展 望

次世代アクチュエータが切り拓く新しいロボティクス

Next-generation Actuators Leading New Robotics

鈴 森 康 一* *東京工業大学

Koichi Suzumori* *Tokyo Institute of Technology

1. は じ め に

「革新的な機能デバイスは革新的なロボットを生み出す」、あるいはもう少し挑発的な言い方をすれば、「誰にでも手に入るモータを組み合わせても革新的なロボットは生まれない」。私は研究室の学生にしばしばこう言っている。

誤解しないでいただきたい。ロボット研究全体にあてはまると言っているのではない。むしろ「実績のある安価なモータを使うことで実用的なロボットは実現できる」し、「標準的なモータを使ってシステムを構築するところにロボティクスの重要な研究課題が沢山ある」。冒頭の考え方は「アクチュエータ工学からロボティクスへのアプローチ」の一つにすぎないことも言い添えている。

しかし、「新しいアクチュエータが新しいロボティクスを切り拓く」のは事実である。いくつかの実例を紹介しよう。

1980年代に実用化が進んだ希土類磁石を用いた電磁モータは、ロボットアクチュエータの主役の座を油圧アクチュエータから奪い取った[1]。今日の小型高性能のロボットはこのモータのおかげと言っても過言ではない。もしこの技術革新がなければ、産業用ロボットはいまだ油圧駆動が主流だったかもしれない。

一方、油圧アクチュエータも近年再注目されている。きっかけの一つは、米国のボストンダイナミクス社が開発したBigDog[2]やWildCatといった脚ロボットである。それらの力強くダイナミックな動きは、フィールドでたくましく働く新しいロボットの可能性を感じさせる。

マイクロロボット研究でもアクチュエータが最重要ポイントの一つであり続けてきた。マイクロギアドモータ、マイクロ超音波モータ、マイクロ空圧アクチュエータの開発によって、管内点検ロボット、歩行ロボット、飛行ロボット等、各種マイクロ移動ロボットが実現した(図1)[3][4]。形状記憶合金アクチュエータは、能動カテーテルや細径内視鏡など多自由度細径機構を実現した[4]。圧電アクチュエータ

図1 超小型自立走行ロボット「ムッシュ君」(1993年発売[3]) (セイコーエプソン社写真提供)

図2 X線透過アクチュエータが実現した胃透視検査用腹部圧迫ソフトロボット[6] (左上:被験者とベッドの間に挟んで用いるロボット, 右上:胃透視像, 右下:ロボットを操作する放射線技師)

はプローブ顕微鏡を実現し、原子レベルの超精密マニピュレーションの道を拓いた。

静電アクチュエータや超音波モータは、強磁場、極低温、超高真空など「特殊環境下でのマニピュレーション」という新しい領域を拓いた。最先端科学の解析ツールとして期待が高い[5]。

X線を透過するアクチュエータは新しい医用ソフトロボットを生み出した。胃部X線検査において被験者の腹部を圧迫することで、胃内のバリウムを検査者の意図どおりに動かし、効率的な検査を実現している(図2)[6]。

原稿受付 2015年8月18日

キーワード: Actuator, Artificial Muscle, Soft Robotics, Tough Robotics

*〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

図3 細径人工筋 [8] (左: 外径 2.4 [mm] 人工筋, 右: 50 本の細径人工筋を束ねた「多繊維人工筋」)

図4 細径人工筋を用いた織布 (左) とパワーアシストウェアの試作例 [9]

「新しいアクチュエータは新しいロボティクスを切り拓く」とご理解いただけたでしょうか。以下では筆者が開発している油空圧アクチュエータを例に紹介させていただく。

2. 細径空圧人工筋が切り拓く「ソフト・ロボティクス」

図3に筆者らが開発している細径人工筋を示す。ゴムチューブとその周囲の編組から構成され、空気圧で動作する。従来のマッキベン人工筋 [7] と同じ原理であるが、繊維やゴムの材料、形状、繊維の編み方等を工夫することで、外径 1 [mm]~4 [mm] の細径人工筋を安定して量産することに成功した [8]。収縮率 25% (動物の筋肉と同等)、単位面積当たりの最大収縮力 1.3 [MPa] (動物の筋肉の約 4 倍) 程度の動作が行える。

