

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

預測干擾觀測器應用於網路延遲控制架構(1/2)

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫  
計畫編號：98-2221-E-009-115-MY2  
執行期間：98 年 8 月 1 日 至 100 年 7 月 31 日

計畫主持人：李安謙 教授  
共同主持人：  
計畫參與人員：潘怡仁、邱敬棠、陳健南

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫  
及下列情形者外，得立即公開查詢  
 涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學機械工程學系

中 華 民 國 99 年 5 月 30 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

## 預測干擾觀測器應用於網路延遲控制架構(1/2)

### Predictive disturbance observer applied to network delay control structure (1/2)

計畫編號：98-2221-E-009-115-MY2

執行期限：98年8月1日至100年7月31日

主持人：李安謙 交通大學機械系

Email: aclee@mail.nctu.edu.tw

共同主持人：

研究人員：潘怡仁、邱敬棠、陳健南

#### 一、中文摘要

本計畫為兩年計畫，目標在完成多軸同步網路傳輸運動控制。由於時間延遲會影響網路系統的穩定性，並使控制更為複雜，為此本計畫提出一個數位的時間延遲控制架構以提升時間延遲系統的性能與抗干擾能力，將預測干擾觀測器應用於穩定與積分的時延系統，搭配 Smith predictor 架構，補償時間延遲、輸入干擾(input disturbance)的影響。本計畫提出的控制架構分為兩部分：內迴路為預測干擾觀測器(Predictive Disturbance Observer, PDOB)，用以抑制各種形式的確定性干擾，包括步階、斜坡、正弦干擾，並且保有干擾觀測器的特性，使系統趨近於模型，PDOB 基於 DOB 架構額外加入預測濾波器(predictive filter)以消除估測干擾的時間延遲，由於此特性提升了傳統 DOB 在時延系統的干擾抑制性能，尤其對消除週期性干擾更為顯著；外迴路為史密斯預測架構，作用在於降低輸出時間延遲的影響，改善系統伺服響應。使用解藕控制設計將多輸入多輸出系統簡化為多個單輸入單輸出系統。利用 PDOB 控制架構可以抑制外在干擾，並且達到控制的目標。

**關鍵詞：**網路傳輸、時間延遲(輸入及輸出)、預測控制

#### Abstract

This is a two-years project. The aim of the whole project is to build a multi-axis motion with synchronous network transmission. Significantly the dead-time has a great influence on the stability of systems, which make the process more difficult to control. Therefore, this thesis presents a discrete

dead-time compensator to improve the performance and capability of disturbance rejection for dead-time systems. It applied predictive DOB and Smith predictor structure to compensate output delay, input delay, and input disturbance for stable and integrating plants. The proposed structure consists of two parts: the inner loop and the outer loop. Firstly the PDOB can be designed to reject any kind of deterministic disturbances, including step disturbance, ramp disturbance and sine disturbance. Also, the property of DOB structure can approach the real plant to the nominal plant. The PDOB based on DOB structure has an additional predictive filter, which eliminate the time delay of estimated disturbance. Because of the property enhances disturbance rejection performance of traditional DOB for dead-time systems especially for periodic disturbance. Secondly, the Smith predictor structure is capable to suppress the effects of time delay. MIMO system is simplified some SISO systems by using decoupling controller. Using PDOB controlled structure can reject disturbance, and achieve a controlled objective.

**Keywords:** Network transmission, Input and output time delay, Predict control, Smith predictor

#### 二、計畫緣由及目的

時間延遲存在於各種常見的物理系統，如機械傳動系統、電腦控制系統、以及網路控制系統。控制系統藉由網路來達到迴授控制的效果，此系統稱做網路控制系統(Networked Control Systems)。近年來網路化在工業應用上越來越普遍，為了因應工業應用的網路化，目前市面上出

現許多種適合工業使用的網路，例如CAN Bus、Profibus、FIP、SERCOS、Ethernet等，隨著製程技術的進步，處理器的功能變得更多樣化且價格也比以往低廉，在多軸控制系統中各軸皆可以獨立處理，將網路跟多軸控制系統結合就是網路化運動控制的一種應用，目前也有相關的研究，如[1]中，利用了CAN Bus來建立分散式控制系統，並且加入多軸控制理論，發展高速且高精分散式的多軸控制系統。

針對時間延遲系統，常見的改善方法是利用Smith predictor[2]，它能有效補償時間延遲造成的影響，消除在閉迴路分母部分的延遲項，使系統設計可以免去時間延遲的影響。然而這項優點卻受限於穩定系統，為了克服這個缺點，有很多人提出相關控制架構[3]，來修正原本的Smith predictor；但它們都需要額外的內迴路來穩定系統，且在干擾響應部份，因為分母部份有時間延遲項，使得控制器的設計較複雜且需符合穩定的限制。Pedro利用有限脈衝響應濾波器[4]，來簡化系統是不穩定且有非極小相位的控制器設計，並去除干擾響應有時間延遲項出現在分母的問題。

