

解説

超音波モータ

Ultrasonic Motors

前野 隆 司* *慶應義塾大学

Takashi Maeno* *Keio University

1. はじめに

超音波モータは、弾性振動エネルギーの莫大さに着目した(株)新生工業の指田社長が、このエネルギーを機械的に取り出すことを目指して研究を重ねた末、1980年代に発明[1]した、日本独自の技術である。1986年に同社がUSR60-4-100として発売した[2]後、カメラメーカや精密メーカが実用化に乗り出した結果、現在では年間出荷台数が150万台程度(1999年)といわれている。生産台数から見ると、キヤノン(カメラの自動焦点用や複写機用、リング型超音波モータ・棒状超音波モータ)、ニコン(カメラの自動焦点用、リング型)、フコク(カメラの自動焦点用、車載用、リング型)、アスモ(自動車用、リング型)など、大量生産している企業の製品シェアが高いが、これらの企業の多くはモータ単体を販売していないため、ロボット研究者にとってはなかなか手に入らないのが難点である。一般に販売されている超音波モータとしては、表1[3][4]、表2[3][5][6]に示したものがあげられる。これら以外にも、国内外の企業や大学において様々な超音波モータの研究や試作が精力的に行われている。本解説では、ロボットのための超音波モータ数種を開発するとともに、ロボットのために数社の超音波モータを使用してきた筆者の視点から、超音波モータの原理と特徴を述べた後に、特徴的な超音波モータについての紹介を行う。

2. 超音波モータの原理と特徴

超音波モータは、圧電セラミックにより励振された機械振動子上の点に楕円運動(または往復運動)を生成し、この点にロータまたはスライダを接触させることにより機械的出力を取り出す摩擦駆動型のモータである。振動子の固有振動数が超音波領域(20[kHz]以上)にあるため超音波モータと呼ばれる。例えば、適切な固有振動モードを励振できる振動子形状を設計して、振動子上の1点に振幅1[μm]、

周波数30[kHz]の円運動を生成できたとすると、円運動の周速度は $2\pi \cdot (\text{振幅}) \cdot (\text{周波数}) = 188 [\text{mm/s}]$ となる。半径30[mm]のロータをこの点に1周期につき1回ずつ円運動の上端で接触させて回転させるとすると、回転数は(周速度)/(半径)/ $2\pi \cdot 60 = 60 [\text{rpm}]$ となる。つまり、半径30[mm]のリング状振動子に振幅1[μm]、周波数30[kHz]の円運動を生成させれば、無負荷回転数60[rpm]の回転式モータとなる。最大トルクは、(ロータの振動子への加圧力)・(摩擦係数)・(半径)なので、加圧力を10[N]、摩擦係数を0.5とすると、ざっと0.15[N·m](1.5[kgf·cm])となる。また、円運動する点にスライダを接触させれば、無負荷速度188[mm/s]、最大推力5[N](500[gf])のリニア超音波モータとなる。このため、超音波モータは、固有振動モード、周波数、振幅、加圧力などのパラメータを適切に設定しさえすれば、大学の研究室レベルでも割合簡単かつ自在に試作することのできるモータであるといえる。ただし、十分に信頼性の高い出力パワーや効率を有する超音波モータの製品化となると、企業努力の賜物にほかならない。

図1はリング型超音波モータの部分展開図を用いた駆動原理の模式図である。進行波が右へ進むと振動子突起上の点Pが反時計回りに楕円運動する結果、回転子(ロータ)が左へ移動する様子がわかる。このようなリング型超音波モータがポピュラーであるため、超音波モータといえればリング型、と思われている方も多いかもしれないが、実際には様々な形状がありえる。

超音波モータを一般の電磁モータと比較した場合の特徴を列挙すると、以下ようになる。

- (1) 低速高トルク(または推力)特性を有する
- (2) 応答性・制御性に優れ、微小な位置決めが可能
- (3) 無通電時に保持トルク(または保持力)を有する
- (4) 磁気の影響を受けず、電磁波を発生しない
- (5) 静粛性に優れる
- (6) 小型・軽量
- (7) 摩擦・摩耗が大きい
- (8) 高周波電源・複雑な駆動回路が必要

それぞれについて概説しよう。ロボットの研究者に、よく、「超音波モータはトルク(または推力)が小さいから

原稿受付 2002年10月29日

キーワード: Ultrasonic Motor, Actuator, Vibration, Piezoelectric Ceramic

*〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1

*Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

表 1 主な回転型超音波モータ [3] [4]

