

## 特集 ■アクチュエータ・テクノロジー ～ヒトとの親和性を目指して～

# 高分子アクチュエータの基礎と応用

## ～ ICPF アクチュエータを用いた触覚ディスプレイ～



昆陽雅司

KONYO MASASHI

東北大学

### 1. はじめに

「体感する」という言葉が示すように、触覚は対象物の存在感・現実感を確かめる上で重要な感覚である。ものに触れた際の皮膚感覚を呈示する触覚ディスプレイは、近年、国内外で多数の研究が行われている [1]。この触覚ディスプレイのキー技術であり、かつ最大のボトルネックはアクチュエータである。なぜなら、触覚ディスプレイでは、触覚の大面积かつ高密度をカバーする空間解像度、数 Hz から数百 Hz 以上のワイドレンジの時間応答性を満たし、かつ小型軽量で多自由度をもつアクチュエータが求められているからである。このためニューアクチュエータ分野の研究者が触覚ディスプレイに参入するケースが多いようである（筆者もその一人であった）。また、触覚ディスプレイはヒトの柔軟な皮膚を直接刺激するという点で、生体との親和性が求められる。

この点で特にアドバンテージがあるのが、導電性高分子ゲル (ICPF) アクチュエータや誘電型エラストマーアクチュエータ [2] などの Electroactive Polymer (EAP) である。EAP に関する解説は文献 [3][4] に詳しい。本解説では、ICPF アクチュエータを用いた触覚ディスプレイの研究について紹介する。

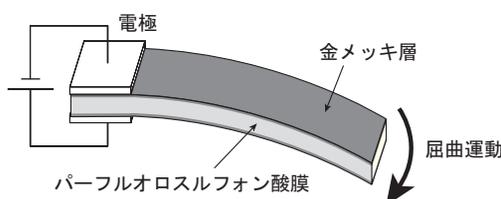


図1 ICPF アクチュエータの動作

### 2. ICPF アクチュエータとは

導電性高分子ゲル (ICPF または IPMC) アクチュエータは、フッ素系のイオン導電性高分子ゲル膜の 1 種であるパーフルオロスルホン酸膜 (厚さ約 180  $\mu\text{m}$ ) の両面に、金や白金などの金属メッキ層を接合することによって得られるフィルム状のアクチュエータである [5]。図1のように、膜の両面に電圧を印加すると内部のイオンの移動によって屈曲運動を行う。発生力は、 $2 \times 10 \text{ mm}$  のカンチレバー形状の先端で 0.6 mN 程度である。

このアクチュエータの最大の特徴は、高応答性と低電圧駆動である。従来の高分子アクチュエータに比べ、応答速度は 100 Hz 以上と高速である。また、ICPF の駆動電圧は 1.5 ~ 3.0 V 程度である。これは、同じく実用的なポリマーアクチュエータとして知られる誘電型エラストマー型アクチュエータの駆動電圧が数百~数千 V であるのと比較して最大のアドバンテージとなる。さらに、高分子ゲル膜は、柔軟性 (ヤング率:  $2.2 \times 10^8 \text{ Pa}$  程度) を有し、ハサミやカッターなどで任意の形状に切り出すことが可能であるため成形が容易である。ただし、ICPF アクチュエータは水中や湿潤状態で駆動するという問題がある。これに対して近年、イオンゲルを用いた空气中で動作可能な導電性高分子ゲルアクチュエータの開発も進められている [6]。

### 3. ICPF アクチュエータの触覚ディスプレイへの適用

触覚ディスプレイに求められる性能と、ICPF アクチュエータの適合性について以下に述べる。

(1) 高空間解像度：指先の触覚の解像度は 1 ~ 2 mm であり、触覚ディスプレイではそれに応じた高密度の分布刺激が必要となる。ICPF アクチュエータは成形が容易で

あり、配電などの機構が単純であることから高密度化が可能である。

(2) 高応答性：触覚受容器は複数の周波数応答帯域をもち、それらが連携することで静的～数百 Hz のワイドレンジの皮膚変形を検出することが可能である [7]。ICPF アクチュエータは数 Hz から 250 Hz 程度まで知覚可能な振動刺激を生成することが可能である。

