

解説

球面モータ

Spherical Motor

矢野 智昭^{*1} 前野 隆 司^{*2} ^{*1}産業技術総合研究所知能システム研究部門 ^{*2}慶應義塾大学理工学部機械工学科
Tomoaki Yano^{*1} and Takashi Maeno^{*2} ^{*1}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology ^{*2}Keio University

1. はじめに

1台で人間の手首や肩のような動きをする球面モータは、以下の特徴を有している。

(1) 同一自由度実現に必要なモータの個数が減少する。したがって、シリアルリンクマニピュレータのようにモータがシリーズにつながるシステムではトータル重量の軽減とシステムのコンパクト化が達成できる。

(2) 回転中心が一致するため、マニピュレータの運動学方程式が簡単になり、多くの場合幾何学的に解くことができる。したがって制御を簡単かつ高速に行える。

(3) ロボットアイの駆動部やトラス構造の能動ジョイント部などを余分な機構を追加せずに構成できる。

(4) システムに使用するモータの個数を減らせるため、システムの小型化だけでなく省エネルギー効果が期待できる。

以下、実用化が近いと思われる電磁型と超音波の球面モータについて研究の動向を述べる。

2. 電磁型球面モータ

電磁型球面モータの研究発表は、1990~1995年にかけて世界的に活発に行われた[1]。しかし、その後実用化までの距離が改めて認識され、研究発表が下火になっていた。2000年以降、計算機の高性能化が三次元磁場解析や複雑な制御の実時間処理が可能なレベルに到達したことと、ヒューマノイドロボットやペットロボットの指、手、腕、腰、首、足首等の関節や目の駆動、内視鏡などの医療機器の駆動、光学機器の較正装置やレーザ追尾装置の駆動など、球面モータを必要とする用途が急速に広がったことを背景に、再び研究発表が活発に行われるようになってきた。

1996年までの研究は文献[1]を見ていただくとして、本稿では2000年以降に提案された球面モータを眺めてみる。

矢野らは、立体的に配置した3組の巻線に流す正弦波電流の振幅と位相差を変えることにより回転磁界の回転軸を三次元空間内の任意の方向に制御できることを示し、ロータを永久磁石にすれば球面同期モータ、ロータをコイルにすれば球面誘導モータが実現できると提案した[2]。これらモータの試作機はロータ支持にジンバル機構を、位置計測にはジンバル機構に取り付けた1軸のポテンシオメータもしくはエンコーダを用いていた。ジンバル機構は支持箇所が力の働く場所から遠くなるために軸がふらつく、モータ本体が大きくなるなどの問題を抱えていた。

Sheffield大学のWangらは球面同期モータの支持機構にベアリング、位置計測にホール素子センサを用いてPI位置フィードバック制御を行い、可動範囲 ± 45 [deg]、ピークトルク0.6 [Nm]を確認した[3]。

誘導モータのロータをコイルにするのは渦電流損を減らすためであるが、球面モータではコイルを立体的に巻くのが非常に困難で、矢野らの試作機は回転するのがやっとの状態だった。

武蔵野工科大学の海老原らは中空鉄球に適切な厚さのアルミを融着すれば渦電流損を減らせることに注目し、融着するアルミ厚をメカニカルギャップと同一の1 [mm]として球面誘導モータを試作した(図1)。試作した球面モータはZ軸周りに1,000 [rpm]、X、Y軸周りに60 [rpm]の高速回転を行い、回転中の軸の方向決めが可能である[4]。

