

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 16 年度 総括研究報告書

主任研究者 遠山 茂樹

平成 17 年 3 月

目 次

I. 総合研究報告

- 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 -----6
スーツ機構の開発に関する研究
遠山 茂樹
- パワーアシストスーツの制御に関する研究 -----32
安全センサーの開発
小型アンプの開発
永井 正夫、梅田 倫弘、エコ プルワント
- 機構の設計と強度計算 -----133
桑原 利彦

厚生労働科学研究費補助金(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会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、介護支援技術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。

本年度は三年目であり、高出力化に加え、小型軽量化の技術の向上を目指した。スーツの軽量化、可動範囲の向上のための検討を中心により介護動作に適した構造を検討する。さらに安全システムとして筋電位、筋圧力を使用したシステム開発、モータ制御実験を行った。

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。高齢者、身体障害者のために都市においてはエレベータ、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、身体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。転じて介護者側に目を向けると、少子高齢化のため、肢体不自由となった高齢者を支える若手介護者の負担が増加しており、介護活動は健常な介護者にとっても身体的に負担の大きなものとなっている。そのため自宅介護における高齢者同士での介護においては介護者側の高齢者がけがをするという事態も容易に想像できる。

そこで身体的負担の軽減、全身の動作をサポートするパワーアシストスーツ(以降PAS)を提案する。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

本年度は三年目でありこれまでの成果を元に、より実用的なパワーアシストスーツの機構の開発、サンドイッチ型高出力モータの開発を中心に研究開発を進めた。アシストスーツ用アクチュエータとして省スペースなφ60サンドイッチ超音波モータ、φ80サンドイッチ超音波モータ、さらなるトルク向上を目的としたφダブルサンドイッチ型超音波モータを開発、試作した。開発したモータの特性を調べ、追従制御、インピーダンス制御システムを構築した。今回は代表的な関節として肘関節を取り上げ、ランダムな運動に対する追従制御、突発的な付加に対応するような粘弾特性を有する制御システムの構築を行った。

下半身用のφ80サンドイッチモータは軽量化、トルク向上を重視した開発を行った。さらに筋電位、筋圧力を用いた駆動制御システムを構築し、パワーアシスト制御に有効であることを確認できた。さらに制御性、携帯性を向上させるための小型モータドライバの開発を行った。

パワーアシストスーツの機構開発は重要なテーマである。今年度は対象となる介護動作を機構学的に解析を行い介護動作の有効性を調査するとともに、前年度に開発したスーツに改良を加え、より介護動作に柔軟に対応できるアシストスーツの開発に成功した。加えて、アシストスーツの動作、評価のための筋電位、筋圧力に関する検討を行った。

C. 研究成果

今年度φ60の省スペース型サンドイッチモータの開発によりアシストスーツ上半身の応用性が増大した。またこのサンドイッチモータは市販されているφ60超音波モータとほぼ変わらない体積で2倍のトルクを出力可能である。さらに試作であるがφ60のサンドイッチモータを製作し、シングルモータの4倍のトルク、および優れた制御性が確認できた。φ80サンドイッチ型超音波モータも同様に小型、省スペース、約1.5倍の高トルクに成功しアシストスーツ下半身のアシスト率向上に有効であるといえる。さらに開発した超音波モータ用ドライバを用いたダブルサンドイッチモータの追従性能試験、インピーダンス制御試験の結果は超音波モータをパワーアシストに使用するにあたり非常に高性能であることを示している。特にインピーダンス制御の結果は、人間の筋肉の粘弾性を超音波モータに持たせるための制御であり、このシステムの完成によりアシストスーツ上半身のパワーアシスト、安全性が飛躍的に向上した。

アシストスーツの機構開発においては、前年度までに基本となる機構が完成しており、今年度は装着者の可動範囲を広げることが目的であったが、腰周り、腿部のスライド機構の追加、および肩周りの機構の調整を行うことで目的を満足するだけの動作範囲を確保することができた。これは介護施設で頻繁に行われるベッド-車椅子間の移乗移載動作のサポートだけでなく、よりアシストスーツの可動範囲を必要とする介護動作にも対応することができるようになっていく。さらに、人間の動作よりも100ms程速く出力が得られることが知られている筋電位をトリガとして利用した駆動システム、筋圧力と関節トルク、関節角度を定式化することによる肘関節に関するアシストスーツのパワーアシストシステムを開発することで、これら筋電位、筋圧力がアシストスーツ用パワーアシスト制御、随意運動のセンシングに有効であることが確認できた。

