

クランク型拮抗方式による形状記憶合金ロボットシステムの研究

木下 敏治*

The Research of the Shape Memory Alloy Robot System using Push-Pull Mechanism of Crank-Type

Toshiharu KINOSHITA

Synopsis

Now it is said that it is necessary to develop an actuator such as a muscle for development of a practical electric artificial arm. Therefore the purpose of this research is to develop the above-elbow prosthesis that has lightweight and the high output by a shape-memory alloy (SMA). The robot system that I used this time is the SMA robot system using push-pull mechanism of Crank-Type made previously. I improved robot-arm movement control programs. Then I changed various parameters and analyzed the data. As the result, I was able to clarify movement conditions and various problems when we used this system.

1. まえがき

現在、実用化されている電動義手は DC モータが用いられており、小型化、軽量化が今後の課題とされている¹⁾。また、義手の開発を行う際には、通常の作業性能に加え「人間に安全で優しいこと」が最優先されるべき条件となるため、生筋のようにコンパクトで強い力を発生すると同時に生体に似た柔らかな機構と動きを兼ね備えたアクチュエータ(駆動装置)の開発が必要とされている²⁾。そこで本研究では、アクチュエータに形状記憶合金を用いて軽量且つ高出力な上腕義手の開発を行うことを目的としている。

システム及びアームは以前に卒研生が製作したクランク型拮抗方式による上腕義手を使用した³⁾。付録 1 に MC ナイロンとアルミチャンネルを用いたロボットアーム(記憶合金上腕義手)の概略図を示す。本研究では、ロボットアーム動作制御プログラムの改良を行い、各種パラメータ(電源電圧、ゲイン、風量)を変化させた場合のデータを解析した。その結果、現在のシステムでの動作における動作条件、動作可能範囲、また、問題点、改善点などが明らかとなった。

古河電工のデータ⁴⁾により 1000 回で 80%程度可動範囲が小さくなることがわかっている。木下研究室でも、卒研のテーマとしては 3kg の重りを 1000 回程上下させ 82%の可動範囲の変化を確認している。

2. 形状記憶合金ロボットシステム

2.1 クランク型拮抗方式

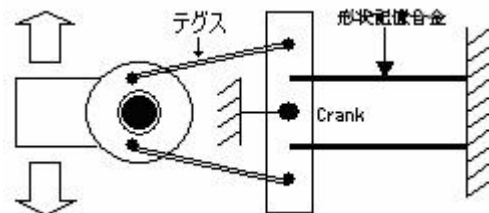


図 1 クランク型拮抗方式の概略図

クランク型拮抗方式³⁾は SMA (形状記憶合金) をアクチュエータとして使用方法の一つである。この方法はクランク機構により一つの閉じたサイクルを形成することで、張力による駆動部への負荷を軽減し、動作の妨げとなる摩擦力を減らすことができる。またクランク機構を用いることは、力とストロークの変換を可能にし、反応速度を向上させることができる。

2.2 位置の検出

アームの位置検出にはポテンショメータを用いている。10[V]の電圧を印加していると 360 度の回転角度に対応して 0[V]~10[V]の値を出力する。ポテンショメータの出力電圧とアームの回転角度の関係は図 2 のようになる。その計算式は以下のようになる。

$$V = -(5.955 - 3.441)/90^\circ \times \theta + 5.955 \\ = -0.0279 \times \theta + 5.955 \quad [V]$$

* 電子工学科

$$\therefore \theta^{\circ} = 216.6 - 36.33 \times V$$

2.3 形状記憶合金

形状記憶合金とは、一旦適当な熱処理によってある形状を記憶するとこれを変形しても一定の温度以上に加熱すると変形前の形に戻るという特殊な合金である。

記憶合金の第1の特徴は、大きな回復力である。実用的な形状記憶合金として知られているNi-Ti

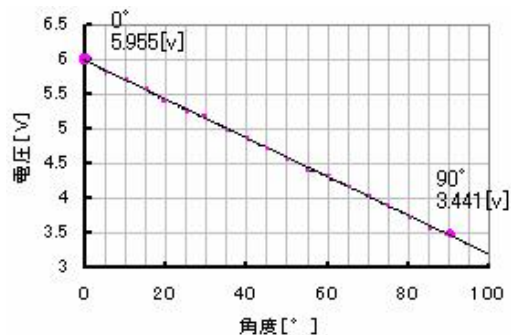


図2 アームの回転角度とポテンショメータの出力電圧の関係

Ti合金の場合、動作回数が少なくてもよければ、1mm 強のワイヤで人間一人を持ち上げることができる。アクチュエータのように数多く繰り返し動作する場合でも十分な力が得られる。

