

國立交通大學

電控工程研究所

碩士論文

一種機械手臂順應性控制與安全設計

A Compliance Control and Safety Design of a
Robotic Manipulator



研究生：許傑巽

指導教授：宋開泰 博士
羅佩禎 博士

中華民國九十九年九月

一種機械手臂順應性控制與安全設計

A Compliance Control and Safety Design of a Robotic Manipulator

研究生：許傑巽

Student: Chieh-Hsun Hsu

指導教授：宋開泰 博士

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

羅佩禎 博士

Dr. Pei-Chen Lo



A Thesis

Submitted to Institute of Electrical Control Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical Control Engineering

September 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年九月

一種機械手臂順應性控制與安全設計

學生:許傑巽

指導教授:宋開泰 博士

羅佩禎 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

當機械手臂在執行任務時，往往會無法完全預期外界環境的狀態，有可能會與外界環境產生意外碰撞而導致硬體上的損壞或人員的傷害。為避免上述情況，必須加入順應性運動控制(例如：阻抗控制)，使得機械手臂碰撞到外界物體時能產生順應能力來保持安全。本研究提出一套機械手臂的安全行為的控制策略。考慮到機械手臂在居家環境裡可能面對的大多情況，以及各種任務類型，大致上可以將機械手臂所有行為分為兩類。第一類情況為待命模式。第二類情況為運動模式。在待命模式裡使用了本論文提出來的機械手臂順應性運動控制，以空間中的質量-阻尼動態模型來實現機械手臂之順應性運動控制，當遇到外力或碰撞時，能夠利用質量-阻尼動態模型來順應外力，以確保對環境(人)的安全。在運動模式使用本論文提出的機械手臂安全移動策略，本策略同樣使用了順應性運動控制的架構。機械手臂在移動的過程中，如果與外界(人或物體)發生碰撞，能夠即時的感知並停止繼續運動，使碰撞程度維持在輕微接觸的範圍，並且會根據碰撞時產生的力向量計算出一個繞路點，機械手臂會移動到繞路點後再次往原設定之目標點前進，如此反覆進行。透過本設計的實現，可以確保機械手臂任何時刻的安全性考量。文中以實驗室自行設計之四自由度機器手臂搭配安裝在終端效應器(End-effector)的六軸力感應器以及工業電腦，驗證所提出方法的可行性。最後在不同情況的測試下，進行順應外力之實驗以及遇到障礙物重新移動實驗，皆為安全行為，消除機械手臂隊人員的威脅，以確保人員的安全。

A Compliance Control and Safety Design of a Robotic Manipulator

Student: Chieh-Hsun Hsu

Advisor: Dr. Kai-Tai Song

Dr. Pei-Chen Lo

Department of Electrical and Control Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

When the manipulator executes a task, it may cause some hardware damage or injury if the manipulator does not know the environment all condition. To avoid the above situation, we must adopt the compliance motion control. We must design the manipulator with the ability of compliance to ensure safety of the manipulator. This thesis presents a strategy for safe behavior of the robot. Taking into account the manipulator in a home environment, we can classify the manipulator's behaviors in two modes. The first mode is standby mode. The second mode is motion mode. Standby mode uses a compliance motion control design for the manipulators. Motion mode uses the same control architecture with safety motion strategy of this thesis. Finally, we use a 4-DOF manipulator developed in our laboratory to test and verify the proposed Algorithm.

誌謝

謹向我的指導教授宋開泰博士致上感謝之意，感謝他兩年多來給於我許多在生活處事上的意見以及專業研究上的指導，以他豐富的學識與經驗，配合理論的應用，使得本論文得以順利完成，且無論在知識或生活等各方面都收穫良多。

感謝學長孟儒、嘉豪、格豪和學姐巧敏在實做及理論上的指導，以及感謝與我共同奮鬥的同學信毅、奕廷、哲豪、維峻及宗暘的相互鼓勵及提攜，同時也感謝學弟仕晟、建宏、上峻、碩成、家昌和章宏在研究途中的協助及在生活上帶來的樂趣。感謝我的朋友們立傑、祺祥、育民、資順、偉傑、逸暘、炳聰、子翔、美月、郁婷、純琪、浩儒等…，時常為我打開不同於研究生涯的另一扇窗，讓我得以喘息。感謝我女朋友虹羽，對於我日常生活大小事的照顧關心與幫忙，不時的陪伴，與許多諒解與支持。

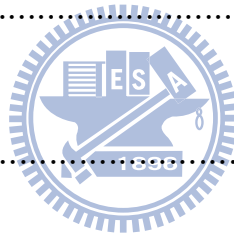
最後，特別感謝我的父母，由於他們的辛苦栽培與鼓勵，在生活上給予我細心地關愛與照料，並支持我就讀碩士學位，使得我才得以順利完成此論文。在此我願以此論文獻給我最感激及最偉大的父母親。

目錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	x
第一章. 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 機器人之安全設計	1
1.3 順應性運動控制之研究背景	6
1.3.1 被動式順應性運動控制	7
1.3.2 主動式順應性運動控制	9
1.3.2.1 混合運動控制(Hybrid motion control)	9
1.3.2.2 阻抗控制(Impedance control)	10
1.4 系統架構	11
1.5 章節說明	12
第二章. 雙臂機器人設計	13
2.1 雙臂機器人整體架構	13
2.2 雙臂機器人機構設計與實現	13
2.2.1 雙臂機器人整體自由度配置	14
2.2.2 雙臂機器人手臂機構設計與實現	14
2.2.2.1 θ_1 自由度之機構設計	15
2.2.2.2 θ_2 自由度之機構設計	16

2.2.2.3 θ_3 自由度之機構設計	17
2.2.2.4 θ_4 自由度之機構設計	18
2.2.2.5 θ_5 自由度之機構設計	19
2.2.2.6 θ_6 自由度之機構設計	19
2.2.2.7 手爪之機構設計	20
2.3 雙臂機器人之硬體設計與實現	21
2.3.1 運算系統之實現	22
2.3.2 力感測系統之使用	22
2.3.3 馬達控制系統之設計與實現	23
2.4 雙臂機器人之軟體設計與實現	26
第三章. 機械手臂之運動學分析	27
3.1 連桿參數與座標	27
3.2 順向運動學	29
3.3 四自由度機械手臂之逆向運動學分析	31
3.4 順向與逆向運動學總結及討論	36
第四章. 機械手臂順應性運動控制	37
4.1 機械手臂順應性運動控制架構	37
4.2 力感測器單位校正	38
4.3 力感測器座標旋轉	40
4.4 力感測器座標實驗	41
4.5 自由質量模型	43
4.6 參數設定之影響	44
第五章. 安全行為策略設計	46

5.1 安全運動與重新移動策略.....	46
5.2 繞路點產生方法	48
5.3 安全設計之討論	50
第六章. 實驗結果	51
6.1 機械手臂順應外力之實驗設置.....	51
6.1.1 機械手臂順應外力之實驗結果.....	51
6.2 機械手臂運行遭遇障礙物而重新移動實驗設置.....	54
6.2.1 機械手臂運行遭遇障礙物而重新移動實驗結果.....	54
6.3 機械手臂安全性評估實驗設置.....	61
6.3.1 機械手臂安全性評估實驗結果.....	61
6.4 實驗討論.....	63
第七章. 結論與未來展望	65
參考文獻	67



圖目錄

圖 1.1 Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm	2
圖 1.2 薄型光學力矩感測器	2
圖 1.3 joint impedance control model	3
圖 1.4 Personal Robot PR-2 Prototype	3
圖 1.5 PR-2 的重力補償結構示意圖	4
圖 1.6 DLR LWR	4
圖 1.7 DLR LWR 的軸關節整合結構	4
圖 1.8 流程圖與實際軌跡示意圖	5
圖 1.9 (a)一種由纜線構成的 SLM 的結構圖(b)此 SLM 結構受力時的動作圖	6
圖 1.10 此 SLM 結構的實際圖	7
圖 1.11 (a)一種 SJM 的結構圖(b)此 SJM 結構受力時的動作圖	7
圖 1.12 此 SJM 結構的 prototype	7
圖 1.13 此 SJM 結構實際安裝情形	7
圖 1.14 此 VSA 結構實際圖	8
圖 1.15 VSA 結構改變硬度時的動作圖	8
圖 1.16 混合運動控制控制架構圖	10
圖 1.17 阻抗控制控制架構圖	11
圖 1.18 系統架構圖	14
圖 2.1 單邊機械手臂自由度示意圖	15
圖 2.2 θ_1 機構之配置圖	16
圖 2.3 θ_1 機構之組立圖	16
圖 2.4 θ_2 機構之配置圖	17
圖 2.5 θ_2 機構之組立圖	17
圖 2.6 θ_3 機構之配置圖	18
圖 2.7 θ_3 機構之組立圖	18
圖 2.8 θ_4 機構之配置圖	19
圖 2.9 θ_4 機構之組立圖	19
圖 2.10 θ_5 機構之配置組立圖	20
圖 2.11 θ_6 機構之配置組立圖	21
圖 2.12 手爪機構之配置組立圖與使用情境	21
圖 2.13 雙臂機器人 3D 組合圖	22
圖 2.14 控制系統硬體架構圖	22
圖 2.15 工業電腦 FB2602A	23
圖 2.16 JR3 力感測器-67M25	24
圖 2.17 資料擷取卡	24
圖 2.18 EPOS 24/1	26

圖 2.19 EPOS 24/5	26
圖 2.20 NI CAN-bus	27
圖 2.21 並聯控制器之電路分接板	27
圖 3.1 連桿參數及座標系變換	28
圖 3.2 關節和關節之間的座標關係	28
圖 3.3 機械手本體與 D-H 座標系	30
圖 3.4 手臂座標系與冗餘圈示意圖	31
圖 3.5 由手臂構成的三角形	32
圖 3.6 手臂三角形裡各向量	33
圖 3.7 α 向量與各向量關係	33
圖 3.8 β 向量與各向量關係	34
圖 3.9 α 向量與 β 向量型成 γ 向量	34
圖 4.1 機械手臂順應性運動控制架構圖	38
圖 4.2 力感測器-X 軸的校正曲線	39
圖 4.3 力感測器+Y 軸的校正曲線	39
圖 4.4 力感測器-Z 軸的校正曲線	40
圖 4.5 機械手臂座標系與力感測器座標系	40
圖 4.6 機械手臂姿態受力示意圖	41
圖 4.7 力感測器安裝在手臂上的姿態	42
圖 4.8 力感測器正常的姿態	42
圖 4.9 各力向量於機械手臂座標系	42
圖 4.10 手腕點模擬成自由質量示意圖	43
圖 4.11 M 對速度的影響模擬	45
圖 4.12 B 對速度的影響模擬	45
圖 5.1 機械手臂行為分類	47
圖 5.2 安全移動流程圖	48
圖 5.3 繞路點產生說明圖	49
圖 5.4 碰撞反作用力對小質量模型施力	49
圖 6.1 機械手臂與力感測器配置	52
圖 6.2 機械手臂順應外力過程	52
圖 6.3 機械手臂的手腕點軌跡	53
圖 6.4 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖	53
圖 6.5 力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖	54
圖 6.6 從(0, 0, -522)到(400, -100-100)移動過程	55
圖 6.7 無障礙物時從(0, 0, -522)到(400, -100-100)的移動軌跡	55
圖 6.8 有障礙物時從(0, 0, -522)到(400, -100-100)的移動軌跡	56
圖 6.9 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖	56
圖 6.10 力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖	57

圖 6.11	從(300, 100, -350)到(300, -200, -350)移動過程	58
圖 6.12	無障礙物時從(300, 100, -350)到(300, -200, -350)的移動軌跡	58
圖 6.13	有障礙物時從(300, 100, -350)到(300, -200, -350)的移動軌跡	58
圖 6.14	手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖	59
圖 6.15	力感測器 XYZ 軸資訊對時間作圖	59
圖 6.16	從(300, -200, -300)到(300, 100, -300)移動過程	60
圖 6.17	無障礙物時從(300, -200, -300)到(300, 100, -300)的移動軌跡	60
圖 6.18	有障礙物時從(300, -200, -300)到(300, 100, -300)的移動軌跡	61
圖 6.19	手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖	61
圖 6.20	力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖	62
圖 6.21	機械手臂安全性評估實驗過程	63
圖 6.22	手腕點移動軌跡	63
圖 6.23	手腕點速度 0.17m/s 記錄的外力	64
圖 6.24	手腕點速度 0.24m/s 記錄的外力	64



表目錄

表 2.1 馬達規格與機構活動之效能表·····	24
表 2.2 馬達控制器規格表·····	25
表 3.1 右機械臂每軸的 D-H 參數表·····	29
表 4.1 座標旋轉誤差表·····	51



第一章 緒論

1.1 研究動機

在現今的世界，機器人慢慢地被應用在各個領域跟不同的環境裡。相較於當今之機器手臂或是自動搬運車只會在工廠裡出現，未來機器人將會慢慢的出現在人們的日常生活中，與人類的互動也會變得越來越頻繁。因此，如何讓機器人在一個有人的環境中安全的完成工作將是項非常重要的議題。

考慮到機器人的安全性設計的話，有關力方面的控制是一個比較會直接想到的議題。機器人要知道何時該出力大，何時該出力小，如何才能安全的與人類互動，或是不傷害到環境周圍的人、物品或自己，並且有效的協助人類完成工作。由於人類的世界各事各物被構築成適合人類型體的樣子，所以在機器人的結構方面，也需要符合人類手臂結構。一來，仿人化的機械手臂也比較能夠在人類環境有效的完成協助人類的工作。二來，對於人類來說比較容易接受並且習慣機器手臂的工作空間，才能達到與機器人一起工作，或是讓機器人在人類環境中工作。

此研究的目的是在於實現一個仿人的機械手臂，能夠安全的與人在環境中互動來達成工作。藉由得知外界的力資訊，在不傷害到人或環境或機器人自己本身的程度下即時快速地做出反應。

1.2 機器人之安全設計

由 Tsetserukou 等人打造了一隻機械手臂[1] (如圖 1.1) 在手腕關節之前擁有四個自由度，而且在每個關節上有他們自己設計的超薄型光學力矩感測器(如圖 1.2)，而且選用了諧和式減速機(Harmonic Drive)，來達到對減輕重量、高準確性以及高扭力的要求。每一軸都是由馬達、Harmonic Drive 減速機跟光學力矩感測器組合而成，因此可以得到每軸的總力矩，再計算馬達出力後，就可以知道發生在每軸上面的外力矩。



圖 1.1 Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm[1]

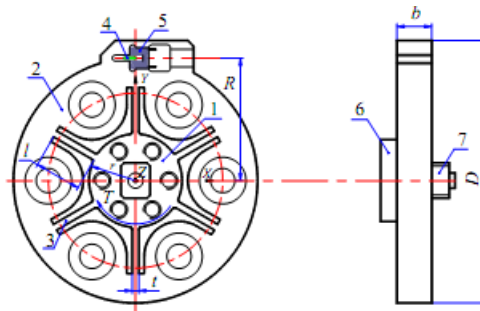
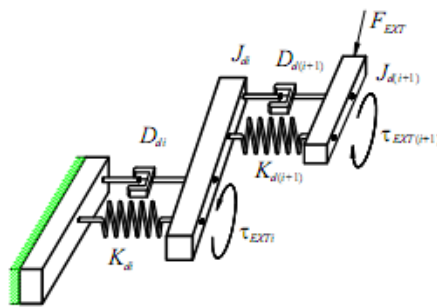


圖 1.2 薄型光學力矩感測器[1]

他們的控制方法是使用可變性的 joint-base 的阻抗控制(如圖 1.3)，以每一軸當作一個彈簧與阻尼的組合，而外力就可經由每軸的力矩感測器得知。他們的機械臂分成兩種操作模式，一種為工作模式，此模式需要較高的準確性，所以也需要較高的剛性。另一種為碰撞模式，碰撞時為了不要造成環境人員或機器人本身的傷害，所以需要較低的剛性，以達到比較柔軟的反應。而要達到此功能，可以藉由調整阻抗控制律裡面 J、D、K 係數，來達到這樣的反應。並且有對因為阻抗控制所造成的震盪做震盪阻尼控制[2]，對系統加上一個相位領先補償器來達到目標。



$$J_{di} \Delta \ddot{\theta}_i + D_{di} \Delta \dot{\theta}_i + K_{di} \Delta \theta_i = \tau_{EXTi}$$

圖 1.3 joint impedance control model[2]

Wyrobek 等人發表的文獻[3](如圖 1.4)提到對於家用機器人來說，最嚴苛的考驗就是對於人類的安全考量的問題，因此他們提出了一種機械結構上一個新設計來解決此問題。在減少背隙方面，他們使用的是皮帶帶動皮帶輪的方式來取代傳統的齒輪傳動。再來是因為需要達到輕量化，所以馬達方面也使用規格較小的馬達，如此一來能夠承受的負載一定會不會太大，因此，他們特別設計了一種重力補償機構，讓馬達不需要承受連結馬達的連桿的重力影響，而且這重力補償機構同時也可以即時的吸收外力，達到類似順應性的效果。這重力補償機構就是由彈簧構成(如圖 1.5)，而且也可以讓機械手臂在受到碰撞時可以非常即時的反應，看起來就像一隻很柔軟的手臂。



圖 1.4 Personal Robot PR-2 Prototype[3]

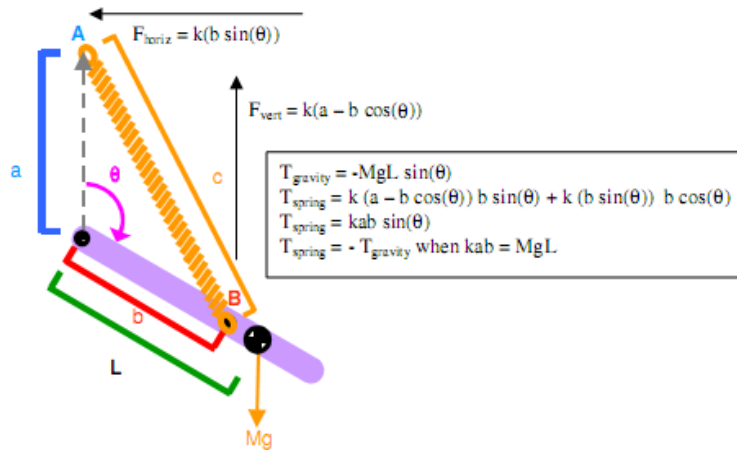


圖 1.5 PR-2 的重力補償結構示意圖[3]

由 Institute of Robotics and Mechatronics 跟 German Aerospace Center (DLR) 共同研發的 DLR LWR(lightweight robot) [4] 是一個高度整合且控制方面完整性高的機械手臂(如圖 1.6)。如圖 1.7 所示，他們將自行研發的馬達、驅動器、電源供應器、諧和式減速機跟力矩感測器全部整合在一個軸關節上，機械手臂的外殼(也是連桿結構)是使用碳纖維來降低重量。為了增加準確性，他們除了在馬達上裝有位置感測器(即一般馬達的編碼器的功用)，也有裝配連桿位置感測器，來針對輸出軸的端點的位置做更準確的定位。



圖 1.6 DLR LWR[4]

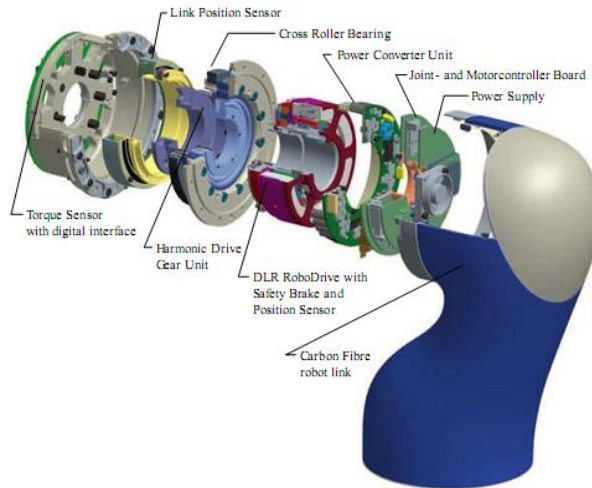


圖 1.7 DLR LWR 的軸關節整合結構[4]

在碰撞偵測方面[5]，DLR 機械手臂使用能量來偵測碰撞的發生。使用能量守恆的觀念，當有外力對手臂發生碰撞時，就是有外來能量加諸在手臂上，以總能量增加的量來計算出一個碰撞偵測訊號。此外，DLR 系統還有一個碰撞鑑定的演算法，可以辨認出卡氏座標下力量的方向或是碰撞發生在哪一關節，以利於後面碰撞後反應的部分。碰撞策略方面，他們對於一個機械手臂在工作時面對的所有情況提出了五種策略(Strategy)，經由組合後可以達成有安全考量在裡面的反應行為。其所提出之五種策略簡介如下：

Strategy 0：為最一般的操作模式，機器手臂沒有反應在裡面，完全跟隨路徑規畫好的路徑行進。

Strategy 1：一旦偵測到碰撞，機器手臂就會馬上停止。

Strategy 2：將控制模式從位置控制切換到零重力力矩控制，讓機器手臂可以有非常順應式的行為。

Strategy 3：切換到有重力補償的力矩控制，可是跟 strategy2 不一樣的是，這裡使用關節力矩回授，並且把馬達跟 link 的慣量經由一個 scale 比例縮小，因此可以得到感覺行為、行動上好像更輕的機械手臂。

Strategy 4：使用估測到的外力來實現導納控制器。

結合軌跡規畫、碰撞偵測跟反應策略後，運作的流程圖如圖 1.8 所示。機械

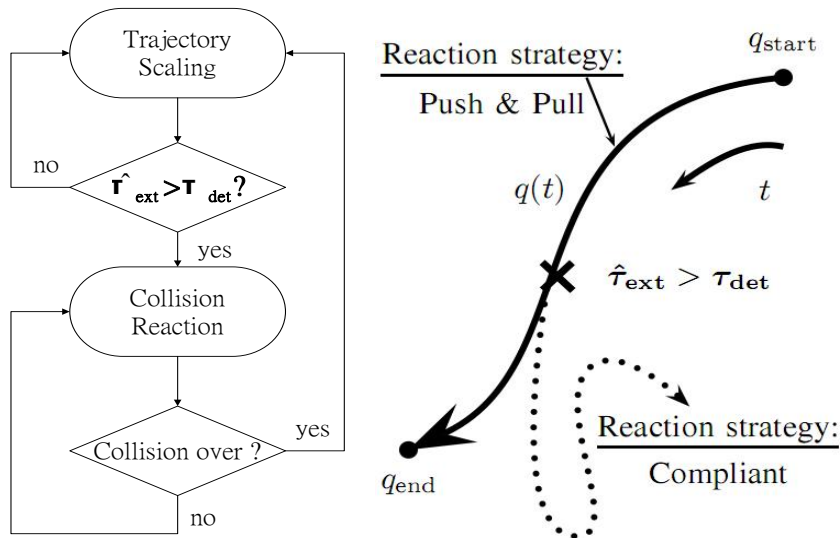


圖 1.8 流程圖與實際軌跡示意圖[5]

手臂經由預先設定好的軌跡行進，如果力矩感測器偵測外力造成的高扭力的發生(扭力大於一個臨界值)的話，此時就會從 Strategy0~4 選一種來進行反應(圖中是選 Strategy2 來反應)，以此達到順應的目的。



