

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

木下 敏治* 平田 一真** 坂井 剛士*** 篠原 稜****

Improvement of the high torque flexible Shoulder Disarticulation Prosthesis (SDP) (Robot Arm) with six degrees of freedom.

Toshiharu KINOSHITA , Kazuma HIRATA , Tsuyoshi SAKAI , Ryo SINOHARA

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 improved model flexible joint SDP (Flexible joint Robot Arm 1.52Kg) can make by new vibration control theory. θ_2 aluminum channel changed carbon channel. Thrust bearing is used θ_1 . 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、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が、一方で電動式肩義手は実用化が遅れている。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

*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

***四国電力

****金沢工業大学電気電子工学科

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方式を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。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。今年度は、一番トルクがかかる θ_2 のリンク部分をアルミチャンネルからカーボンチャンネルに変更し θ_1 にスラストベアリングを用いた。材料を変更し、減衰係数を大きくして振動を減少させることに取り組んだ。



図 1.1. RCB-4HV

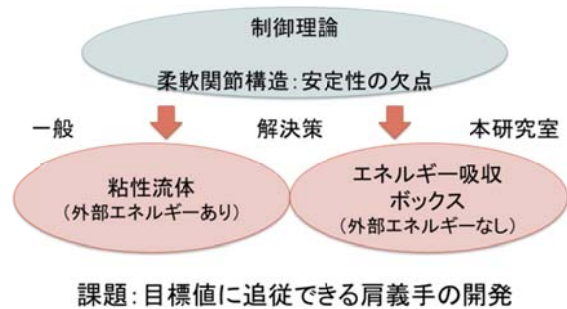


図 1.2. 研究の概略図

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。

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てい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。 $\theta 1$ から $\theta 4$ 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%)合金に変えず、外枠の Al-Mg(0.2-0.8%)合金も厚さ 1.5mm の弾性変形の大きな構造に変えず、柔らかいアルミチャンネルを用いてモータ部と外枠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 $\theta 5$ 、 $\theta 6$ 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、 $\theta 2$ と $\theta 3$ 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。

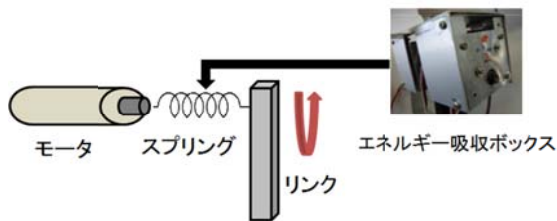


図 1.3 柔軟関節のモデル

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。

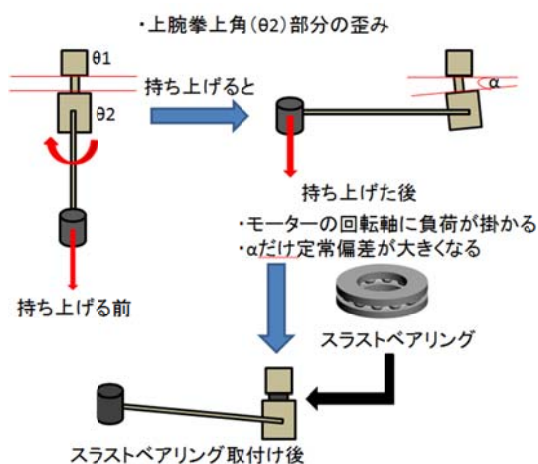


図 1.4 スラストベアリングによる強度問題の解決案

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、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 $\theta 2$ のポテンショ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。本研究の続きは同じ研究紀要の「新しい 6 自由度柔軟関節肩義手の開発」に示す。その結果、定常偏差は $\pm 5\%$ 以内におさまり、制限時間も負荷 500g で 120° から 0° に $\theta 2$ 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是非常に大きい。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

本研究は、2009 年度設計製作した柔軟関節 6 自由度肩義手を用いて、制御ボードを M P2 から約 100 倍の通信速度を持つ RCB-4H V に変更し、ステップ応答波形から制御工学の各種パラメータを測定し、柔軟関節構造を持つ肩義手(ロボットアーム)における課題である手先の振動が止まっている事が確認できた。しかし動作を繰り返す中で肩義手本体の強度問題点も明らかになってきた。そこで今年度は、新しい肩義手を製作することにした。肩義手の問題点を分析、原因を特定し、そこから今回製作する新しい肩義手に用いるカーボンチャンネルを 2009 年度製作の肩義手の上腕拳上部に取り付けてステップ応答負荷実験を行い手先の振動が止まっている事を回転式ポテンショメータとデータロガー GL900 にて確認した。また、スラストベアリングを上腕回旋部とエネルギー吸収ボックスの間に挟み込みカーボンチャンネルと同様にステップ応答負荷実験を行った。その際に定常偏差が 3 度程増えてしまったためサーボモータ KRS-6003HV のパラメータ内のひとつストレッチを変化させステップ応答波形がどの様に変化するかを調べた。そしてカーボン製チャンネルとスラストベアリングを用いて改良した肩義手を製作し動作させることに成功した。

2.2. 改良した実験用肩義手

2009 年度製作の肩義手にスラストベアリング(図 2.1)を上腕回旋部とエネルギー吸収ボックスの間に取り付ける。取り付け方法は図 2.2 の様に通常 (M2.6-6mm) より長い M

