

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760122

研究課題名（和文）供給空気の超精密・高速制御技術を用いた静圧空気軸受エアタービンスピンドルの制御

研究課題名（英文）Control of aerostatic bearing type air turbine spindle using ultra-precision and high-speed supply pressure control technique

研究代表者

加藤 友規（KATO TOMONORI）

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20390429

研究成果の概要（和文）：本研究では、開発を進めてきた超精密高速応答圧力レギュレータをエアタービンスピンドルの回転数フィードバック制御に適用した。また、エアタービンスピンドルに外力が与えられた際の回転数の変動を抑制するために、外乱オブザーバをフィードバック制御系内に構築した。シミュレーションと実験によって、提案した方法の優位性を評価した。また、軟質金属の切削時におけるエアタービンスピンドルの回転数制御と加工面への影響について、評価を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a high-precision quick-response pneumatic pressure regulator and applied it to the rotation feedback control of an air turbine spindle. We also set a disturbance force observer in the feedback control system, in order to avoid rotation speed change caused by the disturbance force given to the air turbine spindle. By simulation and experiment, the effectiveness of the proposed method is evaluated. Then, an air turbine spindle with the proposed rotation control method is applied to aluminum cutting experiment. The effect of the proposed method on surface roughness is evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：超精密加工・静圧空気軸受・空気圧・エアタービンスピンドル，回転数制御，外乱オブザーバ，省エネルギー化，エアパワー

1. 研究開始当初の背景

超精密非球面加工機などの超精密加工機械において、高精度・高速対応・低摩擦・低振動などの優れた特性を有する、静圧空気軸受が広く使用されている。特に、高速回転が求められ、軽負荷の小径工具用や回転霧化式塗装用の主軸の駆動には、静圧空気軸受を用いたエアタービンスピンドルが用いられている。

静圧空気軸受の剛性は、供給空気圧と軸受

面積に比例し、軸受ギャップに反比例することが知られている。剛性を向上させるために空気の供給ライン圧を増加させることには限界がある。また、静圧軸受直前でライン圧を増圧機を用いて増圧する方法もあるが、この場合には増圧機による供給圧力の変動が抑制できず、超精密加工においては、脈動が加工に影響を及ぼすこととなる。軸受面積については、加工装置全体のサイズの制約があり、増加するのは容易ではない。剛性を向上

させるために軸受隙間を小さくすると、空気のせん断による発熱が問題となる。

一方、スピンドルの駆動にエアタービンを用いた場合には、ノズル、羽根形状と供給空気圧、空気流量が回転数・出力を左右する。負荷が加わることによって回転数が低下する場合には、供給空気圧を高くして所定の回転数を維持する方法が採られている。これまでに供給圧力・流量と回転数・出力トルクの関係は研究されているが、供給圧力と流量を高速かつ精密に制御する技術が確立されておらず、エアタービンスピンドルにおいて出力・回転数の高速な制御は困難であった。

2. 研究の目的

本研究課題は、その HPQR を静圧空気軸受エアスピンドルタービンの2つの供給圧制御（軸受およびタービン駆動）のうち、タービン駆動側に適用することにより、回転数の安定化・高ロバスト化を図ることを目的とした。さらに、超精密切削加工実験を行い、提案方法の有効性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、以下の方法・手順で研究を進めた。

- (1) 静圧空気軸受式エアスピンドルタービンを制御するための超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR) の開発

静圧空気軸受およびエアタービンを制御するため、スプール型サーボ弁・等温化压力容器・圧力計・圧力微分計 (PD Sensor)・層流型高速応答流量計 (QFS) により構成される HPQR (図1) を2台製作した。本研究課題では特に、消費エネルギーを評価するため、HPQR の出口側にエアパワーメータを設置した。

- (2) 回転数計測機能付の超精密切削加工用静圧空気軸受エアタービンスピンドルの製作と性能評価

光電変換による回転数計測機能付の超精密切削加工用静圧空気軸受エアタービンス

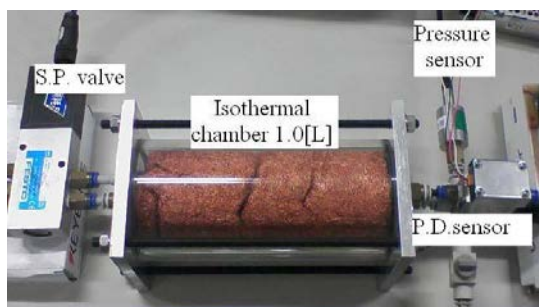


図1 新たに製作した HPQR



図2 エアパワーメータ

ピンドルユニットの設計・製作を行った。スラスト軸受・ラジアル軸受は自成形りによる静圧空気軸受とし、エアタービンは軸衝突型とした。製作したエアタービンスピンドルの回転数の制御性能・外乱応答性能について評価試験を行った。また、消費エアパワーの評価を行った。