1.3 順應性運動控制之研究背景

在追求高效率的時代，機械手臂被運用在工廠搬運與組裝日漸普遍。機械手臂在執行任務的時候單純進行位置控制，將零件放在固定的物件上。由於沒有力量方面的控制法則，因此如果沒有良好的位置規畫時，有可能導致硬體的損傷。所以在位置控制裡面加入力量控制的想法就因此產生。

所謂順應性(compliance)是描述機械手臂與環境有碰觸時，對接觸時所反應出來的力或力矩所追行之運動特性。順應性運動(compliance motion)則是指相互作用期間機械手臂終端效果器之軌跡受接觸力作用而產生變動之運動過程。因此，順應性運動是順應性之具體表現。所謂順應性控制(compliance control)，就是當機械手臂接觸環境面時，讓機械手臂隨著與環境的接觸力量及運動情形對環境產生適當之順應能力，除了控制接觸力外，還須兼顧機械手臂之位置控制，其中順應性運動控制分為被動式與主動式兩大類。

1.3.1 被動式順應性運動控制

安全連結機構(Safe Link Mechanism, SLM)(如圖 1.9)跟安全關節結構(Safe Joint Mechanism, SJM)(如圖 1.10)[6-8]，是基於安全性設計的被動結構，其中包含了線性彈簧、滑動機構、傳動軸等等組成。利用彈簧的彈性吸收外來突然發生的外力，可以有效即時的對外力產生反應。但是這種機構上的彈簧設計也會使得整隻機械手臂成為一彈性系統，在控制方面不但不好控制，負重方面也會有所受限，而準確性也會隨著負重而不穩定。

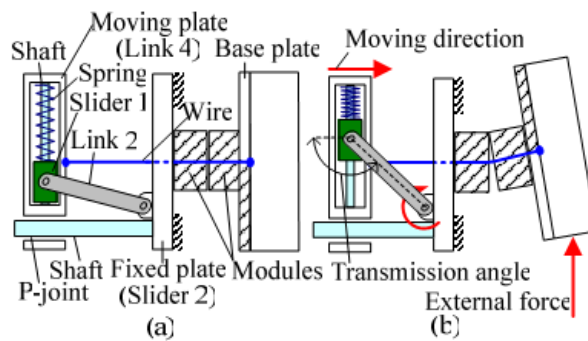


圖 1.9 (a)一種由纜線構成的 SLM 的結構圖(b)此 SLM 結構受力時的動作圖[7]

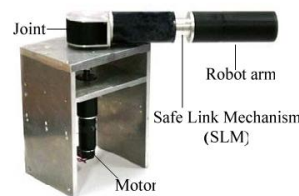


圖 1.10 此 SLM 結構的實際圖[7]

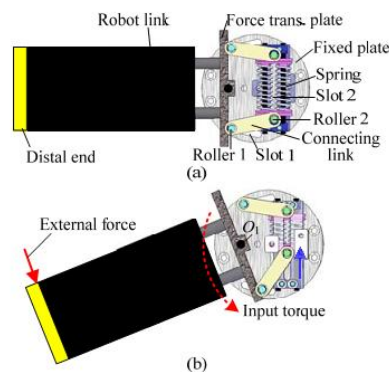


圖 1.11 (a)一種 SJM 的結構圖(b)此 SJM 結構受力時的動作圖[8]

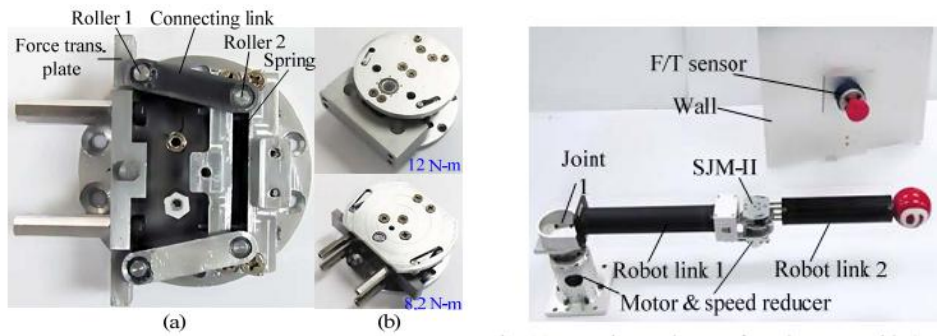


圖 1.12 此 SJM 結構的 prototype [8] 圖 1.13 此 SJM 結構實際安裝情形[8]

可變剛性致動器(Variable Stiffness Actuators,VSA)[9-11]利用了可變硬度傳輸結構來改變機械結構的硬度，通常需要用額外的致動器來改變機械結構(例如葉彈簧的應力角度如圖 1.15)以達到硬度的改變，可以因應不同的工作內容來改變硬度。例如:需要高準確性的工作時，硬度就可以因應這樣的工作內容而調高。但是該種可變硬度致動器需要用到除了自由度以外的致動器，而且該何時改變多少的剛性也很難被定義出來。

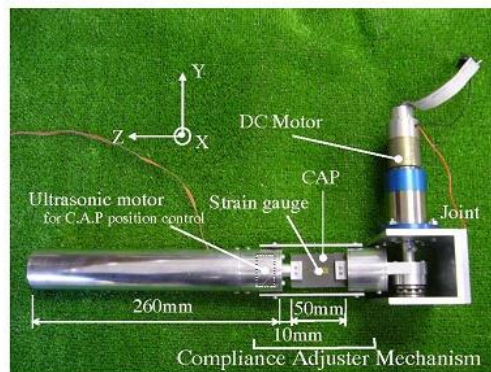


圖 1.14 此 VSA 結構實際圖[10]

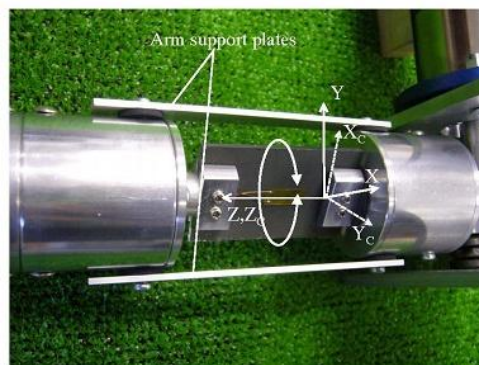


圖 1.15 VSA 結構改變硬度時的動作圖[10]

上述幾種被動式順應通常是由機械式的結構組成，主要是改善硬體的架構來改變接觸力，如夾爪機構、接觸機構等。使用被動式的設計的話，雖然可以有很快速的反應，但是會造成外力被彈性結構吸收，而無法知道實際上到底有沒有外力發生，如果有外力發生也無法知道外力大小有多少，無法達到後續應對外力產生反應的工作目的，較不符合我們的需求。

1.3.2 主動式順應性運動控制

主動式順應主要利用軟體的控制器來使硬體具有順應性的功能，這樣的方法比之前被動式控制的方法要更具強健性。力量回授雖然可以獲得良好的控制效果，但是對於一個多自由度的機械手臂系統，系統的動態方程式裡的許多參數都無法被實際測量，因此欠缺對位置與速度的直接控制，實際上會造成系統位置與速度的響應不如預期。為了同時對系統進行位置與力量控制，近年來有許多學者在順應性控制方面進行了許多研究，大致可分為混合式位置/力量控制(Hybrid motion control)以及阻抗控制(Impedance control)這兩種方法。

1.3.2.1 混合運動控制(Hybrid motion control)

混合運動控制的主要概念是將力與位置控制分開(如圖 1.16 所示)，當機械手臂與拘束面接觸並沿著拘束面移動時，使機械手臂末端在非侷限自由度方向下實行位置控制，在侷限自由度方向實行力量控制，最後算出每個關節扭矩來控制整個機械手臂。首先在 1976 年由 Paul 與 Shimano[12]將機器人運動控制分成位置控制部分與力量控制部分，分別屬於各自的控制迴路裡。1981 年 Mason[13]將合力/位置控制之觀念做了比較完整的描述。Raibert 與 Craig[14]使用 PID 控制法則來設計力量與位置控制器，在經由選擇矩陣來決定機械手臂之終端效果器的工作方向，作為判斷哪個方向為位置控制，哪個方向為力量控制，最後以電腦模擬以及實驗來驗證其可行性。此類控制法需要事先明確的知道侷限自由度的方向與

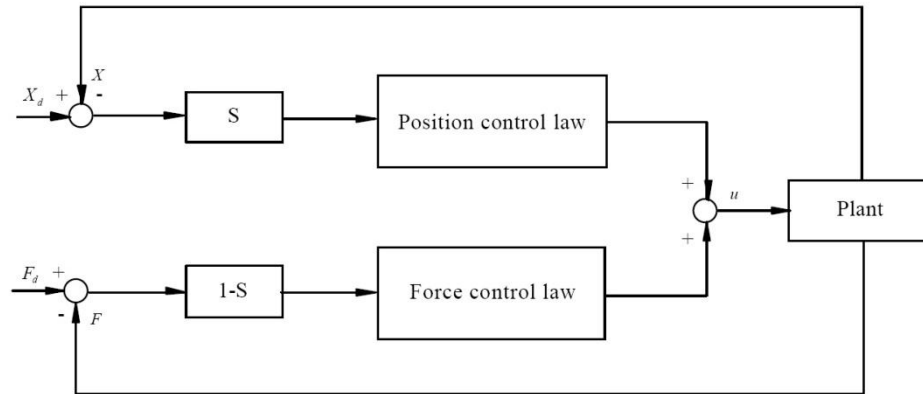


圖 1.16 混合運動控制控制架構圖

非侷限自由度的方向，如果今天是面對一個複雜的幾何形狀，將會大大增加此控制法的困難度。

1.3.2.2 阻抗控制(Impedance control)

阻抗控制(Impedance control)[15]的概念是由 Hogan 在 1985 年提出的觀念與控制方法，其主要構想認為力與位置在物理系統之任一自由度方向上無法被同時決定，所以提出調整機械阻抗的方式達到順應運動，也就是期望的質量、阻尼以及剛性的組合(如圖 1.17 所示)，使機械手臂對於環境能有適當的順應性，稱之為目標阻抗的設計。Kazerooni[16]以頻率的觀點來討論阻抗控制，並且設計了一種強健性阻抗控制器，用於排除模型之不確定性。Anderson 與 Spong[17]提出混合阻抗控制來處理接觸力的部分。Goldenberg[18]以回授與前授補償來消除環境的不確定項。Slotine 與 Li[19]延伸適應自由空間運動控制到適應受限運動控制。Lu 和 Meng[20]將 Slotine 與 Li 的適應控制法則，進一步應用在 Hogan 的阻抗控制上，加入目標阻抗參考軌跡(target-impedance reference trajectory, TIRT)以處理力量感測器的不精確問題以及系統參數的不確定性。

混合式位置/力量控制法需要事先明確的知道侷限自由度的方向與非侷限自由度的方向，如果今天是面對一個複雜的環境，將會大大增加此控制法的困難度。阻抗控制中，須要先推導出機械手臂的動態方程式，才能有效的控制機械手臂。由於動態方程式中的慣性項、離心力、科氏力項…等需要用估測的方式獲得，增

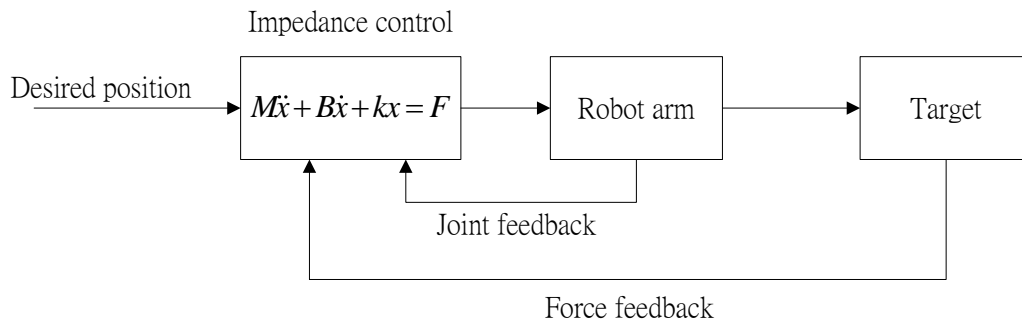


圖 1.17 阻抗控制控制架構圖

加控制實現上的許多困難。

1.4 系統架構

本系統的使用環境，預設為一有人類存在機器人活動工作區域的環境場所。因此在機械手臂的工作過程中，必須隨時面對可能發生人員闖入工作區域內，以及任何可能發生的碰撞，也就是外力的發生。為了安全上的考量，所以面臨到的問題的第一個問題是如何即時的知道目前發生了外力的發生，第二個問題是如何讓碰撞程度可以不傷害環境或人類以及機器人本身，第三個問題是在外力發生後機器人如何經由一些反應策略來反應進而繼續完成工作。未來經由克服這三個問題來達到機械手臂在居家生活環境工作上面的安全要求。

在本論文裡，我們將機械手臂的行為分為兩類，第一類情況為靜止狀態，就是機械手臂正在待命的任何情況。第二類情況為運動狀態，包括機械手臂在移動的所有情況，無論是正在移動物體，或是正在前進到物體的路途中。

靜止狀態裡面我們設計一順應性運動控制於機械手臂上，讓機械手臂能夠跟人類手臂一樣，是可以感受到外力並且隨著外力運動，以提高機械手臂在一般人類活動環境中的安全性。

以人類來說，當我們伸手去拿東西時，若遭遇障礙物，在視覺還來不及看到的時候，本能的會對障礙物進行繞路的動作，因此本設計的概念也由此產生。運動狀態裡，設計了一個重新計算路線機制，使機械手臂在空間中移動時，萬一接觸到障礙物時，會根據接觸力的大小以及方向計算出一個繞路點，使機械手臂退

後到繞路點後，再次往目標點前進，以嘗試著繞過障礙物。如圖 1.18 所示，如果機械手臂跟環境產生碰撞，經由力感測器得知外力的發生，遊安全行為策略決定機械手臂反應後，由逆向運動學將卡式空間的命令轉換成軸空間的命令，下達給機械手臂執行。

1.5 章節說明

本論文一共分為七章，第一章介紹研究動機與目的，並且概略說明所設計之系統架構。第二章說明雙臂機器人實驗平台的設計與組建。第三章則為具冗餘自由度的機械手臂之運動學分析。第四章為機械手臂順應性運動控制方法。第五章為機械手臂的安全行為策略設計。第六章為實驗結果，驗證整體設計上之可行性。第七章為結論與未來展望。

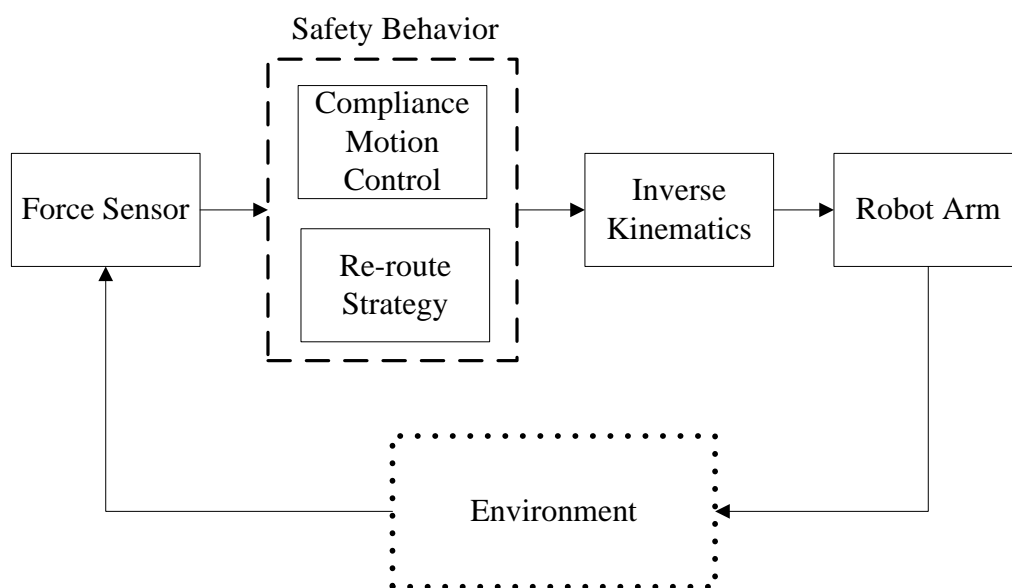


圖 1.18 系統架構圖

第二章 雙臂機器人設計與實現

本論文之主要目標為實現一具能夠安全執行任務並且自由度接近於人類之雙臂機器人，並且設計一運動控制演算法使其可以在執行任務的時候即使發生了碰撞，也可以安全的反應以及產生後續動作。關於本論文中雙臂機器人的整體架構之設計與軟體、硬體、機構之實現都將在本章節中說明，其內容包含：

1. 本論文所提出之整體系統架構，包含系統訊號流程。
2. 實現設計所需之硬體設備及機構，包括感測器與機構設計概念等。

2.1 雙臂機器人之整體架構

本系統主要目的為接收由程式端使用者輸入之空間位置命令，以逆運動學即時算出機械手臂每一軸的角度，並且使用安裝在手腕部位的六軸力感測器回授外力資訊，使機械手臂能夠在靜止的狀態下，如果發生了與環境的碰撞，可以根據外力資訊順應外力運動；而當機械手臂在運動的過程中，如果發生了與環境的碰撞，根據外力資訊產生新的軌跡試圖繞過行進過程中的障礙物。使雙臂機器人在執行工作時對普通環境有更安全的考量。

2.2 雙臂機器人之機構設計

本論文自行設計開發一具雙臂機器人機構，在機器人機構材料方面選用鋁合金，主要優點在於鋁合金質輕且強度高，相當廣泛的使用於航太科技或是汽車上。另外，以及在轉軸的部分使用鋼製作。在機器人構成整體結構的部件上，則是大量使用了螺絲的以及 L 型的支撐設計方式，可以在不增加組裝的情況複雜度下，強化部件的結構強度。對於雙臂機器人來說，擁有足夠的自由度能夠讓機械手臂能夠以各種姿態來執行各種任務是其重要之能力，因此整個手部機構的設計就顯得相當重要。所以在設計之前必須先決定手臂關節自由度的數量。若自由度數量不足，則動作將較不靈活，行動也會受到較多的限制，但是若自由度過多，則

會增加控制上的複雜度與運算量以及機構設計上的困難，因此必須取得設計上的平衡點。雙臂機器人身體的部分主要是用來放置馬達控制器，因此必須考量所以需要裝進去的配備來進行設計，並且分配其安裝空間。另外，由於雙臂機器人在運動中整隻機械手臂的姿態是處於不斷變化的狀態，在馬達配線部分也必須注意要留有足夠了拉伸容忍度以及避免被機構夾到，否則線路及機構都容易受損。

2.2.1 雙臂機器人整體自由度配置

在本論文之雙臂機器人，其設計重點主要在於使其動作靈活度與動作模式可以類似於人類，並且為了使機構的設計上得以簡化與動作控制的複雜度得以降低，我們必須選擇使用最少但符合靈活度要求的自由度，來進行雙臂機器人的設計。所需之動作靈活性如圖 2.1。

2.2.2 雙臂機器人手臂機構設計

本論文中雙臂機器人主要包含三個部分，分別是肩部、肘部和腕部與手爪。

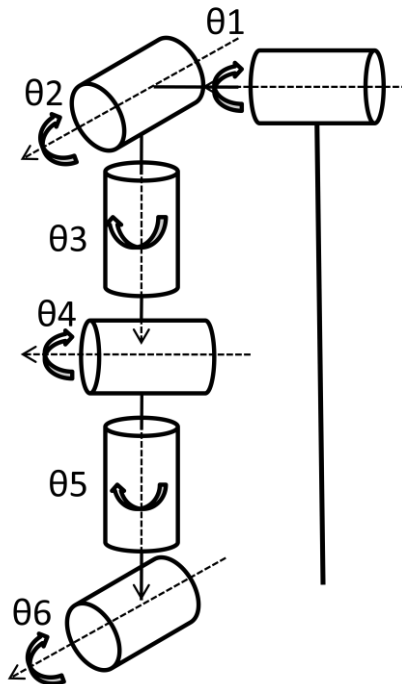


圖 2.1 單邊機械手臂自由度示意圖

2.2.2.1 θ_1 自由度之機構設計

θ_1 自由度，本軸的減速模組包含了兩次減速裝置，第一次減速裝置裝設在馬達與諧和式減速機中間，使用的是減速比 1:4 的時規皮帶輪，第二次的減速裝置為減速比 1:120 的高扭力諧和式減速機，如圖 2.2 圖 2.3 為機構相關的配置圖與組立圖。

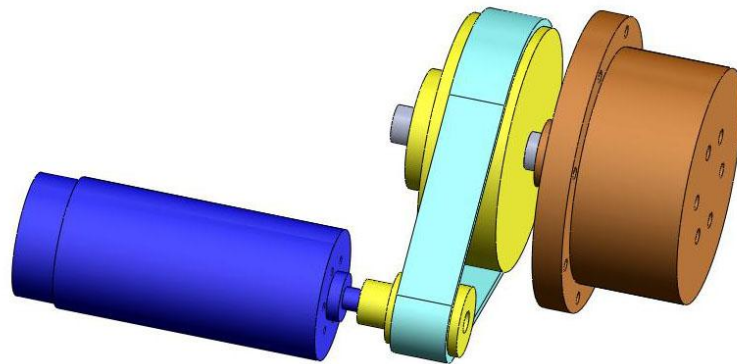


圖 2.2 θ_1 機構之配置圖

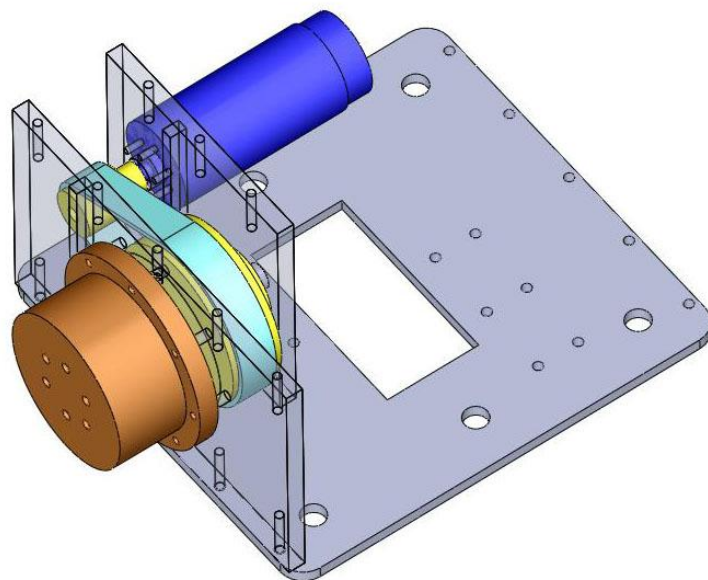


圖 2.3 θ_1 機構之組立圖

2.2.2.2 θ_2 自由度之機構設計

θ_2 自由度，跟 θ_1 自由度之設計一樣，包含了兩次減速裝置，第一次減速裝置裝設在馬達與諧和式減速機中間，使用的是減速比 1:4 的時規皮帶輪，第二次的減速裝置為減速比 1:120 的高扭力諧和式減速機，如圖 2.4 圖 2.5 為機構相關的配置圖與組立圖。

