

第2回 HAKKO 熱の実験コンテスト

熱収縮アクチュエータを用いた5指式マニピュレータの製作

東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科
岩瀬・畠山研究室

1 背景

人間の手は5本ある指がそれぞれ独立して動作し、大きな力を発生させることや細かな作業をすることができる優秀なユニットである。これを模倣することが可能な5指式マニピュレータを製作する場合、各指にアクチュエータを取り付けて独立して動作させる必要があり、非常に複雑な構造が必要となる。さらに、従来のモータなどのアクチュエータは、コイルやそれを取り囲むソケット、ギアなど複雑かつ重量が大きいものが多い。これらのことから、従来アクチュエータを用いて5指式マニピュレータを製作する場合、重量が大きくなってしまう。5指式マニピュレータは人間の手を模したロボットであるため、ロボットのエンドエフェクタとして使用されることが考えられる。そのため、重量の増加は大きな問題となり、軽量なアクチュエータが必要となる。このような問題を解決するためのアクチュエータとして期待されているものに、釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を用いたアクチュエータがある [1]。

釣り糸人工筋肉とは、図1に示すように、釣り糸に代表されるナイロン糸をコイル状に加工し、それをヒートガンなどによって加熱することで収縮する現象を利用したアクチュエータである [2]。

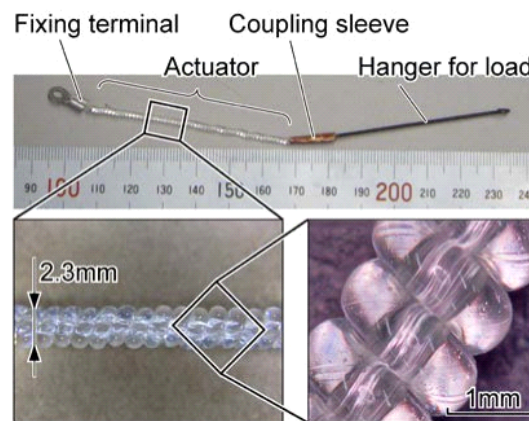


図 1: ナイロン糸アクチュエータ [2]

また、このアクチュエータはナイロン糸でできているため非常に安価であり、軽量であるといった特徴を持っている。

形状記憶合金とは、主にチタンとニッケルの合金であり、図2に示すように変態点と呼ばれる温度以下なら他の金属と同じように変形し、変態点以上に加熱するともと元の形状に変形する性質を持つ。



図 2: 温度による形状記憶合金の変形

この性質を利用することで、簡単かつ軽量なアクチュエータを構築することができる。

以上のことより、これらのアクチュエータを用いることで、軽量な5指式マニピュレータの製作が期待できる。

2 目的

本実験では、釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を加熱によって収縮させ、5 指式マニピュレータのアクチュエータと使用することで、釣り糸人工筋肉と形状記憶合金の性能比較をすることを目的とする。釣り糸人工筋肉と形状記憶合金は共に、モータなどの従来のアクチュエータに比べ軽量で、加熱によって動作するアクチュエータである。そこで、釣り糸人工筋肉では導電性ナイロンを使用することで、形状記憶合金では直接電流を流すことで、電流によって釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を加熱し、電気エネルギーを運動エネルギーに変換するアクチュエータを構築する。これらのアクチュエータを用いることで軽量の 5 指式マニピュレータを製作し、両アクチュエータの性能を比較する。

3 実験機器

本実験で使用する実験機器を表 1 に示し、回路素子と実験試料を箇条書きで示す。

表 1: 実験機器

名称	型番	シリアルナンバ	メーカー
直流安定化電源	LX-2-018-2A	451095170076	TAKASAGO
Arduino uno	A000066	857353133333516122C0	Arduino.cc
ヒートガン	HG-10S	—	株式会社パオック
DC モータ	—	—	—
ブレッドボード	—	—	—
重り (150 g)	—	—	—

回路素子

- モータドライバ IC(TB6643KQ) 1 個
- 電流センサ IC(ACS712ELCTR-05B-T) 1 個
- セラミックコンデンサ (0.1 μ F) 2 個
- セラミックコンデンサ (1 nF) 1 個
- 電解コンデンサ (0.47 μ F) 1 個
- ジャンパ線 適宜

実験試料

- 導電性ナイロン (ミツフジ株式会社, AGposs 銀メッキ繊維 (フィラメント)) 適宜
- 形状記憶合金 (コイル状, ϕ 10 mm) 5 個
- クリップ 適宜
- 圧着端子 適宜
- アルミ棒 適宜
- 釣り糸 適宜

表 1 に示した実験機器のうち、安定化電源は釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を用いたアクチュエータの電源として使用する。Arduino uno(以下, Arduino) は、電流センサで計測した電流のログの取得や、アクチュエータの駆動回路の制御器として使用する。DC モータとヒートガンは、釣り糸人工筋肉の製作に用いる。また、本実験では釣り糸人工筋肉に電流を流し、発生した熱で収縮させる。そこで、釣り糸人工筋肉の材料として、導電性ナイロンを使用する。さらに形状記憶合金には、アクチュエータとして使用するとき、伸び量と縮み量が大きいと考えられるコイル状のものを用いる。

4 アクチュエータの性能評価実験

本節では、釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を用いたアクチュエータをそれぞれ製作し、その性能を比較する。両アクチュエータの評価基準には、アクチュエータに与えた電力と収縮率を用いる。収縮率を S とすると、 S はアクチュエータの自然長 l_n [m] とアクチュエータが収縮した長さ l_c [m] から (1) を用いて求める。

$$S = \frac{l_c}{l_n} \quad (1)$$

この (1) に示したアクチュエータの収縮率と電力 P [W] から、与える電力に対するアクチュエータの収縮率の効率 E [1/W] を (2) に示す式を用いて求める。

$$E = \frac{S}{P} \quad (2)$$

アクチュエータに与えた電力は、図 3 に示すような回路を用いることで求める。

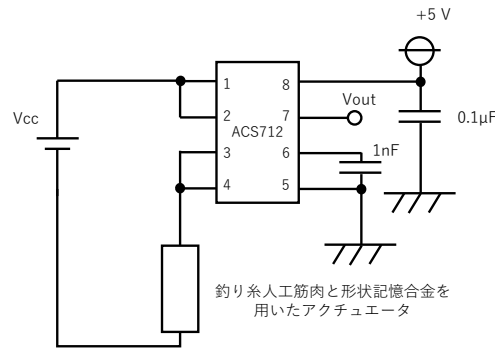


図 3: 電流センサ回路

図 3 のうち、電源である V_{cc} には直流安定化電源を使用し、定電圧電源として使用する。電流センサ IC はアクチュエータに流れる電流を計測するために使用し、7 ピンを Arduino uno(以下、Arduino とする) のアナログピンに接続し、値を取得する。これにより、アクチュエータにかかる電圧と、流れる電流のログデータを取得することができるので、アクチュエータに与えた電力の平均値を求めることができる。与えた電力の平均値とアクチュエータの収縮率から両アクチュエータの効率を導出し、その性能を評価する。

