

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

木下 敏治* 平田 一真** 篠原 稜*** 坂井 剛士****

Development of the New flexible Shoulder Disarticulation Prosthesis (SDP)(Robot Arm 1.6kg) with six degrees of freedom using the RCB-4HV

Toshiharu KINOSHITA , Kazuma HIRATA , Ryo SINOHARA, Tsuyoshi SAKAI

Abstract

In this paper, 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 new practical 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 . New Al-Mg (2.2~2.8%) alloy is used to comper with old Al-Mg (0.2~0.8%) alloy. 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, prehension part of flexible joint SDP is stopped vibration of a hand by principle of conservation of energy.

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

1. まえがき

全国 18 歳以上の身体障害者数（在宅）は、34 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が、一方で電動式肩義手は実用化が遅れている。

*香川高等専門学校詫間キャンパス
電子システム工学科

**香川高等専門学校詫間キャンパス
電子情報通信工学専攻

***金沢工業大学電気電子工学科

**** 四国電力

Google のアクセスランキングのサイトでキーワードを「柔軟関節アーム」と入力すると平成 25 年 3 月 18 日の例だと 857000 件の中で 2 ページまでに 17 件の木下研究室の研究論文がアクセスされている。

他の大学などの研究成果も多数アクセスされている。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。

現在の制御理論では、柔軟関節構造は安定な制御が非常に難しいとされている。解決策として一般的に、粘性流体など外部エネルギーを利用して手先の振動を止めている。本研究室では、エネルギー吸収ボックスという振動エネルギーを熱エネルギーに変換するよう設計して、手先の振動を

止めている。これは、外部エネルギーを利用していないのでエネルギー変換効率は良い。しかし、本研究室の肩義手は目標値に完全に追従するにはまだ及んでいないので、目標値に完全に追従できる肩義手の開発を実現することが本研究の課題である。実現すればエネルギー変換効率の良い、軽量で高精度な柔軟関節肩義手として、産業用ロボットに応用可能となる。

1.1. 経緯

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。

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柔らかいアルミチャンネルを用いて、RC サーボモータを上下のアルミ板で挟んだ構造のアクチュエータをぴったりとネジ止めすることによりすべての不必要な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難問に今までにない音響工学の最新理論 (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 , θ_3 , θ_4 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 、上腕回旋角 θ_3 、肘屈曲角 θ_4 の 4 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 号に掲載した論文より、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 RCB-4HV(12g)の写真を示す。図 1.2 に研究の概略図を示す。ハードウェアによる安定な動作制御とソフトウェアによる正確な動作制御の二つを兼ね揃えた軽量の肩義手を開発することが本研究の目的である。

そして、産業用ロボットとして応用できることを示すことが目標である。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、制御工学の各種パラメータの値を測定した。

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。



図 1.1. RCB-4HV

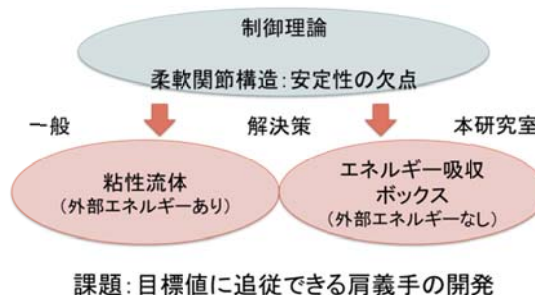


図 1.2. 研究の概略図

1.2. 柔軟関節肩義手(ロボットアーム)の設計理論

本研究は実用化が難しいと思われる多自由度柔軟関節ロボットアーム(肩義手)の開発例を示す内容である。ロボットアーム(肩義手)の振動については高野政晴先生の「詳説 ロボットの運動学」オーム社、P131 から P145 に詳しく理論的に考察されている。

「ロボットアームの振動を測定し、関節駆動のデータを制御して、振動を抑制することは理論的には可能であるが、実際には難しい」と書いてある。

また、「直列に繋がった n 次元の振動モデルの運動方程式を解くことにより固有振動を求めている。アームの変形がなく、関節の柔らかさだけで振動が生ずるとすると仮定したシステムでは、理論的に $6n$ 個の固有振動数と固有モードがある。アームの剛性も考慮するとアームの弾性振動が加わり、モードは無限に存在する。」上記の内容を開発した 6 自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム)に対応させて考察する。 θ_1 から θ_4 はモータを以前のアルミ板 Mg(0.2-0.8%)より強度の強い Al-Mg(2.2-2.8%)合金に変え、外枠の Al-Mg(2.2-2.8%)合金も厚さ 1.5mm の弾性変形の大きな構造に変え、柔らかいアルミチャンネルを用いてモータ部と外わく部は結合されている。すなわち、小さな外力による変形はアルミ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板が板バネとして働くように設計してある。手先の位置決めに関係しない θ_5 , θ_6 は柔軟関節構造にはなっていない。理論的には 4 自由度が柔軟関節となっているので $6 \times 4 = 24$ 、すなわち 24 個の固有振動数がある。その上、 θ_2 と θ_3 の間はアルミチャンネルをカー

ボンチャンネルに変えた。有本先生(新版 ロボットの力学と制御、朝倉書店、2002、P97、図 4.18 参考)のテキストの内容を参考にして、図 1.3 のリンクの部分の弾性減衰係数がより大きくなるように設計してある。他の部分はアルミチャンネルで対応している。

