

ヒトの運動解析に基づく義手に関する研究 — 能動・装飾ハンドの開発 —

広島県立保健福祉大学

大塚 彰

広島大学工学部

辻 敏 夫

坂 和 正 敏

産業技術総合研究所

福田 修

医科器械学 第72巻 第5号 別刷

〔平成14年5月1日発行〕

原著



ヒトの運動解析に基づく義手に関する研究

— 能動・装飾ハンドの開発 —

大塚 彰* 辻 敏 夫*¹
福田 修*² 坂 和 正 敏*¹

Research on Upper Extremity Prosthesis based on Human
Motion Analysis

—Development of Internally Powered Functional-cosmetics
Prosthetic Hand—

Akira Otsuka, Toshio Tsuji*¹,*

*Osamu Fukuda*² and Masatoshi Sakawa*¹*

** Hiroshima Prefectural College of Health Science*

¹ Faculty of Engineering, Hiroshima University

² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract

The purpose of this paper is to propose a cosmetics and an internally powered functional prosthetic hand with a voluntary closing function, which has been developed by using robot manipulator technology. From electromyographic and three dimensional video analyses of human grasping movements, we found that, if the wrist joint is fixed and the thumb moves in a diagonal direction, the compensatory movements of the trunk and upper extremity decreases. The experimental results demonstrate that the thumb movements of flexion and radial abduction play an important kinematic role in human grasping movements. Then, a new mechanism for an internally powered functional prosthetic hand that can drive five fingers with metacarpophageal joints and proximal interphalangeal joints of the fingers by a single cable is proposed. Tendon transmission in the proposed mechanism is useful for the hand to drive the finger joints. We suggest the following results; (1) the hand we developed has passive compliance, and (2) it can grasp objects with a cross section of different diameters.

1. はじめに

従来, 上肢義肢は以下の4つに分類されてい

* 広島県立保健福祉大学

*¹ 広島大学工学部

*² 産業技術総合研究所

る。すなわち, (1) 外観の補填を第一義とする「装飾用義手」, (2) 作業(主として重作業)専用とする「作業用義手」, (3) [能動義手], (4) モータなどを駆動源とする「動力義手=体外力源能動義手」である。(3)の能動義手は, 残存する切・離断者の機能を力源としてケーブル

ルなどを介して、義肢を制御するので「体内力源能動義手」と表現される。また、従来からの体内力源能動ハンドの制御形態は、随意開き (Voluntary Opening; 以下, V.O. と略す) あるいは随意閉じ (Voluntary Closing; 以下, V.C. と略す) の2形態である。前者は、ハンドの指を閉じる方向に働くバネやゴムなどに抗して、指を開かせるものである。後者は、ハンドの指を開かせる方向に作用するバネなどに抗して閉じさせるものである¹⁾。

義手の歴史をみてみると、BC 218—201年、ローマの将軍マルクス・セルギウスが右手を失い、鉄製義手を作らせて再度戦った、までさかのぼれる。能動義手に関しては、1818年、ベルリンの歯科医で外科器械製作者であるバリーフが「能動開き」の手先具を、1835年にベルリンの縫工であるカロリーネ・アイヒアが「能動閉じ」の手先具を考案した。ついで、1844年にオランダのバン・ペーターセンが「能動開き」の義手を、1860年には、フランスのビューフォル伯が「貧者の義手」と称される、最も実用化された義手を考案している。その後、度重なる戦争を経て能動義手は発展し、とくに、1939年以降アメリカにおいて能動義手が発展してきたが、体内力源能動義肢ハンドに関しては、切断者の義手に対するニーズに応えるにはまだまだ問題が残っていると著者らは考えている。

一方、体外力源能動義肢は、1945年のリヒテンシュタインでのワドウツの電動義手や1952年、ドイツ、ハイデルベルグガス義手などが知られている。その後、いわゆるサリドマイド薬禍障害児の問題を契機に発展し、わが国においても国の施策として研究された。以後、現在まで種々の研究が展開されてきている³⁻¹⁰⁾。

今回の報告においては、体内力源能動義肢ハンドに焦点をあて以下述べていく。

2. 目 的

ハンドの問題点の一つとして、従来の体内力源能動義手のハンドには、ハンドの拇指に対して、示・中指が対立位にあり、いわゆる3指摘みを行う時に手関節縮ぎ手が固定されていることにより、義肢操作時の不自然な姿勢を作り出