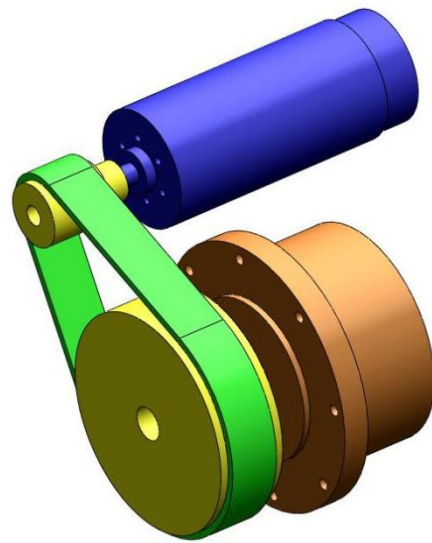


圖 2.4 θ_2 機構之配置圖

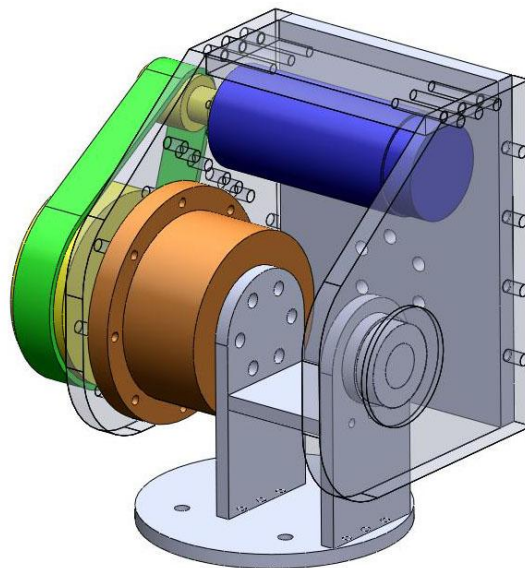


圖 2.5 θ_2 機構之組立圖

2.2.2.3 θ_3 自由度之機構設計

θ_3 自由度，由於配置上的考量，所以使用馬達直驅減速比 1:120 諧和式減速機，達到我們所需要的旋轉方式。並且在容易受力型變的柱子結構上，使用 L 型柱的設計，來加強結構的強度。如圖 2.6 圖 2.7 為機構相關的配置圖與組立圖。

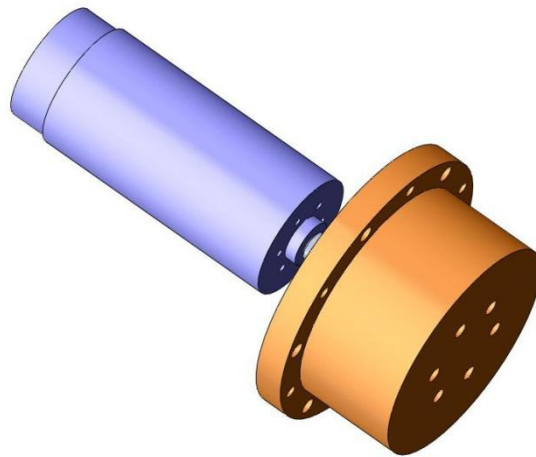


圖 2.6 θ_3 機構之配置圖

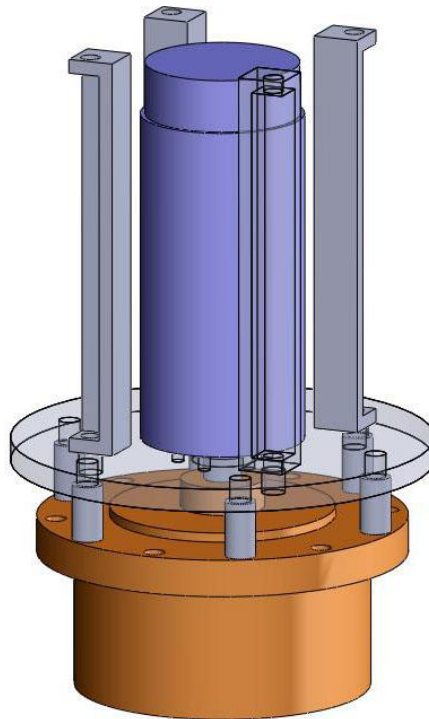


圖 2.7 θ_3 機構之組立圖

2.2.2.4 θ_4 自由度之機構設計

θ_4 自由度，跟 θ_1 和 θ_2 自由度之減速設計一樣，包含了兩次減速裝置，第一次減速裝置裝設在馬達與諧和式減速機中間，使用的是減速比 1:4 的時規皮帶輪，第二次的減速裝置為減速比 1:120 的高扭力諧和式減速機，如圖 2.8 圖 2.9 為機構相關的配置圖與組立圖。

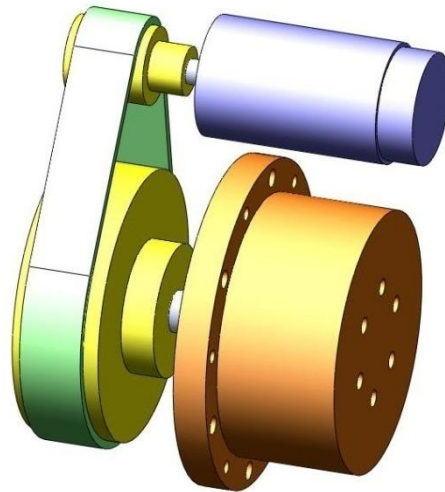


圖 2.8 θ_4 機構之配置圖

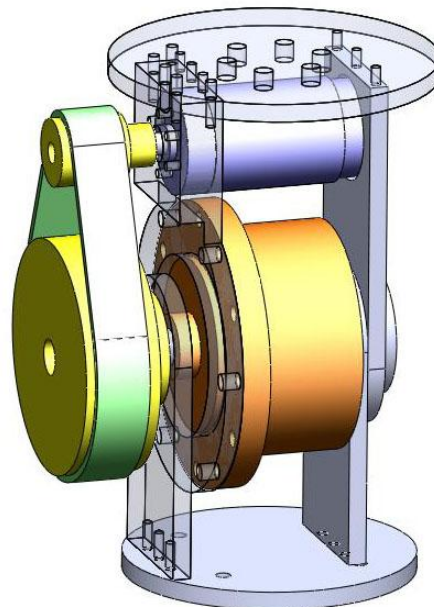


圖 2.9 θ_4 機構之組立圖

2.2.2.6 θ_5 自由度之機構設計

θ_5 自由度，考慮到在此處，背隙的影響較前面幾軸來說已經很小了，所以從此處開始，減速機構開始使用跟馬達為同樣廠牌的 maxon 行星式減速機，而直接與馬達接合，不需再多做處理，如圖 2.10 為機構相關的配置組立圖。

2.2.2.6 θ_6 自由度之機構設計

θ_6 自由度跟上述 θ_5 自由度一樣，減速機構方面使用跟馬達為同品牌的 maxon 行星式減速機，並在外部外加一組 1:1 正齒輪，讓轉動軸可以位移到馬達下方。在與上一軸的連結上，使用止付螺絲讓本自由度零件與上一軸的馬達軸結合。如圖 2.11 為機構相關的配置組立圖。

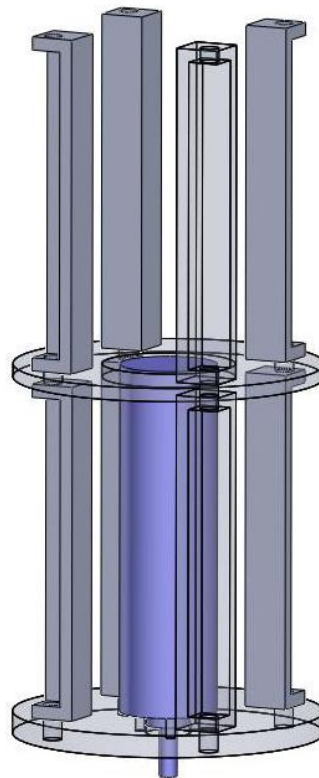


圖 2.10 θ_5 機構之配置組立圖

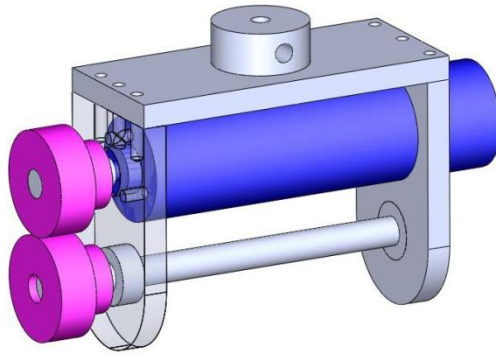


圖 2.11 θ_6 機構之配置組立圖

2.2.2.7 手爪之機構設計

手爪部分，為了達成人類最常使用的手掌與手指功能(例如:握筆、拿瓶子、拿杯子等等...), 在爪子尖端使用了凹槽設計，是為了從桌面上拿起筆，而手指中間的曲折，是為了抓起一般外型簡單物體，而從減速機直驅手指的設計，也是為了有強壯的握力，能夠達成功能。如圖 2.12 為機構相關的配置組立圖與使用情境圖。而全部手臂機構組裝後的組合如圖 2.13。

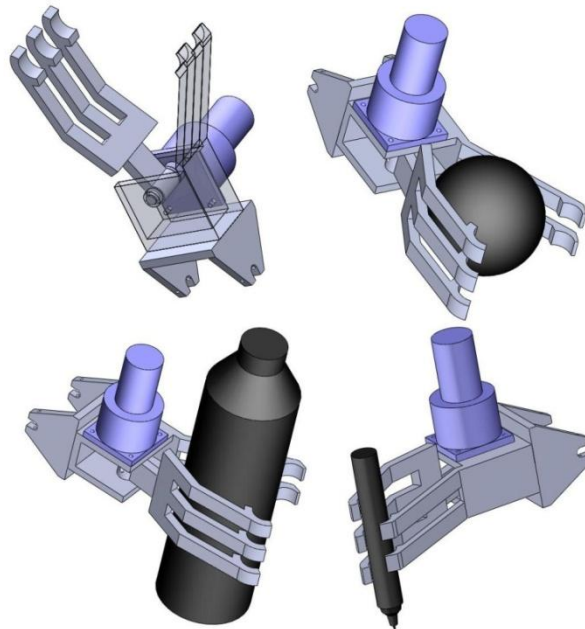


圖 2.12 手爪機構之配置組立圖與使用情境

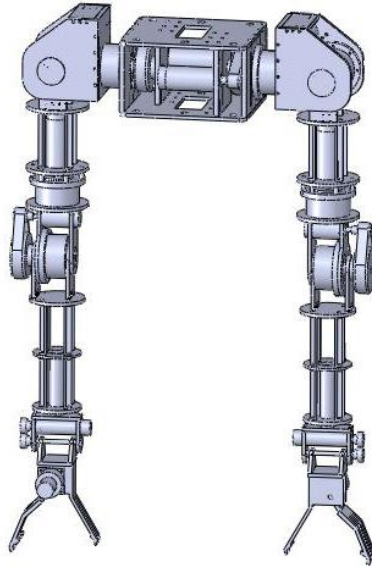


圖 2.13 雙臂機器人 3D 組合圖

2.3 雙臂機器人控制系統硬體架構

圖 2.14 為雙臂機器人控制系統硬體架構圖，在本論文中的雙臂機器人的設計中，在機器人肩膀以下的身體部位除了用來支撐起手臂的高度外，主要是用來放置 14 個直流伺服控制器和 CAN 匯流排介面的電路分接板以及 CAN 匯流排介面控制器。工業電腦與電池則不放置在機器人主體上。力感測器安裝在右臂的手腕部位，而力感測器的資料擷取卡則透過 ISA-bus 插在工業電腦上。

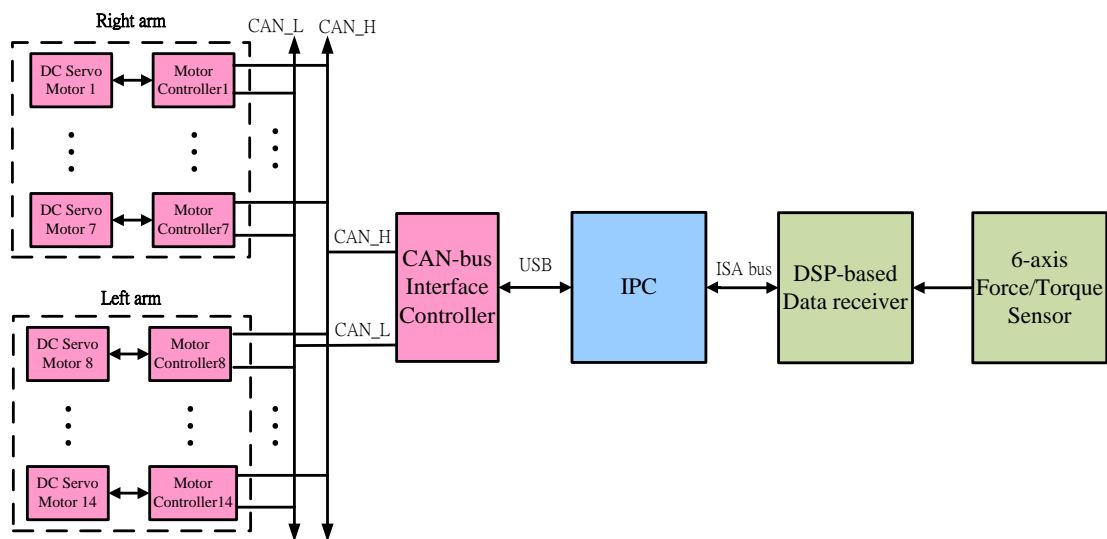


圖 2.14 控制系統硬體架構圖

2.3.1 運算系統之實現

本論文之雙臂機器人採用以 PC 為基礎的運算系統，為了配合力感測器的 A/D 轉換擷取卡(ISA bus 介面)，使用了函數科技的 ISA bus 介面的工業電腦 FB2602A，實體如圖 2.15 所示，選用 INTEL 公司時脈 1.4GHz 的中央處理器及 512MB 的記憶體。儲存媒體使用傳統 IDE 介面硬碟。

2.3.2 力感測系統之使用

在本論文中，使用了 Nitta 公司出的 JR3 力感測器系列中的 67M25(如圖 2.16)。67M25 是 JR3 的一款六軸力和力矩感測器。外型為圓柱型，其 67 毫米厚，直徑 25 毫米。其中包括電子訊號放大器，類比轉數位轉換器。該 67M25 感測器可每秒輸出 2 兆位的六軸資訊。而該 67M25 是從固體坯加工的鋁，由此產生的整體結構可提供了無與倫比的性能和精密度。該 67M25 使用金屬箔應變計作為傳感元件。該 67M25 可以連接各種不同的電子接收器。但 JR3 有配備了 DSP-based 的資料擷取卡(如圖 2.17)，可用於一些工業電腦的匯流排傳輸。此接收器能夠處



圖 2.15 工業電腦 FB2602A



圖 2.16 JR3 力感測器-67M25

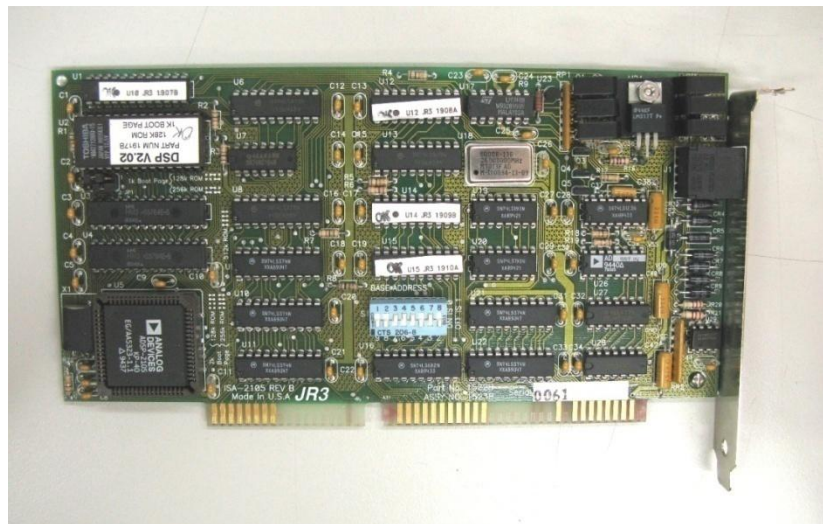


圖 2.17 資料擷取卡

理的力和力矩的全部數據並且有 8 kHz 的數據傳輸速率。並且可以提供去耦，坐標轉換，低通濾波，向量計算，極限值監測，採集峰值和速度計算。

2.3.3 馬達控制系統之設計與實現

在本論文中由於雙臂機器人採用的是直流伺服馬達，這樣同時也具備了定位的高精準度。在馬達的選用方面，主要是採用 MAXON 公司所生產的直流伺服馬達，包含了直流馬達、減速機和編碼器三部份。而目前的手臂設計則是將馬達區分成 4 種不同大小扭力的等級，分別為 RE-35、RE-max29、RE-max24 和 RE-max21，而各自由度的馬達規格以及減速比如表 2.3 所示，實體圖如圖 2.30。

吾人共使用 14 個馬達，每自由度使用 1 個馬達，6 個 RE-35，2 個 RE-max29，2 個 RE-max24，4 個 RE-max21，左右手臂各 6 個自由度(不包含手爪開合的自由度)。從肩膀負載比較大的地方，使用大扭力的馬達，到手肘使用中扭力的規格，手腕使用較小扭力的規格，以符合實際需要。而手爪部分使用了相較於手腕扭力規格大的配置，是希望可以有足夠的握力來應付實際上的各種需要。而各馬達規格與機構活動之效能如下表 2.1。在馬達控制器的部分，使用的是同樣由 MAXON 所生產的直流伺服馬達控制器 EPOS 24/1 與 EPOS 24/5，實體如圖 2.18 與圖 2.19，概略規格如表 2.2，可藉由排線直接讀取編碼器數值並控制馬達進行位置控制、速度控制和電流控制等數種控制，在本論文中，吾人所使用的控制方式為位置控制，其控制方式如同一閉迴路，在吾人下達一位置命令後，控制器會

表 2.1 馬達規格與機構活動之效能表

	DOF-1	DOF-2	DOF-3	DOF-4	DOF-5	DOF-6	DOF-7
描述	肩部旋轉	肩部彎曲	肘部旋轉	肘部彎曲	腕部旋轉	腕部彎曲	手爪開合
使用馬達	RE-35	RE-35	RE-35	RE-max29	RE-max21	RE-max21	RE-max24
額定電壓	1896 24V						
馬達原始連續轉矩 (mNm)	93.3			26.9	6.89		11.2
馬達原始連續轉速(rpm)	6910			7680	6670		7742
MAXON 減速機	無	無	無	無	1: 690	1: 690	1:900
皮帶輪組	1:4	1:4	無	1:4	無	無	無
諧和式減速機	1:120	1:120	1:120	1:120	無	無	無
總減速比	1:480	1:480	1:120	1:480	1: 690	1: 690	1:900
輸出連續轉矩(mNm)	44784	44784	11196	14208	4754	4754	10080
連續轉速 (rpm)	14.4	14.4	57.6	16	9.7	9.7	8.6
機構活動角度	-180°~ 180°	-30°~ 115°	-180°~ 180°	-105°~ 105°	-105°~ 105°	-110°~ 110°	

不斷讀取編碼器讀值並加以控制馬達誤差修正以達成所設定之命令，而修正之方式為 PID 控制，吾人可藉由調整 PID 各參數，使控制器的誤差修正效能有不一樣的表現。另外，在馬達控制器的數量上，由於一個控制器只能控制一個馬達，因此控制器的數量同樣也是 14 個。

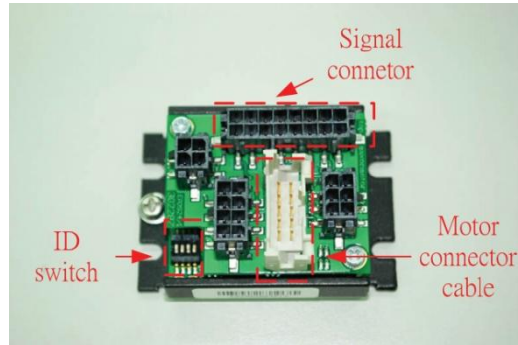


圖 2.18 EPOS 24/1

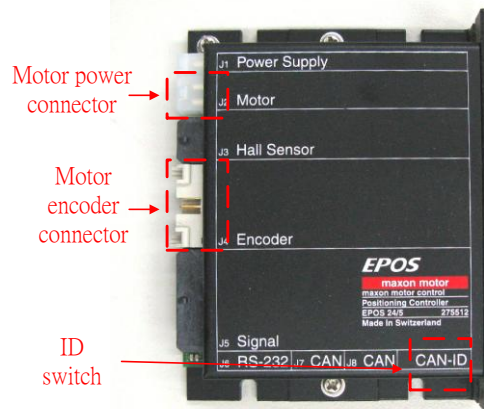


圖 2.19 EPOS 24/5

表 2.2 馬達控制器規格表

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

而在分配控制器命令的方面，是由 CAN 匯流排介面負責傳輸，因為與 RS232 傳輸介面相比，CAN 匯流排介面可以更輕易的連接多個節點與有著更高的傳輸速度。吾人在此所選用的是與 MAXON 馬達控制器相容的由 National Instrument(NI)所生產的 CAN 匯流排介面控制器，實體如圖 2.20，可藉由 USB 傳輸介面與電腦相連接，並將電腦端所發出的命令藉由 CAN-High 與 CAN-Low 兩條訊號線傳輸到各個控制器節點，如圖 2.21 為將馬達電源與 CAN 匯流排連接至各個並聯控制器之電路分接板。

2.4 雙臂機器人之軟體設計與實現

本論文之機械臂是在 PC 的視窗系統環境下進行控制程式與演算法的編寫，只要透過 ISA-bus 載入類比轉數位轉換器與直流伺服馬達控制器的驅動程式，依照原廠所提供的指令即可對硬體進行控制，整合性與方便性相當高，對於圖形化界面的編寫也相當容易。

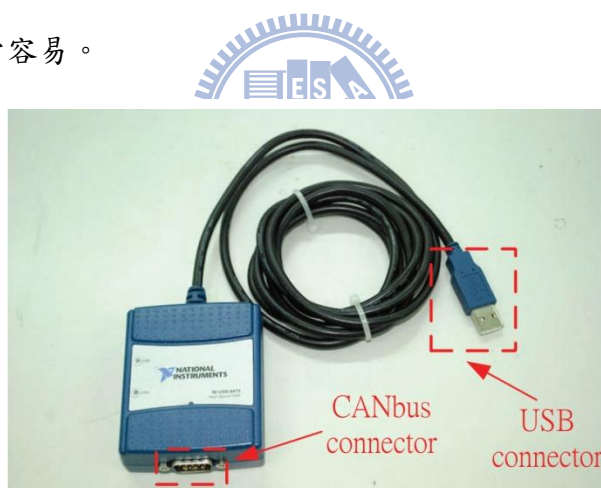


圖 2.20 NI CAN-bus

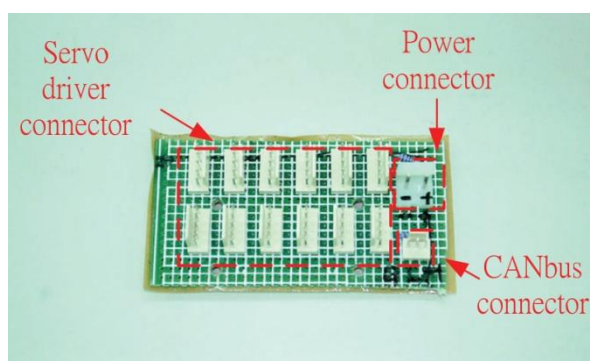


圖 2.21 並聯控制器之電路分接板

第三章 機械手臂之運動學分析

在機器人學中，分析的面向主要可分為運動學（Kinematics）以及動力學（Dynamics）兩部份。以一個多連桿系統為例，在運動學的分析中，主要是在計算各連桿之旋轉角度所產生在空間中的位移量。而其中可再分為順向運動學（Forward-Kinematics）和逆向運動學（Inverse-Kinematics）。本章節分幾部分說明，首先先針對座標系統與向量做介紹，再來根據 D-H 方法推導順向運動學，接著以幾何分析方法對一個具有冗餘自由度的機械手臂進行逆向運動學分析推導，使機械手臂能夠實際執行位置命令。