4.1 釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータ

4.1.1 釣り糸人工筋肉の製作

釣り糸人工筋肉は、ナイロン糸をモータなどによってコイル状に加工し、加熱処理をすることで製作することができる [2]。また、釣り糸人工筋肉はナイロン糸の加熱によって収縮するので、ナイロン糸に直接電流を流すことでジュール熱を発生させ、釣り糸人工筋肉を収縮させることができると考えられる。そこで、本実験ではナイロン糸には導電性ナイロンを使用する。釣り糸人工筋肉の製作には、文献 [2] の製作手順を参考に製作した。まず、図 4 に示すように約 1.50 m の長さに切った導電性ナイロン 8 本の両端にクリップを結んだ。



図 4: クリップに結んだナイロン糸

次に、図 5 に示すように、片方のクリップをモータの回転軸に取り付け、片方に重りをつるした状態でモータを回転させることで、導電性ナイロンをコイル状に加工した。



図 5: コイル状に加工している様子

最後に、コイル状に加工した導電性ナイロンを、コイルがほどけないようにヒートガンで加熱した。加熱した導電性ナイロンの両端を切断し、図 6 に示すように圧着端子で固定した。



図 6: 完成した釣り糸人工筋肉

図 6 に示すように、0.3784 m の釣り糸人工筋肉を製作した。

4.1.2 釣り糸人工筋肉の性能評価実験

釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータの性能を評価するため、図 3 に示した回路を用いて、釣り糸人工筋肉の収縮実験をした。実験条件としては、釣り糸人工筋肉の片方に 150 g の重りを付けてつるし、0.4491 m に伸ばした状態で、釣り糸人工筋肉に電流を流したときの最大の縮み長さを計測した。また、釣り糸人工筋肉がジュール熱により焼き切れてしまうことを防ぐために、 V_{cc} を 13 V, 14 V, 15 V, 16 V と変化させ、それぞれ 4 回実験をした。 $V_{cc}=13$ V の時の電流のログデータを図 7~10 に示す。

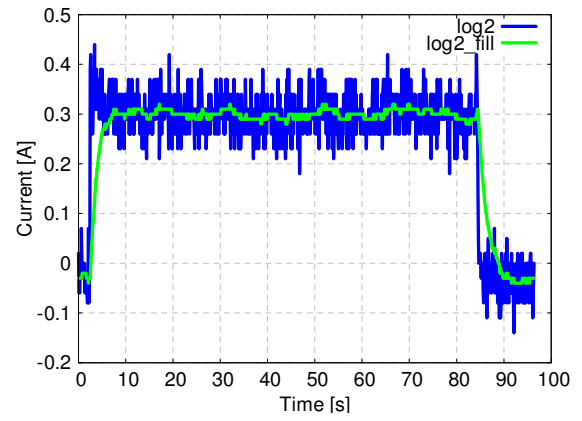
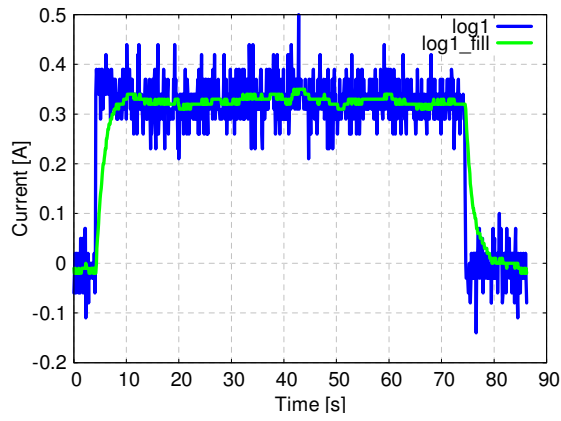


図 7: $V_{cc}=13$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (1 回目) 図 8: $V_{cc}=13$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (2 回目)

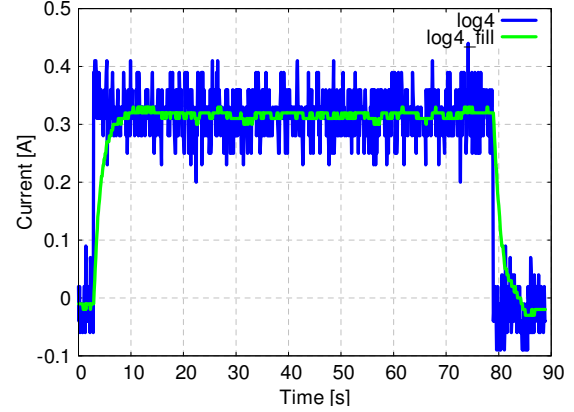
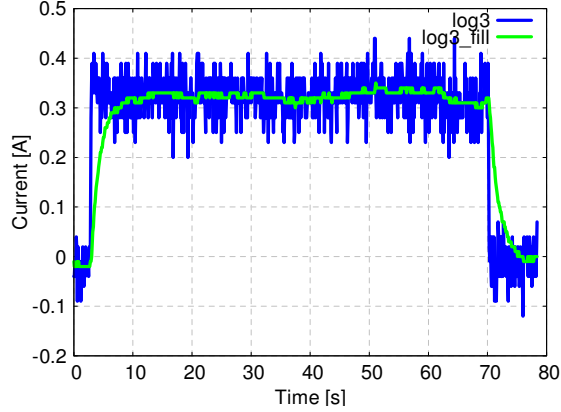


図 9: $V_{cc}=13$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (3 回目) 図 10: $V_{cc}=13$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (4 回目)

図 7~10 のうち, $\log_i(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log_fill(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log_i(i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 2 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 2: $V_{cc}=13$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	電流の平均値 [A]
10 秒から 70 秒	0.326362
10 秒から 80 秒	0.300043
10 秒から 70 秒	0.323239
10 秒から 75 秒	0.315767
平均値	0.316353

また, 釣り糸人工筋肉が縮んだ長さは 1 回目は 0.0115 m , 2 回目は 0.0150 m , 3 回目は 0.0142 m , 4 回目は 0.0139 m であり, 平均の長さは 0.01365 m であった. そのため $V_{cc}=13 \text{ V}$ の時の, 釣り糸人工筋肉の収縮率 S_{13} は $l_n = 0.3784 \text{ m}$ と (1) より, 0.03607 となった.

同様に, $V_{cc}=14 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 11~14 に示す.

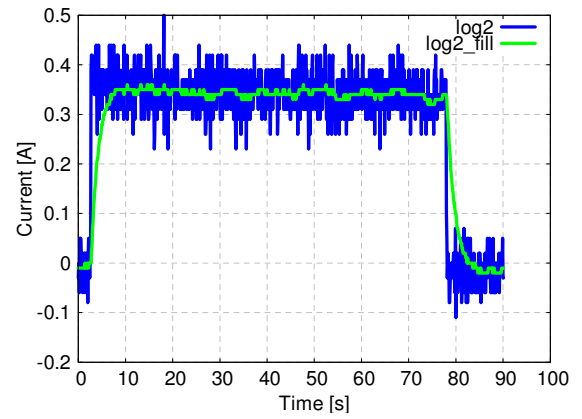
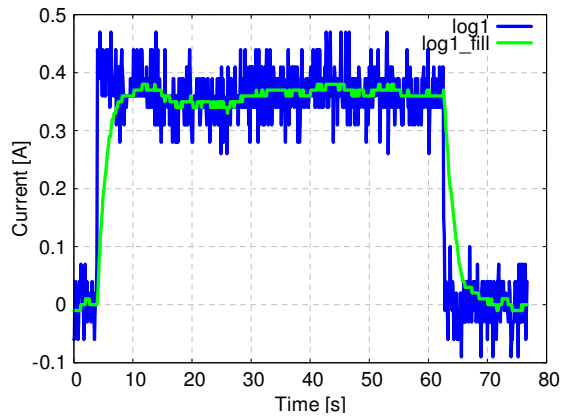


