

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

木下 敏治* 百々 裕輝** 平田 一真***

A coordinated motion control system for energy-saving model flexible joint shoulder-disarticulation prosthesis (SDP, robot arm 1.45kg) with 6degrees of freedom using the IMU-Z and RCB-4HV.

Toshiharu KINOSHITA , Yuki DODO , Kazuma HIRATA

Abstract

In this paper, we propose a coordinated motion control system for energy-saving model flexible joint shoulder-disarticulation prosthesis (SDP, robot arm 1.45kg) with 6degrees of freedom using the IMU-Z and RCB-4HV. 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 IMU-Z motion sensors and potentiometers using the RCB-4HV Command Generator. A practical flexible joint SDP (Flexible joint Robot Arm 1.45Kg) can make by new vibration control theory. (Flexible Joint Robot Arm Control Kinoshita Theory was proposed by us and is called “FJRACK Theory”) A Rise time, A Fall time, Settling time and Steady-state deviation using control engineering is possible to solve it from the fundamental GL900's data and IMU-Z 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, SDP, Unit step response, Robot, RCB-4HV control circuit, IMU-Z motion sensors

1. まえがき

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

** 千葉大学工学部 電気電子工学科

*** 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

1)~9)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.13No.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。²⁶⁾²⁷⁾

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 (Google でキーワードを「柔軟関節ア

ーム」 と入力すると200万件から350万件の中で1 ページから3 ページ目に2011年度、2010年度の研究論文がアクセスされている。

トヨタ自動車の特許なども閲覧でき粘性流体の使用を確認できる。) 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。^{15)~27)}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と思われる。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。

もし、これが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されると思われる。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)~21)}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・トランジューサー)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¹²⁾ 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な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実用化することが目標である。

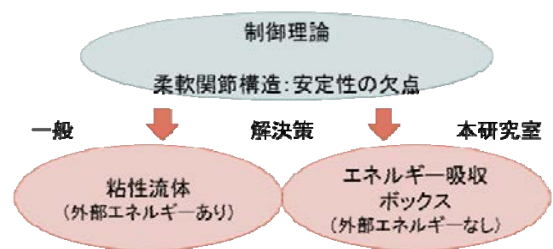
また、小型軽量なポテンシオメータを用いて肩の上腕挙上 θ_2 の値が、柔軟関節構造にすることによりどのような影響を受けているかを、GRAPHTECのGL900を用いてデータ化し、制御工学の各パラメータの値を測定した。

また、昨年度発表した香川高専研究紀要第2号(p167~p184)で示したモーションセンサZMP社のIMU-Zを用いて、ロボット本体の肩の姿勢角(θ_2)をリアルタイムで検出可能か検討するための基礎実験を行った。²⁷⁾ 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。

ロボット本体を軽量化できるため、製造コストは安くなり、ロボットの運転効率も高くなる。



図1.1. RCB-4HV



課題: 目標値に追従できる肩義手の開発

図1.2. 研究の概略図

2. 研究概要

本研究は、平成22年度に専攻科を卒業した山口君を指導して設計製作した柔軟関節6自由度肩義手を用いて、各種データを測定した。

コントロールボードもMP2シリアルサーボ制御で行っていたが、今回は通信速度が1.25Mbpsに対応するRCB-4HV(近藤科学製)に変更した。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($\theta 2$)を0度から120度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($\pm 2\%$)をポテンショメータとIMU-Z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、定常偏差は目標値の $\pm 5\%$ 以内に収まるデータは少ないが、モータの設定を標準とした場合のデータであるので、ストレッチなどの項目を高めることによりソフトウェアサーボにフィードフォワードを加えることにより、 $\pm 5\%$ 以内に目標値まで動作させることが可能であると考えられる。

そのため今回のデータ収集では、定常偏差が大きくても通常の制御工学で定義された各パラメータ(立上り時間、立下り時間、定常偏差、整定時間)を求めた。このデータにより、ストレッチを標準とした場合の負荷に対する変動も測定した結果、立上り時間や立下り時間があまり負荷に影響を受けていないことが分かった。

よって、モータの基本性能としては余力があると判断できる。

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6003HVの基本性能の設定の仕方、IMU-Zのキャリブレーションの仕方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。製作した6自由度肩義手の全体図を図2.1.で示す。実験用柔軟関節6自由度肩義手の仕様は下図のようになる。

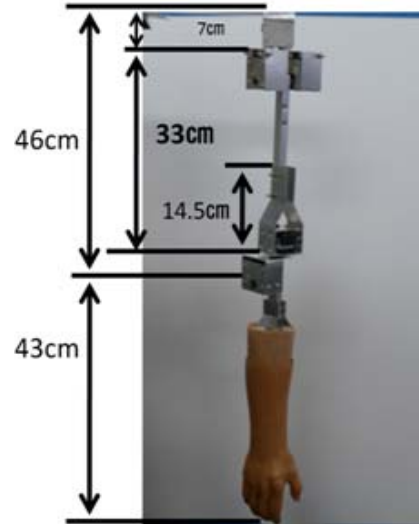
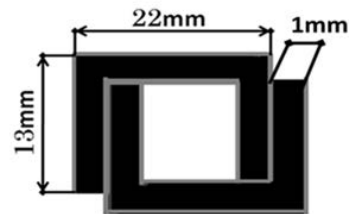


図2.1. 自由度肩義手の全体図



上腕挙上部の構造、同じアルミチャンネルを重ねて強度をあげている

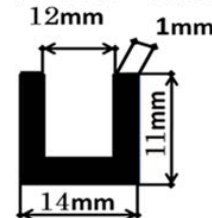


図2.2. エネルギー吸収ボックス用アルミチャンネル

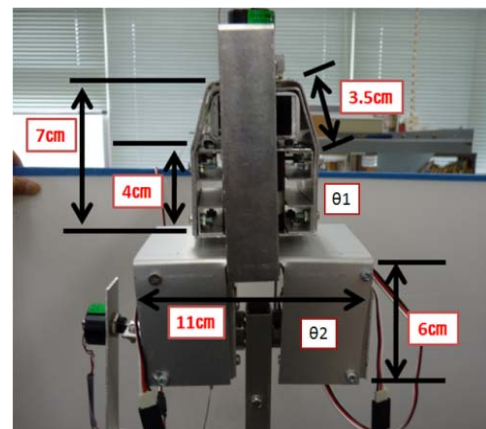


図2.3. 上腕水平回転($\theta 1$)と上腕挙上($\theta 2$)

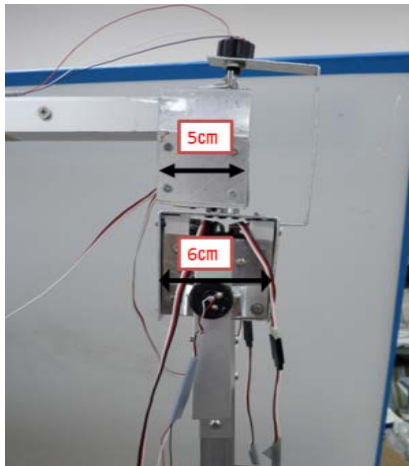


図2.4. 図2.3の横から写真

図2.3.と図2.4.に上腕水平回転角($\theta 1$)と上腕挙上角($\theta 2$)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2.5.～図2.9.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2.2.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。

