

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420456

研究課題名(和文) 超薄膜生成を目指した先端射出圧高速フィードバック制御搭載電動射出成形機の開発

研究課題名(英文) Development of Electric Injection Molding Machine using High-speed Estimated Injection Pressure feedback for Super-thin Film Generation

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： センサレス射出圧高速フィードバック搭載電動射出成形機において圧力の推定遅れは、フィードバック制御系の制御性能に大きな影響を与える。従来の推定法で問題となった過渡状態の推定遅れの改善方法として、射出材料の影響を考慮した反力推定オブザーバとモータ速度を利用した自動切替型オブザーバについて検討した。一方、定常偏差の改善方法として摩擦フリーオブザーバの設計法について検討した。これらの手法を統合した射出圧推定アルゴリズムを提案し、実機データに基づいて有用性を検証した。これらの技術によりセンシング帯域の広域化を可能となり、高速な力覚制御系を構築できる。

研究成果の概要(英文)： The force control system of a typical injection molding machine obtains force information from the machine's environment via a force sensor. Force sensors often have disadvantages such as signal noise, sensor cost, and a narrow bandwidth, so the reaction force observer was developed for electric injection molding machines. This method has both a transient estimated error due to parameter variations and a steady-state error owing to the influence of nonlinear friction. To overcome the transient error, we proposed estimation method which considers the influence of injection material with automatic parameter-switching algorithm. In addition, a friction model is proposed which takes into account the stiction effect in order to improve the steady-state error. Moreover, the availability of proposed integrated estimation algorithms are confirmed by the simulation results using the actual measured value for super-thin film generation.

研究分野：電気電子工学

キーワード：力覚フィードバック センサレス制御 高精度圧力推定

1. 研究開始当初の背景

射出成形機は、完全な密封状態を保つ型締装置と成形材料を熔融状態にして金型に押し込むための射出装置が主要部分となる。そのため、成形物の品質は、射出軸と型締め軸の相互作用により定められる金型内への熔融材料の流入速度や圧力特性により決定される。射出軸の圧力パターンの一例を図1に示す。燃料電池のセパレータなどの超薄肉製品を成形するには、肉厚が薄くなるほど材料の硬化時間が短くなるため、射出や保圧応答には従来装置以上の高速化が要求される。

現在生産されている電動射出成形機では、射出軸に着目すると力センサ(ロードセル)のフィードバックによる力制御帯域が100Hz程度であること、さらに、ベルト駆動での射出圧出力機構を採用しているためベルトの弾性や粘性特性が力センサの特性に影響を与えている。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システムが構成できない。そのため、超薄膜を生成できる先端射出圧高速フィードバック制御技術を搭載した電動射出成形機の実例は未だ報告されていない。そこで、射出速度の高速化を図るには、射出圧のセンシング帯域を広げることに加え、その高速フィードバック制御技術が必要不可欠な要素となる。さらに、現存の射出機構ではベルトの弾性や粘性特性の影響を受けることから、アクチュエータの応答が直接射出圧に伝達できるダイレクト駆動による射出機構についても検証し、高速力覚フィードバック制御系への適用性についても明らかにする。

2. 研究の目的

本研究のアプローチとして、高調波重畳(ティザ信号入力)手法による高次外乱オブザーバを用いた力覚推定器による射出圧の推定結果を踏まえて更なる高速高精度な力覚推定アルゴリズムを確立する。図2は、樹脂を弾性係数と粘性係数を用いて線形化したモデルを用いたオブザーバによる推定値であるが、保圧工程における力センサとの定常誤差はほぼ零であるが、射出圧の立ち下がりや背圧時に誤差を生じていることが確認できる。そこでまず、本研究の第一目的として、射出圧の立ち上がり・立ち下がりの推定遅れの改善を図り、射出圧の広帯域なセンシングを実現する。さらに、射出圧の高速フィードバックに対する制御系設計を行うことを第二の目的とする。また、現状のベルト駆動での射出機構をダイレクト駆動に変更した場合、模擬機を製作し提案する推定手法のセンシング帯域の検証と制御系設計方法を確立することを第三の目的とする。これらの目的を達することができれば、燃料電池のセパレータなどの超薄肉製品を成形できる先端射出圧高速フィードバック制御を搭載した電動射出成形機の実現が可能となる。