3.1 連桿參數與座標

在討論 D-H 變換矩陣之前，首先必須建立機器人的連桿座標系，並定義相關係數。這裡第 i 軸(或座標系 $\{i\}$)為連桿 $i-1$ 與連桿 i 的连接處。而我們採用之手臂軸系及係數是根據 R.P.Paul 所著 <Robot Manipulator>[24]一書內之定義，綜合如下：

1. 連桿 i ：介於軸系 $\{i+1\}$ 及軸系 $\{i\}$ 間的連桿。
2. Z_i 軸：該軸方向的選取是沿著軸系 $\{i\}$ 的線性移動或旋轉軸。
3. X_i 軸：該軸方向的選取沿著軸系 $\{i+1\}$ 及軸系 $\{i\}$ 的共有正交線。
4. Y_i 軸：該軸方向的選取要使 X_i 、 Y_i 及 Z_i 軸成右手座標系法則。
5. a_i ：連桿的長度。即沿著 X 軸方向與 Z_i 軸 Z_{i-1} 軸共有正交線的長度。
6. α_i ：連桿的扭轉角。 Z_i 軸相對於 Z_{i-1} 軸的角度。
7. d_i ：連桿間的距離。即在 Z_i 軸上兩個共有正交線間距離。
8. θ_i ：連桿間的角度。可視為旋轉軸的轉角。

假設關節 0 與關節 1 的座標關係如圖 3.2 所示，其中關節與關節之間的座標關係如下：首先對 x_0 軸旋轉 α 角，之後再沿著 x 軸方向平移距離 a ，在沿著 z 軸方向平移距離 d ，最後在對 z_1 軸旋轉 θ 角。其齊次變換公式為

$$A_i = Rot(Z, \theta) \cdot Tran(Z, d) \cdot Tran(X, a) \cdot Rot(X, \alpha) \quad (3.1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

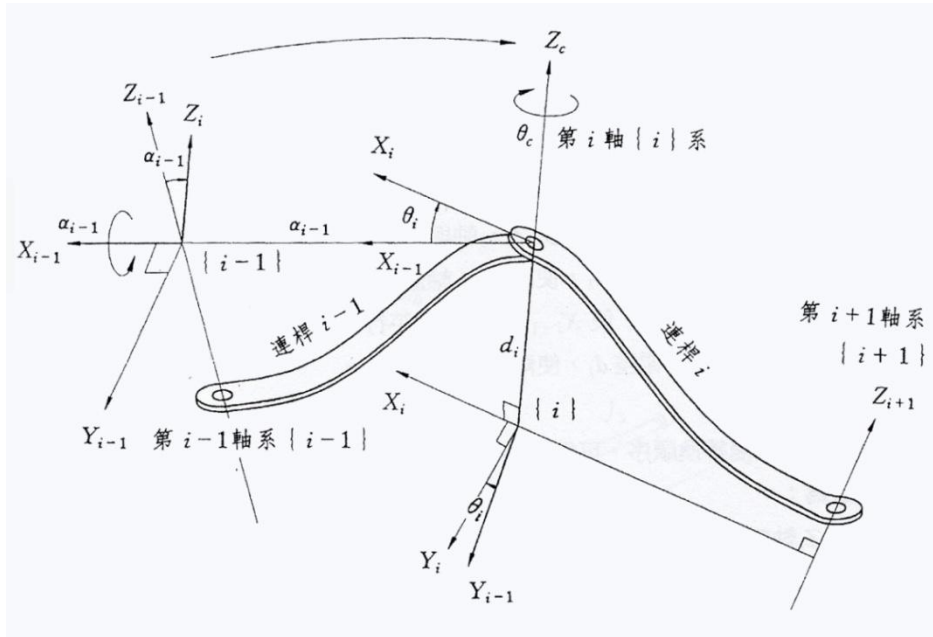


圖 3.1 連桿參數及座標系變換

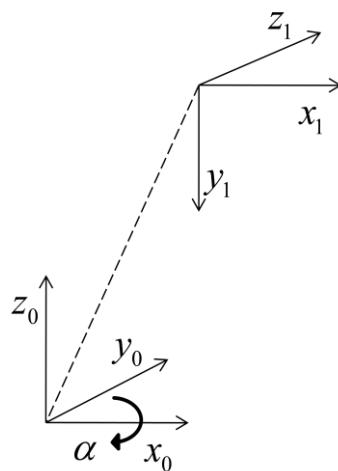


圖 3.2 關節和關節之間的座標關係

3.2 順向運動學

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

利用 D-H model 來建立運動學模型，建立順序為由肩膀部位到手腕部位，如圖 3.3 所示，表 3.1 為雙臂機器人之右機械臂 D-H model 的參數表，其中每 4 個 D-H 參數(θ 、 α 、 a 、 d)可決定出一個手臂自由度的座標轉換矩陣，如式(3.2)，左上角 3*3 矩陣代表的是旋轉方向，而第 4 行前三個元素則是代表 X、Y、Z 方向的位移。整個手臂有多少自由度就有幾個座標轉換矩陣作為代表，將所有自由度的代表矩陣照順序乘積起來即可得知操作臂末端的姿態與位置的矩陣。

表 3.1 右機械臂每軸的 D-H 參數表

	θ	α	a	d
Joint1	θ_1	-90°	0	0
Joint2	$\theta_2 - 90^\circ$	90°	0	0
Joint3	$\theta_3 + 90^\circ$	-90°	0	L_1
Joint4	θ_4	90°	0	0
Joint5	0	-90°	0	L_2

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - 90^\circ) & 0 & -\sin(\theta_2 - 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_2 - 90^\circ) & 0 & \cos(\theta_2 - 90^\circ) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & -\sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ \sin(\theta_3 + 90^\circ) & 0 & \cos(\theta_3 + 90^\circ) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$T_5 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \quad (3.9)$$

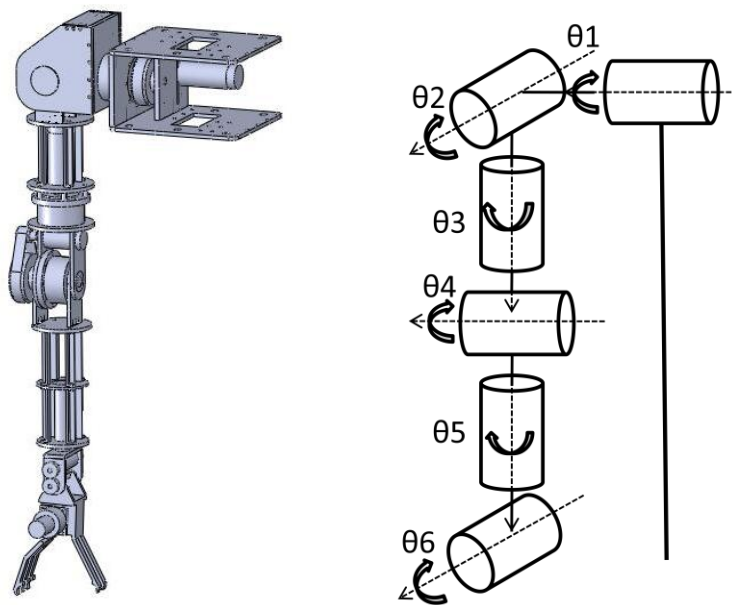


圖 3.3 機械手本體與 D-H 座標系

3.3 具冗餘自由度之逆向運動學分析

基於雙臂機器人對稱性，我們先針對單邊機械手臂來進行分析在對應到另一邊手臂。我們將針對右機械手臂進行逆運動學的分析。由於我們的力感測器將會安裝在機械手臂的手腕部位，所以我們將採用 wrist-partitioned 的類型[24]，將逆運動學的分析從手腕部位分開處理。由於手爪姿態較容易由於任務不同有不同姿態，且我們將力感測器裝在手腕部位，因此我們將針對手腕點來推導出較符合人類自然姿態且具有冗餘自由度的逆向運動學公式，也就是從卡氏座標的 X、Y 和 Z 座標推出 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 的座標。

圖 3.4 中定義了手臂座標系的 X、Y 和 Z 軸，以肩膀點為手臂座標系原點， \vec{r}_u 和 \vec{r}_f 分別為機械手臂上臂長與下臂長。當我們給定了一個目標座標，從肩膀延伸到目標座標就為 \vec{r}_{wrist} 。由於有一冗餘自由度，所以當我們手臂的末端效果器要到目標座標時可以以無限多的姿態到達，求不出有效解。在這裡引用了冗餘圈[23]的概念，也就是針對一個目標座標點所以可以到達的姿態，會在手肘點形成一個圈，直徑為 R。而圖中由 \vec{r}_u 和 \vec{r}_f 形成的右手姿態來說，最重要的是要在這冗餘圈上找到適合的軸位置 (p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}) 來做為限制條件。

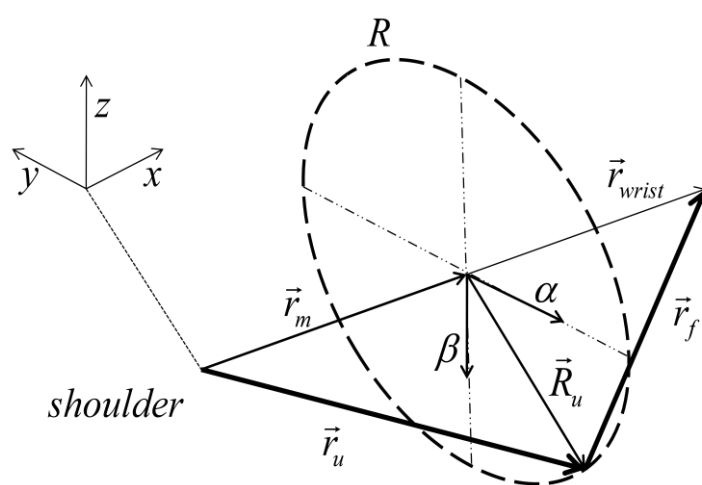


圖 3.4 手臂座標系與冗餘圈示意圖

Step 1：求 θ_4

在已知手腕點的卡式座標 (p_{wx}, p_{wy}, p_{wz}) 後， \vec{r}_{wrist} 就可以得到，我們就可以利用三角關係來求出 θ_4 ，如 3.10 式。

$$\theta_4 = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{\|\vec{r}_u\|^2 + \|\vec{r}_f\|^2 - \|\vec{r}_{wrist}\|^2}{2\|\vec{r}_u\| \cdot \|\vec{r}_f\|}\right) \quad (3.10)$$

其中 \vec{r}_u 和 \vec{r}_f 跟是上臂跟下臂的的長度，而

$$\|\vec{r}_{wrist}\| = \sqrt{(p_{wx})^2 + (p_{wy})^2 + (p_{wz})^2} \quad (3.11)$$

也就是從肩膀到手腕點的距離。

Step2：求手肘的位置

Step2.1 $\|\vec{R}_u\|$ ：

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

$$\Delta_{\vec{r}} = \sqrt{s \cdot (s - \|\vec{r}_{wrist}\|) \cdot (s - \|\vec{r}_u\|) \cdot (s - \|\vec{r}_f\|)} \quad (3.12)$$

而其中 $s = \frac{(\|\vec{r}_{wrist}\| + \|\vec{r}_u\| + \|\vec{r}_f\|)}{2}$ ，而我們要求的 $\|\vec{R}_u\|$ 就等於可表示成

$$\|\vec{R}_u\| = \frac{2 \cdot \Delta_{\vec{r}}}{\|\vec{r}_{wrist}\|} \quad (3.13)$$

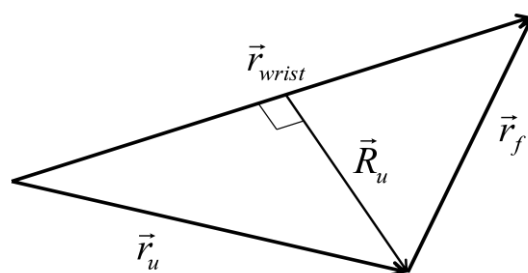


圖 3.5 由手臂構成的三角形

Step2.2 \vec{r}_m 向量：

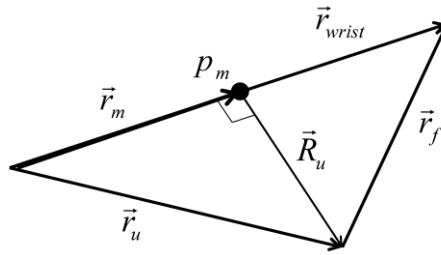


圖3.6手臂三角形裡各向量

$$\vec{r}_m = t_{rm} \cdot \vec{r}_{wrist} \quad (3.14)$$

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

$$t_{rm} = \frac{(\|\vec{r}_u\|^2) - (\|\vec{r}_f\|^2) + (\|\vec{r}_{wrist}\|^2)}{2 \cdot \|\vec{r}_{wrist}\|^2} \quad (3.15)$$

Step2.3 $\vec{\alpha}$ 向量：

$$\vec{\alpha} = \left[-\left(\frac{p_{wy}}{p_{wx}}\right) \cdot C_{factor}, C_{factor}, 0 \right] \quad (3.16)$$

接著定義通過 p_m 且平行於水平面的 α 向量。而定義的考量為，首先由於是平行於水平面的向量，所以 z 分量一定為零。再來， y 分量為 C_{factor} ，由於我們目前為右手結構的推導，而 Y 軸正向的定義是朝左邊(如圖 3.7 所示)，所以 C_{factor} 定

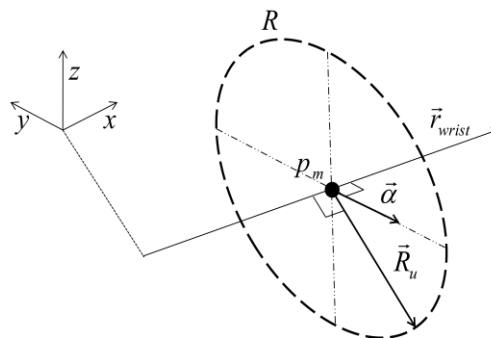


圖 3.7 $\vec{\alpha}$ 向量與各向量關係

義為"-1"，(如果是左手的話 C_{factor} 定義為"1")，而我們定義 α 向量要垂直 \vec{r}_{wrist} ，因此就可以求出 α 向量的 x 分量，如 3.16 式。

Step2.4 β 向量：

如圖 3.8 所示，由於 β 向量同時垂直於 α 向量與 \vec{r}_{wrist} 向量，所以利用 α 向量與 \vec{r}_{wrist} 向量做外積就可以求得 β 向量

$$\vec{\beta} = \vec{\alpha} \times \vec{r}_{wrist} \quad (3.17)$$

Step2.5 (p_{ex}, p_{ey}, p_{ez})：

$$\vec{\gamma} = A \cdot \vec{\alpha} + B \cdot \vec{\beta} \quad (3.18)$$

由圖 3.9 所示可知，由 α 向量與 β 向量做向量加法後可得到 γ 向量，我們可以透過 α 向量與 β 向量的係數 A 與 B 來控制 γ 向量的方向，而由前面已知 $\|\vec{R}_u\|$ 的長度，可以算出 γ 向量與 \vec{R}_u 向量的 k 倍數關係，

$$k = \frac{\|\vec{R}_u\|}{\|\vec{\gamma}\|} \quad (3.19)$$

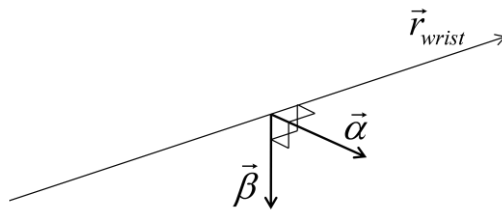


圖 3.8 β 向量與各向量關係

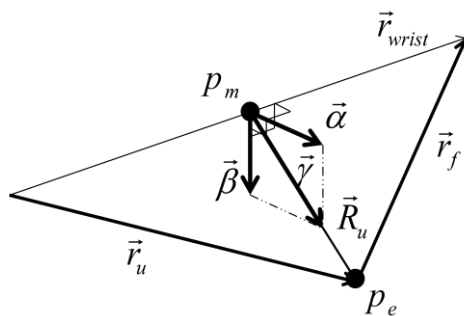


圖 3.9 α 向量與 β 向量型成 γ 向量

因此就可以求得手肘的位置 $(p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}) = k \cdot \vec{\gamma}$ 。

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

算出我們需要的手肘的位置 (p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}) 後， $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 就可以接續算出來。

由肩膀座標原點推導到手肘座標的順向運動學已知

$$R_y(\theta_1) \cdot R_x(\theta_2) \cdot T_z(-L_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \sin \theta_2 L_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\text{而} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \sin \theta_2 L_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{ex} \\ n & o & a & p_{ey} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{ez} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

因此我們可以得到下列聯立方程式

$$\begin{cases} -\sin \theta_1 \cos \theta_2 L_1 = p_{ex} \cdots (1) \\ \sin \theta_2 L_1 = p_{ey} \cdots (2) \\ -\cos \theta_1 \cos \theta_2 L_1 = p_{ez} \cdots (3) \end{cases} \quad (3.23)$$

將 3.23 式的(1)式除以(3)式可得

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{-p_{ex}}{-p_{ez}} \quad (3.24)$$

利用 atan2 函式可求得

$$\theta_1 = a \tan 2\left(\frac{-p_{ex}}{-p_{ez}}\right) \quad (3.25)$$

將 3.23 式的(2)式除以(3)式可得

$$\tan \theta_2 = \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} = \frac{p_{ey} \cos \theta_1}{-p_{ez}} \quad (3.26)$$

利用 atan2 函式可求得

$$\theta_2 = a \tan 2\left(\frac{p_{ey} \cos \theta_1}{-p_{ez}}\right) \quad (3.27)$$

再由肩膀座標原點推導到手腕座標的順向運動學

$$R_y(\theta_1) \cdot R_x(\theta_2) \cdot R_z(\theta_3) \cdot T_z(-L_1) \cdot R_y(\theta_4) \cdot T_z(-L_2) = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{wx} \\ n & o & a & p_{wy} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{wz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

將上式整理可得下式

$$R_z(\theta_3) \cdot T_z(-L_1) \cdot R_y(\theta_4) \cdot T_z(-L_2) = R_x^{-1}(\theta_2) \cdot R_y^{-1}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & p_{wx} \\ n & o & a & p_{wy} \\ \vdots & \vdots & \vdots & p_{wz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

整理可得到下列聯立方程式

$$\begin{cases} -\cos \theta_3 \sin \theta_4 L_2 = \cos \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_1 p_{wz} \cdots \cdots \cdots (1) \\ -\sin \theta_3 \sin \theta_4 L_2 = \sin \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} + \cos \theta_2 p_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz} \cdots (2) \\ -\cos \theta_4 L_2 - L_1 = \cos \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_2 p_{wy} + \cos \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz} \cdots (3) \end{cases} \quad (3.30)$$

將 3.30 式的(1)式和(2)式可得

$$\tan \theta_3 = \frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3} = \frac{\sin \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} + \cos \theta_2 p_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz}}{\cos \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_1 p_{wz}} \quad (3.31)$$

利用 atan2 函式可求得

$$\theta_3 = a \tan 2\left(\frac{\sin \theta_2 \sin \theta_1 p_{wx} + \cos \theta_2 p_{wy} + \sin \theta_2 \cos \theta_1 p_{wz}}{\cos \theta_1 p_{wx} - \sin \theta_1 p_{wz}}\right) \quad (3.32)$$

3.4 順向與逆向運動學總結及討論

本論文的順向運動學使用 D-H 變換矩陣來減少變數，僅使用四個變數(θ 、 α 、 a 和 d)定義空間六軸的變換。而在推導具冗餘自由度的逆向運動學時，使用了冗餘圈的概念來達成推導，再配合幾何與數學的關係，便可以從空間的座標(x,y,z)轉換成軸空間的($\theta_1 \sim \theta_4$)。

透過本逆向運動學分析後，便可以給定卡氏目標座標，得到軸空間 $\theta_1 \sim \theta_4$ 座標，並且可以透過調整 A 與 B 係數使機械手臂整體運動姿態是類似人類平常運動的自然姿態。當機械手臂在運動的過程中，從每軸的馬達編碼器讀回脈衝訊號再計算成角度後，可以利用順向運動學來檢查是否已經到達給定的目標座標。

第四章 機械手臂順應性運動控制

當機器手臂存在於一般的人類活動的環境中時，由於傳統機械手臂沒有力方面的控制法則，當機械手臂在待命狀態下時，對於在居家環境中活動的人類來說，機械手臂本身是有可能成為被人類碰撞到的障礙物，此時基於安全性的考量，我們希望機械手臂對碰撞的反應是可以降低碰撞的程度，並且順應外力使碰撞感”消失”的，因此我們對此設計一順應性運動控制於機械手臂上，讓機械手臂能夠跟人類手臂一樣，是可以感受到外力並且隨著外力運動，以提高機械手臂在一般人類活動環境中的安全性。我們使用的方法是，將安裝六軸力感測器的機械手臂末端，並將機械手臂看成是一個三維空間中的小質量模型，當力感測器感受到力時，整個機械手臂的運動行為將會遵行小質量模型的運動行為運動，來達到順應外力的行為。不同於傳統的機械手臂力控制或是阻抗控制對於環境持續接觸的訴求，本機械手臂順應性運動控制的主要考量是在居家環境中的安全性，希望減少任何情況下碰撞的程度。因此我們只需考量機械手臂終端效果器的空間中位移，不需要考慮旋轉情況。傳統的機械手臂力控制或是阻抗控制，需要推導機械手臂的動態模型，而其中又有許多參數無法確切得知，我們將機械手臂的動態模型簡化成小質量模型的動態模型，且可以藉由改變小質量模型的物理參數，來達到機械手臂的剛性的改變。本章節將介紹本論文使用的機械手臂順應性運動控制的設計。

在[21]中，林振暘學長使用了將整台平面移動式機器人看成是一個放在平面上的質量，並且使用量測馬達的電流來得知使用者的意向，讓輪式機器人可以順應人類施予機器人的力移動。因此，根據這樣的想法，我提出了機械手臂順應性運動控制架構如下。

