

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560291

研究課題名(和文)高分子アクチュエータの高精度制御に関する研究

研究課題名(英文)High precision control of High polymer actuator

研究代表者

佐々木 実(SASAKI, MINORU)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20183379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高分子アクチュエータについて電気的特性と動特性を調べる、その入出力データに基づき時間領域で動特性のモデル化を行い、そのモデルに基づき逆システムを構築し、逆システムを用いたフィードフォワード制御を行う。また、回路電流を検出し、DSPで電荷量によりアクチュエータの先端変位を推定し、電荷量により推定した変位をフィードバック制御、2自由度制御について制御を試み、制御系の有効性を検証する、またステップ状外乱を入れて制御系のロバスト性の検証も行い、高精度制御できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research presents the modeling and two-degree-of-freedom motion control of an Ionic Polymer-Metal Composite actuator with hysteresis compensation. It has been demonstrated that with correctly applied voltage, the hysteresis effect can be substantially reduced. However, there still remains the problem of control. The two-degree-of-freedom-control is a robust control technique that is effective for this actuator. The IPMC position control by the feedforward control employing inverse system and feedback control using a current sensing circuit was carried out. It consists of a feed-forward controller based on an inverse system and a stabilizing feedback controller. Both experimental and numerical results are presented and show the effectiveness of both the control technique and the modeling method with the robustness.

研究分野：知能機械

キーワード：導電性高分子 IPMC 高分子アクチュエータ 高精度制御 フィードフォワード制御 フィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

近年、イオン伝導性高分子膜に金属メッキを施した構造を持つ IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)アクチュエータが、軽量、低電圧駆動、小型化が容易、素材の柔軟性等の理由から電気駆動型高分子アクチュエータとして注目されている。IPMC は電気的入力に対する変形に明確な定量性が無く、変形制御が難しい。本研究で使われた Nafion で作られたアクチュエータはあえて脱水(完全脱水ではない)することによって屈曲制御性が高くなることが分かった。

2. 研究の目的

本研究では、この Nafion について電気特性と動特性を調べる、付与電荷量と曲率の関係を検証した後、入出力データに基づき時間領域で動特性のモデル化を行い、そのモデルに基づき逆システムを構築し、逆システムを用いたフィードフォワード制御を行う。従来の IPMC の位置制御はレーザ変位計を用いて制御するのは多いが、レーザ変位計のような装置が常にあるとは限らない、そこで、回路電流を検出し、DSP で電荷量によりアクチュエータの先端変位を推定し、電荷量により推定した変位をフィードバック制御、2 自由度制御について制御を試み、制御系の有効性を検証する、また外乱を入れて制御系のロバスト性の検証も行うことを目標とした。

3. 研究の方法

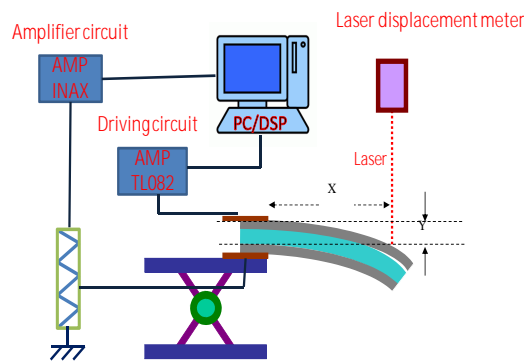


Fig. 1 Experimental setup for measuring bending curvature of Nafion.

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は、銀メッキした Nafion タイプ IPMC、レーザ変位計(キーエンス社製 LS - 5000)、制御ボード(MTT 社の s-BOX)、駆動回路、増幅回路から構成されている。s-BOX の実行には、windows パソコン、MATLAB/Simulink/Real-Time WorkShop、TI 社の DSP 用コンパイラ Code Composer Studio(CCS)を使う。制御ボードで計算された制御電圧は、D/A 変換器から駆動回路を経由して Nafion に印加される。Nafion の電流 I は、基準抵抗 5Ω の電圧をオペアンプ(INAX)で 1000 倍に差動増幅して A/D 変換を介して制御ボードで計

算する。Nafion の先端変位をレーザ変位計で非接触計測する。

4. 研究成果

Nafion のモデル化を行い、モデル化には、物理モデルに基づいて数理モデルとして偏微分方程式を導出し、それを解析する理論的方法と、試験等で測定したデータにより同定する実験的方法がある。本研究では、測定したデータによりモデルを得る実験的方法によってモデル化を行った。時間応答を基としたシステム同定を行う。基礎実験として 2V--2V の矩形波を入力し、そのときの先端変位をモニタリングした。その結果、Nafion は湿度の低い環境で変位が安定となり、その実験データを MATLAB のシステム同定ツールを用いてシステム同定を行った結果を以下に示し、妥当性の評価を行う。また安定判別のため極配置図も示す。