3. 研究の方法

研究代表者は平成24年度までに、科学研究費補助金基盤研究C(一般)の採択を受けて、「高性能超小型電動射出成形機のためのセンサレスマルチ力覚制御系設計法」について研究を行っている。この研究成果は、研究分担者の大石と㈱ニイガタマシテクノと共に射出成形機の小型化を目指したセンサレス力覚フィードバック系の設計法を確立し、エジェクタ軸や型締め軸への力覚フィードバック系の適用を可能とするサーボ技術を開発している。さらに、本年度には高専・長岡技科大共同研究助成を受けて、「プラスチック樹脂流体モデルを含んだ射出軸の詳細モデリングの検討」と題して流体モデルを含んだ射出軸の詳細モデリングを行い、オフラインにて実機設定パラメータの調節が可能となるアルゴリズムの確立を目指して研究を進めている。これらの研究成果をベースに、射出圧のセンシング帯域を広げ、その高速フィードバック制御を搭載した超薄膜生成可能な次世代電動射出成形機の開発を行う。以下の計画・方法により本研究を3年で完遂する。

初年度においては、まず過渡状態の推定遅れの改善方法として、射出材料の影響を考慮した反力推定オブザーバの設計法について検討した。射出材料を粘弾性モデルと負荷側機械の慣性モーメント増加量分としてモデル化し、二慣性共振モデルに負荷したモデルを提案した。さらに、実機ドライバのメモリ容量には制限があるため提案モデルの低次元化を検討した。射出材料の影響を負荷側機械の慣性モーメント、粘性係数、慣性間の弾性要素のパラメータ増加分と見なすことで、従来モデルと同次元で、かつ射出材料の影響を考慮したモデルを提案している。低次元化したモデルを用いてオブザーバを再設計し、圧力推定のシミュレーション解析結果を既存のオブザーバと比較することで、提案モデルを用いたオブザーバの有用性を検証した。一方、定常偏差の改善方法として摩擦フリーオブザーバの設計法について検討した。本研究では、力伝達効率を力センサレスで同定する方法を提案し、実験結果よりセンサで測定した伝達効率とほぼ同値にあることを確認している。また、同定した摩擦フリーオブザーバを用いることにより定常偏差を従来手法と比較して約90%低減できることを確認した。

2年目となる2014年度には、射出圧の立ち上がりの推定遅れの改善と詳細な摩擦モデルを構築して射出圧の推定精度を改善する手法について検討した。まず、工事がイランオブザーバにおいてティザ信号の影響を除去する2次系モデルの減衰係数に着目し、減衰係数が推定値に与える影響を検証した。その結果、これまで一定値としていた減衰係数を最適値に設定することで推定遅れを大幅に改善できることが確認できた。そこで、射

出圧の立ち下がり時における最適な減衰係数の決定と最適値への自動切替型オブザーバの設計を行った。提案手法を用いることにより、従来法に対して推定遅れを約 1/4 まで、改善でき、かつ定常状態に関しても従来と同精度の力覚推定が可能であることを確認した。また、定常状態の推定精度の改善方法として、機械的摩擦を推定アルゴリズムに積極的に取り入れる手法について検討した。摩擦モデルとしてストライベックモデルを取り入れ、実機実験に基づいてクーロン摩擦力やストライベック速度、最大静止摩擦力を同定した。提案するストライベックモデルを力覚オブザーバの前段に配置することにより従来法に対して定常偏差を約 1/3 に減少させることができた。