4.1 機械手臂順應性運動控制架構

圖 4.1 為本論文提出之機械手臂順應性運動控制架構圖，當力感測器感受到外力時，讀到對力感測器座標系 XYZ 三軸的力資訊，經由三軸的校正曲線，校

正成具有單位的力資訊。由於機械手臂在運動時，安裝在手腕部位的力感測器的座標系也會隨著手臂運動的姿態而改變，所以需要隨時將力感測器的座標系旋轉成機械手臂的座標系，在藉由自由質量模型算出此時外力所造成的空間中位移量，經由逆運動學轉換成每軸的旋轉位移量，最後由機械手臂讀回編碼器訊號再經由數值轉換成每軸角度，然後再經由順向運動學得到現在的位置資訊，算出此刻須要給每軸各多少位置命令。

4.2. 力感測器單位校正

直接經由 JR3 的 DSP-based 的接收卡讀到的力資訊量，需要作力單位的識別。單位校正的方法為，由不同已知重量的砝碼，分別對力感測器的三軸做校正。實驗重量分別為 50g、100g、200g、300g、400g、500g、600g、700g、800g、900g、1000g，而由於力感測器的固定方式有許多限制，因此無法全對正 XYZ 軸或負 XYZ 軸作校正，在此本校正實驗在 X 軸的校正實驗為重量往 -X 方向施壓，在 Y 軸的校正實驗為重量往 +Y 方向施壓，在 Z 軸的校正實驗為重量往 -Z 方向施壓。而校正曲線如下圖 4.2 圖 4.3 圖 4.4，而校正式如 4.1 式

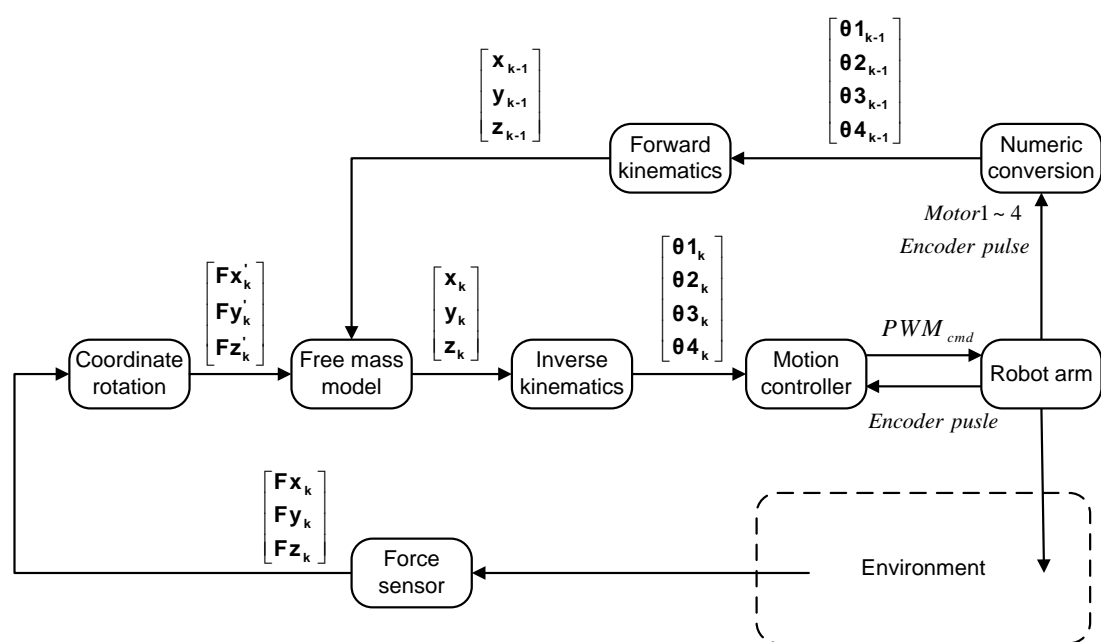


圖 4.1 機械手臂順應性運動控制架構圖

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{(0.566153592 \times Data_x)}{9.8} \\
 F_y &= \frac{(0.536743537 \times Data_y)}{9.8} \\
 F_z &= \frac{(1.430475316 \times Data_z)}{9.8}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

(單位:mNt)

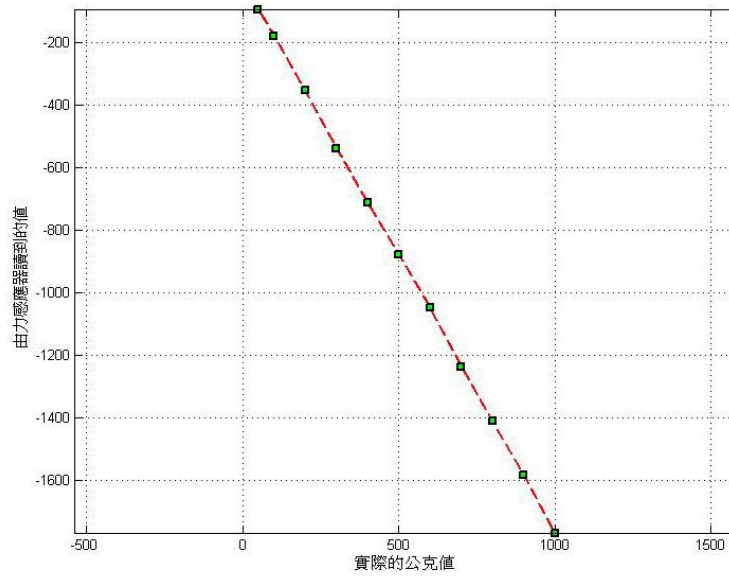


圖 4.2 力感測器-X 軸的校正曲線

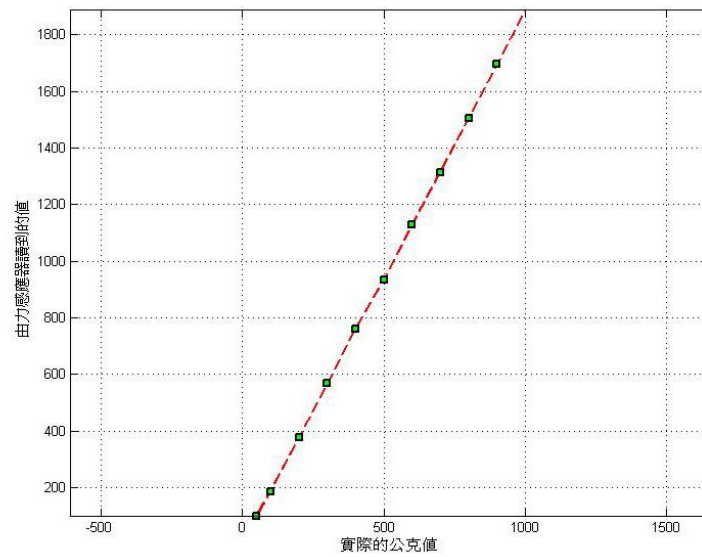


圖 4.3 力感測器+Y 軸的校正曲線

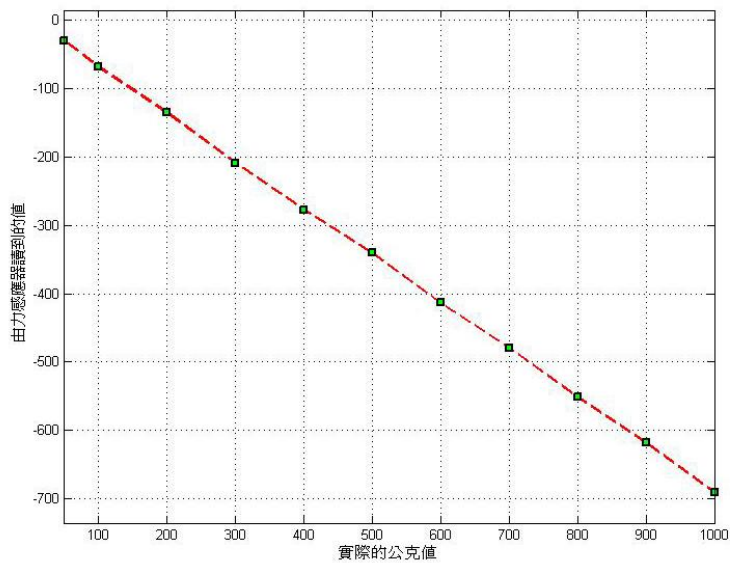


圖 4.4 力感測器-Z 軸的校正曲線

4.3 力感測器座標旋轉

由於機械手臂在空間中移動時，安裝在手腕部位的力感測器也會隨著機械手臂的移動而有姿態的變化，例如：當力感測器目前姿態是以 45 度朝上，此時如果對手腕施向下的力，由力感測器感測到的會是往-Z 軸跟往-X 軸的合力，而機械手臂也會因為這樣產生與我們期望不同運動。因此需要將讀到的三軸力資訊經由座標旋轉，將力感測器的座標系隨時旋轉成機械手臂的座標系，如圖 4.5。直接從力感測器讀到三軸的值为 F_{x_k} 、 F_{y_k} 和 F_{z_k} ，需要先後對 X 軸 Z 軸 Y 軸做旋轉，而 $F_{x'_k}$ 、 $F_{y'_k}$ 和 $F_{z'_k}$ 是旋轉過後相對於機械手臂座標系的向量值。

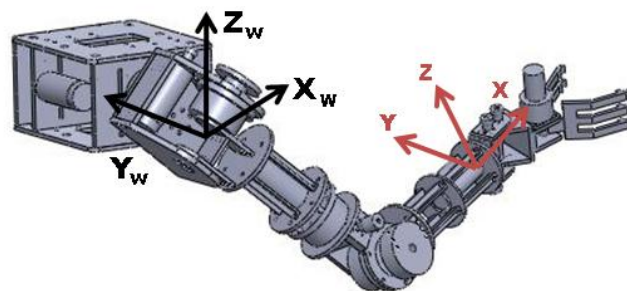


圖 4.5 機械手臂座標系與力感測器座標系

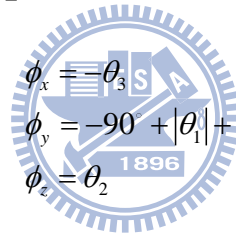
$$\begin{bmatrix} Fx_k \\ Fy_k \\ Fz_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Fx_k \\ Fy_k \\ Fz_k \end{bmatrix} \cdot rot_x \cdot rot_z \cdot rot_y \quad (4.2)$$

而其中，

$$rot_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_x) & -\sin(\phi_x) \\ 0 & \sin(\phi_x) & \cos(\phi_x) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$rot_y = \begin{bmatrix} \cos(\phi_y) & 0 & \sin(\phi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi_y) & 0 & \cos(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$rot_z = \begin{bmatrix} \cos(\phi_z) & -\sin(\phi_z) & 0 \\ \sin(\phi_z) & \cos(\phi_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$



$$\begin{aligned} \phi_x &= -\theta_3 \\ \phi_y &= -90^\circ + |\theta_1| + |\theta_4| \\ \phi_z &= \theta_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.4 力感測器座標實驗

本實驗使機械手臂手腕部位安裝力感測器，並使手腕點到達機械手臂座標系 $\{300, -100, -100\}$ (單位:mm) 的位置 (如圖 4.6 所示)，而後在力感測器上掛上 1000g 的砝碼來進行驗證。

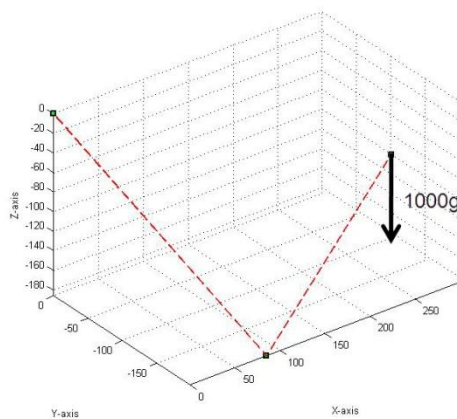


圖 4.6 機械手臂姿態受力示意圖

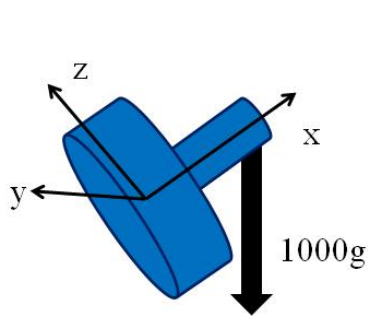


圖 4.7 力感測器安裝在手臂上的姿態

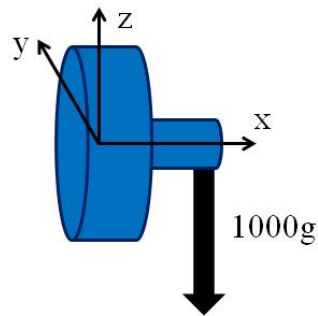


圖 4.8 力感測器正常的姿態

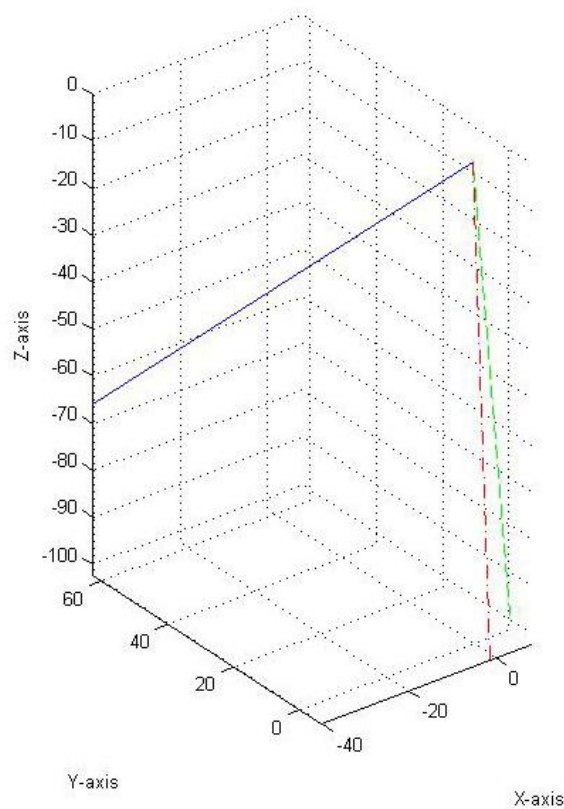


圖 4.9 各力向量於機械手臂座標系

如圖 4.9 所示，藍線實線是當機械手臂手腕點到達機械手臂座標 $\{300,-100,-100\}$ (單位:mm) 的位置時，力感測器對於目前施加 1000g 的重量，而力感測器的姿態與座標系如圖 4.7 所示，直接量測出來的向量。紅線點虛線是將力感測器的座標經過計算而旋轉後得到的向量，綠色虛線是將力感測器實際平放(如圖 4.8 所示)同樣施加 1000g 的重量而直接量測出來的向量，而實際數據如表 4.1。

表 4.1 座標旋轉誤差表

	X-axis	Y-axis	Z-axis
Original gesture	-40.3452	62.3608	-65.9742
After rotation	8.1882	-0.2547	-99.0056
Direct measurement	-1.2845	-6.6655	-102.4796
Error	9.4727	6.1084	3.4739

(單位:mNt)

4.5 自由質量模型

我們希望機械手臂能夠跟人類手臂一樣，可以感受外力並且順應外力自由移動。因此我們將安裝六軸力感測器的機械手臂手腕點看成是一個三維空間中的小質量模型(如圖 4.10 所示)，所以當受到外力時，機械手臂的運動行為將會遵行小質量模型的動態模型。由於 X 軸的力與位移的關係與另兩軸(Y 軸與 Z 軸)的力與位移的關係彼此獨立，在計算時也可以分開討論。因此對機械手臂的 X 軸來說

$$M\ddot{x}_k + B\dot{x}_k = Fx_k \quad (4.7)$$

M 為質量係數，B 為阻尼係數，k 則是代表每個取樣時間點， Fx_k 則是代表目前取樣時間點的 X 軸上的分力。其中

$$\dot{x}_k = \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t} \quad (4.8)$$

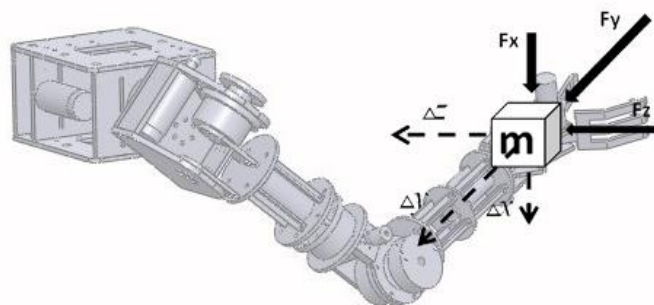


圖 4.10 手腕點模擬成自由質量示意圖

$$\ddot{x}_k = \frac{\dot{x}_k - \dot{x}_{k-1}}{\Delta t} = \frac{x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2}}{\Delta t^2} \quad (4.9)$$

x_k 、 \dot{x}_k 和 \ddot{x}_k 分別為質量物體在 X 軸上的位移、速度和加速度， Δt 則是取樣時間，

目前程式內設定為 10ms。將 4.8 式與 4.9 式代入 4.7 式，就可得

$$x_k = \frac{Fx'_k \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot x_{k-1} - M \cdot x_{k-2}}{M + B \cdot \Delta t} \quad (4.10)$$

所以當機械手臂系統在第 k 個取樣時間點感測到 X 軸上有分力的時候，就可以根據 4.10 式來得到第 k 個取樣時間點的位置。同理

$$y_k = \frac{Fy'_k \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot y_{k-1} - M \cdot y_{k-2}}{M + B \cdot \Delta t} \quad (4.11)$$

$$z_k = \frac{Fz'_k \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot z_{k-1} - M \cdot z_{k-2}}{M + B \cdot \Delta t} \quad (4.12)$$

4.6 參數設定之影響

在上一小節中提到順應性控制架構中有兩個參數(M、B)，而這兩個參數將會影響機械手臂之順應性程度，因此在此小節將探討 M、B 的影響。M 為我們所期望的質量，當 M 越大時，機器手臂的速度反應將越慢，反之 M 越小反應速度越快。B 為我們所期望的阻尼係數，B 越大表示阻力越大，將造成在同樣的力輸入下，B 越大則速度越慢，反之則越快。根據 4.7 式我們利用電腦模擬 M、B 的影響，圖 4.11 為當 B 不變，在固定的力輸入下，M 變化對速度的影響，我們可以發現 M 的變化影響了速度的暫態，M 越大速度上升越慢。圖 4.12 為當 M 不變，在固定的力輸入下，B 對速度的影響，我們可以發現 B 的變化影響了速度達穩態的時間以及穩態的終值大小，B 越大則達穩態的時間越久，穩態的速度也越慢，反之，則時間越短且終值速度也越快。因此我們可透過參數的調整去適應使用者的需求。

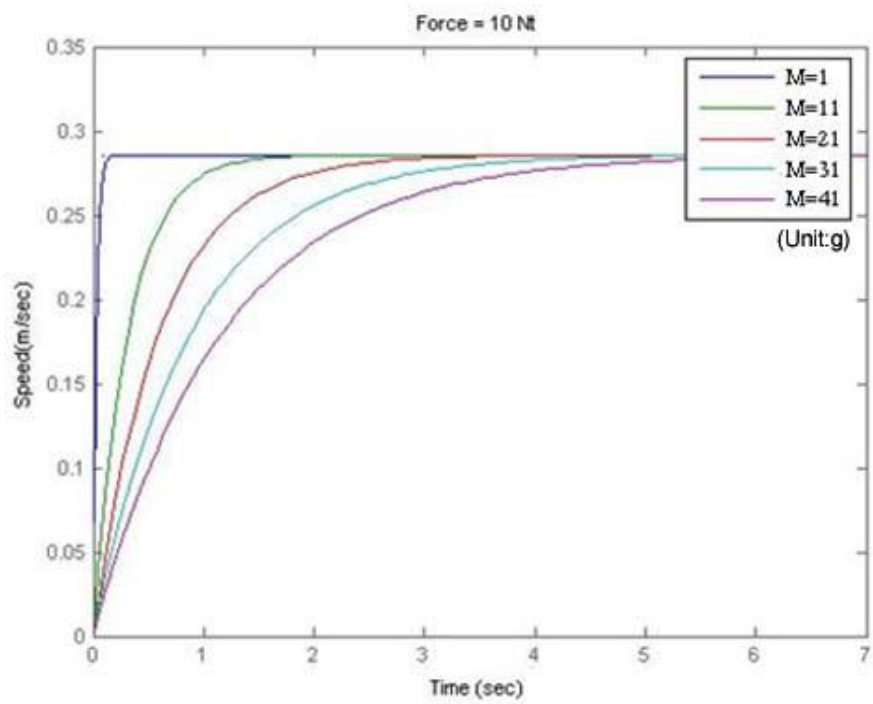


圖 4.11 M 對速度的影響模擬

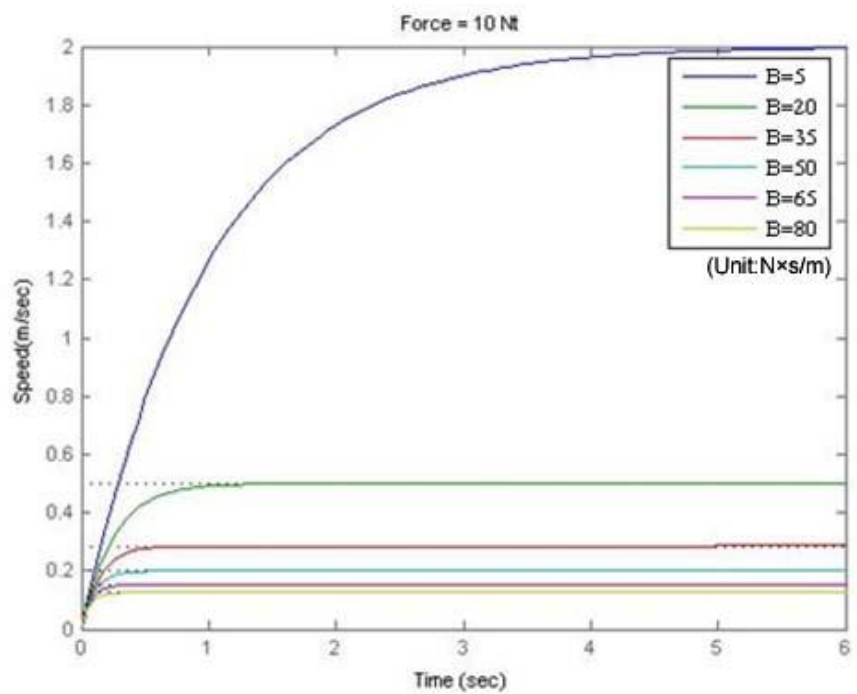


圖 4.12 B 對速度的影響模擬

第五章 機械手臂安全設計

當機械手臂可以達到藉由感知外力資訊並且順應著外力運動，我們可以進一步對機械手臂安全性考量方面的設計。對於機械手臂的實用性來說，只有單純可以順應外力的能力是無法能使機械手臂實際執行在居家環境中的任務。要能夠兼顧實用性與安全性的機械手臂控制系統，無法使用單一控制方法來設計。考慮人類手臂在面對各種不同的情況時，會由各種資訊(例：視覺、力覺、觸覺等等)來調整目前手臂的控制策略。當人類手臂目前需要抬起及支撐物體時，以機械的角度來看，就是將剛性調大。當人類手臂需要順應環境外力或是與另一人類互動時，會將手臂放軟，也就是將剛性調小。在居家環境不同於工廠內的作業區，當機械手臂目前明確的知道任務抓取物品並進行移動，途中還是有可能出現障礙物，無法是單一明確的任務內容。因此，需要設計出一套機械手臂的安全行為策略，以符合機械手臂的安全性與功能性。