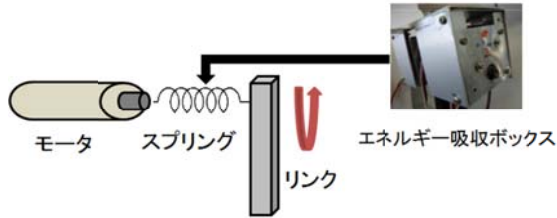


図 1.3 柔軟関節のモデル

その結果、振動モードはアームの振動モードがのることになり、24 個以上の固有振動モードが存在することになる。

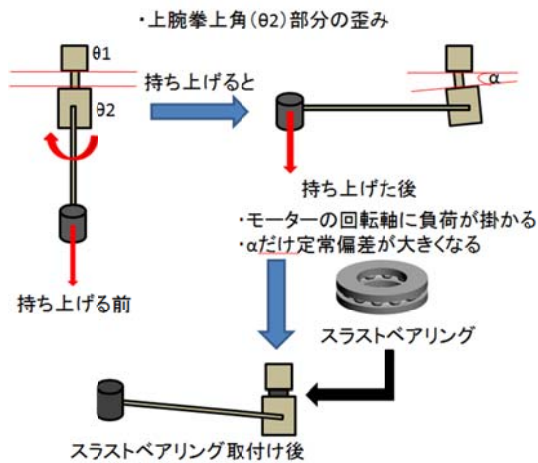


図 1.4 スラストベアリングによる強度問題の解決案

工学の目的は目標とする性能を持つ発明を行うことにあるので、本研究では予算の少なさも有り、振動解析については行わず、結果として手先の振動が止まっているかどうかを θ_2 のポテンシオメータの電圧波形の時間的変化で測定することにした。強度問題の解決方法を図 1.4 に示す原理で実行した。詳しくは本文で示す。その結果、定常偏差は $\pm 5\%$ 以内におさまリ、制動時間も負荷 500g で 120° から 0° に θ_2 を移動させた時、約 1.6 秒となり実用上問題のない値となった。また、目標値では手先は完全に静止していることをステップ応答波形のデータで確認した。以下に本研究を追実験可能な形で論文として公表するものである。本研究は地球の温暖化を止めるための工場内での産業用ロボットに応用可能である。ロボットを作る材料も 10 分の 1 程度にできる。軽量化(1.6kg で 500g の物を移動できる)が出来るためエネルギー変換効率は非常に大きい。福島原子力発電所の工事などでの使用を目的としたヒューマノイドロボットにも応用可能である。

2. 研究概要

2.1. 概要

本研究では、2009 年度設計製作した柔軟関節 6 自由度肩義手の一部を改良し、各種データを測定した。問題点を改良して新たに柔軟関節 6 自由度柔軟関節肩義手を製作し各種データを測定した。コントロールボードは通信速度が 1.25Mbps に対応する RCB-4HV(近藤科学製)を用いた。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に対応する各関節角度を想定して、上腕挙上角(θ_2)を 0° から 120° までステップ応答させ、立上り時間、立下り時間、定常偏差、整定時間($\pm 2\%$)、整定時間($\pm 5\%$)をポテンシオメータとデータロガー GL 900 で測定した。柔軟関節肩義手(ロボットアーム)は、手先の振動を目標値で静止させることが非常に難しいと立命館大学の有本先生の著書「新版ロボットの力学と制御」で述べられている。得られたデータを以下の各章で示すことにより、今までの肩義手より定常偏差などの制御用パラメータの値が実用上問題ない値になっていることが分かった。まず以下の各章において RCB-4HV の設定の仕方、RC サーボモータ 6003 HV の基本性能の設定の仕方、新しい肩義手の製作方法などを含む実験方法を示し、得られた結果の波形を示し、それをもとにデータ処理を行った。

2.2. 新しい 6 自由度柔軟関節肩義手

上腕部を従来のアルミチャンネルからカーボン製チャンネルに変更した。またスラストベアリングを上腕水平回旋部及び上腕の回旋部に取り付けている。またサーボモータ取り付け部の取り付けネジ本数を工作精度の向上により 3 本から 6 本に増やすことが出来た。図 2.1 が従来の肩義手のサーボモータ取り付け部であり、図 2.2 が今回製作した肩義手のサーボモータ取り付け部である。取り付けネジの本数が増えている事が確認出来る。またサーボモータフリーホーン部が通る部分をコの字にカット(図 2.3)して製作していたが今回は図 2.4 の様にフリーホーンの直径 21 mm より 1 mm 大きい 22 mm の穴を開け、そこにフリーホーンを通して。そして重量に関してだが上腕部で 1194 g、前腕部で 410 g と合計で 1604 g となった。2009 年度製作の肩義手の重量は 1450 g であるため約 150 g 重量が増えてしまった結果となった。増えた原因としてはスラストベアリングが一つ約 36 g で 72 g の増加となり、使用するアルミ板に関しても強度的問題がある場所に関して 1.5 mm 厚のアルミ板を使用したため重量が増えたと思われる。また図 2.5 が今回製作した肩義手の θ_2 のみを目標値 120° まで振り上げて振り下ろした時の波形である。測定値は 124° で定常偏差は 4° である。

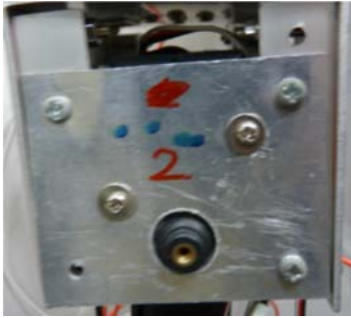


図 2.1 従来のサーボモータ取付け部



図 2.2 今回製作したサーボモータ取付け部

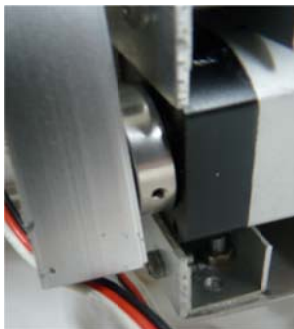
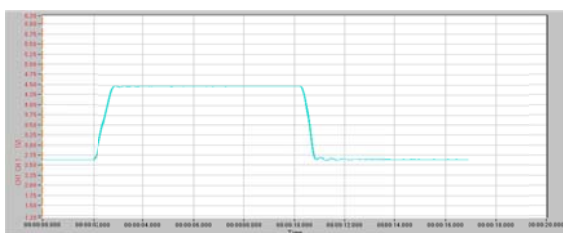


図 2.3 従来のフリーホーン避け部



図 2.4 今回製作したフリーホーン避け部

図 2.5 新しい肩義手で測定した
ステップ応答波形

2.3. 製作時に気を付けたこと

今回はより強度があり、目標値との誤差が少ない肩義手の製作を行った。

ドリルでアルミ板に穴を空けるときに板に接触すると僅かにドリルの刃先がずれ、複数のねじがうまく止まらない場合は穴あけ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。更に予定の穴より 1mm 大きく穴を開けデジタルのけがき針により 0.01mm 単位で印を付けることで、問題を解消した。

また、同じ大きさの板を作り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と板の大きさの誤差の影響は無くすることができた。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。上腕長は $0.19 \times \text{身長} \div 33\text{cm}$ ，前腕長の長さは $0.15 \times \text{身長} \div 26\text{cm}$ ，手の長さは $0.11 \times \text{身長} \div 19\text{cm}$ となる。

しかし、佐藤技研の装飾用義手のグローブの長さは 15cm なので実用的な面と、外観にこだわる患者さんの意思を重んじて手の長さは 16cm で設計した。その結果、前腕長と手の長さの合計は 42cm となった。指の曲げ方で形が変わるため実際には 44cm である。

