

報告日 2019年(令和元年) 5月 22日
報告者 福岡工業大学 工学部 准教授
加藤 友規

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語) 電空ハイブリッド超精密鉛直位置決めステージの内圧制御と省エネルギー化

(2)研究者氏名 加藤友規, 福岡工業大学, 工学部, 准教授

(3)研究概要 (日本文)

本研究では, 超精密鉛直位置決め装置の位置決め方式であるリニアモータとバランスシリンダを併用した電空ハイブリッド方式が持つバランスシリンダの内圧変動に対するステージの応答性に着目し気体用超精密高速応答圧力レギュレータ(HPQR)をバランスシリンダの内圧制御に適用することで, その影響を抑制できることを確認した.

さらに, 工作機械のツールチェンジを想定したステージの自重補償制御に着目し, HPQR にステージの自重補償を行うためのフィードフォワード制御を付与した制御方法を提案した. ステージ重量を変動させる実験とステージ駆動実験を行い, 提案方法が有効であることを示した.

(4)キーワード 空気圧・超精密位置決め・電空ハイブリッド・圧力制御・省エネルギー化

(英文)

(1) **Research title** : Pressure control and energy saving of a hybrid electric-pneumatic ultra-precision vertical positioning stage

(2) **Name of researcher with title of position** Tomonori Kato, Associate Professor, Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology

(3) **Summary**

One of the positioning methods in vertical direction of machine tools, a hybrid electric-pneumatic ultra-precision vertical positioning device has been developed and utilized. In this research, in order to enhance the performance of the hybrid electric-pneumatic ultra-precision vertical positioning device, a new pressure adjustment method in the balancing cylinder when the tool change occurred is proposed. The proposed method utilizes a feed-forward control and a high precision quick response pneumatic regulator (HPQR) that was developed in our previous research. By the experimental results using a hybrid electric-pneumatic

ultra-precision vertical positioning device, the validity of the proposed control method is evaluated and its superiority is indicated.

(4) Key Words pneumatics, ultra-precision positioning, hybrid electric-pneumatic system, pressure control, energy saving

2. 本研究の意義・特色

電空ハイブリッド方式による超精密鉛直位置決めステージは、リニアモータがステージの重量の影響を受けることなく動作することが可能であるため、省電力化や熱の発生の抑制、制御性の向上や最大動作速度の向上といった効果を期待できる点が特徴として挙げられる。本研究では、電空ハイブリッド方式の超精密鉛直位置決めステージの高機能化を目的とし、バランスシリンダの内圧を気体用超精密高速応答圧力レギュレータ（HPQR）を用いて制御することで、空気供給側の圧力・流量の変動による影響を抑制することを目的とした。また、工作機械のツールチェンジを想定したステージの自重補償制御に着目し、HPQR にステージの自重補償を行うためのフィードフォワード制御を付与した制御方法を提案し、実験により有効性を示した。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

3.1 電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置

本研究で製作した電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置の外観を Fig.1 に、仕様を Table 1 に示す。装置の主な構成としては、ステージの移動にコアレス型リニアモータ（GHC 社製，S250D）、重力補償器として空気静圧案内を用いたバランスシリンダ、位置センサとして分解能 1nm のアブソリュート型リニアスケール（HEIDENHAIN 社製，LIC4017）を採用している。また、制御に関するシステム構成を Fig.2 に示す。

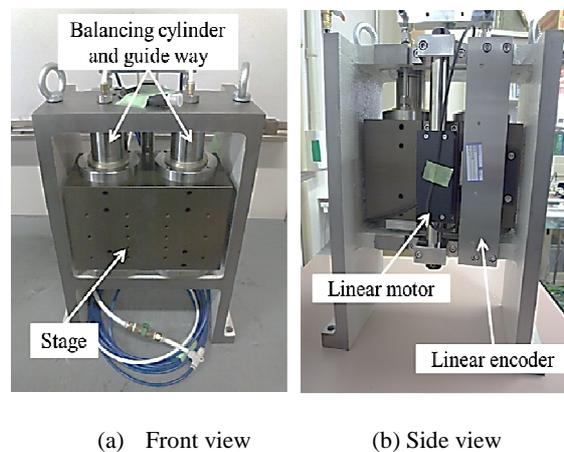


Fig.1 Hybrid electric-pneumatic ultra-precision vertical positioning device

Table 1 Specifications of Hybrid electric-pneumatic ultra-precision vertical positioning device