会社名	名称	タイプ	概略サイズ (mm)	無負荷回転数 (rpm)	最大トルク (mN-m)	定格回転数 (rpm)	定格トルク (mN-m)	用途	外販・サンプル
新生工業	USR30	リング型	φ30×9	300	100	250	50	一般用	○
	USR60	リング型	φ60×26.5	150	1000	100	500	一般用	○
フコク	USR12	リング型	φ12×11	550	5	400	2.9	一般用	○
	USR60-V1	リング型	φ60×44	90		75	400	真空用	○
	S80NN	リング型	φ80×36			60	1180	一般用	○
セイコーインスツルメンツ	超音波マイクロアクチュエータ	円板型	φ4.5×2.5	1400	0.02			一般用	○
		円板型	φ8.0×4.5	800	0.1			一般用	○
		円板型	φ15.0×7.6	240	0.2			一般用	○
本多電子	HSC15SC01	リング型	φ21.6×5.3	550	4.9	250	2.5	一般用	○
ミツバ	2軸駆動型	リング型	φ43×35	200	100			一般用	○
キャノン	リング型	リング型	φ62(単体)	80	88			カメラ用	
		リング型	φ77(単体)	40	157			カメラ用	
		棒状	φ11×25	950	6.9			カメラ用	
ニコン	ロッド型	棒状	φ12×42	250	20	180	8	一般用	○
キャノン精機	UN23NE	リング型	φ23×22	300	22			一般用	○
	UN30NE	リング型	φ30×30	300	68.6	200	34.3	一般用	○

表 2 主なリニア超音波モータ [3] [5] [6]

会社名	名称	タイプ	概略サイズ (mm)	無負荷速度 (mm/s)	最大推力 (N)	定格速度 (mm/s)	定格推力 (N)	用途	外販・サンプル
本多電子	HLS36SL53	三角形平板	48×43×6	450	2.94	200	1.47	一般用	○
ニコン	リニア型	矩形平板	52×23×15			80	0.59	一般用	○
オリンパス	リニア型	矩形平板	30×10×4	140	10			一般用	○
Nanomotion	HR-1	矩形平板	41.7×22×8	270	4			一般用	○
	HR-8	矩形平板		270	30			一般用	○

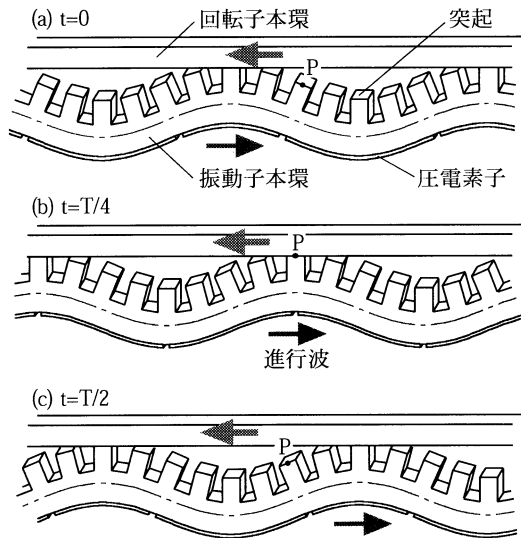


図 1 リング型超音波モータの駆動原理模式図

使えない」といわれるが、減速機なしの電磁モータと比較すると、はるかに低速高トルク（推力）(1)である。また、市販されている超音波モータの最大トルクは例えば新生工業のUSR60で1[N・m]（10[kgf・cm]）程度[2][3]にとどまるが、製品化のための信頼性向上の代償としてある程度低く抑えられている感がある。大学の研究室レベルでは最大トルク40[N・m]（400[kgf・cm]）[7]、最大推力92[N] [8]といったモータも試作されていることからわかるように、ポテンシャルとしては、ロボットへの使用に耐えうる低速高

トルク特性を有しているといえよう。

また、応答性・制御性(2)についていえば、超音波モータはダイレクト駆動モータであり、例えばN分の1に減速した電磁モータと比較すると慣性の影響がN²分の1であるので、ギアヘッド付きの電磁モータと比較すると当然応答性は優れる。筆者らの測定結果によれば、無負荷の場合、ざっと数[ms]で容易に目標速度に達する。また、例えば京セラのリニア超音波モータを用いた精密ステージは1[mm]以下の位置決め精度を有するなど、うまく使えば制御性もよい。筆者も、取り付け角度センサの分解能まで（例えば20万パルス/回転のロータリーエンコーダを取り付けてフィードバック制御すれば、そのエンコーダの分解能まで）の位置決めを容易に達成できることを経験している。ただし、一般ユーザにとって厄介なのは、リニアリティのいいドライバがなかなか手に入らないことだ。

