

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560249

研究課題名(和文) ソフトアクチュエータを用いた可変焦点レンズの開発

研究課題名(英文) Development of Variable Focal Length Lens using Soft Actuator

研究代表者

土谷 茂樹 (TSUCHITANI SHIGEKI)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：30283956

研究成果の概要：

ソフトアクチュエータの一種であるイオン導電性高分子アクチュエータ (IPMC) が柔軟性とアクチュエータ機能を兼ね備えることに着目し、IPMC を用い小型、柔軟で低電圧 (数V 以下) 動作可能な可変焦点レンズを開発することを目的とした。透明で柔軟な容器に液体を封入し、IPMC の加圧力でその形状を変化させ、焦点距離の変化を得る「液体レンズ」式の可変焦点レンズを試作した。容器をイオン導電性高分子で形成し、その一部にアクチュエータ機能を付与することで小型化を図るため、同高分子膜の一部に駆動電極を形成して IPMC 化するため「パターン電極形成技術」を開発した。電極のパターン精度は約 $10^2 \mu\text{m}$ であった。可変焦点レンズを始め様々な用途への応用が可能な空気中動作可能な IPMC の実現を目指し、イオン液体を溶媒とする IPMC を作製し、空気中での長時間 (180 分) の安定動作を確認した。イオン液体を溶媒とする IPMC では屈曲は対イオンの移動に支配され、その動作をモデル化するには IPMC の等価回路決定がポイントであることが分かった。IPMC の交流インピーダンス測定及び IPMC を流れる電流のステップ電圧応答から、約 0.1Hz 以上の周波数では、IPMC の等価回路は膜抵抗と電気二重層容量の直列回路と膜容量との並列回路で表されることが分かった。イオン液体を溶媒とする IPMC は空気中動作が可能であるが、その動作が周囲の湿度の影響を受けた。上記等価回路における膜抵抗 R は湿度増加に対し指数関数的に減少し、電気二重層容量 C は湿度と共に増加すること、またステップ電圧印加時の変位及び電流の応答の時定数 $\tau = RC$ は湿度と共に減少することが分かった。PDMS (Polydimethylsiloxane) の成型により、上部に薄膜状 (設計値 $50 \mu\text{m}$ 厚) の腫 (直径 6mm) を持つ円筒状の容器 ($20 \times 18\text{mm}$) を作製し、その内部に液体 (水) を封入して外部から IPMC で加圧することで腫部の PDMS 膜を撓ませ焦点距離を変化させる構造の可変焦点レンズを試作した。IPMC の動作により腫の中心で $73 \mu\text{m}$ の変位を得た。片面に厚み $100 \mu\text{m}$ の PDMS 膜をスピンコートしたシリコン基板を裏面からエッチングにより円形貫通孔 (直径 4mm) を形成して腫部を作製し、これと樹脂 (アクリル) 製の透明容器とを接着して密閉容器を作製し、内部に液体 (水) を封入した。シリコン基板を上部から IPMC で加圧して腫部の PDMS 膜に水压を印加してレンズ状に変形させるタイプの可変焦点レンズを作製し、IPMC の動作により腫中心で $20 \mu\text{m}$ の変位が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	600,000	4,000,000

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：可変焦点レンズ、液体レンズ、アクチュエータ、ソフトアクチュエータ、イオン導電性高分子金属接合体

1. 研究開始当初の背景

- (1) 携帯電話の自動焦点機構や人工水晶体などに応用可能な小型・低電圧駆動の可変焦点レンズに対する要求が強い。
- (2) イオン導電性高分子アクチュエータ (IPMC) は、イオン交換膜などイオン導電性高分子膜の両面に一對の電極を設けた構造を有し、電極間に2~3Vの電圧を印加するだけで人間の筋肉のような柔軟な動き (屈曲運動) が可能であり、人工筋肉と呼ばれ近年様々な分野への応用が期待されている。

2. 研究の目的

IPMC が柔軟性とアクチュエータ機能を兼ね備えることに着目し、低電圧 (数V以下) で人間の目の水晶体に近い動作が可能な小型で柔軟性を有する可変焦点レンズを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 光学的に透明で変形可能な容器に液体を封入し、アクチュエータ (IPMC) で加圧して容器の形状を変え焦点距離を変化させる方式 (液体レンズ) を開発する。
- (2) 上記容器を IPMC を構成するイオン交換膜 (Nafion®) で形成し、その一部にアクチュエータ機能を付与 (IPMC を形成) することで小型化が図れる。そこで、Nafion®膜の一部に駆動電極を形成してその部分を IPMC 化するため、イオン交換膜への「パターン電極形成技術」を確立する。
- (3) IPMC の小さな力でも変形容易な液体レンズ容器を実現するため、柔軟で可視光の透過率が高く、高い寸法精度で成型容易な PDMS (Polydimethylsiloxane: シリコン樹脂の一種) を成型して液体封入のための容器を作製する。
- (4) 容器の小型化及び寸法精度の向上を図るため、シリコン基板の微細加工技術を活用する。
- (5) 従来の IPMC は原理上含水状態で駆動し、乾燥状態では動作しない。可変焦点レンズ設計の自由度を上げるため、空気中でも駆動可能な IPMC を開発する。