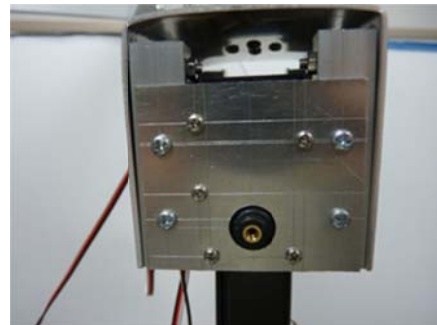


図 2.6. 基準面を取り作成したアルミ板

2.4. 実験用柔軟関節 6 自由度肩義手の仕様

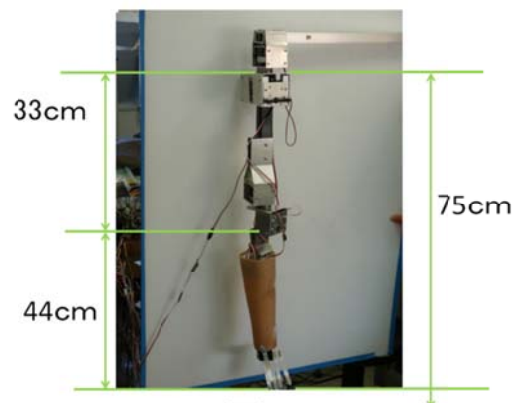
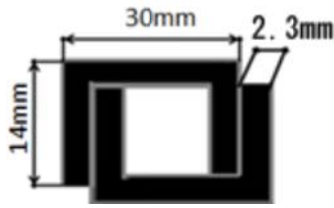


図 2.7 6 自由度肩義手の全体図



ルを重

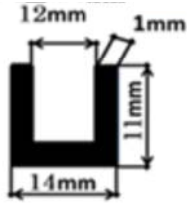


図 2.8. エネルギー吸収ボックス用
アルミチャンネル

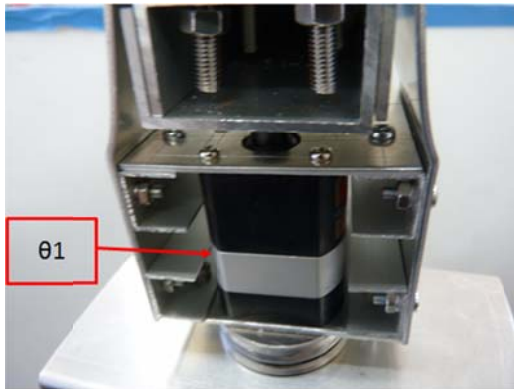


図 2.9. 上腕水平回転($\theta 1$)

RC サーボモータを支えるアルミ板とアルミチャンネルはネジで、外枠のアルミ板ともネジで結合されている。

大きな外力がかかるとアルミチャンネルと外枠が同時に変形するが外力が義手の姿勢で小さくなると板バネの作用で元の形に戻る構造になっている。

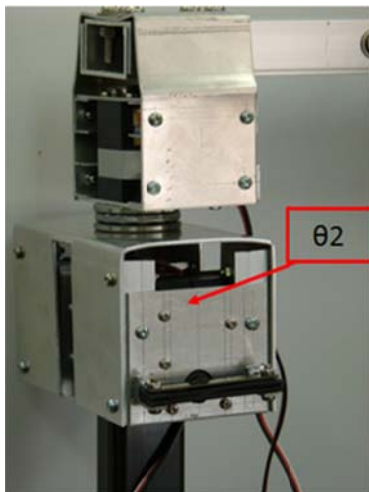


図 2.10. 上腕挙上($\theta 2$)



図 2.11. 上腕挙上($\theta 2$)の拡大図

図 2.9 と図 2.10 に上腕水平回転角($\theta 1$)と上腕挙上角($\theta 2$)の写真を示す。

図 2.11～図 2.15 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。

振動を吸収させるアルミチャンネルは図 2.8 のような厚さ 1mm 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。

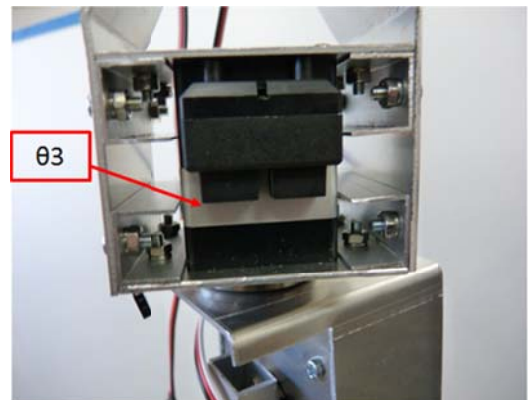


図 2.12. 上腕回旋($\theta 3$)

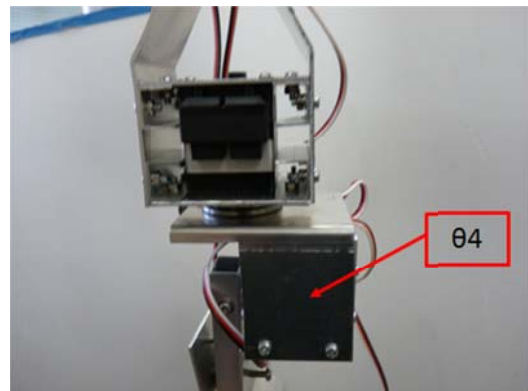
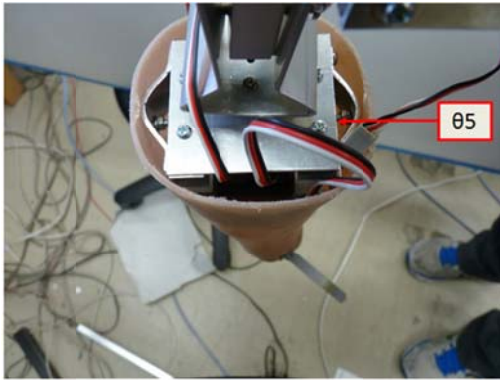
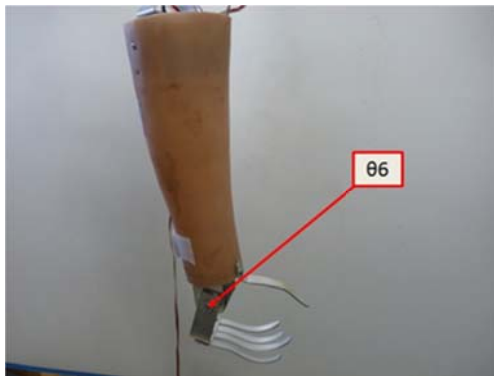


図 2.13. 上腕回旋($\theta 4$)