2.6・12mm のネジでエネルギー吸収ボックスとスラストベアリングを共締めして取り付けしている。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ている。



図 2.1 スラストベアリング

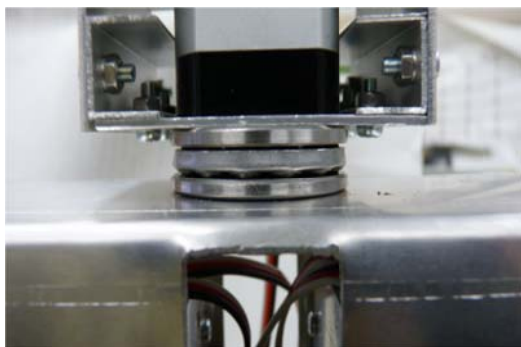


図 2.2 取り付けしたスラストベアリング

2.3. 改良した肩義手

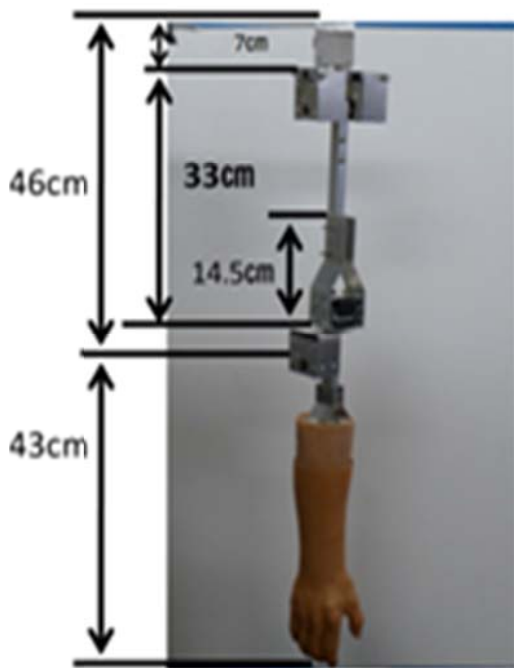


図 2.3 2009 年度製作の肩義手

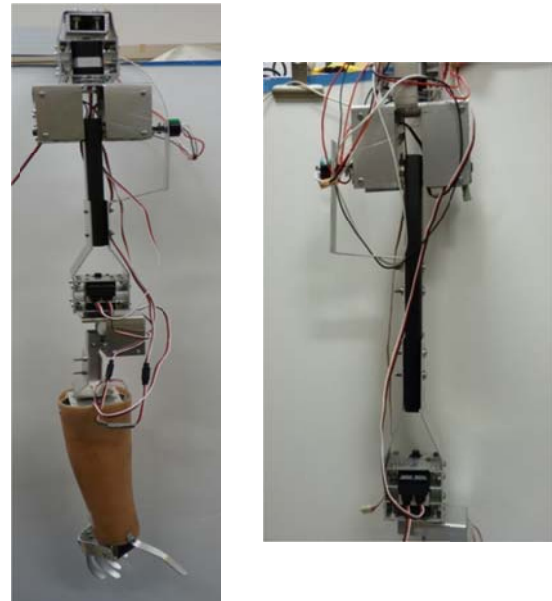


図 2.4 2013 年度製作の肩義手

図 2.3 が 2009 年度製作した肩義手である。そして図 2.4 が今回改良して新しく製作した肩義手である。

2.4. 肩義手のシステム構成

2.4.1. 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 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。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 100 倍程度になり、高性能である。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。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。

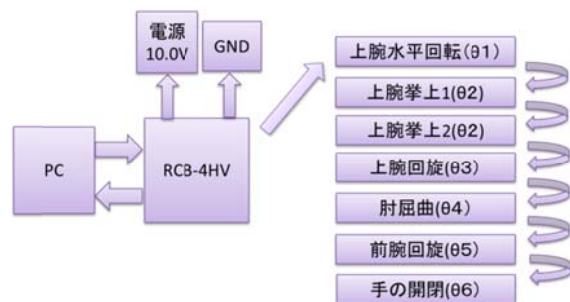


図 2.5 シリアル制御方式を用いた RCB-4HV のシステム構成 (数珠つなぎ)

2.4.2. RC サーボモータの特徴

θ_1 から θ_5 には 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。モータから出る指先の骨組を完成させてからグローブを被せるやり方をとったが, 今回の実験ではグローブを外して水の入ったペットボトルをゴムバンド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。産業用ロボットアームとして $\pm 135^\circ$ まで使用可能な θ_2 の大量データをGL900で測定したため, 本実験を始める前にRCサーボモータのアルミ製サーボホーン部とアルミ板の接合部分にワッシャを二枚重ね1mmの高さ合わせを行った。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。



2.6 高トルクなシリアル RC サーボモータ 6003HV



図 2.7 小型軽量なシリアル RC サーボモータ 4034HV

図 2.6 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。このトルクは最大 $67\text{kg}\cdot\text{cm}$ 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 2.7 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。