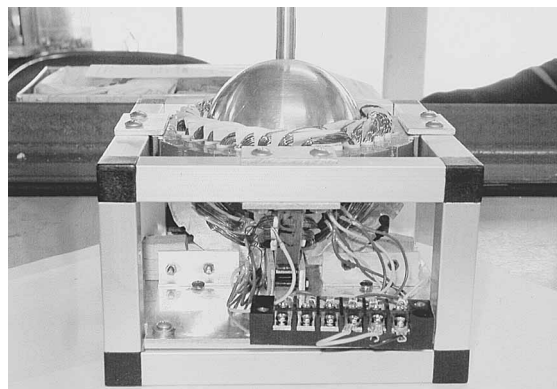


図1 武蔵野工科大学の球面誘導モータ

原稿受付 2003年7月1日

キーワード: Spherical Motor, Actuator, Multi DOF, Ultrasonic Motor

^{*1}〒305-8564 つくば市並木1-2-1

^{*2}〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1

^{*1}Tsukuba-shi, Ibaraki

^{*2}Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

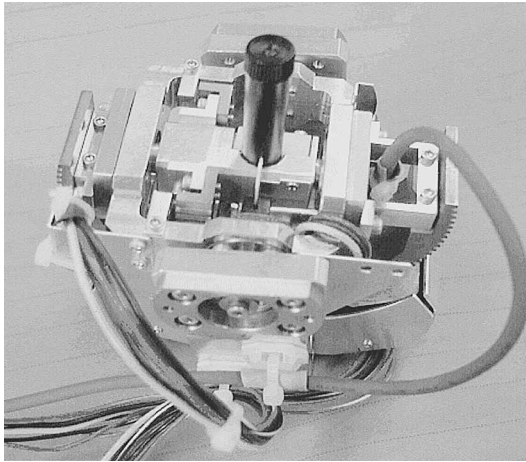


図2 産総研の小型球面ステッピングモータ

Louvain大学のDehezらも同様の考えでロータを薄い球殻とした球面誘導モータを試作し、14,000 [rpm] で0.15 [Nm] のトルクを得ている [5] .

矢野らは、弓状ステッピングモータ上に回転軸が直交する弓状ステッピングモータを入れ子状に搭載した球面ステッピングモータを小型化し、試作した (図2) . 試作したモータは75 [mm] 角に収まるサイズで位置決め精度0.03 [deg] , 出力トルク0.03 [Nm] である [6] .

Georgia工科大学のLeeらは外殻に多数の電磁石を、ロータ表面に多数の永久磁石を配置し、合成力が指令値と一致するように電磁石に電流を流してロータの回転方向を制御する方法を提案した [7] .

この方法は膨大な計算が必要になるため実現は難しいと思われていたが、近年の計算機の目覚ましい性能向上により可能になりつつある .

Hopkins大学のStainらは外殻に16個の電磁石、ロータに24個の永久磁石を配置した球面ステッピングモータを試作した [8] . Aachen工科大学のKahlenらはステータに96個の電磁石、ロータに48組の永久磁石を配置した球面ステッピングモータを試作し、115 [rpm] で出力トルク40 [Nm] を得た [9] (図3) .

3. 超音波球面モータ

超音波モータ [10] を多自由度化する試みは、遠山らによる球面モータ [11] に始まる . 本モータは、球の周りにリング型超音波モータを複数個配置することにより多自由度運動を実現するものであり、義手やロボットハンドに適用されるなど、適用範囲を拡大しつつある .

一方、単一の振動子に固有振動数の等しい複数の固有振動を励振することによって、振動子表面に3軸まわりの楕円振動を生成して回転子を3軸まわりに回転させる多自由度超音波モータが、上羽ら [12] , 富川ら [13] , 前野ら [14] によ

