

伺服迴路前饋補償控制及調適  
Feedforward Controller Design and Parameter Tuning  
for Servo Loop

作者：<sup>1</sup>陳金聖、<sup>2</sup>陳立業、<sup>3</sup>葉宗祺、<sup>4</sup>李峰吉、<sup>5</sup>陳文泉

<sup>1</sup>臺北科技大學自動化科技研究所 副教授

<sup>2</sup>臺北科技大學自動化科技研究所 博士後研究

<sup>3</sup>臺北科技大學自動化科技研究所 博士生

<sup>4</sup>工業技術研究院機械工業研究所工程師

<sup>5</sup>工業技術研究院機械工業研究所經理

## 摘要

典型運動控制系統為串聯式控制架構，傳統各層迴路的控制增益設計均仰賴專家經驗的設計，耗費人力與時間，本文提出一 PDFF (Pseudo Derivative Feedback with Feedforward Gain) 速度迴路控制器與一修正型前饋控制器 (Modified feedforward controller)，並針對重複性軌跡，提出一個容易實現的前饋控制參數調整演算法。最後，上述演算法則將使用工研院的智慧型運動控制平台 (Intelligent Motion control Platform, IMP) 及雙軸運動平台進行驗證。

關鍵詞：速度迴路控制器、前饋控制器、參數調整、IMP 運動控制卡

## ABSTRACT

The cascaded control structure is most applied in industrial motion control applications. However, the parameters tuning in the servo controllers are almost depended on experts' experiences, and it is time consuming to get the optimal controller gains. In this study, we propose an integral servo controller scheme including a pseudo derivative feedback with feedforward gain (PDFF) controller and a modified feedforward controller. The proposed velocity controller involves most typical velocity loop control scheme; and the feedforward controller can be designed to improve the tracking performance. The systematic tuning algorithm of feedforward controller is further proposed to get optimal parameters in the application of repeated trajectory. Finally, the above algorithms will be implemented in ITRI's intelligent motion control platform (IMP) to control a bi-axes motion system. The experimental results are used to verify the performance assessment for our proposed algorithms.

Key words : velocity loop controller, pseudo derivative feedback with feedforward gain controller, feedforward controller, parameters tuning, IMP

## 一、前言

近年來，PC 工業技術快速地發展已經深深影響到機械製造業，而目前國內雖有中、小型廠商設計研發 CNC 運動控制器，但受限於國內市場狹小與資金不足，不易提升工具機之技術層面，僅開發出相關的週邊控制板或簡易的工具機；另外，國內當前學術界與產業界從事運動控制器的研發工作，在軟、硬體設計上均較缺乏深入的學理探討和實務技術根基，目前雖有自行研發的 CNC 運動控制器上市，但其軟體使用者介面、加工精度以及加工速度一直未能足與美、日及歐洲產品競爭。另外，在伺服迴路的控制參數調整方面，以往均採手動的方式來調適參數，不僅調適時間較長，且需要擁有專業經驗的專家方可做到。

## 二、研究目的

對於伺服控制系統而言，準確的定位能力、減少追蹤誤差與增加系統抗干擾能力，一直是產業界與學術界持續努力的目標，而目前工業常用之馬達控制迴路為串聯式伺服控制架構(Cascade Control Loop)，其中包含電流迴路(Current Loop)、速度迴路(Velocity Loop)與位置迴路(Position Loop)，而在各層級的控制迴路中，皆採用 PID 的控制法則，其優點為調整各控制參數相對於系統性能影響的直覺性，如比例(Proportional)增益為增快系統響應，積分(Integral)增益則是消除穩態誤差，但缺點則是固定控制增益，無法在加工條件改變或是系統受外擾工作環境中，維持運動控制精度要求，因此近年來日系的馬達伺服模組皆引進能自我增益調適功能或是適應控制演算法來加以克服。當迴授控制無法滿足追蹤規格需求時，通常控制系統可藉由前饋控制器的設計來增加系統追蹤能力，但是前饋控制器的補償效益更是直接受系統動態變化影響，故反應系統變化的參數修正更是必要的。本文之重點為位置前饋控制器設計及其參數調整策略。

針對速度迴路與位置迴路之控制器設計[1~3]，經馬達系統參數鑑別實驗後，可得知馬達轉動慣量(System Inertia)與黏滯係數(Viscous Coefficient)參數，本文之完整控制架構如圖 1 所示，其中，速度迴路採用 PDFF 控制器的架構與改變 $\gamma$ 、 $K_{vp}$ 與 $K_{vi}$ 的數值，使系統介於 P-I 和 I-P 控制器架構響應特性。目前工業界廣泛使用的速度迴路控制架構大部分仍為傳統 PID 控制器，而本文中所設計的速度迴路為 PDFF 型控制架構，此控制型態可包含目前市面上所使用的任何一種速度迴路控制器 [4~6]。當改變 $\gamma$ 、 $K_{vp}$ 與 $K_{vi}$ 的數值，將形成不同的控制器並達成使用者所需求的響應特性。

另外，增加伺服系統能力消除追蹤誤差(Tracking Error)與輪廓誤差(Contour Error)以提高機械系統之精密程度，一直是產業界與學術界持續努力的目標 [7,8]。目前，前饋控制器對於提升伺服能力擁有顯著的強化作用，本文中將加入速度(Velocity)、加速度(Acceleration)與急衝量(Jerk)前饋控制器，增加系統的伺服與追蹤能力。一般而言，設計控制器均依使用者對於性能的要求，做控制器的參數調整，不過絕大多數的控制器調整方式均仰賴手動方式調適，但是採用手動的方式調適不僅調適時間過長，且須擁有專業經驗的人才方能做到。文中將針對一重複性軌跡，提出前饋控制器之參數調整法則，以降低追蹤誤差滿足系統追蹤性能，本文提出之速度控制器與前饋控制器架構如圖 1 所示。

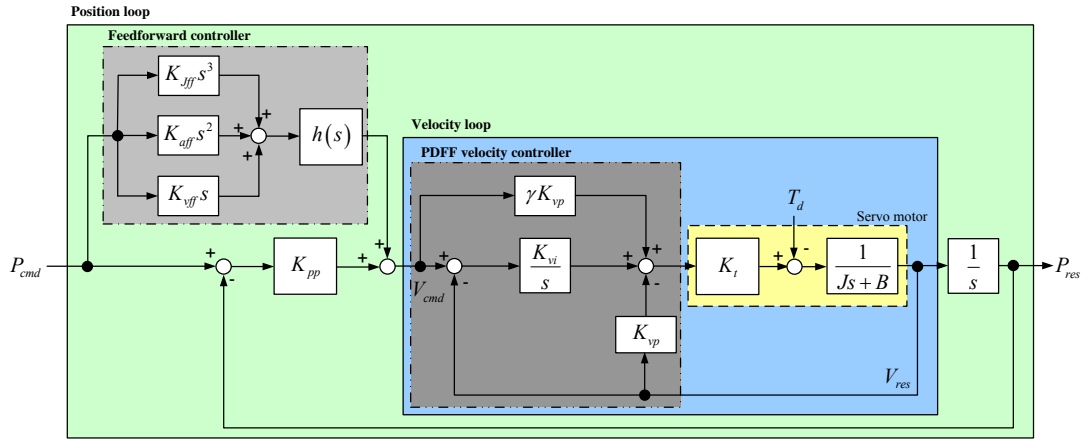


圖 1 伺服控制迴路架構圖

### 三、速度控制器與位置控制器設計

#### 3-1 速度控制器設計

文中提出之速度迴路控制架構如圖 2 所示，係利用改變  $\gamma$ 、 $K_{vp}$  與  $K_{vi}$  之數值，形成不同架構之控制器，並達成使用者需求之響應特性。本文提出之控制器型態可包含目前市面上所使用之任意一種速度迴路控制器。

$$\frac{V_{res}}{V_{cmd}} = \frac{K_t(\gamma K_{vp}s + K_{vi})}{Js^2 + (B + K_{vp}K_t)s + K_{vi}K_t} \quad (1)$$

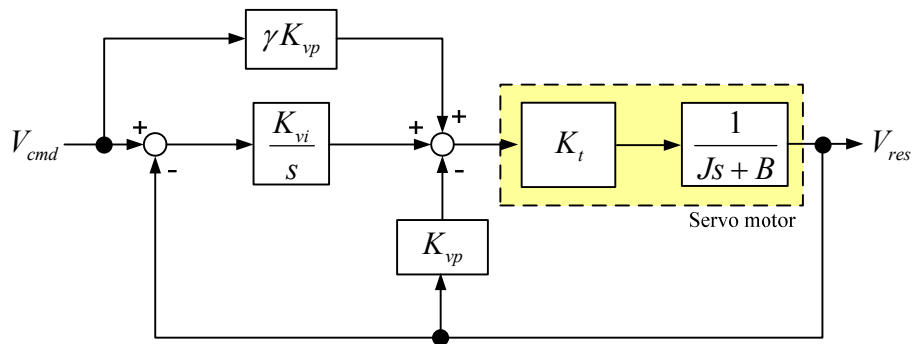


圖 2 PDF 速度迴路

若在加入干擾之影響，則其架構如圖 3 所示。

$$V_{res} = \frac{K_t(\gamma K_{vp}s + K_{vi})}{Js^2 + (B + K_{vp}K_t)s + K_{vi}K_t} V_{cmd} + \frac{-s}{Js^2 + (B + K_{vp}K_t)s + K_{vi}K_t} T_d \quad (2)$$