4. 研究成果

- (1) イオン導電性高分子膜の一種である Nafion®膜上にフォトリソグラフィや感光性樹脂フィルムの露光・現像によってパターンを形成した後、金の無電解めっきを

行うことにより、Nafion®膜上に約 10 μ m のパターン精度で金の微小パターン電極を形成できた。これにより、単純な屈曲運動のみでなくより複雑な動作が可能な微小 IPMC を実現できる。(従来は、レーザーによる電極加工が中心であったため、十分なパターン精度が得られなかった)

- (2) 従来の金属イオンを対イオンとする IPMC は含水状態で駆動し空気中では水が蒸発して動作不可能となるため、用途が限定された。本研究で作製する可変焦点レンズを始め様々な用途への応用が可能な空気中で動作が可能な IPMC の実現を目指してイオン液体 (EMIBF₄, BMIBF₄, BMIPF₆) を溶媒とする3種類の IPMC を作製し、空気中での長時間 (180分) の安定動作が確認できた (屈曲曲率半径の変化は 10%程度)。屈曲変位の大きさは、BMIPF₆ > EMIBF₄ > BMIBF₄ の順に大きかった。3種類のイオン液体を溶媒とする IPMC について、屈曲曲率半径に対する印加電圧 (矩形波) の周波数依存性 (0.05~5Hz) を評価したところ、屈曲曲率半径は印加電圧の周波数と共に減少し、0.05Hz では最大 9m⁻¹、1Hz では最大 2m⁻¹であった。
- (3) 上記3種類のイオン液体を溶媒とする IPMC について、ステップ電圧印加に対する屈曲曲率半径の応答特性及び IPMC を流れる電流の応答特性、さらに IPMC の交流インピーダンスの周波数依存性 (5~13MHz) を評価した。ステップ電圧印加時の屈曲変位は IPMC を流れる電流に比例することから、イオン液体を溶媒とする IPMC の屈曲は IPMC 内部のイオン移動に支配されることが分かった。そのため、IPMC の屈曲をモデル化するには、IPMC の等価回路に関する考察がポイントとなる。そこで、IPMC の交流インピーダンスを複素平面上にプロット (Cole-cole plot) し、その軌跡から IPMC の等価回路を推定したところ、周波数 5~13MHz では抵抗 (イオン伝導に基づく Nafion の膜抵抗) と容量 (金電極間の膜容量) の並列回路で表されることが分かった。一方、ステップ電圧印加後の数秒間に IPMC を流れる電流は、抵抗 (イオン伝導に基づく Nafion の膜抵抗) と容量 (電極 Nafion 界面の電気二重層容

量)の直列回路で説明できることが分かった。以上より、約0.1Hz以上の周波数領域では、IPMCの等価回路は膜抵抗と電気二重層容量の直列回路と膜容量との並列回路で表されると考えられる。

- (4) イオン液体を溶媒とするIPMCは空気中での動作が可能であるものの、その屈曲変位や流れる電流は周囲の湿度の影響を受けることが分かった。湿度の増加に対し、上記(3)で述べたイオン伝導に基づくNafionの膜抵抗 R_m は指数関数的に減少し、電気二重層容量 C_{dl} は湿度と共に増加することが分かった。これにより、ステップ電圧印加時の変位及び電流の応答の時定数 $t=R_m C_{dl}$ は湿度と共に減少し、応答速度が増した。
- (5) PDMSの成型により、上部に薄膜状(設計値50 μ m厚)の腫(直径6mm)を持つ円筒状の容器(20 \times 18mm)を作製し、これとガラス板とを接着して密閉容器を作って内部に液体(水)を封入した。円筒の周囲からIPMCで加圧することで腫部のPDMS膜をたわませ焦点距離を変化させる構造の可変焦点レンズを試作した。IPMCを動作させ、腫の中心部で73 μ mの変位が得られた。
- (6) 一方の面に厚み100 μ mのPDMS膜をスピンコートしたシリコン基板を裏面からエッチングして円形の貫通孔(直径4mm)を形成し、腫部を作製した。これと樹脂(アクリル)で作製した透明容器とを接着して密閉容器を作製し、内部に液体(水)を封入した。シリコン基板を上部からIPMCで加圧することにより腫部のPDMS膜に水圧を印加してレンズ状に変形させ焦点距離を変化させるタイプの可変焦点レンズを作製した。IPMCを動作させ、腫中心で20 μ mの変位が得られた。
- (7) (5)、(6)で述べたように、PDMSの成型で液体レンズ容器を作製したが、焦点距離の変化をさらに拡大するため、IPMCの発生力向上及びPDMSの成型精度の向上による腫部の膜厚低減が必要である。

