

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656261

研究課題名(和文) 1キロヘルツ力制御応答が実現する次世代高性能電動射出成形機への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to 1-kHz force control response realization for the next-generation high performance electric injection molding machine

研究代表者

大石 潔 (Ohishi, Kiyoshi)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：40185187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：射出成形機は高性能射出成形機の開発が求められる。このために、従来技術より広帯域な力制御応答を持つ射出成形機の開発に挑戦する。本研究課題では、まず、ボールネジ駆動の射出軸は機械共振系の振動と非線形摩擦による圧力誤差を生じるが、この圧力誤差を新しい摩擦補償と振動抑制制御により抑圧する。これらの技術を、射出軸と同じボールネジ駆動に適用して、次世代高性能電動射出成形機を実現する力制御系を構成する。次に、従来の射出成形機の力センサでは不可能であった1kHz力覚センシングによる力制御応答を、上述の摩擦フリー高次外乱オブザーバをFPGAの高速サンプリングで実現する。そして、その有効性を検証する。

研究成果の概要(英文)：The development of an injection molding machine with a force control response is challenged. In this research, first, although the ejection axis of a ball screw drive produces the pressure error by vibration and nonlinear friction of a machine resonance system, this pressure error is oppressed by new friction compensation and oscillating inhibitory control. Such technology is applied to the same ball screw drive as an ejection axis, and the proposed force control system which realizes a next-generation high performance electric injection molding machine is constituted. Next, this research realizes the pressure control based on 1 KHz force sensing. It is impossible for the conventional injection molding machine to realize 1 KHz force sensing base force control. By using the high-speed sampling of FPGA, this research realizes the proposed friction free high order disturbance observer and the force control response based on 1-kHz force sensing. Moreover, its validity is verified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム モーションコントロール

1. 研究開始当初の背景

(1) 射出成形機においては、射出軸(主軸)と型締め軸の相互作用により定められる金型内への溶融材料の流入速度や圧力特性が、成形物の品質を決定する。特に、リサイクル可能な工業製品として期待されているプラスチック製品では高品質性、高生産性が求められるので、繊細且つ俊敏な力を高速に実現する力制御技術が必要不可欠となる。しかし、現状の射出成形機の射出軸の力センサ(ロードセル)のフィードバックによる力制御帯域は、100Hz程度が限界である。また、型締め軸は射出成形機の構造上、力センサを取り付けることが不可能であるので、力制御のフィードバック制御ができなかった。

(2) 研究代表者の大石は、これまでに研究協力者の(株)ニイガタマシンテクノとの共同研究で、静止摩擦・クーロン摩擦・機械共振にロバストな力センシングとそのフィードバック制御技術を考案して、特許2件と学術論文3編の実績を有している。静止摩擦と動摩擦と機械共振振動の全てにロバストな力制御した射出成形機の実例は、世界初の成果である。さらに、研究代表者の大石は、FPGAを用いて2慣性系の反力演算器(外乱オブザーバ)と速度演算器(カルマンフィルタ)を1MHz周期で実装し、世界初の10KHz帯域の力覚センシングを、力センサを用いずに実現してきた。それを応用して、力信号を用いてフィードバック制御をボールネジ駆動システムで行っている。これらの成果をさらに発展させて、1KHz帯域力覚フィードバックに基づく次世代高性能電動射出成形機の開発に挑戦する。

2. 研究の目的

家電製品・食料品のケースなどは、日本が得意とする射出成形機で製造される。近年、中国・韓国の追い上げがめざましく、もはやコスト面では太刀打ちできない。日本がこの分野での優位性を保つためには、今まで不可能であった高精細な射出成形となる燃料電池のセパレータなどを可能とする高速高精細射出成形機の開発が求められる。そのために、射出成形機の力応答の応答性能は、従来と比較して広帯域を持つことが望まれる。

本研究課題は、従来の射出成形機の力センサでは不可能であった1KHz力制御応答を、耐ノイズで高速サンプリング力覚センシングを実現する。次に、射出軸は機械共振振動と静止摩擦とクーロン摩擦による圧力誤差を生じるので、この圧力誤差を2つのオリジナルな摩擦補償と振動抑制により抑圧す

る。そして、成形機の射出軸に適用し、摩擦補償と振動抑制により高速高繊細な次世代高性能電動射出成形機を実現する。また、

1KHz力制御応答を、耐ノイズで高速サンプリング力覚センシングによる力センサレス力応答を実験し、有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究課題を2年間で完遂する。