図 11: $V_{cc}=14$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (1 回目) 図 12: $V_{cc}=14$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (2 回目)

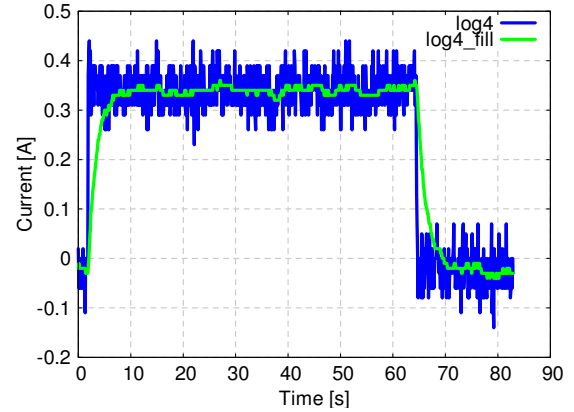
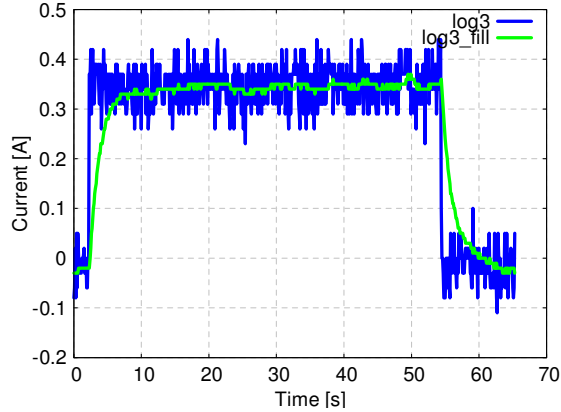


図 13: $V_{cc}=14$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (3 回目) 図 14: $V_{cc}=14$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (4 回目)

図 11~14 のうち, $\log(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log_fill(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log(i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 3 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 3: $V_{cc}=14$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	電流の平均値 [A]
10 秒から 60 秒	0.361753
10 秒から 75 秒	0.342469
10 秒から 53 秒	0.343194
10 秒から 63 秒	0.339211
平均値	0.346657

また, 釣り糸人工筋肉が縮んだ長さは 1 回目は 0.0162 m , 2 回目は 0.0165 m , 3 回目は 0.0147 m , 4 回目は 0.0152 m であった. 平均の長さは 0.01565 m であった. そのため $V_{cc}=14 \text{ V}$ の時の, 釣り糸人工筋肉の収縮率 S_{14} は $l_n = 0.3784 \text{ m}$ と (1) より, 0.04136 となった.

次に, $V_{cc}=15 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 15~18 に示す.

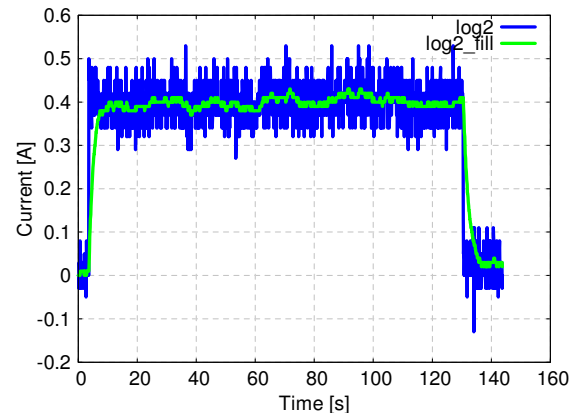
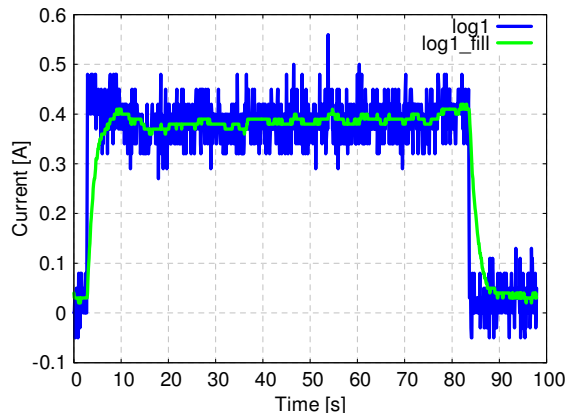


図 15: $V_{cc}=15$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (1 回目) 図 16: $V_{cc}=15$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (2 回目)

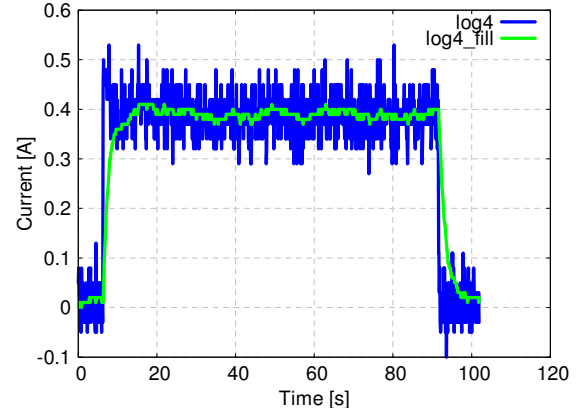
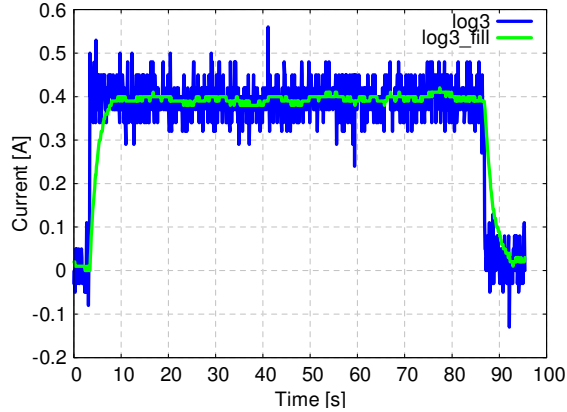


図 17: $V_{cc}=15$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (3 回目) 図 18: $V_{cc}=15$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (4 回目)

図 15~18 のうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log i_fill (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 4 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 4: $V_{cc}=15$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	電流の平均値 [A]
5 秒から 80 秒	0.384282
10 秒から 130 秒	0.398486
10 秒から 85 秒	0.394415
15 秒から 90 秒	0.389934
平均値	0.391779

また, 釣り糸人工筋肉が縮んだ長さは 1 回目は 0.0268 m , 2 回目は 0.0175 m , 3 回目は 0.0193 m , 4 回目は 0.0206 m であった. 平均の長さは 0.02105 m であった. そのため $V_{cc}=15 \text{ V}$ の時の, 釣り糸人工筋肉の収縮率 S_{15} は $l_n = 0.3784 \text{ m}$ と (1) より, 0.05563 となった.

最後に, $V_{cc}=16 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 19~22 に示す.

