

報告日： 2022年 10月 8日
報告者：東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
大西 亘

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

高速流量フィードバックと空圧バルブの非線形逆モデルによる
高精度圧力制御法
～リニアモータ並の位置決め精度を持つ空圧シリンダ実現を目指して～

(2) 研究者氏名、職名

大西亘 講師

(3) 研究概要

空気圧アクチュエータは、質量出力比が高いアクチュエータであるが、バルブの非線形特性、無駄時間、位置依存の共振などの理由により、精密位置決め制御には適していない。本研究では、特にバルブの非線形性の補償に着目して、
1) 高速流量フィードバックを用いた2自由度制御による高速高精度流量制御、
2) ツインドライブ構造によるデッドゾーン補償、の研究を行った。

(4) キーワード

空気圧アクチュエータ, 流量制御, 非線形性補償

(英文)

(1) Research title

High-precision pressure control by high-speed flow rate feedback and nonlinear inversion of pneumatic valve dynamics: Aiming to realize a high-precision pneumatic actuator comparable to a linear motor positioning accuracy

(2) Name of researcher with title of position

Wataru Ohnishi, Lecturer

(3) Summary

Pneumatic cylinders are actuators with high mass-to-power ratio, but they are not suitable for precision positioning control due to the nonlinear characteristics of valves, dead time, and position-dependent resonances. In this study, we focused on the compensation of valve nonlinearity in particular: 1) high-speed, high-precision flow control by 2-DOF control with high-speed mass flow rate feedback, 2) dead zone compensation by twin drive structure.

(4) Key Words

Pneumatic actuator, flow rate control, nonlinearity compensation

2. 本研究の意義、特色

空気圧アクチュエータは、質量出力比が高いアクチュエータであるが、バルブの非線形特性、無駄時間、位置依存の共振などの理由により、精密位置決め制御には適していない。本研究では、特にバルブの非線形性の補償に着目して、1) 高速流量フィードバックを用いた2自由度制御による高速高精度流量制御、2) ツインドライブ構造によるデッドゾーン補償、の研究を行った。

1) の結果として、高速で再現性のある、流量の過渡応答の制御が可能になった。空気圧アクチュエータにおいては、流量の積分が圧力を決め、圧力が力を決め、圧力の積分が位置を決めるため、流量制御は極めて重要である。

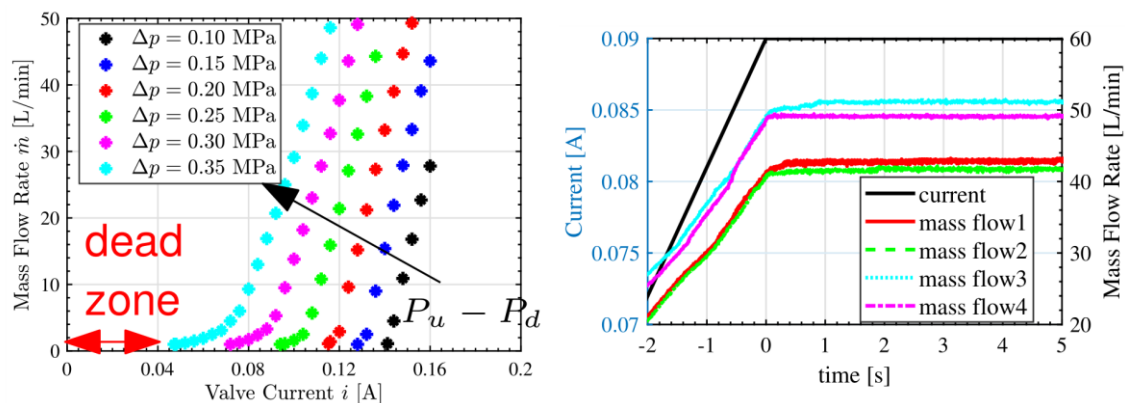
2) 吸気・排気のツインドライブ構造により、和のモード・差のモードに着目したモード分解を提案した。これにより、デッドゾーンにロバストな制御則が実現された。さらに、性能限界を引き出すためのツインドライブ構造に即したアンチwindアップ制御も提案し、実験により有効性を確かめた。

以上により、空気圧アクチュエータによる精密位置決め制御の基礎となる、流量制御において、高速高精度でかつ再現性のある流量制御が実現できたと言える。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

1) 高速流量計を用いた2自由度制御による高速高精度流量制御[3]

Poppet 弁について、下図のような圧力依存性や、流量の再現性のなさが指摘されている。



本課題を解決するため、空気圧シリンダによる位置制御について、アウトーループの位置フィードバック、そして圧力フィードバックに加え、下図に示すように、インナーループに高速流量計を用いた流量制御を用いることを提案した。