Linear motor	Rated thrust [N]	38
	Rated current [A]	1.3
	Maximum thrust [N]	148
Linear encoder	Encoder type	Absolute
	Resolution [nm]	1
Stage	Weight of movable part [kg]	19.81
	Bearing type	Aerostatic bearing

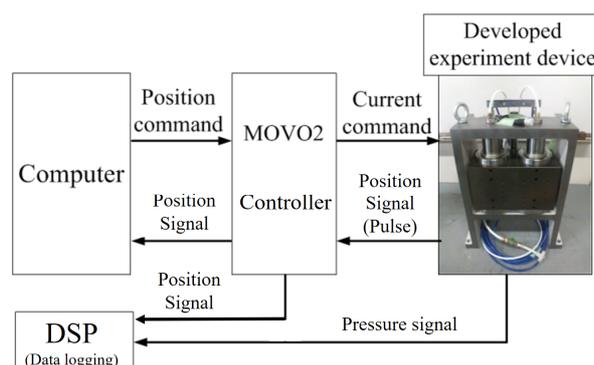


Fig.2 Experimental system configuration

3.2 空気供給側の圧力・流量の変動による影響を HPQR を用いて回避する方法

バランスシリンダの上流で外乱が発生した場合に、シリンダ内圧やステージ位置にどのような影響を与えるか実験により確認した。実験装置の構成を Fig.3 に示す。バランスシリンダの内圧をある汎用のダイヤフラム型 (DH) レギュレータと HPQR の 2 パターンのレギュレータで設定した後、リニアモータでステージを保持した状態で、レギュレータの上流に外乱を発生させた。与える外乱はレギュレータの上流側に設置した SP 弁を全開放することで与えた (約 100L/min の流量外乱)。この時のバランスシリンダの内圧を圧力センサ (JTEKT 社製, PMS-5M-2-500K)、位置をリニアスケールで測定した。なお、今回発生させた流量外乱は実際に超精密工作機を扱っている環境で起こりうる流量外乱に対して大きいものとなっている。

実験結果を Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.4 の位置の結果を見ると、DH レギュレータでシリンダ内圧を調整した場合は、外乱に合わせてステージ位置が 12~8nm 程度変動していることがわかる。そして、HPQR により制御した場合には外乱による位置変動が抑制されていることがわかる。次に Fig.5 のシリンダ内圧の結果を見ると、DH レギュレータの場合は外乱発生時に約 0.3kPa 程度の圧力変動を確認した。一方、HPQR を用いた (提案方法の) 場合は外乱発生時にも内圧に変化が無いことが明らかとなった。

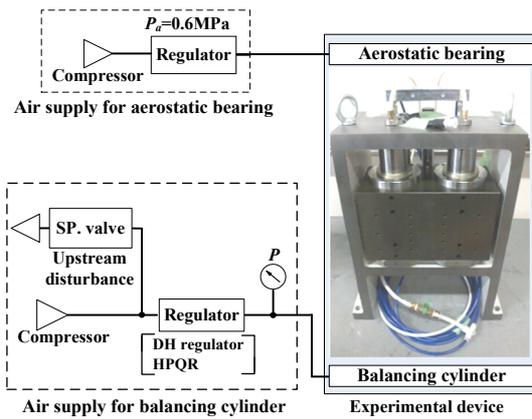


Fig.3 Experimental configuration (Upstream disturbance)

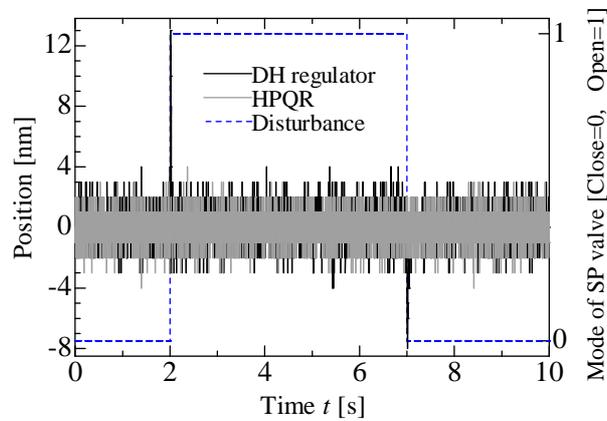


Fig.4 Experimental results (position)

