

新しい6自由度柔軟関節肩義手(木下ロボットアーム I)の開発

木下 敏治* 平田 一真**

Development of new flexible Shoulder Disarticulation Prosthesis (SDP) (Kinoshita Robot Arm I) with 6 degrees of freedom.

Toshiharu KINOSHITA , Kazuma HIRATA

Abstract

I use the RC servo motor, we propose a practical high torque SDP. RCB-4HV is used with control circuit (manufactured by Kondo Kagaku), I can provide a simplified total system of a serial servo control method. The flexible joint SDP have 6 degrees of freedom (θ_1 : shoulder rotation angle, θ_2 : shoulder flexion-extension angle, θ_3 : humeral rotation angle, θ_4 : elbow flexion-extension angle θ_5 : wrist rotation angle, θ_6 : hand prehension angle). Movement of the SDP was measured by a potentiometer using the Rcb4CommandGenerator. A improved model flexible joint SDP (Flexible joint Robot Arm 1.6Kg) can make by new vibration control theory. θ_2 aluminum channel changed carbon channel. Thrust bearing is used θ_1 and θ_3 . A Rise time, A Fall time, Settling time and Steady-state deviation using control engineering is possible to solve from the fundamental GL900's data. As a result, vibration of prehension part of flexible joint SDP is stopped by principle of conservation of energy.

Keywords: Flexible joint, Unit step response, Robot Arm, RCB-4HV control circuit

1. まえがき

厚生労働省の調査では、全国18歳以上の身体障害者数(在宅)は、348万3000人(平成18年7月度)と推計されており、その中で肢体不自由者は全体の50.5%を占めている。また前回調査(平成13年6月度)と比較しても、肢体不自由者は0.6%増と年々増加傾向となっている。肢体不自由者のための義手、義足の中で、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。その中で電動式前腕義手は、手の開閉の制御に筋電を利用して操作する方式で実用化されている。一方で、電動式肩義手は実用化が遅れている。肩義手は手先まで含めると自由度が非常に多いため制御が複雑になり、駆動させるアクチュエータの数が増え、重量が重くなる。現状、電動式肩義手は制御方式や重量などの問題

点が多く、実用に至るには、軽量化等の問題を解決する必要がある。義手研究の現状については2013年12月29日朝日新聞の1面に詳しく述べられている。動力前腕義手の使用者数がヨーロッパなどと比べると非常に少ないことが書かれている。また、肩義手の実用化されているものについては赤澤先生が参考文献に示している。Google検索で「肩義手ロボット」とキーワードで入力すると現在の研究室レベルの研究現状が詳しくわかる。バイオメカニズム学会誌2014年Vol.38 No.1 P3よりP9に電気通信大学の下条誠先生は「人工の手の研究開発動向」という解説を書いている。アメリカのDARPA's Prototype2 Bionic Handが義手の研究開発の例として詳しく述べられている。解説の「おわりに」の章で「人間のように器用な手」の工学的実現は難しいが、その大いなる有用性から革命的な価値を持つと多くの研究者に励ましの文章を示している。

*香川高等専門学校詫間キャンパス電子システム工学科

**ドコモエンジニアリング四国株式会社

2. 研究概要

本研究では、日常生活においてスプーンでものを食べる、コップで水を飲む等の食事動作、電話に出る等の机上動作を実現することを目的として6自由度柔軟関節肩義手を試作してきた。2007年度の試作機²⁾は7個のRCサーボモータを協調動作制御し、300gのものを安定に移動できる。約3年間耐久テストを繰り返した後、朝9時から夕方5時まで手先に持ったボールを投げるなどの各種協調動作を実行する実験を繰り返し、義手の破壊テストを行った。その結果、最高速度でボールを投げ続けても本体の構造の変形は少し（上腕回旋部のアルミニウム板が約3°曲がった）しか生じず、正常な動作を翌日実現できた³⁾。よってこの構造は柔軟関節肩義手として使用可能であると判断した。また、エネルギー吸収ボックスと名付けたアルミニウムできた入れ物にアクチュエータをぴったりとネジ止めすることで、あらゆる振動モードはエネルギー吸収ボックスの弾性限界内の歪みによりアルミニウムの表面振動エネルギーは熱エネルギーに変換され刻々と放出される。このエネルギー吸収ボックスを上腕水平回転角($\theta 1$)、上腕拳上角($\theta 2$)、上腕回旋角($\theta 3$)、肘屈曲角($\theta 4$)に用いることで安定な制御を実現した。そして2007年度の試作機をベースに2009年度に製作した高トルクなRCサーボモータを用いた重量1.45kgの軽量な6自由度柔軟関節肩義手にて500gの水の入ったペットボトルを持たせて繰り返し動作実験を行った結果、強度的問題が存在することが明らかになった。そこで2009年度に製作された肩義手を実験用の肩義手として、肩義手の構造、用いる素材を見直すための基礎実験を行った。それらのデータを元に新たな6自由度柔軟関節肩義手を製作し、動作実験として上腕拳上角($\theta 2$)に取り付けた回転式ポテンシオメータとGRAPHTEC製のデータロガーGL900を用いてステップ応答波形を測定した⁴⁾。その後、協調動作制御である「フォークでものを刺して食べる」動作パターンを作成した。実験結果を元に本研究で開発した肩義手が実用可能であるか判断する。

3. 肩義手の構造、素材の検討

3.1. 強度的問題点

2009年製の6自由度柔軟関節肩義手において、最も負荷の掛かる上腕水平回転角RCサーボモータ(近藤科学製KRS-6003HV)のフリーホーン部(回転部)と上腕拳上部アルミニウム板との接合部分、上腕水平回転角RCサーボモータの回転軸に歪みが生ずることが明らかになった。次に負荷の掛かる上腕回旋部と肘屈曲部の間にも同様の歪みが生ずることが明らかになった。また上

腕拳上部に用いている厚さ1mmのアルミニウム製チャンネルにも歪みが生じていることが分かった。各部の厚さ1.2mmのアルミニウム板とRCサーボモータとの接合部に金属疲労が見られた。

3.2. 解決法

図3.1の様に上腕水平回転部RCサーボモータと上腕拳上部アルミニウム板との間にスラストベアリングを挟むことで接合面積を広げRCサーボモータ回転軸、取り付け部にかかる負荷を軽減する。図3.2の様に通常のM2.6-6mmより長いM2.6-12mmのネジで上腕拳上部のアルミニウム板と内径21mm、外径35mm、厚さ10mm、重量38gのスラストベアリングを共締めして取り付けている。スラストベアリングの内径がRCサーボモータのフリーホーン部の外径21mmより僅かに大きいためスラストベアリングが大きくずれることはない。また、新しく製作する肩義手では各部に用いるアルミニウム板をMg含有率が高い強度のあるものに変更する。