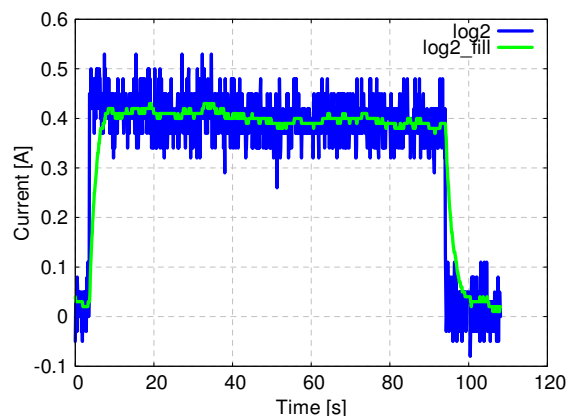
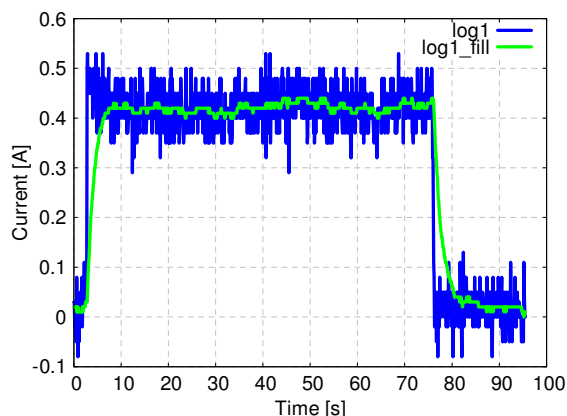


図 19: $V_{cc}=16$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (1 回目) 図 20: $V_{cc}=16$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (2 回目)

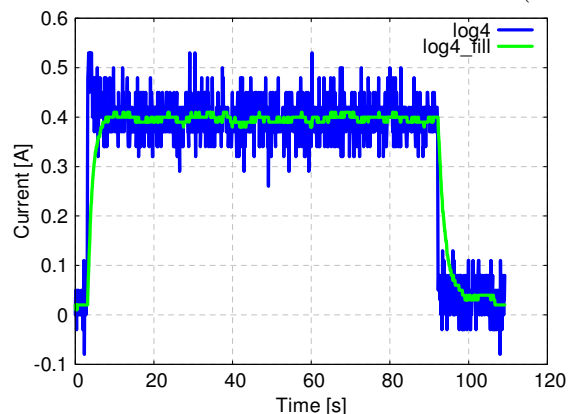
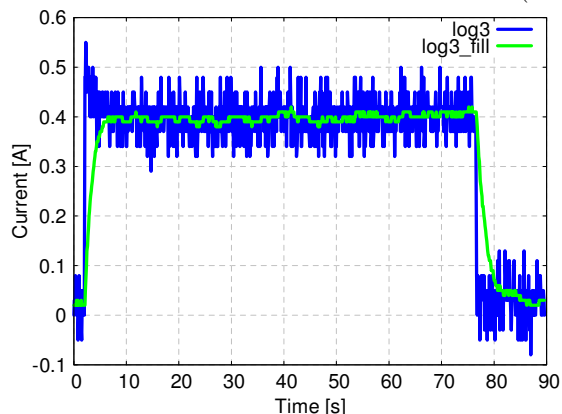


図 21: $V_{cc}=16$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (3 回目) 図 22: $V_{cc}=16$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流 (4 回目)

図 19~22 のうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log i_fill (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 5 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 5: $V_{cc}=16$ にて釣り糸人工筋肉に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	電流の平均値 [A]
10 秒から 75 秒	0.419893
10 秒から 90 秒	0.400948
10 秒から 75 秒	0.397546
10 秒から 90 秒	0.396683
平均値	0.403768

また, 釣り糸人工筋肉が縮んだ長さは 1 回目は 0.0255 m , 2 回目は 0.0300 m , 3 回目は 0.0345 m , 4 回目は 0.0357 m であった. 平均の長さは 0.03143 m であった. そのため $V_{cc}=16 \text{ V}$ の時の, 釣り糸人工筋肉の収縮率 S_{16} は $l_n = 0.3784 \text{ m}$ と (1) より, 0.08306 となった.

以上の実験から, 流れた電流と電源電圧, 釣り糸人工筋肉の収縮率から, 表 6 に示すように, 釣り糸人工筋肉の収縮率に対する電力の効率 E_C が得られる.

表 6: 釣り糸人工筋肉の効率

電圧 [V]	平均電力 [W]	収縮率	効率 E_C [1/W]
13	4.113	0.03607	0.008770
14	4.853	0.04136	0.008523
15	5.877	0.05563	0.009466
16	6.460	0.08306	0.01286

表 6 より，電源電圧 $V_{cc}=16$ V の時，釣り糸人工筋肉の収縮率に対する電力の効率 E_C は最大となり， $E_C = 0.01286$ 1/W となった．

4.2 形状記憶合金を用いたアクチュエータ

4.2.1 形状記憶合金の性能評価実験

形状記憶合金を用いたアクチュエータの性能を評価するため，図 3 に示した回路を用いて，形状記憶合金の収縮実験をした．形状記憶合金をアクチュエータとして使用するために，図 23 に示すように，形状記憶合金の両側にアルミ棒を加工した固定具を取り付けた．

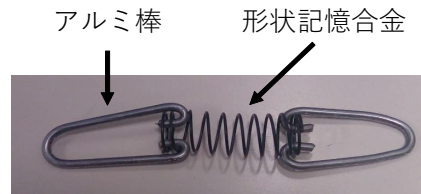


図 23: 形状記憶合金を用いたアクチュエータ

実験条件としては，形状記憶合金の片方に 150 g の重りを付けてつるし，0.06 m に伸ばした状態で，形状記憶合金に電流を流したときの最大の縮み長さを計測した．また，安定化電源が出力可能な電流を考慮し， V_{cc} を 2.5 V, 3.0 V, 3.5 V, 4.0 V と変化させ，それぞれ 4 回実験をした． $V_{cc}=13$ V の時の電流のログデータを図 24～27 に示す．

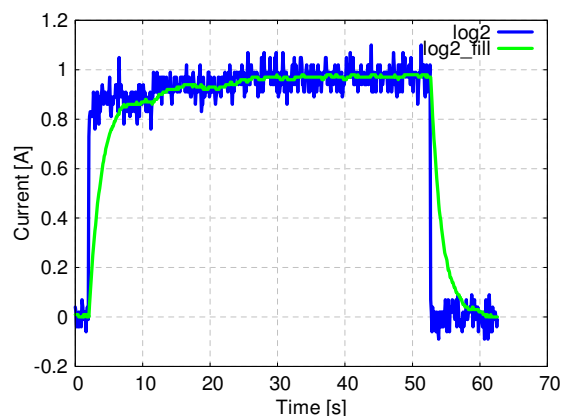
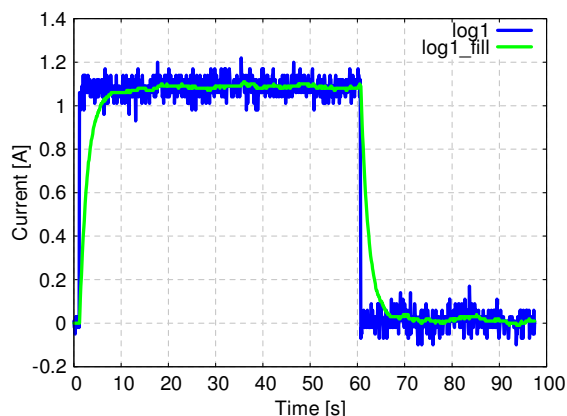


