

平成 26 年度卒業論文

筋電義手の感覚フィードバック装置の比較研究

神戸医療福祉専門学校三田校
義肢装具士科 4 年制 4 期生

1110007 奥田 玲央

1110011 古島 祐人

1110019 高橋 隼平

1110026 中村 義之

1130001 飯野 尚文

担当教員 大坪 靖和 先生

目次

1. 緒言	1	6. 結論	9
1-1. はじめに	1	7. 謝辞	9
1-2. 背景	1	引用文献	10
1-3. 先行研究	1	Appendix A 操作訓練フロー	11
1-4. 筋電義手の操作訓練	3	Appendix B フィードバック装置	12
1-5. 本研究の目的	3	B-1. ハードウェア	12
1-6. 仮説	3	B-1-1. 圧力センサー	12
2. 装置	4	B-1-2. 刺激装置	13
2-1. 全体構成	4	B-1-3. 信号処理回路	14
3. 実験	5	B-2. ソフトウェア	16
3-1. 概要	5	B-2-1. 使用言語	16
3-2. 予備実験	5	B-2-2. プログラミング	16
3-3. 本実験	6	Appendix C 統計計算	19
3-3-1. 被験者群	6	C-1. 計算手順	19
3-3-2. 手順	6	C-2. 回帰曲線	19
3-3-3. 配置	7	Appendix D 計算データ	21
4. 結果	8	Appendix E 回帰曲線計算	22
4-1. 概略	8		
4-2. 詳細	8		
5. 考察	8		
5-1. 習熟度の違い	8		
5-2. FB 装置無しでの習熟度	8		
5-3. 被験者数	8		

抄録

筋電義手の操作において、感覚フィードバック(以下 FB)の有用性が示されている。本研究では、健常者の被験者(n=35)を5グループに分け、筋電義手の基本操作訓練を想定して「振動」と「音」の感覚 FB の比較実験を行った。結果は、振動 FB に優位性がみられた(P=0.05)が、操作訓練の初期において短期間のみ感覚 FB を使用しても効果は得られないことも分かった。

キーワード：筋電義手、フィードバック、骨伝導、振動、操作訓練

1. 緒言

1-1. はじめに

筋電義手とは体外力源義手の一種類で、電動モーターを力源とした電動義手である¹⁾。筋肉の動きによって発生する電位差を読み取り電動モーターを制御し、ハンドの開閉を行う。

欧米先進国では電動義手が標準的な義手の一つとなっている。日本において筋電義手が普及していない理由として、メンテナンス不備、筋電義手自体の重量などが従来より指摘されている。

しかし川村らが指摘しているように筋電義手はその装飾性、機能性、耐用性、騒音や重量面において十分実用的であり、陳らが指摘しているように実生活においては極めて有用なものである。²⁾

1-2. 背景

現在、義手の支給制度が改善されつつあり、それに伴って筋電義手使用者の増加が予想される。筋電義手対象者の中には使用を継続して行わず中断してしまう者も少なくない^{1), 2)}。そこで筋電義手使用中断者例を減らすために義手操作の習熟度が重要となる。

また、病院内、その後の訓練期間で要する時間によっては筋電義手使用中断者の増加を促すことにつながる可能性もある。それを防ぐためには訓練段階において使用者が簡単に、そして短期間で操作を行えるようにする必要がある。そのため筋電義手に感覚 FB 機能を備えることで、訓練者自身の習熟度を向上させ、訓練期間の短縮、また筋電義手使用者の操作向上につなげることができると考えられる。

多くの文献でも筋電義手の訓練による習熟度が重要であることが解り¹⁾⁻⁵⁾、なおかつその習熟度の向上には感覚フィードバックが重要であると示されている³⁾。

しかし、さまざまな感覚 FB 装置がある中で、どの感覚 FB が有用であるのか比較した研究は数少ない。その中でも有用と言われている振動の感覚 FB 装置と音の感覚 FB 装置を組み合わせた『骨伝導の感覚 FB 装置』の有用性について調査することにした。

1-3. 先行研究

感覚フィードバックの種類は数多くの先行研究で検討されている。電気、振動、圧力、音、光、骨伝導の各刺激を用いた FB について下記にまとめる。

(1) 電気刺激装置

辻ら⁵⁾の研究では、比較的感覚順応の少ない安定な感覚を実現することができ、かつ、エネルギー消費量が少ないという特徴をもち、その有効性が確認されている。

奥野ら⁶⁾の研究では、義手と物体が接触してからの作業平均時間の短縮が見られた。把持の際に屈筋、伸筋を意識しないで良いため、操作が楽であった。これらのことより、システムの有用性が示唆された。

この研究では物体の把持に必要な情報提示することで、義手操作性の向上に繋がると考えられる。また、提示刺激においても単純なアナログ変調、振幅変調ではなく、パターン情報として提示するため、使用者の体調や電極貼付の状態に係らず、刺激を確実に提示可能であるとしている。

赤澤ら⁷⁾の研究では、電気刺激パターンにより義手把持状態の情報を伝達する感覚情報伝達システムを試作し、刺激パターンの認知が可能であることを示した。

R.N.Scott¹⁰⁾は、筋電義手は電池式であるため電気刺激に応用しやすいとしている。

(2) 振動刺激装置

奥野ら^{8,9)}の研究では、視覚による FB の有無にかかわらず、感覚 FB のない場合と、感覚 FB がある場合では、物体の変形量に有意な差があった。このことにより、感覚 FB の効果が示された。

可聴周波数以下の皮膚振動感覚の閾値である 10Hz の感覚 FB 装置を試作し、この装置は義手の把握力の大小により、使用者に提示する振動刺激が、連続刺激と断続刺激に切り替わるものであった。この装置を用い、健常者による物体把握実験を行い、義手の操作性が向上することを示した。

振動周波数が可聴域の範囲内においては、音が生じる。これは日常生活での使用において、使用者に不快感を与えると述べている。また、振動周波数の切り替えが可能で感覚 FB 装置を検討する必要があると述べている。

G.F.Shannon¹¹⁾の研究では電気刺激での FB より振動による FB の方が効果的であるとしている。

(3) 圧力刺激装置

木村ら¹²⁾の研究では、提案した力感覚 FB 機構をもつ筋電義手システムの有効性をある程度確認できた。しかし、被験者が筋電義手の操作に慣れていないことや感度の個人差、感覚 FB 装置の取り付け位置、感覚の順応などによってバラツキが出た。

Jacobs ら¹³⁾の研究では、圧力刺激の有用性が示されている。

(4) 音刺激装置

奥野ら¹⁴⁾の研究において、切断者を用いた物体把持実験では、本義手の訓練時間（1 時間弱）がわずかであるにもかかわらず、柔らかい物（紙の箱）を壊さず把握することができた。これは義手の制御システムが有効に働いたため、微妙な力の制御ができるようになり、柔らかい物を把握することが可能であったと考えられる。このことは、本研究で提案した義手を用いることにより、切断者がより短い訓練期間で、高度な作業を行える可能性を示唆している。

本義手では物体を把握する際、把持力の感覚 FB を用いることで使用者は把握力をより正確に認識でき、義手の制御を容易に行うことができた。このことは、感覚 FB が義手の操作性の向上に効果があることを示している。しかし、音の FB は長時間用いるには不快感が大きく、このまま実用化するのは困難である。長期間切断者に使用してもらい、評価を行うことが今後の課題であるとしている。

(5) 光刺激

田村ら⁴⁾の研究においては、FB 装置有群と無群による各被験者の習熟度の比較を行った結果、FB 有群の被験者 A は FB 無群の被験者 E と比較して危険率 1% で有意差が見られた。FB 有群の被験者 B にも、危険率 5% で有意差が見られた。

(6) 骨伝導刺激

補聴器などで広く使用されているが、感覚 FB の刺激として検討されている文献は見つけることが出来なかった。我々は骨伝導刺激が FB 装置として、通常の聴覚に大きく影響しないこと、長時間の受け入れが良いことなどのメリットはあるものの、義手の手先部の FB としては、頭蓋までの配線が必要となり、訓練動作にも制約が出るため、不適応と考えた。配線をワイヤレス (bluetooth など) とすることも可能であるが、高価となり、訓練時間に対してのコストパフォーマンスが悪い。

以下にメリット・デメリットについてまとめる。

メリット : 耳をふさがないので外耳にかける負担が少ない。騒音があっても聞きやすい (外耳での聴覚に影響しにくい)。通常のスピーカーやイヤホンに比べ、長時間使用の受け入れが良い。

デメリット : 通常のスピーカーやイヤホンに比べ、音質が悪い。音が小さく聞こえる。音漏れがある。装着し、振動を伝えるのは、頭蓋(骨突起部周辺)に限られる。

1-4. 筋電義手の操作訓練

新規切断者における筋電義手の操作訓練は、各病院・施設にもより異なるが、概略は Appendix A のようになる。

前腕新規切断の場合、筋電義手の基本動作訓練は 3～4 週目と思われる。

本研究ではこの期間において FB 装置を使用すると仮定して実験を行った。

1-5. 本研究の目的

本研究の目的は、①筋電義手訓練時における感覚 FB の把持力調節の違いを刺激別に明確にすること②基本動作訓練期間の短縮を図るような、訓練時に把持力調節が容易な刺激を提案することの 2 つであった。

本研究では感覚 FB を使用しなかった被験者群、骨伝導による感覚 FB 装置を使用した被験者群、振動による感覚 FB 装置を使用した被験者群の 3 つの習熟度を比較した。

1-6. 仮説

人が物をつかみ上げるとき、その対象物がなじみの物であれば力のコントロールは記憶と予測でこなしており、厳密な感覚 FB によるものではない。そして対象物が未知の物でも、掴み操作を繰り返すと急速にこの記憶が確立する。しかしこの記憶確立の過程は感覚情報に頼っており、視覚か体性感覚のどちらかが必要で、両方とも奪われると、大きく障害される。⁴⁾

筋電義手使用者の場合、視覚での FB によりハンドの開閉角度を知ることができるが、ハンドからの体性感覚は得られないため物体を把持する際の把持力を認識することはできない。¹⁾

以上 2 つのことから視覚および把持力を認識するための感覚 FB 装置を用いることにより把持力の調節が可能であると考え、感覚 FB の刺激別に把持力の習熟度の比較を行う。

