

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04348

研究課題名（和文）位置と力の推定技術の確立とセンサレス制御が拓く圧電駆動システムの新展開

研究課題名（英文）New development of piezoelectric drive system based on position and force estimation technology and sensorless control

研究代表者

関 健太（SEKI, Kenta）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：70432292

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、圧電アクチュエータの位置及び力推定と推定信号に基づくセンサレス制御を実現することを目的に、（1）高周波印加信号を利用したインピーダンスの実時間測定とそれに基づくアクチュエータ先端位置の推定手法、（2）簡易な補助回路を併用したアクチュエータ先端の接触力推定法、を確立し、推定信号に基づくセンサレス位置および力制御システムの実現可能性を実機実験により検証した。さらに、関連技術として、圧電アクチュエータの設置位置と制御パラメータの同時最適化システムを構築するとともに、ひずみゲージを用いたマイクロマニピュレーション、状態検出のためのブリッジ回路の改善を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精密システムの駆動源として多用される圧電アクチュエータは、高分解能センサを用いたフィードバック制御系を設計した上で利活用がなされてきたが、微小操作を行う作業端では作業空間にセンサを設置できない場合が多く、システム設計上の制約となっていた。本研究で構築されたセンサレスで位置と力を推定し、アクチュエータ先端の位置や接触力を制御する基本システムにより、物体の把持力や触覚機能を具備したマニピュレータ、加工装置の先端微細制御など可能となり、マイクロシステム、計測、加工分野全体に波及効果をもたらすと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize position and force estimation of piezoelectric actuators and sensorless control based on the estimated signals.

As main achievements, (1) a real-time impedance measurement using a high-frequency injection signal and an estimation method of actuator tip position based on the impedance measurement, and (2) an estimation method of contact force at the actuator tip using a simple auxiliary circuit, were established. Based on these methods, the feasibility of a sensorless position and force control system based on the estimated signals was verified through the experiments. In addition, as related technologies, a system for simultaneous optimization of installation position and control parameters of piezoelectric actuators, micromanipulation using strain gauges, and improved methods of bridge circuits for state detection were established.

研究分野：計測制御

キーワード：圧電アクチュエータ 状態推定 位置制御 力制御

### 1. 研究開始当初の背景

圧電アクチュエータは、主に精密システムの駆動源として利用されているが、アクチュエータの有する非線形特性を補償しながら駆動精度を確保するために、一般的に高分解能センサを用いたフィードバック制御系が設計される。一方で、作業空間にセンサを設置できない課題もある。そのようなシステムの設計制約を緩和し、実用的な用途拡大を実現する一つの方策として、センサレスで位置および力を高精度に制御することが挙げられる。

圧電アクチュエータを用いてセンサレスで振動の抑制を図る手法はセルフセンシングアクチュエーションと呼ばれ、古くから国内外の研究者によって多くの成果が挙げられている。これらは、主に動的な動作に対しての外乱抑制機能の実現と考えることができる。一方で、静的な動作も含めた位置センサレス制御の一つの取り組みとして、非線形モデルの逆特性の構築とパラメータ同定手法に関する研究が国内外でなされ、実現象を忠実に再現する多くの数学モデルの提案がなされている。その他、アクチュエータの電流計測に基づくセンサレス位置制御、誘電率変化に着目し、ロックインアンプを用いたインピーダンス計測に関する研究がなされている。このように、センサレス制御に対する関心、要求は高く、圧電アクチュエータの用途拡大を目指した研究が盛んに行われている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、圧電アクチュエータの位置及び力センサレス制御の実現である。具体的に、  
(1) 高周波印加信号を利用した高速信号処理技術に基づくインピーダンスの実時間同定と駆動中のインピーダンス変化に基づく位置推定  
(2) 外部回路をとアクチュエータ数理モデルを用いた状態推定  
について取り組み、実験によりその有効性を検証する。

### 3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、最初に位置推定手法の確立と評価、続いて力推定への拡張、最後にセンサレス制御系設計と評価の順に実施する。推定手法として、高周波印加信号を用いた実時間インピーダンス推定に基づく手法と外部回路と数理モデルに基づく推定手法について検討する。

- (1) 高周波印加信号を用いた実時間インピーダンス推定に基づく位置推定と制御  
アクチュエータ出力に影響を与えない高周波電圧を操作量に重畳させ、電気インピーダンスを同定するための電圧と電流信号を計測する。  
計測信号に基づいてアクチュエータの電気インピーダンスを離散フーリエ変換によってリアルタイムで同定する。  
電気インピーダンス変化とアクチュエータ移動量の関係から位置を推定する。  
推定した位置信号を基にしてフィードバック制御系を設計し、位置制御性能を評価する。
- (2) 外部回路と数理モデルに基づく推定手法  
受動素子をアクチュエータに直列接続することにより得られる電気信号と、アクチュエータの力学モデルからアクチュエータが発生する内力を推定する。  
推定信号を用いたフィードバック制御系を構築し、センサレス制御性能を評価する。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に述べる。