(3) 切削加工実験と加工面の評価

提案方法により制御されたエアタービンスピンドルを用いてアルミニウム材の切削加工実験を行い、回転数の制御と加工面への影響について、評価を行った。

4. 研究成果

本研究課題の成果として以下を得た。

- (1) 超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR) の開発

スプール型サーボ弁・等温化压力容器・圧力計・圧力微分計 (PD Sensor)・層流型高速応答流量計 (QFS) により構成される HPQR (図1) を2台製作し、性能を確認した。

- (2) 回転数計測機能付の超精密切削加工用静圧空気軸受エアタービンスピンドルの製作と性能評価

エアタービンスピンドルのタービン側の供給圧力を HPQR で制御し、回転数の安定化と高速制御の実現を目的とし、HPQR の制御系に回転数フィードバック制御を取り入れることで回転数を高速かつ安定的に制御する制御系を構成した (図2)。

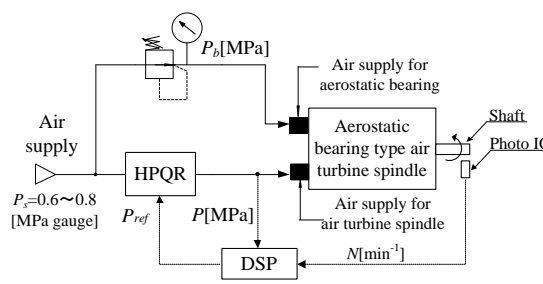


図2 提案方法の装置構成

また、エアタービンスピンドルに作用する外乱により回転数に定常偏差が発生するが、この影響を補償するために回転数フィードバック制御系内に外乱オブザーバを構成しHPQR に実装し回転数制御系を構成した (図 3)。

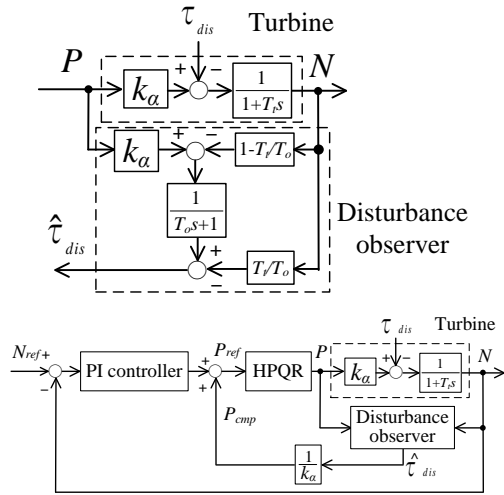


図 3 回転数制御系と外乱オブザーバ

実験的な検証を行った結果、以下の結果を得た。

- ・エアタービンスピンドルに提案方法の回転数制御を適用することで、従来の方法と比較して、回転数の時定数を 10 分の 1 程度に短縮し、回転数を高速に制御することが可能となった (図 4)。

- ・長時間エアタービンスピンドルを駆動させる実験を行い、市販のダイヤフラム型レギュレータを使用した場合と供給圧力の一定値に制御した場合は回転数が大幅に変動を起こしていたが、HPQR に回転数制御を適用した場合は回転数の変動を抑えることができた (図 5)。

- ・エアタービンスピンドルに擬似的に加工負荷による外乱を与える装置 (図 6) を用いて、エアタービンスピンドルの主軸に連続的な加工を想定した外乱が与えられた状態を再現する実験を行い、外乱がある状態のときに発生していた回転数の偏差の抑制を可能とした。まず、外乱オブザーバの性能を確認した (図 7)。

して、回転数を高速に制御することができた (図 8, 図 9)。

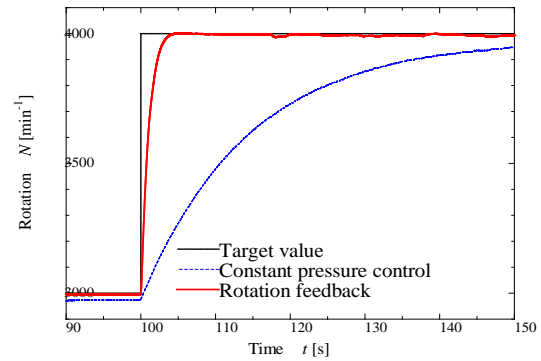


図 4 回転数制御実験結果 (ステップ応答)