先行研究から、奥野ら¹⁴⁾は音刺激により短時間での把持力の調節が可能であることを示しており、Pylatiuk ら¹⁷⁾が振動刺激の有用性を示している。

そのため我々は、健常者が視覚と体性感覚から記憶の確立を行うため、健常者と同じ条件(体性感覚)である『振動』の方が把持力の調節に適している刺激と考える。

また、骨伝導を感覚 FB として用いた文献は見つけることが出来ず、有用性を文献から確認することが出来なかった。そのため、最初に高価な無線を使用するよりも、今回は試験的なものとして、安価で手に入りやすく取り扱いが容易な有線で確認を行うこととした。

2. 装置

2-1. 全体構成

製作する感覚フィードバック装置の全体の流れは、図 2-1 のようになる。

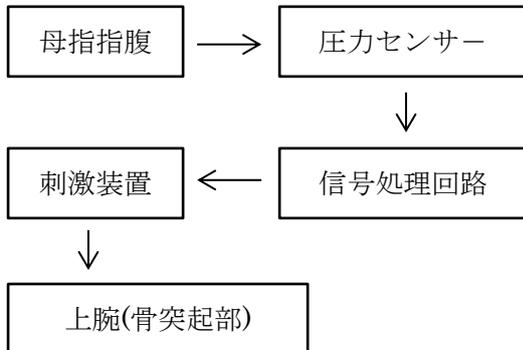


図 2-1 感覚フィードバック装置の流れ

義手の手先部は、三田校所有の筋電義手 Ottobock MyoBoy(ハンドとマイオメーター、図 2-2) および 筋電義手体験用カフ(オープンキャンパスなどにて使用されているもの、図 2-3)を用いた。圧力センサー、信号処理回路、刺激装置(振動/骨伝導)を本研究では自作とした。(図 2-4)

自作した装置に関して、Appendix B のとおり、ハード・ソフトに分けて述べる。



図 2-2 Ottobock マイオボーイ

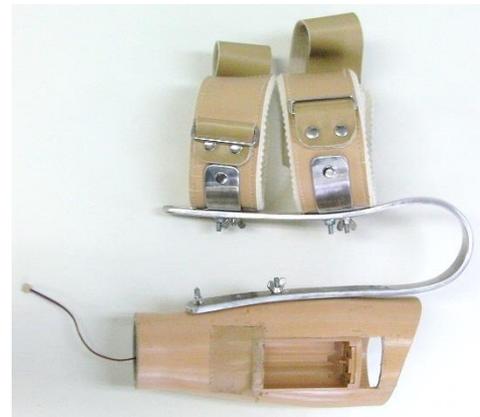


図 2-3 筋電義手体験用カフ

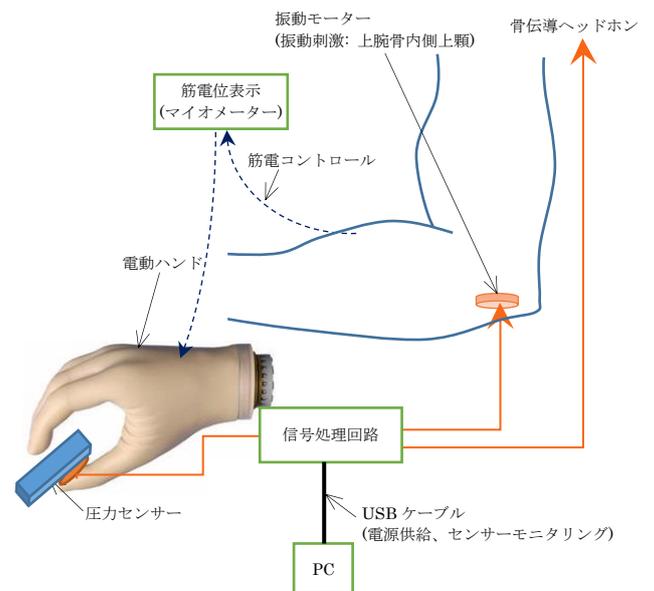


図 2-4 実験装置の構成

3. 実験

3-1. 概要

基本操作訓練のなかでも、難易度の高くないピック・アンド・プレイスを行い、所要時間を計測することで、習熟度を定量化した。

3-2. 予備実験

班員 2 名で機材の動作確認と本実験内容を検討する目的で予備実験を行った。筋電義手の操作(分離運動の確認、感度調整などを含む)を行い、把持物、移動距離、センサーの位置、振動刺激の位置などを決定した。義肢装具士科 11 期生の卒業研究も参考に、本実験の条件を以下のとおりとした。

(1) 被験者 選定条件

- ・被験者群 : 3 群 (A 群=FB 無し, B 群=骨伝導 FB, C 群=振動 FB)
- ・人数 : 15 名以上 (各被験者群につき 5 名以上)
- ・利き手 : 右利き
- ・BMI : 18.5~25.0

(2) 実験手順

- ・把持物 : 280ml ペットボトルに石膏泥を入れ固めたもの(重量 約 400g)
- ・移動距離 : 30cm
- ・移動回数 : 5 往復(1 セット)×10 回
- ・休憩時間 : 前半 5 回と後半 5 回の間 10 分間の休憩(前半, 後半とも 5 往復(1 セット)毎に 3 分間の休憩)

(3) その他

- ・椅子 : 高さ調節の可能な椅子(実習室の椅子)
- ・振動刺激位置 : 上腕骨内側上顆
- ・把持力上限 : 6kg 以上(シリアルデータ 680 以上)を失敗回とし、赤 LED を点灯
- ・引きずり防止 : 確実に持ち上げて、置くという動作を行うため障害物を設置 (図 3-1)

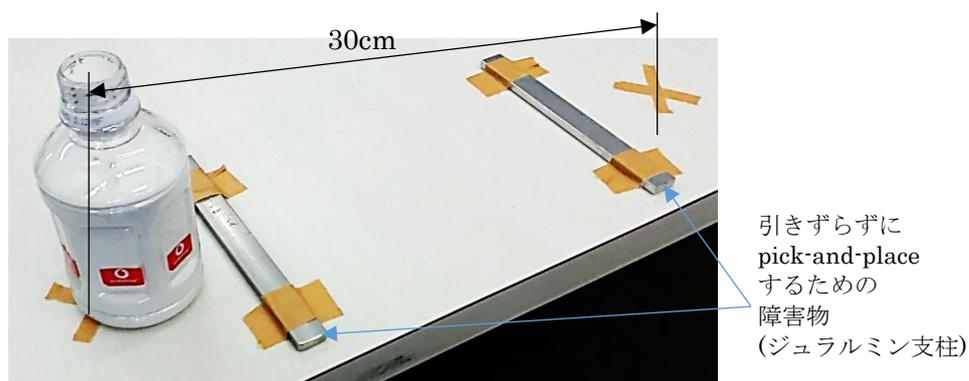


図 3-1 把持物と移動距離

3-3. 本実験

3-3-1. 被験者群

義肢装具士科 4 年制 1 年生～4 年生の中から被験者を抽出し、実験を行った。

本実験開始当初、3 群での本実験としていたが、後半に FB 無しとすると、習熟度の低下が見られたため、後半も FB 有りとする被験者群(B', C'群)を作り、延べ 35 名の被験者について実験を行った。

感覚 FB を使用しなかった被験者群(A 群), 骨伝導による感覚 FB 装置を使用した被験者群(B 群・B' 群), 振動による感覚 FB 装置を使用した被験者群(C 群・C' 群) の 3 つの習熟度を比較し、把持力調整が容易な刺激を判別する。

表 3-1 被験者群分類(○ : FB 有, — : FB 無)

	人数	前半	後半
A 群 (無)	9	—	—
B 群 (骨伝導)	8	○	—
B' 群 (骨伝導)	5	○	○
C 群 (振動)	8	○	—
C' 群 (振動)	5	○	○

3-3-2. 手順

(1) 石膏泥が入ったペットボトルを把持し 30cm 先の指定された位置に移動させる。この時、障害物を跨ぎ、ペットボトルは「落とす」のではなく「置く」ように注意を促す。これを 10 回(5 往復)繰り返すことで 1 セットとし、ビデオカメラで録画・計測し所要時間と失敗数を記録する。なお、計測者用視覚的 FB 装置(赤色 LED ランプ)の点灯と、ペットボトルの落下をもって失敗とし、その回の移動は再度行う。失敗回の経過時間は所要時間を含めない。

(2) ウォーミングアップを兼ねて義手に慣れていただくために 2 セット練習時間をとる。この練習時間内にどのような状況が失敗か等の説明も行う。

(3) 各感覚 FB 装置を装着した状態で 5 セット行う。

(4) 感覚 FB 装置を取り外し、10 分間休憩をはさむ。

(5) 感覚 FB 装置なしの状態でも 5 セット行う。

※1 セットごとに 3 分間の休憩をとる。(疲労を考慮して休憩を入れる)



図 3-2 本実験の様子



図 3-3 振動刺激の取り付け

3-3-3. 配置

基本的な班員の配置は、図 3-4 のようにして実施した。MyoBoy は右用であるため、FB 装置と電源供給 兼 モニタリング用の PC も被験者から見て右側に配置する必要がある。

実験側の各班員の主な役割は下記のとおりであった。兼任も可能であるが、少なくとも 3 人の班員が必要である。

- 班員 A : 実験全体の説明, 往復回数のカウント
- 班員 B : 休憩時間計測, 筋電センサー取り付け
- 班員 C : セット数のカウント, カメラ ON/OFF
- 班員 D : 所要時間計測(ストップウォッチ)入力, シリアルデータ監視
- 班員 E : 握りすぎ(赤 LED)監視, 失敗時の補助 (ペットボトル)