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 3件)

- (1) K. Kikuchi, S. Tsuchitani, M. Miwa, and K. Asaka, Formation of Patterned Electrode in Ionic Polymer-Metal Composite using Dry Film Photoresist, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 3 (2008) pp.452-454.
- (2) 菊地邦友, 土谷茂樹, 三輪昌史, 安積欣

志, フォトリソグラフィ技術を用いた固体高分子電解質膜へのパターン電極形成, 査読有, 精密工学会誌, 74 巻 (2008) pp.719-723.

- (3) K. Kikuchi, M. Miwa, S. Tsuchitani, Operation Characteristics of Ionic Polymer-Metal Composite using Ionic Liquids, 査読有, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1134 (2008) 1134-BB03-06.

〔学会発表〕(計 11件)

- (1) 清水一平, 菊地邦友, 土谷茂樹, イオン導電性高分子金属接合体を用いた可変焦点レンズの開発, 日本機械学会関西学生員卒業研究発表講演会, 2009年3月, 大阪.
- (2) K. Kikuchi, M. Miwa and S. Tsuchitani, Operation Characteristics of Ionic Polymer-Metal Composite using Ionic Liquids, MRS Fall Meeting 2008, Dec. 3, 2008, Boston, USA.
- (3) T. Yokota, K. Kikuchi and S. Tsuchitani, Evaluation of Environmental Humidity on Displacement Characteristics of Ionic Polymer Actuator using Ionic Liquid, SICE Annual Conference 2008, Aug. 20, 2008, Tokyo, Japan.
- (4) K. Kikuchi, M. Miwa, and S. Tsuchitani, Evaluation of Basic Operating Characteristics of Ion Conductive Polymer Actuator using Ionic Liquid, SICE Annual Conference 2008, Aug. 20, 2008, Tokyo, Japan.
- (5) 芳村広幸, 菊地邦友, 土谷茂樹, イオン導電性高分子金属接合体を用いた可変焦点レンズの開発, 日本機械学会関西支部第83期定時総会講演会, 2008年3月, 大阪.
- (6) 横田武志, 菊地邦友, 土谷茂樹, イオン液体を溶媒とする高分子アクチュエータの動作特性 - 湿度変化の動作への影響 -, 日本機械学会関西支部第83期定時総会講演会, 2008年3月, 大阪.
- (7) 西本公大, 菊地邦友, 土谷茂樹, イオン液体を溶媒とするイオン導電性高分子アクチュエータの動作特性 - 基本特性 -, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2008年3月, 大阪.
- (8) 菊地邦友, 三輪昌史, 土谷茂樹, ドライフィルムレジストを用いたイオン導電性高分子金属接合体のパターン電極接合, 第8回計測自動制御学会(SICE)システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 2007年12月, 広島.
- (9) K. Kikuchi, M. Miwa and S. Tsuchitani, Variable-Focal Length Lens using a Soft Actuator, Int. Conf. Advanced Technology in

Experimental Mechanics 2007 (ATEM'2007),
Sep. 13, 2007, Fukuoka, Japan.

- (10) H. Yoshimura, K. Kikuchi, A. Yamaguchi, M. Miwa, and S. Tsuchitani, Evaluation of Displacement Characteristics and Generation Force of IPMCs with Various Counter Ions, Int. Conf. Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007 (ATEM'2007), Sep. 12, 2007, Fukuoka, Japan.
- (11) K. Kikuchi, M. Miwa and S. Tsuchitani, Development of Formation Method of Patterned Electrodes in Ionic Polymer Metal Composite, Int. Conf. Machine Design and Tribology (ICMDT 2007), July 2, 2007, Sapporo, Japan.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土谷 茂樹

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：30283956

(2) 研究分担者

三輪 昌史

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・講師

研究者番号：40283957

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

安積 欣志

独立行政法人産業技術総合研究所関西センター・セルエンジニアリング研究部門・

人工細胞研究グループ長

菊地 邦友

和歌山大学大学院・システム工学研究科・
博士後期課程2年(現在3年)