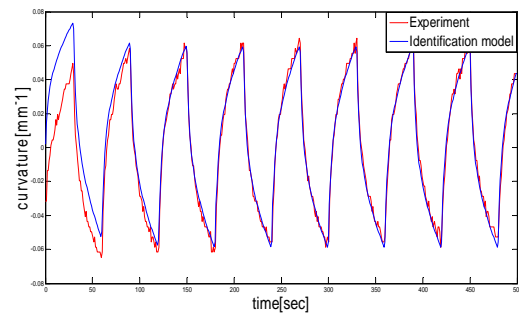


Fig.2. Identification results

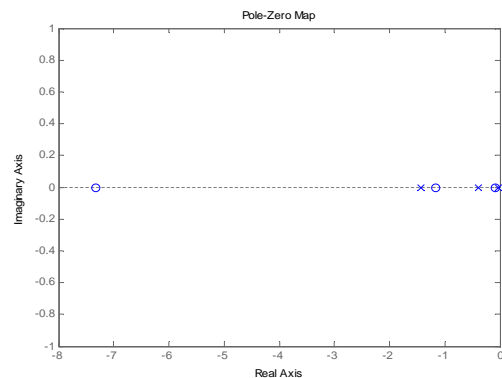


Fig. 3. Pole-Zero Map.

$$G(s) = \frac{0.0022s^3 + 0.0189s^2 + 0.0205s + 0.0017}{s^3 + 1.8487s^2 + 0.6135s + 0.0161}$$

(1)

実験によるデータと作成したモデルの出力を比較すると、Fig.2 を見るとわかるように、Nafion アクチュエータの動特性を捉えたモデルと判断できる。また、Fig.3 の極零点配置図を見ると、極が左半平面に存在していることから安定であると考えられる。

フィードフォワード制御は入力整形法とも呼ばれ、希望する出力が得られるようにプラントに入力する信号を前もって整形する制御方法のことである。本研究ではプラントに対する逆システムを用いたフィードフォ

ワード制御を行う．逆システムを用いたフィードフォワード制御とは希望する出力を軌道として定め，その軌道と一致した出力が得られるようなプラントへの入力整形を行う制御法である．得られた伝達関数式(1)を用いて逆システム

$$G^{-1}(s) = \frac{s^3 + 1.8487s^2 + 0.6135s + 0.0161}{0.0022s^3 + 0.0189s^2 + 0.0205s + 0.0017}$$

を設計し，この式を用いた制御ブロック線を Fig.5 に示す．本研究では，目標曲率は振幅 0.001[mm<sup>-1</sup>],周期 20[s]の正弦波に決定した．実験結果を Fig.6 に示す．

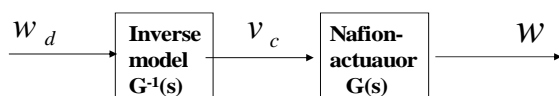


Fig.5 Block diagram of FF control system.

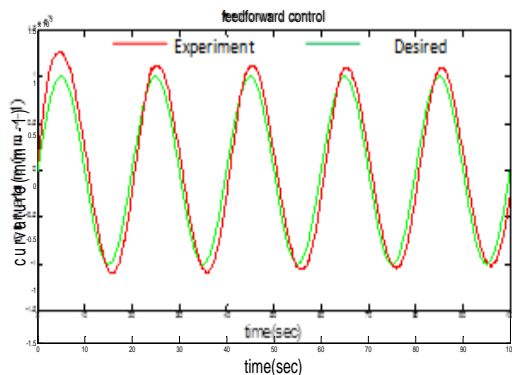


Fig.6. Time response of the FF control.

