

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656113

研究課題名(和文) 高速度顕微鏡を用いたリハビリ用超音波モータの開発

研究課題名(英文) Development of the Rehabilitation Ultrasonic Motor using High-speed Microscope

研究代表者

真下 智昭 (Mashimo, Tomoaki)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・テニユアトラック助教

研究者番号：20600654

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：高速度カメラによって超音波モータが発生する超高速、超微小の楕円運動を観察できるシステムを構築し、モータの出力と楕円運動の関係を明らかにした。楕円運動に基づく超音波モータの出力のモデルを開発し、実験でモデルを検証し、よく一致することを確認した。また、人とのコンプライアンスを高めることを目的として、モータドライバやロボットアームを開発し、超音波モータのトルク制御やバックドライバビリティを瞬時に実現することも可能にした。

研究成果の概要(英文)：We build a mechanical model with the amplitude of the elliptical motion generated in ultrasonic motors to predict the motor output such as torque and revolution. The high-speed camera with high-power lens that can observe the elliptical motion verifies how the elliptical motion relates the motor output experimentally. Such modeling approach is useful for control of the motor output such as the rotational speed and torque. Torque control and backdrivability, important characteristics in the view of human-machine interface, is examined in a robot system with original motor driver.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：アクチュエータ 高速度カメラ 動力学解析 コンプライアンス制御

1. 研究開始当初の背景

我が国が迎える超高齢化社会において、高齢者の身体能力低下を防ぎ、身体機能の回復に努め、社会への参加を維持することは極めて重要な課題である。これまでに、リハビリを支援するための様々なトレーニングマシンが提案されているが、電磁モータを用いて開発されているものがほとんどである。電磁モータは単位体積あたりトルクが小さいため、減速機と併せて使われるのが一般的である。しかし、減速機付き電磁モータでは、騒音が発生する、バックラッシュ（ガタ）が大きい、バックドライバビリティがない、などの問題が生じることになり、これらを根本的に解決する研究開発が望まれている。

2. 研究の目的

電磁モータではなく、トレーニングマシンに超音波モータを用いれば、以下のような優れたモータの特性を活用することができる。(1)発生音が超音波領域であるため静粛である、(2)超高速振動で駆動するためトルクリップルがない、(3)減速機を使わないダイレクトドライブ駆動でバックラッシュが無い、(4)ロータイナリーシャが小さく応答性の優れたトルク制御が可能である、(5)制御によって瞬時にバックドライバビリティを実現できる。しかしながら、超音波モータを制御するにも、そのトルク生成の力学モデルは詳しく分かっておらず使いにくいのが現状である。超音波モータの駆動原理は、ステータ表面（ロータとの接触面）に楕円運動が生じ、ロータに駆動力を伝達するというものである。この楕円運動は、駆動原理そのものであるにも関わらず、超高速（数マイクロ秒）、かつ非常に小さい振幅（数ミクロン）という困難さもあり観察することはできなかった。過去にはモデル化も報告されているものの、楕円運動やトルク生成に関する部分は簡略化されておりトルク発生するメカニズムは明らかになっていない。

これまで楕円運動を実際に観察することはできないでいたが、近年の高速カメラなどに用いられるC-MOSイメージセンサの高速化および高精度化に伴って、超音波領域の運動を観察できる性能まで向上してきた。本研究に先立って、申請者らは超音波振動を観察できる高速顕微鏡システムを構築し、超音波モータの楕円振動を観察することに成功した。これを用いれば、実際の楕円運動観察によるトルク生成メカニズムのモデル化を行うことができる。

本研究では、超音波モータの楕円運動とトルクの関係性を詳しく調べトルク発生メカニズムをモデル化し、超音波モータの最適化を行う。また超音波モータをトレーニングマシンで使うことの利点である、トルク制御、バックドライバビリティを素早く実現することができる制御システムを、モータドライブ回路を含めて開発し、駆動テストを行う。

