

HPQRを用いたエアタービンスピンドルの 高ロバスト化と省エネルギー化

加藤友規*

High-robust and energy saving control of air turbine spindle using HPQR

Tomonori KATO

The purpose of this research is to establish a quick and robust rotation control method of an air turbine spindle and apply it to an ultra-precision machine tool. We developed the high-precision quick-response pneumatic pressure regulator (HPQR) to control of air supply pressure of the air turbine spindle. We also set a disturbance force observer in the feedback control system to avoid changes of the rotation speed due to disturbance forces imparted to the air turbine spindle. The effectiveness of the proposed method was demonstrated through an air power evaluation experiment by rotation control and a disturbance force giving experiment. Compared with the conventional method, the superiority of the proposed method is clearly shown in terms of quick response, robustness, and low energy consumption. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed method, a new air turbine spindle system equipped with rotation control devices was designed and fabricated for the use in an ultra-precision milling machine. The effectiveness of the proposed method with the newly developed air turbine spindle has been demonstrated through rotation control experiments and disturbance giving experiments. The robustness and energy-conserving characteristics of the proposed method were demonstrated.

Key Words : Pneumatics, Air turbine spindle, Rotation control, Disturbance observer, Energy Saving

1. 緒言

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式のエアタービンスピンドルが広く使用されている。著者らの研究室では、気体用超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR)¹⁾を供給空気の制御に用いることで、エアタービンスピンドルの回転数を高速・安定的に制御することと、省エネルギー化を実現することを目的として研究を進めている。

2. エアタービンスピンドルの製作と制御

2. 1 回転数計測機能付エアタービンスピンドルの製作

切削加工時に切り屑や切削油の影響を受けずに回転数を安定的に計測するため、非接触方式の回転計をハウジング内に内蔵したエアタービンスピンドルを設計・製作した (Fig.1)。

2. 2 回転数制御系の構成

エアタービンスピンドルによって切削加工を行う際に、加工荷の変動により主軸回転数が変動する欠点が報告されている。そこで、与えられた外乱を推定するために外乱オブザーバを設定した。この外乱オブザーバは、エアタービンスピンドルの入力である供給圧 P と出力である回転数 N の変動から外乱を推定するものである。外乱オブザーバのブロック

線図を Fig.2 に示す。

2. 3 回転数制御実験とエアパワーの測定・比較

エアタービンスピンドルについて、回転数制御の有無による回転数の時定数とエアパワー (空気の消費エネルギー) の比較を目的に実験を行った。この実験では、提案方法でエアタービンスピンドルの回転数目標値を $N_{ref} = 30,000 \text{ min}^{-1}$ から $40,000 \text{ min}^{-1}$ にステップ的に変化させた。

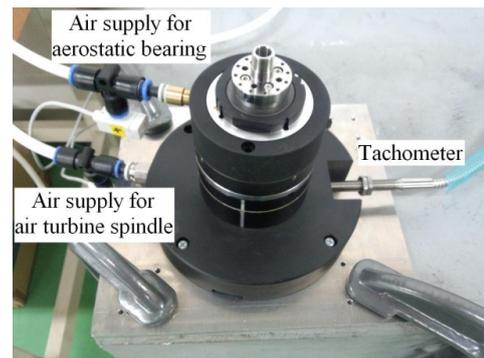


Fig.1 Photograph of newly developed air turbine spindle

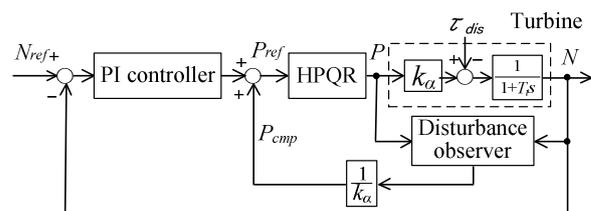


Fig.2 Block diagram of proposed rotation control system

* 福岡工業大学工学部知能機械工学科
(所在地: 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1)
(E-mail: t-kato@fit.ac.jp)

比較のために、エアタービンへの供給空気圧力を 113.1 kPa から 178.5 kPa にステップ状に変化させることで回転数目標値を $N_{ref} = 30,000 \text{ min}^{-1}$ から $40,000 \text{ min}^{-1}$ にステップ的に変化させる実験を行った。なお、回転数を安定させた状態で実験を行うため、エアタービンスピンドルを事前に 100 s 間駆動させ、回転数が安定した後に回転数を変化させた。本実験では、回転数がステップ的に変化し始めた時から回転数が安定する（ステップ幅の 98% となる $N=39,800 \text{ min}^{-1}$ に達する）までのエアパワーをエアパワーメータを使用して測定した。