図 24: $V_{cc}=2.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (1 回目) 図 25: $V_{cc}=2.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (2 回目)

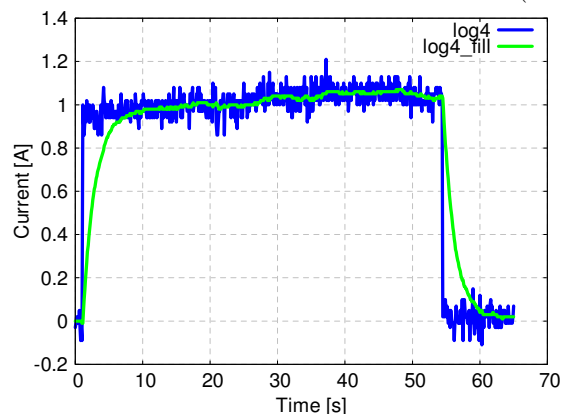
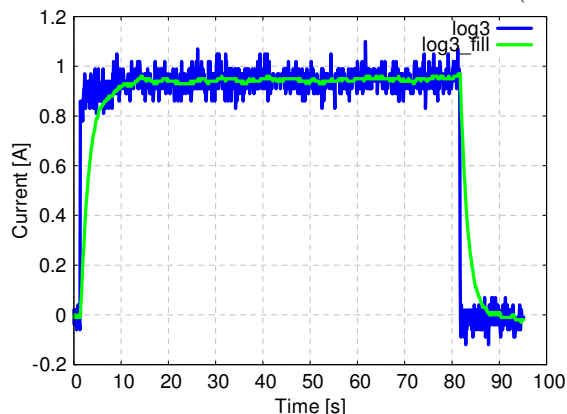


図 26: $V_{cc}=2.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (3 回目) 図 27: $V_{cc}=2.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (4 回目)

図 24~27 のうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log i_fill (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 7 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 7: $V_{cc}=2.5$ にて形状記憶合金に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	範囲内での電流の平均値 [A]
10 秒から 60 秒	1.08257
10 秒から 50 秒	0.949104
10 秒から 80 秒	0.942735
10 秒から 50 秒	1.02050
平均値	0.998727

また, 形状記憶合金が縮んだ長さは 1 回目は 0.0090 m , 2 回目は 0.0060 m , 3 回目は 0.0120 m , 4 回目は 0.0120 m であった. 平均の長さは 0.00975 m であった. そのため $V_{cc}=2.5 \text{ V}$ の時の, 形状記憶合金の収縮率 $S_{2.5}$ は $l_n = 0.03 \text{ m}$ と (1) より, 0.3250 となった.

同様に, $V_{cc}=3.0 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 28~31 に示す.

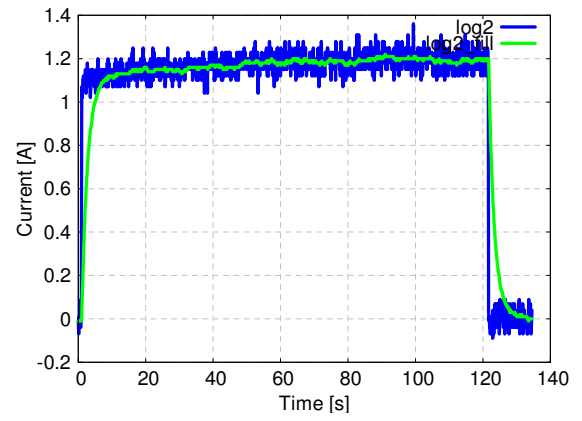
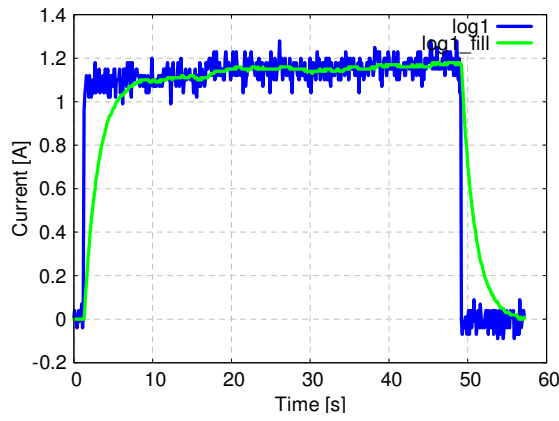


図 28: $V_{cc}=3.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (1 回目) 図 29: $V_{cc}=3.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (2 回目)

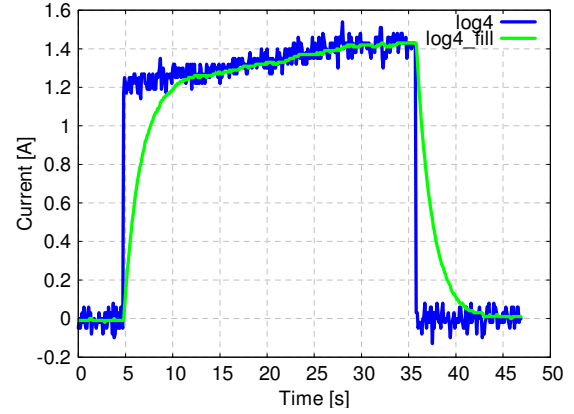
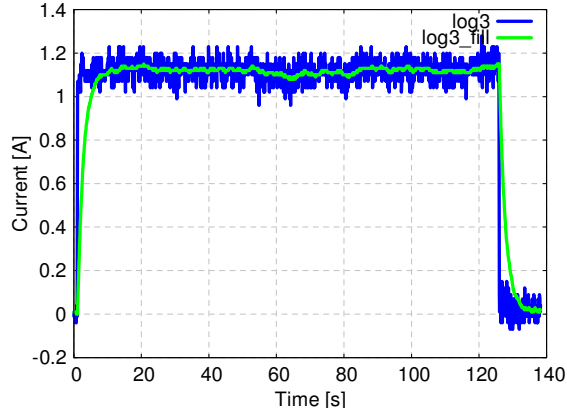


図 30: $V_{cc}=3.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (3 回目) 図 31: $V_{cc}=3.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (4 回目)

図 28~31 のうち, $\log i(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log i_fill(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log i(i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 8 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 8: $V_{cc}=3.0$ にて形状記憶合金に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	範囲内での電流の平均値 [A]
10 秒から 45 秒	1.13963
10 秒から 120 秒	1.1748
10 秒から 120 秒	1.11751
10 秒から 35 秒	1.3365
平均値	1.33424

また, 形状記憶合金が縮んだ長さは 1 回目は 0.010 m , 2 回目は 0.013 m , 3 回目は 0.010 m , 4 回目は 0.008 m であった. 平均の長さは 0.01025 m であった. そのため $V_{cc}=3.0 \text{ V}$ の時の, 形状記憶合金の収縮率 $S_{3.0}$ は $l_n = 0.03 \text{ m}$ と (1) より, 0.3417 となった.

次に, $V_{cc}=3.5 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 32~35 に示す.