ARMAX モデルから設計した逆システムを用いた制御は目標値に追従し良好な結果が得られた．

従来の IPMC の位置制御はレーザ変位計を用いて制御するものが多い，レーザ変位計のような計測装置が常にあるとは限らない．前に述べたような印加電流に対する Nafion IPMC の曲率の振る舞いから，Nafion IPMC の曲率は総付与電荷量に大きく依存している事が示された．その特性を用いて Nafion IPMC の曲率を推定する．そのときの制御系のブロック線を Fig.7 に示す．目標値はフィードフォワード制御の目標値と同じにする，フィードバックコントローラのゲイン  $K_p=5000$  と試行錯誤的に決定した．環境湿度 37%，実験結果を Fig.8 に示す．目標値に追従し良好な結果が得られた．

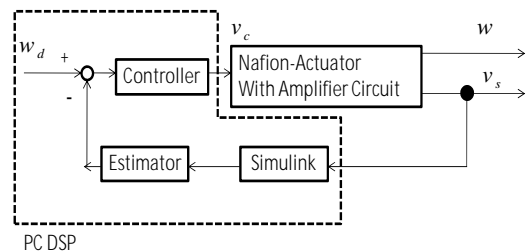


Fig. 7 Block diagram of charge Feedback system.

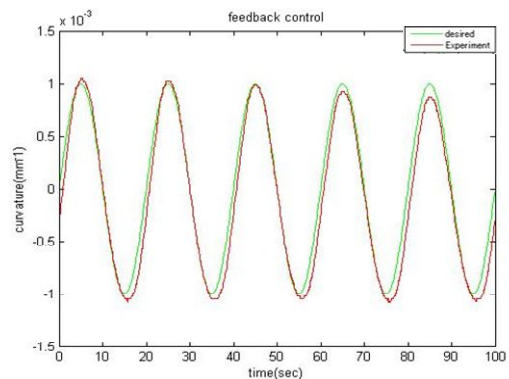


Fig.8 Time response of feedback control system.

一般に，制御系は，フィードフォワードによる構成，フィードバックによる構成の2種類がある．フィードバック制御系は，(a)外乱の影響を抑制，(b)制御対象の特性変動やモデル化誤差の影響を低減，(c)不安定系の安定化に優れており，フィードフォワード制御系は，(d)目標値応答特性の整形に優れている．このため，(a)から(d)のすべての特性をフィードバック制御系で実現する場合，本質的には設計自由度が不足する．この問題を解決する実用的な制御系として，フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた2自由度制御系がある．

Fig.9. は電荷をフィードバック制御に用いる2自由度制御のブロック線図である．ここで，コントロールゲインは  $P=5000, I=500$ ，試行錯誤的決定とした． $W_d$  は目標値、 $W$  は出力、 $v_s$  は Nafion アクチュエータへ加えられる電流を表す．Fig.10 は時間応答の実験結果を示す，振幅多少ずれるものの，目標値に追従できている．

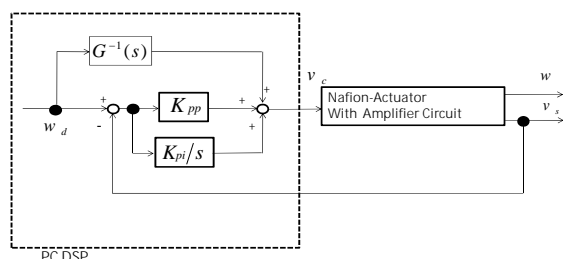


Fig. 9. Block diagram of 2 DOF control system.

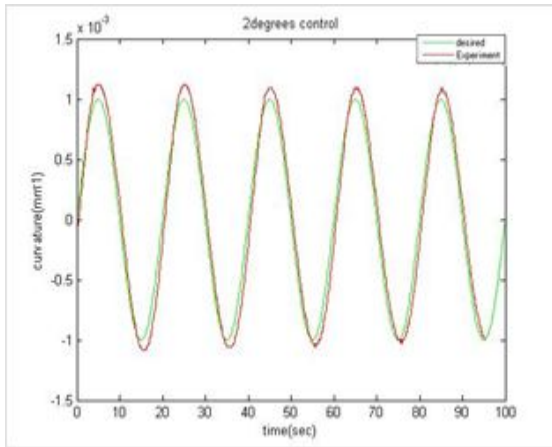


Fig. 10 Time response of the 2DOF control system.

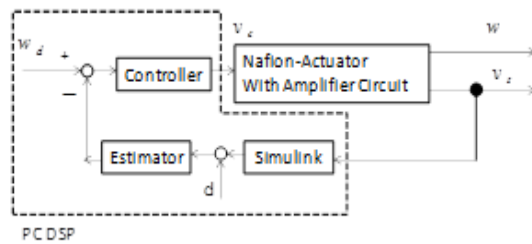


Fig.11. Block diagram of the feedback control system with disturbance.