電磁モータの電磁変換も、超音波モータの圧電変換も、電力（(電圧)・(電流)）を動力（(力)・(速度)または(トルク)・(角速度)）に変換するという意味では同じだが、電磁変換では電圧と速度、電流と力が対応するのに対し、圧電変換では電圧と力、電流と速度が対応する点異なる。厄介なのは、超音波モータは単に圧電変換を介するだけでなく、振動子の振動からロータ（スライダ）の運動への非線形な摩擦接触変換を介して駆動される点である。よく、「超音波モータの電気-機械変換を電磁変換のような線形微分方程式で表せないのか」と聞かれるが、残念ながら近似的な線形式でしか表せない。このため、一般にモータに併売さ

れている超音波モータのドライバは、入出力関係が線形ではなく、特に、最大トルク付近で急激に回転数が下がってしまう現象が見られることが多い。実は、ロータの振動子への沈み込みを増すなどの小細工を行うことによって、ある程度の調整は可能なのだが、一般のユーザに対してはこのあたりの“くせ”が制御性の悪さとして悪印象を与えている感がある。このようなわけで、超音波モータはポテンシャルとしては応答性・制御性がいいのだが、残念ながらフィードバック制御系も含めた完成度という意味では、制御用モータとしては発展途上にあるといわざるを得ない。しかし、非線形特性さえ克服すれば、精密制御やコンプライアンス制御に適したバラ色のダイレクト大トルクモータになり得るといえる。

無通電時に保持トルクを有する(3)という特徴は、無通電時に発生トルクが0となる電磁モータと比較してユニークである。自立型ロボットのアームを静止させておきたいときや、操作型ロボットのスレーブアームが物体と接触した感覚をマスターアームに提示したいときなどに有効な、「止めれば止まる」という特徴は、当たり前といえば当たり前だが、ロボットに適しているといえる。

磁気の影響を受けず電磁波を発生しない(4)という特徴は、すでにMRIなどの機器のためのロボットとしての実績もある。低周波の電磁波は体に悪いといわれ始めているので、もしかしたらこの点が超音波モータの最大の特徴になる可能性もなくなはないだろう。

また、減速ギアが不要であるため静粛性に優れる(5)という点は、ロボットの人間親和性という点から重要であろう。ジャージャーうるさいペットロボットは可愛くないかもしれない。ただし、超音波モータが発生する超音波の音圧は小さくないので、イルカやコウモリにとっては耐えがたい問題かもしれない。

小型・軽量(6)というのは、ギアヘッド付きの電磁モータに比べればその分小型化が可能、という意味だが、電磁モータの進歩もすばらしく、単位出力パワー当たりの体積や質量は残念ながら大差ない。もちろん、単位出力トルク当たりの体積・質量を電磁モータ単体と比較すると、超音波モータの方がはるかに小さいといえる。小型・軽量といえるか否かは用途次第といえる。

摩擦・摩耗が大きい(7)というのは、摩擦駆動タイプであるがゆえのネガティブな特徴である。ただし、近年販売されている超音波モータは、摺動材料の向上もあって、耐久時間1万時間程度の耐久性を持つようになりつつある。耐久性が要求されるロボットへの適用も、そろそろ本格化する気配である。

高周波電源・複雑な駆動回路が必要(8)である点も、使い勝手としては望ましくない。「DCモータのように直流電源をつないでただけで動いて欲しい」といわれると苦しいが、

コンピュータの進歩により大量生産品では駆動回路はワンチップ回路化されている。前に述べたリニアなドライバのニーズと合わせて、小さなドライバの開発が望まれるところである。筆者らも、非線形補償を行った超音波モータの汎用ドライバを開発中なので、ご期待いただきたい。

以上述べてきたように、超音波モータは発明から10数年を経た今もまだ発展途上にあり、電磁モータのように買って取り付ければすぐに使える、ということまではいっていない。しかし、電磁モータとは異なるユニークな特徴を適切に利用すれば、発展の余地は十分あると思う。特に、静かに、高精度かつ大トルク(推力)でものを動かしたいというロボットのニーズには基本的にマッチしている。まさに、ロボットとともに育っていくアクチュエータなのだと思う。

3. 量産・市販されている超音波モータ

超音波モータ連絡会という業界団体があり、新生工業、アスモ、キヤノン、セイコーインスツルメンツ、ニコン、本多電子、松下電器産業、ミツバ、フコクが参加している。もちろんこれらの企業以外にも超音波モータを開発している企業は数多いが、ページ数の都合から、これらの企業の製品を中心に説明を行う。詳細は、超音波モータ連絡会が共同で出版しているカタログ[3](非売品、問い合わせ先: d_takahata@fukoku-rubber.co.jp)を参照されたい。

