

700400332 B

厚生労働科学研究費補助金

長寿科学総合研究事業

超強力サンドイッチ型超音波モータを用いた  
パワーアシストスーツの実用化

平成14～16年度  
総合研究報告書

主任研究者 遠山 茂樹

平成17年 3月

## 目 次

### I. 総括研究報告

超強力サンドイッチ型超音波モータを用いた パワーアシストスーツの実用化	-----1
遠山 茂樹	

### II. 分担研究報告

超音波モータおよびパワーアシスト スーツ機構の開発に関する研究	-----4
遠山 茂樹	
パワーアシストスーツの制御に関する研究	-----10
永井 正夫	
安全センサの開発	-----12
梅田 倫弘	
機構の設計と強度計算	-----15
桑原 利彦	
小型アンプの開発	-----20
エコ プルワント	

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)  
総合研究報告書

超強力サンドイッチ型超音波モータを用いた  
パワーアシストスーツの実用化

主任研究者 遠山茂樹 国立大学法人 東京農工大学 教授

研究要旨

現在、日本は未曾有の高齢化社会になり、介護支援、生活支援の技術の向上が望まれている。しかし、介護は心理的な面からも機械に頼ることは難しく人手による場合が多い。特に日本では筋力が十分でない高齢者が介護に当たらざるを得ない場合も多く、介護支援は大変重要な問題である。本研究開発では介護者が装着できるパワーアシストスーツを実用化するための技術、機構に関する研究を行う。

また、本総合報告書においては各研究について目的、研究方法、考察および結論の4項目について簡潔に報告する。これらに関する詳細な実験データ、資料などは2002-2004年度の総括年度報告書に記載しているため、本報告書では省略する。

分担研究者

永井 正夫	国立大学法人 東京農工大学 教授
梅田 倫弘	国立大学法人 東京農工大学 教授
桑原 利彦	国立大学法人 東京農工大学 教授
エコ プルワント	国立大学法人 東京農工大学 助手

## A 研究目的

日本における 65 歳以上の人口に対する割合は年々増加している。高齢になるに従い、肢体に不自由を訴える人は当然多くなる。それに加え、障害を抱えた方たちも数多く存在する。都市においてエレベータ、エスカレータ、スロープの設置、障害者の目から見た家の設計や乗用車の設計などでバリアフリーの環境作りを積極的に行い始めている。これら環境的なサポートに加え、高齢者、障害者をサポートするものとして、義手、義足に代表される補装具がある。身体機能を補助する能動的なものから、駆動力を有し身体機能を補うものまで様々なものが開発されている。

介護に目を向けると、現在、高齢者の介護についての問題は年々深刻化してきている。その中でも少子高齢化に伴い介護を実際に行う人間も高齢であるということが大きな問題である。一般的に知られている人口ピラミッドからも明らかのように、この高齢者が高齢者の介護を行うという傾向は避けることができない。高齢者が介護を行う場合、問題となるのが高齢者の体力的に衰えているということである。

現在の介護動作は介護者の負担を極力減らすようよく検討されているが、一日当たりの介護動作の回数が多く疲労が蓄積しやすい。これらの現状を考えると、高齢者が一人で介護作業を行うというのは危険なものになってしまう。一方、体力的に余裕のある介護者の場合でも現状の介護施設では介護者不足が問題であり、一人当たりの作業回数も多く、上記のように疲労により腰痛などを患ってしまうといった事例も報告されている。これらの問題を解決する手段としてパワーアシストスーツ(以降 PAS)の開発を行ってきた。これは介護者の負担になっていると考えられる部位にアクチュエータとして超音波モータを配置し、介護者の身体的負担を大幅に減少させる補装具の一種である。

まず、この PAS 開発の一步として、主に介護動作をサポートすることを目的とする。今回開発する PAS のアクチュエータとして超音波モータを使用することとする。超音波モータはダイレクトドライブであり、静音性に優れ、省スペース化に有効であるという特性を有している。このような特徴を有する超音波モータを介護支援機器は従来にないものであり必ず広く普及すると確信している。

## B 研究方法

パワーアシストスーツは人間が装着するものであるため、動作の自由度の確保、パワーアシストのためのアクチュエータの開発および制御が重要であり、安全に使用できる必要がある。これらの技術が複雑に絡み合うことでパワーアシストスーツシステムとして運用することが可能となるが、これらの要素を同時に開発することは不可能である。そこで、動きやすいアシストスーツ機構開発、小型、高出力アクチュエータとして超音波モータの開発、開発した超音波モータの制御、超音波モータ用小型ドライバの開発および安全システムとしてのセンサ選定と開発の項目に分けて各々に関して研究を進める。これらは成果が出た時点、あるいは問題が発生した時点で他の研究項目との関連性を考慮した上で研究方針を調整し、より実用的なパワーアシストスーツシステムの開発を行う。