- (1) 高周波印加信号を用いた実時間インピーダンス推定に基づく位置推定と制御  
図1に構築した位置推定と制御システムの構成を示す。アクチュエータは金属シムを二枚の圧電素子で挟んだカンチレバー型のアクチュエータを用いた。アクチュエータ先端位置に影響を与えない高周波信号  $V_r$  をアクチュエータ駆動電圧  $u_m$  に加算回路を用いて重畳させる。このとき、アクチュエータに流れる電流を計測し、バンドパスフィルタを介して印加信号の周波数成分のみを抽出する。この電圧と電流信号からベクトル比計算を行い、アクチュエータの静電容量  $C_p$  を算出する。この静電容量の値と変位量の関係を予備実験でモデル化しておくことで、アクチュエータ先端位置を推定することができる。一方で、アクチュエータ自身が有する機構共振を検出することができないため、高精度な位置決めを実現するためには振動の検出と制御が必須となる。そこで、アクチュエータに直列に受動素子 ( $R$ ,  $C_c$ ) を接続し、新たに得られる電圧信号  $V_l$  を用いて機構振動の検出と制御を実現するマイナーループを設計する。  
図2左に位置決め制御実験結果を示す。図中、黒線は目標ステップ信号、緑線は開ループ制御時の位置応答、赤線は推定位置信号に基づくフィードバック制御と外部回路を併用したマイナーループを施した結果である。この結果より、推定信号のみで位置決め時の残留振動を抑制しつつ、定常偏差なく目標値に追従できている。同図右はアクチュエータ先端をインパルス加振した際の位置センサレスでの外乱応答であり、青線はマイナーループなし、赤線はマイナーループ負

荷時の応答である。この結果より、マイナーループを付加することで、外乱によって励起される残留振動を速やかに低減できている。これらの結果より、高周波信号に基づく位置推定と制御により、位置センサレスでの位置決めが可能となることを示した。

本手法をカンチレバー型アクチュエータから金属封入された積層型圧電アクチュエータの位置推定へと拡張したところ、微小振動による内部摩擦によりアクチュエータ温度が上昇することが分かった。その結果、インピーダンス推定に誤差が生じたため、その補償法について検討した。具体的には、温度センサを用いた温度補償法と温度変化の推定モデルに基づくインピーダンス補正法を構築した。何れの手法においても温度変化の影響による推定変位劣化を補償することを可能とした。

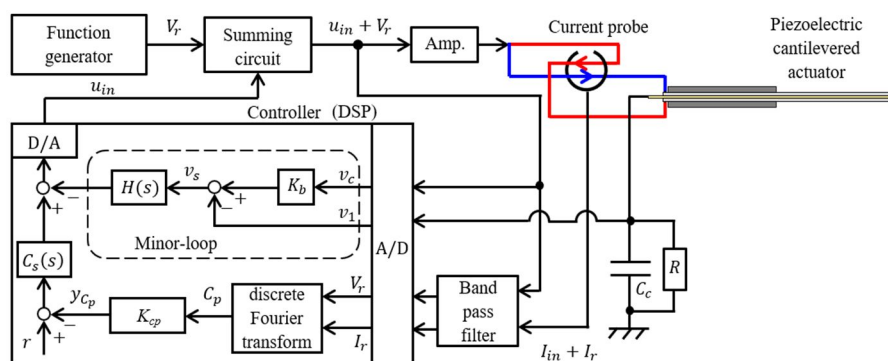


図1 高周波印加信号に基づく位置推定と制御システム構成

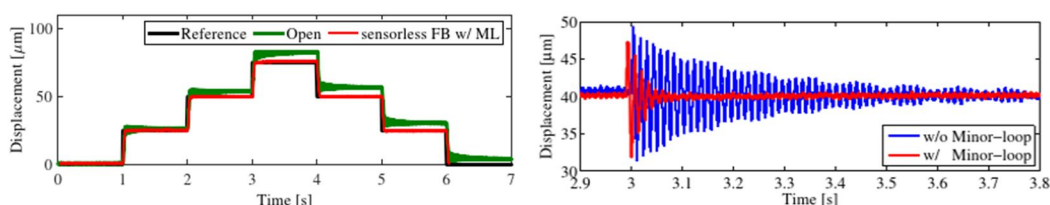


図2 推定信号に基づく位置制御実験結果（左：位置応答，右：外乱応答）

## (2) 外部回路と数理モデルに基づく推定手法

図1の中で使用した受動素子からなる外部回路を用いた手法は、主に動的な信号の検出に用いられる。そこで、この外部回路とアクチュエータの数理モデルを併用することで、静的な動作を含めた状態推定へと拡張する。図3にそのシステム構成を示す。外部回路を接続して得られる信号  $v_1$  と、数理モデルおよび同定試験から得られる  $G$  を用いてアクチュエータ先端と環境との接触力を推定する。