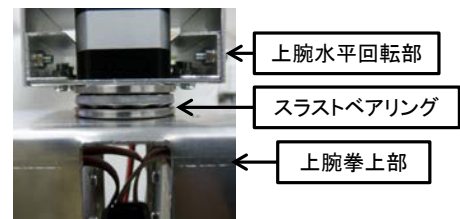


図3.1 スラストベアリング取り付けの様子

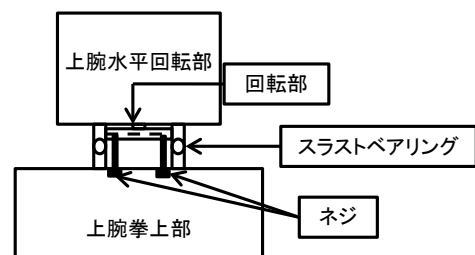


図3.2 スラストベアリング取り付け方法

上腕拳上部のアルミニウム製チャンネルの歪みに関して重量増を最小限に抑え強度を上げるために繰り返しの変形にも耐えるドライカーボン製チャンネルを用いることとした。上腕拳上部の構造は図3.3に示す断面図の様にチャンネル形状のドライカーボンを2つ重ねたものである。従来のアルミニウム製チャンネルの寸法は $a=27\text{mm}$ 、 $b=15\text{mm}$ 、 $c=1\text{mm}$ である。また今回使用するドライカーボン製チャンネルの寸法は $a=30\text{mm}$ 、 $b=14\text{mm}$ 、 $c=2.3\text{mm}$ である。本来はアルミニウム製チ

チャンネルと同寸法のものを用意すべきであるが、特注品となり高価となるため今回は最も寸法の近いものを用意した。縦方向の長さは207mmである。アルミニウム製チャンネル、ドライカーボン製チャンネルの重量は、それぞれ28g、38gである。より寸法の近いドライカーボン製チャンネルを用意することができれば、重量増を抑えることができる。図3.4の点線で囲まれている部分が上腕拳上部に取り付けたドライカーボン製チャンネルである。

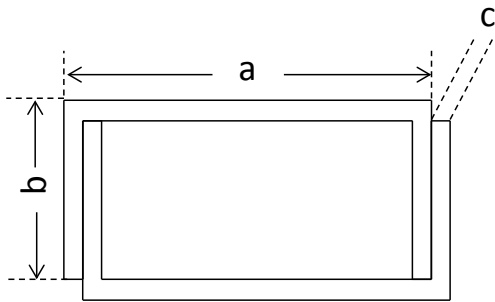


図3.3 上腕拳上部の断面図

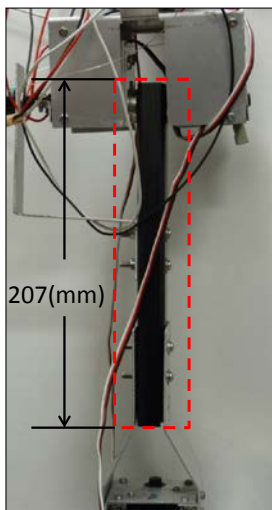


図3.4 上腕拳上部の
ドライカーボン製チャンネル

3.3. ドライカーボン製チャンネルの検討

3.3.1. 実験方法

2009年度に製作された6自由度柔軟関節肩義手を用いる⁹⁾。上腕拳上部のアルミニウム製チャンネルをドライカーボン製チャンネルに置き換え上腕拳上角(θ_2)に取り付けた回転式ポテンシオメータとデータロガーGL900を用いてポテンシオメータの出力電圧から10 μ secのサンプリングタイムでステップ応答波形を測定する。

最も負荷の掛かる姿勢つまり腕を伸ばしきった状態で

負荷無し、100g、200g、…と水を入れたペットボトルを500gまで肩義手に持たせマジックテープで固定し、上腕拳上角(θ_2)を0~120°まで30°刻みで振り上げる。そして測定したステップ応答波形より定常偏差、立上り時間、立下り時間、立上り整定時間($\pm 2\%$)、立下り整定時間($\pm 2\%$)を求める。柔軟関節構造において重要な手先の振動が止まっていることを確認し素材として使用可能か判断するため重要な整定時間について述べる。

ステップ応答波形より求める定常偏差などの定義については第5章で説明する。上腕拳上角に使用しているKRS-6003HVは最高スピードに設定している。

RCサーボモータの仕様、制御システムに関しては第4章で説明する。

3.3.2. 結果・考察

立上り整定時間($\pm 2\%$)をまとめたグラフを図3.5に、立下り整定時間($\pm 2\%$)をまとめたグラフを図3.6に示す。

実験結果より立上り整定時間に関して角度が大きくなれば整定時間が長くなっている。またグラフの傾きが小さいことから負荷の影響は少なくRCサーボモータのトルクは十分であると言える。立下り整定時間に関しては重力の影響が強く肩義手の取り付け用ラックの強度の問題があるため負荷が大きく、角度が大きくなれば整定時間が長くなっていることが分かる。

また全てにおいて手先の振動が止まっていることを確認し、ドライカーボン製チャンネルが肩義手の素材として使用可能と判断した。

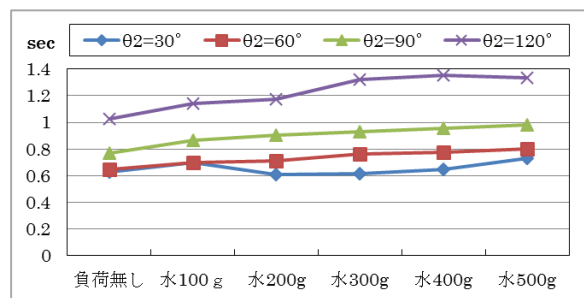


図3.5 立上り整定時間($\pm 2\%$)

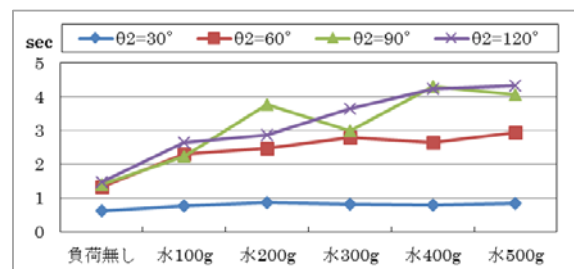


図3.6 立下り整定時間($\pm 2\%$)

3.4. スラストベアリングの検討

3.4.1. 実験方法

ドライカーボン製チャンネルを取り付けてある2009年度製作の肩義手の上腕水平回転部と上腕拳上部の間にスラストベアリングを取り付けた(図3.1)。そしてドライカーボン製チャンネルの実験と同様の方法でステップ応答波形を測定した。

3.4.2.

