

高トルクなシリアル RC サーボモータを用いた 6 自由度柔軟関節肩義手の協調動作制御システム

木下 敏治* 山口 彰大**

Coordinated Motion Control System for Flexible joint type Shoulder Disarticulation Prosthesis (SDP) with 6 degrees of freedom using high torque serial RC servo motor

Toshiharu KINOSHITA , Syouta YAMAGUCHI

Abstract

Flexible joint type SDP can not control exactly using advanced control for robot systems. θ_1 and θ_2 have special structure which cancel undesired vibration. In this paper we propose coordinated motion control system (KONDOU KAGAKU, MP2) for SDP with 6 degrees of freedom using high torque serial RC servo motor. The fundamental coordinated control system can move like human arm using slide bar control software. The SDP (2009) is used RC servo motor, 2 potentiometers and SATOGIKEN COLTD Cosmetic Gloves. Unit step response of this SDP is the output signal of GL900 (GRAPHTEC, sampling time 10 μ sec). Undesired vibration can stop using special structure.

Key Words: Flexible joint, SDP, Unit step response, Robot, Motion processor2

1. まえがき

本研究は現在の制御理論(有本卓、新版ロボットの力学と制御、朝倉書店、p96-99、(2002))では安定な制御が非常に難しいとされている柔軟関節構造を肩の部分に持つ 6 自由度肩義手である。エネルギー吸収ボックスと名付けたアルミニウムで出来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により一平面内での振動モードは存在できるがそれ以外の振動モードはエネルギー吸収ボックスのゆがみにより熱エネルギーとして刻々と放出されるように設計してある。以上の工夫により、2007 年に上腕水平回転角 θ_1 ・上腕挙上角 θ_2 の 2 自由度にエネルギー吸収ボックスを用いることにより、非常に安定し

*香川高等専門学校詫間キャンパス 電子システム工学科

**香川高等専門学校詫間キャンパス 電子通信システム工学専攻

た動作を本体重量 1024g で実現した。研究紀要にこのアイデアを追実験して貰うためあらゆるデータを公開し、研究成果を積み上げることにより本方式が肩義手だけでなくあらゆるロボットに適用できることを示した。図 1 に 2007 年度卒研生の作成した 6 自由度肩義手を示す。図 2 にモーションプロセッサ 2HV(24g)の写真を示す。RCB-1 の代わりにモーションプロセッサ 2HV、KRS-6003HV(100g、トルク 67kg \cdot cm、11V)及び小型軽量のポテンシオメータを用いた 2 自由度センサーを用いて顔面方位制御システムを実用化する。図 3 に手先部に使用予定の佐藤技研の装飾用グローブとソケットの外観を示す。

柔軟関節肩義手の制御という今までにない方式を音響工学の最新理論(B&W、FST¹⁰¹¹) (フィクスト、サスペンション、トランジェューサー) コーンからエッジは伝わる屈曲波を熱エネルギーに変換する)を用いて肩義手の実用化に近づく 1 つの方法を見つけ出

すことが出来た。



図 1. 2007 年度の肩義手の写真

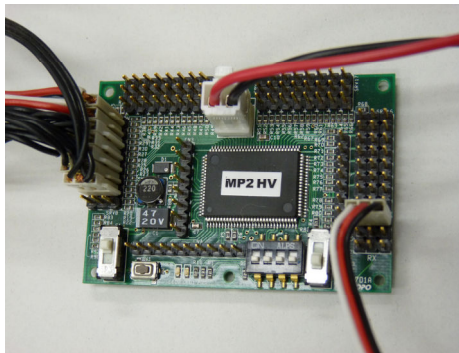


図 2. モーションプロセッサ 2HV



図 3. 手先部に使用予定の佐藤技研の装飾用グローブとソケット

今年度は 100g で 67 kg・cm のトルクを持つ KRS-6003HV という近藤科学の RC サーボモータ (2009 年に発売) を用いて実用型の肩義手を試作した。BMI (ブレイン・マシン・インターフェース) (横井著、サイボーグ (BM I/BMC) 日本ロボット学会誌 vol.26 No.7 p.14- p.15 (2008)) を用いた脳信号の正確な読み取りとともに、それを正確な動きにつなげ