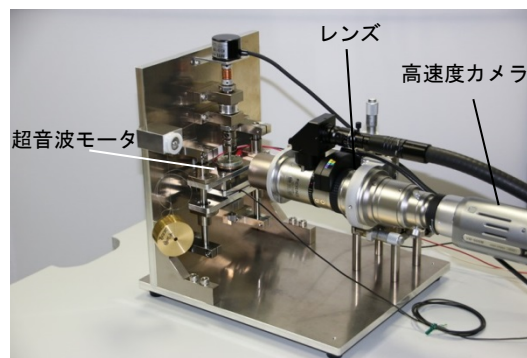


図1 高速度カメラを用いた実験装置

3. 研究の方法

高速顕微鏡によって得られる楕円運動と、モータの測定によって得られるトルクや回転数の関係を調査し、楕円運動に基づいたトルク発生モデルを明らかにする。さらに、モータドライバを開発し、モデルに基づいて、自由にトルクや回転数を制御できるシステムの構築を行う。

(1) 楕円運動の観察と振幅の測定

まず、超音波モータの楕円運動の振幅を測定できる実験装置を開発した(図1)。装置は、超音波モータ、波形発生器、電力アンプ、高速度カメラ、レンズ、およびレンズを移動させるためのXYZステージで構成される。楕円運動観察に用いる超音波モータの直径は約30mmである。電圧の振幅や周波数は装置によって自由に変えることができる。高速度カメラの性能は、最大フレームレートが230,000 fpsでこのときの画素数が160×32 pixelsであり、超音波モータの振動が観察可能なものである。超音波モータ側面の、ロータ接触面に近い位置の楕円運動を観察できるように高速度カメラのレンズをフォーカスする。楕円運動の軌跡を見やすくするためのマーカーとして、ステータ側面にはアルミ粒子を塗布し、光源装置よりアルミ粒子に光を照射する。楕円運動の周波数は約46 kHzであり、高速度カメラのフレームレートは230,000 fpsであるから、一周りに約5フレーム撮ることができる計算になる。撮像した動画から、連続的な5フレーム取り出したものを図2に示す。図中の丸印で示すようにフレーム中のある一点に注目してみると、この点の動きは楕円運動となっていることが観察される。

(2) 楕円運動とトルク関係のモデル化

高速度カメラによって撮影された楕円運動に基づいて、画像処理を行うことにより、楕円運動の振動振幅を知ることができる。そこで、超音波モータが定常状態において発生している、周方向の振幅（モータ軸を鉛直とした場合の横方向）と、法線方向（同場合の縦方向）の振幅を測定した。その結果によると、周方向変位と、法線方向変位の位相は、概ね $\pi/2$ だけ位相がずれており、この振動は楕円運動であることがわかった。また、周方

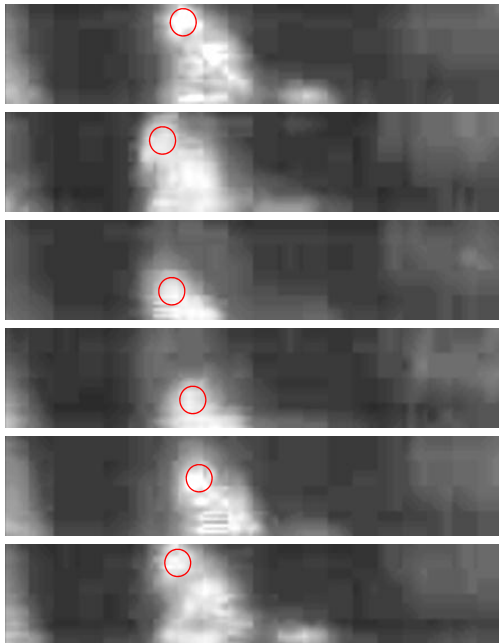


図2 高速度カメラで撮影した楕円運動

向の振幅は約 $1.5 \mu\text{m}$ であり、の振幅は約 $2 \mu\text{m}$ であり、法線方向にやや大きい楕円運動を生成していることを観察にて確認することができた。

