



五軸同動路徑之 輪廓誤差量測與補償

Measurement and Compensation of Contour Error
for Five-Axis Synchronous Paths

林明宗

國立虎尾科技大學
機械設計系
副教授

李建毅

工研院機械所
智慧機械技術組
資訊與資源部

余坦達

國立虎尾科技大學
機械設計系
研究生

關鍵詞(Keywords)

- 輪廓誤差 Contour error
- 誤差量測 Error measurement
- 刀具中心點 Tool center point
- 五軸工具機 Five-axis machine tool
- 伺服調機 Servo tuning

摘要(Abstract)

本文針對五軸工具機提出一刀具中心點輪廓誤差模型用來估測符合 ISO10791-6 標準三種量測路徑下的動態輪廓誤差。首先使用 S 型加減速方法規劃平滑的旋轉軸速度以產生五軸速度曲線，並利用刀具中心點控制方法產生具五軸同動的運

動軌跡並使得刀具中心點保持不動。接著將五軸運動命令代入伺服動態模型中並推導出一五軸輪廓誤差模型。此穩態輪廓誤差模型包含了三種特定的動態特性：單圓大小調變，雙圓以及偏心效應。影響動態輪廓誤差的因素包含初始位置、進給率以及五軸位置增益被進一步地研究以及分析。透過一基於五軸量測路徑之伺服增益調整程序，由伺服增益不匹配所產生的輪廓誤差可以被消除。最後在一桌上五軸雕刻機上進行實驗驗證五軸同動路徑下的輪廓誤差可以被量測並加以補償。

In this paper, a contour error model of the tool center point (TCP) for a five-axis machine tool is proposed to estimate dynamic contour errors on three types of measuring paths described in the standard of ISO10791-6. First, S-shape acceleration/



deceleration (ACC/DEC) method is applied to plan smooth velocities of rotary axes. The TCP control function is developed to generate five-axis velocity profiles and measuring trajectories where five axes are controlled simultaneously to keep the TCP at a fixed point. The contour error model for five axes is derived by substituting five-axis motion commands into servo dynamics models. The steady state contour error (SSCE) model is utilized to illustrate three particular dynamic behaviors: the single-circle with amplitude modulation, double-circle effect, and offset behavior. The factors that affect dynamic contour errors, including initial setup position, federate, and five-axis servo gains, are investigated and analyzed. With the development of servo tuning process under five-axis measuring paths, the contour errors caused by servo mismatch are reduced significantly. Finally, experiments are conducted on a desktop five-axis engraving machine to verify that dynamic contour errors of the TCP can be measured and compensated using the proposed method.

1. 前言

數控工具機的最新發展趨勢可由國際工具機展窺見，漢諾威國際工具機展(EMO2013)中德國提出了工業 4.0 的概念，大幅改變傳統生產製造價值創造鏈、商業模式、服務與現有分工形式，正式宣告智慧製造成為新世代工業的核心型態，掀起第四波的工業革命。技術方面由以往強調高

速、高精度與精微加工，逐漸朝向智能化、人機協同合作、智慧整合感控系統、物聯網、綠色節能等新趨勢。許多廠商更展出整合多軸複合加工機與機械手臂的自動化設備並將其應用於智慧工廠。目前市售的商用控制器大廠(如：FANUC、SEIMENS、HEIDENHIAN)亦推出各式多軸複合加工機的高階智能化功能，包括：學習控制、熱誤差補償、線上刀具與切削震動監控、多軸防撞與防干涉、多軸同動誤差補償、自動化調機參數設定等功能。

五軸工具機與三軸工具機相較，因具備刀具軸向控制、較高體積移除率、較佳的表面加工品質與大幅降低置具架設時間等優點，已逐漸使用於現代化的智慧工廠中。但由於多了兩個旋轉軸，使其加工品質更容易受到準靜態誤差、動態誤差、熱源及結構變形的影響[1-3]。針對五軸工具機的誤差量測與補償，已有許多相關文獻進行探討[4-6]。目前最受歡迎的五軸量具包含了雙球桿(DBB)、雷射干涉儀(Laser interferometer)、雷射追蹤儀(Laser tracker)、Capball、R-test 以及 Non-Bar 等設備，ISO/TC39/SC2 技術委員會已討論將雙球桿以及 R-test 量測設備被列入 ISO 10791-6 規範[7] 內。準靜態誤差方面，Mayer 等人[4]首先提出一系統化的方式建立五軸工具機的幾何誤差模型，並使用雙球桿鑑別出 8 個主要的幾何誤差參數。Bohez 等人[5]則使用 3 次多項式針對五軸銑床的 39 個幾何誤差建立數學模型，利用雷射干涉儀測量線性軸誤差，並透過最小均方根法進行 29 個相依及獨立幾何誤差的求解。Ibaraki 等人[6]依據 NAS979 加工測試件的五軸路徑，使用 R-test 量具進行刀具中心點誤差量測，評估位置相依幾何誤

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】379期・103年11月號

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：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011

機械工業雜誌官方網站：www.automan.tw