

エネルギー変換効率の良いMP2を用いた柔軟関節 6自由度肩義手(ロボットアーム 1.024kg)の 協調動作制御システム

木下 敏治* 大西 章弘** 平井 翔***

A coordinated motion control system for energy-saving model flexible joint shoulder-disarticulation prosthesis (SDP, robot arm 1.024kg) with 6degrees of freedom using MP2

Toshiharu KINOSHITA , Akihiro ONISHI , Sho HIRAI

Abstract

In this paper I propose a quite high torque practical robot arm (SDP) using new RC servo motor. By using Motion Processer2 (MP2) control circuit (KONDO KAGAKU Co.), I can provide a simplified total system of a PWM control method. The flexible joint robot arm (SDP) have 6 degrees of freedom ($\theta 1$: shoulder rotation angle, $\theta 2$: shoulder flexion-extension angle, $\theta 3$: humeral rotation angle, $\theta 4$: elbow flexion-extension angle $\theta 5$: wrist rotation angle, $\theta 6$: hand prehension angle) I used robot arm (SDP) movement control program using Script language. (KONDO KAGAKU Co.)

A practical flexible joint robot arm (Flexible joint SDP 1.024Kg) can make by new vibration control theory (Flexible Joint Robot Arm Control Kinoshita Theory was proposed by us and is called “FJRACK Theory”) which is look like FST(Fixed Suspension Transducer) of B&W Co.

A Rise time, A Fall time, Settling time and Steady-state deviation using control engineering is possible to solve it from the GL900's data. As a result, prehension part of flexible joint robot arm (SDP) was able to stop vibration of a hand by principle of conservation of energy.

Keywords : Flexible joint arm, Robot arm, SDP(Shoulder Disarticulation Prosthesis), Motion Processer2 (MP2)

1. まえがき

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。²⁶⁾本研究では、2009年まで耐久テスト(約3年間)を行ってきた肩義手¹⁵⁾¹⁶⁾を使いミニデータロガーGL

900を使用して肩の上腕拳上角 $\theta 2$ のステップ応答特性を測定することにより手先の振動が生じていないかどうかを確認することである。また3年間に及ぶ経年変化や使用時間によるシステム全体の問題点を確認することも目的の一つである。

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が、一方で電動式肩義手は実用化が遅れている。^{1)~9)}

*香川高等専門学校詫間キャンパス

電子システム工学科

**四国電力

***大紀商事

肩義手 (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))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。現在、電動式肩義手は制御方式や重量など基本的な問題点が多く、実用に至るには軽量化が最大の問題である。^{10)~16)}本研究は現在の制御理論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。¹⁷⁾¹⁸⁾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弾性限界内のゆがみとアルミの表面振動エネルギーを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。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^{19)~21)}(B&W、FST(フィクスト・サスペンション・トランデューサー)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。

B&W社のFSTの理論でエネルギー吸収ボックスの弾性変形を一定の範囲の変形にとどめる様にする。箱全体がバネの様に元に戻る構造である。本研究は、エネルギー保存則を用いて肩義手の θ_1 、 θ_2 の余分のエネルギー成分を熱エネルギーに変換して弾性変形範囲を一定値以内にとどめることにより、肩義手の手先が振動しない制御を実現した。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、非常に安定した動作を本体重量1024gで実現した。香川高等専門学校研究紀要第1号¹⁾²⁾ 2号²⁶⁾²⁷⁾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1.1.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MP2HV³⁾、KRS-4014HVICS(65g、トルク40.8kg・cm、10.8V)とKRS-4024(48.5g、トルク10.5kg・cm、10.8V)を用いて高トルクで軽量の6自由度柔軟関節肩義手の制御システムを動作させることが本研究の目的である。また、小型軽量のポテンシオメータを用いて肩の上腕挙上 θ_2 の値が、柔軟関節構造にすることによりどのよ

うな影響を受けているかを、GRAPHTECのGL900を用いてデータ化し、制御工学のステップ応答時の各パラメータの値を測定した。

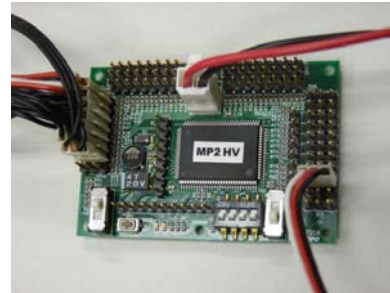


図1.1. モーションプロセッサ2HV

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。

2. 研究概要

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、電話に出る等の机上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RCサーボモータ専用のRCB-1をパソコンに接続し、7個のモータを同時に協調動作制御する。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少し(上腕回旋部のアルミ板が約3°曲がった)しか生じず、正常な動作を翌日実現できた。¹⁵⁾¹⁶⁾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。手長の算出式は $0.11 \times \text{身長}$ で公差 $\pm 1\text{cm}$ 、前腕長の算出式は $0.15 \times \text{身長}$ で公差 $\pm 1.5\text{cm}$ 、上腕長の算出式は $(0.19 \times \text{身長}) - \alpha$ で公差 $\pm 1.5\text{cm}$ である。算出式は医用精密工学⁴⁾より引用したものである。今回の研究はこの肩義手に小型軽量のポテンシオメータを取り付けてGL900でデータを測定する。図1.1.に示すMP2HV³⁾のチップにはルネッサンステクノロジー社のM16シリーズの演算処理回路が搭載されている。AD変換器は6チャンネル5msecで同時にアナログ入力が可能となっている。よって高速な演算、各種関数(三角関数など)の利用が可能となり、顔面方位制御方式¹⁾²⁾²³⁾など各種協調動作制御方式⁴⁾を動作テスト可能である。

3. 使用した柔軟関節6自由度肩義手

3.1. 肩義手の仕様

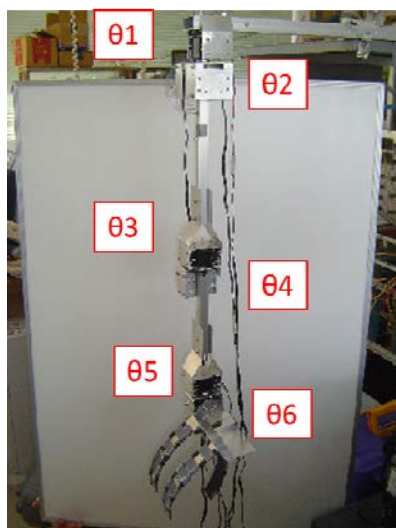


図3.1. 6自由度柔軟関節肩義手の全体図1



図3.2. 6自由度柔軟関節肩義手の全体図2

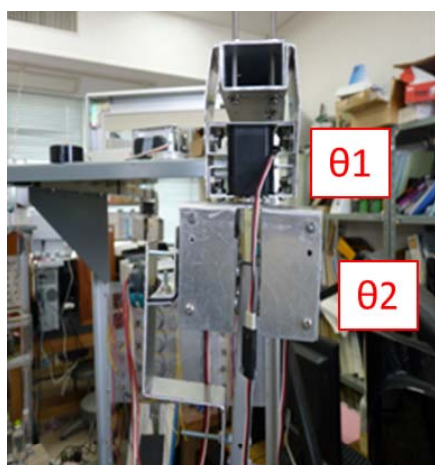


図3.3. 上腕水平回転(θ_1)と上腕挙上(θ_2)