但是在改善並且穩定化系統後，Smith predictor依然缺乏抵抗干擾的能力。因此Astrom將原本的Smith predictor修正後，能夠將setpoint響應以及干擾響應分開設計，並且當系統是積分形式時，能有效消除步階干擾[5]。針對其他型式的干擾，如週期性干擾，Milic結合內部模型原理及控制概念，提出的控制架構能抑制步階及週期性干擾並維持系統的穩健性[6]；Zhou則是在修正Smith predictor架構中，增加有時間延遲項的控制器，利用週期性干擾的特性，讓添加的時間延遲跟原系統的時間延遲總和剛好符合干擾的週期，藉此來消除週期性干擾[7]。

當考慮系統有輸入及輸出部份的延遲，除了上述提到的方法來抑制干擾，也可以利用干擾觀測器來增進系統抗干擾的能力。此方法能將實際系統逼近於估測的系統，而且利用干擾觀測器在內迴路單純考慮干擾的影響，在外迴路的控制器設計就可以只考慮setpoint響應，提供了2個自由度的控制器設計[8]。Kempf提出針對時間延遲系統的干擾觀測器，在原有的干擾觀測器架構中加入系統的時間延遲部份，並考慮階數較少的濾波器設計來減低干擾的影響[9]。不同於Kempf的架構，Takeshi利用Smith predictor的架構再額外設

計的觀測器型式用來獲得干擾的資料；當干擾的頻率較慢時，可以有效補償干擾的影響[10]。然而這2種架構同樣因為系統有時間延遲，從干擾觀測器獲得的干擾資料都會受到時間延遲的影響，使干擾抑制性能降低。

針對時間延遲系統，雖然有提出很多改善方法，但以上文獻多數是修改Smith predictor架構使其應用不限制於穩定系統，由於大部分方法僅能對付步階的干擾，雖然有些加入干擾觀測器，加強干擾的抑制能力，可是因為迴授的干擾存在時間延遲，其抑制結果仍不盡理想。本計畫旨在修正現有之干擾觀測器的架構使其具有預測功能，讓迴授的干擾能即時補償，改善系統暫態響應，除了消除常見的步階、斜波干擾之外，也能處理週期性干擾，同時針對網路控制系統中的時間延遲現象作探討分析，分別探討穩定系統與不穩定非極小系統之情形，設計補償時間延遲對系統性能造成的影響，並且對於干擾能擁有良好的抑制能力，以提高網路控制系統的性能與穩定性。

### 三、研究方法

考慮到傳統DOB[11]架構如圖一，其中 $r$ ：參考命令， $P(s)$ ：實際受控廠， $u(s)$ ：控制輸入， $P_n(s)$ ：受控廠模型， $y$ ：系統輸出， $Q(s)$ ：低通濾波器， $\xi$ ：輸入干擾， $n$ ：量測雜訊， $\hat{\xi}$ ：估測干擾， $\hat{\xi}_f$ ：經過低通濾波器後的估測干擾。應用在時延系統時，所估測出的干擾存在時間延遲，會影響抑制干擾的性能。因此在使用DOB消除時延系統的干擾時，補償時間延遲的影響是很重要的一個環節。由於實現上的需要，以及設計控制方法補償DOB架構的時間延遲的條件，將先介紹所要控制的系統模型，接著透過分析干擾的模型，透過預測濾波器，加入DOB中用以改善傳統DOB在時延系統的性能，稱為預測干擾觀測器(PDOB)。

在文獻[12]中提到，由於系統會受到干擾的影響，在預測程序的輸出時必須考慮干擾的模型，本計畫中考慮確定性干擾，針對確定性干擾的模型作分析，對於已知的確定性干擾(deterministic disturbance)，可以透過干擾的現在與過去值求得未來的干擾，能夠被準確預測，擁有下列特性，滿足(1)式之關係：

$$\phi_{\xi}(q^{-1})\xi(k) = 0 \quad (1)$$

其中 $\xi(k)$ 表示為干擾，而 $\phi_{\xi}(q^{-1})$ 為干擾的特性方程式，常見的確定性干擾其特性方程式可見表1。

而  $i$  步之後的干擾也滿足(2)式：

$$\phi_\xi(q^{-1})\xi(k+i)=0 \quad (2)$$

求解(3)式之 Diophantine equation，求得  $E_i$  與  $F_i$ ，並可整理為(4)式

$$\frac{1}{\phi_\xi} = E_i + q^{-i} \frac{F_i}{\phi_\xi} \quad (3)$$

$$E_i \phi_\xi = 1 - q^{-i} F_i \quad (4)$$

將(2)式同乘以  $E_i$ ，可以得到(5)式

$$E_i \phi_\xi(q^{-1})\xi(k+i)=0 \quad (5)$$

將(4)式代入(5)式中，最後得到相當重要的結果：

$$\xi(k+i) = F_i \xi(k) \quad (6)$$

故由(6)式得知，透過已知確定性干擾的特性方程式求解 Diophantine equation，求得對應  $i$  步的預測濾波器  $F(z)$ ，將現在的干擾  $\xi(k)$  乘上  $F(z)$ ，能夠得到  $i$  步之後的干擾  $\xi(k+i)$ 。由於干擾觀測器應用於時延系統時，所觀測的干擾  $\hat{\xi}(k)$  會存在  $d$  步的延遲：