そのために、初年度の平成24年度では、射出成形機の射出軸に対して非線形摩擦と機械共振と観測ノイズの影響を受けない力制御系による高性能電動射出成形機を開発するための基礎的な手法を確立する。各軸のシステム同定に必要な実機データを様々なトルク指令に対して収集する。この成果より、カルマンフィルタによる観測ノイズの影響のない速度情報を高次外乱オブザーバに結合させるとともに、射出成形機の高速サンプリングの力覚センシングの理論的検討と実機への実装法を検討する。同時に、実測データより高性能射出成形機に必要な仕様の評価・装置の設計を行う。また、1KHz力制御のための数学モデルを導出・検証する。上記の研究の進捗に合わせて目標とする電動射出成形機の基本アルゴリズムを設計し、DSPのソフトウェア及びFPGAのハードウェア上での実装を開始する。

最終年度の平成25年度は、前年度の研究成果である高速サンプリング力覚センシング手法を、射出成形機の模擬機の射出軸に実装して、その有効性を検証する。同時に実機への実装の前段階として模擬機による力覚フィードバック制御系の実験を行う。模擬機の成果を用いることで、推定反力と実測値との実験的データ比較や1KHz力制御系の妥当性を検討し、力覚センシングを広帯域化・高性能化する。また、力覚情報をプラスチック樹脂からの反力を考慮した広帯域力覚フィードバック制御法を検討して、シミュレーション解析により理論的検証を行う。これらの検証実験結果を総合し、本研究課題である「1キロヘルツ力制御応答が実現する次世代高性能電動射出成形機」を、模擬機で実現する。また、大石研究室に現有している75トン射出圧の電動射出成形機に対しては、機械共振振動と静止摩擦とクーロン摩擦による圧力誤差を生じるので、この圧力誤差を摩擦補償と振動抑制により抑圧する。そして、実際に射出成形機の射出軸に適用し、摩擦補償と振動抑制を導入した次世代高性能電動射出成形機を実現する。さらに、高性能電動射出成形機の製品精度と製造効率、及び、作業効率とエネルギー効率を含めた実験データ収集及び実験データの解析をする。従来法と比較してその有用性を検証する。

4. 研究成果

前述の研究方法による研究成果を次に記述する。

まず、本研究課題で提案するクーロン摩擦補償と静止摩擦補償のシステムを用いた力制御系の有効性を、射出軸(主軸)だけにおける大石研究室に現有している75トン射出圧の電動射出成形機に対して構築する。今までの力センサを有する射出成形機では、静止摩擦の影響を解決することは困難であった。そこで、射出軸に発生する機械共振、静止摩擦とセンサノイズに対して不感な摩擦フリー・反力推定オブザーバとその振動抑制制御をFig.1の様に構築する。そして、摩擦フリー・ノイズフリーの力センサレス広帯域力制御系をFig.2の様に構成する。射出成形機の電動機出力トルク指令に高調波重畳させて静止摩擦の影響を克服させようとすると、従来のトルクセンサや外乱オブザーバでは高調波トルクの影響を受けてしまい、射出成形機の圧力を振動させてしまう。これに対して、本研究課題の摩擦補償システムと反力演算器を、(1)式と(2)式で構成される高次外乱オブザーバに基づく演算器によって構成する。出力トルク指令に高調波重畳させても、高調波トルクと機械共振トルクと非線形摩擦の影響を受けずに、安定且つ精度よく力制御を行うことができる。重畳される高調波トルクと機械共振振りに不感な構造にしたことが、射出成形の反力センシングを成功させている。

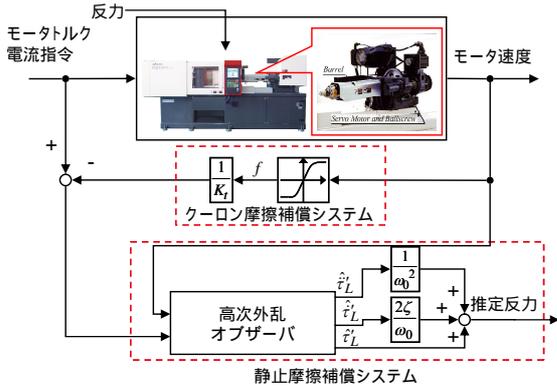


Fig.1 射出成形機の反力推定の概要

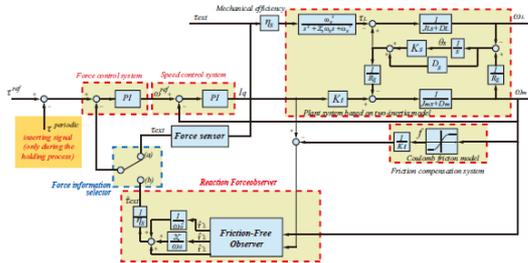


Fig.2 カセンサレス力制御系のブロック図

$$\frac{d}{dt} x_1 = A_h x_1 + B_h u_1 \quad (1)$$

$$y_1 = C_h x_1 + D_h u_1 \quad (2)$$

$$A_h = \begin{bmatrix} K_s a & -1 & 0 & 0 & 0 \\ K_s b + K_s L & -D_L L & -L & 0 & 0 \\ K_s c & 0 & 0 & 1 & 0 \\ K_s d & 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_s e & 0 & 0 & -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix}$$