ることを目標に脳波と近赤外線で血流を測ることにより義手を制御しようとする研究が始まっているが上記ロボット学会誌によると実用化は 2040 年と予想されている。また、米国では手足が不自由な脊髄損傷の患者の脳に手術で電極を埋め込み、検出信号で義手やコンピュータを動かす臨床試験が行われている。この方法は、手術による感染のおそれがある。木下研究室では安全性を考慮し、独自の顔面方位制御方式を提案している。肩離断患者には上肢がなく、上肢系のうち肩、頭及び両目のみが残っているが、患者の意識の中には切断前の幻肢が存在していることが知られている。連続位置制御が可能な信号として頭と肩の動きを採用した。この信号はまた、運動の滑らかさを習得する学習過程に決定的役割を果たす固有受容の条件をも満たしている。本研究の目的は、人間の意志と直結した頭と肩の運動を、義手制御用の情報として利用し、それらを用いて 6 自由度肩義手の顔面方位制御システムを実用化することである。本方式を産業用ロボットへ応用すればエネルギー問題の画期的な解決法となる。

本研究の目的は、使用者が簡単に制御でき、人間の動作に近い肩義手の開発である。本研究では、図 1 に示す 2009 年まで耐久テスト (約 3 年間) を行ってきた肩義手¹²⁾を参考に、新しい肩義手を製作した。

2. 研究の概要

まず、義手は 6 自由度のシンプルな構造で、腕の部分は軽量なアルミを用いた。駆動部は従来のモーターに比べ、軽量で高トルクな RC サーボモータを用いて軽量化を図った。義手の制御方法は、義手の制御に適した機能をもつ制御基板として、現在市販されている近藤科学製の RCB-1、RCB-4 HV、及びモーションプロセッサ 2HV を用いた。この制御基板をパソコンに接続し、7 個のモーターを同時に操作して日常生活における簡単な動作を再現した。

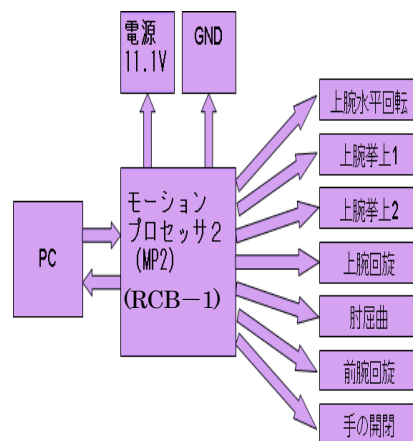


図 4. PWM 制御方式を用いたシステム構造図

本研究では、これまでに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、鉛筆を握る、電話に出る等の机上動作、顔を洗う、歯を磨く等の洗面動作、手を洗う、髪をとく等の衛生動作を実現することを目的として肩義手を試作した。2007年度の試作機はより軽量で高トルクになった RC サーボモータ KRS-4014HVICS(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、トルクをあまり要求されない前腕回旋と手の開閉部分には KRS-4024HVICS (電源電圧 10.8V、トルク 10.5kg・cm、重量 48.5g) を用いる。図 1 に肩義手の写真を示す。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 RCB-1 及びモーションプロセッサ 2HV をパソコンに接続し、7 個のモーターを同時に制御する。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 時より夕方 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(上腕回旋部のアルミ板が約 3° 曲がっていた)少ししか生じず、正常な動作を翌日実現できた。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。図 1 と図 4 は肩義手の写真とシステム構成図を示す。詳しい内容については参考文献で説明している。

項目	算出式	公差 [cm]
手 長	$0.11 \times \text{身長}$	± 1
前 腕 長	$0.15 \times \text{身長}$	± 1.5
上 腕 長	$(0.19 \times \text{身長}) - \alpha$	± 1.5
参考 全 長	$(0.45 \times \text{身長}) - \alpha$	—
参考 中指先高	$0.37 \times \text{身長}$	—

