

超精密加工による高品位表面の創成に関する研究

中尾 陽一* 林 晃生** Sangkee Min***

Study on Generation of Advanced Surfaces by Means of Ultra-Precision Machining Processes

Yohichi NAKAO* Akio HAYASHI** Sangkee MIN***

1. 研究背景

超精密加工分野における代表的な加工が単結晶ダイヤモンド工具による切削および研削加工である。本加工は、従来より、各種光学部品の創成に使用されてきているが、近年では精密なマイクロ部品の創成に対する需要が高まってきている。具体的には、航空機、先端医療分野、また、乗用車の自動走行システムの開発が活発になるとともに、当該分野に使用される各種センサや光学部品の加工にも超精密切削加工の重要性が高まってきている。

超精密切削加工は、一般的な工作機械よりも高精度の超精密工作機械が使用される。特に、マイクロ部品の創成には、超精密工作機械用テーブルの運動精度の向上が望まれており、その要求精度は数十 nm になっている。

そこで、超精密工作機械用テーブルの運動の真直度を向上させる制御システムの開発を進めた。従来、運動の真直度の制御を行った研究は皆無であり、その方法も確立されていなかった。また、本プロジェクト研究では、単結晶ダイヤモンドバイトにより、従来から加工対象であった主要材料ではなく、適用が難しいとされている数種類の難削材料に対して、鏡面加工方法の開発を試みている。

本稿では、これらの研究のうち、これまでの研究で開発したウォータードライブステージの運動の真直度制御、すなわち、姿勢制御と送り方向に垂直な変位制御について述べる。

2. プロジェクト研究の実施状況

超精密工作機械に対する要求加工精度は、サブミクロンからナノメートルオーダーに達している。このため、工作機械にも同レベルの変位制御が必要になりつつある。本研究では、これまでに開発したウォータードライブステージと水静圧スピンドルに対して、静圧軸受に制御機構を具備させることによる高機能化を実現した。

2.1 ウォータドライブステージの姿勢および真直度制御系の開発

昨年までの研究で図1に示すウォータードライブステージに対して、ピッチング等の姿勢並びに送り方向に垂直方向の変位（以下、垂直変位と記す）の同時制御系を開発した。これまでの研究では、テ-

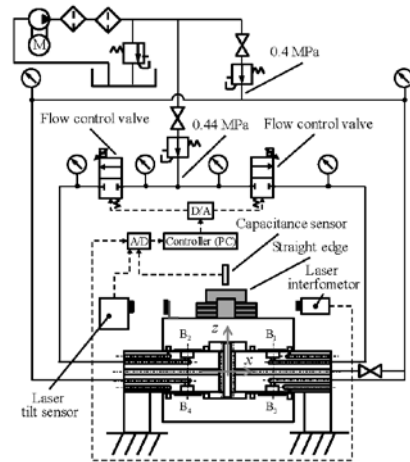
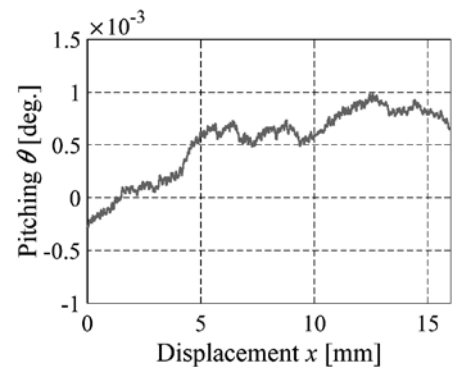
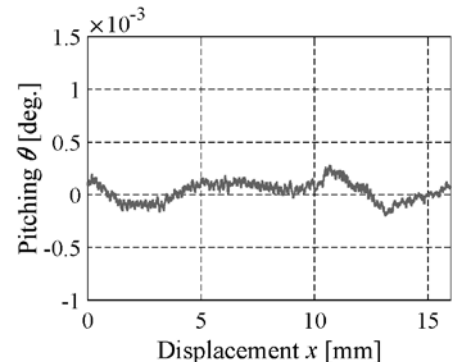


図1 ウォータドライブステージの姿勢制御システム^[1]



(a) 開発した制御系を使用しない場合



(b) 開発した制御系を使用した場合

図2 送り動作中のウォータードライブステージの姿勢制御性能

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助教 機械工学科（現 金沢工業大学機械工学科講師）

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

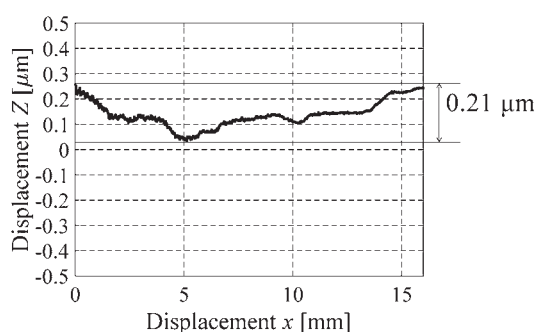
***客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