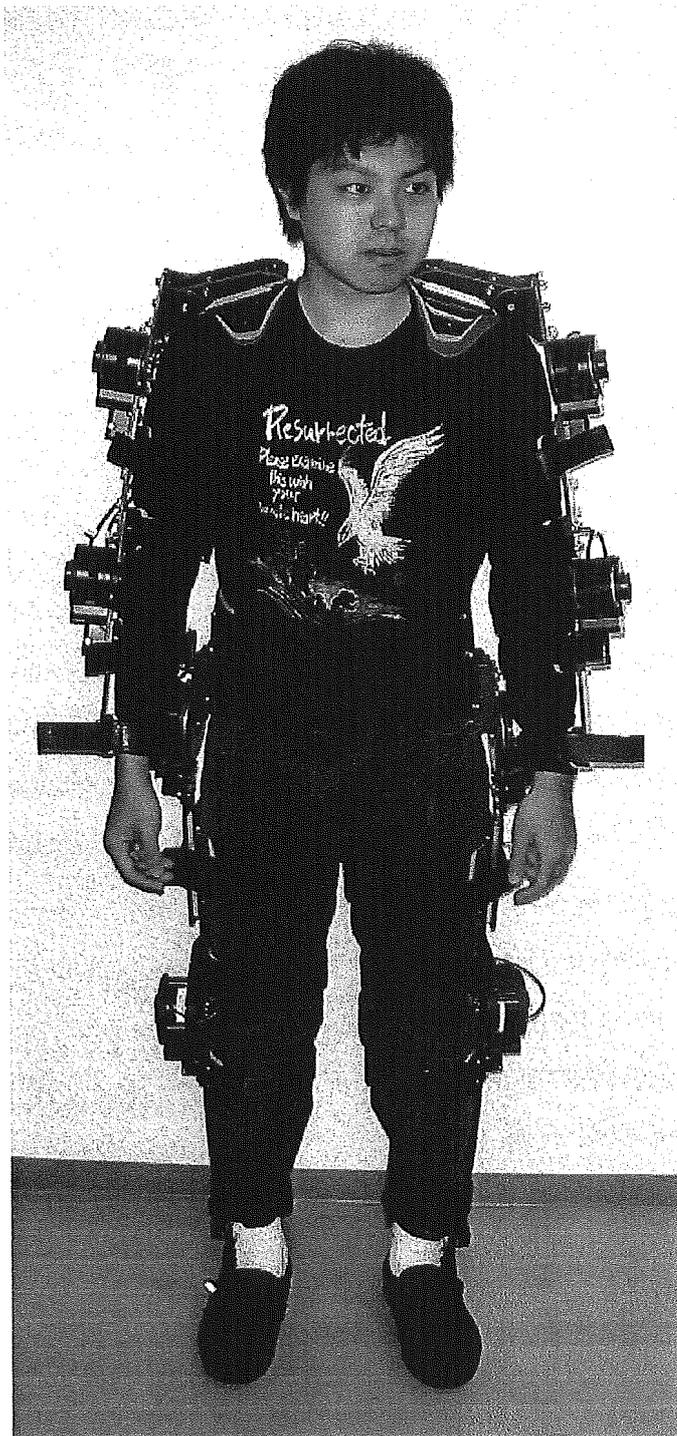


図1 パワーアシストスーツ

D. 考察

今年度の研究の結果、介護用パワーアシストスーツの技術は完成したといえる。以降はパワーアシストのための制御システムの構築、小型化が課題となる。また、アシストスーツは介護動作に対応することを前提に設計されているため、汎用性はほとんどない。そこで応用例として、スーツ各部を取り外しリハビリテーションに応用するための新たな機構開発なども考えられる。

E. 結論

三年目である今年度の研究により、アシストスーツ機構の可動範囲が大きくなり、介護動作以外の動作にも容易に対応できる。さらに、今年度開発したサンドイッチ型高出力型超音波モータはその応用範囲が非常に広く、主に省スペースで柔軟かつ高トルクを必要とする場所での使用に有効である。さらにパワーアシストスーツのアシスト率の評価を、筋電位、筋圧力によって測定するシステムが構築できたため、これまで定量的な評価が不可能であったアシスト率を容易に計測できるようになった。

F. 研究発表

学会発表

- ・ 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、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

G. 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

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する側も高齢であるということが大きな問題になってきている。高齢者介護を移乗作業など体力を要する作業は多いので高齢者が1人で介護作業を行うというのは、介護者自身のけがにもつながり危険なものになってしまう。そこで上記の問題を解決するために本研究では介護者の身体で最も負担となる部位にアクチュエータを配置し介護者の身体的負担を大幅に減少させることを目的としたパワーアシストスーツの開発を行う。今年度は介護動作を機構的に解析することで、各関節にかかる負荷を測定する。これにより介護動作を定量的に評価することでアシストスーツ機構開発に応用する。また、アシストスーツは軽量化、装着性の向上を目的として開発を行う。

A. 研究目的

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おおきな問題である。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な衰えているということである。現在の介護動作は図 1.1-1.4 に示すように、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前年度よりパワーアシストスーツ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。