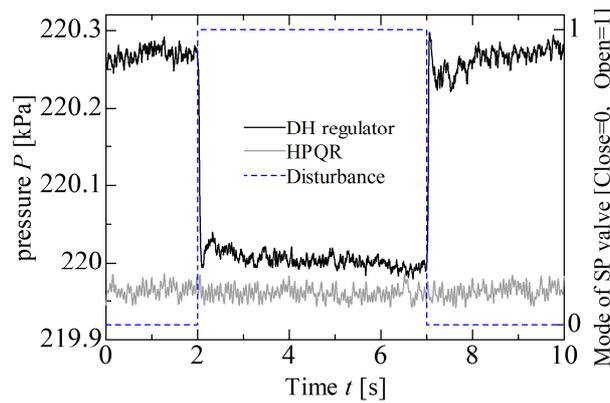


Fig.5 Experimental results (Pressure)

3.3 内圧変動による位置決めへの影響調査

位置決め装置の性能をさらに向上させるために、HPQR の持つロバスト性を維持しながら、ステージの自重補償制御が可能な制御系を構築することとした。

自重補償制御とはステージの自重とシリンダ内圧が釣り合っている状態、つまりモータの出力を示すトルク指令値が常に 0%になるようにシリンダ内圧を制御することである。

提案する制御ブロック線図を Fig.6 に示す. この制御は HPQR の制御にトルク指令値の変動分を補償するフィードフォワード制御を付与した制御系 (提案方法) である. フィードフォワードによる制御量の算出にはトルク指令値の信号を用い, トルク指令値 $T\%$ にゲイン $K_t = -0.3854\text{kPa}$ を掛けることで補償圧力 P_{cmp} を求める. その補償量を目標圧力に加算することでトルク指令値が 0% になるようにシリンダ内圧を制御する. また, HPQR の制御を主としているため, 外乱に対して高いロバスト性を持ち, 圧力を高速かつ精密に制御することができる.

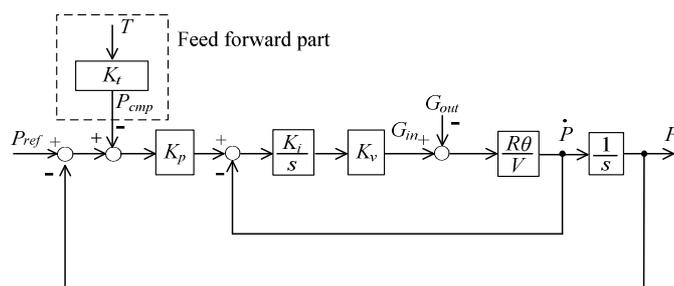


Fig. 6 Proposed feed forward control

提案方法の有効性を評価するために, ステージ重量を変化させ, DH レギュレータを用いた場合, 提案方法を用いた場合で比較する実験を行った. 実験装置図を Fig.7 に示す. 実験方法はステージをリニアモータで固定し, トルク指令値が 0% になるようにシリンダ内圧を調整する. その後, 実験開始 10 秒後にプレートに乗せた錘を取り外し, その時のシリンダ内圧とトルク指令値とステージ位置を測定した. また, 本実験では 1kg の錘を使用した.

トルク指令値の結果を Fig.8 に, シリンダ内圧の結果を Fig.9 に示す. Fig.8 に示すトルク指令値より, DH レギュレータでシリンダ内圧を調整した場合は, 重量変化を加えた制御開始 10 秒時にトルク指令値が約 30% 変動しており, リニアモータへの負荷が増加していることがわかる. 一方, 提案方法では重量変動の影響を補償できており, 瞬時にトルク指令値を 0% に復帰させることができている. つまり, リニアモータの出力の軽減に成功したといえる. また, その時のシリンダ内圧の結果 (Fig.9) を見ると, DH レギュレータを用いた場合はステージ重量変動後も一定圧を供給し続けているため, ステージ自重とシリンダ内圧とのバランスが崩れ, 結果的にモータの負荷が増加した. 提案方法ではトルク指令値が変動した瞬間に圧力を約 12kPa 変化させており, トルク指令値が 0% になるように圧力補償を行っていることがわかる.

以上のことより, 提案方法をバランスシリンダの内圧制御に適用することで, ステージの自重補償を行うことが可能となり, モータの出力を軽減できることが示された.

