

1999 5227

超音波モータを用いた
アクティブひざサポータの開発 (H10-長寿-014)

平成11年度厚生科学研究費補助金 (長寿科学総合研究事業) 研究報告書

平成12年4月

主任研究者 遠山 茂樹
(東京農工大学工学部教授)

分担研究者 梅田 倫弘
(東京農工大学工学部教授)

桑原 利彦
(東京農工大学工学部助教授)

超音波モータを用いた
アクティブひざサポータの開発 (H10-長寿-014)

平成11年度厚生科学研究費補助金 (長寿科学総合研究事業) 研究報告書

平成12年4月

主任研究者 遠山 茂樹
(東京農工大学工学部教授)

分担研究者 梅田 倫弘
(東京農工大学工学部教授)

桑原 利彦
(東京農工大学工学部助教授)

目次

総括研究報告書(遠山 茂樹)	1
A. 研究目的.....	2
B. 研究方法.....	2
C. 研究結果.....	3
D. 考察.....	5
E. 結論.....	5
F. 研究発表.....	6
G. 知的所有権の取得状況.....	7
分担研究報告書(遠山 茂樹)	8
A. 研究目的.....	9
B. 研究方法.....	11
C. 研究結果及び考察.....	27
D. 結論.....	61
分担研究報告書(梅田 倫弘)	62
A. 研究目的.....	63
B. 研究方法.....	64
C. 研究結果及び考察.....	76
D. 結論.....	88
分担研究報告書(桑原 利彦)	89
A. 研究目的.....	90
B. 研究方法.....	90
C. 研究結果及び考察.....	91
D. 結論.....	118

厚生科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）

総括研究報告書

超音波モータを用いたアクティブひざサポータの開発に関する研究

研究者 遠山 茂樹 東京農工大学工学部教授

研究要旨

アクティブひざサポータの自動制御を行うための研究として、超音波モータの特性を考慮した最適な制御方法の検討、人体の運動測定を行った。これにより制御の見通しができた。また、サンドイッチ型超音波モータのさらなる高出力化を進め、ひざサポータを試作し、動作を確認した。

分担研究者氏名

梅田 倫弘 東京農工大学工学部教授

桑原 利彦 東京農工大学工学部助教授

A. 研究目的

アクティブひざサポータの自動制御を行うための研究として、超音波モータの特性を考慮した最適な制御方法を検討する必要がある。

また、人体に装着してその運動を補助することが目的であるため、制御を行う際には人体の運動パターンを考慮した超音波モータの駆動パターンを入力する必要がある。そのため、様々な運動状態における人体の運動パターンを把握しなければならない。

前年度において、超音波モータの高出力化を進めたが、さらなる高出力化を目指し、ロータ材の材料定数をパラメータとして用いた、高出力を実現するための材料の評価法を検討した。

B. 研究方法

超音波モータの特性を考慮した最適な制御方法を検討するために、製作した高出力超音波モータ単体での制御実験を行った。制御実験システムとして、パーソナルコンピュータと任意波形発生装置を GP-IB インターフェースにより接続し、1 軸回転実験プログラムにより出力信号を制御するシステムを構築した。回転速度や位置はロータリーエンコーダにより検出し、フィードバックもこれにより行う。

超音波モータの駆動原理としてもっとも特徴的なものは、2 相の交流電圧の相間位相をずらして印加するというものであり、今回は制御パラメータとしてこの位相差を採用した。また外乱による制御誤差を補償するために PID 制御を用い、この制御の有効性を評価した。

次に、人体の運動パターンを把握するために、人体の運動測定を行った。これは 7 台のカメラと 4 枚の床反力計を用いる 3 次元動作解析システム VICON により、各関節の空間位置と床反力を計測し、計算により各関節に働くモーメントや回転角を求めることができる。

運動測定を行った人体の運動パターンは、歩行、階段昇降、椅子立ち上がりであり、これにより日常生活におけるほとんどの場合の運動に対応することができる。

また、この運動測定により得られたデータをドライバとして、動力学シミュレーション上で人体の動力学モデルを作成した。

サンドイッチ型超音波モータのさらなる高出力化を進めるために、試験を行うロータ材の種類を増やした。材料は軽量化を考え、すべてエンジニアリングプラスチックの種類の中より選択した。それぞれのロータ材において、同じステータとの組み合わせでトルクを測定し、ロータ材の材料定数との関連性について比較検討を行った。