3.4.3. 結果・考察

立上り整定時間(±2%)をまとめたグラフを図3.7に、立下り整定時間(±2%)をまとめたグラフを図3.8に示す。

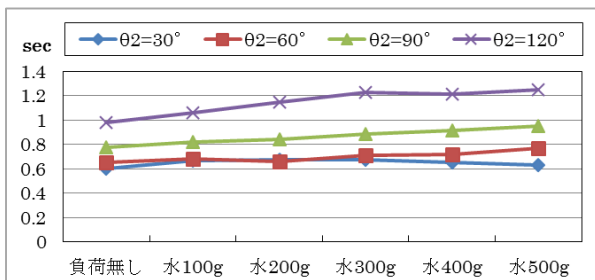


図3.7 立上り整定時間(±2%)

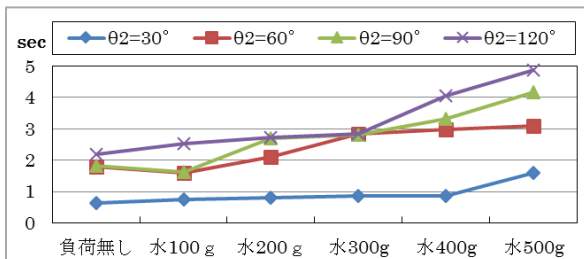


図3.8 立下り整定時間(±2%)

実験結果より立上り整定時間は角度が大きくなれば長くなっていることが分かる。また図3.8より負荷が大きく、角度が大きくなれば立下り整定時間も長くなっていることが分かる。スラストベアリングを取り付けることで上腕水平回転角(θ_1)と上腕拳上角(θ_2)のエネルギー吸収ボックスの動きが制限され整定時間が長くなる心配があったが、図3.5、図3.6と比較しても分かる様にスラストベアリング取り付けの前後で整定時間に大きな変化がないことからスラストベアリングを肩義手の素材として使用可能と判断した。

4. 製作した6自由度柔軟関節肩義手

4.1. 設計・製作

本研究では、日常生活においてフォークでものを刺して食べる、コップで水を飲む等の食事動作、電話に出る等の机上動作を実現することを目的に肩義手を製作した。

義手の長さは、日本人男性の平均身長173cmに合わせてある。義手の長さの計算は、舟久保先生の「医用精密工学-生体へのアプローチ」、丸善株式会社、p.21-22を参考にして求めた。

表4.1に示す様に上腕長は $0.19 \times \text{身長} \approx 330\text{mm}$ 、前腕長の長さは $0.15 \times \text{身長} \approx 260\text{mm}$ とした。

手の長さは $0.11 \times \text{身長} \approx 190\text{mm}$ となるが、今後、佐藤技研製の長さ150mmの装飾用グローブを取り付けることを考慮し手の長さは160mmで設計した。

その結果、前腕長と手の長さの合計は420mmとなった。指の曲げ方で形が変わるため実際には440mmである。また、肩義手を取り付けるラックも強度のあるものに変えてある。新しく製作した肩義手を図4.1に示しており図4.2の概要図に対応している。各部の重量は表4.1に示す通りである。

	上腕部	前腕部と手	全体
全重量(g)	1194	410	1604
横の長さ(mm)	115	95	115
縦の長さ(mm)	330	440	770

表4.1 寸法と重量

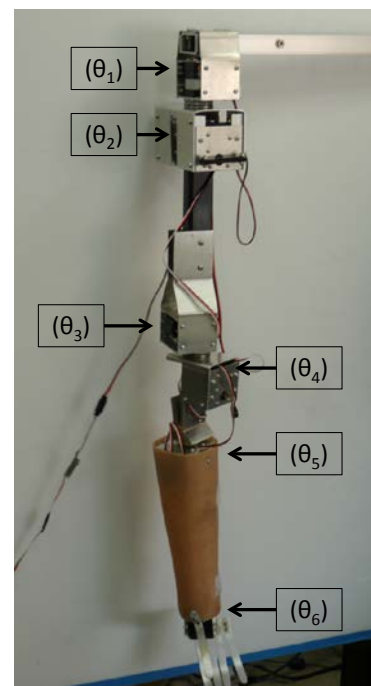


図4.1 新しく製作した肩義手

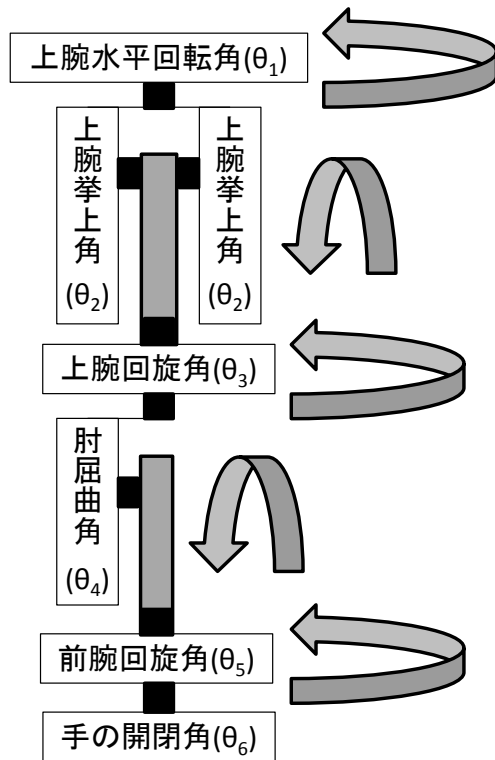


図4.2 肩義手の概要図



図4.3 KRS-6003HVフリーホーン部



図4.4 KRS-6003HV取り付け部

4.2. 改良点

4.2.1. 工作精度

ドリルでアルミニウム板に穴を開けるときにドリルの刃先が板に接触すると僅かに刃先がずれる場合がある。これを防ぐためにポンチで事前に小さな穴を開け、ドリルの刃がずれないようにした。デジタルハイトゲージを用いて0.01mm単位で印を付け、更に予定の穴より1mm大きく穴を開けることで、穴の間隔を正確にすることができた。また、複数の同じ大きさの板の同じ位置に穴をあける場合、上下左右の基準面を決めその位置から計って印をつけることで板の大きさによる誤差の影響を無くすことができた。

結果、図4.4の丸で囲んである部分のRCサーボモータを取り付けるネジを増やすことができた。従来RCサーボモータのフリーホーン部(回転部)周辺のアルミニウム板をコの字にカットしてフリーホーン部をかわす様にしていたが、今回は図4.3に示す様にアルミニウム板にフリーホーンより1mm大きい22mmの穴を開けフリーホーン部を通してRCサーボモータを取り付けている。

4.2.2. スラストベアリング、ドライカーボン製チャンネル

第3章で検討したスラストベアリングを図3.2の取り付け方法で上腕水平回転部と上腕挙上部の間に取り付けした。また次に負荷がかかる上腕回旋部と肘屈曲部の間にも図4.8の様にスラストベアリングを取り付けている。取り付け方法は図3.2と同様である。また上腕挙上部にはドライカーボン製チャンネルを用いている。

