

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560441

研究課題名（和文） 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の確立と検証

研究課題名（英文） Establishment and Verification of Force Control System Design Method for High-performance Injection Molding Ultracompact Machine without Force Sensor

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

研究成果の概要（和文）：高精度な力覚推定アルゴリズムでは静止摩擦などの影響による圧力推定誤差を改善するため、圧力指令値に微小な周期信号を重畳させている。そこで、摩擦の影響を考慮した電動射出成形機のモデルを作成し、実機実験ではハードウェアの構成上設定が困難であるため、数値解析結果に基づいて周期信号の振幅、周波数、位相の各パラメータに対し評価を行った。さらに、超小型射出成型機の根幹技術となる射出材料の粘弾性を考慮した射出部のモデルを提案し、射出材料の変化に対してロバストかつ実装を意識したオブザーバを設計した。提案手法の有用性については、オブザーバを用いた圧力推定の数値解析により確認した。

研究成果の概要（英文）： We have proposed the use of a reaction force observer based on the two-inertia resonant model. However, this method has some estimated error because of the influence of nonlinear characteristics of the holding process and the screw back-pressure process. The estimation accuracy of the reaction force observer depends on parameter variations and the non-linear friction phenomenon. In the holding process, the influence of static friction is reduced by inserting a small-amplitude periodical signal in the force command value so as to improve the estimation accuracy. Further, when the injection material changed, it has a potential to affect the estimation accuracy. In this research, we propose a new injection force estimation method which considers the influence of injection material. Moreover, the availability of proposed method is confirmed by the simulation results using the actual measured value.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,600,000 | 480,000   | 2,080,000 |
| 2011年度 | 1,300,000 | 390,000   | 1,690,000 |
| 2012年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：制御システム，センサレス力覚フィードバック

1. 研究開始当初の背景  
クリーンネス、メンテナンスフリーなどの特徴を持つ電動式射出成形機は、油圧式射出

成形機に対して溶融材料の流入速度や圧力特性において高い再現性を有する。また、長時間の保圧が困難とあるなど欠点もあるが、高

加減速かつ高圧力、短時間な成形工程となる薄膜作製には電動式成形機が有利であると考えられている。

一方、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の高品質性、高生産性が求められるにつれ、高速かつ高精度な速度制御や位置決め、さらには力覚制御などの幅広いサーボ技術が必要不可欠になる。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が、成形物の品質を決定する。また、エジェクタ軸では、薄肉製品における押出力の調整具合が製品の生産効率を左右する。しかしながら、現状ではエジェクタ軸と型締め軸にはともに構造上力覚センサの取り付けが困難であるため、現状では機械操作者の経験や知識による圧力調整によって製品品質や作業効率などが決定されている。そこで、製品の歩留まり、製品品質、エネルギー効率の向上を図る力覚フィードバック系の構成が切望されている。このように、力覚センサの取付けという力覚フィードバック系の最大の問題を解決できれば、薄膜生成も可能となるデスクトップ型射出成形機を実現できる技術と言える。

これまで、研究代表者は、機械メーカーにてフィルム巻取装置のシステム制御系の設計・開発、前職の高松高専ではリアモータの高精度位置制御系設計などの研究に従事し、メカトロニクス分野において研究成果を収めている。また、研究分担者の大石潔教授と(株)ニイガタマシンテクノとの共同研究では、外乱オブザーバに基づいたセンサレス力覚フィードバック技術開発に取り組み、学会等で研究成果を発表している。これまでに射出成形機の制御系開発に制御理論を導入し、その制御性能の向上を図る例は数多く発表されているが、射出軸・型締め軸・エジェクタ軸の3軸全てにセンサレス力覚フィードバック制御技術を展開した例は未だ報告されていない。

そこで、本研究グループでは、これまでの成果と技術融合に基づき、更なるセンサレス力覚情報高精度化を図るオブザーバシステムの設計法を確立する。その上で、これまで射出軸のみに限定していた力覚制御系を3軸全てに適用し、マルチ力覚フィードバックによるメリットを最大限活かした省エネルギー化、省スペース化、低コスト化を目的としたセンサレスサーボ技術の開発を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、エネルギー・環境問題の解決手段として注目されている燃料電池のセパレーターや水質改善システムのろ過装置に用いられる薄膜生成に着目し、熱可塑性超薄膜のリサイクルシステムとして将来期待さ