す、ことがあげられる。

そこで、本研究はこの問題点を検証するために健常者による前腕切断義手の模擬動作による把握・移動パターンの動作解析実験を行い、その結果を検討し新しい体内力源能動ハンドを設計し機構を提案することにある。

問題点の②は感覚の欠如であり、体内力源は、義手に欠落する感覚機能の補填もハーネス・コントロール・システムによるフィードバックとして得られると考えたからである²⁾。

さらに、問題の③として、実際に使用されている能動義手が極端に数少ないという現状である。換言すれば、ユーザである切断者が本当に使用できる、また使用したいと思う能動義手が少ないことに起因すると考えている。これに対して装飾義手は多く活用されている。このことは、中村ら¹¹⁾の報告の中で、中島らの調査として全国17カ所の義肢製作所と兵庫県内で作製された3,456本の内訳をみると、装飾義手3,030本 (87.7%)、体内力源能動義手242本 (7.0%) としている。この事実から、本研究におけるハンドには、ユーザが望む装飾性にも重点を置いた。なお、著者らの考える装飾性とは、「外観の補填」と「ヒトに近い動き」および「使用者の姿勢」と定義づけ、使用してくれる義手ハンドを目指した。今回、ハンドの制御形態は、制御性に優れると言われているVCを採用し、多指・多関節駆動を考えた (従来は3指摘みでIV・V指ダミーの形態が多い)。これらのために、ヒトの把持力を測定した。

3. 方 法

1) ヒトの把握動作実験

本実験は、義肢のハンドの拇指に自由度を付加することで、義肢を使用する切断者の負担がどの程度軽減するか、また、義肢の操作性がどの程度向上するのかを知る目的で実施した。このために、健常者の手関節および拇指の動作を拘束する実験用の長対立装具を作製した。この装具によって被験者の動作自由度を制限し、把握・移動動作時の筋活動や姿勢の変化を調べた。

① 実験環境および条件

実験環境およびタスクを図1-aに示す。タス

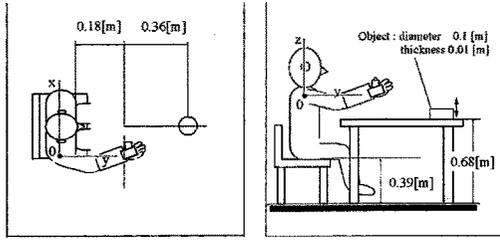


図 1-a 実験環境とタスク

クとしては、手の初期位置から前方のオブジェクトを把握し鉛直上方に持ち上げて、再びテーブル上にセットし手を初期位置に戻す動作である。この際の把握・移動動作における手関節および拇指の運動を評価するために、実験中はこれらの関節に対し以下の4種類の拘束条件を設定した。本条件下の動作は、前腕切断用義肢の模擬動作にも一致するものである。すなわち、条件1：手関節と拇指はフリー（以下、C1とする）、条件2：手関節の固定と拇指のフリー（著者らの仮説動作、C2とする）、条件3：手関節のフリーと拇指の固定（体外力源義手の模擬動作、C3とする）、条件4：手関節と拇指の固定（従来の体内力源義手の模擬動作、C4とする）。

拘束条件を与える用具としては、手関節継ぎ手にダイヤル・ロックを付し固定と解除が可能で、かつ取り外しが可能な拇指対立位保持板を

持つ、長対立装具を作製し使用した。また、ここでいう手関節のフリーとは手関節の掌・背屈を表し、橈・尺屈は行えないことを条件とした。拇指の固定とは、示・中指に対して拇指が対立位にあることをいう。拇指のフリーとは、橈側外転方向の運動をいう。

② データ収集と解析方法

被験者は成人男性3名とし、タスクの試行回数は4条件各3回の計12回行った。そして、この際に発生する筋電位信号をテレメータ（㈱NEC三栄製）で計測するとともに、被験者に取り付けたマーカの位置を2台のCCDカメラから抽出し、3次元動作解析装置（応用計測㈱製）で動作解析を行った。把握動作中における被験者の上肢の運動と姿勢および筋電位を計測するための、電極とマーカの位置は各々、表1と表2に示す。

