

高トルク・軽量な RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の開発

木下 敏治* 高橋 慎弥** 久本 将貴*** 西山 功一****

Development of a Shoulder Disarticulation Prosthesis(SDP) with 6 degrees of freedom using high torque and lightweight RC servo motor

Toshiharu KINOSHITA, Sinya TAKAHASHI, Masaki HISAMOTO and Kouichi NISHIYAMA

Synopsis

The purpose of this research is to develop a SDP that is lighter and has more torque than the one developed last year at our college. This year's SDP has a simple structure with 6 degrees of freedom and a lightweight aluminum frame. And, in order to make the new SDP more powerful and lighter than the old one, we have replaced the RC servo motor for the actuator with 4014/4024(KONDO KAGAKU CO.). As a result, the total weight of the new SDP is reduced to about 1124g, and its $\Theta 2$ angle is increased to 120 degrees, while the old SDP weighs 1.36kg, and its $\Theta 2$ angle is 60 degrees.

1. まえがき

厚生労働省の調査によると、交通事故や労働災害、疫病などによって身体に障害を持ってしまった人が全国に約 330 万人いることがわかり、その中でも肢体不自由者の割合は過半数を超えている。これらの障害者の自立と生活支援を促すうえで、失われた四肢の機能を補う義手・装具の開発が重要な課題となっている。電動式肩義手は前腕義手などの他の義手、義足に比べて開発が遅れている。肩義手は手先まで含めると自由度が多いため制御が複雑になり、多自由度になればそれだけ駆動させるアクチュエータの数が増え、重量が重くなる。よって、機能性に優れた義手が完成したとしても、「重量が重すぎる。」「価格が高すぎる。」との声が上がリ、実用に至るまでには多くの課題が残されているため、研究開発が難しく多くの労力と資金を要求される。

本研究では、従来のもより軽量で高トルクになった RC サーボモータを使用して前年度から専攻科の特別研究で製作されている 6 自由度肩義手の改良を行うことを目的としている。

2. 研究概要

特別研究で製作された肩義手は RC サーボモータ KRS-8044 ICS RED Version(電源電圧 6V、トルク 24.0kg・cm、重量 142.5g)を使用しているがこれではトルクが不足しており、稼働範囲が少なかった。上腕挙上運動を例にとると、負荷をかけない状態でも最大 60 度程度しか上がらなかった。今年度はより軽量で高トルクになった RC サーボモータ KRS-4014HV ICS RED Version (電源電圧 10.8V、トルク 40.8kg.cm、重量 65.0g)をアクチュエータに用いてパワー不足を改良する。トルクをあまり使わない前腕回旋と手の開閉部分には少し軽い KRS-4024HV (電源電圧 10.8V、トルク 10.5kg.cm、重量 48.5g)を用いる。

3. 開発する肩義手

3.1 肩義手の概要

6 自由度肩義手とは図 3.1 に示すように上腕水平回転(θ_1)、上腕挙上(θ_2)、上腕回旋(θ_3)、肘屈曲(θ_4)、前腕回旋(θ_5)、手の開閉(θ_6)の 6 つの駆動部からなっており、それぞれが肩・肘・手首のひねり具合、上腕・前腕の持ち上げ具合、手の開閉を再現する。