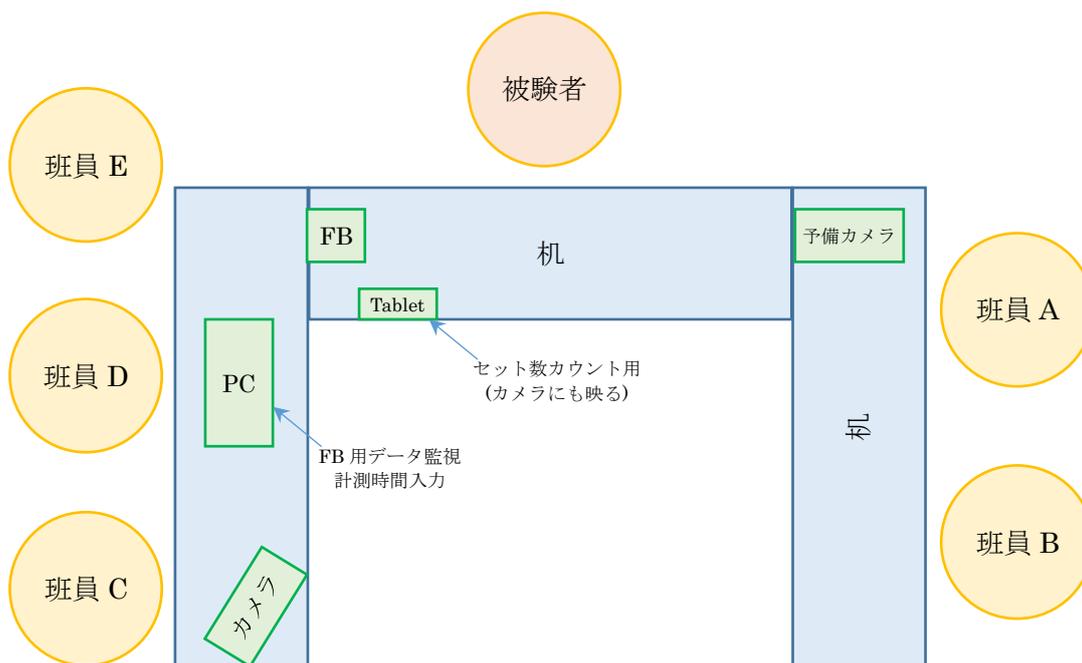


図 3-4 実験時の配置

4. 結果

4-1. 概略

本実験は初めに A, B, C 群の 25 件を実施し統計計算を行った。その結果, 3つのグループの中では A 群の習熟度が最も高い結果が得られた。これは, B 群, C 群は FB をなくした状況に慣れる必要があるため, 一貫して FB がない状態で実験を行った A 群の習熟度が最も高くなったのではないかと考えた。その結果から前後半ともに FB のあるグループ(B' 群 C' 群)を追加実験し, 合計 35 件の本実験結果の比較を行った。結果は C' 群の習熟度が最も高くなった。なお信頼区間は 95%とした。

(表 4-1)

表 4-1 統計計算結果(P=0.05)

	何%速くなったか
A 群	21.59 %
B 群	12.38 %
B'群	14.70 %
C 群	0.36 %
C'群	30.69 %

4-2. 詳細

被検者 35 名の実験結果として, 時間計測および統計計算の結果は, Appendix C を参照願う。

各被験者群において, 1 セット(5 往復)にかかった時間(秒数)を前半にくらべて後半で速くなった割合を有意水準 5 %と 1 %で検定を行った。

5. 考察

本実験から, 各被験者群の習熟度の違いが大きく, C'群の次に習熟度が高いのは A 群という結果となった。このことから, (1) 各被験者群の習熟度の違い (2) A 群(FB 無し群)の習熟度が高いこと (3) 被験者数の 3 つについて考察した。

5-1. 習熟度の違い

- (1) FB 無しの場合は視覚のみで「運ぶ」という動作を行っていたが, 骨伝導 FB は音階で把持力調整を行ったため, 視覚に加え音で把持力を調節することとなり意識すべき感覚が増えた。その為, 動作が慎重になったと考える。しかし逆に言えば意識する感覚が増え, 把持力調整をより精密に行う事から, 把持力調整についてはより繊細になったと考えられる。
- (2) 今回は運ぶ速さを基準に実験を行ったため, 把持力調整の習熟度が低くても運ぶスピードが速ければ習熟度が高いという結果になった。そのため, より把持力の微調整が行えていても習熟度が低いという結果になったと考える。
- (3) 骨伝導 FB では把持力の加減を音階で表現していた。その為把持力調整ではなく一定音階の「音を出す」事が目的になってしまい, 動作が慎重になったために習熟度が低いという結果になったと考える。

5-2. FB 装置無しでの習熟度

A 群の FB は視覚のみであり, 対して B 群 C 群は振動や骨伝導といった他の FB も含んで行った。仮説では同じ体性感覚である触覚を用いた『振動』の方が把持力の調節に適している刺激と考えていたが, A 群は FB が少ないため, 操作が単純に行えたのではないかと考察する。

5-3. 被験者数

B'・C'群は被験者数が A 群と比べて約半数しかおらず, 有用なデータが得られなかったと考える。

B'・C'群を追加実験として行い, 時間的にも実験に余裕はなかったが, 被験者数を統一した方が, より信頼できる解析が可能と考える。

6. 結論

筋電義手訓練時における感覚 FB の影響を実験によって確かめ、次のことがわかったと考える。

- (1) 義肢装具士科 11 期生の実験内容に基づき、特に訓練初期の基本動作訓練を想定した実験を行ったが、FB を外すと操作の習熟が遅くなる傾向にあることも分かった。
- (2) 有意水準によって実験結果の有意差が異なる実験群は、被験者数(n)の少ないことも影響していると思われる。
- (3) FB の感じ方にも個人差があるため、被験者の個人差に応じて FB の大きさやパターンなどを調節できる実験装置も望まれる。

また、本研究は、多くの被験者数について短期間での変化を調査するという“横型”の研究であった。

今後は次のような手法により、より臨床に即した感覚 FB の提案ができると考える。

- (1) 現在 作業療法の分野において取り入れられている訓練方法に近い実験を行うこと。

例：筋電義手操作習熟度評価表

(兵庫県立総合リハビリテーションセンター)

BBT(Box and Block Test, 1 分間テスト)

SHAP

(Southampton Hand Assessment Protocol)

ACMC

(Assessment of Capacity for Myoelectric Control)

- (2) 被験者を増やすだけでなく、数日間訓練を続けるなど“縦型”の研究手法も取り入れること。
- (3) 臨床における訓練は作業療法士にて行われることが多いため、作業療法士科や、臨床(例：県総合リハセンター等)にも見学や協力を求めること。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導 および 多大なご協力を頂きました教員の皆様、被験者として ご協力いただきました義肢装具士科 4 年制 4 期生、5 期生、6 期生、7 期生の皆様にお礼申し上げます。誠にありがとうございました。

引用文献

- 1) 陳 隆明：筋電義手処方の判断基準, 日本義肢装具学会誌, Vol.21, No.3, 2005
- 2) 陳 隆明：リハビリ領域の最新機器—上肢切断のための筋電制御義手—, 脳外誌, Vol.22, No.3, 2013
- 3) H. Schmidt : The importance of information feedback in prostheses for the upper limbs, *Prosthetics and Orthotics International*, 1977 1: 21
- 4) 田村 秋人：筋電義手訓練用 フィードバック装置の開発, 神戸医療福祉専門学校三田校 H21 年度卒業論文集
- 5) 辻敏夫ほか：筋電操作・電気刺激フィードバック型 マン・マシン制御系の動特性.計測自動制御学会論文集,Vol.24 No.3:80-87,1988
- 6) 奥野竜平：バーバル情報伝達による筋電義手感覚情報伝達システムの開発, 科学研究費補助金研究成果報告書.2009.
- 7) 赤澤堅造：感覚情報伝達機能と柔軟指先部を備えたバイオミメティック筋電義手の開発. 科学研究費補助金研究成果報告書.2011.
- 8) 奥野竜平：皮膚振動刺激による筋電義手感覚フィードバック装置の検討.T.IEE Japan,Vol.116-C No.11:1246-1250,1996
- 9) 奥野竜平：可聴周波数以下の皮膚振動刺激を用いた義手感覚フィードバック装置.社団法人 電子情報通信学会. 99-106 ,1997
- 10) R.N.Scott ほか： Sensory-feedback system compatible with myoelectric control. *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol.18 No.1: 64-65, 1980
- 11) G.F.Shannont : A comparison of alternative means of providing sensory feedback on upper limbprostheses.*Medical and Biological Engineering*,Vol.14 No.3:289-294,1976
- 12) 木村文彰ほか：筋電義手間隔フィードバック装置の開発. 日本機械学会北海道支部第 48 回講演概要集: 73-74,2009
- 13) R. JACOBS ほか :Evaluation of the psychophysical detection threshold level forvibrotactile and pressure stimulation of prosthetic limbs usingbone anchorage or soft tissue support. *Prosthetics and Orthotics*
- 14) 奥野竜平ほか：筋電制御によるバイオミメティック電動義手の開発. T.IEE Japan, Vol.114-C No.11: 1090-1094, 1994
- 15) 陳隆明：筋電義手普及の現状と課題, 高位切断者に対する戦略, そして今後の展望. *Jpn J Neurosurg* ,Vol.49 : 31-36,2012
- 16) 竹内豊計：仮想環境を用いた筋電義手訓練システムにおけるタスク難易度調整の効果.ライフサポート,Vol.23:101-107,2011
- 17) Christian Pylatiuk, Artem Kargov, Stefan Schulz : Design and Evaluation of a Low-Cost Force Feedback System for Myoelectric Prosthetic Hands, *Journal of Prosthetics and Orthotics*. 2006, vol.18, no.2, p.57-61

