

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10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11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10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11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	4
D. 考察	5
E. 結論	6
F. 研究発表	7
G. 知的所有権の取得状況	8
分担研究報告書（遠山 茂樹）	9
A. 研究目的	10
B. 研究方法	12
C. 研究結果	55
D. 考察	67
E. 結論	69
分担研究報告書（梅田 倫弘）	71
A. 研究目的	72
B. 研究方法	76
C. 研究結果	93
D. 考察	103
E. 結論	111
分担研究報告書（桑原 利彦）	112
A. 研究目的	113
B. 研究方法	114
C. 研究結果	116
D. 考察	124
E. 結論	126

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用の高出力超音波モータを開発することができた。これは出力トルク、磨耗の点で優れた特性をもつものである。さらに、モータ用のセンサーも委託開発でき、性能を評価した。次年度以降の開発研究の基礎が確立した。

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

現在、高齢や障害などの要因により行動が不自由な人々は、車椅子に代表されるような補助器具を使用している。また、高齢化社会を迎えようとしている日本において、健康な高齢者であっても、ひざに障害を持つ人は多く、円滑な日常生活を送ることに困難をきたす人が多い。そのため、より自然に、かつ使用者に負担をかけずに簡潔に装着でき、使用できる補助器具の開発が望まれている。

そこで、本研究では上記の問題を解決できるアクチュエータを補助器具に組み込むことにより、ひざにかかる負担を軽減し、自由に歩行ができるアクティブひざサポータの開発を目的とした。

B. 研究方法

アクティブひざサポータを開発するにあたり、まず、開発するうえでの要点を確認するために、まずは既存の電磁モータと減速機構を用いてアクティブひざサポータの試作を行った。この試作により電磁モータを用いた場合には、減速機構を必要とするためにアクチュエータ部分が非常に大きくなってしまい、また、電磁モータの慣性力や、減速機構に用いる歯車のバックラッシュにより、応答性が悪いということが指摘された。応答性が悪いと、日常生活の中での突発的な事故に対して、本来ならば行動を補助する目的であるひざサポータが、抵抗になってしまう可能性がある。これらの問

題点を解決できるようなアクチュエータとして超音波モータが挙げられる。

超音波モータは摩擦駆動により減速機構を必要とせず、小型軽量化が可能であり、高い応答性も持つ。超音波モータのトルク面においては、同様の超音波モータをサンドイッチ構造に配置することにより、ほぼ同体積でトルクを大きくすることができる。これがこれまでの研究から明らかになっている。この新たな構造のモータを制御するためにはモータ特性を把握することが必要であるため、実際に駆動させて試験した。

ここで、人体に装着して使用することから、安全性を考慮し、低電圧で高い応答速度を得られるような超音波モータのステータを試作することとした。ここで低電圧化を実現する手段として、ステータの表裏両面に圧電素子を貼りつけることを提案した。

超音波モータのステータは、制作するのに多くの時間を必要とするために、多種多様のステータを試作することは、コスト的にも時間的にも大きな問題である。そこで有限要素法解析ソフトウェアを用いてステータモデルの共振解析及び動解析を行い、実際にステータを試作したときの示す挙動を把握することで、ステータの最適設計を行うことができ、開発にかかる時間を短縮することができる。本研究では、ステータのディスク部の厚さ、分離帯の長さ、分離帯の厚さを変更した数種類のモデルを作り、有限要素法解析によって高さ方向変位の時間変化と、駆動部の描く楕円軌道を比較することによって、それぞれのパラメータが及ぼす影響を推察することにより、新たなステータの設計を行った。

実際に設計、試作を行ったステータは、ステータ単体での性能評価を行う必要がある。性能評価の方法として、両面に張り付けられた圧電素子に片側ずつ電圧を印加し、その時の回転数を測定した。印加電圧を変えていったときの回転数の関係から、低電圧で高い応答性が得られるかを評価した。