* 電子工学科

** 川崎テクノサービス

*** 専攻科電子通信システム工学専攻

**** 四国計測

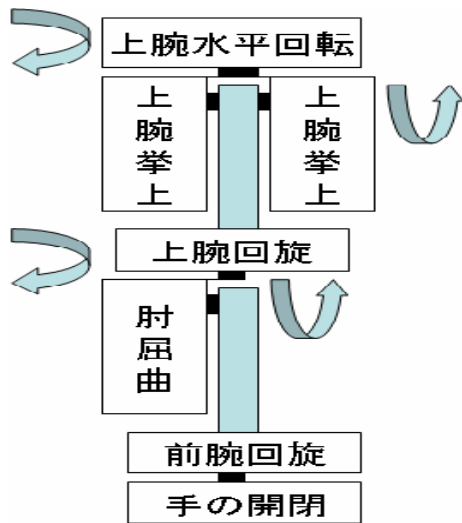


図 3.1 義手の概要図

3.2 肩義手の設計

概要に関しては特別研究の肩義手と同じだが、今回使用するRCサーボモータが前年度のものとは構造も寸法も異なるため、設計段階から作り直す必要があった。

設計において注意しなければいけないのは軽量化を意識しすぎて、義手の強度が落ちてしまうことだ。モータのトルクが倍近く上がっているため義手にかかる負担は大きく、特に上腕拳上部は義手全体の重量を支えなければならない。さらに、上腕拳上部は2個のモータを向かい合わせに取り付けるため、モータの回転軸や初期位置が少しでもずれると故障の原因になってしまうので、製作の際には慎重かつ丁寧に行わないといけない。

3.3 肩義手の製作

全体の骨組みの材料には軽量かつ耐久性に優れたアルミ材（アルミ板、コの字レール）を使用した。図 3.2 に示すようにモータの上下にアルミ板を取り付け、左右から挟むようにコの字レールを取り付け固定する。これが駆動部の基本形となる。

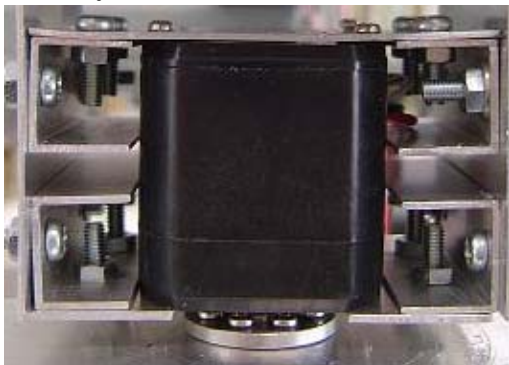


図 3.2 駆動部

モータのギヤとアルミ材をつなぎ合わせるためにローハイトサーボホーンを利用した。アルミ材に図 3.3 に示すような穴をあけてサーボホーンを差し込み、周りをねじでとめる。かなり面倒な作業ではあるが、動作時はギヤの部分にいちばん負担がかかるので、頑丈にとめておかないと正確な値がとれなかったり、破損したりする可能性がある。