超音波モータの楕円運動とモータ出力の関係を明らかにするために、超音波モータが発生するトルクと回転数と、楕円運動振幅を同時に測定できる装置を開発した。プーリーを用いて負荷を巻き上げることによって、そのトルクを算出する。回転軸にはロータリーエンコーダを取り付けることによって回転数を計測することが可能である。ロータとステータ間の押し付け力は、機構によって与えられ、ネジの締め付けを変えることによって、与圧の大きさを自由に調整することができ、また与圧の値はロードセルで測定ができるようにしている。実験では、印加電圧の振幅は 300Vp-p で一定とし、周波数を変えたときの、回転数とトルク、および楕円運動の振幅を測定する。

(3) 超音波モータのトルク制御とバックドライバブルを実現するシステム

トレーニングマシンのような人と接する機械においては、人が突然として、機械に予想できないような動きをする場合が想定される。そのような場合に、人の意図に柔軟に従うコンプライアンスやバックドライバリティが重要になる。このような機能を実現し実験検証するため、モータドライバ回路および簡易なロボットアームを用いて行う。

一般に、超音波モータを制御するときによく用いられるのは、印加電圧の周波数を操作することによって速度を変える周波数制御方式である。印加電圧の周波数が、共振周波数に近い時はステータの振幅は大きく高い

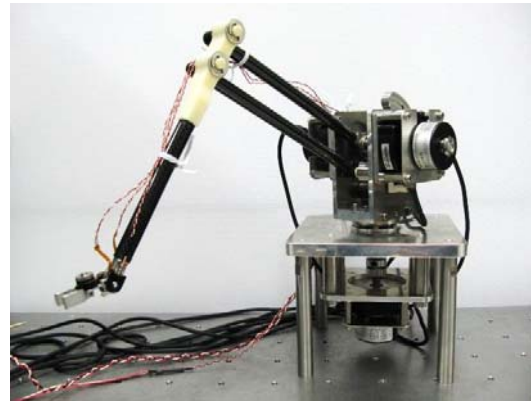
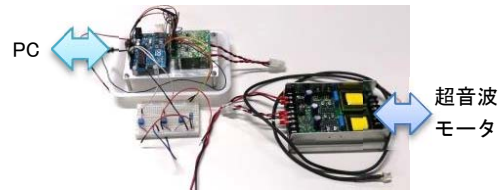


図3 制御実験を行うロボットシステム

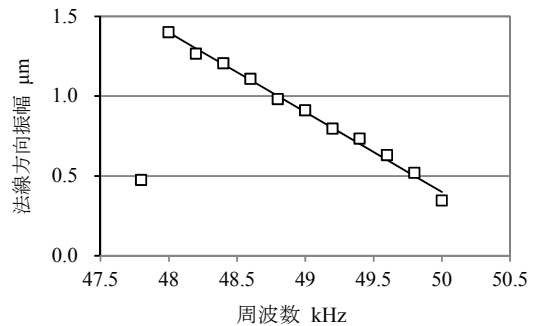


図4 法線方向振幅の周波数応答

回転数が得られる。しかし、共振周波数から遠い時はステータの振幅が小さく、回転数が低下するために、バックドライバリティが低下する。そこで、トルク制御と所望のバックドライバリティを実現できるように、印加電圧の周波数と位相を自由に変えることのできるモータドライバ回路の開発を行った。実際に開発した、マイコン、モータドライバ、ロボットアームのシステムを図3に示す。PCからマイコンを介し、モータドライバおよびロボットアームを制御できる。実験では、ロボットアームに取り付けられた超音波モータを駆動し、トルク制御およびバックドライバリティの実現可能性を調査する。トルクの測定では、ロボットアームの角加速度から計算する他、フォースゲージを用いて静的に生ずるトルクの計測を行う。超音波モータに定在波を発生することにより、瞬時にバックドライバブルを達成することができるかを調べる。