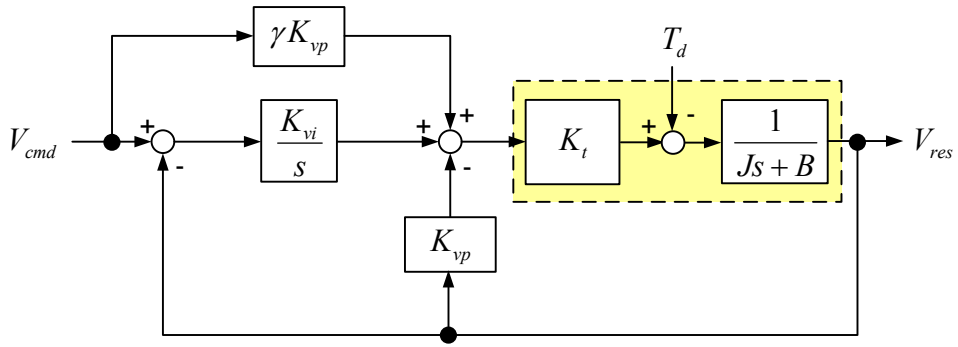


圖 3 PDFF 速度迴路(有干擾)

由上式推導結果可知，速度響應受速度命令與干擾之影響，並且干擾的抑制並不會因文中提出之變數架構 $\gamma$ 所影響。

### 3-2 位置迴路控制器設計

在速度迴路之轉移函數推導中，可進一步將文中速度控制器簡化成

$$V(s) = \frac{\gamma K_t K_{vp} s + K_t K_{vi}}{Js^2 + (B + K_{vp} K_t)s + K_{vi} K_t} = \frac{V_C s + V_D}{s^2 + V_A s + V_B} \quad (3)$$

多數的位置迴路設計均採用簡易的增益控制器( $K_{pp}$ )，其控制方塊圖如圖 4 所示。

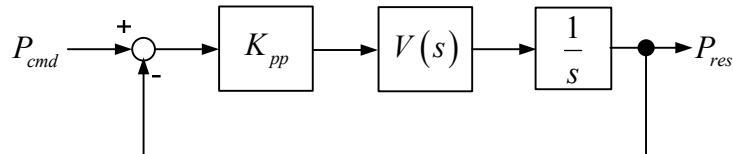


圖 4 位置迴路控制器方塊圖

因此，可推導獲得

$$\frac{P_{res}}{P_{cmd}} = \frac{K_{pp} V(s)}{s + K_{pp} V(s)} = \frac{K_{pp} V_C s + K_{pp} V_D}{s^3 + V_A s^2 + (V_B + K_{pp} V_C)s + K_{pp} V_D} \quad (4)$$

一般而言，位置迴路控制器設計，根據 Cascade 設計控制器原則，將位置迴路頻寬設計為速度迴路控制器之頻寬之  $1/5 \sim 1/10$  倍，如此即可獲得位置迴路比例增益( $K_{pp}$ )之值。

#### 四、前饋控制器設計

然而，為了提升伺服追蹤性能，最常使用的方式乃加入前饋控制器，架構如圖 5 所示，其系統轉移函數為

$$\frac{P_{res}}{P_{cmd}} = \frac{(K_{pp} + FF(s))V(s)}{s + K_{pp}V(s)} \quad (5)$$

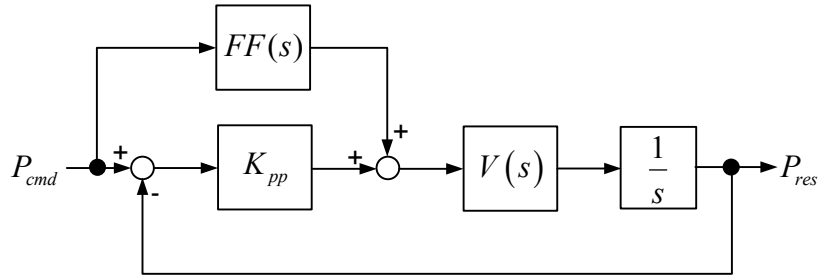


圖 5 位置迴路前饋控制器方塊圖

由於，位置迴路控制器之最終想法，即使得命令與響應達成完美的追蹤控制，即  $\frac{P_{res}}{P_{cmd}} = 1$ ，因此，前饋控制器設計須滿足：

$$\begin{aligned} s + K_{pp}V(s) &= (K_{pp} + FF(s))V(s) \\ FF(s) &= \frac{s}{V(s)} \end{aligned} \quad (6)$$

##### 4-1 前饋控制器設計

文中提出的前饋控制器架構如圖 6 所示，根據式(6)轉移函數為

$$\begin{aligned} FF(s) &= \frac{s^3 + V_A s^2 + V_B s}{V_C s + V_D} \\ &= \frac{1}{V_C s + V_D} s^3 + \frac{V_A}{V_C s + V_D} s^2 + \frac{V_B}{V_C s + V_D} s \\ &= \left( \frac{1}{V_D} s^3 + \frac{V_A}{V_D} s^2 + \frac{V_B}{V_D} s \right) \frac{V_D}{V_C s + V_D} \\ FF(s) &= (K_{jff} s^3 + K_{dff} s^2 + K_{vff} s) \cdot h(s) \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $h(s) = \frac{V_D}{V_C s + V_D}$ ，可將其視為一低通濾波器(Low Pass Filter)， $K_{jff} = \frac{1}{V_D}$ ， $K_{aff} = \frac{V_A}{V_D}$ ， $K_{vff} = \frac{V_B}{V_D}$ 。很明顯地，此設計方式之前饋控制器架構，須使用 Jerk、Acceleration 與 Velocity 資訊。

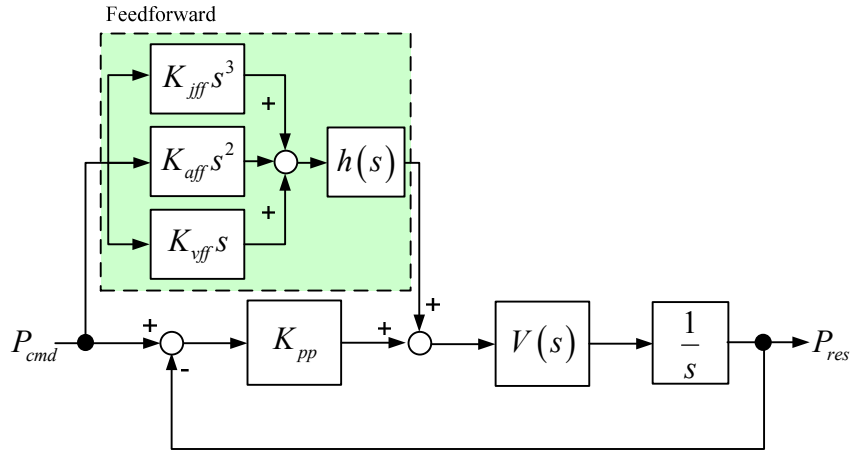


圖 6 前饋控制器架構

#### 4-2 前饋控制器參數分析

我們在前饋控制器之前，各別加入增益  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$ ，如圖 7 所示，觀察  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$  變動對系統響應之影響，其中  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$  的值均介於 0 與 1 之間，可藉由調整  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$  值來降低響應的過衝量與避免電壓命令飽和(Saturation)之情形發生。

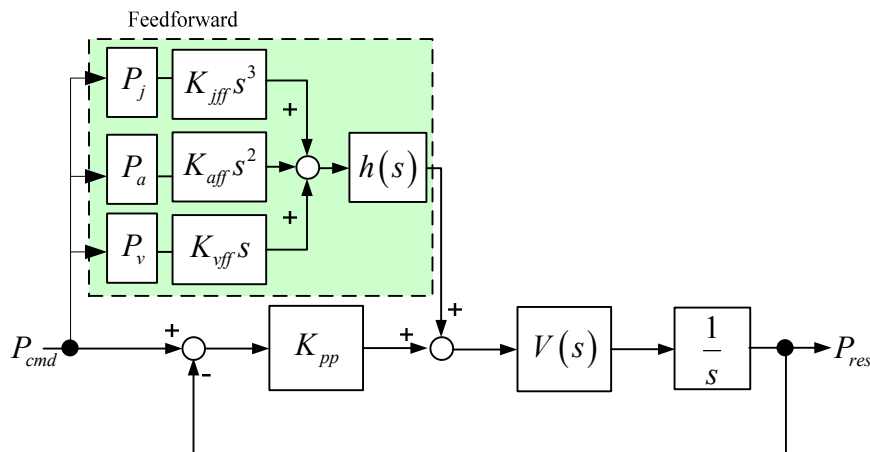


圖 7 前饋控制器架構

首先，藉由實際鑑別演算法搜尋出之馬達相關參數與位置控制器參數如表 1 示，速度迴路與位置迴路頻寬如圖 8 所示，經由控制器參數之設計，速度迴路及位置迴路之頻寬分別為 86.9 Hz 與 5.9 Hz。

