

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04337

研究課題名(和文)パルス幅高速切換え方式による超音波モータの精密位置決め制御回路の開発

研究課題名(英文) Development of precision positioning control circuit of ultrasonic motor by pulse width high speed switching method

研究代表者

岡 正人 (oka, masato)

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：70281582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：周波数・電圧・位相差を任意の値に変えることのできる駆動回路を開発した。この駆動回路は正弦波を発生させるDDSと高電圧オペレーショナルアンプから構成される。この回路により超音波モータの回転速度を制御する3つのパラメータ値を高速かつ任意に変えることが可能となった。

従来の制御手法においては、周波数を変えることにより超音波モータの回転速度を変化させていた。しかしながら、きわめて回転速度が遅い領域において、制御入力値が出力値に正しく反映されない特性がある。提案する可変周波数・電圧制御手法では、制御入力値に対して出力値が正しく反映されることが可能となった。これにより高精度の位置決め制御を実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波モータは非磁性体で構成でき、MRI(Magnetic resonance image)装置内で動作する手術支援ロボットのアクチュエータとしての応用が期待されている。MRI装置で撮影された画像を確認しながら手術することができれば、脳のような複雑な組織においても安全で正確な手術ができると考えられる。本研究では駆動回路および制御手法を見直すことにより、このモータをきわめて高精度に位置制御できることが確認できた。これによりMRI対応型の手術支援ロボットのアクチュエータとして用いることができる。

研究成果の概要(英文)： We developed a drive circuit that can change the frequency, voltage, and phase difference to any desired value. This drive circuit consists of a DDS and several high-voltage operational amplifiers to generate a sine wave. This circuit makes it possible to change the values of the three parameters that control the rotation speed of the ultrasonic motor at high speed and arbitrarily.

In conventional control methods, the rotational speed of the ultrasonic motor is varied by changing the frequency. However, there is a characteristic in which the control input value is not correctly reflected in the output value in the extremely slow rotation speed range. The proposed variable frequency and voltage control method enables the output value to be correctly reflected in relation to the control input value. Using these methods, high-precision positioning control was achieved.

研究分野：電子回路

キーワード：Ultrasonic motor Precise position control Piezoelectric element Actuator

1. 研究開始当初の背景

超音波モータ(Ultrasonic motor)の回転速度は、電圧・位相差・周波数の3つのパラメータに依存している。現在は周波数を変えることによって、回転速度を変化させる手法が主流である。しかしながら、周波数を変えることは進行波を発生させている圧電素子の共振周波数から離して進行波の振幅を小さくしていることを意味している。振幅が小さくなることによって、回転速度は遅くなるが共振周波数より離れることにより効率が極端に悪くなってしまふ。実際に高速回転をしているときよりも低速回転時の方が流入電流が多くなり、効率が悪くなる。しかしながら、周波数を変えることによって、回転速度が変わるため回路が比較的簡単になり、低回転で効率が悪い欠点があるにもかかわらず現在の制御の主流となっていた。本研究では従来から行われている可変周波数制御方式を見直し、新しく可変周波数・電圧制御手法を提案する。これに対応できるように周波数・電圧・位相差の大きさを高速に任意に変える制御回路を開発し、高精度な位置決め制御を実現することができた。

2. 研究の目的

超音波モータは非磁性体で構成でき、MRI(Magnetic resonance image)装置内で動作する手術支援ロボットのアクチュエータとしての応用が期待されている。MRI装置で撮影された画像を確認しながら手術することができれば、脳のような複雑な組織においても安全に手術ができると考えられる。本研究では駆動回路および制御手法を用いることにより $\pm 0.00014\text{deg.}$ 以内というきわめて高精度な位置決め制御システムの構築を行う。この精度を実現することにより、将来開発が期待されているMRI対応型の手術支援ロボットのアクチュエータとして用いることができる。

