

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：37112
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26420092
研究課題名(和文)次世代マイクロ・ナノ加工を実現するための剛性可変型エアタービンスピンドルの開発

研究課題名(英文)Development of air turbine spindle with variable stiffness for realizing micro-nano machining of the next generation

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
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、静圧空気軸受を有するエアタービンスピンドルについて、外乱抑制効果があり消費エネルギー量が少ない回転数制御機構を提案し、切削実験により性能を実証した。また、供給圧力を測定することによる、切削加工時の工具損耗のインプロセス推定方法について提案した。さらに、静圧空気軸受への供給圧を高速・精密に制御することにより、軸受のサイズを変更することなく、軸剛性を制御する方法を提案した。スラスト軸受及びラジアル軸受にそれぞれ独立して圧縮空気を供給できる静圧空気軸受を持つエアタービンスピンドル製作し、提案方法の実証実験を行い、性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a disturbance-compensating and energy-saving control method of an air turbine spindle equipped with a rotation control system designed for use in milling. A method for in-process tool wear estimation of an air turbine spindle, which is equipped with a rotation control system for ultra-precision milling is also introduced. By controlling the supply pressure to the aerostatic bearing quickly and precisely, a method of realizing an air turbine spindle with variable stiffness without changing its size is proposed. An aerostatic bearing type air turbine spindle whose thrust and radial pneumatic supply circuits are separated from each other is developed and the validity of the proposed method is confirmed.

研究分野：機械工学

キーワード：静圧空気軸受 空気圧 可変剛性 切削加工 工具損耗推定 圧力制御 省エネルギー化

1. 研究開始当初の背景

静圧空気軸受を用いたエアタービンスピンドルは、超精密加工をはじめとする高精度を求められる加工に適用されている。静圧空気軸受の軸剛性は軸受面積に比例するため、軸剛性を高めるためには装置の大型化が問題として挙げられる。一般的にこれらの問題には対応した軸受構造の設計や供給空気圧の増圧を行うことで対処がなされている。しかし、静圧空気軸受への供給圧の高速かつ精密な制御は困難であり、一般的に軸剛性の制御は困難である。また、エアタービンスピンドルが抱える問題点として、切削抵抗が作用した場合や静圧空気軸受の供給圧力が変動した際にエアタービンスピンドルの回転数が変動することが挙げられる。また回転数の変動が工具の寿命や被削材の加工精度に影響を与える可能性についても懸念されている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では以下の3点を目的とした。

スラスト方向・ラジアル方向の軸剛性をそれぞれ独立に制御可能な静圧空気軸受を実現すること。

精密加工用の静圧空気軸受エアタービンスピンドルについて、外乱に強く省エネルギーな制御を実現すること。

上記の方法を用いて金型材の加工実験を行い、上記方法の有効性を検証するとともに、供給圧力の変化と工具の逃げ面摩擦量との関係を明らかにすること。

3. 研究の方法

上記のいずれにおいても、目的の達成のために、報告者らが開発を進めてきた気体用超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR) を基本要素として用いた。

HPQR は、圧力計・圧力微分計・等温化圧力容器・スプール型サーボ弁・制御用 DSP な

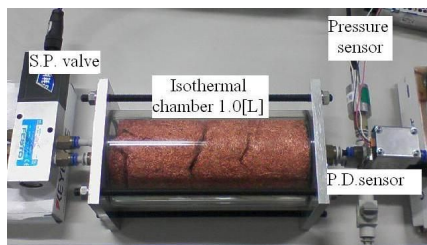


図1 HPQRの装置構成

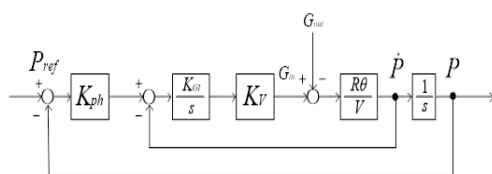


図2 HPQRのブロック線図

どから構成され、時定数 0.1s 程度、精度 50Pa 程度で供給圧力を制御できる、気体用の圧力レギュレータである。装置構成と制御ブロック線図を図1と図2に示す。

4. 研究成果

各目的について、実験等を実施した方法と研究成果を、以下に示す。

スラスト方向・ラジアル方向の軸受の空供給口が分離した静圧空気軸受エアタービンスピンドル(図3)を設計・製作し、それぞれへの供給空気圧を HPQR を用いて制御した(図4)。

