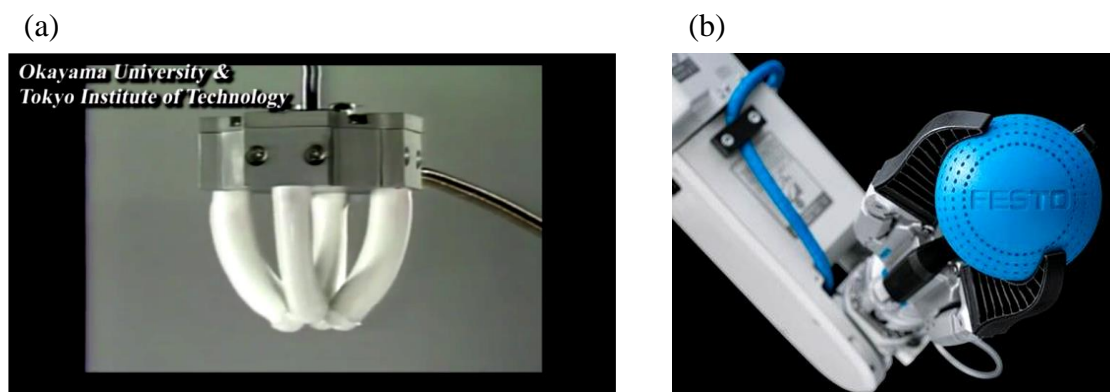



圖 1-3 其他著名的通用型夾爪 (a)Flexible manufacturer (b)FinGripper[13]



拉線驅動式通用型夾爪雖然常伴隨較多的被動自由度，但是其較難安裝感測器，較難推算運動學也較難配合感測器作其他夾取時的控制，反之，機構驅動式通用型夾爪安裝感測器與推倒運動學上都比較容易。考慮到研究中希望結合感測器對於夾取作更細緻的控制，因此本研究選擇開發機構驅動式的通用型夾爪而非拉線驅動式的通用型夾爪。

在目標物體的姿態偵測和定位上，現今的方法主要又分為兩部分，一為即時建模[14, 15]、另一則為需事前建模[16-19]，除了以上兩種主流的方式，還有完全不須建模的方法，日本東京電器大學使用紅外線陣列近接感測器在接近物體時直接以感測器回饋控制進行夾取[20]，柏林工業大學使用深度相機和影像處理方法直接對影像中的物品和點雲進行分割並作幾何形狀上的簡化後進行夾取[21]。

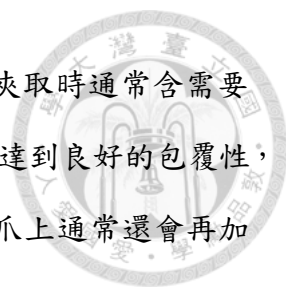
在物體定位的部分，及時建模的好處是無需事先建模，理論上可以夾取所有未知的東西；然而，這類的方法夾取時的環境通常需要是適合建模的環境，也導致通常限制較多，例如背景需單純、畫面中只能有單一物體且物體要「正」的擺放。事先建模的缺點是，無法對於未知也就是未建模的物體作夾取，但是優點則是可於一般複雜的生活場景中做夾取且物體可以任一姿態擺放，其實，我們可以把建模這個動作想成是在告訴或教導機器人，每個物體其各自的外觀、大小、合適的擺放姿態等等。另外其他完全不須建模的方法，其缺點就是對於夾取物體沒有任何的認知，因此不知道自己夾了什麼也無法指定特定目標作夾取，且在完全沒有建模的狀態下，只能知道物體的相對姿態，並不知道物體的絕對姿態，因為絕大部分的物體人類都有其如何擺放才是「正」的認知，也就是我們會習慣將物體以某個特定的姿態作擺放，因此，綜合上述，可以得知建模有其必要性。因此在本篇論文中會將欲夾取的物體作事先的建模。

當有目標物體的姿態之後，接下來是要選擇一個合適的夾取位置和夾取姿態。現今主流的方法有以物體模型的幾何形狀經過力分析選擇合適的夾取位置和姿態、有將模型以 bounding box 進行分割後挑選合適的夾取位置和姿態[17, 18]、也有以物體各自人類習慣的夾取位置和姿態為選擇[19]。這些方法有直接在 real time 底下

做計算的，也有在建模時一併計算完納入模型的資料內。若是在 real time 底下計算通常耗時而若在建模時直接將夾取姿態和夾取位置納入模型的資料內則會多消耗許多電腦的容量。

以上提到的方法都是對所有的物體進行分析，所有的物體最後各自都有一組其適合的夾取姿態；然而，Marco Santello 利用大量的實驗，得到的其中兩個人類在抓取物體時姿態調整的結論，一為「The control of hand posture involves a few postural synergies, regulating the general shape of the hand, coupled with a finer control mechanism providing for small, subtle adjustments.」，二為「Hand posture may be regulated independently from the control of the contact forces that are used to grasp an object.」[22]。由這兩個結論可以推測，或許不用對每個物體單獨計算其適合的夾取位置和姿態，而是少數幾個主要的夾取姿態都有其對應適合的夾取物體類別，並且這幾個少數的主要夾取姿態搭配一些細微的調整後就可以抓取生活中絕大多數的物體，1998 年 Marco Santello 提出了這個實驗結果後，以這個理念開發的夾取方式也相繼出現。

2003 年，哥倫比亞大學、德國卡爾斯魯厄理工學院(KIT)和瑞典皇家工學遠(KTH)提出了一個著名的獲得夾取姿態的概念，其作法為將模型簡化後由簡化後的模型在計算出適合的夾取姿態[20]。柏林工業大學也有做類似的研究，其作法是把物體的形狀簡化成某幾類的幾何形狀，每一類的幾何形狀都有其對應的一系列的夾取姿態，在夾取時就是以物體簡化的幾何形狀所對應的夾取姿態來對物體進行夾取的動作，而其結果也證明這適用於生活中絕大部分的物體。而在夾取位置上，其不用複雜耗時的計算也不用事先將物體各自適合的夾取姿態建入物體的模型中，其中也有實驗直接選擇物體的幾何重心當作夾取位置，實驗結果證實單純的夾取物體重信位置就有良好的夾取效果[21]。然而，可惜的是這篇論文並沒有系統化的描述和解釋模型的分類方法和各幾何形狀類別對應的夾取姿態是怎麼選擇出來的，本研究將建立在這樣的鈞量之上提出一個有系統模型分類和姿態選擇的方法，其可適用於絕大多是生活上常見的物品和生活中常見的環境。



有了目標物體適合的夾取位置和夾取姿態之後，夾爪真實夾取時通常含需要細微的調整和校正，相較於皮膚，機械夾爪堅硬且於控制上較難達到良好的包覆性，因此能容許的定位誤差小且無法在碰觸的過程中調整，因此夾爪上通常還會再加上感測器達到近接感測(proximity sensing)的功能。

在近接感測方面，有些研究選擇在夾爪上安裝相機[23]，有些研究選擇在夾爪上安裝紅外線陣列[24-27]，在日本東京電器大學的研究中是假設在完全不知道物體姿態下，純粹以近接感測器調整夾取姿態並對物體進夾取，但是當夾爪的初始姿態與適合夾取的姿態有差距時、或是夾爪初始位置與物體相距太遠時就無法成功的夾取。

以相機當作近接感測器(proximity sensor)的優點其可以更直接的了解物體表面狀態，但是其缺點為，為了能安裝上相機，夾爪的大小及形狀會被受到限制。紅外線陣列當作近接感測器雖然無法如同相機一樣可以直接獲得足夠的資訊計算夾取姿態，但是其用來微調夾爪姿態的能力是機械夾爪非常需要的，而且其大小較適中，並不會使夾爪在設計時受到太大的限制，因此在研究中將依照所設計的夾爪開發了可以安裝在其上面的紅外線陣列近接感測器。

到目前為止，已經能獲得一個合適的夾取姿態和夾取位置；然而，仍然不能保證夾爪的穩定夾取。壓力陣列是目前許多夾爪都會安裝的感測器，原因是壓力陣列能於夾取的過程中判斷夾取狀態的好壞，例如，物體是否有滑動的現象、夾取時力中心的位置是否恰當、透過力和壓力陣列之間面積的關係判斷物體的軟硬等等。因其能提供的資訊多元，因此現今被大量的選擇安裝於機械夾爪上。

Willow Garage 團隊將人類不同的觸覺神經以各式的感測器做模擬，反應頻率較快的為加速度規，而較慢的則為壓力陣列，藉由快與慢感測器的融合其研究結果可以藉由壓力陣列的滑動來調整夾取力道來夾取未知體重的物體[28]。也有團隊將壓力陣列的每一個陣列(Taxel)想像成相機的像素(Pixel)，因此可以將視覺處理的理論帶入觸覺控制中[29]。不同以往單純使用壓力陣列總數質的變化來判斷是否有滑動發生，密西根州立大學的團隊和明尼蘇達大學的團隊提出觀察整個壓力陣列所



有數值的相關性來判斷是否有滑動的發生，若所有數值皆同時增大或變小，則其所有陣列的相關性高，則可能有滑動的發生[30, 31]。

## 1.4 貢獻

### (1) 研發具被動自由度的機械夾爪

本研究使用行星齒輪結合平行四邊形機構的設計開發了具有一主動自由度和一被動自由度的機構驅動式通用型夾爪。所開發的夾爪在被動自由度被觸發之前和一平行夾爪相同，被動自由度觸發後則可以對物體進行包覆。除此之外，還延續了實驗室昱辰學長兩指和三指的模式轉化設計[32]。

### (2) 研發能結合夾爪的近接感測器與合適的壓力陣列軟墊

本研究設計了以 7 顆紅外線組成的紅外線陣列近接感測器，其可以幫助夾爪進行夾取時的調整並幫助研究中簡化模型後的計算夾取姿態演算法更完整。除此之外，還設計了能使壓力陣列在對於形狀的反應和表現更優秀的 PDMS 軟墊。

### (3) 研發從建模和定位至模型簡化到快速計算夾取姿態之演算法

本研究延續了將人類的拿取研究中所得到的結論之概念——以主要的幾種夾取姿態搭配細微的調整來夾取生活中大多數的物品。在所提出的演算法當中將物品簡化至某些幾何形狀後，以簡化後的幾何形狀所適合的夾取姿態來進行挑選，最後提出一個低運算速度的夾取姿態計算演算法，其不同於其他演算法而可以達到快速計算的原因是，所提出的演算法在捨棄了部分的夾取姿態後將夾取姿態的計算壓縮至二維空間而非三維中，因此大大的降低了計算上需要的時間。

## 1.5 論文架構

本論文總共分為五章，第一章簡述了機器人夾取作業的發展、闡述了研究動機並探討文獻回顧與說明了本研究的貢獻，最後介紹了論文的架構。第二章說明了研究中的實驗平台設計，包括整個機電系統的設計、被動包覆式夾爪的設計與各感測器的設計，並在最後演繹了在本研究中使用了手臂逆運動學的推倒過程。第三章的內容包括了視覺定位和建模的演算法介紹與實際使用在研究中的流程與做法說明、模型簡化的理論與做法介紹、介紹研究中所提出計算夾取姿態的演算法與實作流程、最後會展示整個軟體系統的設計，其功能包含了建模、定位與計算夾取姿態的部分。第五章實驗的部分為展示夾爪的包覆功能、模型定位、模型簡化、夾取姿態的計算結果與結合各感測器夾取的實驗結果，並會與理論比較討論可改進的空間與方向。第五章將總結研究結果與提出未來展望。

## 第二章 實驗平台設計



### 2.1 機械夾爪設計

機械夾爪不同於人類的皮膚柔軟且富有彈性因而能輕易的包覆即抓取不同形狀的物體，為了增加機械夾爪的包覆性，增加機械夾爪的被動自由度是現今常見的方法。增加機械夾爪被動自由度的原因有二：第一，不會因為增加了一個自由度而增加控制上的難度且適合夾取更多元的物體；第二，有許多研究指出人類的抓取動作是在很少的主要抓取動作上加上細微的調整[22]，而這個被動自由度的應用正是在增加夾爪抓取上細微調整的能力。

擁有被動自由度的夾爪主要又分為機械驅動式與拉線驅動式，拉線驅動式的優點為致動器可以放置在後端，然而容易打滑且運動學較難計算。本研究中希望能在夾取的過程中知道夾爪各點的位置以便確認夾取的狀況和結合多感測器座控制，因此設計了一以機械驅動具備動自由度的機械夾爪。此機械夾爪具有一主動自由度和一被動自由度方便夾取時進行包覆，除此之外，此夾爪還具有兩指轉換三指模式的機制，整體的外觀圖如圖 2-1 所示。被動包覆式的機械夾爪在實驗室中共經歷了三代的改版，第一代為昱辰學長的五連桿夾爪而第二代為立言學姊設計的改良五連桿夾爪，本研究中設計的夾爪延續了前兩代兩指和三指模式的轉換機制並改進了前兩代被動自由度包覆上的不足。在本節中會詳細介紹此夾爪的設計以及與前兩代的夾爪做比較討論改進的部分。

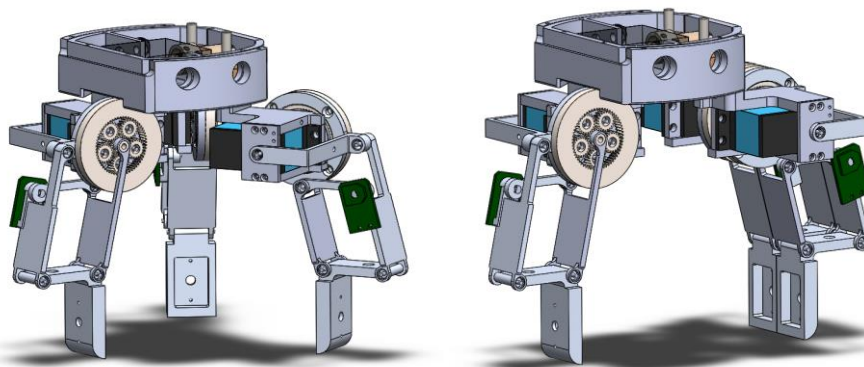


圖 2-1 機械夾爪三指(左)和兩指(右)外觀圖



## 2.1.1 被動彈性設計

### 2.1.1.1 被動彈性機構機制

本研究中夾爪的設計是利用行星齒輪一輸入二輸出且可以將馬達的出力自動分配到兩個輸出的特性設計出一具有被動自由度的夾爪。設計上的概念為，在馬達輸入行星齒輪扭力後，將行星齒輪的其中一個輸出設計為容易驅動的「主輸出」，另一個輸出則設計為具有阻力因而啟動需較大扭力的「順應輸出」。

如圖 2-2 所示，行星齒輪組是由太陽齒輪(sun gear)、行星齒輪(planetary gear)連接行星架(carrier)以及環齒輪(ring gear)三組齒輪所組成的，表 2-1 為行星齒輪在不同輸入輸出模式下的機械運作狀態，可以由表中看出若希望兩輸出和輸入為同方向的條件下，輸入必須為行星架，因此，研究中將行星架設計為與馬達連接的輸入端，而太陽輪和環齒輪設計為兩輸出端。

太陽輪和環齒輪在主輸出和順應輸出的設計選擇是利用兩者的機構特性和夾取時的需求所決定的。夾取時，研究中希望夾爪能快速的到達夾取位置，在包覆時，希望夾爪能做較細微的調整，因此，設計出來夾爪的特性希望能不違背這兩個需求。如表 2-1 所示，當行星架為輸入端且環齒輪固定時，太陽齒輪的旋轉速度特性為大加速，可以快速的到達目的地，適合夾取時的主輸出；而當行星架為輸入端且太陽齒輪固定時，環齒輪的旋轉速度特性為小加速，能做到相較於環齒輪固定時更細微的控制，適合夾取時的順應輸出。在綜合了機構特性和夾取的需求後，將太陽齒輪設計為主輸出而環齒輪設計為順應輸出(如圖 2-3 所示)。

除了利用行星齒輪的特性之外，本研究中的夾爪還加入了平行四邊形連桿的設計，這個設計讓夾爪的指頭在夾爪閉合的過程中都能維持與夾爪閉方向固定的角度。圖 2-3 展示了設計的夾爪如何結合行星齒輪和平行四邊形連桿機構。圖中的 ABCD 為一平行四邊形，桿件 AD 為連接太陽齒輪的主輸出端，桿件 AB 為連接環齒輪的順應輸出端，桿件 CDE 為指頭。由圖可以看出，若有一力 F 能阻止行星架帶動桿件 AB 並讓馬達的所有施力用來帶動桿件 AD，則平行四邊形連桿的特性可

以使指頭 DE 與圖中的水平面保持固定的夾角。在機構的設計上，研究中利用一彈簧來滿足對於這個 F 的需求。

整個被動自由度被觸發的過程大致上如圖 2-4 所示。當夾爪手指沒有受到外力時，桿件 AB 會保持固定並且只有桿件 AD 會被驅動(如圖(a)到圖(b))；當夾爪手指受到外力如碰觸到物體後，馬達施的力無法透過行星架傳遞至太陽輪使桿件 AD 再向前進，此時若桿件 DE 有可以包覆的空間，則馬達的施力將透過行星架傳遞至環齒輪抵抗彈簧的力使桿件 AB 旋轉完成包覆的動作。

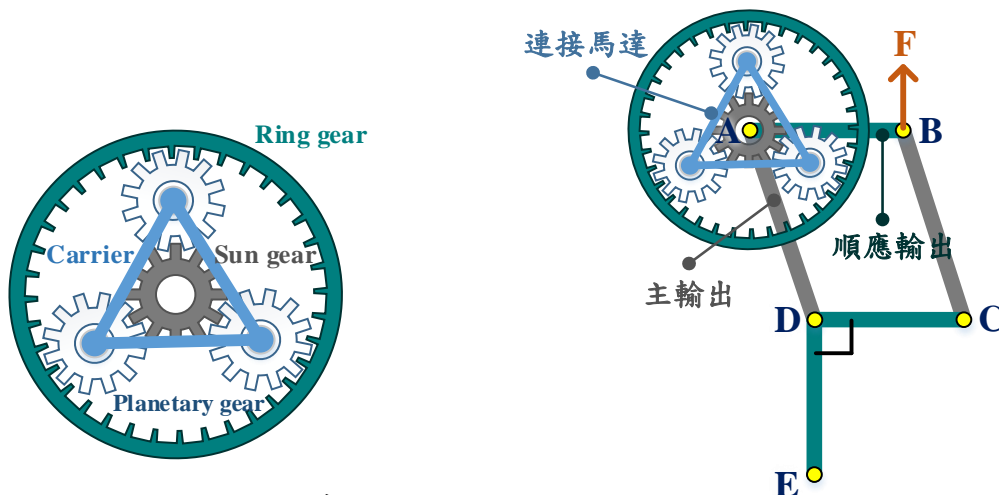


圖 2-2 行星齒輪組示意圖

圖 2-3 行星齒輪組結合平行四邊形機制示意圖

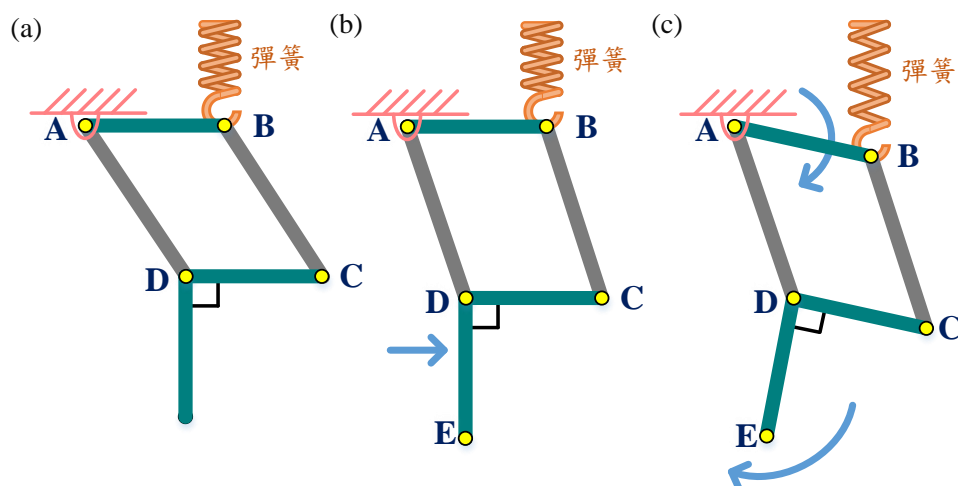


圖 2-4 夾爪包覆過程示意圖

表 2-1 行星齒輪不同模式下的機械運作狀態

輸入	輸出	固定	特性
太陽輪	行星架	環齒輪	同方向 大減速
	環齒輪	行星架	反方向 減速
行星架	太陽輪	環齒輪	同方向 大加速
	環齒輪	太陽輪	同方向 小加速
環齒輪	行星架	太陽輪	同方向 小減速
	太陽輪	行星架	反方向 加速

### 2.1.1.2 運動學推倒

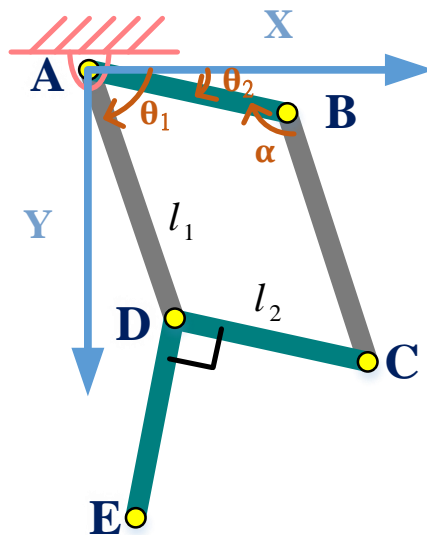


圖 2-5 機械夾爪數學模型

假設桿件 AD 和桿件 AB 的起始角度皆為 0 度，由圖 2-5 可以看出，當獲得桿件 AD(太陽輪)旋轉的角度  $\theta_1$ 、桿件 AB(環齒輪)旋轉的角度  $\theta_2$  和  $\alpha$  角度後即可透

過向量關係求得指夾爪頭 D 點和 E 點的位置。其中  $\alpha$  的角度將由加裝在夾爪上的電位計獲得，而  $\theta_1$  和  $\theta_2$  將由伺服馬達的旋轉角度  $\varphi$  和  $\alpha$  獲得。伺服馬達旋轉角度將透過行星架和行星輪按照一定的比例分給太陽輪或環齒輪，這個比例在表 2-2 和表 2-3 中列出。當環齒輪和太陽輪固定不動時行星架旋轉一圈後太陽輪和環齒輪的旋轉圈數分別為  $1+(N_r/N_s)$  和  $1+(N_s/N_r)$ ，也就是說，行星架旋轉的角度會按照這個比例分給太陽輪或環齒輪，如(式 2-1)所示。除了(式 2-1)之外，由平行四邊形的特性可將  $\alpha$  和  $\theta_1$  以及  $\theta_2$  的關係列成(式 2-2)。由(式 2-1)和(式 2-1)即可求得  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。

$$\varphi = (1 + \frac{N_r}{N_s}) \times \theta_1 + (1 + \frac{N_s}{N_r}) \times \theta_2 \quad (\text{式 2-1})$$

$$\pi = \alpha + (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{式 2-2})$$

表 2-2 環齒輪固定下行星架驅動太陽輪旋轉的關係

原件	行星架	太陽輪(齒數= $N_s$ )	行星輪(齒數= $N_p$ )	環齒輪(齒數= $N_r$ )
迴轉圈數	1	$1+(N_r/N_s)$	$1-(N_r/N_p)$	0

表 2-3 太陽輪固定下行星架驅動環齒輪旋轉的關係

原件	行星架	太陽輪(齒數= $N_s$ )	行星輪(齒數= $N_p$ )	環齒輪(齒數= $N_r$ )
迴轉圈數	1	0	$1+(N_s/N_p)$	$1+(N_s/N_r)$



## 2.1.2 機構設計

### 2.1.2.1 單指模組的機構設計

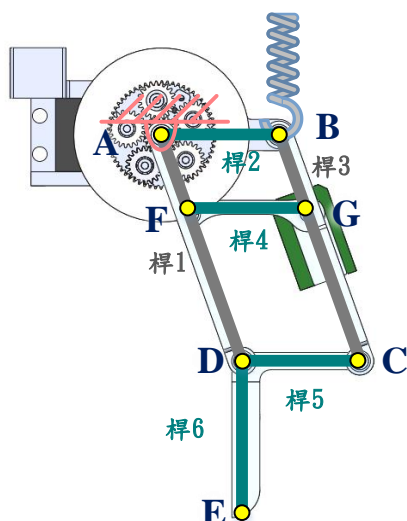


圖 2-6 單指簡單機構概念示意圖

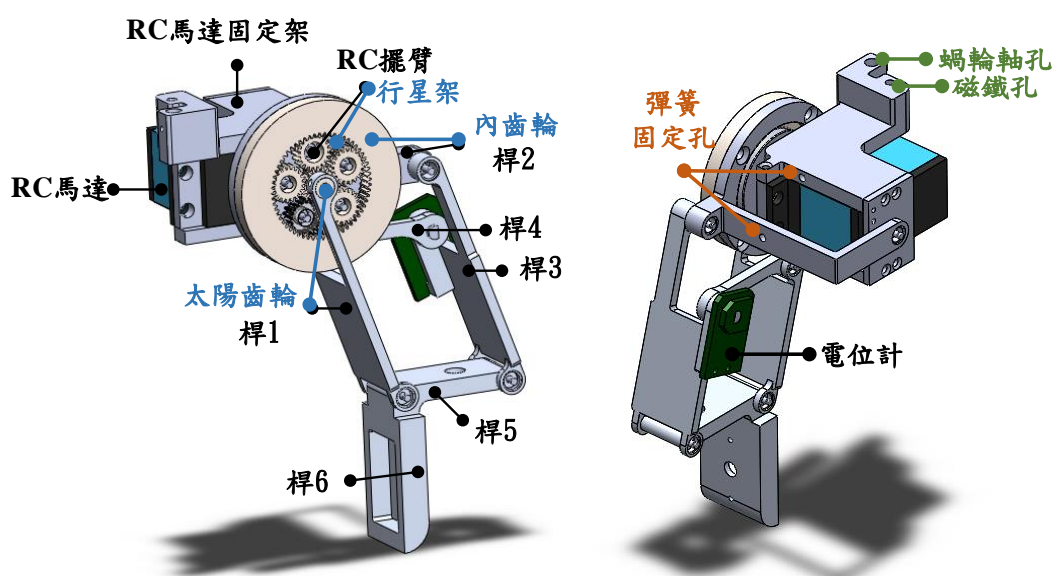


圖 2-7 單指機構設計圖(以 Finger2 為例)

圖 2-6 為一簡單的單指機構概念圖，可與圖 2-3 互相對應，桿 4(桿件 FG) 的增加是為了穩固機構和方便加裝電位計。夾爪上安裝的伺服馬達與電位計的規格

如表 2-4[33]和表 2-5 所示。實驗中的伺服馬達因為有其他電子零件的關係，工作電壓為 5V 而非效能最大的 7.4V，輸出扭力預估在 27kg-cm 左右，齒輪的挑選需承受住伺服馬達的輸出扭力是以這個數直進行估計。

一個夾爪機構會希望桿 2 不要過長，而桿 2 的長度會被環齒輪的直徑所限制，除此之外，在希望夾爪能夠越輕巧越好的目標上，皆希望環齒輪越小越好；然而，環齒輪的訂製昂貴，綜合了價格上的考量後選擇了 KHK 製造的標準環齒輪中最小的型號，其詳細的規格如表 2-6[34]所示，在這個規格下內齒輪可以承受住伺服馬達的最大扭力。太陽齒輪和行星齒輪的部分，因為齒輪還要與其他的零件如軸承配合，若挑選的太小在安裝上或零件的選配上都會有困難，然而，在內齒輪的大小已經固定的情況下，兩者的大小會互相影響，因此最後兩者訂定為相同的大小——也就是節圓直徑皆為 10mm 的規格，然而 KHK 製造的標準正齒輪規格皆無法承受住伺服馬達的最大扭力，最後兩者的訂製材料選擇為 SCM440 且行星齒輪數量需要 5 個。

表 2-4 夾爪致動器規格表

型號	Futaba BLS172SV		
不同供應電壓下之 轉速與扭力	6.0V	0.14sec/60°	31kg-cm
	6.6V	0.12sec/60°	34kg-cm
	7.4V	0.11sec/60°	37kg-cm
尺寸	41 x 21 x 38 mm		
重量	74g		



表 2-5 電位計規格表

型號	FSE11-01DB5KP0
有效回轉角度	180° ± 2°
電阻類型	線性
線性誤差	± 3%
旋轉力矩	0~30gf-cm

表 2-6 環齒輪規格表

型號	模數	節原直徑(mm)	外徑(mm)
內齒輪 SI0.5-60	0.5	30	50

圖 2-7 為 Finger2 的單指機構設計圖，設計的夾爪在實驗中希望能夾取生活中常見的物品如鋁箔包大小的物體，同時在希望設計的夾爪體積不要太大的兩個條件下，各桿件選定的長度如表 2-7 所示。整個機構設計困難的地方在於，如何讓環齒輪、行星架、太陽齒輪與伺服馬達的輸出軸同心，以及，如何連接「太陽齒輪與桿 1」、連接「環齒輪與桿 2」和連接「伺服馬達軸(擺臂)與行星架」。

伺服馬達軸(擺臂)連接行星架並同心的方法如圖 2-8 所示。如圖所示，行星架的設計可以直接與擺臂固定在一起，而擺臂再與馬達軸連接即可達到同心的效果，馬達軸轉動會直接帶動擺臂與行星架。而行星齒輪與行星架的連接方式是透過軸承，如圖所示，軸承可以確保每一個行星齒輪旋轉的順暢並可以確保可以順利的帶動環齒輪與太陽齒輪。

太陽齒輪連接桿 1 並與馬達軸同心的方法如圖 2-9 所示。太陽齒輪與桿 1 是利用緊配以及螺絲固定，而太陽齒輪再通過軸承與一定位稍連接伺服馬達軸達到同心的效果，此定位稍的末端具有螺紋用來固定擺臂與伺服馬達軸，然而擺臂和馬達軸的旋轉與太陽齒輪無關，太陽齒輪與馬達軸只是同心的關係。

環齒連接桿 2 並與馬達軸同心的方法如圖 2-10 所示。如圖所示，桿 2 與環齒輪利用螺絲固定，而桿 2 再利用一軸承與行星架連接，因為是利用軸承連接，行星架的旋轉與桿 2 或環齒輪沒有關係。而又因為行星架與馬達軸同心，因此環齒輪也會與馬達軸同心。

表 2-7 夾爪各桿件長度

桿件	桿 1	桿 2	桿 3	桿 4	桿 5	桿 6(指頭)
長度	69mm	33.5mm	69mm	33.5mm	33.5mm	45mm

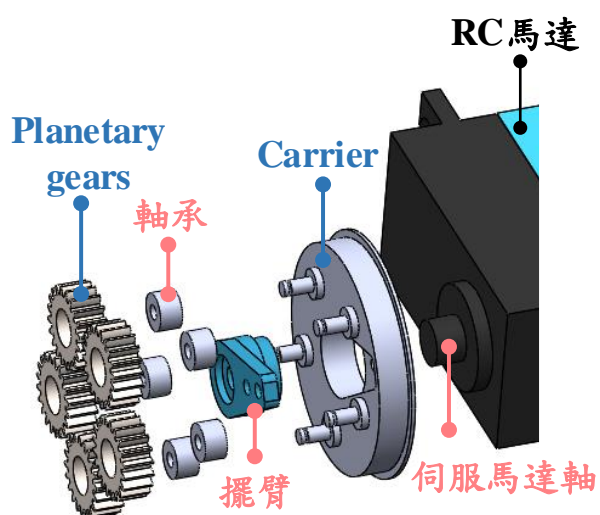


圖 2-8 伺服馬達軸(擺臂)連接行星架並與馬達同心的設計爆炸圖

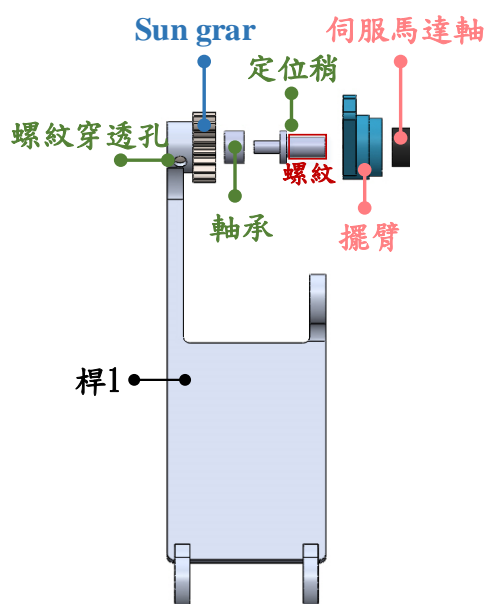


圖 2-9 太陽齒輪連接桿 1 並與馬達軸同心的設計爆炸圖

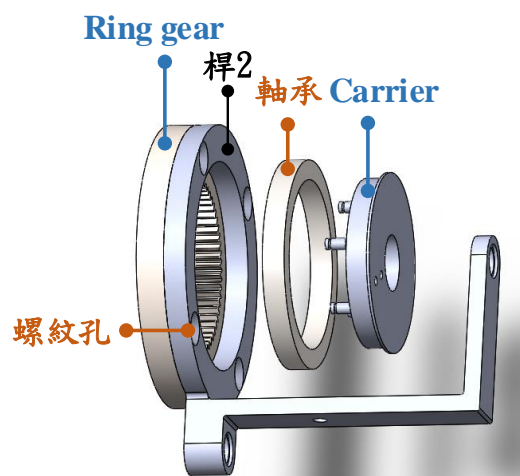


圖 2-10 環齒連接桿 2 並與馬達軸同心的設計爆炸圖



### 2.1.2.2 兩指三指轉換機制

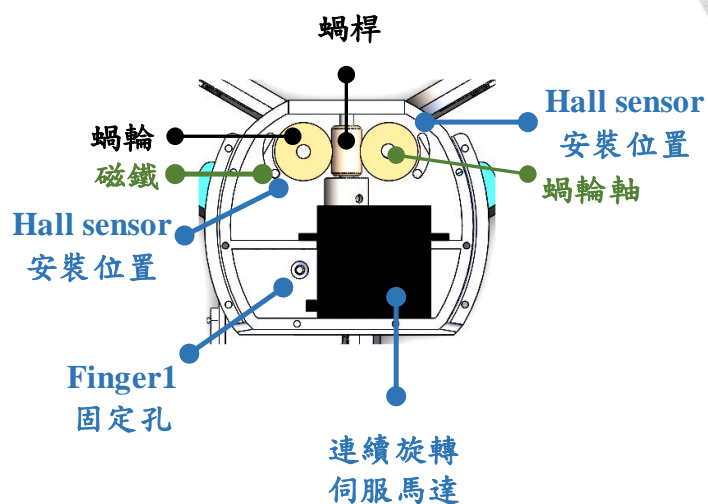


圖 2-11 夾爪手腕(底座)部分的上視圖

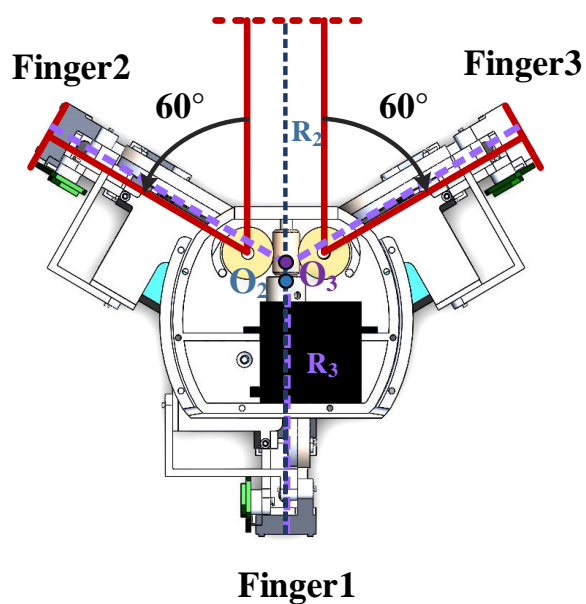


圖 2-12 夾爪兩指三指的轉換示意圖

已經介紹完夾爪指頭的設計部分，此部分要介紹的為夾爪手腕部分的兩指和三指模式轉換機構，這個機構延續了昱辰學長的設計，如圖 2-11 和圖 2-12 所示，其利用蝸輪蝸桿的機構來完成兩個模式之間的轉換，由兩指模式轉換為三指模式的過程中，連接 Finger2 和 Finger3 的蝸輪會以同樣角度向外旋轉 60 度，最後三指

的相位會相差 120 度。其中要注意的地方為，兩指和三指模式下的夾爪中心位置是不同的，如圖 2-12 中的  $O_3$  和  $O_2$  點所示。本研究中的夾爪與昱辰學長設計的版本不同的只有蝸輪的規格，因為本研究中的單指重量較昱辰學長所設計重，且 Finger2 和 Finger3 的分布較開，因此需要減速比較大且直徑較大的蝸輪，最後選定的蝸桿蝸輪規格如表 2-8[35, 36]所示。

在控制上，兩指和三指之間的轉換是由圖 2-11 中的連續旋轉伺服馬達驅動蝸桿帶動兩側個兩個蝸輪，而模式是否已經轉換成功是由裝置在 RC 馬達固定架上的磁鐵隨 Finger 轉動並觸發 Hall sensor 的方式判斷。

表 2-8 蝸桿蝸輪規格表

型號	齒直角模數	節原直徑(mm)	減速比
蝸桿 SW0.5-R1	0.5	11	X
蝸輪 BG0.5-40R1	0.5	20.02	40

## 2.1.3 機械夾爪設計結果

### 2.1.3.1 機械夾爪規格

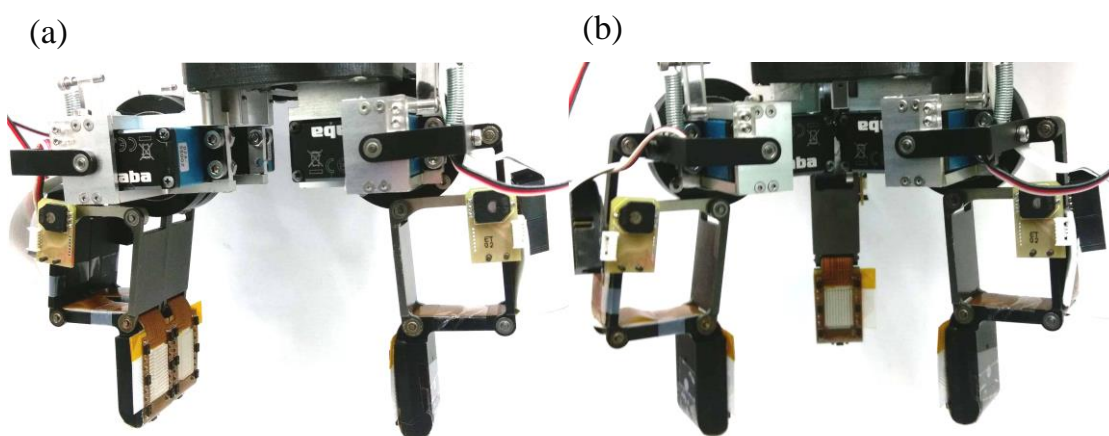
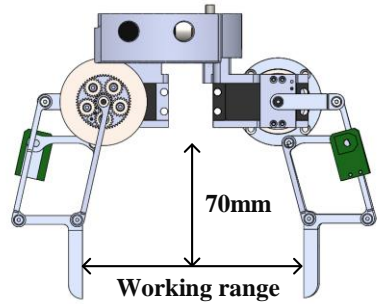


圖 2-13 夾爪體圖

表 2-9 夾爪規格表

夾爪構成	指節數量:3 單指自由度:2 致動器數量:4 單指致動器數量:1 兩指三指轉換:1	
工作範圍	0~180mm(左右)	
$\theta_1$ 旋轉範圍	$42^\circ \sim 138^\circ$	
$\theta_2$ 旋轉範圍	$0^\circ \sim 50^\circ$	
整體重量	2400g	

### 2.1.3.2 機械夾爪順應效果與前代的比較

圖 2-14 為實驗室第一代由昱辰學長設計的五連桿被動包覆是夾爪，而圖 2-15 為實驗室第二代立言學姐所設計的改良五連桿被動包覆式夾爪，兩者的包覆過程和數學模型分別由圖 2-16 和圖 2-17 以及圖 2-18 和圖 2-18 所示。由於第二代夾爪的 CF 桿無法保持一定的角度造成了夾取上一定的困難，因此這個設計並沒有被正式使用，以下將會以第一代夾爪與本實驗設計的夾爪進行比較。

#### (a)傳力角比較：

由表 2-9 中列出的  $\theta_1$  旋轉範圍可以了解到此新設計的夾爪傳力角不會出現 0 度或 180 度且在工作範圍內傳力角的變化在  $42^\circ \sim 138^\circ$  以內，第一代夾爪的傳力角變化在  $45^\circ \sim 135^\circ$  以內，此兩數值為相近的。

#### (b)工作範圍比較：

本研究所設計的夾爪工作範圍為 0~180mm 而第一代的夾爪工作範圍為 0~70mm，因為兩個夾爪預計夾取的目標大小不同，因此無法直接比較。然而，由圖 2-16 可以看出，若第一代夾爪要增加工作範圍，桿件 CB 需要增長，若希望被

動包覆的效果不變則桿件 AE 和桿件 DE 也需要增長，而這將會增加夾爪的寬度。與第一代夾爪不同的是，新設計的夾爪若想要增加工作範圍只需要單純的增長桿件 AD 的長度，夾爪並不會增加不必要的體積。

(c)順應效果比較：

新設計的夾爪在被动自由度尚未被觸發的情況下， $\theta_2$  皆為固定角度，並不會因為  $\theta_1$  的旋轉而改變，這也表示，不管夾取任何大小的物體需觸發被動自由度的力皆是相同的。然而，第一代的夾爪當  $\theta_5$  增加的同時， $\Delta\theta_4$  也會隨之增加，其代表的是當輸入桿 AE 轉角越大(圖 2-18 所示)，必續施予夾爪越大的外力，才能觸發被動自由度將四連桿變成五連桿。

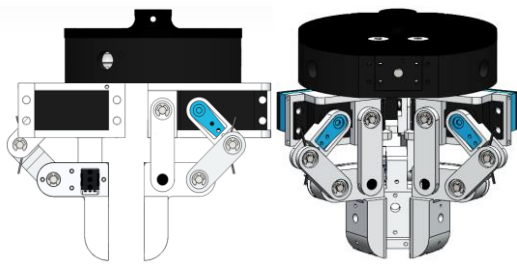


圖 2-14 第一代夾爪外觀[32]

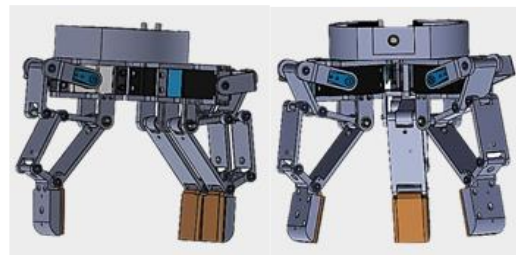


圖 2-15 第二代夾爪外觀

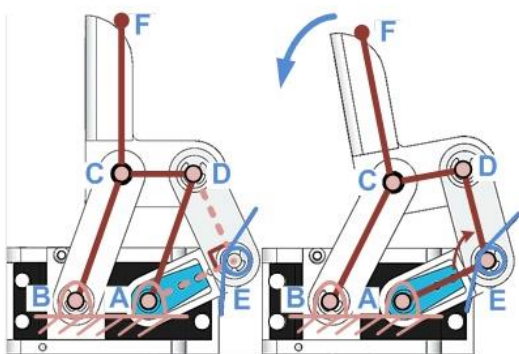


圖 2-16 第一代夾爪包覆示意圖[32]

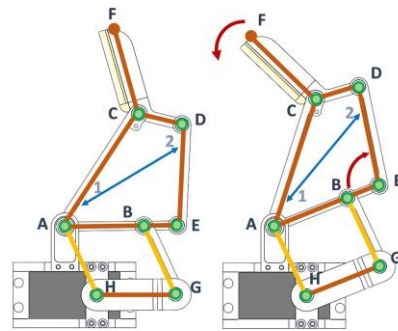


圖 2-17 第二代夾爪包覆示意圖

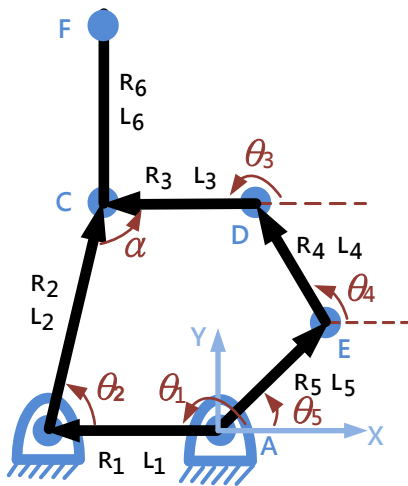


圖 2-18 第一代夾爪數學模型

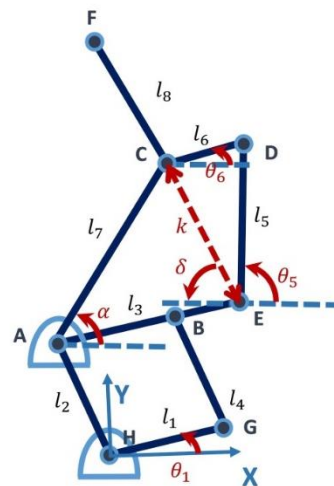


圖 2-19 第二代夾爪數學模型

## 2.2 感測系統設計

### 2.2.1 近接感測器設計

在夾爪指頭上安裝進階感測器是現今常見的做法，原因是因為機械夾爪的金屬指頭沒有如人體的柔軟肌膚可以在碰觸物體後輕易的調整姿態，因此需要在碰觸到物體之前完成校正定位誤差和完成調整夾取姿態的步驟。在近接感測器的挑選上，有些選擇紅外線[24-27]、有些選擇相機[23]。相機的優點是利用兩個視角即可重建整個畫面中的深度資訊，可以獲得詳細的物體表面資料，然而其受限於相機大小的限制，通常會使得夾爪指頭的體積變得過於龐大。紅外線近接感測器的優點是體積較小而較不會影響夾爪指頭的尺寸，其缺點為無法獲得完整的深度資訊且容易受物體顏色差異影響，為了獲得更充分的深度資訊和了解物體的表面形狀，紅外線近接感測器多會設計成陣列的形式。

研究中預計將欲夾取的物體作形狀上的簡化後再夾取，以達到加速建模時間和加速計算夾取姿態的目標，而為了讓夾爪可以更好的順應模型的物體表面形狀也為了充分的運用夾爪的被動包覆效果和兩指三指模式的轉換功能，設計了由紅外線感測器構成的紅外線陣列近接感測器。選擇紅外線當作近接感測器的原因有兩點，第一點為不希望因為增加了近接感測器而增加太多夾爪指頭的尺寸，第二點

為論文中所設計的夾爪能增加包覆效果的功能只有一個被動自由度和兩指三指模式的轉換，要能運用到這兩個功能並不需要完整的深度資訊，只需要陣列形式的紅外線感測器即可達到，之後會再做更詳細的說明。

以下會先介紹如和設計紅外線陣列感測器以及其電路的設計，之後會再介紹如何以這個紅外線陣列近接感測器充份運用夾爪被動自由度和兩指三指模式轉換達到增加機械夾爪的包覆效果，

### 2.2.1.1 紅外線陣列近接感測器的設計

夾爪的座標系如圖 2-20 所示，圖中還展示了各指頭的編號和兩指三指的轉換。設計紅外線陣列近接感測器最主要的目的有兩個，第一個為偵測物體表面是否適合包覆夾取以充分利用夾爪被動自由度的功能(如圖 2-30 所示)，第二個為偵測物體表面是否適合手指張開的抓取方式以充分利用夾爪兩指三指模式轉換的功能(如圖 2-31 所示)。在設計紅外線陣列近接感測器時即圍繞著這兩點做設計。

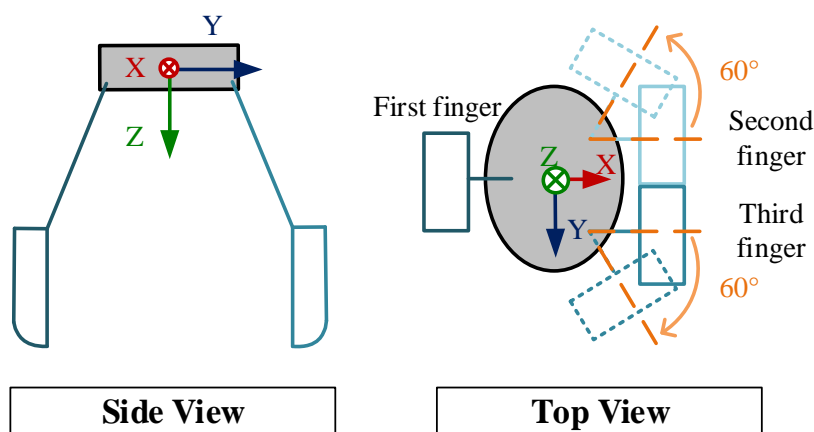


圖 2-20 夾爪坐標系、模式轉換示意圖

首先，先介紹如何設計紅外線陣列近接感測器使其可以偵測物體表面是否適合包覆夾取。如圖 2-21 所示，研究中期望近接感測器偵測到指頭前方為一個曲面後，夾爪再向下，爪取後即可觸發被動自由度對物體進行包覆。若需要偵測物體表面是否適合包覆，至少需要三顆紅外線感測器，如圖 2-22(a)所示，只有兩顆紅外線感測器只能偵測到直線，即圖 2-23 中的(a)、(b)、(c)三種情況；然而，如圖 2-22(b)