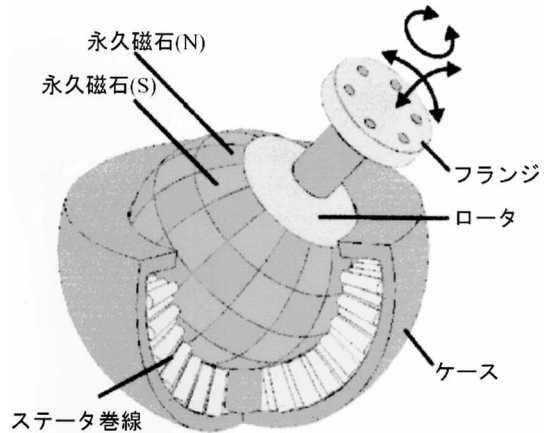


図3 Aachen工科大学の球面ステッピングモータ

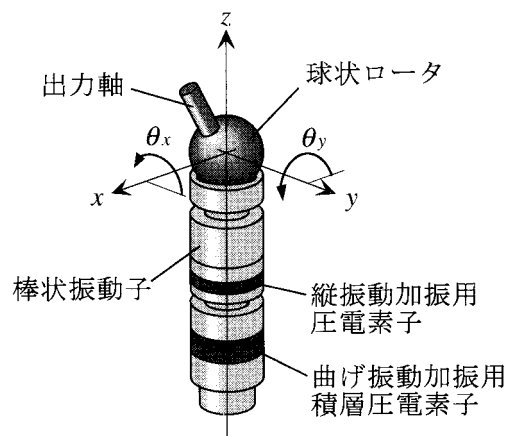


図4 単一振動子を用いた多自由度超音波モータの斜視図

りそれぞれ開発されている . リング型などの1自由度超音波モータでは、一般に、二つの固有振動モードを利用して、これに対し、多自由度超音波モータでは、三つの固有振動モードを用いる . 例えば、前野らのモータ [14] (図4) では、図5に示したような $y-z$ 平面内および $z-x$ 平面内の曲げ振動二次モードと z 軸方向縦振動一次モードという三つのモードを振動子に励振する . 固有振動数 (40 [kHz]) がほぼ等しい三つの固有振動モードは、棒状の金属製振動子に挟み込まれたPZTに交流電圧を印加することによって励振される .

図5 (a) は、二つの曲げ振動2次モードを用いる場合の駆動原理の模式図である . 二つの曲げ振動は、時間的位相を90度違えて励振されている . このため、棒状の振動子の頭部は首振り運動し、振動子上面に圧着された球状回転子は z 軸まわりに回転する . 図5 (b) は、曲げ振動2次モードのうちの一つと縦振動1次モードを用いる場合である . 振動子の先端部には、 x 軸まわり (反時計まわり) の楕円振動が生じている . したがって、回転子は (ii) のときに振動子上面に間欠的に接触し、時計まわりに回転する . 以上は z 軸または x 軸まわりの回転の例であるが、三つの固有振動モー

