

高速高精度之小線段命令運動軌跡插值介紹

High-speed high-precision motion trajectory of small segment interpolation
commands description

工業技術研究院 機械所 李峰吉

摘要

由於近幾年加工形狀複雜化，工件需要更先進的幾何曲線來表示，就必須將加工曲線和曲面路徑以許多的直線的命令來逼近，因此會造成許多極短線段命令。

本文主要針對多階曲線加工軌跡，以小線段直線逼近加工路徑，造成加工進給速度與工件精度低之問題，改善運動控制路徑規劃、伺服迴路控制架構及機械結構，以達到高速高精度之加工品質。

Abstract

Over the past few years due to processing of shape has a complicated and require more advanced parts of the geometric curves future that must be processed on the curves and surfaces, it will cause a number of very short segment command.

In this paper, curve for the processing path, a small segment linear approximation processing path, resulting in slower feed rate and lower work piece machining precision. Improve the motion command, servo control loop and mechanical structure, in order to achieve the high speed and precision processing quality.

關鍵字

路徑規劃, 伺服迴路控制, 機械結構, 高速, 高精度

Keywords

Path Command, Servo Control Loop, Mechanical Structure, High Speed, High Precision

前言

在產業提升及高科技的發展下，在產品製造上講求的是『高速』與『高精度』加工，而工業控制器必須要具有快速且精確的製造能力，已被視為工業的重要指標，近年來一直受到業界的重視。工業控制器技術發展一直隨著型態因而精進，

使得『高速』『高精度』已成為各工業控制器努力的方向。

一般而言，運動控制的精度取決於三個要素：運動控制路徑規劃、伺服迴路控制架構及機械結構。為使工具機的加工精度與速度的提昇，控制系統的設計必須包含良好的運動控制器與路徑規劃插補器，便能大幅的提昇工業控制器的加工精度與縮短加工時間。

傳統工業控制器是用直線或圓弧的軌跡去加工工件，由於近幾年加工形狀複雜化，工件需要更先進的幾何曲線來表示，就必須將加工曲線和曲面路徑以許多的直線的命令來逼近，因此會造成許多極短線段命令，也容易造成工具機加工速度遲緩，或是因速度不平均，造成加工表面不平滑，精度下降。

在運動路徑的規劃上，一個突然產生的速度命令將會需要一極大之加速度，如此將會造成機台產生一過大的力矩輸出，一方面會造成機台的震動，也會減低了機台的使用壽命，因此如何去避免過大的力矩輸出，並使運動在加減速過程中能夠維持平順之速度，是加減速曲線設計規劃上所關切的設計要素。

本文主要針對多階曲線加工軌跡，以小線段直線逼近加工路徑，如何達到高速高精度之加工品質，做一概括介紹。

控制命令與迴路

在高速的過程中又要保持很高的精度就是一個有趣的研究方向[1]。一般而言，高速的進給命令會使系統有較大的追隨誤差，而使得系統有較差的軌跡精度，也因高速導致速度的不連續性加大，造成機台振動而影響了加工表面粗細度。另外，如果維持一樣的插值週期(IPO Time, interpolation time)，為了達到高速插值，位置命令與原工件程式路徑的誤差也會變大，導致尚未進入位置控制迴路前，在運動軌跡規劃(Motion Planning)上就出了問題。所以，為了達到高速高精度控制，必須解決上述種種問題，可以分類為控制命令的問題與控制迴路的問題：