実験結果(図5, 図6)より、それぞれの方向の軸剛性を独立して制御可能であることを確認した。

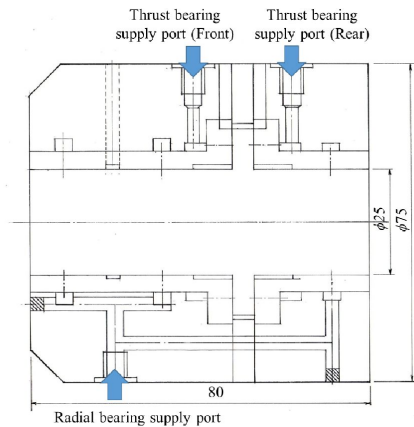


図3 スラスト方向・ラジアル方向の軸受の空供給口が分離した静圧空気軸受エアタービンスピンドルの設計図

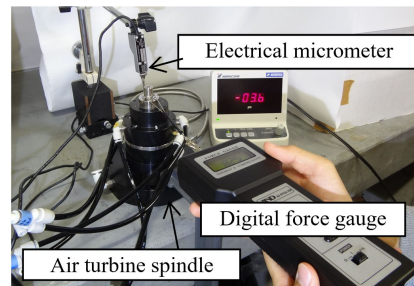


図4 静圧空気軸受の剛性試験

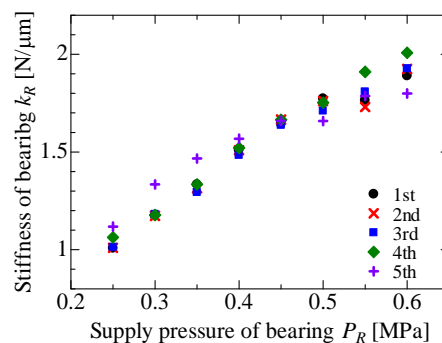


図5 実験結果：ラジアル方向の剛性

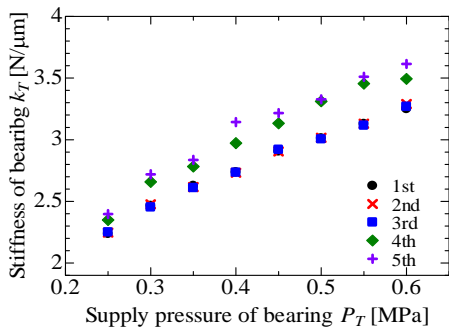
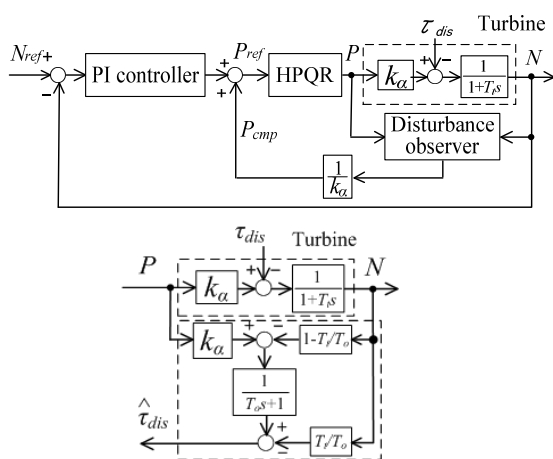


図 6 実験結果：ラジアル方向の剛性

精密加工用の静圧空気軸受エアタービンスピンドルに外乱オブザーバを含む回転数のフィードバック制御機構を付与した(図7, 図8)。

タービン回転中に外乱を付与する実験を行い, 従来方法(タービンに一定圧力を与える)に比べ, 提案方法では, 整定時間が1/5程度に短縮されること(図9)と, 消費エネルギーが1/5程度に削減されていること(図10), 外乱による影響を大幅に抑制できること(図11), を確認した。

上記のエアタービンの制御方法を用いて, 超硬ボールエンドミルで合金工具鋼(SKD61)を切削加工する実験を行った。実験の様子を図11に, 実験の際の工具経路を図12に, 実験条件を表1に, 実験結果(切削距離と工具逃げ面摩耗量)を図13に, 実験結果(HPQRからエアタービンへの供給圧力と工具逃げ面摩耗量の相関)を図14にそれぞれ示す。これらの実験結果より, 提案方法は切削加工において有効であることと, HPQRからエアタービンへの供給圧力と工具逃げ面の摩耗の推定量には高い相関があることが明らかとなった。



(外乱オブザーバ部の拡大図)

図7 エアタービンスピンドルの外乱オブザーバを含む回転数制御(ブロック線図)