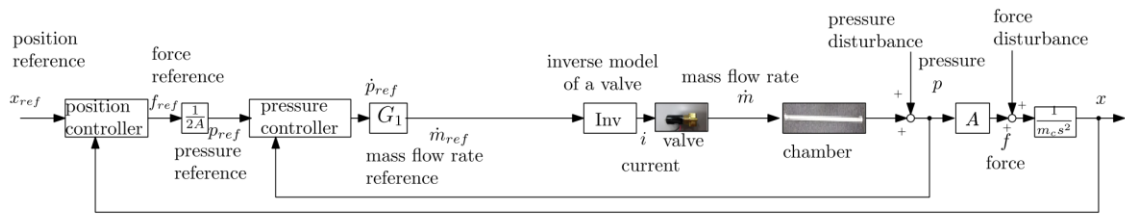


Fig. 3. Block diagram of a pneumatic drive system applied with the conventional flow rate control

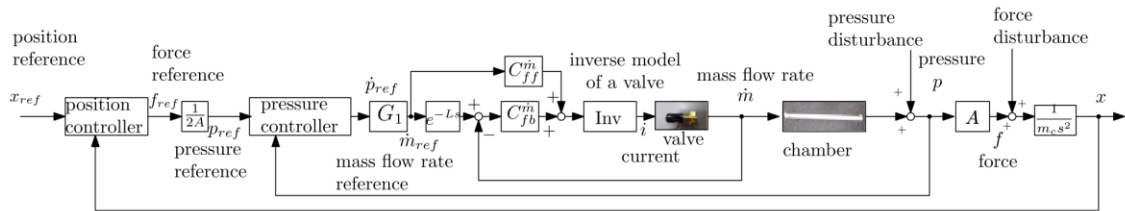
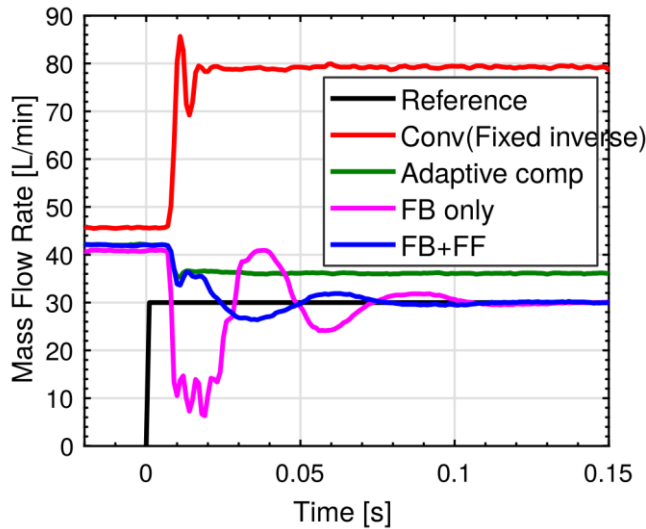


Fig. 4. Block diagram of a pneumatic drive system applied with the proposed flow rate control

本制御法は流量について2自由度制御（フィードフォワード制御+フィードバック制御）となっている。事前に計測した非線形性の逆モデル（フィードフォワード制御）を用い、その誤差をフィードバック制御により補償している。

下図に、流量の過渡応答の実験結果を示すが、提案法（青線）は、指令値に対して高速高精度に応答できていることがわかる。



2) ツインドライブによるデッドゾーン補償[1][2]

弁には、それぞれデッドゾーンなどの非線形性が存在する。それを解決する制御器構成として、下図に示すようなツインドライブ構成を提案した。これは、モード分解された和と差のモードに対してそれぞれフィードバック制御を適用するものである。実験により、高精度な流量制御を実現できることが示された。

