D14 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)

Effect of the machined surface by rotation control of air turbine spindle (part1)

○学 東嶋 元気 (福岡工大) 正 加藤 友規 (福岡工大) 益田 大海 (福岡工大)

野崎 悠輔 (長崎大) 矢澤 孝哲 (長崎大) 大坪 樹 (長崎大) 田中 克敏 (東芝機械)

Genki HIGASHIJIMA, Fukuoka Institute of Technology(FIT), Wajirohigashi3-30-1, Higashi-ku, Fukuoka-shi, FUKUOKA

Tomonori KATO, FIT, Hiromi MASUDA, FIT, Yusuke NOZAKI, Nagasaki University,

Takanori YAZAWA, Nagasaki University, Tatsuki OTUBO, Nagasaki University,

Katsutoshi TANAKA, Toshiba Machine

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

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、静圧空気軸受が広く使用されている¹⁾²⁾。特に、高速回転が求められる軽負荷の小径工用具や回転噴霧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。加工負荷による回転数低下を抑制するために、エアタービンでは一般的に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。しかし空気圧供給ラインの上流で外乱が発生した場合に圧力変動が抑制できない問題が発生する。これまでに供給空気圧・流量・回転数・出力トルクの関係に関して研究は行われていたが¹⁾、供給圧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、エアタービンにおいて出力・回転数の高速かつ安定な制御は困難であった。本研究では、静圧空気軸受を用いたエアタービンスピンドル (以下、エアタービンスピンドル) の主軸回転数の安定化と高速制御を実現することを目的とした。特に、本報では負荷トルクによる外乱が発生した際の回転数の変動を抑制させるために、タービン駆動側供給圧を、これまで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 (以下、HPQR)³⁾に回転数フィードバックと外乱オブザーバ⁴⁾を取り入れて制御した。

2. 超精密高速応答圧力レギュレータ (HPQR)

HPQR は、圧力センサと圧力微分計 (P.D. Sensor) を用いて、スプール型サーボ弁 (S.P.弁) を制御することで供給空気圧を高速かつ精密に制御する減圧弁である。本研究で使用した HPQR の写真を Fig.1 に示す。本研究で使用した HPQR は、容積 1.0L の等温化圧力容器、S.P.弁「FESTO MPYE-5-1/8LF-010B」、圧力計「TOYODA PD64S」、P.D. Sensor「TMC DTP-8」により構成される。

HPQR の圧力制御系は圧力微分値をマイナーフィードバックとする微分先行型の制御系となっており、HPQR の供給側・下流側のいずれで外乱 (流量や圧力の変動) が生じても、影響を打ち消す制御の構成となっている。マイナーループの制御時定数がメインループである圧力制御系の時

Fig.1 Fabricated HPQR

定数よりも十分に小さいと仮定すると、圧力制御系の伝達関数は一次遅れ系となる。本実験では、HPQR の圧力制御の時定数が $T_p=0.05s$ となるように各ゲインを設定した。

3. 提案する回転数制御系の構成

3.1 回転数フィードバック制御

加工負荷がない静的な状態においてエアタービンスピンドルの回転数をフィードバックし HPQR の圧力を制御することを目的に、PI 制御により回転数をフィードバック制御するコントローラを設定した。回転数の制御ループの時定数が $T=0.5s$ となるように PI ゲインを設定した。

3.2 外乱オブザーバ

3.1 節で述べた回転数フィードバック制御の制御系内に外乱オブザーバで推定した値を補償圧力 P_{cmp} に変換しフィードバックすることで、外乱が与えられた状態でも外乱を補償して回転数を高速かつ安定的に制御することができるシステムを構成した。ブロック線図を Fig.2 に示す。

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.3 に示す。外乱オブザーバによる外乱推定値は高周波でハイゲインとなるため、観測ノイズの影響を非常に受けやすくなる。そこで、外乱の推定値に適切な時定数のフィルタを通す必要があるため、外乱オブザーバ内にローパスフィルタを設定し、このローパスフィルタの時定数を T_o とした。この時定数を適切に設定することで、各負荷トルクの影響がエアタービンスピンドルの回転数に与える影響を補償することができる。本実験では制御系の安定性を考慮して、フィルタの時定数を $T_o=0.7s$ と設定した。

Fig.2 Block diagram of proposed rotation control system

Fig.3 Block diagram of disturbance observer

4. 回転数制御実験

4.1 実験装置構成

実験装置の構成図を Fig.4 に示す. タービン駆動側に使用した回転数制御機構は, HPQR, 小野測器社製オプトファイバーセンサ「FG-1200」, DSP (エムティティ社製「s-BOX」) により構成されている. なおタービン側とは別の静圧空気軸受の供給圧は市販のダイヤフラム型減圧弁を使用し調整を行った.

