

平成 21 年 6 月 18 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18560115

研究課題名（和文）

超精密メゾスケール部品創成用ウォータドライブ小型加工システムの開発

研究課題名（英文）

Development of water driven machining system for ultra-precise meso-scale products

研究代表者

中尾陽一 (NAKAO YOHICHI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：00260993

研究成果の概要：

本研究は、マイクロ非球面レンズなどに代表される小型超精密部品の創成に適した、小型加工システムの開発を目的として実施したものである。本研究の特徴は、加工システムの高精度化ならびに小型化に適していると考えられるウォータドライブ方式によるスピンドルとステージを開発したことである。さらに、開発したスピンドルとステージの基本性能や制御性能を評価した後、これらを組み合わせたウォータドライブ小型加工システムを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工作・生産工学，工作機械，機械要素，流体工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

現在，一般に使用されている超精密工作機械用スピンドルの多くは，空気静圧軸受によって支持される。この場合，空気の高い圧縮性のために，軸受の高い支持剛性を得ることが難しく，大きな軸受剛性を得ようとする場合，受圧面積を広くするためにスピンドル径を大きくしなければならない。その結果，加工システムの小型化を図る際の障害になっている。

一方，次世代光デジタル変換素子や光ファイバ用光学素子の性能を決定する，マイクロ非球面レンズ（マイクロレンズアレイ）やその金型などがある。さらに，今後はマイク

ロ鉗子や医療用マイクロロボットといった医用機械システムの開発のためにも，超精密小型機械部品の創成が必要不可欠になっている。この種の小型部品の創成は，従来から使用されている超精密工作機械でも創成可能ではあるが，種々の観点から小型加工システムの方が適している。特に，近年関心が高まっている，加工システムのエネルギー消費の観点からは，消費動力が少ない小型加工システムが適しており，超精密加工に適用できる小型加工システムの開発が必要になっている。

## 2. 研究の目的

本研究は，研究代表者が開発したウォータ

ドライブスピンドルをコア技術にして、小型超精密部品の創成に適したウォータドライブ小型加工システムを開発することを目的にして実施されたものである。加工システム構築のため、本研究においては、回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルに加えて、ウォータドライブステージの開発を行う。さらに、開発するスピンドルとステージの基本性能評価を行うのに加えて、制御系の開発とその性能評価を行う。最終的には、開発したスピンドルとステージで構成されるウォータドライブ小型加工システムを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究は次のように進められた。

#### (1) 回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルの開発

これまでに開発に成功しているウォータドライブスピンドルの機能を拡張し、回転角制御が行えるようにするために、新たなウォータドライブスピンドルの構造を検討し、導出した設計用の数学モデルに基づいて、設計用ソフトウェアを開発し、スピンドルの主要寸法を決定した。次に、スピンドルの詳細構造を検討した後、スピンドルの開発を行った。

#### (2) 回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルのための回転角制御系の設計および制御性能の評価

開発したスピンドルの回転角制御を行うために、数学モデルを導出した。つぎに、この数学モデルに基づいて制御系設計を行うとともに、スピンドルの回転角制御性能を検討した。

#### (3) ウォータドライブステージの開発

ウォータドライブスピンドルと組み合わせて、小型加工システムを構成するために、新たにウォータドライブステージの設計製作を行った。

#### (4) ウォータドライブ小型加工システムの構築

開発するウォータドライブスピンドルとウォータドライブステージを組み合わせた小型加工システムを構築した。

### 4. 研究成果

#### (1) 回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルの開発

開発したスピンドルの基本構造を図1に示す。本スピンドルの特徴は次の通りである。

- ① ロータは水静圧軸受で支持される。
- ② ロータの駆動には水のエネルギーを使用する。そのために、ロータ内に流す水のエネルギーを、トルクに変換するための流路がロータ内部に組み込まれている。
- ③ スピンドルには2種類の供給ポートが設けられており、供給ポートの切り替えによ