4. 研究成果

(1) モデルの検証

高速度顕微鏡で、楕円運動の振幅を測定す

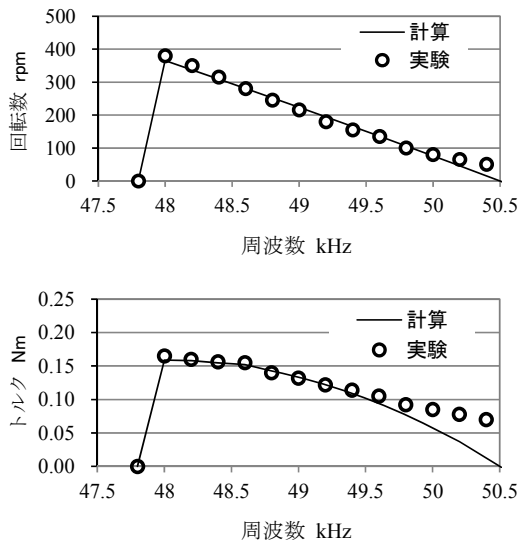


図5 位相と周波数を用いたトルク線図

る。印加電圧の周波数を変えた場合の、法線方向振幅の挙動を図4に示す。図中の直線は、圧電素子の物性から近似した計算結果である。このような挙動は圧電素子の剛性の変化によって起こるものである。実験結果では、振幅は、共振周波数である48.0 kHzで最大となり、周波数が高くなるにつれて、振幅は減少し、この挙動はほぼ線形であることがわかる。

印加電圧の周波数を変えた場合の、回転数およびトルクの挙動をモデルと実験で明らかにする。回転数のモデルでは、楕円振動の周方向振幅から計算することができ、その大きさと一致する線形モデルを採用した。また、トルクのモデルでは、クーロン摩擦則と、摩擦係数の振幅依存性に基づいて計算するモデルを構築した。回転数とトルクを計算するためのパラメータをモデルに与え、印加電圧周波数を変化させたときのモデルの挙動に示し、その結果を実験で検証したものが図5である。回転数およびトルクは、楕円振動の挙動と同じように、共振周波数で最大となり、その後周波数が高くなるにつれ、減少することがわかる。結果から、回転数とトルク共に、計算結果と実験結果はよく一致している。トルクの挙動について見てみると、共振周波数付近においては楕円運動の振幅が大きいため、動摩擦係数の低下によってトルクが減少する。周波数の上昇に伴って動摩擦係数が上昇するが、楕円運動の振幅の低下に伴ってトルクが減少する。この挙動の結果、モータが生ずるトルクは非線形性となる。また50kHz以上において、トルクの計算値と実験値で誤差が生じているが、この理由は圧電素子の振幅の周波数特性を、モデルの簡略化のため線形で近似していることが理由である。図に示すように、周波数と回転数の関係は、共振周波数より高い範囲において、概ね線形であり、この特性が速度制御には使いやすい。しかし

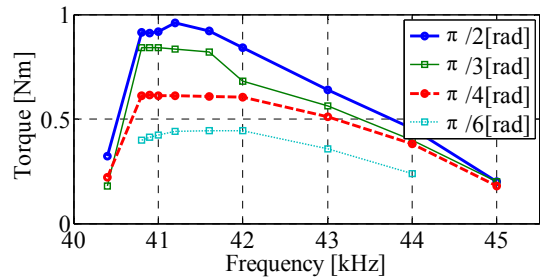


図6 位相と周波数を用いたトルク線図

このとき、回転数は線形でトルクは非線形であるため、慣性モーメントが大きいとき（負荷が大きいとき）はその周波数特性に注意しなければならないことを意味する。一部に誤差は生じたものの、モデルが示す挙動は実験とよく一致しており、動摩擦係数や実際の振動振幅を考慮したトルクモデルが妥当であることを実験で検証することに成功した。超音波モータのモデル化で、楕円運動を直接観察し検証したのは世界でも初めての取り組みであり、信頼性の高い出力モデルを構築できたと考えている。