## C 考察および結論

最終的に、パワーアシストスーツシステムとして超音波モータ、制御用センサを装備したものが完成した。実際の動作実験に関しても、歩行、脚部と肘部のランダムな動作に対するパワーアシストは十分な性能を発揮した。さらに、介護動作中に予想できない突発的な負荷が装着者に掛かったとしても、装着者を保護するようなスーツ機構、制御システムも完成している。

これらの研究結果はパワーアシストスーツの技術だけではなく、他の福祉、介護機器開発に有効に応用できるものである。

## D 研究発表

### 学会発表

- ・ 遠山茂樹他、パワーアシストに最適な超音波モータの開発、平成 15 年度秋季
- ・ 遠山茂樹 他、機構解析シミュレータを用いた抱えあげ動作の解析、2004 年度秋季
- ・ 遠山茂樹 他、超音波モータを用いたパワーアシストスーツの開発、2005 年度精密工学会春季大会
- ・ 遠山茂樹 他、パワーアシストスーツ用超音波モータの開発ー超音波モータの高トルク化ー、2005 年度精密工学会春季大会
- ・ 遠山茂樹他、パワーアシストスーツの開発 機構設計と制御方法の開発、平成 15 年度春季

## E 知的所有権の取得状況

### 特許出願(平成 17 年度に予定)

- ・ 強力サンドイッチ型超音波モータを用いたパワーアシストスーツ
- ・ 動作しやすいパワーアシストスーツの機構

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)  
分担研究報告書  
超音波モータおよびパワーアシストスーツ機構の開発に関する研究  
研究者 遠山茂樹

#### 研究要旨

パワーアシストスーツ製作において最も重要なスーツ機構の設計、製作およびアシストスーツ用小型、高トルクの超音波モータの開発を行う。

スーツ機構は必要な自由度の検討、自重を逃がす機構の考案を経て、介護動作に適した動作のできる機構の開発を行った。介護動作に関しては動作自体を機構解析することで関節への負荷などを定量的に評価し、スーツによって保護すべき部位の検討の指針とした。

モータ開発は基本部であるロータ、ステータの設計ではなく高性能の得られたロータ、ステータを利用した新たなモータ構造を設計することである。また、アシストスーツへの装備も考慮し、小型軽量の構造も同時に検討する。

## A 研究目的

介護施設などで実際に行われている介護動作は、被介護者への負担と介護者自身が出す力を軽減できるようになっている。しかし、予想外の要因による転倒やけがは介護動作に慣れた介護者でも起こりうる事態である。すなわち、アシストスーツ製作の際には、介護動作を柔軟に行うことが出来るだけでなく、介護者をけがから守るための機構も設ける必要がある。

装備するアクチュエータは動作の邪魔にならないよう、小型軽量で極力薄い必要がある。この条件を満たすアクチュエータとして超音波モータがある。超音波モータは一部で使用、市販されているが、検討すべき余地を多く残しているモータである。加えて、普及している DC モータなどにはない多くの特徴を有しており、特に静音性、高応答性、保持トルクを有しているという特徴はアシストスーツのアクチュエータとして最も適当である。この超音波モータに関し、構造を検討することで高トルク化を目指す。

介護動作は非常にシンプルであり、介護の初心者でも簡単に行うことが出来る。この介護動作を機構解析し、動作時に各関節に発生するトルクを測ることで、介護動作のサポートすべきタイミング、保護すべき部位を明らかにする。

以降の研究方法、考察においてはスーツ機構開発、モータ構造開発、介護動作機構解析の3項目に分けて説明を行う。

## B 研究方法

### アシストスーツ機構開発

アシストスーツは人が装着するものであるため、人間と同じ動きの自由度を有している必要があり、スーツ自重および介護時の負荷が装着者の負担とならないような設計としなければならない。そこで強固な外骨格構造で地面に接地させ、スーツ自重、介護による負荷をスーツを通し地面に逃がす機構を設計した。これにより、装着後の動作、自由度、装着性を確認しより介護動作向けのスーツ設計を行う。具体的には対象となる動作に耐えられるだけのぎりぎりの強度とし、軽量化を計る。同時に、装着者とスーツの密着性を向上させるための装着部を新たに製作する。