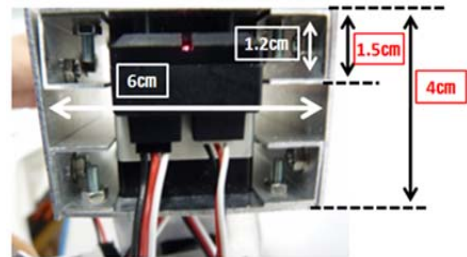


図2.6 下から上腕回旋($\theta 3$)を見た図

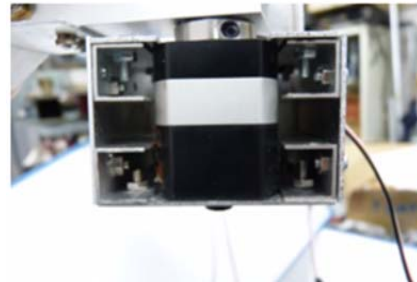


図2.7. 下から肘屈曲($\theta 4$)を見た図

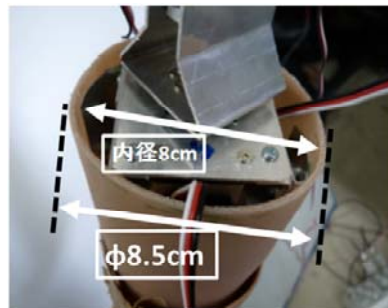


図2.8. 前腕回旋($\theta 5$)とソケットの取り付け方

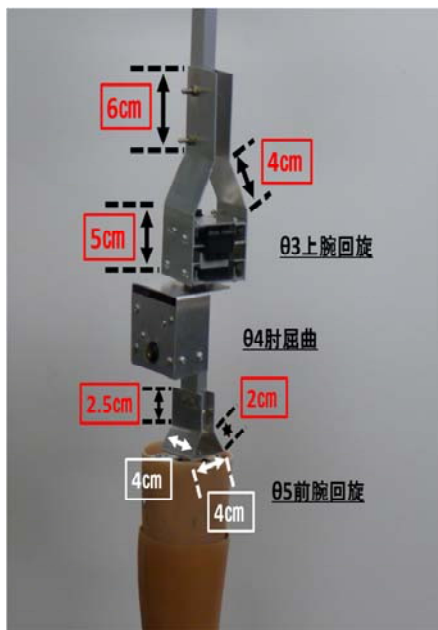


図2.5. $\theta 3$ ～ $\theta 5$ の拡大写真と寸法



図2.9. 手の開閉($\theta 6$)に佐藤技研のグローブを取り付けた

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。 $\theta 5$ 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-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参考文献¹⁶⁾に使用されている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。

それでも産業用ロボットアームとして $\pm 130^\circ$ まで使用可能な θ_1 、 θ_2 の大量データをGL900で測定するため、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213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2.10. 高トルクなシリアルRCサーボモータ
6003HV



図2.11. 小型軽量のシリアルRCサーボモータ
4034HV

図2.10.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2.11.はKRS-4034HV(トルク $14\text{kg}\cdot\text{cm}$ 、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の特性を生かした。モータの動作角は $\pm 135^\circ$ であり、最大回転角は 270° である。

2.1. 肩義手のシステム構成

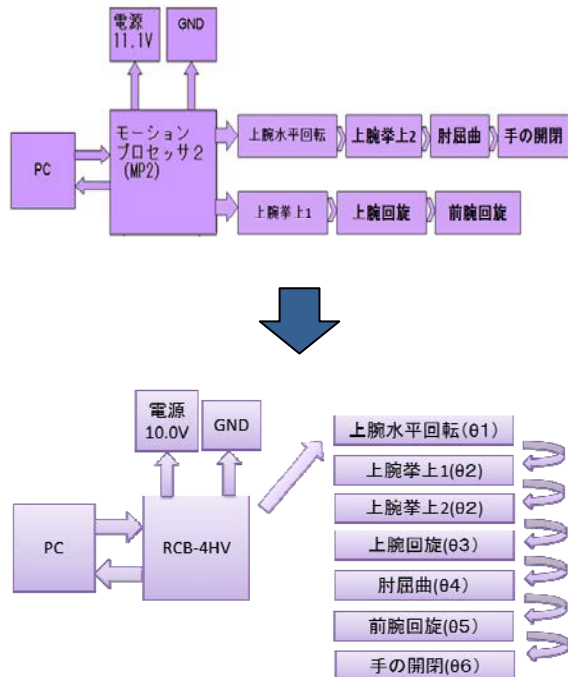


図2.12. シリアル制御方式を用いたRCB-4HVのシステム構成（数珠つなぎ）

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。

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 θ_1 から順にIDを設定する。

2.2. 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。

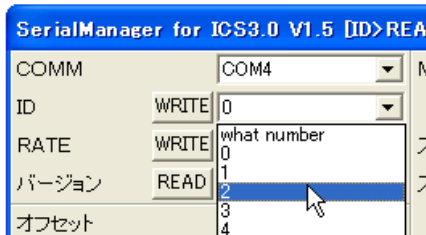


図2.13. IDの設定画面

- 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。

- θ 1 : ID 1
- θ 2 : ID 2
- θ 3 : ID 4
- θ 4 : ID 6
- θ 5 : ID 7
- θ 6 : ID 8

なお、θ 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。

2.3. RCサーボモータの通信速度

今回は通信速度が1.25Mbpsに対応するRCB-4HVを使用したので通信速度を変更した。以下に変更の仕方を示す。

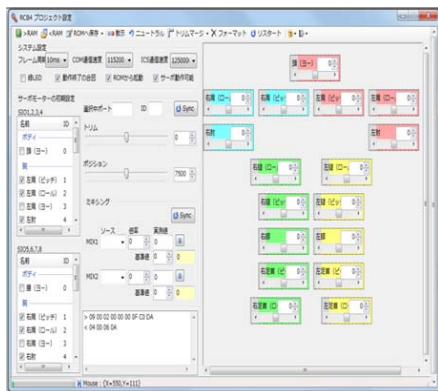


図2.14. HeartToHeart4設定画面

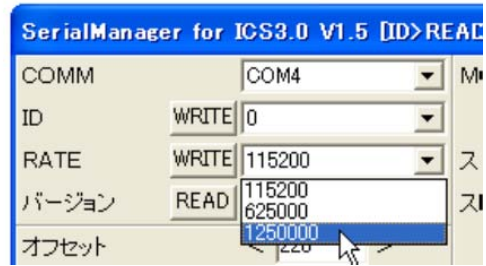


図2.15. SerialManager151設定画面

- 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1250000bps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. RCサーボモータの制御方法



図2.16. 制御用のスライドバー画面

昨年まではモーションプロセッサ2HV (MP2) 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。今後IMU-Zとの接続を考慮し今年にはMP2に比べ約100倍もの高速通信が可能なRCB-4HVのコントロールボードを用いてRcb4CommandGeneratorで肩義手を制御する。図2.16.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て $-4000(-135^\circ) \sim 4000(+135^\circ)$ 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.回転式ポテンシオメータの特性



図2.17. CP-2FB(b)の構造

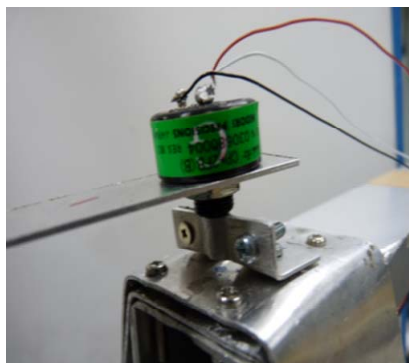


図2.18. CP-2FB(b)圧着の様子

図2.17.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2.18.には圧着の構造を示している。

3. 実験方法



図3.1. 回転式ポテンシオメータを θ_2 に取り付けた様子



図3.2. GRAPHTEC midi LOGGER GL900

θ_2 (上腕拳上)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(図3.2.)を用いて負荷として0~500gの水の入ったペットボトルを肩義手に持たせ θ_2 を $0 \sim 120^\circ$ 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。姿勢の条件を下に示す。

条件として θ_1 (上腕水平回転)、 θ_3 (上腕回旋)、 θ_4 (肘屈曲)を変える。

- $\theta_1=0^\circ$ $\theta_3=0^\circ$ $\theta_4=0^\circ$
- $\theta_1=0^\circ$ $\theta_3=0^\circ$ $\theta_4=90^\circ$
- $\theta_1=-40^\circ$ $\theta_3=0^\circ$ $\theta_4=0^\circ$
- $\theta_1=0^\circ$ $\theta_3=30^\circ$ $\theta_4=90^\circ$
- $\theta_1=0^\circ$ $\theta_3=50^\circ$ $\theta_4=90^\circ$
- $\theta_1=0^\circ$ $\theta_3=-50^\circ$ $\theta_4=90^\circ$

これらの条件は人間が日常的に行う動作を参考にしている。また振動しやすい条件にするため今年には肩義手を取り付けている台をしっかりと固定していない。

図3.2.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。

4. 実験結果と考察

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つまりこの場合であれば 120° である。この 120° 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。

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

そして目標の角度である 120° との差をとる。負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の時のステップ応答波形を例に挙げて説明する。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。そして全て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.に示す。

