

実践的な演習による生体計測に関する教育手法の開発

Development of educational method for bioinstrumentation by practical workshop

柴田 芳幸¹⁾, 深谷 直樹¹⁾, 吉村 拓巳¹⁾, 花房 昭彦²⁾

Yoshiyuki Shibata¹⁾, Naoki Fukaya¹⁾, Takumi Yoshimura¹⁾, Akihiko Hanafusa²⁾

要旨：本稿では、生体計測について学ぶ学生のための実習内容の充実を狙った補助教材を開発したので報告する。補助教材の題材は、計装アンプと Arduino を用いた筋電図計測回路の製作実習とした。これにより、アナログ回路を使った電子回路工作と、Arduino を用いたデジタルフィルタ回路のプログラミングを実習することができ、さらに自身が製作した回路で生体計測が行えると考えた。授業への展開として、本校 4 年生と 5 年生の計 8 名を対象に回路の製作実習を行った結果、学生の興味を惹くことができた。また、この回路を用いて平成 30 年度ひらめき☆ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI を実施した。参加者からは実施内容について肯定的な意見を得ることができた。

キーワード：筋電図計測, 電子工作, Arduino, メカトロニクス

1. はじめに

東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科医療福祉工学コースは、電気・電子回路や情報処理などの電気系基礎科目と、機械製図、機械加工、工業力学などの機械系基礎科目が教育内容に設定されている。最終的に、医療システム、福祉機器やロボットシステムなどを 5 年次の卒業研究で開発、製作するためには、電気と機械の両方について深い知識や技術を必要としている。そして電気・機械技術の中でも、計測と制御は医療システムやロボットシステムの根幹となる技術であり、これを理解していないと医療福祉工学に関するものづくりを行うことはほぼ不可能である。しかしながら、「センサにより計測した信号をコンピュータに取り込んで何らかの処理を行い、出力して別の機器を動かす」といった、計測と制御の一連の流れを学習することは座学だけでは理解が非常に難しい。一方で筆者らの研究グループでは、生体センサや義手、義足、装具の研究開発を行っており、生体信号の計測とその信号によってモータなどの各種アクチュエータを駆動するための手法をいくつか確立している[1-3]。これらの研究から得た知見をもとに、生体計測の中でも基本となる筋電図計測を通じて、計測と制御に関する学習の一助となるような補助教材について開発・検討を行った。本稿では、補助教材として開発した筋電図スイッチ回路について紹介する。そして、補助教材を実際に卒業研究およびゼミナールで使用した様子と、平成 30 年度ひらめき☆ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI を実施した件を報告する。

2. 筋電図スイッチ回路について

ヒトの骨格筋における活動電位の時間的変化を表したも

のを筋電図と呼ぶ。体表面に電極を張り付けると、1 [mV] 程度の振幅で 0.03[kHz]程度の基本周波数の電圧変動が測定される。筋電図計測器の製造・販売を行う企業として、海外では Delsys 社、国内では日本光電工業株式会社など有名で、他にも有限会社追坂電子機器などが製造販売を行っている。本校医療福祉工学コースでは 3 年次に筋電図計測実験実習を行っており、実験計測には BIOPAC SYSTEMS 社の MP36 を用いている。これらの製品はどれも臨床研究の分野では有名であるが、信頼性や無線、有線の種別、計測チャンネル数の増加などに応じて機器の価格も非常に高価なものとなっている。一方で筆者らの研究グループでは、上肢装具の関節動作のトリガーとして筋電図を用いており、前腕部に張り付けた表面電極によって手関節の掌屈/背屈動作、橈屈/尺屈動作、回内/回外動作、指の屈曲/伸展動作を判別し、判別した手指の動きに応じて上肢装具の関節を任意に動作させることができるシステムを開発している[4]。筋電図計測は、計装アンプを用いた 8 チャンネル筋電図計測回路を製作して計測を行っている。この筋電図計測回路のノウハウをもとに、学生の学習補助教材を開発するものとした。