図4に実験で得られた結果を示す。図中左はS字指令、右は振幅が減衰する正弦波指令を入力したときの結果であり、青破線はロードセルによって検出された接触力に基づくフィードバック制御を行った結果、赤線は推定信号に基づくフィードバック制御を行った結果である。この結果より、推定信号に基づくフィードバック制御系はセンサフィードバック制御系と同等の制御性能を得ることができた。

本研究では、高周波印加信号と外部回路を用いた推定手法について主に検討を進めたが、作業空間に物理量を計測するセンサを設置しないというコンセプトから、アクチュエータ自身にひずみゲージを取り付けて得られる信号を基に、作業端の位置あるいは力を推定する手法についても検討を行った。提案法の有効性は実機実験により検証されている。その際に、センサやアクチュエータを適切な位置に設置することが重要であることが分かった。そのため、機構解析を援用したアクチュエータの位置と制御パラメータの最適化アルゴリズムの基礎検討を行った。その結果は片持ち梁の制振実験を通して有効性を確認した。その他に、外部回路を用いた場合は電圧が分圧されるため、そこで得られる検出信号が微小となることが課題となることが分かった。そこで、オペアンプを用いた新たな回路構成を考案し、検出信号のSN比の改善を実現した。

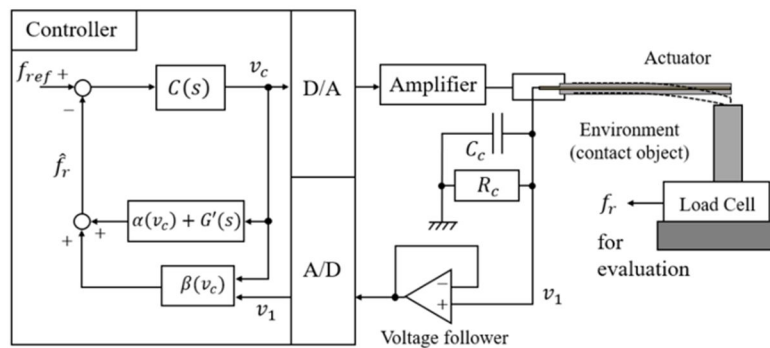


図3 外部回路を用いた接触力推定システムの構成

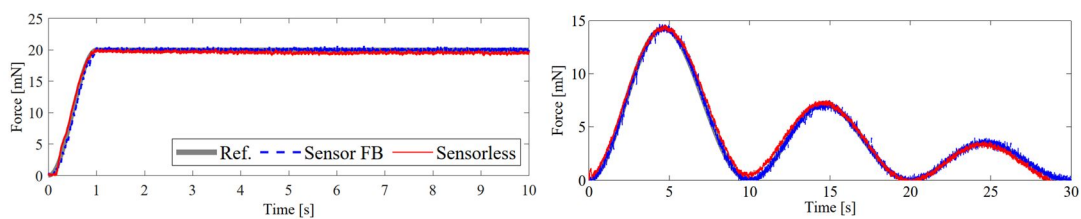


図4 推定信号に基づく力制御実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuya Sakragi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Contact Force Estimation and Sensorless Force Control in Piezoelectric Bending Actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21006154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Chihiro Mikuriya, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Evaluation of Temperature Dependency for Displacement Estimation in Piezoelectric Stack Actuators
3. 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Motion Control（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田 陽紀, 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 ひずみゲージを用いたバイモルフ型圧電アクチュエータの位置と力の推定と制御
3. 学会等名 電気学会産業計測制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 湧也, 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 複数振動モードの抑制を考慮した圧電アクチュエータ位置と制御系の最適設計システムの検討
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 御厨 知宏, 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 積層型圧電アクチュエータの変位推定における温度依存性評価
3. 学会等名 令和3年電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 高次振動モードを有するメカトロニクス機器の振動解析と制御
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Seki, Yuya Sakuragi, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Contact Force Control Based on Force Estimation in Bimorph-type Piezoelectric Actuators
3. 学会等名 IEEE IES 16th International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chihiro Mikuriya, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Displacement Estimation and Control Based on High Frequency Injection and Bridge Circuit in Piezoelectric Actuators
3. 学会等名 IEEE IES the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野 順平, 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 外部回路を用いたバイモルフ型圧電アクチュエータの力推定と制御
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋 諒, 関 健太, 岩崎 誠
2. 発表標題 振動抑制を考慮したアクチュエータ位置と制御系の同時最適設計システム構築の検討
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Seki, Yuya Munemoto, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Experimental Verifications of Strain Signal-Based Position/Force Control in Piezoelectric Bimorph Actuators
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jumpei Ohno, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Improvement of Bridge Circuit for Self-Sensing Actuation Using Piezoelectric Elements
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Ishibashi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Development of Optimal Design Support System of Actuator Position and Control System Considering Resonant Vibration Suppression in Cantilever
3. 学会等名 IEEE IES International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関