(3) 多方向の刺激：触覚受容器は皮膚を変形させる方向によっても異なる感度を有することが知られている。例えばマイスナー小体は皮膚の接線方向の変形に感度がよいとされている [8]。ICPF アクチュエータは薄膜で、電極さえ配置できれば自由なレイアウトが可能である。このことを利用して、図 2 のように ICPF を傾斜させて皮膚に接触させることにより、皮膚に対して法線方向だけでなく、接線方向にも変形を与えることが可能になる。

(4) ウェアラビリティ：ヒトの触覚受容では、触察運動を介した能動的な知覚過程が触覚の質的意味を決定する上で重要となる。触覚ディスプレイでは、被呈示者が自由に触察運動をおこない、それに応じた触刺激を生成することが必要である。従来の触覚ディスプレイでは、アクチュエータ等の機構の大きさや重量の制約のために、デバイスを手指に装着して自由に触察運動をおこなうことが困難であった。ICPF アクチュエータを利用した触覚ディスプレイは 4 節で述べるように、小型軽量であることを利用して指先に装着することが可能である (図 3)。

(5) 安全性：ICPF は柔軟であるため、皮膚に過度な障害を与えることがなく、特別な制御や機構によるリミッターなどを設ける必要がない。また、駆動電圧が 3 V 程度と低く、皮膚に直接接しても安全である。

以上のように、ICPF アクチュエータは触覚ディスプレイを実現する上で、生体との親和性の高いアクチュエータであるといえる。次節より、ICPF アクチュエータを利用した触覚ディスプレイの研究について紹介する。

#### 4. 布のような手触りを呈示する触覚ディスプレイ

多数の ICPF アクチュエータをアレイ状に配置した振動子を用いて、手指を固定したまま呈示する受動型触覚ディスプレイ [9] および指先装着可能とした能動型触覚ディスプレイ [10] を開発した。図 4、図 5 に能動型触覚

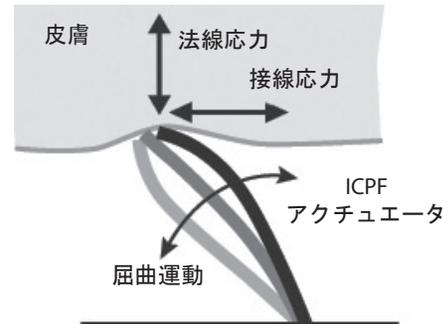


図 2 刺激方法

ディスプレイの外見と構造を示す。能動型ディスプレイは、繊毛部は長さ 3 mm、幅 2 mm の ICPF アクチュエータが横に 1 mm 間隔で 5 本、縦に 1.5 mm 間隔で 12 列並ぶ構造となっている。繊毛は全て 45 度傾けて配置してある。これは、指腹部表面に対して、法線方向と接線方向の刺激を効率良く与えるためである。配線はフレキシブル基板を用いて行う。配線部まで含めた質量は約 8g と非常に軽量である。

これらのデバイスを用いた触覚の呈示法について述べる。触覚は、触対象の剛性、粘弾性、摩擦、表面形状など多種の物理的要因によって引き起こされる多様な感覚である。しかし、これらの多様な入力情報は、皮膚の変形を介して、数種類の機械受容器で受容され、中枢で複数の受容器からの複合感覚として知覚される。仮に、それら数種類の機械受容器を選択的に刺激し、その神経活動を直接制御することができれば、任意の触感を合成することができると考えられる。筆者らは触覚受容器の時間周波数応答特性に着目して、機械振動刺激の周波数領域の違いにより、触覚受容器の SA I、FA I、FA II を選択的に刺激する手法を提案している [9][11]。

受動型触覚ディスプレイを用いた触覚呈示実験の結果、FA I に主に応答する数 10 Hz の振動成分と FA II が主に応答する 200 Hz の振動成分を合成して呈示することで、タオルやデニムの手触りのような複雑な触感が生成することが確認された [9]。