表1に主な回転型超音波モータの概寸と性能を示す。リング型超音波モータが各社から販売されていることがわかる。図2には一例として新生工業のUSR60を示す。また、リング型以外にも、円板の曲げ振動を利用したもの(セイコーインスツルメンツ)、棒の曲げ振動を利用したもの(図3, キヤノン)、棒の縦振動とねじり振動を利用したもの(ニコン)など、様々なタイプがある。表2には主なりニア超音波モータの概寸と性能を示す。イスラエルのNanomotion社[6]が推力の大きいモータを販売するなど、海外メーカーの活動も活発化しつつある。

4. 研究中の超音波モータ

超音波モータの研究は日本で盛んであり、東工大の上羽、中村、黒澤、山形大の富川、東北工大の高野、東京農工大の遠山、神奈川大の辻野、大同工大の西堀、慶大の筆者らをはじめ、多くの研究室で様々な研究が行われている。

特にトルク・推力の大きいモータとしては、前出のメガトルクモータ[7](東工大上羽・中村ら、直径120[mm]、最大トルク40[N·m])があげられる。逆に、超小型のものとしては、黒澤・樋口らの直径1.4[mm]、高さ5[mm]のモータ[9]がある。また、一般の超音波モータは数10[kHz]から数100[kHz]程度の周波数を用いるのに対し、黒澤らの表面波モータ[10]は、周波数10[MHz]から数10[MHz]、

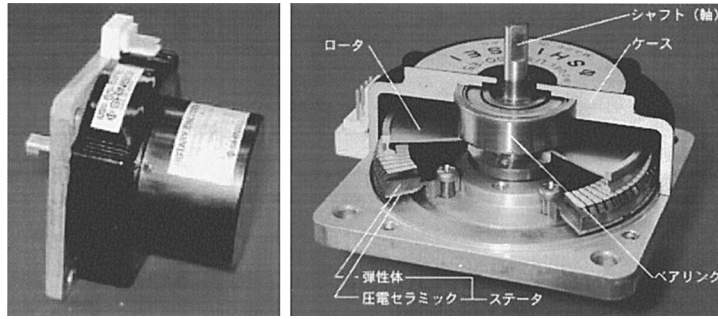


図2 リング型超音波モータ (新生工業 USR60)[2]

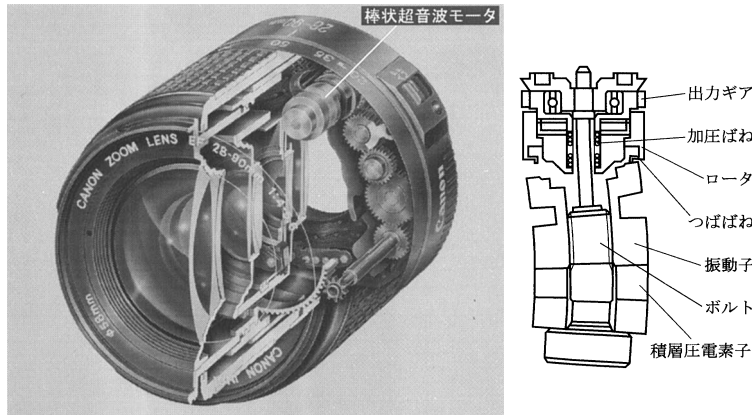


図3 棒状超音波モータを用いた AF レンズと棒状超音波モータの断面図 (キヤノン)

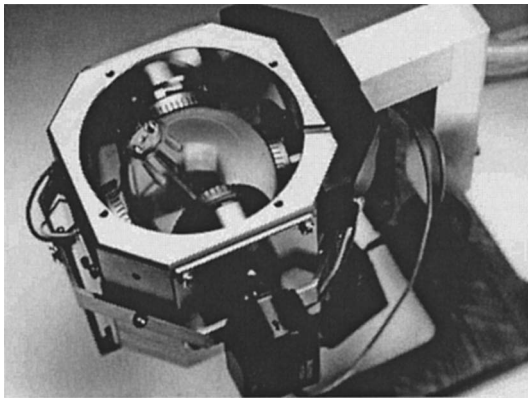


図4 リング型振動子を用いた球面超音波モータ [11]