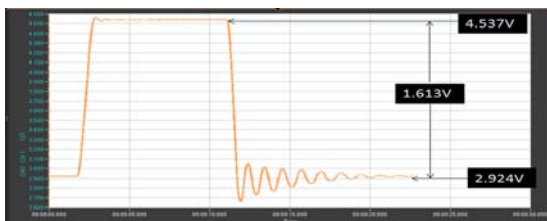


図4.1. 負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

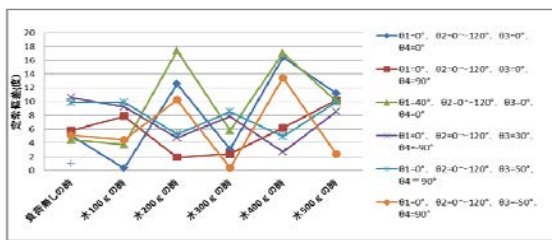


図4.2. 定常偏差

図4.2.のグラフより定常偏差は負荷に関係なく 0° から最大で 18° の範囲で収まっていることがわかる。この差分を埋めるプログラムを作成すれば定常偏差を 0° に近づけることが可能と思われる。

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。負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の時のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

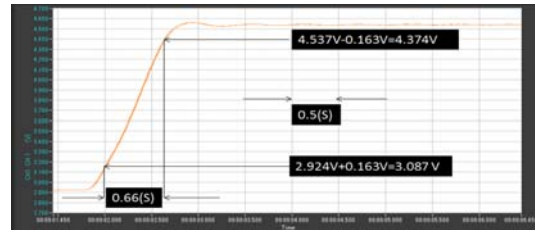


図4.3. 負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の立上り時

図4.3.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。そして全てのステップ応答波形から求めた立上り時間をまとめたグラフを図4.4.に示す。

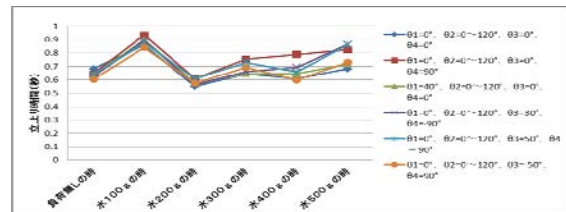


図4.4. 立上り時間

図4.4.のグラフより負荷に関係なく立上り時間は0.55秒~0.95秒の間で一定となっている。また100gの点で値が大きくなっているのはペットボトル内の水の重心が大きくなった事、つまり負荷の持たせ方の問題だと思われる。

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る時の90%~10%に対する時間を立下り時間という。

負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の時のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

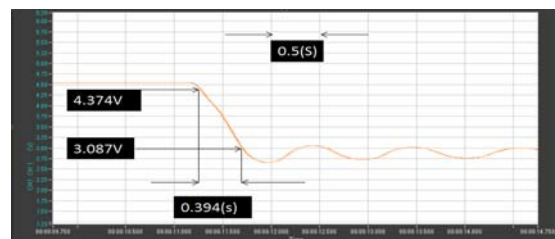


図4.5. 負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の立下り時間

図4.5.のステップ応答の立下りの時の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4.374V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。そして全てのステップ応答波形から求めた立上り時間をまとめたグラフを図4.6.に示す。

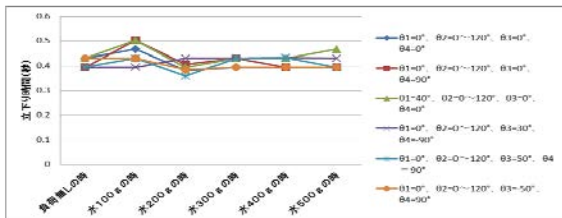


図4.6. 立下り時間

図4.6.のグラフより立下り時間は0.35秒の間から0.5秒の間で負荷に関係なく一定となっていることがわかる。そして立上がり時間のグラフで値が大きくなっていた100gの負荷の時を見ると立下り時間においても多少値が大きくなっている事がわかる。

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±2%や±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±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。

負荷500g、 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta_3=0^\circ$ 、 $\theta_4=90^\circ$ の時のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

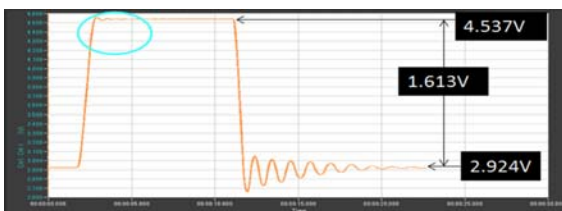


図4.7. 負荷500g、 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta_3=0^\circ$ 、 $\theta_4=90^\circ$

図4.7.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4.8.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±

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±2%の範囲に変化が収まっていることがわかる。

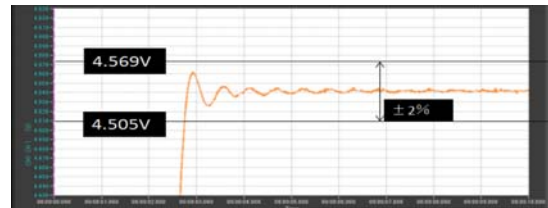


図4.8. ±2%の範囲

これより立上り整定時間は図4.9.に示すように1.0632秒となる。

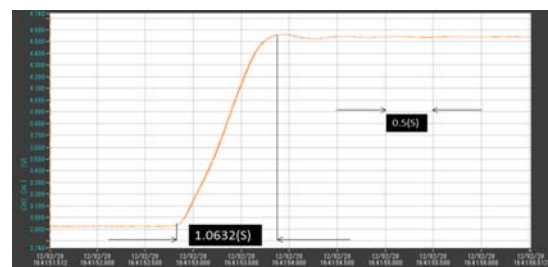


図4.9. 負荷500g、 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta_3=0^\circ$ 、 $\theta_4=90^\circ$ の立上り整定時間

そして全て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4.10.に示す。

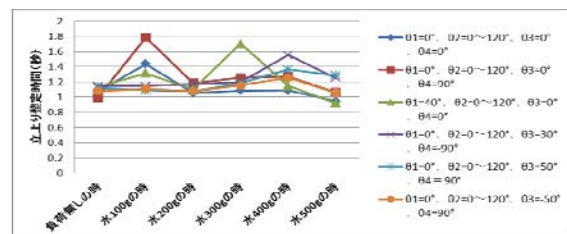


図4.10. 立上り整定時間

図4.10.のグラフより負荷を0～500gまで変化させ、また姿勢における肘を 90° や 0° と色々変化させ日常生活動作で肩義手が取りうる可能性のある姿勢での値を測定した。

最少0.9秒から最大1.8秒の間に収まっており、通常の使用において問題はない。

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±2%や±

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±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。負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の時のステップ応答波形を例に挙げて説明する。

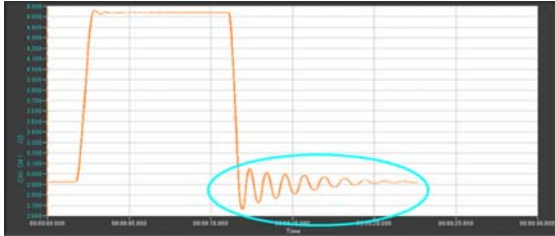


図4.11. 負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

立下った直後の赤丸の箇所を拡大したものを図4.12.に示す。また電圧差1.613Vの±2%の範囲を白線で示している。

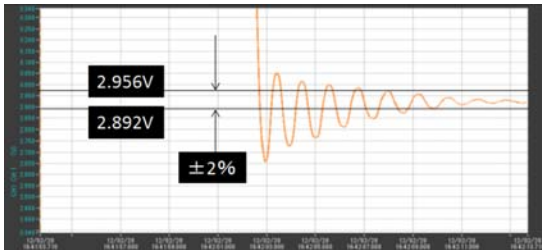


図4.12. ±2%の範囲

そして立下り始める時間から電圧差の±2%に入るまでの時間を図4.13.に示す。

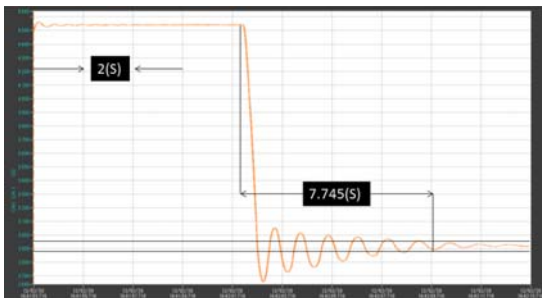


図4.13. 負荷500g、 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の立下り整定時間

図4.13.より立下り整定時間は7.745秒となる。また全て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4.14.に示す。