4.3. 構造

肩義手の素材であるアルミニウム板を従来のAl-Mg(0.2-0.8%)合金より強度の強いAl-Mg(2.2-2.8%)合金に変更した。RCサーボモータの取り付けに関し、柔らかい厚さ1mmのアルミニウム製チャンネルを用いてモータ部と外枠を結合することで、小さな外力による変形はアルミニウム製チャンネルの板バネとしての能力で対応し、より大きな外力に対しては外枠のアルミニウム板が板バネとして働くように設計してある。つまり外枠のアルミニウム板に強度の強いAl-Mg(2.2-2.8%)合金を用いることで、より弾性変形後の復元力の大きな構造になったと考えられる。また図4.2に示した概要図の様に垂直方向の回転中心が手先を真下に下ろ

した状態で一直線上になるように工作を工夫した。新しく製作した肩義手の各自由度の拡大写真を図4.5～図4.10に示す。

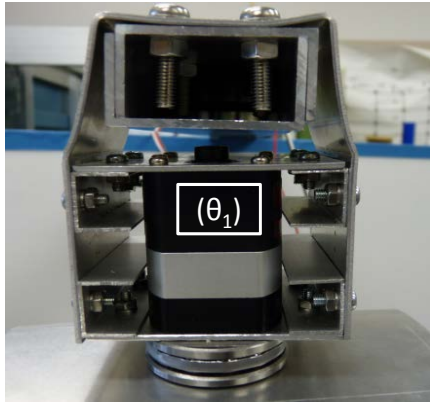


図4.5 上腕水平回転角(θ_1)

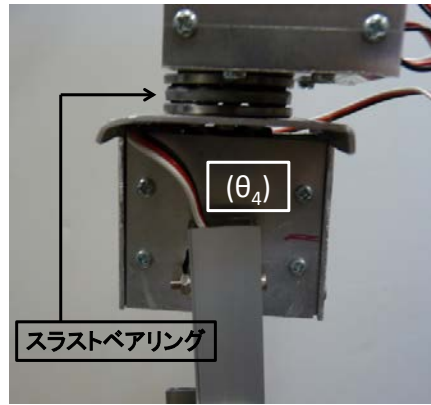


図4.8 肘屈曲角(θ_4)

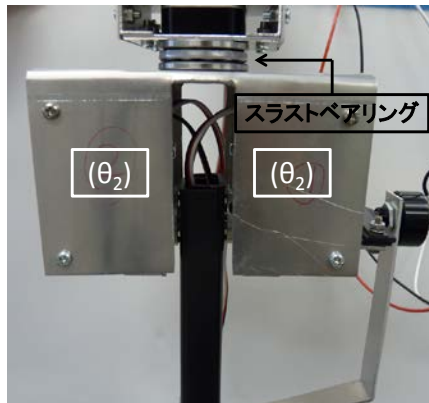


図4.6 上腕拳上角(θ_2)

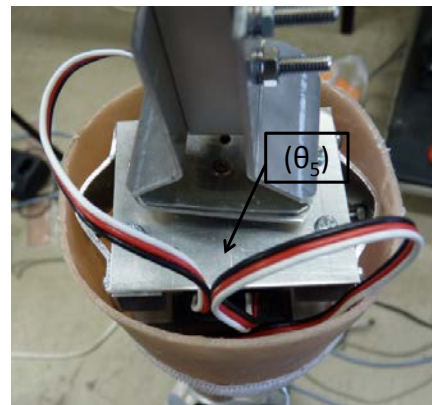


図4.9 前腕回旋角(θ_5)

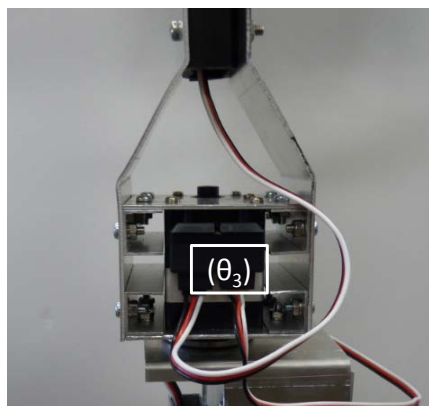


図4.7 上腕回旋角(θ_3)

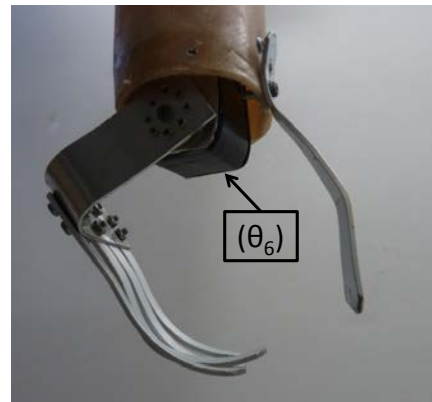


図4.10 手の開閉角(θ_6)

$\theta_1 \sim \theta_6$ の工作の概略は図4.5～図4.10を見てもらうと理解できると思います。図4.5に示すようにアルミチャンネルで小さな外力及び外側のアルミ板で大きな外力を板ばねとして吸収する構造である。

4.4. 制御システム

システムの構成図を図4.11に示す。肩義手の制御にはシリアル制御方式を用いており、肩義手をコントロールするのに必要なものはパソコン、電源、近藤科学製のロボットコントロールボードRCB-4HV(図4.12, 重さ12g)及び6自由度に必要な7個のRCサーボモータである。RCサーボモータに対応したコントロールボード

RCB-4HVのCOMポートをパソコンにUSBで接続し、7個のRCサーボモータを同時に協調動作させることが可能である。COMポートとパソコンの通信速度は最大1.25Mbpsである。肩義手に使用している7個のRCサーボモータは数珠つなぎで接続した。数珠つなぎはシリアルRCサーボモータの最大の特徴と言える。そして、SIOポートを1個使用するようにして θ_1 から順にRCサーボモータにIDを設定した。

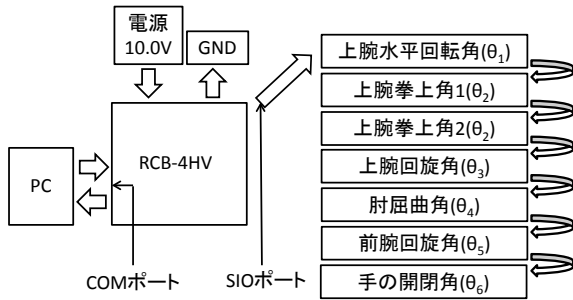


図4.11 システムの構成図

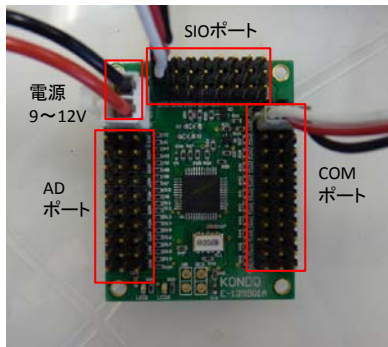


図4.12 RCB-4HV

4.5. RC サーボモータ

使用しているRCサーボモータの仕様表を表4.2に示している。2009年度に製作された肩義手と同様に θ_1 から θ_5 には高トルクなKRS-6003HVのシリアルRCサーボモータを使い、 θ_6 の手先の開閉角には軽量の近藤科学製のKRS-4034HVのシリアルRCサーボモータを使用している。