3. 研究の方法

(1) 開発した駆動回路

図1にDDSとオペアンプから構成される駆動回路を示す。PCから計算された制御入力に対する周波数、電圧および位相差の情報をDDSに送りCh0およびCh1から正弦波を発生させる。このDDSは周波数を32bit、電圧を10bit、位相差を14bitの分解能で独立して出力信号を制御できる。これらの値はPCに接続されたI/Oボードを用いて4ビット・シリアル・モードで情報を書き込む。このCh0およびCh1の正弦波は増幅されて超音波モータのA相およびB相に供給されることになる。DDSから発生された正弦波はバッファ回路(OP1)を通してハイパス・フィルタ回路に入れる。ハイパス・フィルタを設定することにより直流成分が通過しないようにカットオフ周波数を1.0kHz付近に設定した。DDSで発生させた正弦波は3つのオペアンプを直列に用いることにより目的のゲイン(倍率)を得るようにした。図2に製作した回路を示す。左側の回路にはPCからの信号を高速フォトカップラで絶縁してDDSに入力させて正弦波を出力する。この正弦波を増幅するOP1とOP2を配置している。右側の回路は $\pm 190\text{V}$ の電源を供給しており、終段のOP3で再び増幅して超音波モータへ電圧を印

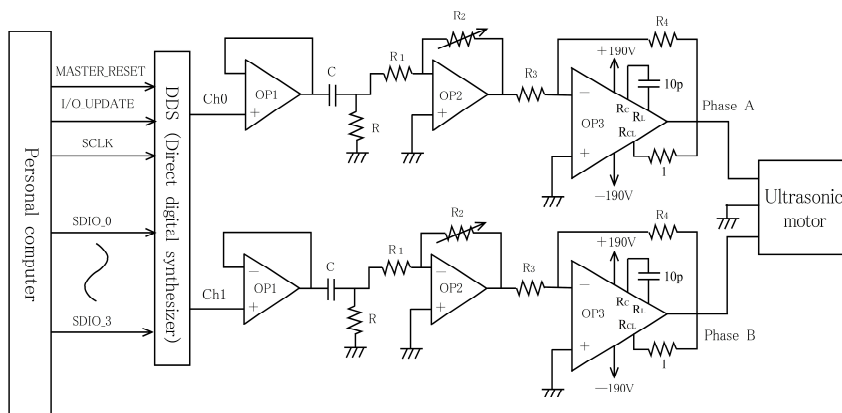


図1 超音波モータ駆動回路

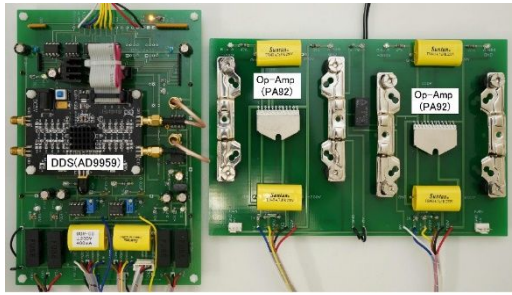


図2 製作した駆動回路

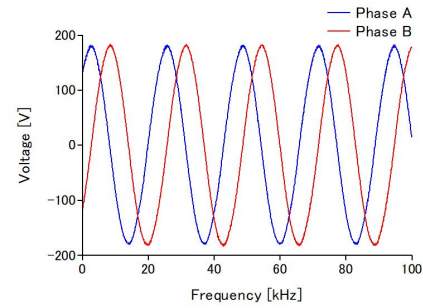


図3 超音波モータへ印加電圧

加する。図3は超音波モータへの印加電圧を示す。ひずみのない電圧が発生している。

(2) 可変周波数・電圧制御

可変周波数・電圧制御について示す。これは周波数と電圧を可変として位相差を2値で制御する手法である。可変周波数制御ではある程度の位置精度を得られるが、更なる高精度な位置決め精度を実現するには難しいことがわかった。これは周波数を高くすると回転速度が0rad/sに近くなっていくが、完全に回転子が停止している状態ではなく、わずかながら正転または逆転方向に動いてしまうことが確認された。本手法では超低速度回転領域では周波数を制御するのではなく電圧を制御する手法を取り入れた(図4)。電圧を制御することにより回転速度を調整でき逆転方向の回転が生じない特性を利用した。制御全体としては高速移動時には可変周波数制御、目標値近傍では電圧制御を行うことになる。

