

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2007 ～ 2009
 課題番号： 19760169
 研究課題名(和文) 高分子人工筋肉アクチュエータの分布定数系モデリングと生物模倣型制御に関する研究
 研究課題名(英文) Distributed Parameter Systems Modeling and Bio-Mimetic Control of Artificial Muscle Polymer Actuators
 研究代表者
 高木 賢太郎 (TAKAGI KENTARO)
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号： 60392007

研究成果の概要 (和文)：

筋肉のように柔軟なイオン導電性高分子 (IPMC) アクチュエータについて、数理モデルを導き、シミュレーション、実験により確認を行った。得られたモデルを用いたシミュレーションでは、一定電場でも応力が緩和する特性や、インピーダンスの分布的な周波数特性を再現できた。またモデルは線形状態方程式で表現され、シミュレーションや解析が容易である。今後提案した数理モデルを利用し、アクチュエータの解析や統合設計への応用が期待される。

研究成果の概要 (英文)：

The mathematical models of ionic polymer-metal composites (IPMCs) which are ones of muscle-like soft actuators have been derived. The models were validated by both simulations and experiments. In the developed simulations, the stress relaxation phenomenon and the distributed frequency response of the impedance can be simulated. The models, which are represented by linear state space equations, are relatively easy to carry out simulations or analyses. In future, the applications toward analyses and syntheses of actuators are expected utilizing the proposed model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	510,000	3,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 知能機械学・機械システム

キーワード：イオン導電性高分子, Ionic Polymer Metal Composite, 高分子アクチュエータ, モデル化, 分布定数系, 電場応力拡散結合

1. 研究開始当初の背景
 電場応答性高分子とは、電気刺激に反応して

変形する高分子材料の総称であり、近年注目を集めつつある材料のひとつである。電場応

答性高分子は、特に環境に柔軟に適応できるソフトロボットやマイクロロボットのための人工的な筋肉様のアクチュエータとして、また、パワーアシストスーツ等のアクチュエータとしても有望だと考えられる。とくに、イオン導電性高分子は、柔軟・軽量であり数[V]の電圧を加えると水中もしくは湿潤した状態で屈曲運動する。国内では、イオン導電性高分子・貴金属複合体や導電性高分子材料が世界に先駆けて開発され、材料研究開発の分野では世界的に見ても進んでいると言えるが、近年では国内に比べ国外で盛んに研究が進められている。

研究代表者は、これまでにイオン導電性高分子・貴金属複合体(Ionic Polymer-Metal Composite, IPMC)アクチュエータを用いて有限回転型アクチュエータを開発し、その特性について調査をしてきた。このアクチュエータの機械的特性については、線形システムで近似できる応答が計測されたが、電気的特性、電気機械変換特性については、単純な低次元の線形時不変システムとしては考えにくい応答が計測された。電気的特性、すなわち電気インピーダンスのボード線図のゲイン・位相特性がおよそ $-10[\text{dB/dec}] \cdot -45[\text{deg}]$ ということから、分布定数系の特徴が現れている可能性がある。このことから、IPMCの電気的特性は偏微分方程式で表現されるシステムであろうと予想される。また、電気機械変換特性について、一定電場を加え続けても、応力が緩和してしまう現象が知られている。これらの特性は、従来の電磁モータや静電アクチュエータ等にはない、イオン導電性高分子の電気化学物理に特有な現象と考えられ、その物理原理の解明はもちろんのこと、工学的応用に必要とされる、数理モデル化が待たれている。

2. 研究の目的

イオン導電性高分子・貴金属複合体(IPMC)アクチュエータについて、モデリングと制御という観点から研究を行う。

イオン導電性高分子の電気刺激に対する応答の物理は複雑で、いくつかのモデルが研究されている。制御工学の観点からアクチュエータを解析・設計対象としてみると、ホワイトボックスモデルの本質を含んだ、より単純なモデル(低次元化モデル)が必要である。すなわち、物理パラメータを陽に含み、かつ制御目的に必要な十分なモデルを求めることが望まれる。特に本研究は、従来ほとんど検討されて来なかった分布定数系としての枠組みから、機械的特性、電気的特性および電気機械変換特性のモデリングを目指すものである。集中定数ブラックボックスモデルに比べて、少数かつ物理的な意味のあるパラメータによってアクチュエータのモデルを特

徴付けられるという価値がある。また、未だ十分には解明されていないイオン導電性高分子アクチュエータの動作原理を明らかにしてゆくことも挑戦的課題である。

具体的には、物理原理に基づき物理パラメータを陽に含んだ分布定数系モデルの確立を目指す。モデルの妥当性は、計算機シミュレーションと、IPMCアクチュエータを実際に製作してそれを用いた実験との比較により確認する。

