超音波モータを用いた人工の腕の開発

An artificial arm using an ultrasonic motor

深谷直樹(学生会員), 和田博(非会員)*, 菊池保広(非会員)**,
古屋信幸(非会員)***, 遠山茂樹(正会員)†

Naoki FUKAYA, Hiroshi WADA*, Yasuhiro KIKUCHI**,
Nobuyuki FURUYA*** and Shigeki TOYAMA†

Abstract

We have successfully developed a new artificial arm for physically handicapped people by use of ultrasonic motors. The ultrasonic motor has a lot of advantages: high torque; low speed; no braking mechanism; no magnetic noise. Especially, a spherical ultrasonic motor has three degrees of freedom in one unit which is similar to the joint of human being's. Then we have attempted to apply a spherical ultrasonic motor to a joint of wrist of an artificial arm. In addition that, we have newly developed a high output torque type of ultrasonic motor for an elbow joint and a shoulder joint. The artificial arm by use of ultrasonic motors shows good maneuverability and excellent controllability.

Keyword

artificial arm, ultrasonic motor, spherical ultrasonic motor

1. はじめに

腕などの欠損者に対しては、欠損部位により前腕義手、上腕義手そして全腕義手または肩義手がある。また機能面に関しても、単に見た目を人間同様にし周囲の好奇の目に晒されないように配慮した装飾義手、残存部位の筋力を利用し作業を行う能動義手そしてモータ等の動力源を利用し、より複雑な作業を行うことを目的とした動力義手などに分類される。各種作業や日常生活動作への対応には、単純に機能面で考えれば動力義手が適しているはずであるが、実際には大部分の障害者が装飾義手や能動義手を選択している。これは動力義手では多数のモータ・減速機による重量増加などのハードウェア的な負担に対し、これに見合うだけの作業能力が得られていないことに起因するものである。

ヒトの腕を解剖学的に表現すれば図1に7自由度として表すことができる。従ってこれと同数のアクチュエータを与えて初めて同等の作業能力を有するが、減速機等の補助機構により形状や重量面の課題により、ほとんどの動力義手は把持機構のほかに手首部分の内転・外転で1自由度のみなど十分な作業能力を持てずにいた。そこで、我々は軽

Fig.1 Degrees of freedom of the human arm

Fig.2 A structure of a spherical ultrasonic motor

2000年5月26日受付

2000年7月26日最終原稿受理

東京農工大学大学院, 東京都小金井市中町 2-24-16

*日産車体株式会社, 神奈川県茅ヶ崎市荻園 824-2

**ダブル技研株式会社, 神奈川県綾瀬市上土棚 4-2-4

***山梨大学工学部, 山梨県甲府市武田 4-3-11

†東京農工大学, 東京都小金井市中町 2-24-16

The graduate school of tech., Tokyo univ. of agriculture and tech., Nakacho 2-24-16, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, Japan

*Nissan shatai cooperation, Ogizono 824-2, Chigasaki-shi, Kanagawa-ken, 253, Japan

**Double research and development cooperation, Kamitsuchitanaka 4-2-43, Ayase-shi, Kanagawa-ken, 252, Japan

***Yamanashi univ., Takeda, Kohfu, Yamanashi-ken, 400-0016, Japan

†Tokyo univ. of agriculture and tech., Nakacho 2-24-16, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, Japan

量かつ人腕と同等の作業性能を有する義手の提供を目的に、球面超音波モータの適用を試みてきた^{1)~3)}。

これは簡潔な構造でありながら減速機構なしに低速高トルク、高保持トルクを発揮し静粛性に優れるという超音波モータの特性を有する単体で3自由度駆動可能なアクチュエータである。また球体を回転させるという構造は、人間の球状関節と相似のもので、その動作を再現するのに適した構造である。図2に球面超音波モータの概略図を示す。

