超音波モータを指に持つロボットハンドの駆動特性*

(第3報, 振動量による把持力検出と外乱の影響)

近藤 節哉^{*1}, 西堀 賢司^{*2}, 長澤 正明^{*3}Driving Characteristics of Robot Hand with Fingers
using Vibration-Type Ultrasonic Motors
(3rd Report, Detection of Grasping Force by Decrease in Vibration
and Influence of Disturbances)Setsuya KONDO, Kenji NISHIBORI^{*4} and Masaaki NAGASAWA^{**} Department of Computer Mechanical System Engineering, Daido Institute of Technology,
10-3 Takiharuro-cho, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi, 457-8530 Japan

A vibration type ultrasonic vibrator works as an ultrasonic motor when it is pressed slantwise against the surface of an object. In our previous paper we made a trail robot hand with three fingers that each works as an ultrasonic motor. This robot hand can simultaneously grasp a cylindrical body and rotate it about its axis. High torque is obtained when an optimum contact force is used for the ultrasonic motor. We propose a detection method to measure the grasping force of the robot hand by the change in the amplitude of vibration. It was confirmed that the vibration amplitude detected by a piezo-element on the vibrator was decreased almost linearly with increase in the grasping force of robot hand. The grasping force affects very little change in the resonance frequency of the vibrator in comparison with the temperature by its self-vibration.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Ultrasonic Motor, Robot Hand, Actuator, Grasping Force, Resonance Frequency

1. ま え が き

ロボットハンドが円柱状物体をつかんでその軸回りに回転させる動作は、Peg-in-holeのような軸部品のはめあい時に軸部品を回転させると容易であることから望まれる。また、宇宙空間におけるトラス構造物や配管の組立作業などへの利用も考えられるが、重量物を宇宙に運ぶ莫大なコストと宇宙空間にて機械的可動部に用いる潤滑剤の飛散を考慮すると、軽量で可動部が少ないロボットハンドが望まれる。従来、物体をつかんで回す動作を実現するために多自由度のロボットハンドが研究されているが⁽¹⁾⁽²⁾、ハードウェア、ソフトウェアともに高度な技術が要求されるため、軽量かつ簡単な構造で円柱状物体をつかんで回すロボットハンドの開発が望まれている。

著者らはさきに、ランジュバン形超音波振動子を物体の表面に対して傾けて接触させ圧着力を加えると、物体との間に生じる摩擦力によって回すことのできる

振動片形超音波モータ(以下超音波モータと呼ぶ)になることに着目して、3個の超音波振動子をハンドの指に用いることにより円柱状物体を把持したときに超音波モータを構成するロボットハンドを試作した。超音波モータは小形・軽量、巻線が不要で構造が簡単、ダイレクトドライブが可能、応答性が速いなどの特徴を持ち^{(3)~(6)}、ロボットハンドの指関節を操作させることなく円柱状物体をつかんで回すことができることを明らかにした⁽⁷⁾⁽⁸⁾。さらに、ロボットハンドが円柱状物体を回転させる場合において、超音波モータの速度制御に駆動電圧を印加する時間割合を変化させるパルス幅変調(PWM: pulse width modulation)方式を提案し、超音波振動子の振動速度とロボットハンドの駆動特性に関する実験から、その有効性を明らかにした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。このロボットハンドが円柱状物体を把持して回す動作において、超音波モータと円柱状物体との接触角度を $\theta=45^\circ$ とし、適切な圧着力(把持力)を与えると良好なトルク特性が得られることがわかった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本研究では、ロボットハンドが円柱状物体を把持すると、超音波モータに圧着力が加わり振動子の振動が拘束されて振動振幅が低下することに着目し、振動量の変化により把持力を検出する方法を提案する。この

* 原稿受付 2004年1月21日。

^{*1} 正員、大同工業大学大学院工学研究科(〒457-8530 名古屋市南区滝春町10-3)。^{*2} 正員、大同工業大学工学部。^{*3} 学生員、大同工業大学大学院工学研究科。

E-mail: nishibo@daido-it.ac.jp

場合、超音波モータの振動特性は共振周波数が変化すると大きく影響を受けるため、共振周波数に及ぼす外乱の影響を理論および実験から調べた。共振周波数の変化は、把持力検出のみならずロボットハンドの駆動特性に直接影響を及ぼすことから重要である。

