

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560131

研究課題名（和文）

ウォータドライブ超精密加工システムの開発と加工環境制御下における水中超精密加工

研究課題名（英文）

Development of water driven ultra-precision machining system and diamond turning in temperature controlled water environment

研究代表者

中尾 陽一 (NAKAO YOHICHI)

研究者番号：00260993

研究成果の概要（和文）：ウォータドライブステージを開発した上、これとウォータドライブスピンドルを組み合わせたウォータドライブ超精密加工システムを開発した。次に、ウォータドライブステージの速度制御を目的として、フィードバック制御系を設計開発し、テーブルに負荷変動が存在しても、テーブル速度を一定に保てることを確認した。さらに、開発した加工システムを水温制御された水中に設置し、温度制御された水中環境下でダイヤモンド切削加工を実施した。

研究成果の概要（英文）：

The water driven stage was developed. Then the water driven ultra-precision machine tool system composed of the water driven stage and the water driven spindle was fabricated. A speed control system of the water driven stage was designed in order to regulate the feed of the table during diamond turning process of the developed machine tool system. The experimental and simulation studies verified that the controller effectively regulates the feed even external loads acting on the table of the stage. All the developed machine tool system was then set in water bath achieving better thermal stability of the machining environment. Finally, diamond-turning tests were carried out using developed system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工作，生産工学・加工学

キーワード：超精密工作機械，ウォータドライブスピンドル，ダイヤモンド切削，水静圧軸受，マイクロファクトリ，水圧駆動システム，ウォータドライブステージ，加工環境制御

1. 研究開始当初の背景

各種光学部品などに代表される精密機械部品の加工には、超精密工作機械が利用される。それは、高精度の機械運動と精密に刃先創成された単結晶ダイヤモンドバイトによ

って、ナノメートルオーダーの加工を実現するものである。その加工精度向上には、加工装置を設置した環境制御が必要になっている。また、加工需要の多くは、小型精密部品であり、超精密小型工作機械の開発が求められて

いた。

ダイヤモンド切削加工用の加工システムに関する代表的な研究として、米国 LLNL における LODTM に関する一連の研究がある。これは、建物内すべてを温度制御した環境に加工システムを設置するなど非常に大がかりな設備を必要とし、産業用途には適さない。

加工システムの運動制御向上を目指した研究としては、スピンドルやステージについて多くの研究が行われている。これらは、ほとんど空気静圧軸受、あるいは油静圧軸受を使用したものである。空気静圧軸受は空気の圧縮性により、高剛性化を図りにくく、特に、小型スピンドルや小型ステージに組み込み可能な小型静圧軸受においては、高剛性化が極めて困難になっている。また、油静圧軸受は高速化が困難であった。

2. 研究の目的

本研究課題は、超精密メゾスケール部品の創成に適した、A3 サイズ程度に収まる小型ウォータドライブ加工システムを開発し、これを温度制御された水中加工環境下に設置して、水中超精密加工を実現することを目的にしたものである。具体的には、まず新たに考案したウォータドライブステージを開発し、これをすでに開発されたウォータドライブスピンドルとともに、高精度に温度制御された水を利用して、小型加工システムを駆動・制御する。そのうえ、加工システム全体をやはり高精度に温度制御された水中（水道水や純水）に設置し、加工精度の更なる向上を目的にして実施したものである。

3. 研究の方法

本研究は次のように進められた。

(1) ウォータドライブステージの開発

ウォータドライブステージの詳細設計を再検討し、導出した数学モデルに基づいたシミュレーションを行い、ステージの基本性能に関する最終評価を行った後、ステージの製作を行った。