	KRS-6003HV	KRS-4034HV
重量(g)	100.8	61.2
最大トルク(kg・cm)	67	41.7
最高スピード(s/60°)	0.22	0.17
最大動作角(度)	270	270
電源電圧(V)	9~12	9~12
寸法(mm)	32×51.5×39.5	43×32×32.5

表4.2 RCサーボモータ仕様表

これらのRCサーボモータはシリアルサーボ制御方式(モータ内のポテンシオメータの位置情報をAD変換する精度が13ビットに改良されたため213通り(=約8000)に分割できる)を用いているので6自由度柔軟関節肩義手は、滑らかに動作する。

5. 動作実験

5.1. 実験方法

新しく製作した6自由度柔軟関節肩義手の動作実験として、前章で述べたスラストベアリングやドライカーボン製チャンネルの実験と同様に負荷無し、100g、200g、…と水を入れたペットボトルを500gまで肩義手に持たせマジックテープで確実に固定する。そして上腕拳上角(θ_2)を0~120°まで30°刻みで振り上げてステップ応答波形を測定する。そしてステップ応答波形より定常偏差、立上り時間、立下り時間、立上り整定時間(±2%)、立下り整定時間(±2%)を求める。

5.1.1. 回転式ポテンシオメータとデータロガー

340°で5Vを出力する回転式ポテンシオメータを上腕拳上角(θ_2)に取り付け、データロガーGL900にて10 μ secのサンプリングタイムで出力電圧の波形を測定する。図5.1の様に回転式ポテンシオメータはカーボン板とゴム板の圧着により軸のみを固定して半田付けした配線の付いた本体ごと回転させるように取り付けている。また、回転式ポテンシオメータの軸はモータの回転軸の真上になるよう正確に取り付けを行った。図5.2に示しているGRAPHTEC製のデータロガーGL900の分解能は16ビットに対応しており、画面の縦軸を電圧軸とすると216(65536)分割できる。

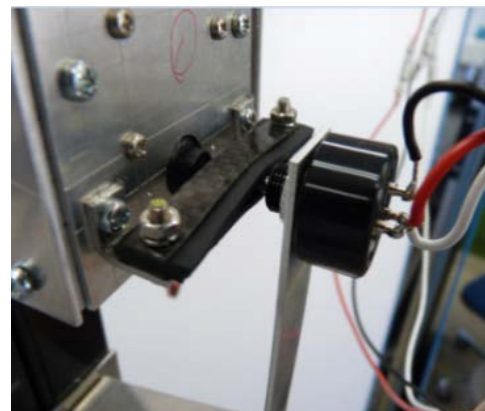


図5.1 θ_2 の回転式ポテンシオメータ



図5.2 GRAPHTEC GL900

5.1.2. RC サーボモータの制御方法

図5.3がRcb4CommandGeneratorの操作画面である。個々のRCサーボモータを一個ずつ制御でき、ICS3.0に対応した高精度な制御用ソフトである。7500をモータの0°（ニュートラル）としている。動かしたいRCサーボモータのIDに対応したICS番号にチェックを入れ赤枠の箇所にて-4000(-135°)~4000(+135°)の8000通りで数値入力し、コマンド生成をクリックし送信すれば、指定されたRCサーボモータは目標値まで動作しようとする。



図5.3 Rcb4CommandGenerator操作画面

5.2. 結果・考察

5.2.1. 定常偏差

定常偏差とは目標角と肩義手の上腕拳上角 (θ_2) の

RCサーボモータが実際に動いた角度との差のことである。測定に340°で5Vに達する回転式ポテンシオメータを用いるので以下に示す①式より実際に動いた角度 X° が求まる。また、ポテンシオメータの滑りがないことを確認しているので立上り時の定常偏差を示す。

$$\text{角度 } X^\circ = (340^\circ \times \text{出力電圧 V}) / 5V \quad \dots \textcircled{1}$$

測定結果より求めた定常偏差をまとめたグラフを図5.4に示す。図5.4より定常偏差は最大でも約3.3°である。また、マイナス方向の定常偏差は目標角を通り過ぎていることを示している。これは、RCサーボモータのスピードを最大に設定してあるためだと考えられる。全ての角度において右上がりのグラフになっていることから肩義手の精度は高いと言える。

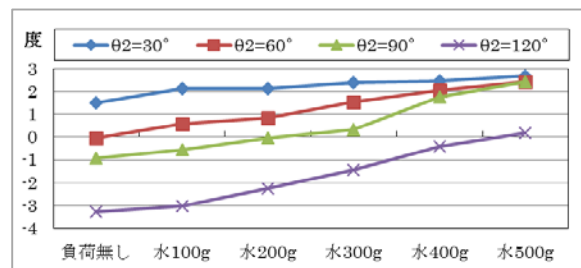


図5.4 定常偏差

5.2.2. 立上り時間、立下り時間

ステップ応答で立上り時の出力の10%~90%に対する時間を立上り時間といい、立下り時の出力の90%~10%に対する時間を立下り時間という。立上り時間をまとめたグラフを図5.5に、立下り時間をまとめたグラフを図5.6に示す。

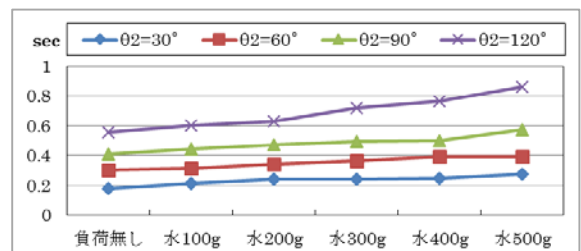


図5.5 立上り時間

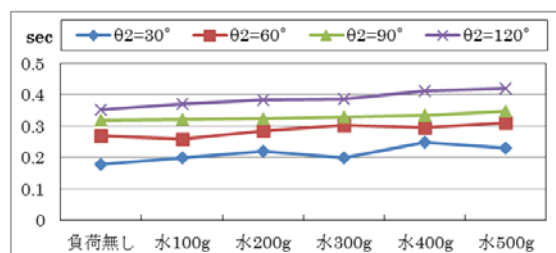


図5.6 立下り時間

図5.5のグラフを見ると全ての角度において右上がりのグラフになっており最大でも立上り時間は1秒以内に収まっている。立下り時間も同様に右上がりのグラフになっており最大でも0.45秒以内に収まっている。表4.2のKRS-6003HVの最高スピードが 60° で0.22秒であり、肩義手の全重量が1604gであることを考えると上記時間は理解できる値である。

