

# 強健式多軸同步控制

## Robust Multi-Axis Synchronization Control

陳金聖<sup>1\*</sup>、陳世剛<sup>2</sup>、陳立業<sup>3</sup>、廖述政<sup>4</sup>、林育信<sup>5</sup>、李峰吉<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 國立台北科技大學 自動化科技研究所 教授

<sup>2</sup> 國立台北科技大學 機電科技研究所

<sup>3</sup> 國立台北科技大學 自動化科技研究所

<sup>4</sup> 旭東機械工業股份有限公司 半導體事業處 副理

<sup>5</sup> 旭東機械工業股份有限公司 電子設備事業處 組長

<sup>6</sup> 工研院機械所 機電控制整合部 經理

**摘要：**本文提出一基於位置控制迴路模式之強健式交叉耦合 (Cross-Coupled) 同步控制演算法，透過位置命令與響應之關係，進而修正位置控制命令，將此控制器架構於位置控制迴路中。為了達成上述目標，首先透過同步誤差模型之推導，獲得系統多軸同步誤差，進而設計交叉耦合控制器來改善多軸同步誤差；最終結合 H-infinity 理論，設計一強健式交叉耦合同步控制控制器，根據各軸位置同步誤差，修正各軸命令。最後，將此強健式同動控制演算法應用於一實機四自由度之伺服同動平台，透過馬達帶動各軸平台，使用光學編碼器進行位置回授偵測，驗證多自由度運動控制之同步性能。

**Abstract :** In this paper, a robust cross-coupled control algorithm based on position control loop is proposed to control multi-DOF (degree of freedom) machinery to modify the positional control command, through positional response and position control command. In order to achieve the goal, a positional synchronous error model is necessary to evaluate the positional synchronous error of the multi-DOF machinery. Then, a cross-coupled controller is further designed to improve the positional synchronous error. Finally, a robust cross-coupled control algorithm using H-infinity algorithm is used to control the multi-DOF system to modify the positional control command through the positional synchronous error. A 4-DOF machinery driven by the motor and measured by rotary encoder, is used in experiments to evaluate the synchronous performance of the proposed H-infinity robust cross-coupled controller.

**關鍵詞：**強健式控制、同動控制、精密製造

**Keywords :** Robust control, Synchronization control, High precision manufacturing

### 前言

現今之製造流程中，許多應用需要仰賴高精度伺服同步運動控制，包含微電子、航太科技、太陽能電池製造與自動化光學檢測等 [1]-[3]。在

多軸同步運動系統中，同一個運動平台上具有多個自由度運動軸及馬達。對於重負載且高速移動之多軸平台，雖然每個軸之動態設計皆符合相同規格，但是在耦合後的機構會有位移上的差異，造成同步誤差產生，而位移差異所產生的因子可

能包含機構組裝上的誤差、質量不平均或各種不確定性之干擾。同步誤差的產生會造成加工精度下降，進而影響加工作品質；甚至會因為加工過程中機構之拉扯，產生過電流的現象，造成跳機等負面影響。由於近年來高速高精度之加工需求不斷增加，多軸同步控制已成為控制領域中之一大挑戰。

目前工業上常使用的控制架構大致上可以分為：串聯式同步控制架構與並聯式同步控制架構 [4]；串聯式同步控制架構亦稱為主從式架構，此架構中具有一「主軸」，而其他的自由度皆稱為「從軸」。控制器僅需要提供主軸控制命令，而其餘從軸則是將主軸之回授作為控制命令。主從式同步控制系統雖然架構簡單且容易實現，但是由於馬達系統本身命令與回授具有延遲之現象，此架構在同步控制之性能上會有一定之限制。並聯式架構會透過交叉耦合之控制器來考量多個受控軸之控制命令，主要目標是將所有受控軸之阻力最小化且位置誤差最小化，因此透過交叉耦合的架構能夠將負載動態響應不平衡之問題減小到最低。目前幾個廠家之控制器都具有交叉耦合之功能，包含：發那科 (FANUC) 的扭矩控制 [5]、西門子 (Siemens) 的扭矩 / 速度控制器 [6]，皆有提供雙軸交叉耦合同步控制之功能。Koren [7] 提出交叉耦合控制器架構來解決多軸同步控制之問題。在接下來的研究中，交叉耦合控制也被拿來提升多軸加工之同動性能，進而減小加工輪廓誤差 [8]-[12]。此外，也有許多研究結合強健式控制、智慧型控制與適應性控制演算法來提升多軸運動系統中之同步性能 [13]-[16]。

目前常見的伺服控制迴路模式大致上可以分為三種：位置模式、速度模式與扭矩模式。每種模式都有不同的優點以及適用性。儘管在伺服迴路架構上有各種不同的模式可供使用者選擇，但是傳統的交叉耦合控制器是計算速度或是扭矩命令，提供給速度模式或是扭矩模式進行操作，無法使用位置模式控制來實現交叉耦合同步控制器之架構。為了解決以上的問題，本文所提出一基

於位置控制模式之強健式交叉耦合同步控制，透過位置同步誤差，進而修正位置命令，將控制器架構於位置控制迴路中。

本文使用 H-infinity 強健式控制演算法結合交叉耦合同步控制，主要目標是要協調多軸伺服平台同步軸之間的動態誤差。根據各同步軸的位置響應來建立即時的位置誤差模型，經由補償器調整各軸的響應，進而改善同步誤差。其交叉耦合控制器不須更改各軸的運動控制架構，而是在各軸的位置控制迴路加上一個補償器來進行位置命令之修正，藉由補償的結果使得各同步軸的動態響應互相匹配。對於強健式交叉耦合同步控制而言，可分為三個主要的部份：

1. 建立多軸同步誤差模型。
2. 設計交叉耦合同步控制器，補償各軸位置命令。
3. H-infinity 強健式交叉耦合同步控制演算法。

### 多軸同步誤差模型

本文中之位置同步誤差為各軸合成之位置向量投影至各分量轉換為單位向量減去位置合成向量；即在每個取樣時間，將量測到的位置響應向量  $P_a (P_a \in R^n)$  與同步單位位置向量  $t$  來求得同步誤差  $\varepsilon$ ，

$$\varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \dots \quad \varepsilon_n]^T \in R^n \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = P_{ave} - P_{ai} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中  $P_{ave}$  為位置響應之平均值

$$P_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ai} \quad (3)$$

則同步誤差可表示如下式：

$$\varepsilon = (P_a \cdot t) \cdot t - P_a \quad (4)$$

將式 (4) 簡化成式 (5) 之位置向量對同步誤差向量之矩陣轉換關係，

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (P_a \cdot t) \cdot t - P_a \\ &= (t \cdot t^T) \cdot P_a - P_a \\ &= (t \cdot t^T - 1) P_a \\ &= C P_a \end{aligned} \quad (5)$$

## 更完整的內容

詳見【機械工業雜誌】422 期・107 年 5 月號

---

機械工業雜誌・每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌・官方網站：[www.automat.tw](http://www.automat.tw)

機械工業雜誌・信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)