これら装着性、軽量化の検討とともに動作の自由度を確保する必要がある。人間の腕、脚、腰などのねじり動作に関しては介護動作を行う際に重要な動きであるが、スーツ機構に回転の自由度をもたせて対応するのは困難である。それはねじり動作のための回転軸を設ける部位は自重による影響を受け易く、構造が大型化してしまうためである。さらに上記のような強固な機構を製作するためには金属を選択する以外になく、これにより動作範囲に制限がかかる。そのため、装着者の動作を妨げないような機構の設計には基本設計の見直しとスーツ構成材料を検討する必要がある。そこで、基本材質にある程度ねじれる材質を選択し、装着者と極力密着させることで動作の自由度を確保する。

### モータ構造開発

ステータ一枚の超音波モータの性能はこれまでの研究でトルク、安定性ともに向上してきた。しかしパワーアシストスーツ用の超音波モータとして使用するにはトルクが不足している。そこで不足分のトルクを補う手段として、超音波モータのサンドイッチ型構造化を検討する。超音波モータは構造が簡易であるためステータ、ロータの構造を変えることで容易にトルク向上を成す事ができる。これまでロータ一枚を二枚のステータで挟むタイプのサンドイッチ構造を研究してきたが、ステータから発生する進行波がロータ内で干渉するなどの原因が考えられ、トルクは約 1.7 倍程度の向上が見られたものの駆動が不安定という問題があった。そこでロータ二枚、ステータ二枚を用いた新しいタイプのサンドイッチ型モータを開発した。さらに上半身用としてφ60 サンドイッチモータを多段化したダブルサンドイッチモータも試作した。

## 介護動作解析

パワーアシストスーツは終日着用可能なように人間がおこなうすべての運動を許容する自由度が求められる一方スーツ自体、およびアクチュエータなど周辺機器の自重を装着者の負担としないような適切な機構も求められ単純に人体の解剖学的な自由度を模擬して設計することはできない。そこで本研究においては介護専門施設等でもっとも介護者が身体を痛めやすく、かつ介護動作の中では比較的大規模な運動である移乗動作を解析の対象とした。移乗動作はベッドに腰掛けた被介護者を介護者が車椅子に移し変える動作（またはその逆の動作）である。ベッドや車椅子が近くにあるため介護者は大きく前傾姿勢をとらなくてはならず腰関節モーメントは非常に大きくなるであろうことが予想される。また運動範囲が大きくこの動作が腰痛の原因となることが他の研究者による先行調査により明らかになっている。

以下に対象となる解析、測定項目を挙げる。

### ・抱きかかえ動作（二次元）

移乗動作のおよそ半分に対応する座位にある被介護者を立位姿勢まで抱き起こす抱きかかえ動作の解析を行った。抱きかかえ動作は運動がほぼ矢状面内で行われる二次元運動と近似できる移乗動作の予備実験として解析を行った。

### ・加速度センサを用いた動作測定

加速度センサを体幹、大腿部に固定し、水平面方向とのなす角を測定した。

### ・抱きかかえ動作（三次元）

初年度の研究で明らかになった問題点を考慮し、実験装置、被験者数を改善し研究を進めた。三次元動作測定器を用いることで抱きかかえ動作を三次元で測定した。また合わせて床反力も測定した。解析時は三次元モデルを作成し三次元的な動力学解析を行うことができた。結果アニメーションにより自然な人間の動きが再現されていることが確認された。

#### (i)測定装置・被験者服装

被験者は各関節位置にターゲットマーカを付け運動を行う。複数の CCD カメラによって動作中のマーカ軌跡を測定し各関節角度の推移として運動データを得る。ターゲットマーカの密着性を高めるため男性被験者は上半身裸、下半身はスパッツとし女性被験者はエアロビクス用の服を来てもらい計測を行った。ターゲットマーカは介護者・被介護者付けてもらい両者とも動作計測を行った。

#### (ii)初期姿勢・測定条件

抱えあげ動作、移乗動作とも椅子に座った被介護者と介護者が対面して立ち、両者が組みあつて静止した状態を初期姿勢とする。介護者は被介護者の腕の下から自分の腕をいれ被介護者の背中で組み、被介護者は介護者の首の腕を回して組み合った。計測中、被介護者役の被験者には極力脱力してもらうように指示し、初心介護者、熟練介護者とも事前に数回の練習を行い被介護者が動作中に十分補助を受けていることを確かめてから測定を開始した。