そこで本論文では、動力義手への応用を目的とした人工の腕の開発について述べる。このためにまず、使用者の感覚的な評価に頼ることが多かった質量配分について考慮し、義手を装着したときの影響に関し動力学解析を用いて評価した。これにより得られた質量配分による影響に基づいて各関節のモータの設計条件を導出して製作し、特性試験を行うことで義手への適応性に関する評価を行った。

2. 動力学解析による設計指針

義手装着時の影響を明らかにするため、3次元動力学解析を行える機構解析プログラムAI MOTIONを用いて質量配分について検討した。機構解析とはシステムに関するラグランジェ乗数を用いた完全な拘束条件付き運動方程式を混合微分代数方程式として解くことにより、機構の運動や反力、反トルクを求める手法である。AI MOTIONは、3次元モデルに対しこの機構解析を行い、結果から運動を可視的に評価できるだけでなく、各関節の反力等を容易に導出できるソフトウェアである。

3次元人体モデルは185cm、75kgの成人男子を対象として20個の剛体で構成され、頭、首、胴体、左右上腕、左右下腕、左右の手、肩、右肩、左足付け根、右足付け根および足に2自由度を与えるための5個の仮想的な接合体からなる。各部分の重心には表1に示す質量と慣性モーメントを与え、各ボディ間は回転関節で結合する。このモデルの右腕の条件を変えることで義手装着時の影響を調べる。構築したモデルの質量を表1に示す。なお下腕部および手の合計質量は2.26kgである。

Table 1. Mass and Moment of inertia of Body parts

Parts name	Mass[Kg]	Ix [kg·m ²]	Iy [kg·m ²]	Iz [kg·m ²]
Head	5.110	0.01560	0.01560	0.015600
Neck	0.580	0.00060	0.00060	0.001000
Body	40.02	1.92170	2.04290	0.381500
Upper arm	2.170	0.01570	0.01570	0.002660
Lower arm	1.325	0.00770	0.00770	0.001100
Hand	0.934	0.00370	0.02800	0.001000
Thigh	6.857	0.11160	0.11160	0.017650
Leg	3.000	0.04400	0.04400	0.003500
Foot	1.256	0.00780	0.00110	0.008200

解析は日常よく使う単純な動作を対象とし、右手の質量を健常状態(2.26kg)、義手装着前(肘下欠損の場合)、重量物(5kg)引き上げ動作時、右腕全体の質量が健常状態と比較して120%、80%の場合と条件を変えた場合の腰部および左右両膝へかかる荷重変化を求めた。

重量物の引き上げ動作のストロボ像および得られた結果を図3に示す。ここにあるように右腕質量が変化した場合腰への負荷は非常に変動的で、質量が増大するとき極めて影響力は大きくなる。また、両膝にかかる荷重は対照的であり、極端に影響を受けていることが理解できる。この傾向は健常状態、負荷状態とも同様であるが、引き上げ動作内では質量80%の場合が最も格差が少ない。これは影響を及ぼす質量が少ないためである。しかし最も軽量の肘下欠損では軽量過ぎ、ただ上腕を挙げただけであるにも関わらず、左膝に多くの荷重がかかっている。これらは直立時に左側に重心が偏るためで、肘下部分だけでも体バランスを大きく狂わせてしまい、荷重が均等にかからなくなることが分かる。物を持つなどはあくまで短時間の負担であるが、義手は常時装着する物であって一時的ではない。軽量性が求められる義手であるが、極端すぎれば重量的バランスの差異が足腰に影響を及ぼし、新たな疾患等を引き起こしかねない。これより単に義手のみではなく、他の部位への影響についても留意せねばならないことが分かる。

以上より、片側離断者の義手は重すぎても、また軽すぎても結果的には装着者に負担を強いるため、理想的には元々存在した部分と同等かある程度軽いことが、体全体への影響を低減する手法であることが分かる。