また、高出力を得るため、ロータ材とステータ材の検討を行った。これは多種の材

料でロータを試作し、その中から実用トルクを得る事が期待できる材料を取り上げ、
摩耗特性と温度上昇の観点から駆動試験を行い、ロータ材の評価を行った。

C. 研究結果

本研究では、アクティブひざサポータ用の新たな超音波モータの設計、試作を行うことが重要項目であり、そのために有限要素法を用いたステータの振動解析を行った。有限要素法解析により次のような結果が得られた。ステータの形状においてもっとも振動状態に影響を与えたものが、ステータディスク部の厚さであった。ディスク部の厚さが厚くなるほど、駆動部の高さ方向変位は小さくなる。次に分離帯の及ぼす影響について以下のことがわかった。分離帯部分の長さが長くなると高さ方向の変位は大きくなる傾向にあると言える。ここで重要なことは、分離帯の長さが長くなると振動しやすくなるために、目的とする振動モードの近傍に、異なる振動モードが存在するようになる。これらの解析結果を基にして新たにステータの設計、試作を行い、ステータの性能評価を行った。同じ形状のステータを用意し、それぞれを単体で駆動させたときの回転数を測定した。これまでの片面貼り付けのステータは、印加電圧が160Vpp以上で使用してきたが、今回新たに試作した両面貼り付けのステータは、40Vppからの低い電圧で駆動することができた。また、100Vpp以下でも高い回転数を得ることに成功している。モータ特性の試験より、サンドイッチとして組み合わせる2枚のステータのわずかな製作誤差により両者の共振周波数が異なるため、うなりを起こすことがあることが判明した。これは共振周波数ができる限り近いものを選び、組とすること

とで対処した。さらに、組となる2枚のステータの位相を最適に調節することが重要であり、最適に調節することで、きわめて高トルクを得ることができた。ロータ材に関しては、66ナイロンは安定して高トルクを出力し、磨耗も少なかった、また、温度については、無負荷時にはすべりなどのため50度前後になるが問題となるほどではなかった。

D. 考察

ディスク部の厚さが厚くなるほど、駆動部の高さ方向変位は小さくなる。これはステータ全体の剛性が高くなり、振動しにくくなったためであると考えられる。そのため、大きな振動を得ようとするならば、ディスク部の厚さを薄くする事が効果的であると思われるが、解析により、薄くしすぎると大きな振動が得られたとしても、駆動部は安定した一定形状の楕円軌跡を描かないことが分かった。ディスク部の剛性が低いために振動はしやすくなるが、振動しやすくなったために目的とする振動モード以外の波が発生しやすくなったためであると考えられる。超音波モータは進行波の波頭の楕円運動にロータを押し付け、そのときの摩擦により駆動している。そのために駆動部の描く楕円軌跡が安定していることが重要である。ディスク部はある程度の剛性を確保しておくことが必要であることが分かった。

分離帯の長さが長くなると振動しやすくなるために、目的とする振動モードの近傍に、異なる振動モードが存在するようになる。近傍に別モードが存在していると、その波が現れてくる可能性があり、安定した振動を得られない可能性が大きくなると思

われる。そこで、共振周波数の近傍に別モードが存在しないように分離帯の長さを決定する必要がある。

サンドイッチとして2枚のステータを組み合わせたとうなりが生じる原因として、わずかな製作誤差により両者の共振周波数が異なるためであると考えられる。また、ステータには圧電素子が貼りつけられているが、現段階では人の手により貼り付けが行われている。そのため、2枚のステータの位相を最適な位置に変えることにより、解決できると考えられる。

ロータ材の検討で、66ナイロンは安定して高トルクを出力し、磨耗も少なかった。また、温度については、無負荷時にはすべりなどのため50度前後になるが問題となるほどではなかった。これは66ナイロンが適度な硬さと弾性を持っているために、ステータ表面とロータ表面の間の摩擦領域で、すべりを起こすことなく摩擦接触が起きており、ステータからの駆動力を安定して伝達しているからである。