2.4.3. RC サーボモータの通信速度

通信速度が 1.25Mbps に対応する RCB-4HV を使用した。以下に設定の仕方を示す。

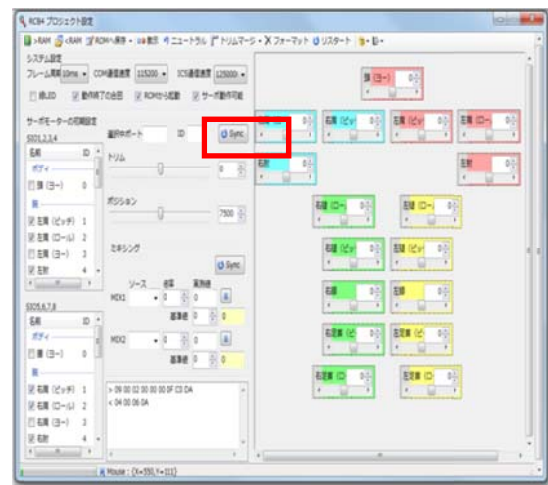


図 2.8 HeartToHeart4 設定画面

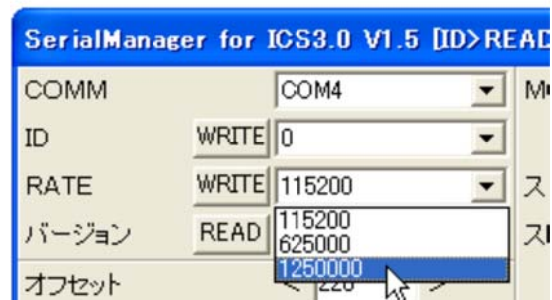


図 2.9 SerialManager151 設定画面

- ① C:\ProgramFiles\HeartToHeart4\HeartToHeart4.exe を起動する。
- ② コントロールボックスでボードを接続したポートを指定する(COM4)。
- ③ ファイル - 新規作成 - プロジェクトで任意の名前のプロジェクトを作成。
- ④ プロジェクトタブのプロジェクトの設定を選択し, 設定ウィンドウを表示させる。
- ⑤ 赤丸の所の ICS 通信速度を 1250000 に変更し, プロジェクトファイルを保存する。

- ⑥ SerialManager151.exe を起動する。
- ⑦ RATE を 125000bps に変更し、WRITE を押すと書き込まれる。
- ⑧ 書き込みボタンを押して保存する。

2.4.4. 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。

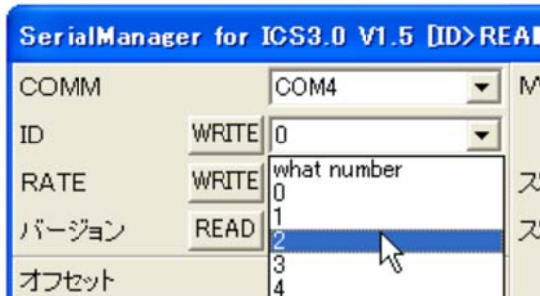


図 2.10 ID の設定画面

- ① SerialManager151.exe を起動する。
- ② ID の what number を選択すると、現在の ID の情報が表示される。
- ③ ID 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。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。



図 2.11 Rcb4CommandGenerator の設定画面

2.4.5. RC サーボモータの制御方法

昨年まではモーションプロセッサ 2HV(M P2) コントロールボードで肩義手とパソコ

ンを接続し、MP2Editor で制御した。今年には Rcb4CommandGenerator で肩義手を制御する。図 2.11 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。

3. 制御パラメータについて

制御パラメータとは、定常偏差、立上り時間、立下り時間、立上り整定時間、立下り整定時間のことを総称している。

まず定常偏差について説明する。定常偏差とは目標角と肩義手 ($\theta 2$) の RC サーボモータが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。

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

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。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る時の 90%~10% に対する時間を立下り時間という。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 1 つめの振動波形の最大値までの時間を整定時間とした。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上記の条件で整定時間を求めた。

4. 実験方法

4.1. スラストベアリングに関する実験

$\theta 2$ 部分に 340° で 5V に達する回転式ポテンシオメータ (図 4.1) とデータロガー G L900 (図 4.3) を用いて腕を伸ばしきった状態で $\theta 2$ を 30° , 60° , 90° , 120° を各 5 回

振り上げてステップ応答波形を測定した。測定波形より制御工学の各種パラメータ(立上り時間, 立下り時間, 定常偏差, 立上り整定時間, 立下り整定時間)を求めた。また, 0, 100, 200, 300, 400, 500 g の水の入ったペットボトルを手先に持たせて負荷としている。そして肩義手においてスラストベアリングが使用可能であるか調べた。図 4.2 に $\theta 2$ 部分に取り付けた回転式ポテンシオメータの写真を示す。緑測器の CP2FB(b) である。図 4.3 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 $10 \mu s$ で測定する。

角度の設定は Rcb4CommandGenerator (図 2.11)で行う。7500 をホームポジションとしており, 以下の通りの数値を入力する。

30° : 8389, 60° : 9278, 90° : 10167,
120° : 11056



図 4.1 回転式ポテンシオメータ



図 4.2 ポテンシオメータ取付け部



図 4.3 GRAPHTEC midi LOGGER GL 900

4.2. KRS-6003HV のストレッチに関する実験

4.2.1. ストレッチとは

ストレッチの値が小さいとき負荷がかかった場合, サーボの出力が最大になる位置が, 目標値(指令値)から離れ, ストレッチの値を大きくするとサーボの出力が最大になる位置が, 目標値に近くなる。スラストベアリングの実験にて定常偏差がスラストベアリングなしの場合に比べ約 3 度ほど大きくなってしまったためストレッチを変えステップ応答波形を測定した。肩義手の仕様はスラストベアリングの実験と同じである。