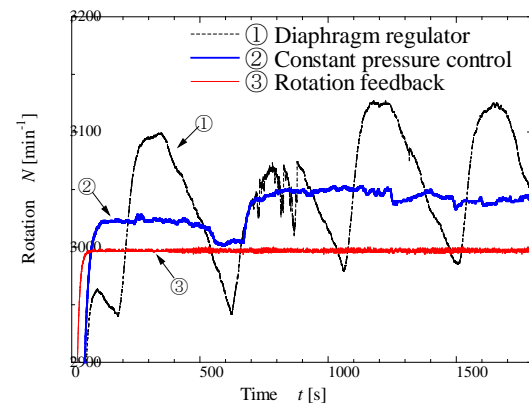


図 5 長時間の回転数安定性評価実験結果

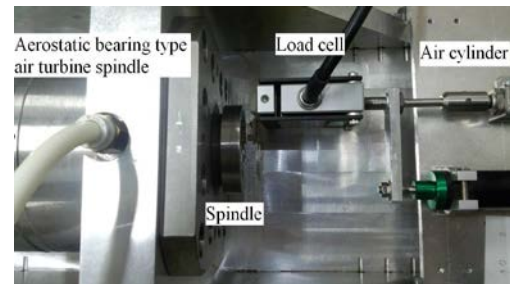


図 6 外乱試験装置

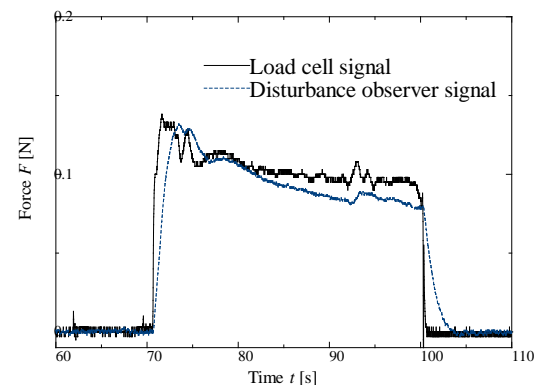


図 7 外乱オブザーバの性能確認実験結果

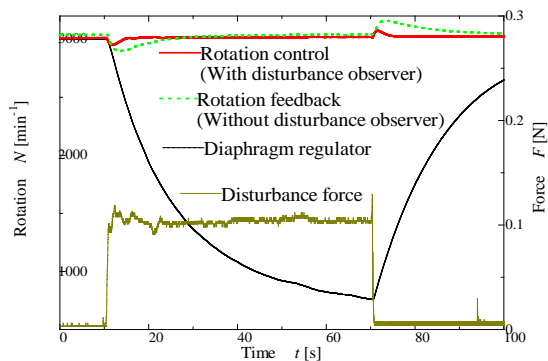


図 8 外乱応答実験結果

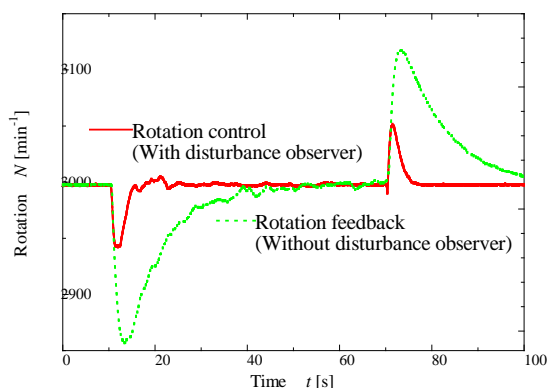


図 9 外乱応答実験結果 (拡大図)

(3) 切削加工実験と加工面の評価

提案方法により制御されたエアタービンスピンドルを用いてアルミニウム材の切削加工実験を行い、回転数の制御と加工面への影響について、評価を行った (図 10, 図 11). 回転数制御による加工面、特に表面粗さへの影響について実験・検討した結果、以下の結果を得た.

- ・提案方法を用いることで、切削外力によるスピンドル回転数の低下を大幅に抑制できることを確認した (図 12).
- ・加工開始、切込増加による影響で表面粗さは悪化しない (図 12).
- ・回転数制御により主分力による回転数低下を抑制でき、回転数低下に伴う表面粗さ劣化を抑制することができる (図 13).