形状記憶合金の第2の特徴は、大きな回復量である。通常の金属材料の変形では、変形歪がたかだか0.5%を越えると、いわゆる弾性限界を超えてしまい変形力を除いたときに元に戻らない。これに対し形状記憶合金では、通常材料の弾性限界より1桁以上大きな変形歪が、加熱しただけで元の形に戻る。

形状記憶合金の第3の特徴は、繰り返し動作である。例えば形状記憶プラスチックでは、2回目以降では1回目と同じ動作をしなくなる。これに対して形状記憶合金では形状回復が完全で何度でも元の形に戻る。

つまり、形状記憶合金が工業的に使われる理由は、大きな回復力と大きな回復量であり、何度でも繰り返して使用できることである。

よって本研究では、伸縮率（最大 5%）が良く広い荷重範囲を持つことからTi-Ni-Cu合金を使用している。Ti-Ni-Cu合金の変態温度は67℃、直径φ=0.5mm 1本での荷重範囲は約3 [kg]である。

3. システムについて

3.1 ボードの接続

AD/DA 変換ボードの使用にあたりコンピュータの拡張スロットに各ボードを増設し、ドライバのインストールを行った。ボードのインターフェースコネクタからフラットケーブルを使いターミナルユニットに接続し、そこから使用するピンを取り出しロボットアームにつなげた。図3にシステムの概略図を示す。

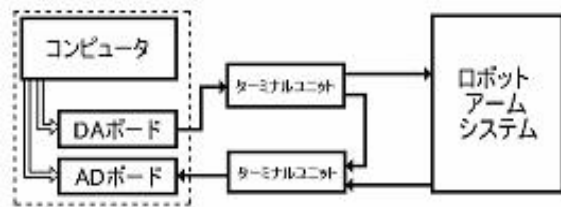


図3 システムの概略図

DA ボードの0チャンネルピンに対応したターミナルユニットの1番とロボットアームの入力端子を接続する。AD ボードの0チャンネルに対応したターミナルユニットのA11番とロボットアームのポテンションメータを接続し、1チャンネルに対応したターミナルユニットのA13番とDAボードのターミナルユニットの1番を接続している。AD ボードの Analog Input で使用しない端子はグラウンドに短絡してなければならない。

3.2 使用ボードの特徴

使用した AD 変換ボード・DA 変換ボード (CONTEC)の特徴を示す。

—AD 変換ボード—

- ・AD12-16 (PCI)
- ・アナログ信号入力
- ・シングルエンド入力：16チャンネル
- ・作動入力：8チャンネル
- ・入力レンジ：シングルエンド入力 0～10V
差動入力 ±10V

- ・分解能：12ビットでデジタル信号に変換

—DA 変換ボード—

- ・DA12-4 (PCI)
- ・アナログ信号出力
- ・シングルエンド出力：4チャンネル
- ・出力レンジ：シングルエンド出力 0～10V
差動出力 ±10V
- ・分解能：12ビットでアナログ信号に変換

3.3 制御回路

ハイパワー・モノリシックオペアンプを用いた差動式形状記憶合金アクチュエータ制御回路を図 4 に示す。

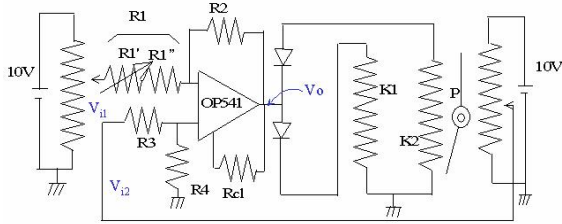


図 4 制御回路

この回路は、目標角度に対応した入力電圧 V_{i1} とロボットのアクチュエータから出力される現在の位置に対応した電圧 V_{i2} をオペアンプの入力に加え、この 2 つの電圧の差に比例した出力電圧を得る。この出力電圧の正、または負によっていずれかのダイオードを ON とし、形状記憶合金の一方に電流を流して加熱することでアームの動作を制御する。目標角度の電圧と現在位置の電圧が等しくなると電流は 0 となり、平衡状態となる。この平衡状態が崩れると、再び電流が流れ目標角度で静止するようにサーボ制御する。