(2) ウォータドライブステージの基本性能評価

製作したウォータドライブステージの基本性能評価試験を行う。具体的には、ステージに供給する水の流量に対するテーブル速度に加え、水静圧軸受の支持剛性を測定した。

(3) ウォータドライブステージのフィードバック制御系設計と性能評価

ウォータドライブステージの数学モデルを導出し、これに基づいてテーブルの速度を一定にすることを目的に、フィードバック制御系の設計を行った。さらに、設計したフィードバック制御系の制御性能に関する評価を実験とシミュレーションによって行った。特に、テーブルの送り方向に作用する外部負荷が制御性能に及ぼす影響について検討した。

(4) ウォータドライブ超精密加工システムの構築

開発したウォータドライブステージと先行研究において開発済みのウォータドライブスピンドルを組み合わせ、ウォータドライブ超精密加工システムを構築した。

(5) 一般的な空気中におけるダイヤモンド切削試験

開発したウォータドライブ超精密加工システムにより、まず、空気中におけるダイヤモンド切削試験を行った。一連の加工実験を行う過程で、加工システムに供給する水の脈動が加工精度に及ぼす影響についても検証し、水の脈動抑制対策を施した。

さらに、赤外線サーモグラフィによって、スピンドルやステージの温度と水温の相関を測定し、水温制御による加工装置の熱的安定性を評価した。

(6) 加工環境制御下における水中ダイヤモンド切削試験

試作した専用水槽にウォータドライブ加工システムを設置し、ダイヤモンド切削試験を実施した。加工中、水中環境下で発生する切り屑の可視化を行った。

4. 研究成果

(1) ウォータドライブステージの開発

開発したウォータドライブステージを図 1 に示す。これは、水静圧軸受と水圧シリンダを内蔵したもので、特に、駆動合力がテーブル重心に作用する構造を特徴としている。また、水静圧軸受と水圧シリンダに供給する水の温度を制御することにより、装置の熱的安定性向上も期待できるものである。