図3.4. 図3.3.の横からの写真

6 自由度(θ_1 上腕水平回転部, θ_2 上腕挙上部, θ_3 上腕回旋部, θ_4 肘屈曲部, θ_5 前腕回旋部, θ_6 手の開閉部)のシンプルな構造で義手の材料には軽量なアルミ板とアルミチャンネルを使用した。アクチュエータは大きなトルクが必要な上腕部には近藤科学のKRS-4014HV (電源電圧10.8V, トルク40.8 kg・cm, 重量65.0g)、それほどトルクの必要のない前腕部にはKRS-4024HV (電源電圧10.8V, トルク10.5kg・cm, 重量48.5g)を使用した。

上腕挙上部にはモータを2 個使用してトルクの増大をはかった。手についてはものをつかみやすくするため大きめに製作し、さらに滑り止めをとりつけた。(滑り止めなしで1024g)その結果、義手の全長は1660[mm]、重量は1124[g]となり、236[g]軽量化することができた。

表 1 肩義手の骨組みの重量とモータの重量

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
モータ重量	260g	モータ重量	162g
骨組み	343.5g	骨組み	358.5g
全体重量		1124g	

図3.3.と図3.4.に上腕水平回転角(01)と上腕挙上角(02)の前からと横からの写真を示す。製作用にエネルギー吸収ボックス周辺の寸法を記入しておいた。図3.5.～図3.10.にその他各自由度の拡大写真を示している。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。アルミチャンネルは図3.2.のような厚さ0.8mmのものを使用している。エネルギー吸収ボックスにアルミチャンネルを使用するのはモータから刻々と熱エネルギーとして放出される熱を肩義手の動きにより生じた空気の流入により冷却するためである。また図3.5.から図3.10.までは各部の様子である。



図3.5. 上腕水平回転(01)

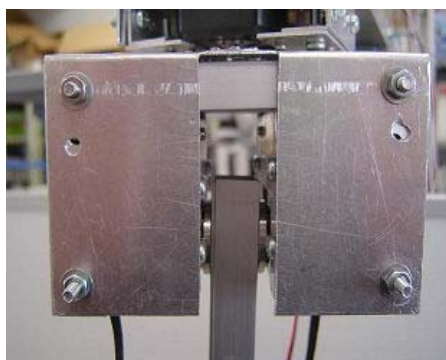


図3.6. 上腕水平回転(02)

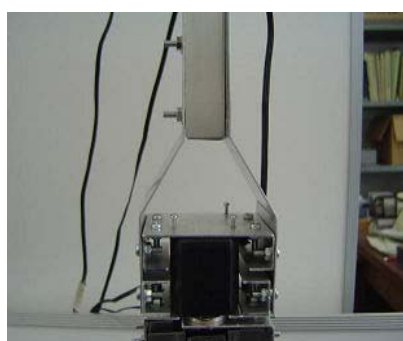


図3.7. 上腕回旋(03)

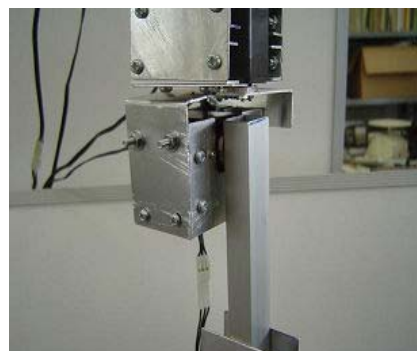


図3.8. 肘屈曲(04)



図3.9. 前腕回旋(05)

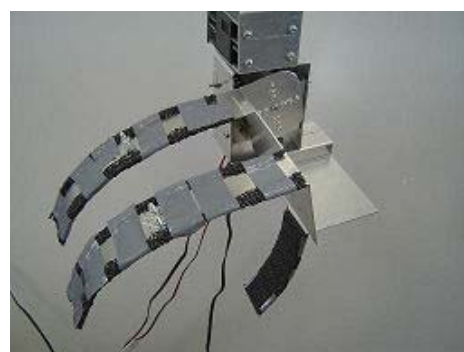


図3.10. 手の開閉(06)



図3.11. KRS-4014HVICS Red Version

電源電圧 10.8V

トルク 10.5kg・cm

最大動作角度 260 度

重量 48.5g



図3.12. KRS-4024HVICS Red Version

電源電圧 10.8V

トルク 40.8kg・cm

最大動作角度 270度

重量 65g

今回使用した肩義手は平成8年度の卒業研究で久本君、西山君、高橋君が共同で開発したものであり3年間の実働テスト及び経年変化による部品の強度をテストしたものである。その後、ボール投げの破壊実験を行い大きな構造上に問題がないことが確認された柔軟関節6自由度肩義手である。しかし測定器がその時点では入手できなかったためステップ応答波形を測定することができていない。今回の研究では、GL900を用いて肩義手の動特性を波形データとして客観的に評価できるように腕の姿勢をいろいろと変化させてデータを収集した。2007年度に身長182cmの久本君の体に合わせた肩義手を開発した。ただ、手の開閉部分に関しては物（ペットボトル）が掴みやすくなるようにと少し大きい構造にしたために全重量が重くなってしまい、肩の上腕拳上部(θ₂)にはかなり負荷がかかっている。

3.1.1. システムの動作原理

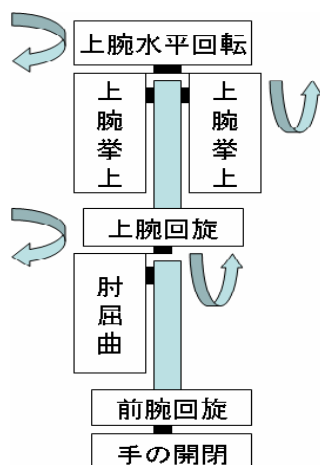


図3.13. 義手の概要図

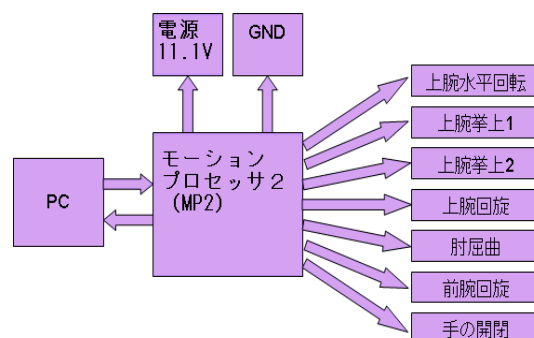


図3.14. システムの構造図

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。今回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3.13.に義手の概要図を示す。システムの構成は図3.14.に示す。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に変形は少ししか生じず、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3.13.と図3.14.の概要図とシステム構造図より作られたものです。