今年度は前年度までの開発結果を基に軽量、装着性、可動範囲を向上させる。さらに介護動作の解析を行うことで最も負担となる部位、動作のタイミングを調査する。また、上半身用にトルク向上、省スペースを考慮したφ60 ダブルサンディッチ型超音波モータを、製作した。

介護動作

現在、介護動作において様々な研究がなされている。人の自然な動きを再現してやることで、介護者の負担を軽減するとともに、被介護者の運動を促すといった福祉学上の介護動作が福祉の現場においておこなわれている。また、下記の図を見てもわかるように、介護者と被介護者の触れ合いが多い。これらにより、被介護者に安心感を与えると共に信頼を得ることもできる。以下に主な介護動作を幾つか上げる。

1.1 ベッドから車椅子への移譲

脚が不自由な人に対しては 1.2 の車椅子からベッドへの移譲と同程度数多く行う動作のひとつである。図にあるように、被介護者は常に脚を地面に着けた状態で、かつ介護者の方に腕を回してもらおう。このとき介護者は被介護者の脚の間に脚を入れ、被介護者の腰付近を持って持ち上げ、腰および足をひねることでベッドから車椅子への移譲を行う。

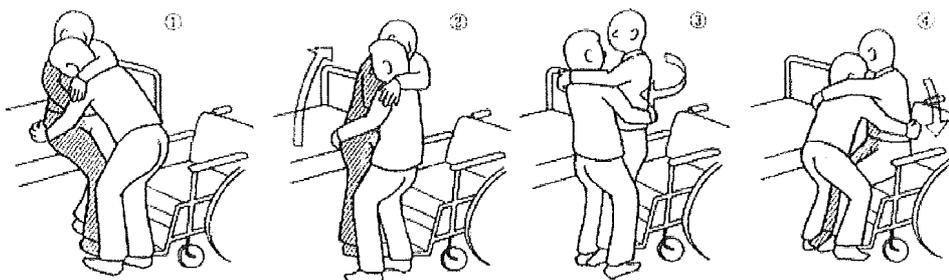


図 1.1 ベッドから車椅子への移譲

1.2 車椅子からベッドへの移譲

1.1 の動作の逆である。

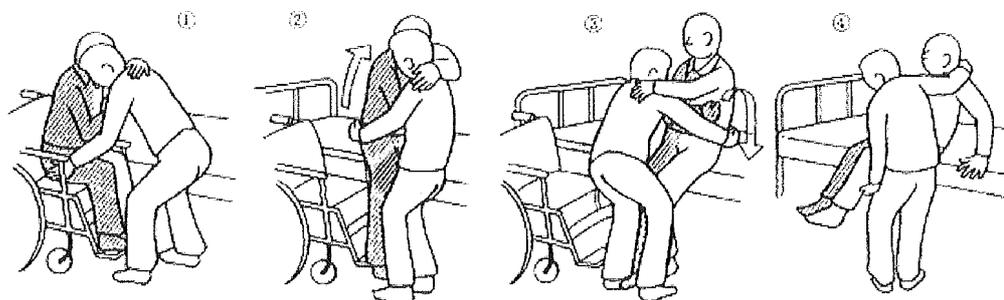


図 1.2 車椅子からベッドへの移譲

1.3 上体起こし

上記移譲動作の前動作として行われる動作である。同様に被介護者の腕を肩に回し、膝を立ててやることで起こしやすくする。

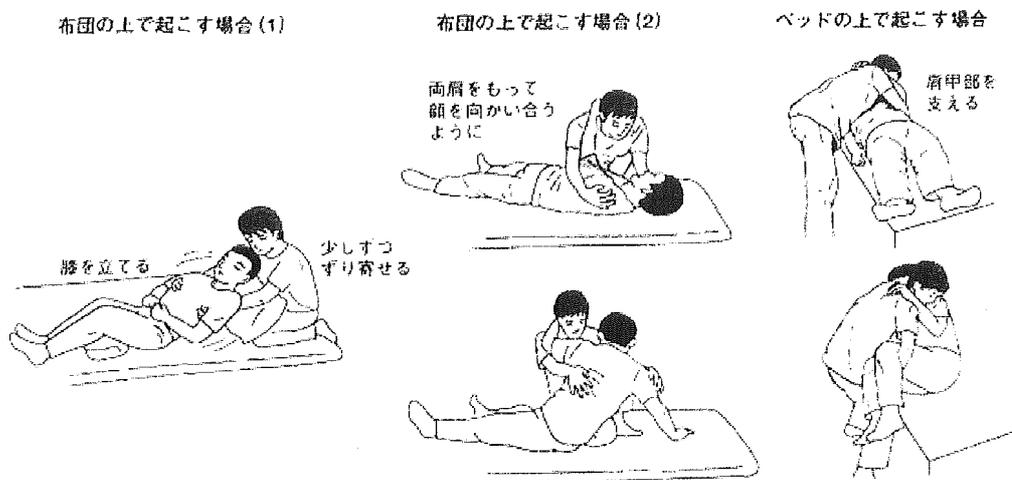


図 1.3 上体起こし

1.4 ベッド上での移動(頭方向)