図 5. 肩義手の長さを決める計算式

図 5 の算出式は医用精密工学より引用した。20 歳から 24 歳の日本人の男性平均身長は統計資料に寄ると 173cm である。173 cm の男性の上腕長及び前腕長は上腕長 = 25.95 cm、前腕長 = 19.03cm である。この長さを目標に新しい高トルクなシリアルサーボ RC サーボモータを用いて肩義手を製作した。

3. 肩義手の協調動作制御システム構成の改良 (MP2、RCB-4HV)

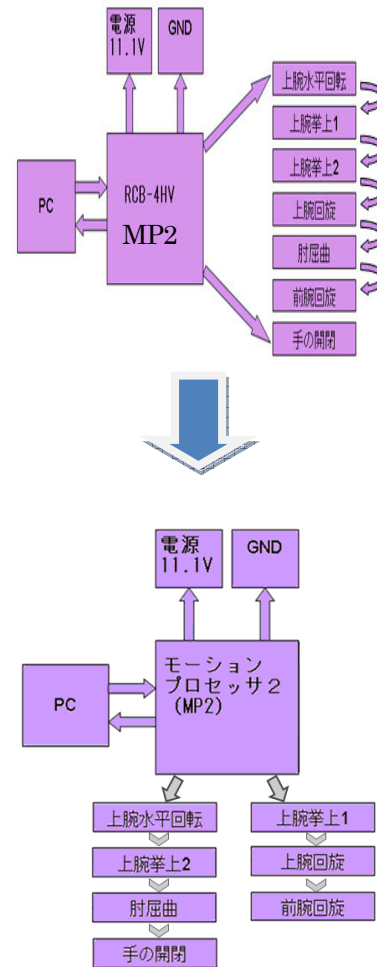


図 6. シリアル制御方式を用いた MP2HV のシステム構成

システム制御方式の構成図は、パソコン、電源、近藤科学のロボットコントロールボード MP2 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ロボットコントロールボードを PC に接続し、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。

これまでにボール投げのモーション、及び文字を書く動作を実現出来た。マジックでホワイトボードに正の字を書くことも出来た。1 個の RC サーボモータを用いて 5 本指を制御できるようにした。

2009 年度には MP2HV で簡単な日常動作を再現することに成功した。2008 年度に製作した肩義手でスプリクトプログラムを開発した共同研究者は卒研生の香川くんです。今回作ってくれたプログラムは、「皿の上にある食べ物をフォークで突き刺してたべる」です。

RCB-4HV(シリアル通信 Ver1.3 に対応)は通信速度がMP2(シリアル通信 Ver1.2 に対応)の 10 倍程度になり、高性能である。しかし、完全に使用方法を理解できておらず、最新版なので近藤科学の他の使用方法用のマニュアルができていなかったため今まで使っていた MP2 で確実に動作するやり方を選択した。ただ、これまでと違い、シリアルサーボモータを肩義手に使用したので数珠つなぎという方法を利用した。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であろう。

図 6 上の方法も同時に数珠つなぎで使用しようとしていたケーブルの接続方法であるが、図 6 下のようポートを 2 個使用するのであれば一つのポートに、ID1,2,3,4 と、もう片方のポートに ID1,2,3 と $\theta 1$ から順に設定していく方がより効率の良い通信方式である。協調動作させるには良い構造であるので、なめらかに動作するには下の構成が推奨される。 $\theta 1$ と $\theta 2$ にポテンシオメータを取り付ける。図 7 に緑測器の回転式ポテンシオメータを示す。

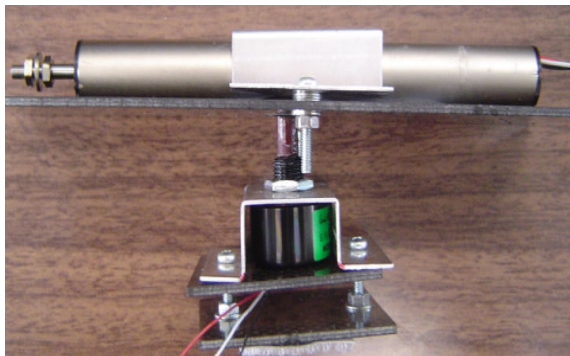


図 7. 回転式ポテンシオメータ CP-2FB(b)を用いた肩の 2 自由度位置検出センサー
(図 7 の下部に CP-2FB(b)が使用されている)