#### (iii)解析モデル

各被験者のモデルは胴体と下半身のみの6節リンクモデルとした。各関節は解剖学的自由度を考慮し同等の機能を有する機械的結合と仮定した。すなわち両膝を1自由度の回転関節、両股関節と腰関節を3自由度の球関節とした。

また、モデル各節の質量はChandlerの方法により決定し、慣性モーメントは質量と近似した形状から計算した。

#### (iv)移乗動作

抱きかかえ動作と同様の実験設備・解析モデルを用いて移乗動作の測定、動力学解析を行った。初心介護者と専門の福祉介護師の動作を比較することでこれまで行ってきた、負担の定量的な評価のほかに、負担を軽減するためのノウハウを工学的に評価することができた。

## C 考察および結論

### アシストスーツ機構開発

アシストスーツ機構開発に関しては一年目、二年目は目的を十分に満足できるようなものを開発することができなかったが、基本構造を確立することができたため、三年目の機構開発において介護動作に容易に適用し、かつ応用範囲の広いアシストスーツを開発することができた。重要な要素として、スーツ機構をエンジニアプラスチックで製作すること、装着者に合った装着部を設けることが挙げられる。特にエンジニアプラスチックによる製作で、軽量化、ねじり動作への適応の問題が解決し、大幅に実用化に近づいた。装着部は市販されているリハビリテーション用の補助具を参考に、スーツ装着者としてモデルを決め、モデルの型を取って製作した。今回モデルには身長、体重、体格ともに平均的な男性を選んだ。スーツ側にも調整機構を設けているため、ある程度の体格の差であれば対応できるようになっているが、体格が大きく異なる場合には新たに装着部を製作する必要がある。

介護動作は体を大きくねじる動作、力を出しやすい姿勢などの動作を含むため、場合によっては介護用以外の用途に使用できるだけの能力のあるアシストスーツ機構が完成したといえる。しかし、上記の装着部の問題などがあり、汎用的なアシストスーツを製作するのは技術的に困難である。そのため実用化のためには初めはオーダーメイドのような形で製作することで、普及させることができると考えられる。

### モータ構造開発

超音波モータは大幅にトルクが向上したサンドイッチ型超音波モータが開発できた。一年目、二年目に開発した大型の超音波モータもトルクの向上には有効であったものの、重量がアシストスーツの装備には不向きであるためサンドイッチ構造の開発は見送った。そのため、上半身用にφ60 超音波モータ、下半身用にφ80 超音波モータを使用することとしこれらのサイズでのサンドイッチ型超音波モータを開発した。結果、φ60 でシングルモータの約2倍、開発が困難であったφ80 のモータにおいても約1.5倍のトルク向上がみられた。さらなるトルク向上を目的としたφ60 ダブルサンドイッチ型超音波モータはシングルモータの約4倍のトルクを得ることができた。また、これらのモータは市販されている超音波モータと体積を比較すると、φ60 サンドイッチで約1.1倍、φ80 サンドイッチで約1.4倍、φ60 ダブルサンドイッチモータでも約2.2倍に収まっており、高トルク化、省スペース化に優れた構造である。

このようにアシストスーツ用アクチュエータとして様々な種類の高出力超音波モータを開発し、これらの性能、特性試験の結果その応用範囲がアシストスーツ技術に止まらないことが明確であるといえる。

## 介護動作解析

三次元動作測定と、床反力測定より得られたデータから動力学解析を行った結果、介護者の熟練度により腰関節への負荷の割合に差が生じていることが明らかになった。その要因として動的な力の影響が考えられる。熟練介護者が動作初期にある程度の勢いをつけテンポよく動作を行っているのに対し、初心介護者は終始力をいれたままゆっくりと動作を行っていた。関節角速度、関節パワーの比較からも熟練介護者が動的な力を利用しているのに対し、初心介護者は動作に必要な力をすべて自身の筋肉により発生しようとしている傾向が見られた。また動作計測により得られたデータから熟練者が両膝を主に駆動し動作を行っているのに対し、初心者は腰を主に動かして動作を行っていることが分かった。引越し業者など身体に非常に大きな負荷を伴う業種の専門家は、腰ではなく膝を動かすように訓練をするという。よって今回の比較により得られた熟練度による相違は妥当なものであると考えられる。

複雑な姿勢によって行われる介護動作を三次元で測定、解析することにより介護動作におけるノウハウを工学的に評価することができた。介護動作によってもっとも痛めやすい腰関節への負荷を小さくするためには、