開発する教材のコンセプトを以下に述べる。できるだけ安価で、構成部品の入手が容易であることを主眼に置いた。さらに、計装アンプ、抵抗、コンデンサ等を利用したアナログ回路と、Arduino によるデジタルフィルタを用いることで、電気電子回路の工作実習とプログラミングによる信号処理の方法を一度に学習できるような回路とした。電極は使い捨て型の表面電極を用い、信号処理の簡便さから有線接続とした。また、外部機器へ信号を出力するために DA コンバータを Arduino に接続することにした。出力から先には、モータや空圧弁、LED などの何らかのアクチュエータを接続し動作（スイッチング）させるものとした。図 1

1)東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科医療福祉工学コース 2)芝浦工業大学システム理工学部生命科学科

に筋電図スイッチ回路の信号処理順序を、図 2 に筋電図スイッチ回路図を示す。

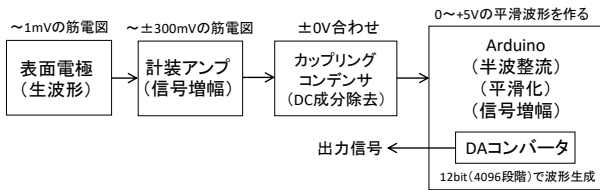


図 1. 筋電図信号の処理順序

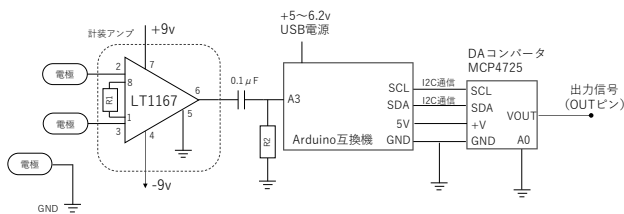


図 2. 筋電図スイッチ回路図

まず、ユニバーサル基板を用いて筋電図スイッチ回路を試作した。電極は、メディコ電極 (MSGLT-04, アズワン) を計測したい筋のある皮膚表面に 2 枚、皮膚表面グラウンドに 1 枚、計 3 枚を貼り付けて計測を行う。電極と計装アンプの接続には、ワニ口クリップ (C-116, テイシン電機) と 1 芯シールドケーブル (2520, モガミ) をはんだ付けした簡易的なリード線を製作して利用した。筋電図信号の増幅には計装アンプ (LT1167, アナログデバイセス) を用いた。この計装アンプは、図 1 中の R1 の抵抗値により、最大で 10,000 倍まで増幅することができる。ここでは、1[KΩ]の半固定抵抗を接続することで約 50 倍~10,000 倍まで調整できるようにした。計装アンプの電源には 9[V]乾電池を 2 個使い、±9[V]の両電源で駆動させた。計装アンプからの出力信号は、基線を±0[V]に合わせるために 0.1[μF]のカップリングコンデンサに接続した (DC 成分除去)。R2 は Arduino 互換機マイコン (UNO R3, ELEGOO, 以下 Arduino) のアナログ入力ピンへ信号入力を行うためのプルダウン抵抗 1[MΩ]である。Arduino は 5[V]電源で駆動しており、このとき Arduino のアナログ入力ピンは 0 から 5[V] (電源電圧) の信号を 1024 段階で読み取ることができ、最小で約 4.9[mV]の電圧を計測することが可能である。筋電図は正負の双方の大きさを持つ信号であるが、Arduino は正の電圧しか読み取ることができない。しかしながら、製作する筋電図スイッチ回路の機能としては正の電圧信号が出力できれば良いため、計装アンプからの出力信号はカップリングコンデンサを通じて DC 成分を除去した後に、そのまま Arduino へアナログ入力することにした。これはつまり、半波整流をしたことと同義である。本来筋電図の計測を行うだけであれば、計装アンプからの出力信号をそのままデータロガー等で記録すればよい。しかし、計測した筋電図信号を使って何らかのアクチュエータを動かすためには、計装アンプによる増幅後でも数百[mV]程度の電圧しかなく、スパイク波形である筋電図信号を滑らかな 0 から