E. 結論

本研究では、高齢や障害になどの要因により行動が不自由な人々の、ひざにかかる負担を軽減し自由な歩行が可能となるアクティブひざサポータの開発を目的とした。今回はアクティブひざサポータに組み込む、低電圧で高い回転数を得られる超音波モータの試作を行った。ステータを設計する際に有限要素法解析を用いた振動解析を行うことは、設計に要する費用と時間の短縮に非常に有効であった。また、今回試作した超音波モータは、低電圧で高い回転数を得ることに成功した。このことから、両

面貼り付けのステータは、超音波モータの高性能化に非常に有効な手段であり、高性能な超音波モータの基礎が確立できた。また、このモータの回転方向を制御するセンサを委託開発した。これによりひざの運動方向検出だけでなく、ひざに過負荷がかかることもふせぐことができた。サンドイッチ構造にしたときに、組となる2枚のステータの位相を最適に調節することが高トルクを得るためには重要である。ロータ材は現時点では66ナイロンが最も適している。

F. 研究発表

1. 論文発表（平成11年度に予定）

- ・遠山茂樹他，サンドイッチ型超音波モータの開発（仮題），精密工学会誌
- ・遠山茂樹他，圧電素子両面張付による超音波モータの高トルク化（仮題），精密工学会誌

2. 学会発表（平成11年度に予定）

- ・遠山茂樹他，超音波モータを用いたひざアクティブサポータの開発（仮題），日本ライフサポート学会
- ・遠山茂樹他，コンピュータシミュレーションによるアクティブサポータの人体への影響（仮題），精密工学会秋季大会

G. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得（平成11年度に予定）

- ・超音波アクチュエータを用いたひざのアクティブサポーター

2. 実用新案登録

特に予定なし。

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

超音波モータの開発、実装試験とまとめに関する研究

研究者 遠山 茂樹 東京農工大学工学部教授

研究要旨

ひざ用として用いる高出力超音波モータのステータの開発を主眼におこなった。まず、有限要素法をもちいて、駆動に適したモードをもつステータを設計した。このとき2つのタイプ、すなわち圧電素子を裏面に張り付けるものと、両面に張り付けるものを検討した。実際に超音波モータのステータを試作するためには、非常に多くの時間がかかる。そのため、様々な形状のステータを試作することは困難である。新たに両面貼付けのステータを設計するにあたり、試作するステータの挙動を把握するために有限要素解析ソフトウェアを用いたステータの振動解析を行なった。解析は、共振解析のみならず動解析もおこない時間ごとの振動状態も十分検討した。さらに、ステータ材質の検討もおこない圧電素子と膨張係数がちかいステンレスを採用し、圧電素子も高出力用のものを採用して試作した。一方、ロータ材は、桑原分担のロータ材の検討結果を利用した。試作の結果、 $\phi 100$ の高出力用の超音波モータ用ステータを開発した。また、両面張り付けのステータは、数十Vの低電圧で駆動できることで、これに適したロータ材の検討をすすめることでサンドイッチ型にすることで片面張り付けのものより高出力低電圧の超音波モータができる見通しができた。また、このモータの回転方向を制御するセンサを委託開発した。これによりひざの運動方向を検出するだけでなく、ひざに過負荷がかかることもふせぐことができる。

A. 研究目的

第1章 序言

現在、高齢や障害などの要因により行動が不自由な人々は、車椅子に代表される補助器具を使用している。障害の状態や程度にもよるが、車椅子の他にも松葉杖や補助器具、義足などが使用されている。これまでの補助器具や義足は、エアシリンダやスプリング等の駆動力を用いているものが多い。しかしながら油圧や空圧を用いた場合、駆動源の重量が重く、制御面においても、電気的な制御信号を変換するための機構が必要であることなどから、構造の複雑化や、重量の増加などの問題を生じる。また、車椅子は平面上での任意の地点への移動だけを見れば非常に便利であるが、階段や、急な坂道などは障害となるなど行動できる場所が制限される。また、周囲からの注目を受けるという点から、障害を持つ人々にとっては好奇の目で見られるなどの精神的苦痛を受けることもあり、必ずしも障害を持つ人々にとって、自立を促すものであるとは言えないのが現状である。そのため、より自然に、かつ使用者に負担をかけずに簡潔に装着でき、使用できる補助器具の開発が望まれている。

