

第23章 高分子アクチュエータのソフトロボットへの応用

向井利春*

1 これからのロボットに求められる柔らかさ

近年、ペットロボットや二足歩行ロボットなどが発表され、人間の傍で活躍する人間共存ロボットへの期待が高まっているが、そのようなロボットでは安全性や人間との親和性などのために柔らかさを実現することが求められる。しかし、現在のロボットの多くがアクチュエータとして採用している電磁モータではこれは難しい。写真1は我々が開発した人間共存ロボットのアクチュエータブロックであるが、モータ、減速器、関節角センサ（エンコーダやポテンショメータなど）で構成されている。他のロボットも多くが同様のアクチュエータ構造を持つ。減速器はギヤの組み合わせでモータの高速低トルク回転を低速高トルク回転に変換するが、減速比を大きくした場合、ギヤの摩擦が原因となり関節軸で受けた力がモータ軸まで伝わらない構造となることが多い。その結果、外からリンクに力を加えても関節軸が動かない「硬い」ロボットとなる。これに対し、人間などの筋肉を持つ動物は、必要なときには力を入れて関節を硬くする一方、力が不用なときには筋肉の緊張を解くことで柔らかさを実現している。関節の柔らかさは安全性に加え

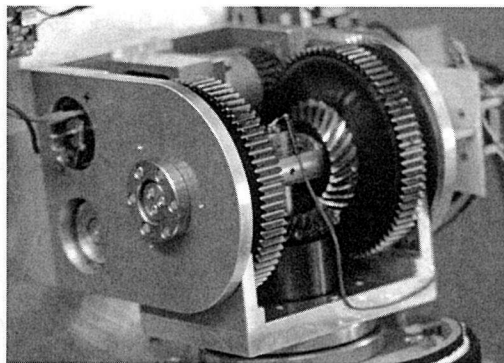


写真1 モータ、減速器、関節角センサの組み合わせで構成されるアクチュエータブロック

* Toshiharu Mukai (独理化学研究所) ロボット感覚情報研究チーム チームリーダー

て、投球時の腕の鞭のような動きなどの体のダイナミクスを有効に使った動作でも重要である。

電磁モータを使ったロボットで柔らかさを実現するには、減速器を介さずにモータから直接関節を動かすダイレクトドライブという方法があるが、大きく重いモータが必要となる。また、力センサや触覚センサでリンクに加わった力を計測し、フィードバックをかけて制御で柔らかさを実現する方法（インピーダンス制御）もあるが、センサの反応領域、感度、応答速度の不足や、センサや制御に障害が起こったときに柔らかさが失われるという問題がある。

そのため人間共存ロボットには、本質的に柔らかく、また、必要なときには硬さを増して大出力が可能なアクチュエータが求められている。残念ながら現在はこの両方を満たすものは存在しないが、ロボティクスからの高分子アクチュエータへの最大の期待はこの点にある。

2 表面電極分割によるIPMCの多自由度化

我々は本質的な「柔らかさ」を実現できるアクチュエータとしてIPMC (Ionic Polymer-Metal Composite)^{1, 2)} に注目し、これを用いたソフトロボットの研究を行っている。IPMCはフッ素系イオン交換樹脂膜の両面に金などの貴金属をメッキした接合体で、電圧をかけるとこれに応じて屈曲する。高速応答、低電圧で動作、水中駆動が可能などの特徴があり、柔軟性と高い耐久性を持つ。また、逆に屈曲により電圧を生じるセンサとしての機能も有する。

IPMCの屈曲の原理を図1に示す。電圧をかけると樹脂膜内のイオンが移動し粗密ができる結果、膜の片側が膨張、逆側が収縮するので、膜が短冊のように細長い形状を持つ場合全体として屈曲する。IPMCを用いることで柔らかさを持つ新たなロボット製作につながると期待されている。我々は表面の電極を分割することによりIPMCに多自由度を与える方法を開発し、これを用

