解説

実用化を控えた様々なアクチュエータ

Different Actuators Waiting for Practical Uses

樋口 俊 郎* *東京大学大学院工学系研究科
Toshiro Higuchi* *Faculty of Engineering, University of Tokyo

1. はじめに

ロボットなどの機械の運動性能はアクチュエータの性能で決まるといってよい。力が強く、パワーが大きく、効率が良く、制御がしやすく、軽いアクチュエータを求めて研究開発が行われてきている。電磁サーボモータでは、磁性材料や製造方法、制御法の発展による性能の向上が進められてきており、ロボットの性能向上に大きく貢献している。一方で、圧電アクチュエータ、静電アクチュエータ、高分子アクチュエータなどの新しい原理や方式によるアクチュエータの研究開発が活発に行われてきている。これは、特殊環境での利用やマイクロ化など、従来の電磁アクチュエータの単なる改良では満たすことができない要求が増してきていることによるものである。また、新機能材料の出現や加工法の発展に伴い、これらを利用して新しい原理や機構のアクチュエータを開発しようとする研究や人工筋肉の開発が活発に行われている[1]~[3]。本稿では、アクチュエータの研究開発の動向を示し、ロボットへの利用が期待される電磁アクチュエータ以外のアクチュエータを概説し、それらが抱える実用化のための課題などを述べたい。

2. アクチュエータの研究開発の動向

2.1 人工筋肉の開発

ロボット用アクチュエータ開発の目標の一つは、筋肉に匹敵する性能を有する柔らかいアクチュエータを作ることであるといえる。筋肉は生物が長年にわたる進化によって獲得した生体アクチュエータである。優れたエネルギー変換効率、柔軟性、自己修復能力などの特徴を有している。筋肉の巧妙な仕組みを明らかにしようとする研究が進んでいるが、まだその完全な解明にはいたっておらず、筋肉を代替するものを作ることは当分できそうもない。したがって、人工筋肉の研究は「筋肉のようなアクチュエータ」の開発を目指して米国や我が国で活発に進められてきてい

る[4]。ゴム空気圧アクチュエータ、高分子アクチュエータ、静電モータ、形状記憶合金アクチュエータなどの研究が進み、すでに実用化されているものもある。

2.2 マイクロアクチュエータ

MEMSの進展に伴い、マイクロな機械に関する研究が活発になった。例えば、マイクロロボットの開発を目指す場合、これを駆動するマイクロアクチュエータの開発が重要な課題となる。寸法効果により、支配的な物理則がマイクロの世界と通常の世界では異なってくることから、マイクロの世界に適した形式の新しいアクチュエータの出現が期待される。例えば微小寸法の世界では、静電塗装、静電集塵など微小な粉を扱うときに静電気が広く利用されてきたことから分かるように、静電気による力が表に現れてくる。また、体積に対する表面積の割合が大きくなり、放熱がやりやすくなるために、形状記憶合金など熱利用アクチュエータの応答性が向上する。また、マイクロアクチュエータでは高価な材料を使うことが可能となる。自走式マイクロロボットでは、ケーブルを用いずにエネルギーを供給することが求められており、外部磁界や光を利用して駆動するマイクロアクチュエータの研究開発が進められている。

現在、マイクロアクチュエータに関して、産業界において開発の競争が行われているのは、携帯端末機器に搭載されるカメラのズーム、自動焦点、手ぶれ防止などに使うアクチュエータである。種々の方式の圧電アクチュエータ、静電アクチュエータなどが電磁型とともに、駆動電源を含めて携帯端末機器に組み込まれる形での製品開発が活発に行われている。これらは採択されると大量に生産されるため安価に入手することができ、ロボットの視覚部やマイクロロボットの駆動に活用できる。

2.3 圧電アクチュエータ

昨年ブレーメンで開催された新しいアクチュエータに関する国際会議 Actuator 2006 で注目を集めたものとして、ディーゼルエンジンの厳しい排ガス規制に対応して実用化が進んだコモンレール式電子制御噴射システムへの圧電アクチュエータの応用がある。燃料の噴射の制御をインジェクタの弁の開閉を積層形圧電素子を利用して0.1[ms]で行う