上記の問題を解決できるアクチュエータを補助器具に組み込むことにより、ほとんど関節に力のない人でも行動が行えるようになる。また、車椅子や松葉杖等よりも、より小型化することが可能である。小型化が実現されることにより、

周囲からの注目を受けるといった、障害を持つ人にとっての精神的負担をも軽減できる。

そこで、本研究では、膝の屈伸運動を補助する目的で、アクチュエータとしての平面型超音波モータを組み込んだ膝サポータの試作を行うことを目的とした。これまで当研究室でも平面型超音波モータを研究開発してきた。トルクの面では、これまでの研究の中で、同じ特性の平面型超音波モータを2枚重ねて、サンドイッチのような構造で使用すると、大きなトルクが取り出せることがわかっている。しかし、大きなトルクが得られるとしても、アクチュエータの応答速度が遅ければ、日常生活において予期できない突発的な事故に対して、本来ならば行動を補助する目的の補助器具が、抵抗になってしまう恐れがある。

また、人体に装着して使用することから、安全性を考慮して、駆動電圧は低いほうが望ましい。

以上のことをふまえた上で、今回は低電圧で応答速度の向上を図ることとした。ここで印加電圧を下げるために、新たな平面型超音波モータを設計、試作することとした。そのため、超音波モータのステータの設計に有限要素法を用い、振動解析によって得られた解析結果を基にして設計を行い、実際に試作して、試作した平面型超音波モータの性能試験を行った。

B. 研究方法

第2章 膝サポータ

2.1 補助器具

現在日本で、身体に何らかの障害を持つ人々の総数は約270万人であり、その中で肢体不自由者は全体の57%にあたる約155万人である。この統計には事故などによる肢体欠損による不自由者は含まれていない。また、これからの日本の高齢化を考えると、障害者の人口比率が高まると推測される。

軽度の障害であれば、関節などへの負担を減らす目的のサポータや、歩行代行機器、重度の障害には、車椅子や義足などの補助器具が研究・実用化されている。最近では、インテリジェント大腿義足膝継手などと呼ばれる、マイクロコンピュータで制御された義足が実用化されている。これは、10段階程度の歩行速度をマイクロコンピュータが記憶しているので、スポーツからゆっくりとした歩行までカバーしている。

このように補助器具は、障害を持つ人々の自立、生きがいを助長し、これからの社会全体の調和のとれた進行のつなぎの役割を求められている。

このような理由から、簡単に装着し、使用できる膝用のアクチュエータがあれば、障害を持つ人が増えるであろうと推測されるこれからの高齢化社会に大きく貢献できる。

そこで本研究では、特に疾患などにより膝に何らかの障害を持つ人々の自立を促す目的で、アクチュエータとしての超音波モータを組み込んだ膝サポータが有益であると判断し、この膝サポータの開発を目指した。

2.2 膝サポータの構成

アクチュエータを組み込んだ膝サポータは、次の3つの項目で構成される。

- ・ 脚に装着するための保持具
- ・ 駆動力としてのアクチュエータ
- ・ 圧力センサを用いた制御系

2.3 膝サポータの試作

既存のDCモータとギヤヘッドを用いて試作した膝サポータを Fig.2.1 に示す。Fig.2.1 のように、補助サポータの保持具により本体を大腿部と下腿部で保持し、膝関節にDCモータをの回転中心をもってくる。下腿部と保持具の前後の間に圧力センサを取付け、下腿部の前後の圧力差を検出し、このときの圧力差を増幅してDCモータに入力する。下腿部前部の圧力が高くなれば、DCモータは下腿部を前に持ち上げる方向に駆動し、反対に下腿部後部の圧力が高くなれば、DCモータは下腿部を後ろに引く方向に駆動する。