実験後、計測した筋電位を整流積分し、その値から各筋がタスク実施時に発生した筋活動量を評価し、各拘束条件における被験者に与える負担（ここでは代償動作をいう）を比較した。また、3次元動作解析に関しては、各マーカの3次元座標位置を計測することにより、被験者の体幹や上肢の各関節角度を計算できる。本稿では、被験者の体幹や上肢に対して、3リンク7自由度および5リンク11自由度のモデル（図

表 1 整流積分筋電位置

Electrodes	Subjects	A				B				C			
		C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Ch.1	Mean[mVmsec]	58.3	57.6	70.8	84.0	51.4	105.2	99.8	99.9	49.1	92.3	91.3	120.2
	SD	3.3	4.9	5.2	14.3	5.0	8.4	9.5	9.0	4.5	7.8	9.1	12.2
Ch.2	Mean[mVmsec]	31.4	34.4	42.6	68.3	42.3	43.8	65.4	88.2	22.8	30.5	31.9	38.9
	SD	2.9	2.1	4.9	6.0	3.8	4.8	4.6	6.5	1.4	1.6	2.0	5.2
Ch.3	Mean[mVmsec]	29.4	30.6	38.3	62.7	36.0	34.7	40.7	60.7	58.1	63.0	65.1	67.8
	SD	2.7	2.5	4.3	3.9	3.2	3.0	2.9	2.7	3.1	5.6	3.5	3.4
Ch.4	Mean[mVmsec]	23.6	18.2	21.5	26.8	22.4	25.3	25.1	24.7	17.4	29.7	19.8	27.2
	SD	3.0	1.2	1.1	2.3	1.8	1.7	2.6	2.4	2.3	1.9	1.9	3.1
Ch.5	Mean[mVmsec]	39.8	23.9	22.7	29.4	11.5	8.6	11.8	17.8	10.5	14.8	16.6	16.8
	SD	9.5	5.7	2.7	4.5	1.3	0.8	0.6	1.1	0.5	1.5	2.3	6.4
Ch.6	Mean[mVmsec]	9.8	10.0	9.8	17.5	10.6	9.0	18.1	20.8	28.2	17.2	28.0	18.5
	SD	1.2	0.9	1.0	1.8	1.1	0.4	2.3	3.1	2.9	3.0	3.0	3.1
Ch.7	Mean[mVmsec]	9.9	8.9	10.4	11.3	14.8	11.7	16.5	17.0	11.5	23.2	14.2	26.8
	SD	1.2	1.1	1.1	1.9	1.3	0.7	1.7	1.2	1.5	4.1	2.8	5.3
Total	Mean[mVmsec]	202.2	183.5	216.1	299.9	189.1	238.4	277.4	319.1	197.6	270.8	266.9	316.2
	SD	23.8	18.4	20.3	34.8	17.4	19.7	24.2	26.0	16.2	25.5	24.6	38.7

Ch.1, trapezius (upper fibers) ; Ch.2, deltoid (anterior fibers) ; Ch.3, deltoid (middle fibers) ; Ch.4, biceps brachii ; Ch.5, triceps brachii ; Ch.6, wrist extensors ; Ch.7, wrist flexors.