所示，若有三顆紅外線感測器則能偵測到圖 2-23 中的(d)、(e)兩種情況，其中的(d)情況極為適合觸發被動自由度以進行包夾取的情況。

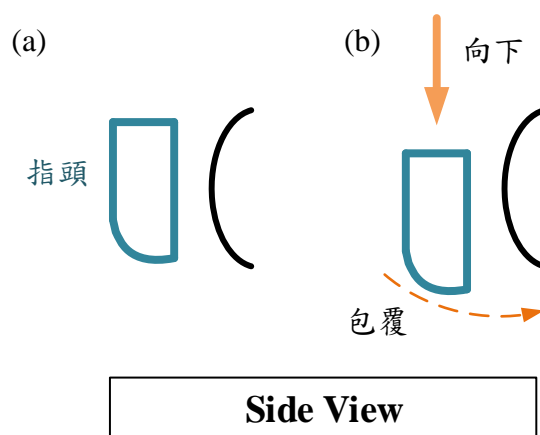


圖 2-21 夾爪被動自由度觸發示意圖

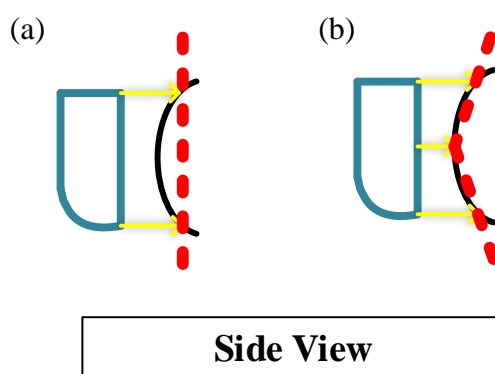


圖 2-22 紅外陣列偵測示意圖 (a)兩顆紅外線 (b)三顆紅外線

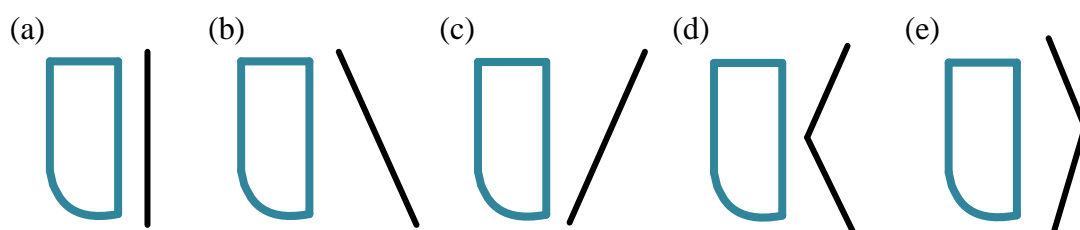


圖 2-23 三顆紅外線能判別的狀況

接下來會介紹，如何設計紅外線陣列近接感測器使其可以偵測物體表面是否適合兩指張開的抓取方式。如圖 2-24 所示，當指頭偵測到前方為一個曲面後，即會打開第二指和第三指進行順應性更好的夾取方式。如同上面有提到的，要偵測曲面至少需要三顆紅外線感測器，而兩顆紅外線感測器可以偵測直線的情形，因此，將紅外線陣列設計成如圖 2-25 所示每指有兩顆的方式，當第二指和第三指閉合時（圖 2-25(a)所示），有四顆紅外線感測器可以偵測表面是否為曲面，若是，則第二和第三指會漸漸張開，直到第二和第三指與物體表面為平均貼何時再停止（如圖 2-25(b)所示）。

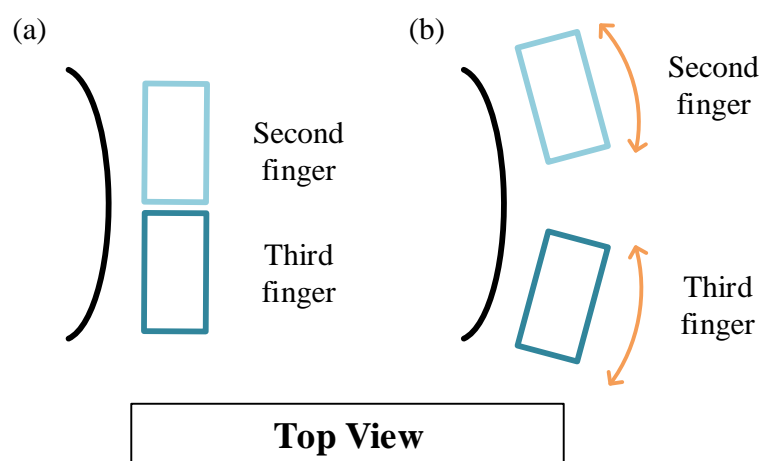


圖 2-24 模式轉換觸發示意圖

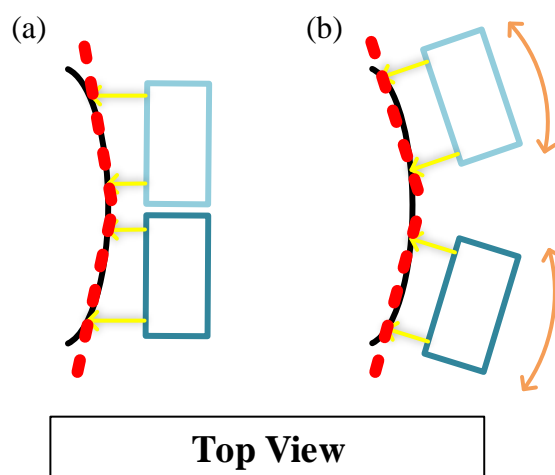


圖 2-25 紅外線列偵測控制模式轉換示意圖

總結上述，最後將紅外線陣列近接感測器設計成如圖 2-26(a)所示 3×2 的形式，除此之外還在紅外線陣列底部設計了一個有避障功能的第七顆紅外線感測器。圖 2-26(b)為將紅外線陣列近接感測器安裝至夾爪上的實體圖。

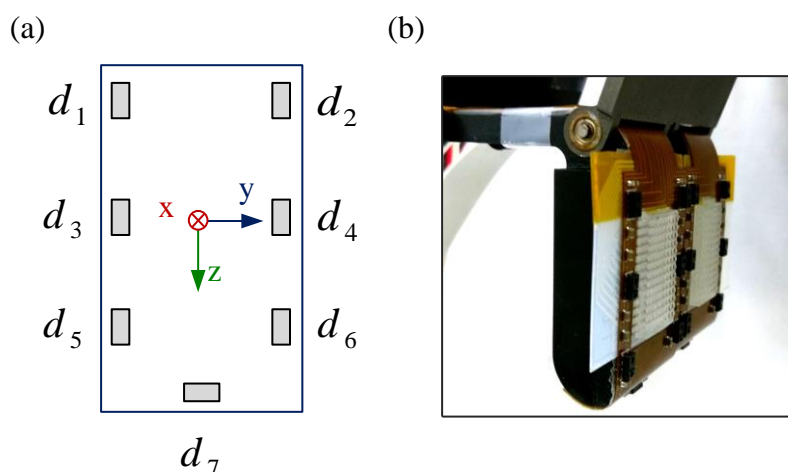


圖 2-26 (a)近接感測器設計結果示意圖 (b)進階感測器實體圖

### 2.2.1.2 紅外線陣列近接感測器電路設計

紅外線感測器是選用 Broadcom Limited 的 APDS-9130，規格如表 2-10 所示，每一顆紅外線陣列皆為一個 I2C 模組，如何將三隻指頭的 21 個 I2C 模組的訊號彙整至控制端(PXI 7831R)以及確保訊號的穩定是電路設計的重點，紅外線陣列近接感測器電路板如圖 2-27 所示，為了能夠貼符再夾爪指頭上，紅外線陣列近接感測器是以軟式電路板製作。

I2C 接上電源後是透過 SDA 和 SCL 兩條訊號線與控制端溝通，兩條訊號線皆需要再接一個拉升電阻(pull up resistance)，圖 2-27 中舊版和新版紅外線陣列電路板的差別主要是在於將 21 個 I2C 模組的兩條訊號線彙整至 PXI 7831R 的方式不同。舊版和新版電路板皆是將訊號線接出後連接至一個訊號分配版上再接回 PXI 7831R 的 DI/O 孔位上(如圖 2-28 所示)，拉升電阻設計在訊號分配版上，而為了讓 I2C 的訊號穩定，紅外線陣列電路板上每個紅外線模組的電源皆接有一電容近進行穩壓的動作。新舊電路版不同的地方是，舊版電路的設計方式是將 7 顆紅外

線感測器的 SDA 和 SCL 訊號線皆單獨接出，也就是控制端必須同時控 21 個 I2C 模組，然而一個 I2C 模組所需要的 FPGA 資源非常多，一個 PXI 7831R 的 FPGA 最多只能允許同時控 9 個 I2C 模組。為了在不增加 PXI 7831R 的情況下同時控制所有的 I2C 模組，改變了訊號彙整的方式。



圖 2-27 近接感測器軟式電路板舊版與新版實體圖比較

新電路版的設計概念如圖 2-29 所示，利用一個 mosfet 開關每一個 I2C 各自的 SDA 訊號並共用 SCL 訊號，當需要某一個紅外線感測器的訊號時即打開其 mosfet 並關掉其紅外線感測器的 mosfet，這樣即可在 FPGA 端只用三組 I2C 模組控制 21 個紅外線感測器的 I2C 模組。設計上，因為 SCL 訊號線共用，紅外線陣列需要接回訊號分配版的電線總數將會變少許多，如此一來可以改較小的接頭，也可將電路版上的電線設計的較粗增加訊號穩定度並避免軟式電路板在拉扯的過程中是線路斷在電路版裡面。Mosfet 和拉升電阻是設計在訊號分配版之中，關於訊號分配版更詳細的設計方式會在 2.3.3.7 紅外線陣列訊號分配板中說明。

表 2-10 APDS-9130 規格表

型號	APDS-9130
尺寸	3.94×2.36×1.35
I2C 介面	最高支援 400 kHz
可編成範圍	2.7 ms to 8 sec
量測距離	20~100 mm

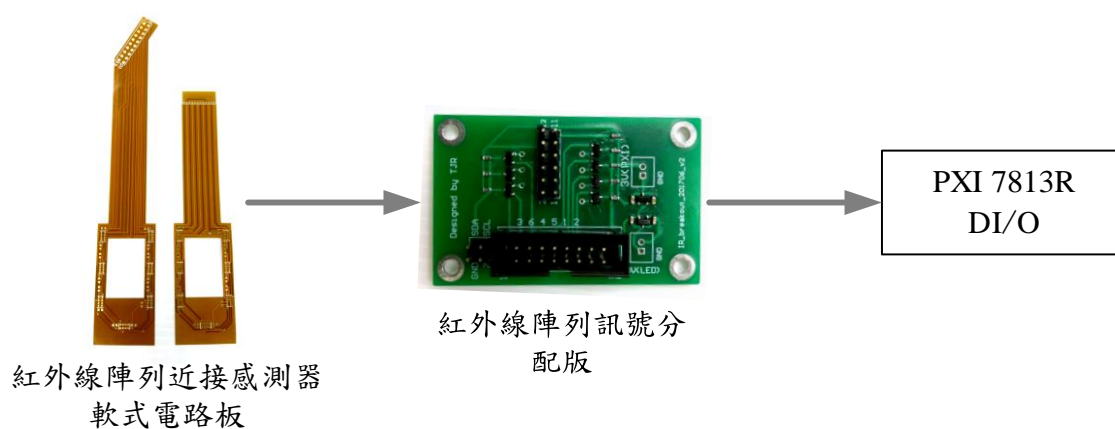


圖 2-28 近接感測器訊號傳輸示意圖

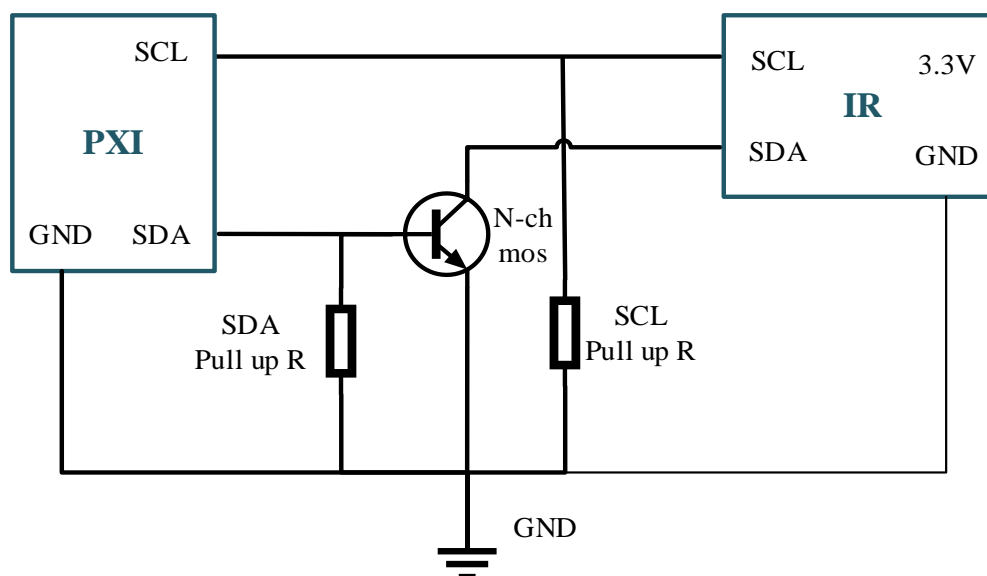


圖 2-29 新版近接感測器電路設計概念圖

### 2.2.1.3 包覆模式判斷

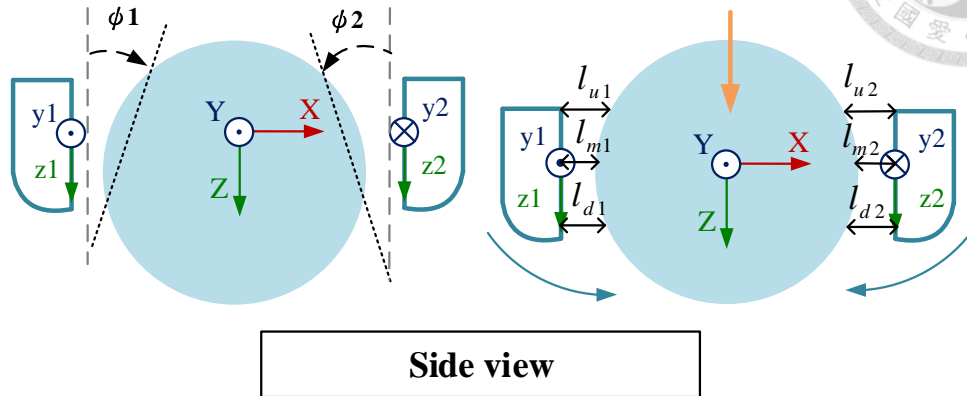


圖 2-30 包覆模式判斷示意圖

包覆模式的判斷如(式 2-3)所示，其中， $i$  為指頭的編號， $d$  為從紅外線感測器上獲得的數值， $V_a$  為從實驗中獲得的經驗參數， $i_{IR}$  為一紅外線感測器的參數，其值為 1023。

$$\begin{aligned}
 & \text{if } a = \frac{d_{1i} + d_{2i} + d_{3i} + d_{4i}}{4} - \frac{d_{5i} + d_{6i}}{2} > V_a, V_a = 30 \\
 & \varphi_i = \arctan\left(\frac{a}{i_{IR}}\right), \varphi_i \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\
 & \text{if } \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}{3} > -\alpha, \alpha > 0 \\
 & Z = Z_{threshold} \frac{2}{\pi} \left( \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}{3} + \alpha \right) \\
 & \text{if } Z[t] < Z[t-1] \text{ and } d_{7i} > 20, \\
 & \text{the gripper will go down Z.}
 \end{aligned} \tag{式 2-3}$$

#### 2.2.1.4 兩指三指模式轉換判斷

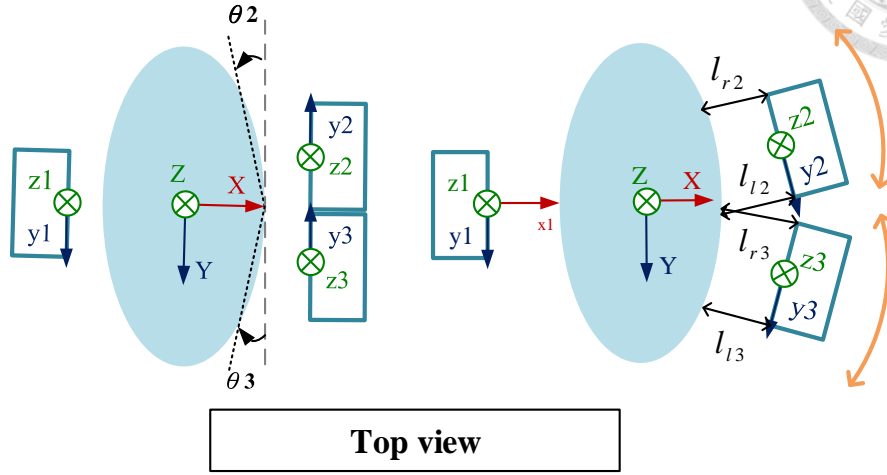


圖 2-31 兩指與三指模式轉換判斷示意圖

兩指三指模式轉換的判斷如(式 2-4)所示，其中， $i$  為指頭的編號， $d$  為從紅外線感測器上獲得的數值， $V_b$  為從實驗中獲得的經驗參數， $i_{IR}$  為一紅外線感測器的參數，其值為 1023。

$$b = \frac{d_{2i} + d_{4i} + d_{6i}}{3} - \frac{d_{1i} + d_{3i} + d_{5i}}{3}$$

$$\text{if } |b| > V_b, V_b = 50$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{b}{i_{IR}}\right), \theta_i \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

$$\text{if } \theta_2 \theta_3 < 0, \text{ the second and the third finger open.}$$

(式 2-4)



### 2.2.2 壓力陣列軟墊設計

在夾爪上安裝壓力陣列是近期主流的研究方向，壓力陣列的資訊可以用來確認夾取的成功與否和夾取時指頭上力分布的情形，近期更有許多的研究利用壓力陣列感測力的變動來偵測夾取時是否有滑動的產生，以達到可以自動調節夾取力道的功能。

本研究所使用的壓力陣列為工研院所研製，包括了感測陣列和電路模組，外觀如圖 2-32 所示。壓組式感測陣列為應用印刷技術將導電墨水印於軟性聚合物上，其利用正向力的改變導致內部電組受到變形而電阻改變進而造成量測電壓的變化來反算所受到的正向力。電路模組的主要功能是將感測陣列的類比訊好轉化為數位訊號，傳輸介面為 RS232，其 Baud Rate 為 2457600，實際使用時取樣頻率可達 1000Hz。

使用時壓力陣列上通常需要覆蓋一層軟墊，其功能有增加壓力陣列覆蓋於不同曲面的覆蓋能力和提供緩衝，也可以較好的分散受力以及提供夾取時所需的摩擦力。在軟墊的選擇上，雖然較厚的軟墊可以較好的均勻分散受力，但是較厚的軟墊同時也會吸收較多的力使壓力陣列的解析度下降，因此一個合適的軟墊是需要透過實驗比較後挑選的。

原先實驗室的壓力陣列使用的是 1mm 厚矽膠材質的軟墊，但是實驗後發覺其仍然無法很好的反映出接觸的面積形狀，因此決定嘗試製作軟墊並在軟墊上設計突起點，期望突起點可以使壓力陣列更好的反應出接觸的面積形狀。參考了不同的論文([37, 38])後發現有兩種形狀的突起點最常被用於壓力陣列中，其中一為圓頂(dome)，另一為平頂(bump)，如圖 2-33 所示。本研究中以這兩種形狀為基礎設計並製作一系列材質為 PDMS 的不同規格軟墊，並依實驗結果在其中挑選出適合並且符合研究中需求的軟墊。



圖 2-32 壓力陣列實體圖

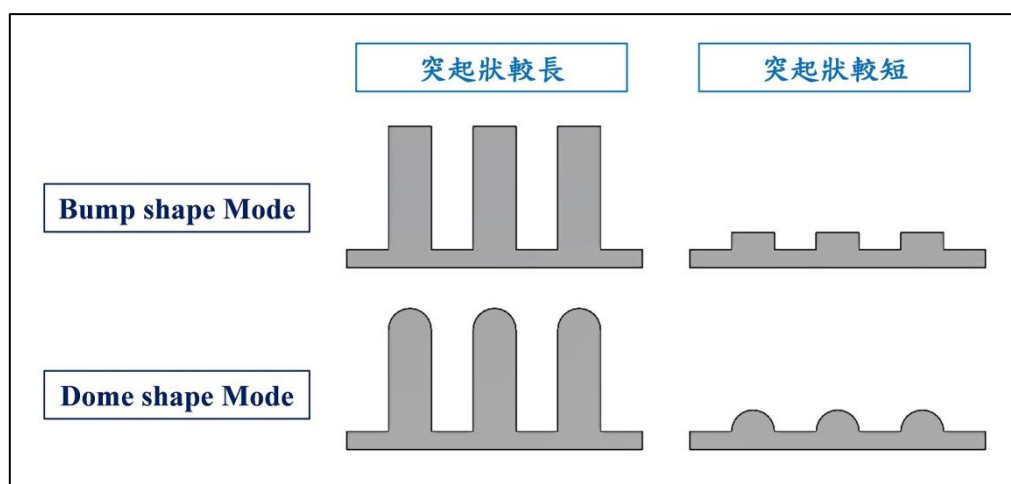


圖 2-33 兩種突起狀與四個設計方向示意圖

### 2.2.3.1 軟墊的設計

軟墊的設計方式為按照壓力陣列的大小和規格設計不同的模具後以 PDMS 為材料製做。壓力陣列尺寸為 19mm×19mm，其範圍內有 13×13 個陣列數，模具按照壓力陣列規格設計的剖面上視圖如圖 2-34 所示；選擇 PDMS 的原因是其具有良好的可塑性、可撓性，且一般情況下被認為是惰性、無毒、不易燃的安全材質。

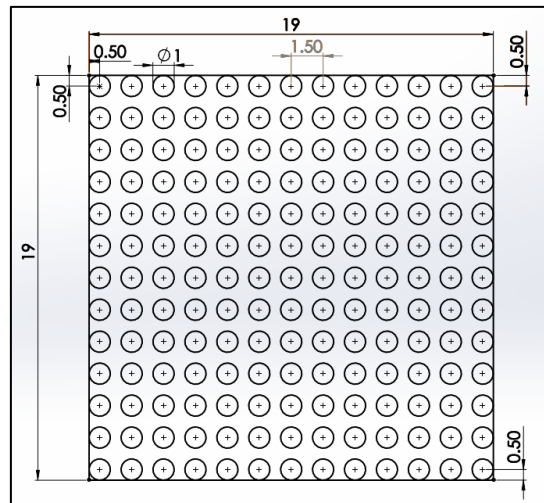


圖 2-34 軟墊上視圖規格（單位為 mm）

軟墊規格需要設計的部分有三個方向，一為軟墊突起點的長短、二為軟墊基底厚度（圖 2-35 所示）、另外還有與紅外線感測器整合的限制條件，以下會就這三個方向分別說明如何設計不同的軟墊。

#### (a)設計軟墊突起狀的長度

突起狀的設計方向主要分為四種，如圖 2-33 所示。一開始傾向於將突起狀設計較長，因為理論上突起狀越長可以提供越多的壓縮量，越能保證施於那一點的力不會被分散至其他點上，但是實際測試後發現，這樣的設計只有在力是垂直施於壓力陣列上（也就是為正向力）或為面接觸才會有較好的表現；若當物體有移動的情形發生（側向力）或是接觸形狀為點（例如和球接觸）或是線（例如和圓柱接觸）等都會使柱狀物發生傾倒，傾倒的現象不僅會使壓力陣列對於接觸面形狀的判斷下降許多，也會使其提供於夾取的摩擦力不足，因此直接淘汰了突起狀較長的設計並往突起狀較短的方向進行設計並測試。

往突起狀較短的方向測試後發現，突起狀越短則軟墊越接近於平面，其對於判別接觸形狀的幫助就會越小，但是能提供的摩擦力會越大，然而軟墊所提供的摩擦力夾取時是非常重要的，因此設計的軟墊是建立在可以提供充足的摩擦力的前提下。經過測試後將所有設計的軟墊平頂(bump)柱狀長度都選在 0.3mm、圓頂(dome)



柱狀長度都選在 0.5mm (其與圖 2-34 中每一個小陣列點的半徑相同)，兩者剖面圖如圖 2-36 所示。

#### (b)設計軟墊基底厚度

軟墊厚度的設計方面，因為紅外線有一 1.2mm 的厚度，再加上紅外線軟式電路板 0.15mm 的厚度，為了確保物體接觸壓力陣列後下壓不會接觸到紅外線陣列，期望的厚度為 2mm。但是，厚度越厚的軟墊會使得壓力陣列對於力的解析度下降，因此設計了不同厚度的軟墊後以實驗進行比較確認 2mm 厚度的軟墊是否會使得壓力陣列對於力的解析度下降很多。

#### (c)與其他感測器結合的限制條件

除了上述兩個需要設計的方面之外，還有整合紅外線陣列與壓力陣列於夾爪上的空間條件。在不希望再增加指頭大小的前提下，指頭的空間不夠同時安裝上紅外線陣列與完整的 13×13 的壓力陣列，因此需要將壓力陣列的陣列數下修。

將陣列數下修的缺點是對於整個夾取面的資訊量會減少，但是優點是每一個陣列點的解析度會相對提高且傳輸速度也會提高。在資訊量和指桿空間兩者的取捨之間，最後希望將壓力陣列縮至 13 (長) × 8 (寬) 個陣列數，其與原本 13×13 個陣列數的比較會在實驗中測試並確認將壓力陣列數下修至 13 (長) × 8 (寬) 式否合理。

總結上述，最終設計的軟墊規格平頂 (bump) 柱狀長度都選在 0.3mm、圓頂 (dome) 柱狀長度都選在 0.5mm，並在這兩個突起形狀下改變軟墊厚度與陣列數。所有設計的軟墊規格如表 2-11 所示，實體圖如圖 2-37、圖 2-38 所示。

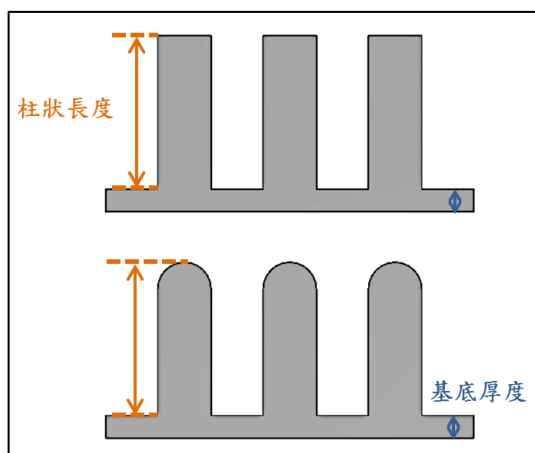


圖 2-35 軟墊設計方向示意圖  
(柱狀長度和基底厚度)

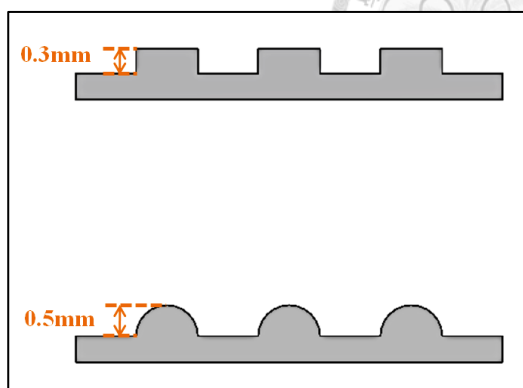


圖 2-36 圓頂和平頂最終選擇的柱狀長度示意圖



圖 2-37 軟墊模具實體圖

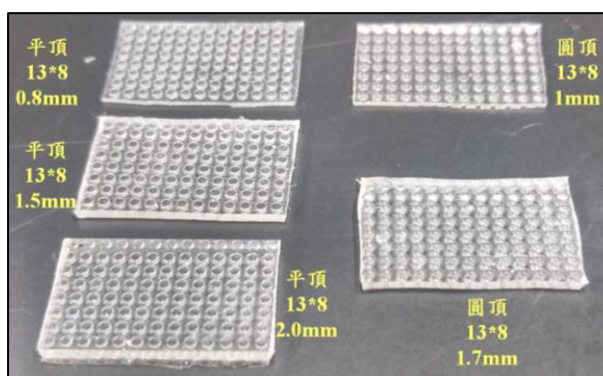


圖 2-38 軟墊實體圖

表 2-11 所有設計軟墊的規格表

規格	突起形狀	突起狀的長度	基底厚度
平面 13×8	無	無	1mm
平面 13×8	無	無	2mm
平頂 13×8	Bump	0.3mm	0.5mm
平頂 13×8	Bump	0.3mm	1.2mm
平頂 13×8	Bump	0.3mm	1.7mm
平頂 13×13	Bump	0.3mm	0.5mm
平頂 13×13	Bump	0.3mm	1.2mm
圓頂 13×8	Dome	0.5mm	0.5mm
圓頂 13×8	Dome	0.5mm	1.2mm
圓頂 13×13	Dome	0.5mm	0.5mm
圓頂 13×13	Dome	0.5mm	1.2mm



### 2.2.3.1 實驗設計

實驗架設如圖 2-39 所示，其中彈簧的作用為將力緩慢的施予後端，避免虎鉗只轉動一點力就上升許多，而壓力陣列在整個實驗過程都是固定在壓克力背板相同的位置上，其用意為減少每次實驗的差異性。實驗主要比較的部分有兩個：

1. 比較不同突起點對於壓力陣列的影響，且期望有突起點的軟墊相比於沒有突起點的軟墊對於壓力陣列可以達到更好的效果。
2. 比較不同厚度對於壓力陣列的影響，且期望的厚度是 2mm，因此希望 2mm 厚度的軟墊相比於 1mm 的軟墊對於力的解析度不要下降太多。

用來比較這兩部分的標準為壓力標準差(式 2-5)和壓力陣列值總合對於施予的力的變化，壓力標準差對與施予的力的關係用來檢測哪種軟墊將力均勻分散的效果最好，壓力陣列值總合與施予的力的關係用來檢測軟墊吸收掉力的多寡。

實驗的過程大致上為：將軟墊適當的貼於壓力陣列上，將力規歸零後，轉動虎鉗推動物體將力予軟墊和壓力陣列，轉動至超過 30N，待力規值和壓力陣列值穩定後以每次減少力規值 5N 的方式自 30N 開始記錄壓力陣列值總合和壓力標準差，記錄到力規值為 5N 時。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}{N}} \bigg/ \sum_{i=1}^N p_i \quad (\text{式 2-5})$$

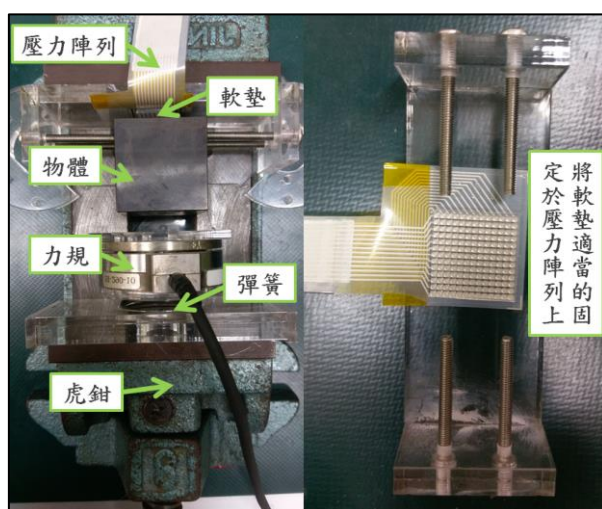


圖 2-39 實驗設置圖



### 2.2.3.1 實驗結果

(a)從圖 2-40 可以看出：

13×8 的軟墊對壓力陣列總值的解析度都高於 13×13 的軟墊，且在 13×8 的軟墊之中，有圓頂或平頂的軟墊解析度皆高於沒有突起點（平面）的軟墊。

(b)從圖 2-41 可以看出：

有圓頂或平頂的軟墊對壓力標準差皆比沒有突起點（平面）的軟墊越快趨於穩定，但是，有突起點的軟墊對壓力陣列標準差的表現都是差不多的。

(c)從圖 2-42 可以看出：

平頂的軟墊對壓力總值的解析度較高。

(d)從圖 2-43 和圖 2-44 可以看出：

從圖 2-43 和圖 2-44 可更清楚的看出在(a)點中由圖 2-40 得到的結論，不論圓頂或平頂，13×8 的軟墊對壓力陣列總值的解析度都高於 13×13 的軟墊，也可看出，厚薄造成壓力總值解析度的差異比 13×13 和 13×8 造成的影響小。

(e)從圖 2-45 可以看出：

圖 2-45 可以更清楚的看出在(b)點中由圖 2-41 中得到的結論，雖然圓頂或平頂的軟墊對壓力陣列標準差的表現都是差不多的，圓頂的壓力陣列標準差相比於平頂更快趨於穩定。

(f)從圖 2-46 和圖 2-47 可以看出：

由圖 2-46 和圖 2-47 可以得以下兩個結論。13×13 或 13×8 的軟墊與壓力標準差的表現沒有明顯的相關性，以及圓頂的軟墊在壓力標準差的表現上比較優秀。

圓頂不論是 13×13 和 13×8 或軟墊的厚薄的差別都對壓力陣列標準差的表現幾乎沒有影響，然而，平頂卻有較明顯的當軟墊越厚對於壓力標準差的穩定效果越好的表現。因此可以推斷在壓力標準差的表現上面圓頂確實比平頂優秀。

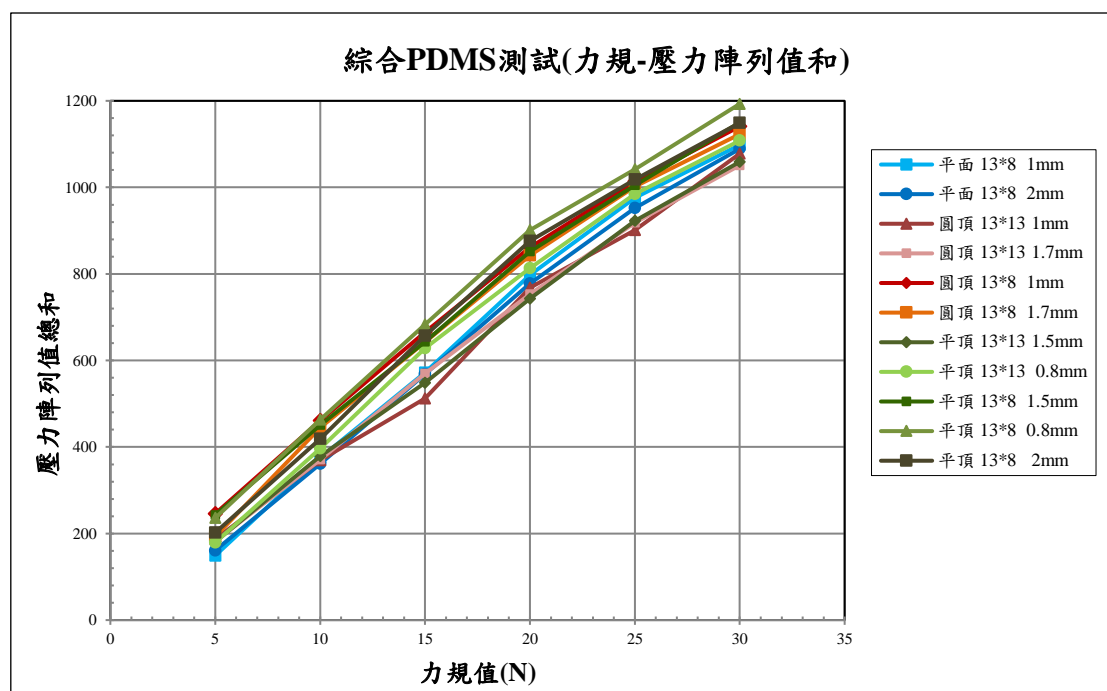


圖 2-40 力規與壓力陣列值和關係圖(所有軟墊)

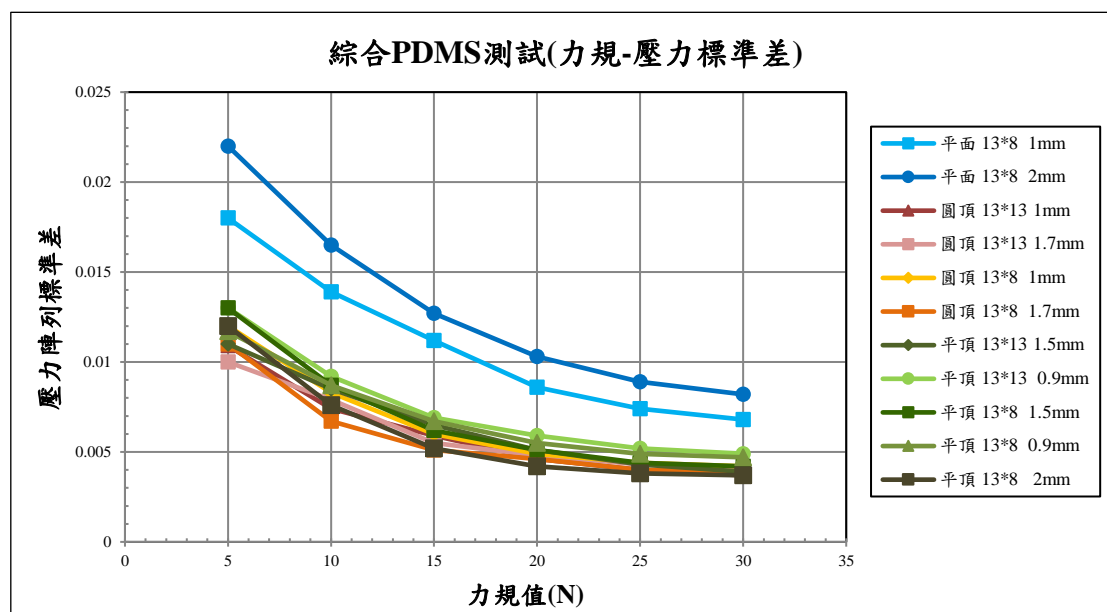


圖 2-41 力規與壓力標準差關係圖(所有軟墊)

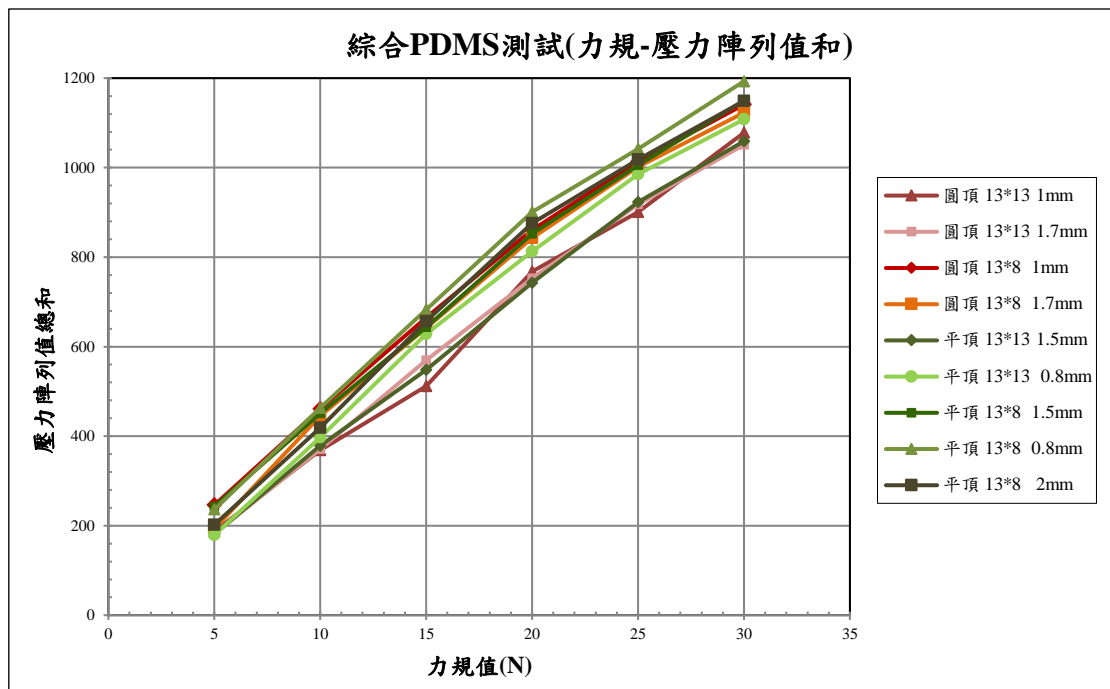


圖 2-42 力規與壓力陣列值和關係圖(圓頂和平頂軟墊)

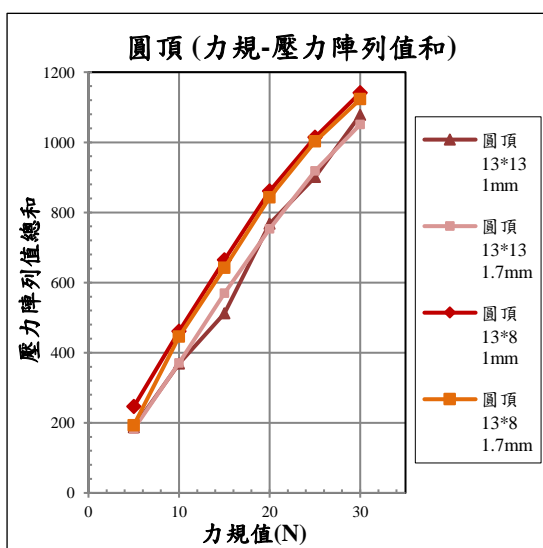


圖 2-43 力規與壓力陣列值和關係圖(圓頂軟墊)

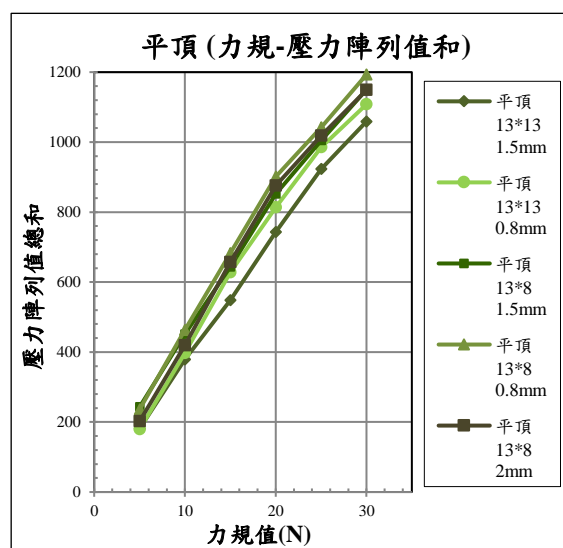


圖 2-44 力規與壓力陣列值和關係圖(平頂軟墊)

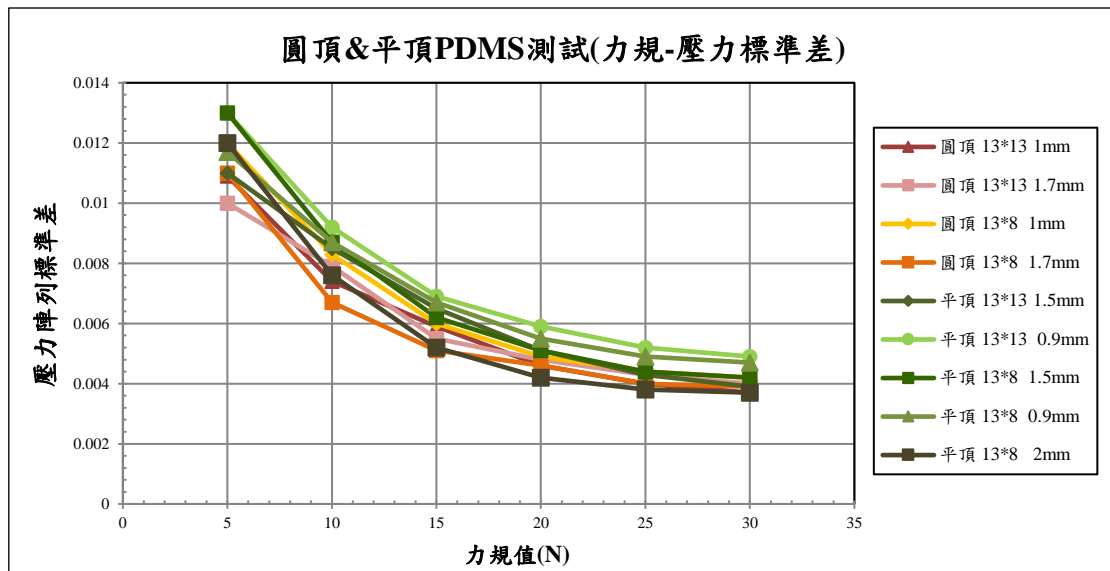


圖 2-45 力規與壓力標準差關係圖(圓頂和平頂軟墊)

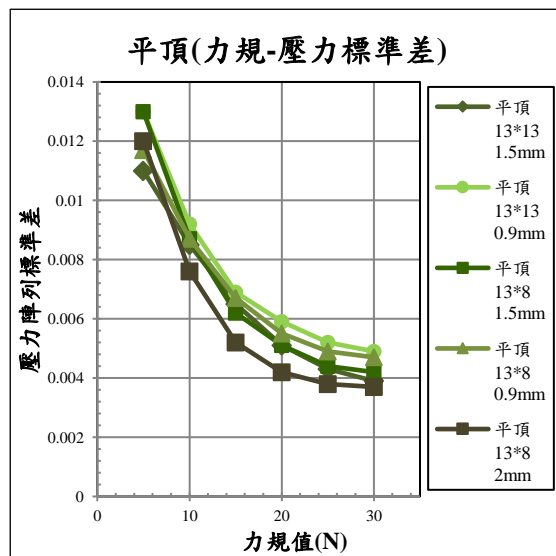
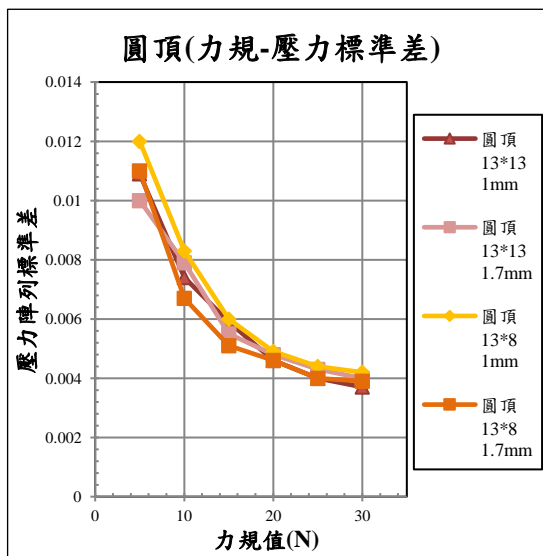


圖 2-46 力規與壓力標準差關係圖(圓頂軟墊)      圖 2-47 力規與壓力標準差關係圖(平頂軟墊)



### 2.2.3.1 壓力陣列軟墊設計總結

總結實驗結果後可以得到以下三點結論：

1. 將  $13 \times 13$  的規格改成  $13 \times 8$  的規格其在壓力陣列值總和的解析度上確實有提高，且在壓力標準差的表現上，此條件與之沒有明顯的關係。因此，在可以接受的資料點下降的範圍之內，將  $13 \times 13$  的規格改成  $13 \times 8$  的規格是可行的。
2. 在平頂和圓頂的選擇上，不論是在壓力陣列總值或壓力標準差上，平頂和圓頂都比沒有突起點的平面表現的好很多，但是，單純平頂和圓頂之間在兩個條件的表現上都沒有很大的差別，然而就如同上面四點所提到的，平頂對於壓力陣列值總和的解析度較圓頂高了一點，而圓頂對於壓力標準差穩定的效果較平頂高，但是因為都沒有很決定性的差別，因此在考慮平頂可以給予的摩擦力比圓頂大很多的條件下，最後是決定選用平頂。
3. 在厚度的選擇上，考慮到需要整合紅外線陣列，因此期望的厚度是定在 2mm。就實驗結果看起來，1mm 和 2mm 厚度對於壓力總值解析度的影響很小，是在完全可以接受的範圍內。而在厚度對於壓力標準差的影響上，圓頂的部分厚薄沒有什麼差異，但是在平面和平頂的部分，軟墊越厚皆越快穩定。因此，選擇 2mm 的厚度是沒有問題的。

最終選擇的軟墊規格為，大小  $13 \times 8$ 、厚度 2mm、平頂的軟墊，從圖 2-40 和圖 2-41 可以看出，此規格的軟墊在壓力陣列值總和和壓力標準差兩者都有很好的表現。



## 2.3 機電系統架構

系統整體的機電架構如圖 2-48 所示，主要分三個部分，手臂控制端、視覺定位端和夾爪控制端，三個部分的資訊將彙整至 PXI 控制核心作控制。控制核心為 National Instrument 的產品，包括 PXI 8110 和 PXI 7813R(如圖 2-49 所示)，PXI 8110 配備 2.26 GHz 四核心 PXI 嵌入式控制器，而 PXI 7813R 具有 160 個數位通道輸出、輸入，並有搭載 Virtex-II 3M Gate FPGA。以下將依手臂、視覺定位和夾爪三個部份說明如何彙整各端訊號至 PXI 控制核心。

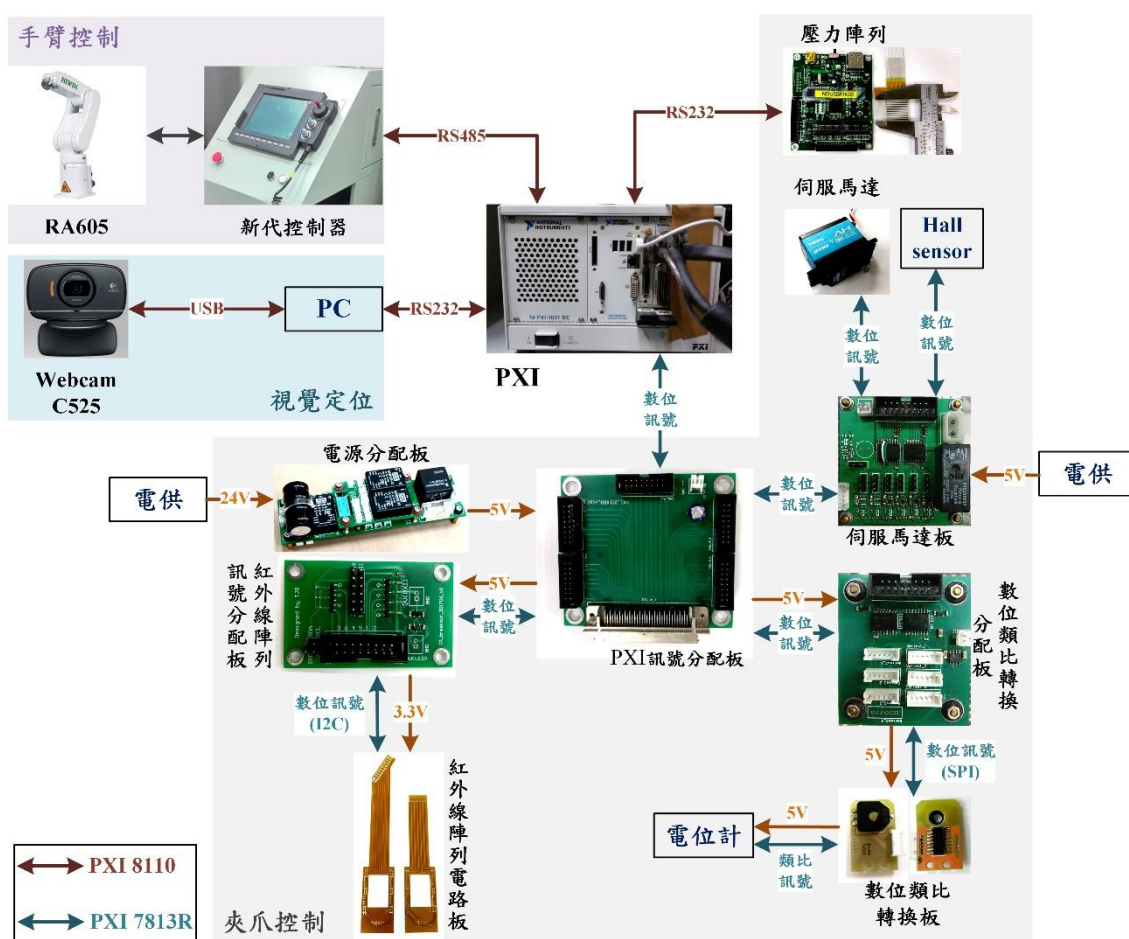


圖 2-48 系統的整體機電系統架構圖

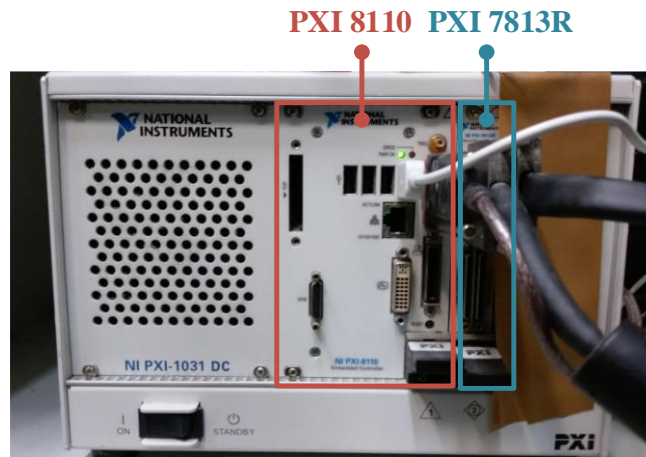


圖 2-49 PXI 實體圖

### 2.3.1 手臂控制機電架構

研究中實驗所使用的手臂是上銀的 RA605 六軸機械手臂(圖 2-50(a))，機械手臂控制器是新代科技的 21R-A 控制器(圖 2-50(b))。

手臂控制器與 PXI 8110 是透過 RS485 並通過 Modbus 通訊協定進行溝通，控制器有提供 Joint space 和 Cartesian space 的控制模式，PXI 端可以與控制器溝通指定手臂的目的位置或馬達轉角與讀取當前手臂的位置資訊。