高い「力/自重比」、しなやか、細径といった特徴を生かした新しいロボット機構の研究を四つ紹介する。

2.1 パワーアシストウェア

細径人工筋を編んで作られるパワーアシストウェアを目指している (図4)。リンク機構からなる「外骨格型」パワースーツに比べると大きな力のサポートはできないが、軽く、柔軟く、着心地のよいパワーアシストウェアが期待できる。現在、織布化とウェアの試作を進めている [9]。

2.2 筋骨格ロボティクス

細径人工筋を束ねると様々な形状の「多繊維人工筋」が

形成できる。これを用いてヒトの身体の駆動系を真似た筋骨格機構の研究を進めている。図5に示す脚機構 [10] は、ヒトと同じように一脚あたり 50 個の人工筋が集積し、冗長駆動系を構成している。

構成を真似ると特性や見た目が似てくる点が面白い。例えば、通常のロボットの膝関節は「回転対偶」で構成されるが、試作した機構の膝関節はヒトと同じように「転がり対偶」で構成される。これによって (1) 深い屈曲角が実現でき、(2) 膝屈曲時には脛軸周りの旋回自由度が生まれ、(3) 「艶めかしい」動きが実現できる。「転がり対偶」関節の駆動は従来のモータでは難しく、細径人工筋を用いるがゆえに実現できる。「生き物らしい」動きをするロボット機構実現のブレイクスルーにつなげたい。

2.3 ジャコメティロボティクス

細径人工筋を用いることで、「超軽量、超長尺、超シンプル」な新しいロボットを実現できる。

いま取り組んでいるのは、(1) 全長 20 [m] の片持ち型長尺細径アームと、(2) 総質量 4 [kg] (含、空圧源)、脚長 1.3 [m]、全長 1 [m] の超軽量歩行ロボットである。小型カメラを搭載した点検/探索ロボットを目指している。搭載重量、位置決め精度、剛性等の特性は望めないが、代わりに、軽量で、搬入/設置/搬出が容易で、落下時/転倒時の本質安全性を持った「実フィールドで使いやすい」ロボットが実現できる。

これまでのロボティクスが目指してきた「高機能/高性能化」とは真逆とも言えるこの考え方に、筆者は新しいロボティクスの一つの可能性があると考え、これを Giacometti Robotics と名付け [11]、その可能性を実証すべくロボット開発を進めている。

2.4 チューブフリー空圧ロボット

空圧アクチュエータの最大の弱点は空圧源である。これまでに、小型コンプレッサ、化学/物理反応を利用したガス発生等、様々な試みがなされてきたが、まだ実用レベルには達していない。

図5 筋骨格脚機構の動作例[10] (左より、膝関節屈曲、股関節屈曲、股関節外転)

筆者らは、ラバチュエータの中に高分子膜からなる燃料電池 (PEMFC) を組み込み、燃料電池の放電/充電に伴う「水 ⇄ 気体」反応を利用した圧力制御法を研究している[12]。シンプルな構成でかつ減圧時にエネルギーを回生できる。コンプレッサや送気チューブが不要な自立型空圧移動ロボットの実現を目指している。

3. 次世代油圧アクチュエータが切り拓く「タフ・ロボティクス」

「タフ・ロボティクス・チャレンジ」(田所論 PM, 2014–2019 年度) は、実フィールドに強い「タフなロボット」実現を目指す研究プロジェクトである[13]。その中で筆者は、発生力が大きく外界からの負荷や衝撃に強いロボットを目指し、油圧アクチュエータの研究開発を担当している。