表 2 対象物を最大持ち上げ時の姿勢(角度)変化

Joints	Subjects	A				B				C			
		C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
θ1	Mean[deg.]	-12.7	-16.1	-14.7	-16.6	-12.1	-12.5	-14.0	-14.6	-7.4	-9.8	-9.4	-14.7
	SD	1.8	2.4	0.9	2.3	1.2	1.6	2.0	1.6	0.8	2.1	1.9	3.9
θ2	Mean[deg.]	-17.1	-24.7	-37.3	-38.9	-27.9	-31.7	-38.5	-41.0	-20.8	-24.9	-27.1	-30.6
	SD	1.4	1.8	3.2	1.7	2.4	1.9	3.0	3.6	2.1	3.4	3.4	4.9
θ3	Mean[deg.]	-2.6	-4.2	5.4	13.3	7.2	15.7	15.4	22.0	-8.3	6.2	8.2	12.5
	SD	2.1	1.4	1.5	1.6	1.5	1.4	2.3	2.1	1.4	1.7	2.1	2.4
θ4	Mean[deg.]	-14.3	-14.4	-17.9	-28.5	-4.8	-9.5	-15.5	-21.2	2.3	-9.5	-7.9	-13.7
	SD	1.8	1.8	1.3	1.7	1.3	0.5	2.2	3.7	0.8	1.5	1.4	1.3
θ5	Mean[deg.]	78.9	72.3	67.7	66.1	84.1	82.9	82.0	79.0	91.7	92.8	93.4	90.0
	SD	1.7	2.2	1.4	1.6	0.8	1.6	3.7	5.0	1.6	2.1	1.9	3.7
θ6	Mean[deg.]	20.5	18.7	5.2	1.8	-6.7	-13.1	-20.1	-22.9	8.2	-4.3	-11.0	-11.9
	SD	2.0	2.7	1.8	2.4	3.3	1.4	2.1	2.1	3.3	3.8	2.1	2.9
θ7	Mean[deg.]	40.4	40.2	47.6	29.4	44.9	28.4	29.4	16.6	29.8	23.7	27.1	15.9
	SD	4.3	5.2	2.9	3.0	1.6	1.9	3.3	2.4	3.0	4.8	3.5	3.5
θ8	Mean[deg.]	50.9	56.1	76.7	78.6	45.5	37.7	49.2	65.9	45.0	36.3	36.6	43.4
	SD	3.6	2.9	4.3	2.4	1.9	2.9	4.3	7.1	3.3	4.5	4.2	5.7

θ1: 体幹右側屈, θ2: 体幹伸展, θ3: 体幹左方回旋, θ4: 肩関節伸展, θ5: 肩甲帯挙上, θ6: 肩関節外転, θ7: 肘関節屈曲.

マーカー位置: 1, 胸骨下端; 2, 胸骨上端; 3, 肩峰, 4, 上腕骨外側上顆; 5, 桡骨茎状突起と尺骨茎状突起の中間部; 6, 示指MP関節部; 7, 示指爪; 8, 拇指爪.

1-b) を当てはめてタスク時の姿勢変化を計算し、運動学的な観点から効果器としての「手」の操作性を評価した。

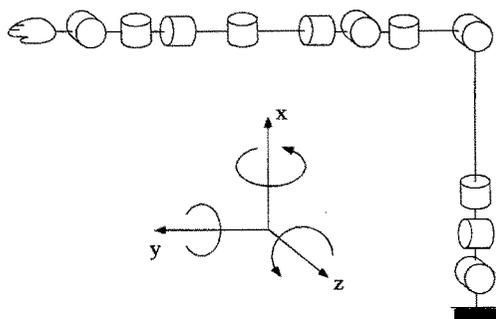


図 1-b 実験環境とリングモデル

- ① 肩から末梢 = 3 リンク 7 自由度モデル
- ② 体幹から末梢 = 5 リンク 11 自由度モデル

2) ヒトの指腹把持力の計測実験

ここでは、動きとしての装飾性の高いハンドの開発としたことから、ヒトにおける指腹把持力をエイムアイ社製接触圧力測定装置(指バック式)により測定した。測定は、2.0kg, 1.5kg, 1.0kg, 0.5kg の牛乳パックを把持した時の指腹把持力を求めた。

4. 結 果

1) ヒトの把握動作実験

① 筋活動電位解析(表1)

まず、全チャンネルに対する平均値をみると、拘束条件が最も厳しい条件 C4 の場合で整流積

分筋電値が最大となっている。拘束された自由度を補うために無理な代償動作でタスクを実行した結果と考えられる。また、条件 C2 と C3 の値を比較すると、条件 C2 の場合の方が筋活動電位信号の発生がやや小さい傾向がみられる。このことは、拇指のみの動作がフリーである場合の方が手関節のみフリーである場合よりも筋力の発生が全体として少なくすむことを意味している。

つぎに、各チャンネルでの比較を行うと、肩関節周囲の 1~3 チャンネルにおいて、ほぼ C1, C2, C3, C4 の順で筋活動電位の発生が大きくなる傾向が認められた。このことは、拇指の動作がフリーであることが肩甲帯および肩関節の動作負担を軽減する効果が高いことを示している。