2. 4 回転数制御実験の結果

回転数の測定結果を Fig.3 と Table 1 に、測定したエアパワーの積算値を Table 2 に示す。Table 1 より、提案方法では時定数は約 1.3 s であった。それに対して従来方法（圧力の一定圧制御のみ）では時定数は約 6.9 s であった。また、Table 2 より、提案方法では、回転数が安定するまでのエアパワーの積算値は 5.94 kJ であったのに対し、従来方法では 11.04 kJ であった。つまり、従来方法と比べ、回転数制御を行うことで回転数が安定するまでのエアパワーの積算値が約 46% 削減されたという結果となった。

2. 5 荒加工実験

開発したエアタービンスピンドルを工作機械の主軸に設置し難削材（SKD61）を側面切削にて加工することで切削外力を与える実験を行った（Fig.4）。実験では、回転数を $40,000 \text{ min}^{-1}$ で安定させた後に送り速度 750 mm/min で荒加工を行い、提案方法の場合と従来方法（圧力の一定圧制御のみ）の場合とで、回転数の状態を比較した。

2. 5 荒加工実験の結果

実験結果を Fig.5 に示す。実験結果より、従来方法の場合、切削抵抗が付与されると回転数が低下していき、最終的には $6,000 \text{ min}^{-1}$ 程度回転数が低下した。一方、提案方法を適用した場合には、回転数の低下は 400 min^{-1} 程度に抑えられ、外力が付与されてから 2 秒後には、外力が作用している状態にも関わ

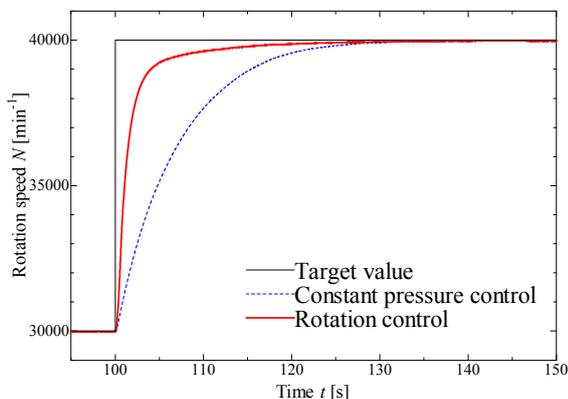


Fig.3 Experimental results of rotation speed control

Table 1 Experimental result of the rotation speed

Control method	Time constant [s]	Settling time [s]
Rotation control	1.3	9.55
Constant pressure control	6.9	20.49

Table 2 Experimental result of integral value of air power

Control method	Integral value of air power [kJ]	Reduction [%]
Rotation control	5.94	46.2
Constant pressure control	11.04	

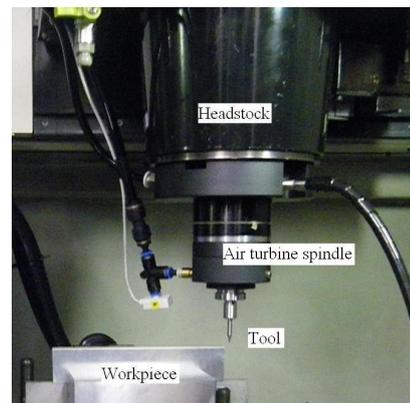


Fig.4 Photograph of the ultra-precision milling experiment

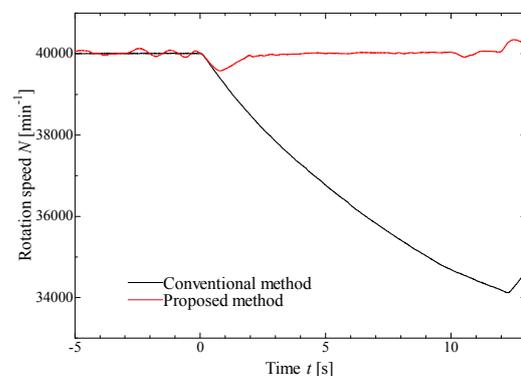


Fig.5 Experimental result of the milling experiment

らず回転数が $40,000 \text{ min}^{-1}$ まで回復していることがわかる。

参考文献

- 1) 川嶋健嗣, 加藤友規, 山崎俊平, 香川利春: 気体用の超精密高速応答圧力レギュレータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 38-2, 17/22 (2007)