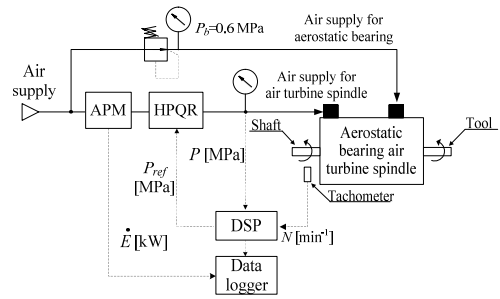


図8 エアタービンスピンドルの外乱オブザーバを含む回転数制御(装置構成)

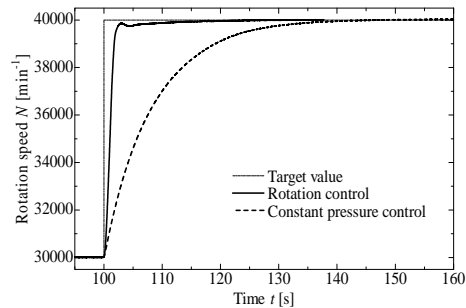


図9 実験結果：回転数の制御

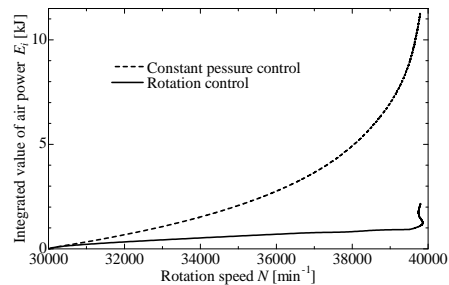


図10 実験結果：回転数の制御時の消費エネルギーの比較

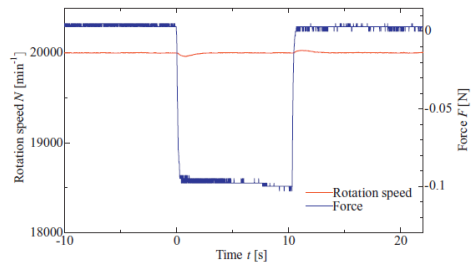


図10 実験結果：外乱付与に対する応答

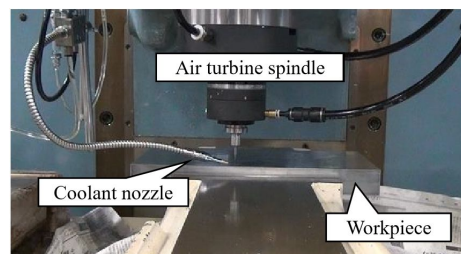


図11 切削加工実験

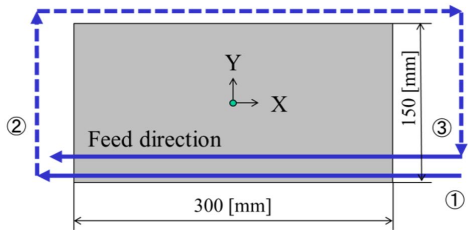


図 1 2 切削加工実験の工具経路

表 1 実験条件 (切削加工実験)

Tool	Ball end mill	
Tool radius [mm]	1	
Number of cutting tooth	2	
Size ($L \times W \times H$) [mm]	300×150×30	
Machine tool	Rakuraku-mill 3V	
Lubricated condition	Semi-dry	
Type of milling	Down cut	
Rotation speed N [min^{-1}]	20,000	
Axial depth of cut a_a [mm]	0.2	0.15
Pick feed P_f [mm]	0.3	0.1
Feed rate f [mm/min]	2,000	

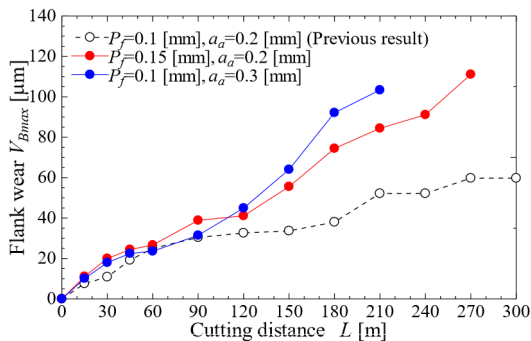


図 1 3 実験結果 (切削距離と工具逃げ面摩耗量)