5.1 安全運動與重新移動策略

考慮到機械手臂在居家環境裡可能面對的大多情況，以及各種任務類型，大致上可以將機械手臂所有行為分為兩類(如圖 5.1)。第一類情況為待命狀態，就是機械手臂正在待命的任何情況。第二類情況為運動狀態，包括機械手臂在移動的所有情況，無論是正在移動物體，或是正在前進到物體的路途中。

當機械手臂在待命狀態下時，對於在居家環境中活動的人類來說，機械手臂本身是有可能成為被人類碰撞到的障礙物，此時基於安全性的考量，我們希望機械手臂對碰撞的反應是可以降低碰撞的程度並且順應外力使碰撞消失的，而此時的控制策略就為上一章說明的順應性運動控制。

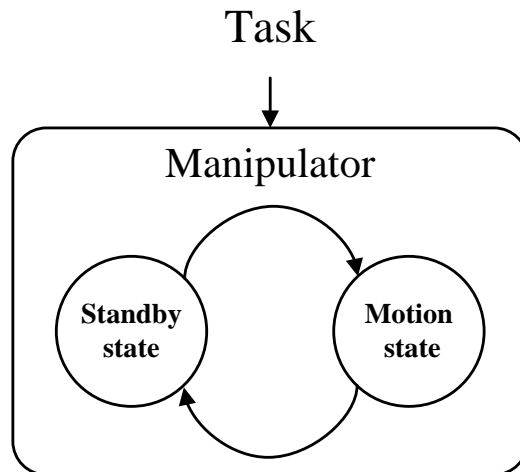


圖 5.1 機械手臂行為分類

當機械手臂在受到命令需要移動時，或是正在移動的過程中，此時為運動狀態。在運動狀態最重要的目的就是到達命令的位置，但如果在過程中遇到障礙物，如何能夠安全的完成任務，就是本設計的主要考量。在過去也有許多研究著重在此方面的研究，但多半為工業上的用途，例如組裝物品方面的 peg-in-hole 問題。而解決的方法多以阻抗控制以及力/位置混合控制為主，但由於在組裝過程中位置限制與力衝突的情況單純，不同於機械手臂在卡式空間中移動所可以遭遇到不確定情況，所以光以阻抗控制或力/位置混合控制並不足以達成此項功能。以人類來說，當我們伸手去拿東西時，若遭遇障礙物，在視覺還來不及看到的時候，本能的會對障礙物進行繞路的動作，因此本設計的概念也由此產生。而圖 5.3 為情境示意圖，當機械手臂得到了命令目標後便開始往目標靠近，如果途中有障礙物在行進軌跡中，一但力感測器感受到了輕微的外力，機械手臂就會停止原路線的前進，並且根據量測到的力方向以及大小，計算出一個繞路點，使手臂有機會繞過障礙物。如果再次觸碰到障礙物，則會再次根據量測到的力方向以及大小，計算出一個繞路點，重複如此的程序，直到完成任務。整個流程如圖 5.2 所示。

機械手臂安全移動流程：

1. 給定移動目標點後，目標點經由逆向運動學得到每軸移動量便開始移動。

2. 如果在移動途中 $F_{x_collision}$, $F_{y_collision}$, $F_{z_collision}$ 任一值大於 8mNt，則視為碰撞發生。
3. 根據碰撞當時發生的 $F_{x_collision}$, $F_{y_collision}$, $F_{z_collision}$ 與目前位置 (x_o, y_o, z_o) 帶入 5.1 式、5.2 式和 5.3 式計算出繞路點。
4. 移動到繞路點後，繼續往目標點移動。
5. 到達目標點，完成工作。

5.2 繞路點產生方法

當機械手臂在與障礙物有接觸時，根據發生接觸時力感測器感測到的力大小以及方向來計算出一個繞路點讓機械手臂能夠從另一條路線往目標點前進，如圖 5.4 所示。繞路點的推導基本上和上一章所提的質量模型概念相同。當機械手臂的終端效應器接觸到障礙物時，會對力感測器施反作用力，而由此時施的力向量去帶入質量模型裡，如圖 5.5 所示。將碰撞反作用力 $F_{collision}$ 與目前位置 (x_o, y_o, z_o)

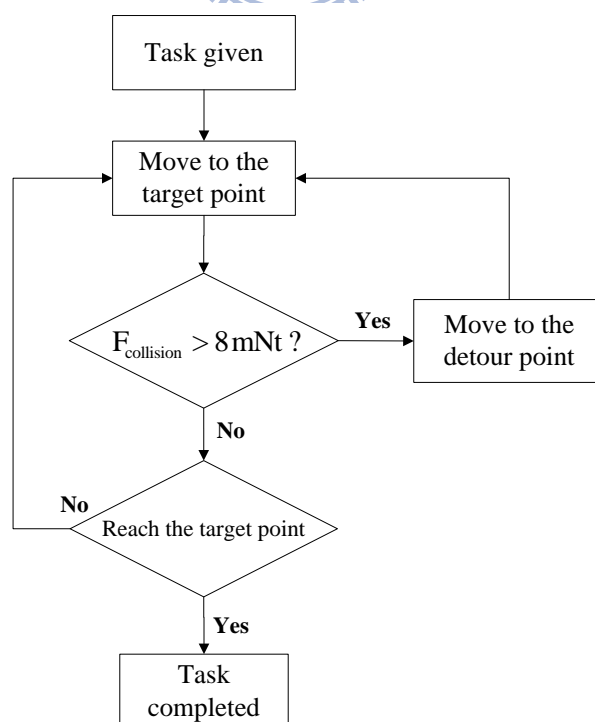


圖 5.2 安全移動流程圖

帶入 4.9 式、4.10 式和 4.11 式就可以得到 5.1 式、5.2 式和 5.3 式，因此可以得到此小質量因為目前的力向量而造成的位移後的卡氏座標點，此點即為本策略的繞路點。

$$x_n = \frac{F_{x_{collision}} \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot x_o - M \cdot x_o}{M + B \cdot \Delta t} \quad (5.1)$$

$$y_n = \frac{F_{y_{collision}} \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot y_o - M \cdot y_o}{M + B \cdot \Delta t} \quad (5.2)$$

$$z_n = \frac{F_{z_{collision}} \cdot \Delta t^2 + (2M + B \cdot \Delta t) \cdot z_o - M \cdot z_o}{M + B \cdot \Delta t} \quad (5.3)$$

所以當機械手臂接觸到障礙物時，對於力感測器感測到的力一定會垂直於與障礙物的接觸面，因此產生的繞路點一定會在與障礙物的接觸點的反方向，以確保此

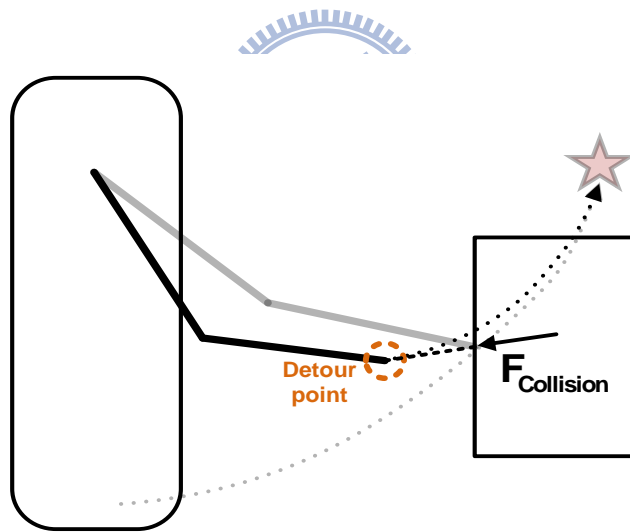


圖 5.3 繞路點產生說明圖

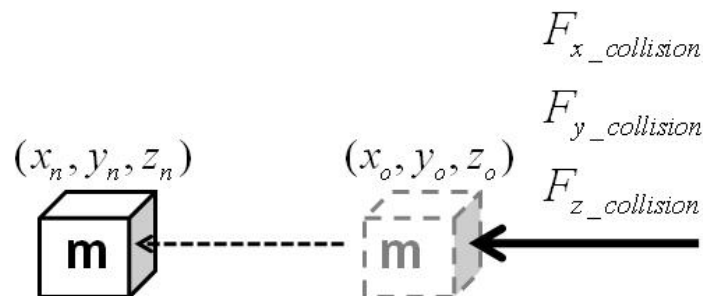


圖 5.4 碰撞反作用力對小質量模型施力

繞路點會產生在無障礙物的空間。當到達此繞路點後，系統再次給定目標點命令，經由逆向運動學算出每軸角位移量，再次往目標點前進。如果再次遭遇障礙物，則會在計算出另一繞路點，達此繞路點後再次往目標點前進，如此反覆。

5.3 安全設計之討論

本論文提出的機械手臂安全設計，同時考慮了機械手臂可能遇到的各種使用情況，將所有情況分為兩大類，分別為待命狀態與運動狀態。在待命狀態使用了本論文提出來的機械手臂順應性運動控制，使機械手臂在待命狀態時能夠順應由人類有意或無意產生的外力，對機械手臂以及人類都有安全上的保障。在運動狀態使用本論文提出的機械手臂安全移動策略，本策略同樣使用了本論文的順應性運動控制的架構。在機械手臂在移動的過程中，如果與外界(人或物體)發生碰撞，能夠即時的感知並停止繼續運動，使碰撞程度維持在輕微接觸的範圍，並且會根據碰撞時產生的力向量計算出一個繞路點，機械手臂會移動到繞路點後再次往目標點前進，如此反覆。透過本設計的實現，可以確保機械手臂任何時刻的安全性考量。



第六章 實驗結果

本章首先會對力感測器的單位進行單位校正以利後續實驗之用，再來對本論文機械手臂順應性運動控制中的力感測器姿態座標旋轉推導進行準確度驗證。再來進行機械手臂順應外力之實驗，以驗證有包含力感測器的整套系統運作正確。而後，給定機械手臂目標點，並在途中隨機放置障礙物，以驗證重新移動策略之可行性。

6.1 機械手臂順應外力之實驗

本實驗的目的，主要是驗證由前述方式所設計出來的機械手臂之順應性運動控制架構是否可以使機器手臂實際順應的外力所運動，以及包含力感測器的整套系統是否運作正確。實驗中主要展示的是機械手臂會依照使用者所施的外力而運動，如同人類手臂與人類手臂的互動一樣。本實驗將使用機械手臂右臂(如圖 6.1 所示)，並且將力感測器安裝在手腕部位(紅色虛線圈)，且暫時無安裝手爪，僅在力感測器上安裝一塑膠桿，做為初步的器具。使機器人整體放置在實驗室空間中，將手腕點移動到(300,-100,-100)處，等待外力的發生。

6.1.1 機械手臂順應外力之實驗結果

本實驗過程如圖 6.2 所示，當機械手臂達到預設的準備點(300,-100,-100)後，以人類手臂對機械手臂施力使機械手臂順著外力運動，本實驗使人類手臂做圓圈的軌跡運行三圈，來驗證本方法的可行性。圖 6.3 為機械手臂手腕點在卡式空間中的運行軌跡。由圖 6.4 以及圖 6.5 可以觀察到手腕點的確有跟著感測到的外力移動。

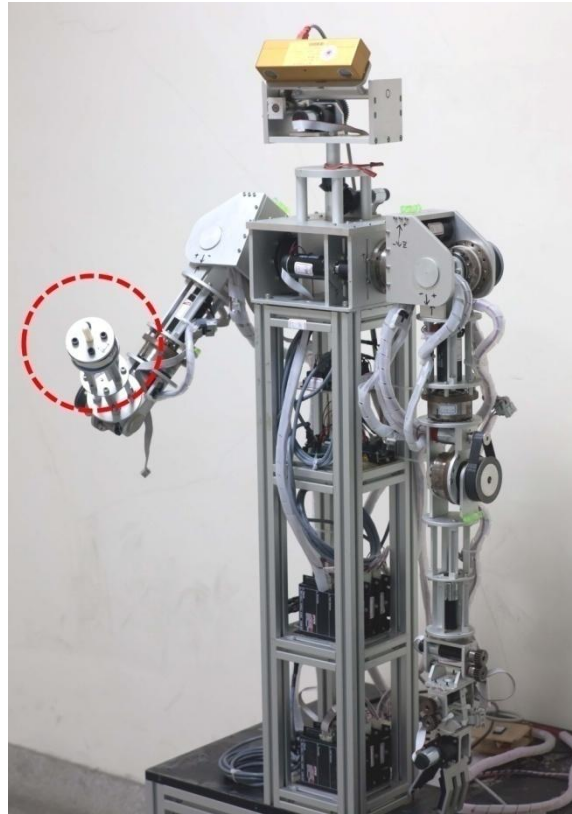


圖 6.1 機械手臂與力感測器配置



圖 6.2 機械手臂順應外力過程

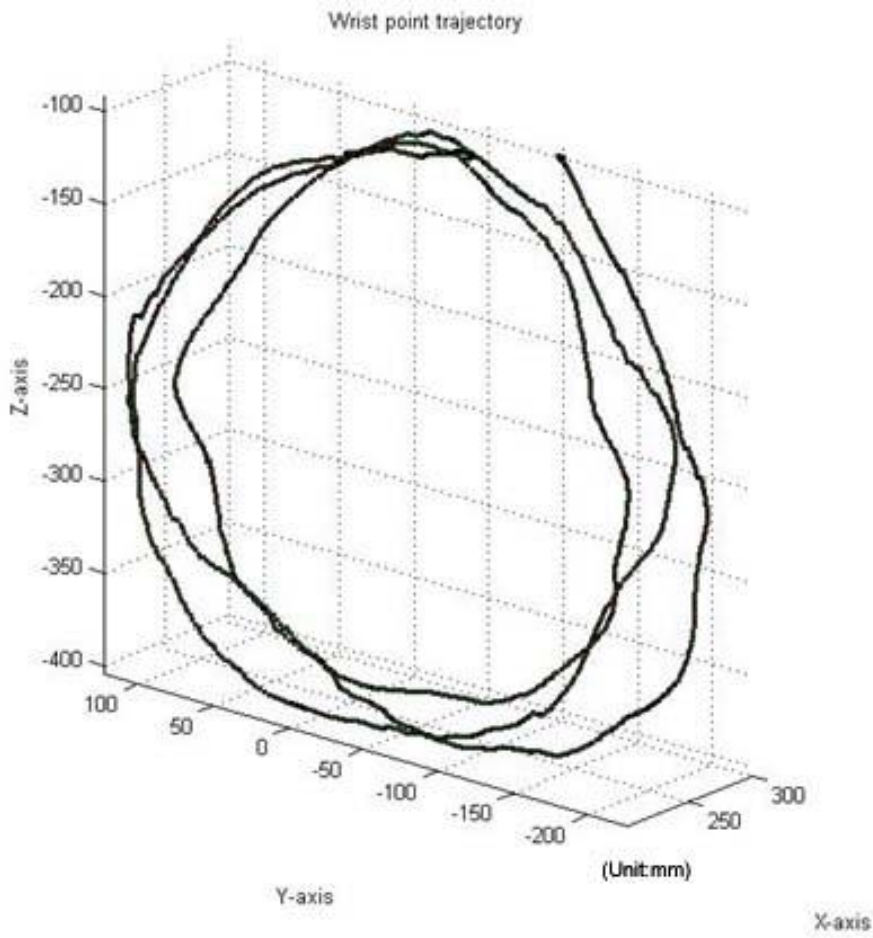


圖 6.3 機械手臂的手腕點軌跡

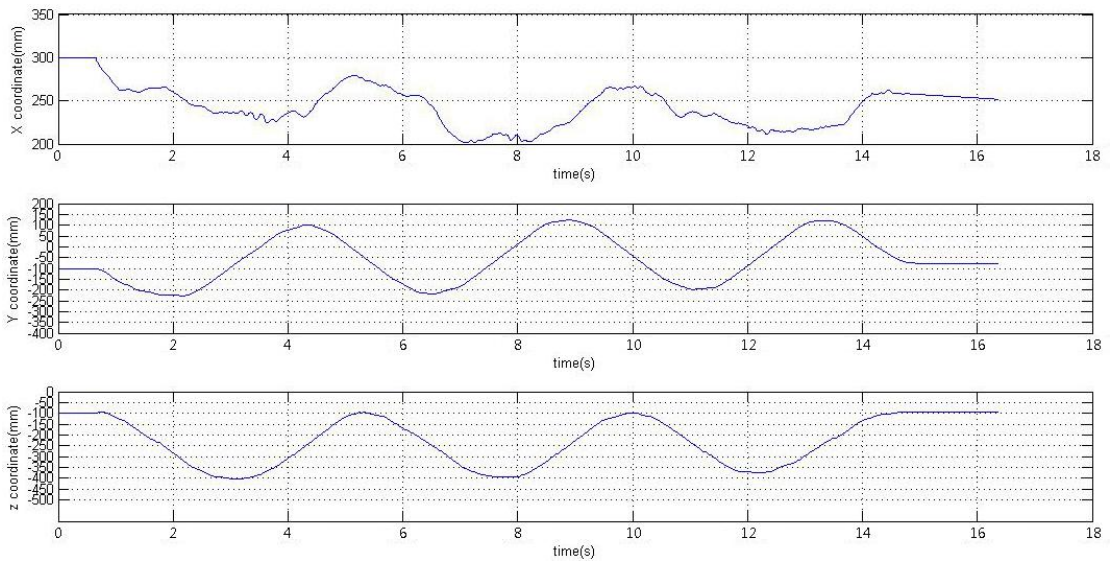


圖 6.4 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖

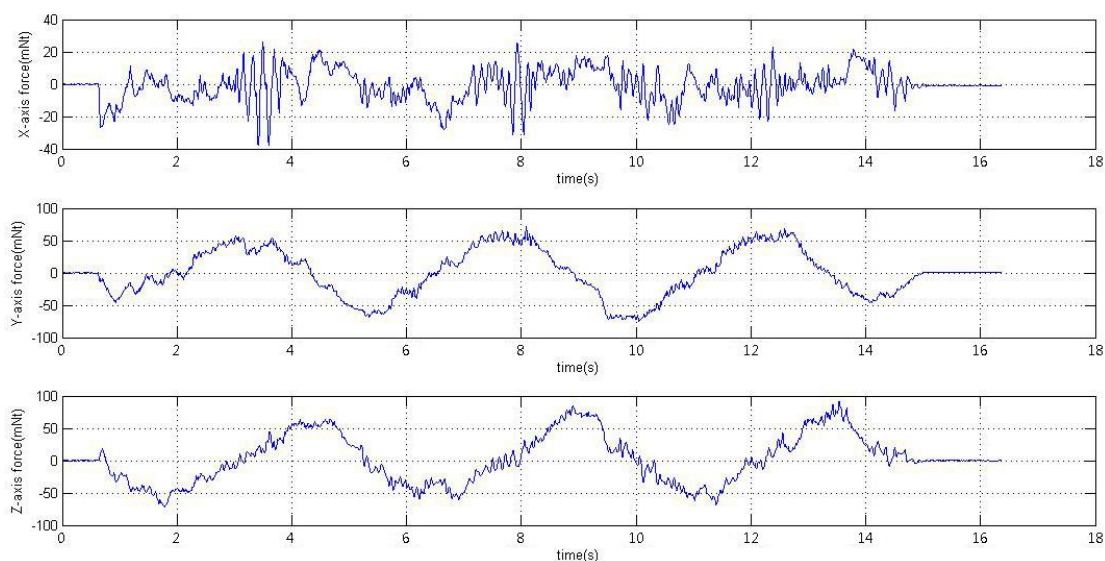


圖 6.5 力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖

6.2 機械手臂運行遭遇障礙物而重新移動實驗

本實驗的目的在於驗證重新移動策略之可行性，機械手臂在行進的過程中若遭遇到障礙物，根據本策略機械手臂將會依照碰撞當時的反作用力方向移動並且再次往目標點前進。本實驗將會使機械手臂進行點到點的移動，在機械手臂手腕點軌跡的途中，隨機放置障礙物，來驗證重新規劃路徑策略是否可以繞過障礙物最後到達目標點。在此將會以三種情形做為驗證主軸，分別是(1)從起始點(0,0,-522)到(400,-100-100)、(2)從(300,100,-350)到(300,-200,-350)和(3)從(300,-200,-300)到(300,100,-300)這三種情形，分別是縱向的移動與橫向的移動。

6.2.1 機械手臂運行遭遇障礙物而重新移動實驗結果

(1) 從起始點(0,0,-522)到(400,-100-100)

機械手臂與障礙物的配置以及實驗情形如圖 6.6 所示，而圖 6.7 為在無障礙物的情形下手腕點從(0,0,-522)到(400,-100-100)的原始軌跡，而圖 6.8 則為在隨機放置障礙物的情形下手腕點從(0,0,-522)到(400,-100-100)的軌跡，可以看出經由本方法的實現，機械手臂的確繞過障礙物而到達目標點(400,-100-100)。而圖 6.9 為將移動軌跡中的 X,Y,Z 坐標分別與時間作圖，圖 6.10 為將力感測器資訊計算與校正過後的 X,Y,Z 軸的力資訊。由圖 6.10 可以看出此段移動共發生了三次碰撞。