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3.15. 肩義手の長さを決める計算式

上記の算出式は医用精密工学より引用した。図3.1.の肩義手の各部の長さは表1より182cmの人間の上腕長及び前腕長の長さを示している。図3.2.の肩義手は身長173cmの人間の写真であり上腕長は25.95cm、前腕長は19.03cmであり、この長さを考え製作したものである。

本研究では、図3.1.の肩義手を用いて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のステップ応答波形を測定することが目的である。RCサーボモータは比較的新しい図3.2.のモータと図3.1.のモータを入れ替えて実験を行った。その時、アルミの各パーツの劣化の状態を確認しモータの取り付け部で問題点があることが分かった。

以前は、300 g までのペットボトルの水を把持させて実験を行ったが今回は肩義手の構造上の欠点が多くなったので100 g までのステップ応答波形を測定することにした。

システムの構成は、図3.14.に示す。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。モーションプロセッサ2HV(MP2)をパソコンに接続し、7個のモータを同時に制御する。

本研究で使用したRCサーボモータは、入力信号と電源のみで動作する。RCサーボモータは、PWM信号を入力すると自動的にPWM(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)信号のパルス幅に相当する角度に制御でき、さらに特定のパルス幅にPWM信号を入力するとサーボモータの角度の読み取りが可能である。

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、上腕水平回転角 $\theta 1$ ・上腕挙上角 $\theta 2$ 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。

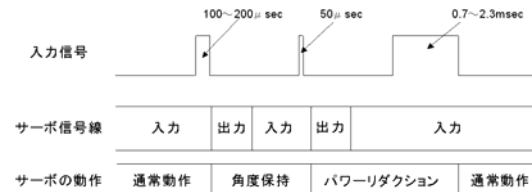


図3.16. 入力信号とサーボモータの関係 (PWM制御の例RCB-1)

3.1.2. RCサーボモータの制御方法

データの測定方法に関しては参考文献²⁶⁾と同じ方法で実験した。

図1.2.に示したようなモーションプロセッサ2HVのコントロールボードで肩義手とパソコンを接続する。今回はMP2Editorという図3.17.のようなスライドバー画面で制御した。

個々のモータを一個ずつ制御でき、13bitに対応した高精度な制御用ソフトである。

マニュアル³⁾によると7500をモータの0°と考えニュートラルとしている。-4000 (-135°) ~ 4000 (+135°) の約8000通りで数値入力するか、スライドバーを2.5°間隔で動かすかの方法がある。例えば、-889とスライドバーを左へ動かすと-30°モータを動かすことができ、+3852へとスライドバーを右へ動かすと+130°動かすことができる。

モータはマウスでスライドバーを動かし終え、左クリックを放した瞬間ステップ応答の開始信号となり、最高スピードで目標値まで到達する。

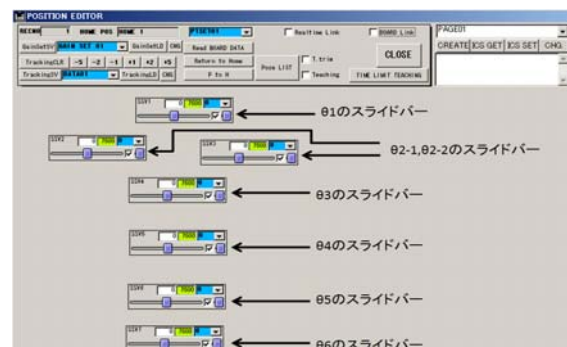


図3.17. 制御用のスライドバー画面

RCサーボモータ内のADコンバータの端の部分の直線性を維持するため分解能は8000通りと単純化されている。

3.1.3. 回転式ポテンシオメータの特性



図3.18. CP-2FB(b)の構造

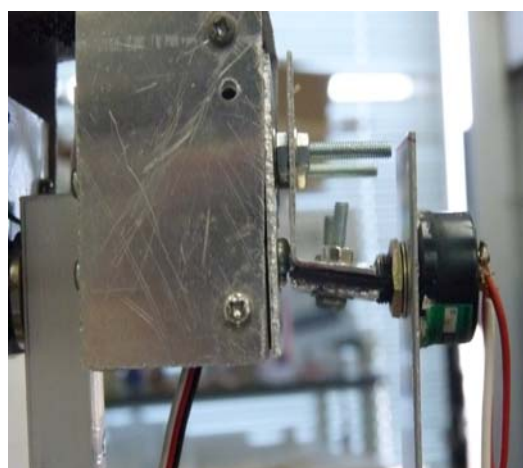


図3.19. CP-2FB(b)圧着の様子

図3.18にある緑測器の回転式ポテンシオメータは、5Vを電圧源としており、回転角が最大の340°になると5Vに達する様に設計されている。分度器を用いて入出力特性を求めた。直線性の良いデータが得られた。図3.19.には圧着の構造を示している。

4. ロボットアームの操作方法

4.1. ロボットアームとMP2 HVの接続方法

MP2EDITORを起動すると下図のようなメニューが開かれる。(パソコンのデスクトップ上にある)