3.1 油圧アクチュエータ再考

建設機械が実証しているように、油圧アクチュエータは野外で力強く動く頑丈な機械を実現する。この技術を転用することで、電動ロボットに比べて格段に「タフ」なロボットが実現できると筆者らは考えている。

しかし、大型機械向けに開発された既存の油圧アクチュエータをそのままロボットに適用しても革新的なタフロボットは生まれない。ロボット用に特化した新しい油圧アクチュエータの開発と、その特徴を生かしたロボット設計が重要である。こう考えて、ロボットシステムの研究チームと双方向の連携をとりながら研究開発を進めている。

表 1 に、油圧アクチュエータの特徴をロボティクスの視点からまとめた。おおよそご理解いただけると思うが、誌面の制約により一部のみ補足説明する。

「①力密度 (=体積当たりの発生力)」が大きい点は間違いないのだが、「②出力密度 (=体積当たりの仕事率)」については注意を要する。油圧シリンダを例にとれば、(i) シリンダ単体をアクチュエータととらえるか、(ii) パワーパック (油圧ポンプとそれを駆動する原動機) も含めてアクチュエータととらえるかで考え方が変わってくる。

据置型ロボットアームでは、パワーパックは一種の外置き

表 1 ロボット用としての油圧アクチュエータの特徴

優れた点:

- ① 大きな力密度 (=アクチュエータ体積当たりの発生力)
- ② 大きな出力密度 (据置型ロボットの場合)
- ③ 耐衝撃性
- ④ 効率的なエネルギーマネジメント
- ⑤ ロック/フリー状態の実現

既存の油圧アクチュエータの課題:

- ⑥ 油シール ⇒ 油漏れ、制御性低下 (摺動部摩擦に起因)
- ⑦ 油圧源 (重い、低効率)
- ⑧ 多自由度化に不向き (制御弁価格、配管)
- ⑨ ロボット用に設計されていない (重い、大きい、揺動型が少ない)

図6 チューブフリー・ラバチュエータ
(左図: ゴムが膨張し変形動作しているのが確認できる)

図7 開発した小型サーボシリンダ (35 [MPa], ボア径 $\phi 20$, 変位センサ/比例弁内蔵, 発生軸力 11 トン)

のエネルギー源と考えて (i) の考え方をとり、パワーパックを内蔵する自立型移動ロボットでは (ii) の考え方をとるのが現実的であろう。つまり、油圧アクチュエータを使うことで、非常に大きな①力密度と②出力密度を持った据置型ロボットアームの実現が期待できる一方、自立型移動ロボットでは、「②大きな出力密度」は必ずしも期待できない。

「④効率的なエネルギーマネジメント」については、例えば一脚あたり最大出力 100 [W] が要求される 4 脚ロボットを例に考えてみよう。電動モータを用いる場合、100 [W] 分のモータをそれぞれの脚に、つまりロボットには計 400 [W] 分のモータを搭載するのが普通である。しかし実際には全脚が同時に最大出力をだすことはあまりなく、400 [W] 分のモータの搭載はオーバースペック設計とも言える。

これに対し油圧アクチュエータでは、バルブの切り替え

図8 多機能タフロボットハンド（製作中，ハンド幅：560 [mm]，指長：807 [mm]，計10 自由度）

により油圧のエネルギーを時分割で各脚に配分することが容易に行える．このため，ロボットには例えば200 [W] 程度のモータを油圧ポンプ駆動用に積むだけでよい．

バルブの切り替えにより，「⑤高剛性（ロック）状態と弛緩（フリー）状態」が容易に実現でき，衝撃吸収やバックドライブが容易であるのも大きな特長である[14]．

一方，既存の油圧アクチュエータをロボットに適用するには表1の⑥～⑨の課題がある．これらを解決しつつ油圧の特長を生かしたロボット用アクチュエータの実現を目指している．