図 3.3 ローハイトサーボホーン

義手の全体及び駆動部を図 3.4～図 3.9 に示す。



図 3.4 義手の全体図

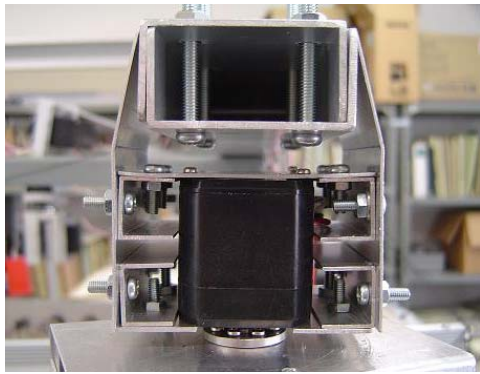


図 3.5 上腕水平回転部

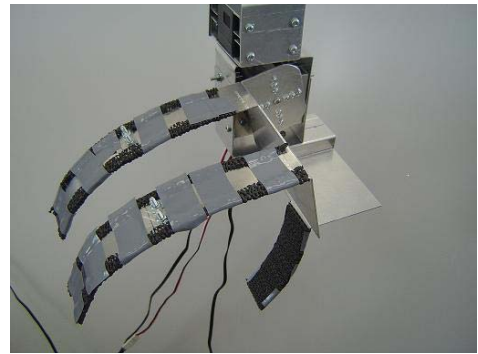


図 3.9 手の開閉部

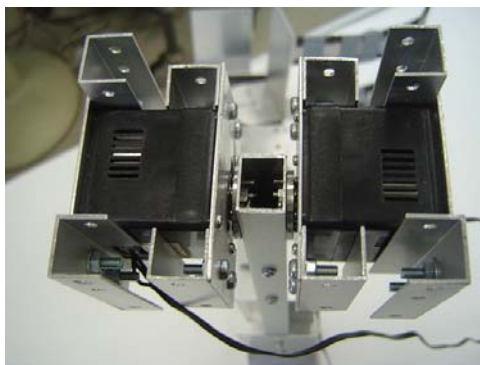


図 3.6 上腕挙上部

上腕挙上部はトルクをもっとも必要とする場所なので、モータを2個向かい合わせに取り付ける。よって、片方のモータを逆回転に設定する必要がある。これは、近藤科学 servo manager を用いてモータの内部設定をリバースに書き換えようとしたが、KRS-4014HV に対応していないので近藤科学ホームページから無償でダウンロードできる近藤科学 serial manager を用いてリバース設定を行った。

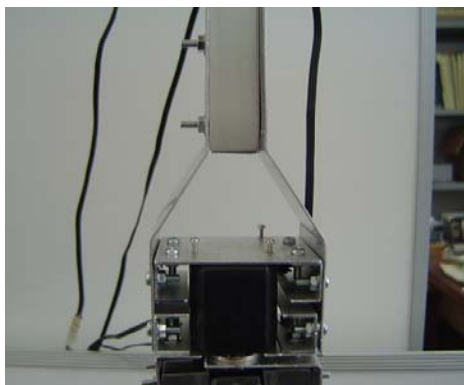


図 3.7 上腕・前腕回旋部

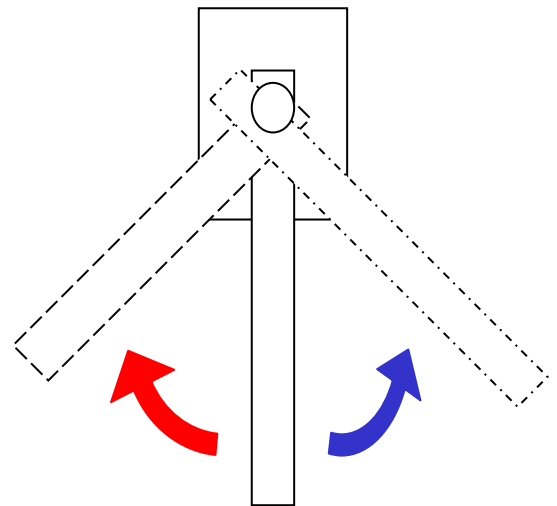


図 3.10 リバース設定



図 3.8 肘屈曲部



図 3.11 Serial Manager 操作画面

赤の矢印が通常の回転方向だがリバース設定することで青の矢印の回転方向となる。これにより、両方のモータが同じ方向に回転する。

このソフトは KRS-4014 専用でまだベータ版なのでマニュアルがなかったが、servo manager と比べるとほぼ同じ機能であると言える。

手の開閉部は物を掴みやすくするために少し大きめに設計しており、指の部分は滑り止めをつけている。

3.4 肩義手の仕様

専攻科の特別研究の肩義手と今年度の肩義手の寸法及び重量を表 3.1、3.2 に示す。

表 3.1 専攻科の特別研究の肩義手の寸法・重量

全長			
縦	735mm	横	130mm
上腕部			
縦	365mm	横	130mm
前腕部			
縦	370mm	横	110mm
重量			
上腕部	600g	前腕部	760g
上腕部モータ重量	427.5g	前腕部モータ重量	201g
上腕部	172.5g	前腕部骨	559g

骨組み	組み
全体重量	1360g

表 3.2 今年度の肩義手の寸法・重量

全長			
縦	830mm	横	190mm
上腕部			
縦	400mm	横	90mm
前腕部			
縦	430mm	横	170mm
重量			
上腕部	603.5g	前腕部	520.5g
上腕部モータ重量	260g	前腕部モータ重量	162g
上腕部骨組み	343.5g	前腕部骨組み	358.5g
全体重量	1124g		