第一類是控制命令的問題

- . 插值週期必須要快，命令誤差必須減至最小。
- . 運動控制路徑加減速度曲線規劃。

. NURBS 技術。

第二類是控制迴路的問題

- . 高速高精控制必須擁有較高的迴路增益。
- . 必須設計前饋控制器以減少伺服落後。
- . 必須解決非線性的控制問題，如摩擦力等。

如欲達到高速高精度之加工品質，則可由以上之問題著手解決。

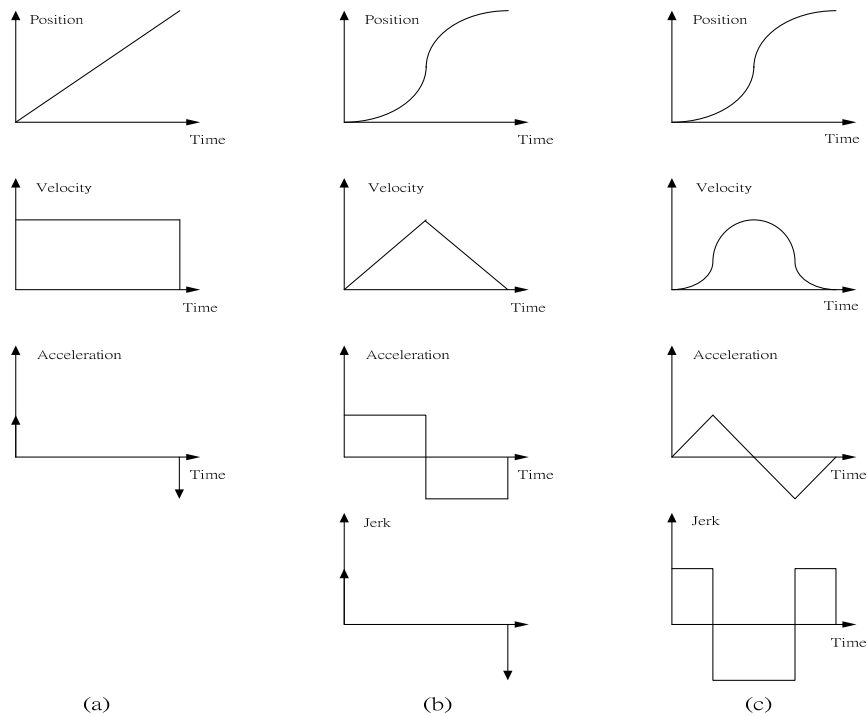
運動控制路徑加減速度曲線規劃

在運動路徑的速度規劃中，突然產生的速度命令則需要極大的加速度能力，當給予物體一極大的加速度時，根據牛頓力學第二定律 $F = ma$ ，理論上會造成馬達過大的力矩輸出，此相當大的力通常由運動機構本身所吸收，而突然的加速度產生也會產生一無窮大的Jerk。

Jerk是指加速度的微分，若我們觀察其Jerk之變化情況，可以發現Jerk值如同一脈衝響應。對機構而言，突然極大的加速度改變，會產生衝擊而振動，而造成機台損壞，像這樣的機械，震動與噪音是無法避免的，也會減低了機台的使用壽命，因此如何去避免過大的力矩輸出，並使運動在加減速過程中能夠維持平順之速度，是加減速曲線設計規劃上所關切的設計要素。

速度規劃演算法的作用，是將插補器命令給控制器在輸出至各軸，因此為了不讓運動造成不平順現象，以降低機台的震動量，使的控制的精度更好以達到高精度的要求。而速度規劃大致可分為直線型、指數型、Bell Shape型、S型...等。

在規劃所謂的優良曲線中，我們希望其運動的起始點與終點之加速度應為零，同時在運動期間其加速度曲線應為連續曲線，且 Jerk 為連續的有限值，以下分別比較一次、二次、三次方的位置曲線，三種不同的速度規劃與 Jerk 的關係，其結果如圖一所示。



圖一、速度與 Jerk 關係

在圖一 (a) 中速度圖為一矩形，而加速度圖則如同一脈衝響應，瞬間之加速度為一極大值，故在此時馬達必需產生極大的扭力，對馬達將會造成不利的影響。圖一 (b) 中加速度為一有限值，因此可改善馬達的力矩輸出。但其 Jerk 則如同一脈衝響應，此一現象將會造成振動，因而影響到機台的精度和使用壽命。圖一 (c) 中速度圖為二次曲線，加速度圖為漸進變化的斜線，而其 Jerk 則為一連續的有限值，因此對於馬達的力矩輸出與減低機台的振動都較前兩種有明顯的改善。如欲達較高精度之加工品質，則建議使用圖一(c)之速度曲線。