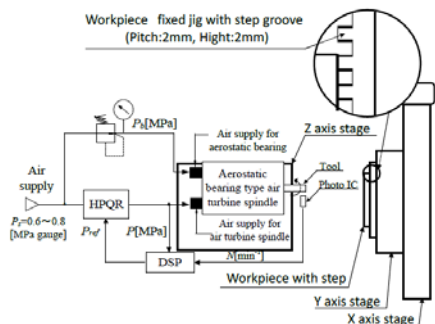


図 10 切削加工実験装置構成

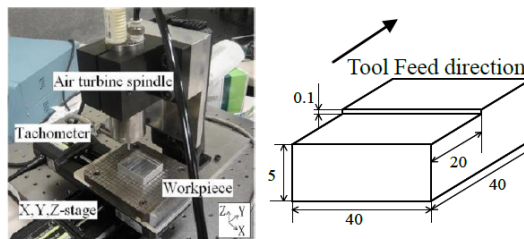


図 11 切削加工実験 (装置写真とワーク形状)

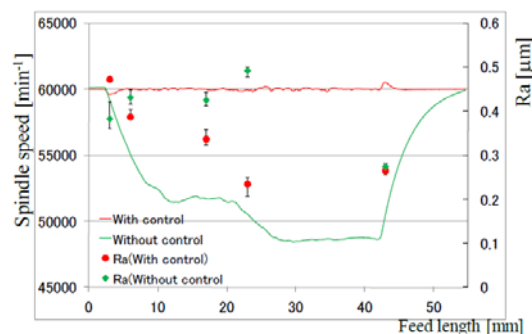


図 12 回転数制御の効果と面粗さ

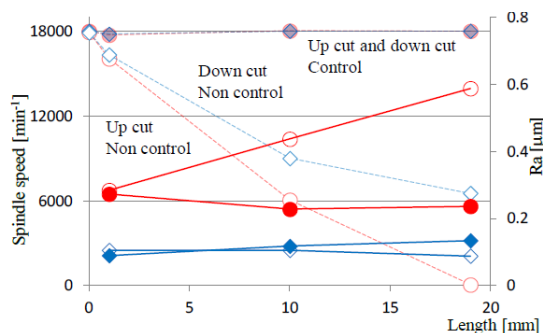


図 13 回転数と面粗さの関係 (実験結果)

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 12 件)
- ① 加藤友規, 東嶋元気, 矢澤孝哲, 大坪 樹, 野崎悠輔, 田中克敏, 気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いたエアタービンスピンドルの回転数制御, 査読済・掲載待ち中, 査読有
 - ② Tomonori KATO, Takashi OWAKU, Hirohisa SAKUMA Toshiharu KAGAWA, Introduction of A Newly Developed Arbitrary Pressure Pulsation Generating Device for Evaluating The Characteristics of Gas Flow Meters and Sensors, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol.5, No.1, 16-21, 2012, 査読有