モータの寸法は若干小さくなっているため、それに伴い、アクチュエータを骨格の強度を保ったまま小型化することができた。これにより前腕部を軽量化することに成功し、全体では約 200g 軽くなった。人間の片腕は約 1.5kg なので、重量に関しては充分目標に達しているが、手先の部分は設計を見直すことで更なる軽量化が可能である。

しかし、腕の全長が 830mm と長くなってしまっている。本来は日本人の平均身長 170cm に合わせて、上腕 350mm、前腕 300mm としなければならないが、製作の時にそのことを把握できていなかったためである。

4. 動作実験

4.1 モータの制御方法

RC サーボモータは入力信号と電源のみで動作する。駆動電圧は HV タイプなので 9[V]~12[V] である。入力信号として約 700[μsec]~2300[μsec] のパルス数を数[msec]~20[msec] の周期で入力することでモータの角度を 1 度単位で決められる。また PIC でも制御が可能である。通常に動作させる場合は入力したパルス幅に相当する角度に制御され、260 度に及ぶサーボ動作範囲の位置制御が可能である。

この他に教示機能 (ポジションキャプチャー) が利用できる。100[μsec]~200[μsec] のパルスが入力されると、サーボは 100[μsec] 以内に信号線を入力から出力に切り換えてサーボの位置 (回転角度) に対応するパルス幅を出力する。このパルス幅を外部で測定することにより、サ

一ボの現在位置情報を取得することができる。この教示機能を使って、肩義手の動作角度を読み取り、測定する。

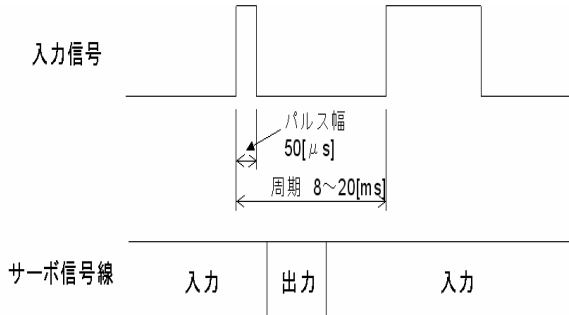


図 4.1 入力信号とサーボ信号との関係

4.2 制御システム

動作実験を行うにあたって 2 種類の制御システムを用いた。

まず、近藤科学製の制御基板 RCB-1 と制御ソフト「Heart to Heart」による協調動作制御システムを用いての動作実験を行う。

コントロールボード RCB-1 は最大で 24 個のサーボモータと接続し、同時に制御することが可能である。RS-232C ポートよりパソコンに接続し、専用のソフトウェアを用いることでより簡単にモータの角度制御が可能である。

RCB-1 専用ソフトウェア Heart To Heart Ver1.0 は、RCB-1 専用のモーション作成ソフトウェアである。教示機能を利用し、協調動作制御プログラムの作成が可能である。

システムの構成は、パソコン、電源、近藤科学製のロボットコントロールボード、そして RC サーボモータ 7 個である。RC サーボモータ専用のロボットコントロールボード RCB-1 をパソコンに接続し、7 個のモータを同時に制御する。

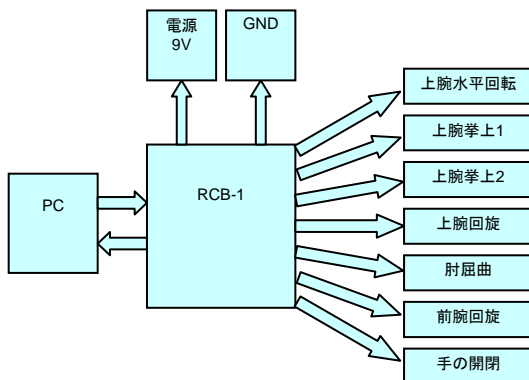


図 4.2 システムの構成図

しかし、この制御方法は PC を介してモータ

の制御を行うので、実用には向いていない。

そこで、今年度は新たに浅草ギ研製の制御用基板 AGB65-RSC を用いた制御システムを開発し、それを用いての動作実験も行った。この制御基板の特徴は

- 1 2 個の RC サーボの回転位置と速度を 1 つのシリアルラインで制御できる
- ID を変更し 4 つの AGB65-RSC を接続することで最大 4 8 個の RC サーボモータを同じシリアルラインで駆動できる
- 他の AGB シリーズ (4 点感圧センサ) と接続でき、同じシリアルラインで使用できる
- RC サーボへのスピード指定が可能
- 通信速度は 115[Kbps], 9600[bps] のどちらかを選択
- 教示機能に対応しているので、脱力時にその角度を読み取ることができる
- 8 チャンネルのアナログ入力に対応している