C. 研究結果

高出力超音波モータの1軸回転実験において次のような結果が得られた。超音波モータは駆動周波数を変化させたときにヒステリシスを示し、また共振周波数を境にして駆動状態に対称性がなく、制御パラメータとしては不適當である。ここで印加電圧及び駆動周波数を一定にし、印加する2相の交流電圧の相間位相差を変化させたときにおいては、位相差が0度付近では回転せずに摩擦力が減少し、位相差が90度付近では最大トルクで駆動することがわかった。

理想的にはこの相間位相差を固定すると速度も一定になるのだが、様々な外乱等により一定にならなかった。そこでPID制御を用いて速度の振動を押さえる制御を行った。その結果、目標値に対する速度の振動を抑えることが可能となり、超音波モータにおけるPID制御の有効性を確認することができた。

次に、3次元動作解析による人体の運動測定より次のような結果が得られた。本研究はひざの運動を補助する目的で行っているため、ひざに発生する

関節モーメント及び関節角度に着目し、床反力のデータと合わせて評価を行った。歩行においては、床反力のデータより身体を片脚で支持している時期と、両脚で支持している時期が周期的に存在しることがわかった。また片脚にのみ注目し、床反力とひざ関節モーメントのパターンを評価したところ、床反力が大きくなり始める時期、つまり踵接床時にひざには大きなモーメントが発生しており、このときをのぞいてはひざに大きな負担はかからないことがわかった。一方、運動パターンが大きく異なるのが椅子からの立ち上がりであった。椅子からの立ち上がりにおいては、サインカーブ的にトルクがかかり、このパターンにしたがって超音波モータを駆動させる必要がある。特に立ち上がりに要する時間が長いとひざにかかる負担が大きくなり、また、上体の姿勢によってもひざにかかる負担が変化する。上体を前方へ曲げることによりひざへの負担が少なくなることがわかった。また動力学モデルによるシミュレーション結果は、実験とよく一致しており、今後このモデルを用いれば、体格の異なる被験者においても、大掛かりな測定実験を行うことなく運動データを生成することが可能となった。

サンドイッチ型超音波モータのさらなる高出力化を進めるために、ロータ材を変更しトルクと材料定数の関連性を評価したところ次のような結果が得られた。これまでは 66 ナイロンにグラスファイバを充填した物を使用していたが、さらに評価する材料を増やしたところ、140kgfcm のトルクを得ることができた。

またそれぞれの材料について、弾性率と硬度のバランスを検討してみたところ、高いトルクを実現できた材料は、ある一定のバランスを持っていることがわかった。また弾性率と硬度の値は、共に大きい値の材料が高トルクの実現において望ましいことがわかった。

D. 考察

位相差を制御パラメータとして用いた場合の結果より、この制御方法を用いれば、超音波モータをサーボモータとして利用することができることを示している。また、この制御方法による速度制御も可能であることが確認され、正転、逆転の制御も容易に行うことができる。

床反力が大きくなるということは、このときに足が床についているということであると言える。このことから歩行時においてもっともトルクを必要とするのは踵接床時であり、この時期を床からの反力とひざの角度を検出して知る必要がある。階段昇降においては、床反力のパターンは歩行時と極めてよく似ており、運動パターンを把握するためには同様にして床からの反力とひざの角度を検出すればよい。ただし、発生するモーメントが大きいので、歩行時よりもトルクを必要とする。

ロータ材の検討を深め、弾性率と硬度のバランスが高トルクを実現するために重要であることがわかったが、現段階でモータの押付け力が 160kgf を超えるほどになっており、ほぼ限界に近く、この構造におけるトルクの今以上の大幅な向上は難しい。そのため、多層化などによる構造上の改善から、高出力を目指すことが必要となる。

E. 結論

本年度はアクティブひざサポータの制御方法を確立するために、超音波モータの制御特性及び制御パラメータの検討、人体の運動測定による運動パターンの解析をおこなった。また、より補助の効果をあげるために、サンドイッチ型超音波モータのさらなる高出力化を進めた。これにより制御パラメータを決定することができ、また PID 制御の有効性も確認できた。人体の運動パターンの解析からは、歩行、階段昇降、椅子立ち上がりの運動を補助するためのモータの駆動パターンを決定することができた。さらにロータ材の検討、