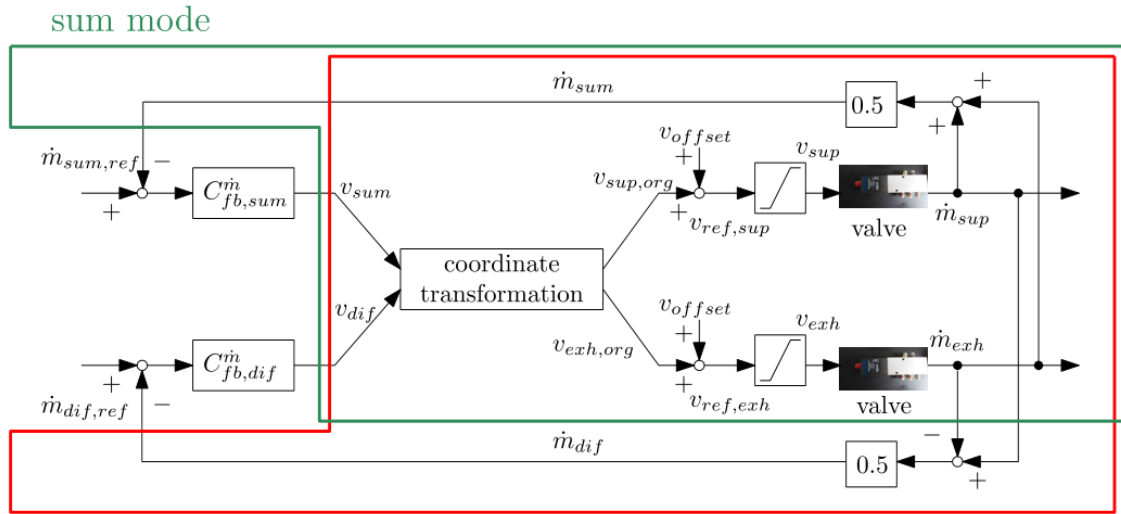
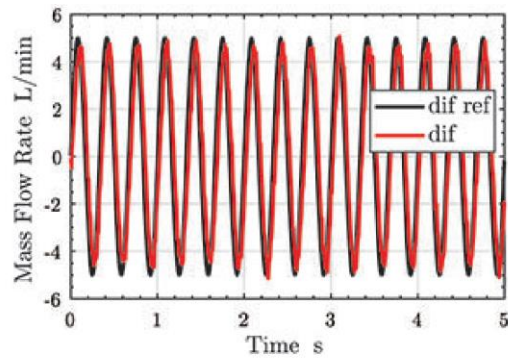


Fig. 3. Block diagram of mass-flow-rate twin-drive system



(a) mass flow rate difference reference ($\dot{m}_{dif,ref}$, black) and mass flow rate difference (\dot{m}_{dif} , red)