図4.14.のグラフより負荷が大きくなれば基本的に立下り整定時間は長くなっていることがわかる。

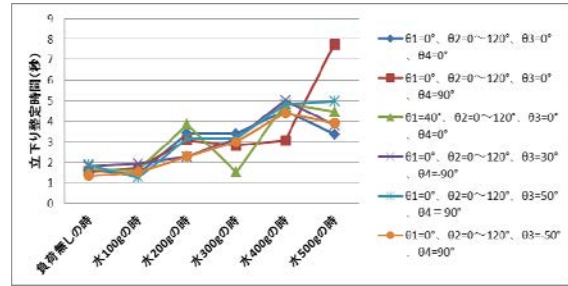


図4.14. 立下り整定時間

そして500gの姿勢 $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ における値が大きくなっている事がわかるが、これは肩義手を取り付けている台と共振して振動が収まるまでに時間がかかったと思われる。例として $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$ と $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$ の姿勢で $\theta 2$ を $0^\circ\sim 120^\circ$ まで変化させたときのステップ応答波形を図4.15.～4.26.に以下に示す。青線が $\theta 2$ の波形である。赤線は $\theta 1$ の波形なので今回は考察の対象外とする。

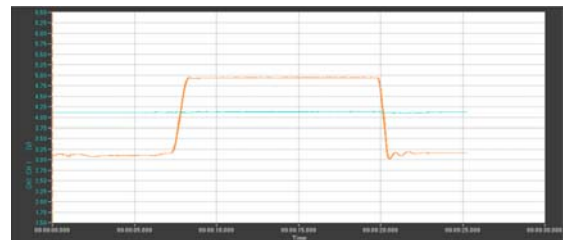


図4.15. 負荷無し $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

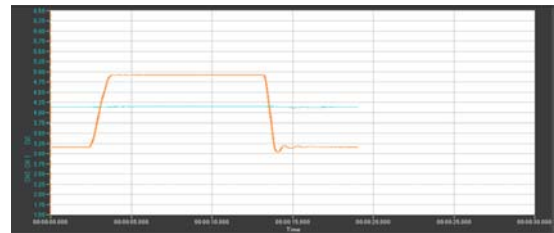


図4.16. 水100g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

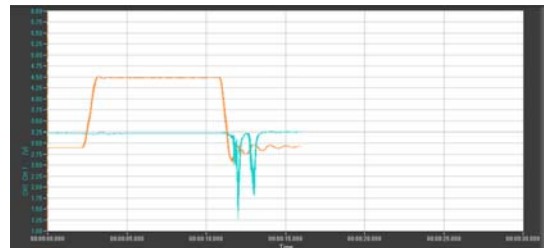


図4.17. 水200g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

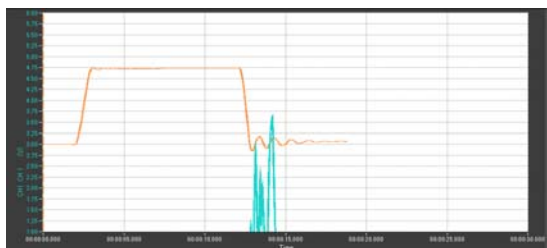


図4.18. 水300g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

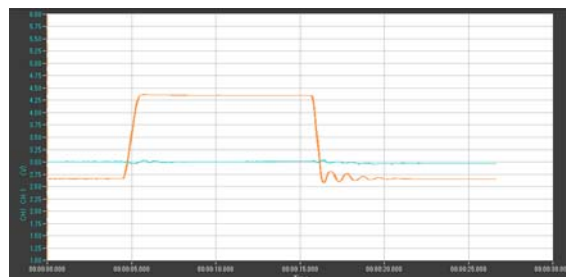


図4.23. 水200g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

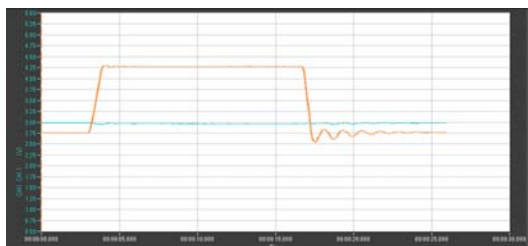


図4.19. 水400g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

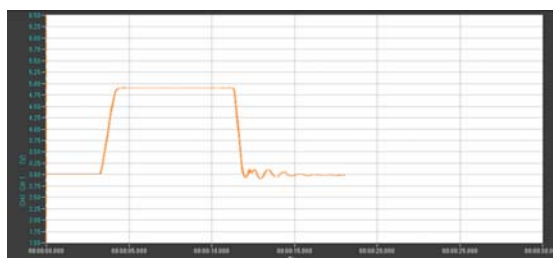


図4.24. 水300g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

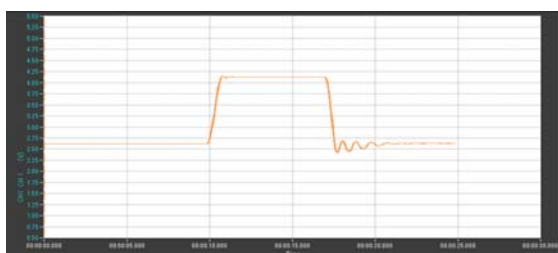


図4.20. 水500g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=0^\circ$ 、 $\theta 4=0^\circ$

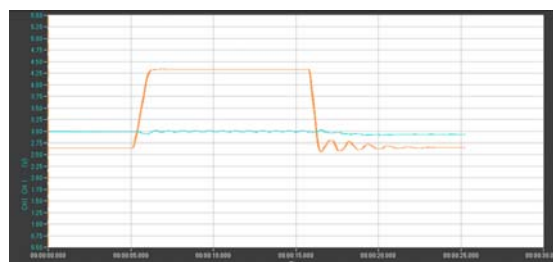


図4.25. 水400g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

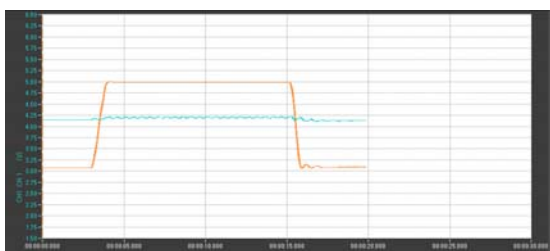


図4.21. 負荷無し $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

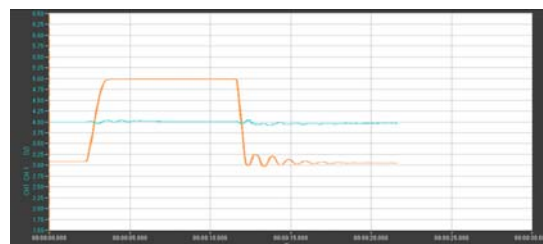


図4.26. 水500g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

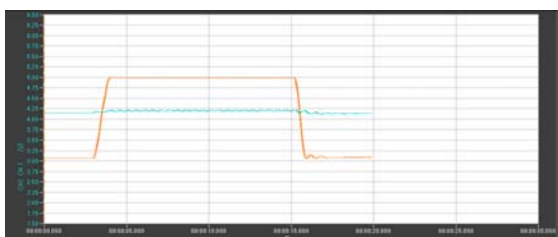


図4.22. 水100g $\theta 1=0^\circ$ 、 $\theta 2=0\sim 120^\circ$ 、 $\theta 3=50^\circ$ 、 $\theta 4=90^\circ$

エクセルデータに示す36種類のステップ応答波形のうち12個のステップ応答波形を示した。データよりわかるように持続振動は存在しておらず、制御するうえで最重要課題である安定な状態で手先が静止していることを示している。

5. IMU-Z

5.1 IMU-Zとは

本年度、ZMP社のe-nuvo IMU-Zというセンサを使用した。このセンサは軽量で小型なため、使用できれば装着者の負担が減るだろう。以下に詳細を示す。



図5.1. IMU-Zの外観

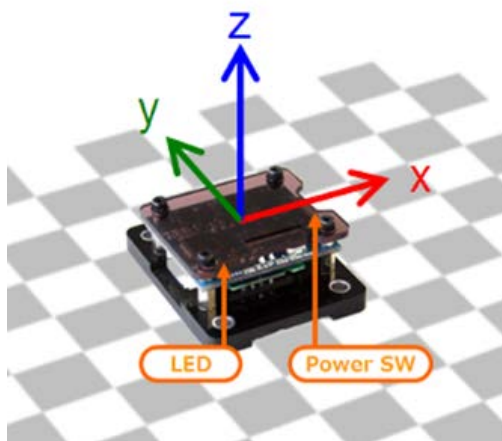


図5.2. IMU-Zの座標軸

特徴

- 9軸センサを1つにパッケージ
ジャイロ、加速度、地磁気と、タイプの異なるセンサを1パッケージに収めているためそれぞれの特徴を生かし、組み合わせることが可能。
- 小型軽量のモジュール
約4cm×約5cmの小型なため、人の手や足、ロボットや、そのほかの移動体などさまざまな場所にとりつけて使用可能。
- 最大28台まで同時利用
1システムに最大28台のIMU-Zが接続できる。人の体に多数のセンサをつけ、多くの点の動きを収集したり、群行動をするたくさんの物体などの計測が可能。
- Bluetoothによる無線接続と、USBによる有線接続