表 1 馬達相關參數表

| 馬達型號 | SGMGV-09ADA21            |                   |
|------|--------------------------|-------------------|
| 參數   | 鑑別結果                     | 單位                |
| J    | $1.955 \times (10^{-3})$ | Kg-m <sup>2</sup> |
| B    | 0.000148                 | N-m/sec           |

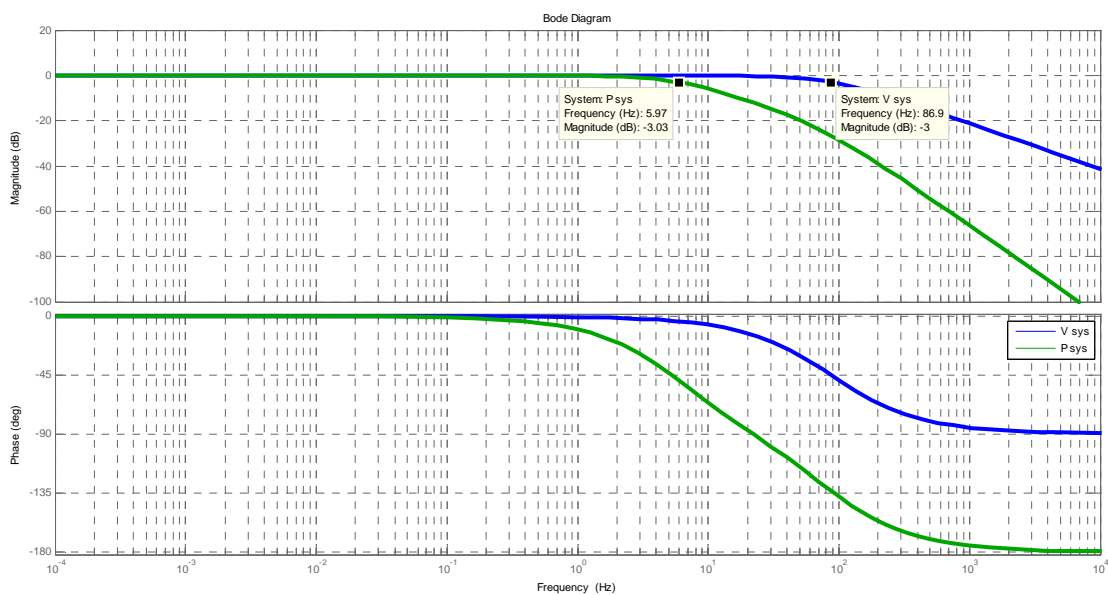


圖 8 速度控制器與位置控制器波德圖

接著則是分析出這些參數中，誰的變動對系統響應影響較為明顯，也就是找出主導系統響應之變數。加入該型前饋控制器之轉移函數為

$$T_1(s) = \frac{P_{res}}{P_{cmd}} = \frac{K_{iff} P_J V_D s^3 + K_{aff} P_A V_D s^2 + (K_{vff} P_V V_D + K_{pp} V_C) s + K_{pp} V_I}{s^3 + V_A s^2 + (V_B + K_{pp} V_C) s + K_{pp} V_D} \quad (8)$$

圖 9 為各別加入不同前饋控制器的頻率響應，圖中顯示，僅有回授控制器之系統響應並不理想；而加入速度前饋後，系統響應與僅有回授控制器之響應類似；加入加速度前饋後，系統響應提升許多，不過有些許的 Overshoot 現象發生；當更進一步加入 Jerk 前饋後，頻寬更加提升，Overshoot 現象亦獲得抑制，近乎完美追蹤。



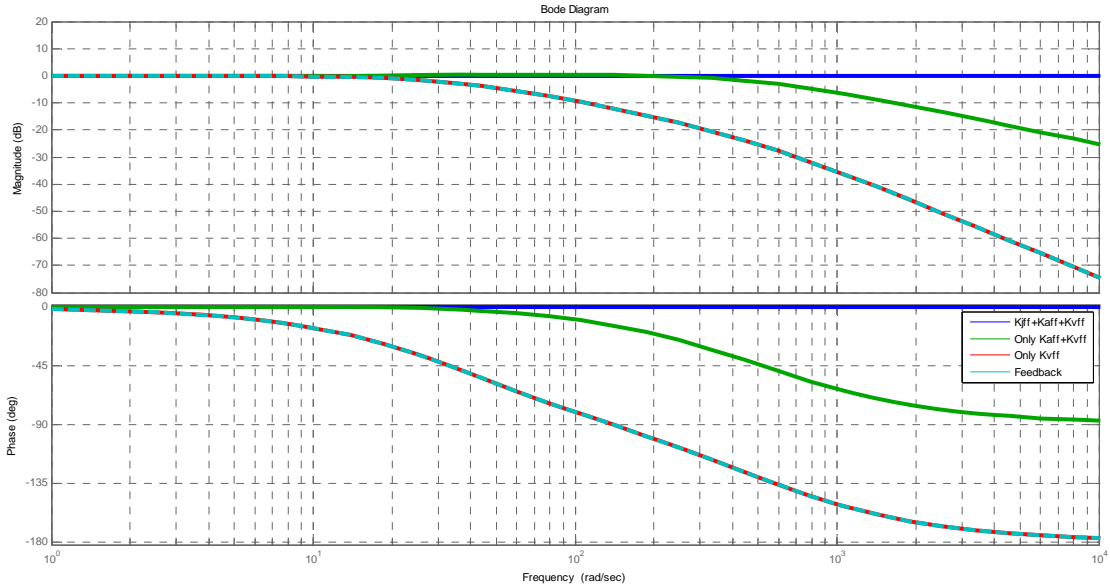


圖 9 位置迴路與前饋控制頻率響應圖

分別對  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$  作偏微分，則得到系統閉迴路轉移函數對  $P_J$ 、 $P_V$  與  $P_A$  的敏感度之關係式如下

$$S_{P_J} = \frac{\partial T_1(s)}{\partial P_J} = \frac{K_{jff} V_D s^3}{s^3 + V_A s^2 + (V_B + K_{pp} V_C) s + K_{pp} V_D} \quad (9)$$

$$S_{P_A} = \frac{\partial T_1(s)}{\partial P_A} = \frac{K_{aff} V_D s^2}{s^3 + V_A s^2 + (V_B + K_{pp} V_C) s + K_{pp} V_D} \quad (10)$$

$$S_{P_V} = \frac{\partial T_1(s)}{\partial P_V} = \frac{K_{vff} V_D s}{s^3 + V_A s^2 + (V_B + K_{pp} V_C) s + K_{pp} V_D} \quad (11)$$

各別對以上三式做波德圖(Bode Plot)，如圖 10 所示。從圖上可看出在極低頻時 Jerk 前饋參數對系統閉迴路轉移函數的敏感度最小，速度前饋參數對系統閉迴路轉移函數的敏感度最大，換言之，當  $P_J$  變動對系統的響應變化較無明顯變化，而變動  $P_A$  與  $P_V$  對系統響應影響較大；而在 72hz 以上時速度前饋參數對系統閉迴路轉移函數的敏感度最小，Jerk 前饋參數對系統閉迴路轉移函數的敏感度最大，即  $P_V$  變動對系統的響應變化較無明顯變化，而變動  $P_A$  與  $P_J$  對系統響應影響較大。不過，由於一般多數應用輸入訊號均為位置命令，速度為位置命令之差分，加速度與 Jerk 為速度與加速度之差分，在差分的過程中，會引入高頻訊號的影響，因此，使用此型控制器進行參數調適時，必須先確認輸入命令的平滑程度。