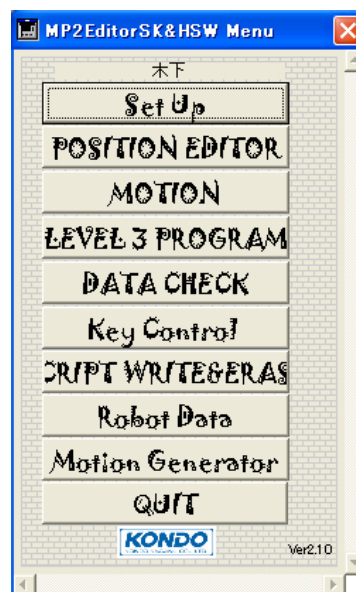


図4.1. MP2EDITORのメインメニュー

図4. 1. のSet Upをクリックすると下図のようなメニューが開かれる。

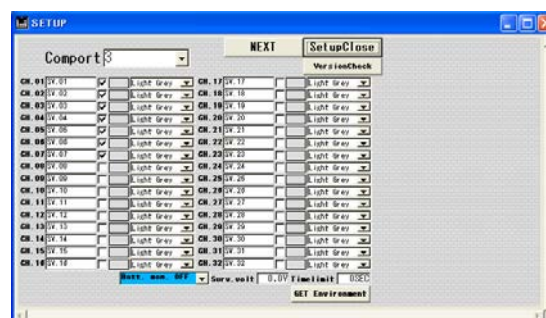


図4.2. SET UP画面（接続ポート選択）

Comportで接続しているポートを選択しNEXTをクリックすると下図のようなメニューに移動する。

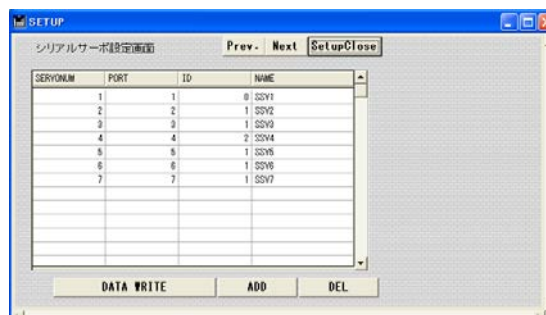


図4.3. SET UP画面（シリアルサーボ設定画面）

この画面でDATA WRITEをクリックするとロボットアームの設定は完了する。

4.2. ロボットアームの動かし方

図4.1.の2番目にあるPOSITION EDITORをクリックすると下図のようなメニューが開かれる。

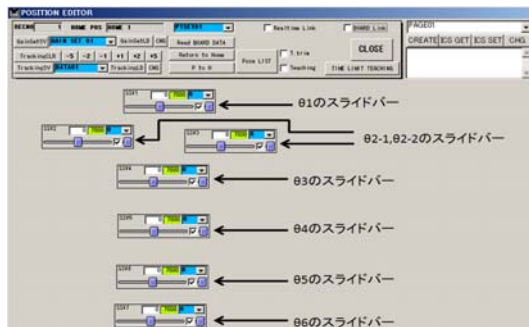


図4.4. 制御用のスライダー画面

上図のスライダーをスライドさせるか白い部分に-4000～4000の数値を入力して動作をさせる事が出来る。

4.3. 協調動作プログラムで動かす方法

図4.1.の4番目のLEVEL 3 PROGRAMをクリックすると下図のようなメニューが開かれる。

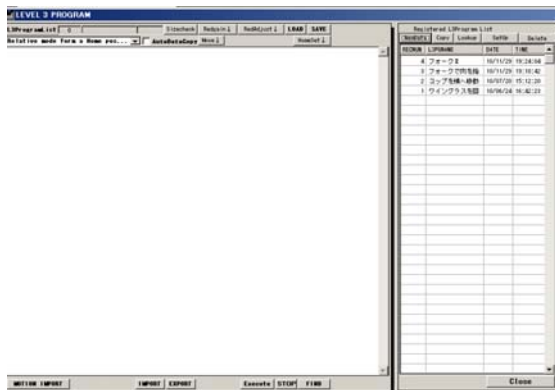


図4.5. LEVEL 3 PROGRAMメニュー画面

右側のフォーク IIなどの動かしたいプログラムをクリックして左側の上部にあるLOADを押すとプログラムが読み込まれてExecuteをクリックするとロボットアームが動作する。

5. 実験方法

5.1. 肩の2自由度に取り付けた回転式ポテンシオメータとステップ応答

回転式のポテンシオメータは図5.1.に示す様に θ_2 （上腕挙上）に取り付けてステップ応答波形を測定することにした。



図5.1. 回転式ポテンシオメータを θ_2 に取り付けた様子



図5.2. GRAPHTEC midi LOOGER GL900

回転式ポテンシオメータはゴム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。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。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 2^{16} 分割できる。

また、ステップ応答の影響で変動波形が観測されている。変動が $\pm 2\%$ 以上の場合は、変動が続く時間は $\pm 2\%$ の整定時間の定義を使うことができる。 $\pm 2\%$ 以内の場合は元の値と新しい値に変化するまでの時間とその時どの程度の変動が起きているのか分かればよい。ポテンシオメータを取り付けているので、図5.2.のGL900の1チャンネル使用し、上腕挙上角の出力信号を1msecごとに入力でき、変動波形としてデータ化する。肩義手は非常に多くのねじを用いて独自に開発した部品を結合したものであるため、位置動作ごとに各関節に加わるトルクが変化するため、ねじ締め力の強さが少しずつ変化し、その結果肩義手の各パーツの重心位置が微妙に変化するため初期位置の変動が起きると予想される。

6. 動作実験

6.1. スライドバーを使用し肩義手のステップ応答波形を求める実験（負荷なし）

6.1.1. 肘屈曲 (θ_4) 90° での上腕挙上運動 ($\theta_2=0\sim120^\circ$)

図6.1～6.3.に示したステップ応答波形は、負荷なしの肩義手をGL900で観測した応答波形である。このデータを取り上げた理由は、立上り時に肩義手が到達位置まで動作した後、ポテンショメータの誤差による振動以外ほぼ振動が起こっていないからである。ロボット工学においてステップ応答波形はオーバーシュートやアンダーシュートを繰り返しながら到達値に安定していくのが普通である。水を持たせていないとき(負荷なし)でも振動はあった。従って、この肩義手においては日常動作で物を持った状態のほうが物を持ち上げるとき安定することがわかった。対して、立下り時には、やはり最高スピードで動作する肩義手は重力の影響を大きく受け、はじめ大きなアンダーシュートの起こる振動波形となった。