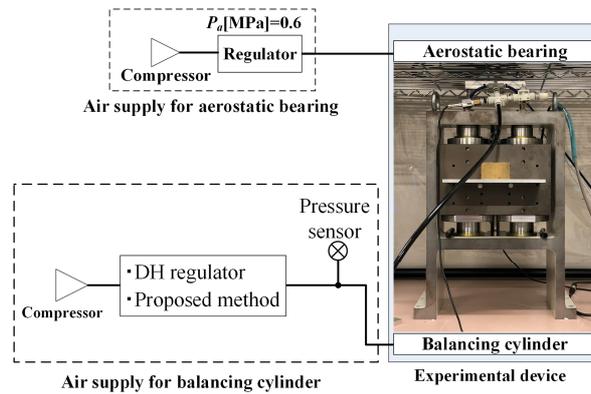


Fig.7 Experimental configuration

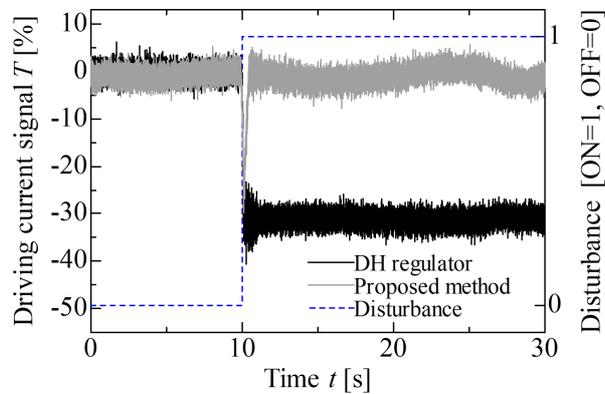


Fig.8 Experimental results (1kg, Driving current)

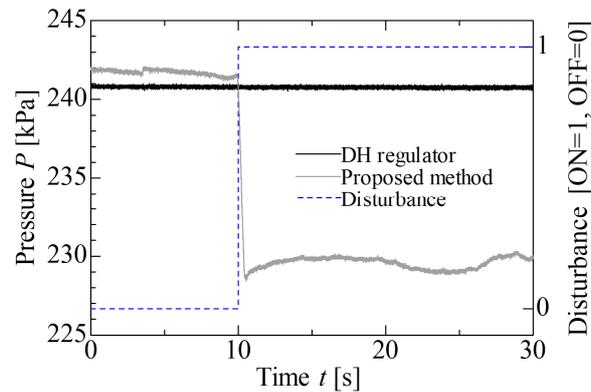


Fig.9 Experimental results (1kg, Pressure in cylinder)

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名
加藤友規・准教授

5. 研究実施時期

2017年（平成29年）3月 から 2019年（平成31年）2月まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) Yoshinobu TSUKIYAMA, Tomonori KATO, keita MATSUO : EVALUATION OF ENERGY CONSUMPTION OF HYBRID ELECTRIC-PNEUMATIC ULTRA-PRECISION VERTICAL POSITIONING DEVICE, The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power 2017, 2D42 (2017)
- (2) 徐有衛, 加藤友規, 島崎皓平 : 電空ハイブリッド超精密鉛直位置決めステージの力制御に関する考察, 2018 年度精密工学会九州支部北九州地方講演会講演論文集, pp.51-52 (2018)
- (3) 築山義信, 加藤友規, 中垣 瞬, 徐 有衛 : 電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置のバランスシリンダ内圧のフィードフォワード制御, Vol.50, No.1, pp.18-24 (2019)

7. 内外における関連研究の状況

電空ハイブリッド方式の超精密鉛直位置決め装置に関する先行研究としては, 加工力のセンサレスモニタリングに関する事例が報告されている. 電空ハイブリッド方式の一つの欠点として, ツールチェンジなどによってステージの重量が変動した場合にその都度, ステージ重量と釣り合わせるためにシリンダへの供給圧を最適圧に調整する必要があることが挙げられる. 本研究より前の従来方式では, 減圧弁のハンドル部分を手動やモータで回して調整を行っていたが, 圧力が整定するまでに時間を要してしまうなどの問題があった. 本研究は, この問題点解決策を提案し, 試験機による実証実験に成功したことに, 大いに意義がある.

8. 今後の発展に対する希望

試験機での実験には成功したが, 工作機械に適用する実証実験や加工実験が望まれる.