さらに、生体の骨格筋をアクチュエータとして捉え比較対象とする場合、高分子アクチュエータとは類似点や相違点があるはずである。そこで、高分子アクチュエータのモデルをもとに、アクチュエータの変形、もしくは力を制御し、骨格筋のようなインピーダンス調整可能なアクチュエータを制御によって実現することを目指し、モデルを用いた力制御についても検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 分布系モデリング

まず、電気系の応答、すなわちインピーダンスを導出する。周波数応答の特徴を再現できる、電極構造を考慮したモデリングを検討する。

続いて、速い初期屈曲応答のモデル(Asaka et al., 2000)と、屈曲応答の緩和過程モデル(Yamaue et al., 2005)を統合し、速い屈曲と遅い緩和過程を含んだ電気機械変換のモデルを導出する。

そして、得られた電気系、電気機械変換系、機械系のモデルを統合して、MATLABによるシミュレータを作製する。電圧入力に対するアクチュエータの応答のシミュレーションを行う。さらに実験を行い、シミュレーション結果と比較することによりモデルの妥当性を検証する。

また予備実験の結果、電気系、電気機械変換系の非線形性についても無視できないことがわかってきた。そのため、線形分布系としてのモデル化に加え、実験による非線形性の特徴づけも行う。

(2) モデルに基づく力制御

次に、生物模倣(バイオミメティクス)型の制御の可能性を検討する。これは、骨格筋の機械インピーダンス可変特性と同様の効果を得るための、IPMCアクチュエータのもつ固有のコンプライアンスや、応力緩和現象、イオンドーピング効果といった特徴を活用した制御則を構築することである。特に、IPMCアクチュエータの緩和現象を考慮に入れたロバストな位置制御、力制御を目指す。

4. 研究成果

イオン導電性高分子アクチュエータの分布

系モデリングという新しい観点から、モデル化を行い、シミュレーションからその妥当性を検討した。また、モデルを用いた生物模倣制御に向けた力制御を試みた。

今後の展開として、このような詳細なモデル化を進めることにより、今後アクチュエータの動作原理の理解と、より高精度なシミュレーションや、モデルベースの制御系設計が可能になると期待される。

以下に詳細をまとめる。

(1) 分布系モデリング

①電気特性およびセンサ機能のモデル化

電気特性すなわち電気インピーダンスの原理を明らかにするため、その分布系モデリングを行った。インピーダンスの周波数応答は、位相が -45 度付近にあり、低次の伝達関数(微分方程式)では記述できないため、モデルが偏微分方程式で表されることが予想される。そこで、ポリマー界面にフラクタル様に存在する電極をモデル化した。これを一般化すると伝送路と同様の分布回路モデルが得られ、得られた偏微分方程式を解析のために離散化した。混合型有限要素法に基づく分布ハミルトン系離散化により、集中定数のRCラダー回路として表現し、低次元化した回路の素子値を決定した。さらに、ある理想的な条件において、離散近似モデルの極限が連続系モデルに一致することを示した。これは、解析が困難な分布系モデルを離散近似する際のよい方法を与え、今後シミュレーションや設計への展望が開けた。

ところで、イオン導電性高分子はセンサとしての機能ももつため、そのセンサ応答機構のモデリングについても検討を行った。電流発生をシンプルなモデルで説明することができ、また電圧応答が電気インピーダンスに直接関連付けられることが明らかになった。さらに実験によりイオン種による周波数応答の違いを調べ、センサの基礎的なモデルを実験的に検討した。センサのモデルにおいて電気インピーダンスとの関連が明らかになったため、電気インピーダンスのモデルの応用としても今後期待される。

②電気機械変換特性のモデル化と統合シミュレーション

高分子物理の分野で提案されている電場応力拡散結合理論に基づき、イオン導電性高分子アクチュエータの応力緩和挙動を含んだ線形システムモデルを構築した。モデルは物理パラメータを含んだ線形状態方程式で表現されており、例えばサイズや材料定数、イオン種などを変えたときのアクチュエータの応答をシミュレーションによって再現できる。現状では定電圧下で顕著となる界面応力の効果は考慮されていないが、応力緩和挙動は実験とよく一致し、イオン半径が小さな

ナトリウムイオンとイオン半径の大きなTEAイオンとの緩和応答挙動の違いを再現できることをシミュレーションと実験により確認した。また、境界条件を評価することにより、アクチュエータの機械的な変形量が電気機械変換系にフィードバックされ影響を受けることを明らかにした。これは、入出力データだけからモデルを構築するブラックボックスモデリングからは導出されない結果であり、新しい知見といえる。