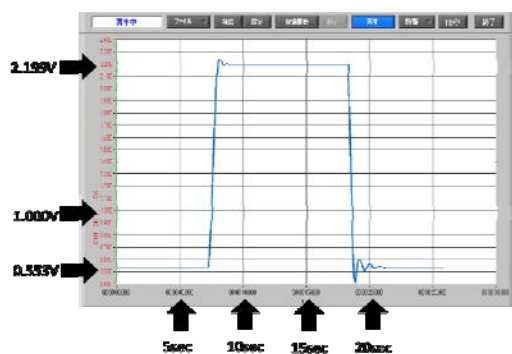


図6.1. 上腕挙上角 $0\sim120^\circ$ のステップ応答

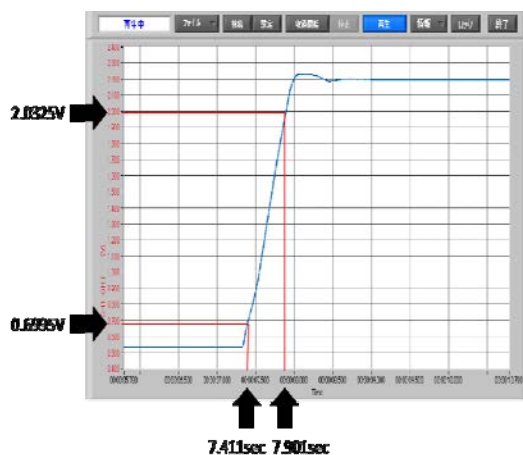


図6.2. 立上り特性の拡大図

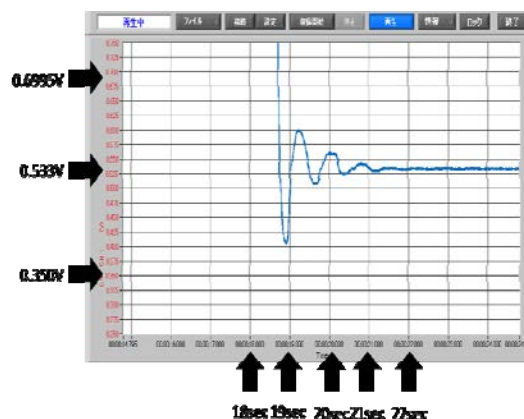


図6.3. 立下り特性の拡大図

以下に上記内容を制御工学の立上り時間、立下り時間、整定時間 ($\pm 5\%$, $\pm 2\%$)、定常偏差を定義に従い測定データをGL900とUSBケーブルでパソコンにデータを取り込み、拡大図をプリントアウトして上記パラメータを正確に測定した。エクセルの測定ポイントが大きくなっているデータは改良後のデータである。それ以外は金属疲労が少ない状態での各パラメータの値である。ページ数に制限があるためすべてのデータを論文に示すことはできないので代表的データをエクセル表示する。

6.2. 立上り時間・立下り時間

ステップ応答で立上る時の0.1～0.9に対する時間を立上り時間といい、立下る時の0.9～0.1に対する時間を立下り時間という。図6.4.にステップ応答波形の一例 ($\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim120^\circ$ 負荷なし)を示す。また、図6.5.に立上り時間を測定するための拡大図を示す。ただし、エクセルでグラフ化した波形の大きな三角印▲は θ_4 改良後のデータである。

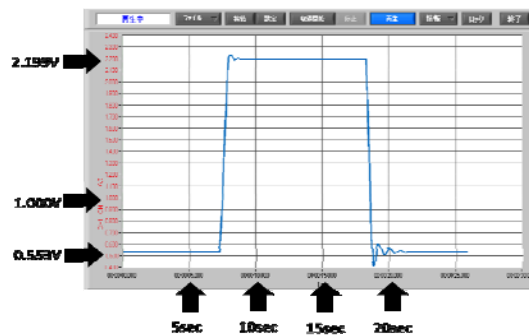


図6.4. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim120^\circ$ 負荷0

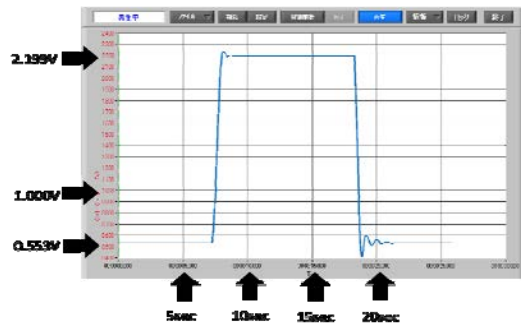


図6.5. 立上り時間0.1~0.9

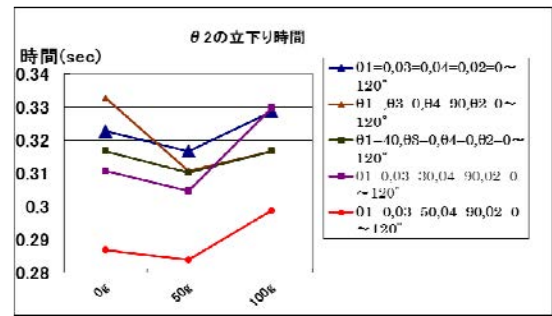


図6.9. 立下り時間(負荷0~100g)

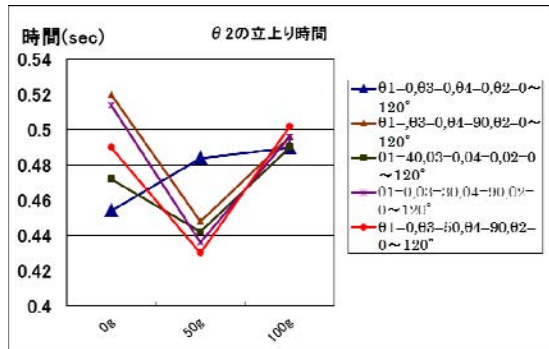


図6.6. 立上り時間(負荷0~100g)

図6.7.にステップ応答波形の一例 ($\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0 \sim 120^\circ$ 負荷なし) を示す。また、図6.8.には立下り時間を測定するための拡大図を示す。

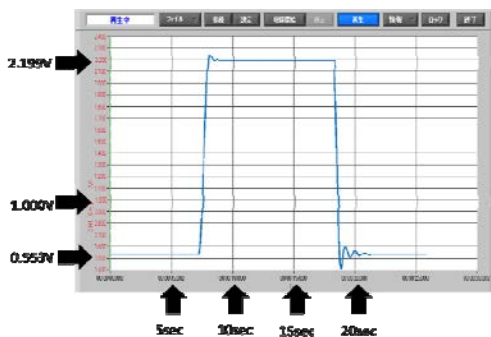
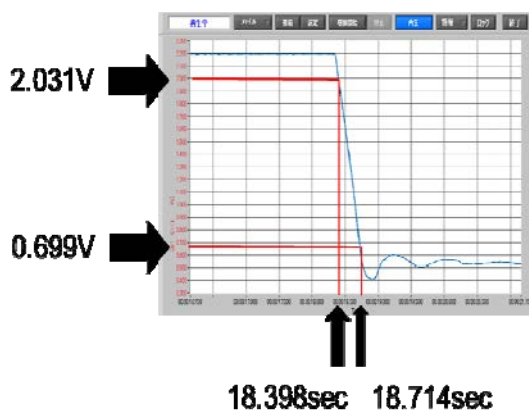
図6.7. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0 \sim 120^\circ$ 負荷なし

図6.8. 立下り時間0.9~0.1

図6.6.に上腕挙上運動 (θ_2) と上腕水平回転運動 (θ_1) の立上り時間を負荷0~100gまで測定し、まとめたグラフを示す。

最終的に立上り時間は負荷に関係なくほぼ一定で停止しているのがわかる。図6.9.は立下り時間をまとめたグラフより θ_2 の運動では負荷が大きくなると重力の影響を受け、 0° に戻る動作が加速してしまいそうであるが、モータは自動でその影響を受けないようにスピードを弱め、負荷による時間の変化はほぼないに等しい。