無線により、被験者の動作をしばらく手軽に測定したり、有線の接続により、電波の環境の厳しい場所でも信頼性の高い測定が可能。

表1に示すようにIMU-Zを使えば角速度、加速度、地磁気がXYZ方向の3種類かつ9つのデータが10msecごとに同時出力できる。図5.3.にCAN-USB(有線)の図を示す。

表1 IMU-Zの仕様

加速度センサ	3軸
角速度(ジャイロ)	3軸
地磁気	3軸
通信インターフェイス	Bluetooth CAN(USBポート)
サンプリング	10[msec]~10[sec]10[msec] 刻みで指定可能
サイズ	42[mm]×52.5[mm]×20.5[mm]
重量	35[g]
最大接続台数	28台

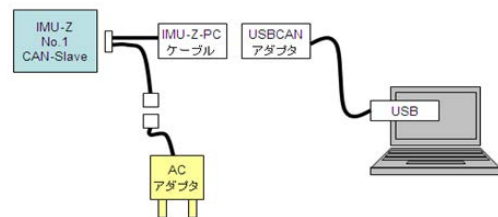


図5.3. IMU-Zとパソコンの接続図

5.1.1 原理

- 加速度計測
STMicroelectronics社の3軸加速度センサ(LIS331DHL)を使用。静電容量型加速度センサを用いている。温度変化において特性変化が少なく、量産性に優れているため、家庭用ゲーム機などにも使用されている。
- 方位計測
Honeywell社の3軸地磁気センサ(HMC5843)を使用。内部には12ビットのA/Dコンバータを使用。原理は、地上における地磁気の方角を北としその方向を磁気センサで検出。

・角速度計測

STMicroelectronics社の2軸角速度センサ（LPR550AL、LPY550AL）を使用。センサ内部には質量をもった弾性体がくみこまれていて、電気的に振動させられている。弾性体は外部から回転運動を受けると、それに比例したコリオリ力が発生。この力による弾性体の位置変化は静電容量の変化として観測できる。LPR550ALでXY軸、LPY550ALでZ軸の角速度を測定する。コリオリ力とは回転座標系上で移動した際に移動方向と垂直な方向に移動速度に比例した大きさで受ける慣性力的一种である。

5.1.2 付属アプリケーション

IMU-Zに付属のアプリケーションには、以下のようなものがある。

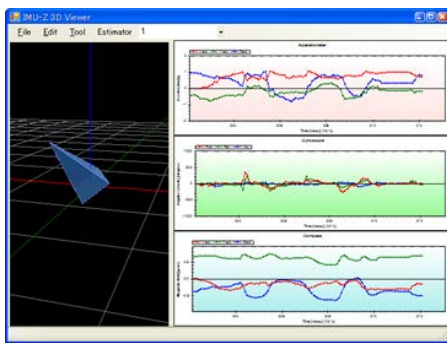


図5.4. 3D Viewer

1つのIMU-Zのデータをグラフで表示し、同時に3Dモデルを表示することのできるアプリケーション。グラフは上から加速度・ジャイロ・地磁気を表示している。

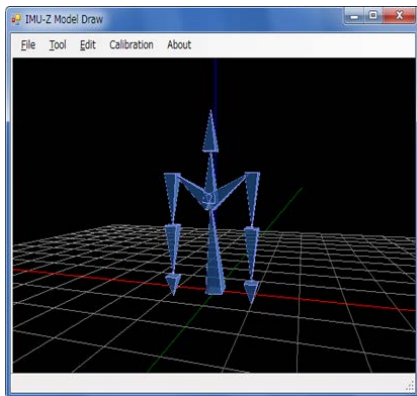


図5.5. Model Draw Application

ピラミッド型のパーツを組み合わせた上半身モデルを表示する。身体にIMU-Zを取り付けることで人の動きと画面上のモデルが同期して動く。また、接続するIMU-Zの数が1つでも、接続・設定したIMU-ZのノードIDに対応したパーツのみ動く。モデルは11個のパーツから構成されており、各パーツのノード番号は以下の通りである。

- Node 1:腰 Node 2:胸 Node 3:頭 Node 4:左肩
- Node 5:左上腕 Node 6:左下腕 Node 7:左手
- Node 8:右肩 Node 9:右上腕 Node 10:右下腕
- Node 11:右手