図 2.14. 上腕回旋 ($\theta 5$)図 2.15. 上腕回旋 ($\theta 6$)

前腕部には装飾用肩義手で世界的に有名な佐藤技研のソケットを用いた。 $\theta 1$ から $\theta 5$ 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-4034HV のシリアル RC サーボモータを使用しソケットに固定した。今回の実験では水の入ったペットボトルをマジックテープで固定して実験を行った。肩の 2 自由度の構造は 3 年間の耐久テストをクリアしてきた 1kg タイプの柔軟関節肩義手と同様である。ハイパワーな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。シリアルサーボ(コンプライアンス)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)を用いているので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。



図 2.16. 高トルクなシリアル RC サーボモータ 6003HV



図 2.17. 小型軽量のシリアル RC サーボモータ 4034HV

図 2.16 に KRS-6003HV (100g, 11.1V) を示した。このシリアル RC サーボモータは 2009 年度に制作した肩義手の $\theta 1 \sim \theta 5$ までの 5 自由度に全部で 6 個使用している。

これまででトルクは最大であり $67\text{kg}\cdot\text{cm}$ である。モータの動作角は $\pm 135^\circ$ であり、最大回転角 270° となっている。

図 2.17 は KRS-4034HV (トルク約 $40\text{kg}\cdot\text{cm}$, 約 41.5g, 11.1V) のシリアル RC サーボモータである。このモータは小型で軽量な特性を生かした。モータの動作角は $\pm 135^\circ$ であり、最大回転角は 270° である。

2.5. 肩義手のシステム構成

2.5.1. システム構成

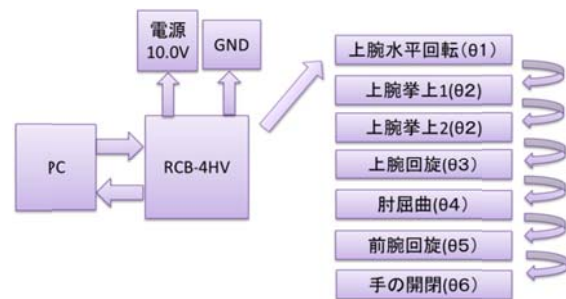


図 2.18. シリアル制御方式を用いた RCB-4HV のシステム構成 (数珠つなぎ)

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 RCB-4HV 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。シリアルサーボモータを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。ポートを 1 個使用するようにしてポートに $\theta 1$ から順に ID を設定する。

2.5.2. ID の設定

以下に RC サーボモータの ID 設定方法について示す。

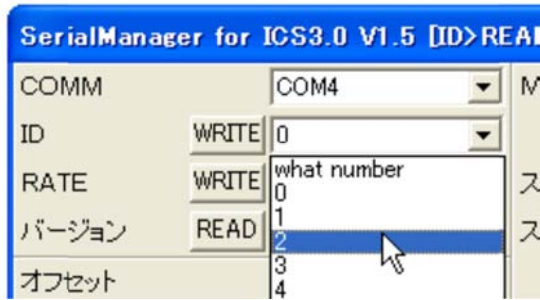


図 2.19. ID の設定画面

- ①SerialManager151.exe を起動する。
- ②ID の what number を選択すると、現在の ID の情報が表示される。
- ③ID を変更したい数字に設定し、WRITE を押すと書き込まれる。
- ④書き込みボタンを押して保存する。

現在の各 RC サーボモータに対応する ID を以下に示す。

$\theta 1$: ID 1, $\theta 2$: ID 2, $\theta 3$: ID 4,
 $\theta 4$: ID 6, $\theta 5$: ID 7, $\theta 6$: ID 8

なお、 $\theta 2$ に関してはモータの片方を逆転に設定している。スレーブにも設定しておく必要がある。詳しいことに関しては SerialManager15.pdf (デスクトップ上) に明記されている。

2.5.3. RC サーボモータの制御方法



図 2.20. 制御用のスライドバー画面

図 2.20 が操作画面である。個々の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° と考えニュートラルとしている。動かしたい RC サーボモータの ICS 番号にチェックを入れ赤枠の箇所に $-4000(-135^\circ) \sim 4000(+135^\circ)$ の 8000 通りで数値入力し、コマンド生成をクリックし送信した瞬間から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動作しようとする。

2.5.4. 回転式ポテンショメータの特性

図 2.21 にある緑測器の回転式ポテンショメータは、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。圧着を用いて回転軸と $\theta 2$ の回転中心は結合されている。回転軸が柔軟関節構造のため、微妙に変化するのでゴムをアルミ板で挟んでデータが集められるよう工夫した。実験データを測定できることが大量のデータからわかった。



図 2.21. CP-2FB(b)の構造

3. 実験方法

RCB-4HV のコントロールボードで肩義手とパソコンを接続する。



図 3.1. GRAPHTEC midi LOOGER GL900

$\theta 2$ (上腕拳上) に取り付けした回転式ポテンショメータとデータロガー GL900(図 3.1)を用いて負荷として 0.100.200.300.400.500g の水の入ったペットボトルを肩義手に持たせ $\theta 2$ の目標値を

0°, 30°, 60°, 90°, 120° まで振り上げてステップ応答波形を測定し各種パラメータ（定常偏差, 立上り時間, 立下り時間, 立上り整定時間, 立下り整定時間）をもとめる。図 3.1 の 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 の 16 乗分割できる。またサンプリングタイムは 10 μ s で測定する。

4. 実験結果

4.1. 定常偏差

まず定常偏差について説明する。定常偏差とは目標角（動かしたい角度）と実際に動いた角度との差の事である。測定に 340V で 5V に達する回転式ポテンショ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。

$$\text{角度 } X^\circ : \text{出力 } V = 340^\circ : 5V \cdots \text{①}$$

そして目標角度との差をとる。図 4.1 のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

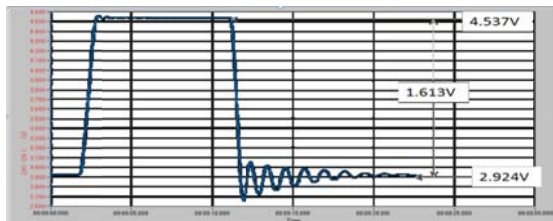


図 4.1 ステップ応答波形

図 4.1 より電圧の最も低い点 2.924V から最も電圧の高い点 4.537V までの電圧差は 1.613V であり①式に代入すれば肩義手 ($\theta 2$ が実際に動いた角度は 109.7° となる。そして, これより定常偏差は 10.3° と求まる。そして過去の肩義手と, 新しい肩義手のステップ応答波形のデータから求めた定常偏差をまとめたグラフを図 4.2~図 4.4 に示す。