原稿受付 2007年8月31日

キーワード: New Actuators, Artificial Muscle, Polymer Actuators, Electrostatic Actuators, Piezoelectric Actuators

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Binkyo-ku, Tokyo

ものである。温度環境、耐久性など極めて厳しい条件下で利用できる圧電素子の開発が進められてきている。ディーゼル車の普及が世界的に拡大することにより、従来とは比較にならないほど大量の積層形圧電素子が生産される。積層形の圧電素子は、応答性、エネルギー変換効率、発生力に優れているが、価格が高く、これを組み込んだ精密機器の普及の大きな障害となっていた。大量生産が始まることにより、入手が容易となり利用が拡大するものと予測できる。

圧電材料として最も多く利用されているPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）は、鉛の化合物である。鉛の利用は大きく制限されようとしており、特性の良い非鉛圧電材料を求める研究が活発に行われている。このように、アクチュエータは環境・公害問題などとも密接な繋がりを持つようになってきている。

3. 実用化を目指す各種非電磁アクチュエータ

3.1 高分子アクチュエータ

化学的刺激、電氣的刺激、熱刺激、磁気刺激、光刺激等によって変形する高分子材料があり、これを利用して人工筋肉を実現しようとする研究が行われている。そのなかで、応答性が良く、ロボットに活用できるものには、誘電体の電歪効果を利用したもの、イオンの移動を利用したイオン導電性高分子アクチュエータIPMC（Ionic conductive polymer metal composite）などがある。高分子材料の電歪効果を利用したものはSRI インターナショナルなどで研究開発が進められ商品化されている。この人工筋はEPAM（Electroactive Polymer Artificial Muscle）と呼ばれる。アクリル系やシリコンゴム系のゴム状の薄い高分子膜を伸縮が可能な電極で挟んだ構造で、コンデンサを形成電極間に電圧を加えると静電力で引き合い、厚さ方向に収縮し、面方向には伸張する。固体の圧電材料に比べて歪が大きい。エネルギーの変換効率が良く、スピーカに利用できるほど、応用性が良い[5]。数[kV]の高電圧をかける必要があり、外部から局所の電極間の距離を小さくするような力が加わった場合、絶縁破壊を発生しやすくなるという課題がある。

IPMCは、高分子電界ゲル膜の表面に電極として白金等の金属をメッキしたものであり、電圧をかけるとイオンが移動するとともに水分子が移動し、片面が膨張して他面が収縮することにより屈曲する。2[V]程度の低電圧で動作できる利点がある。一方、水に濡れた状態で使うという制約がある。空気中では厳密な密閉が必要となる。渡邊らは、揮発性のないイオン液体を高分子網目構造に閉じ込める工夫を行い空気中での利用を可能にする技術を開発している[6]。

新しい飛行方式として、鳥のように飛ぶ飛行機を作製しようとする試みが行われている。上面に太陽電池フィルムを貼った翼の内部にIPMC層を組み入れ、これの曲げ変形によって羽ばたき上昇し、翼の形を変形させて滑空する鳥

ロボットが提案されている[7]。

3.2 空気圧アクチュエータ

産業用ロボット用のアクチュエータとして空気圧シリンダ、空気圧モータなどが古くから広く利用されている。圧縮空気が容易に利用できる工場では、単純な動作を最も安価に実現できるものとして、大量に利用されている。電磁サーボモータに対抗できる性能を得るためには、気圧弁の高性能化、位置センサの内蔵化などで閉ループ制御系を構成することが必要となる。

空気圧アクチュエータのもう一つの形態として、ソフトアクチュエータがある。素材にゴムを使い柔らかな機械システムの駆動用や人工筋肉を目指すものである[8]。すでに市販されているものもあり、ロボットの制御の研究に利用されている。高精度の位置決めや速度制御には向かないが、介助用、人体装着型パワーアシストとしての利用が期待できる。ゴムに繊維強化の方向によって伸縮だけではなく、種々の変形が実現できる。