◎特徴

- ・直径 22mm の小型、軽量
- ・軸受ボールベアリング ・寿命 1000 万回転以上
- ・全抵抗値 1k Ω ・重量 約 20g

入力電源とグラウンド間に 5V の電圧を加え、先の軸受ボールベアリングが回転することで、出力端子から出力電圧を測定することができる。

可動範囲は、 0° から 340° で 0V から 5V まで直線的に変化する。

4. KRS-6003HV 及び KRS-2552HV を使った肩義手の製作



図 8. 2009 年度製作した肩義手



図 9. 高トルクシリアル RC サーボモータ 6003HV



図 10. 小型軽量のシリアル RC サーボモータ 2552HV

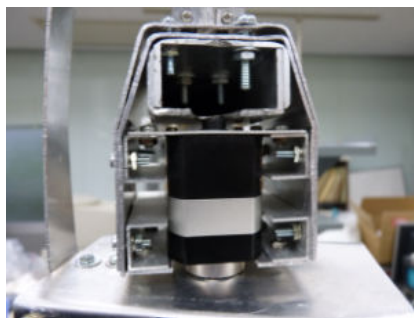


図 11. 上腕水平回転角($\theta 1$)

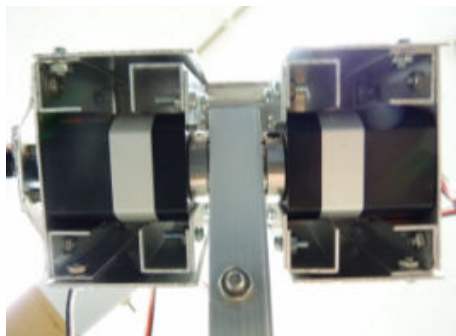


図 12. 上腕挙上角($\theta 2$)

図 11 に上腕水平回転角($\theta 1$)、図 12 に上腕挙上角($\theta 2$)を示す。

図 11～図 16 に各自由度の拡大写真を示す。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乗るように工作を工夫した。

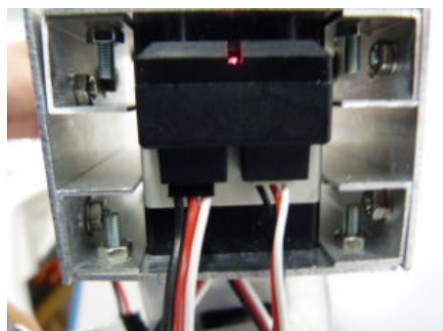


図 13. 下から上腕回旋角($\theta 3$)を見た図

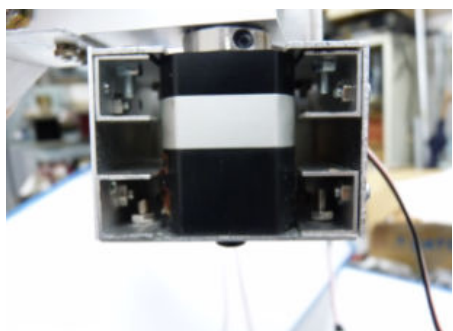


図 14. 下から肘屈曲角($\theta 4$)を見た図

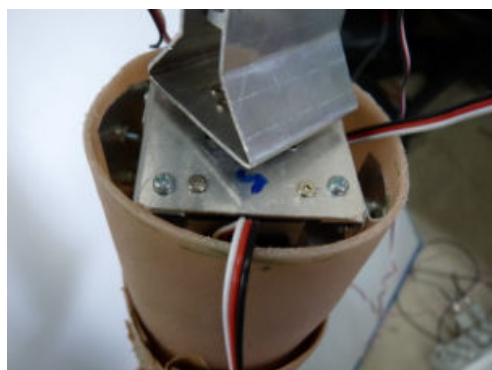


図 15. 前腕回旋角($\theta 5$)とソケットの取り付け方



図 16. 佐藤技研のグローブを取り付けた手先の開閉角($\theta 6$)