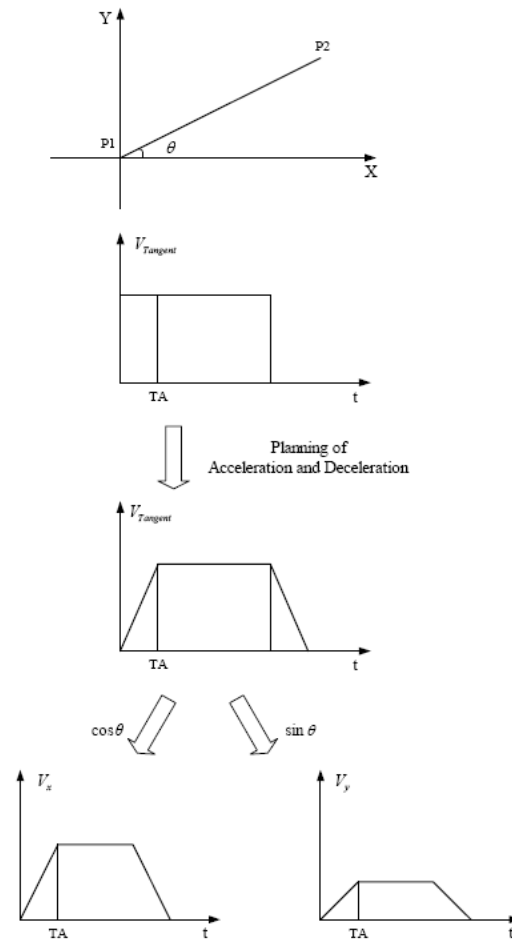
加減速模式有兩種，分別為前加減速與後加減速模式兩種。

(一).前加減速之插補方式

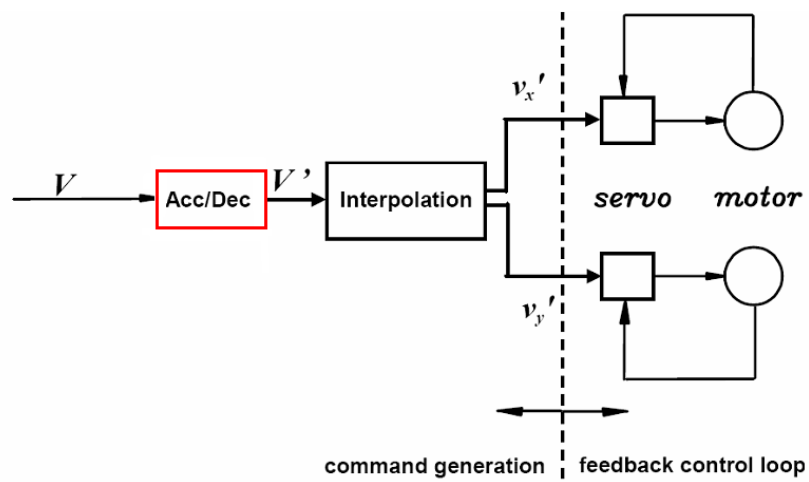
前加減速，在軌跡規劃時就須先考慮其加減速參數，先對切線速度做加減速規劃，根據運動路徑的幾何關係如直線或圓，求出各軸速度，其加減速的處理是沿著機構運動的切線方向，如圖二所示[2]。

前加減速架構示意圖，如圖三所示，此架構的加減速演算法在插補動做之前，首先將命令給的速度，依加減速演算法規劃出預定的速度曲線外形，之後在映射到各軸，即各軸可依速度曲線外形插補出位置命令，所以可以確保插補出的