(a) Motion of an analysis model

(b) Waist part

(c) Left knee

(d) Right knee

Fig.3 Analysis results

3. 肘関節

解析が示すように、体全体でのバランスを踏まえれば、義手全体の質量は健常状態か、ある程度軽量であることが望ましい。そこで解析モデルの肘から先の重量 2.26kg を数値目標とし、この質量を有する手首部を支えるために必要な肘部の出力について検討する。

3.1. 肘関節に必要な駆動力

肘関節は基本的に 1 方向に動くため、肘部は 1 自由度のモータで表現することができる。ここで肘部に必要なモータの起動トルクを求めるため、肘-手首間の距離から許容される手首部の限界質量 G を考える。ここで従来の平面型超音波モータ ($\phi 60.0$, 起動トルク $0.6\text{N}\cdot\text{m}$) を使用した場合、一般成人男性における肘-手首間の距離をおよそ 200mm とすれば G は 300g 程度と、極めて低い数値になる。また仮に手首部が目標質量ぎりぎりでは、対象物を満足に持ち上げる余裕もなくなる。つまり、作業を行うには少なくと

Fig. 4 A sandwich type ultrasonic motor for an elbow joint

Fig. 5 Contact force - Rotational speed characteristics about the elbow joint

Fig. 6 Rotational speed - Driving torque characteristics

も倍以上のトルクが必要であり、また手首部の質量が 300g 以上になるのは好ましくないことが理解できる。

3.2. サンドイッチ構造

トルク増大を図る方法には歯車列の組み込みや、アクチュエータの複数化等があるが、どちらの方法も小型化は望めない。そこで超音波モータの駆動力を生じうるものがステータであることに注目し、1 枚のロータを 2 枚のステータで挟む構造の超音波モータを開発した。これはいわばサンドイッチのようにロータを 2 枚のステータで挟むもので、構造の簡潔性、軽量性を損なうことなく、従来のモータと比較して同程度の容積でありながら、駆動トルクの倍増が期待できる。このサンドイッチ構造の超音波モータの概略を図 4 に示す。ステータ外径は 78mm である。

ステータの材質は黄銅で、櫛歯のない裏側には PZT 製の圧電素子がエキボシ系の接着剤で貼り付けてある。ロータの材質はポリカーボネイトを用い、ステータの振動が最も大きくなる外周部のみ接触させている。それぞれのステータには、組み合わせ後ロータの回転方向が同一になるように正負を決めた 2 系統の 2 相交流電流を印加し、各交流電流間の位相差は 90° 固定としている。入力周波数に関しては、駆動に適したモードを発生する固有振動数 35.8kHz としている。

3.3. 実験および結果

実際にサンドイッチ構造による効果を確認するため、ステータ 1 枚型、ステータ 2 枚によるサンドイッチ構造型に関して単体駆動試験を行った。なおステータ 1 枚時の測定は、2 枚のうち 1 枚を取り出し、そこにスラスト軸受を入れることで行った。またロータの補強のためにステータと接触しない面に厚さ 5mm の黄銅板を接着している。

ステータ・ロータ間の押しつけ力-回転速度特性を図 5 に、回転速度-駆動トルク特性を図 6 に示す。これより、回転速度は押しつけ力 250N 付近で最高を示し、以後減少していく。これは荷重が大きくなりすぎてステータのベース部分が反りかえり、滑りが大きくなってロータに伝達されにくくなるためである。従って、何らかの形で滑りを抑えるには、接触面を改善すればよい。そこでライニング材を利用する。接触面は強度と柔軟性を必要とするため、この条件に沿う材質として厚さ 1.5mm の CFRP 製シートを用いて、回転速度および駆動トルクへの効果について観察した。この結果、駆動トルク、回転速度ともに向上し、回転速度に関しては同様の傾向であるものの、ライニング材添付のものはさらに速くなっており、接触状態の改善が大きく影響していることが伺える。また駆動トルクに対する効果は大きく、最大駆動トルク領域では倍近くまで向上している。また滑りが抑えられたことによって、ある程度押しつけ力をかけると駆動時の騒音は全く発生せず、回転も安定するなど得られる効果は多い。