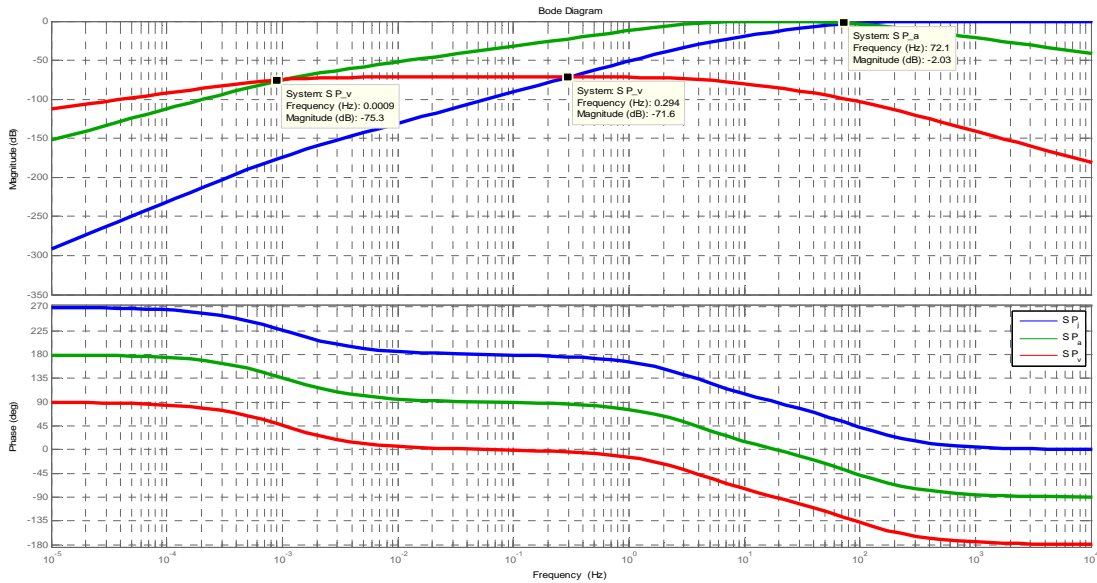


圖 10 位置迴路與前饋控制頻率響應圖

#### 4-3 前饋控制參數與輸入命令分析

由於前饋控制器的輸入命令是由我們設計，其包含有 Jerk、加速度與速度，因此我們先分析使用者設計的輸入命令時域資訊，以速度命令為討論的基底。我們將速度命令圖細分為 7 個區域，如圖 11 所示，即各時間區域中包含有不同的輸入命令，配合進入前饋控制器中，相關資訊如表 2 所示。

表 2 輸入命令與前饋控制器相關聯表 (A 為加速度，V 為速度)

| 時間區域 | 變加速度區間                            | 等加速度區間(+)             | 變加速度區間                            | 等速區間      | 變加速度區間                            | 等加速度區間(-)             | 變加速度區間                            |
|------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
|      | (1)                               | (2)                   | (3)                               | (4)       | (5)                               | (6)                   | (7)                               |
| 輸入命令 | Jerk、A 與 V                        | A 與 V                 | Jerk、A 與 V                        | V         | Jerk、A 與 V                        | A 與 V                 | Jerk、A 與 V                        |
| 前饋係數 | $K_{jff}$ 、 $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ | $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ | $K_{jff}$ 、 $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ | $K_{vff}$ | $K_{jff}$ 、 $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ | $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ | $K_{jff}$ 、 $K_{aff}$ 與 $K_{vff}$ |
| 調整增益 | $P_J$ 、 $P_A$ 與 $P_V$             | $P_A$ 與 $P_V$         | $P_J$ 、 $P_A$ 與 $P_V$             | $P_V$     | $P_J$ 、 $P_A$ 與 $P_V$             | $P_A$ 與 $P_V$         | $P_J$ 、 $P_A$ 與 $P_V$             |

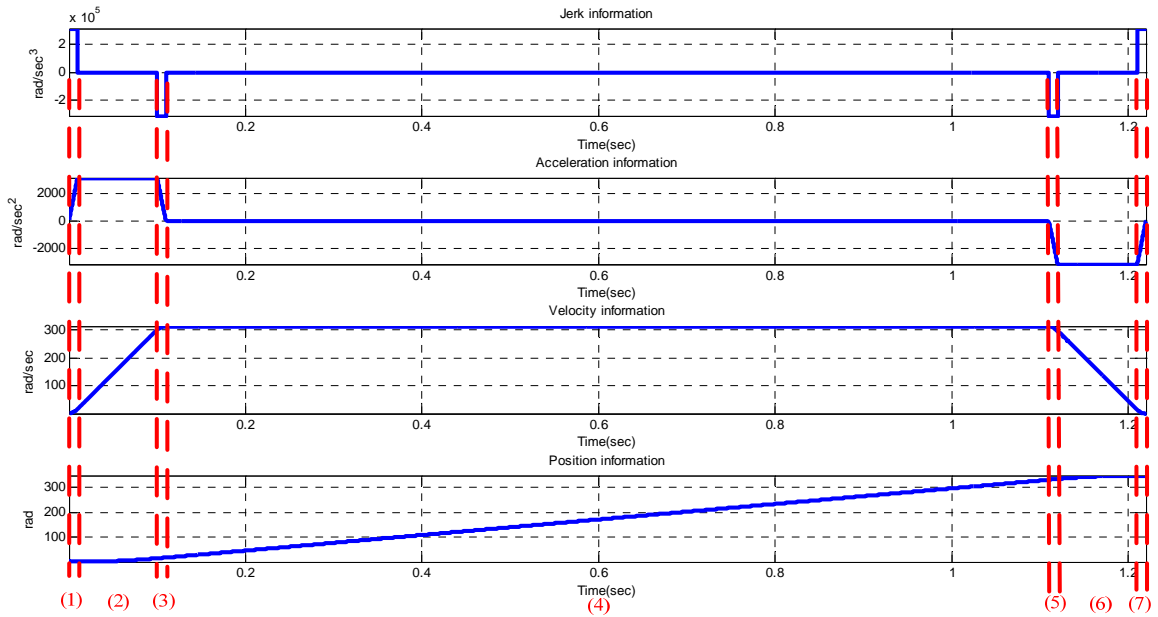
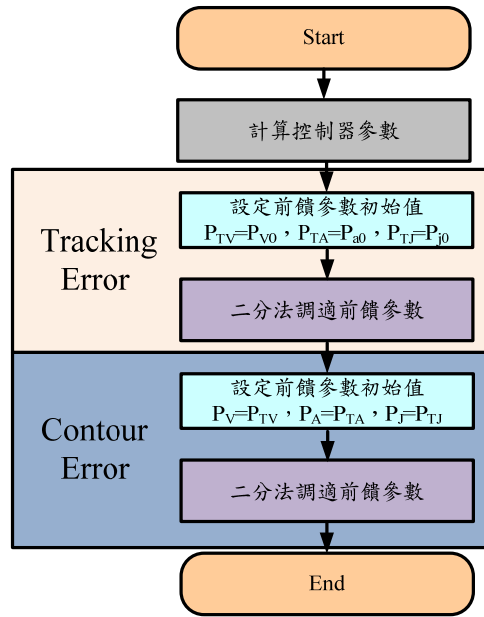


圖 11 輸入命令時間區域圖

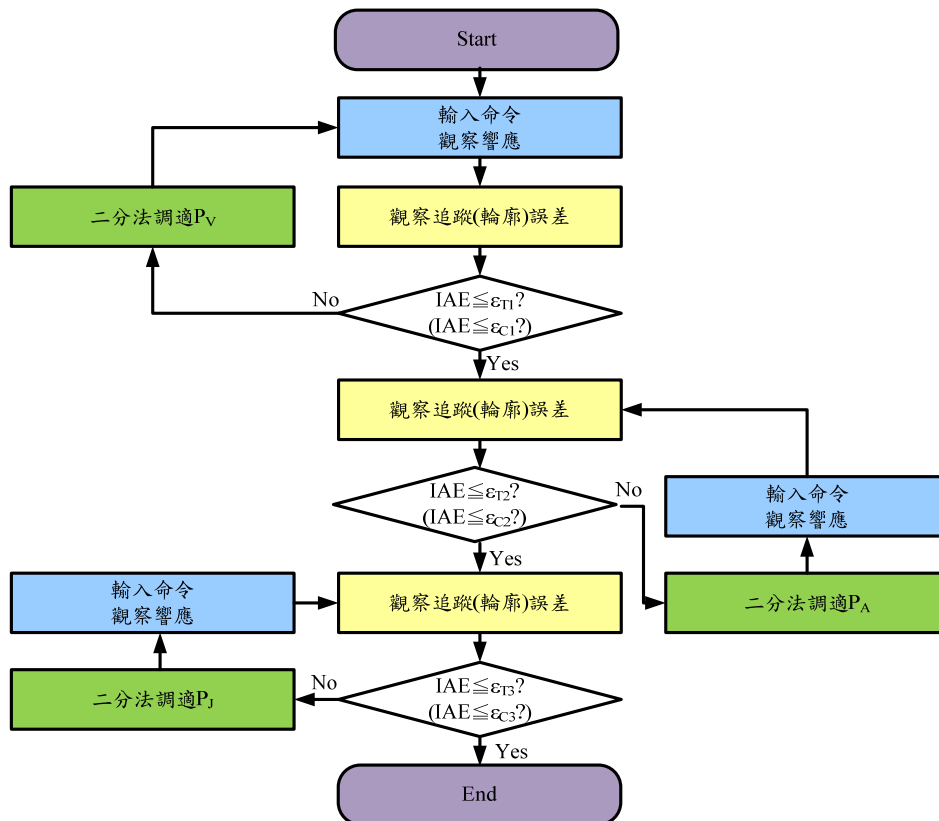
經過以上分析，我們可以歸納相對應的參數調適方式，當系統處於變加速度區間時[區間(1)、(3)、(5)與(7)]，相關聯的調變係數最多，反之，當系統處於等速區間時，相關聯之調變係數僅有一個( $P_V$ )，如此一來可先藉由觀察等速區間之位置誤差，調適速度前饋之增益，爾後再進入等加速度區間[(2)與(6)]，調整加速度前饋之增益，最後，再觀察變加速度區域[(1)、(3)、(5)與(7)]，調整 Jerk 前饋之增益，完成整體前饋控制迴路參數調適之工作，以達到最佳的追蹤性能。