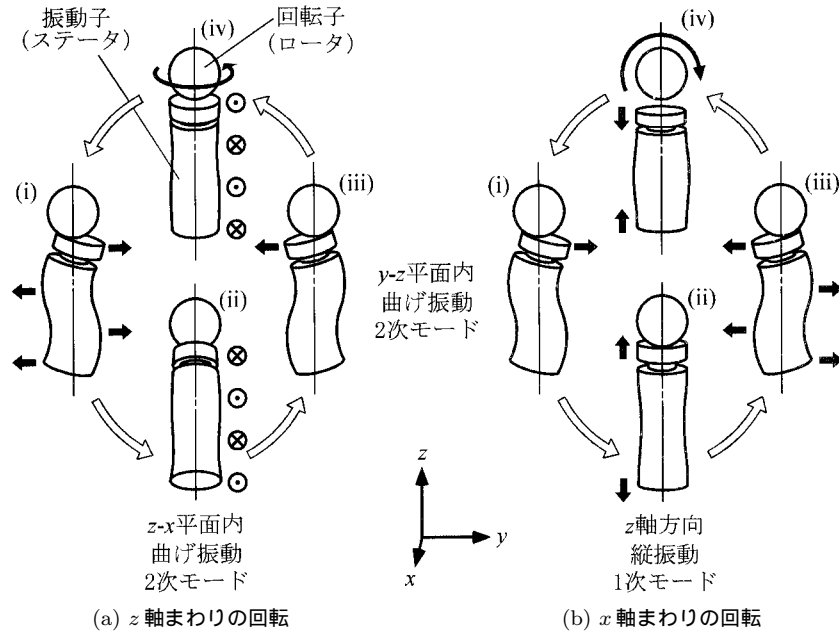


図5 単一振動子を用いた多自由度超音波モータの駆動原理模式図

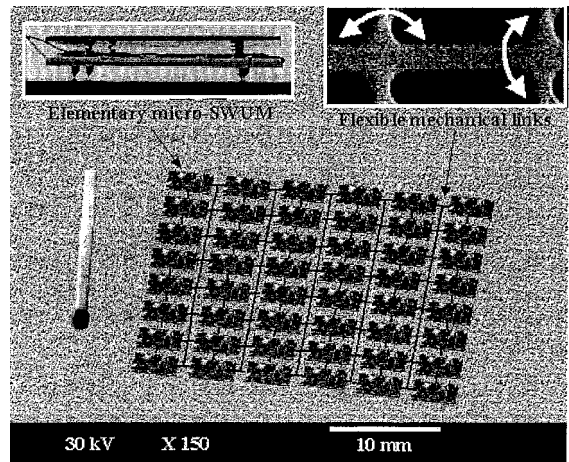
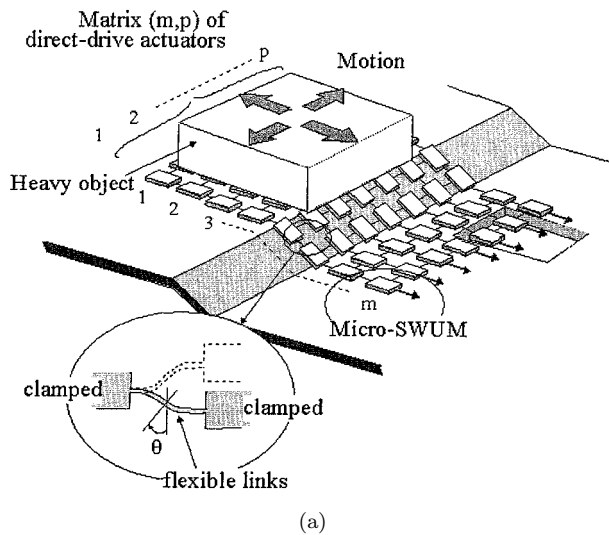


図6 配列状マイクロ超音波モータ

ドの振幅と位相を様々に組み合わせることにより、球状の回転子を任意の方向に回転させることが可能である。振動子は直径10 [mm]、長さ約30 [mm]、回転子は直径10 [mm]である。回転子は振動子の先端に設けた磁石により振動子に吸着される構造となっており、加圧力は数 [N] 程度である。振動子先端にはつばねが設けられており、ここに回転子が接触する。モータの最大回転速度は250 [rpm]程度、最大トルクは 7×10^{-3} [Nm]程度である。加圧機構・接触部構造などを変更することにより大出力化を図れば、ロボットの関節部や目、光線の制御などへの適用が可能である。

また、球面ではないが、小型超音波モータを複数個接続

することにより多自由度駆動を行うアクチュエータの研究も行われている。図6は、Ferreiraによるコンベヤ型ロボットである [15]。フレキシブルリンクで接続された48個の定在波型超音波モータ (SWUM) アレイを 47×29 [mm²]の範囲に組み込むことにより、上に載せた数十 [g]の物体を任意の方向に移動させることに成功している。それぞれの矩形板状超音波モータは、固有振動数十 [kHz]程度の高次(例えば4次, 6次)面外曲げモードを0.25 [μm]程度の振幅で励振することにより駆動される。さらなる小型大出力化が達成されれば、マイクロマニピュレーションのための優れたアクチュエータとなり得ると考えられる。