命令是依循指定的輪廓產生的。



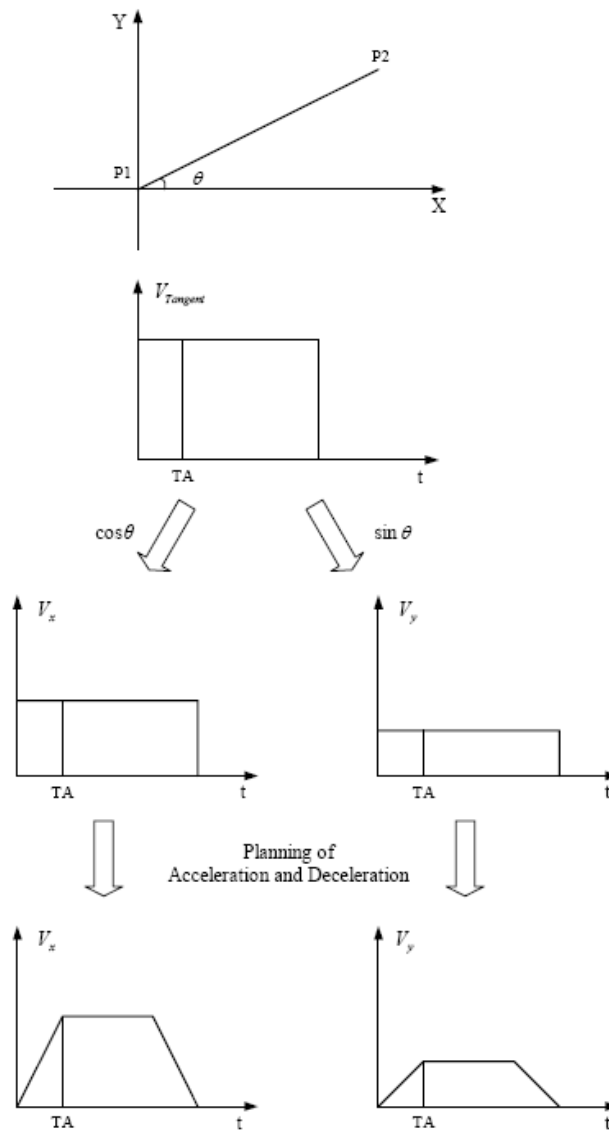
圖二、前加減速規劃流程



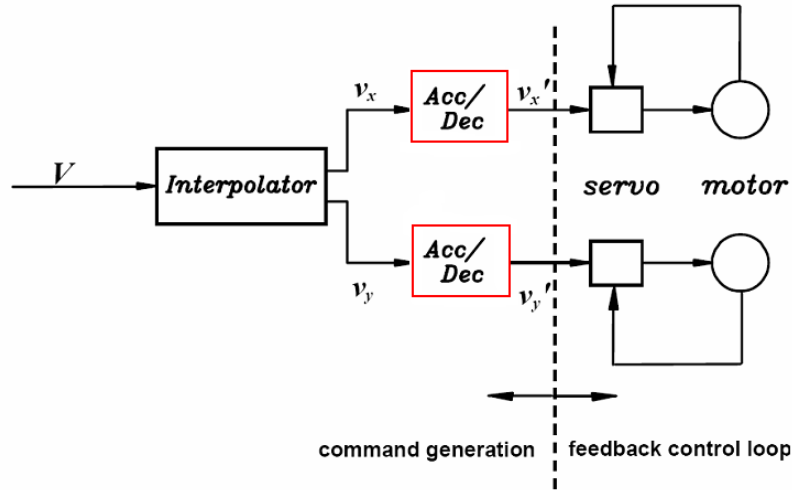
圖三、前加減速架構

(二).後加減速之插補方式

後加減速模式先將位置命令以等速度規劃，如圖四所示，在單位時間各軸的位移量，再經由數位濾波器運算，達成有加減速的位置插值命令。後加減速度模式，主要應用於直線小線斷命令，無法達到規劃之速度命令運動時，可使用此模式解決此問題，但此模式在轉角軌跡會有較大之定位誤差，並且圓形軌跡會有圓內縮之現象。



圖四、後加減速規劃流程



圖五、後加減速架構

而後加減速架構示意圖，如圖五所示。圖中 Acc/Dec 方塊，是運用移位暫存器的原理，將輸入的單位時間等速度位移量，經由權重的分配的相加，最後再取其平均，加減速之數學如式(1)。

$$V'[kT] = \frac{1}{b_s} \sum_{i=0}^{n-1} b_i \cdot V[(k-i)T] \quad (1)$$

V ：未經加減速

V' ：經過加減速

b_i ：速度曲線權重

b_s ：速度曲線權重總合

在加減速方面，如果採用後加減速，加減速是在各軸插值計算出之後各軸分別運算，則對於路徑命令本身就會產生一個誤差，以循圓為例，FANUC 提出誤差如式(2)所示[1]。

$$\Delta R = \frac{1}{2} (T_1^2 + T_2^2) \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