評価を深めることにより、高トルクを得るためには弾性率と硬度のバランスが重要であるということがわかり、さらなる超音波モータの高出力化も実現することができた。

F. 研究発表

1. 論文発表

- ・エコ・プルワント、遠山茂樹、渡辺宏一郎：サンドイッチ型超音波モータの開発（第1報）、精密工学会誌（投稿準備中）
- ・エコ・プルワント、梅田倫弘、遠山茂樹、内田薫：人体の歩行の動力学的モデルの開発、精密工学会誌（投稿準備中）

2. 学会発表

- ・エコ・プルワント、遠山茂樹：有限要素法による超音波モータの接触解析、日本機械学会2000年次大会（2000年7月開催）
- ・内田薫、遠山茂樹、梅田倫弘：人の歩行原理に注目した歩行シミュレーション、日本機械学会2000年次大会（2000年7月開催）

G. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

- ・ サンドイッチ型モータの高トルク化のための位相調節法、遠山茂樹（申請準備中）

2. 実用新案登録

- ・ 特になし

3. その他

- ・ 特になし

厚生科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）

分担研究報告書

モータの特性を考慮した、ひざの負担を軽減する

制御方法の開発に関する研究

研究者 遠山 茂樹 東京農工大学工学部教授

研究要旨

アクティブひざサポータの自動制御を行うための研究として、超音波モータの特性を考慮した最適な制御方法を検討する必要がある。超音波モータの特性を考慮した最適な制御方法を検討するために、製作した高出力超音波モータ単体での制御実験を行った。今回は制御パラメータとして位相差を採用した。また外乱による制御誤差を補償するために PID 制御を用い、この制御の有効性を評価した。超音波モータは駆動周波数を変化させたときにヒステリシスを示し、また共振周波数を境にして駆動状態に対称性がなく、共振周波数は制御パラメータとしては不適當である。ここで印加電圧及び駆動周波数を一定にし、印加する 2 相の交流電圧の相間位相差を変化させたときにおいては、位相差が 0 度付近では回転せずに摩擦力が減少し、位相差が 90 度付近では最大トルクで駆動することがわかった。これは超音波モータをサーボモータとして利用することができることを示している。また、この制御方法による速度制御も可能であることが確認され、正転、逆転も行うことができた。理想的にはこの相間位相差を固定すると速度も一定になるのだが、様々な外乱等により一定にならなかった。そこで PID 制御を用いて速度の振動を押さえる制御を行った。以上の結果より、ひざの負担を軽減する制御方法の確立が可能となる。

A. 研究目的

近年ロボットは様々な分野に広く用いられており、さらに産業用や障害者用の生活補助用、また特殊な応用例としての義手・義足など広く用いられることが期待されている。それに従いロボットに用いられるアクチュエータには、小型化・高トルク化・多自由度化といった様々な要求がされるようになってきている。

一般に機械は低速度・高トルクの機械的パワーを要求するものが多いのに対し、モータは高速度・低トルクの形で機械的パワーを供給するものであるため、両者のマッチングをとるためにモータと機械系の間には減速機としてのギアが用いられる。ロボットアームアクチュエータの駆動源は、従来電磁式モータに多段減速機を使用する事によって十分な出力を得ている。しかし、多段減速機を接続した場合において減速機が複雑になればそれに比例してバックラッシによる誤差もまた増加していく。また減速機によって小型化の妨げとなり、多くの容積を必要としてしまう。例えばアーム部の各関節の重量が増加すればその分出力は損失され、さらに慣性モーメントも増加してしまうため制御の精度についても影響しかねない。

このように、従来までの減速機を用いたアクチュエータによるロボット義手・義足等への応用は、非常に多くの問題点が浮き彫りとなっている。そこで近年、減速機を使用しないダイレクトドライブアクチュエータが大きく注目されている。

このダイレクトドライブに適したアクチュエータのひとつに、進行波型超音波モータ(Ultra Sonic Motor)がある。超音波モータは超音波振動を駆動力とする新しい原理のモータで、圧電素子の電歪現象を利用して微小振動を起こし、弾性体である金属製のステータに進行波を発生させ、それによって起こるステータ表面上の波の先端での楕円運