DCモータを減速機構と組合せることにより、 $10\text{ kg f}\cdot\text{cm}$ のトルクを得ている。

以下に、使用したアクチュエータ部の仕様を示す。

表 2.1 アクチュエータ部の緒言

DCモータ	製造元	日本サーボ株式会社
	名称	ブラシ付き直流モータ
	形式	DME38BA
	定格出力	7.2W
	定格電圧	12V
	定格電流	1.3A
	定格トルク	150gf·cm
	定格回転速度	4700rpm
	重量	250g
	減速機構	製造元
名称		6DGタイプギヤヘッド
形式		6DG100
減速比		1/100
重量		550g

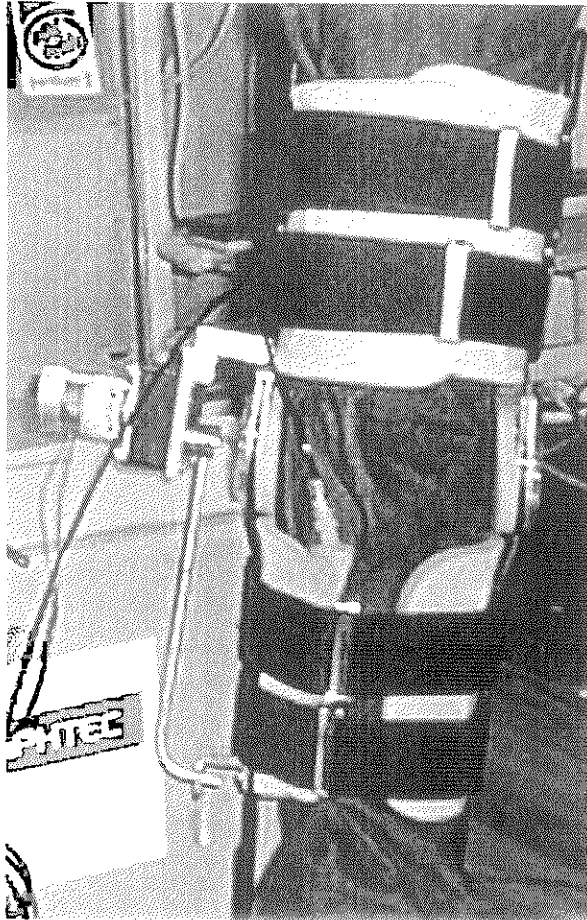


Fig.2.1 試作した膝サポータ

2.4 改善点

Fig.2.1 からもわかるように、試作した膝サポータは、駆動力として用いた DC モータが大きく横にはりだしている。また、実際に装着し、意図的に下腿部の前後に圧力差を起こして駆動させてみると、目的とする向きに駆動力を発生するものの、下腿部を動かし、また歩行などの動作を補助するには至らなかった。このことから、試作した膝サポータは減速機構を組込んではいるが、十分なトルクは得られておらず、実用には難しい。これ以上のトルクが必要である。

また、DC モータはロータの慣性により応答にずれを生じる。大きなトルクを取出すために DC モータを大型化すれば、ロータの慣性も大きくなり、応答は悪くなる。また、減速機構を用いるので、ギヤのバックラッシが存在し、これも応答を悪くする要因となる。膝サポータの目的から、障害を持つ人の行動を補助するためには、突発的な行動において、応答速度が速いことが必要となる。

改善すべき点としては、

- ・アクチュエータ部の小型・軽量化
- ・高トルク化
- ・応答速度の向上

が挙げられる。

この問題を解決するために有用なアクチュエータとして、減速機構を必要とせず、また、摩擦駆動であるために保持トルクが高く、応答速度も良好な、超音波モータが挙げられる。超音波モータについては第3章で述べる。