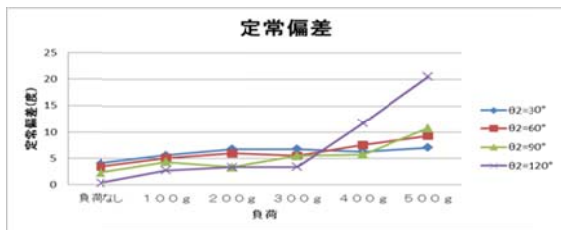


図 4.2.スラストベアリングなしの定常偏差

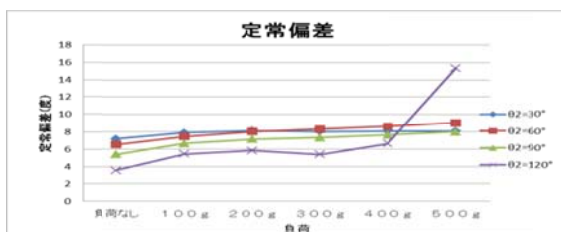


図 4.3.スラストベアリングありの定常偏差

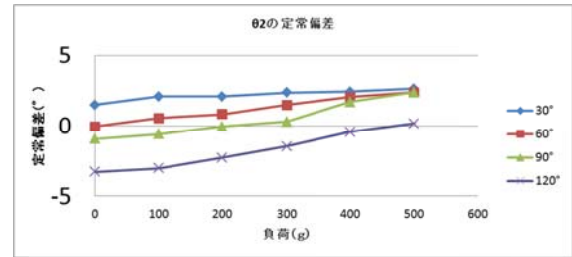


図 4.4.新しい肩義手の定常偏差

4.2. 立上り時間

次に立上り時間について説明する。ステップ応答で立上る時の 10%~90%に対する時間を立上り時間という。下図のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

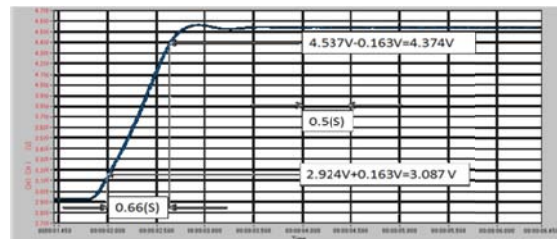


図 4.5. ステップ応答波形

図 4.5 のステップ応答の立上る時の 10%と 90%つまりこの場合, 電圧差 1.613V の 10%である 0.163V を電圧の最も低い点 2.924V に足した 3.087V に対する時間から電圧の最も高い点 4.537V から電圧差 1.613V の 10%である 0.163V を引いた 4.374V に対する時間までを立上り時間とするので立上り時間は 0.66(S)となる。そして過去の肩義手と新しい肩義手から求めた立上り時間をまとめたグラフを図 4.6~図 4.8 に示す。

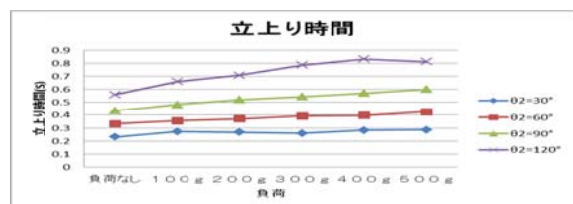


図 4.6. スラストベアリングなしの立上り時間

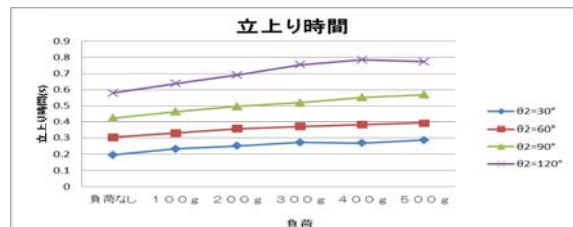


図 4.7. スラストベアリングありの立上り時間

スラストベアリングのあるなしでは, 立上がり時間の大きな変化は見られない。新しい義手でも同様のデータである。

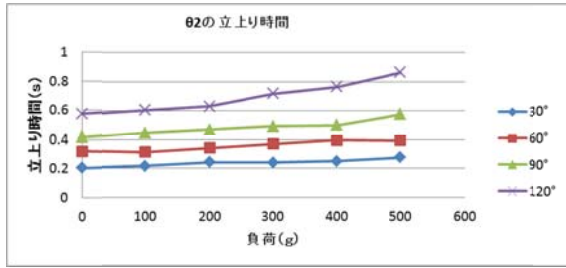


図 4.8.新しい肩義手の立上り時間

4.3. 立下り時間

次に立下り時間について説明する。立上り時間と同様に立下がる時の 90%~10%に対する時間を立下り時間という。下図のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

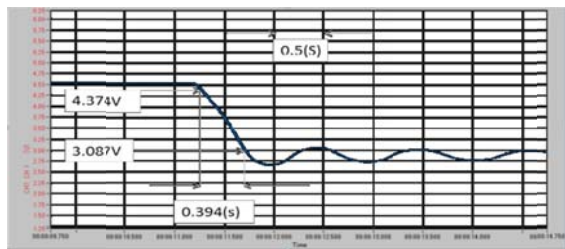


図 4.9. ステップ応答波形

図 4.9 のステップ応答の立下る時の 90%と 10%つまりこの場合、電圧差 1.613V の 10%である 0.163V を電圧の最も高い点 4.537V から電圧差 1.613V の 10%である 0.163V を引いた 4.374 V に対する時間から電圧の最も低い点 2.924V に足した 3.087V に対する時間までを立下り時間とするので立下り時間は 0.394(S)となる。そして過去の肩義手と新しい肩義手のステップ応答波形から求めた立下り時間をまとめたグラフを図 4.10~図 4.12 に示す。