#### 4-4 前饋控制器參數調適流程

透過圖 12 的調適流程可以讓使用者依據不同需求的特性，如：追蹤誤差或者是追蹤效益的響應特性調適前饋控制器參數。首先透過追蹤誤差特性，利用二分法對  $P_V$  進行調適，接著利用  $P_A$  進行粗調系統響應，當系統無過衝與飽和時，再進一步藉由  $P_J$  對系統進行微調。接著使用者可由第二個指標輪廓誤差(Contour Error)特性，利用二分法進一步去調適更符合使用者所需要的輪廓追蹤效能。



(a)



(b)

圖 12 前饋控制器參數調適流程圖：(a)前饋控制器參數調適方式(b)二分法調適方式  
( $\epsilon_{T1}$ 、 $\epsilon_{T2}$ 、 $\epsilon_{T3}$ 、 $\epsilon_{C1}$ 、 $\epsilon_{C2}$ 、 $\epsilon_{C3}$  為各區間容許誤差)

## 五、實驗

### 5-1 實驗設計

實驗參數設定：

- 操作環境：VxWorks 6.0 + IMP
- 取樣時間：1 msec
- 實驗平台：Mitsubishi MRJ2S-10A，型號為：HC-KFS13，如圖 13 所示。
- 實驗配置：如圖 14 所示。
- 實驗命令：NURBS 產生的人臉軌跡圖，如圖 15。
- 實驗參數：如表 3

表 3 實驗參數

| Parameters                  | Parameters of x-y stage |        |        |
|-----------------------------|-------------------------|--------|--------|
|                             | Unit                    | X axis | Y axis |
| Torque coeffi. $K_t$        | $N \cdot m/Vot$         | 0.1066 | 0.1066 |
| Motor inertia $J_m$         | $10^{-4} kg \cdot m^2$  | 0.084  | 0.084  |
| Ball-screw pitch $P$        | $mm/rev$                | 10     | 10     |
| Resolution of motor encoder | $pulse/rev$             | 8192   | 8192   |



圖 13 實驗平台

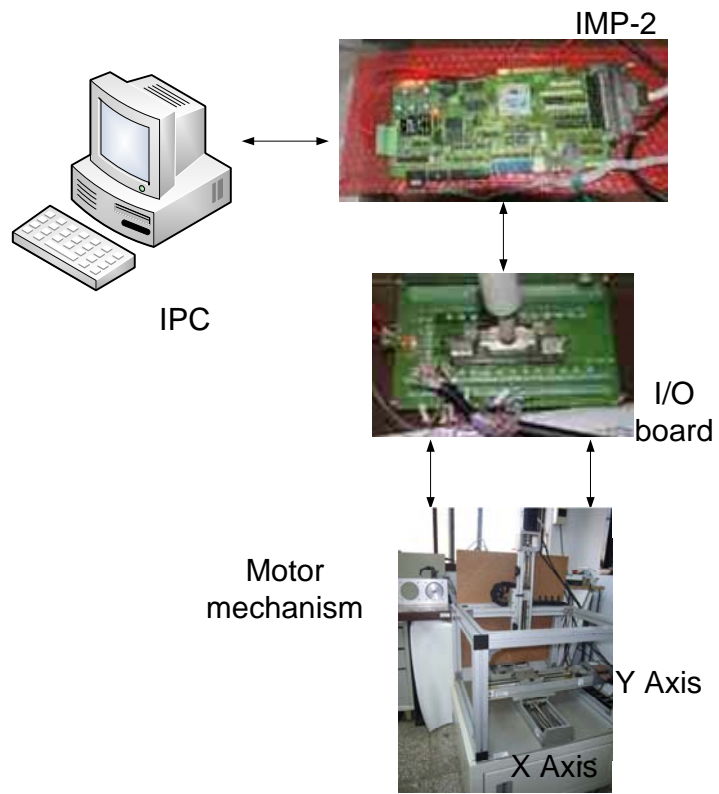


圖 14 實驗配置圖

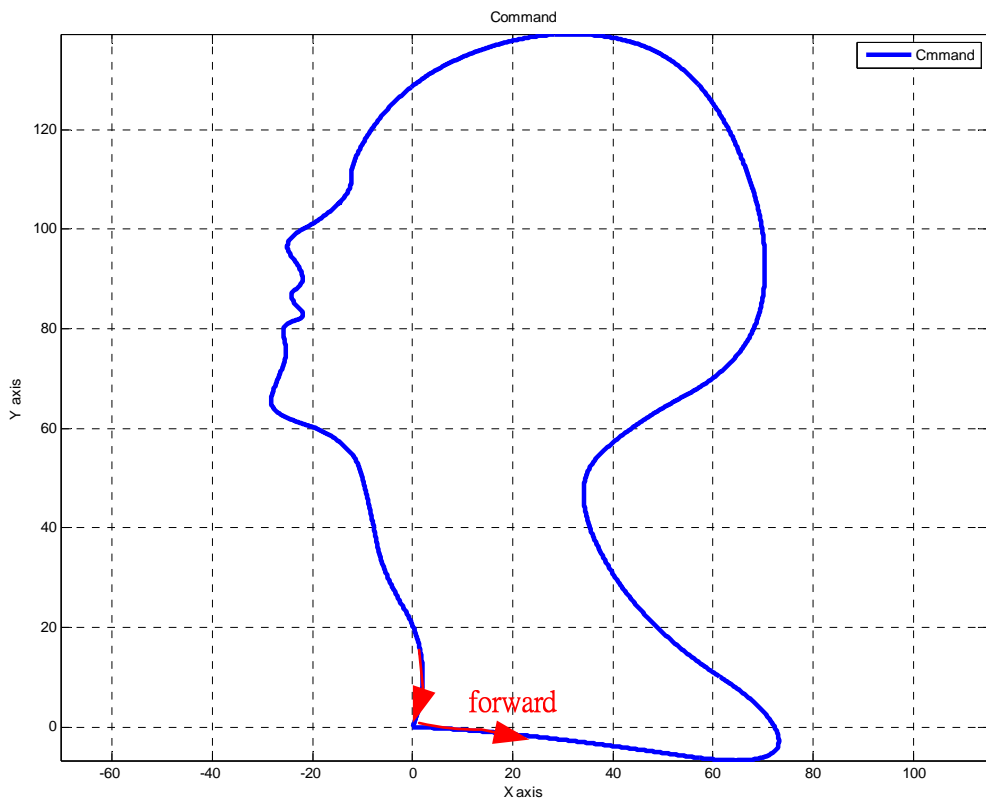


圖 15 雙軸 NURBS 軌跡命令 (單位為 mm)

## 5-2 實驗結果

在此我們有兩個性能指標，追蹤誤差與輪廓誤差，利用圖 12 的流程首先對追蹤誤差進行調適，調適完後再對輪廓誤差進行調適即可達到所需求的性能結果。在追蹤誤差指標中我們分別針對 X 軸與 Y 軸進行二組實驗，一為未加前饋控制器之實驗，另一為加入前饋控制器之實驗。