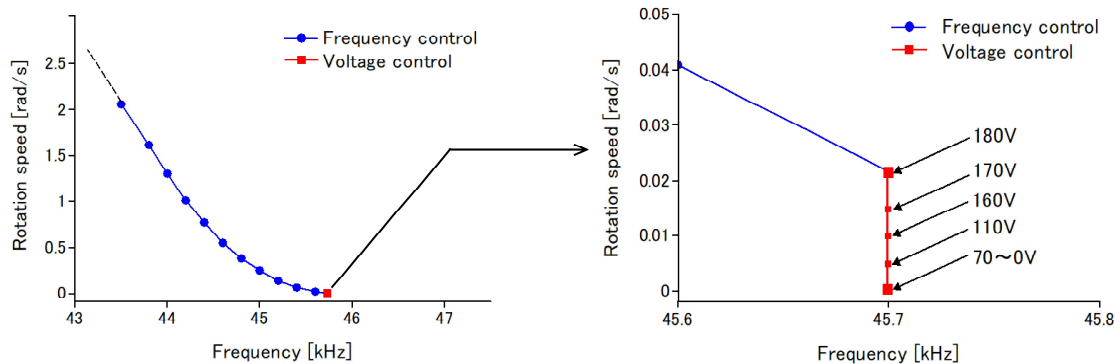


図4 可変周波数・電圧制御

次に位置決め精度を決定する要因の超低速回転領域における特性について実験を行った。図5に可変周波数制御、図6に可変周波数・電圧制御の結果を示す。縦軸は1ms後に移動した角度(rad)を示す。1msの時間は本制御実験でのサンプリング時間と同じ値とした。段階的になっているのはエンコーダの最小分解能(2.424×10^{-6} rad)近傍の移動のためである(以下、このエンコーダの最小分解能での移動角度を1パルスと表現する)。この実験では回路の違いによる影響をなくするために両方の実験においてオペアンプ回路を用いた。測定時の負荷は無負荷とした。

図5に可変周波数制御において周波数を変化させたとの結果を示す。測定は最大電圧を180Vで固定して、周波数を45.5kHzから1msごとに20Hzずつ増やしていき49.1kHzまで行き、49.1kHzに達すると20Hzずつ減らして45.5kHzまで行った。これを10回繰り返して全部で3600ポイントにおいて各周波数に対する1ms後の移動角度を測定した。周波数制御では周波数を高くすると低速になる特性が46.0kHz付近まで見られる。しかしながら、これ以上周波数を上げても必ずしも移動角度が0radとならず、0radであるかまたは±1パルスの範囲で不確定な移動が見られる。特に逆(-)方向の移動は制御入力とは異なる動きとなるため、制御が正しく行えない原因となる。この周波数を高くしたときの回転子の状態を高分解能エンコーダを用いることにより、初めて検証することができた。

図6に可変周波数・電圧制御において電圧を変化させたときの結果を示す。測定は周波数を45.7kHzで固定して、電圧は0Vから180Vまで1Vずつ増やして180Vまで行き、180Vに達すると1Vずつ減らして0Vまで行った。これを10回繰り返して全部で3600ポイントにおいて各電圧に対する1ms後の移動角度を測定した。この実験結果より全体的な傾向として電圧を低くすると回転速度が低くなることが分かった。約70V以下にすると停止の状態になっており、周波数制御のように逆方向への移動は見られず、制御入力に対して回転方向が正しく反映されている(数か所において逆方向の移動が見られるが数が少ないため誤差の範囲と考えられる)。この超低速回転領域の特性の違いにより、高精度な位置決め制御が可能になると考えられる。