4.2 加工実験

本実験では, エアタービンスピンドルに加工負荷による外乱が与えられた際の回転数の変動を調べることを目的として実験を行った. 実験の条件と構成を Table.1 に, 実験での加工装置を Fig.5 に示す. この実験では, 40×40 の A5052 の表面を 1mm/s で切削し 20mm 加工した地点で段差により切り込み量が 0.1mm 増加するワークを用いた. エアタービンスピンドルの回転数目標値を $N_{ref}=60000\text{min}^{-1}$ と設定し本実験では, (1) 市販のダイヤフラム型レギュレータで供給圧を設定した場合, (2) 3.1 節の外乱オブザーバを組み込まずに回転数フィードバック制御を行った場合, (3) 3.2 節に示す提案した回転数制御の場合, の 3 通りの方法で実験を行い回転数 N の変化を記録した.

実験結果を Fig.6 に示し, (2)と(3)の場合の回転数 N の結果の拡大図を Fig.7 に示す. Fig.6 より, (1) 市販のダイヤフラム型レギュレータで供給圧を設定した場合は, 外乱が与えられると回転数が 10000min^{-1} 程度低下することを確認した. 次に Fig.7 より, (2) 外乱オブザーバを組み込まずに回転数フィードバック制御を行った場合は, コンタクトの瞬間に回転数が 1000min^{-1} 程度低下したが, 時定数が 10s 程度で目標の回転数に復帰していた. (3) 提案した回転数制御の場合は, コンタクトの瞬間に回転数が 400min^{-1} 程度低下したが, 時定数が 2.0s 程度で目標の回転数に復帰しており, 外乱オブザーバを組み込まなかった場合と比較して, 回転数を高速に制御することができていた. また, 20s 付近で切り込み量が増加して加工負荷が増大しているが, 回転数制御により外乱変動の影響を小さく抑えられていた.

Fig.5 Experimental apparatus

Fig.6 Experimental results

Fig.7 Experimental results (Enlarged view)

Fig.4 Configuration of experimental apparatus

Table 1 Specifications in experiment

Workpiece A5052	Size	$40 \times 40 \times 5$ [mm]
	Axial depth of cut	0.1 [mm]
	Depth of the step	0.1 [mm]
Tool FX-MG-EDS-0.8	Diameter	0.8 [mm]
	Number of the teeth	2
Air turbine spindle NAKANISHI AES-1600	Tool rotation	$60,000$ [min^{-1}]
	Turbine pressure	0.071 [MPa]
	Air bearing pressure	0.5 [MPa]
X, Y, Z-stage SIGUMA KOKI SGSP20-85,35	Max displacement	85mm(X, Y), 35mm(Z)
	Displacement of each pulse	0.001 [mm]
	Cutting speed	1 [mm/s]

5. 結言

加工負荷による外乱が生じたときに, 回転数を安定的に制御することを目的に外乱オブザーバを組み込んだ制御系を構成した. 外乱を与える実験を行い, 外乱が与えられているときの回転数の変動を瞬時に抑制することができた.

参考文献

- 1) 田中克敏: 超精密加工機械の高精度化の研究, 博士学位論文 (日本工業大学), (2008)
- 2) 吉岡勇人, 松村晋平, 橋詰等, 新野秀憲: 給気温度制御による空気静圧主軸の熱変形抑制, 日本機械学会論文集 C 編, 70-700, 3605/3610 (2004), pp. 3605-3610
- 3) 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, (2007), pp. 17-22
- 4) 中尾陽一, 浅岡直哉, 藤本政良: 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, 76-763, (2010), pp. 281-290

謝辞

本研究は科研費 (課題番号: 23760122) の助成を受けたものである. また, ご助言頂いた香川利春先生・川嶋健嗣先生 (東工大), 仙波卓弥先生 (福岡工大) に感謝申し上げる.