- ・腰関節ではなく膝関節をおもに駆動して動作を行う
  - ・上半身にある程度の勢いをつけ腰関節まわりの動的な力を利用する
- ということが有効であると明らかになった。

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)  
分担研究報告書  
パワーアシストスーツの制御に関する研究  
研究者 永井 正夫

研究要旨

超音波モータは超音波振動を駆動力とするモータで、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、それによって起き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力を得るアクチュエータである。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となった。開発した超音波モータを用いて、パワーアシストスーツに必要な様々な駆動制御実験を行い、その制御性能を確認するとともにパワーアシストスーツの制御システムを構築する。

はじめに制御性能の確認のために位置・速度制御を行い超音波モータの性能が装着者のサポートをするに十分かどうかの確認を行う。次にパワーアシストのための制御法の検討、安全性を考慮した制御を行う。

## A 研究目的

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により駆動力を得るアクチュエータである。超音波モータは一般的に普及している電磁モータとは駆動原理、構造が根本的にことなり、その特徴として小型軽量、低速高トルク、磁気作用がないなど優れた性能を有している。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の独自性を十分に発揮できるという点である。

そのため、新たに開発したモータに基本となる制御を適用し、超音波モータの制御性能を評価する。その上で、超音波モータの特徴をいかしたパワーアシスト制御法を検討し、アシストスーツシステムとして実装する。

## B 研究方法

アシストスーツ用超音波モータとして、下半身にはステータ径 $\phi 80$ の超音波モータ、上半身にステータ径 $\phi 60$ の超音波モータを装備する。超音波モータの制御は一般に印加電圧の周波数か位相差を変化させることによって行う。通常位相差を制御した場合の方がより確実かつ細かく動作を変化させることができるが、 $\phi 80$ のモータは駆動の際の電流値が大きく、位相差による制御を行うドライバの開発が困難である。小型アンプの開発の項に記しているように、常に最適周波数を監視し、位相差制御を行えるドライバが完成している。そこで駆動には $\phi 80$ のモータに対しては市販されている周波数制御ドライバを用い、 $\phi 60$ のモータに対しては開発したドライバを用いて駆動制御を行う。

まずモータの動作性能を見るために、アシストスーツ装着者のランダムな動作に対しての追従性能を見る。この追従制御にはPI制御を用いが、 $\phi 80$ 用の周波数制御のドライバは仕様上、ある速度以下の速度で駆動することができない。そこで制御周期を変化させ、装着者に違和感がない程度の動特性を得られる制御周期を適用する。その上で、基本動作である歩行を行い動作追従の評価を行った。また、パワーアシストのための制御は指令値として関節角速度のみを用い、速度に応じて超音波モータの出力トルクを変化させるというシンプルな動作を行う。

$\phi 60$ のモータの駆動は高性能なドライバが完成したことで制御性が飛躍的に向上した。特に位相差制御を行うことで、周波数制御では不可能であった速度0、無負荷状態を行うことができる。より細かい指令値を与えることが出来るようになったため、肘関節の追従制御、パワーアシスト制御に加え、モータに粘弾特性をもたせることにより突発的な負荷に対応するような制御方法を考案した。

## C 考察および結論

下肢用 $\phi 80$ 、上肢用 $\phi 60$ の超音波モータを用いて駆動制御実験を行った。追従性能に関しては関節角度に対し $\phi 80$ で $4\sim 6^\circ$ 、 $\phi 60$ で $2\sim 3^\circ$ 程度の角度誤差があった。制御周期を短くすることで改善が見込めるが、装着者からは違和感がないとの報告があった。これはアシストスーツフレームと装着者が完全に密着していないためであるが、動作に負担を感じるという報告はなかったため、ある程度の誤差は許容できるといえる。

パワーアシスト制御に関しては、両モータとも装着者からはアシスト感があったとの評価を得た。アシスト率に関する定量的な評価に関しては安全センサの開発の項に記載する。

開発したドライバを用いた $\phi 60$ の粘弾特性を持たせたの駆動制御はシミュレーション結果とも傾向が一致し、実装した実験でもサポート感が得られた。

このように超音波モータの制御性能は十分にパワーアシストスーツに必要な条件を満たしている。しかしながら、超音波モータのトルクが人間の出すトルクに対し劣るため、アシスト率100%以上での制御ではなく、アシスト率を常に一定に保ち、装着者にパワーアシストによる違和感を与えないような制御システムとする必要がある。

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)