### 5-2-1 未加前饋控制器追蹤實驗結果

X 軸與 Y 軸位置響應如圖 16 與圖 17 所示。

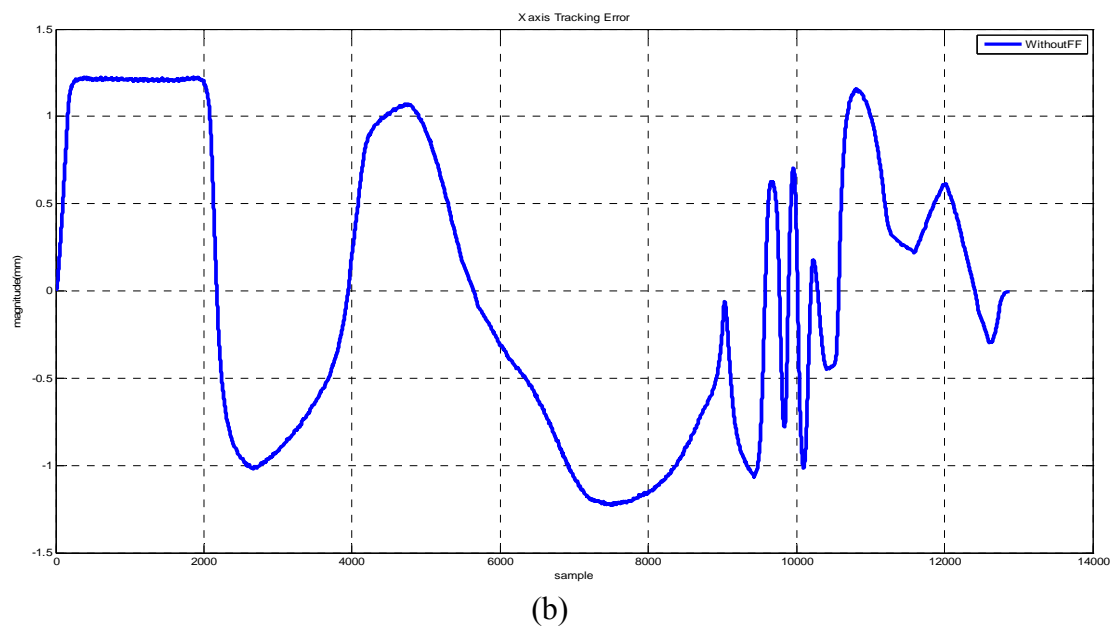
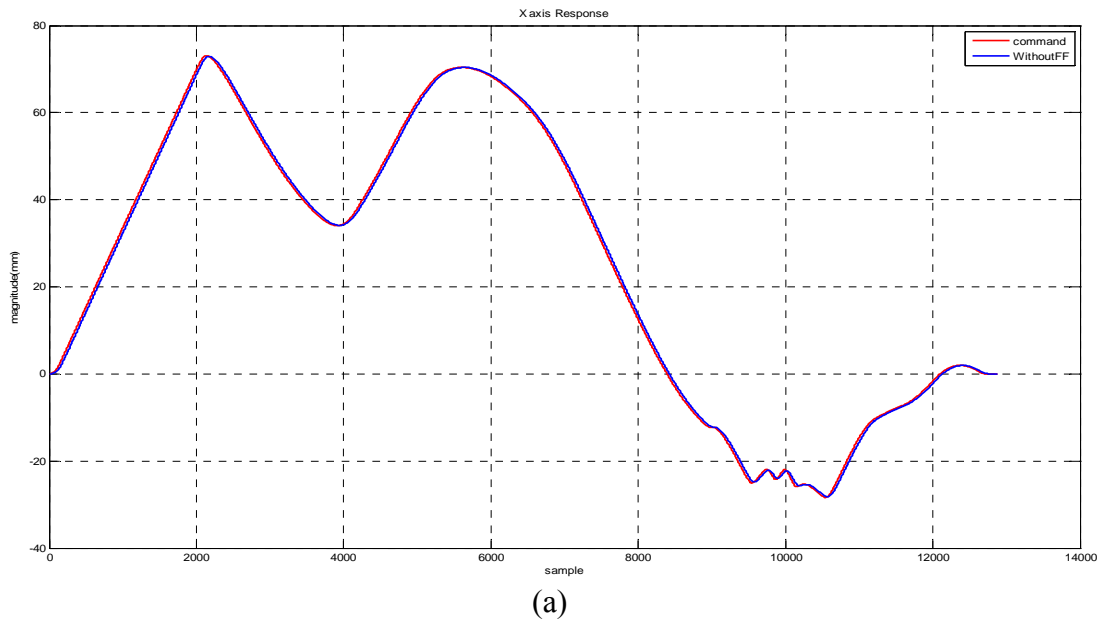


圖 16、X 軸位置響應實驗圖(未加前饋控制器)：(a)命令響應比較圖(b)追蹤誤差圖

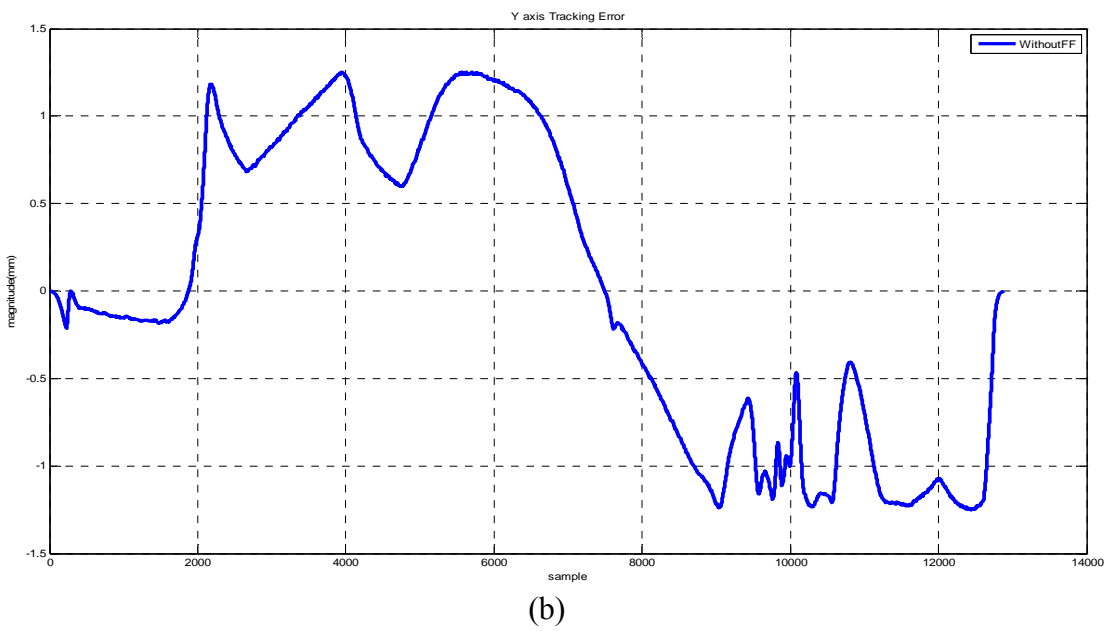
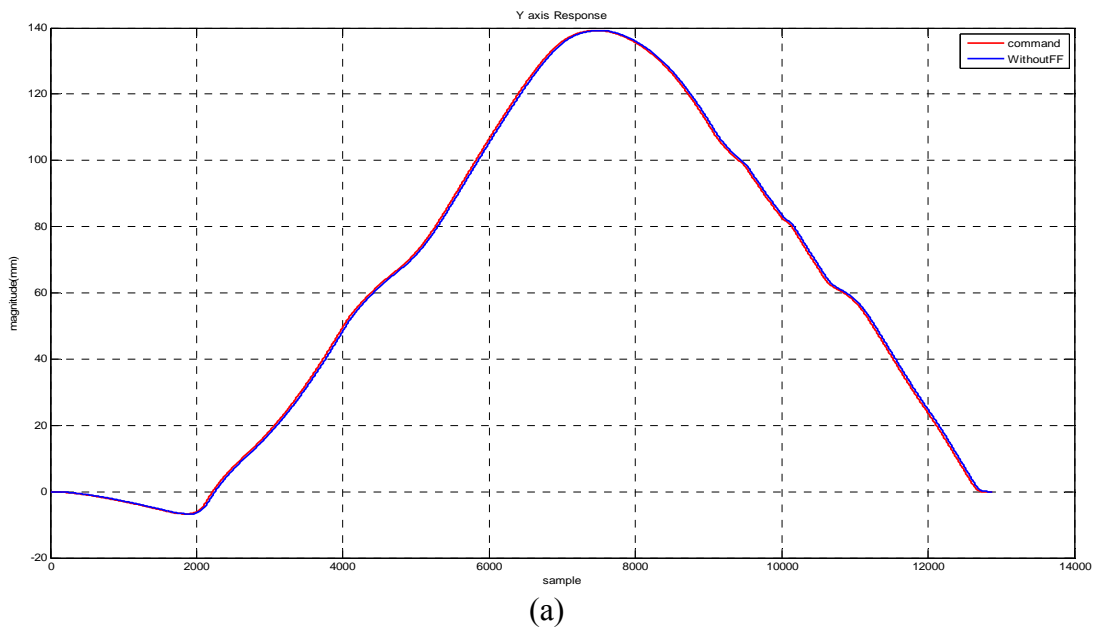