- ・ストレッチ **HARD(a)** → サーボの出力が最大になる位置が, 目標値に近くなります。
- ・ストレッチ **SOFT(b)** → 負荷がかかったとき, サーボの出力が最大になる位置が, 目標値(指令値)から離れます。

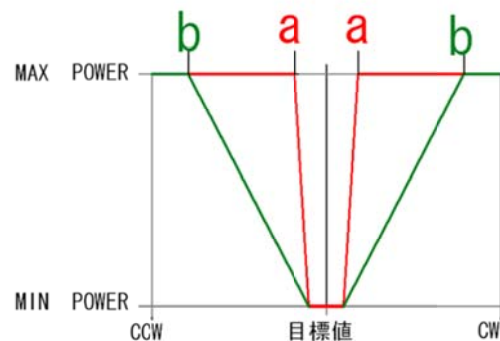


図 4.4 ストレッチに関する説明図 1
目標値に近いところで負荷と保持力が均衡

例えストレッチが最大 127 であっても設定画面で最大電流や最大温度設定の関係で RC サーボモータに必要な電流が供給されなければ目標値まで動作できない。

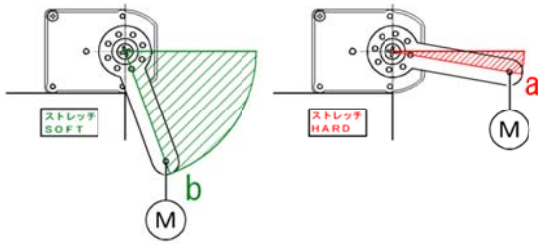


図 4.5 ストレッチに関する説明図 2
目標値から離れたところで負荷と保持力が
均衡

4.2.2. 実験方法

スラストベアリングに関する実験と同様に $\theta 2$ 部分に 340° で $5V$ に達する回転式ポテンショメータ (図 4.1) を取り付け、腕を伸ばしきった状態で $\theta 2$ を $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ を各 5 回振り上げてステップ応答波形を測定した。測定波形より制御工学の各種パラメータ (立上り時間, 立下り時間, 定常偏差, 立上り整定時間, 立下り整定時間) の平均値を求めた。

負荷は何も持たせず, $\theta 2$ 部分の 2 個のサーボモータ KRS-6003HV のストレッチを 60, 80, 100, 127 と変化させて測定した。

- スピード **SLOW** → サervoの最大トルクが下がり, 最大スピードが遅くなります。
- スピード **FAST** → サervoの最大トルクが上がり, 最大スピードが速くなります。

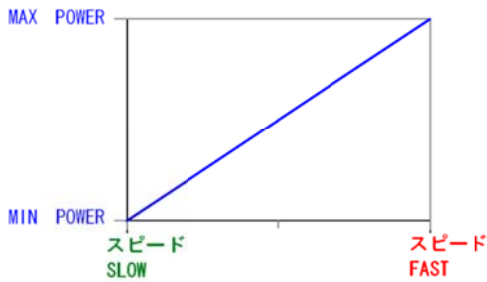


図 4.6 ストレッチのスピードについて



図 4.7 SerialManager151 設定画面の一例

実際にはストレッチ 60 で最高電流, 最高温度を中の状態にして測定した。

5. 実験結果

5.1. スラストベアリングの効果

測定したステップ応答波形より計測した各種パラメータを以下に示す。

5.1.1. 定常偏差

負荷	定常偏差(度)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
負荷なし	7.152	6.5112	5.3808	3.5432
100g	7.8728	7.4496	6.6456	5.42
200g	8.1312	8.0072	7.1352	5.8144
300g	8.0088	8.3064	7.3256	5.3656
400g	8.0496	8.6192	7.6384	6.6168
500g	8.0632	9.0136	7.992	15.3344

図 5.1 定常偏差 スラストベアリングあり
のデータ

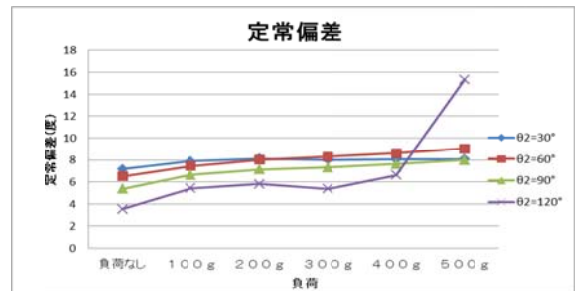


図 5.2 定常偏差 スラストベアリングあり

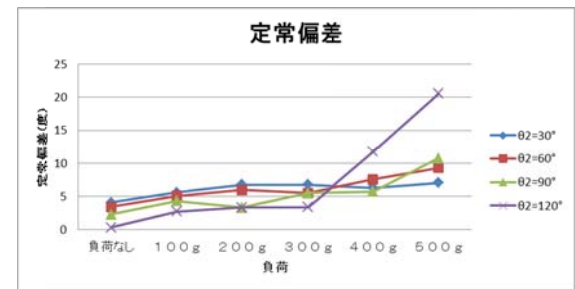


図 5.3 定常偏差 スラストベアリングなし

5.1.2. 立上り時間

負荷	立上り時間(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
負荷なし	0.1942	0.3028	0.4246	0.579
100g	0.2306	0.3288	0.4644	0.6384
200g	0.2502	0.3556	0.4972	0.6902
300g	0.2718	0.3694	0.52	0.7546
400g	0.2664	0.3816	0.553	0.7856
500g	0.2848	0.3908	0.57	0.7742