以上より、サンドイッチ型超音波モータの特性について評価した結果、ライニング材およびサンドイッチ構造の有有用性を明らかとし、従来の倍以上に当たる最大駆動トルク $4.3\text{N}\cdot\text{m}$ を得るに至った。これは手首部の持ち上げ、物体把持に関し十分な容量を持つ値と言える。

4. 手首

図1にあるように、人は手を3自由度方向に動かすため、同じ動作を再現するには義手もまた3自由度を有する必要がある。しかし一般に関節の多自由度化は多数個のモータと複雑な機構を必要とし、小サイズ化や軽量化が難しいことから義手の多くは多自由度を与えてはいない。また与えたとしても、サイズ、重量面などが問題となっていた。そこで手首部には軽量化に極めて効果的な、単体で3自由度駆動可能な球面超音波モータを採用し⁴⁾、手首部目標質量として300gを基準に開発を行った。

4.1. 球面超音波モータ

3自由度型の球面超音波モータはこれまで開発してきた2自由度型の改良発展版である^{5)~7)}。したがって、基本的な構造も非常に似通っているが、最大の相違点はロータとステータの配置にある。球面超音波モータでは、ステータはロータに対し円で接触し、この円の中心回りに回転力を発生する。各ステータが発生する駆動力を角速度ベクトルで表すと、これらは図7(a)のようにロータの中心に向かって回転力に比例したベクトルを生成する。これらはロータ上で合成されるため、この合成ベクトルの方向がロータの回転方向を決定する。

従来は図2のように4個のステータでロータを保持するため、ステータ数の多さにより大出力を必要とする肩部等に適するものの、作業領域に対する制約、ステータ分の重量増大などの短所を有する。そこで可動範囲拡大と軽量化に有利な、3個型超音波モータを手首部に採用した。

ステータは図7(b)のようにx-y平面上に120度間隔で配置され、それぞれに対し、z軸方向に負の傾き角を持たせれば、これら角速度ベクトルもまた傾きを持つため合成ベクトルはz軸成分を有し、この結果ロータは3自由度方向に回転力を得る。従って、この傾き角 ψ が大きければそれだけ駆動力は増大する。

しかし、ロータはステータを向かい合うように押しつけることで保持されるため、z軸方向への傾きを持つとステータの接触圧は均一でなくなる。これは摩擦力の不均一化、接触抵抗の増大によるx、y軸回りの駆動特性低下の要因となることから、傾き角にはある程度の限度が存在する。よってこれまでは傾き角を 15° とし各軸回りの十分な回転力を確保していたが、ステータ、ロータ間の接触が不均一になりがちで、駆動の不安定化を引き起こす要因となっていた。そこでこの傾き角についても検討し、これまで用いられていた $\psi=15^\circ$ ではなく $\psi=10^\circ$ とした。

4.2. 手首部概略

以上の考察を踏まえ、手首関節用の3個型3自由度球面超音波モータを開発した。軽量化のためケースにはジュラルミンを使用し、ロータは軽量かつ駆動特性に優れたポリカーボネイトを採用した。ロータは直径45mmの真円、ステータは直径 $\phi 30\text{mm}$ の円環状のステンレス材に圧電素子を貼りつけたものを、x-y平面上にz軸方向に 10° の傾きを与えて等間隔に3個配置した。この球面超音波モータの概略を図8に示す。この結果、質量は目標値300gに対し、実際には175gと大幅な軽量化に成功している。

Fig.7 A model of three stator type spherical ultrasonic motor

(a) Structure of a spherical ultrasonic motor (b) A model of three stator type spherical ultrasonic motor

Fig.8 The three stator type ultrasonic motor

Fig.9 Rotational speed - Torque characteristics

4.3. 特性試験および結果

モータの基本特性を明確に認識するため駆動トルク-回転速度特性を測定した。印加電圧は120Vp-pである。y軸回り、及びz軸回りの回転速度-駆動トルク特性実験の結果を図9示す。作業領域はx軸回りに130°、y軸回りに120°、z軸回りは360°回転可能である。