$$\hat{\xi}(k) = \xi(k) \cdot q^{-d} = \xi(k-d) \quad (7)$$

若在 DOB 架構中加入  $F(z)$ ，則經過預測濾波器  $F(z)$  後的估測干擾為：

$$F_i \hat{\xi}(k) = \xi(k-d+i) \quad (8)$$

當滿足以下關係時： $i=d$ ，發現可以消除 DOB 觀測干擾的時間延遲，得到無延遲的干擾，提高 DOB 架構的性能

$$F_i \hat{\xi}(k) = F_i \xi(k-d) = \xi(k) \quad (9)$$

由表 1 與(3)式，可求得對應步階、斜坡、正弦干擾的預測濾波器  $F(q^{-1})$ ：

(a)步階干擾

$$\frac{1}{1-q^{-1}} = E_i + q^{-i} \frac{F_i}{1-q^{-1}}$$

(b)斜坡干擾

$$\frac{1}{(1-q^{-1})^2} = E_i + q^{-i} \frac{F_i}{(1-q^{-1})^2}$$

(c)正弦干擾

$$\frac{1}{1-2q^{-1} \cos(\omega_0 T) + q^{-2}} = E_i + q^{-i} \frac{F_i}{1-2q^{-1} \cos(\omega_0 T) + q^{-2}}$$

經過求得  $F(q^{-1})$  得到預測濾波器  $F(z)$ 。藉由分析確定性干擾之模型，解得預測濾波器  $F(z)$ ，用以補償 DOB 架構應用在時間延遲系統估測到的干擾，消除估測干擾的時間延遲。在下節將使用預測濾波器  $F(z)$ ，消除 DOB 觀測干擾的時間延遲，設計時延系統的預測干擾觀測器架構。

基於 Smith predictor 與 DOB 的控制架構所提

出的控制方法，將 DOB 修改為 PDOB 架構，再結合 Smith predictor 架構，即以 PDOB 為內迴路觀測系統外部干擾，並透過 Smith predictor 為外迴路消除時間延遲的影響。其方塊圖如圖二所示，其中  $F(z)$  被設計用來消除估測干擾的時間延遲，控制器  $K(z)$  用於調整系統的伺服響應速度與干擾抑制響應，在此控制器  $K(z)$  的設計形式為

$$K(z) = v_1 \frac{z-v_2}{z-1} \quad (10)$$

其中  $v_1$  與  $v_2$  為調整參數，並依照系統程序的形式而有所不同， $K(z)$  參數的設計如下

(a)對於一階穩定系統：

選擇  $v_1 = \frac{c_1}{b}$ ， $v_2 = a$ ，則可以得到控制器

$$K(z) = \frac{c_1}{b} \left( \frac{z-a}{z-1} \right) \quad (11)$$

對於一階積分系統，其 Q-filter 的形式可與一階穩定系統相同，便可達到消除干擾的效果。此時 Q-filter 形式如下

$$Q = \frac{t_0}{z+\beta} \quad (12)$$

其中  $t_0 = 1 + \beta$ ， $\beta$  為調整參數。當干擾為斜坡函數時，所設計的 Q-filter(12)式可簡化為(13)式

$$Q = \frac{t_1 z + t_0}{(z+\beta)^2} \quad (13)$$

其中  $t_1 = 2\beta + 2$ ， $t_0 = 1 + \beta$ ， $\beta$  為調整參數。當干擾為正弦函數時，所設計的 Q-filter 為

$$Q(z) = \frac{t_1 z + t_0}{(z+\beta)^2} \quad (14)$$

其中  $t_1 = 2\beta + 2\cos(\omega_0 T)$ ， $t_0 = \beta^2 - 1$ ， $\beta$  為調整參數，透過  $Q(z)$  與  $K(z)$  在系統的穩定度與干擾抑制響應之間作取捨。