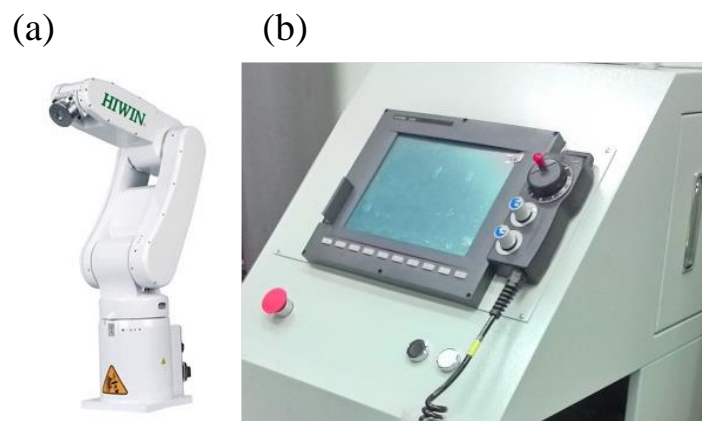


圖 2-50 (a) RA605 實體圖 (b)新代控制器實體圖



### 2.3.2 視覺定位機電架構

視覺定位的部分硬體是選用 Logitech 的 C525 Webcam，而處理影像處理的電腦配備 CPU 為 I7 6700、GPU 為 GeForce GTX 980。資訊溝通上，Webcam 透過 USB 與電腦連結，而電腦端經過影像處理定位並計算出合適的夾取姿態後通過 RS232 傳送至 PXI 8110，PXI 控制端再彙整各方資訊對手臂和夾爪夾下達命令。

### 2.3.3 夾爪控制機電架構

#### 2.3.3.1 電源分配板

電源分配板是由實驗室學長游崑舜[39]所設計，其功用是將電供的輸入電壓 24V 轉成 5V 以及 12V 供給感測器與其他電路元件。此電源分配板設計的最初目的是給馬達使用，為了抵擋馬達在高速運轉下產生之逆電動勢，電源分配板上有加上光耦合器(Optocoupler)將 24V 與其他電源的地位準隔開。除此之外，為了保護感測器不被突然開啟的電源衝擊，5V 以及 12V 的電源將透過控制端開啟 relay 後才會將電源輸出至各電路板。

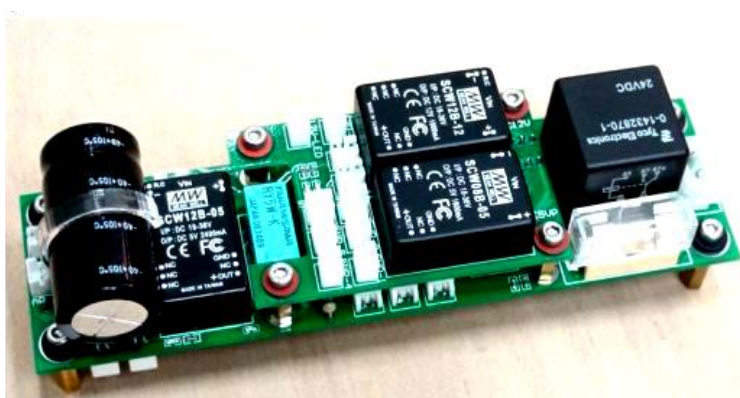


圖 2-51 電源分配版實體圖

#### 2.3.3.2 PXI 訊號分配板

一個 PXI 訊號分配板的功能是將 PXI 7813R 四個 channel 的其中一個 channel 之 40 個腳位分成實驗室標統一的分流方式(如圖 2-52 所示)，再與各式感測器或馬

達電路板連接以進行訊號的傳輸。除此之外，PXI 訊號分配板還有將電源分配板的 5V 電分給各個感測器的功能，各式感測器的電源將不需額外再接線。

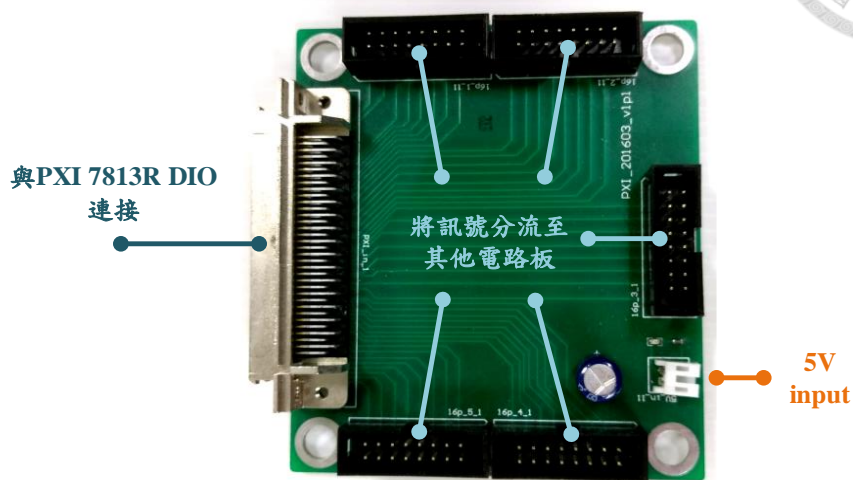


圖 2-52 PXI 訊號分配版實體圖

### 2.3.3.3 伺服馬達板

本研究設計的機械夾爪為了使體積縮小同時要求高扭力的情況下，選擇了伺服馬達作為致動器。伺服馬達板為實驗室學長游崑舜[39]所設計，有 7 個數位訊號，可最多提供 7 個伺服馬達使用。夾爪只需要 4 個數位訊號，因此還有剩下的數位訊號可以提供給夾爪上兩指三指變換的霍爾感測器使用。

透過電源分配板的 5V 電源在需要供給伺服馬達如此大電流的強況下會有電流不穩定的強行發生，因此伺服馬達板的 5V 電源是單獨由電供供應，電路板上方還有獨立的繼電器以決定是否要供電，確保在訊號正確輸入前，伺服馬達不會動作而造成機構的損壞。

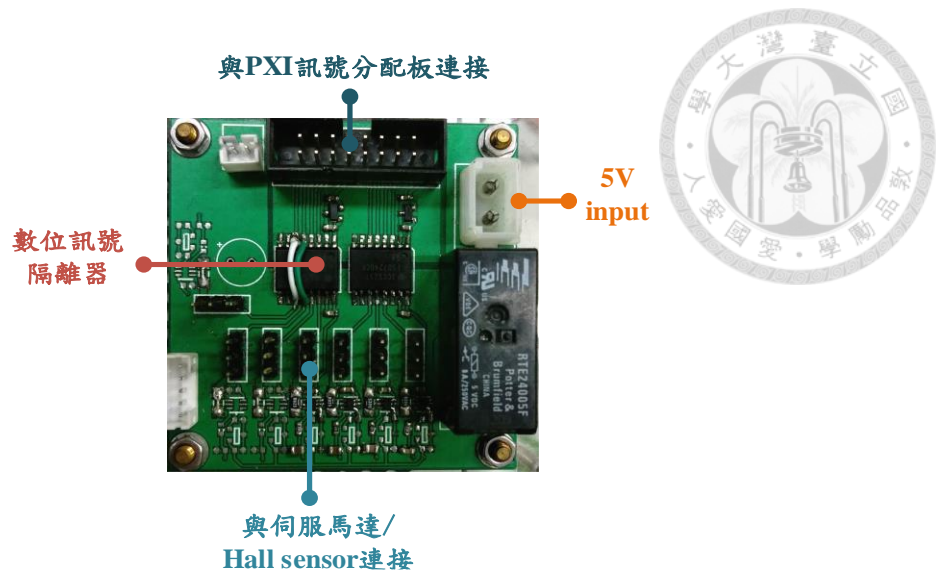


圖 2-53 伺服馬達版實體圖

#### 2.3.3.4 數位類比轉換板(電位計電路板)

在機械夾爪上的電位計訊號是類比訊號，要使用 PXI 的數位 I/O 來讀取類比訊號就必須要作類比和數位訊號的轉換，此數位類比轉換板最初是由實驗室的林育辰學長設計[32]，為了能符合本研究中的驗為計規格，重新設計後最終使用的版本如圖 2-54 所示。若類比訊號的傳輸距離太長，電壓會因此衰退而失真，因此來自夾爪的類比訊號應在夾爪附近轉成數位，如此長距離傳輸才不會有問題。

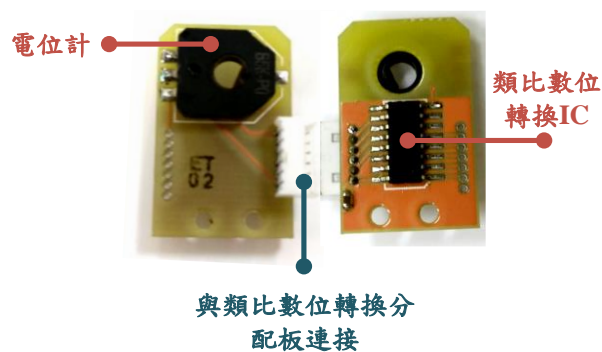


圖 2-54 數位類比轉換版實體圖

#### 2.3.3.5 數位類比轉換分配板

來自三指且經過類比數位轉換後的數位訊號最後會匯集至機械手臂上的類比數位分流板，最後以 16pin 排線回傳至數位訊號分配板。

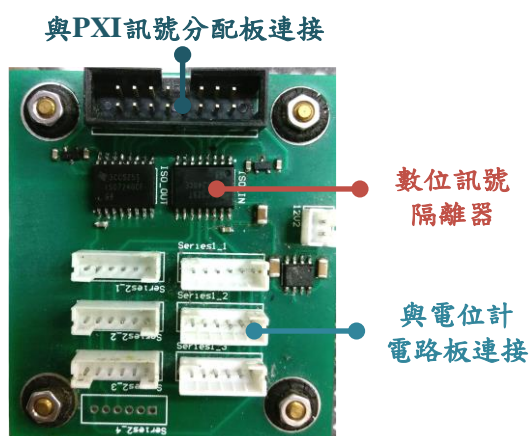


圖 2-55 數位類比轉換分配版實體圖

### 2.3.3.6 紅外線陣列訊號分配板

紅外線陣列分配板上有 I2C 的拉升電阻和開關 SDA 訊號的 mosfet，如此一來，紅外線陣列電路板指需要單獨將 SDA、SCL、電源和地的線路接出來即可，這樣的設計可以省下許多紅外線電路板的空間，方便紅外線電路板的配線。APDS-9130 的 I2C 和 LED 皆需要 3.3V 的電壓出入，因此，紅外線陣列訊號分配板上還有將從 PXI 訊號分配板輸入的 5V 轉成 3.3V 的 regulator。

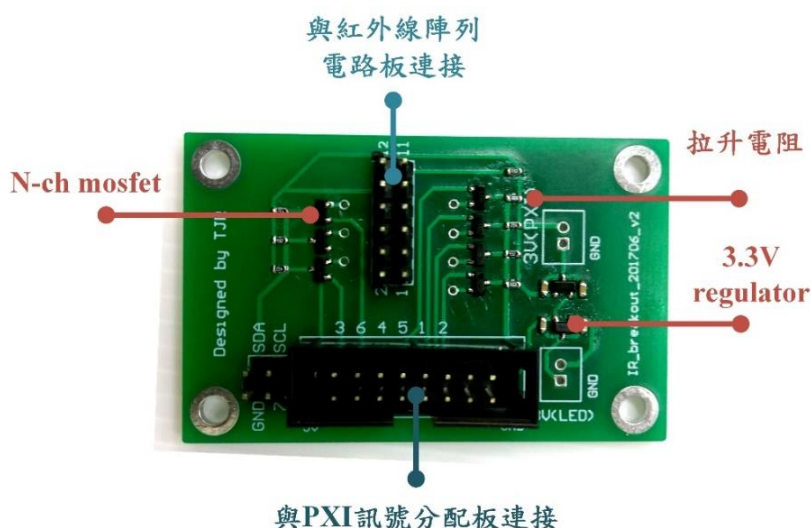


圖 2-56 紅外線陣列訊號分配版實體圖



## 2.4 手臂逆運動學推導

在本研究中，逆運動學的推倒是利用幾何方式推倒，RA605 六軸機械手臂前三軸可以決定末端位置而後三軸可以決定末端的姿態，計算上會拆成前三軸和後三軸作計算。在研究中將世界座標系定義為與手臂坐標系相同，世界座標系的定義如圖 2-57 所示。



圖 2-57 世界座標系的定義

### (a) 前三軸旋轉角度推倒

圖 2-58 為機械手臂前三軸的數學模型，其中，P 點為第三軸末端的位置，黑色數字代表的是個軸的長度，第三軸末端姿態坐標系由較淡的橘色坐標系所表示， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$  的推倒過程如下式所示，求得  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$  後即可獲得第三軸末端對世界座標的轉矩陣  ${}^w_3R$ ，以下令  $\overline{OA} = 375$ ， $\overline{AB} = 30$ ， $\overline{BC} = 340$ ， $\overline{CD} = 40$ ， $\overline{DE} = 338$ ， $\overline{CE} = \sqrt{\overline{DE}^2 + \overline{CD}^2}$ 。實驗中希望機械手臂是「向前」夾取的，因此  $\theta_3$  永遠會取大於零的結果。



$$\theta_1 = \arctan 2(y, x)$$

(式 2-6)

$$x' = x - \overline{AB} \cos \theta_1$$

$$y' = y - \overline{AB} \sin \theta_1$$

$$z' = z - \overline{OA}$$

$$\overline{PB} = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$$

$$\cos \theta_3 = \frac{\overline{PB}^2 - (\overline{BC}^2 + \overline{CE}^2)}{2 \times \overline{BC} \times \overline{CE}}$$

(式 2-7)

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}$$

$$\theta_3 = \arctan 2(\pm \sin \theta_3, \cos \theta_3)$$

$\theta_3$  is the one which is bigger than zero.

$$\theta_2 = -\arctan 2(z', \sqrt{x'^2 + y'^2}) - \arctan 2(\overline{CE} \sin \theta_3, \overline{BC} + \overline{CE} \cos \theta_3) \quad (式 2-8)$$

$${}^w_3R = {}^w_1R {}^1_2R {}^2_3R = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (式 2-9)$$

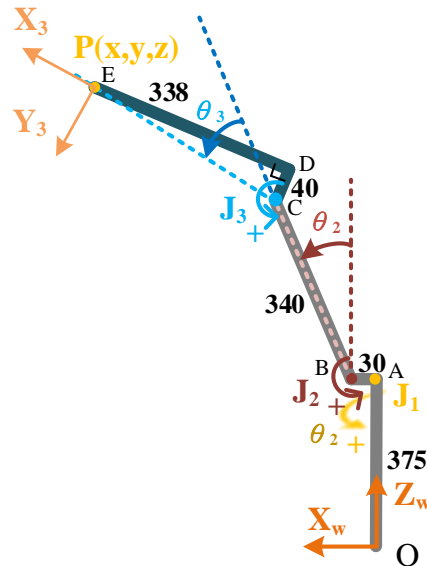


圖 2-58 機械手臂前三軸數學模型

(b) 後三軸旋轉矩陣推倒

圖 2-59 為機械手臂後三軸的數學模型，第六軸對第三軸的姿態可以用尤拉角 ZYZ 表示並推倒，但是需要將在推倒前三軸時的末端姿態做一個轉換，如圖 2-59 所示，需將淡橘色的坐標系轉為深橘色坐標系，轉換過程如(式 2-10)所示。假設 ${}^w_6R$ 為末端對世界座標的姿態，則 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 和 $\theta_6$ 的推倒過程如(式 2-11)和(式 2-12)所示。因為手臂上安裝了夾爪與許多不同的感測器，因此配線繁多且複雜，在希望線路不用保留太長妨礙夾取的同時又必須讓手臂在夾取的過程中不會拉扯到電線，因此在實驗中始終會選擇 $\theta_6$ 較小的那一組解。

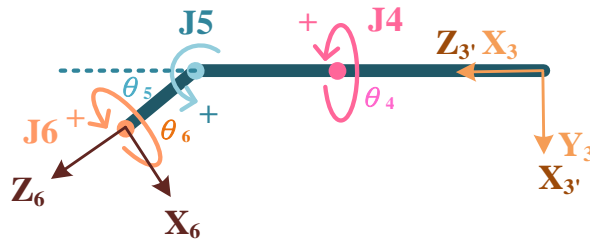


圖 2-59 數學模型後三軸數學模型

$${}^w_3R = {}^w_3R R_x(+90)R_y(+90) = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & -s_1 \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & c_1 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (式 2-10)$$

$$= \begin{bmatrix} -c_1s_{23} & -s_1 & c_1c_{23} \\ -s_1s_{23} & c_1 & s_1c_{23} \\ -c_{23} & 0 & -s_{23} \end{bmatrix}$$

$${}^3_6R = R_z(\theta_4)R_y(\theta_5)R_z(\theta_6) = {}^3_wR {}^w_6R$$

$$= \begin{bmatrix} c_1c_2c_3 - s_1s_3 & -c_1c_2s_3 - c_1s_3 & c_1s_2 \\ s_1c_2c_3 + c_1s_3 & -s_1c_2s_3 + c_1c_3 & s_1s_2 \\ -s_2c_3 & s_2s_3 & c_2 \end{bmatrix} \quad (式 2-11)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned}
& \text{if } r_{33} = 1 \\
& \quad \theta_5 = 0 \\
& \quad \text{if } |\arctan2(-r_{12}, r_{11})| < |\arctan2(r_{12}, -r_{11})| \\
& \quad \quad \theta_4 = 0, \theta_6 = \arctan2(-r_{12}, r_{11}) \\
& \quad \text{else} \\
& \quad \quad \theta_4 = \pi, \theta_6 = \arctan2(r_{12}, -r_{11}) \\
& \text{else if } r_{33} = -1 \\
& \quad \theta_5 = \pi \\
& \quad \text{if } |\arctan2(r_{12}, -r_{11})| < |\arctan2(-r_{12}, r_{11})| \\
& \quad \quad \theta_4 = 0, \theta_6 = \arctan2(r_{12}, -r_{11}) \\
& \quad \text{else} \\
& \quad \quad \theta_4 = \pi, \theta_6 = \arctan2(-r_{12}, r_{11}) \\
& \text{else} \\
& \quad \theta_5 = \arccos(r_{33}) \\
& \quad \text{if } \left| \arctan2\left(\frac{r_{32}}{\sin(\theta_5)}, \frac{-r_{31}}{\sin(\theta_5)}\right) \right| < \left| \arctan2\left(\frac{-r_{32}}{\sin(\theta_5)}, \frac{r_{31}}{\sin(\theta_5)}\right) \right| \\
& \quad \quad \theta_4 = \arctan2(r_{23}, r_{13}) \\
& \quad \quad \theta_6 = \arctan2(r_{32}/\sin(\theta_5), -r_{31}/\sin(\theta_5)) \\
& \quad \text{else} \\
& \quad \quad \theta_4 = \arctan2(-r_{23}, -r_{13}) \\
& \quad \quad \theta_6 = \arctan2(-r_{32}/\sin(\theta_5), r_{31}/\sin(\theta_5)) \\
& \quad \quad \theta_5 = -\theta_5
\end{aligned} \tag{式 2-12}$$

## 2.5 本章結論

本章介紹了整個實驗平台的設計，其中包含了，介紹自行設計的具有一主動自由度和一被動自由度的夾爪，其利用平行四邊形和行星齒輪機構的結合達到了使夾爪具有順應性的目標。之後說明了紅外線陣列近接感測器和壓力陣列軟墊的設計過程和設計結果，紅外線陣列近接感測器為一由七顆紅外線感測器組成的夾爪近接感測器，其中指腹上的六只功能是增加夾爪的包覆效果，指頭底下一只的功能是避障；壓力陣列軟墊最後是選擇 8×13 平頂厚度 2mm 的設計。再之後介紹了整個機電系統的組成架構，包含資料的種類和傳送方式。最後說明如何使用了幾何方法推倒六軸手臂的逆運動學。

### 第三章 視覺定位與計算夾取姿態



#### 3.1 視覺定位

在目標物體的姿態偵測和定位上，現今的方法主要又分為兩部分，一為即時建模，另一則為需事前建模。即時建模的好處是無需事先建模，但是這類的方法也可以看作是需要建模，只是在即時的狀態下建模，因此需要適合建模的環境，也導致通常限制較多，例如：背景需單純、畫面中只能有單一物體且物體要「正」的擺放。事先建模的缺點是，無法對於未知也就是未建模的物體作夾取，但是優點則是可於一般複雜的生活場景中做夾取且物體可以任一姿態擺放。除了以上提及的兩種主要的方法之外，也有完全不須建模的方法，但是其缺點就是對於夾取物體沒有任何的認知，機器人不知道自己夾了什麼也無法指定特定目標作夾取，並且只能知道物體的相對姿態，並不知道物體的絕對姿態，然而絕大部分的物體人類都有其如何擺放才是「正」的認知，也就是我們會習慣將物體以某個特定的姿態作擺放。綜合上述，以得知建模有其必要性，並且可以把建模這個動作想成是在告訴或教導機器人，每個物體其各自的外觀、大小、合適的擺放姿態等等，因此在本篇論文中是採用將欲夾取的物體作事先的建模方法達到姿態偵測和定位的目標。

研究中是以 VisualSFM 軟體[40]對物體進行建模並結合 SiftGPU[41]和 OpenCV 兩個函式庫達到對物體即時定位的目標，其中 VisualSFM 和 SiftGPU 皆是基於 Scale-invariant feature transform(Sift)演算法[42]的開放程式軟體和開放函式庫。以下內容會先介紹 Scale-invariant feature transform(Sift)演算法，接下來會介紹 VisualSFM 和 SiftGPU 的使用，最後會說明如何利用 VisualSFM 和 SiftGPU 結合 OpenCV 達到即時定位的流程。



### 3.1.1 Scale-invariant feature transform(Sift)演算法介紹

Scale-invariant feature transform(Sift)演算法是由 David Lowe 在 1999 年發表，2004 年完善總結的一個影像處理中對於影像尋找特徵表現非常優秀的方法[42]。因為 Sift 演算法有計算關鍵點的旋轉主方向和對特徵點作歸一化處理，因此除了具有尺度不變性之外，拍攝物體場景的亮度變化和角度皆不會影響影像特徵的搜尋結果。

Sift 演算法搜尋關鍵點的過程主要分為四個步驟：在影像不同尺度空間的極值偵測、精確的關鍵點定位、關鍵點的旋轉方位定向、生成關鍵點描述子。

#### 3.1.1.1 不同尺度空間中的極值偵測

這個步驟主要是來偵測候選的關鍵點(keypoint)。Sift 演算法引進了影像處理中尺度空間(scale-space)的理論，尺度空間理論的概念為將圖片進行一系列不同尺度模糊化的處理模仿人類眼睛看一個物體由近至遠逐漸模糊的過程，而關鍵點的搜尋為在這一系列不同尺度空間下的圖片中尋找的，因此，雖然欲與原始圖片匹配的新圖片跟原始圖片在不同的空間尺度下，仍然可以在展開的一系列不同尺度空間下的圖片找出不變的關鍵點，因此 Sift 特徵具有尺度的不變性。

文獻中指出，唯一可能的 scale-space kernel 只有 Gaussian function(式 3-1)[43]，利用此尺度可變的 Gaussian function 對圖片  $I$  作 convolution(式 3-2)即可得到一系列高斯模糊後不同尺度下的影像  $L$ ，即為建立一系列的高斯(Gaussian)金字塔(如圖 3-1 所示)。極值的偵測上 Lowe 是採用高斯差異函數(Difference of Gaussians,DOG)，(式 3-3)而非高斯拉普拉斯函數(Laplacian of Gaussians,LOG)，DOG 與 LOG 有很高的相似度且 DOG 的計算速度較快且操作較簡單。DOG 在實際操作上為將高斯塔中每組中相鄰的兩層圖像相減即可，而候選極值點的偵測如圖 3-2 所示，DOG 每一個像素都要和自己尺度和上下兩個尺度下所有相鄰的點比較，共 26 個點，若為所有點之中的極大或極小值才被選為候選的極值。



$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (\text{式 3-1})$$

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (\text{式 3-2})$$

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, \sigma) - G(x, y, k\sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (\text{式 3-3})$$

高斯塔中各組中每層的尺度如(式 3-4)所式， $i$  為圖像所在的組(塔)數，而  $S$  為每組中的層數。每組圖層之間為 down sample 的關係，例如，當  $S=3$  時，第一組第零層的圖像可由第零組第三層的圖像 down sample 而來，此關係也可由 Gaussian function 推得。其中要注意的地方為，因為 DOG 會捨棄每組中的首末兩層，這會使原本在高斯空間中連續的尺度空間到了 DOG 中變成不連續，因此需要在高斯空間下每組再生成  $S+3$  層圖像也就是使得 DOG 中每組多  $S+2$  層圖像使得在 DOG 空間中圖像的尺度空間也可以連續。

$$2^{i-1}(\sigma, k\sigma, k^2\sigma, \dots, k^{n-1}\sigma), k = 2^{1/S} \quad (\text{式 3-4})$$

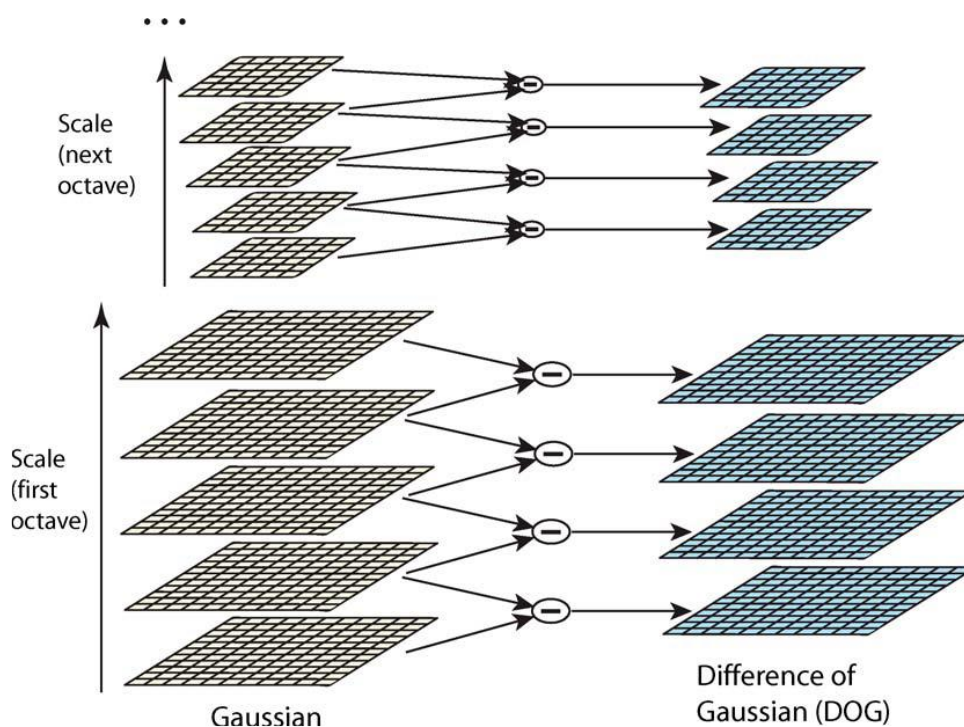


圖 3-1 高斯金字塔[42]

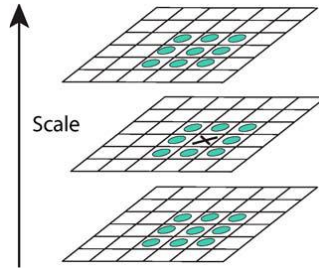


圖 3-2 極值點的偵測示意圖[42]

### 3.1.1.2 精確的關鍵點定位

圖像為離散空間，因此得到的候選關鍵點為在離散可中間偵測到的，並非真實連續空間中的極值點，須再利用 Sub-pixel Interpolation 得到連續空間中的極值點，除此之外，通過 DOG 生成的極值點會有較強的邊緣效應且某些極值點的抗躁能力可能較差，這些不佳的候選極值點也需要被排除。

Lowe 提出的方法為利用泰勒展開式將離散空間下的極值點逼近至連續空間中的極值點。(式 3-5)為 DOG 的二階泰勒展開式，其中  $X_i = (x_i, y_i, z_i)$  為候選關鍵點的位置、 $\Delta X$  為候選關鍵點與連續域中極值點的距離。將  $D(\Delta X)$  對  $\Delta X$  微分，並且因為希望  $D(\Delta X)$  為極值因此另之等於零得(式 3-6)，將之整理成式之後即可求得  $\Delta X$  (式 3-7)。 $\frac{\partial^2 D(X_i)}{\partial X^2}$  矩陣中各項的求法為利用泰勒展開式推倒而得到的 finite differential method，舉例如(式 3-8)所示。假設  $\Delta X$  中有任一項大於某一數值(Lowe 在論文中建議為 0.5)則表示候選的關鍵點離極值點還有不能被接受的距離，將  $X_i + \Delta X$  後再重複迭代逼近，Lowe 在論文中設定若迭代次數超過 5 次仍無法使誤差值小於 0.5 則刪除此候選特徵點。

$$D(\Delta X) = D(X_i) + \frac{\partial D^T(X_i)}{\partial X} \Delta X + \frac{1}{2} \Delta X^T \frac{\partial D^2(X_i)}{\partial X^2} \Delta X \quad (\text{式 3-5})$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial D^T(X_i)}{\partial X} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial D^2(X_i)}{\partial X^2} + \left( \frac{\partial D^2(X_i)}{\partial X^2} \right)^T \right) \Delta X \\ &= \frac{\partial D^T(X_i)}{\partial X} + \frac{\partial D^2(X_i)}{\partial X^2} \Delta X \end{aligned} \quad (\text{式 3-6})$$



$$\frac{\partial D^2(X_i)}{\partial X^2} \Delta X = -\frac{\partial D^T(X_i)}{\partial X}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma^2} & \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial y} & \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial x} \\ \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial y} & \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} \\ \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial x} & \frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta y \\ \Delta x \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial D}{\partial y} \\ \frac{\partial D}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (式 3-7)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \sigma} = \frac{D_{k+1}^{i,j} - D_{k-1}^{i,j}}{2}$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial \sigma^2} = \frac{D_{k+1}^{i,j} - 2D_k^{i,j} + D_{k-1}^{i,j}}{1} \quad (式 3-8)$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial x} = \frac{(D_{k+1}^{i+1,j} - D_{k-1}^{i+1,j}) - (D_{k+1}^{i-1,j} + D_{k-1}^{i-1,j})}{1}$$

$$\text{If } \Delta X > 0.5 \text{ in any dimension, repeat.} \quad (式 3-9)$$

$$\text{If } |D(X_i + \Delta X)| < 0.03 \text{ reject keypoint.} \quad (式 3-10)$$

求出候選特徵點的偏移量  $\Delta X$  後將  $X_i + \Delta X$  代回 DOG 函式求得其極如(式 3-10)

所示，若此極值太小則表示其抗躁能力差，應該將其刪除，論文中 Lowe 將此值設為 0.03。除此之外，還需要刪除在邊緣上的候選特徵點，Lowe 使用 Hessian matrix(式 3-11)來判斷關鍵點是否在邊緣上，若特徵點位於邊緣上，則在橫跨邊緣的方向  $D$  的主曲率會較大(頻率變化大)，而延著邊緣方向的主曲率會較小(頻率變化小)，而  $H$  特徵值(eigenvalue)得比例會與主曲率的比例相同，因此解出  $H$  特徵值(eigenvalue)關係即可推得主曲率的關係。假設  $H$  的特徵值(eigenvalue)分別為  $\alpha$  (較大)和  $\beta$  (較小)，則如(式 3-12)所示，若再另  $\gamma = \alpha/\beta$  則可再得到(式 3-13)，當  $R$  越大則表示  $\alpha$  與  $\beta$  的差異越大，在論文中，Lowe 設定當  $R$  大於 10 則將在關鍵點判定為在邊緣上因此將之刪除。

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (式 3-11)$$



$$Tr(H) = D_{xx} + D_{yy} = \alpha + \beta$$

$$Det(H) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 = \alpha\beta$$

$$R = \frac{Tr(H)^2}{Det(H)} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(\gamma\beta + \beta)^2}{\gamma\beta^2} = \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma}$$

$$\text{If } R < \frac{(10+1)^2}{10} \text{ reject keypoint.} \quad (式 3-14)$$

將候選關鍵點移至相對準確的極值位置並刪除了不佳的關鍵點後即獲得所有圖像中滿意的關鍵點，接下來需要將這些關鍵點作一些操作使得被描述的關鍵點具有旋轉不變性和去除光照影響。

### 3.1.1.3 關鍵點的旋轉方位定向

為了讓關鍵點具有旋轉不變性，需為每一個特徵點計算其基準方向。其方法為計算在關鍵點所在的尺度空間中臨近  $3\sigma'$  區域內的所有像素窗口的梯度如(式 3-15)所示與方向分布如(式 3-16)所示，Lowe 建議梯度的大小(magnitude)須再和  $\sigma' = 1.5\sigma$  的高斯分布加成(離特徵點離越遠的像素權重越小)，如此一來臨近區域窗口的半徑大小即為  $radius = 3\sigma' = 4.5\sigma$ 。在完成所有關鍵點的梯度大小和角度計算後，將  $360^\circ$  分為三十六個 bin(每  $10^\circ$  一個 bin)的直方圖統計關鍵點鄰近區域內所有像素的角度和其大小，直方圖的峰值即代表了關鍵點的主方向。到這個步驟為止，已經確定了關鍵點的位置、尺度和方向，而這個關鍵點即為 SIFT 特徵點。接下來，需要對這個特徵點作描述，使其不隨尺度、旋轉、光照等變化的改變。

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (式 3-15)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y+1) - L(x, y-1)) / (L(x+1, y) - L(x-1, y))) \quad (式 3-16)$$

### 3.1.1.4 生成關鍵點描述子

Lowe 使用一組向量來描述特徵點。Lowe 將特徵點一個臨近範圍內區域(與計

算特徵點旋轉方向的區域相同)的座標軸轉至主方向使其具有旋轉不變性後將這個區域分為  $d \times d$  塊，對每一塊子區域再分割成數塊的像素窗口，計算每個子區域的梯度直方圖，並依這些直方圖生成每個特徵點圖特有的向量描述子。Lowe 建議  $d=4$ ，且建議每個區域內再分為 16 個像素窗口，每個像素梯度大小需再和  $\sigma' = 0.5d$  的高斯分布加成，並分配到 8 個方向上(直方圖分為 8 個 bin)，最後形成  $4 \times 4 \times 8 = 128$  維的描述子。圖 3-3 以將特徵點附近一個範圍內的區域分割為 16 個像素窗口和 4 個直方圖為例。為了消除光照變化的影響，最後需要將生成的描述子進行歸一化如式所示。

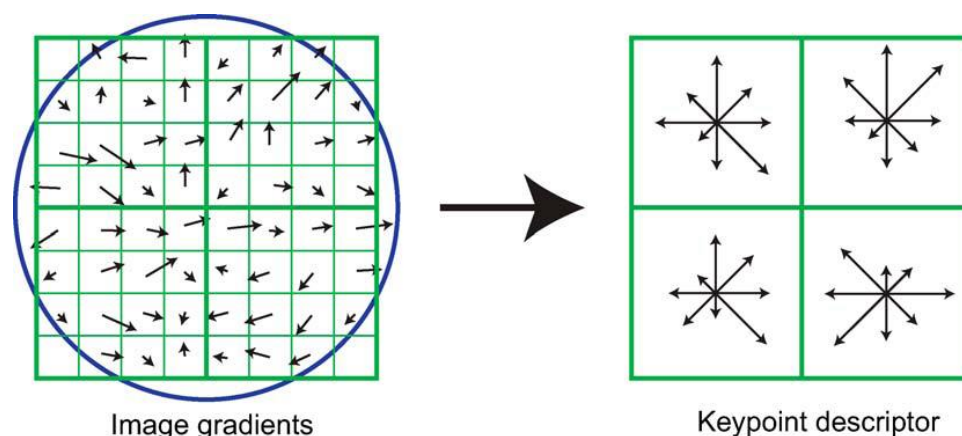


圖 3-3 生成描述子的示意圖[42]

### 3.1.2 介紹 VisualSFM 與 SiftGPU

由 Sift 演算法的介紹可以了解其具有很高的可靠度，可在複雜的環境中、不同的尺度下作特徵點的比對，適合應用於物體的定位，但其計算的過程非常的繁複。自其發表至今有許多人提出不同的加速方法，但是皆沒有 Lowe 提出的效果好。為了使物體的定位能夠達到在 real-time 底下利用 Sift 做運算，運用了和 Changchang Wu 所提出的開放函式庫 SiftGPU，其利用 GPU 實現了 Sift 演算法，並且能達到在 real-time 底下運算的速度。另外，因為期望物體的定位是利用 Sift 特徵點比對的方式，物體的建模也需要建立在 Sift 特徵點上，在建模上也是使用 Changchang Wu 提出的 VisualSFM 軟體，其為利用 structure from motion (SFM) 達到 3D 重建的圖型化

人機介面(如圖 3-4 所示)。因為 SiftGPU 和 VisualSFM 作者皆有釋出原始的程式碼，在研究中需要修改用來結合 OpenCV 上非常的方便。



圖 3-4 VisualSFM 軟體介面[40]

### 3.1.3 建模與定位流程

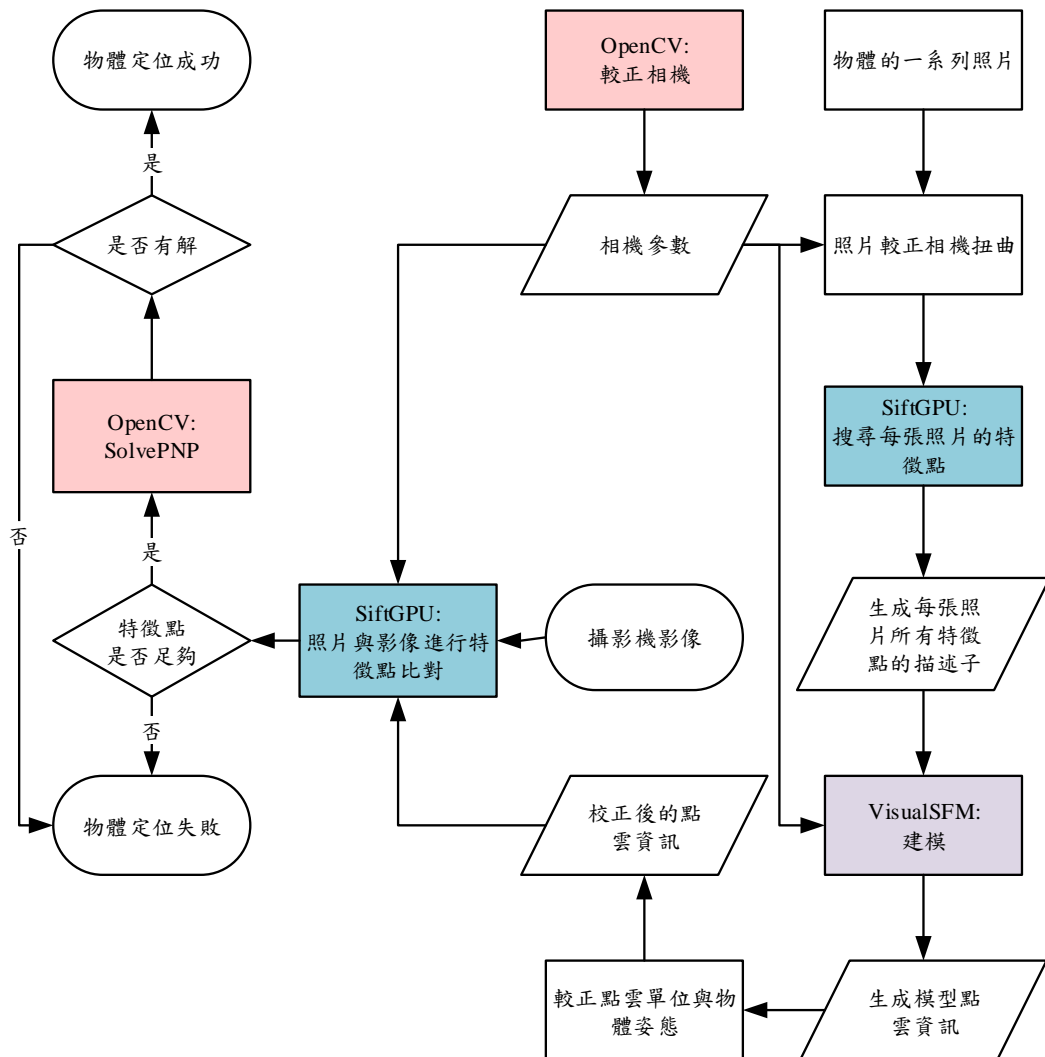


圖 3-5 建模與定位流程圖

圖 3-5 為一個物體由建模到定位的流程圖，其中以三個顏色分別代表使用到 OpenCV、SiftGPU 和 VisualSFM 的步驟與用途。

一個物體在三維空間中經過相機投影到平面影像的關係如(式 3-17)所示[44]：

$$sm' = A[R | t]M' \quad (式 3-17)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中：

$s$  為三維和二維點之間的單位轉換參數

$(X, Y, Z)$  是在世界座標(OpenCV 定義的世界座標)下的 3D 點座標

$(u, v)$  是 3D 點投影後的像素座標

$A$  是相機矩陣

### 3.1.3.1 相機校正

由(式 3-17)可以看出，在座三維二維之間的座標轉換之前，要先對相機作較正得到一組相機矩陣，其包含了焦距和相機中心位置的參數，除此之外，還需要一組相機鏡頭的 distortion 參數，因為鏡頭的成像可能會導致影像的扭曲。因此，在定位和建模之前須先對相機作較正，並先將物體一系列的照片作變形修正，之後在作特徵點的定位時才不會受影像變形的影響。

### 3.1.3.2 建模流程

論文中物體模型的建立是利用物體一系列的照片基於 Sift 特徵點的匹配生成物體點雲(如圖 3-6 所示)。將一系列修正變形後的物體照片利用 SiftGPU 找出每張圖的 Sift 特徵點後，每張照片生成一 VisualSFM 可以讀取的格式之所有特徵點描述子的檔案，一張照片對應一個特徵點描述子檔案。VisualSFM 會利用這些檔案在兩兩圖片之間作特徵點的匹配，再利用相機矩陣和特徵點所在的二維座標反推回特徵點在世界座標下的三維座標，這一系列物體特徵點在三維座標下的座標點

即為物體的點雲，點雲的數量與物體可以偵測到的特徵點數量有關。最後再將點雲的數值與物體姿態校正至希望的單位與擺正的姿態即完成物體的建模。

物體姿態校正後，擺正時的物體座標系會與世界座標系重合，圖 3-7 中的橘色座標系為世界座標系而黃色為物體的座標系。在本研究中，不同的幾何形狀有各自「擺正」的定義，後續的模型簡化步驟中，會以不同幾何形狀各自定義的擺正姿態對模型作簡化，不同形狀詳細的擺正定義如圖 3-7 所示。

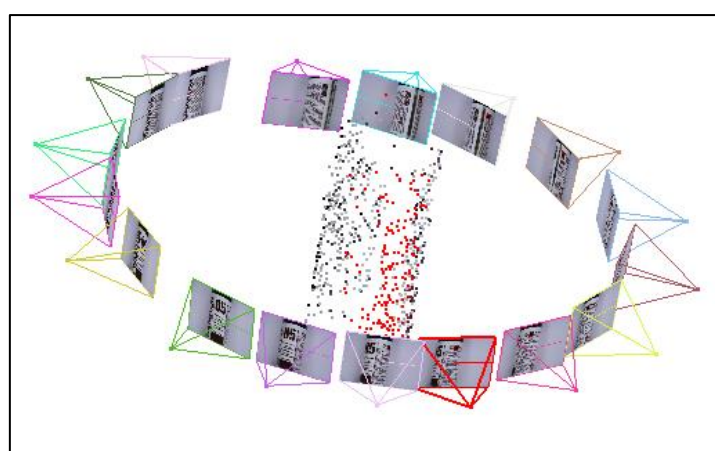


圖 3-6 建模成功示意圖

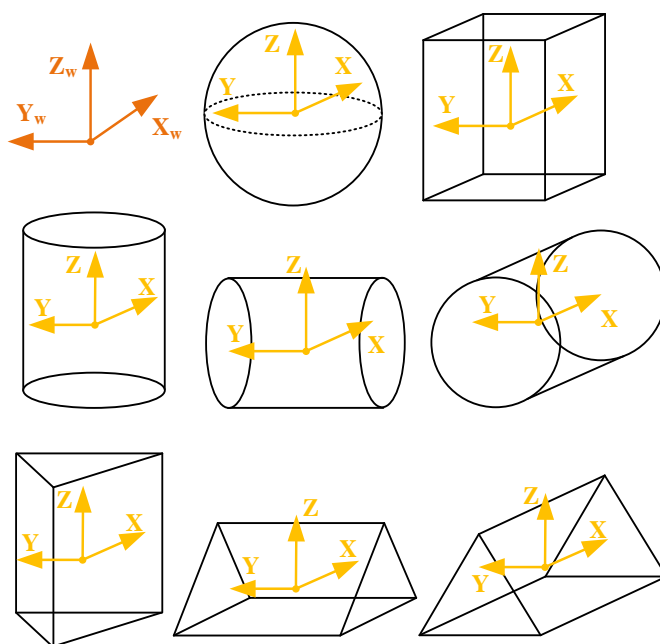


圖 3-7 幾何形狀有各自「擺正」的定義



### 3.1.3.3 物體定位流程

物體的模型點雲資訊包含了各個世界座標下物體的點分別對應於物體一系列照片中的哪幾張的哪幾個 Sift 特徵點。有了這些資訊後，一張新的攝影機影像即可分別對物體的所有照片進行特徵點的比對，並由模型資訊可獲得特徵點對應的世界座標下物體姿態擺正的座標。如(式 3-17)所示，有了物體至少四個特徵點的三維和二維投影座標以及相機矩陣後即可得到旋轉矩陣 $[R|t]$ ，到了此步即表示定位完成，可以獲得物體的姿態與在世界座標中的位置。本論文中此旋轉矩陣的求得是利用 OpenCV 的 SolvePNP function，因為所獲得的特徵點通常遠大於 4 個，計算旋轉矩陣需要考慮誤差導致計算上繁雜，考慮了速度上的需求因此使用了 OpenCV 的函式。物體定位的實驗結果將在第四章展示。

## 3.2 模型簡化

當有目標物體的姿態之後，接下來是要選擇一個合適的夾取位置和夾取姿態。現今的主流方法有：以物體模型的幾何形狀經過力分析選擇合適的夾取位置和姿態、將模型以 bounding box 進行分割後挑選合適的夾取位置和姿態、也有以物體各自人類習慣的夾取位置和姿態為選擇。以上這些方法的物體模型又分為直接在 real time 底下做計算和在建模時一併計算完納入模型的資料內。若是在 real time 底下計算通常耗時；然而若在建模時直接將夾取姿態和夾取位置納入模型的資料內則會多消耗許多電腦的容量。但是文獻中對人類夾取的研究可以發現，或許不用單獨計算每個物體各自適合的夾取位置和姿態，而是某一類幾何形狀的物體有其適合的夾取姿態。以這樣的概念，有研究把物體的形狀簡化成某幾類的幾何形狀，每一類的幾何形狀都有其對應的一系列的夾取姿態，在夾取時就是以物體簡化的幾何形狀所對應的夾取姿態來對物體進行夾取的動作，而其結果也證明這適用於生活中絕大部分的物體。

在本研究中將延續這樣的想法，更有系統的分類物體和提出一可以由簡化過的幾何形狀快速計算出合適夾取姿態的演算法。計算夾取姿態演算法會在下一節



介紹而在本節中會先介紹如何分類物體和模型簡化的流程，以及最後會說明如何加入模型夾取可行性的判斷以避免簡化的模形並不適合夾取。

### 3.2.1 模型分類

正如剛剛所提到的，研究中希望由物體的幾何形狀來決定夾取姿態，因此需要把物體分類成不同的幾何形狀，為了要達到這個目的，需要先決定研究中要將物體分成哪幾類的幾何型狀。

因為物體的幾何形狀會決定夾取姿態，反過來說，有哪些夾取姿態會決定要將物體分成哪幾類。研究中所擁有的夾取模式(兩指模式和三指模式)和其對應適合的夾取形狀如表 3-1 所示。例如一個物體的其中一個投影面為圓形而另兩個投影面為長方形則此物體會是被簡化為長圓柱的形狀。將所有形狀排列組合後便可以將所有的物體區分為長方體(Box)、長圓柱(Cylindrical)、球體(Spherical)、正三角柱(Triangular prism)這四種幾何形狀。

在計算夾取姿態的演算法之中，一個物體將有一系列的「重心夾取姿態」和「邊緣夾取姿態」，如字面上的意思，重心夾取姿態的夾取位置設定在物體重心的位置，而邊緣夾取姿態的夾取位置則是在物體幾何形狀邊緣的位置(如圖 3-20 所示)。因為重心位置的夾取相較於邊緣位置的夾取穩定性更高，研究中將預設的夾取位置設為重心位置，因此會以重心位置附近成形的幾何形狀分類物體。以香蕉為例，雖然香蕉並非圓柱狀，但是在重心位置附近可以將之近似為圓柱狀，而簡化後的圓柱形狀是否適合邊緣夾取會再作夾取可行性的判斷。模形簡化後的形狀、尺寸和夾取可行性的判斷等所有的資料包含點雲即為完整模型的資料。