図 5.4 立上り時間 スラストベアリングあり
のデータ

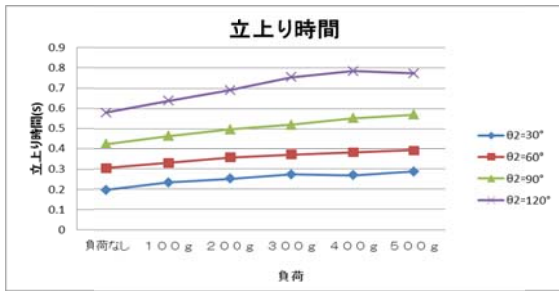


図 5.5 立上り時間スラストベアリングあり

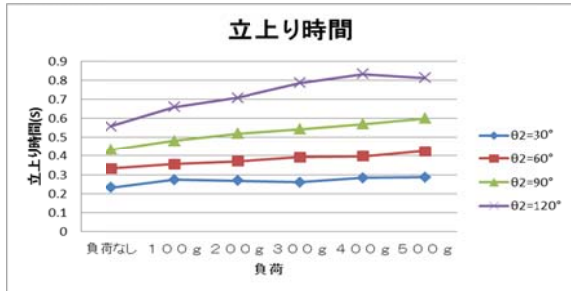


図 5.6 立上り時間スラストベアリングなし

5.1.3. 立下り時間

負荷	立下り時間(S)			
	θ2=30°	θ2=60°	θ2=90°	θ2=120°
負荷なし	0.2238	0.2744	0.3238	0.3766
100g	0.2372	0.2908	0.3374	0.4016
200g	0.243	0.3056	0.3594	0.409
300g	0.2706	0.321	0.3678	0.41
400g	0.2802	0.3296	0.37	0.416
500g	0.3038	0.3346	0.375	0.4126

図 5.7 立下り時間スラストベアリングありのデータ

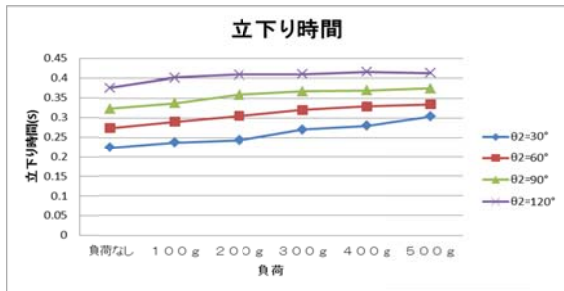


図 5.8 立下り時間スラストベアリングあり

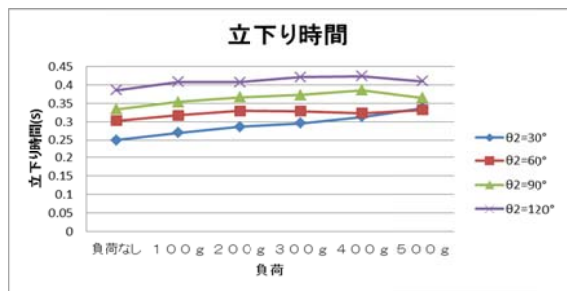


図 5.9 立下り時間スラストベアリングなし

5.1.4. 立上り整定時間±2%

負荷	立上り整定時間±2%(S)			
	θ2=30°	θ2=60°	θ2=90°	θ2=120°
負荷なし	0.6	0.6574	0.7804	0.9824
100g	0.6694	0.6842	0.819	1.0602
200g	0.6742	0.6586	0.8418	1.1504
300g	0.677	0.7124	0.8832	1.2284
400g	0.6554	0.7208	0.9158	1.2146
500g	0.6354	0.7696	0.9498	1.2516

図 5.10 立上り整定時間±2% スラストベアリングありのデータ

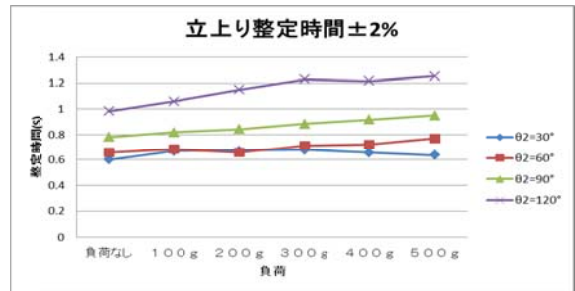


図 5.11 立上り整定時間±2% スラストベアリングあり

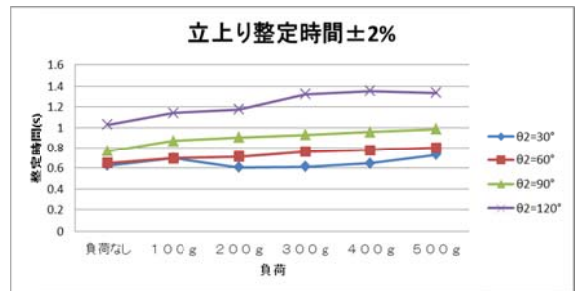


図 5.12 立上り整定時間±2% スラストベアリングなし

5.1.5. 立上り整定時間±5%

負荷	立上り整定時間±5%(S)			
	θ2=30°	θ2=60°	θ2=90°	θ2=120°
負荷なし	0.4722	0.5914	0.7804	0.9824
100g	0.5232	0.6204	0.819	1.0602
200g	0.5708	0.6516	0.8418	1.1504
300g	0.5676	0.7124	0.8832	1.2284
400g	0.5868	0.7208	0.9158	1.2146
500g	0.6354	0.7696	0.9498	1.2516