前面部分在 SISO 系統架構下討論，因此在這部分將系統擴充為多輸入多輸出(MIMO)的延遲系統[13]，故先使用通用型解耦方法將多輸入多輸出的系統簡化為多個單輸入單輸出的系統，並且可以調整系統的伺服響應，考慮系統有外部干擾輸入，基於上述所說的 PDOB 的架構，整體的架構如圖三，其中  $r(z)$ ：參考命令， $\xi(z)$ ：輸入干擾， $y(z)$ ：系統輸出， $G(z)$ ：系統包含有輸出延遲時間項， $T(z)$ ：輸入的延遲時間， $C(z)$ ：解耦器， $D_c(z)$ ：系統解耦後的延遲時間， $Q_s(z)$ ：理想的系統轉移函數， $Q_d(z)$ ：抑制輸入干擾濾波器， $F(z)$ ：預測濾波器。在解耦器設計部分：

$$\begin{aligned}
C(z) &= T^{-1}(z)G^{-1}(z)Q_s(z)D_e(z) \\
&= \det(G(z)T(z))^{-1} \begin{bmatrix} g_{22}(z)Z^{-a} + g_{21}(z)Z^{-b} & \\ -g_{22}(z)Z^{-e} - g_{21}(z)Z^{-f} & \\ -g_{12}(z)Z^{-c} - g_{11}(z)Z^{-d} & \\ g_{12}(z)Z^{-g} + g_{11}(z)Z^{-h} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{s11}(z) & 0 \\ 0 & Q_{s22}(z) \end{bmatrix} \quad (15)
\end{aligned}$$

a、b、c、d、e、f、g、h 為可調的時間延遲參數與輸入時間延遲和輸出時間延遲使的關係：

$$\begin{cases}
g+L_{11}+t_{12} = d+L_{12}+t_{21} \\
h+t_{12} = d+t_{11} \\
g+t_{22} = c+t_{21} \\
h+L_{12}+t_{22} = c+L_{11}+t_{11} \\
a+L_{21}+t_{11} = f+L_{22}+t_{22} \\
b+t_{11} = f+t_{12} \\
a+t_{21} = e+t_{22} \\
b+L_{22}+t_{21} = e+L_{21}+t_{12}
\end{cases}$$

$\det(G(z)T(z))^{-1}$  是為非增分函式 (non proper function) 所以需要將(14)式經過修正為

$$\det(G(z)T(z))_o^{-1} = [g_{11}(z)g_{22}(z)(1 - (g_{11}(z)g_{22}(z))^{-1} g_{12}(z)g_{21}(z)Z^{-(L_{12}-L_{21}+L_{11}+L_{22})})(1 - Z^{-(t_{12}-t_{21}+t_{11}+t_{22})})]^{-1} \quad (16)$$

因為在經過修正的  $\det(G(z)T(z))_o^{-1}$  因輸入延遲時間與系統包含的延遲時間不同會有四種類型，避免  $\det(G(z)T(z))^{-1}$  為非增分函式 (non proper function)，四種類型如下：

case 1:  $t_{12} + t_{21} - t_{11} - t_{22} > 0$  &  $L_{12} + L_{21} - L_{11} - L_{22} > 0$

$$\det(G(z)T(z))_o^{-1} = [g_{11}(z)g_{22}(z)(1 - (g_{11}(z)g_{22}(z))^{-1} g_{12}(z)g_{21}(z)Z^{-(L_{12}-L_{21}+L_{11}+L_{22})})(1 - Z^{-(t_{12}-t_{21}+t_{11}+t_{22})})]^{-1}$$

case 2:  $t_{12} + t_{21} - t_{11} - t_{22} > 0$  &  $-L_{12} - L_{21} + L_{11} + L_{22} > 0$

$$\det(G(z)T(z))_o^{-1} = [g_{12}(z)g_{21}(z)((g_{12}(z)g_{21}(z))^{-1} g_{11}(z)g_{22}(z)Z^{(L_{12}+L_{21}-L_{11}-L_{22})} - 1)(1 - Z^{-(t_{12}-t_{21}+t_{11}+t_{22})})]^{-1}$$

case 3:  $-t_{12} - t_{21} + t_{11} + t_{22} > 0$  &  $-L_{12} - L_{21} + L_{11} + L_{22} > 0$

$$\det(G(z)T(z))_o^{-1} = [g_{12}(z)g_{21}(z)((g_{12}(z)g_{21}(z))^{-1} g_{11}(z)g_{22}(z)Z^{(L_{12}+L_{21}-L_{11}-L_{22})} - 1)(Z^{(t_{12}+t_{21}-t_{11}-t_{22})} - 1)]^{-1}$$

case 4:  $-t_{12} - t_{21} + t_{11} + t_{22} > 0$  &  $L_{12} + L_{21} - L_{11} - L_{22} > 0$

$$\det(G(z)T(z))_o^{-1} = [g_{11}(z)g_{22}(z)(1 - (g_{11}(z)g_{22}(z))^{-1} g_{12}(z)g_{21}(z)Z^{-(L_{12}-L_{21}+L_{11}+L_{22})})(Z^{(t_{12}+t_{21}-t_{11}-t_{22})} - 1)]^{-1}$$