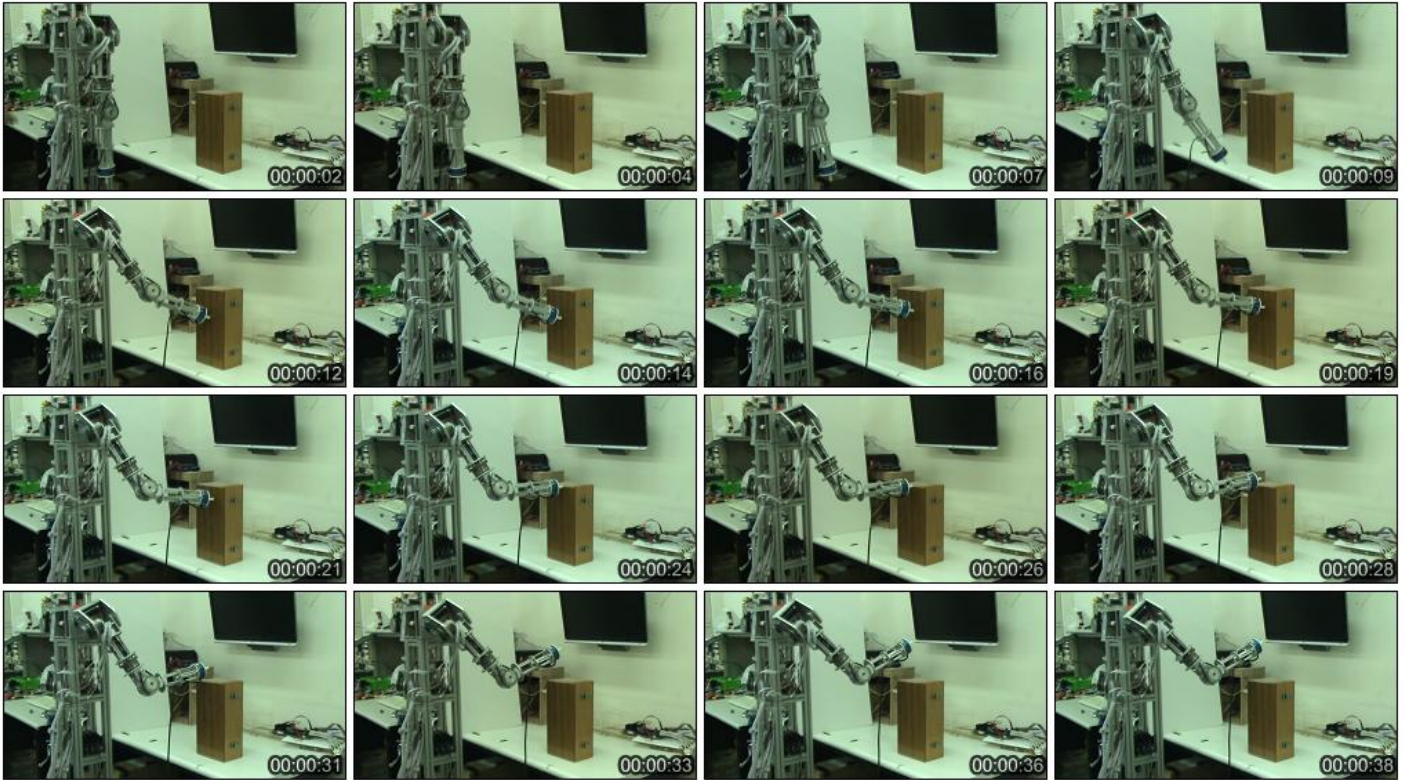


圖 6.6 從(0,0,-522)到(400,-100-100)移動過程

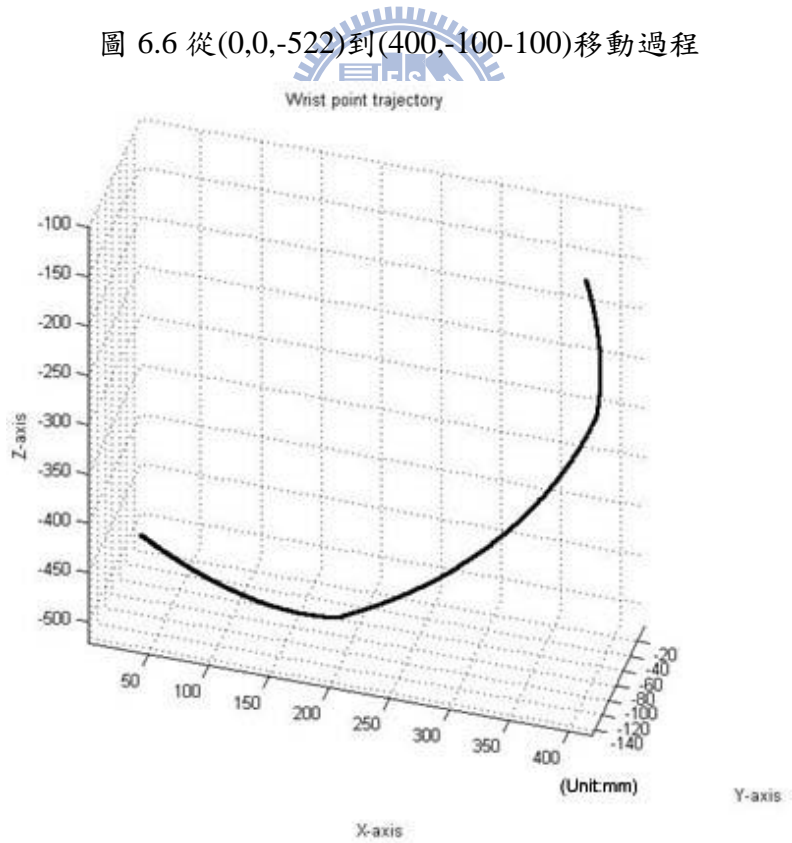


圖 6.7 無障礙物時從(0,0,-522)到(400,-100-100)的移動軌跡

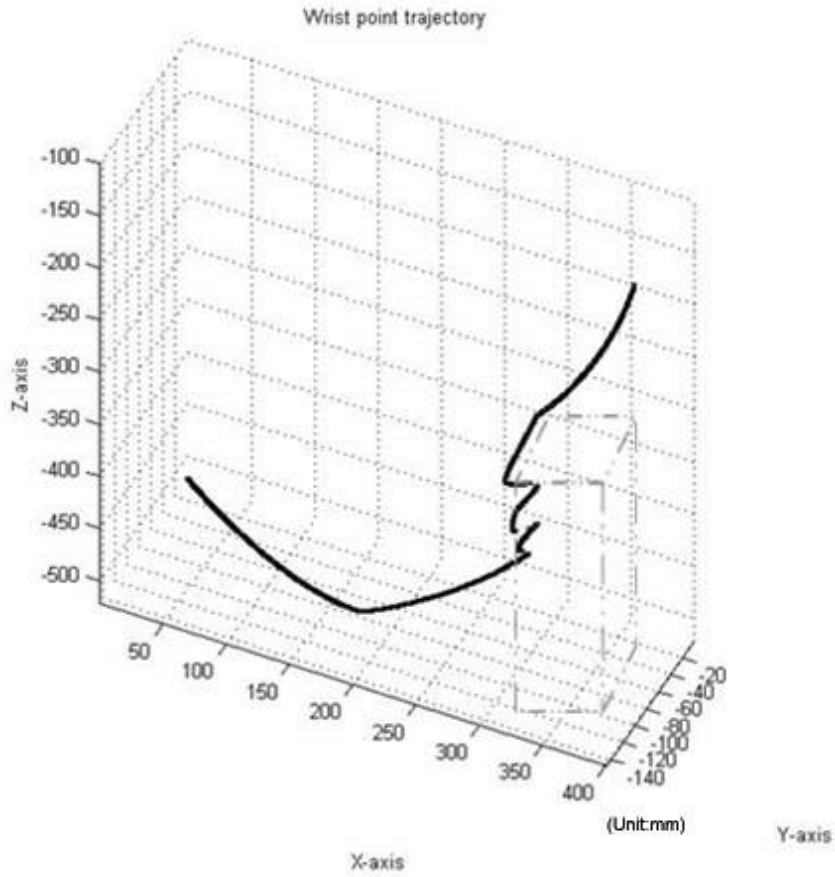


圖 6.8 有障礙物時從(0,0,-522)到(400,-100-100)的移動軌跡

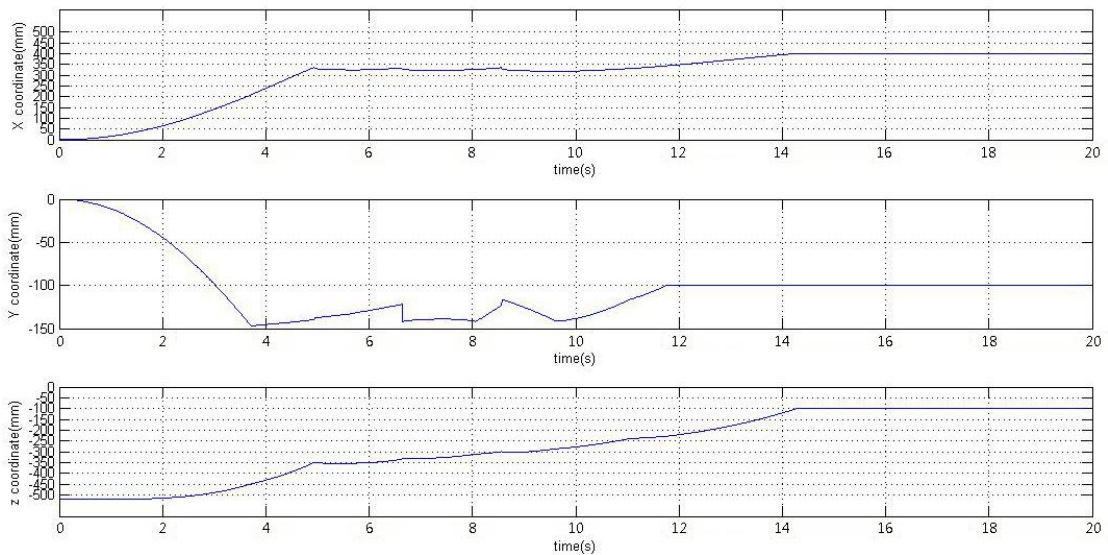


圖 6.9 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖

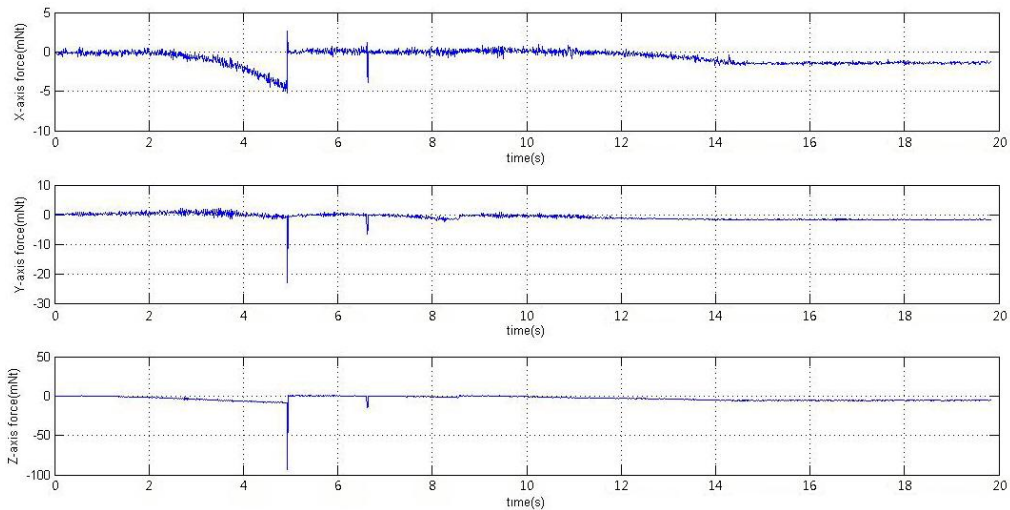


圖 6.10 力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖

(2) 從(300,100,-350)到(300,-200,-350)

機械手臂與障礙物的配置以及實驗情形如圖 6.11，而圖 6.12 為在無障礙物的情形下手腕點從(300,100,-350)到(300,-200,-350)的原始軌跡，而圖 6.13 則為在隨機放置障礙物的情形下手腕點從(300,100,-350)到(300,-200,-350)軌跡，可以看出經由本方法的實現，機械手臂的確繞過障礙物而到達目標點(300,-200,-350)。而圖 6.14 為將移動軌跡中的 X,Y,Z 坐標分別與時間作圖，而圖 6.15 為將力感測器資訊計算與校正過後的 X,Y,Z 軸的力資訊。由圖 6.15 可以看出此段移動共發生了四次碰撞。



圖 6.11 從(300,100,-350)到(300,-200,-350)移動過程

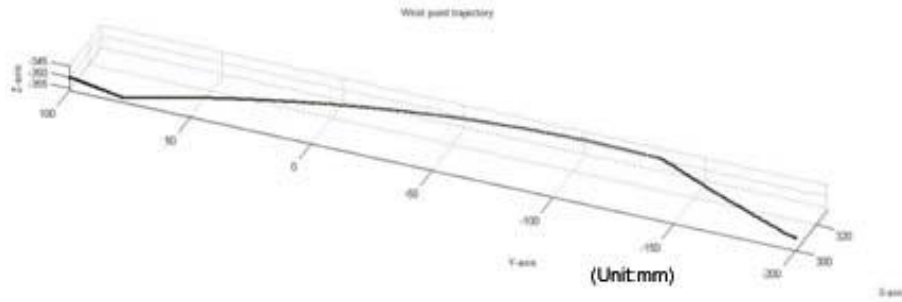


圖 6.12 無障礙物時從(300,100,-350)到(300,-200,-350)的移動軌跡

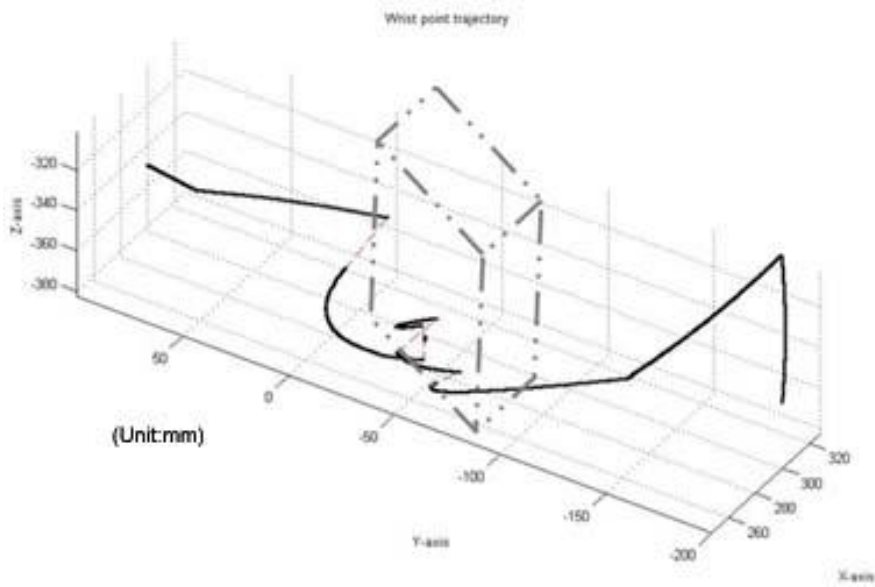


圖 6.13 有障礙物時從(300,100,-350)到(300,-200,-350)的移動軌跡

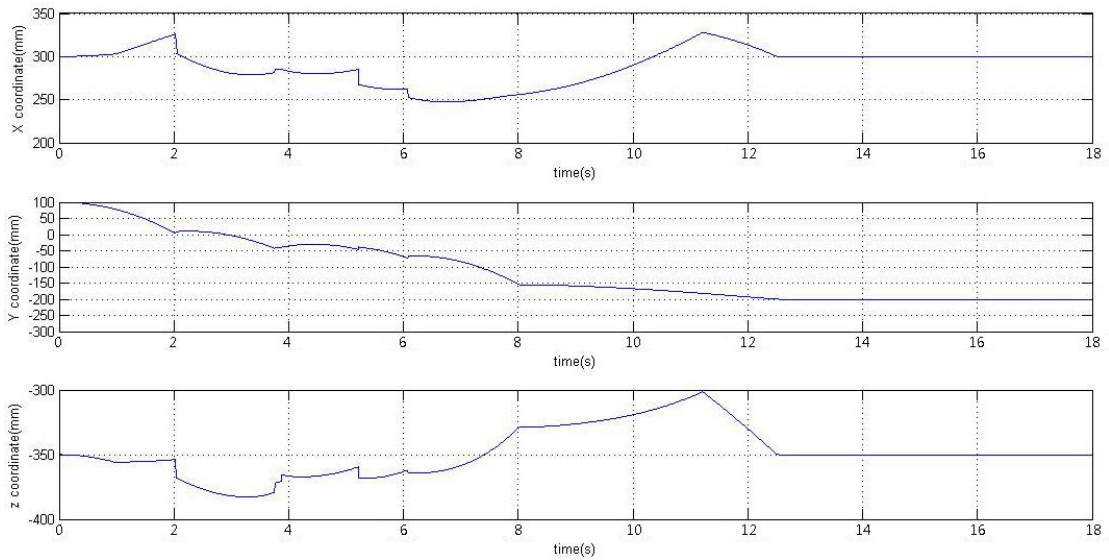


圖 6.14 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖

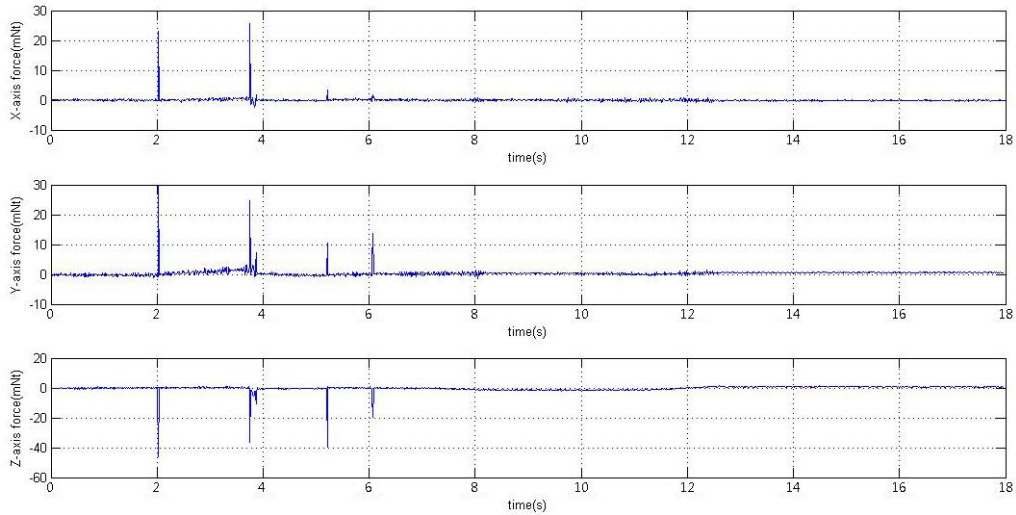


圖 6.15 力感測器 XYZ 軸資訊對時間作圖

(3) 從(300,-200,-300)到(300,100,-300)

機械手臂與障礙物的配置以及實驗情形如圖 6.16，而圖 6.17 為在無障礙物的情形下手腕點從(300,-200,-300)到(300,100,-300)的原始軌跡，而圖 6.18 則為在隨機放置障礙物的情形下手腕點從(300,-200,-300)到(300,100,-300)軌跡，可以看出經由本方法的實現，機械手臂的確繞過障礙物而到達目標點(300,100,-300)。而圖 6.19 為將移動軌跡中的 X,Y,Z 坐標分別與時間作圖，而圖 6.20 為將力感測器資訊計算與校正過後的 X,Y,Z 軸的力資訊。由圖 6.20 可以看出此段移動共發生了五次碰撞。

