

Compensation for Dynamic Errors in Freeform Surface Fabrication Using a Long-Stroke Fast Tool Servo

September 2025

HASHIMOTO, Takeshi

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	Ⓐ 乙 第	号	氏 名	橋本 剛
主 論 文 題 名 : Compensation for Dynamic Errors in Freeform Surface Fabrication Using a Long-Stroke Fast Tool Servo (ロングストロークファストツールサーボを用いた自由曲面加工における動的誤差の補正)				
(内容の要旨) 高性能光学部品は、精密機器において重要な役割を果たしている。その中でも自由曲面形状や微細構造の光学設計は、光学性能やシステム統合性を高める上で特に重要である。超精密加工技術は、このような光学部品をナノメートル精度で製造する上で重要な役割を果たしており、中でもファストツールサーボ（FTS）加工は、高精度の自由曲面光学部品を効率よく製造する有望なアプローチとして注目を集めている。しかし、これまでのほとんどの FTS 加工に関する研究は、寸法が数十マイクロメートルの微細周期的構造の加工に焦点を当てられており、ミリメートル以上のストローク動作を必要とする自由曲面加工の研究が少ない。そこで本研究では、FTS を用いたミリメートルスケールの高低差を持つ自由曲面の加工における、サーボの動的な挙動による加工誤差の解析手法を提案し、加工誤差の補正を行うことにより高精度の自由曲面加工を実現した。 第1章では、本研究の背景と目的について述べた。 第2章では、光学部品加工に用いられる超精密加工機に関する開発について概説した。また、光学部品に対する最近の需要と動向について述べ、FTS 加工を含む超精密加工方法の概要について述べた。 第3章では、自由曲面加工における主軸回転方向の角度誤差が工作物の形状誤差に及ぼす影響について調査し、その主な要因である FTS の時間遅延の同定および補正するための手法を提案した。この補正の有効性をミリメートルの高低差を持つ自由曲面形状の加工により検証し、時間遅延に起因する主軸回転方向の角度誤差を低減することに成功した。 第4章では、FTS の時間遅延の同定手法を用いて、自由曲面加工の形状誤差を推定する方法を提案した。サーボデータより算出された形状誤差の予測値を用いて 3 次元誤差マップを導出し、得られた誤差マップを補正データとして用いることで、工具軌跡を補正し加工実験を行い、自由曲面加工における形状誤差を低減することに成功した。 第5章では、凹型レンズアレイ（MLA）の FTS 加工において発生する表面のうねりの形成要因に関して調査を行った。加工後表面のうねり状態とサーボデータ解析によるサーボの動的挙動を比較評価することにより、表面のうねりを最小化する加工条件を見出した。 第6章では、凸型マイクロドームアレイ（MDA）の FTS 加工を試み、凹型 MLA 加工と比較を行った。サーボの動的挙動に起因する誤差とその加工面形状の関係について調査を行い、MDA 加工における形状誤差を低減するための加工方法の提案を行った。 第7章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめた。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	HASHIMOTO Takeshi
Thesis Title Compensation for Dynamic Errors in Freeform Surface Fabrication Using a Long-Stroke Fast Tool Servo			
Thesis Summary High-performance optical components are widely used in precision devices. Among these, freeform and microstructured optical designs are especially important for enhancing the optical functionality. Ultraprecision machining technologies play a critical role in fabricating such components, among which, fast tool servo (FTS) machining has emerged as a promising approach for producing freeform surfaces with enhanced productivity. However, most previous studies on FTS machining have focused on the machining of periodic microstructures with dimensions of several tens of micrometers, and there have been few studies on machining of freeform surfaces that require a stroke of millimeters or more. In this study, an error analysis method based on the dynamic behavior of FTS was proposed for machining freeform surfaces with millimeter-scale height differences, and the form errors were compensated for accordingly. Chapter 1 introduces the background and objective of this research work. Chapter 2 provides a brief introduction to ultraprecision machines and recent demands for optical components, and a literature review of machining methods including FTS machining. Chapter 3 presents the effect of clocking angle error in the spindle rotational direction on form errors in FTS machining of freeform surfaces. The system time delay was identified, and its compensation method was proposed. The effectiveness of the method was verified by machining freeform surfaces with millimeter-level height differences, and the clocking angle error caused by the time delay was successfully reduced. Chapter 4 proposes a method for estimating the form error of freeform surface machining using the time delay identification method for the FTS. By using the estimated form error from the servo data to derive a three-dimensional error map and using the error map as correction data for toolpath generation, the form error in freeform machining was successfully compensated for and form accuracy was improved significantly. Chapter 5 presents a method for suppressing the waviness on a concave micro lens array (MLA) surface. By comparing the surface waviness after machining and the dynamic error based on servo data analysis, the optimization of machining conditions to minimize the surface waviness was performed. Chapter 6 describes FTS machining of a convex micro dome array (MDA) with comparison with the MLA machining. The relationship between servo dynamic error and form error was investigated, and a machining method to reduce the form error in MDA machining was proposed. Chapter 7 presents the overall conclusions obtained from this research.			