為了不使  $\det(G(z)T(z))_o^{-1}$  為零，則令  $t_{12} + t_{21} \neq t_{11} + t_{22}$ ，即為輸入延遲時間  $T(z)$  的對角線相加不等於非對角線相加。

$$\begin{aligned}
G(z)T(z)C(z) &= \begin{bmatrix} Z^{-(a-L_{11}-t_{11})} & 0 \\ 0 & Z^{-(h-L_{22}-t_{22})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{s11}(z) & 0 \\ 0 & Q_{s22}(z) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} Q_{s11}(z)Z^{-q_{11}} & 0 \\ 0 & Q_{s22}(z)Z^{-q_{22}} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

經過此解藕之後，可以抑制不同的確定性干擾(步階、斜坡、正弦干擾)，進而達到控制的目標。

## 四、目前成果

### ■ 穩定系統受到輸入輸出延遲的干擾影響分析

PDOB 與傳統 DOB 分析其延遲時間干擾下的抑制響應，分析如下：

(a)對於步階干擾，PDOB 與 DOB 的性能是相同的，因為對應於步階干擾的  $F(z)=1$ ，所以 PDOB 等效於 DOB 架構。其響應如圖四。

(b)對斜坡干擾而言，PDOB 與 DOB 架構皆可用在時延系統，並達到消除斜坡干擾的效果，其中 PDOB 透過  $F(z)$  消除時間延遲，提高頻寬，加快干擾抑制的響應。其響應如圖五。

(c)對正弦干擾而言，PDOB 架構藉  $F(z)$  消除干擾的延遲，確實能夠消除時延系統的正弦干擾；但是傳統 DOB 架構估測的正弦干擾仍存在時間延遲，以致於無法消除正弦干擾，僅能依靠 low-pass filter 的頻寬壓低正弦響應，反觀 PDOB 架構不需要依靠頻寬也能夠達到消除正弦干擾的效果。其響應如圖六。

### ■ 以預測之 DOB 與 smith predictor 之架構做單輸入單輸出系統的推導

由於 Smith predictor 的優點，使閉迴路分母不存在時間延遲項，如此一來對於伺服響應的追蹤，其控制器的設計將更為簡單；由於干擾影響的分析可知本計畫發展出的 PDOB 架構比傳統的 DOB 架構還實用，藉著 PDOB 架構的加入，可以看出在干擾到輸出的轉移函數增加了  $(1 - QFz^{-(d_{ca}+d_{sc})})$ ，F-filter 的存在不僅加速了干擾抑制響應，同時也簡化了 Q-filter 的設計。以簡單的例子模擬，分別在不同的干擾下與文獻[14][15]比較。

考慮系統為  $P_i(s) = 0.1/s e^{-6.7s}$ ，輸入時間延遲  $e^{-3s}$ ，取樣時間  $T = 0.1s$ ，經 zero order hold 得離散的系統模型為： $P_n(z) = \frac{0.01}{z-1} z^{-67}$ ，輸入時間延遲： $z^{-30}$

#### (a) Step disturbance

考慮系統干擾為步階輸入，控制器選擇為

$$K(z) = 90, F(z) = 1, Q(z) = \frac{0.03}{z-0.97}$$

並且在增益與時間常數上有 10% 的誤差時，其響應圖如圖七，由圖中明顯看出在不確定性較大時，Normey-Rico 所設計的控制架構將不穩定，而本架構與 García 的方法仍能使系統穩定。

#### (b) Ramp Disturbance

受到斜率為 1 斜坡干擾，分別在 50 秒到 150 秒輸入，控制器選擇為

$$Q(z) = \frac{(3\beta^2 + 6\beta + 3)z + (\beta^3 - 3\beta - 2)}{(z + \beta)^3} \quad \text{其中}$$

$\beta = -0.997$  ,  $K(z) = 0.3$  ,  $F(z) = \frac{98z - 97}{z}$  , 系統存在不確定性, 其響應圖如圖八, 可以得知本計劃所提出的控制架構與 Normey-Rico 的架構, 其性能與穩定性相當接近。

### (c) sinusoid Disturbance

在時間  $t = 70s$  受到正弦干擾  $\xi(t) = \sin(0.5t)$  控制器選擇為  $F(z) = \frac{-19.6572z + 19.8192}{z}$  ,

$$Q(z) = \frac{(2\beta + 2\cos(\omega T))z + (\beta^2 - 1)}{(z + \beta)^2} ,$$

$\beta = -0.9628$   $K(z) = 0.35$  , 當系統不存在不確定性時, 其響應圖如圖九, 本架構的方法能夠確定消除正弦干擾, 而 García 的架構則否。

### ■ 使用時間延遲補償之方法運用多軸同步運動平台運動(MIMO)

以包含有時間延遲的雙輸入雙輸出的系統為例子模擬, 在三種不同的確定性干擾(步階、斜坡、正弦干擾)下, 設計 Q-filter 抑制干擾; 輸入源為單位步階, 而第一個輸入源在第零秒進入, 第二個輸入源在第 20 秒進入。