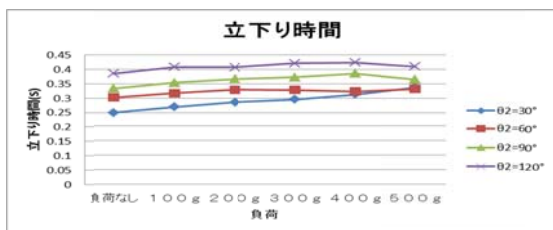


図 4.10. スラストベアリングなしの立下り時間

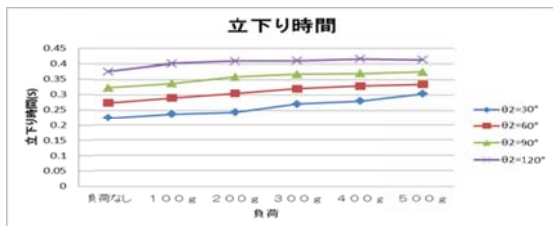


図 4.11. スラストベアリングありの立下り時間

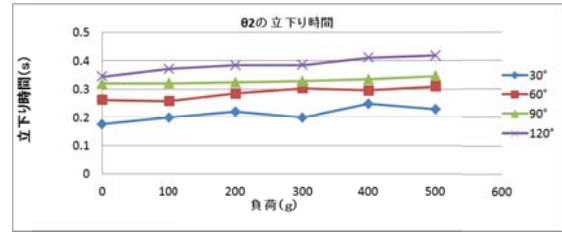


図 4.12.新しい肩義手の立下り時間

4.4. 立上り整定時間

立上り整定時間とは、肩義手が動作つまりステップ応答波形が変化し始める点から立上った後ステップ応答が定められた許容範囲内(制御工学において一般的に $\pm 2\%$ や $\pm 5\%$)に入る(この場合肩義手の振動が止まる)までの時間である。結果をより厳密にするため電圧差の $\pm 2\%$ の範囲内で波形変化が収まっていれば振動は止まっていることとする。下図のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

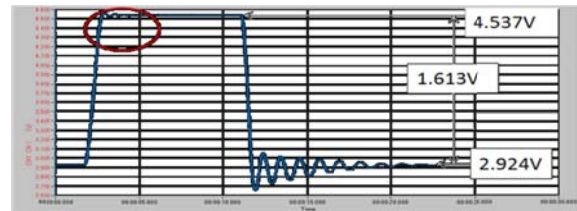


図 4.13. ステップ応答波形

図 4.13 のステップ応答波形の立上った直後の赤丸の箇所を拡大したものを図 4.14 に示す。わずかに波形が変化していることがわかる。そして電圧差の $\pm 2\%$ の範囲を白線で示している。この場合ステップ応答波形が立上った直後から電圧差 1.613V の $\pm 2\%$ の範囲に変化が収まっていることがわかる。

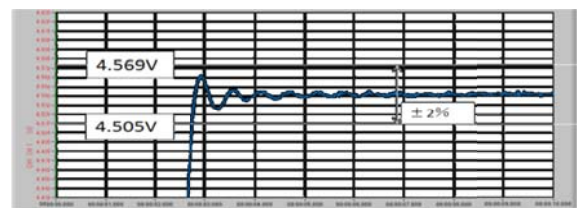


図 4.14 $\pm 2\%$ の範囲

これより立上り整定時間は図 4.15 に示すように 1.0632 秒となる。

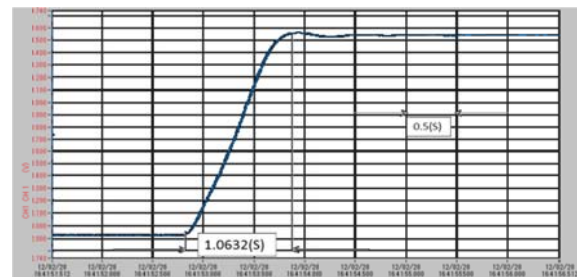


図 4.15 ステップ応答波形

そして過去の肩義手と新しい肩義手のステップ応答波形から求めた立上り整定時間をまとめたグラフを図 4.16~図 4.21 に示す。

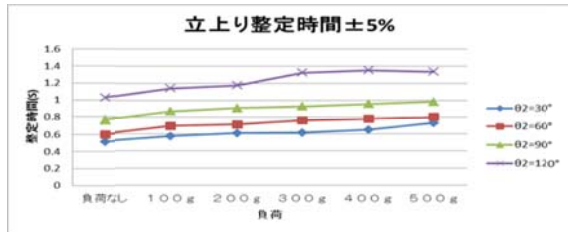


図 4.16. スラストベアリングなしの立上り整定時間 $\pm 5\%$

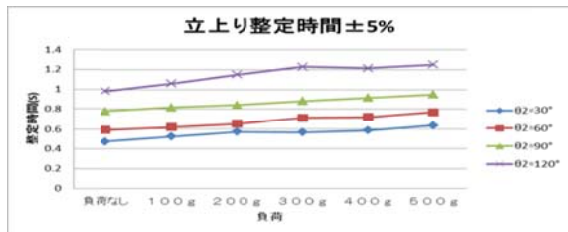


図 4.17. スラストベアリングありの立上り整定時間 $\pm 5\%$

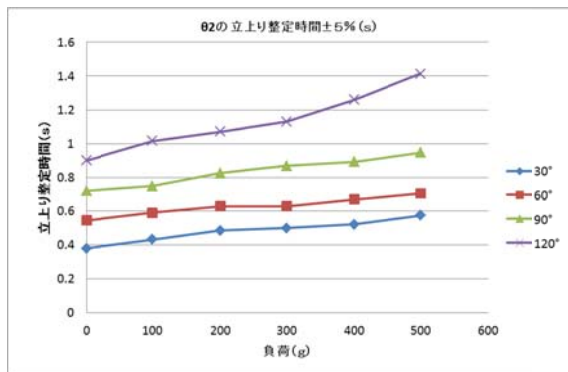


図 4.18. 新しい肩義手の立上り整定時間 $\pm 5\%$



図 4.19. スラストベアリングなしの立上り整定時間 $\pm 2\%$

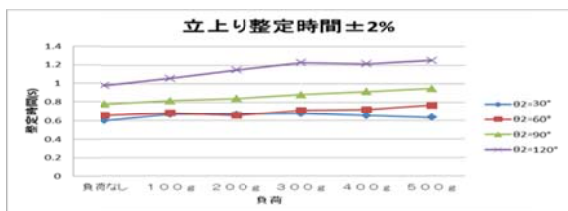


図 4.20. スラストベアリングありの立上り整定時間 $\pm 2\%$

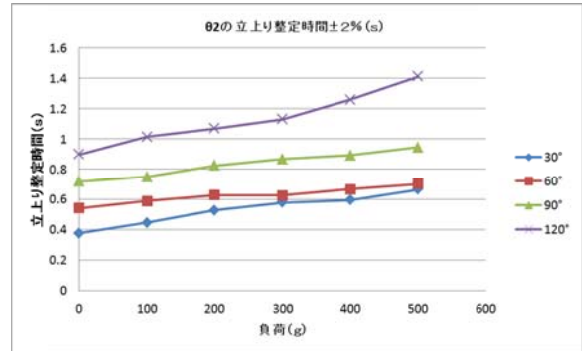


図 4.21. 新しい肩義手の立上り整定時間 $\pm 2\%$

4.5. 立下り整定時間

立上り整定時間と同様の方法で求める。

肩義手が動作つまりステップ応答波形が変化し始める点から立下った後ステップ応答が定められた許容範囲内(制御工学において一般的に $\pm 2\%$ や $\pm 5\%$)に入る(この場合肩義手の振動が止まる)までの時間である。