などがあげられる。

この制御基板を使用した理由については、

- 制御できる最大モータの数が 4 8 個と多いこと
- もともと PIC 等のマイコンでの制御を主としてつくられたものなので PIC への移項が容易にできること
- 他の AGB シリーズと接続でき、8 チャンネルアナログ入力に対応しているので容易にセンサー入力を取り入れることができる

これらの理由から AGB65-RSC を使用した。

制御ソフトについては自由に機能や操作画面をつくれ、シリアル通信の記述が容易にできることから Visual C# 2005 で作成している。今回は PC を介して実験を行っているが、将来的には PC を介さなくともセンサー入力によって動作の制御を行えるシステムを実現させることができる。

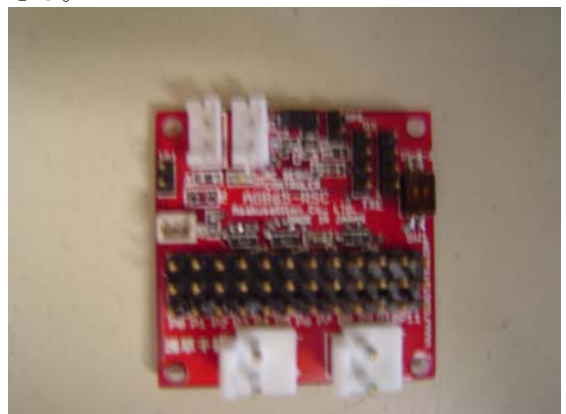


図 4.3 AGB65-RSC

4.3 実験時に生じた問題

まず、各アクチュエータを数度ずつ動作させて挙動や振動が異常でないかを確かめたところ、問題なく動作した。次に各駆動部ごとに動作させ、モータの制御が行えているかを調べる追従特性実験、及びRCB-1を用いて、水を飲むなど連続した動作のモーションを記憶させておき、シナリオとしていつでも再生できるようにするシナリオ作成実験を行う。

しかし、実験を繰り返しているうちに、上腕挙上部のモータが高温状態になり、その影響で義手の挙動がおかしくなる。最終的に片方のモータとモータ制御用のICが故障して動かなくなった。単なる上腕挙上運動だけでモータが故障するほど負荷がかかるのは、義手にとって致命的なので原因を調べて改善しないとイケない。

4.4 問題の解決

近藤科学に修理を依頼し、原因をうかがったところによると、異常な高熱により内部のモータとモータに隣接していたICが焼き切れてしまったとのことらしい。

故障するほどの高熱が発生する理由として次の2つが考えられる。

1. 今回のモータでも、上腕挙上運動を行うにはトルクが足りず、過負荷がかかり高熱が生じる。
2. 義手の構造に問題があるため、動作中に余分な負荷がかかり、高熱が生じる。

1の理由を考えると、今回かなりトルクが上がっているため、充分トルクは足りていると思われるが、念のため調べてみる。

故障したモータを外し、1個の状態で作成実験を行って、どの程度追従できるかを測定した。手の開閉部を外した場合のグラフを図4.4、手の開閉部を取り付けた場合を図4.5に示す。