最終年度の 2015 年度においては、2 年間で提案した射出材料を考慮した機械モデルとパラメータ自動切替モデルを統合した射出圧推定アルゴリズムを提案し、新たなオブザーバ設計法を検討して先端射出圧フィードバック制御を構築する。そのために、これまでの提案してきた推定方法では射出圧立ち下がり時の顕著な推定遅れを改善すべく、自動切替型オブザーバの設計法を確立した。本手法においては、工程ごとに設定パラメータを最適化し、全工程における高精度な圧力推定を実現する。まず、保圧工程の静止摩擦による推定誤差を低減するために、圧力指令値にディザ信号を重畳している。ディザ信号による振動を負荷慣性にバネ-ダンパ系を接続した二次系として表現しており、設計者が設定する減衰係数の設定基準がなかった。そこで、減衰係数による設定範囲を定め、推定誤差の二乗平均誤差に基づいて設定値を定めた。また、射出圧立ち下がり時において、自動で設定パラメータを切り替える自動切替型オブザーバを設計した。提案するオブザーバでは、状態変数を共有したオブザーバの状態行列をそれぞれ 2 つ用意し、モータ速度を切り替え信号として利用している。切り替え時には、状態変数の修正を行い不連続な推定値にならないように工夫を行っている。提案する新たな推定手法を用いることにより、従来の推定法に対して、最大推定遅れを約 8% 以下に改善できることを確認した。

4. 研究成果

図 1 に低次元化した射出材料を考慮した射出圧推定システムを示す。ここで、 I_q はトルク電流指令、 K_t はトルク定数、 J_m はモータ側慣性モーメント、 D_m はモータ側粘性係数、 K_S は慣性間の弾性定数、 D_S は慣性間の粘性定数、 J_L は負荷側慣性モーメント、 D_L は負荷側粘性係数、 F_{ext} は環境からの反力、 θ はねじれ角、 ω はモータ速度、 v は負荷側速度をそれぞれ示す。また、 J_L 、 D_L 、 K_S はそれぞれ負荷側の慣性モーメント、粘性係数、軸ねじれ部の弾性係数の微小増加分を示す。また、図 2 に従来法での射出工程か

ら保圧工程での過渡状態における推定結果を示す。この結果から、力センサ値に対して最大 40ms 程度の推定遅れが発生していることがわかる。

本手法では、保圧工程の静止摩擦による推定誤差を低減するために、圧力指令値にディザ信号を重畳している。図 1 左上部のようにディザ信号による振動を負荷慣性にバネ-ダンパ系を接続した二次系として表現している。ここで減衰定数は明確な設定基準がなく、先行研究において減衰定数は全体の誤差が最小となるように全工程において $\zeta=0.2$ に設定されている。そこで、減衰定数の設定範囲を $0.0 \sim 1.2$ とした場合の過渡状態における推定誤差の変化を確認する。減衰定数に対する二乗平均誤差の変化を図 3 に示す。この結果から $\zeta=0.95$ に設定した場合に最も推定誤差が小さくなることが確認できる。

そこで、本研究においては圧力立ち下がり時において、自動で設定パラメータを切り替えるパラメータ自動切替型オブザーバを提案する。パラメータ自動切替型オブザーバでは状態変数を共有し、オブザーバの A, B, C, D 行列をそれぞれ 2 つ用意し切り替えることで、最適なパラメータでの圧力推定を行う。また、切り替えのタイミングは汎用性を考慮し、モータ速度を利用した。図 4 にセンサ圧力に対するモータ速度とオブザーバ切り替え範囲を示す。この結果より、切替のタイミングは、モータ速度信号のノイズを考慮し、それぞれ速度が 4rad/s を下回る、6rad/s を上回るタイミングとした。また、パラメータ切替前後では、状態変数が一致しないため、推定誤差が発生する。切替時の誤差の改善には状態変数の修正が必要となる。図 5 に提案する自動切替型オブザーバでの推定結果および過渡状態(0.8 ~ 1.2[s])の拡大図を示す。立ち下がり時の最大推定遅れ時間は 3.4[ms]であり、これは従来オブザーバの 43.9[ms]に対して約 8% 以下に改善できている。また、図 6 に従来オブザーバと提案オブザーバの過渡状態における推定誤差を示す。立ち下がり時の最大推定誤差は従来オブザーバでは約 -32[MPa]であったが、提案オブザーバでは約 -8[MPa]に改善されていることが確認できる。