立下り時の振動には肩義手の取り付け台の振動が含まれているため整定時間($\pm 2\%$)が長くなっている。

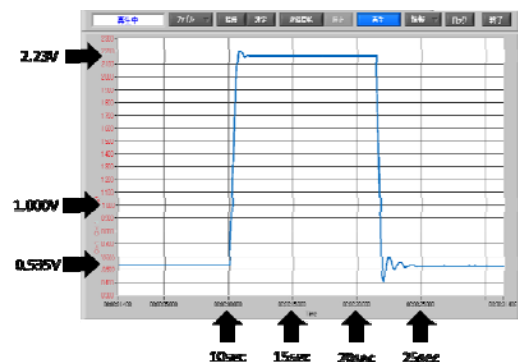
6.3. 整定時間 $\pm 2\%$

6.3.1. 上腕挙上運動 (θ_2) の整定時間 $\pm 2\%$

整定時間 (settling time) とは、ステップ応答が定められた許容範囲内 ($\pm 2\%$ や $\pm 5\%$) 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。

図6.10.にステップ応答の一例 ($\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0 \sim 120^\circ$ 負荷100g) を示す。

また、図6.11.に立上り整定時間を測定するのに必要な拡大図を示す。

図6.10. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0 \sim 120^\circ$ 負荷100g

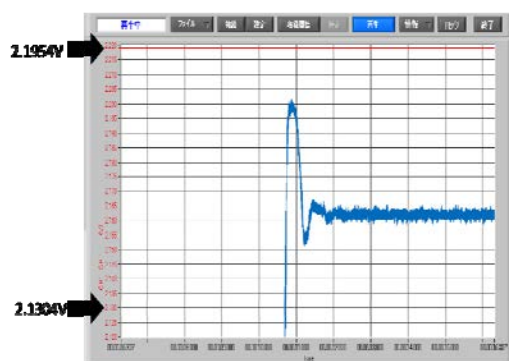


図6.11. 定時間±2%範囲

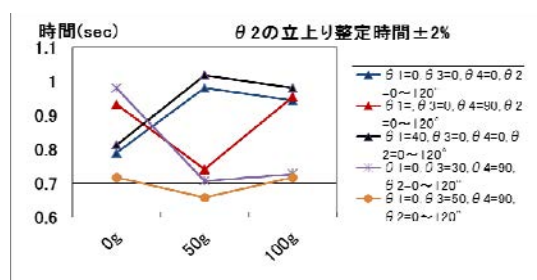


図6.12. θ_2 の立上り整定時間±2%(負荷0~100g)

図6.13.にステップ応答の一例 ($\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g)を示す。また、図6.14.に立上り整定時間を測定するのに必要な拡大図を示す。

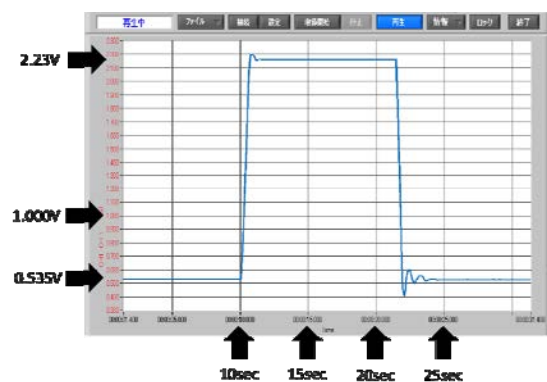


図6.13. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g

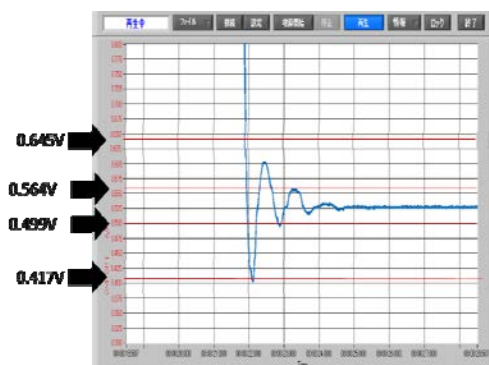


図6.14. 整定時間±2%範囲

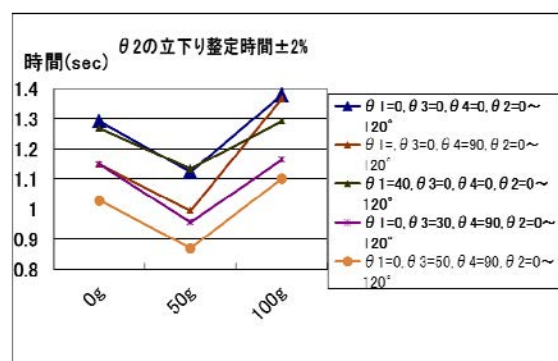


図6.15. θ_2 の立下り整定時間±2%(負荷0~100g)

上図は±2%の整定時間だけだが、±5%の整定時間はすべて0秒以内に収まっていたので省略をした。この肩義手の精度の高さを証明することができた。図6.15.は θ_2 の立下り整定時間の結果だが、重力の影響を受け、整定時間は負荷が大きくなるにつれて長くなっていることがわかる。

6.4. 定常偏差について

はじめに定常偏差の計算方法を示しておく。ポテンシオメータの回転角度とGL900よりわかる電圧から、目標角と実際の動作角の差分を定常偏差とする。

例えば、6.1.1『負荷(水)100g、肘屈曲 90° 』での上腕挙上運動 ($\theta_2=0\sim 120^\circ$) の場合の立上りで計算してみる。下が0.533V、上が2.199Vなので出力は、 $2.199 - 0.533 = 1.666V$ である。

求めたい角度をXとおき、電圧を角度に変換する計算式は

$$\text{角度} X^\circ : \text{出力} V = 340^\circ : 5V$$

より、出力に1.666Vを代入すると、 $X : 1.666 = 340 : 5$ から $X = 111.928$ となる。

目標角は 120° なので $120 - 111.928 = 8.072^\circ$ 。定常偏差は 8.072° となる。

6.4.1. 上腕挙上運動(θ_2 立上り時)の定常偏差

図6.16.にステップ応答の一例 ($\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g) 及び、定常偏差を求めるための図を示す。

miniLOGGER GL900(GRAPHTEC)を用いて測定した。目標値との定常偏差は図6.17.より約5度とわかる。

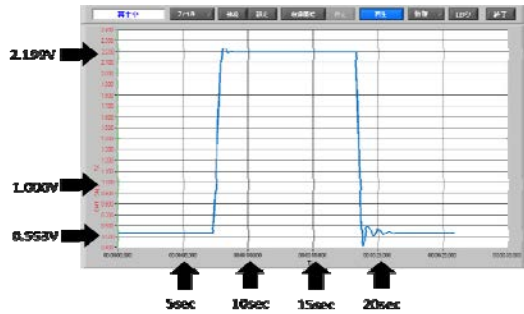
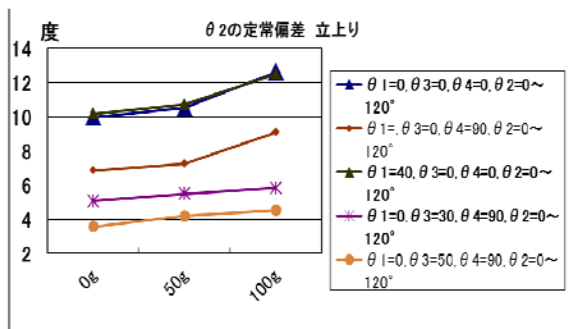
図6.16. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g図6.17. θ_2 の定常偏差（立上り）（負荷0～100g）