$$B_h = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_g} + D_m R_g a + J_m R_g K_s a^2 - J_m R_g b & -R_g K_s a \\ D_m R_g b + J_m R_g K_s a b + J_m L R_g K_s a - J_m L R_g D_L b - J_m L R_g c & -R_g K_s b \\ D_m R_g c + J_m R_g K_s a c + J_m R_g d & -R_g K_s c \\ D_m R_g d + J_m R_g K_s a d + J_m R_g e & -R_g K_s d \\ D_m R_g e + J_m R_g K_s a e - J_m R_g \omega_0^2 d - 2J_m R_g \zeta \omega_0 e & -R_g K_s e \end{bmatrix}$$

$$C_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D_h = \begin{bmatrix} J_m R_g a & 0 \\ J_m R_g b & 0 \\ J_m R_g c & 0 \\ J_m R_g d & 0 \\ J_m R_g e & 0 \end{bmatrix}$$

$$u_1 = \begin{bmatrix} \omega_m \\ I_q \end{bmatrix}, x_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}, y_1 = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_s \\ \hat{\omega}_L \\ \hat{\tau}_L \\ \hat{\tau}_L \\ \hat{\tau}_L \end{bmatrix}$$

$$k_1 = 6\alpha - 2\zeta\omega_0 - \frac{D_m}{J_m} - \frac{D_L}{J_L}$$

$$k_2 = \frac{J_m R_g}{K_s} \left\{ \omega_0^2 + 2\zeta\omega_0 \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 + \frac{D_L}{J_L} \right) + \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 \right) \frac{D_L}{J_L} + \frac{K_s}{J_L} - 15\alpha^2 \right\} + \frac{1}{R_g}$$

$$k_3 = \frac{J_m R_g}{K_s} \left\{ 20\alpha^3 - \omega_0^2 \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 + \frac{D_L}{J_L} \right) - 2\zeta\omega_0 \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 \right) \frac{D_L}{J_L} - \left(2\zeta\omega_0 + \frac{D_m}{J_m} + k_1 \right) \frac{K_s}{J_L} \right\} - \left(2\zeta\omega_0 + \frac{D_L}{J_L} \right) \left(\frac{1}{R_g} - k_2 \right)$$

$$k_4 = \frac{J_m R_g}{K_s} \left\{ \omega_0^2 \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 \right) - 15\alpha^4 J_L \right\} + \omega_0^2 \left(J_m R_g + \frac{J_L}{R_g} - J_L k_2 \right) + 2\zeta\omega_0 \left(R_g D_m + \frac{D_L}{R_g} + J_m R_g k_1 - D_L k_2 + J_L k_3 \right)$$

$$k_5 = J_m R_g \left\{ \omega_0^2 \left(\frac{D_m}{J_m} + k_1 \right) - 6\alpha^5 \frac{J_L}{K_s} \right\} + \omega_0^2 \left(\frac{D_L}{R_g} - k_2 D_L + J_L k_3 \right) - 2\zeta\omega_0 k_4$$

$$k_6 = -\frac{J_m J_L R_g \alpha^6}{K_s} - 2\zeta\omega_0 k_5 - \omega_0^2 k_4$$

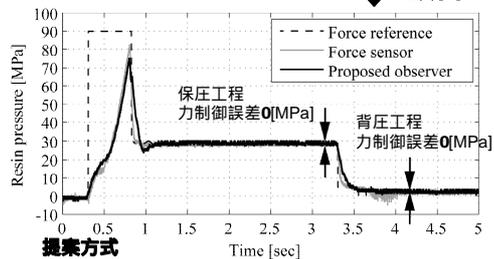
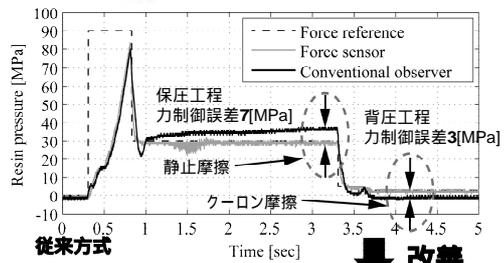