主に車椅子からベッドへの移譲後に行われる動作である。図にあるように被介護者の膝を立てて、上半身の下に介護者の腕を入れて移動させる。この場合被介護者とシーツの間の摩擦などがあるため、他の動作に比べ力が必要である。

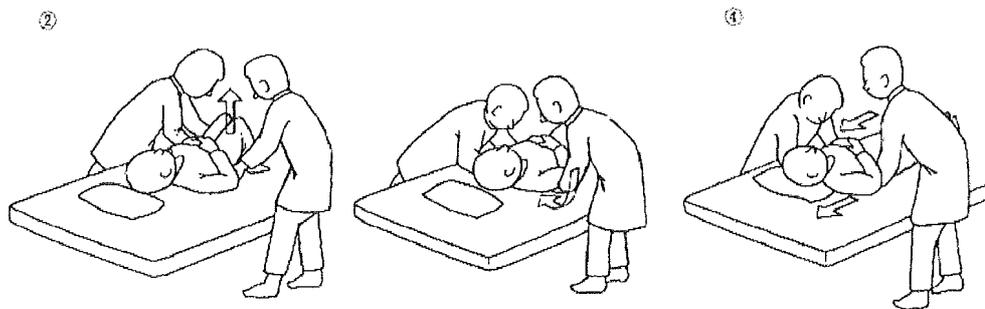


図 1.4 ベッド上での移動(頭方向)

B. 研究方法

1. PAS 機構開発

スーツ機構開発においては下記が基本構造として挙げられる。

- ・モータを装備するための構造、および位置
- ・介護動作に対応できるスーツの自由度の確保
- ・装着者の負担にならないこと

これらに関しては前年度までに開発した機構を基に改善し、加えて装着性の向上させるための装着部、肩周りの動作を滑らかにするための機構を新たに開発する。

2. 介護動作の解析

介護用パワーアシストスーツの製作にあたりスーツの機構、アクチュエータ出力、制御方法を検討するため実際の介護動作の動力的解析を行った。対象とした動作はベッド端から車椅子へ被介護者を移し変える移乗動作(図 2.1)と、椅子に座った被介護者を立位まで引っ張りあげる抱きかかえ動作(図 2.2)の二つである。このうち移乗動作は介護現場で日常頻繁におこなわれかつもっとも介護者への負担が大きいとされる動作でありこの動作によって介護者が腰を痛めるという事例が多く報告されている。また移乗動作が三次元的で複雑な姿勢、運動で行われるのに対し、抱えあげ動作はほぼ矢状面内で行われる二次元運動と近似できる。移乗動作は被介護者を[持ち上げ]→[旋回させ]→[着席させる]というプロセスで進行し、前半と後半はほぼ逆動作ととることができ、抱えあげ動作は移乗動作の前半部に相当するため移乗動作の予備段階として解析を行った。

実験の被験者は介護者と被介護者で一組とし、学生が介護者を務める初心者ペアと専門の福祉介護師が介護者を務める熟練者ペアの二組で行った。両者のデータを比較することで介護動作のノウハウを工学的に評価しパワーアシストスーツ設計の指針とする。なお両ペアとも被介護者は健常者とした。



図 2.1 移乗動作



図 2.2 抱えあげ動作

2.1 動作計測

動力学解析を行うため介護動作の計測を行った。動作計測には Vicon 社製の 3次元動作測定器を用いた。また日本キスラー社製のフォースプレートを使用して床半力も同時に計測した。各動作を初心者・熟練者のペアにそれぞれ5回ずつ行ってもらい測定した。サンプリング周波数は運動データ、床半力データとも 60Hz である。

測定装置・被験者服装

三次元動作測定器および床半力計の配置を図 2.3 に示す。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。ターゲットマーカの配置を図 2.4 に示す。また被験者のデータを表 2.1 に示す。

表 2.1 被験者データ

	性別等	体重[kg]	身長[cm]	年齢[才]
初心者ペア	男性、初心者	65	170	22
	男性、健常者	45	167	24
熟練者ペア	女性、福祉介護師	48	158	30
	女性、健常者	46	150	24