7 図 32~35 のうち, $\log(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log_fill(i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得し

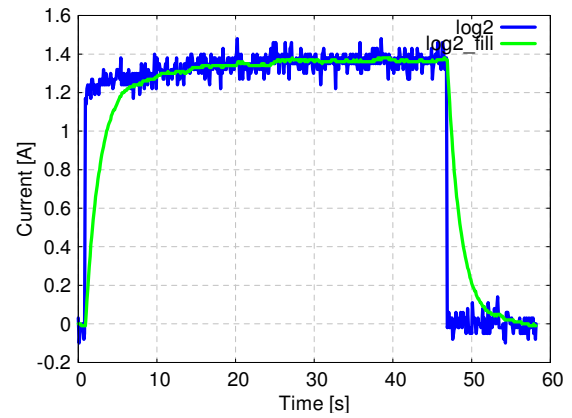
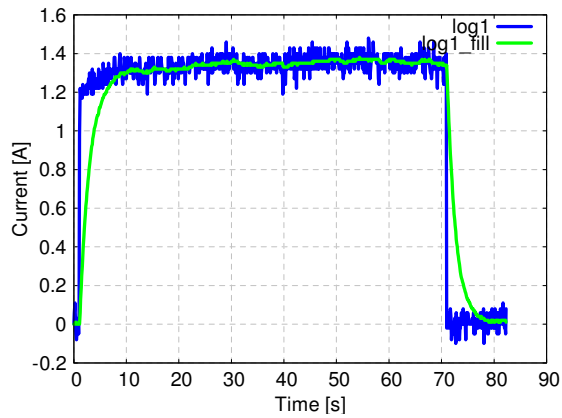


図 32: $V_{cc}=3.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (1 回目) 図 33: $V_{cc}=3.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (2 回目)

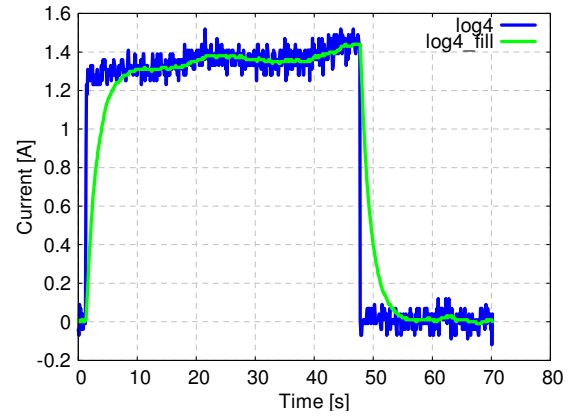
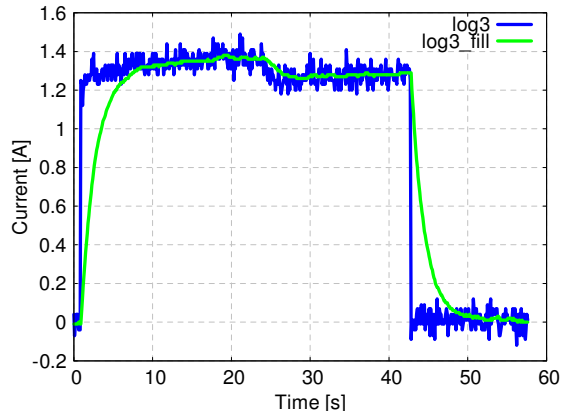


図 34: $V_{cc}=3.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (3 回目) 図 35: $V_{cc}=3.5$ にて形状記憶合金に流れた電流 (4 回目)

た電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log(i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 9 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 9: $V_{cc}=3.5$ にて形状記憶合金に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	範囲内での電流の平均値 [A]
10 秒から 70 秒	1.34287
10 秒から 45 秒	1.34597
10 秒から 40 秒	1.31162
10 秒から 45 秒	1.35114
平均値	1.33790

また, 形状記憶合金が縮んだ長さは 1 回目は 0.019 m , 2 回目は 0.019 m , 3 回目は 0.019 m , 4 回目は 0.019 m であった. 平均の長さは 0.019 m であった. そのため $V_{cc}=3.5 \text{ V}$ の時の, 形状記憶合金の収縮率 $S_{3.5}$ は $l_n = 0.03 \text{ m}$ と (1) より, 0.6333 となった.

最後に, $V_{cc}=4.0 \text{ V}$ の時の電流のログデータを図 36~39 に示す.

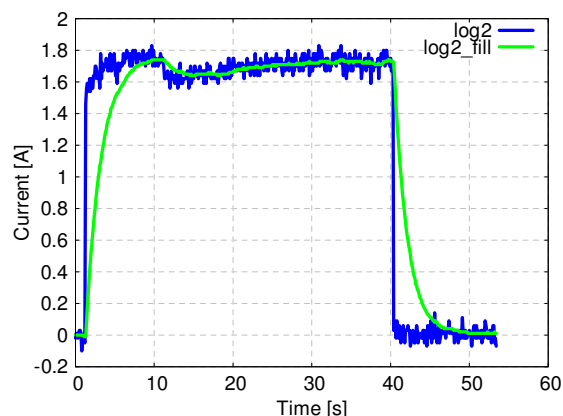
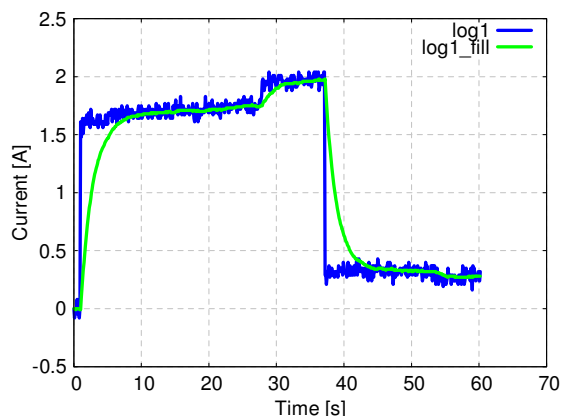


図 36: $V_{cc}=4.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (1 回目) 図 37: $V_{cc}=4.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (2 回目)

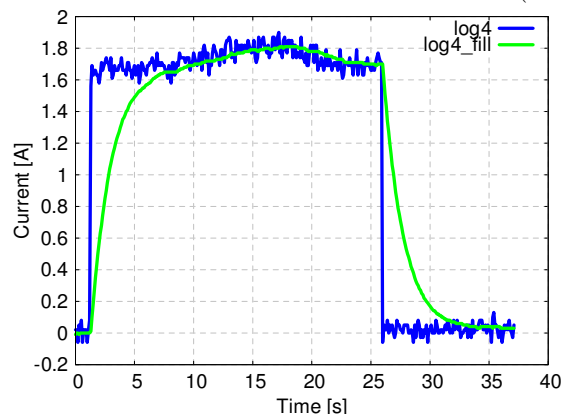
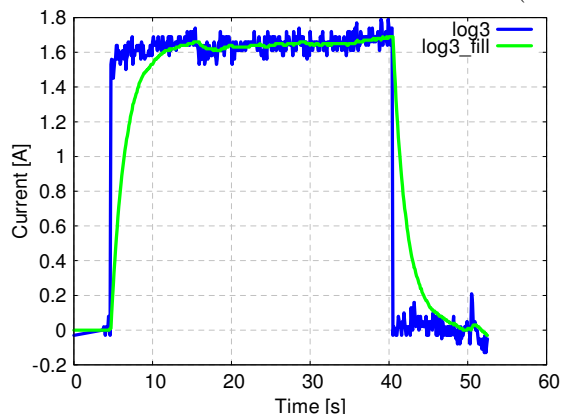


図 38: $V_{cc}=4.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (3 回目) 図 39: $V_{cc}=4.0$ にて形状記憶合金に流れた電流 (4 回目)

図 36~39 のうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値, $\log i_fill (i=1,2,3,4)$ が電流センサで取得した電流値に, カットオフ周波数 0.6 rad/s のローパスフィルタをかけた値である. このうち, $\log i (i=1,2,3,4)$ のログデータを使用し, 表 10 に示すように流れた電流の平均値を求めた.