また、能動型触覚ディスプレイを用いた触覚呈示手法として、静的な圧覚を生成する 5 Hz の低周波振動による SA I 刺激と、触察運動の速度と対象面の凹凸の波長に応じて周波数を変化させる FA I 刺激、摩擦感を生成するために触察運動の加速度に応じて 200 Hz の高周波振動で刺激する FA II 刺激、と組み合わせて複合的な触感を呈示する手法を提案した。これにより、触運動に依



図3 装着型触覚ディスプレイ

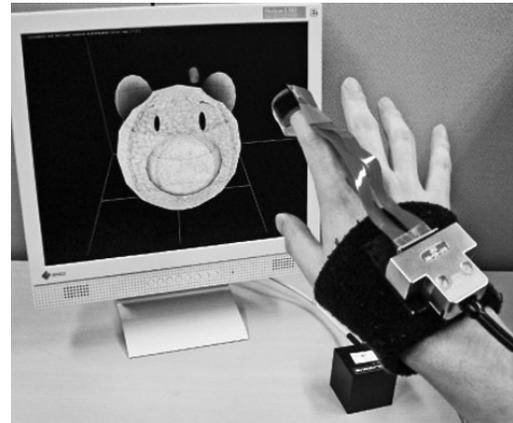


図5 3次元の触覚ディスプレイ  
\*口絵にカラー版掲載

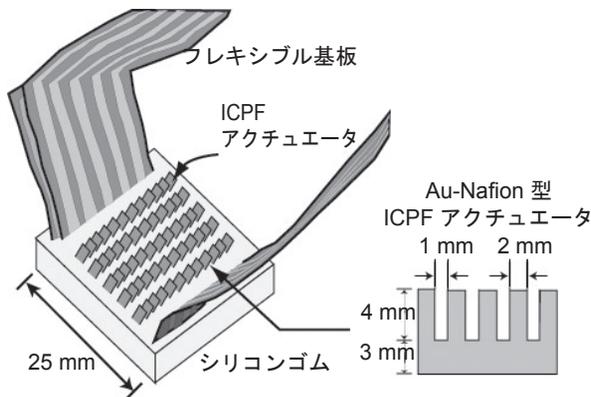


図4 装着型触覚ディスプレイの構造

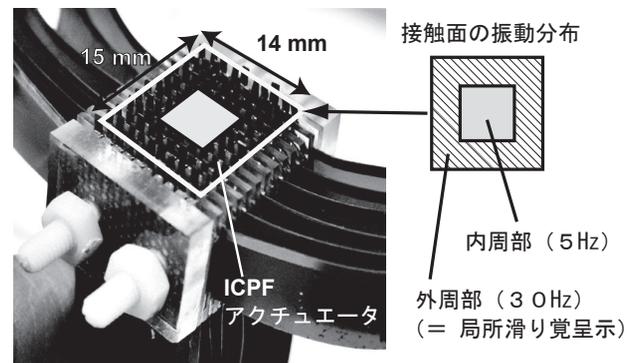


図6 局所滑り覚呈示による把持力調整反射の誘発

じた4種類の布素材の手触りの合成に成功している [11].

最後に、装着型触覚ディスプレイの応用として、3次元オブジェクトの手触りを呈示するアプリケーション [12] を紹介する。タオルやボアなどのテクスチャ感呈示に加えて、低周波振動を用いた圧覚呈示を利用して、凹凸感を呈示することで、3次元オブジェクトの形状を表現する。図5にCGのぬいぐるみに触れるアプリケーションの例を示す。被験者はぬいぐるみの凹凸形状とそれを撫でた際のテクスチャ感を感じることが可能である。

### 5. 局所滑り覚呈示による把持力調整反射の誘発

ICPF アクチュエータを用いた他の触覚ディスプレイの研究例として、局所滑り覚呈示による把持力調整反射の誘発 [13] について紹介する。

ヒトは質量と摩擦係数が未知の状態であっても触覚受容器からの情報に基づいて適切な力を把持できることが知られており、このメカニズムは、接触面外周に起こる局所滑りの検出に基づくという仮説が提案されている。