本研究では、反力推定オブザーバの推定精度を改善するため、圧力立ち下がり時における最適なパラメータの決定とパラメータ自動切替型オブザーバの設計を行った。提案手法を用いることにより、推定遅れの改善を図られ、定常状態に関しても従来と同精度の力覚推定が可能であることを確認した。

以上のことからパラメータ自動切替型オブザーバは全工程における高精度な射出圧推定に有効である。

今後の課題として、オブザーバによる高精度推定値をフィードバックさせるセンサレス力制御を行い、提案手法の有用性を検討する。

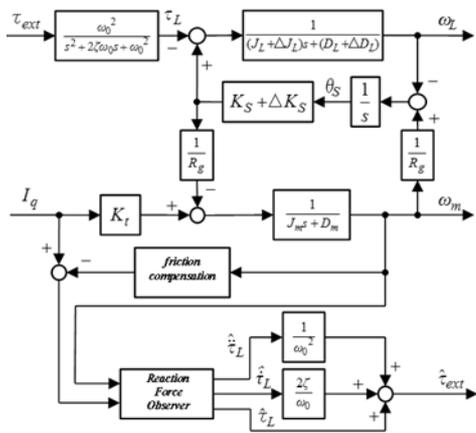


図 1 低次元化オブザーバによる射出圧推定システム

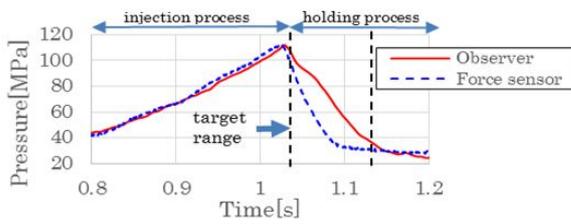


図 2 低次元化オブザーバ推定結果(拡大図)

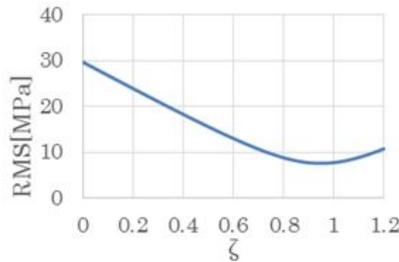


図 3 減衰定数に対する二乗平均誤差

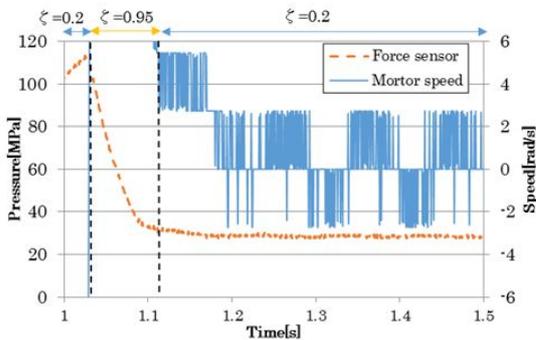


図 4 センサ圧力に対するモータ速度

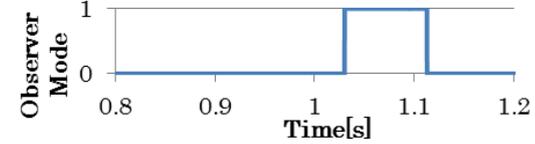
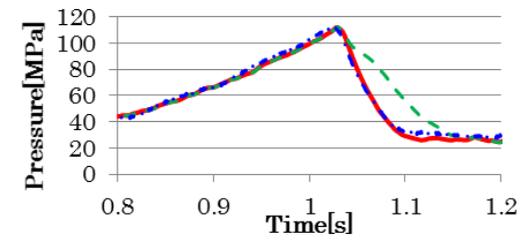
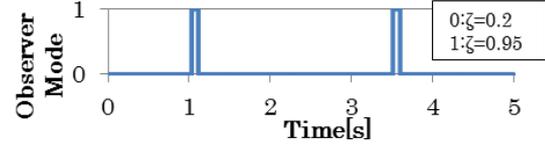
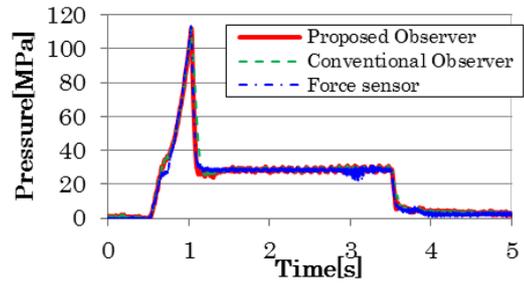