出力電圧 V_o は

$$V_o = \frac{(R1+R2) R4}{(R3+R4) R1} V_{i2} - \frac{R2}{R1} V_{i1}$$

で表される。 $R1$ (可変抵抗 $R1'$) の値を変化させることでゲインを変化させることができる。ボードの入出力特性は図 5 に示す。

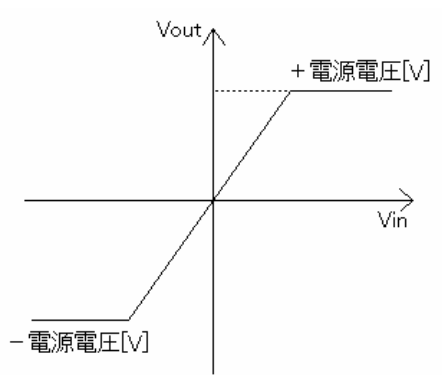


図 5 ボードの入出力特性

$$R1' = 0.319 [\Omega] \sim 21 [\text{k}\Omega]$$

$$R1'' = 973.7 [\Omega]$$

RCL : 出力負荷電流を約 2 [A] の定電流源とするための抵抗

4. プログラムについて

Visual Basic を開発言語に選び研究開発を行った⁵⁾。しかし、Visual Basic にはもともと AD/DA 入出力関数が含まれていないので ACX-PAC (W32)BP を用いることでそれを可能にした。

4.1 ACX-PAC(W32)BPについて

ACX-PAC(W32)はインターフェイスボードを使用して計測・制御を行うためのさまざまな ActiveX コンポーネント集である⁶⁾。これを使用することにより、必要なコンポーネントを組み合わせるだけでハイレベル且つビジュアルなプログラムを短期間にローコストで作成することができる。また ActiveX コンポーネントは、今までのプログラムで使用していた関数やサブルーチンなどのライブラリに似ているが、単にプログラムをモジュール化しただけではなく、さまざまな汎用性を持っている。

まず 1 つ目はコンポーネントをフォームやシートに貼りつけるだけで使用することができることである。通常必要とされる、グラフィカルなボタンやスイッチ、メーター、グラフなどをプログラミングする場合の図形を描くプログラムを作成する必要がなく、コンポーネントを貼りつけるだけで図形の描画プログラムが完成する。

2 つ目は、コンポーネントの状態を簡単に変えることができることである。コンポーネントはそれぞれプロパティページを持っており、プロパティページではコンポーネントの図形の選択、メーター、グラフの目盛り指定、配色、デジタルフィルタやフーリエ変換の変換方法等をラジオボタンやチェックボタンをチェックする、またはテキストボックスに文字や数値をキー入力するだけで簡単に変更することができる。よってプログラマーは、開発時にソースコードを変更することなく、視覚的にコンポーネントの状態を変えることができるため、大幅にプログラミング効率を上げることができる。

3 つ目は、コンポーネントは、関係するメソッド関数、プロパティ変数、イベント関数がコンポーネントごとにまとめられており、オブジェクト指向のプログラミングスタイルを強力にサポートすることである。プロパティ変数は、コンポーネントの状態をソースコード上で取得・変更することができ、プロパティページとも密接に連携している。さらにデフォルト値が個々に設定されて

いるため、すべてのプロパティ変数の内容を確認することなく必要なプロパティ変数の設定でプログラミングが完了する。メソッド関数は、従来のライブラリ集のサブルーチンと同様の利用法となるが、プロパティ変数との連携により、引数は、大幅に軽減している。

今回使用したコンポーネントは ACX Analog Control, ACX X-Y Graph Control, ACX Logging Control の3つである。