5[V]程度の電圧信号に変換する必要がある。そこで Arduino に筋電図信号を取り込み、ローパスフィルタ処理を行い、スパイク波形だった筋電図信号を滑らかな山なりの信号へ変換 (平滑化) した後、再度増幅するプログラムを組んだ。Arduino プログラミングによる平滑化処理には差分方程式を利用した。Arduino のマイコンには、Hi-Low のデジタル出力ピンと PWM によるアナログ出力ピンが備わっている。PWM 出力よりさらに滑らかな信号を出力できるように、DA コンバータ (MCP4725, マイクロチップ) を別途接続した。DA コンバータは、Arduino と I2C 通信を行う。一連の筋電図信号の処理の流れを示すと、生波形→計装アンプで信号増幅→コンデンサで DC 成分除去→Arduino で平滑化と増幅→DA コンバータからアナログ出力、となる。製作した回路が筋電図信号を計測し、平滑波形を出力できるかどうか確認するため、オシロスコープ (TBS1052B, テクトロニクス) を用いて計測を行った。図 3 に計測した信号を示す。図 3 中の上段が計装アンプで増幅した後の EMG 信号 (200[mV/div]) で、下段が Arduino および DA コンバータからの出力信号 (2[V/div]) である。高周波でスパイク状の筋電図波形が、0 から 5[V]の山なりの波形に変換できていることがわかる。

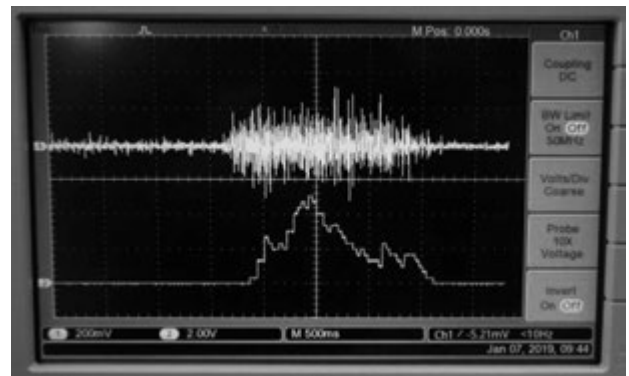


図 3. 計測した筋電図信号

3. ゼミナールと卒業研究での実習

本校医療福祉工学コースのゼミナールと卒業研究にて、4 年生 4 名と 5 年生 4 名の計 8 名を対象に、開発した筋電図スイッチ回路の製作実習および計測実験を行った。学生がユニバーサル基板で回路製作を行うと、配線に非常に時間がかかってしまう。そこで、基板の配線パターンを基板設計ソフト・EAGLE にて設計し、CNC フライス盤 (KitMill SR200, オリジナルマインド) により 0.5 ミリ径のエンドミルで銅張積層板 (FR-1, サンハヤト) を切削加工して、配線パターンを製作した。基板に部品をはんだ付け作業するだけで、回路を組み立てることができるようになった。器用な学生であれば、30 分かからない程度で回路を組み立てることができた。しかし、不要な銅箔部分を絶縁処理していなかったため、電子工作になれていない学生は部品のはんだ付けが難しかった。よって、回路製作の容易さと基板の量産を求めて、プリント基板の製造を専門業者 (ユニク

ラフト)に委託し、プリント基板を用いた実習に変更した。図4に銅張積層板とプリント基板でそれぞれ製作した回路を示す。プリント基板を使って回路を組み立てた後に、筋電図計測を行った。被検筋は皮膚表面に近い骨格筋であればどこの筋でもよいのだが、衣服をめくる必要がなく、かつ皮下脂肪が少なく確実に計測できる部位を考慮した結果、前腕部の筋とした。具体的には、利き手側の長橈側手根伸筋(手関節の背屈を行う筋)の筋腹に電極を2枚並べて貼った。グラウンド電極は、手関節の尺骨茎状突起に貼った。計測の結果、8名の学生全員について、自分で組み立てた筋電図スイッチ回路を使って筋電図を計測することができた。プリント基板を用いたことで、部品のはんだ付けが格段に行いやすくなっており、配線ミスが軽減したことがうかがえた。

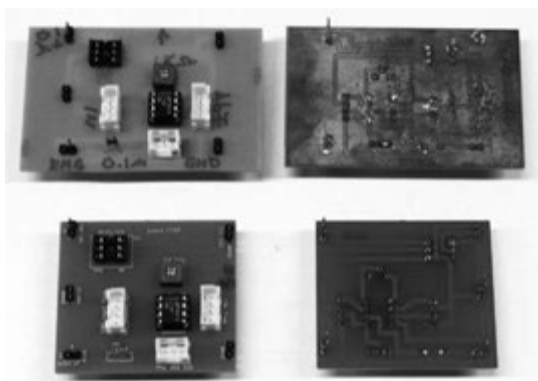


図4. 銅張積層板(上段)とプリント基板(下段)