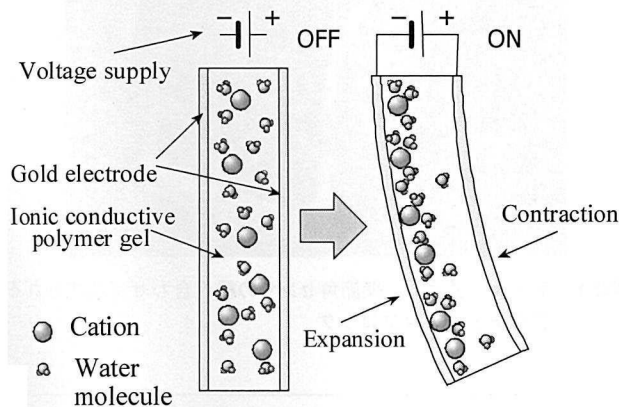


図1 IPMCアクチュエータの屈曲原理

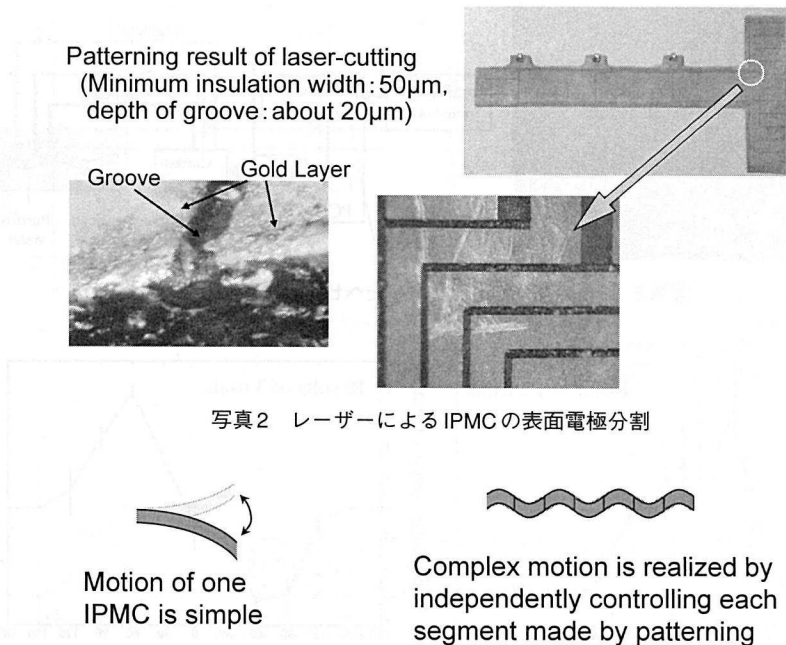


図2 表面電極分割によるIPMCアクチュエータの多自由度化

いることによるロボット応用の可能性を研究してきた。

1枚のIPMCの表面電極を分割した例を写真2に示す。この例ではレーザーを用いて分割を行ったが、NC工作機械を用いたり、場合によってはカッターナイフで物理的に電極分割を行ったことも可能である。電極は屈曲領域になるとともに、根元に加えられた電圧を末端まで伝達する電線の役目も果たす。もとのIPMCは電圧に応じて全体が屈曲するので1自由度であるが、電極分割により部分ごとに異なる屈曲を実現する多自由度化が可能となる(図2)ので、1枚のIPMCからロボットが製作できる。IPMC自体をロボットとすることで、関節だけではなく体全体が柔軟なロボットが製作可能となる。

3 ソフトなヘビ型水中ロボット

1枚のIPMCから製作した多自由度を持つロボットの例として、ヘビのように泳ぐ全身が柔軟なロボット^{3, 4)}(写真3)を紹介する。これは、細長いIPMCの表面電極を長さ方向に複数(6または7)領域に分割し、それぞれに位相差のある屈曲を与えることでヘビのようにくねる動きを与え、前身後退や回転を可能としたものである。