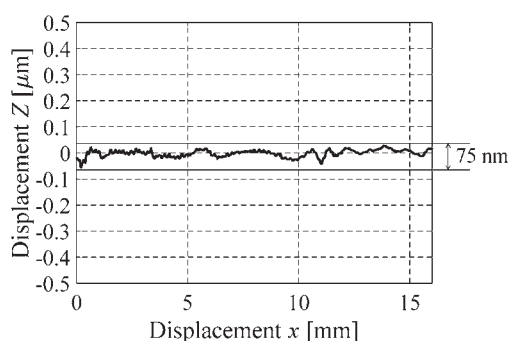
ブルに送り動作を与えない条件下における姿勢と垂直変位の制御に成功していた。今年度は、テーブルに送り動作を与えた場合の姿勢と垂直変位の制御系を開発し、その制御性能を実験により検討した。さらに、送り動作中のテーブルに対して、外部荷重をステップ状に与えた場合の制御性能についても実験によって調べた。

以下に実験結果^{[2],[3],[4]}を示す。図2は送り動作中のテーブルの姿勢変化を示す。これによれば、開発した制御系を用いない場合、 1.0×10^{-3} deg. 程度の姿勢誤差が発生している。これに対して、開発した制御系を組み込むことにより、図2(b)に示すように姿勢誤差は、 0.4×10^{-3} deg. 程度にまで減少させることに成功している。

同様にして、垂直変位についても制御性能の評価を行った。図3(a)に示す結果によれば、開発した制御系を用いない場合、 $0.21 \mu\text{m}$ 程度の垂直変位誤差が発生している。これに対して、開発した制御系を組み込むことにより、図3(b)に示すように誤差は、 75nm 程度にまで減少しており、開発した制御系をウォータドライブステージの制御系に組み込むことにより、大きな加工精度の向上が期待でき



(a) 開発した制御系を使用しない場合



(b) 開発した制御系を使用した場合

図3 送り動作中のウォータドライブステージの垂直変位制御性能

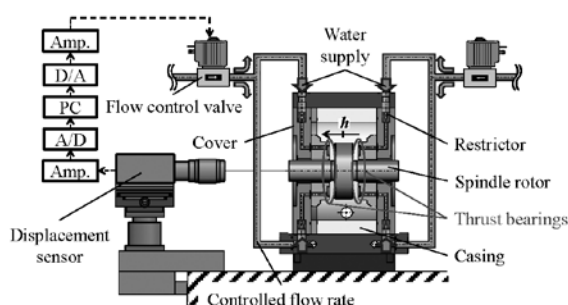


図4 静圧軸受の微小変位制御システム

ることを確認した。

2.2 水静圧スピンドルの微小変位制御系の開発

次に水静圧スピンドルの変位制御に関する研究成果を示す。昨年度までの研究では、図4に示す水静圧スピンドルに対して、外部に設けた流量制御弁による流量制御により、水静圧軸受の変位フィードバック制御系を開発した。これまでに軸受剛性の無限大化に加え、静的な性能評価によって、 10nm の位置決め分解能を実現した。今回、外部負荷荷重に対する制御性能や時間とともに変化する目標値に対する制御性能の評価を行った。

図5はステップ状に変化する 1N の外部荷重を与えたときの制御応答を示す^[5]。これによれば、加えられた外部荷重によって、一旦、 20nm 程度の軸変位が発生しているが、開発した制御系によって 0.1 秒の後には、初期の状態が維持されることが確認できる。

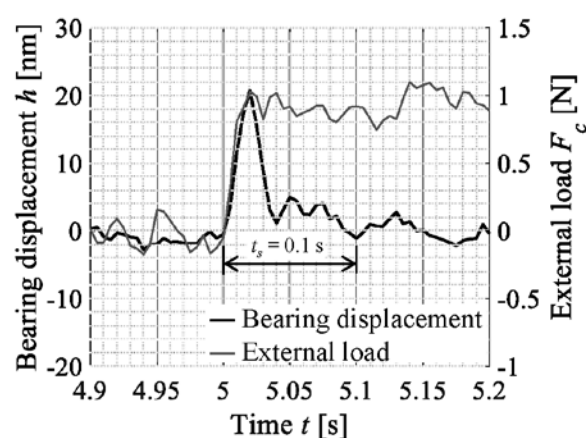


図5 ステップ状の外部負荷に対する制御応答

3. まとめ

本研究プロジェクトでは、超精密加工による高品位表面の創成を目指して、超精密工作機械用の高度機械要素技術の開発と従来材料からの代替が期待される新材料に対する超精密加工の研究を行ってきた。これまでの研究成果により論文賞を受賞するとともに、産業界との連携にも繋がりがつつある。

参考文献

- [1] 中尾, 林, S. Min, 神奈川大学工学研究所報39号, 159.
- [2] S. Shibata, A. Hayashi and Y. Nakao, Trial study on pitching and vertical displacement control of water driven stage, Proceedings of ICPE2016 (Hamamatsu, 2016. 11).
- [3] S. Shibata, A. Hayashi and Y. Nakao, Measurement of vertical displacement of water driven stage for pitching control during feed motion, Proceedings of 31th ASPE Annual Meeting (Portland, 2016.10).
- [4] 柴田 悟史, 林 晃生, 中尾 陽一, ウォータドライブステージの姿勢制御の試みー第二報送り動作時におけるピッチングと上下方向の変位制御ー, 日本機械学会北陸信越支部第54期総会・講演会論文集 (2017.3).
- [5] Y. Yamada, A. Hayashi and Y. Nakao, Design of positioning control system of opposed pad water hydrostatic thrust bearings, Proceedings of 31th ASPE Annual Meeting (Portland, 2016.10).