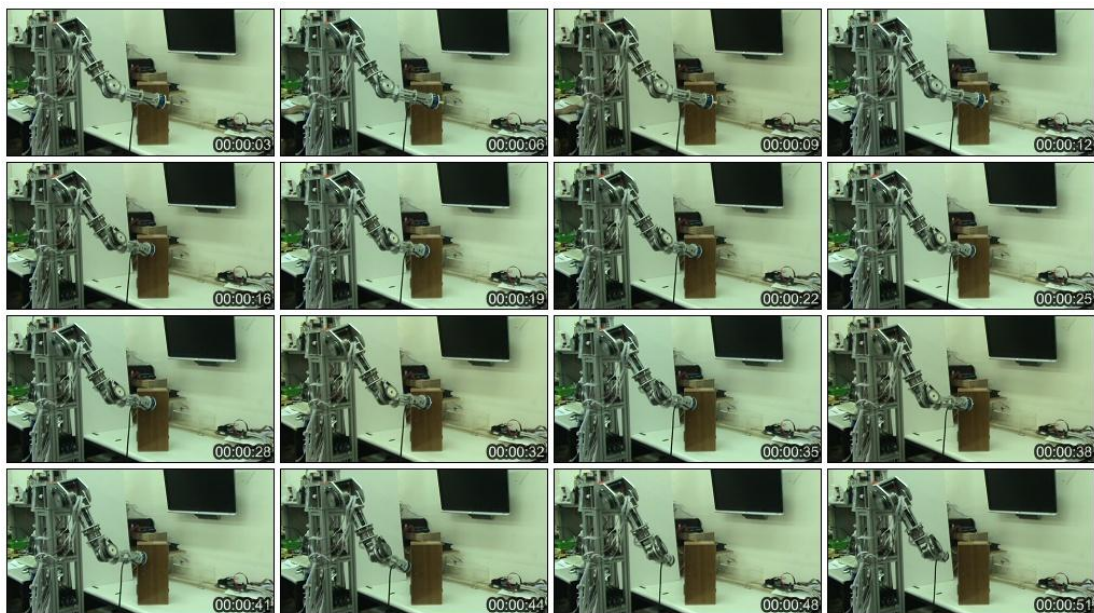


圖 6.16 從(300,-200,-300)到(300,100,-300)移動過程

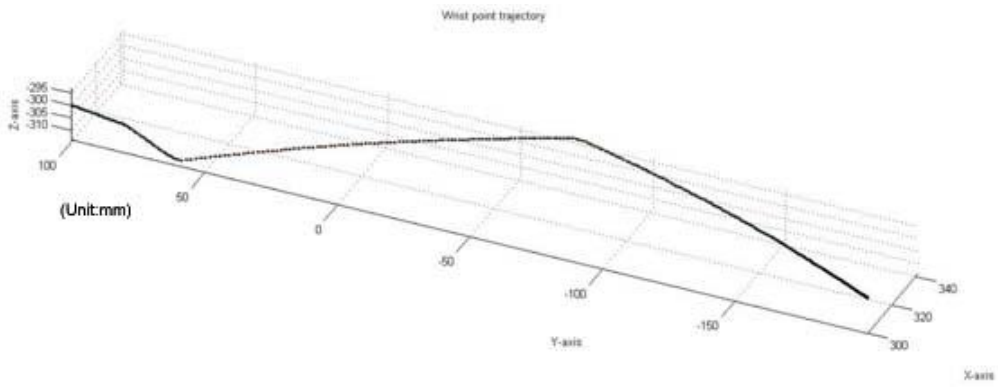


圖 6.17 無障礙物時從(300,-200,-300)到(300,100,-300)的移動軌跡

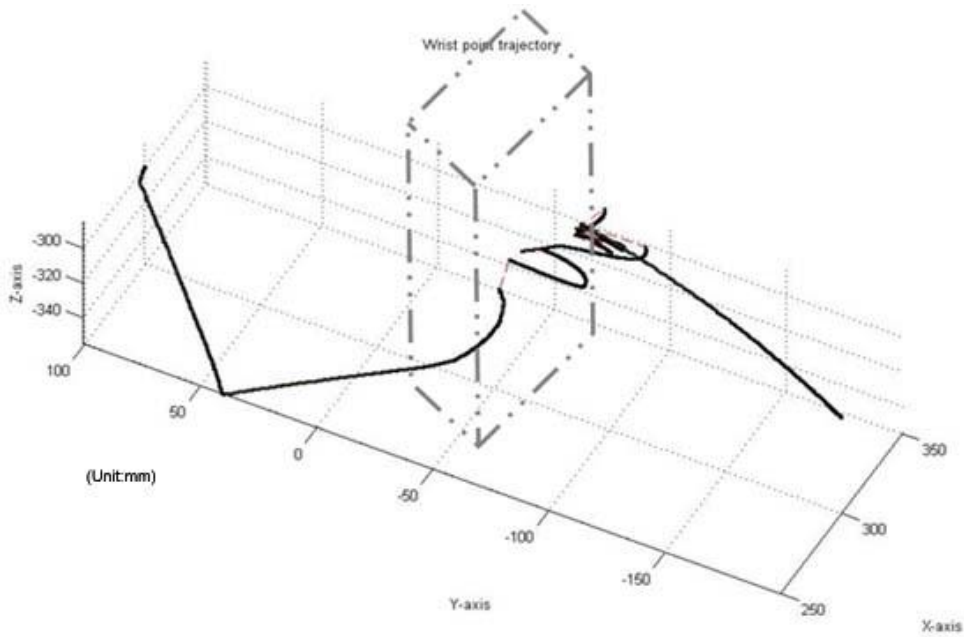


圖 6.18 有障礙物時從(300,-200,-300)到(300,100,-300)的移動軌跡

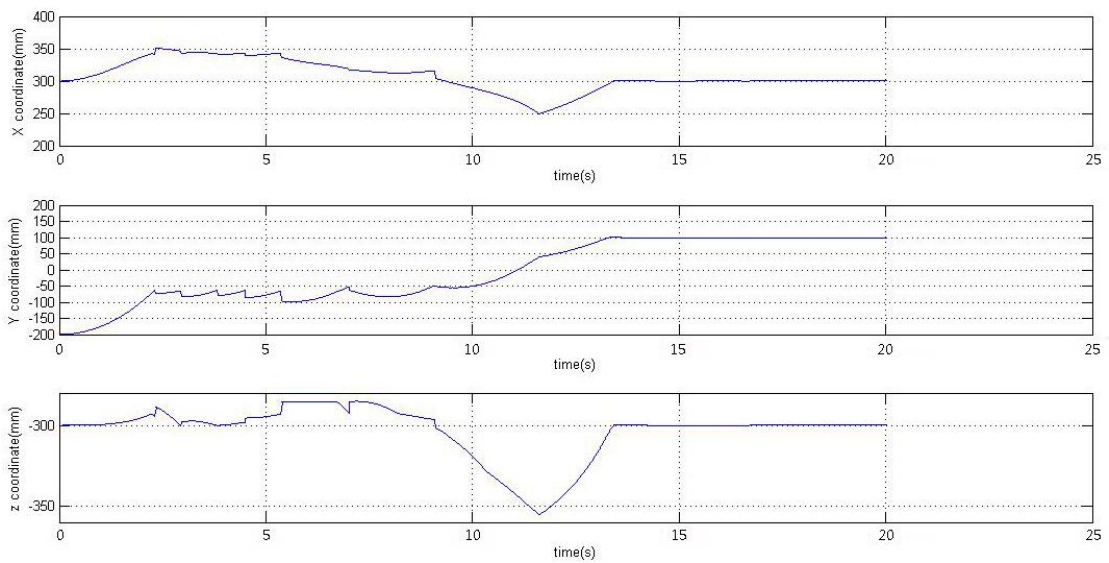


圖 6.19 手腕點 XYZ 座標分別對時間作圖

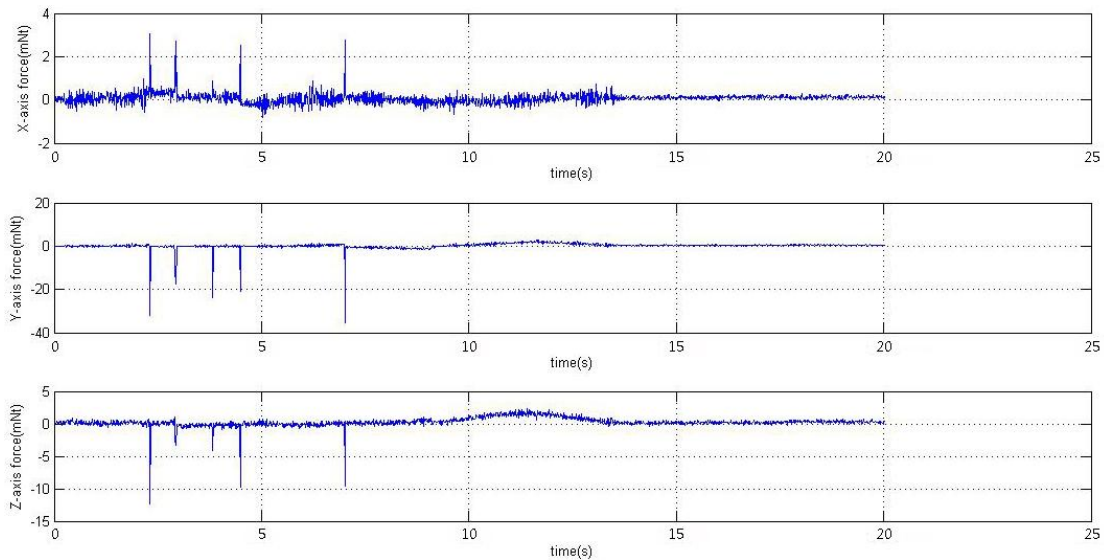


圖 6.20 力感測器 XYZ 軸力資訊對時間作圖

6.3 機械手臂安全性評估實驗設置

本實驗的目的在於評估重新移動策略之安全性，以評估本策略的安全性能。本實驗控制機械手臂手腕點的移動速度，來測試本策略可以在多少速度的移動下，仍然可以維持環境中物體的安全。本實驗將機械手臂放在一桌面前，桌面上放置一瓶裝滿 2000ml 水的塑膠保特瓶作為環境中物體，桌面上有鋪設止滑墊以消除物體滑動的可能性。本實驗目的在測試在本策略的執行下，機械手臂可以以多快的速度行進而將障礙物撞倒。

6.3.1 機械手臂安全性評估實驗結果

機械手臂與障礙物的配置以及實驗情形如圖 6.21 所示，手腕點將會以不同速度從(0,0,-522)移動到(450,-100-300)，而途中放置一個裝滿水約 2kg 的寶特瓶做為障礙物。經由多次實驗得到手腕點移動速度為 0.17m/s 時，障礙物在遭遇碰撞後仍然可以安穩在原本位置上，而碰撞時所發生最大的力為 52.53mNt，而碰撞力的實驗記錄結果如圖 6.23 所示，實驗過程的手腕點軌跡如圖 6.22 所示。圖 6.24 為手腕點以 0.24m/s 速度移動時所記錄的碰撞力，可以看到有圖上兩個突波，第一個突波代表的是機械手臂與瓶身的第一次碰撞，第二個突波代表的是瓶身因為遭遇外力撞擊重心不穩有晃動而在撞回機械手臂的時候。在手腕點以 0.24m/s 速

度移動時所記錄的碰撞力最高值有 104.34mNt，並且造成物體二次碰撞，可以看出當速度到達 0.24m/s 已經會對環境中物體開始造成安全性的威脅。

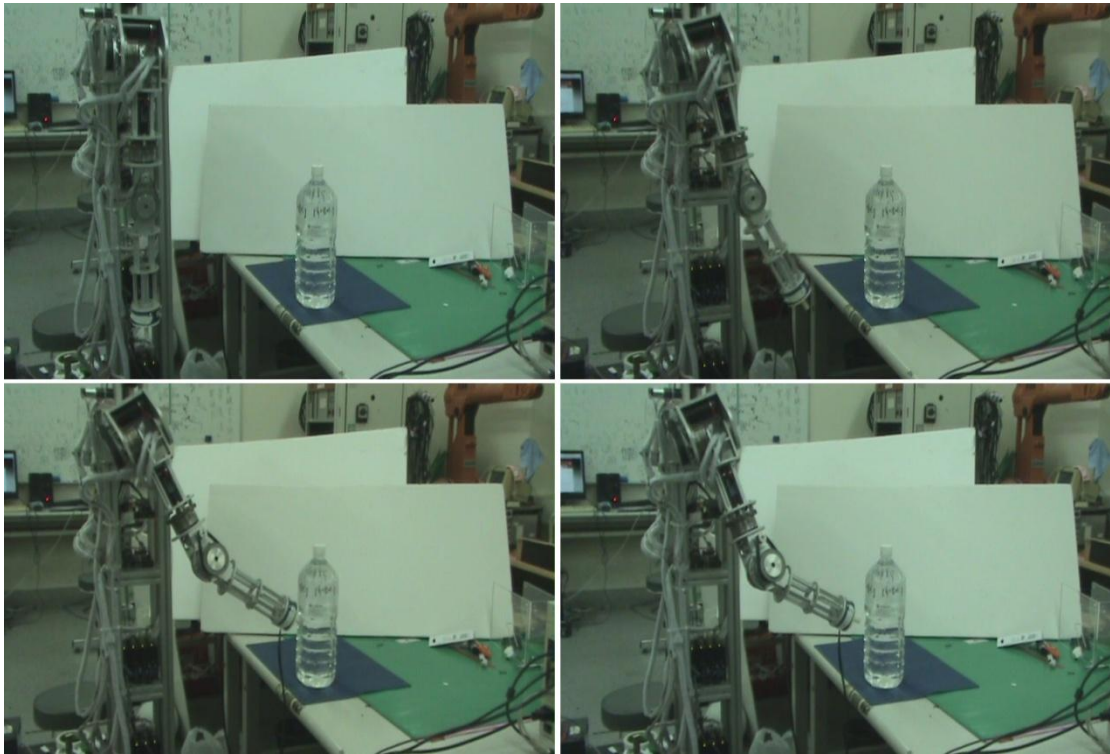


圖 6.21 機械手臂安全性評估實驗過程

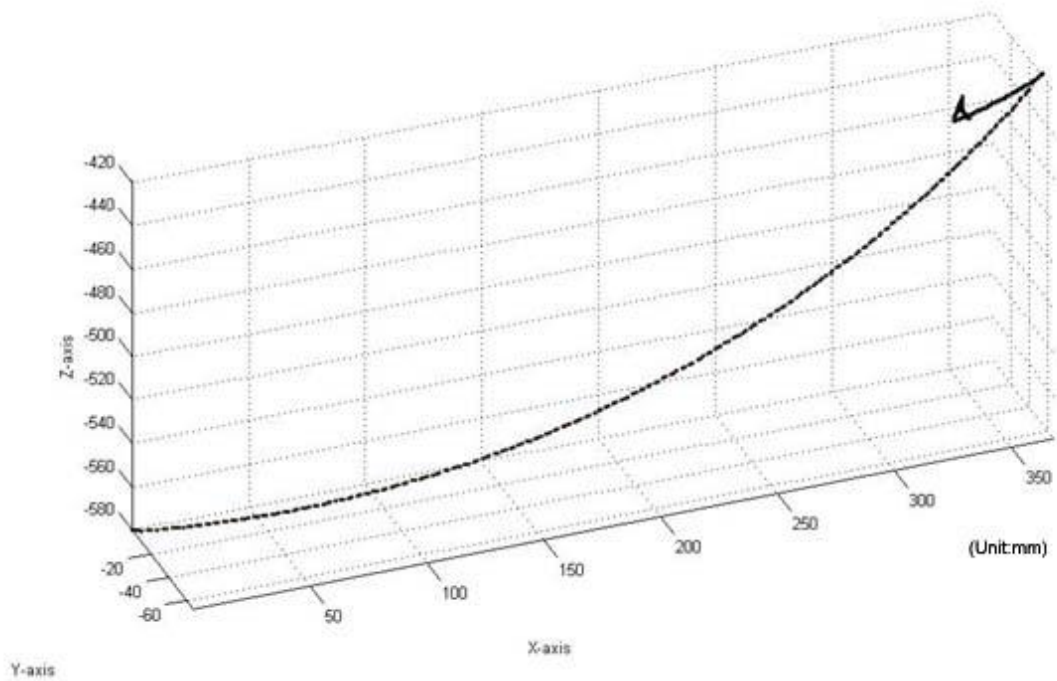


圖 6.22 手腕點移動軌跡

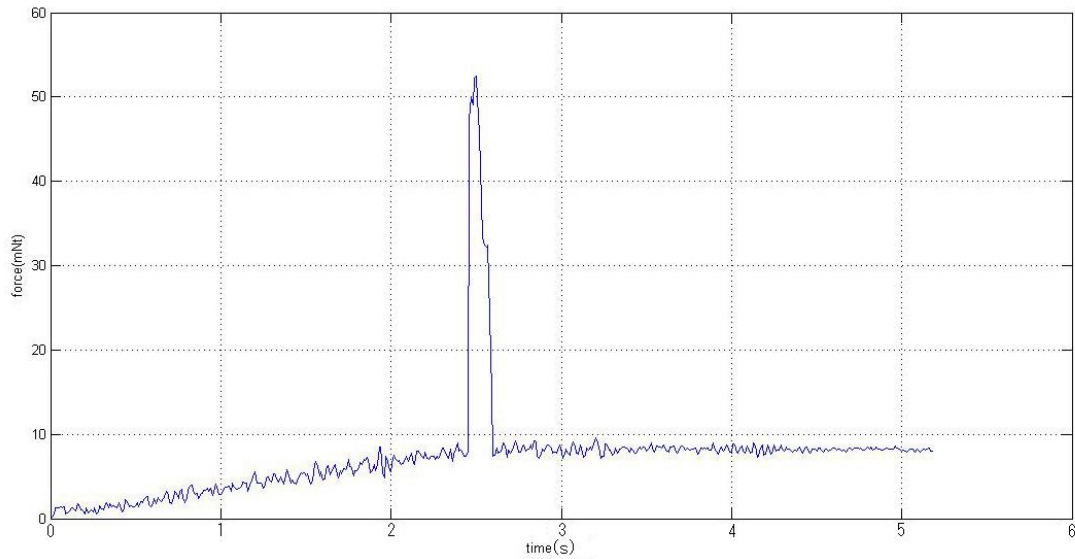


圖 6.23 手腕點速度 0.17m/s 記錄的外力

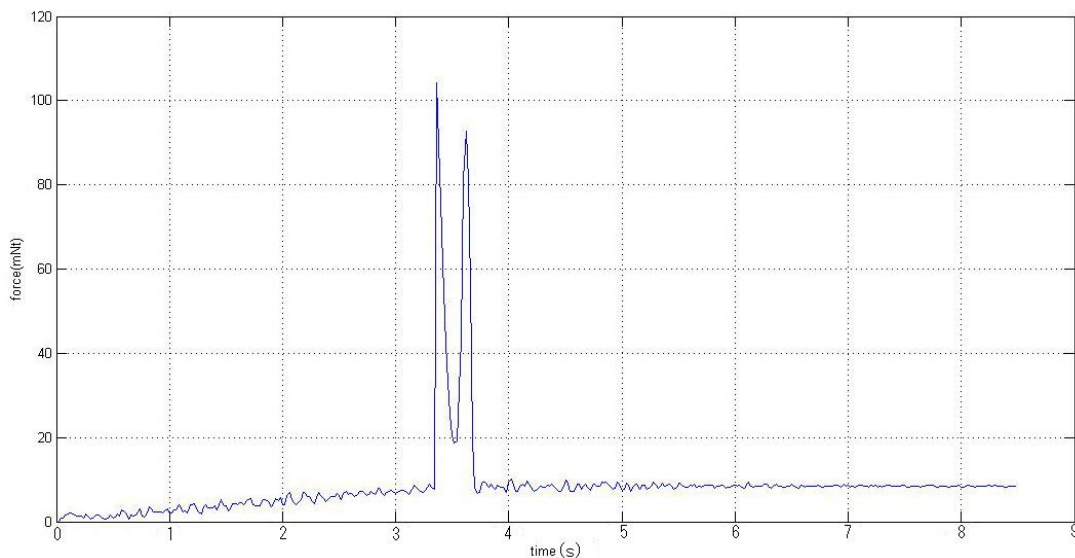


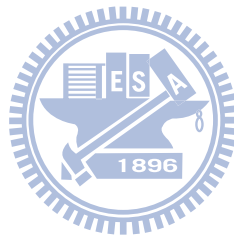
圖 6.24 手腕點速度 0.24m/s 記錄的外力

6.4 實驗討論

在本章第三節，機械手臂順應外力之實驗，以人類手臂對機械手臂施力，期望機械手臂順應外力而產生三個圓圈的手腕點軌跡運動，由圖 6.3 可以看出機械手臂手腕點的空間運動軌跡，而由圖 6.4 和圖 6.5 可以看出手腕點的 X、Y 和 Z 的座標的確有順應著 X 軸、Y 軸和 Z 軸的感測的外力在移動。

本章的第四節，機械手臂運行遭遇障礙物而重新移動實驗，其中規畫了三個實驗情境，分別是(1)從起始點(0,0,-522)到(400,-100-100)、(2)從(300,100,-350)到(300,-200,-350)和(3)從(300,-200,-300)到(300,100,-300)這三種情形，分別代表了機

械手臂縱向的移動與橫向的移動。而在機械手臂運動的過程中，隨機放置障礙物，而由圖 6.7 和圖 6.8 與圖 6.12 和圖 6.13 與圖 6.17 和圖 6.18 可以看出機械手臂原本的運動軌跡與使用重新移動策略後機械手臂重新移動的運動軌跡的不同，使用本方法後可以藉由輕微碰撞而繞過障礙物，達到安全性與功能性的要求。最後經由安全性評估實驗，測出在機械手臂手腕點速度 0.17m/s 時，本方法仍可以確保環境中物體的安全。



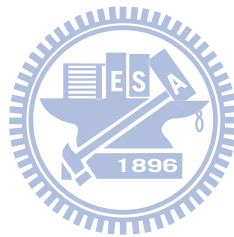
第七章 結論與未來展望

7.1 結論

本論文之主要目標為實現一具自由度接近於人類之雙臂機器人能夠安全執行任務之方法並研究，論文中設計一運動控制演算法使其可以在執行任務的時候即使發生了碰撞，也可以安全的反應以及產生後續動作。本論文完成雙臂機器人的整體架構之設計與軟體、硬體、機構之實現，其內容包含：所提出之整體系統架構及系統訊號流程，硬體設備及機構，感測器與機構設計等。根據 D-H 方法推導出順向運動學，並以幾何分析方法對一個具有四自由度的機械手臂進行逆向運動學分析推導，使機械手臂能夠實際執行位置命令。發展出順應性運動控制架構，當力感測器感受到外力時，讀到對力感測器座標系 XYZ 三軸的力資訊，經由三軸的校正曲線，校正成具有單位的力資訊。由於機械手臂在運動時，安裝在手腕部位的力感測器的座標系也會隨著手臂運動的姿態而改變，所以需要隨時將力感測器的座標系旋轉成機械手臂的座標系，在藉由自由質量模型算出此時外力所造成的空間中位移量，經由逆運動學轉換成每軸的旋轉位移量，最後由機械手臂讀回編碼器訊號再經由數值轉換成每軸角度，然後再經由順向運動學得到現在的位置資訊，算出此刻須要給每軸各多少位置命令。本論文針對機械手臂的安全考量，設計了一套機械手臂的安全行為策略，將機械手臂的全部行為分為靜止狀態與運動狀態。在靜止狀態時，本論文提出的機械手臂的順應性運動控制方法可以讓機械手臂順應外力運動，使機械手臂待命時，對於活動在它周圍的人類來說，不會只是個高剛性的障礙物，而是可以感知外力的智慧型機械手臂。在運動狀態時，則是使用重新規劃路徑策略，藉由與障礙物發生碰撞的反作用力計算出繞路點，使機械手臂會嘗試從另一條路線往目標點移動，最終到達目標點，完成任務。經由實驗驗證本論文之機械手臂可成功避開障礙物，目前在 0.24 m/s 以下時可以安全迴避環境中之物體。

7.2 未來展望

本論文目前安裝在力感測器上的器具為簡單的器具，並無手爪功能，未來可在力感測器上安裝手爪，並且完成手爪與手爪預備抓取的負載的重力補償，已達到實用方面的要求。本論文在感測器使用方面，由於僅使用力感測器作為回授，對於外界資訊種類獲得有限，因此未來可加入電腦視覺部分，已達到主動避障與被動避障同時進行，對於機械手臂的安全性與實用性必定可已有大幅的提升。



参考文献

- [1] D. Tsetserukou, R. Tadakuma, H. Kajimoto, N. Kawakami and S. Tachi, “Intelligent Variable Joint Impedance Control and Development of a New Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm,” *Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Jacksonville, FL, USA, 2007, pp. 338-343.
- [2] D. Tsetserukou, N. Kawakami and S. Tachi, “Vibration Damping Control of Robot Arm Intended for Service Application in Human Environment,” *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Daejeon, Korea, 2008, pp. 441-446.
- [3] K. A. Wyrobek, E. H. Berger, H. F. Machiel Van der Loos and J. K. Salisbury, “Towards a Personal Robotics Development Platform: Rationale and Design of an Intrinsically Safe Personal Robot,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, 2008, pp. 2165-2170.
- [4] A. Albu-Schaffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, T. Wimbock and G. Hirzinger, “The DLR Lightweight Robot: Design and Control Concepts for Robots in Human Environments,” *Industrial Robot: An International Journal*, 2007, Vol. 34 , No. 5, pp. 376 – 385.
- [5] A. De Luca, A. Albu-Schaffer, S. Haddadin and G. Hirzinger, “Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006, pp. 1623-1630.
- [6] Jung-Jun Park, Byeong-Sang Kim, Jae-Bok Song and Hong-Seok Kim, “Safe Link Mechanism based on Passive Compliance for Safe Human-Robot Collision,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, 2007, pp. 1152-1157.
- [7] Jung-Jun Park, Hwi-Su Kim and Jae-Bok Song, “Safe Robot Arm with Safe Joint Mechanism using Nonlinear Spring System for Collision Safety,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009, pp. 3371-3376.
- [8] Jung-Jun Park, Yong-Ju Lee, Jae-Bok Song, Hong-Seok Kim and Jae-Bok Song, “Safe Robot Arm with Safe Joint Mechanism using Nonlinear Spring System for Collision Safety,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation*, Pasadena, CA , 2008, pp. 2177-2182.
- [9] H. Iwata, S. Kobashi, T. Aono and S. Sugano, “Design of Anthropomorphic 4-DOF Tactile Interaction Manipulator with Passive Joints,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Canada, 2005, pp. 1785-1790.
- [10] S. Kajikawa, “Variable Compliance Mechanism for Human-care Robot Arm,” *Proc. of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 2736-2741.
- [11] H. Seki, Y. Kamiya and M. Hikizu, “SCARA Type Robot Arm with Mechanically Adjustable Compliant Joints,” *Proc. of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Prague, Czech Republic, 2006, pp.1175-1181.
- [12] R. Paul and B. Shimano, “Compliance and Control,” *Proc. of Joint Automation Control Conference*, New York, 1976, pp.694-699.
- [13] M. T. Mason, “Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, Vol.11, No. 6, pp. 418-432.
- [14] M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, Vol.103, pp. 275-282, 1981.
- [15] N. Hogan, “Impedance Control: an Approach to Manipulation. Part I: Theory, Part II: Implementation, Part III: Application” *Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.107, pp. 1-23, 1985.
- [16] H. Kazerooni, “Robust Compliant Motion : Impedance Control,” *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, U.S., 1986, pp.185-188.
- [17] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Hybrid Impedance Control of Robotics Manipulators,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.4, No.5, pp. 549-556, 1988.
- [18] A. A. Goldenberg, “Implementation of Force and Impedance in Robot Manipulation,” *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, pp. 1626-1632.
- [19] J-J E. Slotine and W. Li, “Adaptive Strategy in Constrained Manipulators,” *Proc.*

- of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, 1987, pp. 595-601.
- [20] W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance Control with Adaptation for Robotics Manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 408-415, 1991.
- [21] 林振暘, "基於馬達電流量測之行動輔助機器人順應性控制," 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, 2008.
- [22] 晉茂林, "機器人學," 五南圖書出版公司, 1998.
- [23] 王衍翔, "擬人型雙手臂機器人之機電設計、運動規劃與合作," 國立中興大學電機工程學系碩士論文, 2009.
- [24] R. P. Paul, "Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, the Computer Control of Robot Manipulators," MIT Press, 1981.