前腕部には装飾用肩義手で世界的に有名な佐藤技研のグローブとソケットを用いた。モータが大きすぎたためグローブの一部を仕方なくカットして取り付けた。 $\theta 5$ の前腕回旋には KRS-6003HV のシリアル RC サーボモータを使い、 $\theta 6$ の手先の開閉には KRS-2552HV のシリアル RC サーボモータを使用し、ソケットに固定するやり方で試作を終えた。

肩の 2 自由度は 3 年間の耐久テストをクリアしてきた久本君のチームと同様の構造である。ハイパワーのトルクを持つシリアル RC サーボモータを肩から前腕まで 6 個使用している。全体に使用している軽量のアルミ板はこれまで 0.8 ミリのものを使用していたが、高トルクに耐えるために厚さを 1.2 ミリに強化した。

シリアルサーボ制御方式(RC サーボモータの位置可動範囲は 0 から 270° である。AD 変換器の精度が 13 ビットに改良されたため 2^{13} 通り約 8000 に分割できる)を用いているため柔軟関節構造を肩の部分に持つ 6 自由度肩義手は、滑らかな動作が可能である。また、装飾用グローブの手先も指紋が繊細に作られているので摩擦が大きく、物を掴む際に適した構造である。

5. 取り付けられた回転式ポテンシオメータとステップ
応答

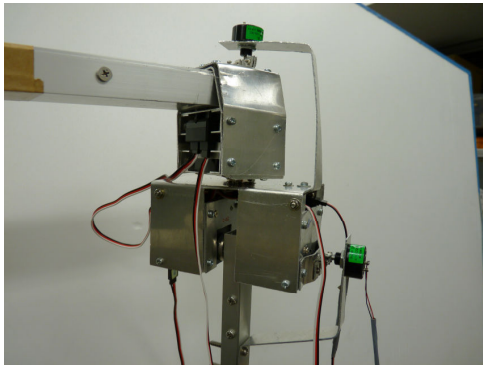


図 17. $\theta 1, \theta 2$ にポテンシオメータを取り付けた
写真、及び配線の様子

MP2 を用いてコンピュータの画面上のスライド
バー¹³⁾で各自由度のモーターの動きを目視で確認し
た。普通の人間が早く上腕を動かす動作が再現可能
であることを確認した。手先の振動はいろんな動作
に対して発生しなかった。

今の段階では、 $\theta 2$ の上腕挙上という最大な負荷
がかかり、目標値と最も誤差の出る自由度を
GRAPHTEC の mini LOADER GL900 を使い
サンプリングタイム $10 \mu \text{sec}$ で計測した。下図に示
した写真が GL900 である。



図 18. GRAPHTEC の mini LOADER GL900

GL900 は 8CH 同時に高速でデータを記録可能な
ミニデータロガーである。

最大 $10 \mu \text{sec}$ で読み込み可能という精度である。
サンプリングタイムは $10 \mu \text{sec}$ で実験した。

コンピュータ画面上のスライドバーで肘の屈
曲角 $\theta 4 = 60^\circ$ とし、他の自由度は 0° とする。

上腕挙上角 $\theta 2$ を 100.1° にスライドバーで指定し
ステップ応答が測定できるスイッチをクリックする。
停止状態を約 15 秒間保ち、その後、元のホームポ
ジションへスライドバーの目標値を $\theta 2 = 0^\circ$ とし
てステップ応答を測定するためのモーション設定方