ここでは電荷量をフィードバック制御と2自由度制御においてPC内で53秒の時0.0005[mm<sup>-1</sup>]ステップ状外乱を混入させ、ロバスト性の検証を行った。フィードバック制御のブロック線図をFig.11に示し、回路電流をモニタリングした。その結果をFig.12とFig.13に示す。

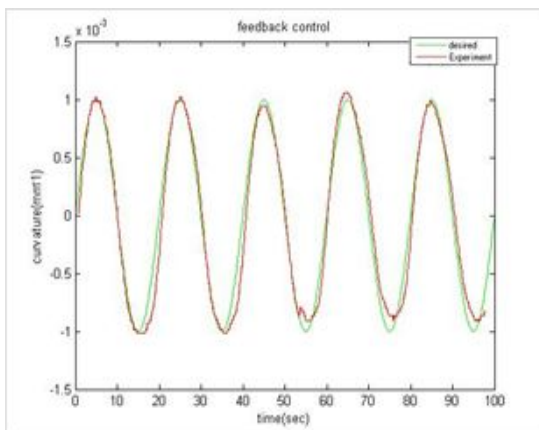


Fig. 12 Time response of the feedback control system with disturbance.

Fig. 11のような外乱を入れると電流値は急激に上昇する、このため、電流は目標値からずれるが、電荷量をフィードバックしているため、すぐに元に戻る。Fig.12に示される通り、曲率も元に戻っている。目標値に追従したことによりロバスト性を検証することができた。

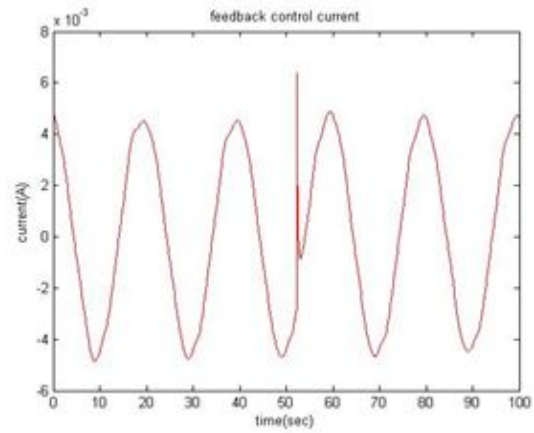


Fig. 13 Time response of the current with disturbance.

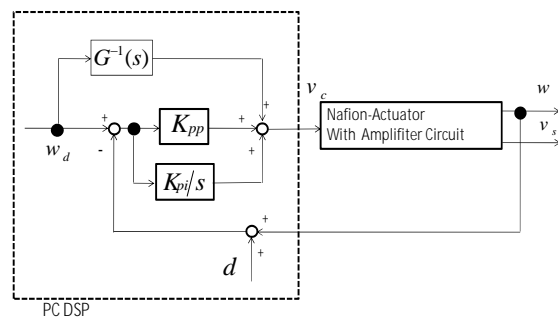


Fig. 14. Block diagram 2DOF control system with disturbance.

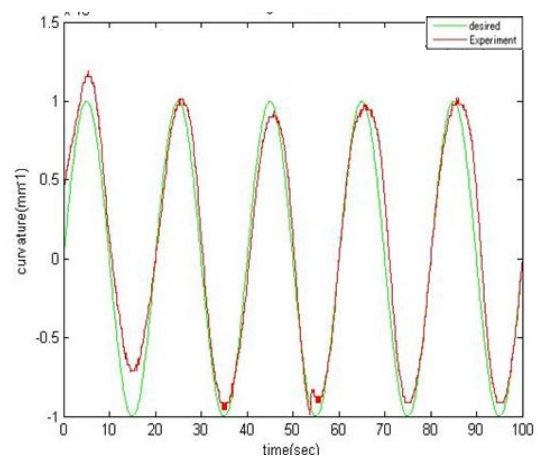


Fig.15 Time response of 2DOF control system with disturbance.

2自由度制御系においてロバスト性があるのか検証する実験を行った。制御系のブロック線図をFig.14に示し、その結果をFig.15とFig.16に示すステップ状外乱が入ったため、電流は目標値からずれるが、電荷量をフィードバックしているため、すぐに元に戻る。Fig.15に示される通り、曲率も元に戻っている。目標値に追従したことによりロバスト性を確認することができた。

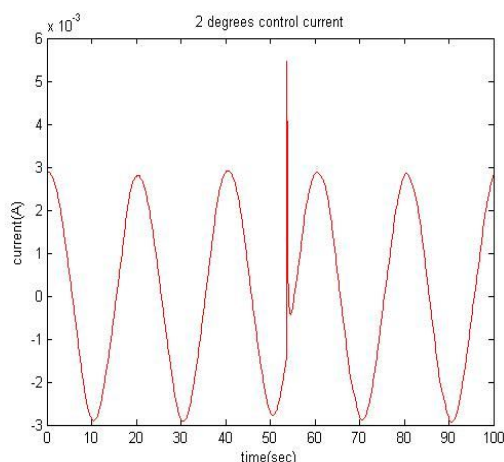


Fig.16 Time response of the current with disturbance.