また、機械特性を、線形のオイラーベルヌイ梁モデルをモード展開することによって有限次元の状態方程式で表した。そして、状態方程式で表された電気機械変換特性と結合することで統一モデルとしてシミュレーションを行った。図1にMATLABソフトウェアを用いて作製したシミュレータの画面出力の例を示す。

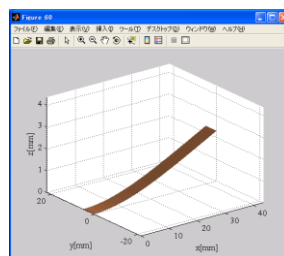


図1：シミュレータの出力例

③非線形特性の計測

本研究で考慮した物理はすべて線形性を仮定したものであった。しかしながら実験では、屈曲の大きさは電圧の大きさに比例せず、2次から3次に近い非線形性をもつ。実はこのことはあまりよく知られていない。そこで、その特性を明らかにするため、非線形特性の調査を行った。この結果は、今後の動作原理の解明へ役立つ可能性がある。

(2) モデルに基づく力制御

ところで、生物の骨格筋は筋活動度が高くなるにつれ機械的インピーダンスが大きくなることが知られており、アクチュエータを力制御する際にも同様の特性を持たせられると望ましい。そのため、これまでに導出されたモデルを近似したものを利用し、IPMCの力制御への応用を行った。とくにPID制御器を用いた場合、提案するモデルを用いると、極配置を用いて容易かつロバストな制御系を設計できることを実験から確認できた。今後、アクチュエータの柔軟性を活かして位置制御や力制御の設計に応用することが期待される。

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 15 件)

- ① S. Sano, K. Takagi, S. Sato, S. Hirayama, N. Uchiyama, K. Asaka, Robust PID force control of IPMC actuators, Proceeding of SPIE, Vol. 7642, 76421U, (2010), 査読なし
- ② 佐野滋則, 高木賢太郎, 森和紀, 内山直樹, 高木章二, IPMC によるセルフセンシングアクチュエータ開発のための基礎実験, SICE SI 部門講演会 講演論文集, (2009), 査読なし
- ③ K. Takagi, T. Osada, K. Asaka, State Space Modeling and Simulation of Ionic Polymer Actuators, 4th Conference on Artificial Muscles and the 5th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio, pp. 25-28, (2009), 査読なし
- ④ 椎葉賢一郎, 高木賢太郎, 安積欣志, IPMC アクチュエータの非線形な入出力特性の実験的検証, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2009), 査読なし
- ⑤ K. Takagi, I. Jikuya, G. Nishida, B. Maschke, K. Asaka, A Study on the Discretization of a Distributed RC Circuit Model, Proceedings of ICCAS-SICE 2009, pp. 677-680, (2009), 査読あり
- ⑥ 佐藤侑, 佐野滋則, 高木賢太郎, 内山直樹, 高木章二, IPMC アクチュエータを用いたロバストな力制御, 日本機械学会東海支部第 58 期講演会論文集, pp. 203-204, (2009), 査読なし
- ⑦ K. Takagi, T. Osada, K. Asaka, Y. Hayakawa, Z. W. Luo, Distributed parameter system modeling of IPMC actuators with the electro-stress diffusion coupling theory, Proc. SPIE, Vol. 7287, 72871Q, (2009), 査読なし
- ⑧ K. Takagi, B. Maschke, G. Nishida, K. Asaka, A Numerical Study on the Hamiltonian Discretization of the Transmission Line: Toward the Modeling for the Fractal-Like Rough Electrodes of Ionic Polymer Actuators, 第 9 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 293-294, (2008), 査読なし
- ⑨ T. Osada, K. Takagi, Y. Hayakawa, Z. W. Luo, K. Asaka, State Space Modeling of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators based on Electrostress Diffusion Coupling Theory, Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 119-124 (2008), 査読あり
- ⑩ G. Nishida, K. Takagi, B. Maschke, Z. W. Luo, Multi-Scale Distributed Port-Hamiltonian Representation of Ionic Polymer-Metal Composite, Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (IFAC), pp. 2300-2305, (2008), 査読あり
- ⑪ K. Takagi, K. Asaka, G. Nishida, Y. Nakabo, Z. W. Luo, Distributed Impedance Model of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators, The 3rd International Conference Smart Materials, Structures and Systems (CIMTEC2008): Advances in Science and Technology, Vol. 61, pp. 157-162, (2008), 査読なし
- ⑫ K. Takagi, N. Kamamichi, et al., Frequency response characteristics of IPMC sensors with current/voltage measurements, Proc. SPIE, Vol. 6927, 692724, (2008), 査読なし
- ⑬ 高木 賢太郎, 長田 高明, ほか 2 名, 応力緩和現象を考慮した IPMC アクチュエータの線形分布定数モデル, 第 8 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 225-226, (2007), 査読なし
- ⑭ 長田 高明, 高木 賢太郎, ほか 2 名, IPMC アクチュエータの応力緩和現象を考慮した状態空間モデル, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 論文集, 633, (2007), 査読なし
- ⑮ 高木 賢太郎, 釜道 紀浩, ほか 4 名, IPMC センサの周波数応答特性 II: モデルによる検討, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2007), 査読なし