2. 超音波モータの動作原理と外乱の影響

2.1 超音波モータの動作原理 図1に振動片形超音波モータの基本構成を示す。ランジュバン形超音波振動子は弾性体であるアルミニウムの間にはさまれた圧電セラミックに交流電圧を印加することにより弾性体中にて縦波が発生する。このとき、発生する縦波の半波長 $\lambda/2$ を超音波振動子の長さ L に一致するように選ぶと、弾性体両端における振動変位は最大となり、共振周波数 f_0 は次式で求められる。

$$f_0 = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{2L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C は弾性体中の縦波の伝ば速度であり、アルミニウムの場合、約 5×10^3 m/s である。超音波振動子をすべてアルミニウムとして近似し、長さ $L = 66$ mm のときの共振周波数 f_0 を式(1)より求めると約 38 kHz となる。この値は実測値に近い値である。

超音波モータは、超音波振動子の先端をロータの表面に対して角度 θ 傾けて圧着力(接触力)を加えることにより構成される。超音波振動子先端の軌跡は図2に示すように、ロータの表面にて振動エネルギーが拘束されるため表面を押す接触運動と縮むときの自由振動により実線で示す半円運動を描き、接触運動によって生じる摩擦力にてロータを回すことができる。このとき、圧着力を増加することにより接触面 s が増加し大きな摩擦力が得られるが、振動エネルギーの拘束期間が増加するため x 方向の振動量が減少すると考えられる。なお、前報⁽⁹⁾にて振動子端面における x 、

y 方向の振幅 U 、 V の位相差から円軌跡の x 軸に対する傾き角 ε は $\theta = 45^\circ$ のとき $\varepsilon \approx 0.5^\circ$ で極めて小さい値であった。

2.2 外乱の影響 以下に超音波モータの共振周波数に及ぼす外乱の影響について理論的な考察を行う。

2.2.1 熱による影響 振動片形超音波モータはひずみエネルギーを機械的振動に変換するときに熱が発生するため、超音波振動子は温度上昇による膨張のため長さ L が変化する。振動子の線膨張率を α とすると、温度変化 ΔT_a に対する長さの変化 ΔL は次式で表せられる。

$$\Delta L = \alpha L \Delta T_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

発熱による振動子の長さの変化を考慮すると、共振周波数 f_0 は式(1)より次式で表せられる。

$$f_0 = \frac{C}{2(L + \Delta L)} = \frac{C}{2L(1 + \alpha \Delta T_a)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、超音波振動子をすべてアルミニウムとして近似すると、その線膨張率は $\alpha = 2.3 \times 10^{-5}$ /K である。また、弾性体であるアルミニウム中の縦波の伝ば速度 C は温度が上昇すると低下することが知られている。以上のことから、共振周波数 f_0 は自己発熱によって低くなることが予想される。

2.2.2 圧着力による影響 図3は超音波モータがロータを回す状態を等価回路で示したものである。 C_a は圧電セラミックの等価コンデンサ、 C_m 、 L_m 、 r_o はそれぞれ超音波振動子のコンプライアンス、質量、内部抵抗を表し、 L_L 、 D_L 、 R_L はそれぞれロータに生じる慣性力、摩擦力、粘性力に相当する。超音波振動子を効率良く駆動するためには等価回路の C_m と L_m が共振を起こす周波数で電力を供給する必要があるため、共振周波数 f_0 は次式で表せられる⁽⁶⁾。

Fig. 1 Structure of ultrasonic motor

Fig. 2 Model of driving force of ultrasonic motor

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_m L_m}} \dots\dots\dots (4)$$

超音波振動子の接触運動と自由運動は整流用ダイオード D によって表現される。すなわち、超音波振動子が縮むとき等価ダイオード D は順方向バイアスとなり、超音波振動子もロータも自由運動となる。振動子は自由振動状態となり、等価電流 i_2 で表される。負荷側はロータや負荷の慣性によるフリーホイール運動となり、等価電流 i_3 を形成する。一方、超音波振動子が伸びるとロータとの接触が生じ、等価ダイオード D は逆バイアスとなり、速度に対応する電流 i_1 は L_L , D_L , R_L で表される負荷回路を流れる。このとき、超音波振動子の先端では機械的スプリング作用が生じるため、この作用がコンデンサ C_s に相当する。超音波振動子がロータと接触している状態を常に一定方向の力を受ける直線運動と仮定すると、等価回路において L_L による電圧降下はなく L_L は無視できる。また機械的損失である R_L は負荷抵抗であるため、超音波振動子の共振周波数には影響を及ぼさないものと考えられる。このことから、超音波モータの共振周波数 f_0 は式(4)にスプリング作用 C_s が直列に加わり、次式

のように表せられる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_m C_s}{C_m + C_s} L_m}} \dots\dots\dots (5)$$