- https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfpsij/5/1/5_16/_article
- ③ 加藤友規, 益田大海, 河村良行, 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春, 層流型高速応答流量計を用いたソプラノリコーダー吹奏ロボットの呼気制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第 43 巻第 6 号, 143~148, 2012, 査読有
- ④ Tomonori Kato, Genki Higashijima, Katsutoshi Tanaka, Takanori Yazawa, Tatsuki Otsubo, Yusuke Nozaki, Proposal of Energy-Saving Control Method of Air Turbine Spindle and Evaluation of Its Energy Consumption Using Air Power Meter, ICRERA 2012 Proceedings, 2506, 2012, 査読有
DOI : 10.1109/ICRERA.2012.6477390
- ⑤ Tomonori KATO, Manabu ONO, Tomoaki HIGASHI, Kotaro TADANO, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA, Proposal and Analysis of a Pneumatic Artificial Rubber Muscle with High-Damping Characteristics That Uses a Rubber Bellows, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol.4, No.1, 1-7, 2012, 査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfpsij/4/1/4_1_1/_article
- ⑥ Tomonori Kato, Genki Higashijima, Takanori Yazawa, Tatsuki Otsubo, Yusuke Nozaki, Katsutoshi Tanaka, Rotation Control and Disturbance Force Compensation of Air Turbine Spindle for Precision Machining using Hig-Precision, Quick-Response Pneumatic Pressure Regulator, Proceedings of 2012 ASPE Annual Meeting, Vol.54, 169~172, 2012, 査読有
- ⑦ Hiromi Masuda, Tomonori Kato, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Development of a Recorder-playing Robot Using Unsteady Flow Rate Control Technique, Proceedings of International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, 1319~1324, 2012, 査読有
- ⑧ Tomonori KATO, Takashi OWAKU, Hirohisa SAKUMA, Toshiharu KAGAWA, INTRODUCTION OF A NEWLY DEVELOPED ARBITRARY PRESSURE PULSATION GENERATING DEVICE FOR EVALUATING THE CHARACTERISTICS OF GAS FLOW METERS AND SENSORS, Proceedings of The 2nd Japan-China Joint Workshop on Fluid Power -Sustainable Future of Fluid Power, 71~76, 2012, 査読有
ISBN : 4-931070-09-4
- ⑨ Tomonori KATO, Takashi OWAKU, Hirohisa SAKUMA, Proceedings of The 8th International Fluid Power Conference (IFK2012), Vol.1, 191~202, 2012, 査読有
- ⑩ Tomonori KATO, Yoshiyuki KAWAMURA, Tatsuya FUNAKI, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA, Control of Blown Air For a Soprano-Recorder-Playing Robot Using Unsteady Flow Rate Measurements and Control Techniques, Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Power, 626~632, 2011, 査読有
- ⑪ 加藤友規, 大野学, 東知明, 只野耕太郎, 川嶋健嗣, 香川利春, ゴムベローズを用いた高減衰空気圧ゴム人工筋の提案と特性解析, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第 42 巻第 6 号, 114~119, 2011, 査読有
- ⑫ 尹鍾皓, 秋久潤, 加藤友規, 川嶋健嗣, 香川利春, 圧力脈動場における気体用流量計の動特性試験装置の開発, 計測自動制御学会産業論文集, 第 10 巻第 1 号, 1~6, 2011, 査読有
<http://srv01.sice.or.jp/~ia-j/papers/10IA013.pdf>
- [学会発表] (計 8 件)
- ① 東嶋元気, 加藤友規, 矢澤孝哲, 大坪樹, 野崎悠輔, 田中克敏, エアタービンスピンドルの省エネルギー制御法の提案とエアパワーの評価, 平成 24 年度秋季フルードパワーシステム講演会, 2012 年 11 月 30 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ② 野崎悠輔, 矢澤孝哲, 大坪樹, 加藤友規, 東嶋元気, 田中克敏, 林秀千人, 扇谷保彦, 小島龍広, エアタービンスピンドルの回転数制御による加工面への影響, 平成 24 年度秋季フルードパワーシステム講演会, 2012 年 11 月 30 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ③ 平川鉄磨, 加藤友規, 益田大海, 武藤大樹, リコーダー吹奏ロボットの呼気制御ばらつきを考慮したビブラートのモデル

化、平成 24 年度秋季フルードパワーシステム講演会, 2012 年 11 月 30 日, 福岡工業大学 (福岡市)

- ④ 平川鉄磨, 加藤友規, 益田大海, 武藤大樹, 大野学, ビブラートのばらつきを考慮したリコーダー吹奏ロボットの呼気制御, 日本機械学会九州支部福岡講演会, 2012 年 9 月 29 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ⑤ 東嶋元気, 加藤友規, 益田大海, 野崎悠輔, 矢澤孝哲, 大坪樹, 田中克敏, エアタービンスピンドルの回転数制御による加工面への影響 (第 1 報), 日本機械学会九州支部福岡講演会, 2012 年 9 月 29 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ⑥ 野崎悠輔, 矢澤孝哲, 大坪樹, 加藤友規, 東嶋元気, 益田大海, 田中克敏, 林秀千人, 扇谷保彦, 小島龍広, エアタービンスピンドルの回転数制御による加工面への影響 (第 2 報), 日本機械学会九州支部福岡講演会, 2012 年 9 月 29 日, 福岡工業大学 (福岡市)
- ⑦ 東嶋元気, 加藤友規, 矢澤孝哲, 大坪樹, 野崎悠輔, 田中克敏, エアタービンスピンドルの外乱発生時における回転数の高速安定制御, 平成 24 年度春季フルードパワーシステム講演会, 2012 年 5 月 24 日, 機械振興会館 (東京都)
- ⑧ 加藤友規, 東知明, 大野学, 只野耕太郎, 川嶋健嗣, 香川利春, ゴムベローズを用いた高減衰空気圧ゴム人工筋のモデル化とシミュレーション, 平成 23 年度春季フルードパワーシステム講演会, 2011 年 5 月 27 日, 機械振興会館 (東京都)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 静圧空気軸受スピンドル装置およびこれを用いた工作機械

発明者: 田中克敏, 加藤友規, 矢澤孝哲

権利者: 同上

種類: 特許

番号:

出願年月日: 平成 23 年 11 月 10 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/research/search/profile/id/147>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 友規 (KATO TOMONORI)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 20390429