分担研究報告書

安全センサの開発

研究者 梅田 倫弘

#### 研究要旨

アシストスーツを安全に使用するための安全システム構築を行う。このシステムは足裏に装備したロードセルにより装着者の重心を判別し、緊急時の姿勢維持、あるいは無理な姿勢にならないよう、モータにフィードバックさせる。今回はロードセルによる重心位置の判別のための基礎研究を行った。

さらに、筋電位、筋圧力を検出することで、装着者の随意運動をセンシングし、関節トルクを推測する。このシステムと重心判定により、アシストスーツ装着者の状態、姿勢を詳細に把握することができる。

また、筋電位を用いてモータ駆動を行い、安全システムとして有効に作用するかの評価を行う。

## A 研究目的

介護者は、パワーアシストスーツを装着することによって、パワーアシストスーツを装着していない状態（日常生活）に比べて大きな力を発揮することが出来るようになる。大きな力を発揮できる反面で急激な負荷変動等からの危険性が増して安全性が損なわれてしまう場合がある。今回は特に要介護者を介護する場合は、パワーアシストスーツ装着者である介護者及び要介護者の安全性というものは最重要項目であり、装着者となる介護者が最も気にかける部分である。また、この安全性が確保されなければ、パワーアシストスーツは介護の現場で利用されることは無いと考えられる。

パワーアシストスーツが利用されるものにするために、介護動作において最も負荷がかかる腰や膝に急激な過負荷がかかったときの警告やその負荷を最小とするパワーアシストスーツの姿勢制御を行うことで安全性を確保する。そこで本研究では、介護動作中におけるパワーアシストスーツの装着者の姿勢が安定しているもしくは異常であるかどうか判断するものとして足底に足裏反圧センサを装備する。この足裏反圧センサからパワーアシストスーツを着用した装着者の床反力の相対値及び接地情報を検出し、装着者の重心判定を行う。

重心位置とともに装着者の姿勢を検出する手段として、表面筋電位、筋圧力を測定するシステムについて検討する。筋電位、筋圧力は装着者の関節トルクの推定、アシスト率の定量的な評価、モータ駆動の信号として有効に使用できる信号であるため、これらを行うためのシステム構築を行う。

## B 研究方法

### 重心判定

アシストスーツを着用した装着者の足底にロードセルを設置した。ロードセルの検出部上に硬い金属板を取り付け、その間にロードセルでのひずみを妨げない程度の弾性体の緩衝材を入れることでロードセルの検出部に垂直方向の力が負荷されるようにした。このロードセルユニットを片足に付き4個、両足計8個を配置し、アシストスーツを着用した装着者の床反力の相対値及び接地情報を測定した。このロードセルを設置した位置は、人間の足裏で最も力が負荷されるとされている部分である。

ロードセルから得られる力はアナログ電圧であり、A/D変換して制御ユニットに入力し装着者の重心位置を算出した。今回は、介護動作はダイナミクスを持つため、慣性力と重力がつくるモーメントがゼロとなるZMP理論を用いることで装着者の重心位置を算出した。

### 筋電位、筋圧力

今回センシングする筋電位は表面筋電位であり、対象となる筋肉のある部位に電極を貼り付けて信号を測定する。筋圧力は、筋張力による筋表面での圧力変化をロードセルによって測定する。筋電位、筋圧力はともに測定対象者の筋の出力によって変化するため、パワーアシストを行いながら動作した際のアシスト率の評価にも使用できる。

筋電位の測定は主にアシスト率に関する評価を行いかつスーツ動作を効果的に行うための信号として使用するための検討を行う。表面筋電位は、リアルタイムで測定を行うと、値が大きく変動することが知られている。アシスト率を評価する際には測定後にそれらを平均化することで、容易に結果を得ることができるが、関節トルクを推定しながらモータを駆動させることは出来ない。そこで、得られる筋電位の信号をフィルタに通すことで平滑化を行いその信号をモータ駆動制御に使用する。

筋圧力は筋電位と異なり、得られる信号が大きく変動することがないため、容易にアシスト率評価、駆動制御、姿勢検出に利用できる。そこで、筋圧力を駆動制御、姿勢検出の信号として扱いやすくするため、装着者の関節トルクとの関係を調べる。今回は肘の動きを対象とした。肘の関節角度、関節トルクと上腕部の筋圧力は非常に密接な関係にあるため、これらを定式化することでアシスト率評価、駆動制御、姿勢検出を容易に行うことができるようになる。