図 1 ウォータドライブステージ

(2) ウォータドライブステージの基本性能評価

ウォータドライブステージの基本性能を実験によって明らかにした。代表的性能である、ステージに供給した水の流量と速度の関係を図 2 に示す。

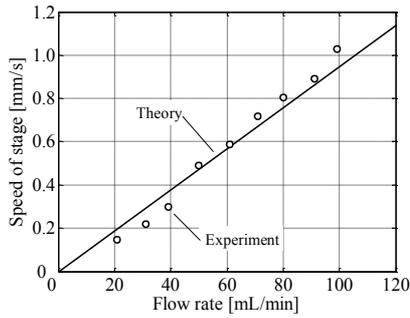


図2 ステージの速度性能

これらの結果によれば、開発したウォータドライブステージは、超精密加工に要求される送り速度をわずか数十 ml/min の流量で実現できることを示した。

また、ステージの駆動力に関する性能を図3に示す。

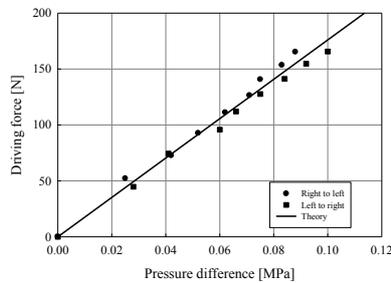


図3 ステージの駆動力

(3) ウォータドライブステージのフィードバック制御系設計と性能評価

開発したフィードバック制御系の性能をシミュレーションと実験によって確認した。これによれば、図4に静特性を示す通り、速度定常誤差は1%程度となった。

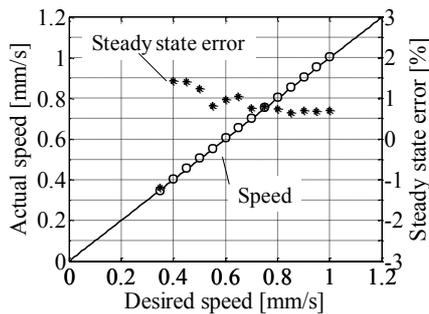


図4 フィードバック制御系の静特性

さらにステップ応答実験によって制御系の動特性評価を行った結果、図5に示す通り、シミュレーションと実験結果は良く一致し、良好な制御性能が得られた。

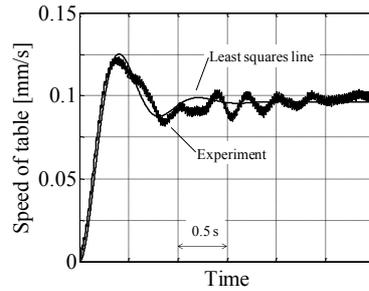


図5 フィードバック制御系の動特性

また、テーブル移動中にテーブルに作用する外部負荷をステップ状に変化させたも、図6に示すように、一時的に速度変動が発生するが、1秒以内に外部負荷の影響を制御系が補償できることを確認した。

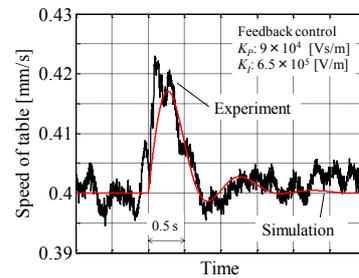


図6 ステップ状の外部負荷に対する応答

(4) ウォータドライブ超精密加工システムの構築

開発したウォータドライブ超精密加工システムの構成を図7に示す。

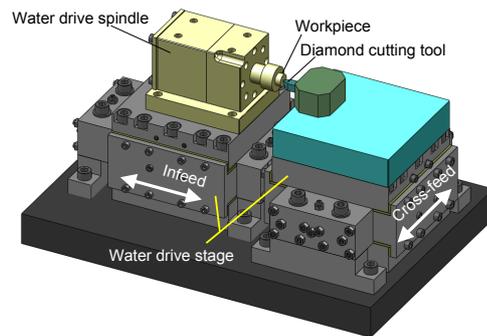


図7 ウォータドライブ超精密加工システムの構成

これは、ウォータドライブステージ上にダイヤモンドバイトを設置し、ウォータドライブスピンドルに取り付けた工作物を切削する小型加工システムである。

(5) 一般的な空気中におけるダイヤモンド切削試験

開発したウォータドライブ超精密加工システムによるダイヤモンド切削試験を行った。加工に使用した工作物材料は無酸素銅とアルミニウム合金である。加工例を図8に示す通り良好な加工面の創成が可能であることを確認した。表面粗さは11 nmRaであった。



図8 開発した加工システムによる加工結果（無酸素銅の場合）

また、ウォータドライブスピンドルに供給する水温制御の装置の熱的安定性に関する評価を行った。これによれば、図9に示す通り、水温とスピンドル温度には強い相関があり、水温を制御することにより装置の熱的安定性の向上が期待できることを示した。

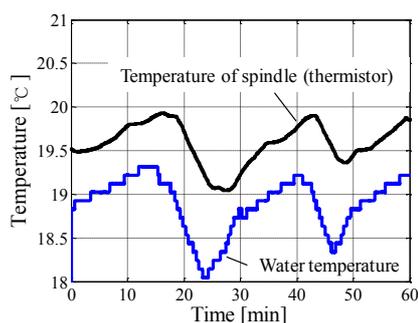


図9 水温とスピンドル温度の関係

(6) 加工環境制御下における水中ダイヤモンド切削試験

開発したウォータドライブ超精密加工システムを水温制御された水槽中に設置して、水温制御下でダイヤモンド切削を行った。さらに、加工中の水中における切り屑の挙動を調べた。これらの結果は、今後の超精密加工の加工精度と加工面品位の改善に利用する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

(1) Y. Nakao, S. Nakatsugawa, M. Komori and K. Suzuki, Design of Short-Pipe Restrictor of Hydrostatic Thrust Bearings, Proc. of ASME

2012 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Houston, 2012-11). (査読有り)

(2) Y. Nakao, T. Sano, S. Harada and K. Suzuki, Evaluation of dynamic characteristics of water driven stage, Proceedings of 12th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 1, pp. 384-387, (Stockholm, 2012-6). (査読有り)