以簡單的例子模擬, 考慮標稱模型為

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.2e^{-s}}{0.3s+1} & \frac{1.1e^{-3s}}{0.7s+1} \\ \frac{1.6e^{-7s}}{0.9s+1} & \frac{1.3e^{-3s}}{0.4s+1} \end{bmatrix} ,$$

輸入延遲為  $T(s) = \begin{bmatrix} e^{-2s} & e^{-4s} \\ e^{-6s} & e^{-5s} \end{bmatrix}$  ; 經過 Zero order

hold 取樣時間為 0.1s 轉換成為

$$G_n(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.3102z^{-10}}{z-0.7165} & \frac{0.1464z^{-30}}{z-0.8669} \\ \frac{0.1683z^{-70}}{z-0.8948} & \frac{0.2879z^{-30}}{z-0.7788} \end{bmatrix} ,$$

輸入延遲時間:  $T(z) = \begin{bmatrix} z^{-20} & z^{-40} \\ z^{-60} & z^{-50} \end{bmatrix}$  ,

解耦條件:

$$a = 0, b = 30, c = 50, d = 20, e = 10, f = 10, g = 60, h = 0$$

$$, Q_s(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.01}{z-0.99} & 0 \\ 0 & \frac{0.01}{z-0.99} \end{bmatrix} ,$$

系統的延遲時間為  $D_c(z) = \begin{bmatrix} z^{-30} & 0 \\ 0 & z^{-80} \end{bmatrix}$

(a)考慮步階干擾, 第一個干擾為單位步階在第

150 秒進入, 第二個干擾為單位步階在第 100 秒

$$\text{進入。} Q_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.5528}{z-0.4472} & 0 \\ 0 & \frac{0.5528}{z-0.4472} \end{bmatrix} , F(z) = I ,$$

其響應圖如圖十。

(b)考慮斜坡干擾, 第一個干擾為斜率為 1 的斜坡干擾在第 150 秒進入, 第二個干擾為斜率為 1 的斜坡干擾在第 100 秒進入。

$$Q_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.0138z-0.0138}{(z-0.9931)^2} & 0 \\ 0 & \frac{0.0138z-0.0138}{(z-0.9931)^2} \end{bmatrix} ,$$

$$F(z) = \begin{bmatrix} \frac{31z-30}{z} & 0 \\ 0 & \frac{81z-80}{z} \end{bmatrix} ,$$

其響應圖如圖十一

(c)考慮正弦干擾, 第一個干擾為頻率 0.25rad/sec 的正弦在第 0 秒進入, 第二個干擾為頻率 0.25rad/sec 的正弦在第 40 秒進入。

$$Q_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{0.029z-0.0294}{(z-0.9852)^2} & 0 \\ 0 & \frac{0.029z-0.0294}{(z-0.9852)^2} \end{bmatrix} ,$$

$$F(z) = \begin{bmatrix} \frac{27.9916z-27.2684}{z} & 0 \\ 0 & \frac{35.9482z-36.3757}{z} \end{bmatrix} ,$$

其響應圖如圖十二

分別在不同的干擾與不同的時間輸入下, 本計畫發展的架構都可以正確的抑制干擾, 並且可以從圖中看出解耦控制將多輸入多輸出的系統內部互相影響消除, 還達到想要的目標。

## 五、預期成果

今年度計畫成果如下列所示:

- (1) 完成穩定系統受到輸入輸出延遲的影響分析
- (2) 完成以預測之 DOB 與 smith predictor 之架構做單輸入單輸出系統的推導
- (3) 完成使用時間延遲補償之方法運用多軸同步運動平台運動
- (4) 目前正在進行前三項成果之實驗, 預計七月底完成。

## 六、文獻回顧

- [1] 謝鎮洲，以 CAN Bus 建構出高速精密之多軸運動控制器，國立交通大學，碩士論文，中華民國九十一年八月。
- [2] O. J. M. Smith, "Closed control of loops with dead time," *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp. 217-219, 1957.
- [3] S. Majhi and D. P. Atherton, "Modified Smith predictor and controller for processes with time delay," *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 146, No. 5, pp. 359-366, 1999.
- [4] P. Garcia, P. Albertos, T. Hagglund, "Control of unstable non-minimum phase delayed systems," *Journal of Process Control*, vol. 16, No. 10, pp. 1099-1111, 2006.
- [5] K. J. Astrom, C. C. Hang and B.C. Lim, "A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long time delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, No. 2, pp. 343-345, 1994.
- [6] M. R. Stojic, M. S. Matijevic and L. S. Draganovic, "A robust Smith predictor modified by internal models for integrating process with dead time," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, No. 8, pp. 1293-1298, 2001.
- [7] H. Q. Zhou, Q. G. Wang and L. Min, "Modified Smith Predictor design for periodic disturbance rejection," *ISA Transactions*, vol. 46, No. 4, pp. 493-503, 2007.
- [8] Umeno and Y. Hori, "Two degree of freedom controllers for robot manipulators without speed sensors," *Proceedings of the 1990 International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.179-188, 1990.
- [9] C. J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol. 7, No. 5, pp. 513-526, 1999.
- [10] T. Takehara, T. Kunitake, H. Hashimoto and F. Harashima, "The control for the disturbance in the system with time delay," *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC*, vol. 1, pp. 349-353, 1996
- [11] B. Yao, M. Al-Majed, M. Tomizuka, "High-performance robust motion control of machine tools : An adaptive robust control approach and comparative experiments," *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 2, No. 2, pp. 63-76, 1997.
- [12] R. Soeterboek, *Predictive Control: A Unified Approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1992.
- [13] J. E. Normey-Rico, *Control of Dead-time Processes*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [14] J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, "A unified approach to design dead-time compensators for stable and integrative processes with dead-time," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 2, pp. 299-305, February 2002
- [15] P. Garcia and P. Albertos, "A new dead-time compensator to control stable and integrating processes with long dead-time," *Automatica*, vol. 44, pp. 1062-1071, 2008.