表 10: $V_{cc}=4.0$ にて形状記憶合金に流れた電流の平均値

ログデータの範囲	範囲内での電流の平均値 [A]
10 秒から 25 秒	1.69454
15 秒から 40 秒	1.69317
15 秒から 40 秒	1.54381
10 秒から 25 秒	1.74539
平均値	1.66923

また, 形状記憶合金が縮んだ長さは 1 回目は 0.019 m , 2 回目は 0.019 m , 3 回目は 0.019 m , 4 回目は 0.019 m であった. 平均の長さは 0.019 m であった. そのため $V_{cc}=4.0 \text{ V}$ の時の, 形状記憶合金の収縮率 $S_{4.0}$ は $l_n = 0.03 \text{ m}$ と (1) より, 0.6333 となった.

以上の実験から, 流れた電流と電源電圧, 形状記憶合金の収縮率から, 表 11 に示すように, 形状記憶合金の収縮率に対する電力の効率 E_C が得られる.

表 11: 形状記憶合金の効率

電圧 [V]	平均電力 [W]	収縮率	効率 E_C [1/W]
2.5	2.497	0.03250	0.01302
3.0	4.003	0.3417	0.08536
3.5	4.683	0.6333	0.1352
4.0	6.677	0.6333	0.09485

表 11 より，電源電圧 $V_{cc}=3.5$ V の時，形状記憶合金の収縮率に対する電力の効率 E_C は最大となり， $E_C = 0.1352$ 1/W となった．

5 5 指式マニピュレータの製作

本実験で用いる 5 指式マニピュレータを製作する．5 指式マニピュレータの構成図を図 40 に示す．

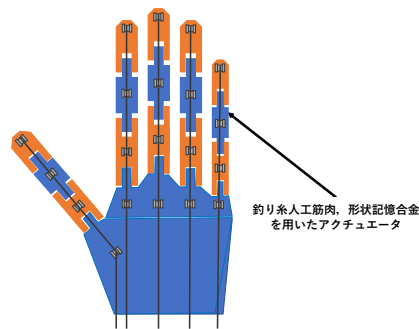


図 40: 5 指式マニピュレータの構成図

図 40 に示すように，各指にアクチュエータを取り付け収縮させることで，指を動作させる．アクチュエータは，図 41 に示す方法で指に取り付ける．

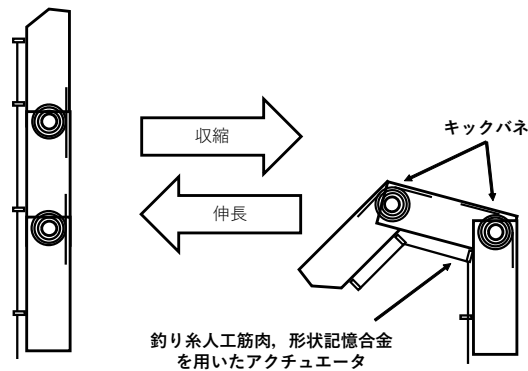


図 41: アクチュエータの取り付け方法

図 41 に示すように，アクチュエータを各指に取り付ける．指の各関節にはキックバネを取り付けることで，常に指が開く方向に力を発生させる．これにより，アクチュエータが収縮すると指が閉じ，アクチュエータが伸長すると指が開く．アクチュエータは釣糸系人工筋肉，あるいは形状記憶合金を用いて構築されるので，それぞれに電流を流すことによって収縮することができる．そのため，各指を独立して動作させることができる．

マニピュレータは実際の人の手を参考に，表 12 に示すような範囲で設計した．

表 12: マニピュレータの設計範囲

設計パラメータ	値 [m]
手首から中指の先端までの長さ	0.21
中指の付け根から先端までの長さ	0.096
掌の最大幅	0.081
各指の最大直径	0.018

実際に製作した 5 指式マニピュレータを図 42 に示す。

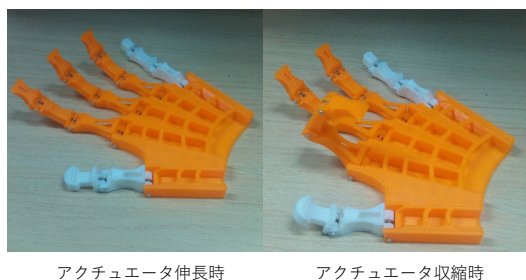


図 42: 製作した 5 指式マニピュレータ

図 42 に示すように、釣り糸を指に取り付け引っ張ることで、アクチュエータが収縮した時を再現した。その結果、各指が問題なく独立して動作できることを確認した。

6 5 指式マニピュレータの動作実験

6.1 駆動回路

釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を用いたアクチュエータを製作した 5 指式マニピュレータに取り付け、動作実験を行う。そのために、図 43 に示す駆動回路を用いてアクチュエータを制御する。

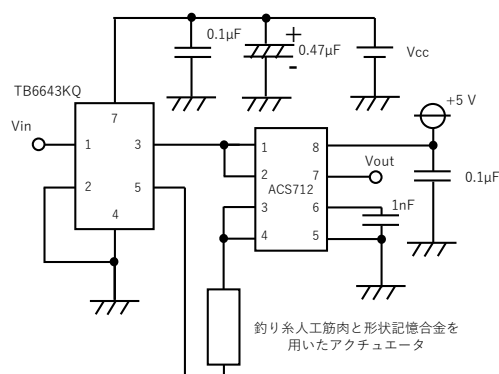


図 43: 駆動回路

図 43 のうち、Vout は図 3 と同様に Arduino のアナログピンに接続し、アクチュエータに流れる電流を計測する。また、Vin は Arduino のデジタルピンに接続し、モータドライバ IC に PWM 信号を用いて制御信号を送る。そして Arduino では、計測した電流値から PID 制御側を用いて、モータドライバ IC に送る PWM 信号のデューティ比を制御する。これによりアクチュエータに流れる電流を制御し、アクチュエータを駆動させる。

6.2 動作結果

6.2.1 釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータ

釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータを、5 指式マニピュレータの指に通して接続した。釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータを取り付けたマニピュレータを、図 44 に示す。

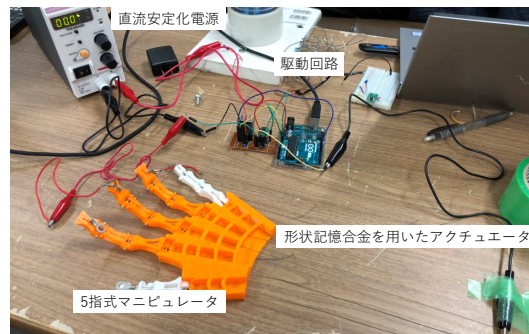


図 44: 実験の様子 (釣り糸人工筋肉)