表 3-1 夾取模式和其對應適合的夾取形狀

夾取模式	適合夾取的投影形狀
兩指&三指	多邊形(長軸和短軸相似)、圓形
兩指	平行四邊形、多邊形(長軸和短軸不相似)、橢圓形
三指	正三角形



### 3.2.2 模型簡化流程

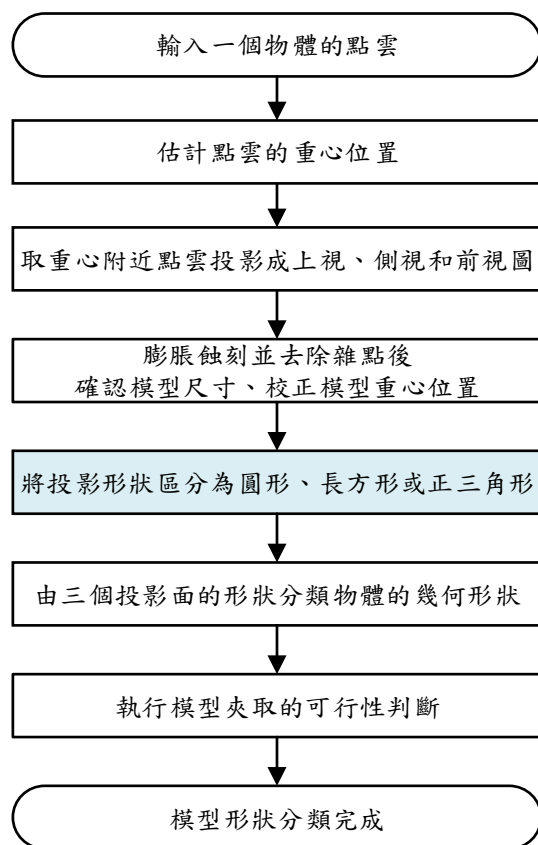


圖 3-8 模型簡化之流程圖

如同上述提到的，研究中會以物體重心附近的形狀來分類並簡化物體，模型簡化的整體流程如圖 3-8 所示，以下會詳細介紹模型簡化的流程，而其中影像處理的部分皆為使用 OpenCV。在建模的步驟中有提到，在本研究中物體「擺正」的狀態有其各自的定義。在建模時即需要把物體點雲校正至這些姿態之中的其中一個成為它們定義之「擺正」的姿態，在進行模型簡化時輸入的點雲即為已經校正至「擺正」的點雲。

在建模的流程中，首先，會由物體的點雲估測出一個大概的幾何重心位置，這個時候還沒有去除雜點所以重心並不是最準確的，但是除非點雲的狀態非常差(雜點非常多)，否則並不會與校正後的重心位置相差太多，可以假設為物體的重心位置。接下來，將這個假設的重心位置附近一個範圍內的點投影取 top view、side view

和 front view（因為我的夾爪寬 2.5cm，測試後取正負 3cm 的範圍作投影圖），將投影點膨脹、蝕刻並去除雜點後將可確認模形的尺寸和校正模形重心位置。校正形狀尺寸後，將投影圖的形狀區分為正三角形、長方形或圓形，最後即可由投影面的形狀組合回一個幾何形狀，這個形狀即為物體模型簡化後的形狀，之後將把這個簡化後的形狀當作物體的形狀作夾取姿態的計算。最後，將由校正後的模型尺寸進行夾取可行性的判斷，至此即完成物體的模型簡化作業。

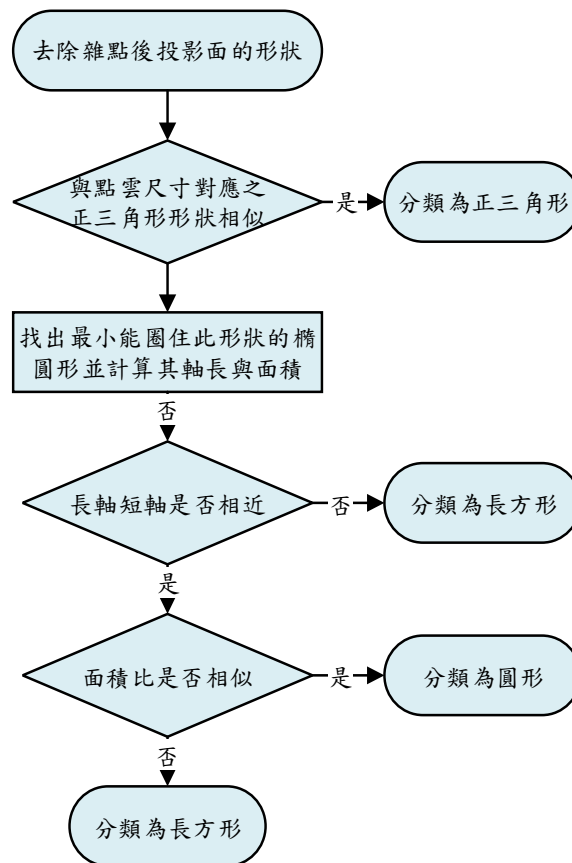


圖 3-9 分類投影面形狀之流程圖

### 3.2.2.1 模型簡化判斷

如何將投影面分類為正三角形、長方形或圓形的流程如圖 3-9 所示。膨脹、蝕刻並去除雜點後即可以把點雲組合回一個形狀。首先，因為三角柱有其「擺正」的定義，會以校正後的重心位置和模型尺寸計算出其對應的正三角形，若此投影面的

形狀面積與這個正三角形的面積相似且幾乎重疊，將分類為正三角形，若不是，將進入其他形狀的判斷，要進入判斷前，會先找出一個可以裝下這個形狀最小的橢圓形，如果這個橢圓形的短軸和長軸差很多，就直接判斷為長方形，如果短軸和長軸很相近，接下來將測試面積比，如果此形狀的面積和橢圓的面積比很相近表示此形狀很接近圓形，將分類為圓形，反之則分類為長方形。

在真實操作中，首先會進行使否回三角形的判斷，作法是將投影形狀與正三角面積必較，若面積之間的差異小於 0.2 會進入面積重疊相似度的判斷，否則將進入下一輪圓形和長方形的判斷；若面積重疊後不相似的面積閾值設小於10% 則將投影形狀分類為三角形，反之則將進入下一輪圓形和長方形的判斷。在圓形和長方形的判斷上，研究中將橢圓形長短軸比的閾值設為90%，若小於之則直接將投影形狀分類為長方形；橢圓面積與投影形狀面積比的閾值設為86%，若大於之則將投影形狀分類為圓形，若小於則分類為長方形，以上狀況皆為在模型點雲狀態良好且充足的情況測試出來之參數。

圖 3-10 為實驗中的其中一個測試物品(去角質霜)模型點雲之上視、前視和側視圖，其中藍點為為校正前之模型重心位置而粉紅點為校正後之模型重心位置。圖 3-11 為模型之實體圖和各投影面形狀之長短軸和面積比，三個投影面之分類結果皆為長方形，因此將這個模型分類為長方體。圖 3-12 為實驗中的另一個測試物品(三角巧克力) 模型點雲之上視、前視和側視圖。圖 3-13 為模型之實體圖和各投影面形狀之長短軸和面積比，三個投影面之分類結果分別為三角形、長方形和長方形，因此將這個模型分類為三角柱。

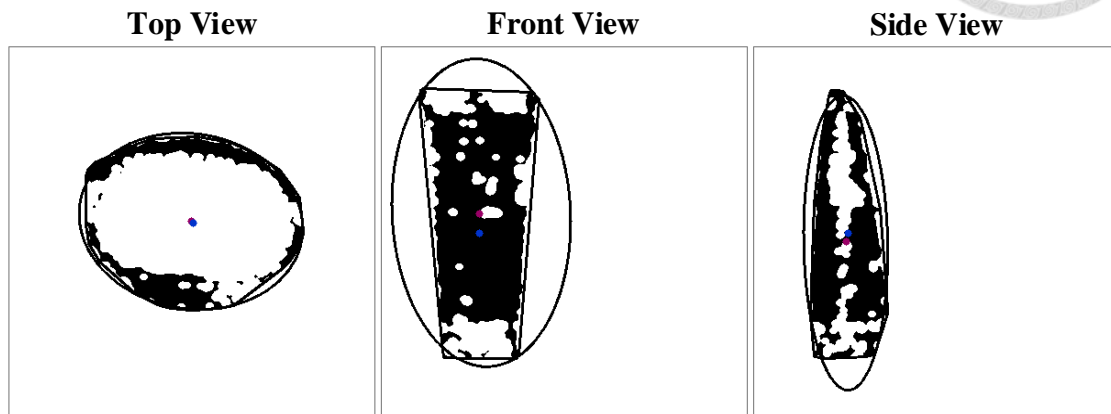


圖 3-10 去角質霜各投影面點雲狀態



圖 3-11 去角質霜實體圖與各投影面分析結果

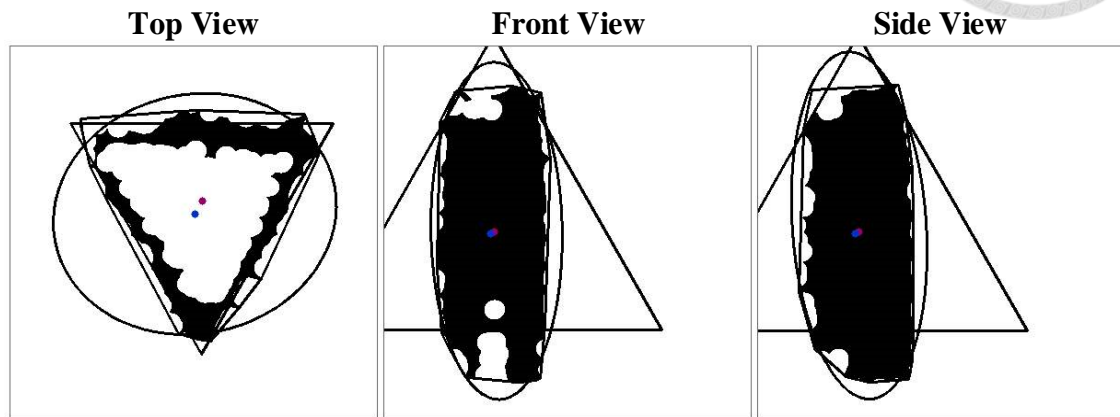


圖 3-12 三角巧克力各投影面點雲狀態



圖 3-13 三角巧克力實體圖與各投影面分析結果



### 3.2.2.2 模型夾取可行性判斷

在本研究中一個物體皆具有一系列的「重心夾取姿態」和「邊緣夾取姿態」，其中邊緣夾取姿態是重心夾取姿態的延伸，此部分會在之後如何計算夾取姿態的章節再作詳細的說明。然而，模型的形狀是被簡化過的，並不能完全的取代原本的物體形狀，因此，一個物體是否真的適合簡化過形狀的夾取姿態需要再被確認。

在建造模型資訊時，物體所有軸的面都會進行可行性判斷，然而，定位時只會取各模型必要的資訊出來使用。由模型簡化的流程可以看出研究中對於圓形和三角形的分類是嚴苛的，因此，在定位時，以圖 3-16 的圓柱為例，研究中只會確認 Z 軸兩端的面是否適合被夾取；一個球體三個投影面皆為圓則不需要被確認；而一個長方體則是三個投影面皆不為圓或三角柱，因此六個軸方向皆需要確認。

夾取可行性的判斷又分為重心夾取的可行性判斷和邊緣夾取的可行性判斷。重心夾取的部分，研究中希望避免的是夾取面為一點、一直線或是面積很小的表面，而邊緣夾取的部份則是希望避免夾取在很小的表面上，因此，在判定上，研究中是將物體靠近夾取位置，也就是將表面部分的點雲提取出來當作判斷的依據，提取的範圍為簡化後模型的尺寸大小，若此提取出來的面的點雲與模型應有的尺寸相差許多，則這個面可能是一個點或一直線或一面積很小的表面，因此不適合被夾取。

以圖 3-14 中的一日蔬果鋁箔包為例，由圖 3-15 中的點雲提取狀況可以看出，由 top 的面和 button 的面可判斷指頭閉合方向為 Z 軸方向的重心夾取姿態並不可行，因為 top 的面太小了；而因為 top 的面太小，因此圍繞著靠近方向為正 Z 方向的邊緣夾取姿態皆不可行，但是 button 的面是夠大的，因此圍繞著靠近方向為負 Z 方向的邊緣夾取姿態是可行的。



Model's Name : 一日蔬果

Input a Model



#### Top View Description

橢圓長軸 : 9.8172 > 92.7044 %  
 橢圓短軸 : 9.1010  
 橢圓面積 : 59197.8450 > 87.0674 %  
 幾何面積 : 51542.0000  
 三角相差 : 0.5932 三角重疊 : - %

#### Front View Description

橢圓長軸 : 20.2934 > 47.0639 %  
 橢圓短軸 : 9.5508  
 橢圓面積 : 63580.8804 > 76.9665 %  
 幾何面積 : 48936.0000  
 三角相差 : 0.0828 三角重疊 : 28.3040 %

#### Side View Description

橢圓長軸 : 18.0459 > 52.8529 %  
 橢圓短軸 : 9.5377  
 橢圓面積 : 56461.6708 > 75.7771 %  
 幾何面積 : 42785.0000  
 三角相差 : 0.1547 三角重疊 : 27.8404 %

Definition : Box

圖 3-14 一日蔬果實體圖與各投影面分析結果

	Top	Button	Front	Back	Right Side	Left Side
重心						
邊緣	Not Fit	It Fits	It Fits	It Fits	It Fits	It Fits
重心	Not enough		It's enough		It's enough	

圖 3-15 一日蔬果重心與邊緣夾取可行性判斷結果



Model's Name : 品客波卡

Input a Model



#### Top View Description

橢圓長軸 : 7.3024  
 橢圓短軸 : 7.0274  
 橢圓面積 : 33642.5433  
 幾何面積 : 32718.0000  
 三角相差 : 0.2598      三角重疊 : - %

#### Front View Description

橢圓長軸 : 14.7676  
 橢圓短軸 : 9.8746  
 橢圓面積 : 50500.5011  
 幾何面積 : 38972.0000  
 三角相差 : 0.1119      三角重疊 : 27.8785 %

#### Side View Description

橢圓長軸 : 14.2657  
 橢圓短軸 : 9.3940  
 橢圓面積 : 46409.6226  
 幾何面積 : 39280.0000  
 三角相差 : 0.0033      三角重疊 : 22.9552 %

Definition : Cylinder

圖 3-16 品客波卡實體圖與各投影面分析結果

	Top	Button	Front	Back	Right Side	Left Side
邊緣						
重心	It's enough		It's enough		It's enough	
邊緣	It Fits	It Fits	Not Fit	It Fits	It Fits	It Fits

圖 3-17 品客波卡重心與邊緣夾取可行性判斷結果



### 3.3 夾取姿態的計算

定位完成後，可以得到物體的重心位置和姿態，然而，欲夾取一個物體只有這兩項資訊是不夠的，還需要考慮目標的幾何形狀和其周遭的狀況。現今常見的方法為將一系列設計好的夾取姿態與環境比對後再挑選出合適的夾取姿態，這樣的方法因為需要操作三維空間中的點雲，因此通常耗時。不同於這樣的方法，希望能在簡單的假設下簡化夾取姿態的計算，由欲夾取之目標物體和其他周遭環境及物體之間的位置關係獲得適合的夾取姿態，而且此方法將夾取姿態的搜尋壓縮到二維空間之中，或許不適用於所有的環境中，但能適用於絕大部分的環境中且只需花費極少的計算時間。

在現今各式定位的演算法中，所需的環境資訊及假設都不盡相同，因此不論環境資訊的詳盡程度，本研究提出的獲得夾取姿態的演算法著重於如何在知道目標物體的「幾何形狀、位置及姿態」的條件下利用「已知的環境資訊」決定合適的夾取姿態，也就是說，不同的定位演算法在知道各自可獲得環境的限制條件下，此方法可擴展於不同的環境限制條件中。接下來將由最基本的假設與概念進而到詳細的流程與完整的做法介紹此演算法。

#### 3.3.1 演算法基本假設與概念介紹

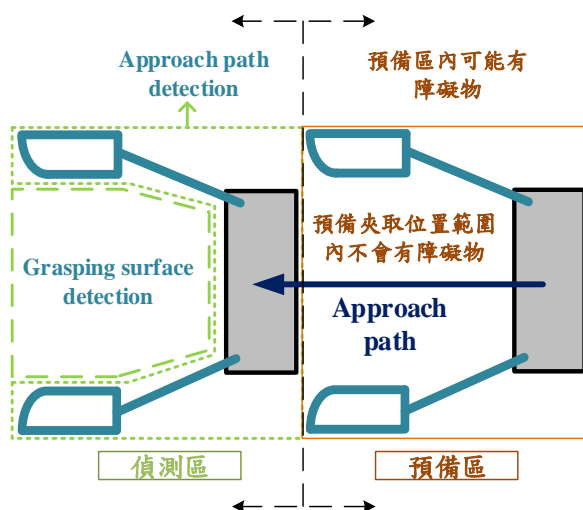


圖 3-18 夾爪在預備位置和夾取位置以及在夾取位置時需要的偵測範圍

重心夾取

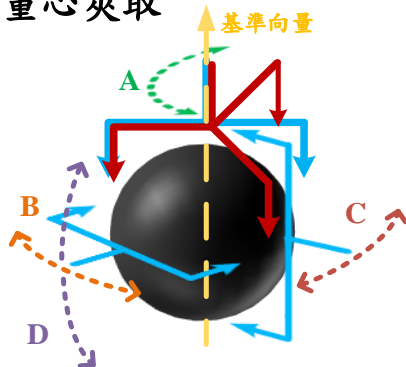


圖 3-19 四類重心夾取姿態

邊緣夾取

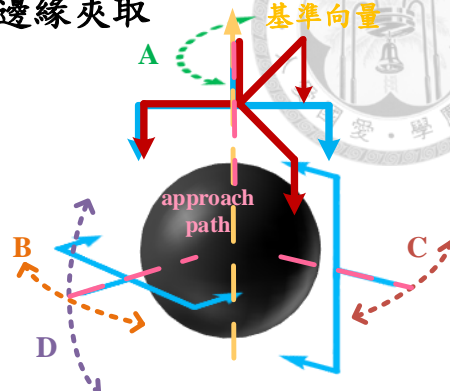


圖 3-20 四類邊緣夾取姿態

一個夾取流程大致上分為四個步驟，第一個步驟為從初始位置到夾取預備位置，第二步驟為從預備位置到夾取位置，第三步驟為夾取物體後從夾取位置退回預備位置，而第四步驟為從預備位置到目的地。論文中的演算法專注在讓「夾爪」在第二和第三步驟中找出一個可行的夾取姿態，手臂在整個夾取過程中的碰撞將用簡單的決策條件避免，也就是說在預備夾取位置是假設為沒有障礙物的。

要達到利用環境資訊計算適合地夾取姿態這個目標，首先要先了解欲夾取一個物體其夾取姿態需滿足的條件，成功夾取需滿足的條件有兩個：一為要有充分的表面和空間讓夾爪指頭可以接觸(grasping surface)，如圖 3-18 的 surface detection 區域內不能有障礙物，二為夾爪由預備位置到夾取位置的靠近路徑(approach path)不能被阻擋，如圖 3-18 的 approach path detection 區域內不能有障礙物。以下將以一個橢球為例來介紹如何用環境資訊判斷是否滿足可行夾取姿態的條件。

首先，假設在沒有除了目標物體之外其他障礙物的環境中，夾取所需的兩個條件在任何夾取姿態下皆滿足，因此挑選的 approach path 是直接(straightforward)的，只跟物體與手臂的位置有關係，此夾取姿態之後稱呼它為「最佳的 approach path」，在有障礙物的情況下，仍然會希望所挑選的夾取姿態越接近此理想的 approach path 越好，此最佳的夾取姿態可幫助快速的篩選和計算出各類最適合的夾取姿態，最後在各類夾取姿態中選擇離之最近的夾取姿態作夾取。

接下來，若目標在一有障礙物的環境中，理論上會有無限多個夾取姿態需要被判斷是否能滿足兩個夾取成功所需的條件，然而，在絕大多數的狀況下，都存在著某些限制導致了夾取時不理想的 approach path 或無法達到的 approach path，會對夾取過程產生限制的因素包含了環境、硬體(包含相機、夾爪、手臂)、物體模型形狀或演算法本身的限制。

由環境限制來看，物體若放在桌子上或抽屜裡則由下往上的行徑方向是必定會被阻擋的，而若物體掛在天花板上則由上往下的行徑方向是會被阻擋的。由硬體限制來看，硬體包含了相機，手臂和夾爪，這些硬體造成的限制例如：目標物體與相機照射方向相反的 approach path 可能存在，但是因為無法獲得資訊而無法判斷在某些情況可能是不希望被允許的；另外如手臂的運動和夾爪可夾取的物體大小限制也會對夾取的規劃產生影響等等。由物體模型的形狀來看，物體形狀可能存在著不適合被夾取的面等等。最後，演算法限制的部分，如一開始所提到的，研究中的演算法只專注於保證「夾爪」的夾取在 approach 的過程中是不會碰撞的，但是沒有辦法保證整個手臂在 approach 的過程中是不會碰撞的，然而此部分可以簡單的增加行程極限條件避免手臂的碰撞，之後會再做更詳細的介紹。

假設在可以根據環境限制決定出一個「必定會被阻擋的 approach path」這個條件下，研究中將一個物體重心位置和邊緣位置可供夾取的夾取姿態簡化為四類，如圖 3-19 和圖 3-20 所示，之後會再詳細介紹為什麼簡化為這四類及各自的定義。圖 3-19 和圖 3-20 中假設的為「垂直從下往上」的 approach path 不被允許，而此路徑即被定義為「基準向量」。然而，即使在「垂直從下往上」的 approach path 不被允許時，也並非所有幾何形狀的模型在任意姿態下都適合圖 3-19 和圖 3-20 中的基準向量或都適合圖 3-19 和圖 3-20 中的夾取姿態，因此，研究中會綜合模型幾何形狀當下的姿態和「必定會被阻擋的 approach path」兩個條件定義合適的基準向量。

定義了基準向量和獲得物體位置後即可建立物體在被夾取時的「基準坐標系」，所有的夾取姿態將依此基準坐標系建立而非物體本身的姿態。然而，就如同之前提到的，在大部分的狀況中都存在會被限制而不理想的夾取姿態，因此，需要將這些

不理想的夾取姿態從依據基準坐標系定義的所有夾取姿態中扣除，剩下的夾取姿態命名為「目標可行之夾取姿態」。

最後，目標可行之夾取姿態將透過本論文題出的方法與環境資訊比較後獲得不會被障礙物阻擋而可行的夾取姿態，這些「可行的夾取姿態」再與「最佳的夾取姿態」比較後於每個類別(A、B、C、D)各自挑選出最適合的夾取姿態，排序後再經過 IK 的計算確認，挑選出最適合且可行的夾取姿態進行夾取。

總結上述，此演算法的主要流程架構如圖 3-21 所示。就如之前有提到的，此方法可適用於不同的已知環境限制條件中，因此在接下來的內容裡面，會先介紹這個方法的主要流程，之後再介紹如何從此研究的定位方法中獲得環境資訊，最後介紹如何使用此環境資訊結合此方法計算出適合的夾取姿態，以及討論在本研究中獲得資訊方法的優點和缺點。

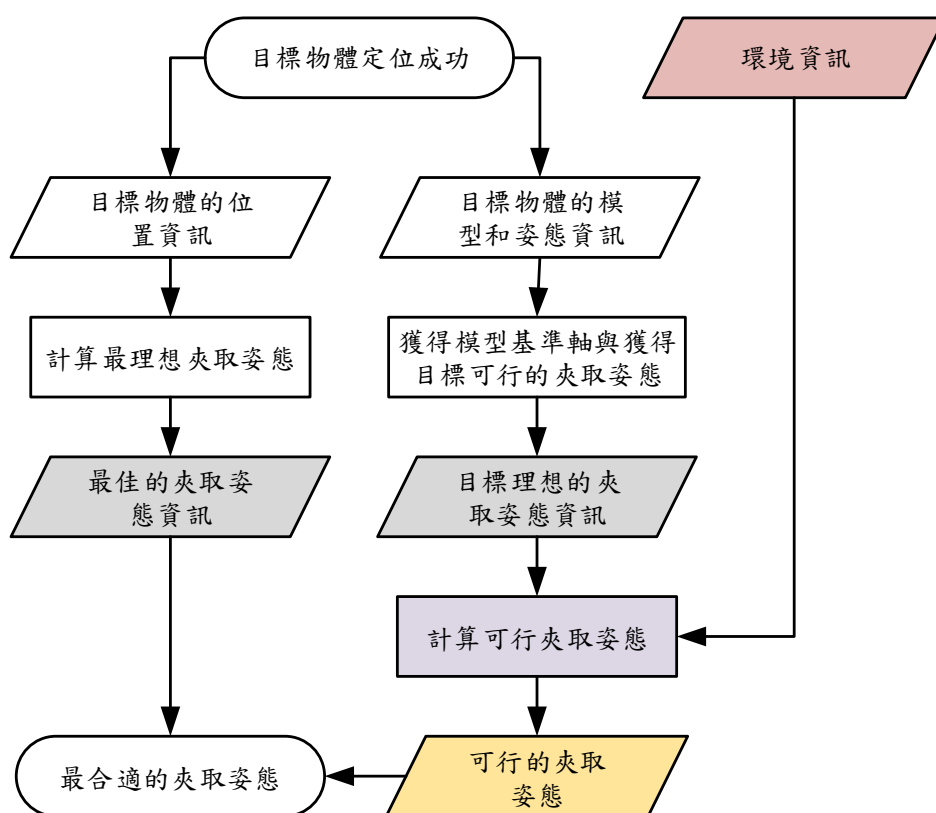
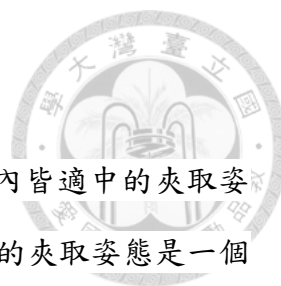


圖 3-21 計算夾取姿態的主要流程



### 3.3.2 最佳的夾取姿態的計算

挑選最理想夾取姿態的目標為找到一個位於各軸行程範圍內皆適中的夾取姿態，因為這樣的夾取姿態有最大彈性的手臂移動路徑。這個最佳的夾取姿態是一個指標，可幫助在後面可行夾取姿態的計算中快速的定義出在考慮了幾何和行程極限的關係下各類(A、B、C、D)最適合的夾取姿態。表 3-2 為手臂定義之各軸行程極限範圍，而圖 3-22 為手臂各軸也是實驗中定義的世界坐標示意圖。

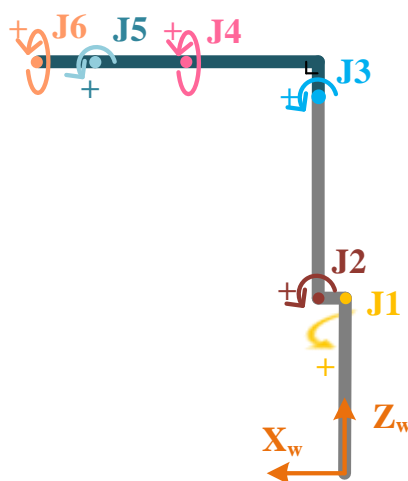


圖 3-22 手臂各軸與座標系示意圖

表 3-2 手臂各軸行程極限

	J1	J2	J3	J4	J5	J6
行程極限	$\pm 165^\circ$	$-80^\circ \sim 100^\circ$	$-83.25^\circ \sim 55^\circ$	$-190^\circ \sim 190^\circ$	$\pm 110^\circ$	$\pm 360^\circ$

實驗中的物體皆放在世界坐標中正 X 方向的區域，由表 3-2 可看出第一軸的行程極限遠大於這個範圍，因此研究中將第一軸的行程影響忽略，並且，在希望第四軸保持在 0 度的條件下，最理想夾取姿態將從手臂第一軸轉至正對物體時的連續夾取姿態中挑選出來，目標為在最理想夾取姿態下的手臂第 2、3、5 軸也在適中位置。由表 3-2 可看出第 2、3、5 軸最適中的轉角分別為 10 度、-14.125 度和 0 度。

簡單總結上述，要找出最理想夾取姿態大致上需要兩個步驟：第一為找出對各軸來說皆連續的夾取姿態範圍，第二為在這個範圍之內找到第 2、3、5 軸皆在適中位置的夾取姿態。

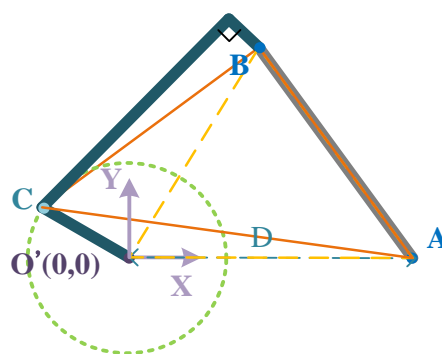
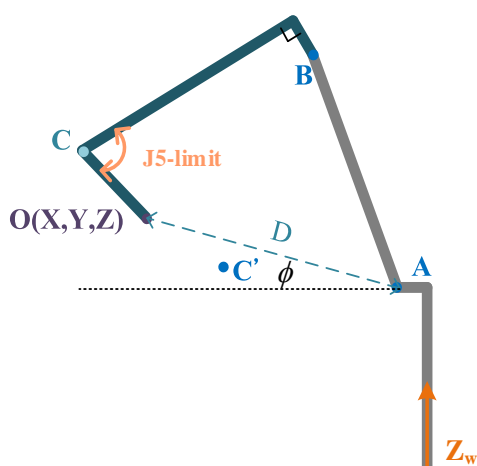


圖 3-23 夾取姿態推至正極限的一個例子      圖 3-24 計算最理想夾取姿態的座標

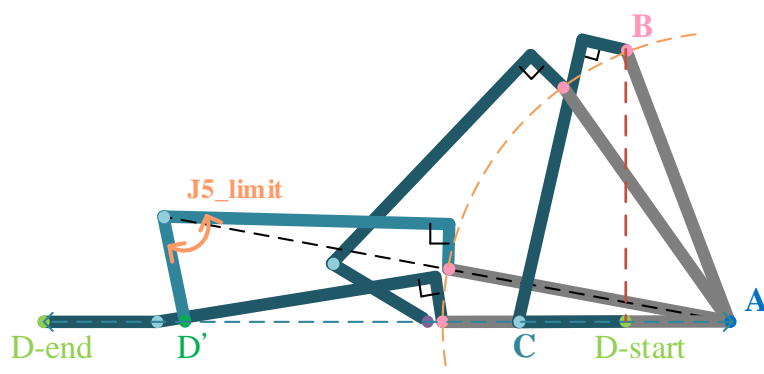


圖 3-25 物體擺放在定義範圍內不同位置下的夾取姿態正極限示意圖

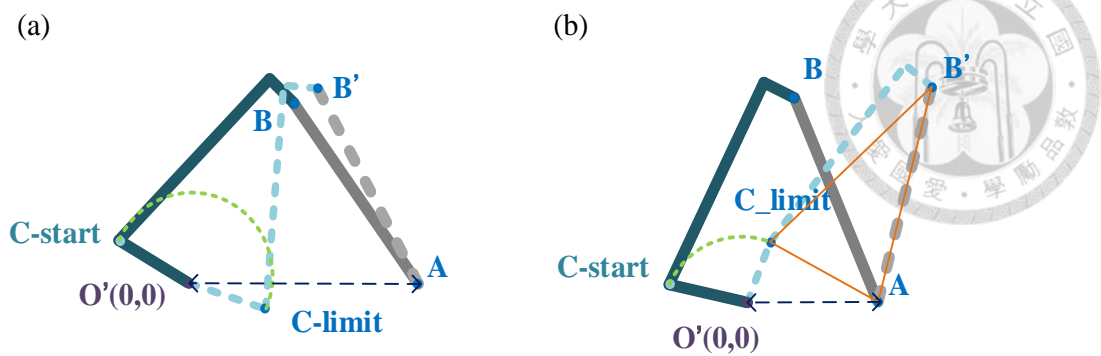


圖 3-26 物體擺放在兩個不同位置時的正負極限示意圖

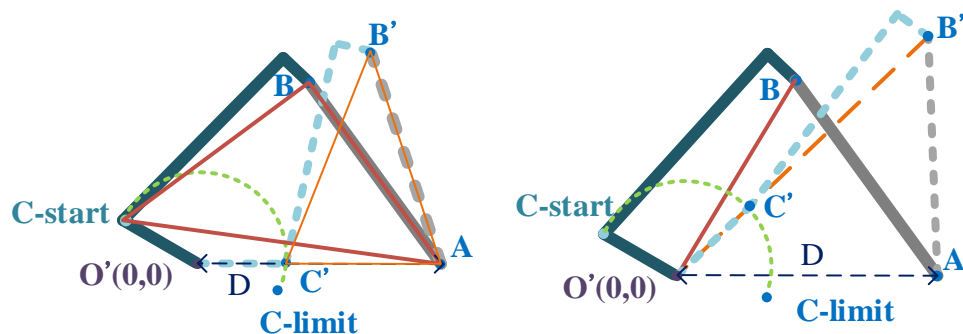


圖 3-27 圖 3-26(a)物體擺放位置的 J2 及 J3 負極限示意圖

#### (a)計算連續的夾取姿態範圍

為了找出當手臂第一軸轉至正對物體時所有「連續」夾取姿態的範圍，先將夾取姿態  $\overrightarrow{CO}$  推至某一軸的行程正極限，如圖 3-23 所示，由此夾取姿態當做起點往回尋  $\overrightarrow{CO}$  對 O 點順時針旋轉至某一軸的行程負極限的位置。為了方便計算，需將做簡單的轉換：當一物體放在正 X 區域的任意位置時，手臂第一軸轉至正對物體時的截面如圖 3-23 所示，若純粹考慮物體位置與手臂之間的關係，可以將圖 3-23 轉化為圖 3-24，兩者之間相差一個  $\phi$  的角度。

藉由圖 3-24 的例子可以快速的了解夾取姿態由極限位置順時針迴轉的過程中各軸的狀態。圖 3-24 中的夾取姿態為轉至正極限的夾取姿態，夾爪轉至負極限的過程中 C 點會以順時針的方線沿著綠色圓形的路徑移動，移動的過程中 J5、J3 和 J2 的角度皆會變動並且會逐漸碰到某一軸的行程極限，而物體在圖中的位置時手

臂轉至夾取姿態負極限的過程中會先碰到 J5 的行程極限(110 度)。由三角形 ACB 可看出 J3 的角度和  $\overline{AC}$  長度有關；由三角形 BO'A 可看出 J2 的角度和  $\overline{O'B}$  長度有關；而 J5 的行程極限可由幾何關係直接算出。這三個關係可幫助計算時快速的找出 J5、J3 和 J2 在姿態旋轉過程中的最大和最小(或極限)角度。

物體在不同距離下夾取姿態推至正極限的夾取姿態如圖 3-25 所示。物體擺放位置需距離 A 點大於 D-start(真實設定為 100.0mm，是手臂第一軸的桿件半徑)和小於 D-end(singular point)。物體擺放在 D-start 到 D-end 距離的距離之間夾爪不會在推至正極限的過程中先碰到 J2 的行程極限(擺放在 D-start 的距離時，實驗中正極限的  $\angle OAB$  加上  $\phi$  可能的最大角度  $90^\circ$  為 157.891 度)；若物體擺放位置的距離小於 D' 則夾取姿態推至正極限時 J5 會先到達行程極限 110 度；若距離大於 D' 則 J3 會先到行程極限-83.25 度。

圖 3-25 所示的一系列姿態即為物體在不同距離下連續夾取姿態的起點，夾取姿態  $\overline{CO}$  自起點繞 O 點順時針旋轉的過程中會先後碰到不同軸的行程極限(一點要注意的為 J3 在計算行程極限位置時要將  $\phi$  考慮進去)，圖 3-26(a)即為夾取姿態在連續旋轉的過程中會先碰到 J5 的行程極限，而圖 3-26(b)即為夾取姿態在連續旋轉的過程中會先碰到 J3 的行程極限(與  $\overline{AC}$  長度有關)。圖 3-26 中的弧線  $CC_{\text{limit}}$  即為連續的夾取姿態範圍

(b)在連續的夾取姿態範圍內計算出最佳的夾取姿態

在弧線  $CC_{\text{limit}}$  的範圍內 J2、J3 和 J5 分別都是可以找到一最大和一最小值，各軸的最大和最小值再與各軸最適中的位置比較綜合三軸資訊計算出一定義的「最佳的夾取姿態」。以圖 3-26(a)的情況為例子，J5 的最大和最小值為其行程極限 110 和-110 度；J3 的最大值發生在  $\overline{AC}$  長度最短時，而最小值發生在  $\overline{AC}$  長度最長時，如圖 3-27 右邊的紅色和橘色三角形所示；J2 的最大值發生在  $\overline{CB}$  長度最短時，而最小值  $\overline{CB}$  長度最長時，如圖 3-27 左邊的紅線和橘線所示。

各軸的最大角度  $J_{i-\max}$  (下標的  $i$  為軸的指標) 和最小角度  $J_{i-\min}$  會與的各軸最適中的角度  $J_{i-\text{ideal}}$  比較( $J_2$  的  $J_{i-\text{ideal}}$  需考慮  $\phi$ ，不直接為預設的 10 度)。計算後會得出各軸的  $J_{i-\text{best}}$  與比重  $w_i$ ，此比重與  $J_{i-\text{best}}$  和  $J_{i-\text{ideal}}$  的距離和每一軸從  $C_{\text{start}}$  到  $C_{\text{limit}}$  轉的行程大小還有速度相關，詳細過程如(式 3-18)和(式 3-19)所示，其中  $J_{i-\text{range}}$  為各軸的行程範圍。

計算出各軸的  $J_{i-\text{best}}$  後可推算回各軸在此角度下的夾取姿態  $C_{i-\text{best}}$  在圖 3-26(a) 的情況下三軸計算出來分別的最佳夾取姿態將大至上如圖 3-28 所示，而欲求的  $C_{\text{best}}$  將由(式 3-20)求出。

$$\begin{aligned}
 &\text{if } J_{i-\min} \leq J_{i-\text{ideal}} \leq J_{i-\max} \\
 &\quad J_{i-\text{best}} = J_{i-\text{ideal}} \\
 &\text{else if } J_{i-\max} < J_{i-\text{ideal}} \\
 &\quad J_{i-\text{best}} = J_{i-\max} \\
 &\text{else if } J_{i-\text{ideal}} < J_{i-\min} \\
 &\quad J_{i-\text{best}} = J_{i-\min}
 \end{aligned} \tag{式 3-18}$$

$$w_i = \left| \frac{J_{i-\text{ideal}} - J_{i-\text{best}}}{J_{i-\text{ideal}}} \right| + \left| \frac{J_{i-\max} - J_{i-\min}}{J_{i-\text{range}}} \right| + \left| \frac{J_{i-\max} - J_{i-\min}}{C_{\text{start}} - C_{\text{limit}}} \right| \tag{式 3-19}$$

$$C_{\text{best}} = (-\phi) + \left( \sum_{i=1}^3 C_{i-\text{best}} \times w_i \right) / \sum_{i=1}^3 w_i \tag{式 3-20}$$

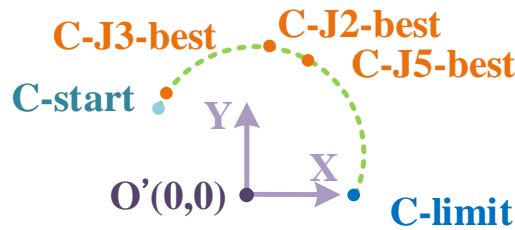


圖 3-28 圖 3-26(a)各軸最適中的夾取姿態

由最理想夾取姿態的計算可以了解在實驗場景中哪個範圍是最適合手臂進行夾取作業的。圖 3-29 為 Z 軸位置固定在 8.5 cm 而 X 方向持續改變計算出來的最理想夾取姿態，8.5 cm 是實驗中測試物體的大致夾取位置，而 20 cm~70 cm 是在實驗場景中預計的手臂工作範圍。研究中在夾取時傾向讓夾爪以由上往下或由前往後靠近物體的方式進行夾取，由圖 3-29 可以推測 60 cm 左右的物體擺放位置是較佳的。

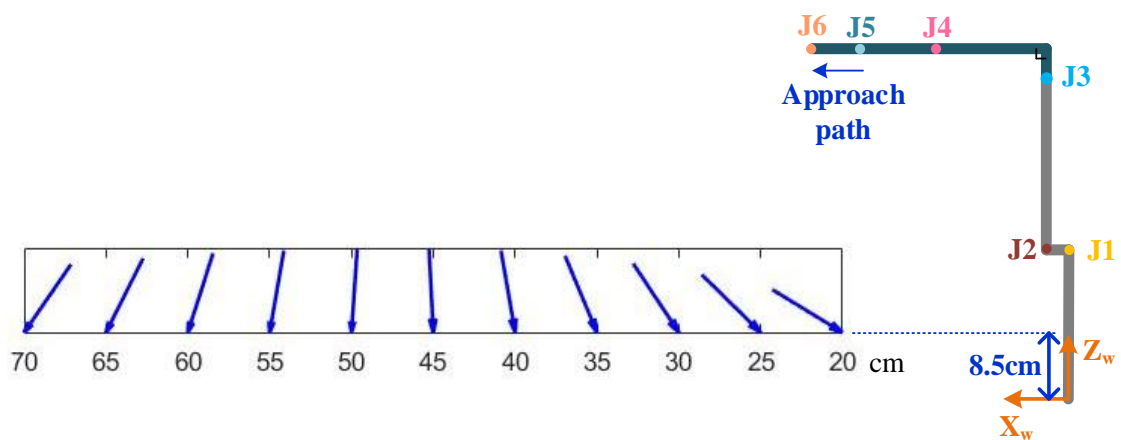


圖 3-29 最理想夾取姿態在不同位置時之示意圖

### 3.3.3 定義基準向量與基準座標系

#### 3.3.3.1 定義基準向量

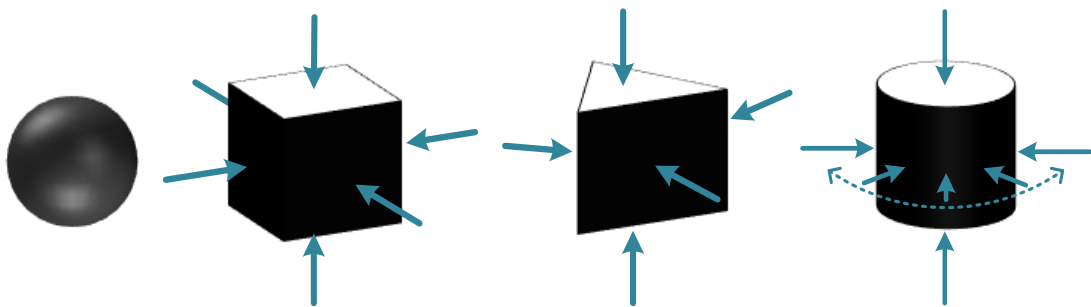


圖 3-30 四個定義的幾何形狀適合的夾取路徑(圓適合的夾取路徑為無線多個)

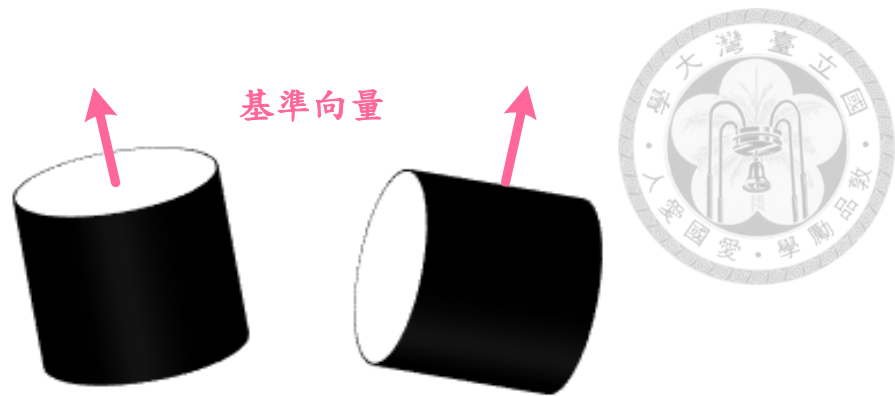


圖 3-31 以兩個例子示意圓柱在不同姿態下定義的基準向量

基準向量的定義和模型之幾何形狀本身存在之適合的夾取路徑有關，在本研究中四個夾爪可以夾取的幾何形狀各自定義之適合的夾取路徑如圖 3-30 所示，基準向量的定義即為在模型幾何形狀當下姿態的所有夾取路徑中最接近「不允許的夾取路徑」此假設的路徑向量。在本研究中，所有的物體都會被放在桌上供手臂夾取，因此由下往上的夾取路徑始終會被阻擋，考慮此環境因素在本研究中定義的「不允許的夾取路徑」為垂直由下往上的路徑。

圖 3-31 中以兩個不同姿態下的圓柱物體為例示範如何定義本研究中的基準向量，此物體放在桌上，則由下往上的路徑始終會被阻擋，因此會在圓柱所有的夾取路徑(圖 3-30 所示)中找最接近由下往上的夾取路徑定義為基準向量。

### 3.3.3.2 定義基準座標系

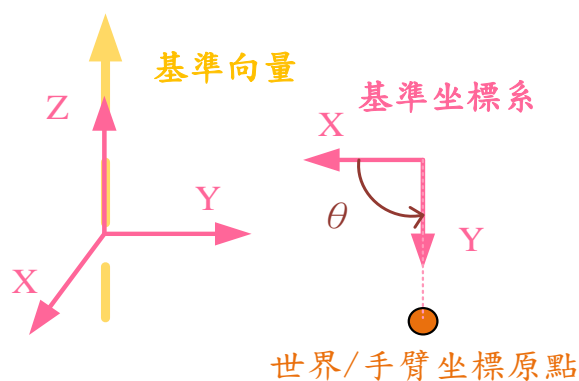


圖 3-32 基準座標系的定義方法示意圖

若要建立一系列夾取姿態則需要一個完整的座標系才能清楚的定義所有的夾取姿態，而此座標系的定義應與夾取運動有重要的關聯。論文中所有夾取姿態的定義將建立在以基準座標系為基礎定義的基準坐標系之上，而非物體姿態的坐標系，因為基準向量在演算法中代表的空間意義是非常重要的。

論文中定義的基準座標系如圖 3-32 所示，基準坐標系的 Z 軸方向即為基準向量的方向，基準坐標系的原點即為物體的重心位置，而基準坐標系 XY 平面 $\theta = 90^\circ$ 的向量會指向世界座標原點投影至基準坐標系 XY 平面的點。

### 3.3.4 定義重心夾取姿態與邊緣夾取姿態

有了基準座標系之後，即可依此基準向量定義完整的一系列夾取姿態。所有夾取姿態包含了夾取重心位置的夾取姿態和夾取邊緣位置的夾取姿態。因為物體模型的形狀是由重心位置的形狀簡化而來且重心位置的夾取穩定性較高，因此重心夾取姿態的選擇順位將比邊緣夾取姿態高。

此部分除了定義不同類別的夾取姿態之外，也會說明不同類別夾取姿態下夾爪的分割方法。如前面所提到的，成功夾取需要的兩個條件為物體需要有足夠的面和空間(grasping surface)供夾爪碰觸夾取和不被阻擋的夾爪靠近路徑(approach path)，簡單來說也就是「整個夾爪」在 approach 的路徑上和夾爪閉合至碰觸到物體表面的過程中皆不能被障礙物阻擋。為了偵測整個夾爪的碰撞情形，研究中將整個夾爪依其幾何形狀分為指頭區(finger area)和手腕區(wrist area)兩區，兩個區域分別偵測計算後再組合為一個夾取姿態，圖 3-33 以一兩指模式為例示範如何分割指頭區和手腕區。為了計算上的方便，不同類別夾態姿態夾爪的分割會有些為的差異，以下會再詳細說明。

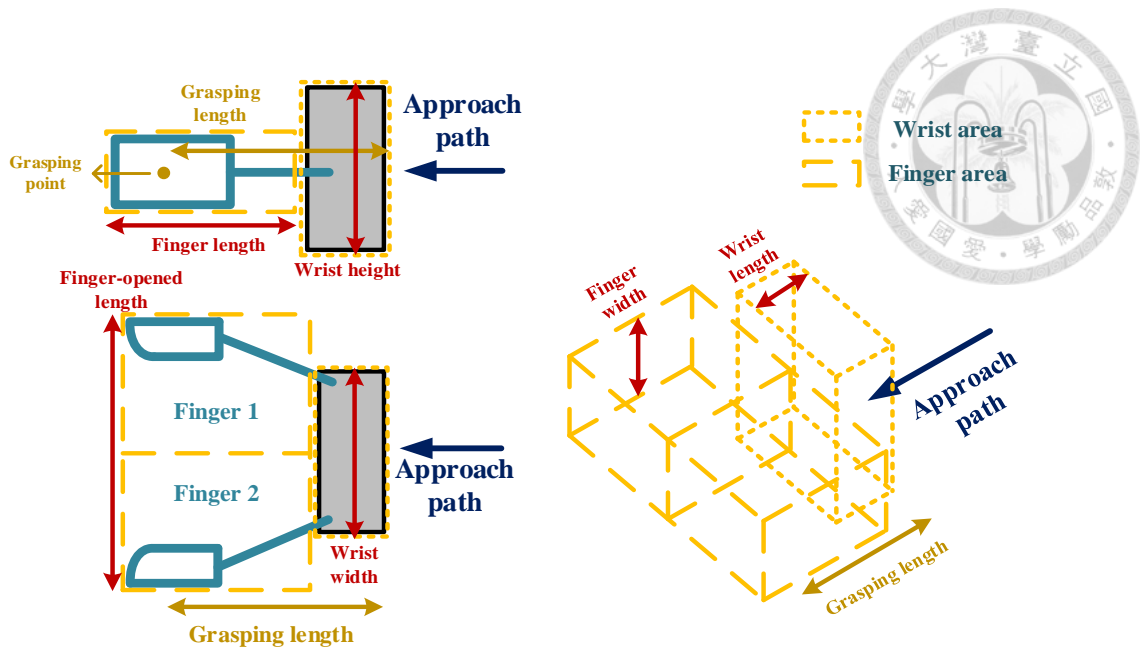


圖 3-33 夾爪手指區與手腕區的分割示意圖

#### 3.3.4.1 定義 A、B、C、D 四類重心夾取姿態

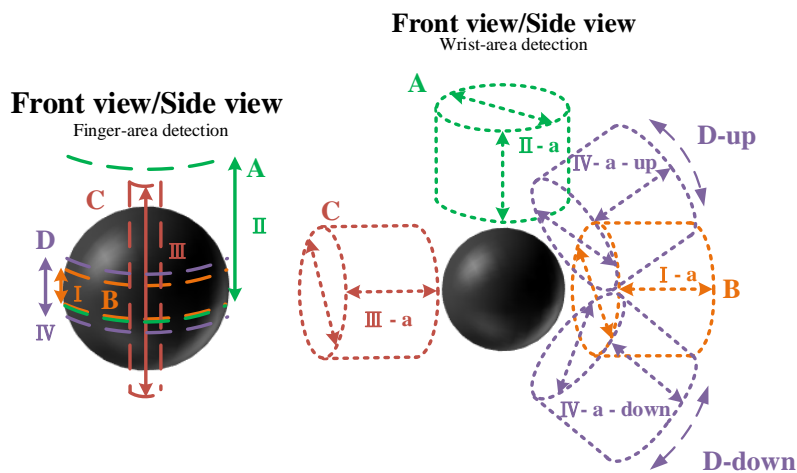


圖 3-34 四類夾取姿態手指區與手腕區的搜尋範圍示意圖

A、B、C、D 四類夾取姿態正是依照指頭區(finger area)和手腕區(wrist area)的偵測範圍不同分成四類。A、B、C、D 四類夾取姿態各自需偵測的指頭區範圍和手腕區範圍至大上如圖 3-34 所示。偵測完成後若有可以組合成一個完整夾取姿態的指頭和手腕區則可以組合成一個可行的夾取姿態。以下將詳細定義四類夾取姿態與偵測時各自的夾爪分割方式。