傾き角 ψ を10°にしたことで駆動は安定し、また以前のようにステータを強く押し付けていくとロータが押し出されるように揺らぐことも無くなった。このため駆動力を大きく損失するステータの片当たりも解消され、回転速度、駆動トルク双方の最大値を向上することができた。

以上より、ステータを3個に限定し、傾き角 ψ を10°に変更した新構造の3個型球面超音波モータは手首用アクチュエータとして利用するに十分であることが確認された。

5. 肩部

肩部は慣性モーメントの影響が最も強く、極めて大きな力を必要とする関節である。しかしながら、図2にある肩用モータは、球面超音波モータを採用したことにより構造的、重量的に優れているものの、大出力を必要とする作業に対応させるには更なるトルク向上が望まれている。そこで、前章に示されるように駆動トルク特性に優れたサンドイッチ型超音波モータの適用により、大出力を必要とする作業へ対応を試みた。

5.1. 質量配分からの設計目標

前章に示すとおり、肘部の質量は545gである。仮に接合フレーム75g、手首部はハンド部を含め300g以内で製作したとすると、その質量はおおよそ950g程度である。肘から下の質量目標を表1の通り2260gとすれば約1300gの余裕ができる。先端部の軽量化は慣性モーメントの影響を低減できるため、モータにとっても都合が良いが、2章で得られた結果からすれば、下半身への影響を極力小さくするためには極端に軽すぎるのは望ましくないことになる。そこで、この余剰分を肩部で吸収することとして設計した。

肘部と比較して肩部はきわめて大きな力を必要とするため、ステータのサイズは肘部より拡大し100mmとしている。ロータ材は肘部同様ポリカーボネードとし、同様に接触面にライニング材を添付し、このロータを両側から挟み込むようにして押しつけ力を与えることで駆動力を得る。なお押しつけ力は850Nとした。

5.2. 実験および結果

肩部は3自由度を要するので、回転軸が一致するように各軸周りにモータを配置した。図10にモータの概略を、図11に各軸回りの配置を示す。また、配置を工夫したことにより、各軸も2セットずつ配置できるように配慮されており、容易に駆動トルクを倍増できる

この肩部の性能を評価するため、各軸回りに配している肩用サンドイッチ型超音波モータの駆動特性について実験した。結果を図12に示す。肘部同様のサンドイッチ構造を採用し、かつステータ径を拡大したことで駆動トルクは大幅に向上し、義手全体を支え、また対象物を持ち上げるのに十分である。回転速度はさほどではないものの、各自由度の作業領域は実際には最大で250°以下である。無負荷ならば伸張-屈伸の時間は2.9秒程度であるため、実作業にも十分対応できると思われる。

6. 超音波モータを用いた人工の腕

以上より、手首部、肘部、肩部を組み合わせ、腕を構成した。図13に超音波モータを用いた人工の腕を、表2にこの腕の各種諸元を示す。駆動系を関節部に集約したことで、各関節間に各センサーや制御機器、バッテリー等を収

Fig. 10 A sandwich type ultrasonic motor for the shoulder joint

Fig. 11 Structure of a sandwich type ultrasonic motor for the shoulder joint

Fig. 12 Rotational speed - Torque characteristics about the sandwich type ultrasonic motor for shoulder joint

Table 2 The specification of an artificial arm

	Length[mm]	Weight[g]
Whole body	746	3885
Shoulder motor	110	890
Elbow motor	70	545
Wrist motor	45	175
Part between a shoulder axis and an elbow axis	310	
Part between an elbow axis and a wrist axis	248	
Between a wrist axis to the hand	133	
Joint parts of the shoulder to the elbow		295
Joint parts of the elbow to the wrist		75