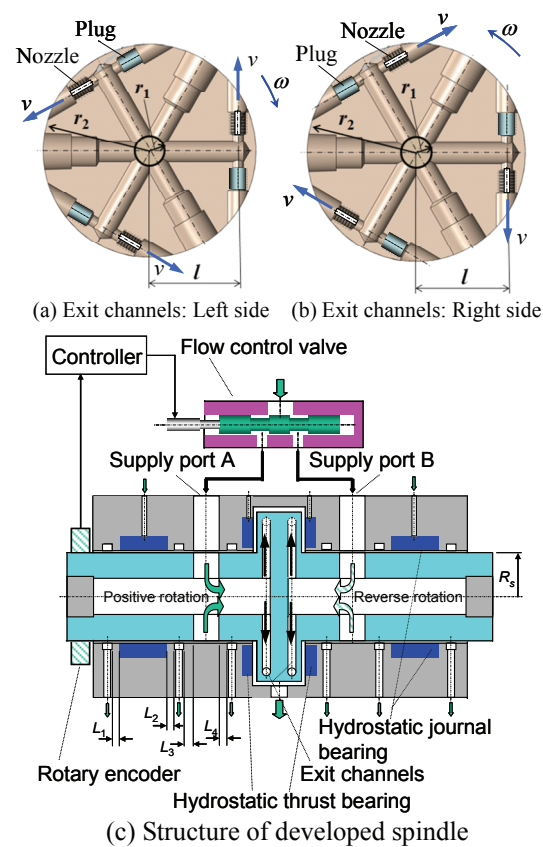


Fig. 1 Developed water driven spindle

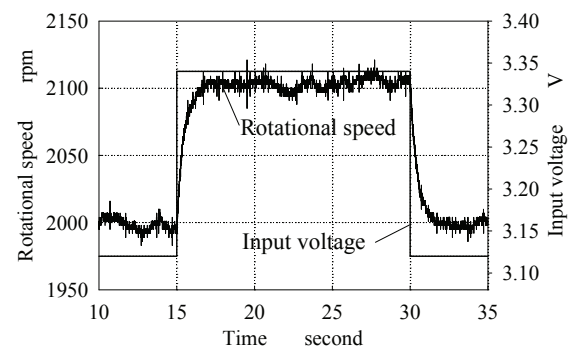


Fig. 2 Step response of water driven spindle

りロータの回転方向を換えることができる。従って、適当な流量制御弁と制御系を組み込むことにより、ロータの回転角を制御することも可能になる。

#### ④ スピンドルの駆動に供給する水は冷却媒体としても利用することができる。

#### (2) スピンドルの基本性能評価

開発したスピンドルの基本性能評価を行った。その結果によれば、スピンドルへの供給総流量が 10 l/min のとき、スピンドル回転数は 2,000 rpm、また、このときの流体圧力は、約 1.7 MPa となる。スピンドル出力は総供給流量 20 l/min 時に、80 W (3,800 rpm) となった。導出した数学モデルによってスピンドルの

全効率を計算した結果、総供給流量が 20 l/min 程度のときには 3% 程度であった。

スピンドルの静特性に加えて、スピンドルの動特性についてもステップ応答実験ならびに理論計算により評価した結果、図 2 に実験結果を示すように、スピンドル単体の時定数は 0.96 秒であった。

(3) 回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルのための回転角制御系の設計および制御性能の評価

開発したスピンドルに対して、回転角制御系の設計を行った。まず、スピンドルの回転角をフィードバックし、一般的な比例積分制御系を構成すると、閉ループ制御系は 2 次系で表せることを示した。その結果、この閉ループ制御系の固有振動数と減衰係数を定めることにより、目標特性が得られる 2 種類の制御ゲインを決定するための理論式を導出した。

さらに、理論的検討によりスピンドルに作用する外部負荷トルクによって、定常偏差が残ることを示した。この検討結果に基づいて、外部負荷トルクを補償するために、外乱オブザーバを設計した閉ループ制御系内に組み込んだ。

設計した回転角制御系の制御性能をステップ応答により評価した。実験結果を図 3 に示す。ここでは、外乱オブザーバの有無による応答の違いを比較している。これによれば、外乱オブザーバを使用しなければ、スピンドルは  $6^\circ$  程度までしか回転せず、その結果、 $4^\circ$  程度の定常偏差が発生している。これは次のような理由による。すなわち、本スピンドルは、低粘度油による静圧軸受で支持されているため、軸受部の摩擦が非常に小さい。一方、ロータには僅かな不釣り合いが存在し、これによるトルクが一種の負荷トルクとして作用するため、定常偏差が発生する。

一方、外乱オブザーバを用いた場合には、図中に実験結果を示すように、定常偏差は  $0.02^\circ$  であり、使用したロータリエンコーダの分解能である  $0.018^\circ$  と同等になり、ロータの不釣り合いによるトルクは、外乱オブザーバにより補償できることが確かめられた。

さらに、スピンドルに外部負荷トルクを印加した場合の制御性能を調べたが、この場合にも、外乱オブザーバが組み込まれた回転角制御系は、定常偏差をロータリエンコーダの分解能と同等の  $0.02^\circ$  まで小さくできることを明らかにした。