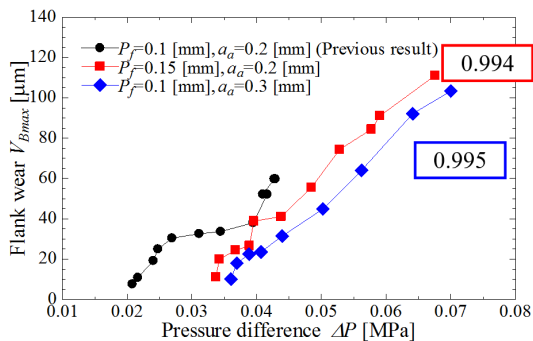


図 1 4 実験結果 (HPQRからエアタービンへの供給圧力と工具逃げ面摩耗量の相関)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Yusuke OKAMOTO, Takanori YAZAWA, Tomonori KATO, Kazuya NISHIDA, Shinya MORIYAMA, Yukio MAEDA, Tatsuki OTSUBO, Study on Tool Wear In-process Estimation for Ball End Mill using Rotation Control Air Turbine Spindle, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.749,2017, 94/100

DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.749.94

Tomonori KATO, Shunta Honda, Mingzhao CHENG, Kazuki SAKURAGI, Manabu ONO, Fabrication of a Miniature Rubber Muscle Actuator Driven by Gas-Liquid Phase Change, JFPS International Journal of Fluid Power System, 査読有, Vol.9, No.1, 2016, 11/17

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfpsij/9/1/9_11/_article

Tomonori KATO, Genki HIGASHIJIMA, Takanori YAZAWA, Tatsuki OTSUBO, Katsutoshi TANAKA, Proposal of Disturbance-Compensating and Energy-Saving Control Method of Air Turbine Spindle and Evaluation of Its Energy Consumption, Precision Engineering, 査読有, Vol.43, 2016, 439/447

DOI : 10.1016/j.precisioneng.2015.09.009

加藤友規, 本多駿太, 程明昭, 櫻木一樹, 大野学, 気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータの製作, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 査読有, 第 47 巻, 2016, 1/6

DOI : 10.5739/jfps.47.1

〔学会発表〕(計 19 件)

Tomonori Kato, Kenya Higashijima, Yoshinobu Tsukiyama, Kazuki Sakuragi, Pitak Thumwarin, Precise Measurement and Control of the Blown-air Flow Rate for a Robot Playing a Wind Instrument Such as a Recorder or Khлуй –Fundamental Experiment for Expressing Tremolo-, Proceedings of The 31st Annual Meeting of The American Society for Precision Engineering (ASPE2016), 2016 年 10 月 27 日, 226/229, ポートランド (米国)

Yusuke Okamoto, Takanori Yazawa, Tomonori Kato, Kazuya Nishida, Shinya Moriyama, Yukio Maeda, Tatsuki Otsubo, Study on Tool Wear in-process Estimation for Ball End Mill using Rotation Control Air Turbine Spindle, Proceedings of 2016 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (2016 IC3MT), No.59, 2016 年 10 月 9 日, 松江テルサ (島根県松江市)

Tomonori Kato, Kazuki Sakuragi, Mingzhao Cheng, Ryo Kakiyama, Yuta Matsunaga, Manabu Ono, Development of Miniaturized Rubber Muscle Actuator Driven by

Gas-Liquid Phase Change, Proceedings of Bath/ASME 2016 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2016-1702, 2016年9月9日, パース大学(英国)

Hitoshi KINO, Kazuyuki TSUDA, Tomonori KATO, Hiroyuki FUJIOKA, Soft actuators with nanosheet liquid crystals, The 1st FIT-ME Symposium --Chemistry and Applications of Inorganic Layered Materials --, p.30, 2016年5月16日, 福岡工業大学(福岡県福岡市)

Tomonori KATO, Mingzhao CHENG, Kazuki SAKURAGI, Hitoshi KINO, kazuyuki TSUDA, Hiroyuki FUJIOKA, Manabu ONO, A review of recent research on miniature soft actuator driven by gas liquid phase change of fluorocarbon, The 1st FIT-ME Symposium --Chemistry and Applications of Inorganic Layered Materials --, p.26, 2016年5月16日, 福岡工業大学(福岡県福岡市)

Kazuki Sakuragi, Mingzhao Cheng, Tomonori Kato, Recorder-playing robot that uses versatile vibrato to mimic a human player, Proceedings of The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2015, Yokohama), 002584/002588, 2015年11月11日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

Tomonori KATO, Tetsuma HIRAKAWA, Proposal of a Novel Pressure Control Method for Air Cylinders Used in Hybrid Electric-Pneumatic Ultra-Precision Vertical Positioning Device, Proceedings of The Thirtieth Annual Meeting of The American Society for Precision Engineering (ASPE2015), 522-525 2015年11月3日, オースティン(米国)