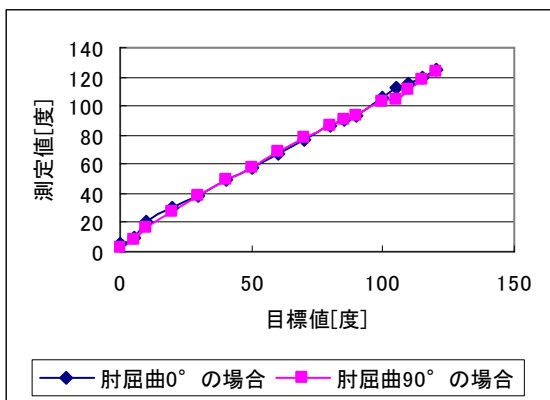


図 4.4 上腕挙上（モータ1個）の測定結果
手先なしの場合

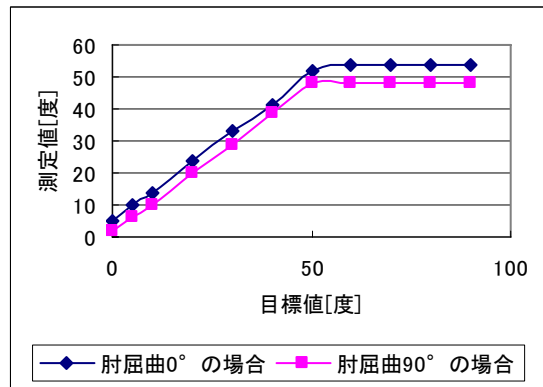


図 4.5 上腕挙上（モータ1個）の測定結果
手先ありの場合

手先を外した場合にはモータ1個でも問題なく動作しているが、手先を取り付けた場合だと50°付近で止まり、それ以上持ち上がらなくなった。

この結果は特別研究の義手による測定結果とほとんど同じであることから、KRS-4014はKRS-8044を2個組み合わせた場合とほぼ同じトルクを持っているということが改めてわかった。

よって、KRS-4014を2個組み合わせれば、充分に上腕挙上運動を行えるトルクを發揮できることになる。

次に2の理由を考えると、最初にアクチュエータを動かした際には挙動や振動に異常はなかったのですが、動作を行ううちに何らかの理由によって高熱が生じて故障につながったと考えられる。

故障する直前に行ったAGB65-RSCを用いての動作実験のデータを図4.6に示す。

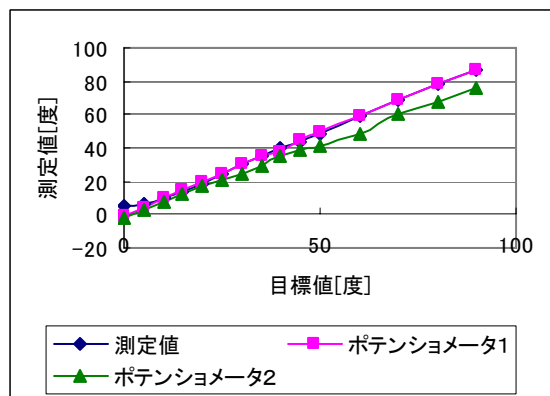


図 4.6 上腕挙上（故障する直前）の測定結果

図より2つのポテンシオメータの値が始めはほぼ同じであったのに、角度が上がるにつれて誤差が増えていっているのがわかる。

90° を例にとると、ポテンシオメータ 1 の値は 87° となっているが、ポテンシオメータ 2 の値は 76° と 11 度のズレが生じている。

このとき、1 のモータは目標値に達した状態で固定されるが、2 のモータはズレにより目標値に満たない状態なのでモータは回転を続けようとする。このときの 2 のモータの動作の流れは

1. モータが目標値へ回転させようとトルクをかけ続ける。しかし、1 のモータが固定されているので測定値は変わらない。
2. 値が変わらないため、モータ内部のポテンシオメータは同じ位置情報を制御ボードに送信することになる。
3. 制御ボードは送られた位置情報からまだ目標値に到達していないと判断するため目標値に対応した PWM 信号をモータに送り続ける。