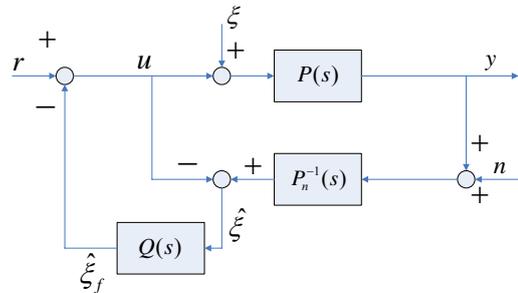
## 六、圖表

表 1 常見的確定性干擾之特性方程式

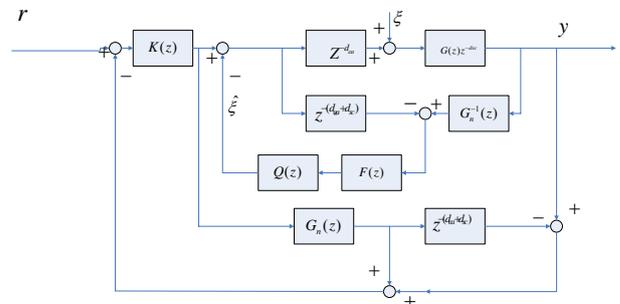
干擾	$\phi_{\xi}(q^{-1})$
----	----------------------

步階	$1 - q^{-1}$
斜坡	$(1 - q^{-1})^2$
拋物線	$(1 - q^{-1})^3$
正弦	$1 - 2q^{-1} \cos(\omega_0 T) + q^{-2}$