Appendix A 操作訓練フロー

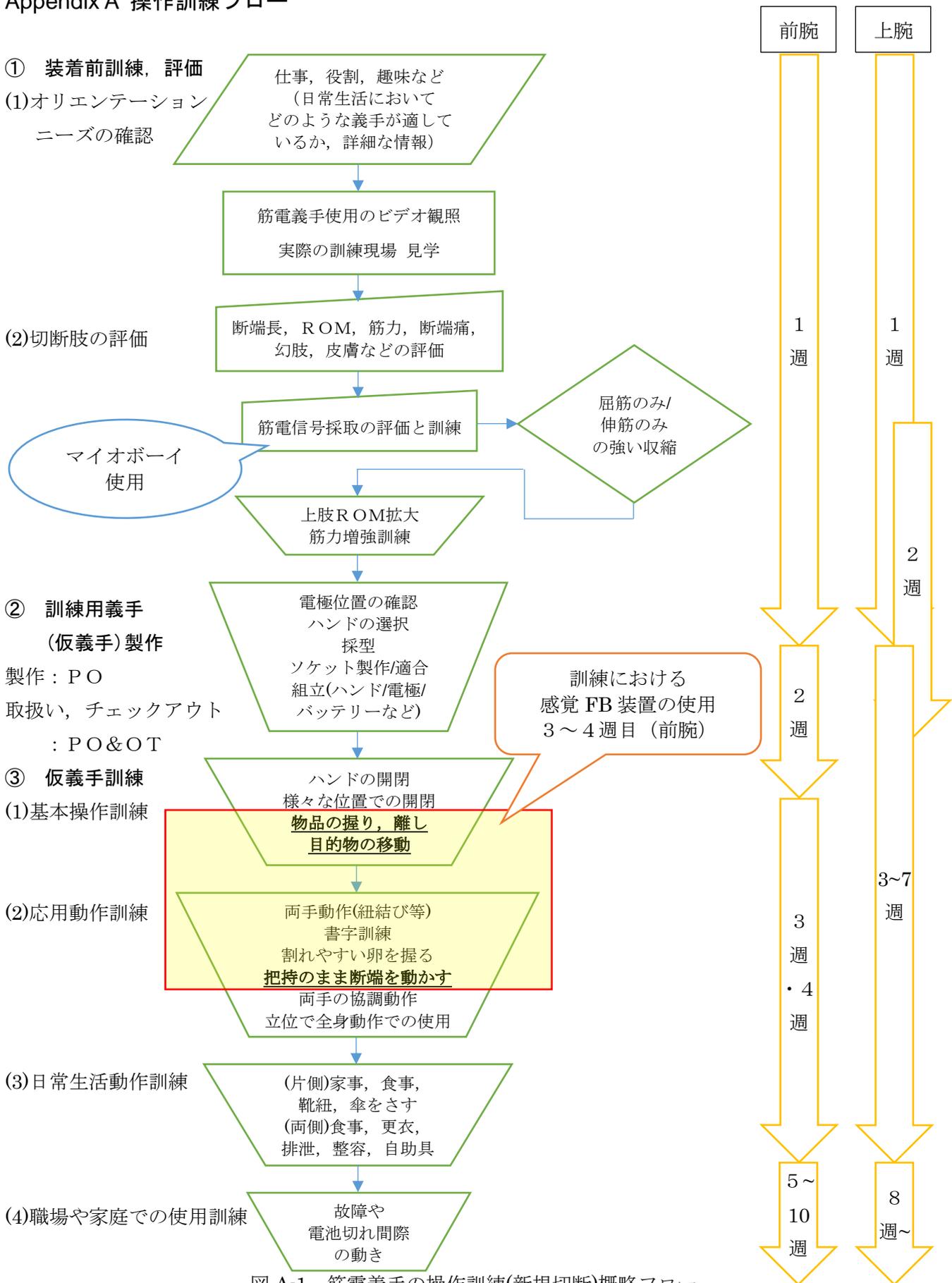


図 A-1 筋電義手の操作訓練(新規切断)概略フロー

Appendix B フィードバック装置

B-1. ハードウェア

B-1-1. 圧力センサー

(1) 感圧部(FSR: Force Sensing Register)

- ・高分子厚膜フィルム(PTF: Polymer Thick Film)

特徴：安価(500 円/個)，薄い(0.2mm)，精密測定可(10g~10kg まで線形的に抵抗変化)

加工：延長して基板と接続しやすいよう，イヤホン用コードとジャンパーコードをはんだ付け
はんだ付け部などがショートしないように絶縁テープ，熱収縮チューブを施した。



図 B-1-1 高分子厚膜フィルム(FSR402)



図 B-1-2 義手への取り付け

(2) 義手への取付け

- ・義手の手先部の改造などは行わない。
- ・高分子厚膜フィルム(PTF)を義手の指先に，サージカルテープで固定する(図 B-1-2)。

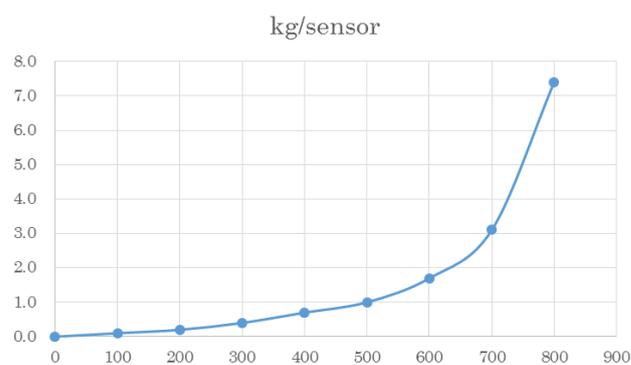
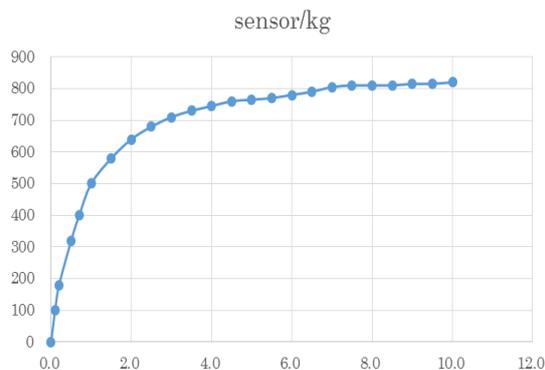
(3) 検量(キャリブレーション)

- ・装置のハードウェアおよびソフトウェアの完成後，センサーに対する力と信号の大きさを計測した。
- ・センサーを体重計に置き，PC 上にて信号の大きさをモニタリングし，検量線を作成した。
- ・後述の「握り過ぎ」のチカラを 6 kg(缶コーヒーが潰れてしまうほどの強さ)とし，そのときの信号

の

大きさを“680” (0~1023 の 1024 段階の 680) とした。

- ・計測，作成した検量線を図 B-2-1, B-2-2 に示す。



(4) その他

感圧部が折れ曲がってしまうと、抵抗値が下がったまま元に(検量線の特性に)戻らないことがあるため、義手の取り付け等に注意が必要である。

本実験中(装置開発から約 1 年使用)に 1 本故障したため、交換した。

B-1-2. 刺激装置

(1) 振動刺激装置

振動部：コイン型バイブレーションモーター 定格 DC3V(消費電流: 20mA 以下) とする(図 B-4-1)。

加工：延長して基板と接続しやすいよう、イヤホン用コードとジャンパーコードをはんだ付け
はんだ付け部などがショートしないように絶縁テープ、熱収縮チューブを施した。

取付け：バイブレーションモーターは、1 個を上腕骨内側上顆にサージカルテープで貼り付ける。



図 B-4-1 振動モーター



図 B-4-2 延長後

(2) 骨伝導刺激装置

音響部：ゴールドダンス株式会社製「Goldendance AQUA」(品番：GDA-705R)を購入、使用した。



図 B-5 Goldendance AQUA

取付け：バンド部を後頭部へと回し、図 2-6 のような形で装着する。振動子を耳周辺の骨に当てることで、耳をふさぐことなく（鼓膜を使わず、骨伝導で直接 内耳で）音を聞くことができる。

(図 B-6)



図 B-6 装着方法

音量調整：図 B-7 のボリュームにて調節可能(製作ミスで、通常のボリュームとは逆向きの設定)

音量は急激に大きくなる特性がある。これは骨伝導ヘッドホン特有のものと思われる。

後述の回路図において、通常のヘッドホンであれば $50k\Omega$ 可変抵抗(ボリューム)と Arduino 9 ピンの間に $1k\Omega$ の抵抗を入れるが、骨伝導ヘッドホンでは音量が小さくなってしまったため、取り付けていない。

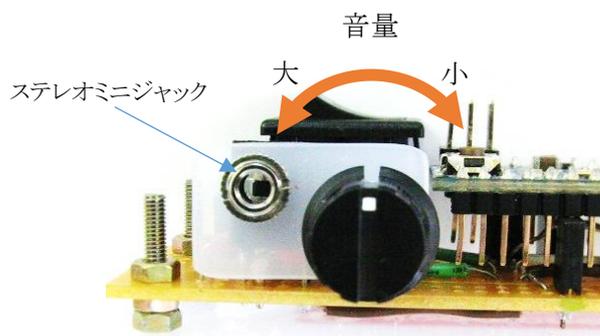


図 B-7 ボリューム

(3) 実験者用 LED

FB と連動する実験者用の LED を 2 つ設置した。

1 つは常時 FB と連動して点灯する黄色 LED とし、他方は後述の把持力が強すぎる際の失敗回を見逃さないために点灯する赤色 LED とした。(図 B-9)