5.2.3. 立上り 整定時間(±2%)、立下り 整定時間(±2%)

整定時間とは、ステップ応答が定められた許容範囲内(±2%や±5%)に入り、この時点以降は再び許容範囲を越えなくなるまでの時間である。今まで立上り、立下り後、全ての振動波形が±2%や5%の範囲内に収まっていた場合、整定時間0秒としていたが、より厳密にするために以下の方法で測定した。



図5.7 $\theta=60^\circ$ 、水500gの時のステップ応答波形

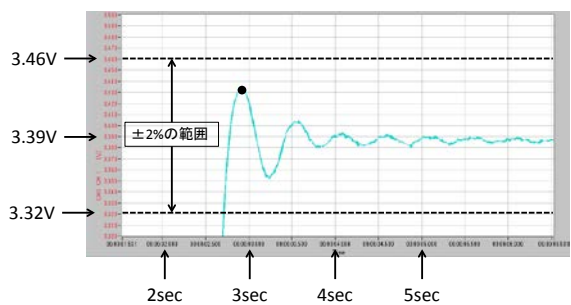


図5.8 立上り部分の拡大図

図5.7は負荷500gの水の入ったペットボトルを持たせ θ 2(上腕拳上角)を 60° まで振り上げ振動が止まったのを確認した後に振り下げた場合のステップ応答波形である。そして立上り部分(図5.7の丸の部分)を拡大したものが図5.8である。そして、点線で挟まれた範囲が電圧差の±2%の範囲である。この場合、立上った後全ての振動波形が±2%の範囲に収まっていることが分かる。この場合整定時間は0秒とするのではなく、立上り始めから1つ目の振動波形の最大値(図5.8点の部分)

までの時間を立上り整定時間とした。また、立下り整定時間も同様の方法で求めた。測定した立上り整定時間(±2%)を図5.9に示し、立下り整定時間(±2%)を図5.10に示す。

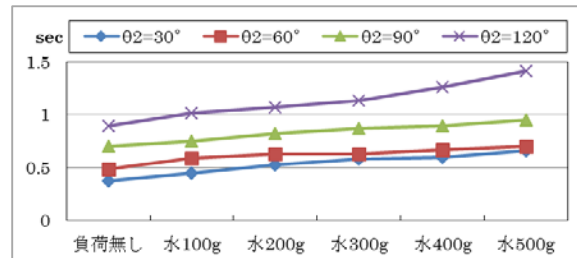


図5.9 立上り 整定時間(±2%)

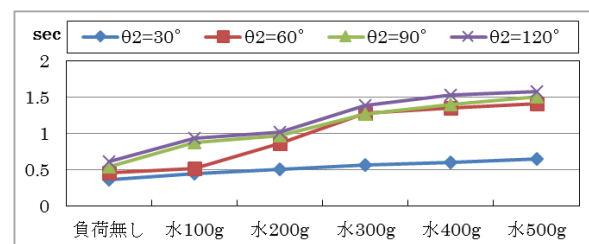


図5.10 立下り 整定時間(±2%)

まず目標値で静止していることが図5.7の波形データより確認できる。立上り時や立下り時に振動波形が見られるが、一番大きな振動が生ずると考えられる負荷500g、目標値 120° でも立下り整定時間は1.6秒以内に収まっている。

6. 協調動作制御

6.1. 協調動作制御システム

協調動作制御とは複数のモータを同時に制御することである⁶⁾。コントロールボードにはRCB-4HVを用いており、モーションの作成をHeart To Heart 4にて行った。各RCサーボモータの目標角は目標の値を入力するかスライダーにて設定する。またHeart To Heart 4の教示機能「Smart Teach」を用いることで手動にて肩義手を動かし、その時のRCサーボモータの位置情報を目標角として取り込むことができる。

6.2. 教示機能

RCサーボモータの回転軸を直接手で回し目標角を設定する機能である。目標角を決めたいRCサーボモータを選択する。そのRCサーボモータは姿勢が勝手に変わらない程度の保持力を残し回転軸を手で回すと回るようになる。このときRCサーボモータは現在の位置情報をソフト側に送る。この位置を元に各RCサーボモータの目標角を決めることができる。図6.1がHeart To

Heart 4のポジション(目標角)設定画面である。 $\theta_1 \sim \theta_6$ までのRCサーボモータの目標角が表示されている。スライダーでの目標角の編集も可能であるが、肩義手は6自由度あるため、一度に複数のRCサーボモータの目標角を決定できる教示機能「Smart Teach」を用いた。図6.1で目標角を設定するRCサーボモータには色が着いている。 $(\theta_4$ と $\theta_5)$ そして「TEACH」ボタン(教示ボタン)をクリックすることで選択したRCサーボモータの回転軸がフリーになり手動で動かすことが可能になる。そして、この状態で選択したRCサーボモータを図6.2の様に手動にて動かし任意の場所で固定する。その後「TEACH」ボタン(教示ボタン)をもう一度クリックすることで、この時のRCサーボモータの位置を目標角として決定することができる。

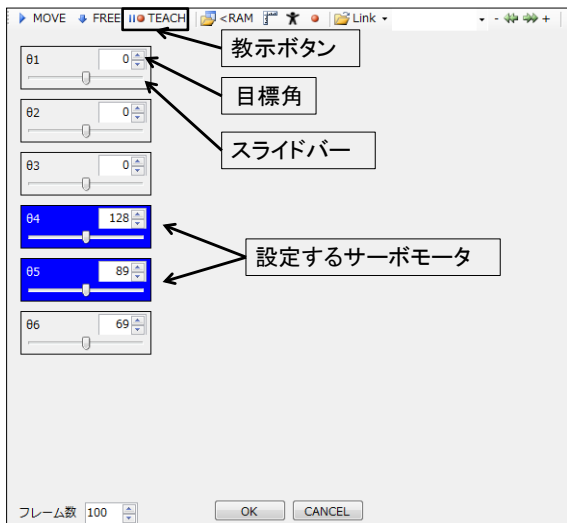


図6.1 Heart To Heart 4ポジション設定画面



図6.2 教示の様子

6.3. モーションの作成

義手を装着しても実現が難しい動作パターンが多いのは、更衣動作、入浴動作などである。また、他人の助けを要せず、自力で行うことのできる動作パターンが多いのは洗面動作、食事動作、机上動作などである。協調動作制御で、最も適当なテスト用動作パターンは、食事動作であると判断した。食事動作について、ADL表(日常生活動作評価表)からフォークでものを刺して食べる動作を例にとり説明する。図6.3がHeart To Heart 4のモーション編集画面でありフォークでものを刺して食べる動作を再現したものである。Pos0~Pos4にはそれぞれRCサーボモータの目標角を示すポジションデータが入っており再生ボタンをクリックすると左から順に再生される。またPos0~Pos4をそれぞれダブルクリックすることで各RCサーボモータの目標角を編集することができる。今回は先に説明した教示機能を用いてPos0~Pos4を作成した。作成した各RCサーボモータの目標角を表6.1に示しており、RCサーボモータの回転方向は第4章の図4.2を肩義手を正面から見た図として考え、矢印の方向を正の方向としている。手の開閉は閉じる方向を正としている。肩義手を正面から見た時のモーション再生の様子を図6.4に示している。表6.1、図6.4それぞれの①~④はPos1~Pos4に対応しており、Pos0は全てのRCサーボモータの目標角を 0° としているため省略してある。