スプリング作用の成分 C_s は圧着力により生じるため、超音波モータの共振周波数 f_0 は圧着力により高くなることが予想される。

3. 実験装置および方法

図4は本研究にて試作したロボットハンドの構成を示す。試作したロボットハンドは3本の超音波振動子をハンドの指として回転体と接触する位置が均等になるように配置し、円柱状物体を把持したとき振動片形超音波モータを構成する。この機構によりハンドは円柱状物体を把持すると同時に回転させることができる。超音波振動子のロボットハンドへの取付けは、振動子の振動を妨げないように縦波の節となるフランジ部にOリングを介して取付けてある⁽⁹⁾。また、ハンドの開閉のため停止時に自己保持特性を持つ進行波形超音波モータを用いることにより一定の把持力を保持する機構を簡単な構造にて実現した。

図5に提案する超音波モータの駆動ブロック図を示す。超音波モータにその振動変位をピックアップする圧電素子を取付け、圧電素子からの信号の変化によりロボットハンドの把持力を検出する方法を考案する。なお、圧電素子からの信号は高周波電圧であるため整流回路を用いて直流電圧に変換し、A/Dコンバータを介して測定した。また、超音波モータの駆動周波数 f を変動する共振周波数 f_0 に追従させるため位相同期ループ(PLL: phase locked loop)方式を用い⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、超音波モータに取付けた圧電素子からの電圧信号をPLL回路にフィードバックさせた。ここで、PLL-IC

Fig. 3 Equivalent circuit of ultrasonic motor

Fig. 4 Configuration of robot hand having three ultrasonic motors as the fingers

Fig. 5 Block diagram of driving circuit for ultrasonic motor

に LM 565 CN を使い, 起動時に共振周波数 f_0 にほぼ同期した駆動周波数 f が得られるように, 自走発振周波数を起動時の共振周波数 f_0 付近に設定した。なお, ロボットハンドでは 3 本の超音波モータをそれぞれ独立の PLL 回路にて駆動した。

超音波モータの振動特性は, 超音波振動子端面の振動速度の振幅をレーザドップラー振動計を用いて測定した。また, ロボットハンドの把持力の校正にはハンドのフレームに取付けたひずみゲージを用いた。実験は超音波振動子と回転体との接触角度 θ を最適な $\theta=45^\circ$ とし⁷⁾, 回転体は直径 $d=64$ mm の塩化ビニル製の円柱状物体を用いて行い, それぞれの超音波振動子を共振周波数(約 38.5 kHz), 駆動電圧 60 V_{p-p} で動作させた。使用した本多電子製超音波振動子 HEC-1540 P 2 BF の主な仕様を表 1 に示す。

4. 実験結果および考察

4・1 超音波振動子単体の振動特性 図 6 は超音波振動子単体の表面温度 T_a と共振周波数 f_0 の関係を示す。実験は超音波振動子に圧着力 N を加えずに動作させ, 振動子の一方の端面に貼ったサーミスタ温度プローブにより表面温度 T_a を計測した。共振周波数 f_0 は, 駆動周波数を変化させてレーザドップラー振動計により振動子端面の振動速度の振幅が最大となる周波数から求めた。図 6 から共振周波数 f_0 は表面

Table 1 Specifications of ultrasonic vibrator

Length	66 mm
Diameter	15 mm
Resonance frequency	38.5(±1.0) kHz
Resonant impedance	65 (±30) Ω
Electric capacity (at 1 kHz)	930 (±15%) pF

Fig. 6 Change in resonance frequency f_0 for temperature T_a of ultrasonic motor

温度 T_a が上昇するにつれて低くなり, 30°C の温度上昇で約 0.5% 減少することがわかる。これは式 (3) より超音波振動子の発熱による線膨張と弾性体中の振動の伝ば速度 C が低下するためと考えられる。超音波振動子をアルミニウム(線膨張率 $\alpha=2.3 \times 10^{-5}/K$)と仮定すると, 式 (3) から線膨張による影響は約 0.07% と小さく, 伝ば速度 C の低下による影響が大きいと思われる。

図 7 は圧着力 N による超音波振動子の共振周波数 f_0 の変化を示す。実験は, 超音波振動子と回転体との接触角度 $\theta=45^\circ$ とし, 圧着力 N を $0 \text{ N} \leq N \leq 10 \text{ N}$ の範囲で変化させ, 超音波振動子端面における振動速度の振幅が最大となる共振周波数 f_0 を計測した。共振周波数 f_0 は圧着力 N の増加に伴いほぼ直線的に増加していることがわかる。このとき, 共振周波数の増加割合は圧着力 $N=10 \text{ N}$ で約 0.1% である。共振周波数の増加は式 (5) から回転体との接触により振動子先端のスプリング作用を表す等価コンデンサ C_s の容量が加わることで説明できる。