図 44 に示すように、本実験では中指を動作させる。アクチュエータに流れる電流を 0.4 A になるように制御し、実際に動作させたときの様子を図 45 に示す。

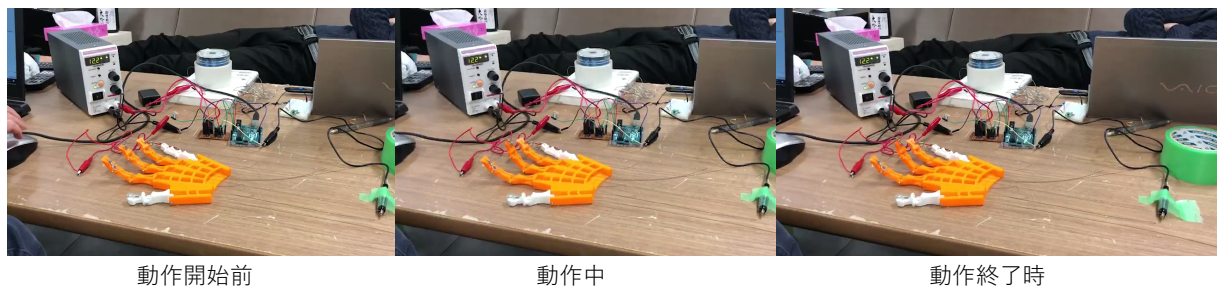


図 45: 動作中の様子 (釣り糸人工筋肉)

図 45 からわかるように、5 指式マニピュレータの中指を動作させることができた。また、電流を流すのを停止した後、指に取り付けたキックバネにより釣り糸人工筋肉が伸び、程度指が伸びた状態に戻った。そのため、指を連続的動作させることができた。しかし、キックバネの力が足りず、指は完全に音の場所に戻ることはなかった。

6.2.2 形状記憶合金を用いたアクチュエータ

形状記憶合金を用いたアクチュエータは、大きさの問題から 5 指式マニピュレータに直接取り付けることができない。そこで、釣り糸を先端部に取り付けることで、5 指式マニピュレータに接続した。形状記憶合金を用いたアクチュエータを取り付けたマニピュレータを、図 46 に示す。

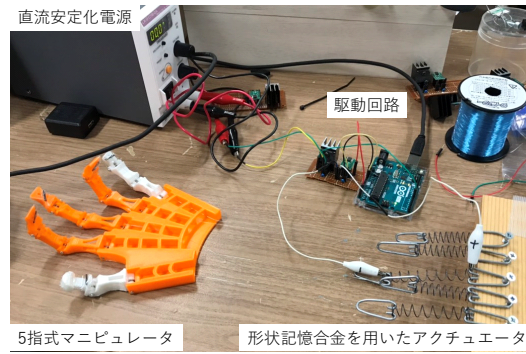


図 46: 実験の様子 (形状記憶合金)

図 46 に示すように、本実験では中指を動作させる。アクチュエータに流れる電流を 0.7 A になるように制御し、実際に動作させたときの様子を図 47 に示す。

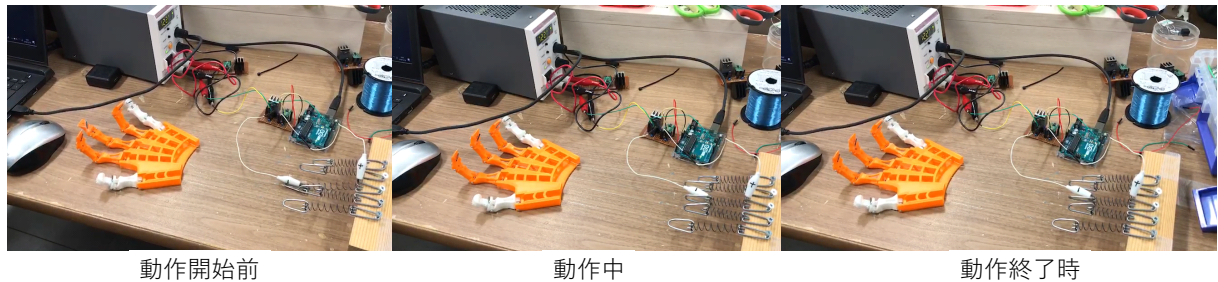


図 47: 動作中の様子 (形状記憶合金)

図 47 からわかるように、5 指式マニピュレータの中指を動作させることができた。しかし、動作終了時の中指は、動作開始前の位置に戻っていない。これは、5 指式マニピュレータに取り付けたキックバネの力が弱く、形状記憶合金を引っ張ることができなかったためである。そのため、指を連続させて動作させることが困難であった。

7 考察

釣り糸人工筋肉と形状記憶合金を用いたアクチュエータの性能を比較すると、釣り糸人工筋肉の収縮率に対する電力の効率 E_C は最大で $E_C = 0.01286 \text{ 1/W}$ なのに対し、形状記憶合金の収縮率に対する電力の効率 E_C は最大で $E_C = 0.1352 \text{ 1/W}$ となった。このことから、収縮率に対する電力の効率は、形状記憶合金のほうが高いことがわかる。また収縮率も、釣り糸人工筋肉が最大で 0.08306 なのに対し、形状記憶合金は最大で 0.633 であり、形状記憶合金は釣り糸人工筋肉よりも収縮率が高いことがわかる。このことから、形状記憶合金を用いたアクチュエータは、釣り糸人工筋肉を用いたアクチュエータよりも小さい電力で動作させることができると考えられる。しかし、本実験で用いた形状記憶合金は 1 本あたりの価格が約 2000 円である。これに対して釣り糸人工筋肉は、1 本あたり約 1000 分の 1 程度の値段である、約 2.3 円で製作することができた。そのため、長い釣り糸人工筋肉を製作することで、形状記憶合金に比べ低い収縮率を、アクチュエータの価格を抑えて補うことができる。

以上の理由から、マニピュレータにアクチュエータを収納する十分なスペースがある場合は、コストの面から釣り糸人工金にが優れていると考える。しかし形状記憶合金は、釣り糸人工筋肉よりも高い収縮率を持つため、より小型のマニピュレータを設計することができると考える。

8 まとめ

本実験では、熱によって収縮するアクチュエータとして形状記憶合金と釣り糸人工筋肉に注目し、アクチュエータの収縮率と電力効率から、性能の比較をした。その結果、収縮率と電力効率はともに形状記憶合金が優れていることが分かった。しかし、本実験で製作した釣り糸人工筋肉の価格は形状記憶合金の約 1000 分の 1 であり、釣り糸人工筋肉は低価格で熱によって収縮するアクチュエータとして有用であると考ええる。さらにこれらのアクチュエータを用いることで、軽量な 5 指式マニピュレータを製作することができた。本実験で製作したマニピュレータは、電流制御によって駆動でき、構造が簡単かつ軽量であるため、ロボットのエンドエフェクタなどに応用できると考える。

参考文献

- [1] 本間大; 三輪敬之; 井口信洋. 形状記憶効果を利用したデジタルアクチュエータ. 日本機械学会論文集 C 編, 1983, 49.448: 2163-2169.
- [2] 福井航; 三浦久典. ナイロン糸アクチュエータの基礎特性. In: 精密工学会学術講演会講演論文集 2017 年度精密工学会春季大会. 公益社団法人 精密工学会, 2017. p. 171-172.