(3) Y. Nakao, T. Sano, M. Nagashima and K. Suzuki, Development and modeling of water driven stage, Proc. of ASME 2011 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Denver, 2011-11). (査読有り)

(4) T. Sano, M. Nagashima, Y. Nakao and K. Suzuki, Design of Speed Control System of Water Driven Stage, Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, CD ROM, (Okinawa, 2011-10). (査読有り)

(5) Y. Nakao, T. Sano, M. Nagashima and K. Suzuki, Model Verification and Design of Speed Control System of Water Driven Stage, Proc. of ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences, CD-ROM, (Washington DC, 2011-8). (査読有り)

(6) 中尾, 新宮, 大林「小型流体駆動スピンドルの回転速度制御用ロータリ形流量制御弁」日本機械学会論文集(C編) Vol. 77, No. 774, pp. 514-526, (2011-2). (査読有り)

(7) Y. Nakao and M. Ishikawa, Angular Position-Control of Fluid-Driven Bi-Directional Motor, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, No. C11, pp. 2350-2362, (2010-11). (査読有り)

(8) Y. Nakao, H. Niimiya and T. Ohbayashi, Design of Rotary-Type Flow Control Valve for Control of Water-Driven Spindle, Proc. of ASME 2010 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Vancouver, 2010-11). (査読有り)

(9) Y. Nakao and M. Ishikawa, Modelling and characteristics of fluid-driven bi-directional motor for angular position-control system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, No. C4, pp.863-876, (2010-4). (査読有り)

(10) 中尾, 浅岡, 藤本「回転角制御機能を備えた流体駆動スピンドルの開発と回転角制御」日本機械学会論文集(C編), Vol. 76, No. 763, pp. 749-758, (2010-3). (日本機械学会賞(論文)受賞) (査読有り)

(11) Y. Nakao and N. Asaoka, Angular Position Control of Fluid-Driven Spindle, Proc. of ASME 2009 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Florida, 2009-11).

〔学会発表〕(計 26 件)

- (1) 佐野, 鳥居, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブステージの速度制御系設計 第三報: ステージのフィードバック速度制御系の性能評価」, 日本機械学会関東支部 19 期総会講演会学会発表, (首都大学東京, 2013 年 3 月 15 日).
- (2) 原田, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブ加工システムによるダイヤモンド切削の試み」, 日本機械学会関東支部 19 期総会講演会学会発表, (首都大学東京, 2013 年 3 月 15 日).
- (3) 中尾, 小森, 牧野, 中津川, 鈴木, 「水静圧軸受の支持剛性を最大にする短管軸受絞りの設計問題」, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会学会発表, (由利本荘, 2012 年 10 月 27 日).
- (4) 原田, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブステージの性能評価 (第一報 水静圧軸受の剛性測定)」, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会学会発表, (由利本荘, 2012 年 10 月 27 日).
- (5) 佐野, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブステージの速度制御系設計 (第二報 比例弁による速度制御の試み)」, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会学会発表, (由利本荘, 2012 年 10 月 27 日).
- (6) 原田, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブステージに組み込まれた水静圧軸受の剛性測定」, 日本機械学会 2012 年度年次大会学会発表, (金沢, 2012 年 9 月 10 日).
- (7) 佐野, 鈴木, 中尾, 「ウォータドライブステージの速度制御系設計 第一報 ウォータドライブステージのモデル化」, 日本機械学会 2012 年度年次大会学会発表, (金沢, 2012 年 9 月 10 日).
- (8) 中尾, 「ダイヤモンド切削用流体駆動スピンドルの回転角制御」, 日本機械学会九州支部・第 62 期総会講演会学会発表, (熊本, 2010 年 3 月 15 日).

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/lab/na_kao_lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 陽一 (NAKAO YOICHI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 00260993