圖 17、Y 軸位置響應實驗圖(未加前饋控制器)：(a)命令響應比較圖(b)追蹤誤差圖



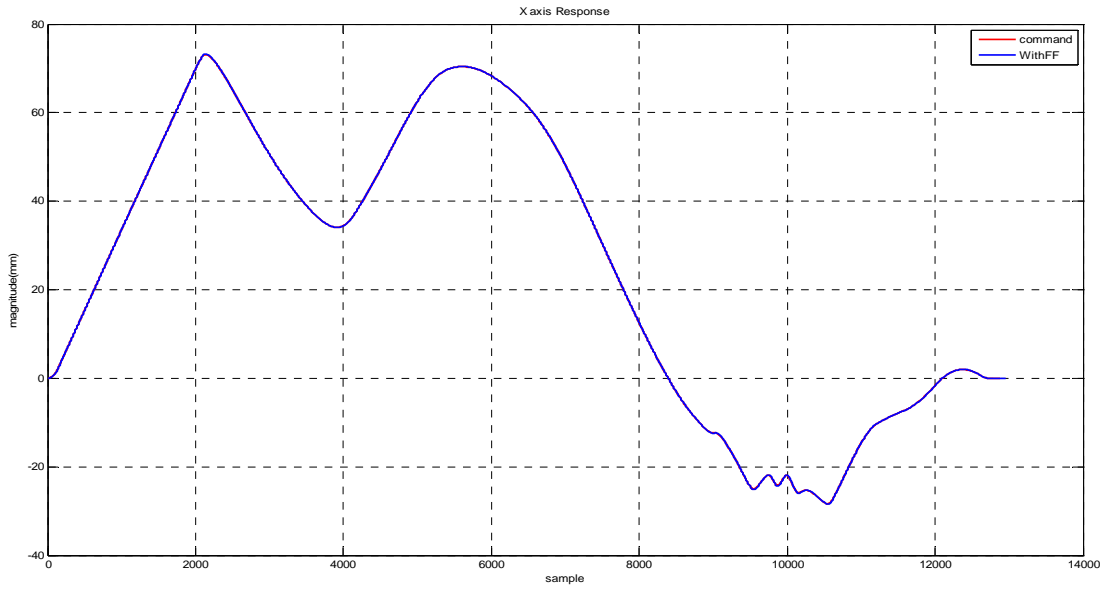
## 5-2-2 加入前饋控制器實驗結果

### 5-2-2-1 追蹤誤差調適方法與實驗結果

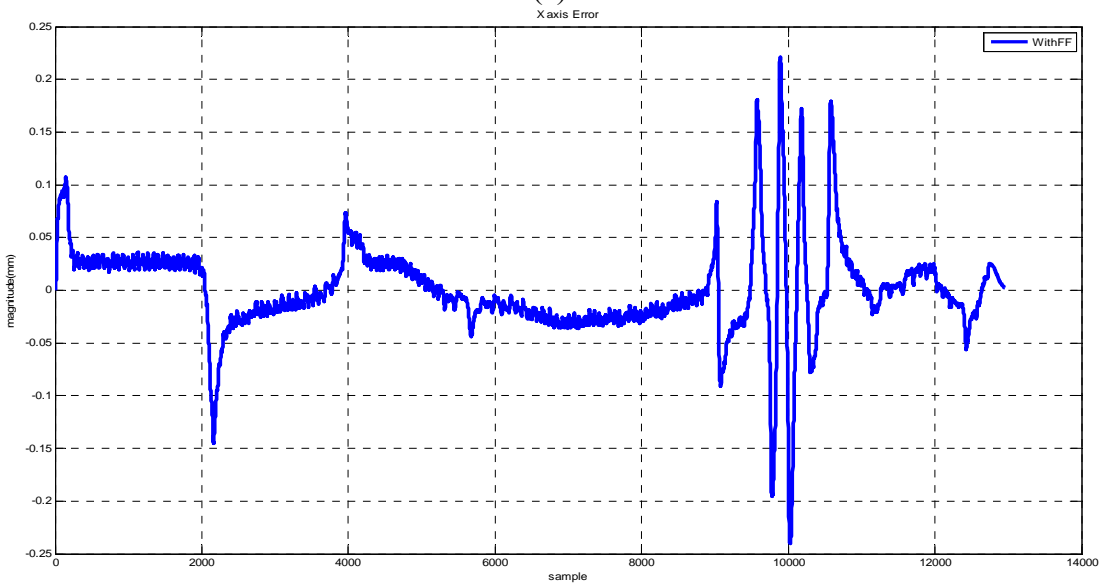
表 4 為不同前饋參數調整 IAE 資訊，變化各參數後可得到馬達單軸追蹤誤差特性之 IAE 數據，如同圖 12 調適流程，第一步調適  $P_V$  可得知為 0.75 時其誤差最小，接著依序調適  $P_A$  與  $P_J$ ，可依據使用者所想要的誤差特性得到一組前饋參數。加入前饋控制器後之 X 軸與 Y 軸位置響應如圖 18 與圖 19 所示，X 軸最大追蹤誤差由  $\pm 1.2\text{mm}$  降低為  $\pm 0.25\text{mm}$ ，而 Y 軸最大追蹤誤差由  $\pm 1.2\text{mm}$  降低為  $\pm 0.15\text{mm}$  以內。

表 4、各軸追蹤誤差 IAE 表

| $P_V$ | $P_A$ | $P_J$ | IAE(tracking error)       |                           |
|-------|-------|-------|---------------------------|---------------------------|
|       |       |       | X axis( $\times 10^3$ mm) | Y axis( $\times 10^3$ mm) |
| 1     | 1     | 1     | 2.9603                    | 6.01                      |
| 0.5   | 1     | 1     | 3.3911                    | 6.87                      |
| 0.75  | 1     | 1     | 0.3768                    | 0.698                     |
| 0.62  | 1     | 1     | 1.9142                    | 3.85                      |
| 0.75  | 0.5   | 1     | 0.3759                    | 0.3217                    |
| 0.75  | 0.75  | 1     | 0.3751                    | 0.3217                    |
| 0.75  | 0.5   | 0.5   | 0.3754                    | 0.3215                    |
| 0.75  | 0.5   | 0.75  | 0.375                     | 0.321                     |

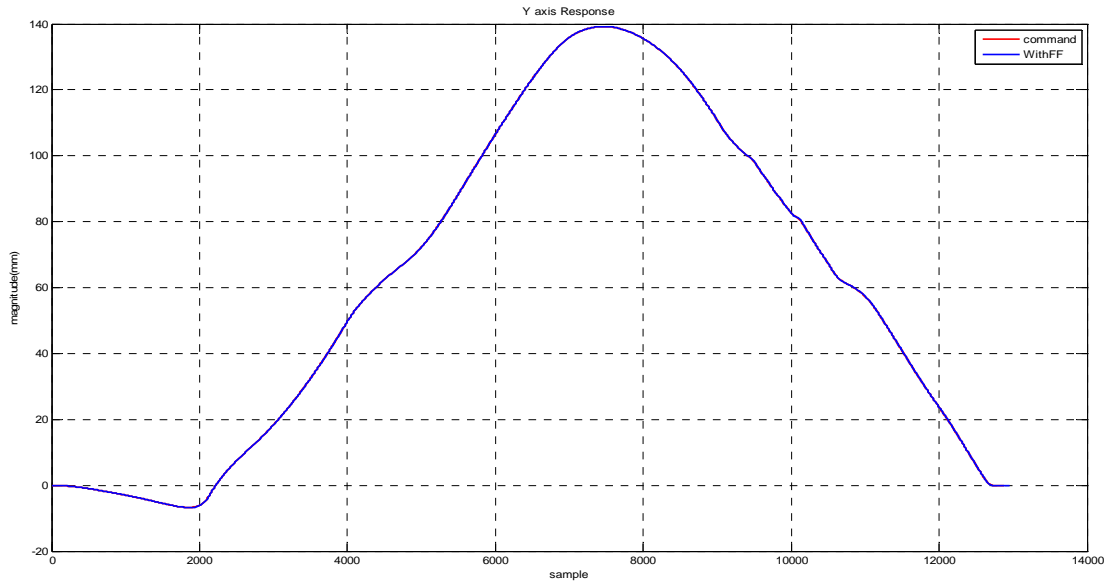


(a)