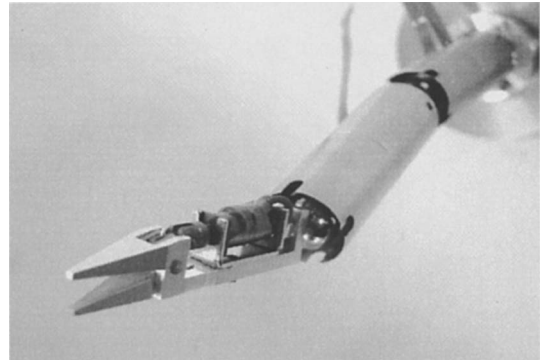


図5 多自由度超音波モータを用いた多自由度鉗子 [14]

振幅数 [nm] の振動により 4 [mm] 角のスライダを最大推力 3.5 [N], 最大速度 1.1 [m/s] で駆動するものであり, 今後の小型・大出力化が期待される。

また, 球を任意軸方向に回転させることのできる多自由度超音波モータとしては, 遠山らが, リング状振動子を複数用いた球面モータ [11] を開発している (図 4)。筆者らも, 単一の振動子 (直径 10 [mm]) に縦振動と二つの曲げ振動を励振して直径 10 [mm] の球を駆動するもの [12] や, 平板状振動子 (20 [mm]×20 [mm]×8 [mm]) に三つの曲げ振動を励振して直径 40 [mm] の球を駆動するもの [13] など

を開発し, 多自由度鉗子 [14] などに適用を図っている (図 5)。

これらの他にも, 新たな超音波モータの開発, 最適設計の研究, 制御の研究, 応用研究も盛んに行われている。多くは研究段階にあるためユーザから見ると完成度が低いといえるが, 今後の発展が期待される。

5. おわりに

超音波モータの研究者であり, ユーザでもあり, 超音波モータで学位を取得した筆者にとって, 超音波モータは特に愛着のあるアクチュエータである。徐々に進展しつつある

この日本発の技術が、世界をリードする日本のロボット工学への適用を起爆剤に今後大きく発展していくことを願ってやまない。ロボット工学の研究者・技術者の皆さんには、是非、掲載した企業や大学にコンタクトを取って、ロボットへの適用や共同研究を行って頂けたらと思う。ご質問・ご意見等あれば、気軽に問い合わせ願いたい。また、誌面の都合で残念ながら割愛した超音波モータも多々あることを記し、超音波モータの研究開発を行っておられる多くの研究者・技術者に敬意を表したい。

電磁モータが世に出たばかりの頃、故松下幸之助氏は、「将来、家庭で多くのモータが使われるようになる日が必ず来る」といわれたという。僭越ながら先人にあやかり、「将来、ロボットのために多くの超音波モータが使われるようになる日が必ず来る」と願いつつ、筆を置こう。

参 考 文 献

- [1] 指田：超音波振動を利用したモーター装置，特開昭 55-125052 .
- [2] <http://www.tky.3web.ne.jp/ usrmotor/topj.html>
- [3] 超音波モータガイド．超音波モータ連絡会，2001.
- [4] <http://www.canon-prec.co.jp/>
- [5] <http://www.olympus.co.jp/LineUp/Technical/USLM/>
- [6] <http://www.nanomotion.net/>
- [7] J. Satonobu, N. Torii, K. Nakamura and S. Ueha: "Construction of Megatorque Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor," Jpn. J. Appl. Phys., vol.35, part 1, no.9B, pp.5038-5041, 1996.
- [8] 尹, 石井, 中村, 上羽: "高出力超音波リニアモータ", 超音波 TECHNO, pp.2-5, 2001.
- [9] Takeshi Morita, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Toshiro

Higuchi: "A Cylindrical Micro Ultrasonic Motor Using PZT Thin Film Deposited by Single Process Hydrothermal Method," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Conl., vol.45, no.5, pp.1178-1187, 1998.

- [10] 黒澤：“弾性表面波リニアモータ”，日本音響学会誌，vol.55, no.7, pp.522-528, 1999.
- [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] Kenjiro Takemura and Takashi Maeno: "Design and Control of an Ultrasonic Motor Capable of Generating Multi-DOF Motion," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.6, no.4, pp.499-506, 2001.
- [13] 大野，竹村，前野：“矩形平板状多自由度超音波モータの開発”，第1回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会講演論文集，no.01-11, pp.111-112, 2001.
- [14] Kenjiro Takemura and Takashi Maeno: "Development of a Master-Slave System for Active Endoscope Using a Multi-DOF Ultrasonic Motor," Transactions on Control, Automation and Systems Engineering, vol.4, no.1, pp.17-22, 2002.



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。工学博士。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，ロボット，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学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)