(4) ウォータドライブステージの開発

ウォータドライブスピンドルと組み合わせ、小型加工システムを構成するために、新たにウォータドライブステージの構造と動作原理を考案し、設計製作を行った。

図 4 に本研究において考案したウォータドライブステージの基本構造を示す。考案した

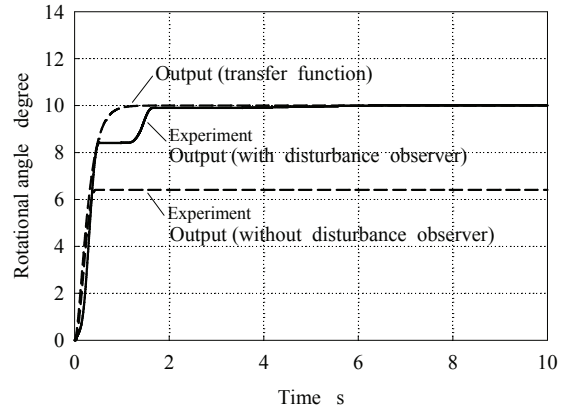


Fig. 3 Step response of designed angular position feedback control system

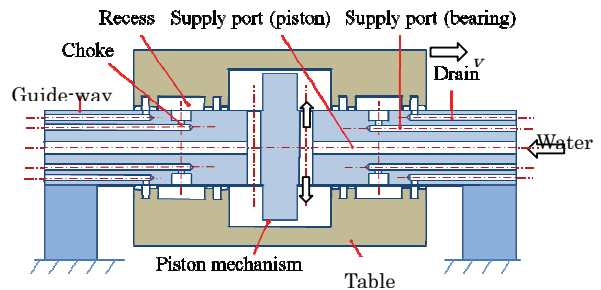


Fig. 4 Structure of developed water driven stage

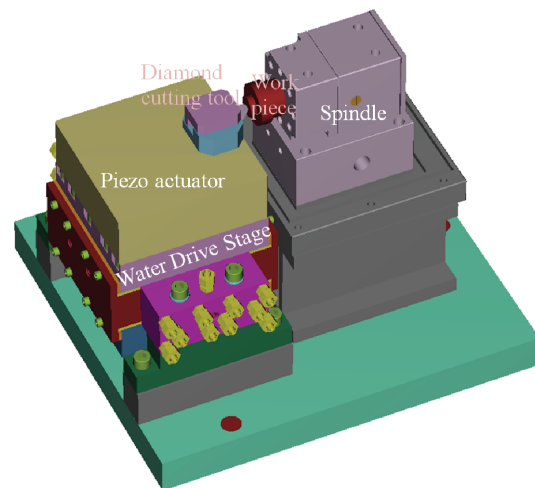


Fig. 4 Developed water driven ultra-precision machining system

ウォータドライブステージのテーブルは、ステージ本体から供給される水の静圧によって非接触で支持される。また、ステージ本体の一部が長方形断面のピストン構造をなし、また、テーブルがシリンダ構造をなすため、ステージ本体から供給する水によってテーブルが動作する。例えば、図中シリンダ室 A

に水を供給すると、テーブルは左方向に滑らかに動く。また、このとき発生する流体圧力による駆動合力はテーブルの重心に作用し、さらに、ステージは上下左右に対称構造になっているため、高い運動精度が得られることを特徴としている。

開発したウォータドライブステージのストロークは、20 mm であり、水をわずか 30 ml/min 供給することにより、6 mm/min の送り量で動作することを確かめている。また、本ステージの時定数は 2 ms であり、応答性が良いことを明らかにした。

本ステージに組み込まれた水静圧軸受の基本性能についても評価検討した。その結果、水静圧軸受の供給圧力が 0.5 MPa のとき、軸受の負荷容量は 500 N 以上、軸受剛性は 330 N/ $\mu\text{m}$  であることを明らかにし、小型超精密部品の加工用として、十分な性能を有することを示した。なお、供給圧力を上げることにより、必要であればさらなる性能向上が図れる。