各領域に正弦波状の電圧を与えるが、周波数 f と各領域間の位相差 θ を変えることで、図3に

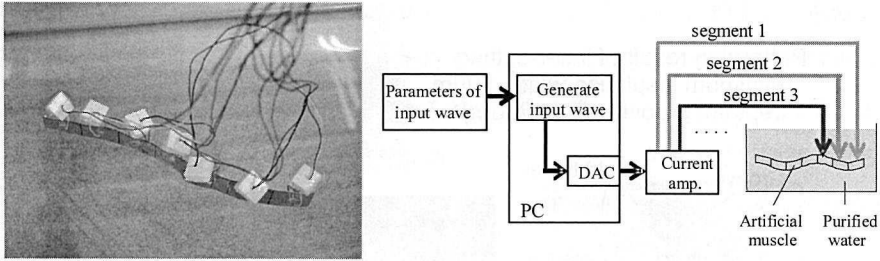


写真3 1枚のIPMCから製作したヘビ型水中ロボット

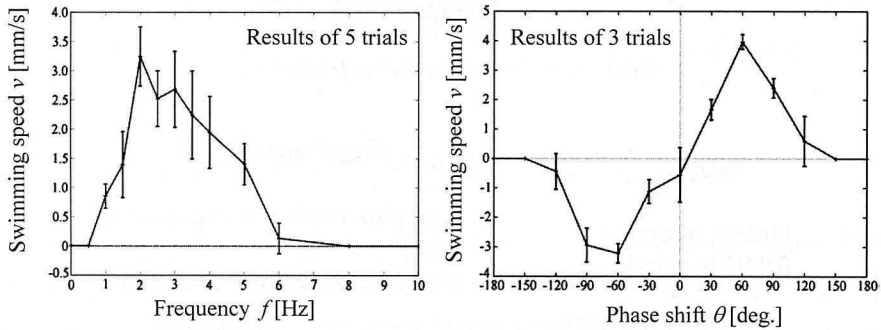


図3 ヘビ型ロボットの周波数 f と位相差 θ による進行速度制御

示すように前進後退と進行速度を制御できる。また、正弦波のように左右対称な動きではなく図4に示すように非対称な動きにすることで、左右の回転も可能となる。

写真3ではIPMCの各領域にはケーブルが接続されていて、外部から電力を供給している。最終的には、電源、コントロール回路ともヘビ型ロボットの頭部などに搭載し、独立して動くロボットにしたい。現在研究中のコントロール回路について述べる。図3より、位相差 θ は60度（6領域に分けた場合、全身で1波長となる位相差）が適していることがわかるので、駆動信号として三相交流を考えその正負の組み合わせを用いることで、電源回路の簡略化が可能である。簡略化した回路と電源（ボタン電池などの小型バッテリー）を頭部に搭載し、各部の制御を行わせることが目標である。電力の伝達は、表面電極を電線として用い、さらに表と裏の電極を接続して伝達可能とすることで、外部のケーブルなしに可能となる。図5に三相交流の信号を表面電極と表裏接続を通して伝達する場合の表面電極分割例を示す（ただし、簡略化して3領域で示してある）。