ACX Analog Control

- ・ アナログ入出力 ActiveX コンポーネント
- ・ AD/DA 変換を行い、データを取得する。
- ・ 最も簡易的なアナログ入力方法は AcquireData メソッドを使用したものである。Timer イベントでこのメソッドを実行するだけで周期的なサンプリングができる。
- ・ 取得したデータを ACX X-Y Graph Control、に指定して簡単にグラフ表示が可能。

ACX X-Y Graph Control

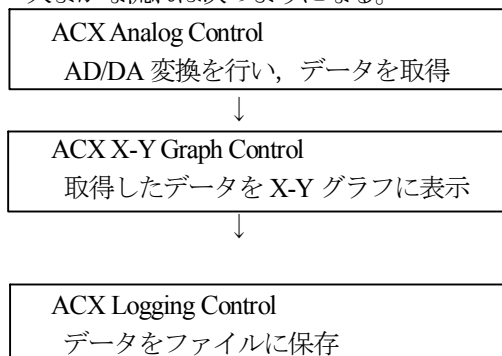
- ・ X-Y グラフ ActiveX コンポーネント
- ・ 1つのグラフで最大 32 種類の信号を表示可能。
- ・ マウス操作によりグラフのレイアウトを自由に変更可能。
- ・ プロパティにより、各種設定の変更がプログラムレスで実現。(ライン設定/アラーム設定/フレーム設定/スケール設定)

ACX Logging Control

- ・ ログ用 ActiveX コンポーネント
- ・ データをカンマ区切り(CSV)形式でファイルに保存。
- ・ ファイル名、保存場所、データフォーマット、ヘッダ設定等はプロパティページで設定可能。
- ・ 保存データは Excel 等の各種アプリケーションへの読み込みが可能。

4.2 プログラムの概要

大まかな流れは次のようになる。



ACX Analog Control, ACX X-Y Graph Control を用いて 1 自由度のアナログ入出力を同時に行い、X-Y グラフに表示するようになっている。ACX Analog Control は 2 つ使用し、片方に AD ボード (AD12-16(PCI))、もう片方に DA ボード (DA12-4(PCI)) を対応させている。アナログ入力には AcquireData メソッドを使用しており、タイマイメント⁶⁾により制御されている。データ取得、グラフ表示は約 0.1 秒間隔で行われる。データの保存は ACX Logging Control によって行う。保存したデータは Excel で読み込むことによって、データの解析・比較を行うことを可能にしている。

作成したロボットアーム動作制御プログラムは付録 2 に示す。

4.3 フォームデザイン

作成したプログラムのフォームデザインを図 6 に示す。また各オブジェクト名、プロパティページの設定内容は付録 2 に示す。

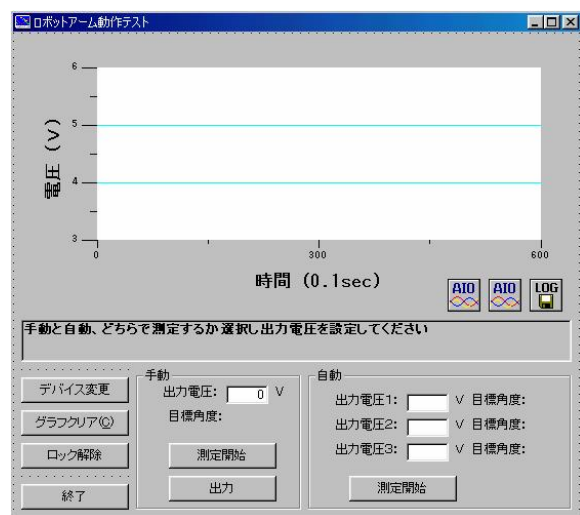


図6 フォームデザイン

各設定はプロパティページ、またはマウス操作で変更可能。このプログラムを実行すると図 7 の実行画面となる。

実際に測定した様子は付録 2 に示す。



図 7 実行画面

測定中は、各チャンネルの電圧がリアルタイムで表示されるようになっている。プログラムの実行終了時には終了ボタンをクリックすることで、0[V]が出力される。

4.4 測定方法

測定方法は測定したいデータの内容によって使い分けられるよう 2 種類作成した。

手動測定

- 1) 測定開始ボタンクリックで測定開始
- 2) 出力電圧を入力
- 3) 出力ボタンクリックでボードにその電圧が出力される。この時、出力電圧に対応したアームの回転角度がラベルに表示される。