(a) A 類夾取姿態

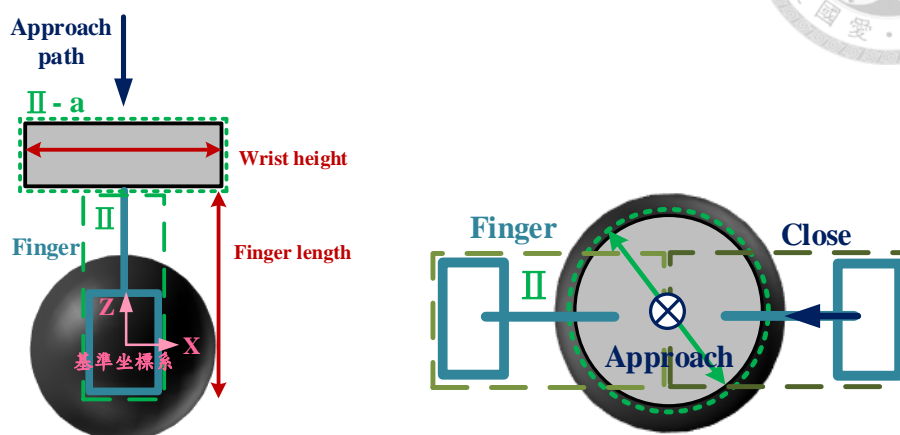


圖 3-35 A 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖

A 類夾取姿態定義的 approach path 為與基準向量反向且通過物體重心的向量，其允許兩指和三指兩種模式的夾取。指頭閉合方向的定義為與基準向量垂直且夾取位置連線會通過物體重心之所有向量集合，也就是與基準向量(基準座標系 Z 軸)垂直繞基準向量 360 度之所有通過物體重心的向量集合，在本篇論文中定義 1 度為一組夾取面，因此，與 approach path 組合後 A 類總共有 720 組夾取姿態(包含兩指和三指模式)。

A 類夾取姿態夾爪的分割方式如圖 3-35 所示，圖中以兩指模式下 A 類的其中一個夾取姿態為例。A 類夾取姿態手腕區為圖中的 II-a 區而手指區為圖中的 II 區，A 類手指區的分割方式為一指一個區域，可組合為三指或兩指模式。



## (b) B 類夾取姿態

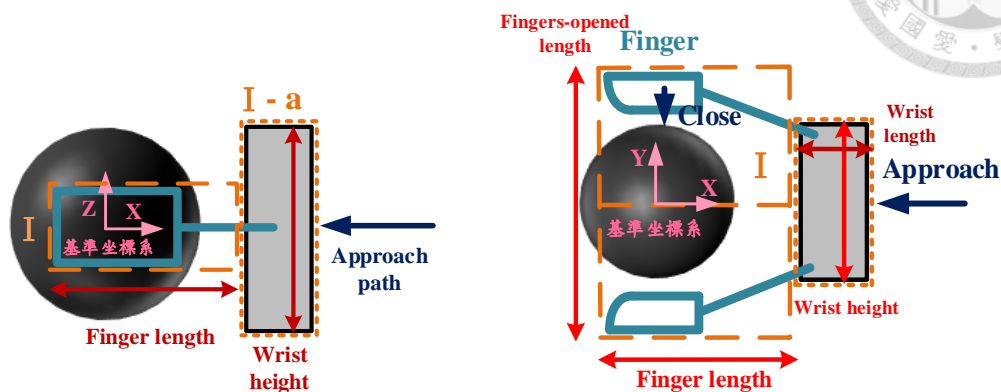


圖 3-36 B 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖

B 類夾取姿態定義的 approach path 為所有與基準向量垂直且指向物體重心的向量，也就是與基準向量(基準座標系 Z 軸)垂直繞基準向量 360 度之所有通過物體重心的向量集合，在本篇論文中定義 1 度為一組 approach path，每一 approach path 只允許一組兩指模式的夾取，因此 B 類總共有 360 組夾取姿態。夾取時指頭閉合方向的定義為同時與 approach path 和基準向量垂直且會通過重心的向量。

B 類夾取姿態夾爪的分割方式如圖 3-36 所示，圖中以 B 類的其中一個夾取姿態為例。B 類夾取姿態手腕區為圖中的 I - a 區而手指區為圖中的 I 區，B 類因為只有兩指模式因此不需再切割，兩指一起偵測即可。

(c)C 類夾取姿態

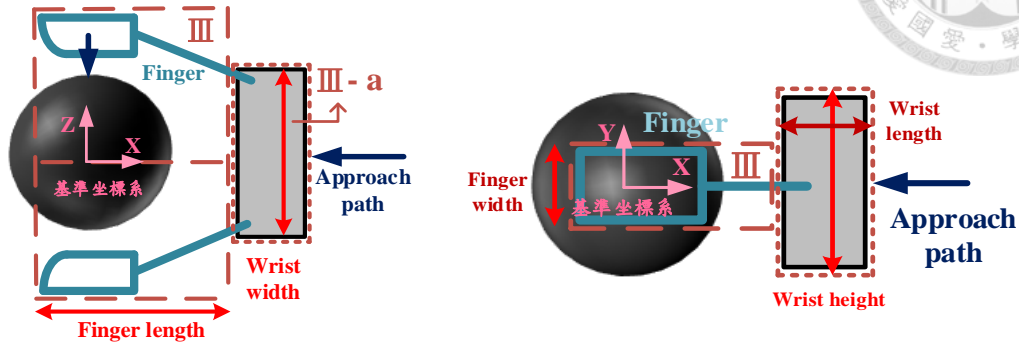


圖 3-37 C 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖

也就是與基準向量(基準座標系 Z 軸)垂直繞基準向量 360 度之所有通過物體重心的向量集合，在本篇論文中定義 1 度為一組 approach path，每一 approach path 只允許一組兩指模式的夾取，因此 C 類總共有 360 組夾取姿態。夾取指頭閉合方向的定義為沿著基準向量的向量。總結上述，C 類總共有 360 組夾取姿態。

C 類夾取姿態夾爪的分割方式如圖 3-37 所示，圖中以 C 類的其中一個夾取姿態為例。C 類夾取姿態手腕區為圖中的 III-a 區而手指區為圖中的 III 區，C 類因為只有兩指模式因此不需再切割，兩指一起偵測即可。



(d) D 類夾取姿態

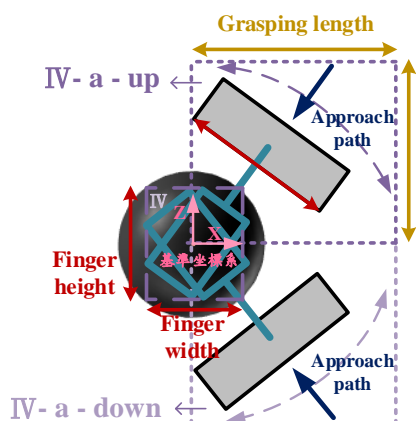


圖 3-38 D 類重心夾取姿態手指手腕區分割示意圖

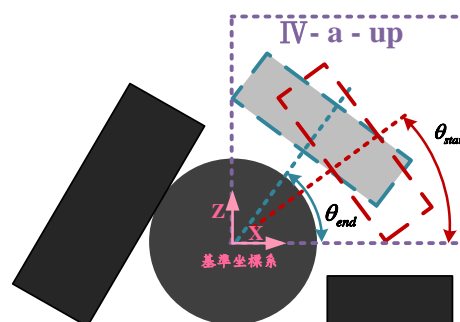


圖 3-39 一組 D 類重心夾取姿態 approach path 的調整範圍示意圖

D 類夾取姿態包含了 D-up 和 D-down，兩者有一樣的指頭搜尋範圍因此分為同一類，其夾爪的分割方式如圖 3-38 所示，同中以 D 類的其中一組 D-up 和 D-down 夾取姿態為例，由圖可以看出，不同於 A、B、C 類夾取姿態的切割方式，D 類夾取姿態一個手腕區內包含一個以上對應的夾取姿態，手指區的分割方式與 A 類夾取姿態類似，是將指頭分開分割，兩個可行的手指區可足合為一個完整的兩指閉合夾取。

D-up 之 approach path 為基準座標系中 XY 平面和正 Z 方向之間繞 Z 軸旋轉且指向重心的向量集合；D-down 之 approach path 為 XY 平面和正 Z 方向之間繞 Z 軸旋轉且指向重心的向量集合。其中要注意的地方為，以圖 3-38 的 D-up 夾取姿態為例，雖然 D-up 夾取姿態都可以對 Y 軸旋轉並進行調整，但是因為其在同樣的手腕搜尋範圍以內，會先計算為只有一個夾取姿態，最後再將其繞 Y 軸調整至最靠近「最理想夾取姿態」的 approach path。在本篇論文中定義 1 度為一組 approach path，每一 approach path 只允許一組兩指模式的夾取，因此，包括 D-up 和 D-down D 類總共有 720 組夾取姿態。夾取時指頭閉合方向的定義為同時與 approach path 和基準向量垂直且會通過重心的向量。

圖 3-39 中以一組 D-up 夾取姿態為例定義其繞 Y 軸旋轉的範圍，approach path 之起始角度(approach path 與 X 軸之夾角)與結束角度(approach path 與 Z 軸之夾角)分別為  $\theta_{end}$  和  $\theta_{start}$ 。起始角度與結束角度並非 0 度和 90 度是因為手腕區偵測範圍只能保證在  $\theta_{end}$  和  $\theta_{start}$  之間沒有障礙物，而會選擇這樣的偵測範圍定義 D 類夾取姿態搜尋範圍的原因有四點：

第一點，以圖 3-38 為例，D-up 和 D-down 的 approach path 只是為了補足當 A 類夾取姿態之 approach path 和 B 類夾取姿態之 approach path 皆會被阻擋時之 approach path，因此不需要包含 0 度和 90 度的 approach path 也不需要一組非常完整之 approach path。

第二點，由圖 3-39 可以看出當 B 類夾取姿態的 approach path(圖中基準座標系的負 X 方向)被阻擋時，0 度到  $\theta_{start}$  之間存在夾取姿態的可能性非常小，也可以看出當 A 類夾取姿態的 approach path (負 Z 方向)被阻擋時， $\theta_{end}$  到 90 度之間存在夾取姿態的可能性非常小。

第三點，在這樣定義下 A 類與 B 類之間的夾取姿態可以連接。以 D-up 為例 A 類和與 B 類之 approach path 皆不會被阻擋時，則表示 0 度到 90 度之間連續的 approach path 皆不會被阻擋，並不會有某一段 approach path 是不能被確認的。

第四點，以圖 3-38 之截面為例，切割物體重心以上和以下的偵測範圍容易操作和計算。

綜合以上四點，此種定義 D-up 和 D-down 偵測範圍的方法在很小的機率下可能會忽略少數幾個夾取姿態，但是在絕大多數的情況下適用且非常容易計算跟操作。

從四類重心夾取姿態的定義和夾爪的分割方式可以瞭解到各類夾取姿態的判斷皆只需要基準坐標系上正負 Z 之間一個範圍的環境資訊即可，因此計算速度快，這也是為什麼研究中將夾取姿態分為 A、B、C、D 四類。四類夾取姿態各自包含的夾取姿態如表 3-3 所示。

表 3-3 四類重心夾取姿態的整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態	B 夾取姿態	C 夾取姿態	D 夾取姿態
approach path 數目	1	360	360	Up 360 Down 360
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 360 三指 360	兩指 1	兩指 1	兩指 1
總夾取姿態(組)	720	360	360	720

### 3.3.4.2 定義 A、B、C、D 四類邊緣夾取姿態

邊緣夾取姿態為由重心夾取姿態延 approach path 方向退回物體邊緣處(如圖 3-20 所示)做夾取的一系列夾取姿態，此類夾取姿態尤其適合在重心夾取姿態皆不可行或物體的尺寸較大導致夾爪無法伸至重心位置時。以下將分別定義四類邊緣夾取姿態。

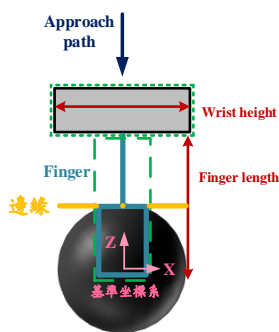


圖 3-40 A 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖

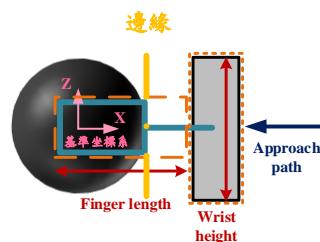


圖 3-41 B 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖

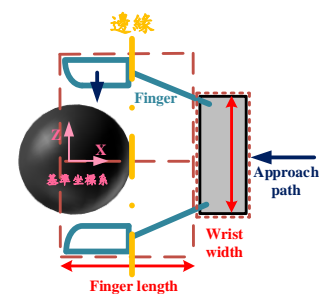


圖 3-42 C 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖

#### (a) A 類夾取姿態

A 類邊緣夾取姿態 approach path 的定義與 A 類重心夾取姿態相同，而指頭閉合方向的定義基本上也與重心夾取相同，只是其閉合方向不用通過重心而是通過邊緣夾取的位置，如圖 3-40 所示。



### (b)B 類夾取姿態

B 類邊緣夾取姿態 approach path 的定義與 B 類重心夾取姿態相同，而指頭閉合方向的定義基本上也與重心夾取相同，只是其閉合方向不用通過重心而是通過邊緣夾取的位置，如圖 3-41 所示。

### (c)C 類夾取姿態

C 類邊緣夾取姿態 approach path 的定義與 C 類重心夾取姿態相同，而指頭閉合方向的定義基本上也與重心夾取相同，只是其閉合方向不用通過重心而是通過邊緣夾取的位置，如圖 3-42 所示。

### (d)D 類夾取姿態

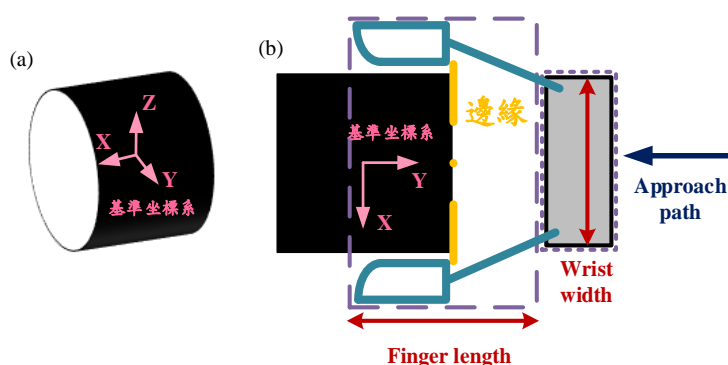


圖 3-43 D 類邊緣夾取姿態手指手腕區分割示意圖

D 類邊緣夾取姿態 approach path 的定義也與重心夾取姿態相同，而指頭閉合方向的定義基本上也與重心夾取相同，只是其閉合方向不用通過重心而是通過邊緣夾取的位置；但是，夾爪的切割方式與重心夾取姿態有很大的不同。因為，幾何形狀擁有的可行 D 類夾取姿態數量通常很少，因此，不同於 D 類重心夾取姿態中一組手腕搜尋區域包括了一個以上的夾取姿態的手腕切割方式 (如圖 3-38 所示)，將 D 類邊緣夾取姿態改變成如 A、B、C 類夾取姿態一樣一組夾取姿態有一對應的手腕搜尋區域。

圖 3-43(a)以一圓柱為例說明 D 類邊緣夾取姿態夾爪的分割方式，圖中的物體只有在繞 Z 軸 90 度和 270 度處有 D-up 和 D-down 夾取姿態，因此只要取出 X 軸正負一個範圍內的環境資訊，如圖 3-43(b)所示，即可判斷所有繞 X 軸旋轉的夾取姿態。但是，為了撰寫程式上的統一性，只會在 90 度 D-up、90 度 D-down、270 度 D-up、270 度 D-down 範圍內各自選擇一個最接近「最理想夾取姿態」的夾取姿態。

### 3.3.5 目標理想的夾取姿態

#### 3.3.5.1 硬體限制下可行的夾取姿態

##### (a)夾爪的限制

夾爪機構在夾取上會造成的限制包含夾爪能開合的極限和能伸至重心位置長度的極限。

##### (b)相機的限制

相機對夾取造成的限制為無法判斷物體後方的障礙物情形，針對此限制，可做兩個情況的假設。

第一個情況假設物體的數量很少且分布稀疏，在此情況下假設所有物體皆會被定位到，因此不用減小 grasping surface 和 approach path 的搜尋範圍。

第二個情況下設物體的數量多且分布密集，在這樣的情況下相機只能定位到最相機照射方向前排的物體。因為無法確認後排物體的分布情形，只能假設所有被前排物體(包括目標本身)擋住而無法成像的區域為無限遠的障礙物。在這樣的假設下 grasping surface 和 approach path 的搜尋範圍將會快速減少。

本研究中因為沒有使用深度相機，要從各物體的定位結果轉至 2.5D 點雲需耗費大量的計算時間，且就現階段的實驗仍專注於物體擺放較鬆散的環境中，因此研究中的實驗將假設在第一種所有物體皆被定位到的情況中。

### (c) 手臂運動的限制

研究中在意的手臂運動限制為手臂是否能順暢的到達預備和夾取位至以及夾取物體後是否也能順暢的到達目的地，因此希望將容易到達手臂行程極限以及不是必要的夾取姿態直接扣除。如圖 3-44 所示，負 Y 方向 approach 的夾取姿態(也可以想成是由後往前的夾取姿態)，容易在整個夾取的過程中讓手臂 J5 到達行程極限且手臂在這類的姿態下夾取物體可能會碰撞到物體前方的障礙物，然而，此種由後往前的夾取姿態從人類拿取的經驗來看也是很少會使用到的，因此直接將所有由後往前 approach 的夾取姿態扣除。

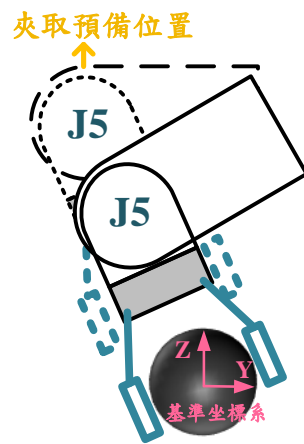


圖 3-44 由後往前的夾取姿態在手臂運動上的限制

#### 3.3.5.2 演算法限制下可行的夾取姿態

本論文中的演算法只有保證夾爪(如圖 3-18 所示)在 approach 過程中不會有碰撞，但無法保證手臂不會有碰撞。然而整個演算法的重點是在 approach 的過程中能找出一個絕對可行的夾取姿態。為了達到這個目的，研究中的作法大至上分為兩個步驟：

第一步，假設在一個定義的區域以外不會有障礙物，若能將手臂的整個運動過程都移出此區域，則能保證在此範圍內被計算出來可行的夾取姿態在整個 approach 的過程中手臂不會有碰撞發生，而夾取姿態的搜尋範圍的定義需大於這個區域。

第二步，若在這個定義的區域以外有障礙物、又或者若有無法將手臂的整個運動移出這個定義區域的夾取姿態，則利用加入決策條件的方式避免手臂的碰撞。

以下將詳細介紹這兩個步驟的做法，分別為增加了一個 J5 的行程條件限制和增加一系列的決策條件。

(a) 增加手臂 J5 行程極限的限制

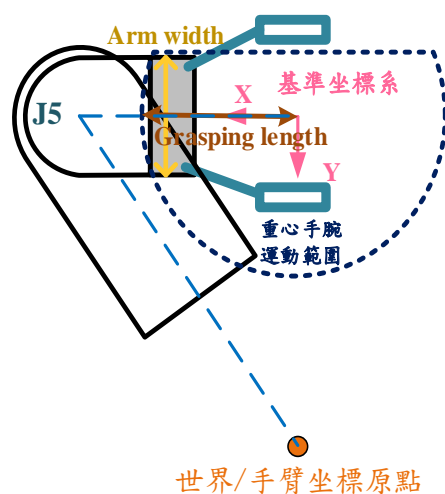


圖 3-45 尚未加入 J5 行程極限條件時手臂位於空間中可能的位置

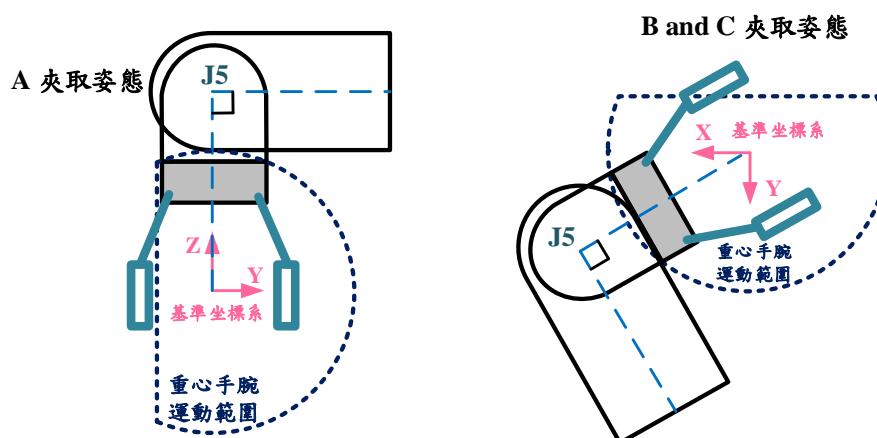
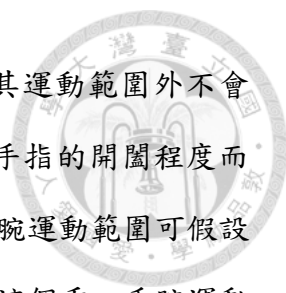


圖 3-46 加入 J5 行程極限條件後手臂的位置示意圖



研究中假設在一個圍繞著某點(物體重心位置)運動的夾爪手腕其運動範圍外不會有障礙物，雖然不同的重心夾取姿態手腕距離重心的距離會因手指的開闔程度而有所不同，然而差異並不大，因此可以假設為相同，則此重心手腕運動範圍可假設為一個正圓形，以下將稱這個區域為重心手腕運動範圍，圖中這個重心手腕運動範圍已經直接扣除「手臂運動的限制」，所以沒有由後往前的夾取姿態因此將不會是一個正圓形。

如圖 3-45 所示，當還沒有加入任何形成條件限制時，手臂有可能會進入到此區域，然而，如圖 3-46 所示，若將 J5 的行程極限限制在正負 90 度以內且夾取姿態的偵測範圍大於此區域，就能保證在所有 A、B、C、D 重心和邊緣夾取姿態下 approach 的過程手臂皆不會進入這個重心手腕運動範圍之內。而由圖 3-46 也可以看出，重心手腕運動範圍的定義可以小於真實重心手腕的運動範圍，而夾取姿態的搜尋範圍需大於或等於重心手腕運動範圍；越大的夾取姿態的搜尋範圍意味著越遠的 approach path，而這是不被希望的，因此在實驗中須綜合夾爪的尺寸以及期望的 approach path 和期望偵測的障礙物範圍定義一個適合地重心手腕的運動範圍。

由人類拿取的過程來看，我們也很少會以手腕大於 90 度的姿態下拿取物體，因此研究中假設將手臂 J5 的行程極限限制於正負 90 度以內是合理的。



(b) 增加一系列的決策條件

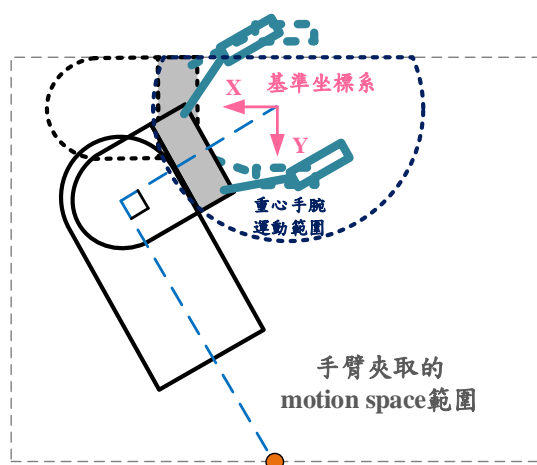


圖 3-47 將障礙物分為三區的示意圖

增加了 J5 的行程限制後只能保證經過計算後被選擇的重心和邊緣夾取姿態 D 夾取姿態在當障礙物只分布於手腕運動範圍內是可行的，因此還需要增加決策條件保證所有被選擇的夾取姿態在所有障礙物分布的狀況下手臂是不會碰撞的。

此部分會依障礙物分布的區域不同來加入決策條件，研究中將障礙物分布的區域分為三區，重心手腕運動範圍以內、重心手腕運動範圍以外和手臂夾取的 motion space 範圍以內以及手臂夾取 motion space 的範圍以外。手臂夾取的 motion space 範圍為整個夾取的過程中手臂會經過的區域。三個區域的示意如圖 3-47 所示，若有障礙物分布於手臂夾取的 motion space 範圍以外並不會對手臂的碰撞造成影響，此區域內的障礙物不用被考慮；而重心手腕運動範圍內的障礙物加入 J5 形成極限限制條件之後也可以避免手臂的碰撞，也不需要再被確認一次。因此，需要被確認的區域只有重心手腕運動範圍以外和手臂夾取的 motion space 範圍以內這個區域。

在這個區域內所有被選擇的 A、B、C、D 夾取姿態皆沒有辦法在加入了 J5 行程限制後被保證手臂不會在夾取過程中碰撞，因此所有的夾取姿態皆會有一個對應的區域將其排除以避免手臂的碰撞，要注意的事，在這邊是架設所有物體皆在正常推疊的狀態。以下分重心夾取和邊緣夾取說明。



### (1)重心夾取

為了避免重心夾取時手臂的碰撞，研究中將手臂夾取的 motion space 範圍以內分割為八個區域(如圖 3-48 所示)，若障礙物到物體重心的距離大於重心手腕運動範圍且屬於八個區域中的其中一個區域就需要進入以下的決策判斷條件。每個區域對應需要扣除的夾取姿態如表 3-3 所示。

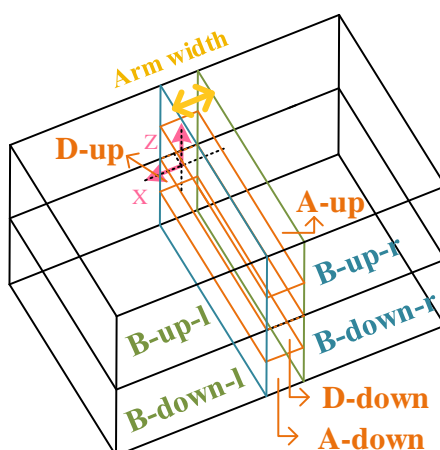


圖 3-48 手臂夾取的 motion space 範圍以內分割八區的示意圖

### (2)邊緣夾取

不同於重心夾取的所有夾取位置皆位於重心，邊緣夾取姿態的夾取位置是物體的尺寸而有所不同，並不絕對，因此無法像重心夾取一樣訂出一個對所有重心夾取姿態大小皆非常相近的手腕運動範圍並假設其為一個正圓；然而，仍然可以將邊緣夾取中距離最短的手腕距離假設為邊緣夾取手腕運動範圍的半徑，這在當物體的長短軸差異極大且周圍有障礙物時有很大的機率會犧牲掉長軸的邊緣夾取姿態，但是日常生活中大部分的物品仍然適合這樣的假設且比起對於每個邊緣夾取姿態單獨計算可以省下許多計算的時間。訂出邊緣夾取姿態的手腕運動範圍後，計算方法與中心夾取姿態相同，也就是將各邊緣夾取位置周圍的障礙物狀況切成如所示的八個區域再對夾取姿態做手臂是否可能會碰撞的判斷。

表 3-4 手臂 motion space 以內障礙物分布位置對應須移除的夾取姿態

移除的重心夾取姿態	B-up-l	B-up-r	B-down -l	B-down -r
A(approach 方向)	X	X	X	X
B(度)	0~89	91~180	0~89	91~180
C(度)	0~89	91~180	0~89	91~180
D-up(度)	0~89	91~180	X	X
D-down(度)	X	X	0~89	91~180

移除的重心夾取姿態	A-up	A-down	D-up	D-down
A(approach 方向)	負 Z	正 Z	X	X
B(度)	X	X	90	90
C(度)	X	X	90	90
D-up(度)	X	X	90	X
D-down(度)	X	X	X	90

### 3.3.5.3 模型形狀限制下可行的夾取姿態

Ravi Balasubramanian 用實驗證實了人類在拿取物體時傾向讓手腕與物體的軸方向正交[45]，本研究中依這個結論對四個簡易形狀設計一系列的夾取姿態。以下依照球、圓柱、長方體和三角柱定義由 A、B、C、D 四類重心和邊緣夾取姿態簡化而來的各形狀適合的可行夾取姿態。

- (a) 球：有完整的 A、B、C、D 四類重心夾取姿態(表 3-3)，沒有邊緣夾取姿態。
- (b) 圓柱：依基準向量的不同又分為兩種情況，各自定義的夾姿態如圖 3-50 和圖 3-51 所示，兩種情況各自的詳細的重心和邊緣夾取姿態如表 3-4 和表 3-6 所示。
- (c) 長方體：對於長方體所定義的夾取姿態如圖 3-49 所示，詳細的重心和邊緣夾取姿態如表 3-5 所示。

(d) 三角柱：依基準向量的不同又分為兩種情況，各自定義的夾取姿態如圖 3-52 和圖 3-53 所示，詳細的重心和邊緣夾取姿態如表 3-8 和表 3-9 所示。

除了簡化過的幾何形狀本身的限制之外，還有各模型本身存在的限制。在建模時有針對各模型的面進行是否適合夾取的判斷，扣除這些因模型限制無法被達到的夾取姿態後，即可獲得物體的「模型可行之夾取姿態」。

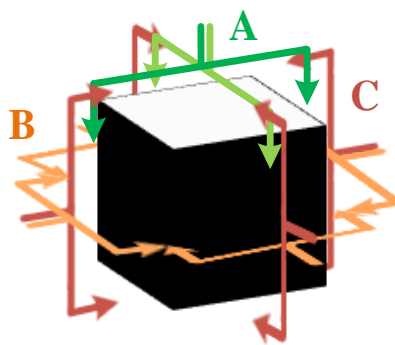


圖 3-49 長方體的夾取姿態

表 3-5 長方體的夾取姿態整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		4		4		Up	0
							Down	0
每一 approach path 配對	兩指	2	兩指	1	兩指	1	兩指	0
之指頭閉合方向數目	三指	0						
總夾取姿態(組)	2		4		4		0	
邊緣夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		4		4		Up	0
							Down	0
每一 approach path 配對	兩指	2	兩指	1	兩指	1	兩指	0
之指頭閉合方向數目	三指	0						
總夾取姿態(組)	2		4		4		0	

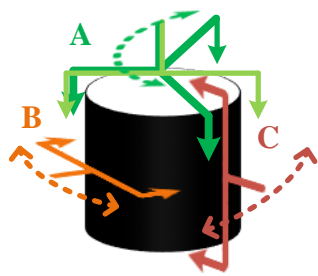


圖 3-50 直立圓柱的夾取姿態

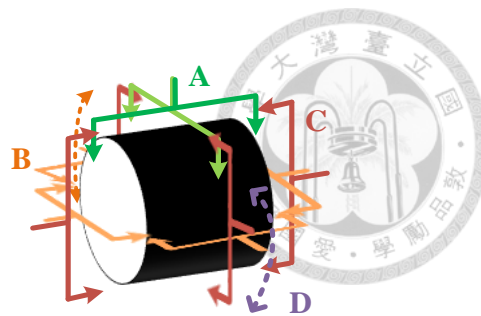


圖 3-51 躺下圓柱的夾取姿態

表 3-6 直立圓柱的夾取姿態整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		360		360		Up 0 Down 0	
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 360 三指 360		兩指 1		兩指 1		兩指 0	
總夾取姿態(組)	720		360		360		0	
邊緣夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		0		360		Up 0 Down 0	
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 360 三指 360		兩指 0		兩指 1		兩指 0	
總夾取姿態(組)	720		0		360		0	

表 3-7 躺下圓柱的夾取姿態整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		4		4		Up 2 Down 2	
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 2 三指 0		兩指 1		兩指 1		兩指 1	
總夾取姿態(組)	2		4		4		4	
邊緣夾取姿態	A 夾取姿態		B 夾取姿態		C 夾取姿態		D 夾取姿態	
approach path 數目	1		4		2		Up 2 Down 2	
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 1 三指 0		兩指 1		兩指 1		兩指 1	
總夾取姿態(組)	1		4		2		4	

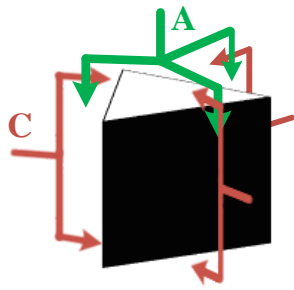


圖 3-52 直立三角柱的夾取姿態

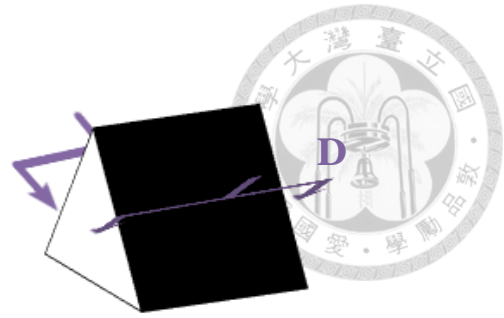


圖 3-53 躺下三角柱的夾取姿態

表 3-8 直立三角柱的夾取姿態整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態	B 夾取姿態	C 夾取姿態	D 夾取姿態
approach path 數目	1	0	3	Up 0 Down 0
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 0 三指 1	兩指 0	兩指 1	兩指 0
總夾取姿態(組)	1	0	3	0
邊緣夾取姿態	A 夾取姿態	B 夾取姿態	C 夾取姿態	D 夾取姿態
approach path 數目	1	0	3	Up 0 Down 0
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 0 三指 1	兩指 0	兩指 1	兩指 0
總夾取姿態(組)	1	0	3	0

表 3-9 躺下三角柱的夾取姿態整理

重心夾取姿態	A 夾取姿態	B 夾取姿態	C 夾取姿態	D 夾取姿態
approach path 數目	0	0	0	Up 2 Down 0
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 0 三指 0	兩指 0	兩指 0	兩指 1
總夾取姿態(組)	0	0	0	2
邊緣夾取姿態	A 夾取姿態	B 夾取姿態	C 夾取姿態	D 夾取姿態
approach path 數目	0	0	0	Up 2 Down 0
每一 approach path 配對之指頭閉合方向數目	兩指 0 三指 0	兩指 0	兩指 0	兩指 1
總夾取姿態(組)	0	0	0	2



### 3.3.6 可行夾取姿態的計算

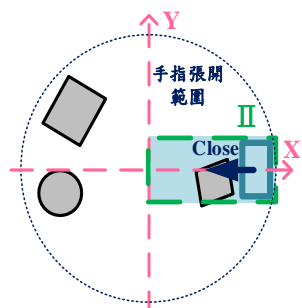


圖 3-54 A 類重心夾取姿態手指區搜尋範圍

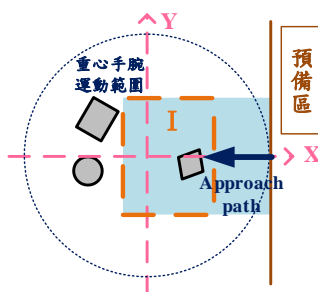


圖 3-55 B 類重心夾取姿態手指區搜尋範圍

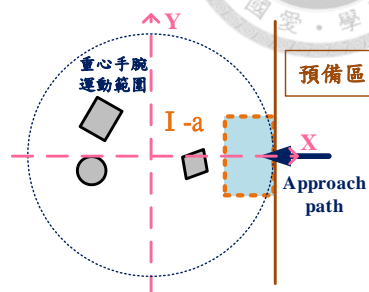


圖 3-56 B 類重心夾取姿態手腕區搜尋範圍

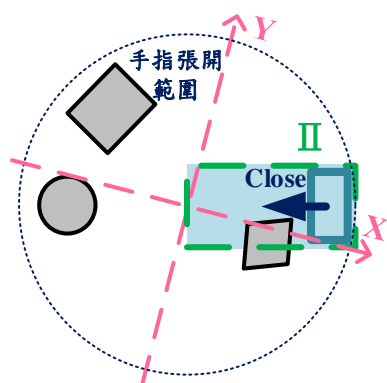


圖 3-57 旋轉障礙物示意圖

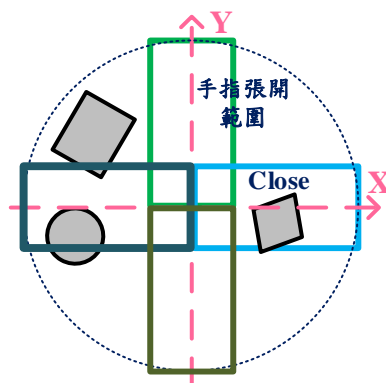


圖 3-58 減少 360 次至 90 次搜尋的方法示意圖

可行的夾取姿態為從「目標可行之夾取姿態」與環境資訊比對計算後獲得。因為已經通過簡單的條件式判斷確保夾爪由起始位置到預備位置是不會碰撞的，因此各類夾取姿態手指區和手腕區的搜尋只需要確保由預備位置到夾取位置的過程不會碰觸障礙物。

在 3.3.5.2 小結有說明過：在增加了 J5 行程條件的限制後，可確保在可行夾取姿態的手臂運動是不會進入到重心手腕運動範圍內，因此夾爪的預備位置至少需大於重心手腕運動範圍。然而研究中不希望夾爪的預備位置離夾取位置太遠，因為這將需要手臂末端姿態保持固定下移動更長的距離，這對手臂的運動軌跡規劃是

較不佳的，因此在實驗中將搜尋範圍定定義為手腕運動範圍。

搜尋方式以 A 類重心夾取姿態為例，如圖 3-35 所示，指頭區的搜尋需要 Z 方向 Finger length 高度和手指張開範圍內的障礙物資訊，將障礙物資訊投影至 XY 平面後如圖 3-54 的灰色區塊所示，而圖中以一個 0 度 A 類重心夾取姿態為例，這個夾取姿態手指閉合的成功需要圖中的淡藍色區域內皆沒有障礙物；若以 B 類重心夾取姿態為例，0 度 B 類重心夾取姿態的手指和手腕區搜尋範圍如圖 3-54 和圖 3-55 的淡藍色區域所示，各自需要的障礙物資訊厚度分別為 Finger width 和 Wrist width(如圖 3-36 所示)。

若要改變夾取姿態的角度進行搜尋有兩個方式，一為旋轉圖 3-54、圖 3-55 和圖 3-55 中的淡藍色區域進行是否有障礙物的確認；二為旋轉障礙物而讓淡藍色區域保持在相同位置進行確認。第一種方法接近真實中的情形，但是操作即計算困難；第二種方法則相對操作起來簡單且計算速度快許多，因此本論文採用第二種方法。以圖 3-54 的夾取姿態為例，將旋轉障礙物一定角度並且讓手指區域保持不變，則障礙物與手指區的空間關係將如圖 3-57 所示。然而，旋轉 360 次障礙物在計算時間上的負荷仍然不小，為了加快計算速度，採用了如圖 3-58 所示的方法(一樣以圖 3-54 夾取姿態為例)，將障礙物旋轉至任一個角度後，可以直接確認圖中框出的四個手指區域。以圖中的情況為例，則表示為將障礙物旋轉 0 度的情況下可以直接確認 0、90、180 和 270 度的指頭閉合情形。這將幫助計算上從需要旋轉障礙物 360 次降至只需要旋轉 90 度，但一樣能確認 360 個夾取姿態。

### 3.3.7 獲取障礙物資訊

在本研究中並沒有使用深度相機，獲取障礙物(包括物體和環境)資訊的方法是利用物體模型的資訊即時生出點雲以及桌子的點雲。要注意的地方是，由於在本研究中的實驗場景單純，是不同的物體放在一張桌子上面，因此可以使用如此單純的方法獲得障礙物的資訊，若是環境資訊較複雜，則使用深度相機直接獲得環境和物體的點雲資訊較容易計算和節省時間。



即時生出物體和環境的點雲之後，即可利用這些環境資訊取出不同夾取姿態計算時需要的部分，以下會先介紹如何即時生出物體和環境的點雲，之後會介紹如何從這些點雲中或各類夾取姿態在演算法中需要的部分。

### 3.3.7.1 即時製造物體和環境的點雲

經過建模與模型簡化後，可以獲得詳細的模型資訊，這些資訊中包含了模型的種類與尺寸，這兩項模型資訊可以幫助建出如圖 3-59 所示每個物體各自的點雲。將四個簡化的形狀想像成皆由不同截面相同的柱體所組成，其中將球體想像成由許多及面大小不同的圓柱體組成，則一個方體即為一個截面不變的四角柱體，會由兩層各四個點的點雲組成、而一個正三角柱即為一個截面不變的三角柱體，會由兩層各三個點的點雲組成、而一個圓柱體其截面不變，會由兩層各二十個點的點雲組成、而將一個球體想像成一個截面不斷改變的圓柱體集合，會由 6 個不同截面大小的圓柱和一個 20 個點的圓平面組成，其共有十一層和 102 個點的點雲。

「桌子」這個障礙物的點雲生成方式如圖 3-60 所示。在演算法當中，會將轉換到基準坐標系的障礙物分布狀況分成了三種，在不同的計算階段需要基準坐標系下不同分布位置的障礙物資訊，因此需要完整的桌子平面方程式資訊以方便在不同的計算階段取出不同範圍的桌子平面資訊。空間中的平面只要有了法向量和平面上一點的資訊後即可求得，而世界坐標系中的桌子即為法向量垂直向上且 Z 座標固定的平面，有了物體的定位資訊後可以知道物體重心與桌子的向量，此向量與法向量可透過旋轉矩陣的轉換後轉換至基準坐標系中，有了基準坐標系中桌子平面的一點與法向量的資訊後即可得到在基準坐標系中的桌子平面方程式。

計算得到基準坐標系下的桌子平面方程式之後即可在不同的計算階段中取出需要的桌子障礙物範圍。研究中，手腕運動範圍以內供計算夾取姿態用的的桌子障礙物點雲為一總共 20 個點的圓平面；手臂夾取運動範圍以內供計算演算法限制下的夾取姿態的桌子障礙物點雲為一共 7 個點的長方形平面。

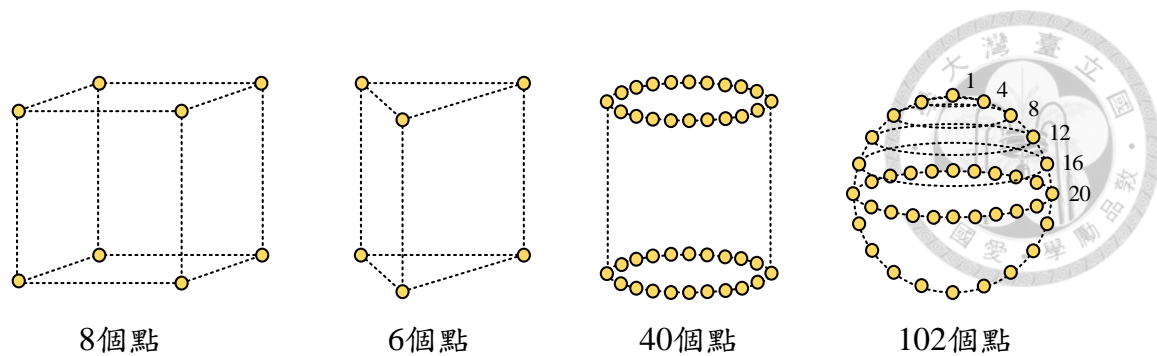


圖 3-59 四個簡易形狀在本研究中所生成的點雲示意圖

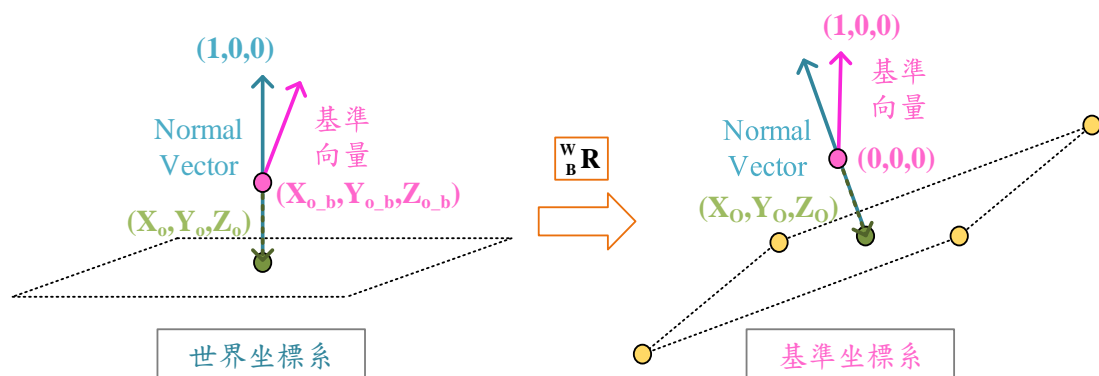


圖 3-60 桌子於基準坐標下的平面方程式計算示意圖

### 3.3.7.2 獲取各類夾取姿態計算時演算法需要的部分點雲資訊

因為研究中所自行生成的點雲不像深度相機所提供的點雲密集，若要取出部分的點雲資訊時需要自行裁切，以下將以圖 3-62 和圖 3-63 為例說明如何從不同障礙物各自簡單的點雲裁切出希望取出的部分。

圖 3-61 以一個方體為例說明在裁切點雲的時候的搜尋順序，而圖 3-62 以需要裁掉一個方體上方的一部分為例說明點雲的轉換過程。四個簡單幾何形狀皆由不同截面形狀不變的柱體所組成，則四個簡單幾何形狀的點雲可以找到兩兩一組對應相同點數量的柱體，或單一組的面，例如球體中央 20 個點所組成的平面或桌子障礙物的平面點雲。點數量對應的柱體搜尋的過程如圖 3-61 所示，而單組的平面點則是兩兩相鄰的點做搜尋。

搜尋後點雲轉換的過程如圖 3-62 所示，若要將物體向下載至一個高度，則每兩個點會獨立確認在欲裁切高度以下、以上或一個以上一個以下，若兩個點皆在欲

裁切高度以內則皆保留在原本的位置、若兩個點皆在欲裁切高度以上則兩個點皆捨棄、而若一個點在欲裁切高度以上而另一個點在欲裁切高度以下則需要經過計算，將在欲裁切高度以上的點沿著兩點的向量所縮短至欲裁切的高度，如圖 3-62(b)所示。

裁切後的點雲投影至平面後會再經過 convex 的篩選動作，只留下包圍整個障礙物形狀的點雲，如圖 3-63(b)所示，因為在整個演算法當中，旋轉障礙物點雲計算夾取姿態的時間最耗時，這個動作可以將不需要的點移除減少計算時間。

最後，為了在計算夾取姿態時有充分的點雲可以利用，會在相距太大的點與點之間補上充足的點，如圖 3-63(c)所示，也就是避免點和點之間的距離會跨越判斷是否有障礙物的搜尋區域(圖 3-54 所示的淡藍色區域即為搜尋區域)。

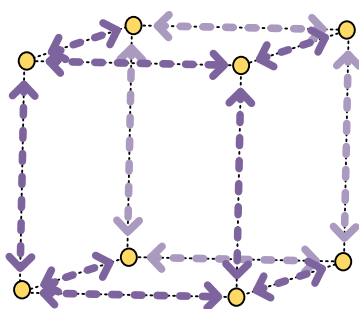


圖 3-61 裁切模型時點雲搜索示意圖

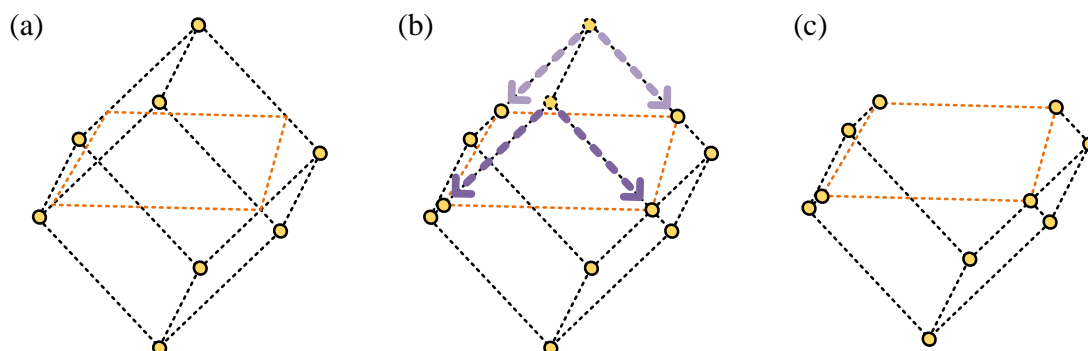


圖 3-62 裁切模型時點雲轉化示意圖

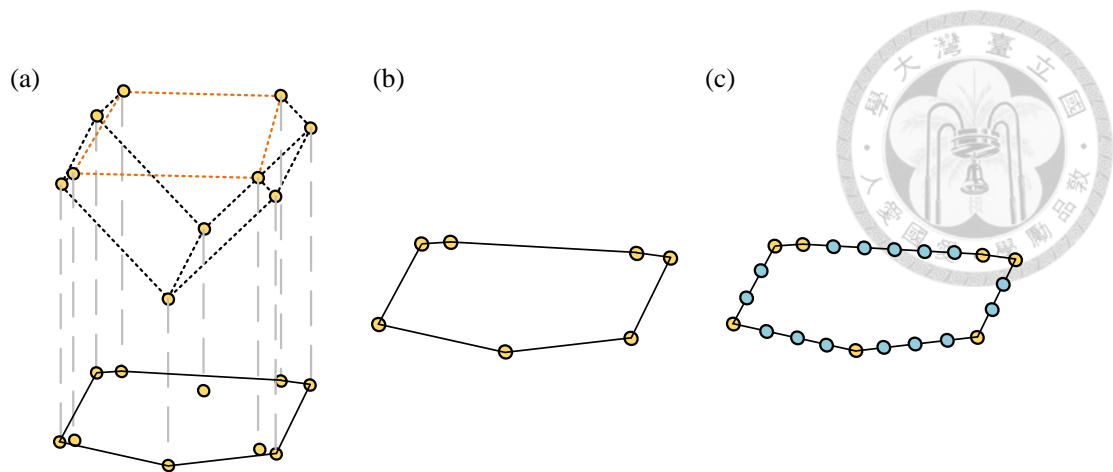


圖 3-63 裁切後模型之點雲投影至平面以計算夾取姿態之示意圖

### 3.3.8 研究中夾取姿態的計算流程

在研究中使用提出的演算法以計算夾取姿態的完整流程圖 3-69 所示，其中的顏色可以對應到圖 3-21 簡易流程圖中的方塊顏色。其中除了在以上提到的演算法之外，還加入了是否有其他物體在欲夾取物體之上的判斷，若有其他物體在欲夾取物體以上則會先夾取在上方的物體，避面夾取時物體和物體之間的碰撞，因為夾取下方的物體時必定會移動到上方的物體。以下會詳細介紹研究中真實用來判斷是否有物體在上方(淡綠色程序)、計算夾取姿態(淡紫色程序)和挑選最合適的夾取姿態(淡藍色程序)的流程。