1 から 3 の動作が繰り返されることで熱が蓄積していき、2 のモータが異常な高温状態となり、故障につながったと考えられる。

対策としてモータの初期状態での誤差をなるべく少なくすることから始めた。骨組みの取り付け作業の際に約 1～2° の誤差が生じると思われる。専攻科生の新原君に相談したところ、特別研究で製作した肩義手でも同じような問題が生じており、誤差を少なくするために様々な方法をためした結果、モータを最小動作角（モータの稼動範囲の最小値:0 度）いっぱいまで回転させてから骨組みを取り付けることで誤差を少なくする方法が、いちばん効果があったようだ。この方法を踏襲した結果、誤差を減少させることができ、モータが故障するほどの高温状態にはならなくなった。

誤差はわずかなものではあったが、それがモータを故障させるほどの高熱を引き起こす原因となっていたことが発見できた。

ただ、長時間動作を行い続けていると、だんだんと熱が蓄積しているようであった。ファンなどを取り付けて熱を逃がす構造にしないと長時間の動作は危ういかもかもしれない。

5. 実験結果

上腕挙上部の高温状態による問題を解決した後測定した結果を改良前、モータ 1 個の場合の結果と比較したグラフを図 5.1、5.2 に示す。

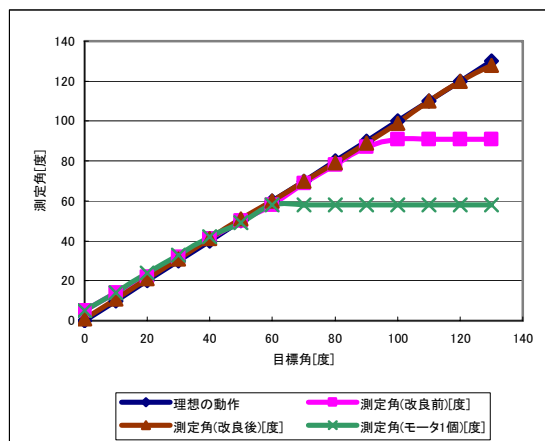


図 5.1 上腕挙上（肘屈曲 0° の場合）の測定結果のまとめ

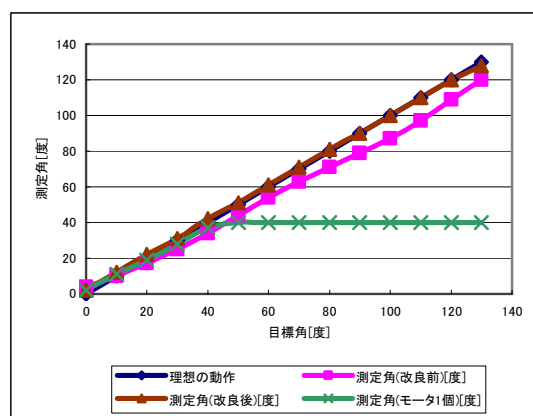


図 5.2 上腕挙上（肘屈曲 90° の場合）の測定結果のまとめ

改良を行った結果、追従特性は理想値とほぼ同じになった。上腕挙上部のパワー不足を改良できたが、長時間動作を行うと熱ほどの程度蓄積し、また、その熱で故障を引き起こすのかという検証がまだ行えていないので、今後調べていきたい。

6. 今後の課題

今後の課題については手の開閉部の設計を見直し軽量化をはかること、熱による影響を詳しく調べることと、感圧センサー、曲げセンサーなどを用いて義手をセンサー入力に対応させることにより、顔面方位制御方式による空間上の手先の位置決めを実現させることである。

7. 謝辞

本研究にあたって、発生した問題に対して助言をくださった専攻科の新原君、並びに研究に

協力下さいました実習係の方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 赤澤堅造 他、動力義手・装具の研究開発の現状と将来、BME(医用電子と生体工学)、Vol.13, No.2, p.34-41(1999)
- 2) 新原洋人 RC サーボモータを用いた6自由度肩義手の協調動作制御システムの開発 平成18年度専攻科特別研究論文集
- 3) ICS Servo Manager for RED Version 操作マニュアル
- 4) 東原孝典 斉藤之夫, 全腕式電動義手(TDUs-86)のメカニズムと工学評価 バイオメカニズム 10 p227-237 東大出版会