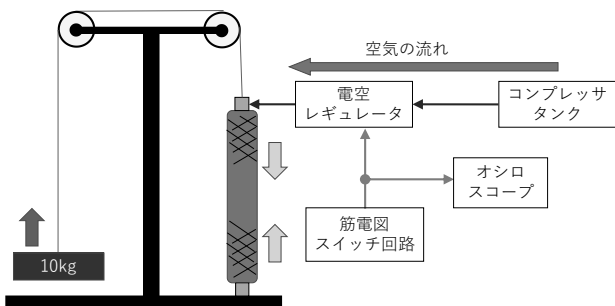


図5. 動作実験装置概略

次に、図5に示す簡易的な動作実験装置を作成した。電圧レギュレータ(ITV0050-2ML, SMC)は、0から5[V]の入力信号に比例して、およそ0から0.9[MPa]の圧力を制御することができる。コンプレッサ(DPP-AYAD-P, コガネイ)の供給圧力は最大で約0.5[MPa]で、エアタンク(VBAT05A1, SMC)に接続した。電圧レギュレータの出力ポートにはマッキベン型空気圧人工筋を取り付けてあり、マッキベン型空気圧人工筋の一片は装置に固定されていて、もう片方は10[kg]のおもりにつながっている。筋電図スイッチ回路の出力信号を、電圧レギュレータに入力することで、被検者の発揮した筋電図の大きさに比例して空気圧人工筋が収縮し、おもりを吊り上げる仕事を行う。被検者の筋電図波形は、オシロスコープにて常に観測できるようにした。マッキベン型空気圧人工筋は、以前の我々の研究で

研究・開発、製作を行ったものである[5]。この動作実験装置を用い、筋電図スイッチ回路と空気圧人工筋によるおもりの吊り上げ実験を行った。実験の結果、筋電図の発揮に合わせてマッキベン型空気圧人工筋が収縮し、おもりを持ち上げることができた。しかし、筋電図スイッチ回路の出力信号を、電圧レギュレータへ2[V]程度しか入力することができなかった。筋電図スイッチ回路の出力信号を電圧レギュレータには接続せず、オシロスコープだけに接続した場合は最大5[V]の電圧変化を計測できた。従って、筋電図スイッチ回路のDAコンバータから出力できる電力が不足し、電圧レギュレータのドライバを完全に駆動させることができなかったことが考えられる。電圧レギュレータを最大まで動作させるためには、筋電図スイッチ回路の出力信号と電圧レギュレータのドライバの間に、トランジスタを用いた電力増幅回路を組み込む必要がある。

4. ひらめき☆ときめきサイエンスの実施

平成30年8月17日に、本校にて科研費「ひらめき☆ときめきサイエンス」を実施した。実施内容は、前項で述べた筋電図スイッチ回路の製作と、図5に示す動作実験装置を用いたマッキベン型空気圧人工筋によるおもり吊り上げ実験とした。参加者は中学1年生から中学3年生の9名、保護者3名で、授業にて製作実習、計測実験を経験した本校学生8名に補助を依頼した。図6は筋電図スイッチ回路製作の様子である。参加者の多くは、小学校や中学校、あるいは個人ではんだごてを使った電気電子工作を体験したことがあり、簡単な講習で全員がプリント基板に部品をはんだ付けすることができた。



図6. はんだ付け作業の様子



図7. Arduinoプログラミングの様子

次にプログラミング演習室にて、Arduino プログラムを入力する作業を行った（図 7 参照）。参加者はパソコンには不慣れであったため、補助学生が丁寧に入力作業の支援を行った。半角と全角、コロンとセミコロン、カンマとコンマの入力間違いが多かった。Arduino は C++言語と同等の言語で動作している。この作業を通じて、コンパイルやデバックなど、プログラムを入力してからマイコンに書き込むまでの手順を学習することができた。Arduino のプログラミングを書き込み終了後、Arduino と筋電図スイッチ回路基盤を接続して完成となる。筋電図スイッチ回路の全体像を図 8 に示す。有線にて筋電図を計測するときには、電極とリード線の断線による不良が多いため、ワニ口クリップ（C-116、テイシン電機）と 1 芯シールドケーブル（2520、モガミ）をあらかじめ筆者がはんだ付けして製作しておき、当日は配布のみとした。図 8 中の、赤（筋電図信号）と白（GND）の線が事前に製作したリード線である。