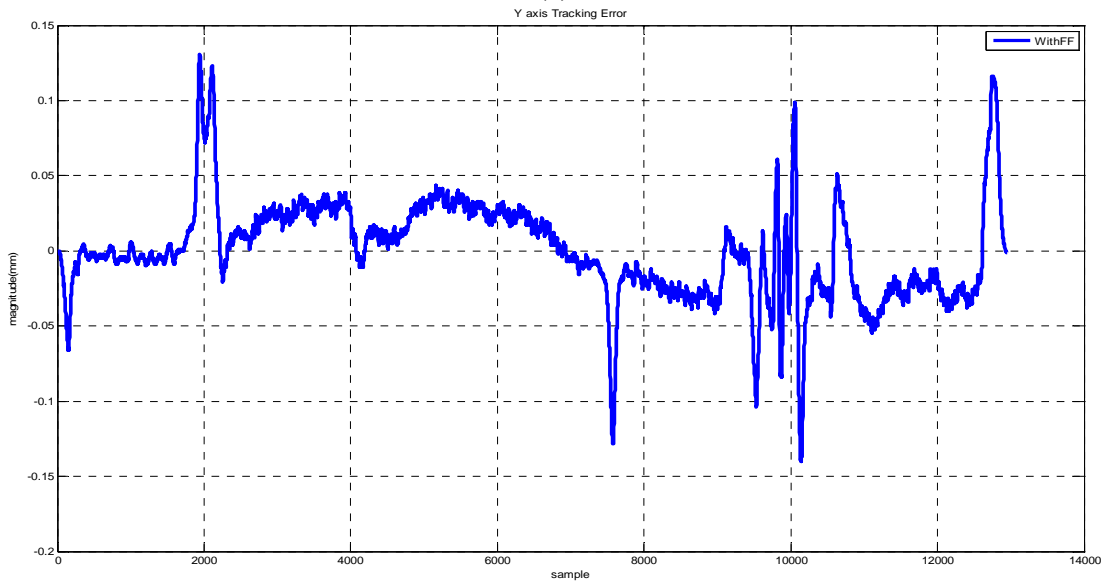


(b)

圖 18、X 軸位置響應實驗圖(加前饋控制器)：(a)命令響應比較圖 (b)追蹤誤差圖



(a)



(b)

圖 19、Y 軸位置響應實驗圖(加前饋控制器)：(a)命令響應比較圖(b)追蹤誤差圖

### 5-2-2.1 輪廓追蹤誤差調適方法與實驗結果

考慮輪廓追蹤特性，在此使用二分法尋找前饋參數，利用輪廓誤差(Contour error)IAE 數據來選取相對於使用者所需要的特性，表 5 為分析不同前饋參數輪廓誤差的關係表，其調適方法如同調適單軸追蹤誤差特性，從表中輪廓誤差 IAE 數據可得知單軸追蹤誤差調適出來的前饋參數並不能符合輪廓追蹤所需求的效能，因此必須提供這兩個誤差指標讓使用者依所需求特性選取不同之性能指標。加入調適後前饋控制器參數後的輪廓追蹤結果如圖 20。

表 5、各軸追蹤誤差 IAE 表

| $P_V$ | $P_A$ | $P_J$ | IAE(Contour error) ( $\times 10^4$ mm) |
|-------|-------|-------|--|
| 1     | 1     | 1     | 687.329                                |
| 0.75  | 0.5   | 1     | 300.2197                               |
| 0.62  | 1     | 1     | 139.6826                               |
| 0.5   | 1     | 1     | 113.9087                               |

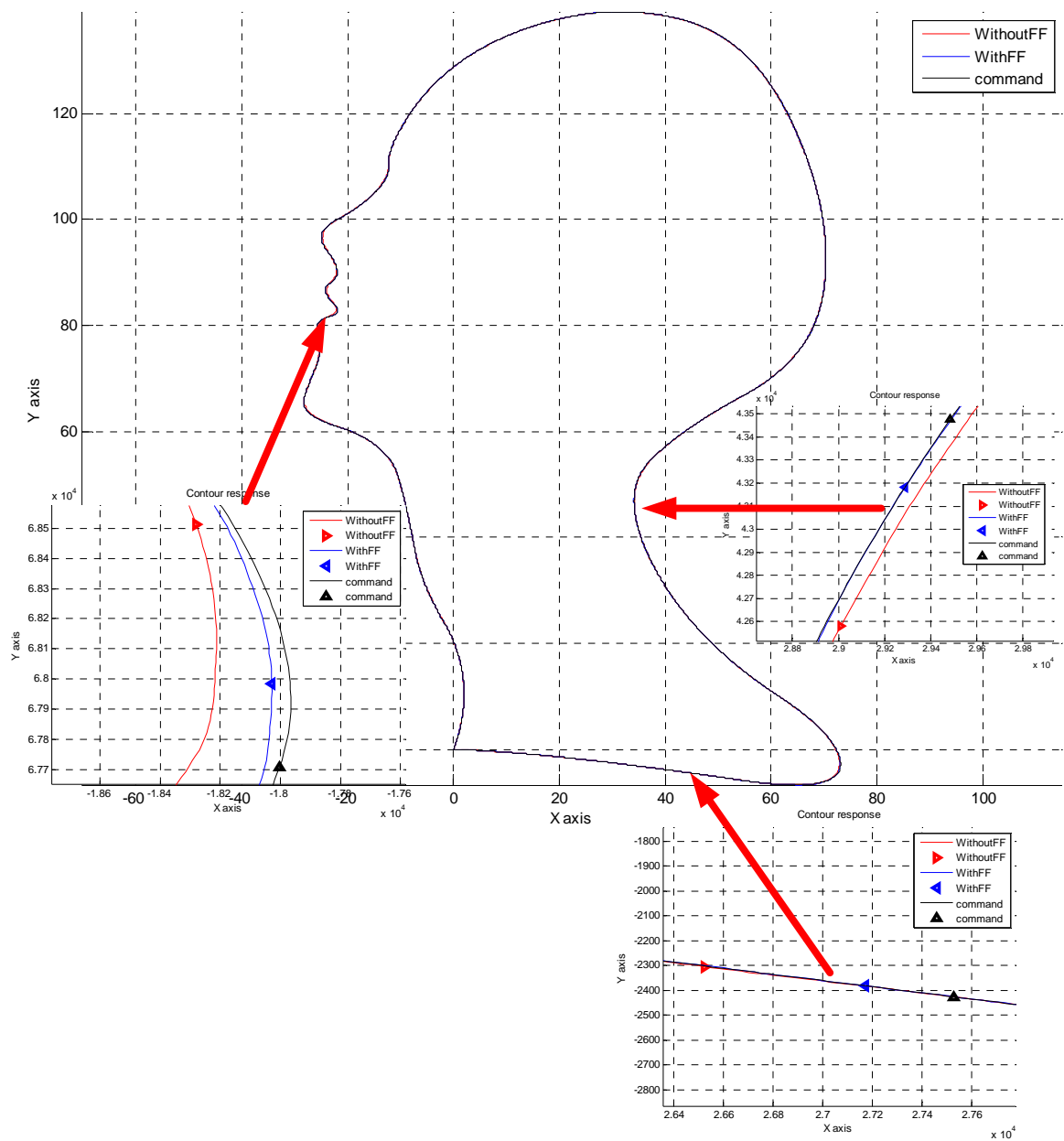


圖 20、加入調適後前饋控制器參數輪廓追蹤結果(單位為 mm)

## 六、結論

若系統平台參數估測準確的狀態下，本文中採用之前饋控制器將可達到最佳的系統追蹤性能。不過，在實際應用時，由於操作環境亦受溫度與外界擾動的影響，進而影響系統參數，將引起追蹤性能之良窳。故本文加入前饋控制器調適之調適法則，以增進系統響應的追蹤效能，此調變法依據使用者所需的性能指標，以命令與輸出響應誤差關聯性調變控制器參數，提供現場操作人員一良好指引。由圖 20 可以驗證加入了前饋控制器的輪廓追蹤不只提高了精確性也提高了追蹤效益。

本文以追蹤誤差與輪廓誤差當作效能指標，但是實際在上機加工過程中，響應過切的問題也是一個能夠當作效能指標的一個策略，因此可在圖 12 流程圖中加上此一指標策略增進響應性能。

整體而言，文中提出的速度控制器設計方式，經實驗驗證，除擁有傳統速度控制器之特點，更有良好的干擾抑制能力；提出之前饋控制器架構，透過文內提出的調適過程，經過實驗驗證，可使系統擁有良好的循跡能力。

## 七、參考文獻

- 1 Marchetti L. A., and Wright P., “A PC\_based Open Architecture Controller: Design, Implementation, and Operation,” ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, MED-Vol. 10, pp. 863-867, 1999.
- 2 Ogata K., Discrete Time Control Systems, Prentice Hall, 1987.
- 3 Franklin G. F., Powell J. D., and Workman M. L., Digital Control of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1990.
- 4 Yeung C. H., Altintas Y., and Erkorkmaz K., “Virtual CNC system. Part I. System architecture”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 46, pp. 1107-1123, 2006.
- 5 Erkorkmaz K., Yeung C. H., and Altintas Y., “Virtual CNC system. Part II. High speed contouring application”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 46, pp. 1124-1138, 2006.
- 6 Bedi S., Ali I., and Quan N., “Advanced Interpolation Techniques for NC Machines,” ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, No. 3, pp. 329-336, 1993.
- 7 Poo A., Bollinger J. G., and Younkin G. W., “Dynamic Errors in Type I Contouring Systems,” IEEE Trans. on Industry Automation, Vol. 1A-8, No. 4, pp. 477-484, 1972.
- 8 Fanuc AC Servo Amplifier Maintenance Manual, FANUC LTD, 1987.