

# 学 位 論 文 の 要 旨

## Study on ultraprecision finishing method for freeform optical elements

氏 名 王 賀 印

In the conventional polishing method, the deviation of the polishing direction may result in polishing stripes. Therefore, in order to improve the surface roughness, it is necessary to polish with the same position of the tool. In addition, when polishing is performed using the end face of the circular tool, a circumferential speed difference is generated in the radial direction, and material removal becomes unstable. In this study, in order to solve these problems, a rotation and revolution polishing (RRP) method was designed to polish aspheric lens molds. The conventional polishing removal model can only predict the depth of removal during fixed point polishing. In view of the above deficiencies, a material removal profile model for moving and polishing was established in this thesis. The removal was related to the contact pressure at that point, relative linear velocity and feed rate. The pressure and relative linear speed were modeled according to the contact and tool attitude. The polishing removal depth for the unit path length was integrated.

In chapter one, the definition of aspheric surfaces, aspherical curve equations were introduced. The current ultraprecision manufacturing process and measuring method of the aspherical surface were described. The ultraprecision machine tools with excellent performance were also described in detail. The purpose of the research and the composition of the doctoral thesis were elaborated in this chapter.

In chapter two, the rotation and revolution polishing method was proposed as a polishing method for an aspherical lens. The polishing tool rotates around the rotation axis and revolves with the revolution axis. The revolution axis is perpendicular to the polished area and just passes through the contact center. Both axes are in the same plane and maintain a fixed angle. With such a tool structure, the direction of the movement path of the tool in the contact surface continuously changes during polishing, and the directionality and uniformity of the path can be improved. The 3D modeling was built using SolidWorks software.

In chapter three, the mathematical model of the fixed point and single path scanning type polishing was studied. The characteristics of material removal by rotation and revolution type polishing was discussed and described. The workpiece entire surface was polished, and the characteristics were discussed. The experimental results of entire surface did not reach a smooth plane, and it was thought to be caused by the frequently changing polishing direction. In the end of this chapter, we expanded on the previous content and built a material removal model at the vertical bisector of the corner.

In chapter four, the small-diameter polishing tool was used to mount the three-axis CNC machine tool for the entire plane polishing. The mathematical theory was modified and the RRP method for point, line, and surface was optimized. A model based on the Preston equation was built and validated. A polishing experiment on the electroless Ni-P substrate was carried out, the polishing characteristics were discussed. The XY-YX polishing scan path achieves high surface quality. Roughness of Ra 0.12 nm could be achieved.

In chapter five, the conclusions of the paper were summarized, and the prospects for future research were also presented.

# 学 位 論 文 の 要 旨

## 自由形状光学素子の超精密仕上げ法の研究

氏 名 王 賀 印

本研究では、各種光学素子、特に自由形状光学素子の超精密仕上げ加工法を研究として自転／公転型研磨法を提案した。これまでの研磨加工法では、研磨工具の端面、あるいは工具の円周面を使用し、研磨工具の速度差による研磨除去量分布や研磨痕の残留などが顕在するため、研磨加工が作業者の能力やスキルに依存し、研磨量の安定性や再現性が低く、作業の自動化は極めて困難であった。本研究で提案した自転／公転型研磨法は今までの研磨法の問題点を意識し、安定的に研磨が行えることを目指した。実際にその効果を理論的、実験的の両面から実証した。本論文は5章で構成される。

第1章では、本研究に取り扱う非球面の定義、非球面曲線の方程式、非球面の測定法の紹介とともに、非球面光学素子の製造方法とその問題点を調査し、本研究の背景や研究の意義、位置づけを明らかにした。

第2章では、本研究で提案した自転／公転型研磨法の原理を説明し、パイプ状研磨工具を用いて、その軸線周りに回転する自転運動を行う。また、その研磨工具の軸は、ワークの法線に対して傾き、工具の端面とワークの接触面の中心を通る軸周りに公転運動を同時に行う特徴である。このような構造とすることによって、研磨加工中にワークとの接触領域内のツールの走行軌跡の方向を連続的に変化させて、研磨軌跡の等方性と、軌跡密度の均一性を高めようというものである。加工中工作物とツールの接触領域内に均一な研磨除去量が発生して、研磨能率も良好かつ安定であると期待できる。本章では SolidWorks ソ

ソフトウェアを使用して研磨ユニットの設計を行い、実現可能な自転／公転型研磨ユニットの設計、試作を行った。

第 3 章では、自転／公転型研磨法による光学ガラス材料の定点研磨実験を行い、パイプ状研磨工具による走査研磨法の数学モデルを構築した。研磨実験中に研磨ツールの形状が安定的に維持でき、研磨エリア内の速度分布により研磨面粗さも一様に仕上げることを確認できた。まず、定点研磨理論に基づく数学モデルを提案し、研磨実験結果との一致性を確認し、それによる定点研磨除去形状の予測を行った。次に、工作物表面の全体研磨のための走査研磨を検討した。パイプ状研磨工具の走査軌跡、除去モデルについて検討し、実験結果と比較を行った。また、将来自由曲面の研磨において研磨シミュレーションによる工具パスの検証や修正研磨への応用の可能性を検討した。平面実験の結果は理想でなかったが、その原因についても考察し、研磨工具のスキャン軌跡検討の必要性を言及した。

第 4 章では、前章の平面研磨実験結果を受けて、自転／公転型研磨法による全面研磨のための研磨工具スキャン軌跡の検討を行った。研磨工具は小径回転式研磨ツールを用い、3 軸 CNC 研磨装置によるスキャン研磨実験を行った。実験対象も中性子ミラー基板材料である無電解 Ni-P めっき基板を使用した。研磨実験では小径回転工具直径や工具スキャンピッチやスキャン方式の検討を行い、工作物の研磨除去量、表面粗さ、形状精度への影響について考察した。最終的に検討した XY-YX スキャン方式で走査研磨は高い表面品質が実現し、Ra 0.12 nm の表面粗さを得ることができた。

第 5 章では、本研究で得られた結論をまとめ、今後研究の展開を述べる。