#### 3.3.8.1 判斷障礙物是否位於物體上方的完整流程

判斷障礙物是否位於物體上方的完整流程圖如圖 3-65 所示，每轉換一個障礙物點雲資訊至基準坐標系後即會進入此判斷程序。

每轉換一個障礙物點雲至基準坐標系後，會將點雲資訊保留至環境資料中以供後續計算夾取姿態中做使用，並將當前的障礙物點雲資訊取出作是否在物體上方的判斷。

取出點雲資訊後會先判斷障礙物是否在手腕運動範圍以內，只有在手腕運動範圍以內的障礙物會再進行後續的判斷程序，在障礙物以外的障礙物會在之後進入演算法限制的判斷程序而直接判斷為不在物體上方。位於手腕運動範圍以內的障礙物會裁掉障礙物於物體以下的部分，只保留位於物體上方的部分，將這個部分

投影至平面後，用影像處理的方式，計算是否有重疊的區域判斷這個投影平面是否會遮蔽欲夾取的物體，如果沒有則判斷為不在物體上方，如果會遮蔽物體的話，則障礙物與物體的相對位置會有三種可能的情況，障礙物完全在物體上方壓住物體、物體倚靠著障礙物且障礙物比物體高與障礙物倚靠著物體且障礙物比物體高，如圖 3-64 所示，其中的(a)與(c)是希望先夾取障礙物的情況。圖 3-64(a)的情況判斷較單純，只需要判斷障礙物的最低點是與物體的最高點相近，如果是的話則不需要在進入下一輪倚靠與被倚靠的判斷，直接將障礙物判斷為位於物體上方。圖 3-64(b)和圖 3-64(c)的判斷較圖 3-64(a)複雜，需先計算出障礙物指向物體的軸向量，並將此向量轉換為世界座標並計算其傾斜的角度，如果大於一定的角度則表示其有非常大的機率倚靠在物體身上而需要被優先夾取，換言之，如果此角度幾乎垂直的話則表示有非常大的機率為物體倚靠在障礙物身上因此不用優先夾取此障礙物。

若有障礙物被判斷為在物體上方，會將此障礙物的最高位置記錄下來，最後會將目標改為在物體上方且位置最高的障礙物。

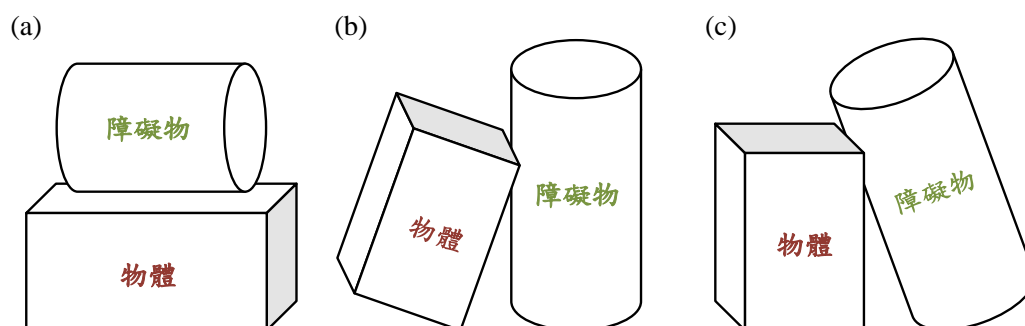


圖 3-64 在基準坐標系中物體上方有物體之三種可能

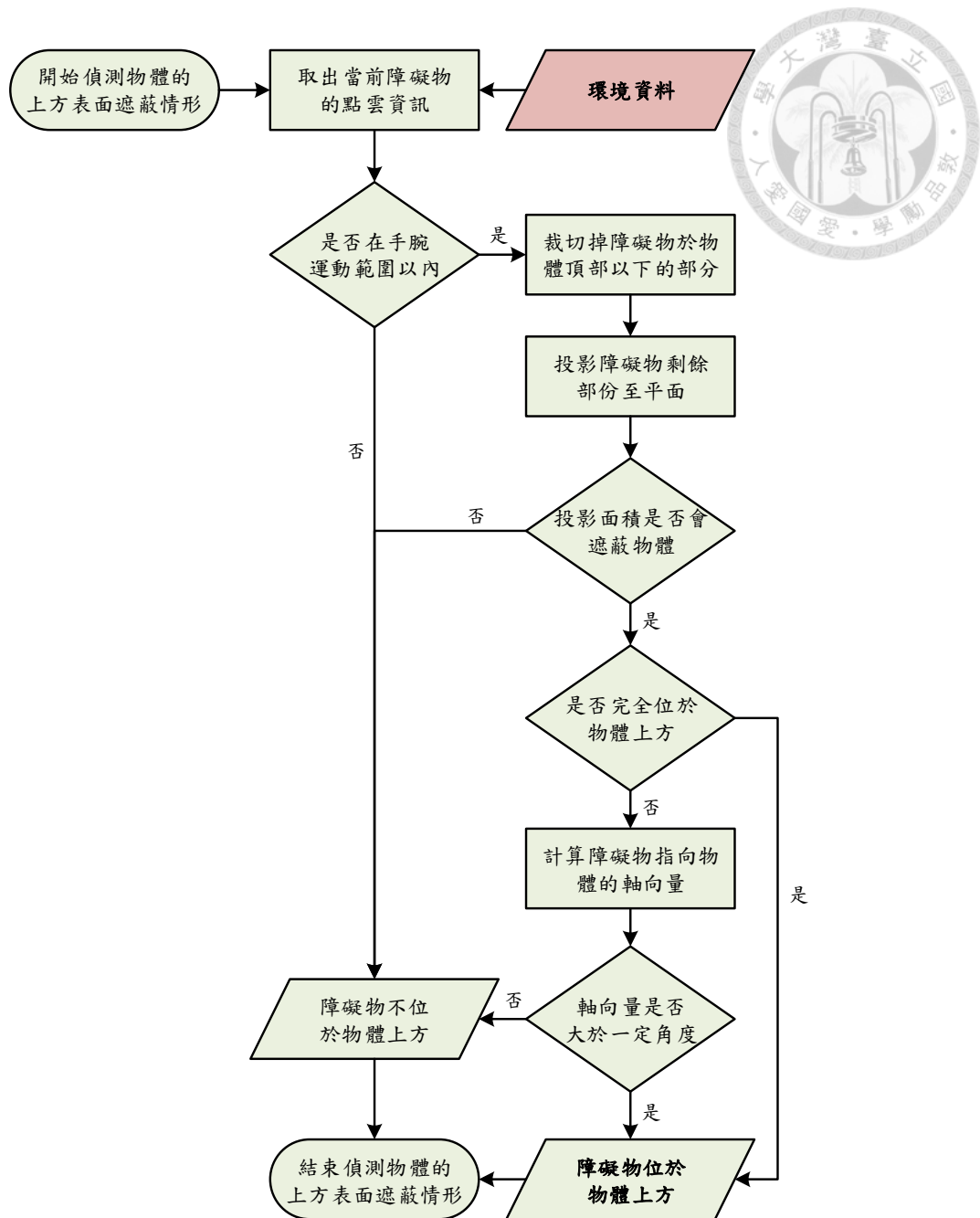


圖 3-65 判斷物體上方是否有障礙物的流程圖

### 3.3.8.2 計算夾取姿態的完整流程

計算夾取姿態的完整流程如圖 3-66 所示，將所有的障礙物點雲由世界座標轉至基準坐標系建立的完整的環境資料後，即會進入計算夾取姿態的流程。

首先，所有的障礙物皆會區分為，在手腕運動範圍以內和在手腕運動範圍以外至手臂夾取的運動範圍以內。在手腕運動範圍以外至手臂夾取的運動範圍以內的物體會先進入扣除演算法限制下夾取姿態的計算程序，而演算法限制下可行的夾

取姿態資料會與在手腕運動範圍內的障礙物資料一起輸入進計算可行夾取姿態的程序中。

可行夾取姿態的計算方法已經在 3.3.6 節中介紹過，而經過計算後的可行的夾取姿態資料會進入計算最合適夾取姿態的步驟，最後會挑選出一個可行的且相對合適的夾取姿態進行夾取。

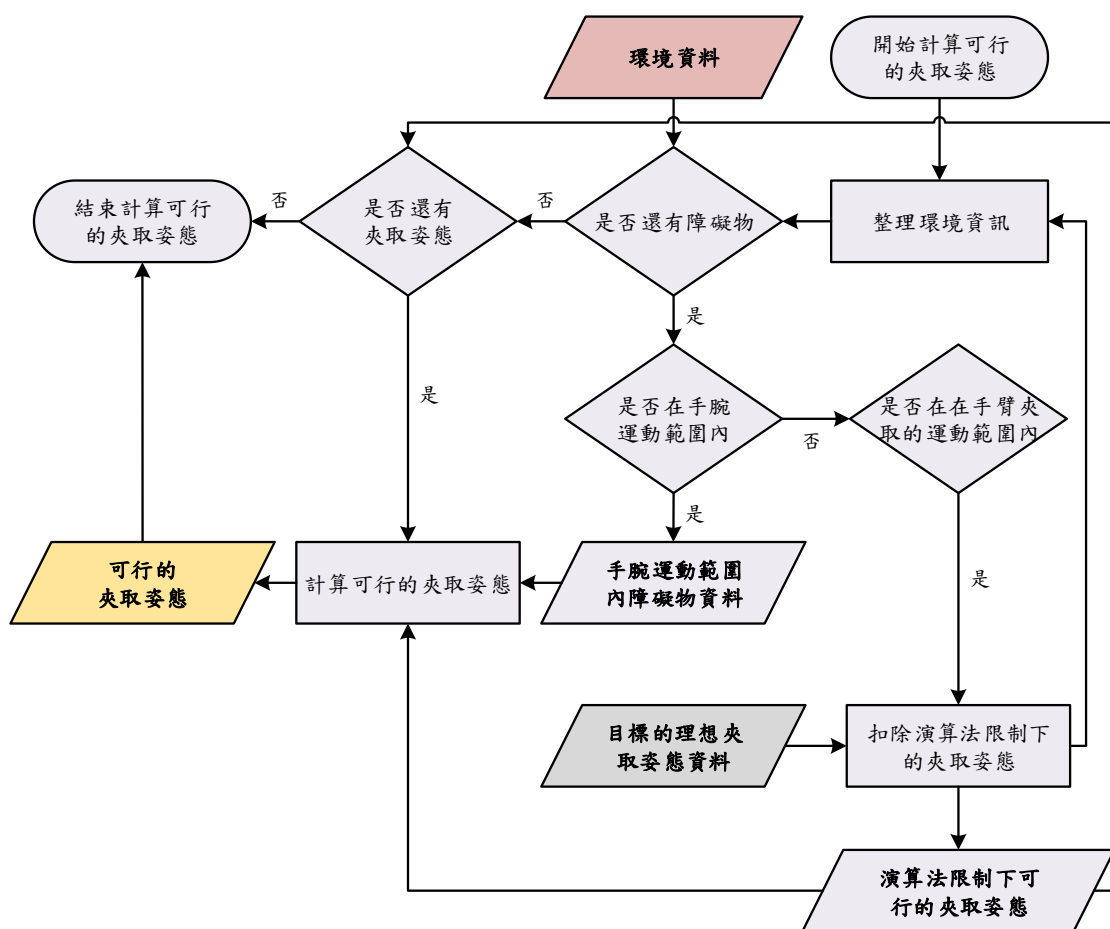


圖 3-66 計算夾取姿態的流程圖

### 3.3.8.3 挑選最合適夾取姿態的完整流程

挑選最合適夾取姿態的完整流程如圖 3-67 所示，各類夾取姿態會先與最理想夾取姿態比較和計算後挑選出在各類夾取姿態當中最優的夾取姿態，並記錄與最理想夾取姿態的距離(角度)。每一類夾取姿態皆挑選出最佳的夾取姿態後利用記錄下來的角度替五個類別的最佳夾取姿態作排序。再依照這個排序進行逆運動學計

算確認是可以進行的夾取姿態才會成為最終被選擇的「最合適的夾取姿態」。

排序的方法如圖 3-68 所示，如果與最理想夾取姿態的距離順序如圖中上排的橘色數字所示，則排序後挑選夾取姿態的順序為圖中的下排格子所示。可以發現若與最理想夾取姿態的距離相同，會按照 A 類(三爪)、A 類(兩爪)、B 類、C 類和 D 類夾取姿態的順序排列，這也是研究中默認在當所有類別的夾取姿態與最理想夾取姿態的距離皆相同的情況下的排序順序。

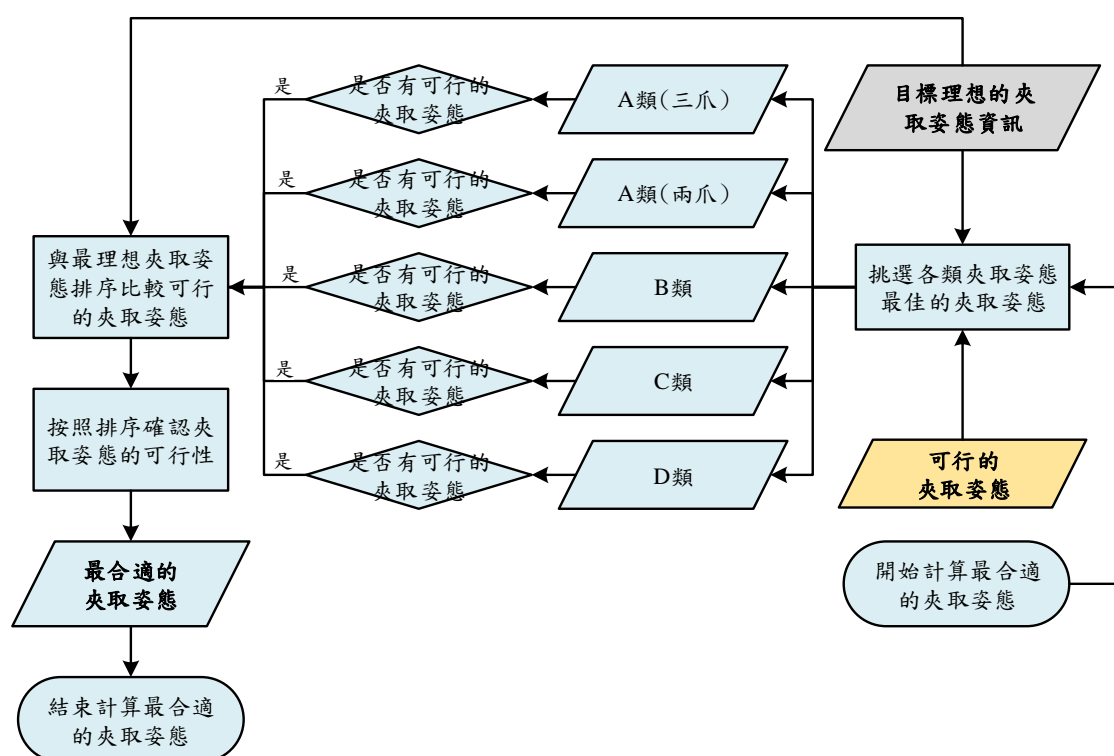


圖 3-67 挑選合適夾取姿態的流程圖

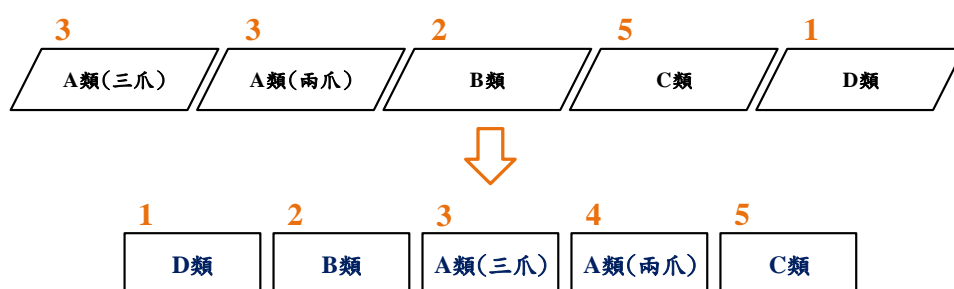
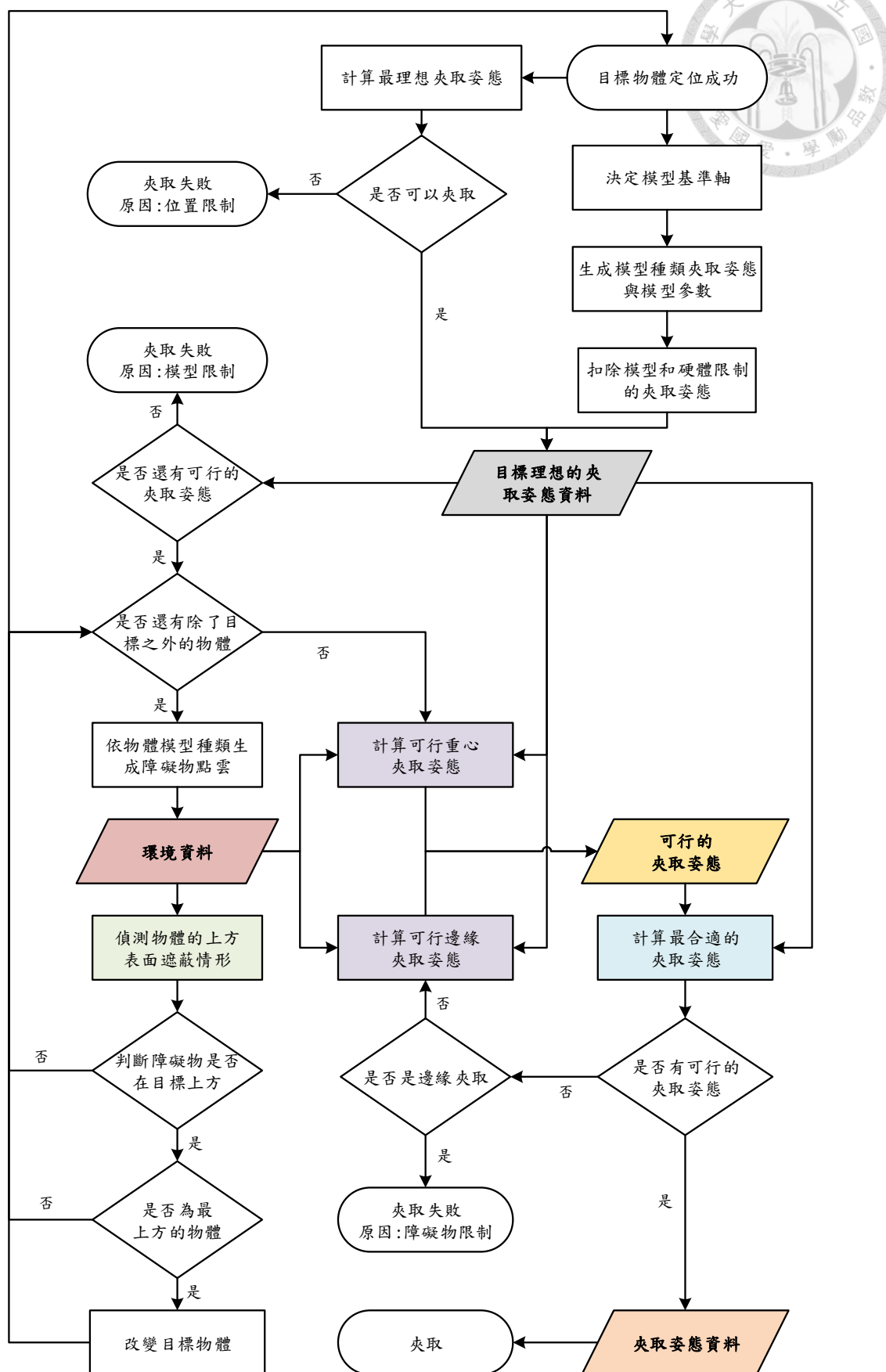


圖 3-68 各類夾取姿態排序示意圖





### 3.4 夾取軟體介紹

整個獲取夾取姿態的演算法，包括從建模至模型簡化到計算夾取姿態的演算法至此以說明完畢，本研究中自行設計了一個軟體系統以實現這一套演算法，以下將簡單介紹這個軟體所具有的功能和程式架構。

圖 3-70 為程式一開始進入時的功能選擇介面，「Take Pictures」提供了最一開始建模所需要拍攝一系列的功能、「Build Model」提供了使用 VisualSFM 軟體之前將一系列照片去扭曲和偵測每張照片各自特徵點的功能、建完模型點雲後再使用「Model Calibration」功能校正點雲的單位和選擇一個我們認為擺正的姿態當作預設姿態、之後使用「Detect Model」功能偵測模型的尺寸與簡化後的形狀類別、最後即可使用「Locate Model」功能開始物體與障礙物的定位並計算一個合適的夾取姿態同時與 PXI 溝通進行夾取。在軟體中，只要簡單的輸入一些必要選項例如模型的編號等，軟體即可自動輸出下一個步驟所需要的檔案並自動命名或自動載入所需的所有檔案，以下將簡單介紹各功能的設計與程式架構，

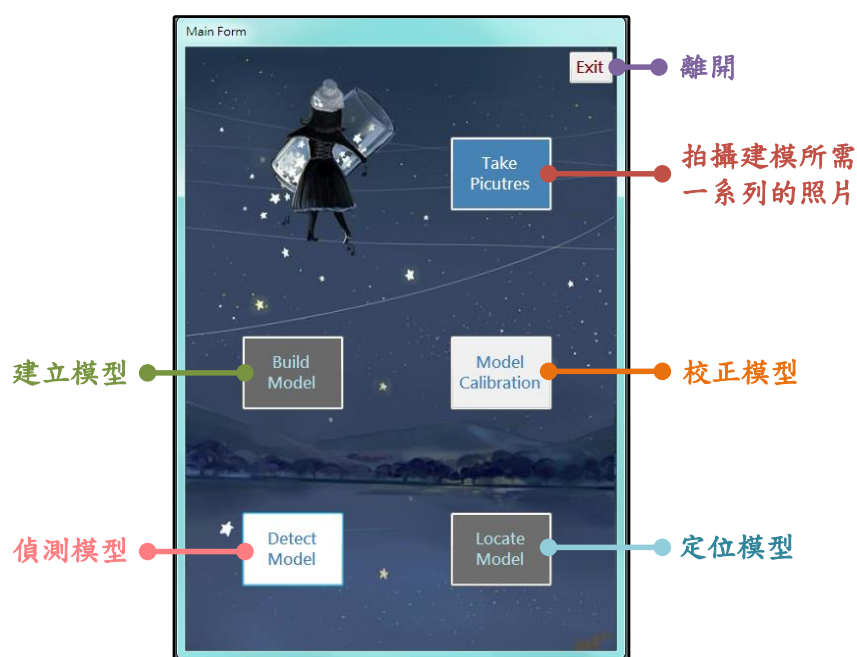


圖 3-70 功能選擇介面



### 3.4.1 拍攝建模照片

圖 3-71 的左邊介面是「Take Pictures」功能的介面，輸入了模型編號後，決定好角度後按下「Take This Picture!」後，屬於這個模型的其中一張照片及拍攝完成，會儲存在模型所屬的資料夾裡且整個拍攝過程圖片編號及檔案名稱會自動生成，若有不滿意的照片按下「Don't save!」鈕後即可重新拍攝相同編號的照片。

### 3.4.2 建立模型

圖 3-71 的右邊介面是「Build Model」功能的介面，設定好模型編號與此模型所有的一系列照片總數後，按下「Enter」鈕後即可使轉換圖片至去扭曲化的灰階影像和生成每張圖片所屬的特徵點檔案，其中讀取相機參數和生成檔案並儲存至所屬資料夾的部分是全自動化的。介面中有面板可以確認目前影像的轉化狀態，而開始轉化後「Enter」按鈕即會被鎖住，避免誤按使轉換的圖片產生錯誤。因為模型所擁有的一系列圖片數目皆不小，若發生錯誤則必須全數重新開始建立，因此這項保護有其必要性。



圖 3-71 「Take Pictures」和「Build Model」介面示意圖



### 3.4.3 校正模型

圖 3-72 展示的是「Model Calibration」功能的介面，將物體放於在研究中定位好相隔 5 公分之四個點位置並將其「擺正」後，記錄模型尚未校正單位前的數值與姿態旋轉矩陣，將其輸入至此介面中並輸入模型編號與模型名字後，此部分的功能會將此模型編號的點雲作校正單位與姿態的動作，校正結束後的點雲檔案會自動生成並儲存至模型對應的資料夾。

模型單位校正

模型姿態校正

Model's index: 0

Model's name: 杯子

CHANGE!

\_new.txt

Model Calibration

圖 3-72 「Model Calibration」介面示意圖

### 3.4.4 偵測模型

圖 3-73 展示的是「Detect Model」功能的介面，此功能會執行偵測模型之簡化形狀、模型尺寸和夾取可行性的判斷。其中重心夾取可行性的判斷和邊緣夾取可行性的判斷之介面是使用堆疊頁面的方式顯示，如目前圖中顯示的是重心夾取可行性判斷的結果，若要確認邊緣夾取可行性判斷的結果須切換到「邊緣」的頁面

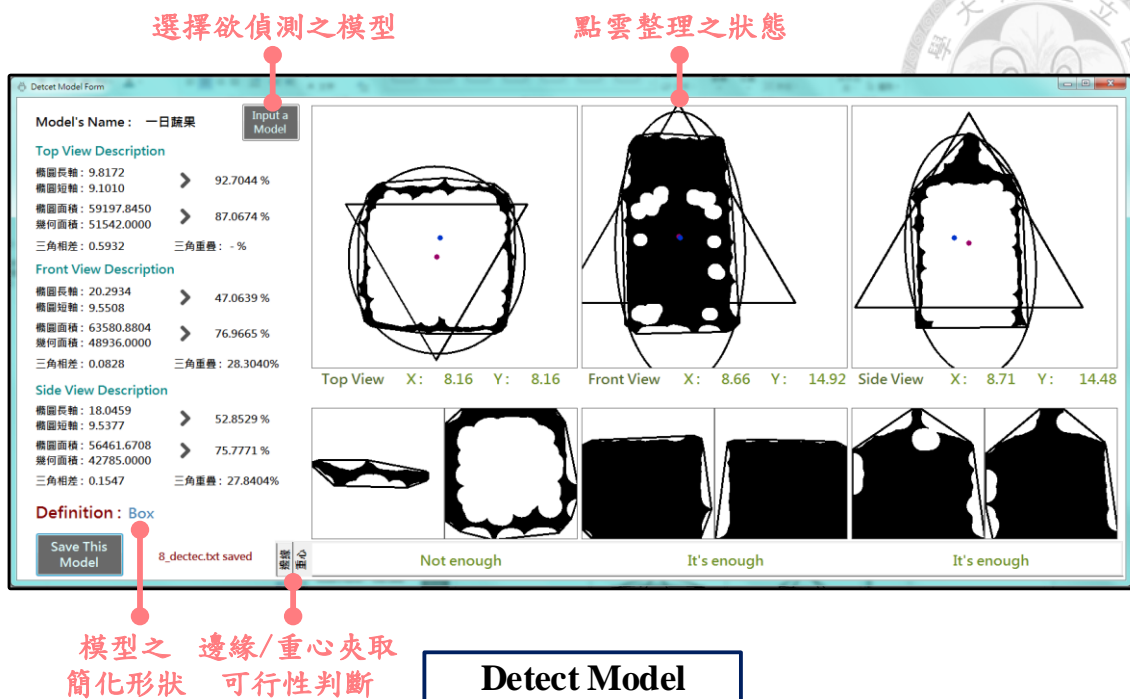


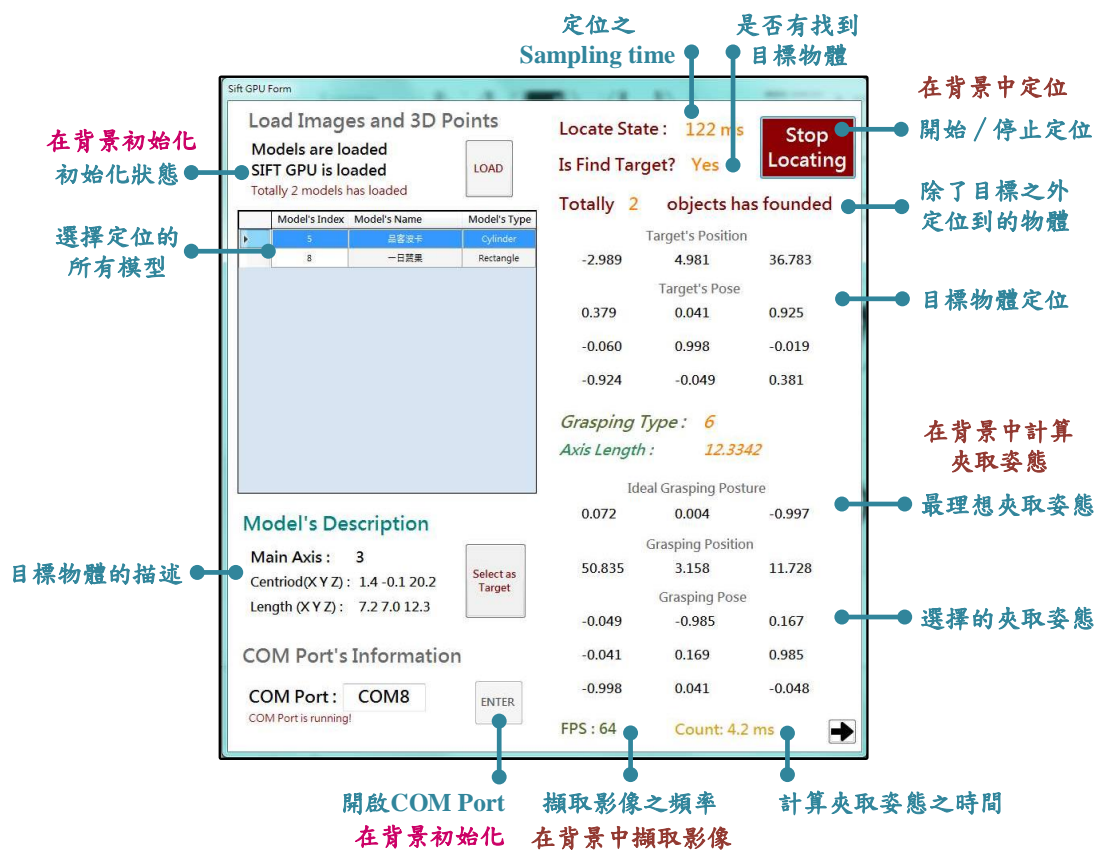
圖 3-73 「Detect Model」介面示意圖

### 3.4.5 定位模型

圖 3-74 和圖 3-75 展示的是「Locate Model」功能的介面，其中圖 3-74 為預設介面而圖 3-75 為展開介面，可以觀看更詳細但是非必要的資訊，此部分數值的顯示動作在介面被展開之前程式內部不會執行，而非有顯示但是介面位展開所以看不到，如此可以節省電腦的效能，尤其顯示擷取影像常是非必要但吃效能的動作。

為了避免使用者覺得程式進入無回應的狀態，耗時較長的初始化動作皆是以開執行續在背景中執行的方式設計程式架構。如圖 3-74 中粉紅色字體顯示的初始化動作皆會在背景中執行並用面板告知使用指目前的初始化狀態。初始化皆完成後才可以進入定位動作，否則軟體會跳出警告。開始定位後介面即無法關閉，如圖 3-74 中介面的關閉按鈕已消失，必須要停止定位之後才可以關閉此介面，如此設計成是架構的原因是因為，在定位模型的同時，電腦同時在進行擷取相機影像與計算夾取姿態的動作，此三個動作是平行化同時進行的，因此，為了使程式可以正確的關閉所有執行序與成功釋放所有一開始被初始化的資料記憶體，強制使用者在停止定位模型後才可以關閉介面。

展開介面的部分，使用者可以選擇觀看標準坐標系下物體周圍障礙物的狀態(圖 3-75(a))、擷取相機的影像狀態(圖 3-75(b))或各類夾取姿態的計算狀態(圖 3-75(c))。圖 3-76 為夾取姿態計算狀態的放大圖，其中每一個數字是一個 bit，顯示某一類夾取姿態某一個角度的夾取姿態是可行(true)或是不可行(false)的狀態，以圖 3-74 和圖 3-75(b)的狀態來看，品可波卡為欲夾取物體而一日蔬果為障礙物，兩個模型皆有定位成功，品克波卡的 Z 軸太短又一日蔬果高於品可波卡且會阻擋到 A 類重心夾取姿態，最後所有的夾取姿態只有 A 類邊緣夾取姿態有可行的夾取姿態，而 A 類邊緣夾取姿態的指頭部分在 180 度左右處會被一日蔬果阻擋，沒有足夠的表面給三指模式夾取，因此最終選擇的夾取姿態為編號 6 的 A 類兩指邊緣夾取姿態(如圖 3-74 中的「Grasping type」所示)。



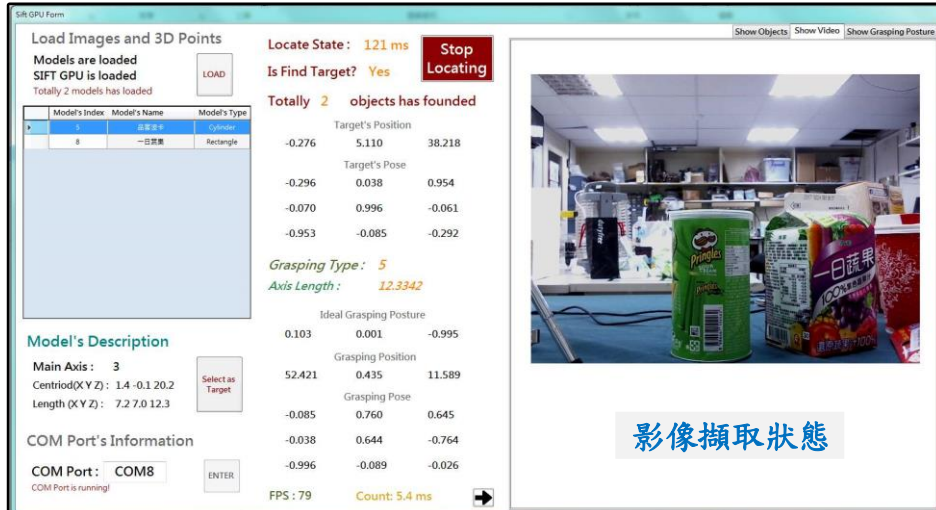
### Locate Model

圖 3-74 「Locate Model」介面示意圖

(a)



(b)



(c)

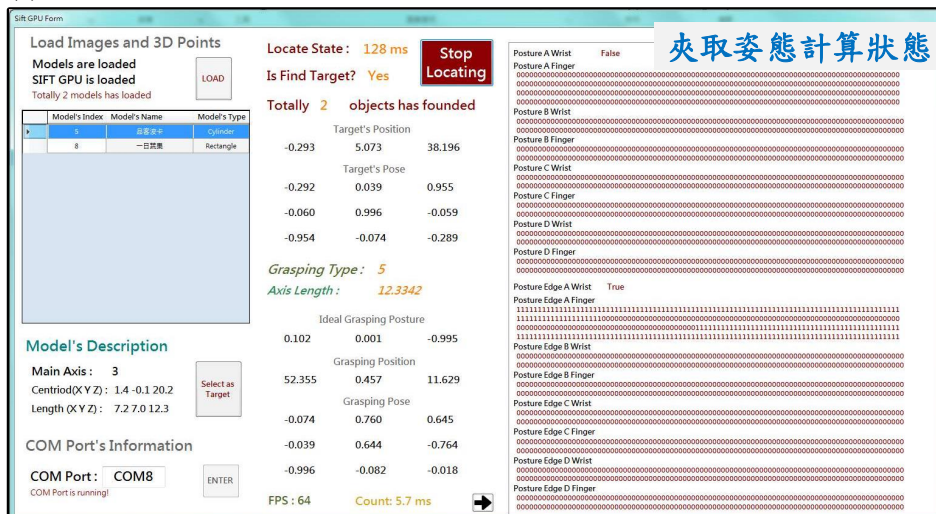


圖 3-75 「Locate Model」展開介面示意圖

(a)標轉坐標系狀態介面 (b)影像擷取狀態介面 (c)夾取姿態計算狀態介面



## 第四章 結合多感測器之夾取應用



### 4.1 夾爪包覆實驗結果

此部分的實驗是為了測試研究中所設計的夾爪其被動自由度會在怎樣的條件下被啟動，且分析啟動條件是否合理。此部分是以兩指模式夾取一圓柱狀的鋁罐當作實驗場景，夾爪夾取物體並產生包覆的過程如圖 4-1 所示，而圖 4-2 中的三張圖表由上至下分別顯示的為在包過程中，電位計的變化、伺服馬達 PWM 的增加變化、壓力陣列各指與三指總和的壓力陣列單元總值變化。

實驗過程大致如下，圖 4-1(a)可對應到圖 4-2 中 70ms 時，此時夾爪剛碰觸到物體，之後緩慢增加馬達 PWM 直到被動包覆被啟動，由電位計的變化可以了解到被動包覆的啟動是發生在 8992ms 時，之後快速的增加 PWM 且發現包覆持續被啟動，觀察到包覆的啟動後便結束實驗。圖 4-1(b)可對應到圖 4-2 中 8992ms~1400ms 時，為包覆過程中某一瞬間的示意圖，而圖 4-1(c)為實驗最後的包覆情形。

圖 4-2 中電位計數值變化顯示只有第一指有包覆的發生是因為，第一指需抵抗第二和第三指的合力，因此其需施予物體較大的力，因此較早達到觸發被動自由度的條件且變化較劇烈，導致在包覆的過程中物體會朝第一指的方向移動，這使第二和第三指的主動自由度仍然有增加，因此雖然被動自由度有被啟動(可由圖 4-1 觀察出來)，電位計仍然顯示第二和第三指在向第一指的方向推進。

由圖 4-2 中的實驗結果可以推估夾爪被動自由度的啟動條件為壓力陣列總值在 60 左右，由圖 2-44 可換算此時的力量約為 1.5N 左右，而如圖 4-1 所展示的，這樣的力量連容易變形的鋁罐都不會被擠壓變形，是合理的被動自由度啟動條件。

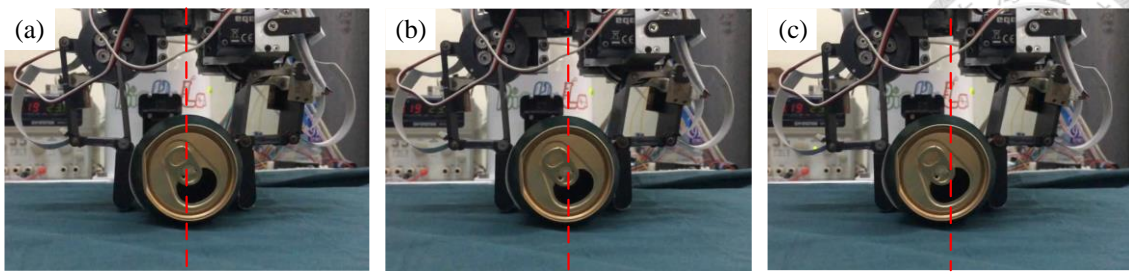


圖 4-1 被動自由度被啟動的過程

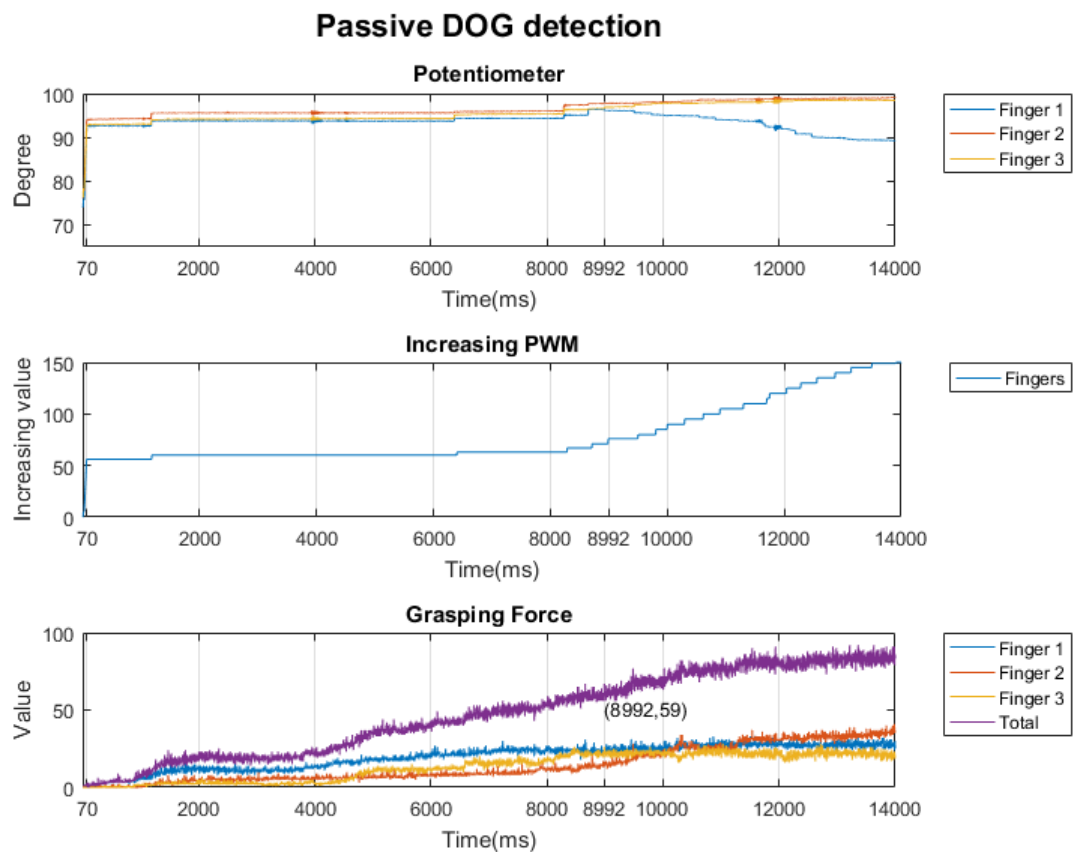


圖 4-2 被動自由度啟動過程的各項實驗數值

## 4.2 物體定位實驗結果

圖 4-3 以兩個物體，X 軸和 Y 軸各相隔 5 cm 總共 9 個位置當作測試位置，由實驗結果可以發現定位誤差在  $\pm 4$  mm，此誤差是在夾取時完全可以忽略的誤差大小。圖 4-4 展示了物體在不同位置和姿態時的定位結果，可以發現影像定位的結果在夾取時是完全可以相信的。

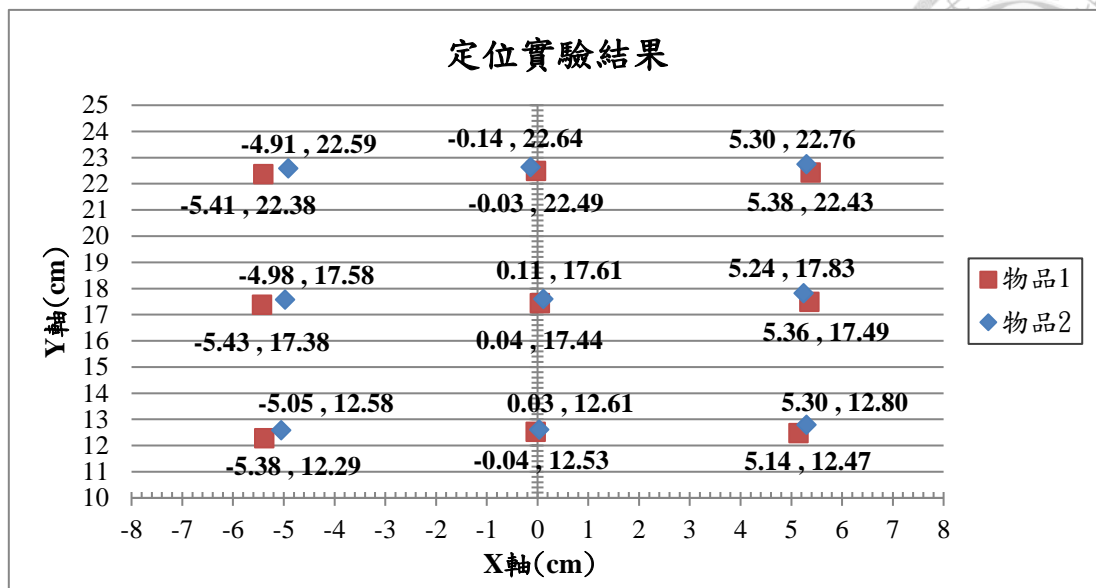


圖 4-3 物體定位實驗結果

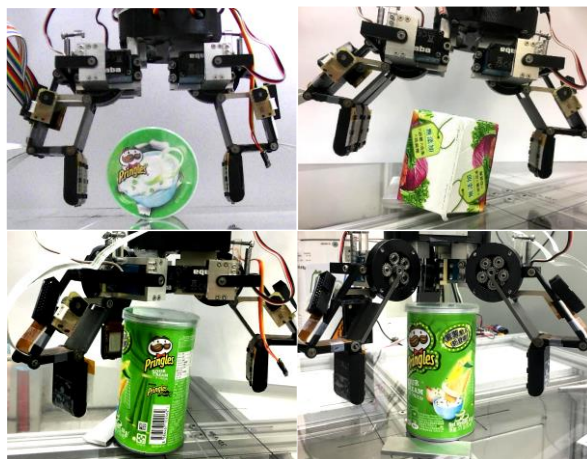


圖 4-4 定位成果

### 4.3 模型簡化實驗結果

圖 4-5 為 8 種物體的模型簡化結果，而圖 4-6 和圖 4-7 展示的為模型簡化過程中的詳細數值。其中比較特別的結果是，Object 4 和 Object 6 皆會被簡化長方體，兩個物體在圖中的擺放姿態下，A 類兩指夾取姿態皆適合使用研究中研發的近接感測器觸發模式轉換更好的包覆物體。由圖中的尺寸也可以發現模型簡化的結果跟實體物品相似，而最主要的誤差來源是取決於點雲的雜點狀態。

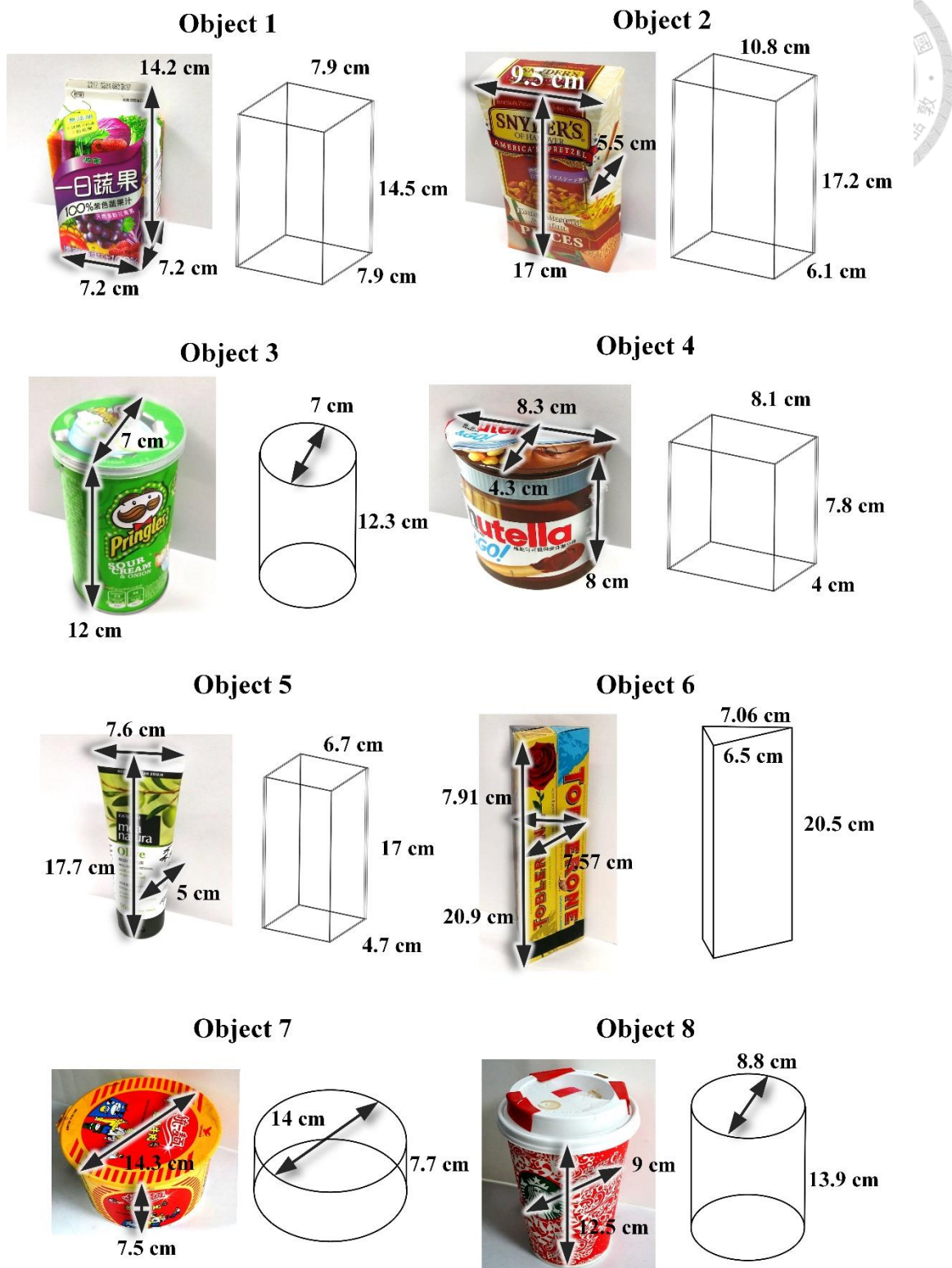


圖 4-5 模型簡化結果

Object 1			Object 2		
Top View Description			Top View Description		
橢圓長軸: 9.8172	➤	92.7044 %	橢圓長軸: 11.6753	➤	67.5234 %
橢圓短軸: 9.1010			橢圓短軸: 7.8836		
橢圓面積: 59197.8450	➤	87.0674 %	橢圓面積: 39182.6543	➤	81.9776 %
幾何面積: 51542.0000			幾何面積: 32121.0000		
三角相差: 0.5932	三角重疊: - %		三角相差: 1.8706	三角重疊: - %	
Front View Description			Front View Description		
橢圓長軸: 20.2934	➤	47.0639 %	橢圓長軸: 26.7670	➤	46.2922 %
橢圓短軸: 9.5508			橢圓短軸: 12.3910		
橢圓面積: 63580.8804	➤	76.9665 %	橢圓面積: 71883.9710	➤	71.7608 %
幾何面積: 48936.0000			幾何面積: 51584.5000		
三角相差: 0.0828	三角重疊: 28.3040%		三角相差: 0.0931	三角重疊: - %	
Side View Description			Side View Description		
橢圓長軸: 18.0459	➤	52.8529 %	橢圓長軸: 22.1764	➤	35.9480 %
橢圓短軸: 9.5377			橢圓短軸: 7.9720		
橢圓面積: 56461.6708	➤	75.7771 %	橢圓面積: 38315.9143	➤	80.3687 %
幾何面積: 42785.0000			幾何面積: 30794.0000		
三角相差: 0.1547	三角重疊: 27.8404%		三角相差: 0.3517	三角重疊: - %	
Definition : Box			Definition : Box		
Object 3			Object 4		
Top View Description			Top View Description		
橢圓長軸: 7.3024	➤	96.2349 %	橢圓長軸: 9.5863	➤	51.5021 %
橢圓短軸: 7.0274			橢圓短軸: 4.9371		
橢圓面積: 33642.5433	➤	97.2519 %	橢圓面積: 44344.0505	➤	82.7766 %
幾何面積: 32718.0000			幾何面積: 36706.5000		
三角相差: 0.2598	三角重疊: - %		三角相差: 2.0317	三角重疊: - %	
Front View Description			Front View Description		
橢圓長軸: 14.7676	➤	66.8666 %	橢圓長軸: 11.7108	➤	82.8364 %
橢圓短軸: 9.8746			橢圓短軸: 9.7008		
橢圓面積: 50500.5011	➤	77.1715 %	橢圓面積: 106440.8103	➤	74.3944 %
幾何面積: 38972.0000			幾何面積: 79186.0000		
三角相差: 0.1119	三角重疊: 27.8785%		三角相差: 0.7062	三角重疊: - %	
Side View Description			Side View Description		
橢圓長軸: 14.2657	➤	65.8506 %	橢圓長軸: 9.0519	➤	64.7823 %
橢圓短軸: 9.3940			橢圓短軸: 5.8641		
橢圓面積: 46409.6226	➤	84.6376 %	橢圓面積: 59096.6015	➤	69.2163 %
幾何面積: 39280.0000			幾何面積: 40904.5000		
三角相差: 0.0033	三角重疊: 22.9552%		三角相差: 0.2469	三角重疊: 30.0731%	
Definition : Cylinder			Definition : Box		