図 5.13 立上り整定時間±5% スラストベアリングありのデータ

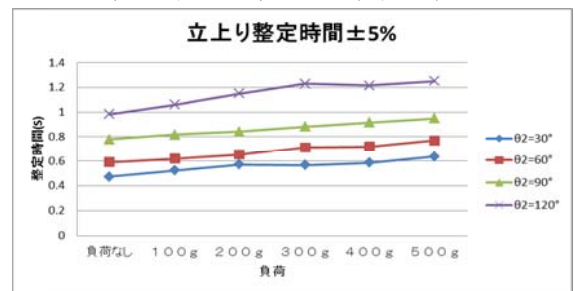


図 5.14 立上り整定時間±5% スラストベアリングあり

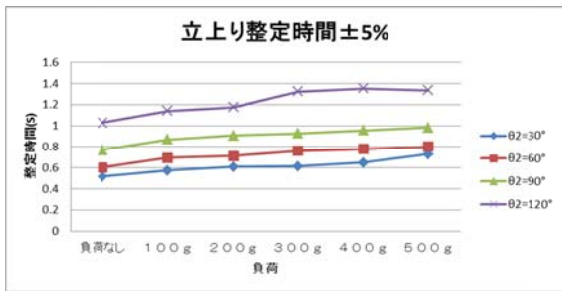


図 5.15 立上り整定時間±5%
スラストベアリングなし

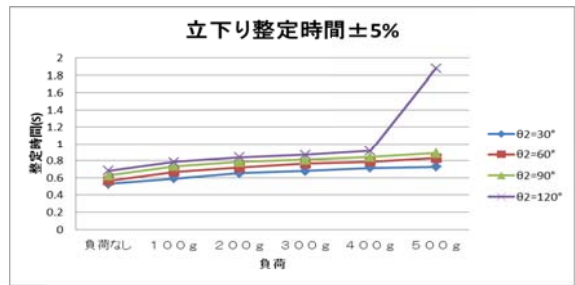


図 5.20 立下り整定時間±5%
スラストベアリングあり

5.1.6. 立下り整定時間±2%

負荷	立下り整定時間±2%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
負荷なし	0.6458	1.779	1.8144	2.1764
100g	0.7482	1.584	1.6114	2.5218
200g	0.8096	2.1068	2.693	2.717
300g	0.8478	2.8458	2.809	2.8372
400g	0.8724	2.9784	3.3254	4.0492
500g	1.6066	3.0988	4.151	4.8654

図 5.16 立下り整定時間±2%
スラストベアリングありのデータ

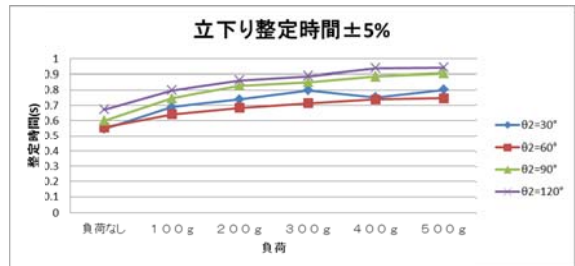


図 5.21 立下り整定時間±5%
スラストベアリングなし

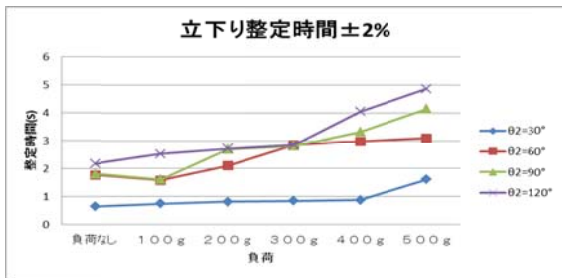


図 5.17 立下り整定時間±2%
スラストベアリングあり

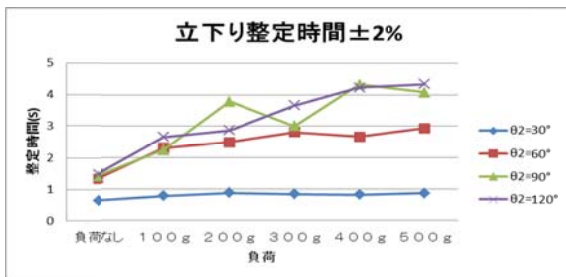


図 5.18 立下り整定時間±2%
スラストベアリングなし

5.1.7. 立下り整定時間±5%

負荷	立下り整定時間±5%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
負荷なし	0.5266	0.5634	0.6258	0.6818
100g	0.5884	0.6684	0.7338	0.7818
200g	0.651	0.7168	0.7812	0.8386
300g	0.6778	0.7642	0.8106	0.8668
400g	0.7132	0.7874	0.8418	0.9124
500g	0.7256	0.8276	0.8864	1.8768