② 動作(関節角度)解析

ここでは、各被験者が対象物を持ち上げた時点において、どのような姿勢になっているかについて調べた。求めた角度は、前腕から中枢の拘束のない部位の動作としての関節角度、角(θ)1~8 についてであり各試行の平均値・標準偏差を表2に示した。結果は、角1~角4, 6 に全被験者にほぼ共通する変化がみられた。その姿勢変化傾向は、C1, C2, C3, C4 の順で強くなる。すなわち、体幹が左に側屈(角1)し、前屈(角2)し、左に回旋(角3)しながら肩関節が屈曲(角4)し、肩関節が外転(角

6) するというものであった。拘束により無理な代償姿勢になる傾向がうかがえる結果である。

③ 操作性の評価^{12~14)}

作業中において義手の位置や姿勢をどの程度自由に制御できるかという点は、操作能力の高い義手を設計する上で考慮すべき重要なポイントの一つである。ここでは、運動学的な観点から操作性を定量化するために、可操作性楕円を計算した。

可操作性楕円とは、関節速度を用いて実現し得る手先の速度のすべてを表したものである。楕円は、手先速度の出力発生 の容易性を示すものであり、楕円の長軸方向に速度を発揮しやすいことを意味する。

図2に被験者Cに関する可操作性楕円を示す。各楕円は、3次元空間内の拘束条件C1~C4の各条件での、横断面、矢状面、前額面においてそれぞれ、上方から、側方から、後方から見た投影図である。なお、いずれも対象物を把持し最高点まで持ち上げた時点の姿勢において計算したもので、各試行の平均値を示している。図中に示す楕円体の主軸半径の長い方向は、大きな手先速度を出しやすい方向を、短い方向は小さな手先速度しか出せない方向を示している。また、小さい方の楕円が手先から肩関節までの3リンク7自由度モデルを使用して計算した結

果を、大きい方の楕円が手先から腰部までの5リンク11自由度モデルを使って計算した結果を示している。操作性は、モデルの自由度が増加することで向上することが分かる。このことは、上肢切断者のリハビリテーションで残存する関節や体幹の関節可動域の拡大を図ることは誤りでないことを証明するものである。

C1とC2~C4の楕円形状を比較すると、いずれのモデルの場合も上方から見た図において、拘束条件有りの場合では楕円の扁平率が高くなるとともに反時計方向に回転する傾向がみられる。とくに、C4ではその傾向が強いことが認められる。また、同時に側面からみた図や後方からみた図では、それぞれ水平方向に拡大・縮小している。拘束条件を加えることで、手先の速度を発生しやすい方向が身体に対して斜めに傾いてしまい、しかもその大きさも縮小するために操作性が低くなってしまふことが確認された。

2) ヒトの指腹把持力実験

結果を成人男性例(図3)で示す。示指で2.0Kgのパック把持力は160gf/cm²程度であり、大きな力を必要としないことが確認された。また、比較的少指に把持力を必要とすることから、5指で把持することの必要性と5指による把持力分散の利点を認めた。