さらに、下図に示すような動作領域の分類に基づくアンチwindアップ制御を提案した。

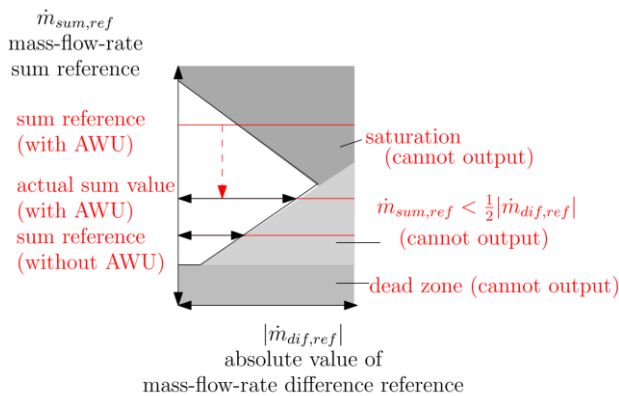


Fig. 5. Conditions that the difference mode value follows the reference

閉ループ系の周波数応答データにより、提案手法により線形性向上と、相補感度関数の帯域向上が確認できた。

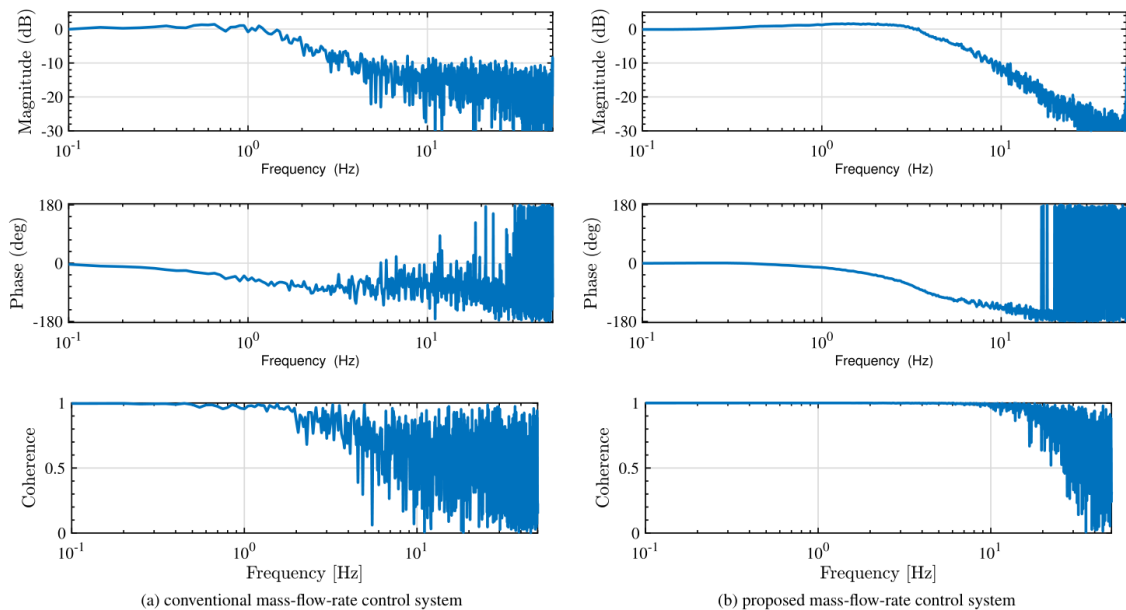


Fig. 15. Complementary sensitivity function of pressure PI control system with the conventional/proposed mass-flow-rate control system

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

大西 亘 講師

5. 研究実施時期

2019年 3月1日から 2021年 2月28日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

査読付論文誌

[1] Yui Shirato, Wataru Ohnishi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Koichi, Sakata, Atsushi Hara: Effect of Dead Zone Compensation by Mass-Flow-Rate Twin Drive System with Anti-Windup for Pressure Control System, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No.2, 2022.

[2] 白戸 柚衣, 大西 亘, 藤本 博志, 堀 洋一, 坂田 晃一, 原 篤史: 空気圧駆動システムのための流量ツインドライブシステムによるデッドゾーン補償法, 精密工学会誌, Vol. 87, No.9, pp.759-764, 2021.

[3] Yui Shirato, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki, Hiroshi Fujimoto: Two-Degree-of-Freedom Flow Rate Control for Pneumatic Valves using Fast Response Flow Meter, IEEJ Journal of Industry Applications, 2021.

査読付国際会議発表

[4] Yui Shirato, Wataru Ohnishi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Koichi Sakata and Atsushi Hara: Proposal of Anti-Windup Method of Twin Drive Mass-Flow-Rate Control for Pneumatic Driving System, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, pp.226-231,2021.

[5] Yui Shirato, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki: Two-Degree-of-Freedom Control with Adaptive Dead Zone Compensation for Pneumatic Valves, 5th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, pp. 1-6, 2019.

査読無国内会議発表

[6] 白戸柚衣, 大西亘, 藤本博志, 古関隆章, 堀洋一: むだ時間をもつ高速高精度空圧システムにおける極配置に関する考察, 電気学会メカトロニクス制御研究会資料(電気学会研究会資料), Vol. MEC-19-001, 2019.

[7] 大西亘, 白戸柚衣, 藤本博志, 古関隆章: 空気圧アクチュエータによる精密位置決めへの挑戦, 電気学会リニアドライブ研究会資料, Vol. MAG-19-040, LD-19-028, pp. 1-6, 2019.

7. 内外における関連研究の状況

空圧バルブの非線形性のモデル化については, [Richier nad Hurmuzlu, 2001],[Rao and Bone, 2008],[Valdiero et al, 2011]など, 多くの研究がある。本研究の特色は, 応答時間が5ms以下と極めて早い流量計の存在に着目し, i) 事前のモデル化によるフィードフォワード制御, ii) モデル化誤差を抑圧するフィードバック制御, の組み合わせに着目するもので, 独自性がある。

本研究の外部からの評価について, 以下にまとめる。

1) の高速な流量センサによるフィードバック制御を用いた2自由度制御は, [5]の国際会議発表において, 電気学会より優秀論文発表賞を受賞した。さらに, その内容を発展させた研究は[3]の英文論文誌 IEEJ Journal of Industry Applications の掲載に至った。

2) のツインドライブによるデッドゾーン補償法は, [2]において, 精密工学会における論文誌発表に至り, さらに精密工学会研究奨励賞の受賞に至った。また, アンチwindアッ

プ制御に展開した研究は, [1]において, 英文論文誌 IEEJ Journal of Industry Applications の掲載に至った。

また, 一連の研究を担当した学生の修士論文は, 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻より, 優秀修士論文賞の受賞に至った。

8. 今後の発展に対する希望

一連の研究により, 非線形性の影響が低減したため, 周波数領域システム同定を行い, 残りの非線形性の強さを定量化する。さらに, 反復学習制御へと展開し, 空気圧シリンダの位置決め精度を向上させていく。