図 5.19 立下り整定時間±5%
スラストベアリングありのデータ

5.2. ストレッチの変化が与える効果

5.2.1. 定常偏差

ストレッチ	定常偏差(度)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	7.152	6.5112	5.3808	3.5432
80	7.3152	7.8712	7.7608	6.916
100	7.084	7.8848	7.8424	6.8344
127	7.356	7.6808	7.6792	7.1064

図 5.22 定常偏差

5.2.2. 立上がり時間

ストレッチ	立上がり時間(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.1942	0.3028	0.4246	0.579
80	0.2016	0.3048	0.4296	0.5698
100	0.1996	0.3104	0.4206	0.5682
127	0.2024	0.3064	0.4174	0.5694

図 5.23 立上がり時間

5.2.3. 立下がり時間

ストレッチ	立下り時間(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.2238	0.2744	0.3238	0.3766
80	0.2104	0.272	0.3242	0.3848
100	0.2294	0.275	0.329	0.3854
127	0.2184	0.2754	0.3296	0.3806

図 5.24 立下り時間

5.2.4. 立上り整定時間±2%

ストレッチ	立上り整定時間±2%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.6	0.6574	0.7804	0.9824
80	0.5856	0.634	0.7334	0.8948
100	0.5858	0.624	0.7326	0.9888
127	0.5724	0.6368	0.7338	0.9848

図 5.25 立上り整定時間±2%

5.2.5. 立上り整定時間±5%

ストレッチ	立上り整定時間±5%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.4722	0.5914	0.7804	0.9824
80	0.4724	0.563	0.734	0.8948
100	0.4678	0.5636	0.7326	0.9888
127	0.4646	0.5702	0.7338	0.9848

図 5.26 立上り整定時間±5%

5.2.6. 立下り整定時間±2%

ストレッチ	立下り整定時間±2%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.6458	1.779	1.8144	2.1764
80	2.067	2.1856	2.0732	2.1958
100	1.3692	2.0568	2.2478	2.172
127	2.0892	2.808	2.8404	2.9566

図 5.27 立下り整定時間±2%

5.2.7. 立下り整定時間±5%

ストレッチ	立下り整定時間±5%(S)			
	$\theta 2=30^\circ$	$\theta 2=60^\circ$	$\theta 2=90^\circ$	$\theta 2=120^\circ$
60	0.5266	0.5634	0.6258	0.6818
80	0.5168	0.5306	0.5836	0.6794
100	0.5066	0.5272	0.591	0.6746
127	0.4884	0.5336	0.5774	0.671