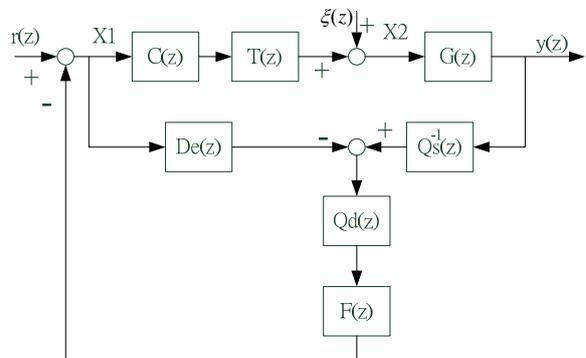
$\omega_0$  : 正弦干擾的頻率



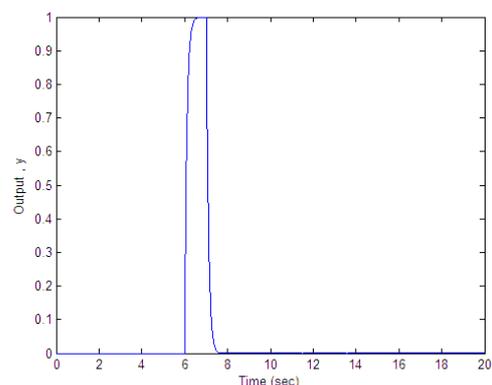
圖一 傳統 DOB 方塊圖



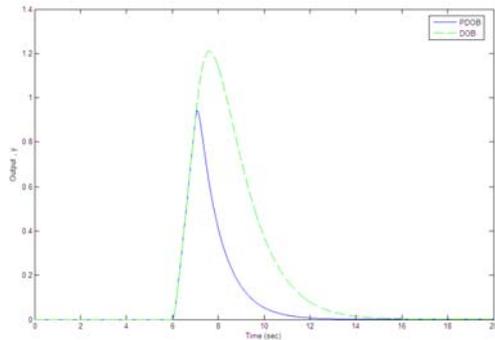
圖二 PDOB 與 Smith predictor 架構



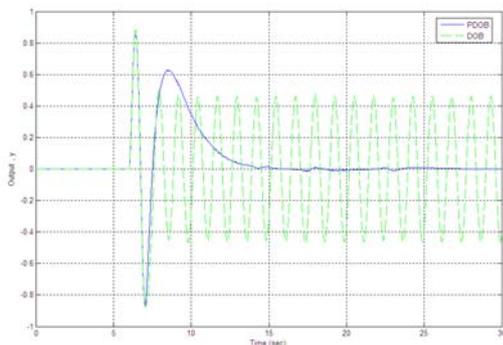
圖三 TITO 預測干擾觀測器架構



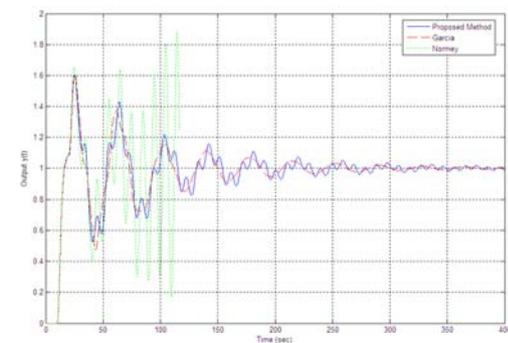
圖四 Q-filter 為一階時，PDOB 受到單位步階干擾的系統響應



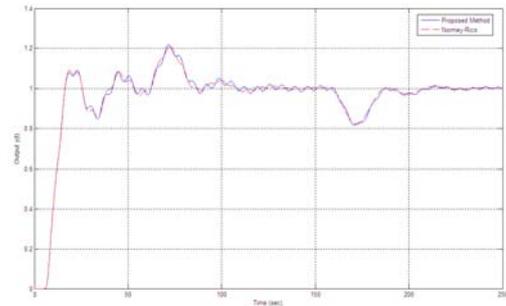
圖五 Q-filter 為二階時，PDOB 與 DOB 架構受到斜坡干擾(slope 為 1)的系統響應



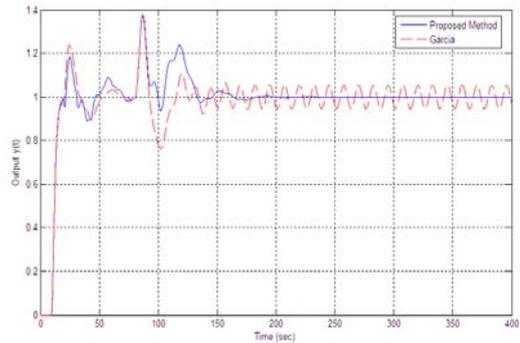
圖六 Q-filter 為二階時，PDOB 與 DOB 架構的正弦干擾抑制響應(正弦干擾頻率  $\omega_0 = 5 \text{ rad/sec}$ )



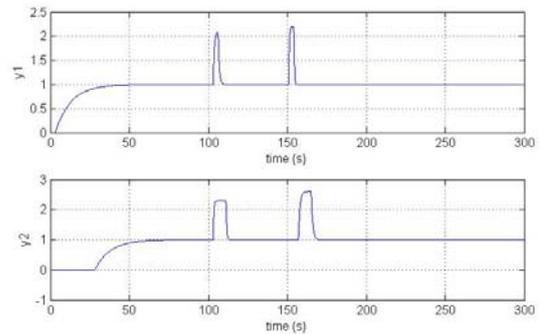
圖七在系統增益與時間常數存在 10% 的誤差的系統響應，其中在時間  $t = 70\text{s}$  大小為  $-0.1$  步階干擾進入



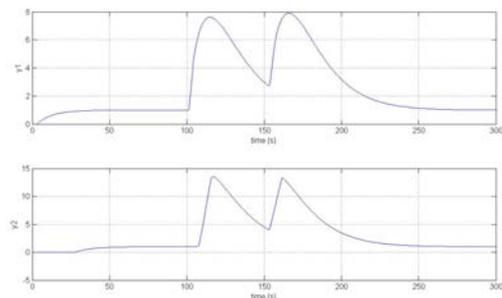
圖八 存在斜坡干擾與時間延遲誤差的系統響應



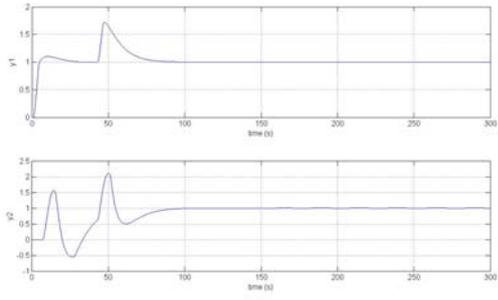
圖九 系統延遲時間的系統響應圖，其中在時間  $t = 70\text{s}$  起受到正弦干擾影響



圖十延遲時間系統的響應圖當存在步階干擾



圖十一延遲時間系統的響應圖當存在斜坡干擾



圖十二延遲時間系統的響應圖當存在正弦干擾