回転角度の計算は【位置の検出】に記載した、ポテンシオメータの出力電圧とアームの回転角度の関係式により算出している。

2), 3)を繰り返すごとにボードに指定した電圧が出力される。

自動測定

- 1) 出力電圧 1 ～ 3 に目標角度に対応した電圧を入力
- 2) 測定開始ボタンクリックでタイマイイベントが発生し指定時間に自動的に電圧を出力し測定を行う。

出力時間はあらかじめプログラム上で指定。各出力電圧の出力時間は X-Y グラフの X 軸に対応している。

※ 手動測定時は自動側が、自動測定時は手動側がそれぞれ入力ロック状態となる。測定方法を途中で変更したい場合はロック解除ボタンをクリックする。

※ 各出力電圧に何も入力せずに測定開始ボタンをクリックした場合、ボードには 0[V]が出力されるので、アームは 0[V]に対応した角度に動こうとする。よって、各測定は以下のようにするのがよい。

- 1) 手動側の 2), 3)の操作を行ってアームを目標角度に動かしておく。
- 2) ロック解除ボタンで入力ロックを解除する。
- 3) **手動測定**, **自動測定**を選択し、測定開始。

どちらの測定法を用いても X-Y グラフの X 軸最大値までデータを表示したら、測定は自動的にストップする。引き続き測定を行いたいときはグラフクリアボタンをクリックしてから開始する。

5. 実験結果

5.1 測定事項

1) アームの可動範囲

0° ～ 90° に対応した電圧を目標値としてボードに出力し、それに対する実際のアームの可動範囲を測定する。

2) 動作条件

各種パラメータを変化させた時の目標値に対するアームの反応速度をそれぞれ測定・比較し、このアームにおける最適な動作条件を求める。

5.2 測定結果

5.2.1 アームの可動範囲

- ・ まず分度器で実際のアームの回転角度を測定し、可動範囲を求めた結果
平均：約 3° ～ 70°
- ・ 次にポテンシオメータの出力電圧から可動範囲を計算し、求めた結果
平均：約 4° ～ 67°

以上の結果からポテンシオメータの出力電圧と実際のアームの回転角度には誤差があることがわかった。この誤差は使用したポテンシオメータ CP-2FB(b)自体が ± 1 %, 角度にして約 3° の誤差

を持っていることが原因と考えられる。この誤差は θ の式に直接効いてくるので測定開始前にはアームの回転角度とそれに対するポテンショメータの出力電圧を確認し、誤差が大きいときには計算式に使用する値を変えなければならない。プログラム上では a1 及び a2 の値を変える。CP-2FB(b) の各仕様の一部を以下に示す。

■電気的仕様

有効電気角	340°
全抵抗値	1 k Ω
単独直線性	$\pm 1\%$

■機械的仕様

機械角	360° エンドレス
回転トルク	0.5mN・m 以下
質量	約 20g

■環境特性

使用温度範囲	-40~100°C
寿命	1000 万回転以上

- 今回使用したロボットアームの製作時の可動範囲は 0° ~85° , 昨年の可動範囲は 0° ~75° なので、実験回数に比例して可動範囲が徐々に狭くなっていることがわかった。

5.2.2 動作条件

図8~10は、各種パラメータを変化させた時の目標値に対するアームの反応速度を比較したものである。

- 図8はゲイン: $R1' = 10$ [k Ω] , 風量: 13 [V] 0.15 [A] , 目標可動範囲: 6° (5.7[V]) $\rightarrow$ 64° (4.1[V]) $\rightarrow$ 6° (5.7[V])一定で電源電圧を 10[V] ~14 [V] 変化させた時の測定結果。
- 図9は電源電圧: 13 [V] , 風量: 13 [V] 0.15 [A] , 目標可動範囲: 10° (5.68 [V]) $\rightarrow$ 67° (4.1 [V]) $\rightarrow$ 10° (5.68 [V])一定でゲインを変化させた時の測定結果。
- 図10は電源電圧: 13 [V] , ゲイン: $R1' = 10$ [k Ω] , 目標可動範囲: 13° (5.6 [V]) $\rightarrow$ 64° (4.2 [V]) $\rightarrow$ 13° (5.6 [V])一定で風量を変化させた時の測定結果。