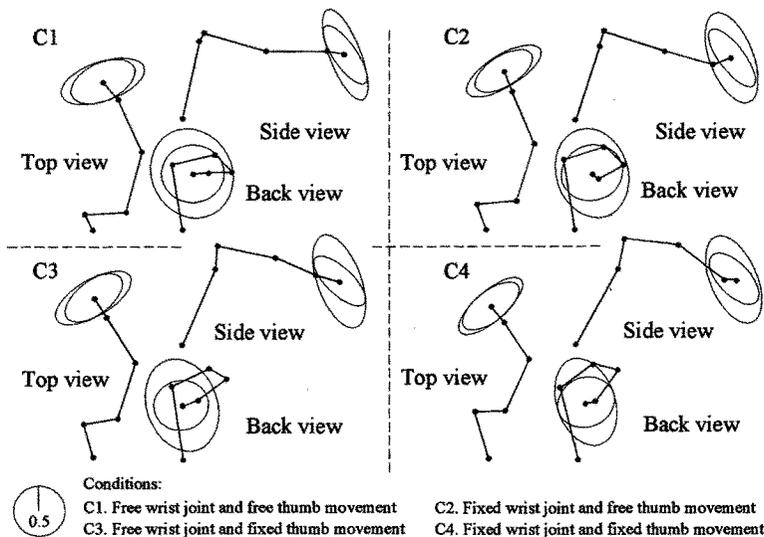


図2 可操作性楕円

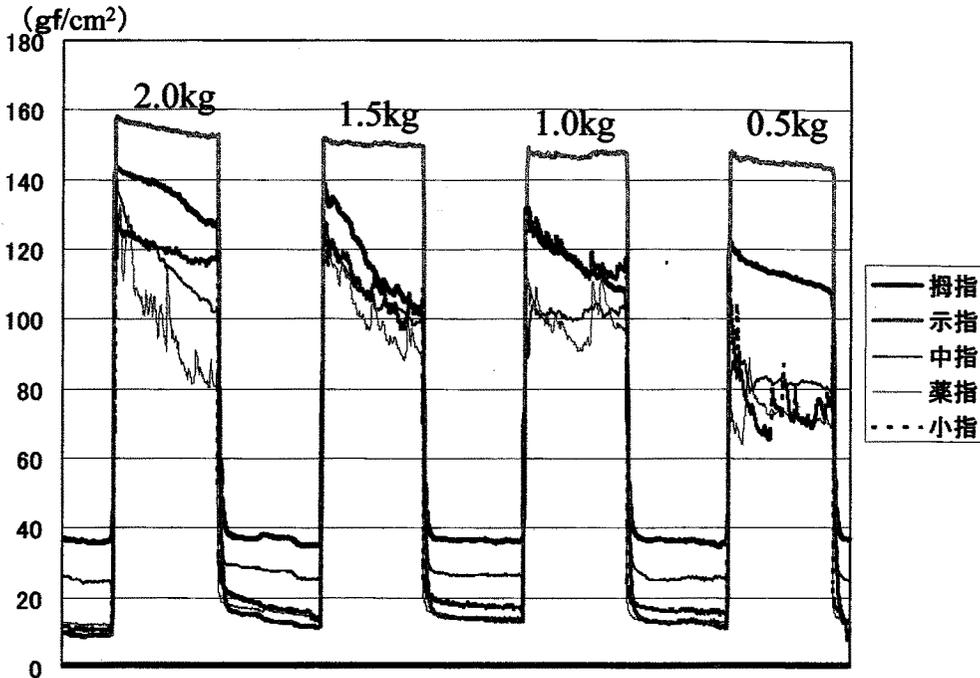


図3 ヒトの指腹把持力

5. 考 察

ヒトによる義手の模擬動作による把握・移動動作パターンの分析結果から、手関節のみあるいは拇指のみに運動を与えた場合には、手関節および拇指の双方を固定した場合と比較して把握・移動動作中の操作性が向上する。また、把握動作時には、代償的な中枢の筋活動も抑えられることが明らかになった。

また、拇指のみ固定した場合と手関節のみ固定した場合の結果には、可操作性楕円において大きな差がないことから把握・移動動作時の拇指の働きは手関節の働きと同じ程度に重要であると推察できた¹⁵⁻¹⁷⁾。この手関節が自由ということは、体内力源によるケーブルコントロール方式では、制御上においても機構上においても実現に困難があり、体外力源においてのみ実現されるものである。そこで、今回のハンドの開発においては、手関節自由の機構と同様の操作性を有する拇指のみ自由に近似するハンドを設計した。すなわち、拇指の開き方向を従来の示・中指に対立して開閉(掌側外・内転)するのではなく、掌側・橈側外転の中間位¹⁸⁾に開くもの

である。併せて、ヒトの把持力実験結果からヒトの動きに似た(装飾性)、強い把持力を求めることのない多指・多関節駆動を提案する。

6. 設計した体内力源能動ハンド

1) 駆動方式

ハンドの駆動には、産業用ロボットハンドとして実績のある、ワイヤ・プーリ駆動^{19, 20)}を採用した。一般的に市販のハンドの駆動機構には、リンク方式が採用されている。リンク方式は、機械的な構造であるために信頼性が高く、剛性に優れている。一方、ワイヤによる駆動方式は、動力をリンクといった機械的要素から独立して伝達できる。また、多関節駆動においては、動力伝達に関してリンクなどの新たな機構の追加を必要としないために、ハンド機構部の構造を簡略化でき、軽量化を図ることができる、という利点を持つ。欠点としては、プーリなどとの摩擦やワイヤのバネ特性により動力伝達系に歪みが生じ、高反応・高精度位置決めが困難である。しかし、逆にワイヤのバネ特性を利用することによって、ヒトの手に特有の柔らかさを求めることができる。