複数の圧力室を作り、これに順次空気圧を切り替えて駆動する方式の空気圧モータが鈴森らによって開発されている。空気圧ワブルモータはハーモニックドライブ機構と類似した減速機構が内蔵された低速高トルク空気圧モータである。これをさらに発展させ傘歯車を用いた空気圧ニュートンモータが開発された[9]。

3.3 形状記憶合金を利用したアクチュエータ

大きな変形を与えて熱を加えると元に形状に戻る性質があるTiNi合金である形状記憶合金（Shape Memory Alloy, SMA）は、細線にしたものを通電加熱することにより数%の収縮が得られる。単位断面当たりの発生力は400[MPa]程度と大きい利点がある。ロボット用としては指の駆動やマイクロボットなどに適している。

冷却は熱伝導によって行うしかなく、冷却の時間によって応答性が制約される。細線が利用されるのは冷却を早めるためであり、大型の機器の駆動には適していない。堂埜らは、形状記憶線をメリヤス編み構造とし、編むことにより収縮率30%と大きな力を得る工夫を行っている。可撓性があり人体に装着することができ、パワーアシスト用としての利用が期待できる[10]。

3.4 超音波モータ

超音波モータは摩擦駆動形の圧電アクチュエータである。圧電振動子で楕円運動あるいは往復運動を生成した点にロータあるいはスライダを接触させることによって駆動するモータである。カメラの自動焦点や精密位置決め用のステージの駆動にすでに実用化されており、電磁形モータに対抗できるモータとして、活発に種々の形態の超音波モータの研究開発と製品化が進められてきている[11]。超音波モータは、電磁形モータに比べると低速大トルクであり、減速機を必要としない利点がある。また、停止時（無通電時）は

摩擦力によって保持される特徴があり、産業用ロボットで必要とされることが多いブレーキが不要となる利点がある。モータ制御に関する研究も進んでおり、精密な位置、速度制御が実験室レベルにおいては実現しており、ロボットの腕の制御、ハンド指の制御などの研究が行われている。超音波モータは摩擦駆動のアクチュエータであり、接触点での磨耗の問題があり、駆動の安定化と耐久性の向上が課題となっている。カメラの自動焦点機構など、実働時間の短いところから実用化が進められた。駆動には圧電振動子を励振させるための高周波電源が必要であり環境、負荷の変化に対応して固有振動モードを維持する仕組みが必要となる。また、精密な制御を行う場合には、かなり複雑な制御回路が必要となる。したがって、ロボット用として、超音波モータの特徴を生かせる応用が拡大するためには、耐久性の向上とトルクの更なる増大が求められる。

3.5 機能性流体アクチュエータ

電界や磁界により物理的性質を変化させることができる流体であり、スマート流体とも呼ばれる。主なものとして、電気粘性流体 (ERF)、磁気粘性流体 (MRF)、磁性流体、電界共役流体などがある。電界や磁界によってそれぞれ粘弾性特性を変化できる ERF と MRF は、それ自身アクチュエータとしての利用ではなく、ブレーキ、クラッチ、特性の変化できるダンパーとしてロボットの制御に利用できる。一対の棒状の電極間に直流電圧を印加すると、電極間に噴流を生じる誘電液体があり、電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid) と呼ばれる。この噴流 (ジェット流) を利用することによるマイクロアクチュエータが開発されている [12]。また、こうして得られた噴流の液圧によってシリコンゴムチューブをラバーアクチュエータと同様の原理で収縮させるマイクロ人工筋が開発されている [13]。