図 9 に、完成した筋電図スイッチ回路を用いた、おもり吊り上げ実験の様子を示す。男女差や年齢を問わず、被検者の筋があまり発達していないと筋電図計測が難しいのだが、参加者全員の筋電図を計測することができた。そして、マッキベン型空気圧人工筋を収縮させて、おもりを吊り上げることができた。

5. おわりに

本稿では、筋電図計測を通じて、計測と制御に関する学習の一助となるような補助教材について検討と開発を行ったのでこれを紹介した。開発した筋電図スイッチ回路を用いてゼミナールと卒業研究にて製作実習と計測実験を行った。結果として、筋電図の發揮に合わせてマッキベン型空気圧人工筋が収縮し、おもりを上下させることができた。一方で回路の設計、部品選定の不備から、筋電図スイッチ回路の出力電流が小さく最大圧力を發揮できなかった。実習補助教材としては改善が必要な点があるものの、実習中、実験中の学生の感触はよく、教員と学生が一丸となって取り組むことができたため、筋電図スイッチ回路の製作は、学生の興味を惹くことができる内容だと考える。また、平成 30 年度ひらめき☆ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI を実施した結果、中学生の興味を惹くことができた。筋電図は、計測した波形をオシロスコープでリアルタイムを觀察することができるので、参加者はみな自身の筋電図がどういったらきれいにたくさん發揮されるのか、電極を貼る位置や力の入れ具合などを熱心に確認していた。実習後に参加者から、空圧機器ではなくて次はモータを動かせるようにしてみたい、という意見が出ており、参加者の工学的な好奇心を刺激することができたと思われる。

本校学生による回路の製作と、Arduino プログラミングにはおよそ 90 分程度を要した。さらに計測と動作実験に 90 分程度を必要とした。実際に実習にかかった時間と、実習の難易度を考慮すると、3 年生か 4 年生の実験実習に適し

ていると考えられる。しかし、経済的な側面では本回路の製作費として 4000 円程度かかっており、市販の筋電図計測機器に比べると非常に安価であるが、ひとつの実験実習科目にだけ使う教材費としては高価である。今後の課題として、他の生体計測実験での使用や、エンジニアリングデザイン科目などと連携することで、この回路を在学中に複数回使えるように教育内容を修正することが挙げられる。そして、先に述べた回路の改善をすることはもちろんのこと、回路を構成する部品の見直しを行い、製作費の軽減を図る必要がある。



図 8. 完成した筋電図スイッチ回路



図 9. おもり吊り上げ実験の様子

謝辞

本稿で紹介した筋電図スイッチ回路の開発は、平成 29 年度東京都立産業技術高等専門学校特定課題研究費・教育課題研究と、平成 30 年度ひらめき☆ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI（整理番号 HT30121）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] N. Fukaya, Y. Ogasawara : Development of Humanoid Hand with Cover Integrated Link Mechanism for Daily Life Work, 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2017), pp.849-852, Nagoya, Japan, 2017

- [2] 吉村拓巳, 田村俊世, 黄銘: 体温調整が困難な頸髄損傷者等の障害者に対する 車いす運動中の体温制御システムの開発, デザントスポーツ科学, Vol.38, pp172-181, 2017
- [3] A. Hanafusa, F. Shiki, H. Ishii et al. : Development of an Active Upper Limb Orthosis Controlled by EMG with Upper Arm Rotation, IHSI 2018: Intelligent Human Systems Integration, pp163-169, 2018
- [4] 石井晴己, 花房昭彦, 大西謙吾ほか: 上肢装具制御への応用を目的とした筋電計測システムの開発—Arduino マイクロコントローラを用いた手首の動作判別—, 第 26 回ライフサポート学会フロンティア講演会予稿集, p.69, 2017
- [5] 柴田芳幸, 山本紳一郎: 空気圧人工筋を用いた免荷歩行訓練装置, 計測と制御, Vol.56, No.4, pp276-280, 2017