これらの結果から以下のことがわかった。

- 電源電圧が 12[V]~14[V]のときはほぼ同じ動作結果が得られた。
- ゲインはどれもほぼ同じ結果となったが、ゲインが大きいときはアームの目標値到達時に

振動が見られることがあった。また小さいときは反応速度に遅れが見られることがあったことから、一番安定した動作が得られた $R1' = 10$ [k Ω] が最適であると考え、以降の測定は $R1' = 10$ [k Ω] で行った。

- 風量は冷却装置使用時ならばその大きさにかかわらずほぼ同じ動作結果が得られた。

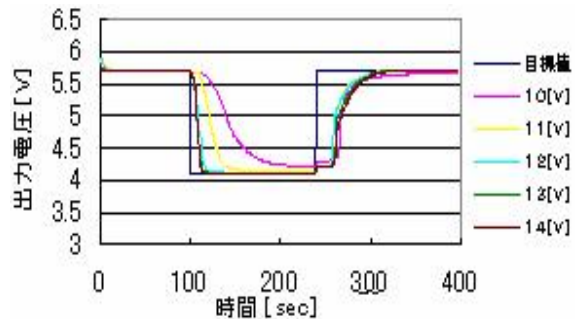


図8 電源電圧可変時

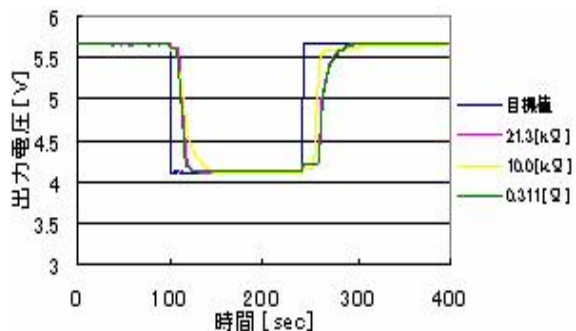


図9 ゲイン可変時

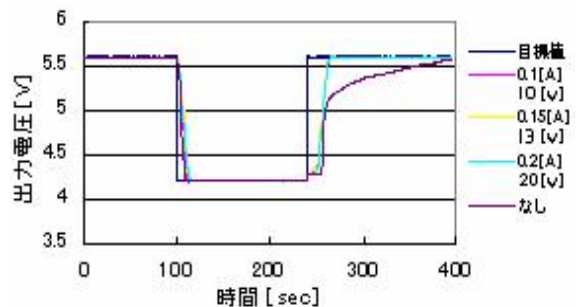


図10 風量可変時

これらの結果をふまえ、次に2回以上繰り返し動作を行ったときの立ち上がり、立ち下がり時間を測定した結果を以下に示す。

(目標可動範囲: 20° $\rightarrow$ 60° $\rightarrow$ 20°)

表 1 連続動作の測定結果

電源電圧	風量	0[V]	5[V]	10[V]	13[V]
		0[A]	0.05[A]	0.1[A]	0.15[A]
10[V]	上	4.45	2.30	3.50	3.93
	下	7.25	2.20	2.57	2.70
11[V]	上	3.20	1.47	1.77	1.87
	下	7.05	1.70	1.87	1.80
12[V]	上	4.15	1.07	1.17	1.30
	下	8.05	1.43	1.43	1.50
13[V]	上	4.15	0.83	0.80	0.80
	下	8.85	1.50	1.43	1.43
14[V]	上	3.75	0.60	0.63	0.70
	下	10.00	1.23	1.30	1.53

単位 : [sec]

表 1 に記載した立ち上がり, 立ち下がり時間は繰り返し動作の平均値である。

- ・ 冷却装置なしのときは電源電圧を変化させてもほぼ同じ動作結果となった。図 11 に示す。
- ・ 冷却装置ありで電源電圧 10[V], 11[V]のときの動作結果は図 12 に示す。
- ・ 冷却装置ありで電源電圧 12[V]の動作結果を図 13, 電源電圧 13[V]の動作結果を図 14, 電源電圧 14[V]の動作結果を図 15 にそれぞれ示す。
- ・ 表 1 より立ち上がり時間は電源電圧 14[V]のときがわずかに速いが, 図 13~15 より見た目には動作結果はほぼ同じであることがわかった。