Fig.3 射出成形機の圧力応答結果

Fig. 3 の射出成形機の圧力応答の実験結果から分かるように、静止摩擦とクーロン摩擦の影響を良く補償して力指令値に提案方式が良く追従している。また、高次外乱オブザーバによる摩擦フリー反力推定器の力推定値が、実際の力センサの値に一致している。次に、実際に射出成形によって成形された実物を、従来の力センサフィードバック制御方式と提案する摩擦フリー力センサレス力制御方式の実物の写真を比較検証する。

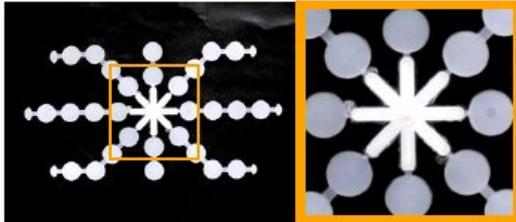


Fig. 4 カセンサフィードバック制御による射出成形機の成形品の写真

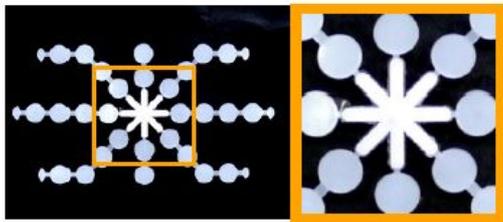


Fig. 5 提案する力センサレス力制御による射出成形機の成形品の写真

Fig. 4 と Fig. 5 を比較して分かるように、力センサフィードバックの成形品とまったく遜色なく成形が提案方式でできていることが確認できる。

次に、Fig. 6 の様に加速度・反力演算器(高次外乱オブザーバ)を用いて力制御系を加速度制御方式で構成する。モータ速度情報は速度演算器(カルマンフィルタ)で観測ノイズを低減し、且つFPGAによる200KHzサンプリング演算で実装している。

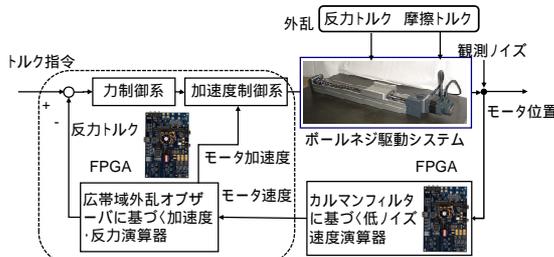


Fig. 6 FPGA で実装された加速度・反力演算器による力制御系

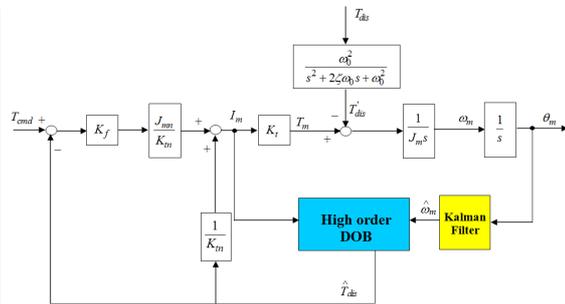


Fig. 7 提案する加速度・反力演算器による力制御系のブロック図

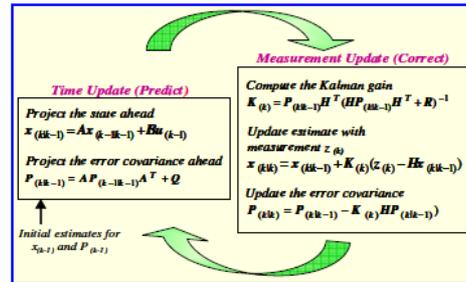


Fig. 8 カルマンフィルタの計算構造

Fig. 6 において、ボール駆動システムが射出成形機の模擬機である。カルマンフィルタと高次外乱オブザーバの制御構造は、Fig. 7 に示す。Fig. 8 に示す構造のカルマンフィルタは複雑になるので、高速サンプリングシステムには適さない。この欠点をFPGAによる高速演算処理で、200KHzの高速サンプリングで解決した。力センシングの帯域は、1KHz帯域の摩擦フリー高次外乱オブザーバによって維持される。