B-1-3. 信号処理回路

(1) 概要

図 B-8 に示す回路により、圧力センサーからの信号で、刺激装置のバイブレーションモーターの駆動と骨伝導ヘッドホンへの出力を行う。

モーター駆動の閾値および駆動(振動)パターンを変更 および ヘッドホンへの周波数の変更を可能とするように、マイコンボードを使用した。

マイコンボードは、PC でプログラミングが容易な Arduino(アルデュイーノ)とした。

本研究では、H25 年度 卒業研究(PO4-3 期生)で使用された Arduino MICRO を流用した。

(2) 制御部

入力信号：圧力センサーからの信号(抵抗の変化)により、変化する電圧 DC 0 ~ 5 V

出力信号：振動・音響パターンに応じた電圧パルス DC 0 ~ 3 V

その他：確認用として、振動、音響パターンと同時点灯する LED(砲弾型 黄/赤色)を取り付ける。

電源 DC5V は、マイコンボード(Arduino の USB 端子 または 9 V 乾電池)から供給する。

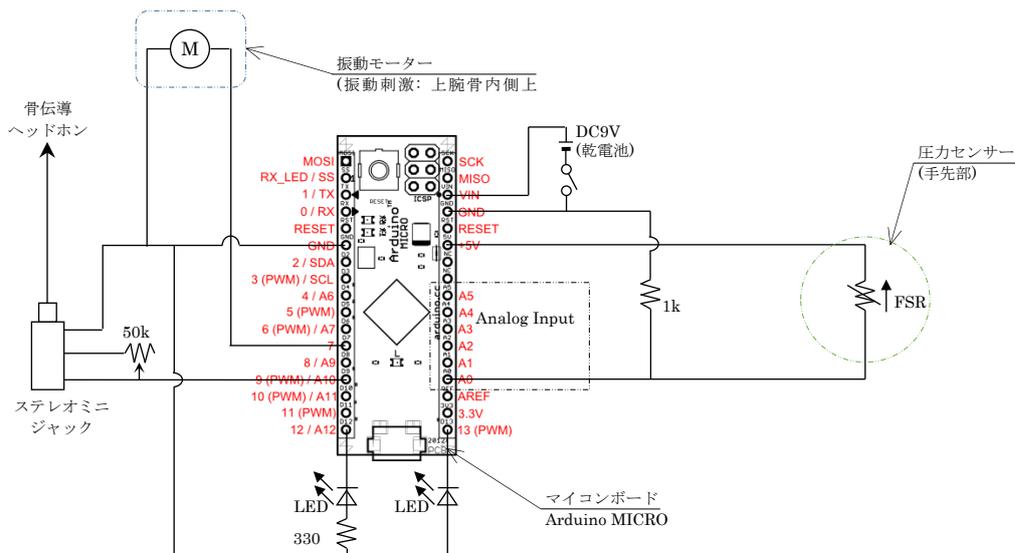


図 B-8 回路図

(3) センサーなどの接続

- ・ PC(Arduino IDE 起動)－Arduino MICRO

Micro-USB ケーブル(Android スマートフォン用で可)で接続する。

Arduino MICRO への電源供給と、センサーモニタリング(シリアル通信)が可能になる。

- ・ FSR－Arduino MICRO および 振動モーター－Arduino MICRO

それぞれ延長したジャンパーコードを図 B-9 に示すピンに差し込む(極性無し)。

- ・ 骨伝導ヘッドホン

ステレオミニジャックに差し込む。

適宜、延長コード(100 円ショップなどで購入)を使用する。

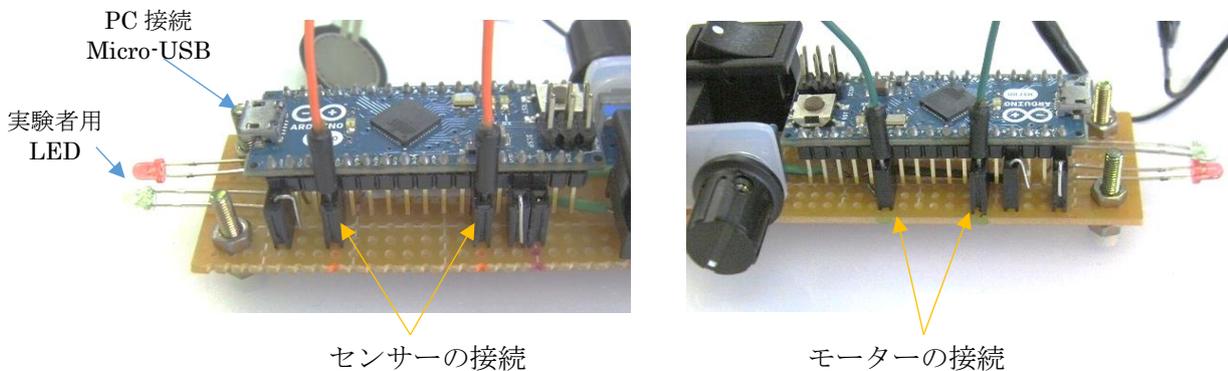


図 B-9 接続ポイント

B-2. ソフトウェア

B-2-1. 使用言語

- ・ハードウェアに合わせ、Arduino IDE とした。
- ・入手先：<http://arduino.cc/en/Main/Software>
- ・装置の製作および開発時(2013 年 6 月~2014 年 7 月)Arduino IDE のバージョンは 1.0.5r2 であった。
- ・2014 年 9 月バージョン 1.0.6 がリリースされ、動作に問題はなかった。

B-2-2. プログラミング

(1) 開発環境

プログラミング開始当初~予備実験までの 2013 年度(H25 年度 義肢装具研究法Ⅱ~卒業研究Ⅰ)においては、試験的に MacOSX(個人 PC)にて開発を行った。2014 年度(H26 年度 卒業研究Ⅱ)においては、複数の班員の PC で実験ができるように、Windows 8.1(個人 PC)に移行し、引き続き開発、実験を行った。

プログラミング, Arduino へのプログラムの書き換え, 圧力センサーの信号のモニタリングは, MacOSX, Windows7, Windows8 および 8.1 いずれでも可能であった。(Windows RT は不可)

(2) 振動刺激の概略

入力(FSR による 1024 段階の電圧)に対する出力(振動モーターの振動パターン と 骨伝導ヘッドホンの音階と長さ)を図 B-10 のようなコンセプトとした。

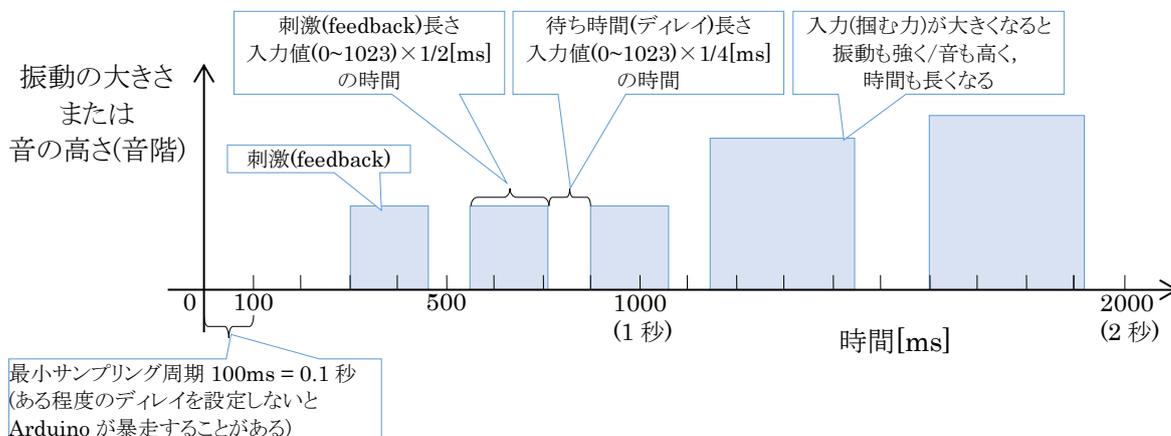


図 B-10 フィードバック信号の強弱の考え方

次項のプログラムでは、入力(0-5V で、0-1023 の値) (FSR にかかる力)が 100g 未満のときに 100ms(0.1 秒)のデレイ(待ち時間)を設定しているが、このデレイが無いと、信号が 0 の(FSR に接触していない)状態で数分経つと、シリアルデータ(モニタリングのために出力)がオーバーフローし、Arduino が暴走する(無反応になる)ことがある。

今回製作した装置では、FSR に軽く触れただけでも 100 程度の信号(約 100g の力)を検出、出力するため、最小サンプリング周期の閾値を 100 とし、サンプリング周期も 100ms(0.1 秒)とした。

(3) プログラム

Arduino スケッチ(プログラムソフト)

説明

```
const int L1 = 13; // yellow LED pin
const int L2 = 12; // red LED pin
const int BA = 9; // phone pin
const int M1 = 7; // motor pin
int v1 = 0; // val for FSR

void setup() {
  pinMode(L1, OUTPUT); //LED out
  pinMode(BA, OUTPUT); //phone out
  pinMode(M1, OUTPUT); //motor out
  pinMode(L2, OUTPUT); //LED out t

  Serial.begin(9600); //9600bitps
}

void loop() {
  v1 = analogRead(0); //from FSR
  Serial.println(v1); // send data to serial

  analogWrite(L1, v1/4); //LED on
  tone(BA, v1*2); //headphone on
  if (v1 > 779) analogWrite(L2, v1/4); //LED on
  analogWrite(M1, v1/2); //motor on

  delay(v1/2);

  analogWrite(L1, 0); //LED off
  noTone(BA); //headphone off
  analogWrite(L2, 0); //LED off
  analogWrite(M1, 0); //motor off

  delay(v1/4);
  if (v1 < 100) delay(100);
}
```

13 番を黄色 LED とする。
 12 番を赤色 LED とする。
 9 番をヘッドホンとする。
 9 番をヘッドホンとする。
 圧力センサーで使用する以上の変数を v1=0 に初期化

出力の初期設定
 13 番ピンを出力(黄色 LED)とする。
 9 番ピンを出力(ヘッドホン)とする。
 7 番ピンを出力(振動モーター)とする。
 12 番ピンを出力(赤色 LED)とする。

シリアル出力を 9600bps にて行う。
 出力の初期設定 ここまで

以下の内容を繰り返す。
 アナログ入力 0 番(FSR400)の値を v1 とする。
 アナログ入力 0 番の値をシリアルモニタに出力 0-5V = 0-1023

黄色 LED を点灯
 ヘッドホンへ出力(力が強いほど高音)
 振動モーターを駆動
 赤色 LED を点灯(約 3.8V, FSR400 で 6kg 以上の力)

LED, モーター, ヘッドホン出力したまま待機(力の大きさに比例)

黄色 LED を消灯
 ヘッドホンを消音
 赤色 LED を消灯
 振動モーターを停止

LED, モーター, ヘッドホン消したまま待機

ここまですり繰り返す内容

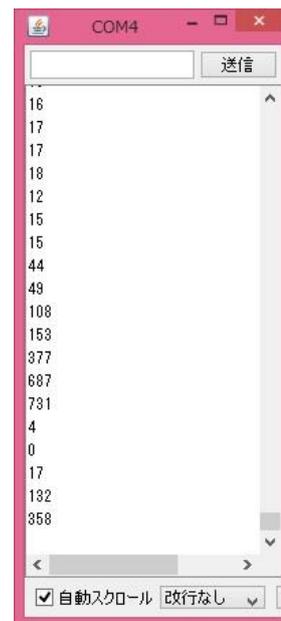
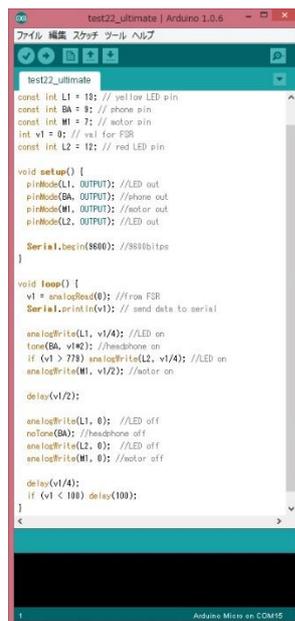


図 B-11 実際の PC 画面(Windows 版) (プログラム(スケッチ) : 左 シリアルモニター : 右)

(4) その他

- ・ Arduino を長期間使用しなかった時

数週間 Arduino に通電しないと書き込んだプログラムがリセットされることもあるため、実験前に動作確認(センサー数値モニタリング, FB 出力(振動モーター, ヘッドフォン音量)など)が必要である.

プログラムが消えている場合, 再度, プログラム(Arduino スケッチ)を書き込む必要がある.

- ・ FB の感じ方

力の大きさにより, 骨伝導ヘッドホンの音階の違い(100~1000Hz 程度)はよく分かるが, 振動モーターの“振動の大きさ”は殆どわからず(ON/OFF にしか感じられず), 振動の長さのみで力の大きさを判断できる装置となった.

- ・ 骨伝導ヘッドホンの音階 (参考)

骨伝導ヘッドホンに出力される音(100~1000Hz 程度の純音)の主な音階と周波数は表 2-1 のとおりである.