図6.17は上腕挙上（ θ_2 ）を $0\rightarrow 120^\circ$ までステップ応答させ最高スピードで動かさせたときの定常偏差（負荷0～100g）である。

図6.17よりわかることは、緑の線(小さい三角印)で示した上腕回旋 30° 及び肘屈曲 90° 曲げた状態の上腕挙上の定常偏差が $2^\circ\sim 6^\circ$ の間にあり、ほぼ目標角まで達しているということである。さらに負荷なしであっても水100gを持たせた状態でも目標角に近いということもわかる。橙の線で示した上腕回旋 50° の時も同様である。この2つの状態は特に人間の生活の机上動作に近い角度である。従って日常動作を行う時に最も安定した動きができるということである。上腕挙上を動かした瞬間強い振動とエネルギー吸収ボックスの弾性変形が生じるが目標値に手先が移動できれば上図のような弾性変形量となる。

6.4.2. 上腕挙上運動（ θ_2 立下り時）の定常偏差

図6.18にステップ応答の一例（ $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g）及び、定常偏差を求めるための図を示す。

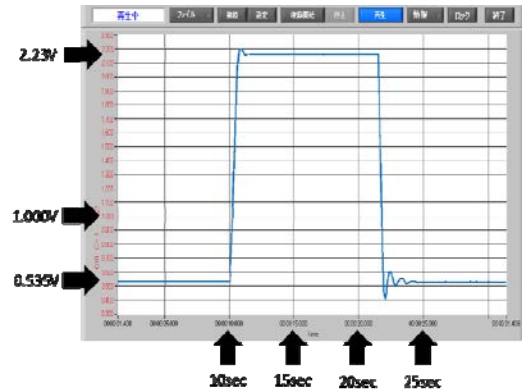
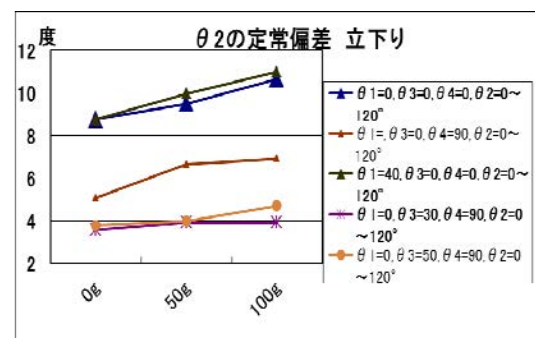
図6.18. $\theta_4=90^\circ$ $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 負荷100g図6.19. θ_2 の定常偏差（立下り）（負荷0～100g）

図6.19は上腕挙上を $120\rightarrow 0^\circ$ までステップ応答により最高スピードで動かさせたときの定常偏差である。

6.4.3. 定常偏差についての考察

θ_2 のステップ応答波形を θ_3 、 θ_4 、 θ_5 をパラメータとしてたくさんのデータをGL900で縦軸16ビットの精度で、横軸1msecのサンプリングタイムでコンピュータにデータを集めた。エクセルにより、立上り時間・立下り時間、 $\pm 2\%$ に対応した整定時間、 θ_2 を動かした時の定常偏差とその時の θ_1 の定常偏差、 θ_1 を動かした時の定常偏差とその時の θ_2 の定常偏差を測定しグラフ化した。その結果、エネルギー吸収ボックスは上腕の姿勢角に応じて、弾性限界内で四角形が平行四辺形になる様に弾性変形しながら余分な振動成分をアルミの表面分子の振動エネルギーに与えることにより、熱という形で約2、3秒以内に振動はなくなっていることがわかった。高速で動くほど風速は早くなるので熱は放出されやすい。この実験結果により柔軟関節肩義手は製作可能

であることがわかった。欠点として上記のような各種誤差が生ずるが日本で最初のサリドマイド児用の電動義手を開発した徳大チームの徳島大学医学部整形外科の先生方の考えでは軽量化と外観を向上させる方がより患者さんに喜んでもらえるという意見であった。しかし、ZMP社のモーションセンサを用いれば定常偏差はソフトウェアサーボを用いて0に近づけることができる。

7 協調動作

7.1 フォークで食事をする動作

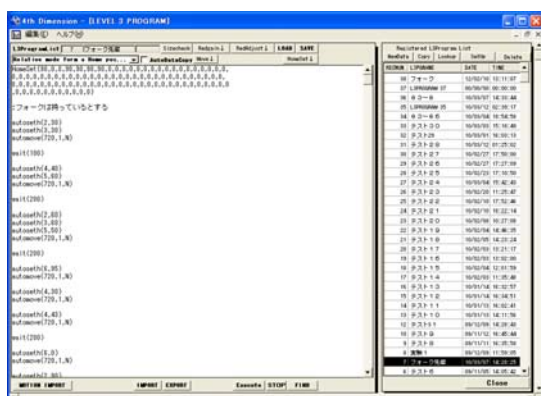


図7.1. フォークで食事をするプログラム

173cm用の参考文献¹⁾に用いたRCサーボモータを、参考文献¹¹⁾で作った182cm用の肩義手の部品にモータを入れ替えることにより、MP2で協調動作制御のテストができるようにした。参考文献¹⁾で作ったフォークで食事をするプログラムの一部を図7.1.に示す。この動作パターンを再生すると途中までは動いたが途中で動かなくなってしまう。

182cm用の手だと肩の上腕拳上角 θ_2 に掛かる負荷は173cmの肩義手に比べると遥かに大きなものになる。

そのため、協調動作パターンに存在するトルクのかかる姿勢を再現することができなくなり、途中で止まったと考えられる。協調動作パターンをこの肩義手の能力を考え変更することにより動作させることは可能である。

8. 実際のステップ応答の波形

以下に測定した実際のステップ応答波形を示す。



図8.1. $\theta_1=0, \theta_3=0, \theta_4=0, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.2. $\theta_1=, \theta_3=0, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.3. $\theta_1=40, \theta_3=0, \theta_4=0, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.4. $\theta_1=0, \theta_3=30, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$