其中 ΔR ：最大循圓誤差

V ：循圓速度

R ：循圓半徑

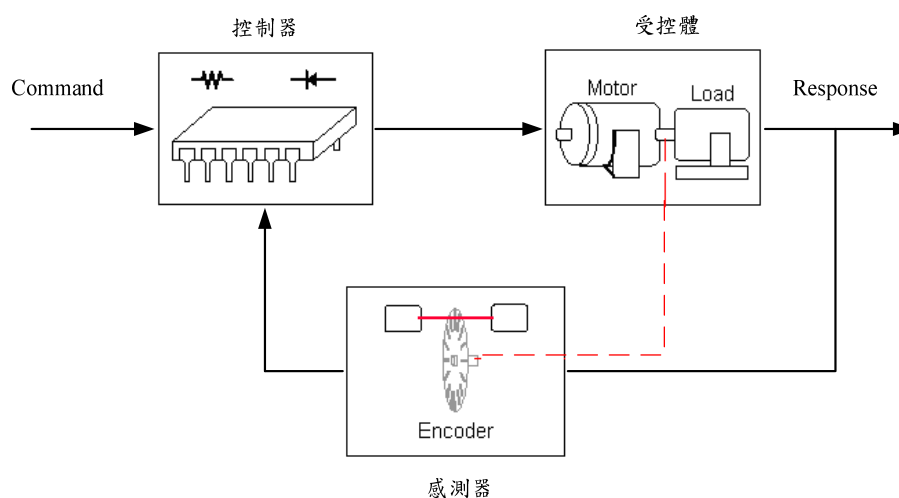
T_1 ：指數型加減速的時間常數

T_2 ：伺服馬達的時間常數(s)

由式(2)可知，速度越快誤差越大；半徑(或是曲率半徑)越小誤差越大；後加減速的時間常數越長誤差越大；伺服馬達時間常數越長誤差越大。所以，高速高精度控制，前加減速之插補方式，而且機台的剛性越好，伺服的時間常數可以調的越小，誤差越小。

控制迴路方面的改善

一個典型的閉路控制系統，如圖六所示，基本上由三個單元所組成：控制器(Controller)、受控體(Plant)與感測器(Sensor)。控制器根據所下達的參考命令與由感測器所測得的回授信號比較，所產生的誤差再經由控制定律計算出適當的修正信號送至受控體，因此控制系統的目的，即在於使系統能根據所期望之輸出，而有最快速與精確的反應。控制器之主要目的，即在於根據控制命令與回授信號，產生適當的修正信號，使系統有最佳的反應，而這個過程主要是完成控制定律(Control Law)的執行。



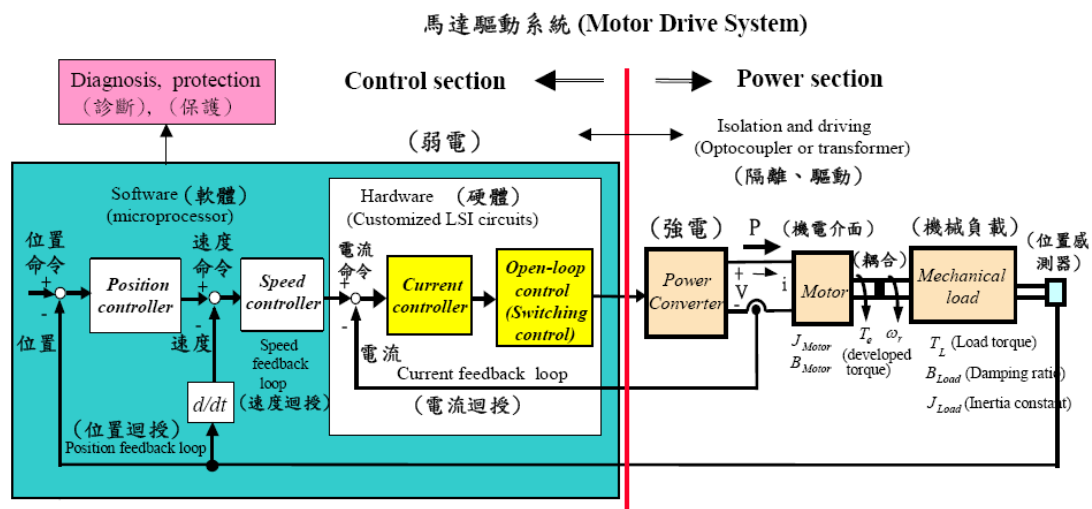
圖六、控制系統的方塊圖

控制器的設計可根據實際問題之需要而採取不同方法，近代控制理論所發展各種控制方法如：適應控制、強健控制、模糊控制(Fuzzy control)與類神經控制(Neural control)等，均可用來進行控制定律的設計。良好控制架構，可提高整個系統剛性，以增加其抵抗干擾(Disturbance)能力，增加系統精度(Performance)。