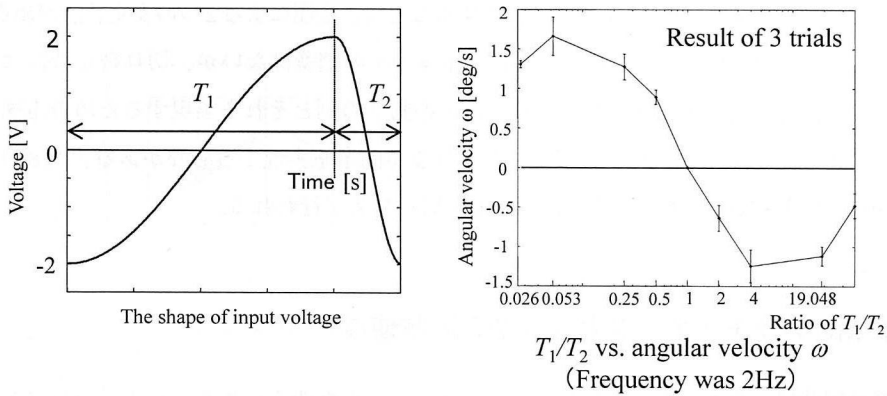


図4 非対称な入力による左右回転

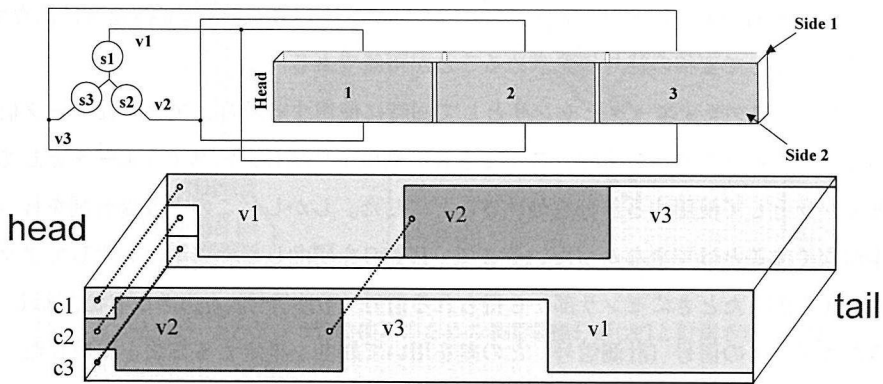


図5 表面電極分割と表裏接続により三相交流を外部ケーブルなしで伝達

4 双安定アクチュエータ構造

IPMCをアクチュエータとして使うときの問題点として、

- リラクゼーションが起こる
- 動きの再現性が低い
- 一定の形を保つのにエネルギーが必要

などがある。我々はこれらを解決してIPMCをアクチュエータとして使うために、多安定型のアクチュエータ構造を提案している⁵⁾。これは複数の安定点を持つアクチュエータ構造とすることで、

- 決められた構造で安定する
- 動きの再現性が得られる
- 安定構造を保つためにはエネルギー不要

などを実現するものである。図6に座屈により2つの安定点を持つ双安定アクチュエータ構造を

示す。両端間隔を IPMC の長さ l より短く拘束することで、座屈による 2 つの安定状態が出現する。

状態 1 または状態 2 を取っているときにはエネルギーの消費はないが、切り替え時にはアクチュエータを駆動する必要がある。図 7 に切り替えの動きの例とそれを実現するための電極分割を示す。このように、切り替え時には部分ごとに異なる曲率を実現する必要がある。図 8 のように 3 つの部分に正負を反転した電圧をかけることで切り替えが行われる。

5 IPMC アクチュエータとセンサの同時使用

IPMC は屈曲により電圧を生じるというセンサとしての機能も有する。我々はシンプルなロボットを IPMC により実現するために、1 枚の IPMC をアクチュエータとセンサとして同時に使用するための研究を行った⁶⁾。センサとしての IPMC から得られる信号は変移速度に依存するが、信号処理を行うことで変移の絶対値を求めることが可能である。

1 枚の IPMC をアクチュエータとセンサとして同時に使用する場合、アクチュエータ信号のセンサへの干渉が問題となる。そこで、ここでも表面電極を分割し、アクチュエータとして使用する部分とセンサとして使用する部分を分けることにした。しかし、このような分割を行っても干渉を完全になくすことはできなかった。そこで、IPMC を屈曲しないように固定してアクチュエータ部に電圧を加えたときにセンサ部から得られる信号 (干渉信号) をあらかじめ記録しておき、自由に変形するときの信号 (計測信号) との差を用いて屈曲を推定する方法を開発した。

分割の仕方を図 9 の左に、領域 1 と 2 で求めた計測信号 - 干渉信号と変移の関係を図 9 の右に示す。領域 1 と 2 で傾きに違いがあるし線形の関係からの多少の逸脱も見られるが、変移と差の

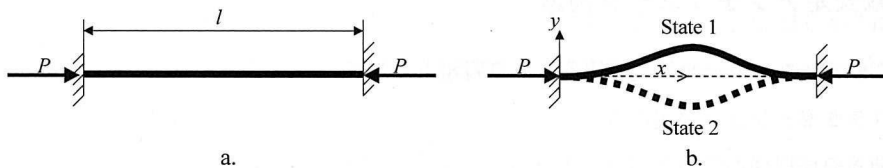


図 6 双安定アクチュエータの構造

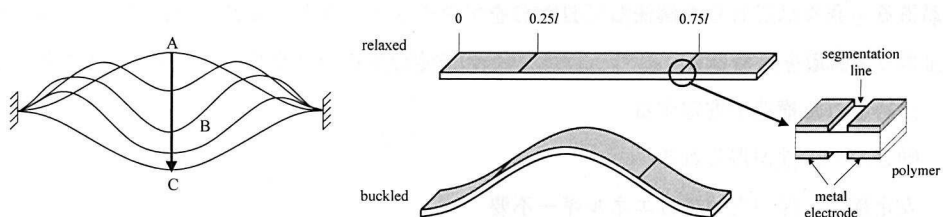


図 7 双安定アクチュエータの状態切り替え例(左)とそれを実現する表面電極分割(右)