際の実験条件として、被験者の手関節および拇指の拘束条件の違いによる把握動作を可操作性情円などの解析手法により検討した。その結果として、拇指の外側方向への開きが有利であることを認め、ハンドの基本構造とした。ハンドの制御方式としては、随意閉じを採用し、駆動はワイヤ・プーリ方式とした。手指の機構は、一つの力源で多関節・多指駆動が可能な設計とした。これらにより、他動でのヒトの指の柔らかさを持ち、かつ、異形状断面物の把握を可能とした「拇指が外側に開く、随意閉じハンド」を設計し試作した。

今後の課題としては、2つを考えている。1つは、機構上での装飾性は得られたが、外観上での装飾性²⁾の解決である。いま1つは、使い易い義手を目指す時他部位の機能、とくに、前腕の回内・外機能の実験的実証である。

文 献

- 1) 澤村誠志：切断と義肢，3版，119-206，医歯薬出版，1993.
- 2) 川村次郎：義手の感覚装置について，日整会誌，45(9)，755-768，1971.
- 3) 厚生省特別研究 動力義肢の実用化研究班：動力義肢の実用化研究成果報告書，1971.
- 4) 野島元雄，ほか：上肢高位切断者に対する電動義肢，日本災害医学会誌，21：447-460，1973.
- 5) 加藤一郎，ほか：電池式多自由度前腕義肢（ワセダハンド-9H3），バイオメカニズム4，東京大学出版会，139-146，1978.
- 6) Funakubo, H et al: Japanese Research and Development of Portable Microcomputer System for Cooperative Control of Movement of Electrical Prosthesis, International Conference on Telemanipulators for the Physically Handicapped, 193-302, 1979.
- 7) 菅野重樹，ほか，多自由度人間形人工の手の開発，バイオメカニズム7，東京大学出版会，114-124，1984.
- 8) 伊藤宏司，ほか：超音波モータを用いた3自由度前腕筋電義手，計測自動制御学会論文集，27(11)，1281-1289，1991.
- 9) 斎藤之男，ほか：全腕電動義手の開発状況，日本義肢装具学会誌，9(4)，369-374，1993.
- 10) 西川大亮，ほか：EHW 筋電義手の構築に関する基礎研究，第19回バイオメカニズム学術講演会予稿集，17-22，1998.
- 11) 中村春基：兵庫リハにおける筋電義手普及のための試み（その1），日本義肢装具学会誌，16（特別号），210-211，2000.
- 12) Yoshikawa, T.: Analysis and control of robot manipulators with redundancy. Robotic Research, The First International Symposium, 735-747, 1984.
- 13) Yosikawa, T.: Dynamic manipulability of robotic mechanisms, J. Robo. Syst., 2(1), 113-124, 1985.
- 14) 吉川恒夫：ロボット制御理論，1版，109-131，コロナ社，1988.
- 15) Otsuka, A. et al.: Development of an Internally Powered Prosthetic Hand, Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 201-206, 1998.
- 16) 大塚 彰，ほか：能動義肢ハンドの開発—把握・移動動作分析—，日本臨床バイメカ学会誌，20，501-505，1999.
- 17) 大塚 彰，ほか：体内力源能動義肢の開発，日本義肢装具学会誌，15(4)，332-339，1999.
- 18) Davies, E. W., et al.: A cosmetics functional hand in incorporating a silicone rubber cosmetic glove, Prosth. Orthot. Int., (1) : 89-93, 1977.
- 19) Kaneko M., et al: A new consideration on tendon-tension control system of robot hands, Proc. of IEEE Int. Conf. On Robot and Automation, Sacramento, 765-771, 1991.
- 20) 金子 真：器用な多指ロボットハンドの開発，日本ロボット学会誌，16(5)：617-619，1998.
- 21) 斎藤之男，ほか：CADによる機能的装飾義手の開発に関する研究，バイオメカニズム8，東京大学出版，265-273，1986.