動とロータの接触による摩擦力を利用して駆動量を得るアクチュエータである。

超音波モータは従来の電磁式モータとは駆動原理が根本的に異なる構造を持っており、その特徴として小型軽量、低速で高トルク、磁気作用がないなど優れた性能と特徴を備えている。さらに供給電圧を絶った後でも保持力を有し、回転子の慣性が小さく応答性に優れていることから、位置決めサーボ用モータとしての応用が期待されている。

近年本研究室において研究・開発がなされている超音波モータの動力特性は、ステータの振動解析、性能試験を繰り返し実用可能なレベルまでとなった。しかしハードウェアのレベルの向上と比較してソフトウェアの開発は遅れている。

したがって超音波モータの実用化を考慮したソフトウェアの開発が必要であり、そこで重要なことは超音波モータ・球面超音波モータの独自性を十分に発揮できるという点である。

1 軸の超音波モータにおいては、力制御は行われているが精密な位置・速度制御は行われていない。

よって本研究では 1 自由度の超音波モータにおいて、フィードバック機構を要した位置・速度制御技術の確立、また精密な位置決めのためのステップ動作を実現し、アクティブひざサポータに応用した場合の、ひざの負担を軽減する制御方法の開発をを目的としている。

B. 研究方法

制御法・制御パラメータの選定

これまで超音波モータの制御法として、PWM 制御、固定ゲイン PID 制御、可変ゲイン PID 制御、ニューラルネットワークを用いる手法が提案されている。しかし超音波モータは特殊なモータであるため、その動特性は確立されたとはいえていない。さらに温度上昇や負荷トルクなどの駆動条件の変化によって特性が変化することが知られており、それに対してこれらの制御法はいくつかの問題点を持っている。

よって超音波モータを高性能で高精度に制御するには、まずこれら駆動条件の変化による特性変動を把握し、補償法の検討が必要である。

超音波モータの制御手法として一般に駆動周波数、印加電圧および印加電圧位相差制御による方法が提案されている。しかし位置制御を達成するためには超音波モータを連続的に CW, CCW, STOP することのできる印加電圧位相差による手法が有効であると思われる。印加電圧位相差制御には、多くのモータの制御に多々適用され信頼がある比例積分(PID)制御を適用し、さらに PID 制御器で対処しきれないパラメータ、駆動周波数についても検討する。

よって本研究では、印加電圧位相差及び駆動周波数の両方を制御することでハイブリッド化による安定制御を試みる。

PID 制御

アナログ PID 制御

フィードバックの基本は PID 制御であり、これまで超音波モータの制御に多々適用されている信頼性の高い制御器である。

アナログ制御における PID 制御のブロック線図を図 3.1 に、制御演算式を式(3.1)に示す。

式(3.1)において偏差 e に比例する項を P(Pro-portional)動作、偏差 e の積分に比例する項を I(Interral)動作、偏差 e の微分に比例する項を D(Differencial)動作といい、この 3 つの動作をあわせて持つものを PID 動作(制御)という。

$$y = K \left(e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \frac{d}{dt} e \right) \quad (3.1)$$

PID 制御の基本動作は P 動作である。I 動作と D 動作は P 動作の欠点を補い、制御成績をさらに高めるための補助動作である。

P 動作では操作変数 y の値は偏差 e の値に比例して連続的に変化させることができる。最も簡単な制御法のひとつである On/Off 制御では操作変数の値は 2 値であるためハンチングを起こしやすいが、PID 制御では操作変数 y の値は連続可変であるためハンチングを起こすことなくよりよい制御成績が得られる。

PID 制御は制御演算式が簡潔であるにもかかわらず、非常により制御が期待できさらに使いやすいという大きな特徴がある。

制御対象に対する PID 各動作の作用と限界

ここでは各動作の効能と限界について述べる。

①P 動作

オフセットの大きさは比例ゲイン K の値を大きくすると小さくなる。理論的には比例ゲイン K の値を ∞ にするとオフセットはゼロになるが、 K の値の増大させると制御変数は振動する。したがって K の値を ∞ にすることはできず、実用上はオフセットを 0 にすることはできない。そのためオフセットを 0 にするには I 動作を用いる必要がある。しかし、制御成績に対する要求がゆるく、対象が制御しやすい特性ならば、制御演算式は P 動作だけでも十分な場合がある。比例ゲイン K を大きくとることのできる制御対象の場合は、P 動作だけでもオフセットを小さく押さえることが可能である。また、一般に P 動作は応答速度を速める働きがある。