表 B-1 周波数と音階

音階	ド(C)	レ(D)	ミ(E)	ファ(F)	ソ(G)	ラ(A)	シ(B)
周波数	130.81	146.83	164.81	174.61	195.99	220.00	246.94
[Hz]	261.62	293.66	329.62	349.22	391.99	440.00	493.88
	523.35	587.32	659.25	698.45	783.99	880.00	987.76

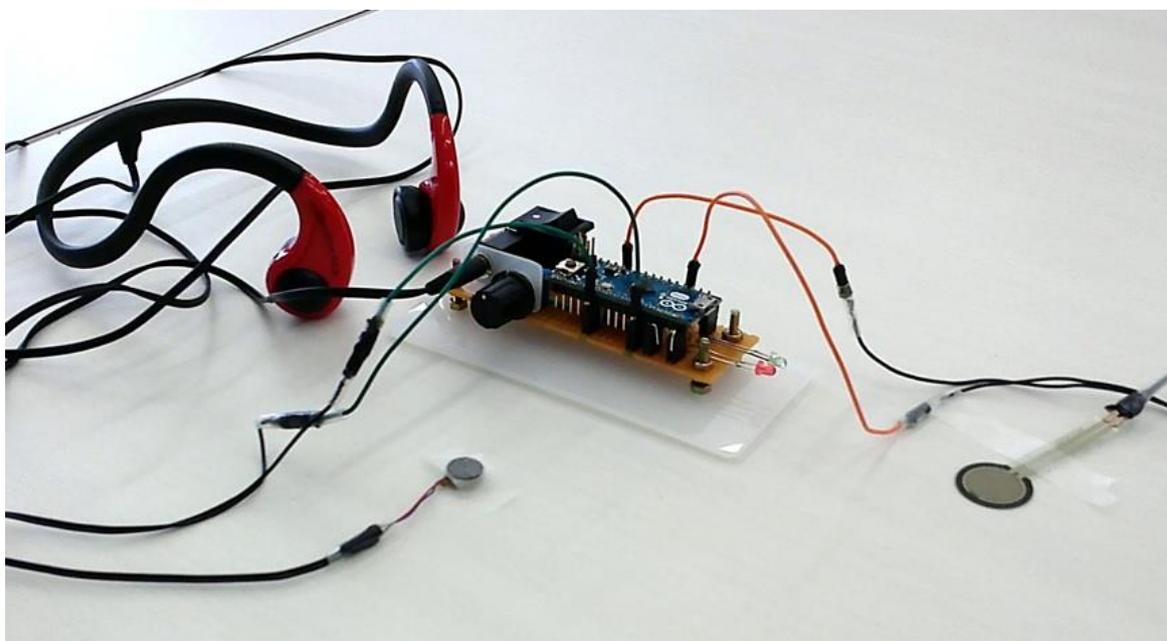


図 B-12 FB 装置全体

Appendix C 統計計算

C-1. 計算手順

(1) 計算ソフト

計算は主に Excel (Appendix D 参照)にて実施

(2) データ入力

ストップウォッチで計測した時間(失敗回はビデオにて再計測して除外)を Excel に入力

(3) 被験者毎に前半/後半の比率を計算

前半と後半の計測時間の平均値を計算(関数: AVERAGE)

時間を秒数で抽出(関数: MINUTE, SECOND)

所要時間比率[%] = (前半の平均時間 - 後半の平均時間) / (前半の平均時間) × 100

(4) 被験者群毎に統計計算

所要時間比率[%]は自由度 $f(f=n-1, n$:被験者数)の t 分布と考え、以下の計算を実施

所要時間比率の平均値を計算(関数: AVERAGE)

同 普遍分散を計算(関数: VAR.S)

99%信頼区間, 95%信頼区間(有意水準 1%, 5%)を計算

信頼区間(L, U) = (平均値) ± (パーセント点)√(不偏分散 / 被験者数)

パーセント点は、「統計学」(産業能率大学)付表-1 t 分布の上側 100α パーセント点 t_{α} より
99%信頼区間のとき $\alpha=0.005$ ($2\alpha=0.010$), 95%信頼区間のとき $\alpha=0.025$ ($2\alpha=0.050$)であるので、

$f=4(n=5)$ のとき $t_{\alpha 99} = 4.604, t_{\alpha 95} = 2.776$

$f=7(n=8)$ のとき $t_{\alpha 99} = 3.499, t_{\alpha 95} = 2.365$

$f=8(n=9)$ のとき $t_{\alpha 99} = 3.355, t_{\alpha 95} = 2.306$

(5) 信頼区間内の所要時間比率の平均値を計算

信頼区間の範囲内のセルの平均値を計算(関数: AVERAGE)

自動計算ではなく、範囲内のセルを選別しなければならないため、Excel メニューの[データ] - [データ入力の規則] から、範囲内のセルの文字色を変更し、間違いの防止対策とした。

(6) まとめ

被検者群ごとの計算結果を表 4-1 のようにまとめた。

C-2. 回帰曲線

表 4-1 のような前半/後半の所要時間比率とは別に、実験中の習熟度の向上について、回帰曲線を求めた (Appendix D 参照)。すなわち、1 セット毎に何秒速くなるかを計算によって求めた。

計算方法は以下のとおりである。

(1) 計算ソフト：計算は主に Excel にて実施

(2) データ入力：前述の入力データを使用

(3) 被験者毎の計算

時間を秒数で抽出(関数: MINUTE, SECOND)

回数(セット数)の平均値 A を計算：5 セットであるので, A=3 とする

前半と後半の計測時間の平均値 Ave を計算(関数: AVERAGE)

前半と後半の計測時間の標準偏差 S を計算(関数: STDEV.P)

前半と後半の計測時間の共分散 S_{xy} を計算(関数: COVARIANCE.P)

前半と後半の計測時間の相関係数 r を計算(関数: CORREL)

回帰曲線を $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$ と仮定して, α, β を計算

$$\beta = S_{xy} / S^2, \alpha = Ave - \beta \times A \quad \text{この } \beta \text{ が 1 セット毎に速くなる秒数}$$

(4) 被験者群毎に統計計算

β は自由度 $f(f=n-1, n$:被験者数)の t 分布と考え, C-1.と同様の計算を実施

(5) 信頼区間の平均値の計算とまとめ

C-1.と同様に信頼区間内の β の平均値求め, 表 C-1 のようにまとめた.

結果はおおよそ, 所要時間比率で求めたとおりの習熟度の順となった.

同条件の B 群と B'群 および C 群と C'群, あるいは信頼区間により β (グラフの傾き)に差異が見られたが, これは後述の被験者数も影響していると考えられる.

表 C-1 回帰曲線の計算結果(P=0.05)

回帰曲線を $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$ と仮定した β の値

	前半 5 セット	後半 5 セット
A 群	-0.17	-0.24
B 群	-0.26	-0.24
B'群	-0.06	-0.27
C 群	-0.12	+0.13
C'群	-0.23	+0.03

Appendix D 計算データ

Subject No	1st and 2nd half					ave range	ave. [s]	差 [s]	ratio %
	1st	2nd	3rd	4th	5th				
A-1	01:31	01:35	01:23	01:15	01:25	01:26	86		
A-2	01:27	01:32	01:23	01:24	01:10	01:23	83	3.00	3.49
A-3	01:02	01:06	00:58	01:09	01:00	01:03	63	15.00	19.23
A-4	00:58	01:00	00:49	00:43	00:43	00:51	51		
A-5	00:58	00:52	00:59	00:48	00:53	00:54	54		
A-6	00:45	00:39	00:32	00:27	00:25	00:34	34		
A-7	00:30	00:26	00:28	00:30	00:27	00:28	28		
A-8	00:53	00:48	00:42	00:33	00:36	00:42	42		
A-9	01:11	01:21	01:22	01:41	01:21	01:23	83		
Total	01:16	01:04	01:21	01:05	01:04	01:10	70	13.00	15.66
						ave.	8.89		19.11
						ss			110.88
						2α=0.1	OK	L	7.34
							NG	U	30.89
							99%信頼区間ave		21.59
						2α=0.5	NG	L	11.02
							NG	U	27.21
							95%信頼区間ave		21.59
B-1	01:11	00:52	01:08	00:57	00:56	01:00	60		
B-2	00:54	00:49	00:49	00:48	00:55	00:51	51	9.00	15.00
B-3	01:06	01:04	00:55	01:06	01:00	01:02	62		
B-4	00:33	00:27	00:27	00:24	00:24	00:27	27		
B-5	00:47	00:35	00:36	00:33	00:32	00:37	37		
B-6	00:28	00:34	00:43	00:35	00:36	00:35	35		
B-7	00:30	00:26	00:25	00:25	00:25	00:26	26		
B-8	00:22	00:19	00:19	00:19	00:18	00:19	19	7.00	26.92
Total	00:32	00:28	00:29	00:28	00:27	00:29	29		
	00:30	00:25	00:26	00:31	00:23	00:27	27	2.00	6.90
						ave.	5.00		13.61
						ss			85.14
						2α=0.1	OK	L	2.20
							NG	U	25.03
							99%信頼区間ave		12.38
						2α=0.5	NG	L	5.90
							NG	U	21.33
							95%信頼区間ave		12.38
C-1	00:58	01:16	00:59	00:52	00:52	00:59	59		
C-2	01:03	01:02	00:57	01:08	01:18	01:05	65	-6.00	-10.17
C-3	00:48	00:53	00:53	00:52	00:47	00:51	51		
C-4	00:48	00:47	00:50	00:53	00:52	00:50	50	1.00	1.96
C-5	00:38	00:33	00:37	00:35	00:35	00:36	36		
C-6	00:37	00:38	00:38	00:38	00:38	00:38	38	-2.00	-5.56
C-7	00:51	00:43	00:46	00:47	00:51	00:48	48		
C-8	00:43	00:41	00:41	00:47	00:38	00:42	42	6.00	12.50
Total	00:43	00:42	00:44	00:36	00:34	00:40	40		
	00:44	00:44	00:52	00:54	00:47	00:48	48	-8.00	-20.00
	01:27	01:29	01:17	01:17	01:12	01:20	80		
	00:59	00:58	01:01	01:01	01:03	01:01	61	19.00	23.75
	01:01	01:02	01:05	01:06	01:09	01:05	65		
	01:14	00:57	01:05	01:08	00:50	01:03	63	2.00	3.08
	00:55	00:56	00:47	00:43	00:31	00:46	46		
	00:28	00:28	00:26	00:24	00:23	00:26	26	20.00	43.48
Total						ave.	4.00		6.13
						ss			408.23
						2α=0.1	OK	L	-18.86
							NG	U	31.13
							99%信頼区間ave		4.26
						2α=0.5	NG	L	-10.76
							NG	U	23.02
							95%信頼区間ave		0.36