圖 4-6 模型簡化的各項詳細數值

## Object 5

### Top View Description

橢圓長軸: 6.2087	>	73.9643 %
橢圓短軸: 4.5922		
橢圓面積: 38079.2640	>	96.8795 %
幾何面積: 36891.0000		
三角相差: 0.8266	三角重疊: - %	

### Front View Description

橢圓長軸: 21.7987	>	44.4577 %
橢圓短軸: 9.6912		
橢圓面積: 48373.2753	>	68.0376 %
幾何面積: 32912.0000		
三角相差: 0.4225	三角重疊: - %	

### Side View Description

橢圓長軸: 21.0810	>	27.8646 %
橢圓短軸: 5.8741		
橢圓面積: 28355.1971	>	78.4512 %
幾何面積: 22245.0000		
三角相差: 0.5956	三角重疊: - %	

**Definition :** Long Box

## Object 6

### Top View Description

橢圓長軸: 9.4783	>	82.8988 %
橢圓短軸: 7.8574		
橢圓面積: 62260.5352	>	66.0796 %
幾何面積: 41141.5000		
三角相差: 0.1689	三角重疊: 1.9389 %	

### Front View Description

橢圓長軸: 23.8709	>	39.2858 %
橢圓短軸: 9.3779		
橢圓面積: 40620.9073	>	87.1608 %
幾何面積: 35405.5000		
三角相差: 0.3861	三角重疊: - %	

### Side View Description

橢圓長軸: 24.5220	>	39.0339 %
橢圓短軸: 9.5719		
橢圓面積: 42592.3264	>	83.4986 %
幾何面積: 35564.0000		
三角相差: 0.3869	三角重疊: 27.8404 %	

**Definition :** Triangular prism

## Object 7

### Top View Description

橢圓長軸: 15.0494	>	87.0440 %
橢圓短軸: 13.0996		
橢圓面積: 58175.8958	>	97.2181 %
幾何面積: 56557.5000		
三角相差: 0.4819	三角重疊: - %	

### Front View Description

橢圓長軸: 17.7869	>	53.7654 %
橢圓短軸: 9.5632		
橢圓面積: 50195.9586	>	77.3319 %
幾何面積: 38817.5000		
三角相差: 1.8322	三角重疊: - %	

### Side View Description

橢圓長軸: 15.0118	>	74.7651 %
橢圓短軸: 11.2236		
橢圓面積: 54850.8102	>	69.9388 %
幾何面積: 38362.0000		
三角相差: 1.7653	三角重疊: 27.8404 %	

**Definition :** Disk

## Object 8

### Top View Description

橢圓長軸: 9.3832	>	92.5510 %
橢圓短軸: 8.6842		
橢圓面積: 27050.4588	>	94.2295 %
幾何面積: 25489.5000		
三角相差: 0.4050	三角重疊: - %	

### Front View Description

橢圓長軸: 14.6252	>	66.8761 %
橢圓短軸: 9.7807		
橢圓面積: 35208.1935	>	82.2763 %
幾何面積: 28968.0000		
三角相差: 0.1580	三角重疊: 33.2481 %	

### Side View Description

橢圓長軸: 15.6287	>	60.3478 %
橢圓短軸: 9.4316		
橢圓面積: 36281.0858	>	86.2212 %
幾何面積: 31282.0000		
三角相差: 0.1179	三角重疊: 30.0731 %	

**Definition :** Long Cylinder

圖 4-7 模型簡化的各項詳細數值



## 4.4 夾取姿態計算實驗結果

此部分將展示夾取姿態的計算結果，以下將分兩部分展示和討論，第一部分以五個物體八種情況來展示，夾取姿態由完整的 A、B、C 和 D 四類重心和四類邊緣夾取姿態扣除不理想夾取姿態的過程以及計算出來的最終夾取姿態。第二部分已三個例子展示多物體的夾取姿態計算結果和障礙物在基準坐標系中的裁切和投影結果。

### 4.4.1 單一物體夾取姿態計算實驗結果

以下共以八種情況來展示夾取姿態的計算過程和計算結果，其中又可將這八種情況分類成四個部分，第一部分為展示圓柱的夾取姿態計算，包含了躺下和直立圓柱的例子、第二部分為展示三角柱的夾取姿態計算，包含了躺下和直立三角柱的例子、第三部分為展示有模型限制時的夾取姿態計算結果、而第四部份為展示 B 和 D 類夾取姿態的計算結果。

八種情況皆會列出完整的夾取姿態經過模型限制、硬體限制、演算法限制(障礙物為桌子)判斷後的理想夾取姿態，最後會展示加入環境障礙物(桌子)資訊後的可行夾取姿態，以及與最佳夾取姿態比對後最終選擇的夾取姿態，要注意的地方是，若有計算出可行的重心夾取姿態則不會在計算邊緣夾取姿態，因此最終展示的邊緣可形夾取姿態可能並沒有納入環境資訊，為單純扣除三個限制的目標可行夾取姿態。其中模型限制包含了模型本身存在了不適合夾取的面等限制、硬體限制包含了夾爪的開闔大小限制和手臂不適合由後往前夾取的限制、演算法限制為會通過簡單的決策條件快速刪除條件對應的夾取姿態等等，以上提到的限制條件在 3.5 節中完整的介紹。



#### 4.4.1.1 圓柱的夾取姿態計算

實驗中以兩個情況為例展示躺下和站立圓柱在計算夾取姿態時的不同。



圖 4-8 站立品客波卡(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果

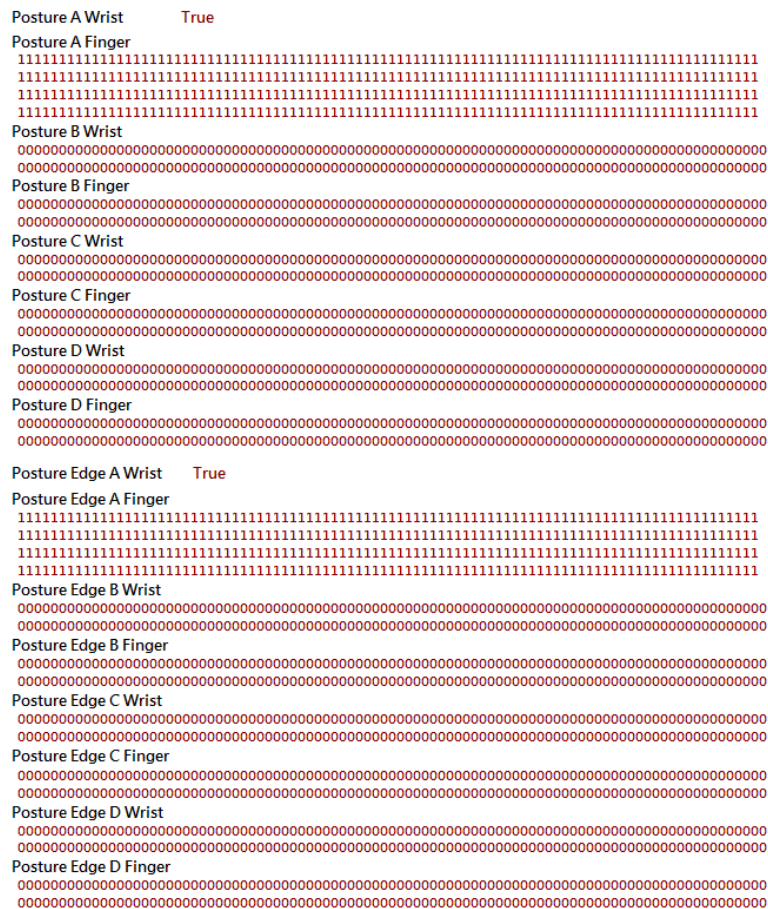
表 4-1 站立品客波卡(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	360	360	360	360	360	0	0
硬體限制	T	360	360	360	0	0	0	0
演算法限制	T	360	90	90	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	360	0	0	360	360	0	0
硬體限制	T	360	0	0	0	0	0	0
演算法限制	T	360	0	0	0	0	0	0

表 4-2 站立品客波卡(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角

(X:沒有夾取姿態; -:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	0.13183	0.13183	X	X	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-



	Target's Position	
-1.773	3.121	35.920
	Target's Pose	
0.732	0.035	0.681
-0.010	0.999	-0.041
-0.682	0.023	0.731

Ideal Grasping Posture		
0.059	0.003	-0.998
Grasping Position		
49.770	2.303	8.679
Grasping Pose		
0.023	0.842	0.539
-0.035	0.540	-0.841
-0.999	0.001	0.042

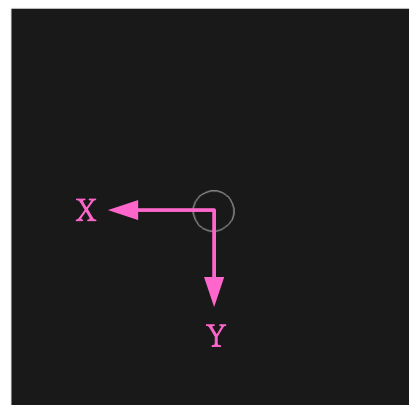


圖 4-10 站立品客波卡之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果

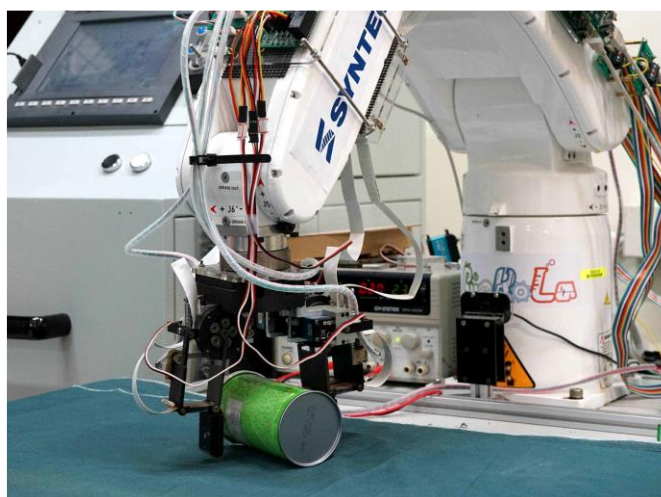


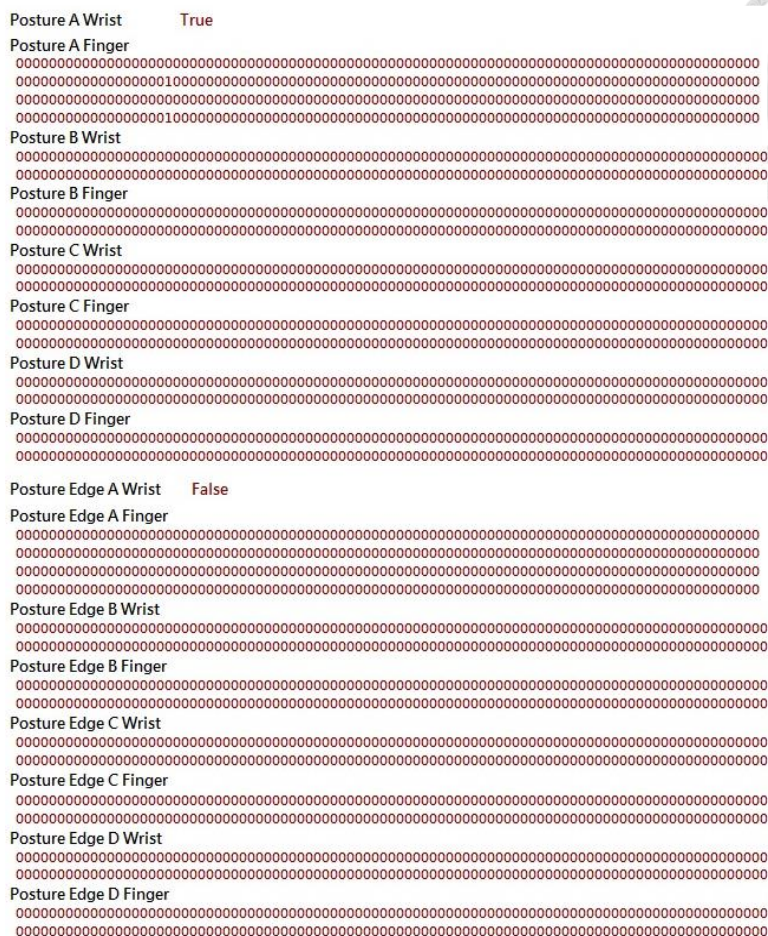
圖 4-11 躺下品客波卡(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果

表 4-3 躺下品客波卡(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	4	4	4	4	4	2	2
硬體限制	T	2	2	2	4	4	0	0
演算法限制	T	2	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	4	4	2	2	2	2
硬體限制	F	0	2	2	2	2	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0

表 4-4 躺下品客波卡(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態; -:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	0.257769		-	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-



Target's Position		
0.865	6.286	41.284
Target's Pose		
0.298	-0.946	0.129
0.365	-0.012	-0.931
0.882	0.325	0.341

	Ideal Grasping Posture		
0.178	-0.001	-0.984	
	Grasping Position		
55.134	-0.335	5.514	
	Grasping Pose		
0.004	-0.944	0.331	
0.011	0.331	0.943	
-1.000	0.000	0.012	

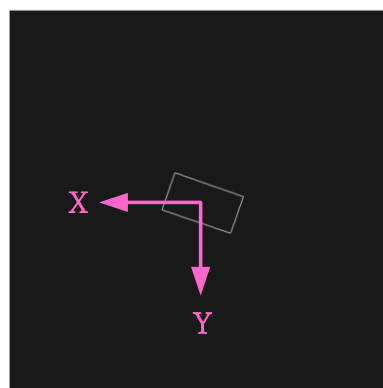


圖 4-13 躺下品客波卡之基準坐標系與最終選擇夾取姿態計算結果



#### 4.4.1.2 三角柱的夾取姿態計算結果

實驗中以兩個情況為例展示躺下和站立三角柱夾取姿態的不同。因為三角柱長軸過長，此三角柱物體在躺下沒有理想的夾取姿態。

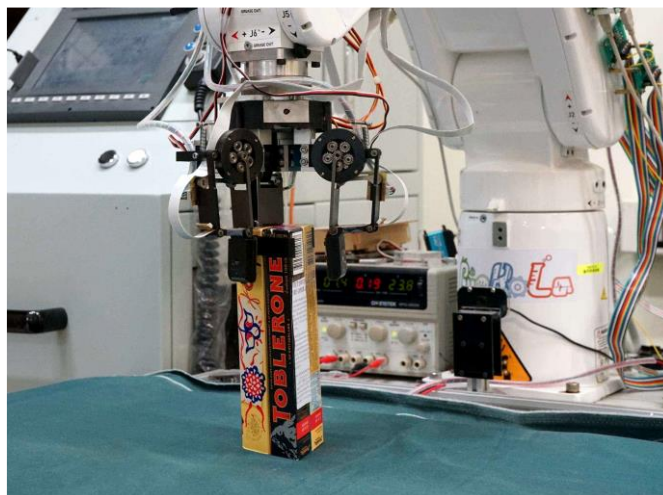


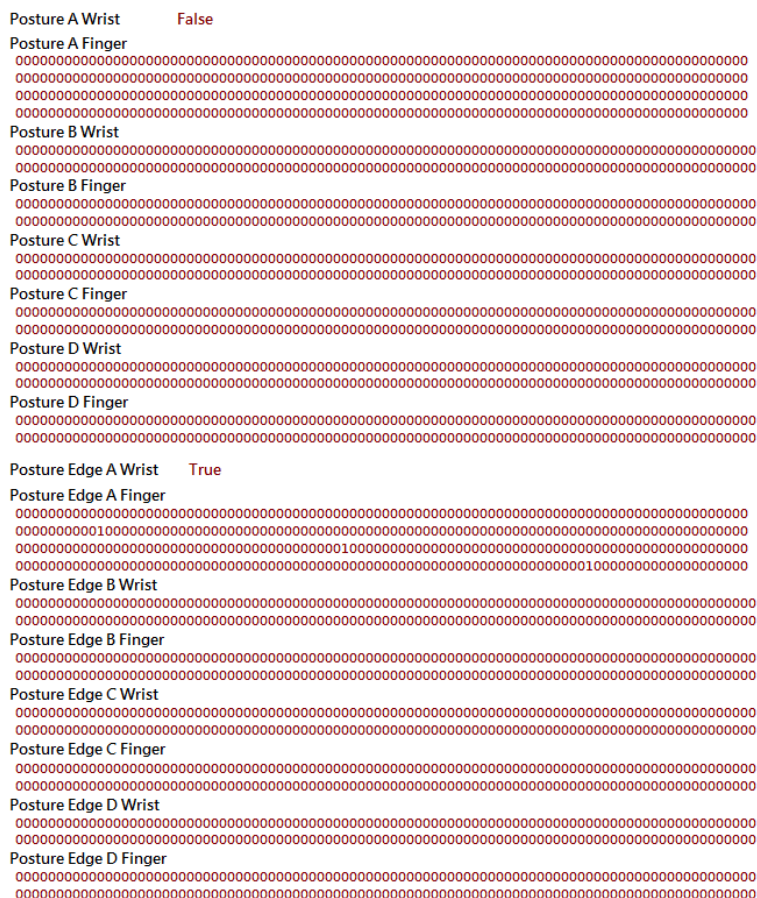
圖 4-14 站立三角巧克力(三角柱)的夾取姿態計算實驗結果

表 4-5 站立三角巧克力(三角柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	3	0	0	0	0	0	0
硬體限制	F	0	0	0	0	0	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制下	T	3	0	0	0	0	0	0
硬體限制下	T	3	0	0	0	0	0	0
演算法限制	T	3	0	0	0	0	0	0

表 4-6 站立三角巧克力(三角柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態;-:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	X	X	X	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	0.08193	X	X	X	X



	Target's Position	
2.238	-1.070	37.575
	Target's Pose	
0.998	0.004	0.056
-0.003	1.000	-0.016
-0.056	0.016	0.998

Ideal Grasping Posture		
0.129	-0.004	-0.992
Grasping Position		
51.305	-1.677	20.529
Grasping Pose		
0.016	0.543	0.839
-0.004	0.840	-0.543
-1.000	0.005	0.015



doi:10.6342/NTU201704032

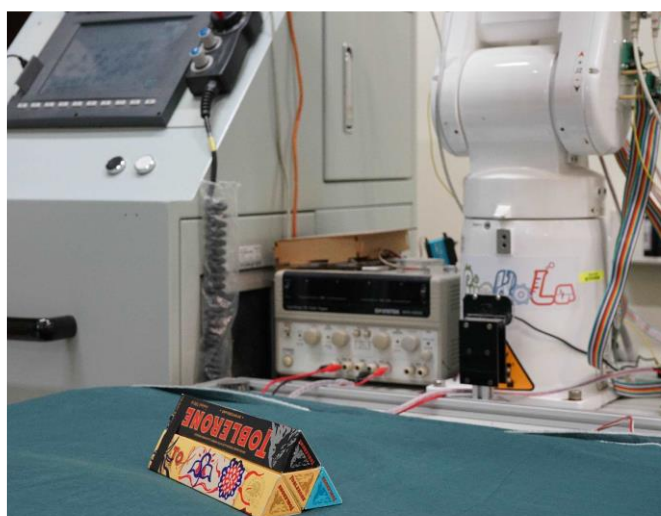


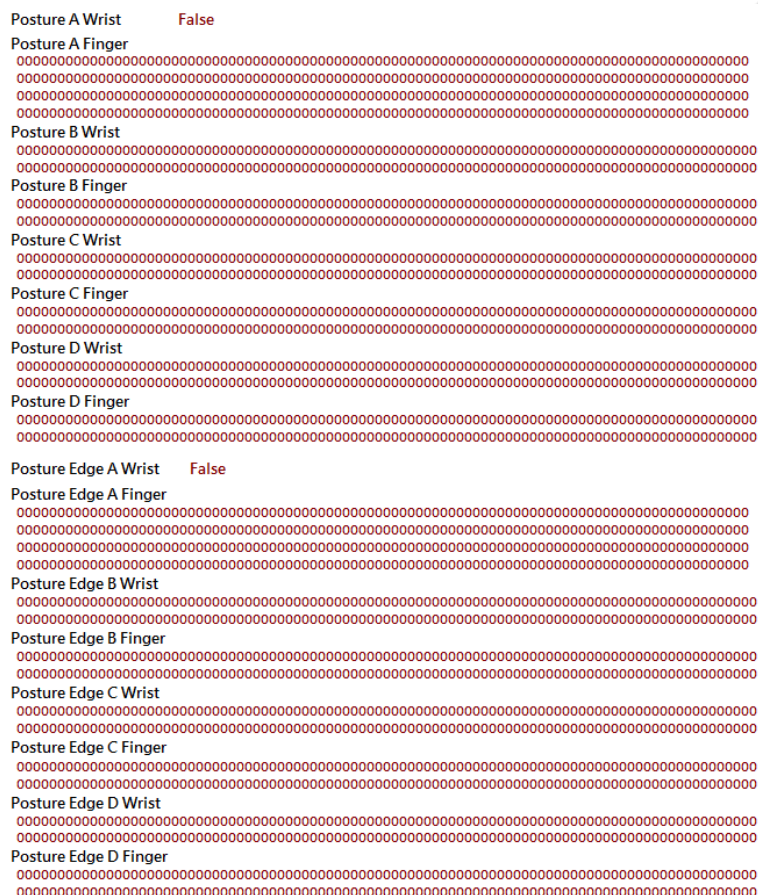
圖 4-17 躺下三角巧克力(三角柱)的夾取姿態計算實驗結果

表 4-7 躺下三角巧克力(三角柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	F	0	0	0	0	0	2	2
硬體限制	F	0	0	0	0	0	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	F	0	0	0	0	0	0	0
硬體限制	F	0	0	0	0	0	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0




表 4-8 躺下三角巧克力(三角柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態; -:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-



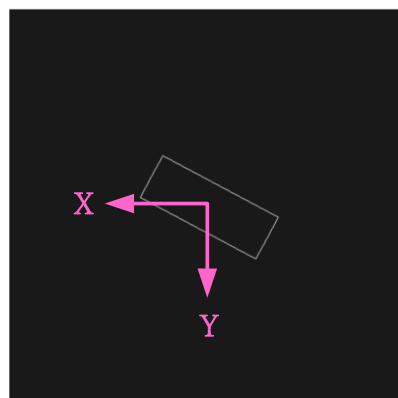
	Target's Position	
6.018	7.341	39.449
	Target's Pose	
0.130	-0.965	0.230
0.851	-0.011	-0.526
0.510	0.264	0.819

Axis Length : None

-----

-----

FPS : 64      Count: 0.8 ms      State: 100      

doi:10.6342/NTU201704032



#### 4.4.1.3 具模型限制的夾取姿態計算結果

圖 4-20 和圖 4-23 中的物體有一個面不適合夾取，在模型限制判斷時，與此面有關的夾取姿態即會被扣除。由圖 4-20 和圖 4-23 兩個情況可以發現夾取姿態計算結果確實會避開此面。



圖 4-20 一日蔬果(長方體)第一種情形的夾取姿態計算實驗結果

表 4-9 一日蔬果(長方體)第一種情形限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	2	2	4	4	0	0
硬體限制	T	2	0	0	2	2	0	0
演算法限制	T	2	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	1	1	3	3	0	0
硬體限制	F	0	1	1	1	1	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0

表 4-10 一日蔬果(長方體)第一種情形候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態;-:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	0.12879	X	X	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-

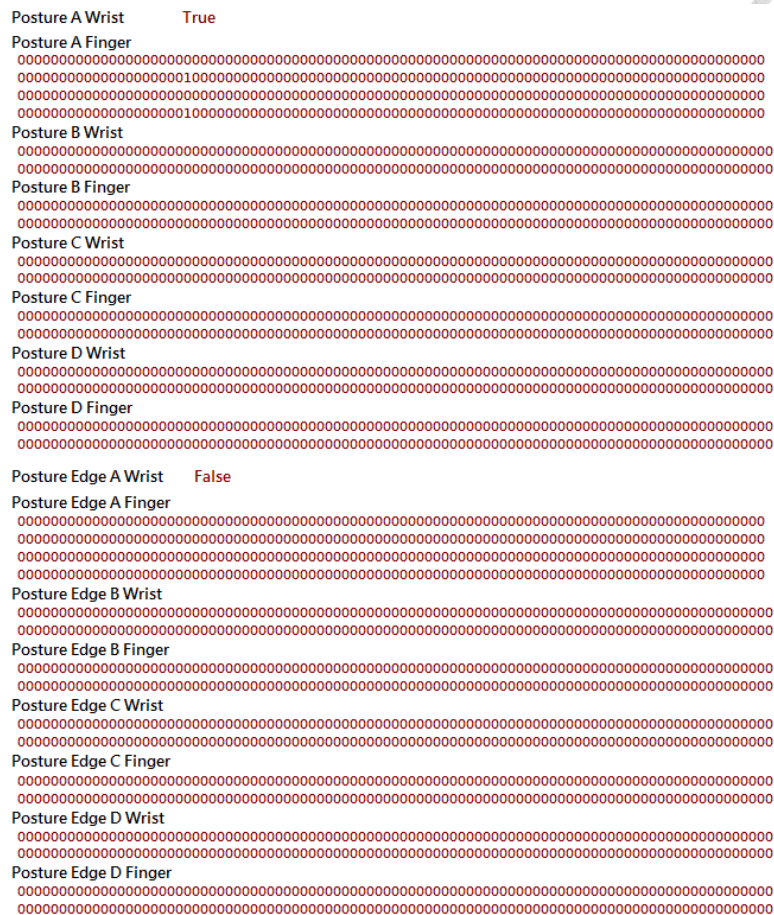


圖 4-21 一日蔬果(長方體)第一種情形的最終各類夾取姿態計算結果

Totally 1 objects has founded

### Target's Position

9.430                      5.773                      36.864

### Target's Pose

-0.020      -0.853      -0.522

-1.000      0.027      -0.006

0.019            0.521            -0.853

Grasping Type: 1

Axis Length : 7.97567

### Ideal Grasping Posture

0.082                      -0.015                      -0.997

### Grasping Position

50.714      -9.430      6.027

### Grasping Pose

-0.019      -0.852      0.523

-0.020      0.523      0.852

-1.000      0.006      -0.028

FPS : 63 Count: 2.8 ms State: 100 

圖 4-22 一日蔬果(長方體)第一種情形的最終選擇夾取姿態計算結果

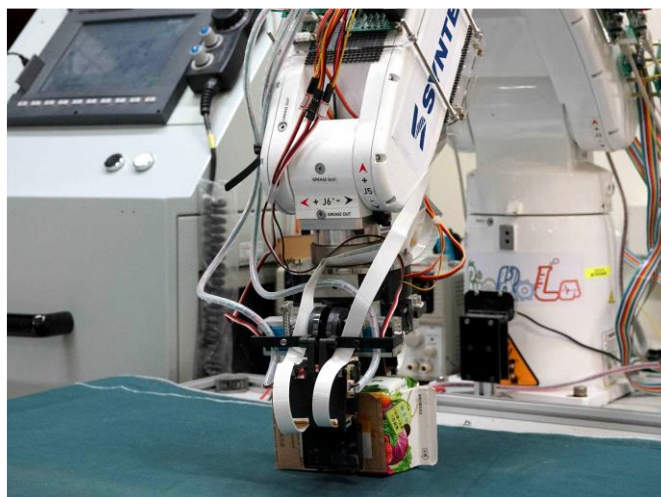


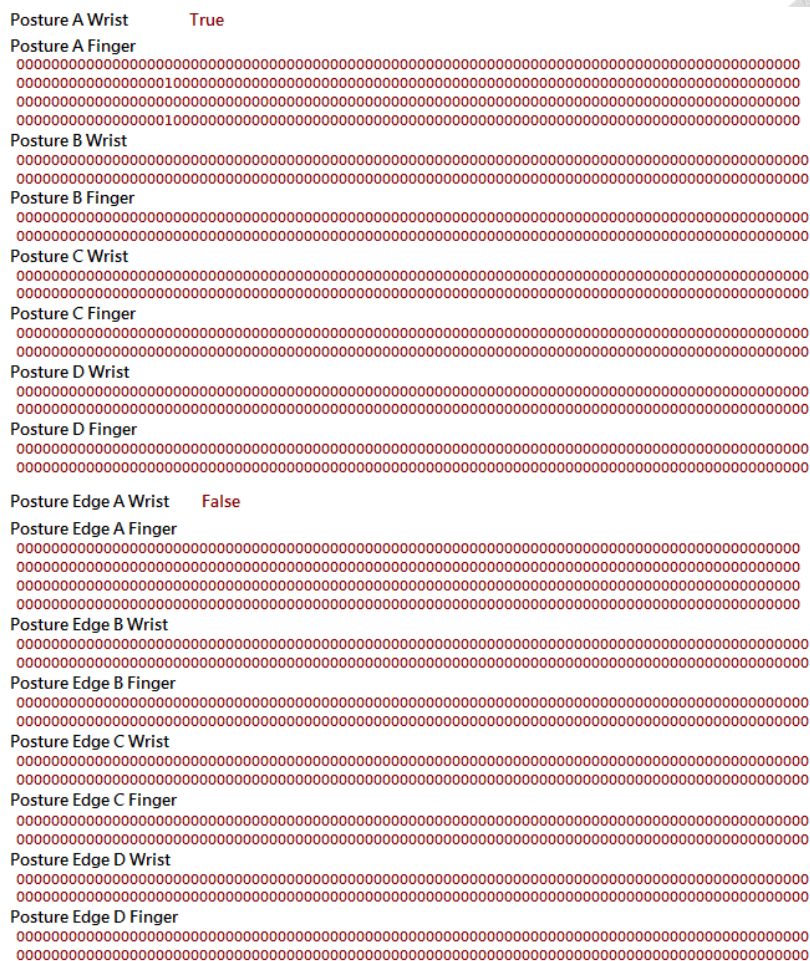
圖 4-23 一日蔬果(長方體)第二種情形的夾取姿態計算實驗結果

表 4-11 一日蔬果(長方體)第二種情形限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	2	2	4	4	0	0
硬體限制	T	2	0	0	2	2	0	0
演算法限制	T	2	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	1	1	3	3	0	0
硬體限制	F	0	1	1	1	1	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0

表 4-12 一日蔬果(長方體)第二種情形候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態;-:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	0.261425	X	X	X-
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-



Totally 1 objects has founded

Target's Position		
-4.786	5.142	40.235

Target's Pose		
-0.002	0.974	0.226
-0.994	0.022	-0.102
-0.105	-0.225	0.969


Grasping Type : 1

Axis Length : 7.97567

Ideal Grasping Posture		
0.156	0.014	-0.988

Grasping Position		
54.085	4.786	6.658

Grasping Pose		
0.105	-0.969	0.223
-0.002	0.224	0.975
-0.994	-0.103	0.022

FPS : 64 Count: 2.8 ms State: 100 

doi:10.6342/NTU201704032



#### 4.4.1.4 D 類夾取姿態的計算結果

圖 4-26 中的物體因直徑過長，在圖中的擺放姿態下沒有理想的重心夾取姿態，邊緣體夾取姿態允許調整因此可計算出一與最佳夾取姿態相距最近的夾取姿態。

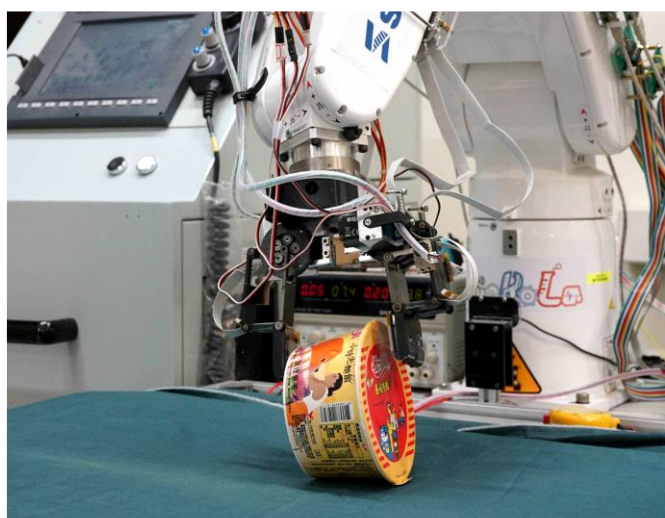


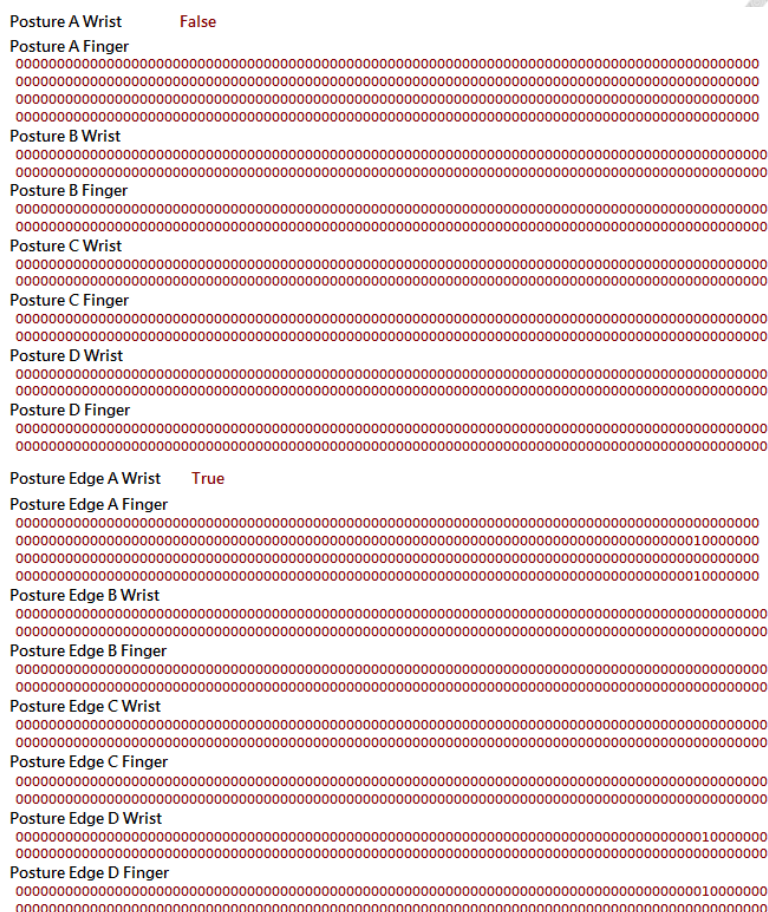
圖 4-26 側躺泡麵(圓柱)的夾取姿態計算實驗結果

表 4-13 側躺泡麵(圓柱)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	4	4	4	4	4	2	2
硬體限制	T	0	0	0	0	0	0	0
演算法限制	F	0	0	0	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	2	4	4	2	2	2	2
硬體限制	T	2	2	2	0	0	2	2
演算法限制	T	2	0	0	0	0	1	1

表 4-14 側躺泡麵(圓柱)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角  
(X:沒有夾取姿態;-:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	X	X	X	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	0.28558	X	X	0.18399



Totally 1 objects has founded

	Target's Position	
-5.614	2.601	43.051
	Target's Pose	
0.060	0.962	-0.265
-0.927	0.152	0.342
0.370	0.225	0.901

Grasping Type : 7  
Axis Length : 14.32615

Ideal Grasping Posture		
0.244	0.026	-0.969
Grasping Position		
56.020	5.274	13.382
Grasping Pose		
0.202	-0.228	0.953
0.199	0.962	0.188
-0.959	0.152	0.239

FPS : 64      Count: 4 ms      State: 100      

doi:10.6342/NTU201704032



#### 4.4.1.5 B 類夾取姿態的計算結果

圖 4-29 中的物體因為長軸過常因此在途中的擺放姿態下沒有 A 類重心夾取姿態是理想的，A 類重心夾取姿態在硬體限制的判斷時即被扣除。



圖 4-29 直立蝴蝶餅乾(長方體)的夾取姿態計算實驗結果

表 4-15 直立蝴蝶餅乾(長方體)限制判斷後的理想夾取姿態數目

重心夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	4	4	4	4	4	0	0
硬體限制	T	0	4	4	0	0	0	0
演算法限制	F	0	2	2	0	0	0	0
邊緣夾取姿態	A(腕)	A(指)	B(腕)	B(指)	C(腕)	C(指)	D(腕)	D(指)
模型限制	T	4	4	4	4	4	0	0
硬體限制	T	4	2	2	0	0	0	0
演算法限制	T	4	1	1	0	0	0	0

表 4-16 直立蝴蝶餅乾(長方體)候選夾取姿態與最佳夾取姿態的夾角

(X:沒有夾取姿態;-:沒有進入計算)

重心夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	X	X	1.06321	X	X
邊緣夾取姿態	A(三指)	A(兩指)	B	C	D
與最佳夾取姿態的夾角(rad)	-	-	-	-	-

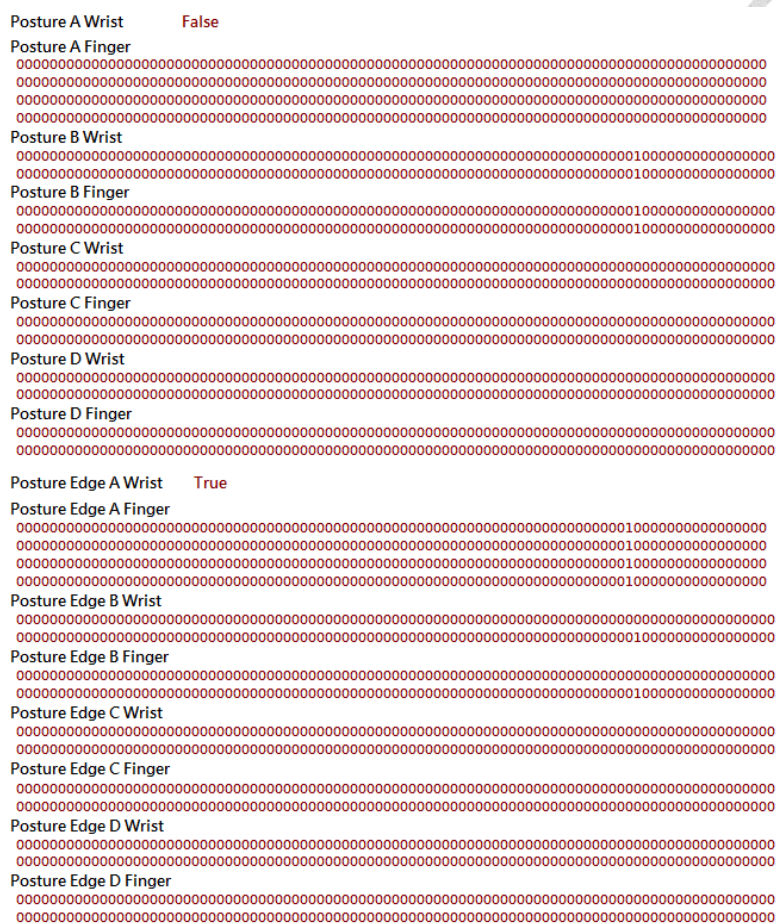
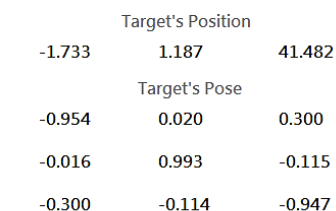


圖 4-30 直立蝴蝶餅乾(長方體)的最終各類夾取姿態計算結果



Axis Length : 6.3208

FPS : 63      Count: 1.1 ms      State: 100      

圖 4-31 直立蝴蝶餅乾(長方體)的最終選擇夾取姿態計算結果



## 4.4.2 多物體夾取姿態計算實驗結果

### 4.4.2.1 多物體的取姿態計算結果

此組實驗主要在展示夾取目標 A 類和邊緣 A 類夾取姿態手指區擷取的障礙物資訊不同，如圖 4-35 所示，且由圖可了解 A 類夾取姿態沒有存在可行的手指夾取範圍但是 A 類夾取姿態存在。如圖 4-32 所示，綜合三個物體加上桌子共四個障礙物環境資訊的夾取姿態計算僅需要 8.3ms。

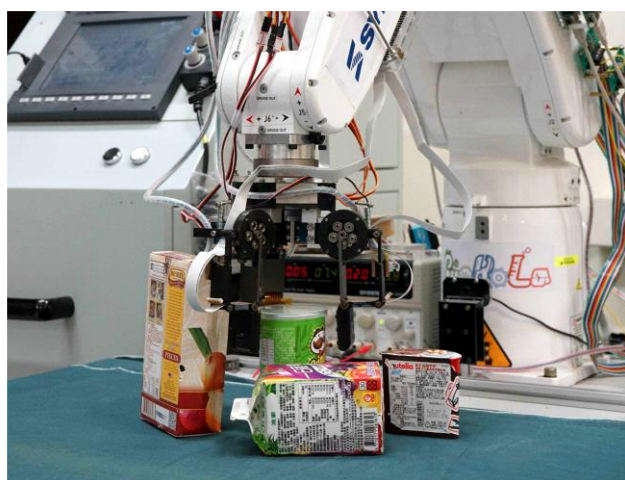


圖 4-32 目標品客波卡的夾取姿態計算實驗結果

Totally 4 objects has founded

Target's Position

1.520	3.145	38.246
-------	-------	--------

Target's Pose

0.769	0.026	0.639
-------	-------	-------

-0.008	0.999	-0.031
--------	-------	--------

-0.639	0.019	0.769
--------	-------	-------

Grasping Type: 5

Axis Length: 12.3342

Ideal Grasping Posture

0.111	-0.003	-0.994
-------	--------	--------

Grasping Position

52.016	-1.412	12.820
--------	--------	--------

Grasping Pose

0.019	0.638	0.770
-------	-------	-------

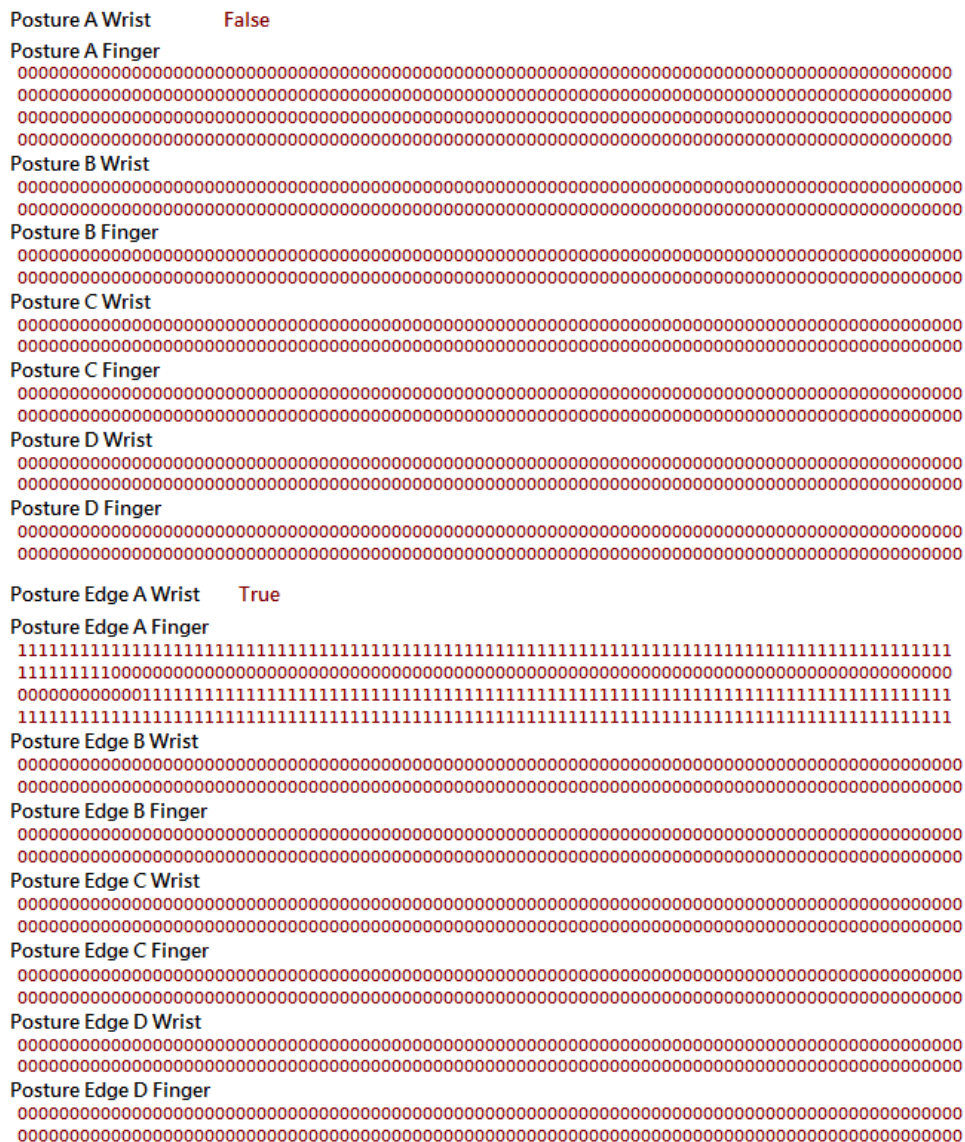
-0.026	0.770	-0.638
--------	-------	--------

-0.999	-0.008	0.031
--------	--------	-------

FPS: 63 Count: 8.3 ms State: 100 →



圖 4-33 目標品客波卡的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖



(a) A 類重心夾取姿態手指區 (b) A 類邊緣夾取姿態手指區



4.4.2.2 物體被障礙物倚靠且障礙物高於物體的夾取姿態計算結果

此情況中欲夾取目標為圖 4-37 中的品客波卡，但是經判斷後其上方有其他物體倚靠，夾取目標會直接改成此在上方的物體，也就是圖 4-39 中的三角巧克力會成為夾取目標。判斷的過程如圖 4-17 所示。如圖 4-37 和圖 4-39 所示，綜合兩個物體加上桌子總共三個障礙物環境資訊的夾取姿態的計算僅需要大約 4~8ms。



圖 4-36 目標品客波卡(圓柱)被倚靠的夾取姿態計算實驗結果

Totally 3 objects has founded

Target's Position

0.031 3.143 44.393

Target's Pose

-0.363 0.034 0.931

0.003 0.999 -0.036

-0.932 -0.010 -0.363

Grasping Type : None

Axis Length : None

Ideal Grasping Posture

-----

Grasping Position

-----

Grasping Pose

-----

-----

-----

FPS : 63 Count: 8.6 ms State: 100 ➡



圖 4-37 目標品客波卡的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖



表 4-17 目標品客波卡的倚靠或被倚靠判斷情形

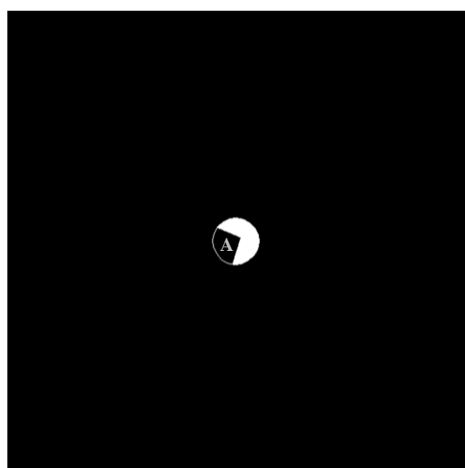


圖 4-38 目標上方面積投影圖

目標投影原始面積	2931	1849/2931=0.631
目標被遮蔽後面積	1849	63.1%<95%
目標最高點位置	148.1	148.1>58.6
物體 A 最低點位置	58.6	A 不在目標上方
物體 A 傾角(度)	26.2°	26.2°>5°
		A 朝目標傾斜