## C 考察および結論

### 重心判定

今回足裏センサから床反力を検出し、それによって体の重心位置を算出することで重心位置の判定を行った。この重心判定と各関節に取り付けられたエンコーダからの回転角度から得られた体の姿勢とその安全性が判定できると考えられる。これによって危険な体勢にあるときにその姿勢を安定にさせるという動作をパワーアシストスーツ側にさせることも可能になる。

### 筋電位、筋圧力

装着者の意志をアシストスーツの駆動に反映させ、かつ効果的なパワーアシストを得るために駆動信号として表面筋電位を用いた。筋電位はそのままでは関節トルクの大きさを把握することはできないので低域通過フィルタにより高周波成分の除去を行った。このことにより筋電位から関節トルクの大きさをほぼ把握することができ、またフィルタの次数により超音波モータの応答性が変化することも確認することができた。

開発したアシストスーツを装着し肘関節に置いて重り持ち上げ実験をおこなった。アシストゲインを調整することにより持ち上げ時に発生する筋電位の低下が確認でき、アシスト率評価システムとして有効性を確認することができた。

筋圧力と関節トルク、関節角度の関係を明らかにし定式化することでアシスト率評価、モータ駆動を行うことができるようになった。

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)

分担研究報告書

機構の設計と強度計算

研究者 桑原 利彦

#### 研究要旨

超音波モータは摩擦力を利用して駆動力を得るアクチュエータである。この駆動原理により、ステータ・ロータ間の接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのため、ロータ材の選定、耐磨耗用の摩擦材の選択は非常に重要である。前年度までのロータ材の検討、耐磨耗用の摩擦材の検討により耐久力、トルクの向上を示唆することが出来た。更なる高トルク化のための有限要素法を用いたステータ形状の解析、超音波モータの押し付け機構に関する検討を行った。これまでの研究でステータを二枚使用したサンドイッチ型にすることでほぼ同体積でトルクを約2倍まで上げることが出来ることがわかっている。そこで今回はステータ一枚での性能の向上のため、これまで製作してきたモータ(Φ80、Φ100)の機構を見直し、さらに大型のモータ(Φ120、Φ145)、Φ110の大型サンドイッチ型モータを製作しトルクの向上を目指した。

## A 研究目的

アクチュエータは、パワーアシストスーツを人体に装備し、装着者の力などを効率良くアシストするための重要な要素として挙げられる。これは、身体に装着する事から更に厳しい制約となるためである。アクチュエータとして求められる特性は、長時間装着していても負担にならないよう小型軽量であり、力を補助するだけの大出力である。また、人間の関節特有の性質である粘弾性特性を有することである。小型軽量かつ大出力を実現することは既存のアクチュエータでは、難しく、新しいアクチュエータの提案が望まれてきた。以上の理由から、小型軽量かつ静粛性に優れ、摩擦駆動により粘弾性特性を有する進行波型超音波モータは重要な存在となり得ている。特に超音波モータは印加電圧を変化させることで瞬時にフリー状態を実現できるため、フェールセーフ機能の実現も容易でありパワーアシストスーツに適したアクチュエータである。だが、パワーアシストスーツにはその性質上、小型軽量を実現しつつ大出力を発揮する事が求められる。このため更なる小型軽量化、出力特性の向上を行わねばならない。本章では、この超音波モータの高出力化を行う。

## B 研究方法

超音波モータをパワーアシストスーツに適したアクチュエータにするためには、高トルクであり小型軽量という、相反するものを両立したものでなければならない。そこで、この問題を解決するためにまず、超音波モータの出力を理論的に解明した。今回、解明した超音波モータの理論から導き出した超音波モータの出力特性式より、まずステータについて注目した場合、振動振幅だけでなく進行波の波数も重要であることが分った。また、ステータとロータの各共振周波数の比が重要であることも明確になった。

得られた見解をもとに、パワーアシストスーツ用超音波モータを製作した。リフトタイプのパワーアシストスーツ用の超音波モータは高出力なものが求められるため、超音波モータのトルクがステータ直径の3乗に比例することから、ステータ直径 $\phi 100$ 、 $\phi 120$ 、 $\phi 145$  mmの超音波モータを製作した。また、より高出力にするためにステータ直径 $\phi 110$  mmのものを二つ使用したダブル型超音波モータ、ステータ直径 $\phi 60$ mm を3個並列し、それを積層化した平面複数型超音波モータを製作した。サポートタイプのパワーアシストスーツ用の超音波モータは、小型軽量で高出力なものが求められる。そこで、本研究では人間の関節に適用できるサイズとしてステータ直径 $\phi 80$  mmの超音波モータを製作した。製作した超音波モータの基本性能を明確にするるとともに今回導き出した超音波モータの理論の検証を行った。