れているデスクトップ型次世代射出成形機の基幹技術について検討する。小型電動射出成形機には、従来の力覚センサと同等の検出精度を有するセンサレス力覚フィードバック系の設計法を確立する必要がある。さらには、薄膜作成可能な高性能化を実現するには、これまでセンサを搭載することが不可能であった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と協調マルチ力覚制御系への拡張が必要不可欠となる。

そこで本研究課題では、対象とする射出成形機において製品精度にかかわる動作軸のモータ駆動制御回路内に高精度力覚推定器を構成し、コスト低減と高速化のための電流制御ループ内へのセンサレス力覚検出の構築を第一の目的とする。さらに、最小限の電気エネルギーで従来以上の出力を実現する高効率なシステム制御を目指し、全ての力覚制御系を包括・統合し、プラスチック状態を考慮した協調マルチ力覚フィードバックシステムの開発と実装を第二の目的とする。

## 3. 研究の方法

初年度の2010年度においては、様々なトルク指令に対する実機データに基づき、射出軸の詳細なシステム同定を行った。また、トルク指令値に高調波成分を重畳させた場合、力覚推定値が振動するものの推定精度が向上する事前研究成果を応用した高調波重畳による高精度力覚推定アルゴリズムの設計方法を確認し、実測結果に基づいて力覚推定アルゴリズムの有用性を検証した。さらに、電動射出成形機の駆動系に用いているボールねじの非線形摩擦要素を考慮した力覚推定アルゴリズムを提案し、実機実験により有効性と実現性の確認を行った。

2011年度では、重畳する入力信号の振幅、周波数、位相まで考慮した評価関数を完成させ、一昨年度の成果からより厳密な周期信号の最適化について検討した。さらに、高次反力オブザーバを用いた力センサレス圧力制御の実用化に向けて、保圧工程の過渡状態に適合した高次反力オブザーバと保圧工程の定常状態に適合した高次反力オブザーバの両方を1つのオブザーバ構造で実現できる手法について検討を行った。

最終年度の2012年度においては、改良したセンサレス力覚推定アルゴリズムにプラスチック流体モデルを付加した力覚フィードバック系を成形機全3軸に適用する前準備を行った。まず、金型内のプラスチック樹脂の反力を考慮した高精度な力覚情報獲得方法の足掛かりとして、プラスチック樹脂の物理モデルを力覚推定アルゴリズムに取り入れ、力覚推定値と実測値との比較検討や物理モデルの妥当性を検討しながらセンシング精度を高めた。

#### 4. 研究成果

重畳する入力信号の振幅、周波数、位相まで考慮した評価関数を完成させ、より厳密な周期信号の最適化について、以下のような研究成果を得た。

保圧時の圧力指令値を 30[MPa]とした場合の重畳するパラメータ(振幅、周波数、位相)について評価を行った。まず周期信号のパラメータのうち位相を 0[rad]に固定し、振幅と周波数のみを変化させた場合の数値解析による推定値の誤差率を図 1 に示す。この結果から振幅を 4[MPa]、周波数を 10[Hz]としたとき最小誤差率となることが確認できた。さらに、位相に対しても同じ圧力指令値に対する数値解析により評価を行った。

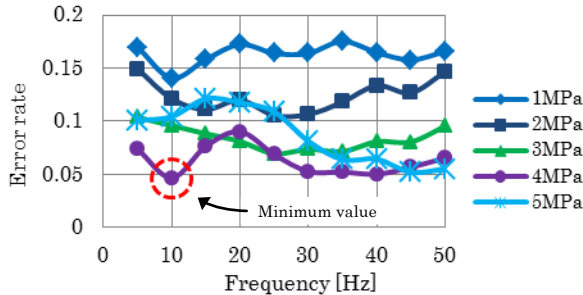


図 1 数値解析による推定誤差率(振幅と周波数)

