



五軸工具 機靜動態誤差分析與 路徑規劃演算法之實現

Static/Dynamic Error Analysis of Five Axis Machine Tool
and Implementaton of 5-axis Trajectory Planning Algorithm

蔡孟勳

國立中正大學
機械工程系
教授

林明宗

國立虎尾科技大學
機械設計系
助理教授

吳仕凱

國立中正大學
機械工程系

關鍵詞

- 五軸工具機 Five-axis machine tool
- 誤差模型 Error model
- 路徑規劃 Trajectory planning
- 刀具中心點 TCP

摘要

本文針對五軸工具機之靜動態誤差進行誤差模型建立與分析，藉以提升五軸工具機之加工精度。首先，藉由齊次座標矩陣建立五軸工具機的順向與逆向運動學方程式並推導幾何誤差模型，再利用五軸工具機動態模型推導動態誤差模型。隨後，NC 路徑(如:CK1, CK2 和 CK4)則可透過逆向

運動方程式進行路徑規畫。本文亦同時介紹兩種路徑規劃方法：包含量測用路徑規劃與 FANUC 刀具中心點控制方法。最後，採用一即時刀具中心點插補演算法針對NC路徑進行平滑進給率之規劃與插補，並透過模擬驗證本研究所提出五軸工具機誤差模型之正確性與路徑規劃演算法之可行性。

In this paper, geometric and dynamics error models of five-axis machine tool are developed and analyzed to improve machining accuracy. The forward and inverse kinematics equations are derived using HTM (homogeneous transformation matrix). Based on the HTMs and dynamic models of five-axis machine tool, geometric and dynamics error models are developed. NC test paths such as CK1, CK2 and CK4 are planned by utilizing the



inverse kinematic equations. Furthermore, two trajectory planning methods including measurement path planning and FANUC TCP (tool center point) control are introduced in this study. Finally, a real-time TCP interpolation algorithm is performed to generate a smooth feedrate profile for NC paths. Simulations are performed to verify the accuracy of error models and validate the feasibility of trajectory planning algorithms for a five-axis machine tool with a swivel head and a rotary table.

一、前言

新一代數控工具機之發展正朝向智能化、多軸加工、高速高精度、數位串列控制等目標邁進，能夠銑削高精度複雜曲面之多軸複合式工具機即將成為下一代主流。於 2010 年的日本國際工具機大展(JIMTOF 2010)中，日本各工具機大廠如：山崎(Yamazaki Mazak)、大隈(Okuma)、森精機(Mori Seiki)、Mitsubishi(三菱重工)等紛紛推出各式五軸複合加工機之高階機種，線性軸進給速度高達 50 m/min，旋轉軸速度 50 rpm，且切削精度可達 2 μm 。這使得五軸工具機得以廣泛應用在航太、汽車、光電、生醫等精密關鍵零組件(如：渦輪葉片、精密凸輪、精密齒模等)的加工製造上。但當五軸加工精度由微米等級依次進入次微米，再進入奈米等級後，五軸機台靜動態誤差之量測及補償技術將越形重要。

目前市面上除了 HP 以及 Reneishaw 等大廠推出 6D 雷射干涉儀可以用來量測五軸工具機線性

軸的六個幾何誤差外，亦有荷蘭 IBS Precision Engineering 公司的 R-Test、德國 Etalon 公司的 LaserTRACER 及美國 API 公司的 Laser tracker III 等產品可以進行五軸工具機幾何誤差之量測及校正。但目前產品單價偏高，且尚未能完全分離五軸工具機之靜態幾何誤差，動態誤差補償技術亦正在研究發展當中。如何建立五軸誤差模型、五軸量測以及誤差補償技術已成為高速高精度加工之必要核心技術。

本文之目的便是針對五軸工具機之靜動態誤差進行誤差模型建立與分析。藉由齊次座標矩陣推導幾何誤差數學模型以及順逆向運動方程式，再利用五軸工具機動態模型推導多軸動態誤差，同時運用逆向運動方程式規劃 NC 量測路徑。本文亦介紹兩種路徑規劃方法：包含量測用路徑規劃以及刀具中心點控制方法(TCP control)，最後利用數值模擬驗證本文所提出五軸工具機靜動態誤差模型之正確性以及路徑規劃演算法之可行性。值得一提的是，過去文獻幾乎並未針對動態伺服誤差對於五軸整體誤差進行分析，本文乃是第一篇針對動態誤差的影響進行分析與探討。

1.1 文獻回顧

五軸工具機的誤差來源可區分為結構誤差、靜態誤差與動態誤差，Slocum [1]於文獻中提到上述誤差之累積將造成五軸加工時整個工作區的體積誤差。Srivastava [2]則提出幾何誤差以及時變誤差模型，並透過 D-H 座標轉換建立幾何誤差數學模型，並得知五軸角度偏差僅受到旋轉軸誤差所影響。Lei [3-4]提出一新型 3D probe ball 量具用來量測五軸工具機的線性軸誤差，並利用齊次座標

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】349期・101年4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