図 5.28 立下り整定時間±5%

制御の各パラメータをグラフ化したものを図 5.29～図 5.35 に示す。

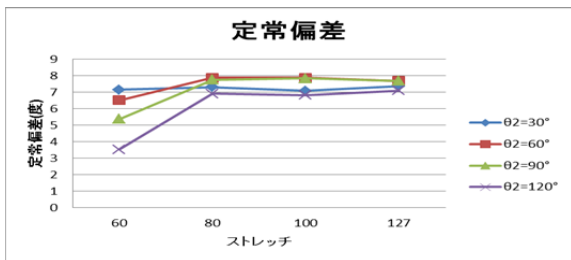


図 5.29 ストレッチの変化による定常偏差

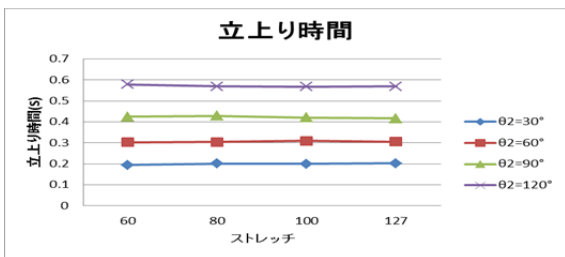


図 5.30 ストレッチの変化による立上り時間

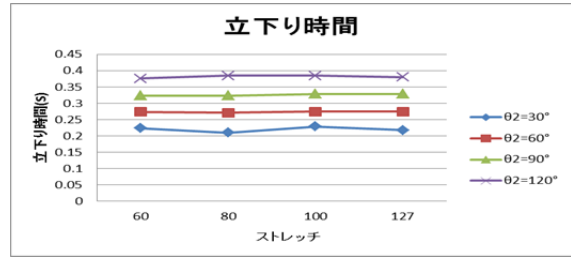


図 5.31 ストレッチの変化による立下り時間

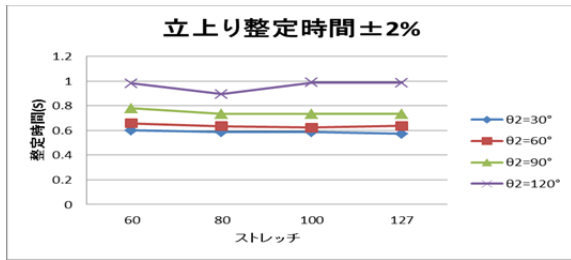


図 5.32 ストレッチの変化による立上り整定時間±2%

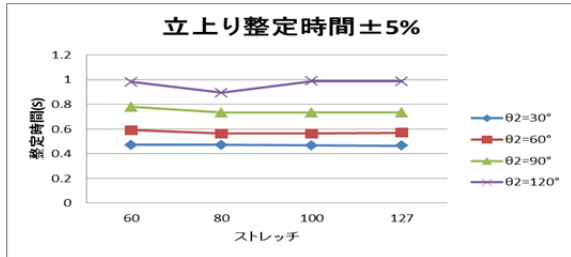


図 5.33 ストレッチの変化による立上り整定時間±5%

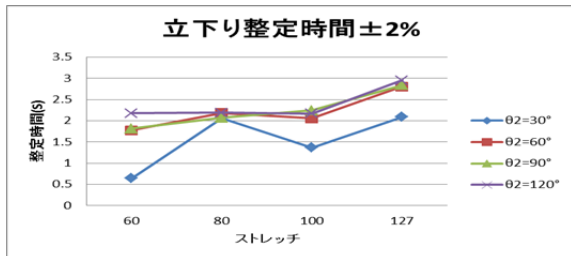


図 5.34 ストレッチの変化による立下り整定時間±2%

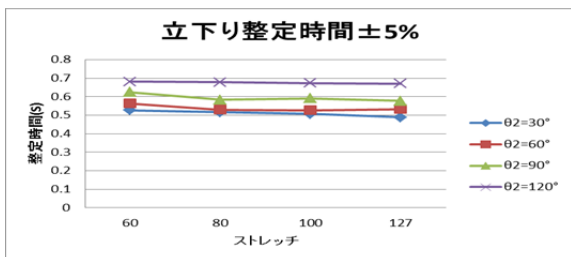


図 5.35 ストレッチの変化による立下り整定時間±5%

肩義手を動かした時のステップ応答波形を図 5.36 から図 5.38 に示す。

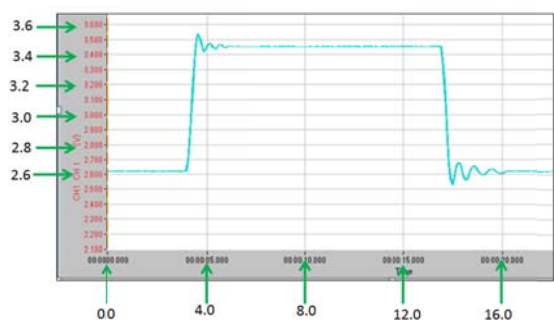


図 5.36 $\theta_2 = 60^\circ$ 負荷なしの時のステップ応答波形

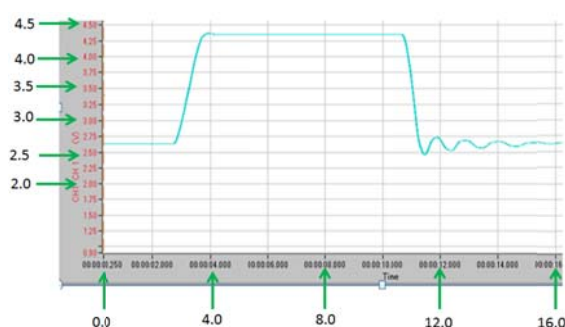


図 5.37 $\theta_2 = 90^\circ$ 負荷 200 g の時のステップ応答波形

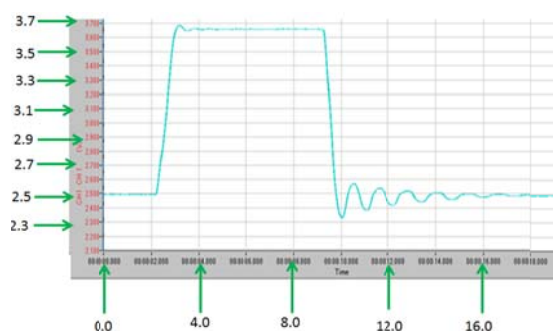


図 5.38 $\theta_2 = 90^\circ$ 負荷 400 g の時のステップ応答波形

6. まとめ, 考察

スラストベアリングの実験に関して立上り時間, 立下り時間等スラストベアリングのありなしで大きな変化はないが定常偏差だけがスラストベアリング無しの時に比べ全体的に3度程大きくなっており, 理由が特定できずストレッチを60~127まで変化させたが効果がなかった。ストレッチの変化による各パラメータの値も大きな変化がなかった。この実験結果によりあらゆる条件下で手先の振動は静止していることが確認できた。問題点は定常偏差を±5%以内に収めることである。そのため肩義手(ロボットアーム)に使用しているアルミ板(マグネシウム, 0.2~0.8%)をより強度の強いアルミ板(マグネシウム, 2.2~2.8%)に変えて, モータの取り付け部にも改良を加える必要があること

を示している。本研究の続きは同じ研究紀要の(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)の開発)に詳しく説明してある。新しい肩義手では, 実用化の目安になる定常偏差が±5%にほぼ収まっていた。

7. 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, 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。

8. 参考文献

- 1) 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)
- 2) 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
- 3) H24_特別実験演習I前期レポート
平田一真
- 4) H24_特別実験演習I後期レポート
平田一真
- 5) 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)
- 6) 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)