Subject No	1st and 2nd half					ave range	ave. [s]	差 [s]	ratio %
	1st	2nd	3rd	4th	5th				
B'-1	00:53	00:58	00:55	00:50	00:56	00:54	54		
B'-2	00:53	00:51	00:57	01:02	01:05	00:58	58	-4.00	-7.41
B'-3	00:35	00:44	00:31	00:42	00:36	00:38	38	8.00	17.39
B'-4	00:36	00:30	00:34	00:33	00:38	00:34	34		
B'-5	00:41	00:46	00:49	00:52	00:48	00:47	47		
Total	00:50	00:44	00:39	00:42	00:37	00:43	43	4.00	8.51
						ave.	4.60		10.28
						ss			111.39
						2α=0.1	OK	L	-11.45
							NG	U	32.01
							99%信頼区間ave		10.28
						2α=0.5	NG	L	-2.82
							NG	U	23.38
							95%信頼区間ave		14.70
C'-1	00:28	00:30	00:24	00:25	00:25	00:26	26		
C'-2	00:20	00:22	00:22	00:23	00:20	00:21	21	5.00	19.23
C'-3	00:55	00:49	00:44	00:46	00:49	00:49	49		
C'-4	00:44	00:44	00:48	01:05	01:01	00:52	52	-3.00	-6.12
C'-5	01:19	01:23	00:57	00:57	00:57	01:07	67		
Total	00:46	00:45	01:03	00:44	00:51	00:50	50	17.00	25.37
	01:03	00:53	00:49	00:44	00:51	00:51	51		
	00:34	00:26	00:24	00:26	00:24	00:27	27	24.00	47.06
	01:24	01:29	01:29	01:33	01:34	01:30	90		
	01:13	01:02	00:58	01:02	00:53	01:02	62	28.00	31.11
Total						ave.	14.20		23.33
						ss			378.01
						2α=0.1	OK	L	-16.70
							NG	U	63.36
							99%信頼区間ave		23.33
						2α=0.5	NG	L	-0.81
							NG	U	47.47
							95%信頼区間ave		30.69

Table 実験中に何%早くなったか？

groupe	feed back	有意水準	
		1%	5%
A	無し-無し	21.59	21.59
B	骨伝導-無し	12.38	12.38
B'	骨伝導-骨伝導	10.28	14.70
C	振動-無し	4.26	0.36
C'	振動-振動	23.33	30.69

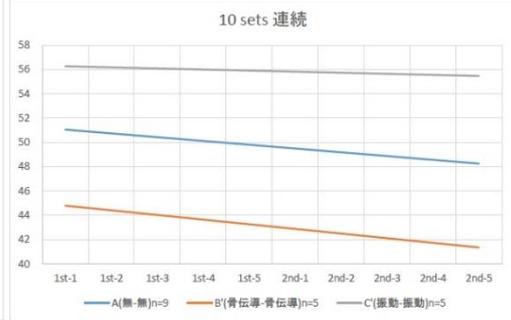
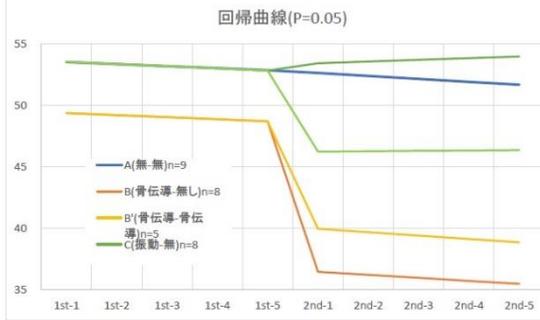
Appendix E 回帰曲線計算

生データとリンク										回帰曲線(直線) $y = a + bx + \epsilon$										計算値										回帰曲線(直線) $y = a + bx + \epsilon$									
Subject No	1st half [m/s] / [s]					Ave 3.00	S 1.41	Sxy	r	rr	α	β	ϵ	2nd half [m/s] / [s]					Ave 3.00	S 1.41	Sxy	r	rr	α	β	ϵ													
	1	2	3	4	5									1	2	3	4	5																					
A-1	01:31	01:36	01:23	01:15	01:25	85.80	6.88	-6.40	-0.86	0.43	86.21	-0.14	01:27	01:32	01:23	01:24	01:10	83.20	7.30	-8.40	-0.81	0.66	83.67	-0.16															
A-2	00:33	00:32	00:32	00:32	00:26	31.00	2.53	-2.80	-0.78	0.61	32.31	-0.44	01:20	00:20	00:24	00:22	00:22	23.00	2.37	-1.60	-0.48	0.23	23.86	-0.29															
A-3	01:24	01:34	01:43	00:57	00:53	78.20	19.91	-19.80	-0.70	0.49	78.35	-0.05	01:02	01:06	00:58	01:09	01:00	63.00	4.00	-0.20	-0.04	0.00	63.04	-0.01															
A-4	00:58	01:00	00:49	00:43	00:43	50.60	7.23	-9.40	-0.92	0.85	51.14	-0.18	00:39	00:39	00:45	00:47	00:42	42.40	3.20	2.80	0.62	0.38	41.58	0.27															
A-5	00:58	00:52	00:59	00:48	00:53	54.00	4.05	-2.80	-0.49	0.24	54.51	-0.17	00:57	00:55	00:51	00:49	00:46	42.40	3.20	2.80	0.62	0.38	41.58	0.27															
A-6	00:45	00:39	00:32	00:27	00:25	33.60	7.47	-10.40	-0.98	0.97	34.16	-0.19	00:24	00:23	00:24	00:22	00:18	22.20	2.23	-2.60	-0.83	0.68	23.77	-0.52															
A-7	00:30	00:26	00:28	00:30	00:27	28.20	1.60	-0.40	-0.18	0.03	28.67	-0.16	00:23	00:22	00:19	00:19	00:19	20.40	1.74	-2.20	-0.89	0.80	22.57	-0.72															
A-8	00:53	00:48	00:42	00:33	00:36	42.40	7.39	-9.80	-0.94	0.88	42.94	-0.18	00:32	00:32	00:31	00:30	00:29	30.80	1.17	-1.60	-0.97	0.94	34.33	-1.18															
A-9	01:11	01:21	01:22	01:41	01:21	83.20	9.77	8.00	0.58	0.34	82.95	0.08	01:16	01:04	01:21	01:05	01:04	70.00	7.13	-4.60	-0.46	0.21	70.27	-0.09															
Total	Average					54.11							Average					45.18																					
2 α =0.1	ss												ss																										
2 α =0.5	99%信頼区間ave					56.29					53.71	-0.15	99%信頼区間ave					47.63																					
B-1	01:11	00:52	01:08	00:57	00:56	60.80	7.36	-5.00	-0.48	0.23	61.08	-0.09	00:54	00:49	00:49	00:48	00:55	51.00	2.90	0.20	0.05	0.00	50.93	0.02															
B-2	00:54	00:45	00:42	00:38	00:50	45.80	5.67	-3.00	-0.37	0.14	46.08	-0.09	00:45	00:44	00:54	00:48	00:46	47.40	3.56	1.20	0.24	0.06	47.12	0.09															
B-3	01:06	01:04	00:55	01:06	01:00	62.20	4.21	-2.00	-0.34	0.11	62.54	-0.11	00:58	01:02	00:56	00:51	00:51	55.60	4.22	-5.00	-0.84	0.70	56.44	-0.28															
B-4	00:33	00:27	00:32	00:24	00:24	27.00	3.29	-4.20	-0.90	0.82	28.17	-0.39	00:22	00:23	00:21	00:20	00:21	21.40	1.02	-1.00	-0.69	0.48	24.28	-0.96															
B-5	00:47	00:35	00:36	00:33	00:32	36.60	5.39	-6.40	-0.84	0.71	37.26	-0.22	00:32	00:31	00:28	00:28	00:31	30.00	1.67	-1.00	-0.42	0.18	31.07	-0.36															
B-6	00:28	00:34	00:43	00:35	00:36	35.20	4.79	3.40	0.50	0.25	34.76	0.15	00:30	00:32	00:33	00:33	00:28	31.20	1.94	-0.60	-0.22	0.05	31.68	-0.16															
B-7	00:30	00:26	00:25	00:25	00:25	26.20	1.94	-2.20	-0.80	0.64	27.96	-0.59	00:22	00:19	00:19	00:19	00:18	19.40	1.36	-1.60	-0.83	0.70	22.01	-0.87															
B-8	00:32	00:28	00:29	00:28	00:27	28.80	1.72	-2.00	-0.82	0.68	30.83	-0.68	00:30	00:25	00:26	00:31	00:23	27.00	3.03	-1.60	-0.37	0.14	27.52	-0.17															
Total	Average					40.33							Average					35.38																					
2 α =0.1	ss												ss																										
2 α =0.5	99%信頼区間ave					44.90					43.85	-0.25	99%信頼区間ave					40.37																					
C-1	00:58	01:16	00:59	00:52	00:52	59.40	8.80	-7.20	-0.58	0.33	59.68	-0.09	01:03	01:02	00:57	01:08	01:18	65.60	7.12	7.20	0.72	0.51	65.17	0.14															
C-2	00:48	00:53	00:53	00:52	00:47	50.60	2.58	-0.80	-0.16	0.03	50.87	-0.09	00:48	00:47	00:50	00:53	00:52	50.00	2.28	2.80	0.87	0.75	48.38	0.54															
C-3	00:38	00:33	00:37	00:35	00:35	35.60	1.74	-0.80	-0.32	0.11	36.39	-0.26	00:37	00:38	00:38	00:38	00:38	37.80	0.40	0.40	0.71	0.50	30.30	2.50															
C-4	00:51	00:43	00:46	00:47	00:51	47.60	3.07	0.80	0.18	0.03	47.35	0.08	00:43	00:41	00:41	00:47	00:38	42.00	2.97	-0.80	-0.19	0.50	42.27	-0.09															
C-5	00:43	00:42	00:44	00:36	00:34	39.80	4.02	-4.80	-0.84	0.71	40.69	-0.30	00:44	00:44	00:52	00:54	00:47	48.20	4.12	3.20	0.55	0.30	47.63	0.19															
C-6	01:27	01:29	01:17	01:17	01:12	80.40	6.50	-8.40	-0.91	0.84	81.00	-0.20	00:59	00:58	01:01	01:01	01:03	60.40	1.74	2.20	0.89	0.80	58.23	0.72															
C-7	01:01	01:02	01:05	01:06	01:09	64.60	2.87	4.00	0.99	0.97	63.14	0.49	01:14	00:57	01:05	01:08	00:50	62.80	8.42	-7.40	-0.62	0.39	63.11	-0.10															
C-8	00:55	00:56	00:47	00:43	00:31	46.40	9.11	-12.20	-0.95	0.90	46.84	-0.15	00:28	00:26	00:26	00:24	00:23	25.80	2.04	-2.80	-0.97	0.94	27.82	-0.67															
Total	Average					53.05							Average					49.08																					
2 α =0.1	ss												ss																										
2 α =0.5	99%信頼区間ave					55.54					51.83	-0.14	99%信頼区間ave					50.69																					
B'-1	00:53	00:58	00:53	00:50	00:56	54.40	2.73	-0.40	-0.10	0.01	54.56	-0.05	00:53	00:51	00:57	01:02	01:05	57.60	5.28	7.00	0.94	0.88	56.85	0.25															
B'-2	01:11	00:56	00:57	00:54	00:58	59.20	6.05	-5.60	-0.65	0.43	59.66	-0.15	00:55	00:54	00:47	00:46	00:46	49.60	4.03	-5.20	-0.91	0.83	50.56	-0.32															
B'-3	00:45	00:49	00:47	00:48	00:43	46.40	2.15	-1.00	-0.33	0.11	47.05	-0.22	00:35	00:44	00:31	00:42	00:36	37.60	4.76	0.00	0.00	0.00	37.60	0.00															
B'-4	00:36	00:30	00:34	00:33	00:38	34.20	2.71	1.40	0.36	0.13	33.63	0.19	00:28	00:28	00:30	00:27	00:27	28.00	1.10	-0.60	-0.39	0.15	29.50	-0.50															
B'-5	00:41	00:46	00:49	00:52	00:48	47.20	3.66	4.00	0.77	0.60	46.30	0.30	00:50	00:44	00:39	00:42	00:37	42.40	4.50	-5.60	-0.88	0.77	43.23	-0.28															
Total	Average(n=5)					48.28							Average(n=5)					43.04																					
2 α =0.1	ss(n=5)												ss(n=5)																										
2 α =0.5	99%信頼区間ave					48.28					48.24	0.01	99%信頼区間ave					43.04																					
C'-1	00:28	00:30	00:24	00:25	00:25	24.20	2.24	-2.20	-0.69	0.48	27.71	-0.44	00:20	00:22	00:22	00:23	00:20	21.40	1.20	0.20	0.12	0.01	20.98	0.14															
C'-2	00:55	00:49	00:44	00:46	00:49	48.60	3.72	-3.00	-0.57	0.33	49.25	-0.22	00:44	00:44	00:48	01:05	01:01	61.40	8.87	11.00	0.88	0.77	51.98	0.14															
C'-3	01:19	01:23	00:57	00:57	00:57	66.60	11.83	-14.00	-0.84	0.70	66.90	-0.10	00:46	00:45	01:03	00:44	00:51	49.80	7.03	1.80	0.18	0.03	49.69	0.04															
C'-4	01:03	00:53	00:49	00:44	00:48	51.40	6.47	-7.80	-0.85	0.73	51.96	-0.19	00:34	00:26	00:24	00:26	00:24	26.80	3.71	-4.00	-0.76	0.58	27.67	-0.29															
C'-5	01:24	01:29	01:29	01:33	01:34	89.80	3.54	4.80	0.96	0.92	88.65	0.38	01:13	01:02	00:58	01:02	00:53	61.60	6.59	-8.00	-0.86	0.74	62.15	-0.18															
Total	Average(n=5)					56.56							Average(n=5)					42.40																					
2 α =0.1	ss(n=5)												ss(n=5)																										
2 α =0.5	99%信頼区間ave					48.25					48.95	-0.18	99%信頼区間ave					46.30																					