3.6 静電モータ

静電力を利用したモータはトルクや推力が電磁力を用いたモータと比べて大幅に小さく、ロボットなどの機械の駆動としての利用は不可能であると思われていたが、筆者らは一対の 3 相の帯状電極を形成した薄いプラスチックフィルムを対向させて重ねる形で構成される高出力静電モータを開発した。2.5 [kV] の 3 相交流電圧を印加したときに単位面積当たりの推力 1.8 [kN/m²] を発生し、1 [m/s] を超える速度で駆動できて電磁型リニアモータに匹敵する性能を有することを示した。積層することによって大きな力を得ることができ、また、種々の方向に曲げた状態でも駆動ができる特徴を有している [14] [15]。また、磁性体を用いていないため、強磁場においても使用することができ MRI 中で像をほとんど乱すことなく駆動できている。高電圧の駆動回路が必要となるが、液晶のバックライト用電源など民生品において高電圧の利用が拡大してきており、高電圧対応の回路部品の入手が容易になってきている。

4. お わ り に

本稿でいくつかの新しいアクチュエータを紹介したが、性能と価格で電磁アクチュエータに対抗できる段階までに達しているものは極めて少ない。実用化されるにはアクチュエータの性能向上に加え、電源やコントローラの小型軽量化などアクチュエータシステムとしての完成度を高めることと、価格低減のための生産技術の開発が必要である。また、耐久性や信頼性を高めることも重要な課題となる。新しいアクチュエータは、その特徴を生かせるところでしか実用化は進まない。ロボットの開発設計者とアクチュエータの研究開発者とのより密接な交流を促進すべきである。

参 考 文 献

- [1] アクチュエータシステム技術企画委員会編：アクチュエータ工学、養賢堂、2004。
- [2] 特集「次世代アクチュエータ」、日本ロボット学会誌、vol.21, no.7, pp.697-762, 2003。
- [3] 特集「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ」、電気学会誌、vol.127, no.5, pp.280-299, 2007。
- [4] 長田義仁：ソフトアクチュエータ開発の最前線。エヌ・ティー・エス、2004。
- [5] 千葉：“エレクトロアクティブポリマー人工筋肉を用いたロボットの可能性”，日本機械学会誌、vol.107, no.1033, pp.12-13, 2004。
- [6] T. Honda, H. Kokubo and M. Watanabe: “Materials for Polymer-Ion-Gel-Actuator Containing Ionic Liquids,” Proceedings of 1st International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, pp.135-138, 2006。
- [7] A. Colozza: “Fly Like a Bird,” IEEE Spectrum, May 2007, pp.32-37, 2007。
- [8] 則次：“空気圧ゴム人工筋の開発と人間支援ロボットへの応用”，日本 AEM 学会誌、vol.14, no.3, pp.186-190, 2006。
- [9] 宇塚、榎本、鈴森：“ニューテーションモータの開発（第 1 報：空圧ニューテーションモータの動作原理と基本特性）”，日本機械学会論文集（C 編）、vol.172, no.716, pp.180-185, 2006。
- [10] 堂塾、齊藤、桑田：“人体装着に適した網目 SMA 人工筋肉”，松下電工技報、pp.59-63, 2003。
- [11] 前野：“超音波モータ”，日本ロボット学会誌、vol.21, no.1, pp.10-14, 2003。
- [12] 横田、吉田：“機能性流体を用いたマイクロアクチュエータ”，電気学会誌、vol.127, no.5, pp.282-284, 2007。
- [13] 竹村、横田、枝村：“電界共役流体に発生するジェット流を用いた人工筋アクチュエータ”，日本機械学会論文集，C 編，vol.71, no.708, pp.2571-2577, 2005。
- [14] 樋口：“静電力のメカトロニクスへの応用—力の強い静電モーター—”，精密工学会誌、vol.70, no.8, pp.1043-1046, 2004。
- [15] 西嶋、山本、樋口、稲葉：“静電フィルムアクチュエータを用いた 2 自由度ロボットアームの開発”，精密工学会誌、vol.71, no.12, pp.1574-1578, 2005。

樋口俊郎 (Toshiro Higuchi)

1977 年東京大学大学院博士課程修了。1978 年東京大学生産技術研究所助教授、1991 年より東京大学工学部精密機械工学科教授。1992～1996 年度神奈川科学技術アカデミー「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダー。静電モータ、圧電アクチュエータ、超精密位置決め等、メカトロニクスに関する研究に従事。（日本ロボット学会正会員）