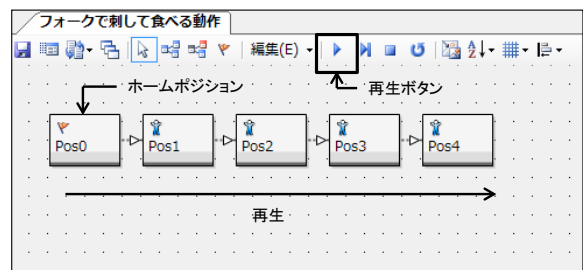


図6.3 Heart To Heart 4モーション編集画面

	上腕水平回転角	上腕拳上角	上腕回旋角	肘屈曲角	前腕回旋角	手の開閉角
	θ_1 (度)	θ_2 (度)	θ_3 (度)	θ_4 (度)	θ_5 (度)	θ_6 (度)
①	0	0	0	0	0	69
②	0	0	0	128	89	69
③	0	0	27	91	96	69
④	0	64	68	128	-81	69

表6.1 各RCサーボモータの目標角

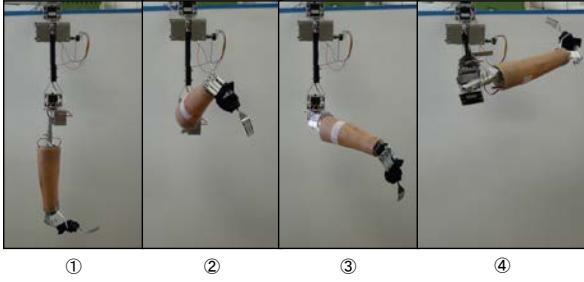


図6.4 フォークでものを刺して食べる動作の再生の様子

6.4. 動作実験

製作した肩義手を、より実際の使用に近い形で評価するために、上腕拳上角(θ_2)に取り付けてある回転式ポテンシオメータとデータロガーGL900を用いて作成した協調動作(フォークでものを刺して食べる動作)の上腕拳上角(θ_2)位置情報に対応するポテンシオメータの電圧波形を測定した。図6.5が実際に測定した波形である。Pos4で2秒停止した後、全てのRCサーボモータの目標角が 0° に戻る様にしており、この波形では2回動作させている。また、 θ_2 が動くのはPos3からPos4に移る時であり、この波形より実際に測定した角度を第5章の①式より求めると 67.32° となり目標角 64° との誤差率は5.19%である。そして、測定波形より手先が振動していないことが分かる。今回は実際にフォークでものを刺していないため、今後より実際の食事動作に近い形で測定を行う予定である。また、各種動作パターンや負荷を変えてのデータを測定し、問題点がないか検討する予定である。

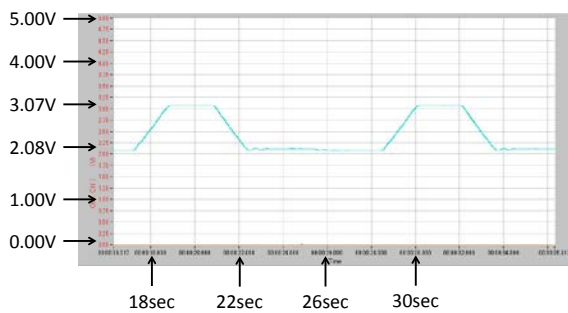


図6.5 フォークでものを刺して食べる協調動作パターンの電圧波形

7. センサ制御

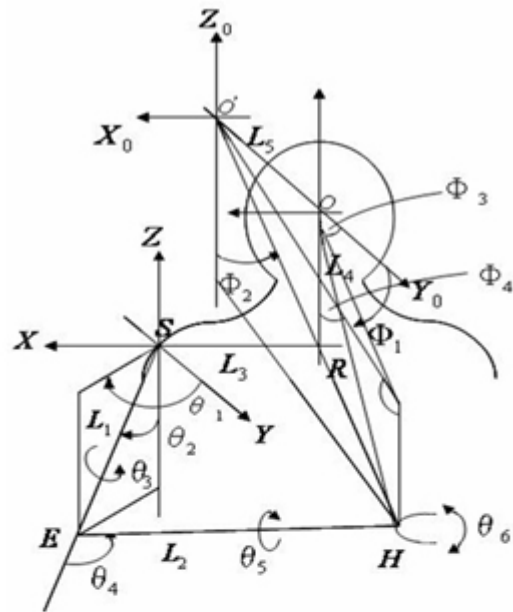
7.1. ミキシング機能

ミキシングとはHeart To Heart 4のポテンシオメータなどのアナログセンサでRCサーボモータを制御す

る機能である。コントロールボードRCB-4HVのADポートには最大で10個のアナログセンサを接続することができる。ミキシング機能を用いることで肩義手の顔面方位制御システムを実現できる可能性がある。

7.2. 顔面方位制御システム

顔面方位制御システムとは、人間が手を動かす時には一般的に目は手先の目標を見ているという点に注目して、顔の方向を視線の方向と近似し、手先をその直線上に拘束するものである。図7.1に示す L_1 (上腕の長さ)、 L_2 (前腕の長さ)、 L_3 (肩から頭の中心線までの長さ)、 L_4 (L_3 の端から目までの長さ)、 L_5 (目から仮想の目までの長さ



- : 実際の目の位置
- ' : 目の仮想位置
- S : 肩関節の中心
- E : 肘関節の中心
- L_1 : 上腕の長さ
- L_2 : 前腕の長さ
- L_3 : 肩から頭の中心線までの長さ
- L_4 : L_3 の端から目までの長さ
- L_5 : 目から仮想の目までの長さ
- ⊙1 : 上腕水平回転角
- ⊙2 : 上腕拳上角
- ⊙3 : 上腕回旋角
- ⊙4 : 肘屈曲角
- ⊙5 : 前腕回旋角
- ⊙6 : 手の開閉角