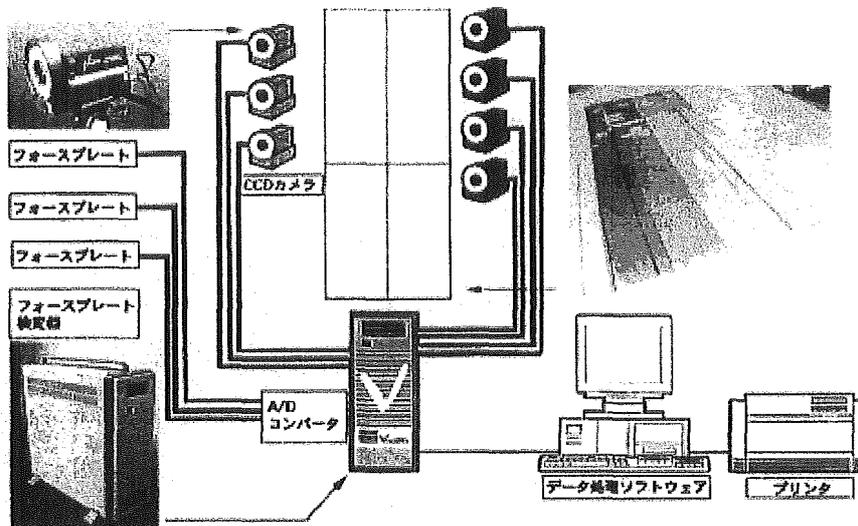


図 2.3 三次元動作測定システム構成図



図 2.4
ターゲットマーカ配置図

2.2 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、両者が組みあたっ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。組み合った様子を図 2.5 に示す。また手の状態を図 2.6 に示す。

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。



図 2.5 被験者姿勢



図 2.6 組み手

測定結果

抱えあげ動作・移乗動作の測定結果は本書巻末付録に掲載する。

2.3 動力学解析

測定した介護動作の運動データと床半力データから介護者、被介護者の動力学解析を行った。歩行、走行などと異なり上半身の接触状況が複雑であるため今回は床半力を入力し下肢から解く方法により解析した。各被験者のモデルは剛体リンクモデルとし解析プログラムは本研究室で開発した機構解析ソフト **A1MOTION** を使用した。

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。モデルを図2.7に示す。

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。初心介護者・熟練介護者モデルのパラメータを表2.2、表2.3に示す。

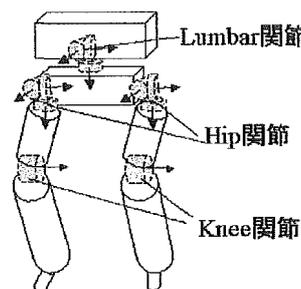


図 2.7 解析モデル

表 2.2 初心介護者モデルのパラメータ

	形状	寸法[m]	質量[kg]	慣性モーメント[Nm・sec ² /rad]
体幹	立方体	0.32/0.32/0.1	21.95	0.31/0.31/0.17
骨盤	立方体	0.22/0.38/0.1	11.92	0.05/0.05/0.06
上腿	円柱	0.42/0.1	6.74	0.11/0.11/0.02
下腿(足部含む)	円柱	0.38/0.1	2.68	0.03/0.03/0.00

表 2.3 熟練介護者モデルのパラメータ

	形状	寸法[m]	質量[kg]	慣性モーメント[Nm・sec ² /rad]
体幹	立方体	0.37/0.23/0.1	15.25	0.22/0.22/0.12
骨盤	立方体	0.2/0.4/0.1	9.58	0.04/0.04/0.05
上腿	円柱	0.37/0.1	4.58	0.06/0.06/0.01
下腿(足部含む)	円柱	0.36/0.1	1.93	0.02/0.02/0.00

※寸法は節形状が立方体である場合は高さ、幅、奥行きの順に、円柱である場合は高さ、直径の順示す。また、慣性モーメントは基本姿勢でのグローバル系 X 軸、Y 軸、Z 軸まわりの順に示す。

3. モータ開発

超音波モータとは超音波領域の機械的振動を利用した摩擦駆動のアクチュエータである。このモータの構造は振動部である弾性体に圧電素子を接着したステータと駆動部であるロータによって構成されている。超音波モータはステータに超音波領域の 2 相の交流電圧を印加することによって、圧電素子の電歪現象を利用した微小振動によりステータ表面に進行波を発生させる。進行波の任意の一点では楕円運動が発生しており、この状態のステータにロータを押し付けることでその摩擦力によりロータが進行波と反対方向に回転する。このような超音波モータを進行波型超音波モータという。従来の電磁式モータと原理、構造が全く異なっており、次のような特徴を有している。

- ・減速器なしで低速回転、高トルクを発生する。
- ・応答性が良い。
- ・構造が簡単なので小型、軽量化が容易である。
- ・摩擦駆動のため保持トルクを有しており、ブレーキ機構が必要ない。
- ・磁界を発生せず、磁界の作用を受けにくい。

サンドイッチモータ

上記の超音波モータの特徴はPAS 開発には最適である。そこで省スペースを考慮し、PAS の下半身(腰、膝)には $\phi 80$ 超音波モータ、上半身(肩、肘)には $\phi 60$ 超音波モータを装備することとした。今回はトルク向上を目的とし、上半身用に開発した $\phi 60$ ダブルサンドイッチ型超音波モータについて報告する。