結果をより厳密にするため電圧差の $\pm 2\%$ の範囲内で波形変化が収まっていれば振動は止まっていることとする。下図のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

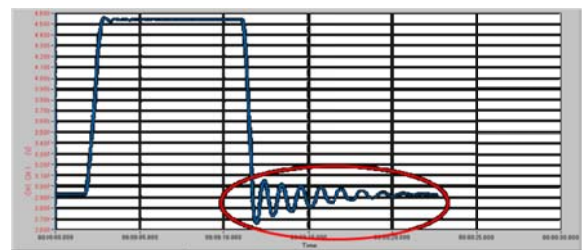


図 4.22 ステップ応答波形

立下った直後の赤丸の箇所を拡大したものを図 4.23 に示す。また電圧差 1.613V の $\pm 2\%$ の範囲を白線で示している。

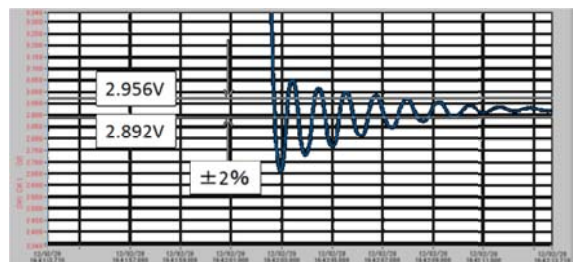


図 4.23 $\pm 2\%$ の範囲

そして立下り始める時間から電圧差の $\pm 2\%$ に入るまでの時間を図 4.24 に示す。

もし最初の波形から $\pm 2\%$ 以内に収まっていれば最初の振動波形の最大値までの時間を立下り時間と定義して測定した。

立上りに関しても同様で、最初の波形から $\pm 2\%$ に収まっていれば最初の振動波形の最大値までの時間を立上り時間と定義した。

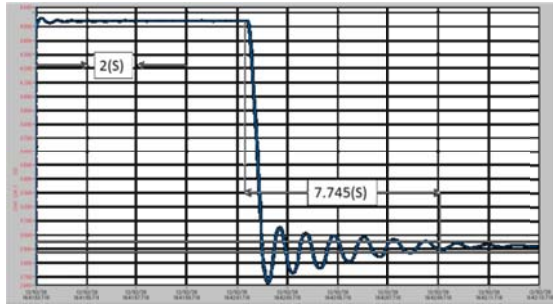


図 4.24. ステップ応答波形

図 4.24 より立下り整定時間は 7.745 秒となる。また過去の肩義手と新しい肩義手のステップ応答波形よりもとめた立下り整定時間をまとめたグラフを図 4.25~図 4.30 に示す。



図 4.25 スラストベアリングなしの立下り整定時間 $\pm 5\%$

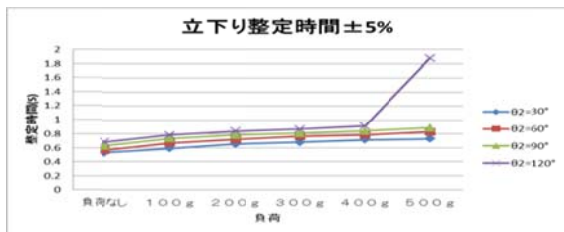


図 4.26. スラストベアリングありの立下り整定時間 $\pm 5\%$

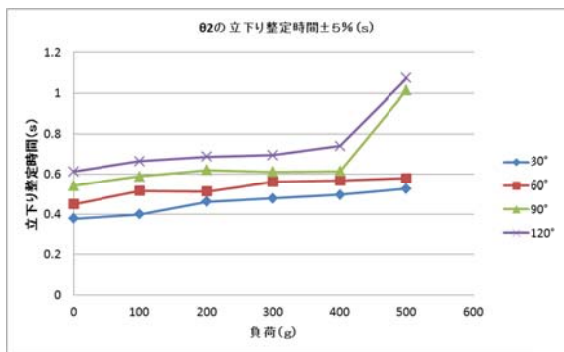


図 4.27. 新しい肩義手の立下り整定時間 $\pm 5\%$

新しい肩義手の立下り時間は、負荷 400g まで 0.8 秒以内に収まっており改良した肩義手のスラストベアリングあるなしに関わらず 1 秒近くかかっているのが改良されている。負荷 500g でも約 1 秒で反応している。

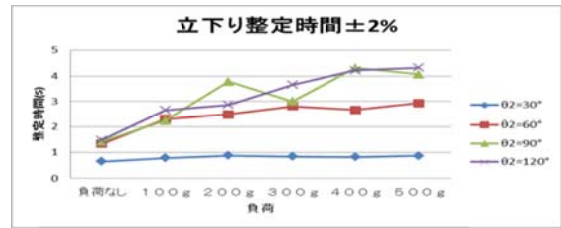


図 4.28. スラストベアリングなしの立下り整定時間 $\pm 2\%$

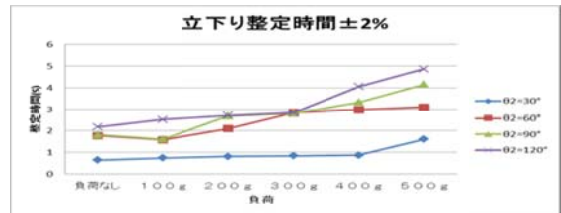


図 4.29. スラストベアリングありの立下り整定時間 $\pm 2\%$

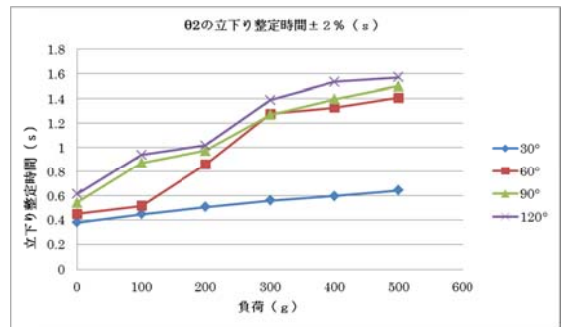


図 4.30. 新しい肩義手の立下り整定時間 $\pm 2\%$

新しい肩義手を動かしたときのステップ応答波形を図 4.31~図 4.40 に示す。

まず目標値で静止していることが以下の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立下り整定時間は負荷 500g で目標値 120° でも 1.6 秒以内に収まっている。図 4.4 の新しい肩義手の定常偏差は目標値 120° 負荷 500g でも 2° 程度になっているので実用上問題はない値である。