図 5 切替型オブザーバによる推定結果

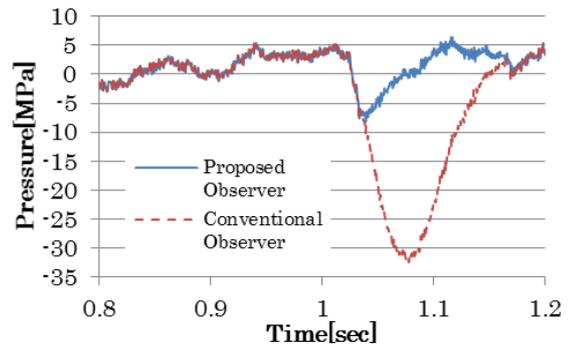


図 6 立ち下がり時におけるオブザーバの推定誤差

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)

[学会発表](計9件)

Kenji Iwasawa, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Koichi Kageyama, Masaru Takatsu and Shiro Urushihara: "Robust pressure control of electric injection molding machine using automatic parameter switching reaction force observer", Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 6557 - 6562, Nov. 10-13, 2013, Vienna, Austria

岩崎憲嗣, 岩澤秀, 大石潔, 横倉勇希, 景山晃一, 高津勝, 漆原史朗: 「機械系効率を考慮した反力オブザーバによる射出成型機の反力推定」, 電気学会産業応用部門大会, 2-2, 2013年8月

六車健宏, 漆原史朗, 大石潔, 景山晃一, 高津勝: 「射出材料の粘弾性を考慮した射出圧推定」, 電気学会産業応用部門大会, 2-4, 2013年8月

Kenji Iwasawa, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Koichi Kageyama, Masaru Takatsu and Shiro Urushihara: "Robust Sensorless Pressure Control of Electric Injection Molding Machine using Friction-Free Force Observer", 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2014) -Yokohama, YF-000302, pp.37-42, 14-16 March, 2014

六車健宏, 漆原史朗, 大石潔, 岩崎憲嗣, 景山晃一, 高津勝: 「射出材料を考慮した射出圧推定オブザーバの低次元化」, 電気学会産業計測制御・メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-57, MEC-14-45, 2014年3月

岩崎憲嗣, 大石潔, 横倉勇希, 景山晃一, 高津勝, 漆原史朗: 「力伝達損失を考慮した摩擦フリーオブザーバによる電動射出成型機のカセンサレス制御」, 電気学会産業計測制御・メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-060, MEC-14-048, 2014年3月

Syu Iwasawa, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Toshimasa Miyazaki, Koichi Kageyama, Masaru Takatsu, Shiro Urushihara: "Fine Sensorless Force Control using Stribeck Model for Injection Molding Machine", Mechatronics2014-Tokyo, JF-000442, pp.201-206, Tokyo Metropolitan University, November 27-29, 2014

岩澤秀, 大石潔, 横倉勇希, 宮崎敏昌, 景山晃一, 高津勝, 漆原史朗: 「電動射出

成型機のスライベックモデルによる動摩擦補償を用いたセンサレス力制御におけるロバスト性についての検討」, 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会, MD-15-062, HCA-15-001, 2015年3月

新田詠人, 漆原史朗, 大石潔: 「パラメータ自動切替型オブザーバによる射出圧推定精度の改善」, 電気学会産業応用部門大会, Y-66, 2015年9月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)
長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 40185187

(3) 連携研究者

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