(2) 制御実験

超音波モータのトルク制御とバックドライバビリティを、ロボットアームを用いた実験で実証する。このときに採用された超音波モータの直径は $\phi 60$ mmであり、モータに印加される電圧は、400Vp-pである。

超音波モータのバックドライバビリティがどの程度のものなのかを調べるためには、超音波モータに定在波を発生させバックドライバブルとした状態において、ステータとロータの間に働く静止摩擦を測定する。超音波モータに定在波が発生した状態のロータにフォースゲージを取り付け、静止摩擦トルクを測定したところ、約2ミリ秒で、53mNmまで小さくできることがわかった。この値は、無通電時にステータとロータの間に働く静止摩擦トルクの大きさと比べると、約5%であり、出力軸を指の力で回すことが可能なほどのバックドライバビリティを瞬時に実現できることを確認した。

滑らかなトルク制御を実現するために、超音波モータが発生するトルクと、超音波モータに印加される電圧の位相差のデータベースが重要である。そこで、位相差を $\pi/6 \sim \pi/2$ radまで変化させた場合のトルクの変化を実験で明らかにした(図6)。トルクの値は、フォースゲージを用いた実験によって静的に測定したものである。位相差が $\pi/2$ から小さくなるほど、発生するトルクもまた小さくなることがわかる。トルクは、位相差が $\pi/2$ が最大になり、位相差が0の時に最小になり、この変化はsin関数で近似することができるモデルを明らかにした。このように周波数と位相差を変化させることで、任意のトルクを得ることが可能であることがわかる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 真下智昭, 超音波モータを用いたロボットの開発と制御, システム制御情報学会誌, Vol. 57, No. 2, pp. 53-58, 2013.
(その他に2報を国際論文誌へ投稿中)

[学会発表] (計 9 件)

- (2) M. Takaoka, T. Mashimo, K. Terashima, “Study on Torque Generation of the Ultrasonic Motor using a High-Speed Microscope,” 10th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (IWPMA2013), Hannover, pp. 177-179, 2013
- (3) T. Mashimo, M. Takaoka, K. Terashima, “High-speed Microscopic Observation of the Elliptical Motion in an Ultrasonic Motor Elliptical motion,” IEEE International Ultrasonics Symposium, Prague, pp. 478-480, 2013.
- (4) 山下貴仁, 真下智昭, 武居直行, 寺嶋一彦, 超音波モータを用いた生活支援用ロボットアームの開発, 日本ロボット学会学術講演会, No. 403-7, 2012.
- (5) 高岡碧, 真下智昭, 寺嶋一彦, 高速度顕微鏡を用いた超音波モータのトルク生成メカニズムに関する研究, 日本ロボット学会学術講演会, No. 2I3-1, 2012.
- (6) 真下智昭, 楢田運動の観察による超音波モータのトルクモデルの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013.
- (7) 山下貴仁, 真下智昭, 武居直行, 寺嶋一彦, 超音波モータを用いたロボットアームの開発—トルク制御に関する一手法の提案—, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013.
- (8) 高岡碧, 真下智昭, 寺嶋一彦, 高速度顕微鏡を用いた超音波モータのトルク生成メカニズムの解明, 精密工学会学術講演会, 2013.
- (9) 山下貴仁, 真下智昭, 寺嶋一彦, 超音波モータを用いた安全性の高いロボットアームの開発, ロボット学会学術講演会, 2013.
- (10) 山下貴仁, 真下智昭, 寺嶋一彦, 超音波モータのトルク制御に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.

[その他]

豊橋技術科学大学 真下智昭ホームページ
<http://www.eiiris.tut.ac.jp/mashimo/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

真下 智昭 (MASHIMO, Tomoaki)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・テニユアトラック助教
研究者番号：20600654

(2) 研究分担者

三好 孝典 (MIYOSHI, Takanori)
豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号：10345952

(3) 連携研究者

寺嶋 一彦 (TERASHIMA, Kazuhiko) 豊橋技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号：60159043