#### (5) ウォータドライブ小型加工システムの構築

本研究において開発した回転角制御機能を具備したウォータドライブスピンドルとウォータドライブステージを組み合わせて、図 5 に示すウォータドライブ小型超精密加工システムを構築した。この加工システムを用いて、ダイヤモンド切削試験を行うために、ウォータドライブステージのテーブル上にはダイヤモンドバイトの微小な切り込み量を制御するためのピエゾステージを設置し、ダイヤモンド切削試験を行った。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- (1) Y. Nakao and Y. Sagesaka, Diamond Turning using Water Drive Spindle, Proceedings of 11th International Conference on Precision Engineering, pp. 157-161, (Tokyo, 2006-8). (査読有り)
- (2) Y. Nakao, T. Mizoi and Y. Minowa, Design of air drive spindle, Proc. of ASPE 2006 Annual Meeting.
- (3) Y. Nakao, Rotational Speed Control of Water Drive Spindle for Diamond Cutting, Proc. International Conference on Manufacturing Research 2007, pp. 54-58, (Leicester, 2007-9). (査読有り)
- (4) Y. Nakao and M. Ishikawa, Design of Fluid Drive Spindle and its Rotational Speed Control, Proc. of ASME 2007 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Seattle, 2007-11). (査読有り)
- (5) Y. Nakao and M. Ishikawa, Rotational Speed Control of Fluid Drive Motor, Proc. of International Symposium on Flexible Automation

2008, (Atlanta, 2008-6). (査読有り)

- (6) Y. Nakao and M. Ishikawa, Design of Angular Position Controller of Fluid Drive Spindle for Diamond Turning, Proc. International Conference on Manufacturing Research 2008, pp. 57-64, (West London, 2008-9). (査読有り)
- (7) Y. Nakao and M. Ishikawa, Design of Angular Position Control System for Fluid Driven Spindle, Proc. of ASME 2008 International Mechanical Congress and Exposition, CD-ROM, (Boston, 2008-11). (査読有り)
- (8) Y. Nakao, M. Kawakami, Design of water driven stage, Proceedings of 9th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 1, pp. 200-203, (San Sebastian, 2009-6). (査読有り)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 中尾, 溝井, 「エアドライブスピンドルの設計」日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol. 4, pp. 49-50.
- (2) 中尾, 提坂, 近藤, 「ウォータドライブスピンドルによるダイヤモンド切削」日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 Vol. 4, pp. 51-52.
- (3) 中尾, 「ウォータドライブスピンドルの回転数制御に関する検討」日本機械学会沖縄講演会講演論文集(2007-10, 那覇), pp.107-108.
- (4) 中尾, 石川, 「流体駆動スピンドルの試作と基本特性」, 日本機械学会中国四国支部・第 46 期総会講演会論文集(2008-3, 広島), pp.405-406.
- (5) 石川, 中尾, 「流体駆動スピンドルの回転数制御」, 日本機械学会九州支部・第 61 期総会講演会論文集, (2008-3, 福岡), pp.71-72.
- (6) 中尾, 石川, 「回転角制御機能を備えた流体駆動スピンドルの試作と制御系設計」, 日本機械学会 機素潤滑設計部門講演会論文集(2008-4-21, 倉敷), pp.135-136.
- (7) 中尾, 高橋, 「ワイヤドライブ・エアステージの試作とモデリング」, 2008 年度精密工学会中国四国支部愛媛地方学術講演会論文集(2008-11-15, 松山), pp. 25-26.
- (8) 中尾, 浅岡, 「流体駆動スピンドルの回転角制御に関する基礎的検討」, 計測自動制御学会九州支部学術講演会論文集, (2008-11-29, 那覇), pp.259-260.
- (9) 浅岡, 中尾, 「ダイヤモンド切削用流体駆動スピンドルの開発」, 2008 年度精密工学会九州支部福岡地方講演会論文集, (2008-12-6, 福岡).
- (10) 高橋, 中尾, 「ワイヤドライブ・エアステージの制御系設計」, 日本機械学会関西支部・第 84 期総会講演会論文集, (2009-3-17, 大阪), p. 23.
- (11) 浅岡, 中尾, 「ダイヤモンド切削用流体駆動スピンドルの性能評価」, 日本機械学会

関西支部・第 84 期総会講演会論文集,  
(2009-3-17, 大阪), p. 25.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: スピンドル装置

発明者: 中尾陽一

権利者: 神奈川大学

種類: 特許権

番号: 特願 2006-251727

出願年月日: 2006 年 9 月 25 日

国内外の別: 国内

名称: スピンドル装置

発明者: 中尾陽一

権利者: 神奈川大学

種類: 特許権

番号: 特願 2006-251728

出願年月日: 2006 年 9 月 25 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

[http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/jyuken/lab/na  
kao.html](http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/jyuken/lab/na<br/>kao.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中尾陽一 (NAKAO YOHICHI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 00260993