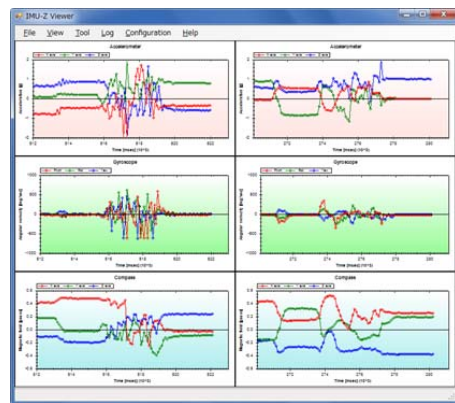


図5.6. IMU-Z Viewer

IMU-Zのデータを取得してグラフに表示する。また計測データをファイルに保存する、ログ機能がある。

また、開発用環境のSDKには他にも数種類のサンプルアプリケーションが付属しており、簡単な説明を行う。

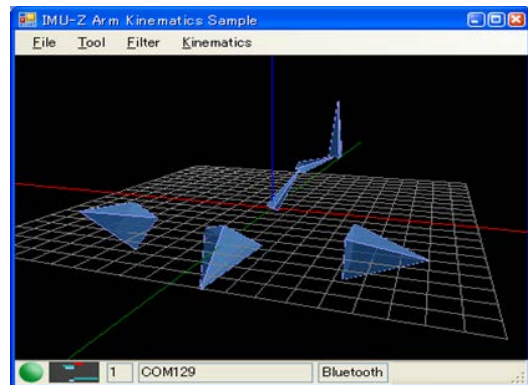


図5.7. ArmKinematicsSample

運動学表示のサンプル。3リンクのアームを表示

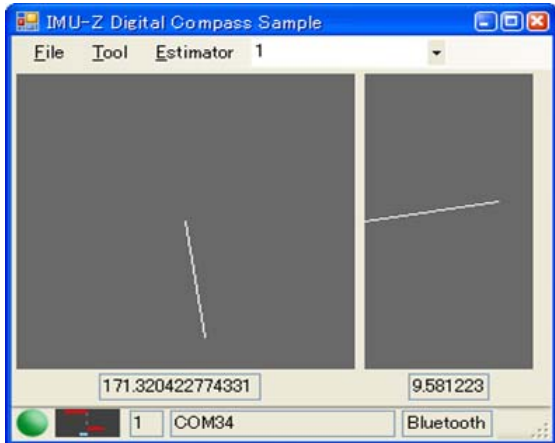


図5.8. DigitalCompassSample

地磁気センサから方角を計算するサンプル

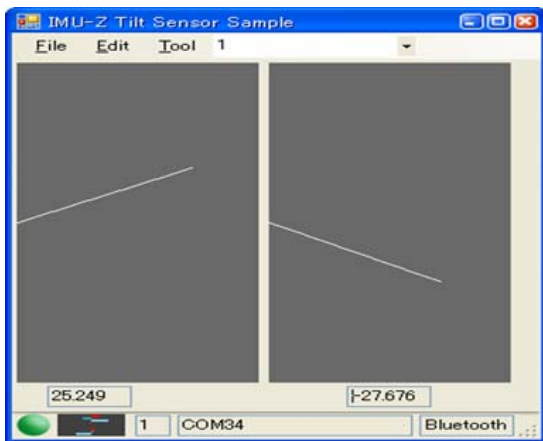


図5.9. TiltSensorSample

地磁気センサから方角を計算するサンプル

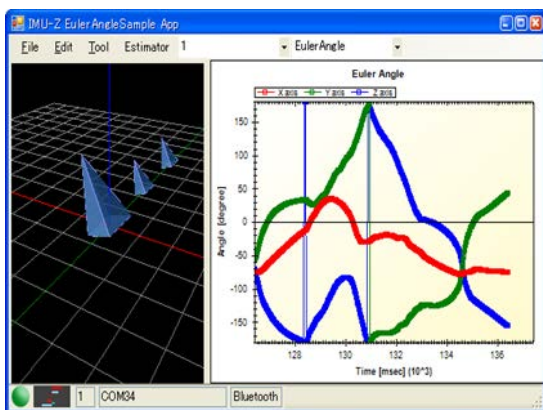


図5.10. EulerAngleSample

クォータニオン表現をオイラー角に変換するサンプル

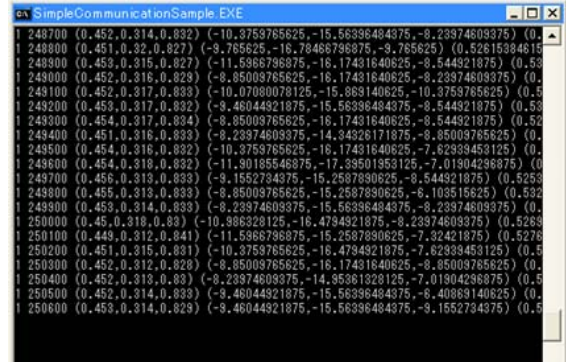


図5.11. SimpleCommunicationSample

IMU-Zから受信したセンサの値をコンソールに出力

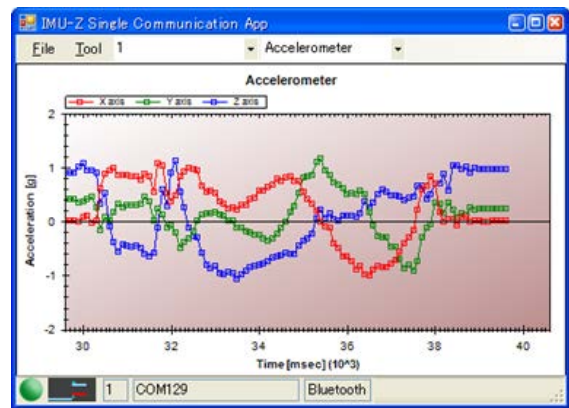


図5.12. ImuzSingleCommunicationSample

IMU-Zからの計測データをグラフに表示

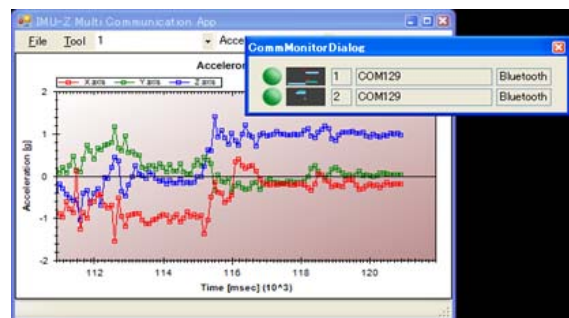


図5.13. ImuzMultiCommunicationSample

複数のポートを利用して、IMU-Zからの計測データをグラフに表示

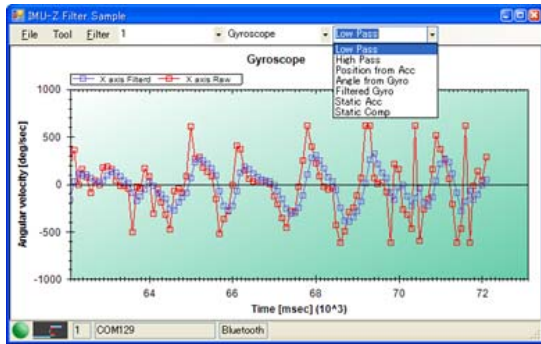


図5.14. FilterSample 実行画面1

フィルタを利用するプログラム。元データと、フィルタ適用後のデータが グラフにプロットされる

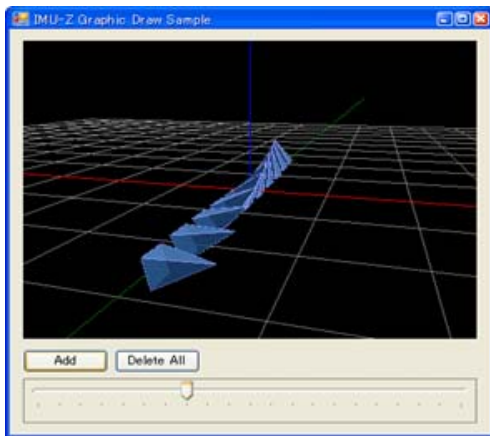


図5.15. GraphicDrawSample 実行画面2

ImuzDrawを利用して、3Dの空間にオブジェクトを表示するサンプル。IMU-Zとの通信せずに単独で表示のみ行う

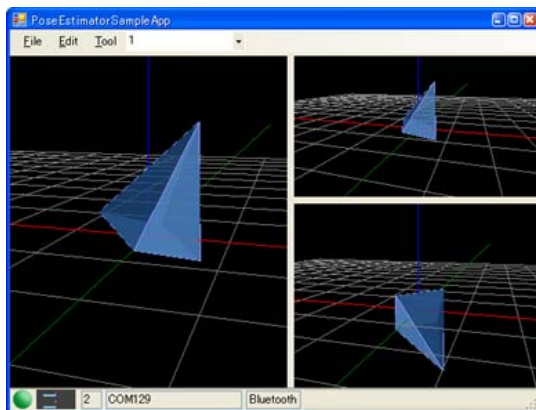


図5.16. PoseEstimatorSample 実行画面3

姿勢推定器(PoseEstimator)のサンプル。3種類の推定器の結果を同時に表示

5.1.3 PCとの接続・設定

次に、IMU-ZとPCとの接続・設定、使用方法について説明する。

初期設定

- ① 今回は有線で使用するため図5.3のようにACアダプタをコンセント、USBCANアダプタをPCへ繋ぐ。
- ② IMU-ZのNode番号(図5.5. Model Draw Applicationの説明を参照)とRole※を設定するので、IMU-Zのプッシュスイッチを押しながらパワースイッチをONにする。
すると設定モードに切り替わりLEDが点滅するので、確認する。
- ③ C:\Program Files\ZMP\IMU-Z Application and SDK\ImuzConfigurationTool.exeを起動しFile-Open-コンボボックス内の[Lawicel CANUSB]を選択し、開く。
- ④ Target Node Noを[All]にして[Get Status]ボタンを押すと現在の設定が帰ってくる。
(複数のIMU-Zを接続しているならば、その数だけ)
- ⑤ Target Node Noを変更したいセンサの番号にして、Node Noに新たに設定するノード番号を入力し、Roleも指定する。
(今回はUSB接続かつ右肩に装着するため、Node Noは8でRoleはCAN-Slaveとする)
- ⑥ [Save]ボタンを押して設定を送信し、IMU-Zを再起動する。

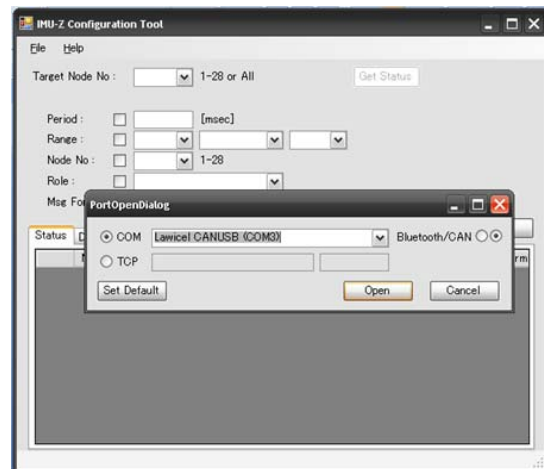


図5.17. ③の画面

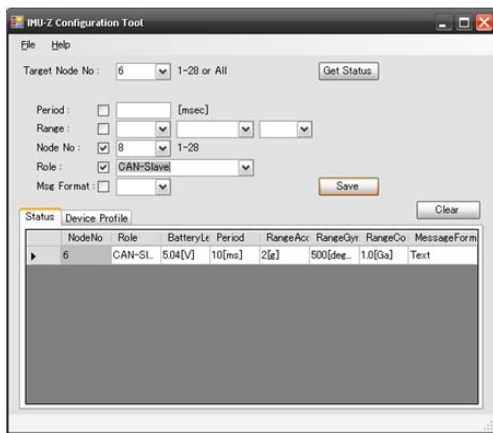


図5.18. ⑤の画面(ノード番号6⇒8へ)