4. おわりに

電気学会リニアドライブ研究会では2002年4月から多次元ドライブシステム調査専門委員会を設置した。日本ロボット学会、電気学会、日本機械学会、精密工学会が主催する研究講演会や国際会議でも球面モータに関する研究発表が増加している。本稿がこの熱気をさらに盛り上げて球面モータ実用化の一助になれば幸いである。

参考文献

- [1] 矢野：“多自由度アクチュエータ”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.3，pp.330-333，1997。
- [2] 矢野，金子：“回転中心を同一とする多自由度アクチュエータの基礎的検討”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.6，pp.875-882，1993。
- [3] J. Wang, K. Mitchell, G.W. Jewell and D. Howe: “Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors,” Proc. IEEE-RSJ Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1798-1803, 2001.
- [4] 田中，和多田，鳥居，海老原：“多自由度アクチュエータの提案と設計”，第11回 MAGDA コンファレンス講演論文集，pp.169-172，2002。
- [5] B. Dehez, D. Grenier and B. Raucant: “Two-Degree-of-Freedom Spherical Actuator for Omnimobile ROBOT,” Proc. 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2381-2386, 2002.
- [6] T. Yano and T. Suzuki: “Basic Characteristics of the Small Spherical Stepping Motor,” Proc. 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02), pp.1980-1985, 2002.
- [7] K.M. Lee and C.K. Kwan: “Design Concept Development of a Spherical Stepper for Robotic Applications,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.7, no.1, pp.175-181, 1991.
- [8] D. Stein and G.S. Chirikjian: “Experiments in the Communication and Motion Planning of a Spherical Stepper Motor,” Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (DETC'00), pp.1-7, 2000.
- [9] K. Kahlen and R.W.D. Doncker: “Current regulators for multiple-phase permanent magnet spherical machines,” Proc. 2000 IEEE Industrial Application, pp.2011-2015, 2000.
- [10] 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。
- [11] 遠山，張，杉谷，長谷川，中村，宮谷：“超音波モータを用いたロボット用アクチュエータの開発（第2報）”，日本ロボット学会誌，vol.13，no.2，pp.235-241，1995。
- [12] 石井，天野，中村，上羽：“複合振動を用いた多自由度超音波アクチュエータの試作”，日本音響学会研究発表会講演論文集，1997 秋季 2，pp.1171-1172，1997。
- [13] 青柳，富川，高野：“多重モード円環振動子を用いた多自由度超音波モータの構成”，日本音響学会春季講演論文集（II），pp.979-980，1999。
- [14] K. Takemura and T. Maeno: “Design and Control of an Ultrasonic Motor Capable of Generating Multi-DOF Motion,” IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol.6, no.4, pp.499-506, 2001.
- [15] A. Ferreira: “Design of a Flexible Conveyer microrobot with Electromagnetic field-based friction drive control for microfactory Stations,” Journal of Micromechanics, vol.1, no.1, pp.49-67, 2000.



矢野智昭 (Tomoaki Yano)

1979年神戸大学大学院修士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所に改組。現在主任研究員。フライホイール車用変速機，自動縫製用腕機構，壁面歩行ロボット，多自由度アクチュエータの研究に従事。日本機械学会，電気学会，IEEE会員。（日本ロボット学会正会員）



前野隆司 (Takashi Maeno)

1986年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1990～1992年カリフォルニア大学バークレー校 Visiting Industrial Fellow。1995年慶應義塾大学専任講師，現在助教授。2001年ハーバード大学 Visiting Professor。博士(工学)。1995年日本音響学会技術開発賞受賞。1999年日本機械学会賞(論文)受賞。超音波モータ，触覚センサ，触覚ディスプレイ，進化ロボティクス，マニピュレータ，VR等の研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本音響学会，日本バーチャルリアリティー学会，IEEE等の会員。（日本ロボット学会正会員）