本研究では Nafion アクチュエータの目標値精密追従制御を行った。まず、Nafion アクチュエータの数式モデルから導出した逆システムを用いたフィードフォワード制御を行うことで、目標先端位置に追従させることが出来た。しかし、フィードフォワード制御はモデル化誤差や外乱などに対するロバスト性に欠けるため、フィードバック制御を考えた。装置の小型化、簡単化を実現するために、外部センサを用いず Nafion アクチュエータの曲率と付与電荷の関係式から電流検出回路により推定した曲率を用いてフィードバック制御を行った。その結果、目標値に追従させることが出来た。フィードフォワード制御、フィードバック制御を組み込んだ 2 自由度制御系も目標値に追従させることが出来た。また、フィードバック制御、2 自由度制御にステップ状外乱が混入しても目標先端位置に追従したことで、ロバスト性の検証ができ、システムの有効性を確認することができた。

##### 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 5 件)

- (1) H. Ngetha, M. Sasaki, H. Tamagawa, S. Ito, K. Ikeda, Dynamic Characteristics of Selemion CMV-Based IPMC Actuators in High Humidity Environment, Journal of Computer and Communications, 2014, 2, pp.45-52. (査読有)
- (2) Kota Ikeda, Minoru Sasaki, Hirohisa Tamagawa, IPMC bending predicted by the circuit and viscoelastic models considering individual influence of Faradaic and non-Faradaic currents on the bending, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 190, January 2014, Pages 954-967. (査読有)

- (3) Wenyi Lin, Minoru Sasaki and Hirohisa Tamagawa, Large and symmetric deflection of Acryl plate-CFRP plate laminate actuator, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.41, pp. 51-58, 2013. (査読有)

- (4) Hiroshi Tamagawa, Wenyi Lin and Minoru Sasaki, An IPMC of thermo-responsive Selemion AMV coated with Au foils, Advanced Robotics Vol. 26, No. 5-6, 2012. (査読有)

- (5) Wenyi Lin, Minoru Sasaki and Hirohisa Tamagawa, Symmetric deflection of CFRP-based polymeric laminate, Advanced Engineering Forum, Vol.2-3, pp.966-971, 2012. (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) Harrison Ngetha, Minoru Sasaki, Hirohisa Tamagawa, Satoshi Ito, Stability analysis of Selemion CMV-based IPMC actuators in Humidity controlled environments. THE FIRST DeKUT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION in DeKUT, Nyeri, Kenya, November 3-4, 2014.

- (2) Harrison Ngetha, Minoru Sasaki, Hirohisa Tamagawa, Satoshi Ito, Two Degree of Freedom Control of Selemion CMV-based IPMC Actuators in Extremely Low Humidity Environment, THE FIRST DeKUT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION in DeKUT, Nyeri, Kenya, November 3-4, 2014.

- (3) H. Ngetha, M. Sasaki, H. Tamagawa, S. Ito, K. Ikeda, The Dynamic characteristics of Selemion CMV-based IPMC actuators in high humidity environments. 2014 Conference on Advances in Robotics and Automation Technology, Wuhan, China, September 12-14, 2014.

- (4) H. Ngetha, M. Sasaki, H. Tamagawa, S. Ito, K. Ikeda, Dynamic characteristics of selemion CMV-based IPMC actuators in different & varying humidity environments, 第 22 回日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス in 宮崎講演論文集, pp.555-560, 2013.

- (5) Minoru Sasaki, Wenyi Lin, Hirohisa Tamagawa, Satoshi Ito and Keiko Kikuchi, CONTROL OF A NAFION-BASED IONIC POLYMER METAL COMPOSITE ACTUATOR, Proceedings of the KSEEE-JSAEM 2012 International Engineering Conference, Nairobi, Kenya, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ics.human.gifu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岐阜大学・工学部・教授

佐々木実 (SASAKI, Minoru)

研究者番号：20183379

(6) 研究分担者

岐阜大学・工学部・准教授

玉川浩久 (TAMAGAWA, Hirohisa)

研究者番号 60324282

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：