超音波モータの出力トルクの向上及び軽量化には、超音波モータの要素で重要な要素であるステータの性能向上は必要不可欠である。そこで、本研究ではステータの材料について検討を行う。本研究室では今までに超音波モータのステータ材料は、真鍮及びステンレス合金 SUS420-J2 を主に使用してきた。しかし、真鍮は密度が大きく超音波モータ全体の重量が増してしまうという欠点がある。また、ステンレス合金は加工性に若干の欠点がある。そこで本研究では、それぞれの欠点を克服するためにアルミ合金 A6061、リン青銅 C5210、チタン合金 TP340、ステンレス鋼 SUS420-J2 の4種類の材料について、振動解析及び振動振幅測定、トルク試験を行い検討した。

ステータを軽量化した場合、質量が減ってしまい運動エネルギーが低下し、結果的に超音波モータの出力が低下してしまう。そこで、この問題を解決すべくステータ振動部にある櫛歯に注目し、櫛歯数を変化させたときについて有限要素法を用いて解析・検討を行い、振動振幅を図った。

超音波モータは、摩擦駆動であるため長時間の連続駆動した場合、発熱等による出力特性が変化するという現象がある。また、その発熱によってパワーアシストスーツ装着者は、不快に思うだろう。そこで、これらの問題を解決する方法としてライニング材が挙げられる。このライニング材は、ステータの超音波振動を効率よくロータの回転力に換える働きをするものであり、超音波モータ全体の寿命にも影響を与えるものである。本研究では、ライニング材の対象としてロータに熱硬化性フェノール樹脂を貼り付けた。また当研究室ではいまままでにステータ側にライニング材を貼り付けてこなかったが、本研究ではステ

ータにフッ素樹脂を貼り付けた。ステータ及びロータにそれぞれライニング材を貼り付けることによって、摩擦熱等による圧電素子と弾性体を貼り合わせている接着層の劣化を防ぎ、大幅な出力特性の低下を防ぐことが出来ると考えられる。このステータとロータに貼り付けたライニング材を組み合わせた時の出力特性及び安定性を明確にするためにトルク試験や耐久試験を行い、ライニング材を検討した。

## C 考察および結論

今回製作したφ80超音波モータ、φ80軽量サンドイッチ型超音波モータはこれまでの本研究室で製作した超音波モータに比べ、大きくトルクを向上させることができた。その要因として振動モード、ロータ形状の変更が挙げられる。振動モードはこれまでの本研究室では9波のモードが主流であり、トルク向上のために振動振幅の増大にのみ着目していた。今回モデル化により振動振幅以外に振動の波数がトルク向上に関わることに着目し製作した。また、ロータ形状もこれまで一枚の円盤を基本とし、ライニング材を工夫することが重視されていたが、ロータの共振周波数に注目し形状を変えて再設計した。さらにステータとロータをケースに固定することで押し付け力の固定を図ったことによって出力特性が大幅に向上したと考えられる。また、φ80軽量サンドイッチ型超音波モータは、重量面においても良好な結果が得られた。これは、超音波モータの重量の大半を占めるステータ材料の検討を行い、軽量性や出力特性の面から検討した結果であると考えられる。

今回製作した超音波モータの回転数、トルク測定結果より、リフトタイプのパワーアシストスーツに最適な超音波モータの検討を行う。リフトタイプのパワーアシストスーツはサポート率を重視するパワーアシストスーツであるため、トルクの大きさが最も重要な要素である。単純なトルクの比較ではステータ二枚を使用しているφ110ダブル型超音波モータが最も大きい。ただ、今回製作したφ110ダブル型超音波モータは大型超音波モータのダブル化に対する試験的な要素が大きく、これまでの研究成果から検討すると、ステータ直径φ145mmをサンドイッチ化したモータがトルク的には最もリフトタイプのパワーアシストスーツに適していると考えられる。サンドイッチ化には複数のモータを同期させて動作させることが重要である。その面から検討するとφ100、φ120W、φ145W超音波モータがCW方向、CCW方向の特性の違いも少なく、適しているといえる。つまり、トルクを重視して判断するならばφ145W超音波モータを使用するのが最も良好な結果が得られると予想される。次にパワーアシストスーツ装備の面から検討する。リフトタイプのパワーアシストスーツはある程度の重さには耐えられるが、重くなった分はモータの出力で補わなければならない