②On/Off 制御

On/Off 制御を適用できる制御対象も P 動作において比例ゲイン K を十分大きく取ることのできる制御対象である。すなわち、On/Off 制御は P 動作で比例ゲインを無限大とした制御として考えることができる。

③ I 動作

I 動作は、P 動作の欠点であるオフセットをゼロにする効果がある。なお I 動作は単独でもコントローラとして動作することができるが、P 動作と組み合わせたほうがよい制御成績を期待できる。

④ D 動作

D 動作も P 動作を補助しよりよい制御成績を得る目的で使用する。D 動作は単独では制御能力を持たないため必ず P 動作, または PI 動作と組み合わせて使用される。D 動作の効能は制御応答を速くし, 制定時間を短くすることができる。つまり制定時間を短くする。微分動作は遅れの大きい制御対象に有効であるといわれているが, 遅れの小さい制御対象に対しても有効である。しかし遅れの小さい制御対象は, 微分動作なしでも十分によりよい制御成績が得られる。ただし D 動作は操作変数の値を急変させるため, これが好ましくない場合は使用できない。

デジタル PID 制御

フィードバック制御においては、従来はアナログの PID 制御が多く用いられてきた。それは PID 制御は制御演算式が簡単であり、かつ非常によい制御が期待できる点が多い。近年、コンピュータによるデジタル制御においても、PID 制御は多く用いられ、高度の制御演算が実現されている。

デジタル制御は単なるデジタル化ではなく、コンピュータ制御であることが大きな特徴である。コンピュータ、特にマイコンは複雑な制御演算を安価に行うことができる。

よって、コンピュータの演算機能を活用することによりアナログ制御と比べ、高度かつ経済性のある制御システムを構築できることがデジタル制御の最大メリットである。

しかしデジタル化の結果、制御変数はサンプリングされ飛び飛びの値となるため、もとのアナログ量に変化しているにもかかわらず、情報が失われてしまう可能性がある。よってデジタル制御はアナログ制御と比べて劣る可能性を持っている。したがって、制御に必要な情報が失われないようにサンプリングすることが必要となる。

デジタル制御がその効果を発揮するのは、単純な PID 制御ではなくより高度の制御においてであり、それらをアドバンス制御と呼んでいる。

本研究では、アドバンス制御の制御要素として PID 制御をベースとし、それに他の要素を付け加え、複数の PID 制御を組合すことでより高度な制御の実現を目指す。(図 3.2)

アナログ PID 制御演算式のデジタル化

本実験ではコンピュータによるデジタル制御を行うため、式(3.1)のアナログ PID 演算式を次のようにデジタル化して用いる。

・P 動作

アナログの連続式をそのままサンプリングに置き換える。
すなわち比例項は Ke_1 となる。

・I 動作

アナログの積分は、次のように定義されている。

$$\int x dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\sum_{i=0}^{i=n} x_i \Delta t \right) \quad (3.2)$$

アナログの場合時間的に連続であるが、極限として Δt を 0 にすることができる。しかしデジタルはサンプリングであるので、 Δt の最小値はサンプリング周期 θ となる。したがってデジタルの積分は、以下のようなになる。

$$\sum_{i=0}^{i=n} x_i \theta = \theta \sum_{i=0}^{i=n} x_i \quad (3.3)$$

この和を $\sum x_n$ と略記する。したがって積分項は次のようになる。

$$\frac{\theta}{T_I} \sum e_n \quad (3.4)$$

・D 動作

微分も積分と同様に考えて、アナログ微分の定義

$$\frac{d}{dt}x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (3.5)$$

において、 $\Delta t = e_n - e_{n-1}$ 、 $\Delta t \rightarrow \theta$ とおくことにより以下のようになる。

$$\frac{T_D}{\theta}(e_n - e_{n-1}) \quad (3.6)$$

・PID 動作

以上から、PID 制御演算式は以下のように表される。

$$y = K \left(e_n + \frac{\theta}{T_1} \sum e_n + \frac{T_D}{\theta}(e_n - e_{n-1}) \right) \quad (3.7)$$

しかし今回は、式(3.7)を以下のように変形して用いる。これによりさらにアナログ制御により近い特性を持つことになる。

$$y = K \left(e_n + \frac{\theta}{2T_1} \sum (e_n + e_{n-1}) + \frac{T_D}{\theta}(e_n - e_{n-1}) \right) \quad (3.8)$$