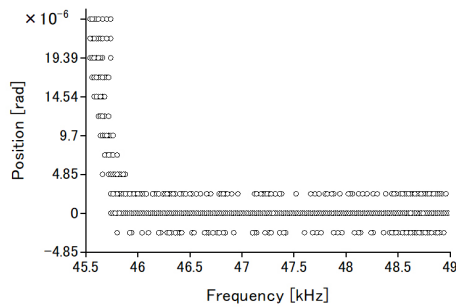


図5 可変周波数制御

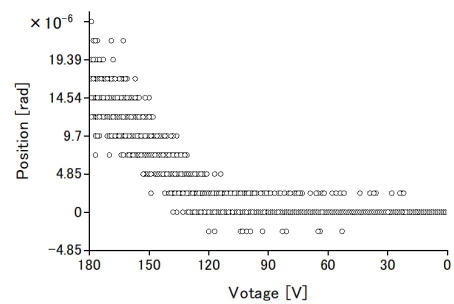


図6 可変周波数・電圧制御

(3) 実験結果

図7に実験に用いた装置を示す。超音波モータ、負荷およびエンコーダを同一軸上に配置して軸をカップリングで接続している。超音波モータは回転子(ロータ)の直径が60mmの進行波型超音波モータを用いた。負荷はパウダクラッチ(磁性粉体クラッチ)を用いた。このパウダクラッチに供給する電流を調整することによって負荷の大きさを調整した。エンコーダは648000P/Rの分解能を有している。実験ではこの信号を4通倍することにより2592000P/Rの分解能をもつ位置検出器として使用した。角度の最小分解能としては 2.424×10^{-6} radとなる。エンコーダからの位置情報はPCに内蔵されたカウンタボードに入力される。PC内で計算された制御入力は、I/Oボードを經由して回路に伝えられる。サンプリング時間は1msとして制御を行った。

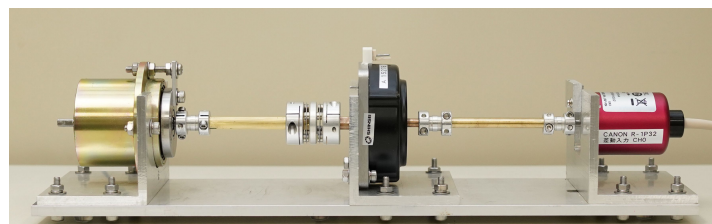


図7 実験装置

実験は目標値を0radおよび 1.5708 ($\pi/2$) radとして5sごとに目標値を変えた。また、35sからは $0.11\text{N}\cdot\text{m}$ (定格トルクの22%)の負荷を加えた。目標値は $r(k)$ として青色、出力値は $y(k)$ として赤色で表した。制御器はPID制御を用いて各ゲイン値は、 $K_P=1.0$, $K_I=0.1$, $K_D=0.01$ とした。各ゲインは手動で調整をした。図8に可変周波数・電圧制御の実験結果を示す。出力値は目標値に対して理想的な応答となっている。図9に図8の目標値近傍を拡大した応答波形、図10に図9の目標値近傍を拡大した応答波形を示す。図9の実験結果においては応答波形がインパルス状に立上っているように見えるが、これは目標値近傍での位置偏差の状態がわかるようにスケールを拡大しているためである。可変周波数制御では無負荷と負荷時において位置偏差を0となるようなゲイン値を見つけるのが困難で位置偏差を0とすることができなかった。可変周波数・電圧制御では図10に示されるように負荷の有無にかかわらずに位置偏差を0とすることができた。図11から図13に負荷時の周波数、電圧および位相差の変化を示す。制御入力 $u(k)$ に対して周波数、電圧および位相差がそれぞれ

れ制御されている。これらの実験結果より精密位置決め制御を実現するには目標値近傍では電圧制御が適しており、制御全体として周波数制御と電圧制御を併用するのが望ましいことがわかる。

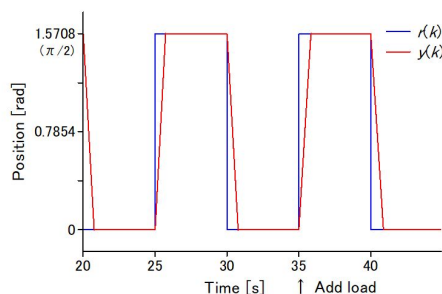


図 8 目標値と出力

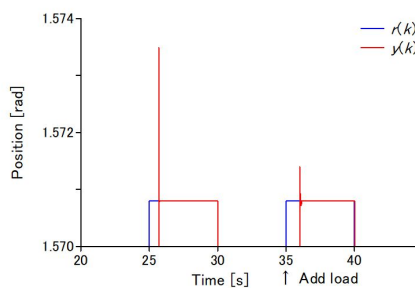


図 9 目標値と出力の拡大図

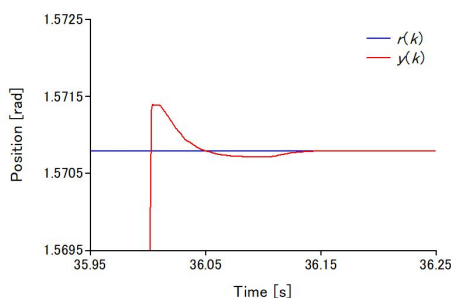


図 10 目標値と出力の拡大図(負荷時の詳細)