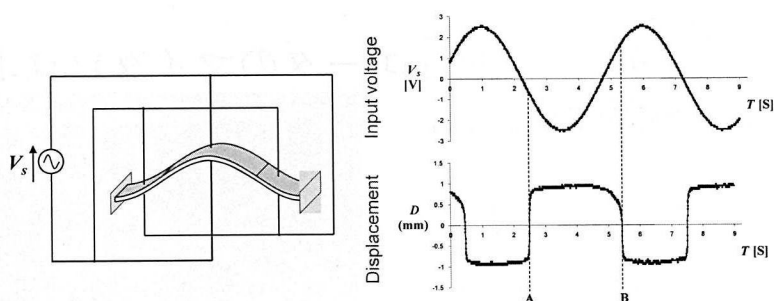


図8 状態切り替えのための接続(左)と実験結果(右)

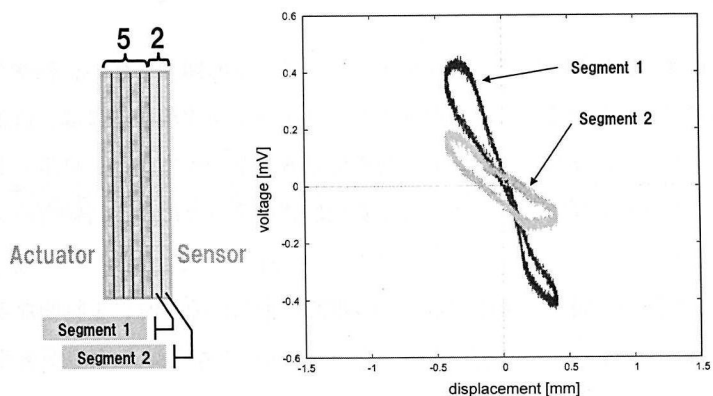


図9 アクチュエータとセンサ同時使用のための表面電極分割(左)と計測された信号(右)

信号が対応しているので、補正を行うことにより変移を求めることが可能となる。

文 献

- 1) 小黒啓介, 材料, **44** (500), pp.681-682 (1995)
- 2) K. Asaka and K. Oguro, *J. of Electroanalytical Chemistry*, **480**, pp.186-198 (2000)
- 3) 小川浩司ほか, 計測自動制御学会論文集, **42** (1), pp.80-89 (2006)
- 4) J. Rossiter *et al.*, Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.1215-1220 (2006)
- 5) J. Rossiter *et al.*, MHS2006 & Micro-Nano COE, pp.36-40 (2006)
- 6) 釜道紀浩ほか, 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.175-176 (2006)

未来を動かすソフトアクチュエータ

— 高分子・生体材料を中心とした研究開発 —

Soft Actuators which Drive Future Technologies

— Recent R & D Activities Focused on Polymers and Biomaterials —

監修：長田義仁，田口隆久

Supervisor : Yoshihito Osada, Takahisa Taguchi

シーエムシー出版

未来を動かすソフトアクチュエータ
—高分子・生体材料を中心とした研究開発—

2010年12月27日 第1刷発行

監修 長田義仁, 田口隆久 (T0768)
発行者 辻賢司
発行所 株式会社シーエムシー出版
東京都千代田区内神田1-13-1 (豊島屋ビル)
電話03(3293)2061
大阪市中央区南新町1-2-4 (椿本ビル)
電話06(4794)8234
<http://www.cmcbooks.co.jp/>

[印刷 倉敷印刷株式会社] © Y. Osada, T. Taguchi, 2010
定価はカバーに表示してあります。
落丁・乱丁本はお取替えいたします。

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写(コピー)することは、
法律で認められた場合を除き、著作者および出版社の権利の侵害
になります。

ISBN978-4-7813-0293-5 C3043 ¥65000E