※) CAN-Slave , SingleBT ,CAN-MasterBTの三つを選択できる。

CAN-Slave: CAN-USB(有線)接続時

SingleBT: Bluetooth(無線)接続時

CAN-MasterBT: Bluetooth – CAN接続時(PCと一台のIMU-Zが無線接続、それと他のIMU-Zが有線接続)

Euler Angle Sample

- ① IMU-Zを接続した状態でC:\¥Documents and Settings¥IMU-Z Ver.1.53¥Samples¥Imuz Samples¥Euler Angle Sample¥bin¥Debugを起動しFile – Openを押すとダイアログが表示されるので接続している方式(ポート番号)を選び、Openボタンを押す。
- ② 図5.20.赤丸の所のコンボボックス内のノード番号を初期設定で設定した任意の値にするとセンサのグラフ及び3Dモデルが表示される。

補足) その他の操作についてはメニュー項目に以下の機能がある。

Edit – Clear Graph : グラフの消去

Edit – Pause Graph : グラフの一時停止

Tool – IMU-Z Manager : マネージャーダイアログを表示し、レンジや計測間隔値を設定

Tool – Communication Monitor : 複数のセンサの値や変化を簡易的に表示する

Estimator – Begin Calibration : 場所によって異なる地磁気の大きさの変化を吸収し、データを更正する

Estimator – Save Cal Data : 上記の構成データを保存し、次回アプリケーション起動時には自動で読み込まれる。

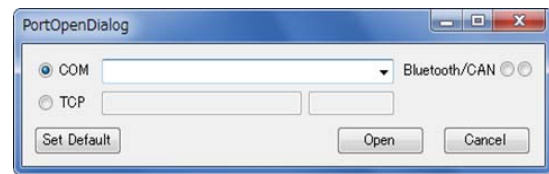


図5.19. Port Openダイアログ

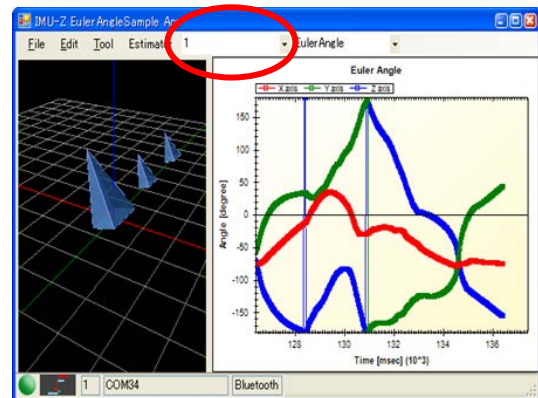


図5.20. Euler Angle Sample 表示画面

6. 実験方法

IMU-Zが肩の2自由度位置検出センサとして実用かどうかを検証した。確認方法として、Euler Angle Sampleのサンプルプログラムを用いてステップ応答のデータ測定をし、肩義手の動作角度とIMU-Zの動作角度を比較した。その判断基準として、データ測定した値が一致すれば、IMU-Zはセンサとして実用可能であると仮定した。Euler Angle Sampleのサンプリングタイムは10msecで測定した。

7. 実験結果と考察



図7.1. IMU-Z取り付け位置

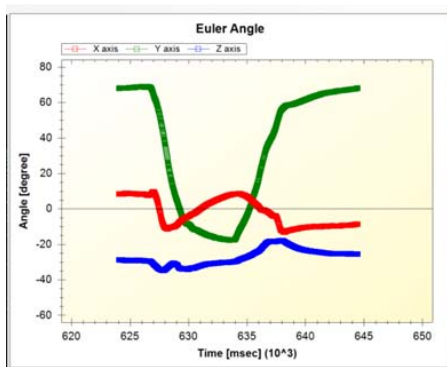


図7.2. ステップ応答

まず始めに、IMU-Zは人間に取り付けてどのような動きをするか計測したりするものなので、実際に人間の上腕挙上 $\theta 2$ の位置に取り付けて、腕を下げた状態から $\theta 2$ を90度まで上げた時のデータ測定を行った。図の位置にY軸が回転するように取り付けた。70度 \sim -20度で90度回転している。よって、人間に取り付けた場合、正確なデータが取れることが確認できた。



図7.3. IMU-Z取り付け位置

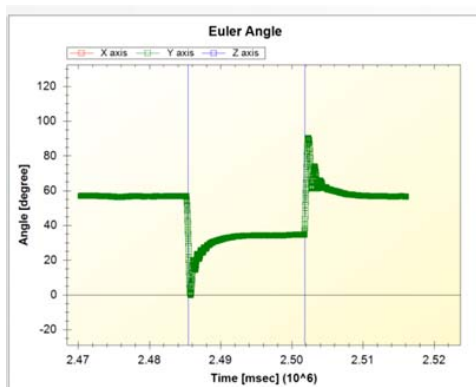


図7.4. ステップ応答

次に、IMU-Zを肩義手に取り付けても同様に正確なデータが取れるか、肩義手の $\theta 4$ のモータの

回転軸上に取り付けてデータ測定をした。図が $\theta 2$ を0度 \sim 50度動かしたときで、ステップ応答の波形としては良くなかった。これはIMU-Zが肩義手の動きに追従できていないのではないかと思い、サーボモータのストレッチとスピードが原因と考えた。よって、設定していたストレッチとスピードの値を半分にして、再度データ測定を行った。

以下にストレッチとスピードの設定方法について示す。



図7.5. SerialManager151設定画面

- ① SerialManager151.exeを起動する。
- ② 図の赤枠のストレッチとスピードの値を変更する。
- ③ 書き込みボタンを押して保存する。

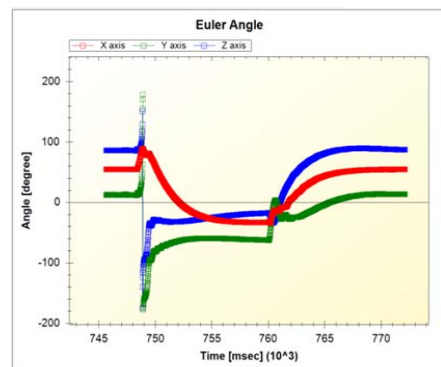


図7.6. ステップ応答

ストレッチとスピードを変更しても同様なデータになってしまった。いろいろ試しながら測定していると、モータの磁気が問題であることが分かった。よって、モータから約40cm離すと磁気の影響を受けなくなることが判明したので、アルミチャンネルを2つ重ねてその先端にIMU-Zを地面に対して水平に取り付け、それを肩義手の $\theta 4$ の位置にネジで固定した。また、

IMU-Zのオフセットの調整を正確に行えていなかったのも原因であった。よって、オフセットの調整もきちんと行い同じ条件で再度測定した。

以下にオフセットの調整の仕方について説明する。

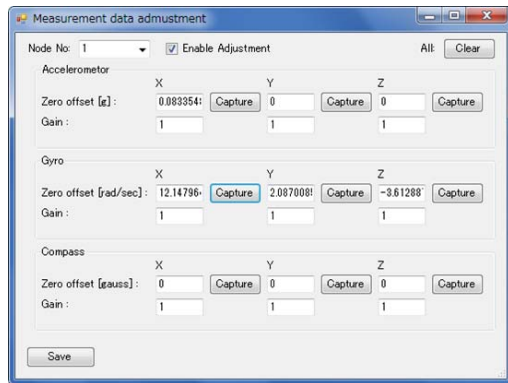


図7.7. オフセット調整画面

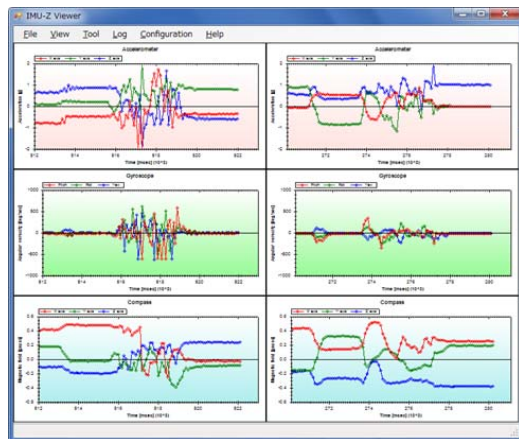


図7.8. IMU-Z Viewer画面

- ① IMU-Zを接続した状態でC:\Program Files\ZMP\IMU-Z Viewerを起動する。
- ② Configuration-Adjustを押すと図の画面が表示される。設定したノード番号を選択し、Enable Adjustmentにチェックを入れるとオフセットの調整が有効になる。
- ③ 加速度のX,Y軸はIMU-Zを水平にした状態でCaptureを押す。Z軸はIMU-Zを垂直にした状態でCaptureを押す。
- ④ ジャイロのX,Y,Z軸はIMU-Zを静止した状態でCaptureを押す。
- ⑤ 地磁気のX,Y,Zは図の地磁気の見ながら、Captureを押して15秒以内に最大と最小の値がとれるように、IMU-Zを動かす。
- ⑥ Saveを押すと、すべての値がファイルに保存される。