超音波モータは先に述べたようにロータとステータの 2 つの部品から構成されるため、設計の自由度が大きい。これまで当研究室において基本構造を応用し、ロータ一枚をステータ二枚で挟み込むタイプのサンドイッチモータを開発してきた(図 1)。

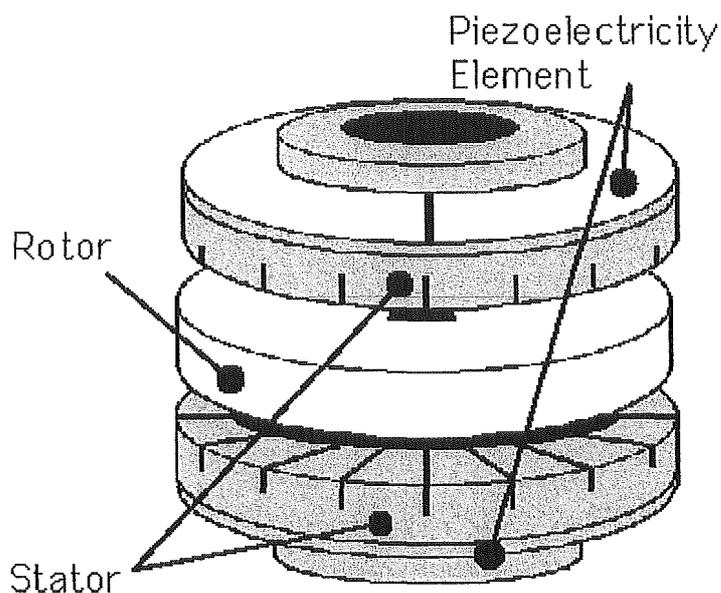
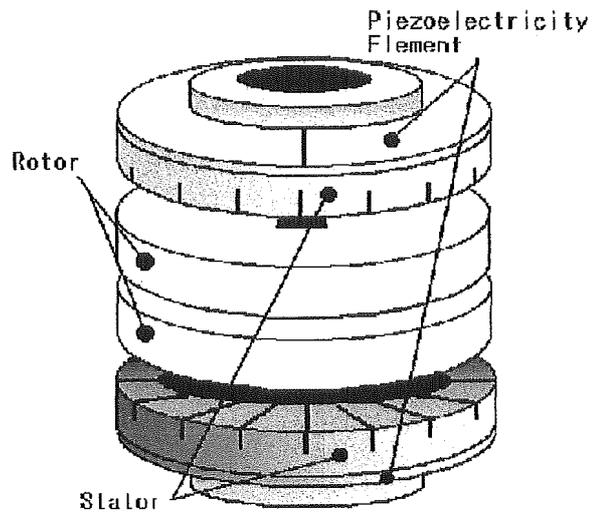


図1 Sandwich Motor

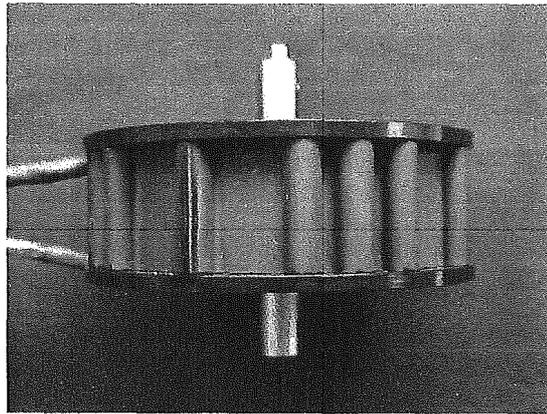
この構造により約 1.7 倍のトルク向上が確認できた。しかしながらこのタイプのモータは駆動が非常に不安定であり、製作には、二枚の進行波の位相を一致させることが重要となるが、機械的に一致させるのは非常に困難である。また、一般的に超音波モータの製作にはステータの共振周波数に対するロータの振動状態も考慮し設計を行うが、このタイプではロータの振動状態を解析するのが困難であるため、最適なロータ構造を設計することができなかった。

そこで今回はロータの振動状態を考慮し、モータを超音波モータの構造を多段化する機構を考案した。イメージ図を図 2 に示す。各ロータとステータの組み合わせにおいて、ロータを向かい合わせにしたのは、二枚のロータ間に板ばねを設けることで二つのステータにかかる押し付け力の均等化を図ったためである。この構造により二組のモータの出力特性がほぼ同一になり、各ステータの進行波がロータで干渉することがないため、シングルのモータの最大回転数を維持したまま、トルクを約 1.9 倍まで増加させることに成功した。