以上のことから省エネで且つ確実に動作するアームの動作条件は, 電源電圧 12[V], 風量 5[V] 0.05[A] であると考えられる。

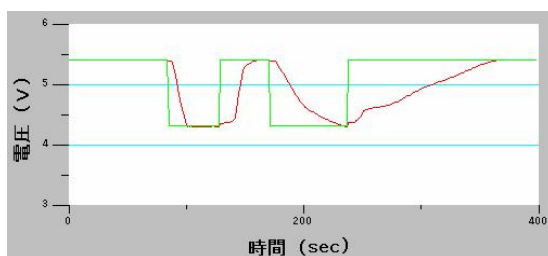


図 11 動作結果 1

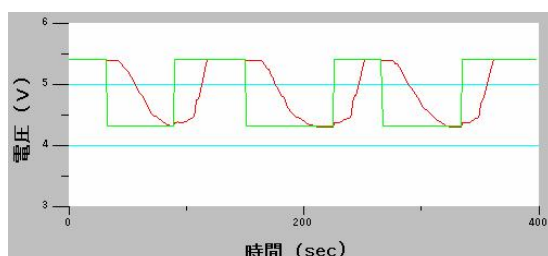


図 12 動作結果 2

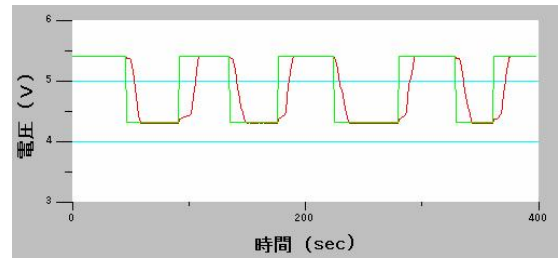


図 13 動作結果 3

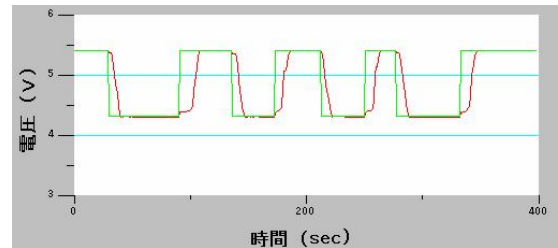


図 14 動作結果 4

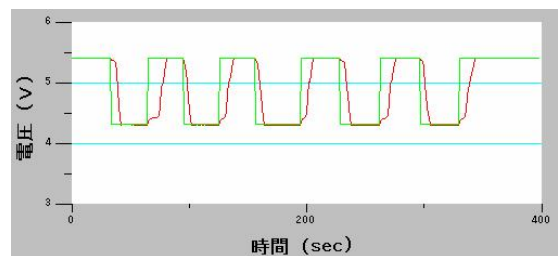


図 15 動作結果 5

- ・ 最適条件 (電源電圧 12[V], 風量 5[V] 0.05[A]) における繰り返し動作の結果を図 16 に示す。

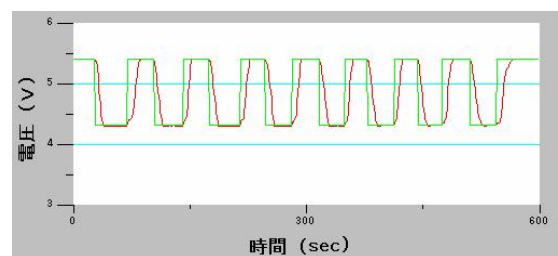


図 16 最適条件における動作結果

6. まとめ

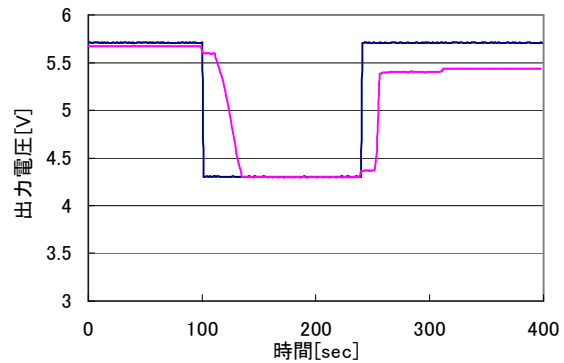
今回の研究でロボットアーム動作制御プログラムを改良することができた。その結果, 使いやすくなり, データの保存・解析・比較を容易に行えるようになった。