振幅と周波数の設定値は、図 1 における最大および最小誤差率の条件において、位相を変化させた場合の誤差率を図 2 に示す。誤差率が最大となる振幅と周波数の設定条件では、位相を変化させることで推定誤差が 5%ほど変化しているが、誤差率が最小となる条件では位相を変化させてもその推定誤差はほとんど変化していない。これらのシミュレーション結果から、振幅は指令値の約 13%の 4[MPa]、周波数は 10[Hz]程度に設定した場合が最も推定精度が向上することが分かった。また、位相については推定値に影響を与えないことも分かった。

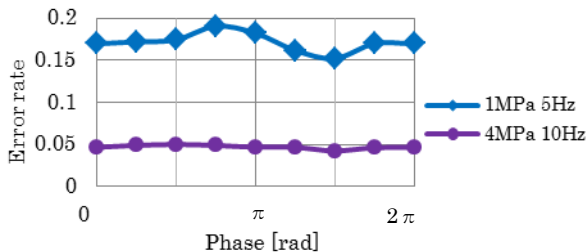


図 2 数値解析による推定誤差率(位相)

また、射出材料の粘弾性を考慮した射出部のモデルを提案し、射出材料の変化に対してロバストかつ実装を意識したオブザーバを設計した。さらに、オブザーバを用いた圧力推定のシミュレーションを通してその有効性を確認した。

まず、ドライバのメモリ容量に制限のある

実機に搭載するために、従来の二慣性共振モデルのパラメータ内にプラスチックの影響を含ませ、モデルの低次元化を図った。図 3 に提案する射出材料の影響を考慮した二慣性系のモデルを示す。負荷側機械の慣性モーメント、粘性係数、またバネ定数が材料の影響を受け、それぞれ微小に増加しているモデルとなっている。

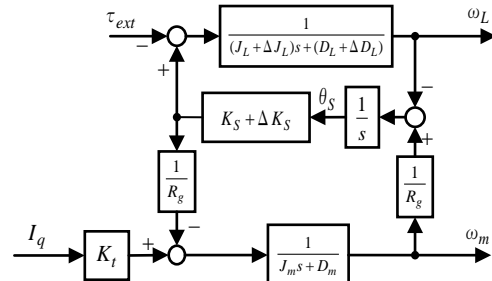


図 3 低次元化した射出部数学モデル

図 3 のブロック線図から、材料の弾性要素は負荷側機械の粘性要素へと書き換えることが可能であると考えた。つまり、負荷側機械の弾性要素の材料による増加分  $\Delta DL$  は粘性要素の値と同じであると考えられる。次に、負荷側機械の慣性モーメントの微小増加量  $\Delta JL$ 、バネ定数の微小増加量  $\Delta KS$  は射出部の周波数特性からパラメータの同定を行った。同定の条件として反共振周波数、共振周波数を用いている。

提案したオブザーバを用いて圧力推定の数値解析を行った。実機において圧力指令値に 10[Hz]のディザ信号を重畳し、射出成形を行った際の入力電流とモータ速度のデータをオブザーバに入力している。オブザーバは除去周波数 10[Hz]、極  $\alpha=100$ [rad/s]として設計し、数値解析を行っている。解析結果を、従来のオブザーバの推定値、センサの検出値と比較していた結果を図 4 に示す。この解析結果から、提案するオブザーバが各工程において力センサとほぼ同等の高精度な圧力推定を行えていることが確認できる。また、オブザーバの推定結果とセンサ値との誤差を従来のオブザーバと比較し、特に差が顕著にみられる 0.5 から 1.5[s]に着目したグラフを図 5 に示す。従来のオブザーバに比べセンサ検出値との誤差が小さくなり、平均でおよそ 3%の推定誤差が改善されている。

今後の展開として、メインの射出部のセンサレス力覚フィードバックを構成する準備が整ったので、力覚制御系を 3 軸全てに適用し、マルチ力覚フィードバックによるメリットを最大限活かした省エネルギー化、省スペース化、低コスト化を目的としたセンサレスサーボ技術の開発を図る。