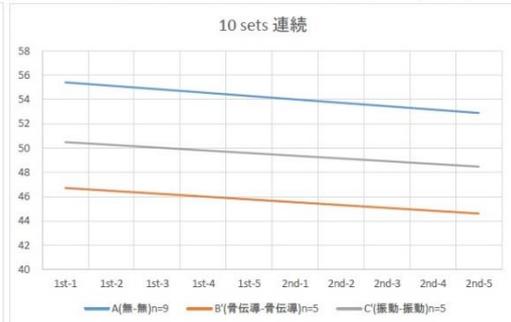
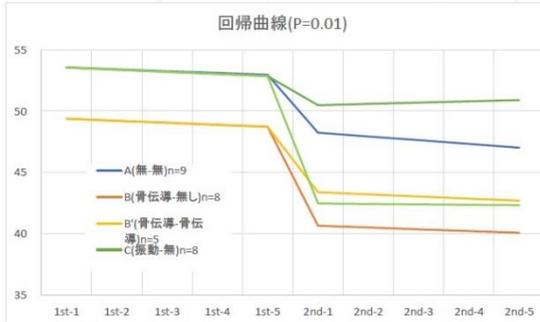
Table 実験中にとどのくらい早くなったか(1回毎に何秒早くなるか)?

実験群	被験者 n	1st half		2nd half		1st+2nd		1st/2nd	
		1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%
A feedback無し-無し	9	-0.15	-0.17	-0.31	-0.24	-0.28	-0.31	15.38	14.43
B 骨伝導	13	-0.17	-0.17						
B(骨伝導-無し)	(8)	-0.25	-0.26	-0.14	-0.24			10.10	11.67
B'(骨伝導-骨伝導)	(5)	0.01	-0.06	-0.17	-0.27	-0.23	-0.38	10.85	18.85
C 振動	13	-0.18	-0.18						
C(振動-無し)	(8)	-0.14	-0.12	0.10	0.13			8.74	-2.52
C'(振動-振動)	(5)	-0.11	-0.23	-0.03	0.03	-0.22	-0.09	25.04	4.04

group	1st		1st					1st Ave	2nd		2nd					2nd Ave	ratio
	α	β	1	2	3	4	5		α	β	1	2	3	4	5		
A(無-無)n=9	53.71	-0.17	53.54	53.37	53.21	53.04	52.87	53.21	52.88	-0.24	52.64	52.40	52.17	51.93	51.69	52.17	1.95
B(骨伝導-無し)n=8	49.55	-0.17	49.38	49.22	49.05	48.88	48.72	49.05	36.68	-0.24	36.44	36.19	35.95	35.71	35.46	35.95	26.71
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	49.55	-0.17	49.38	49.22	49.05	48.88	48.72	49.05	40.22	-0.27	39.95	39.67	39.40	39.13	38.85	39.40	19.67
C(振動-無し)n=8	53.73	-0.18	53.55	53.38	53.20	53.02	52.85	53.20	53.32	0.13	53.45	53.59	53.72	53.85	53.99	53.72	-0.98
C'(振動-振動)n=5	53.73	-0.18	53.55	53.38	53.20	53.02	52.85	53.20	46.20	0.03	46.23	46.27	46.30	46.33	46.37	46.30	12.97
A(無-無)n=9	51.37	-0.31	51.06	50.75	50.44	50.13	49.82	50.44	49.50		49.50	49.19	48.88	48.57	48.26	48.88	3.08
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	45.18	-0.38	44.80	44.41	44.03	43.65	43.27	44.03	42.88		42.50	42.12	41.74	41.35	42.12	4.35	
C'(振動-振動)n=5	56.36	-0.09	56.28	56.19	56.10	56.01	55.92	56.10	55.83		55.74	55.65	55.56	55.47	55.65	0.79	



group	1st		1st					1st Ave	2nd		2nd					2nd Ave	ratio
	α	β	1	2	3	4	5		α	β	1	2	3	4	5		
A(無-無)n=9	53.71	-0.15	53.56	53.41	53.26	53.11	52.95	53.26	48.55	-0.31	48.24	47.94	47.63	47.32	47.01	47.63	10.57
B(骨伝導-無し)n=8	49.55	-0.17	49.38	49.22	49.05	48.88	48.72	49.05	40.79	-0.14	40.65	40.51	40.37	40.22	40.08	40.37	17.70
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	49.55	-0.17	49.38	49.22	49.05	48.88	48.72	49.05	43.55	-0.17	43.38	43.21	43.04	42.87	42.70	43.04	12.25
C(振動-無し)n=8	53.73	-0.18	53.55	53.38	53.20	53.02	52.85	53.20	50.38	0.10	50.48	50.58	50.69	50.79	50.89	50.69	4.73
C'(振動-振動)n=5	53.73	-0.18	53.55	53.38	53.20	53.02	52.85	53.20	42.50	-0.03	42.46	42.43	42.40	42.37	42.34	42.40	20.30
A(無-無)n=9	55.69	-0.28	55.41	55.13	54.85	54.57	54.29	54.85	54.01		53.73	53.45	53.17	52.89	53.45	2.55	
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	46.95	-0.23	46.71	46.48	46.24	46.01	45.78	46.24	45.54		45.31	45.08	44.84	44.61	45.08	2.53	
C'(振動-振動)n=5	50.71	-0.22	50.49	50.26	50.04	49.82	49.59	50.04	49.37		49.14	48.92	48.70	48.47	48.92	2.24	



group	1st		1st					1st Ave	2nd		2nd					2nd Ave	ratio
	α	β	1	2	3	4	5		α	β	1	2	3	4	5		
A(無-無)n=9	54.58	-0.16	54.42	54.27	54.11	53.95	53.80	54.11	46.19	-0.34	45.86	45.52	45.18	44.84	44.50	45.18	16.51
B(骨伝導-無し)n=8	43.84	-0.15	43.69	43.53	43.38	43.23	43.08	43.38	36.38	-0.34	36.05	35.71	35.38	35.04	34.70	35.38	18.46
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	43.84	-0.15	43.69	43.53	43.38	43.23	43.08	43.38	43.55	-0.17	43.38	43.21	43.04	42.87	42.70	43.04	0.79
C(振動-無し)n=8	49.72	-0.16	49.56	49.40	49.23	49.07	48.91	49.23	47.87	0.40	48.27	48.67	49.08	49.48	49.88	49.08	0.32
C'(振動-振動)n=5	49.72	-0.16	49.56	49.40	49.23	49.07	48.91	49.23	42.50	-0.03	42.46	42.43	42.40	42.37	42.34	42.40	13.88
A(無-無)n=9	51.45	-0.33	51.12	50.80	50.47	50.14	49.81	50.47	49.48		49.15	48.82	48.49	48.16	48.82	3.26	
B'(骨伝導-骨伝導)n=5	46.95	-0.23	46.71	46.48	46.24	46.01	45.78	46.24	45.54		45.31	45.08	44.84	44.61	45.08	2.53	
C'(振動-振動)n=5	50.71	-0.22	50.49	50.26	50.04	49.82	49.59	50.04	49.37		49.14	48.92	48.70	48.47	48.92	2.24	