Fig. 7 Change in resonance frequency f_0 for contact force N

Fig. 8 Change in vibration amplitude U for driving frequency f

図8は超音波振動子単体の駆動周波数 f に対する振動特性を示す。ここで、振動振幅 U は共振周波数 $f_0=38.6\text{ kHz}$ における最大振幅 U_0 にて無次元化してある。振動振幅 U は駆動周波数 f が共振周波数 f_0 から離れるにつれて急激に減少しており、 $\pm 0.5\%$ 以上の変化において20%以下になることがわかる。このことから、超音波モータの共振周波数 f_0 が自己発熱により0.5%変化した場合、超音波振動子の振動エネルギーは急激に減少し、モータの駆動特性は大きく劣化することが考えられる。これに対し、圧着力による共振周波数 f_0 の変化が0.1%以下の場合は、図8からモータの駆動特性に及ぼす影響は少ないと考えられる。前報⁽⁷⁾にて、ロボットハンドの最適な把持力(圧着力) N は $2.45\text{ N} \leq N \leq 3.43\text{ N}$ であったことから、超音波モータは自己発熱により変化する共振周波数に応じて駆動周波数を追従させることにより安定した駆動特性が得られると考えられる。

4.2 PLL方式による駆動特性 図9は超音波振動子端面の振動特性の時間的変化をPLL方式を用い

Fig. 9 Temporal changes in vibration amplitude under the conditions with and without PLL

Fig. 10 Difference in torque characteristic between single USM and robot hand

ない場合と用いた場合で比較したものである。PLLを用いずに駆動周波数 f を一定にした場合、振動振幅 U は時間 t の経過に伴い減少し、20分経過後は開始時に比べ約30%減少している。これは超音波振動子の自己発熱により共振周波数 f_0 が変化したためである。起動時において振幅 U は急激に減少するが時間の経過に伴いその変化が緩やかになるのは、超音波振動子中にて熱飽和が生じることにより共振周波数 f_0 の変動が減少するためと考えられる。これに対し、PLLを用いて駆動した場合、振動振幅 U の時間の経過に伴う減少はわずか(20分で約5%)であり、安定した振動特性から駆動周波数 f が変化する共振周波数 f_0 に追従していることがわかる。

図10は超音波モータ単体と3本の超音波モータをPLL方式で駆動したロボットハンドのトルク-回転数特性の比較を示す。ここで超音波モータと回転体との圧着力 N は最大トルクを得るのに最適な圧着力 $N=3.0\text{ N}$ として実験を行った⁽⁷⁾。ロボットハンドにおける特性曲線は超音波モータ単体に比べ、無負荷時の回転数 n はわずかに低下するが、最大トルクはほぼ3倍となることがわかる。3本の超音波モータをPLL方式を用いずに同一周波数で駆動した前報⁽⁷⁾では、ロボットハンドの最大トルクは超音波モータ単体に対し約2.3倍であった。このことから、3本の超音波振動子をそれぞれPLL駆動すると、各振動子を常に最良の振動状態で駆動できることがわかる。

4.3 把持力特性 図11は圧着力による超音波振動子端面の振動振幅と圧電素子(ピックアップ)からの出力電圧の変化を示す。振動振幅 U と出力電圧 V_p はそれぞれ圧着力がない $N=0\text{ N}$ のときの値で無次元化してある。なお、実験はPLLを用いて駆動することにより自己発熱による振動特性の影響を取り除い

Fig. 11 Relation between pickup voltage and vibration amplitude for contact force N

Fig. 12 Response curves of pickup voltage V_p and strain gauge output V_e when grasping and releasing

た。圧着力 N の増加に伴い振動子端面の振動振幅 U はほぼ直線的に減少することがわかる。これは圧着力を加えることにより接触時に振動が拘束され振動振幅が低下したためと考えられる。また、圧着力 N に対するピックアップの出力電圧の比 V_p/V_{p0} の変化は、振動振幅の比 U/U_0 の変化とほぼ同じであることから、圧電素子は超音波振動子の振動状態を検出するセンサとして有効であることがわかる。この実験結果から、圧着力 N とピックアップの出力電圧 V_p の関係は次式にて求めることができる。

$$V_p/V_{p0} = 1 - KN \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K は 1 N 当たりの減少率で $K=0.043/N$ である。