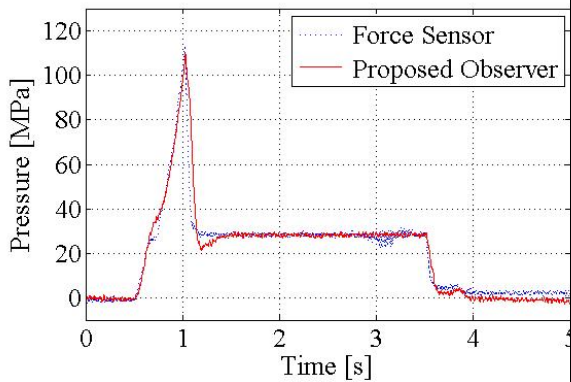


図4 全行程における解析結果と実測値の比較

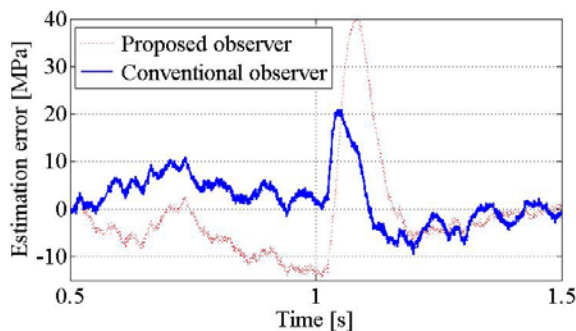


図5 推定値とセンサ検出値との誤差

## 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)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 古澤亮、浅井哲也、大石潔、真島勝行、景山晃一、高津勝、漆原史朗、非線形摩擦要素を考慮した電動射出成形機のセンサレス力制御」、査読有、電気学会論文誌D(産業応用部門誌)、Vol. 131、No. 3、pp. 311-318、2011
- ② 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制御の実現性に関する検討、査読有、電気学会論文誌D(産業応用部門誌)、Vol. 133、No. 3、pp. 248-261、2013

〔学会発表〕(計9件)

- ① Ryo Furusawa, Kiyoshi Ohishi, Koichi Kageyama, Masaru Takatsu and Shiro Urushihara、High-Performance Sensorless Injection Force Control Based on Nonlinear Friction Phenomenon、the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2010)、November 7-10, 2010、Renaissance Phoenix Glendale Hotel & Spa, AZ,

## USA

- ② 古澤亮、大石潔、真島勝行、景山晃一、高津勝、漆原史朗：「並列高次反力推定オブザーバを用いた電動射出成形機の力センサレス圧力制御に関する検討」、電気学会産業応用部門大会、2-103、2011年9月、琉球大学
- ③ 六車健宏、岩澤秀、漆原史朗、古澤亮、大石潔、景山晃一、高津勝：「射出圧推定アルゴリズムにおける設定パラメータの評価」、電気学会産業応用部門大会、Y-79、2011年9月、琉球大学
- ④ 六車健宏、岩澤秀、漆原史朗、古澤亮、大石潔、景山晃一、高津勝：「射出圧推定アルゴリズムにおける設定パラメータ評価法」、計測自動制御学会四国支部学術講演会、S01-20、2011年11月、徳島大学
- ⑤ 古澤亮、大石潔、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電動射出成形機のセンサレス力制御」、電気学会産業計測制御研究会、IIC-12-006、pp. 29-34、2012年3月、横浜国立大学
- ⑥ Ryo Furusawa, Kiyoshi Ohishi, Koichi Kageyama, Masaru Takatsu and Shiro Urushihara, Force Sensorless Pressure Control Considering Nonlinear Friction Phenomenon for Electric Injection Molding Machine、12th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2012), March 25-27, 2012, HOTEL Bristol Fra Filipa Lastrica 2, 71000 Sarajevo
- ⑦ 岩崎憲嗣、大石潔、景山晃一、高津勝、漆原史朗：「同一次元高次反力オブザーバを用いた射出成型機の反力推定」、電気学会産業応用部門大会、2-17、2012年9月、千葉工業大学
- ⑧ 六車健宏、漆原史朗、古澤亮、大石潔、景山晃一、高津勝：「射出圧推定法における重畳する周期信号の最適設定値解析」、電気学会産業応用部門大会、Y-60、2012年9月、千葉工業大学
- ⑨ 六車健宏、漆原史朗、大石潔：「プラスチックの粘弾性を考慮した射出成形機の反力推定」、計測自動制御学会四国支部学術講演会、SO1-18、2012年11月、香川高等専門学校

## 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：4 0 1 8 5 1 8 7

(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：9 0 3 2 1 4 1 3