Totally 3 objects has founded

Target's Position

-6.740 -0.806 44.104

Target's Pose

0.888 -0.411 -0.207

0.358 0.899 -0.252

0.289 0.149 0.946

Grasping Type: 5

Axis Length: 20.9211

Ideal Grasping Posture

0.288 0.033 -0.957

Grasping Position

56.689 3.260 20.213

Grasping Pose

0.149 0.229 0.962

0.411 0.870 -0.271

-0.899 0.436 0.036

FPS: 64

Count: 3.8 ms

State: 100



圖 4-39 更改目標三角巧克力的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖

4.4.2.3 物體倚靠障礙物且障礙物高於物體的夾取姿態計算夾果

雖然欲夾取目標蝴蝶餅乾轉至基準坐標系後上方有物體，但是經過判斷後確認為其倚靠在障礙物上而非有障礙物在其之上，判斷過程如表 4-18 所示，因此不會更改目標，仍然會以蝴蝶餅乾為夾取目標。如圖 4-41 所示，夾取姿態的計算僅需要 3.2ms。

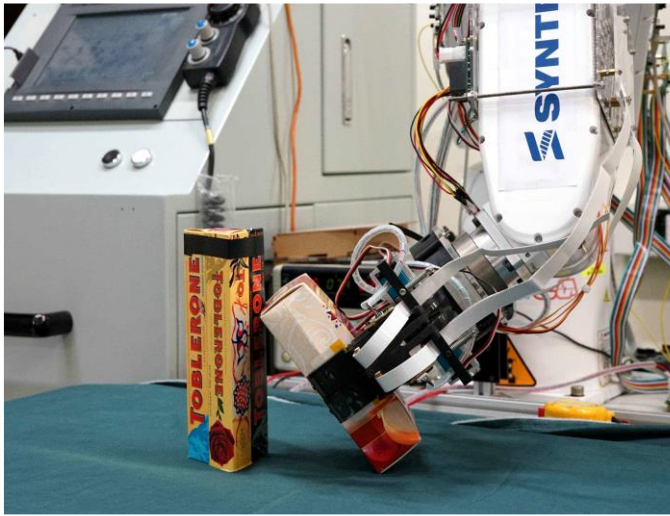


圖 4-40 目標蝴蝶餅乾的夾取姿態計算實驗結果

Totally 2 objects has founded

Target's Position

-3.533 1.464 39.805

Target's Pose

0.512 -0.509 0.692

-0.028 0.796 0.605

-0.859 -0.329 0.393

Grasping Type: 3

Axis Length: 6.3208

Ideal Grasping Posture

0.160 0.012 -0.987

Grasping Position

53.655 4.063 10.336

Grasping Pose

0.389 0.861 0.329

-0.695 0.508 -0.509

-0.605 -0.031 0.796

FPS : 80 Count: 3.2 ms State: 100 ➡



圖 4-41 目標蝴蝶餅乾的最終選擇夾取姿態計算結果和物體分布示意圖

表 4-18 目標蝴蝶餅乾的倚靠或被倚靠判斷情形

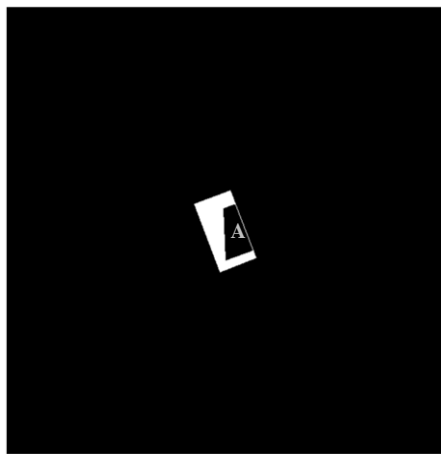


圖 4-42 目標上方面積投影圖

目標投影原始面積	5187	$3163/5167=0.61$ $61\%<95\%$
目標被遮蔽後面積	3163	面積縮小>5%
目標最高點位置	186.1	$186.1>83.1$ A 不在目標上方
物體 A 最低點位置	83.1	
物體 A 傾角(度)	-1.4°	$-1.4^{\circ}<5^{\circ}$ A 不朝目標傾斜

## 4.5 滑動偵測與調整夾取力量實驗結果

以上的實驗只到了計算夾取姿態的步驟，尚未對物體進行實際的夾取動作，為了能及時的了解夾時的狀態，加入了壓力感測器的回饋進入夾取時的控制，圖 4-43 中夾取的實驗流程如下：夾爪一開始自預備位置等待，若有偵測到欲夾取的物體則夾爪會先移動到準備位置，之後再移動到夾取位置，最後夾爪閉合且若夾取時壓力陣列偵測的力大於一定值則把物體夾取並移動物體到目的地。因為實驗中有易變形的物體，因此壓力陣列的閾值只設定在 2 N，然而，這會導致一些較重的物體無法被夾起。圖 4-43 展示了兩次的實驗結果，其中 Condition 1 的情況中夾爪很好的貼合在物體上因此很成功地舉起物體，然而在 Condition 2 的情況中雖然也成功地舉起物體，但是在移動的過程中可以通過圖片發現物體有滑動的情形發生。由此實驗可以了調節夾取的力量夾取各式不同重量的物體時有其必要性。

本研究中欲藉由滑動的偵測來調整夾取的力道來夾取不同重量的物體。當有滑動發生，這一刻與上一刻的壓力陣列資料彼此之間的相關性會與滑動的程度有關。若只是單純的增加夾取的力道，壓力陣列的值會同時增加，因此雖然兩者的壓力陣列值雖然會有所不同，兩筆資料相關性(correlation)是高的；然而若有滑動發生，滑動越劇烈則兩筆資料之間的相似度會越低、相關性(correlation)也就越低[30, 31]。

兩個時刻之間的壓力陣列資料相關性可由(式 4-1)求得[30]。其中， $c$ 是此刻和上一刻壓力陣列的相關性、 $X$ 是此刻壓力陣列所有單元組成的一維陣列、 $\bar{X}$ 是此刻壓力陣列所有單元的平均、 $Y$ 是上一刻壓力陣列所有單元組成的一維陣列而 $\bar{Y}$ 是上一刻壓力陣列所有單元的平均。 $c$ 的值介於正負 1 之間，數值越大表示兩組陣列的相關性越大，研究中即是以 $c$ (correlation)的數值大小來判斷是否有滑動的發生。

以下將以三指模式的夾爪夾取直立擺放的品克波卡，也就是圖 4-8 的狀況為實驗場景進行滑動偵測的實驗。實驗主要分為三個部分，單純增加夾取力道觀察是否為有滑動現象發生、以不同的初始夾取力量夾取不同負重的品克波卡並進行提升的動作以觀察滑動現象、最後是藉由滑動偵測調整夾取力量夾取不同負重的品克波卡並觀察夾取力道的調整結果。以下實驗的 sampling rate 皆為 2ms。

$$c = \frac{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})^T}{\sqrt{(X - \bar{X})(X - \bar{X})^T} \sqrt{(Y - \bar{Y})(Y - \bar{Y})^T}} \quad (\text{式 4-1})$$

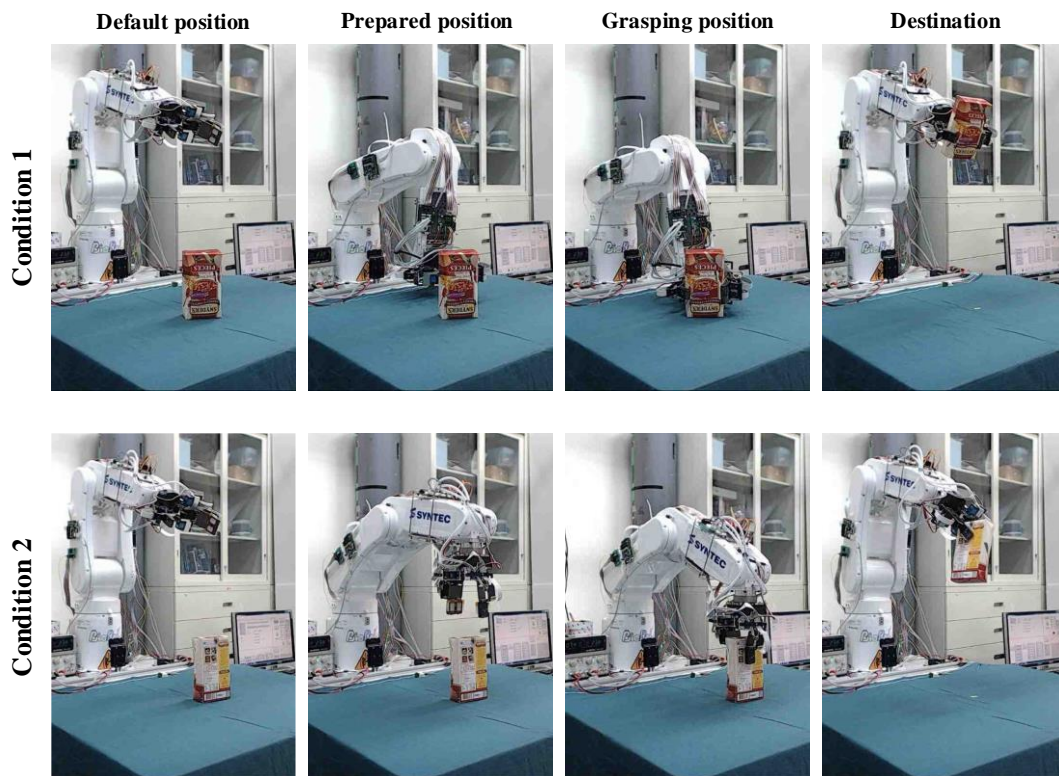


圖 4-43 自動夾取流程示意圖



### 4.5.1 夾取力道與滑動相關性實驗

此實驗只單純增加夾取力並沒有拉升物體道，實驗目的是觀察演算法是否會將夾取力道的改變誤判為滑動的發生。

圖 4-44 為夾取力道與相關性(correlation)關係的實驗結果，圖中的上圖記錄的是計算出來此刻和上一刻壓力陣列的相關性，而下圖記錄的是每一指的所以壓力陣列單元總和和三指的總和。由實驗結果可以看出，單純的增加夾取力道並不會被誤判為是滑動的發生。

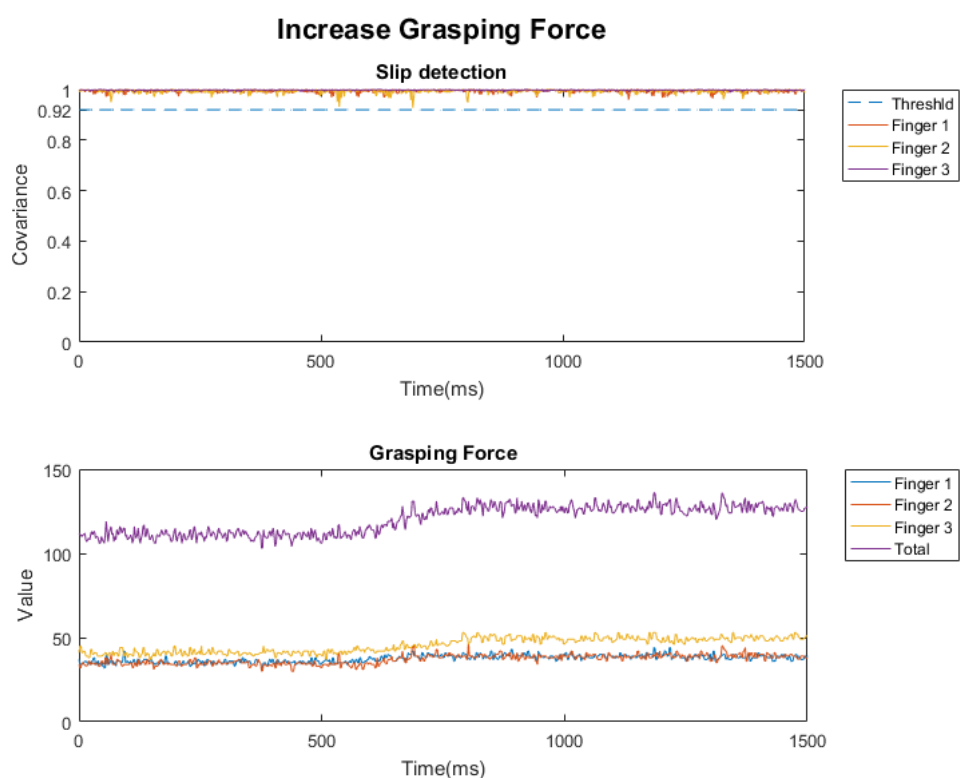


圖 4-44 夾取力道與相關性(correlation)關係實驗結果



## 4.5.2 滑動偵測實驗

研究中以 250g 和 500g 兩種負重的品客波卡為夾取目標，並以不同的初始力道夾取物體後拉升 2cm，觀察兩個時刻壓力陣列的相關性(correlation)是否會與滑動的劇烈程度有正相關。

### 4.5.2.1 品客波卡負重 250g

圖 4-45 和圖 4-46 為負重 250g 的品客波卡以不同的初始力道夾取並拉升的實驗結果。因為馬達 PWM 解析度無法將夾取力道精準的調整至某個數值且壓力陣列本身會有浮動，圖中標示的初始力道誤差在 15%以內。

由圖 4-45 可以看出，拉升物體的過程中壓力總值有劇烈的下降，且三指的壓力總值皆有劇烈的改變，由原本的第一和第二指出力較大改變為第三指出力較大，也就是物體在夾取過程中在夾爪內有調整位置的情形，因此力的分布改變了，這也表示在夾取時物體與夾爪有相對移動的情形發生，而這也符合在壓力總值下降最劇烈之處，相關性(correlation)的數值會低於閾值因此會被判斷為有滑動發生的實驗結果。

圖 4-46 中的實驗結果顯示，雖然在拉升物體的過程中夾取的壓力陣列總值有稍微下降的趨勢但是並不劇烈，且三指的力分布也沒有改變，推測並沒有滑動的發生，這與相關性(correlation)的實驗結果相符，並沒有偵測到有滑動的發生。

由此組實驗結果可以推測，當壓力陣列總值在 100 左右時可以穩定的拉升起 250g 的品客波卡，這符合在測試 PDMS 軟墊時的實驗結果(圖 2-44 所示)。

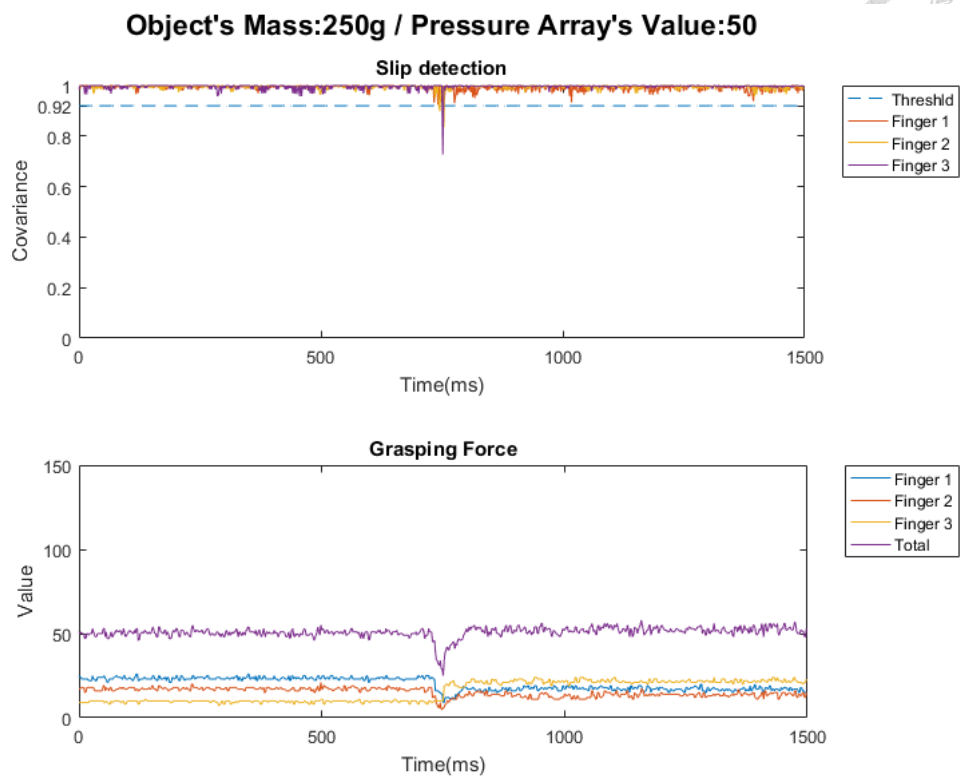


圖 4-45 滑動實驗結果(負重 250g；壓力陣列初始總值 50)

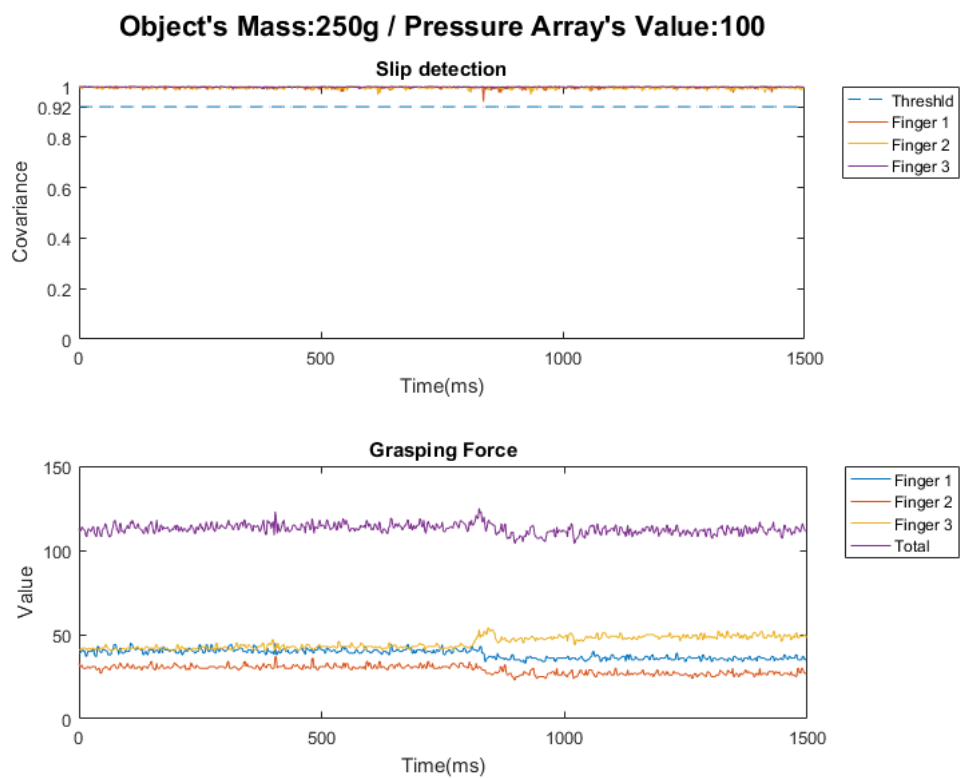


圖 4-46 滑動實驗結果(負重 250g；壓力陣列初始總值 100)



#### 4.5.2.2 品客波卡負重 500g

圖 4-47、圖 4-48、圖 4-49 和圖 4-50 為負重 500g 的品客波卡以不同的初始力道夾取並拉升的實驗結果。因為馬達 PWM 解析度無法將夾取力道精準的調整至某個數值且壓力陣列本身會有浮動，圖中標示的初始力道誤差在 15% 以內。因為壓力陣列總值 50 的情況下完全無法夾取 500g 的品客波卡，因此由壓力陣列總值 100 開始測試。

由圖 4-47 和圖 4-48 可以看出，拉升物體的過程中壓力總值有劇烈的下降，且三指的壓力分佈也有劇烈的改變，這表示在夾取時物體與夾爪有相對移動的情形發生，相關性(correlation)的數值在這兩個夾取過程中皆判斷有滑動發生的情形，且實驗結果中壓力陣列初始值為 100 的情況偵測到的滑動情形明顯比 150 劇烈。

在圖 4-49 的情況中，結果顯示物體在拉升的過程中壓力總值有下降，且三指力的分佈有改變，推測有滑動的發生，但是兩者皆不如在圖 4-47 和圖 4-48 的情況中劇烈，相關性(correlation)的實驗結果只偵測到輕微的滑動。

最後，圖 4-50 中的實驗結果顯示，在拉升物體的過程中夾取的壓力陣列總值有下降的趨勢但是並不劇烈，且三指的力分布也沒有改變，推測並沒有滑動的發生，而在相關性(correlation)的實驗結果也沒有偵測到有滑動的發生。

由此組實驗結果可以推測，相關性(correlation)的數值變化不只可以偵測是否有滑動的發生也和滑動的劇烈程度有正相關。此組實驗結果也顯示當壓力陣列總值在 200 左右時雖然有輕微的擾動但是幾乎可以穩定的拉升起 500g 的品客波卡，而當壓力陣列總值在 250 左右時則可以完全穩定的拉升起 500g 的品客波卡，這與在測試 PDMS 軟墊時的實驗結果符合(圖 2-44 所示)。

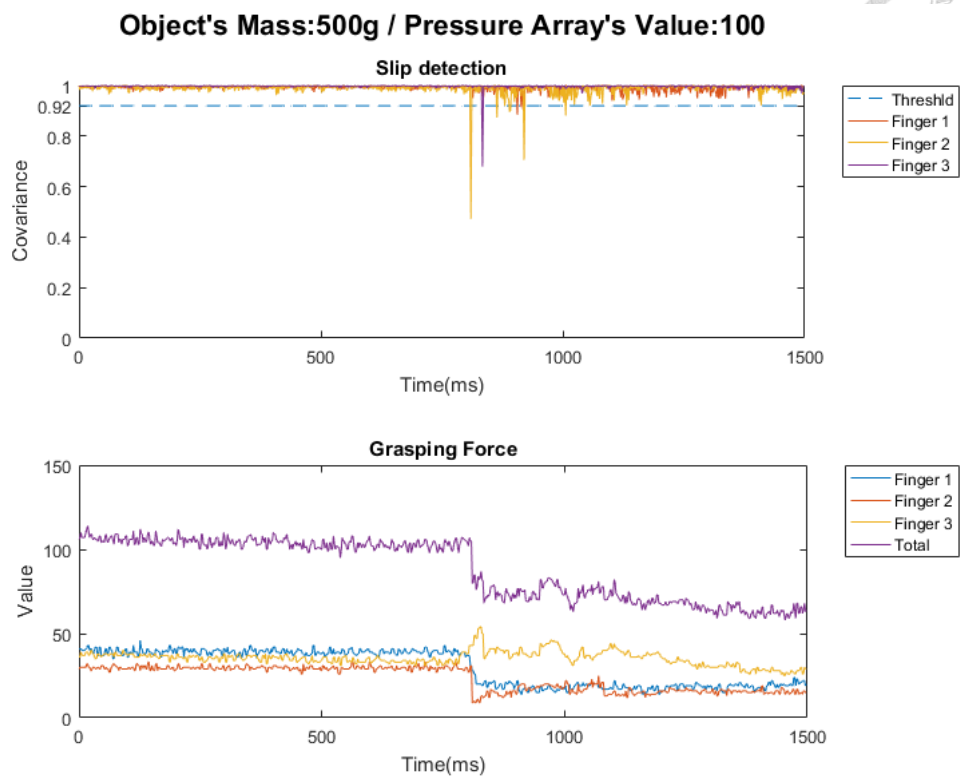


圖 4-47 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 100)

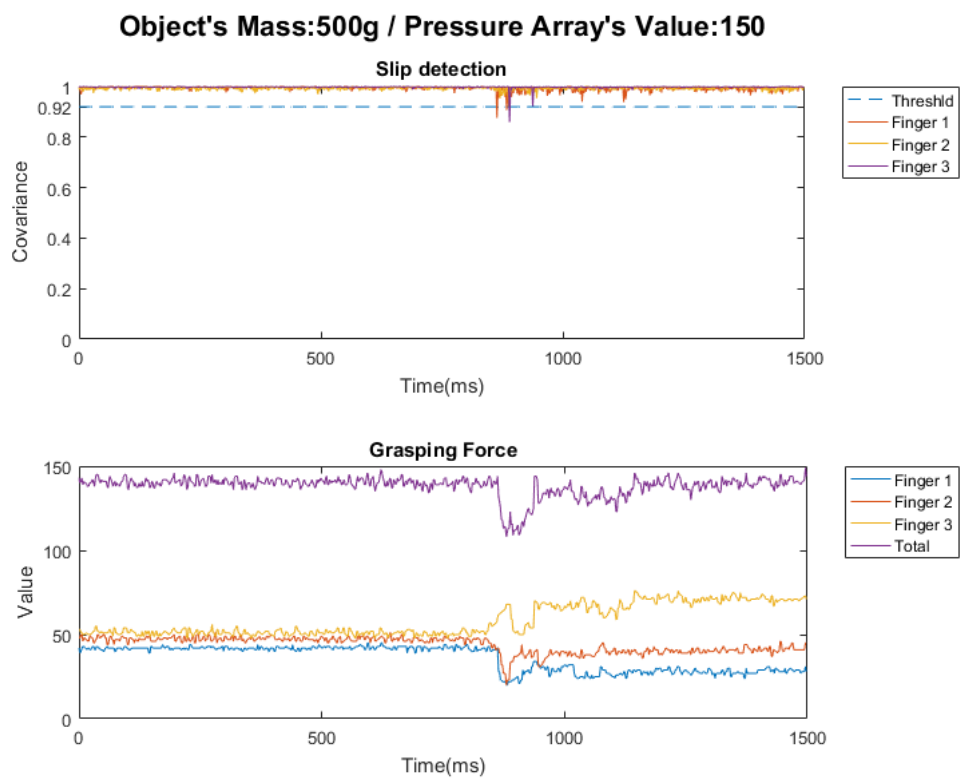


圖 4-48 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 150)

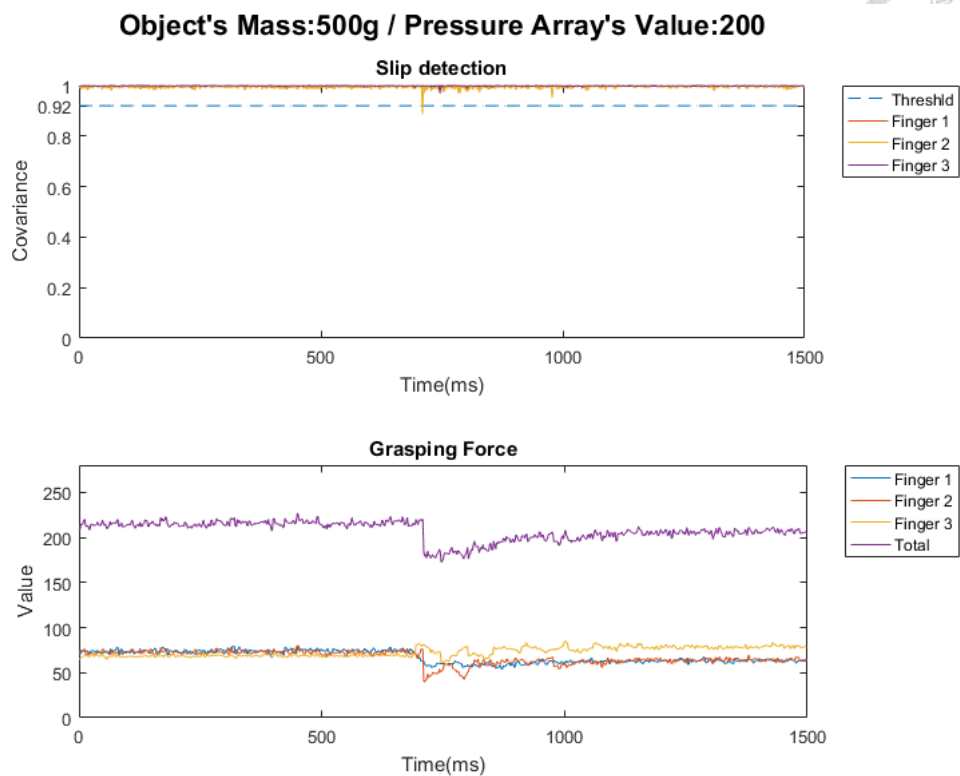


圖 4-49 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 200)

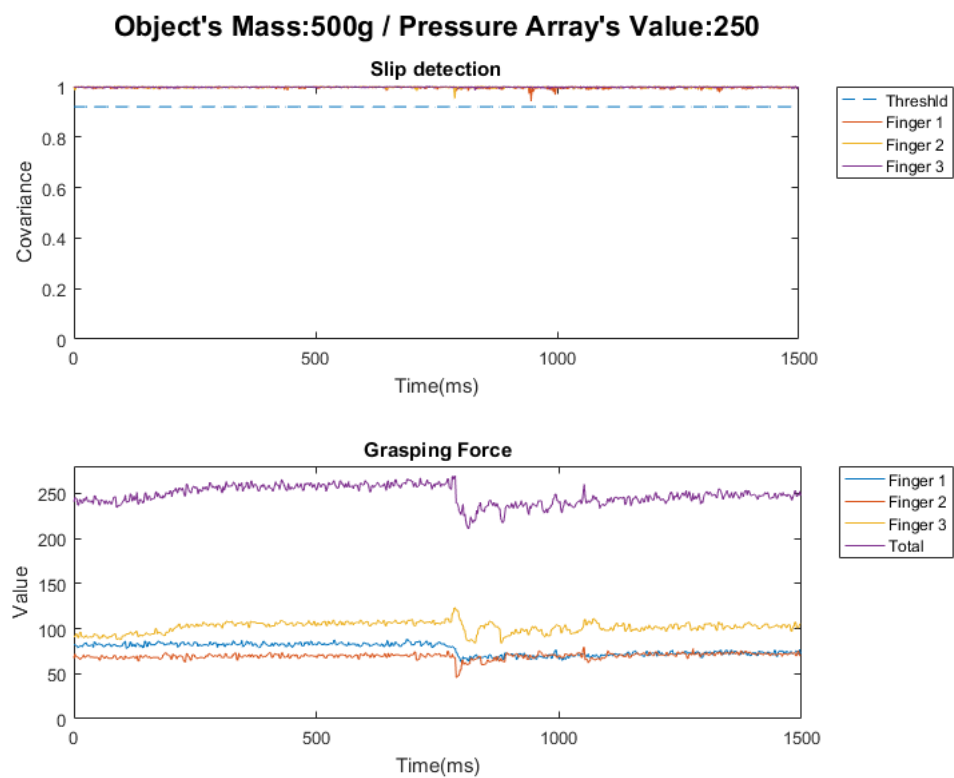


圖 4-50 滑動實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 250)



### 4.5.3 夾取調整實驗

以下同樣以 250g 和 500g 負重的物品可波卡當作實驗對象，實驗過程大致如下，以壓力陣列總值 80 的初始條件夾取物體後向上提升 5cm，到達目的位置後靜至一段時間觀察是否為穩定夾取。

250g 負重的實驗結果如圖 4-51 所示，拉升的起始時間為 612ms，到達目的的時間為 1680ms，拉升的過程中有偵測到滑動的發生，依照偵測到的滑動劇烈程度調整了馬達的 PWM(三指調整幅度相同)，調整後的壓力陣列總值上升至 115 左右，調整後的夾爪夾取呈現穩定狀態。調整後壓力陣列總值 115 可以穩定的夾取 250g 負重的品克波卡與在滑動偵測時的實驗結果符合。

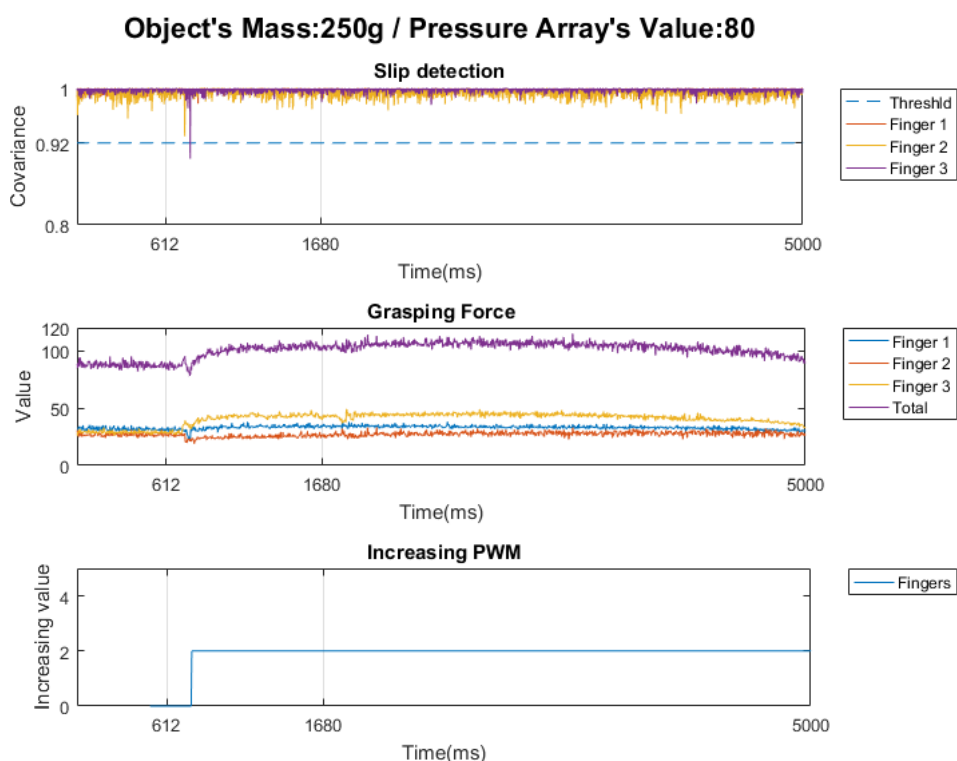


圖 4-51 調整夾取力到實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 80)

5000g 負重的實驗結果如圖 4-52 所示，拉升的起始時間為 668ms，到達目的的時間為 1650ms，拉升的過程中有偵測到滑動的發生，依照偵測到的滑動劇烈程度調整了馬達的 PWM(三指調整幅度相同)，調整後的壓力陣列總值上升至 220 左右，調整後的夾爪夾取呈現穩定狀態。由實驗果可以看出，在相同的初始夾取力量下提升相同的物體，在 500g 的情形中偵測到的滑動現象相比在 250g 時劇烈許多，而調整後壓力陣列總值 220 可以穩定的夾取 500g 負重的品克波卡與在滑動偵測時的實驗結果符合。

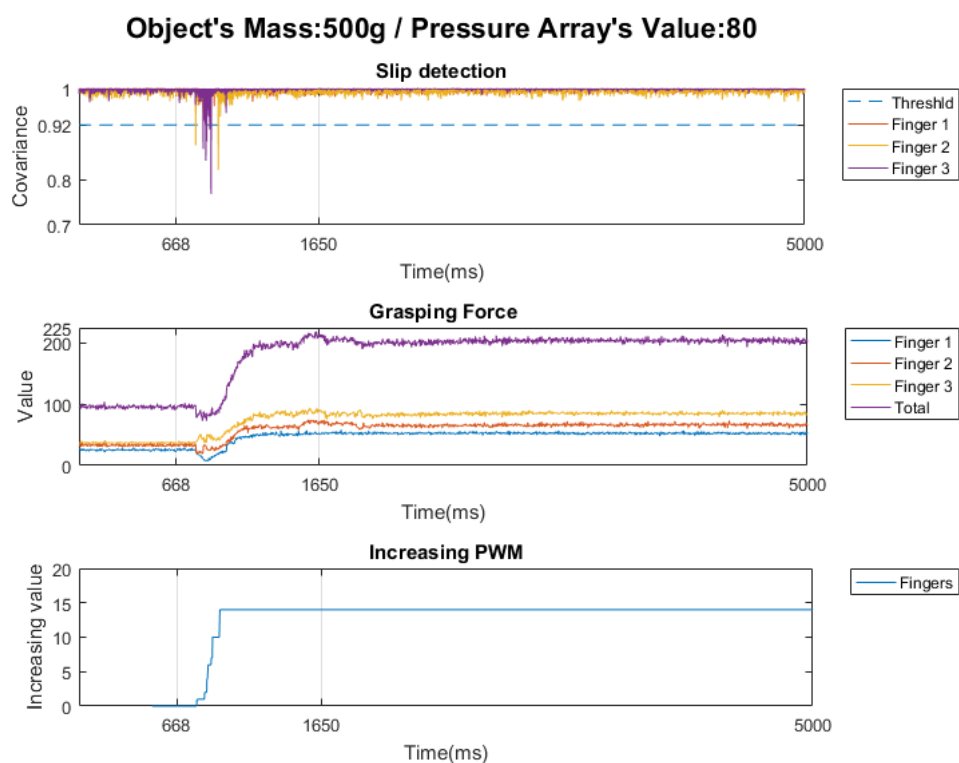


圖 4-52 調整夾取力到實驗結果(負重 500g；壓力陣列初始總值 80)

由以上兩組實驗室可以了解到，研究中所使用的滑動偵測演算法是可以良好的偵測到滑動的現象且可以由數值判斷滑動的劇烈程度以應用於調整夾取力道之中，力道調整的結果適中，於滑動偵測中的實驗結果相符。



## 4.6 近接感測器實驗結果

圖 4-53 為夾爪被動自由度被觸發之情況。圖 4-53(a)顯示，平均的  $\phi$  為  $0.100103\text{rad}$ ，所以夾爪形成一個較深的夾取姿態以增強包覆性，如圖 4-53(b)所示。

圖 4-54 為兩爪模式切換到三爪模式之情形。此物體被辨識分類為長方體，如圖 4-5 所示，故夾爪最初選擇兩爪模式夾取物體。當夾爪接近物體時，如圖 4-54(a)所示，兩指的  $\alpha$  大於  $50^\circ$ ，且  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  之讀值分別為  $0.2124\text{rad}$  和  $-0.0618\text{rad}$ 。因此，夾爪會張開直到第二指和第三指的  $\theta_2$  小於  $50^\circ$ ，如圖 4-54(b)和圖 4-54(c)所示。

在手指上加裝接近感應器的優點是能夠使夾爪更好的包覆於物體上作更穩定的夾取，由實驗結果可以了解到研究中開發的近接感測器可以達到這個預期中的效果，然而在實驗中有發現，紅外線受顏色的影響比想像中的劇烈，當物體表面顏色分布均勻時近接感測器的效果是好的，然而當物體表面顏色分布不均時，近接感測器的表現會下降許多。

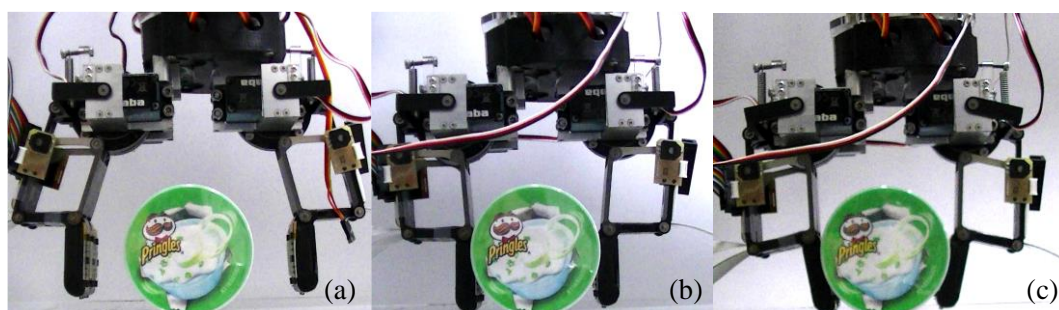


圖 4-53 觸發被動包覆過程

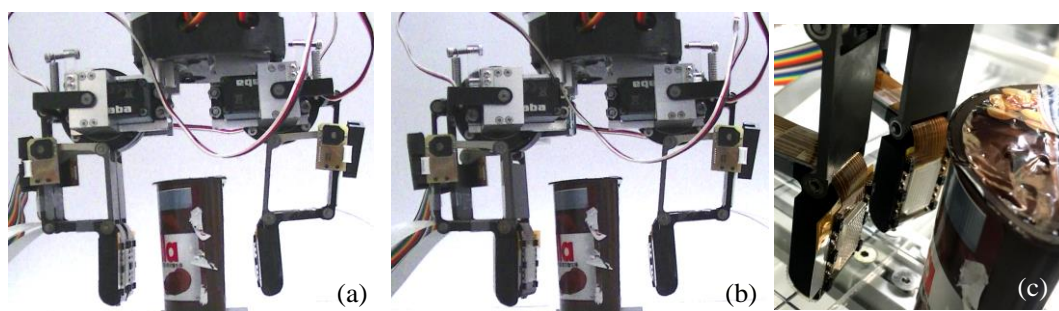


圖 4-54 觸發模式轉換過程



## 4.7 本章結論

本章先藉由簡單的實驗展示機械夾爪的包覆能力和視覺定位的成果，驗證兩者穩定且適合進行夾取實驗的，之後再藉由一系列的實驗設計驗證本研究所提出之計算夾取姿態演算法的可行性，此部分由一系列的實驗結果可以了解到，研究中所提出的計算夾取姿態演算法所需的計算時間非常低且計算結果可靠。最後進行紅外線陣列感測器與偵測滑動來調整夾取力道的實驗，結果證實其對於夾取確實有正向的功能，能幫助夾爪夾取更多樣化的物體。

由本章的實驗結果可以了解到，研究中所使用的定位演算法是可相信的、模型簡化的結果雖然跟點雲的狀態有直接的關係但是若點雲的狀態佳則模型簡化的效果會是好的、雖然尚未在非常複雜的環境進行計算夾取姿態演算法的驗證，但就目前的實驗結果還來看在鬆散的環境中研究中所提出的演算法是可行的。最後，近接感測器的實驗結果顯示其確實可以使夾取時的穩定性提高，然而紅外線受顏色影響劇烈，是否可以更換其他感測器或其他改進的方向是需要再思考的，而滑動偵測調整夾取力量的部分尚未在各式夾取姿態下進行測試，其是否能適用於所有的夾取姿態中並能穩定的調整夾取力量是未來可以再努力的方向。

## 第五章 結論與未來展望



### 5.1 結論

本研究成功地開發了具有一主動和一被動自由度的機構驅動式通用型夾爪，並為夾爪上的壓力陣列設計了適合的壓力陣列軟墊和可以幫助夾爪作更包覆性夾取的紅外線陣列近接感測器。

除了硬體上的開發之外，研究中還提出了一套完整且低耗時的計算夾取姿態演算法，這個演算法依賴了兩個主要的策略，第一個為，演算法中將物體的形狀簡化，分類至四個簡單的幾何形狀中，並以此簡化的模型來計算夾取姿態，第二個策略延續了第一個策略，在演算法中將夾取姿態的設計簡化至二維空間並且只需要擴展至四個幾何簡單幾何形狀上，不只節省了對每個物體設計夾取姿態的時間也因為將夾取姿態的計算壓縮至二維空間上節省了大量的計算時間。

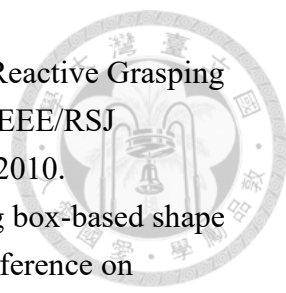
### 5.2 未來展望

- (1) 研究中提出的演算法從實驗結果來看，在鬆散的環境是可行的，之後需要再利用更多的實驗驗證演算法在複雜環境的可行性和是否有可以改進之處。
- (2) 雖然當物體的表面顏色平均時，近接感測器的表現良好，然而當紅外線遇到物體表面顏色差異很大時，其可靠度會降低非常多，如何改進是可以思考的方向。
- (3) 研究中滑動偵測調整夾取力量的部分尚未在各式夾取姿態下進行測試，其是否能適用於所有的夾取姿態中並能穩定的調整夾取力量是未來可以再努力的方向。


## 參考文獻



- [1] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, and K. Biggers, "Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand," in *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, 1986, pp. 1520-1532.
- [2] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, and S. Ito, "Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III," presented at the ICCAS2002, The 2nd International Conference on Control, Automation and Systems, Korea.
- [3] S. R. Company. *Shadow Dexterous Hand*. Available: <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>
- [4] J. Butterfa, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, "DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand," in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, 2001, pp. 109-114.
- [5] A. Bicchi, "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 652-662, 2000.
- [6] A. M. Dollar and R. D. Howe, "A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 11, pp. 154-161, 2006.
- [7] L. U. Odhner, L. P. Jentoft, and M. R. Claffee, "A compliant, underactuated hand for robust manipulation," *International Journal of Robotics Research*, vol. 33, 2014.
- [8] I. SPECTRUM, "Willow Garage Introduces Velo 2G Adaptive Gripper," ed.
- [9] K. Suzumori, S. Iikura, and H. Tanaka, "Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms," in *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, 1991, pp. 1622-1627.
- [10] B. Technology. *BarrettHand*. Available: <http://www.barrett.com/robot/products-hand.htm>
- [11] SCHUNK. *SDH servo-electric 3-Finger Gripping Hand*. Available: <http://mobile.schunk-microsite.com/en/produkte/produkte/sdh-servo-electric-3-finger-gripping-hand.html>
- [12] ROBOTIQ. *3-Finger Adaptive Robot Gripper*. Available: <http://robotiq.com/en/products/industrial-robot-hand>
- [13] FESTO. *Fin Gripper*. Available: <http://www.electroquip.co.uk/news/pneumatics-the-best-3-grippers-available-on-the-market>
- [14] V. Lippiello, F. Ruggiero, B. Siciliano, and L. Villani, "Visual Grasp Planning for Unknown Objects Using a Multifingered Robotic Hand," presented at the IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2013.

- 
- [15] K. Hsiao, S. Chitta, M. Ciocarlie, and E. G. Jones, "Contact-Reactive Grasping of Objects with Partial Shape Information," presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010.
  - [16] K. Hübner and D. Kragic, "Selection of robot pre-grasps using box-based shape approximation," presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.
  - [17] S.-K. Kim and M. Likhachev, "Planning for Grasp Selection of Partially Occluded Objects," presented at the IEEE ICRA, 2016.
  - [18] K. Huebner, S. Ruthotto, and D. Kragic, "Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping," presented at the IEEE ICRA, 2008.
  - [19] A. T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, and P. K. Allen, "Automatic Grasp Planning using Shape Primitives," presented at the IEEE ICRA, Taipei, Taiwan, 2003.
  - [20] C. Eppner and O. Brock, "Grasping Unknown Objects by Exploiting Shape Adaptability and Environmental Constraints," presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013.
  - [21] K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo, "Integrated Control of a Multi-fingered Hand and Arm using Proximity Sensors on the Fingertips," presented at the IEEE ICRA, 2016.
  - [22] M. Santello, M. Flanders, and J. F. Soechting, "Postural hand synergies for tool use," *J. Neurosci.*, vol. 18, pp. 10105-10115, Dec. 1998.
  - [23] K. Shimonomura, H. Nakashima, and K. Nozu, "Robotic grasp control with high-resolution combined tactile and proximity sensing," presented at the IEEE ICRA, 2016.
  - [24] S. YE, K. SUZUKI, Y. SUZUKI, M. ISHIKAWA, and M. SHIMOJO, "Robust Robotic Grasping Using IR Net-Structure Proximity Sensor to Handle Objects with Unknown Position and Attitude," presented at the IEEE ICRA, 2013.
  - [25] K. Hsiao, P. Nangeroni, M. Huber, A. Saxena, and A. Y. Ng, "Reactive Grasping Using Optical Proximity Sensors," in *IEEE ICRA*, 2009, pp. 2098-2105.
  - [26] K. Koyama, H. Hasegawa, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo, "Pre-shaping for Various Objects by the Robot Hand Equipped with Resistor Network Structure Proximity Sensors," presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013.
  - [27] M. Grammatikopoulou, E. Psomopoulou, L. Droukas, and Z. Doulgeri, "A controller for stable grasping and desired finger shaping without contact sensing," presented at the IEEE ICRA, 2014.
  - [28] J. M. Romano, K. Hsiao, G. Niemeyer, S. Chitta, and K. J. Kuchenbecker, "Human-Inspired Robotic Grasp Control With Tactile Sensing," in *IEEE*

- Transactions on Robotics*, 2011, pp. 1067 - 1079.
- [29] Z. Pezzementi, E. Plaku, C. Reyda, and G. D. Hager, "Tactile-Object Recognition From Appearance Information," presented at the IEEE Transactions on Robotics, 2011.
- [30] Y. Cheng, C. Su, Y. Jia, and N. Xi, "Data Correlation Approach for Slippage Detection in Robotic Manipulations Using Tactile Sensor Array," presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015.
- [31] M. Stachowsky, T. Hummel, M. Moussa, and H. A. Abdullah, "A Slip Detection and Correction Strategy for Precision Robot Grasping," *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 21, pp. 2214-2226, 2016.
- [32] 林昱辰, "可變與自順應外型多感測器夾爪之開發與其在多外型與多尺寸物件自動化取放任務之應用," 碩士論文, 機械工程學系, 國立台灣大學, 台北, 2014.
- [33] Furtaba. *Futaba BLS172SV*. Available: <http://www.futabarc.com/servos/sbus.html>
- [34] 小原齒輪. *SI 內齒輪*. Available: [https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?jsessionid=0D4AB1E5C8BF53D8EB2CD05BDFE2160B?indexCode=18&referrer=series&sic=1&lang=zh\\_TW](https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?jsessionid=0D4AB1E5C8BF53D8EB2CD05BDFE2160B?indexCode=18&referrer=series&sic=1&lang=zh_TW)
- [35] 小原齒輪. *SW 蝸桿*. Available: [https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?indexCode=75&referrer=series&sic=1&lang=zh\\_TW](https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?indexCode=75&referrer=series&sic=1&lang=zh_TW)
- [36] 小原齒輪. *BG 蝸輪*. Available: [https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?indexCode=79&referrer=series&sic=1&lang=zh\\_TW](https://www.khkgears.co.jp/khkweb/search/sunpou.do?indexCode=79&referrer=series&sic=1&lang=zh_TW)
- [37] C. Li, P.-M. Wu, S. Lee, A. Gorton, M. J. Schulz, and C. H. Ahn, "Flexible Dome and Bump Shape Piezoelectric Tactile Sensors Using PVDF-TrFE Copolymer," *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 17, pp. 334-341, 2008.
- [38] H.-K. Lee, S.-I. Chang, and E. Yoon, "A Flexible Polymer Tactile Sensor: Fabrication and Modular Expandability for Large Area Deployment," *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 15, pp. 1681-1686, 2006.
- [39] 游崑舜, "可側傾雙輪機器人之運動控制與其內部機器人泛用機電系統架構," 碩士學位, 機械工程學系, 國立台灣大學, 台北, 2012.
- [40] C. Wu. *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System*. Available: <http://ccwu.me/vsfm/index.html>
- [41] C. Wu. *SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*. Available: <http://www.cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/>

- 
- [42] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [43] T. Lindeberg, "Detecting salient blob-like image structures and their scales with a scale-space primal sketch: A method for focus-of-attention," *International Journal of Computer Vision*, vol. 11, pp. 283-318, 1993.
- [44] OpenCV. *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. Available: [http://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](http://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html)
- [45] R. Balasubramanian, L. Xu, P. D. Brook, J. R. Smith, and Y. Matsuoka, "Human-Guided Grasp Measures Improve Grasp Robustness on Physical Robot," in *IEEE ICRA*, 2010.