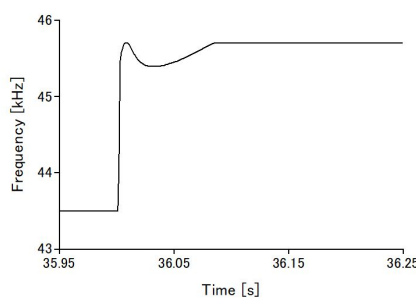


図 11 周波数

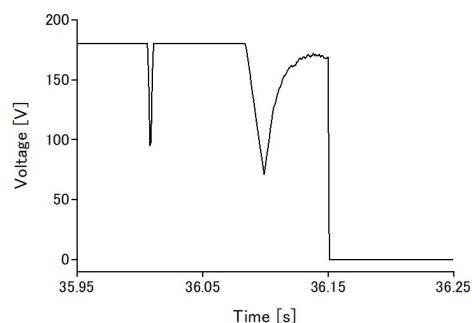


図 12 電圧

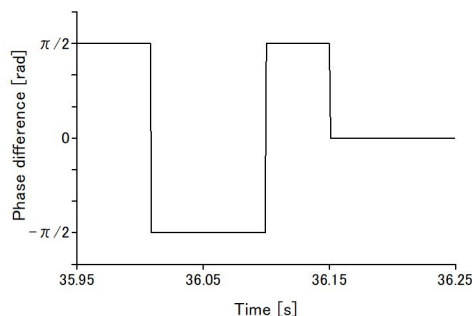


図 13 位相差

4. 研究成果

本研究では超音波モータの高精度な位置決め制御を実現するための回路と可変周波数・電圧制御について述べた。それぞれについて要約すると次のようになる。

1. 現在主流である昇圧トランスを用いた回路を見直して、正弦波を発生させるためのDDSと高電圧オペレーショナルアンプを用いた回路を開発した。この回路により超音波モータの回転速度を制御する3つのパラメータ値を高速かつ任意に変えることが可能となり、ひずみのない正弦波電圧を超音波モータに供給することができた。

2. 従来の制御では周波数のみによって回転速度を変化させていたが、きわめて回転速度が遅い領域(超低速回転)において制御入力が出力値に正しく反映されない特性があることが実験によりわかった。本手法では共振周波数より数kHz高い周波数領域において電圧制御を行うことにより、制御入力に対して出力値が正しく反映されることが可能となった。これにより周波数と電圧を可変、位相差を2値で制御する可変周波数・電圧制御を行いその有効性を示した。

以上より、これらの手法を用いることにより従来の位置精度より8倍高い 2.424×10^{-6} rad以内で超音波モータを位置制御できることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岡 正人, 田中幹也	4. 巻 87
2. 論文標題 3パラメータ値高速切替手法による超音波モータの精密位置決め制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡 正人, 田中幹也, 喜多直輝
2. 発表標題 3パラメータ値高速切替手法における超音波モータの精密位置決め制御
3. 学会等名 日本AEM学会 第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 喜多直輝, 岡 正人
2. 発表標題 3パラメータ値切り替え手法における小型超音波モータの位置制御
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 正人, 田中幹也, 喜多直輝
2. 発表標題 パラメータ値高速切替手法による超音波モータの精密位置決め制御
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜多直輝、岡 正人
2. 発表標題 パラメータ値切替手法における小型超音波モータの位置決め制御
3. 学会等名 日本機械学会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜多直輝、岡 正人
2. 発表標題 3パラメータ値切替方式における小型超音波モータの位置決め制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------