測定結果からは, 今回使用したロボットアームの動作可能範囲及び, 動作条件を明らかにすることができた。

動作可能範囲については、このアームは製作してから約5年がたっているため、測定結果からもわかるようにその可動範囲は年々狭くなっており、アクチュエータとして使用している Ti-Ni-Cu 合金はかなり疲労していると考えられる。また、室温や測定環境・動作条件などによって反応速度に違いが見られることもあった。しかし、どのような条件であっても、約 10° ～ 65° の範囲でならば確実に動作することが確認できた。

また、このアームを使用するにあたっての問題点は測定結果にばらつきが見られたことである。同じ動作条件・環境で測定を行っても、スムーズに動作せず、アームの回転が途中で止まってしまうことがあった。これは可動部に発生する摩擦の影響によるものではないかと考え、可動部にグリスを塗ることでその改善を図った。

その結果、一時は改善されたが、その後グリスが乾くことにより再び動く動きが悪くなった。その様子を図 17 に示す。



グリス使用数分後

図 17 グリスによる動作の変化

よって、摩擦の軽減が必要であると考えられる。

今後の課題としては可動部にボールベアリング等を使用して摩擦の軽減をはかること、アクチュエータを新しい Ti-Ni-Cu 合金、またはバイオメタルファイバーに張り替えることにより、特性及び反応速度の向上をはかること、冷却装置を使用した場合の測定方法の改善などがあげられる。冷却装置に関しては、今回のように装置自体の電圧・電流値で測定するのではなく、形状記憶合金自体の温度、または冷却部の温度を測るようになる必要がある。

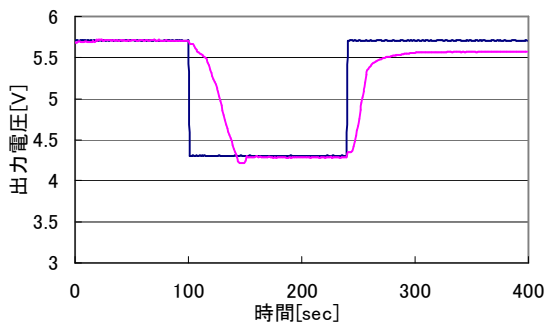
また、今回の測定によってクランク型拮抗方式による形状記憶合金ロボットシステムの反応速度についての詳細なデータをとることができたので、今後は負荷についてのデータをとるなどして、より有効なアクチュエータの開発を行っていきたい。

7. 謝辞

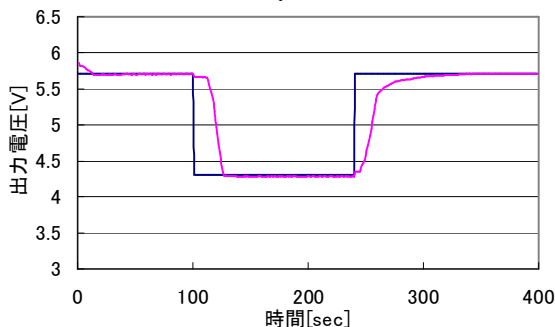
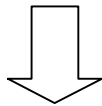
本研究にあたり卒業研究として熱心に努力してくれた西田美奈子さん（現徳島大学工学部学生）ならびに電子工学科の教官の方々、またいろいろな面でお世話していただいた実習係の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

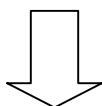
- 1) 赤澤堅造 他、動力義手・装具の研究開発の現状と将来、BME（医用電子と生体工学）、Vol.13, No. 2, p.34-41 (1999)
- 2) 木下敏治 他、形状記憶合金アクチュエータを用いた上腕義手のマイクロコンピュータ制御システム、本紙、第 31 号, p.119-127



グリス使用前



グリス使用直後



- 付録1 ロボットアームの概略図