図7.9. IMU-Z取り付け位置



図7.10. IMU-Zの拡大図

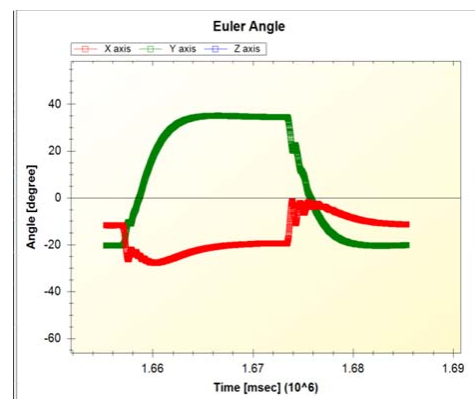


図7.11. ステップ応答1

モータの磁気影響なしで、オフセットの調整をした時の波形が図になる。目標値まで動いた後、安定しているのでステップ応答の波形としては問題ない。しかし、IMU-Zは非常に高性能で、同じ部屋でも場所によって地磁気の変化していた。よって、より良いデータ測定のためにIMU-Zの取り付け位置で、再度オフセットの調整をしてデータ測定をした。

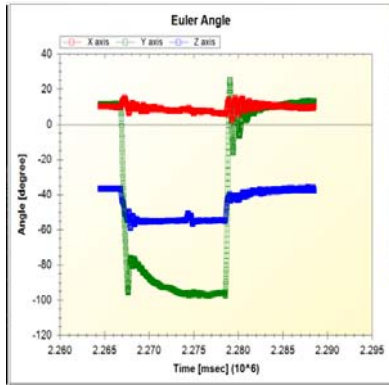


図7.12. ステップ応答2

図7.12.がその時のデータになる。測定条件は θ_1 を0度、 θ_3 を-50度、 θ_4 を-90度、 θ_2 を0度から120度動かした。手先に負荷を取り付けずに測定した。波形を見ると、目標値まで動くときにオーバーシュートがあって、目標値に到達し、ホームポジションに戻るときにアンダーシュートがあった後、振動が止まりホームポジションに戻っていることが見てわかる。この時の実際の肩義手の動作角度は107度、IMU-Zの動作角度は107度で一致し、図は理想的な波形であると思われる。

以下に、各パラメータを変更してデータ測定した時の波形と、肩義手の動作角度とIMU-Zの動作角度の測定誤差のグラフを示す。姿勢1～姿勢7の具体的な各関節角度の値は、図7.13.～図7.19.に詳しく示してある。

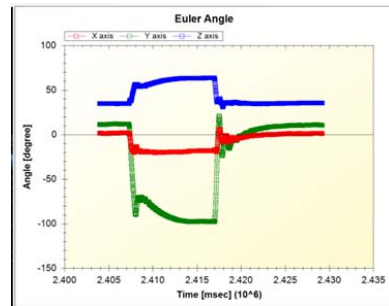


図7.15. 姿勢3

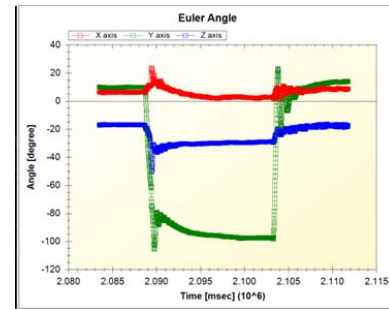


図7.16. 姿勢4

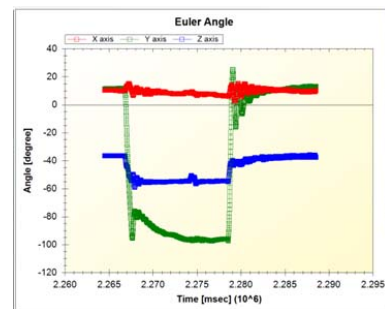


図7.17. 姿勢5

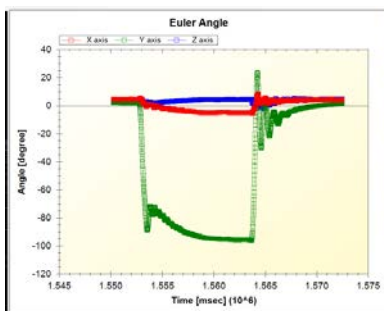


図7.13. 姿勢1

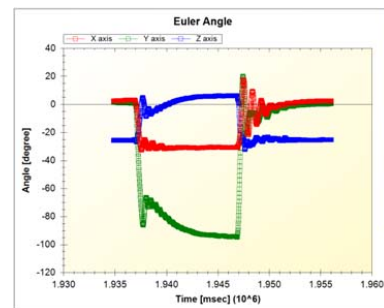


図7.18. 姿勢6

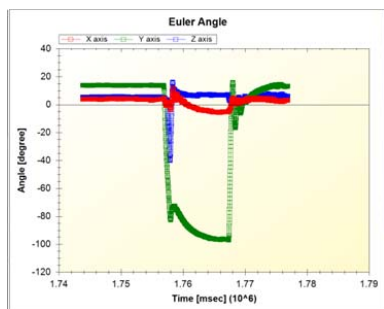


図7.14. 姿勢2

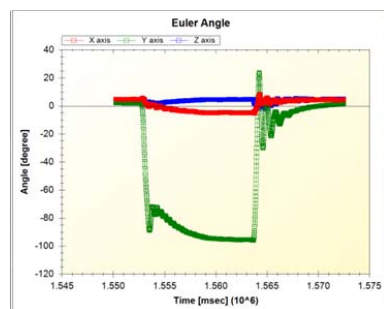


図7.19. 姿勢7

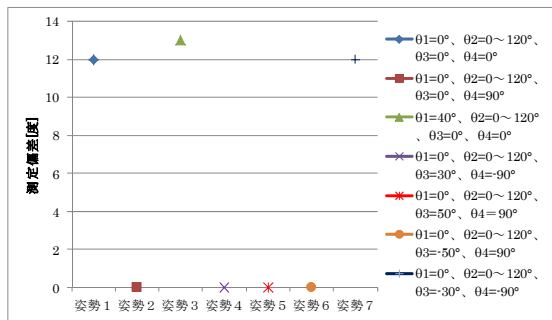


図7.20. 各パラメータによる測定誤差

図7.20.のデータより、7種類の姿勢に対して4種類が測定誤差が0度、また3種類が約12～13度の間にある。以上の実験結果から、IMU-Zは肩の2自由度位置検出センサとして実用可能であることが分かった。しかし、測定誤差にばらつきがあるという問題点も判明した。これは、柔軟関節アームの欠点である姿勢によって負荷の影響力が異なるからと、IMU-Zをモータの回転軸上に取り付けていないのが原因と考えられる。

8. まとめ

昨年度のKRS-6003HV(トルク：67kg・cm)を用いた6自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム)を用いて、制御ボードをRCB-4HVに変更し、ステップ応答波形の各種データを測定した。昨年と同様、ポテンシオメータを圧着で取り付けたGL900によるデータを測定した結果、負荷500gまで通常のストレッチの設定で動作することを確認した。手先の振動が起こっていないことを確認した。また、IMU-Zを用いて上腕挙上角のリアルタイム制御(サンプリングタイム10msec)で測定誤差に相当する測定データが7種類の姿勢に対して4種類の姿勢で誤差0度となった。残りの3種類も12度前後である。以上の結果より、モーションセンサIMU-Zをうまく利用すれば、肩義手(ロボットアーム)を目標値までソフトウェアサーボを用いて協調動作制御可能であることが分かった。今回の実験では、ZMP社のサンプルソフトを用いてデータを収集した。使用されている開発言語はC#である。今後の課題としては、C#を用いたIMU-Z Lite(地磁気センサを除く)を用いて、オリジナルソフトを開発すれば柔軟関節肩義手(ロボットアーム)の定常偏差を5%以内に収めることが可能と思われる。本技術が開発されれば、現在問題になっている地球温暖化に対する製造工場の省エネ化が可能とな

り、人間にやさしい地球環境を取り戻すために有益であると思われる。

9. 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。

10. 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・軽量な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ー 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