法を考えた。図 19 に測定結果を示す。

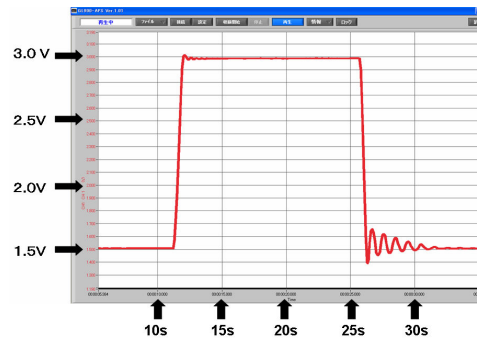


図 19. 上腕挙上角を 0 から 100.1° まで上げ下げ
する動作

立ち上がりと立ち下がり直後の出力波形に予想
される興味深いデータを測定できたので次に振幅を
拡大した図を記載した。

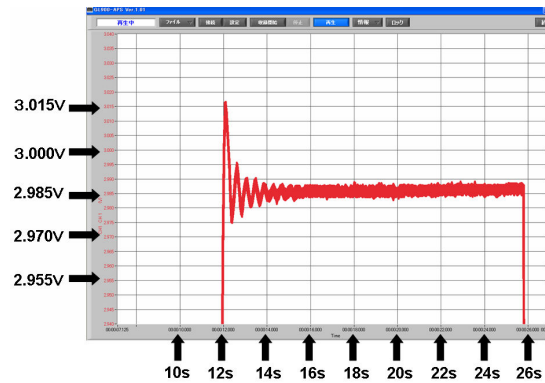


図 20. 立ち上がり特性

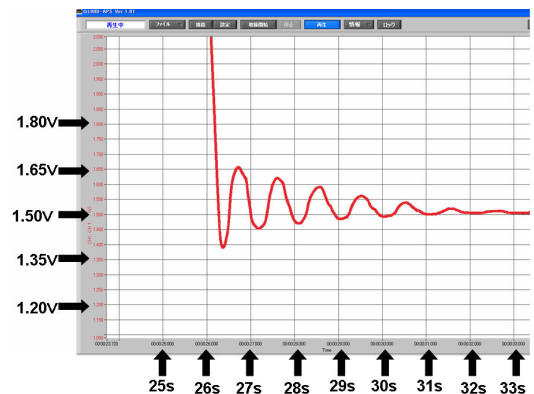


図 21. 立ち下がり特性

図 20 と図 21 が立ち上がりと立ち下がりに分けて
表示したステップ応答の拡大図である。

立ち上がりは、肩義手を設定した位置まで動作した
直後を正確に捕えており、オーバーシュートやアン
ダーシュートを含む振動が時間の変化で波形の振幅

が小さくなっている。RC サーボモータ 6003HV に使用されている AD コンバーターは 13 ビットであり、 $2^{13}=8192$ の精度である。 $\pm 135^\circ$ に対応しているので 0° から 135° は $8192/2=4096$ に対応している。今、デジタルコードで 3037 を目標値とすると $4096:135=3037:x$ 、 $135 \times 3037=4096x$ 、 $x=409995/4096=100.096^\circ$ となる。 0° がポテンシオメータの 1.507V に対応しており、応答波形は 2.986V で停止している。計算上の目標電圧は $340^\circ : 5.028(\text{電源電圧})=100.096^\circ \cdot x$ 、 $x=5.028 \times 100.096/340=1.480\text{V}$ 。 $\theta 2=0^\circ$ に対応するポテンシオメータの値は 1.507V なので 100.096V に対応する電圧は次の計算でもとまる。 $1.507+1.480=2.987\text{V}$ となる。測定値は 2.986V であり誤差は 0.001V となり、定常偏差は 0 と考えてよい。図 19 のステップ応答波形の振幅が 0.1~0.9 になる立ち上がり時間 T_r は 0.52sec、0.9~0.1 になる立ち下がり時間 T_f は 0.36sec である。