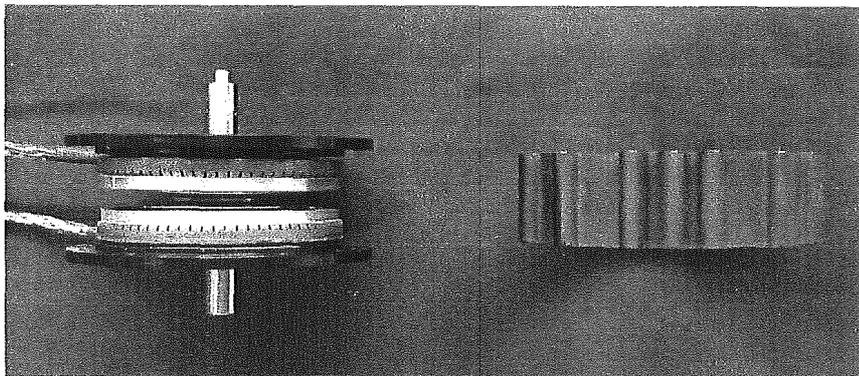
そこでアシストスーツにはこのタイプのサンドイッチモータを装備することとし、図 3 に示す PAS 用サンドイッチモータを開発した。これはシングルのφ60 超音波モータの軸を除いた厚さ 25[mm] に対し、28[mm] と非常に省スペースである。このモータは中間の固定部により押し付け力を固定できるような構造をとっている。



☒ 2 New Sandwich Motor



(a) overall view



(b) left: structure right: holding fixture

☒ 3 New Sandwich Motor

3.3 モータ開発(ダブルサンドイッチモータ)

上記のサンドイッチモータと同時に、よりトルクを向上させるためにサンドイッチ構造を多段化したダブルサンドイッチモータの試作を行った。サンドイッチ構造の同様であるが、これらの構造はシングルの超音波モータの回転数を維持したまま、トルクのみを向上させることができることに大きなメリットがある。今回試作したモータを図4に示す。

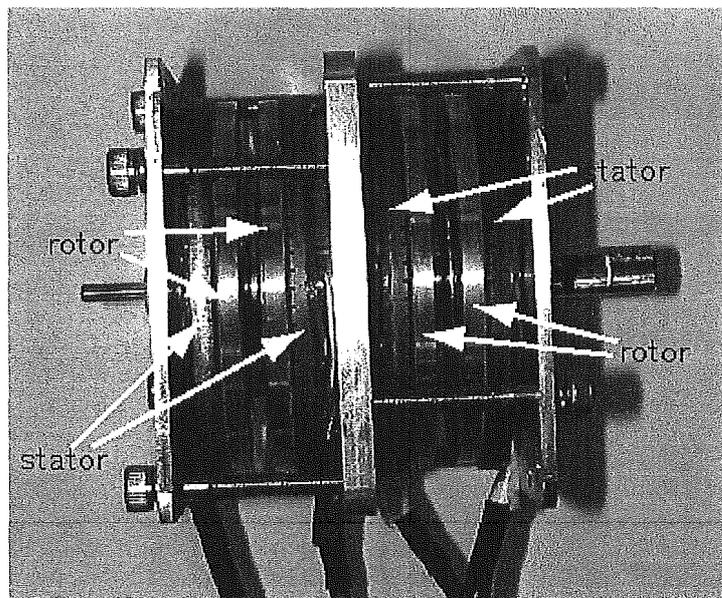


図 4 Double Sandwich Motor

C. 研究結果

1.PAS 機構開発

今回のアシストスーツ機構開発において重要な検討事項を以下に列挙する。

- ・ スーツ上肢と下肢の連結
- ・ スーツ上肢の自重を装着者の負担にならないような機構
- ・ 動きやすい肩周りの機構
- ・ 下肢部屈曲角度の増加とそれに応じておきる装着者表面での変位を補正する機構
- ・ 装着性の向上