〔学会発表〕 (計 15 件)

- ① S. Sano, K. Takagi, S. Sato, S. Hirayama, N. Uchiyama, K. Asaka, Robust PID force

- control of IPMC actuators, SPIE Smart Structures and Materials, 2010 年 3 月 10 日, Town and Country Convention Center (San Diego, USA)
- ② 佐野滋則, 高木賢太郎, 森和紀, 内山直樹, 高木章二, IPMC によるセルフセンシングアクチュエータ開発のための基礎実験, SICE SI 部門講演会, 2009 年 12 月 24 日, 芝浦工業大学 (東京)
- ③ K. Takagi, T. Osada, K. Asaka, State Space Modeling and Simulation of Ionic Polymer Actuators, 4th Conference on Artificial Muscles and the 5th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio, 2009 年 11 月 25 日, 千里ライフサイエンスセンター (大阪)
- ④ 椎葉賢一郎, 高木賢太郎, 安積欣志, IPMC アクチュエータの非線形な入出力特性の実験的検証, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 16 日, 横浜国立大 (横浜)
- ⑤ K. Takagi, I. Jikuya, G. Nishida, B. Maschke, K. Asaka, A Study on the Discretization of a Distributed RC Circuit Model, ICCAS-SICE 2009, 2009 年 8 月 18 日, 福岡国際会議場 (福岡)
- ⑥ 佐藤侑, 佐野滋則, 高木賢太郎, 内山直樹, 高木章二, IPMC アクチュエータを用いたロバストな力制御, 日本機械学会東海支部第 58 期講演会, 2009 年 3 月 18 日, 岐阜大学
- ⑦ K. Takagi, T. Osada, K. Asaka, Y. Hayakawa, Z. W. Luo, Distributed parameter system modeling of IPMC actuators with the electro-stress diffusion coupling theory, SPIE Smart Structures and Materials/NDE, 2009 年 3 月 12 日, San Diego (USA)
- ⑧ K. Takagi, B. Maschke, G. Nishida, K. Asaka, A Numerical Study on the Hamiltonian Discretization of the Transmission Line: Toward the Modeling for the Fractal-Like Rough Electrodes of Ionic Polymer Actuators, 第 9 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 2008 年 12 月 5 日, 長良川国際会議場
- ⑨ T. Osada, K. Takagi, Y. Hayakawa, Z. W. Luo, K. Asaka, State Space Modeling of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators based on Electrostress Diffusion Coupling Theory, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2008 年 9 月 23 日, Nice (France)
- ⑩ G. Nishida, K. Takagi, B. Maschke, Z. W. Luo, Multi-Scale Distributed Port-Hamiltonian Representation of Ionic Polymer-Metal Composite, The 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (IFAC), 2008 年 7 月 6 日-11 日, Seoul (Korea)
- ⑪ K. Takagi, K. Asaka, G. Nishida, Y. Nakabo, Z. W. Luo, Distributed Impedance Model of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators, The 3rd International Conference Smart Materials, Structures and Systems (CIMTEC2008), 2008 年 6 月 12 日, Acireale (Italy)
- ⑫ K. Takagi, N. Kamamichi, et al., Frequency response characteristics of IPMC sensors with current/voltage measurements, SPIE Smart Structures and Materials/NDE, 2008 年 3 月 11 日, San Diego Convention Ctr. USA
- ⑬ 高木 賢太郎, 長田 高明, ほか 2 名, 応力緩和現象を考慮した IPMC アクチュエータの線形分布定数モデル, 第 8 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 2007 年 12 月 20 日, 広島国際大学
- ⑭ 長田 高明, 高木 賢太郎, ほか 2 名, IPMC アクチュエータの応力緩和現象を考慮した状態空間モデル, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 2007 年 9 月 28 日, 広島大学
- ⑮ 高木 賢太郎, 釜道 紀浩, ほか 4 名, IPMC センサの周波数応答特性 II: モデルによる検討, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 15 日, 千葉工業大学

〔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：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 賢太郎 (TAKAGI KENTARO)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60392007