3.2 タフロボット用油圧アクチュエータの開発例

現在，①産学連携による実用化を目指した研究開発，②ロボティクスのニーズと油圧工学のシーズに基づいた目標設定，という二つの方針の下，種々の「ロボット用油圧アクチュエータ」の研究開発を進めている．具体的には，①高圧・小型・センサ／バルブ内蔵サーボシリンダ（35 [MPa]，内径 $\phi 10 \sim 30$ [mm]），②揺動モータ（35 [MPa]，可動範囲 270° ），③高効率小型パワーパック（35 [MPa]，10 [l/min]），④高出力マッキベン型人工筋，⑤新原理小型サーボバルブ，等のコンポーネント開発を進めている．

まだ，開始したばかりの研究プロジェクトであるが，これまでに開発したアクチュエータと，それらを用いた現在計画中のロボットハンドの例を図7と図8に示す．

4. お わ り に

新しいアクチュエータが新しいロボットの可能性を生み出し，それに伴い新しいロボティクスが発展する……このような展開を夢見て次世代アクチュエータの研究を進めている．

3章で紹介した人工筋肉に関する各研究は，それぞれ，文科省科研基盤研究（A）（26249028），文科省科研挑戦の萌芽研究（15K13907），内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（革新的設計生産技術），4章で紹介した油圧アクチュエータの研究は内閣府革新的研究開発推進プログラム

（タフ・ロボティクス・チャレンジ）の研究課題として進めている．関係各位に感謝する．

参 考 文 献

- [1] 例えば，鈴森：アクチュエータ工学入門，pp.56–58, pp.244–246，講談社ブルーバックス，2014．
- [2] M. Raibert et al.: “BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot,” Proc. 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, pp.10822–10825, 2008.
- [3] 宮澤修ほか：“自律自走ロボット「ムッシュ君」の開発”，日本時計学会誌，no.146, pp.42–50, 1993.
- [4] 日本機械学会：機械工学便覧応用システム編 $\gamma 7$ メカトロニクス・ロボティクス，pp. $\gamma 7$ -208-211，日本機械学会，2009.
- [5] 樋口，大岡監修：アクチュエータ，研究開発の最前線，pp.460–526，エヌ・ティー・エス，2011．
- [6] 澁谷ほか：“腹臥位用遠隔圧迫枕の開発と有用性評価”，日本診療放射線技師会誌，vol.61, no.738, pp.21–25, 2014.
- [7] 例えば，中村：図解人工筋肉，pp.54–68，日刊工業新聞，2011．
- [8] M. Takaoka et al.: “Fabrication of Thin McKibben Artificial Muscles with Various Design Parameters and Their Experimental Evaluations,” 5th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology, p.82, 2013.
- [9] 大野ほか：“細径空圧人工筋肉を用いた能動繊維およびウェアラブルスーツの試作”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，1A1-009, 2015.
- [10] 車谷ほか：“細径マッキベン人工筋肉を用いた筋骨格ロボットの研究”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，1P1-W04, 2015.
- [11] K. Suzumori: “New Pneumatic Artificial Muscle Realizing Giacometti Robotics and Soft Robotics,” T5th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), pp.4–5, 2015.
- [12] K. Suzumori et al.: “New mobile pressure control system for pneumatic actuators using reversible chemical reactions of water,” Sensors and Actuators A: Physical, vol.A201, pp.148–153, 2013.
- [13] <http://www.jst.go.jp/impact/program07.html>
- [14] 鈴森：“ロボットとアクチュエータのバックドライバビリティ”，日本ロボット学会誌，vol.31, no.6 pp.548–551, 2013.

鈴森康一（Koichi Suzumori）

1982 年横浜国立大学工学部卒業，1990 年同大学工学研究科博士課程修了．1984～2001 年株式会社東芝勤務，2001～2014 年岡山大学教授，2014 年より東京工業大学教授．
（日本ロボット学会正会員・フェロー）