整定時間 T_s は単位ステップに対する応答が定められた許容範囲内に達し、それ以後はその範囲に留まる時間である。許容範囲としては、最終値の $\pm 2\%$ 、または $\pm 5\%$ が用いられることが多い。本実験では立ち上がりでは $\pm 5\%$ に対し、 $T_s=0\text{sec}$ 、 $\pm 2\%$ に対し、2.28sec である。また、立ち下がりに対し、 $\pm 5\%$ に対しては $T_s=2.78\text{sec}$ となり、 $\pm 2\%$ に対し 4.43sec となった。肩義手の制御方式として顔面方位制御方式を使用する予定なので、肩の中立位置に対応した肘の屈曲角 $\theta 4=60^\circ$ と仮定してステップ応答の特性を求めた。立ち下がりでは肘より先の重力による影響が大きく $\theta 2=0^\circ$ となったときに $\theta 4$ に大きな力が作用するため、 $\theta 4=60^\circ$ に保つための過渡現象が生じている為、その影響が $\theta 2$ に及び制時間が長くなっているが目標値に振動しない状態で静止していることがデータよりわかる。以上の実験結果より振動を止めることはできることが証明された。HOME POSITION へ戻る動作においても振動は減衰して停止した。ポテンシオメータの誤差が 1° あるため電圧に変換すると $\pm 1^\circ$ すなわち、約 0.004V の誤差が生ずるはずである。図 20 の整定時間 T_s に続く停止状態後のデータの変動は約 0.004V なので上記実験の誤差は理解できる。

6. 結び

6.1 結果

今年度課題としていた肩義手を試作できた。

ハイパワートルクのモーターを 6 個使用しているので頑丈な構造になった。

前腕部には、佐藤技研の装飾用グローブとソケットを取り付けることができたが、グローブを切ってしまう、モーター部の構造に改良が必要であることが分かった。

ポテンシオメータを柔軟関節に対応できるように工夫して取り付けることで上腕挙上角のステップ応答を観測できた。

肩義手にポテンシオメータを取り付けることは、今年度が初めてのことで、図 19 や図 20 のような出力波形を見つけることで柔軟関節構造を肩の 2 自由度に持つ構造は振動を止められるということがサンプリングタイム $10\mu\text{sec}$ に対応した 8CH GRAPH TEC の mini LOADER GL900 を用いることにより発見できた。

6.2 今後の課題

- ・上腕挙上角で出力波形が読めたので、すでに取り付けが完成している上腕水平回転角でも出力波形を取り出す作業をする。
- ・今年度作った肩義手はシリアルサーボ制御方式であるので、これまでの PWM 制御方式で作成したプログラムを参考にしながら、シリアルサーボのサブリクトプログラムを完成させる。
- ・PWM 制御方式の顔面方位制御についての基礎実験を卒研生と共同研究をしていたので、その経験を生かしてシリアルサーボ制御方式のシステムを完成させる予定である。

7. 謝辞

本研究にあたって、ご指導していただいた電子システム工学科の全教員ならびにさまざまな面でお世話していただいた学生支援室の方々に深く感謝いたします。また、共和工業、佐藤技研、緑測器、近藤科学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。

8. 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) 舟久保熙康, 医用精密工学-生体への工学的アプローチ-, 丸善株式会社(1983)

- 3) 木下 他,6 自由度肩義手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 他,クランク拮抗方式による形状記憶合金ロボットシステムの研究,詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 34 号, p.47-56(2006)
- 5) 木下 他,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,詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 35 号, p.33-44(2007)
- 6) 木下 他,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)
- 7) 木下 他,ロボットコントロールボード RCB-1 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,詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 36 号, p.37-46(2008)
- 8) 木下 他,RC サーボコントローラ AGB65-RS C 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,詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 36 号, p.47-56(2008)
- 9) 木下 他,肩義手のための RC サーボコントローラ AGB65-RSC を用いた感圧センサーの開発,詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 37 号, p.55-67(2009)
- 10) B&W (Bowers & Wilkins)800 Series カタログ(2009)
- 11) フィクスト・サスペンション・トランスデューサー(略称 FST), B&W (Bowers & Wilkins)683/684 Series カタログ(2009)
- 12) 久本 将貴, 6 自由度肩義手の顔面方位制御システムの開発, 香川高等専門学校詫間キャンパス電子通信システム工学専攻科平成 20 年度専攻科特別研究論文集(2009)
- 13) MP 2 Editor + Motion Generator 取扱説明書(2009)