図 12 は図 4 に示したロボットハンドが物体を把持したときと放したときの超音波振動子のピックアップ出力電圧の応答特性を示す。比較のため、従来から把持力検出によく用いられているひずみゲージの結果も示してある。ひずみゲージの出力電圧 V_e は物体を把持したときの定常値 V_{e0} で無次元化してある。実験は $t=0$ ms 時に $N=8$ N の把持力を加え、30 ms 後に $N=0$ N とした。ピックアップおよびひずみゲージの出力はともに立上り、立下り時間に約 5 ms の遅れが生じていることがわかる。これは把持動作に用いている進行波形超音波モータの応答遅れと考えられる。ひずみゲージの場合、出力信号 V_e は把持力を加えたときの立上り、把持力を開放したときの立下りともに振動しながら 15 ms 後に定常値に収束していることがわかる。この振動要素はハンドのフレームにおけるたわみによるものと考えられる。これに対し、圧電素子

(ピックアップ)の場合、出力信号 V_p の立上りと立下り時間はひずみゲージと同程度であるが、応答特性は振動せずに緩やかに定常値に収束している。これは、ピックアップ電圧が圧着力による振動子の振動量の変化を直接検出しており、フレームのたわみ振動の影響を受けにくいことを表している。以上のことから、超音波モータの振動量の変化を圧電素子により直接把持力を検出する手法は有効であるといえる。

5. 結 論

振動片形超音波モータを指に持ち円柱状物体を把持して回転させるロボットハンドにおいて振動特性および駆動特性に及ぼす外乱の影響について調べた。そして、円柱状物体を回転させるときの把持力を超音波振動子の振動量の変化から検出する方法を提案し、実験的に以下のことを明らかにした。

(1) 超音波モータの振動特性は自己発熱による共振周波数の変化によって大きく影響される。しかし、圧着力による共振周波数の変化は小さく、影響は少ない。

(2) 超音波振動子の端面における振動振幅は圧着力の増加に伴いほぼ直線的に減少する。

(3) 超音波振動子に取付けた圧電素子からの出力電圧の変化割合はレーザドップラー振動計による振動子端面の振動振幅の変化割合と一致する。

(4) 一定の把持力を加えたときの超音波振動子に取付けた圧電素子の応答特性は振動要素がなく緩やかに定常値に収束する。

(5) 提案する超音波振動子の振動状態にて把持力を検出する手法は有効である。

(6) 3 個の超音波モータをそれぞれ PLL 駆動することにより、ロボットハンドの最大トルクは超音波モータ単体のほぼ 3 倍の値が得られる。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 C(2)12650257 の補助によるものである。また、超音波振動子を提供していただいた本多電子(株)の宮本年昭氏に感謝する。

文 献

- (1) 鈴森康一・田中裕久、フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究(第3報、パラレル結合によるロボットハンドへの適応)、機論, 57-536, C (1991), 1261-1266.
- (2) 松岡毅・長谷川勉・本田久平・桐木利弘、作業状態観測と評価に基づく多関節多指ハンド物体操作システム、日本ロボット学会誌, 17-5 (1999), 696-703.
- (3) 坪井実、小型で大力の超音波モータ、日経メカニカル, 89-5 (1981), 100-104.
- (4) 内野研二・熊田明生、超音波モータ/アクチュエータ、

- (1986), 85-91, トリケップス.
- (5) 内野研二・圧電/電歪アクチュエータ, (1986), 180-183, 森北出版.
- (6) 見城尚志・指田年生, 超音波モータ入門, (1991), 73-103, 総合電子出版.
- (7) 西堀賢司・大熊繁・小幡洋久, 超音波モータを指にもつロボットハンドの駆動特性, 機論, **60**-575, C (1994), 2358-2363.
- (8) Nishibori, K., Kondo, S., Obata, H. and Okuma, S., Robot Hand with Fingers using Vibration-Type Ultrasonic Motors (Driving Characteristics), *J. Robotics Mechatronics*, **15** 6 (2003), 588-594.
- (9) 西堀賢司・小幡洋久・近藤節哉・大熊繁, 超音波モータを指にもつロボットハンドの駆動特性(第2報, PWMによる駆動特性), 機論, **64**-623, C (1998), 2557-2562.
- (10) Nishibori, K., Obata, H., Kondo, S. and Okuma, S., PWM Driving Characteristics of Robot Hand with Fingers using Vibration-Type Ultrasonic Motors, *Proc. 23rd Int. Conference Industrial Electronics, Control, Instrumentation (IECON'97)*, **3** (1997), 1355-1360, New Orleans, USA.
- (11) 泉野有司・中岡睦雄, 進行波型超音波駆動系の適応制御技法による高性能化, 電気学会論文誌, **110**-11, D (1990), 1956-1960.
- (12) 杉山昌・金子誠司, 超音波工学, (1993), 58-60, コロナ社.