図7.1 上肢系の数学的モデル

の長さ)を決定する。次に $\Phi 3$ (頭部の方位角は、頭部の水平回転角と同じ意味で使用する)、 $\Phi 4$ (頭部の仰角は、頭部の垂直回転角と同じ意味で使用する)を求めるため、頭にセンサーを装着する。さらに両肩の上下前後の動作で $\theta 3 \sim \theta 6$ は装着者の意志で動かせるように設計する。具体的には、右肩の上下の位置情報($\sigma 1$)で $\theta 3$ 、右肩の前後の位置情報($\sigma 2$)で $\theta 4$ 、左肩の上下の位置情報($\sigma 4$)で $\theta 6$ 、左肩の前後の位置情報($\sigma 3$)で $\theta 5$ を動かすことができる。それらの値からニュートン・ラプソン法を用いて、視線の方向に手先を拘束するように $\theta 1$ 、 $\theta 2$ を関係式から近似し、その値に従って肩義手が動くシステムである。

7.3. 基礎実験

7.3.1. 実験方法

図7.2に示す様に、RCB-4HVのA/Dポートに $\theta 2$ を制御するアナログセンサとして直線式ポテンシオメータを接続する。そして直線式ポテンシオメータを動かし、直線式ポテンシオメータからの入力電圧と $\theta 2$ に取り付けた 340° で5Vを出力する回転式ポテンシオメータからの出力電圧の変化をデータロガーGL900を用いて測定する。

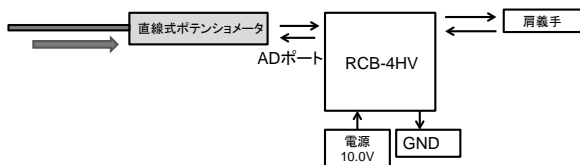


図7.2 センサ制御基礎実験の構成図

7.3.2. 結果・考察

図7.3に測定した入力電圧と出力電圧の電圧波形を示す。入力電圧と出力電圧が同じタイミングで変化していることがわかる。つまりアナログセンサを用いた肩義手のリアルタイム制御が可能であることがわかる。

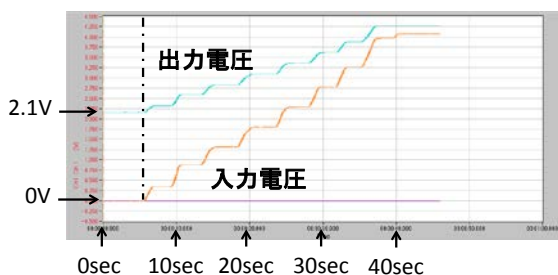


図7.3 入力電圧と出力電圧

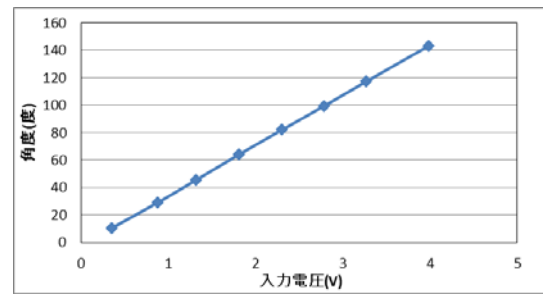


図7.4 入力電圧と $\theta 2$ 角度の関係

また、図7.4よりアナログセンサからの入力電圧に対して $\theta 2$ の角度が一定の割合で増えていることがわかる。顔面方位制御を実現するためには両肩の4自由度、頭部の2自由度の動きを測定するため、最低でも6個のアナログセンサが必要である。今後は複数個のアナログセンサをRCB-4HVに接続し基礎実験を行い、顔面方位制御を実現する。

8. まとめ

8.1. おわりに

重量に関しては2009年製の肩義手に比べて1604gと約150g増えた結果となった。一つ38gのスラストベアリングを取り付けたこと、上腕拳上部に関して従来のアルミニウム製チャンネルと同じ寸法のドライカーボン製チャンネルを使用しなかったこと、強度的問題がある場所に関して1.2mm厚から1.5mm厚のアルミニウム板に変更したことで重量が増えたと考えられる。強度に関しては動かした回数と、出た不具合を記録する様になっている。製作した6自由度柔軟関節肩義手の動作実験では工作精度が上がったことにより立上り、立下り整定時間($\pm 2\%$)共に1.6秒以内に収めることができた。また教示機能を用いてフォークでものを刺して食べる動作を再現し、最も負荷の掛かる上腕拳上部($\theta 2$)において目標角と実際の動作角との誤差率を約5%にすることができ、実用化に近づいた。アナログセンサを用いて肩義手のリアルタイム制御が可能であることを確認した。

8.2. 今後の課題

今回製作した肩義手には、装飾用グローブが着いておらず改良して取り付ける必要がある。もし装飾用グローブを取り付けることができれば、肩義手はペットボトルやフォークをマジックテープなどのサポート無しで持つことができる可能性がある。それでも把持できなければ、手先のRCサーボモータも高トルクで軽量なものに交換することを検討する。

上腕水平回転角RCサーボモータのフリーホーン部と上腕挙上部のアルミニウム板を繋ぐネジが緩み易い。実験中は毎回締め直していたが、実際に使用するとなると問題となる。そこでネジロック剤の使用や、スラストベアリングの種類の変更及び取り付け方法などを検討する必要がある。顔面方位制御の実現に向けてアナログセンサの個数を増やす必要がある。

9. 謝辞

共和工業、佐藤技研、緑測器、近藤科学、ZMP社の各株式会社には研究に協力していただき深く感謝しています。研究に協力してくれた木下研究室の竹内博希君、林直人君、前田悠哉君に感謝します。

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) 木下敏治，高橋慎弥，久本将貴，西山 功一：“高トルク・軽量の RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の開発”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 35 号 p.45-52(2007)
- 3) 木下敏治，西原大樹，久本将貴，三好敦士：“6 自由度肩義手の協調動作制御システム用モーション作成の研究”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要第 37 号 p.69-85(2009)
- 4) 木下敏治，平田一真，篠原稜，坂井剛士：“RCB-4HV による新しい 6 自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム 1.6kg)の開発”，香川高等専門学校研究紀要第 4 号 p.121-134(2013)
- 5) 木下敏治，平田一真，坂井剛士，篠原稜：“高トルクな 6 自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム)の改良”，香川高等専門学校研究紀要第 4 号 p.109-120(2013)
- 6) 木下敏治，山口彰大：“高トルクなシリアル RC サーボモータを用いた 6 自由度自由肩義手の協調動作制御システム”，香川高等専門学校研究紀要,第 1 号,p.131 -138 (2010)
- 7) 木下敏治，川井由宇，山口彰大，香川悠，久本将貴：“肩の 2 自由度に柔軟関節を用いた 6 自由度柔軟関節肩義手のモーションプロセッサ 2HV を使用した顔面方位制御システムの開発”，香川高等専門学校研究紀要第 1 号 p.113-130(2010)