以上を踏まえ今回製作したアシストスーツ各部を図 1.1～図 1. に示す。

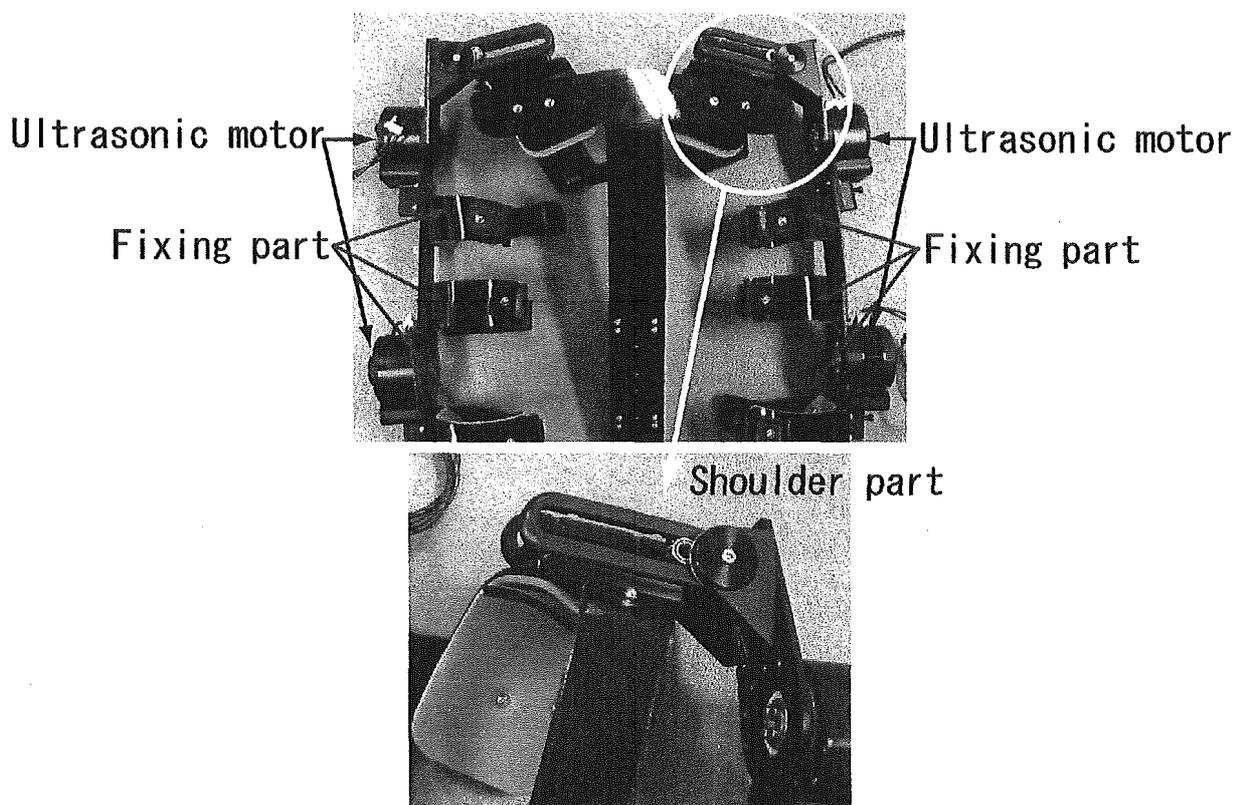


図 1.1 アシストスーツ上半身部

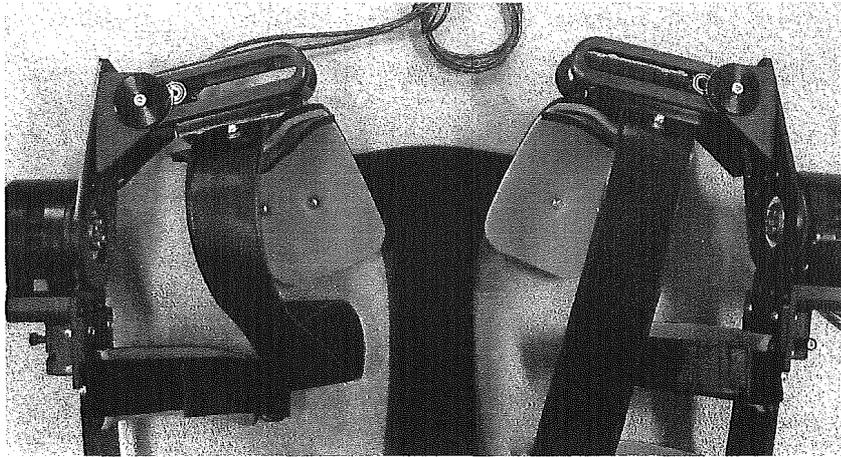


図 1.2 アシストスーツ上半身前面

図 1.1、1.2 にアシストスーツ上半身部を示す。肩部のマジックテープ、腕部 4 個の装着部によって装着者と密着する構造となっている。装着部は装着者背面側にエンジニアプラスチックとスポンジで構成される型を設け、これをマジックテープで締めて固定する。肩部のマジックテープは腹の装着部と接続する。

肩部はこれまで肩関節の回転軸数に合わせた回転軸の自由度をスーツ機構にもたせていたが、2号機のフィールドテストの際に動作に不具合が生じることがあった。これを改善するために、肩部の機構には胸鎖関節による肩の球関節の変位をスライド機構によって調整する機構とした。これにより特に動作し難かった腕を横に振り上げる動作が滑らかに行えるようになった。さらに、スライド機構同士をばねなどで引っ張ることで動作自体をより円滑にするだけでなく、スーツ腕部の自重をキャンセルすることも可能となった。

これら肩部、腕部の機構はすべて背中側のフレームに接続されており、背中フレームを腰部と接続することでスーツ上半身の自重を逃がすことが出来るようになっている。また、前屈時に上半身部の重量が全て装着者に掛かっていたが背中フレームの弾性による反発力である程度負荷を軽減することが可能となった。

フレームは強度が必要な軸以外はエンジニアプラスチックのポリカーボネードで作成し、モータを含めた重量は重量約 3 キロとなっている。また、超音波モータは肩、の上下方向、肘の伸縮をサポートする方向に配置する。