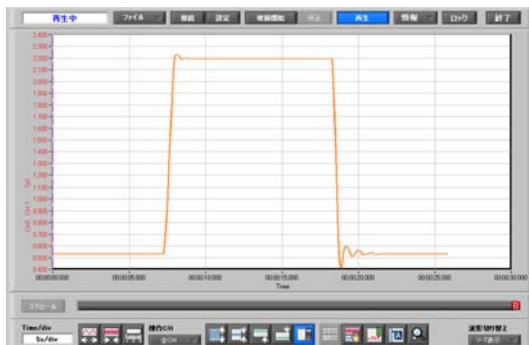


図8.5. $\theta_1=0, \theta_3=50, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.9. $\theta_1=0, \theta_3=30, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.6. $\theta_1=0, \theta_3=0, \theta_4=0, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.10. $\theta_1=0, \theta_3=50, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$

あらゆる日常生活で肩義手として使用する時、各関節角度がとると予想される姿勢で、手先の振動が起こっていないことがわかる。



図8.7. $\theta_1=, \theta_3=0, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.11. $\theta_1=0, \theta_3=0, \theta_4=0, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.8. $\theta_1=40, \theta_3=0, \theta_4=0, \theta_2=0 \sim 120^\circ$



図8.12. $\theta_1=, \theta_3=0, \theta_4=90, \theta_2=0 \sim 120^\circ$

本研究では手先の振動が静止していることを確認することが重要なため多数のデータを示した。



図8.13. $\theta 1=40, \theta 3=0, \theta 4=0, \theta 2=0 \sim 120^\circ$



図8.14. $\theta 1=0, \theta 3=30, \theta 4=90, \theta 2=0 \sim 120^\circ$

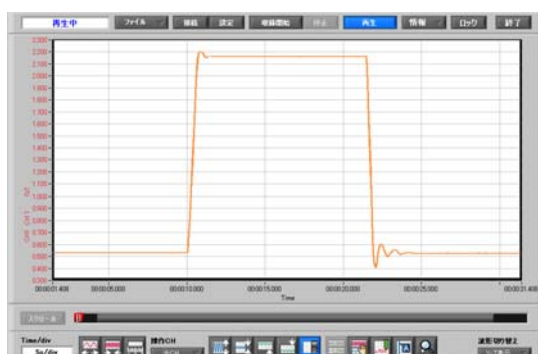


図8.15. $\theta 1=0, \theta 3=50, \theta 4=90, \theta 2=0 \sim 120^\circ$

9. まとめ

今回の実験結果の判定には通常制御工学で使用されている立上り時間、立下り時間、定常偏差、整定時間(±2%)を拡大解釈して用いている。なぜなら、柔軟関節肩義手(ロボットアーム)に関しては手先の振動を止めることが最重要課題である。現在、他の研究機関で行われている方法は粘性流体などに外部電圧をリアルタイムで高速で制御することにより手先の振動を止めており非常にエネルギー変換効率が悪くなっている。本研究室ではエネルギー保存則を用い、エネルギー吸収ボックスという新しい構造体を上腕拳上角($\theta 2$)及び上腕回旋角($\theta 1$)の2自由度に用い

ることにより、いろんな腕の姿勢及び負荷の変化に対しても手先の振動が止まることを本実験で再確認した。ただ、柔軟関節肩義手(柔軟アーム)が本質的に抱えている問題点として定常偏差が大きくなるということである。しかし、この問題点は基礎実験により立上り時間や立下り時間、及び整定時間、定常偏差の最大値などを考慮すればフィードフォワード制御を含むソフトウェアサーボで解決できる問題である。よって、制御用各パラメータは通常±5%以内に定常偏差が収まったとき定義された値であるが、本実験では最大 120° の変化に対して12度の定常偏差が生じているが(約10%)立上り時間や立下り時間は0.52秒及び0.33秒以内であり、また立上り時間の整定時間も最大1秒、立下り時間の整定時間も1.4秒である。以上のような事実から、取り付け台の振動を考慮すれば本研究で使用した柔軟関節6自由度肩義手(ロボットアーム)は基本性能が上記のソフトウェアサーボに対応可能と判断できる。また、実験中の上腕回旋部の取り付け部が金属疲労により変形し始めたがそのことにより手先の振動が持続することはなかった。

10. 謝辞

本研究にあたって、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。

11. 参考文献

- 1) 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)
- 2) 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自由度柔軟関節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)
- 3) 近藤科学株式会社,
MP2Editor+MotionGenerator 取扱説明書 (2009)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) Inoue Takahiro, Mechanics and control of soft-fingered manipulation, Springer(2008)
- 7) Birglen Lionel, Under actuated robotic hands, Springer(2008)
- 8) 有本卓, Control theory of multi-fingered hands: a modeling, Springer(2007)
- 9) 加藤 他: “筋電義手使用による運動機能再建の評価”, 日本ロボット学会誌October 2009, Vol.27No.8, p.102-108(2009)
- 10) 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)
- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) 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)
- 14) 木下 他: “RC サーボコントローラ AGB65-RSC 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)
- 15) 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)
- 16) 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)
- 17) 有本 卓: “柔軟関節ロボットの制御”, 新版ロボットの力学と制御, 朝倉書店, p.96-99(2002)
- 18) 有本卓, Control theory of non-linear mechanical systems : a passivity-based and circuit-theoretic approach, Clarendon Press (1996)
- 19) B&W (Bowers & Wilkins)800 Series カタログ (2009)
- 20) 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)
- 21) 日本塑性加工学会, 非線形有限要素法, コロナ社(1994)
- 22) 顧 蘭明: “肩義手の顔面方位制御アルゴリズムの改良”, 詫間電波工業高等専門学校昭和62年度卒業論文(1987)
- 23) 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)
- 24) 近藤科学株式会社, シリアルマネージャ for ICS3.0 V1.5 ソフトウェアマニュアル (2009)
- 25) 齊藤浩一: “国立東京工業高等専門学校・齊藤先生のe-nuvo IMU-Zで学ぶ9軸モーションセンサ”, 株式会社ZMP (2010)
- 26) 木下 他: “高トルクなRC サーボモータを用いたエネルギー変換効率の良い柔軟関節6自由度肩義手(SDP, ロボットアーム1.45kg)の協調動作制御システム”, 香川高等専門学校研究紀要第2号, p.145-165, 2011
- 27) 木下 他: “エネルギー変換効率の良い6自由度柔軟関節肩義手 (SDP, ロボットアーム1.45kg) の顔面方位制御システム用肩部2自由度位置検出センサの開発”, 香川高等専門学校研究紀要第2号, p.167-184, 2011