本研究では、ICPF アクチュエータを用いた振動刺激により、接触面外周に起こる局所滑り時の触覚受容器活動を陽に作り出し、実際に把持力調整反射が起こるという証拠を初めて得た。

具体的には、図6に示すように、ICPF アクチュエータを用いて高密度の分布を実現し、接触面内の中央部と外周部に2種類の振動刺激を加えることで、振動周波数と分布パターンの影響を評価した。この結果、外周部に30 Hzの振動を加えることで、ヒトの把持力が無意識のうちに50%程度増大されることを確認した。この結果により、30Hzの振動刺激に最も感度が高い触覚受容器であるマイスナー小体の関与が示唆された。また、接触面全面ではなく、外周部のみに振動を加えたときに把持力増加が見られることも確認された。

このようなヒトの把持力調整反射を自在に操る手法の確立により、マスタ・スレーブなどの遠隔操作において、操作者により直感的な滑り情報の呈示ができること期待される。

## 6. まとめ

ICPF アクチュエータを用いた触覚ディスプレイの研究について紹介した。ICPF は高速応答性、小型軽量性、安全性などの点で優れた特徴を有する。筆者は現在、超音波振動子を用いた新しい触覚ディスプレイの開発を進めているが、他のアクチュエータに手を出して初めてソフトアクチュエータの触覚ディスプレイとの相性の良さを実感した。今後も、生体との親和性が触覚ディスプレイを開発する上で重要な課題になるであろう。

## 参考文献

- [1] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J.-M. Alexandre, and A. Kheddar, Tactile interfaces: a state-of-the-art survey, Proc. 35th International Symposium on Robotics (ISR 2004), pp. 721-726 (2004)
- [2] IM. Koo, et al. Development of Soft Actuator Based Wearable Tactile Display, IEEE Trans. Robotics (2007)
- [3] Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles, Reality, Potential, and Challenges, 2nd Issue, Ed. Yoseph Bar-Cohen, SPIE (2004)
- [4] Electroactive Polymers for Robotic Application, Artificial Muscles and Sensors, Ed. K. J. Kim and S. Tadokoro, Springer-Verlag Press (2007)
- [5] 安積欣志：高分子アクチュエータ，日本ロボット学会誌 Vol. 21 No. 7, pp.708712 (2003)
- [6] T. Honda, H. Kokubo, M. Watanabe, Materials for Polymer-Ion-Gel-Actuator Containing Ionic Liquid, Proc. of 1st Intl. Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Priority Areas, No.438, pp.135-138 (2006)
- [7] 前野隆司：ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.6, pp.772-775 (2000)
- [8] 前野隆司，小林一三，山崎信寿：ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係，日本機械学会論文集，Vo.63, No.607, C編，pp. 881-888 (1997)
- [9] 昆陽雅司，田所論，高森年，小黒啓介，徳田献一：高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触覚ディスプレイ，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 6, No. 4, pp. 323-328 (2001)
- [10] M. Konyo, K. Akazawa, S. Tadokoro, T. Takamori, Wearable Haptic Interface Using ICPF Actuators for Tactile Feel Display in Response to Hand Movements, J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 15, No. 2, pp. 219-226 (2003)
- [11] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro, N. Saiwaki, A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp.1121-1127 (2005)
- [12] 昆陽雅司，吉田晃典，田所論：高分子ゲルアクチュエータを用いた皮膚表面刺激による3次元オブジェクトの手触りの呈示，第11回ロボティクスシンポジウム講演論文集，pp. 301-307, 2006.
- [13] 昆陽雅司，中本雅崇，前野隆司，田所論：ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 11 巻 1 号，pp. 3-10 (2006)

## 【略歴】

昆陽雅司 (KONYO Masashi)

東北大学 大学院情報科学研究科 助教

1999年神戸大学工学部情報知能工学科卒業。2004年神戸大学院自然科学研究科システム機能科学専攻博士課程修了。2004年慶應義塾大学大学院理工学研究科 COE 助手。2005年東北大学大学院情報科学研究科助手，2007年同研究科助教，現在に至る。博士(工学)。触覚ディスプレイ，触覚センサ，ニューアクチュエータなどの研究に従事。