Fig.13 An artificial arm using the ultrasonic motor

納するに十分な空間を有するに至っている。また表2にあるように諸寸は標準的な人間とほぼ同様である。また各関節のユニット化により、義手への応用に際しても寸法を変更することで各個人の寸法に容易に対応可能である。

質量は肩用モータ単体で890g、接合フレームを含めた肩部全体で2965g、肘から下を含めた総質量3885gと、解析モデルの標準質量4429gに対し87.7%程度に納めることができ、装着時のバランスにも有用である。なお、肩部に関しては各軸にモータを2組装着し駆動力を倍増できるため、より大出力を必要とする作業にも対応可能である。

今後の課題としては装飾用カバー、障害者への体幹に取り付けるためのターミナルデバイスおよびハンド部の取り付けによる質量変化への配慮が挙げられる。特に手の先端に位置するハンドは重量モーメントにより腕全体に大きく影響するため、軽量性が特に重要視される部位である。ここで前述の手首部の質量目標300gを基準とすると手首用モータ質量175gを引いた差分は125gで、この範囲内に収まるハンドとしてはフックの開閉により作業する能動フックが相当する。もちろん使用者はより多機能であることを望むが、これは構造の複雑化、多数個のアクチュエータによる質量の増加を招くため、上記条件を満たすことは難しい。従ってハンド部においては単に機能に着目するのではなく、軽量性と操作性、機能性を両立したハンドの構築が求められる。

これらを付加した場合、構成や用いる材質によっては目標質量を超過する恐れがある。その場合には肩部の重量を軽減させることで対応することが可能である。

7. 結言

単体で3自由度駆動可能な作業性に優れた球面超音波モータを手首部に、駆動力に優れたサンドイッチ型超音波モータを肩部、肘部に持つ人工の腕を開発した。この腕は人腕と同等の自由度、作業性を有し、人腕より軽量で重量的

バランスに優れたものである。各関節とも良好な駆動特性を示し、また超音波モータの特性である静粛性も高い。

特に、生活環境において使用される義手は、周囲にその使用を気づかれないことが望まれるものである。このことから、本研究で開発した人工の腕は、その運動性能のみならず環境適応性に関しても高いと言え、義手への応用に對し極めて有用な特性を有していると言える。

謝辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)および中小企業想像基盤技術研究事業の援助を受け行われたものである。ここに謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 深谷直樹, 遠山茂樹: 超音波モータを用いた人工義手の開発, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 102.
- [2] 深谷直樹, 遠山茂樹: 超音波モータを用いた人工義手の開発, 第13回ライフサポート学会大会予稿集, (1997), 96
- [3] N.Fukaya, S. Toyama and T.Seki: Development of an Artificial Arm by use of Spherical Ultrasonic Motor, the 29th Int. Sympo. Robotics, Bermingam, England, (1998) 74-77.
- [4] 遠山茂樹, 水鳥健次, 張 国強, 宮谷保太郎: 3自由度球面超音波モータの開発, 1996年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (1996) 869-870.
- [5] S.Toyama, S.Hatae and S.sugitani: Multi-Degree of Spherical Ultrasonic Motor, Proc. ASME Japan/USA Sympo. Flexible Automation, (1992) 169.
- [6] 遠山茂樹, 波多江茂樹, 野中 学: 超音波モータを用いたロボットマニピュレータ用アクチュエータの開発 第1報, 日本ロボット学会誌, 10, 6, (1992) 771.
- [7] 遠山茂樹, 張 国強, 杉谷 滋, 長谷川真一, 中村和人, 宮谷保太郎: 超音波モータを用いたロボットマニピュレータ用アクチュエータの開発 第2報, 日本ロボット学会誌, 13, 2, (1995) 235.
- [8] 菊池保広: 機構解析シミュレータを用いた人体の運動解析, ライフサポート学会誌, Vol.10, No.2 (1998) 76-77.
- [9] 加倉井周一, 初山泰弘: リハビリテーション医学講座第8巻補装具, 医歯薬出版(1991)