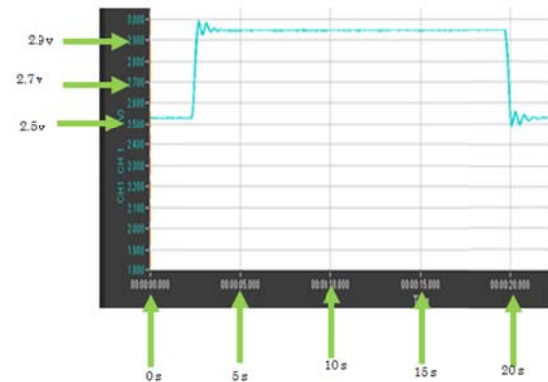


図 4.31. 負荷なし 目標値 30°

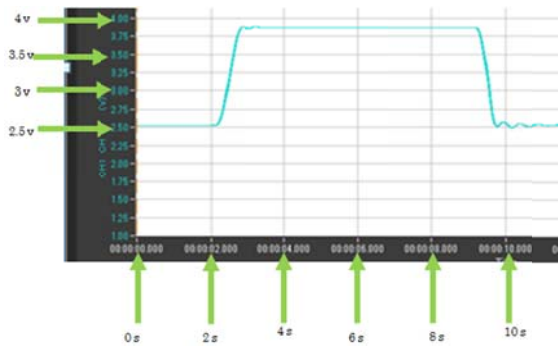


図 4.32. 負荷なし 目標値 90°



図 4.36. 負荷 400g 目標値 90°



図 4.33. 負荷 200g 目標値 30°



図 4.37. 負荷 300g 目標値 60°

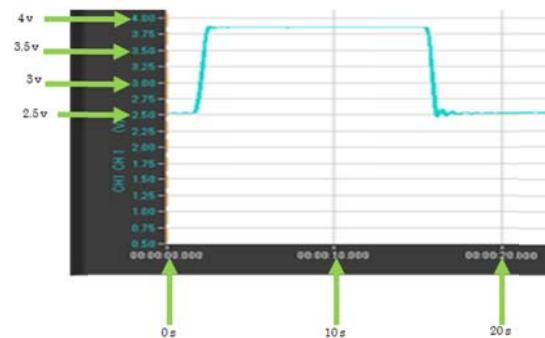


図 4.34. 負荷 200g 目標値 90°

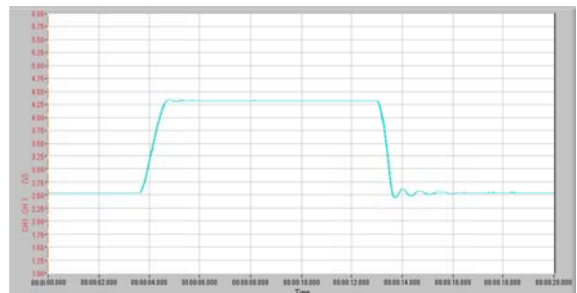


図 4.38. 負荷 300g 目標値 120°



図 4.35. 負荷 400g 目標値 30°

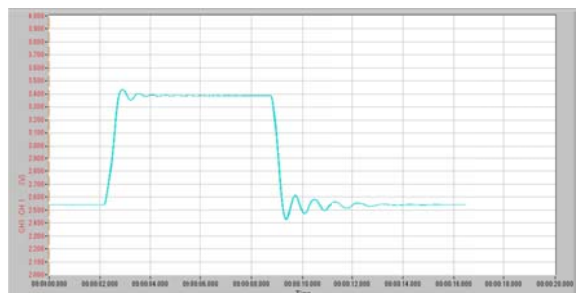


図 4.39 負荷 500g 目標値 60°

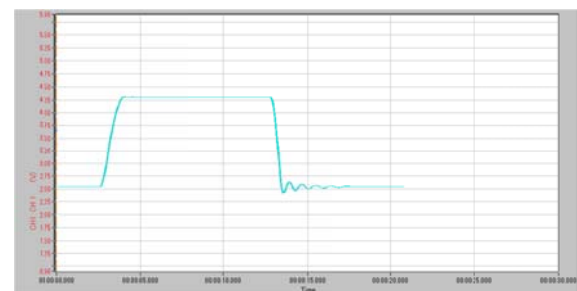


図 4.40. 負荷 500g 目標値 120°

負荷を 0g から 500g まで変化させて手先が振動せずに静止しているか調べるためにあえて長時間のステップ応答波形を測定している。すべてのデータが示すことは、過渡的には振動しても目標値で静止していることである。

5. 考察とまとめ

実験結果のグラフより、今までの肩義手より定常偏差が小さくなり実用上問題無い値となった。目標値の±5%以内であれば制御工学では実用の範囲と判断する。他の制御用パラメータ（立上り時間，立下り時間，立上り整定時間，立下り整定時間）も実用上問題無い値となっている。肩義手の取付け台をより強度の高いものに変更し，肩義手の動きによる振動を少なくした。

今回のデータは過去の先輩のデータと比べる為，ストレッチ60で測定したものである。今回の改良により問題点をほぼ解決することが出来た。今後の課題としては，コップで水を飲む等の日常生活でよく使う動作パターンをコンピュータに記憶させ協調動作制御を，開発した肩義手で動作テストする。

次に，両腕が無い人が肩義手の手先を自然な態度で，ある目標点まで動かそうとするときを考える。患者さんが脳内の幻肢を動かそうとすると，残存した鎖骨と頭の方角が動く。その動きをセンサーで捉えることにより開発した肩義手で顔面方位制御方式を用いた協調動作制御システムの実現に向けて研究を続ける。

6. 謝辞

本研究にあたって電子工学セミナーで実験に協力してくれた竹内博希君，林直人君，前田悠哉君に感謝します。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。

7. 参考文献

- 1) 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”，研究紀要,第 1 号,p.131-138 (2010)
- 2) 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)
- 3) 木下敏治，百々裕輝，平田一真：“エネルギー変換効率の良い RCB-4HV と IMU-Z を用いた 6 自由度柔軟関節肩義手(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 3 号,p.87-107 (2012)
- 4) 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 1.45 kg)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
- 5) H24_特別実験演習 I 前期レポート
平田一真
- 6) H24_特別実験演習 I 後期レポート
平田一真