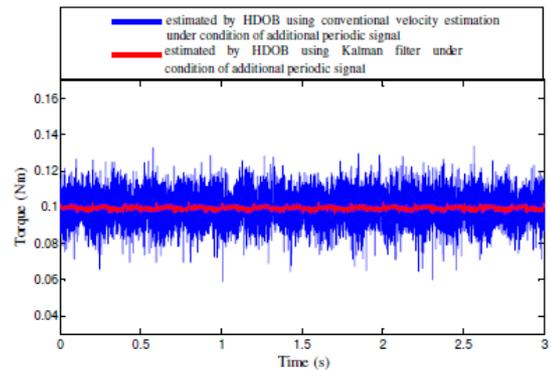


Fig. 9 FPGA で実装された加速度・反力演算器による力制御系の力応答の実験結果

実験結果によりの様にその有効性を確認した。サーボモータの高速応答では、高速サンプリングの観測ノイズの対策が問題となる。本研究では、耐観測ノイズとなるカルマンフィルタと広帯域外乱オブザーバのカスケード結合構造による加速度制御を、FPGAの高速演算能力によって実現をした。ノイズ成分が少なくなっていることは、Fig. 9 と Fig. 10 の結果から明確に検証できる。これに

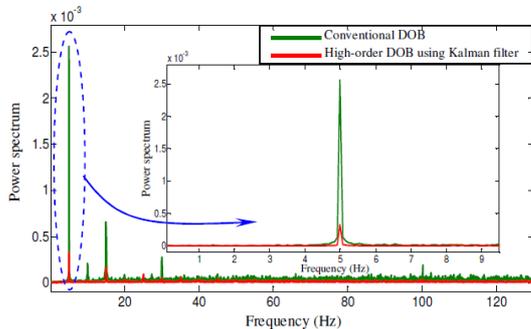


Fig.10 Fig.9の力応答結果のFFT解析結果

より、本研究課題の有効性が立証できる。さらに、提案する高性能電動射出成形機の製品精度と製造効率を実機により検証すると、従来法と遜色無い結果を得ることができた。また、作業効率とエネルギー効率を含めた実験データ収集及び実験データの解析をすると、こちらも、従来法と比較して、提案法の有用性も確認できた。

以上より、本研究課題は2年間で完遂したと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

- [1] T.T.Phuong, K.Ohishi, Y.Yokokura, C.Mitsantisk, "FPGA-Based High Performance Force Control System with Friction-Free and Noise-Free Force Observation", IEEE Transaction on Industrial Electronics, 査読有, vol.61, 2014, pp.994-1008.
- [2] 河原翔太、吉岡崇、大石潔、Nguen Hien、宮崎敏昌、横倉勇希、"サイクロイド減速機の角度伝達誤差に起因した速度振動の拡張状態オブザーバによる抑制法"、電気学会論文誌D、査読有、Vol.134、2014、pp.241-251.
- [3] 宮本直樹、大石潔、"SPMSMにおける電流センサのオフセットとゲイン変動による電流検出誤差の一補正法"、電気学会論文誌D、査読有、Vol.133、2013、pp.627-638.
- [4] 古澤亮、大石潔、岩崎憲嗣、景山晃一、高津勝、漆原史朗："自動パラメータ切替形反力オブザーバを用いた射出成形機のセンサレス力制御の実現性に関する検討"、電気学会論文誌D、査読有、Vol.133、2013、pp.248-261.
- [5] C.Mitsantisk, K.Ohishi, S.Katsura, "Estimation of Action/Reaction for the Bilateral Control Using Kalman Filter", Industrial Electronics, 査読有, vol.59, 2013, pp.4383-4393.
- [6] T.Hiraide, K.Takahashi, M.Nandayapa, K.Ohishi, "Fine Acceleration Control

Method Considering Torque Ripple for Hybrid-Type Stepping Motor", IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有, Vol.2, 2013, pp.221-231.

- [7] 金子和秀、大石潔、"ACサーボモータの速度制御系の応答性能を維持した操作量飽和対策の一手法"、電気学会論文誌D、査読有、Vol.133、2013、pp.526-535.

[学会発表](計1件)

- [1] K.Iwazaki, K.Ohishi, Y.Yokokura, K.Kageyama, M.Takatsu, S.Urushihara, "Robust Sensorless Pressure Control of Electric Injection Molding Mashine using Frection-Free Observer", IEEE/IES AMC2014, 2014年3月14日、慶應義塾大学、横浜、神奈川県、日本。

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

大石 潔(OHISHI KIYOSHI)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：40185187

(2)研究分担者

和田 安弘(WADA YASUHIRO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：70293248

宮崎 敏昌(MIYAZAKI TOSHIMASA)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：90321413

(3)連携研究者

大西 公平(OHNISHI KOUHEI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：80137984

漆原 史朗(URUSHIHARA SHIRO)
香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授
研究者番号：90311092