為提高對外部干擾力矩和系統參數變動所造成影響之抑制能力，一般高性能伺服控制系統，常利用於控制器中，以增加內迴路之方式增強系統穩健性

(Robustness)。基本上Cascade控制器，乃利用內迴路控制器高頻寬之設計，以阻斷干擾因子對外迴路受控變數之影響。其設計方法乃是將系統分解成數個獨立運做之子系統，每子系統採取適當的控制器做補償。

進給軸控制系統是這些組件裡最核心也是影響最大的子系統，在此子系統中完成對機台的三個控制迴路— 包括位置控制迴路、速度控制迴路、電流控制迴路，如圖七所示。位置控制迴路對加工路徑做高精度的位置控制，使得切削結果符合所要求的加工精度。速度控制迴路對速度命令做控制，因為命令中已涵蓋了加減速的量，所以必須控制精準才能使切削表面粗細度良好。電流迴路控制了對切削扭力的控制，也包括了對摩擦力的補償控制，此迴路也相當重要。



圖七、Cascade 控制架構

多軸的高精度軌跡控制器的設計。先建立一個好的控制架構，此控制系統必須包含了速度及電流前饋控制、位置迴路迴饋控制、摩擦補償等，讓多軸控制參數皆控制至一個高精度的組合，確保工具機具有良好的軌跡精度，進而得到後續良好的高精度加工。在降低動態誤差方面，必須藉由好的加減速控制、前饋補償的建立、非線性摩擦力的補償來達到增加精度的目的。

此時可以設計一組控制功能方塊來補償不同的路徑命令，摩擦，切削力量等等，這些控制方塊包括動態響應匹配(Dynamic Response Matching)，用來調整各軸使得阻抗相同；速度前饋控制(Speed Feedforward Control)，用來改善速度跟隨曲線；電流前饋控制(Current Feedforward Control)，用來改善扭力跟隨曲線；摩擦力補

償(Friction Compensation)，用來補償機台切削或是進給時所遇到的摩擦力問題[1]。以達到高速高精度之控制。

機構設計

除了主軸速度以及進給速度必須往上提升外，加減速也是一個重要的指標，因為速度提升了，加速減速在總加工時間上所佔的影響相對增多，但是要達到高的加減速，除了伺服系統必須具備大的扭力與功率之外，機台的設計也必須是剛性非常高的設計，才有辦法使加減速提高，否則就會造成極大的振動或是達不到指定的加減速[3]。

高速切削的加工，是以高的轉速、快的進給、小的切深、小的切削行距來進行加工，總體的加工時間會變短，工件的總受熱少，並且不易產生顫振，所以不僅增加了加工效率，並且降低了加工能耗(單位功率的材料切除率)，且能獲得較高的加工表面精度及粗細度品質。

所以，高速加工機床應具備下列特點，第一是微米級的加工精度；第二是高的剛性及輕量化的移動零件；第三是必須具備高速響應的伺服系統及高性能的運動控制器，必須有很短的插補週期，還需具備前饋控制。

並且在機台之加工過程，因為受熱對加工品質影響，必須對機台做溫度誤差補償等能力。

結語

精密定位系統的目標，簡而言之為“快”、“穩”、“準”；希望以最短的時間及最小之定位誤差(Positioning Error)穩定的將受控系統精確的驅動至指定位置。精密定位系統的應用層面廣闊，定位精度之要求日益提升，隨著精度的要求提昇，精密定位系統設計之困難度也越來越高。

本文所討論的主題，便是從控制命令、運動控制路徑加減速曲線規劃、控制迴路與機構設計等方向改善，並注重機械系統本身之精度，致動器、感測器的選擇與自動控制演算法則多方配合，才能達到高速且精密定位系統之控制，缺一不可。

參考文獻

- [1] 郭倫毓，”多軸加工機之智慧型之高速高精度軌跡控制”，博士論文，國立台灣大學機械工程研究所，民國90年
- [2] 黃志宏，” CNC 工具機之進給速度控制”，碩士論文，國立中央大學機械工程研究所，民國91年
- [3] 黃百毅，”智慧型精密定位控制系統設計”，博士論文，國立台灣大學電機學院研究所，民國89年
- [4] FANUC, *FANUC AC Servo motor a series parameter manual* , P180.