Tomonori KATO, A review of HPR and its applications -Control of air turbine spindle and hybrid electro-pneumatic ultra-precision vertical positioning stage, 7th International Conference on Fluid Power and Mechatronics, Proceedings (FPM2015), 3-1780, 2015年8月6日, ハルビン(中国)

Mingzhao CHENG, Tomonori KATO, Shunta HONDA, Kazuki SAKURAGI, Manabu ONO, Pressure Control in a Miniature Rubber Muscle Driven By Gas-Liquid Phase-Change, Proceedings of The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), 134/135, 2015年4月23日, 宜野湾コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)

西田一矢, 加藤友規, 石本航大, 静圧空気軸受式エアタービンスピンドルの軸剛性の可変性, 2016年度精密工学会九州支部北九州地方講演会, 27/28, 2016年12

月10日, 北九旧工業高等専門学校(福岡県北九州市)

築山義信, 加藤友規, 松尾啓汰, 電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置の内圧制御についての一検討, 第59回自動制御連合講演会, SaA4-5, 2016年11月12日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

西田一矢, 加藤友規, 後藤大樹, 三村政司, 溝田武人, エアタービンを用いた空気圧式ボール発射装置の高機能化, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 50/52 2016年10月19日, ねぶたの家ワ・ラッセ青森(青森県青森市)

櫻木一樹, 加藤友規, 程明昭, 柿山稜, 松永悠汰, 大野学, 気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータの小型化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2A1-04b5, 2016年6月10日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

西田一矢, 瀬戸壮太, 加藤友規, 溝田武人, 田中完二, 吉田和夫, 空気圧式による硬式野球ボール発射装置の高機能化, 平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 68/70, 2016年5月26日, 機械振興会館(東京都港区)

丸木諒祐, 矢澤孝哲, 野崎悠輔, 山田玲子, 大坪樹, 加藤友規, 人工歯の加工メカニズムに関する研究, 2015年度精密工学会九州支部飯塚地方講演会, 19/20, 2015年12月5日, 九州工業大学(福岡県飯塚市)

加藤友規, 木宮正貴, 櫻木一樹, 西田一矢, 程明昭, クルイ(タイの伝統的な縦笛)を自動吹奏するロボットの開発, 平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 92/94, 2015年11月27日, ジェイドガーデンパレス(鹿児島県鹿児島市)

西田一矢, 加藤友規, 矢澤孝哲, 大坪樹, 長田尚子, 丸木諒祐, 静圧空気軸受式エアタービンスピンドルの回転数制御と切削加工, 日本機械学会九州支部長崎講演会講演論文集, B-02, 2015年9月25日, 長崎大学(長崎県長崎市)

丸木諒祐, 矢澤孝哲, 野崎悠輔, 大坪樹, 加藤友規, 山田玲子, 歯の全自動加工に関する研究(第1報)-自動化に向けた基礎データ収集用実験装置の開発-, 2015年砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 118/119, 2015年9月9日, 慶應義塾大学(神奈川県横浜市)

加藤友規, 平川鉄磨, HPRとNF弁を用いた電空ハイブリッド超精密鉛直位置決めステージの制御, 平成27年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 4/6, 2015年5月28日, 機械振興会館(東京都港区)

〔産業財産権〕

出願状況（計 2 件）

名称：工具損耗推定方法

発明者：加藤友規，西田一矢，數裕太，廣瀬太志，矢澤孝哲，岡本優介，長田尚子

権利者：学校法人福岡工業大学，国立大学法人長崎大学

種類：特許

番号：特願 2017-059574

出願年月日：平成 29 年 3 月 24 日

国内外の別： 国内

名称：主軸ヘッド昇降装置および工作機械

発明者：田中克敏，福田将彦，益田大海，加藤友規，平川鉄磨

権利者：東芝機械株式会社，学校法人福岡工業大学

種類：特許

番号：特願 2015-155079

出願年月日：平成 27 年 8 月 5 日

国内外の別： 国内

○取得状況（計 2 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：東芝機械株式会社，学校法人福岡工業大学

種類：特許

番号：特許第 5843233 号

取得年月日：平成 27 年 11 月 27 日

国内外の別： 国内

名称：気体用計量器の特性評価試験装置および特性評価方法

発明者：大和久崇，佐久間博久，加藤友規

権利者：東京瓦斯株式会社，学校法人福岡工業大学

種類：特許

番号：特許第 5822302 号

取得年月日：平成 27 年 10 月 16 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>

7

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