

明治大学大学院 理工学研究科

2023 年度修士学位請求論文

遅延聴覚フィードバックがもたらす
影響の客観的な評価方法の検討と年
齢による影響の変化の分析

2024 年 2 月

指導教員 村上隆啓

専攻 電気工学専攻

研究室名 知能信号処理研究室

学位請求者 山下 一樹

目次

第 1 章	序論	4
1.1	背景	4
1.2	目的	5
第 2 章	先行研究	7
2.1	遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の調査	7
2.2	遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査	9
第 3 章	主観評価実験におけるアプリケーション開発	10
3.1	アプリケーションの概要	11
3.1.1	ユーザー情報の取得	13
3.1.2	画像の取り込みおよび保存	14
3.1.3	評価結果の入力と出力	15
第 4 章	ボタン押し課題のシステム	17
4.1	ボタン押し課題	17
4.2	音響信号への遅延生成アプリケーション	20
4.2.1	ASIO における音声の同時入出力	22
4.2.2	任意の遅延時間後にボタン押下の合図音を再生させる機能	23

目次

4.2.3 ボタンの押下時間間隔を記録する機能	24
4.3 生成する遅延時間の正確性の調査	26
4.3.1 遅延時間の測定方法	26
4.3.2 測定結果	28
第 5 章 遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の評価方法	30
5.1 分散	31
5.2 平均二乗誤差	32
第 6 章 身体運動のばらつきを評価するための最適な実験条件	34
6.1 ボタンを押下する間隔の最適な条件	35
6.2 ボタンを押下する回数の最適な条件	36
6.3 遅延を発生させる最適なタイミング	36
6.3.1 調査方法	37
6.3.2 調査条件および調査対象	38
6.3.3 調査結果	39
第 7 章 遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査	43
7.1 調査方法	43
7.2 調査条件および調査対象	44
7.3 調査結果	46
7.3.1 観測値の分布	46
7.3.2 遅延時間と評価指標の関係	49
第 8 章 結論	57
8.1 まとめ	57
8.2 今後の展望	58

目次

参考文献	60
発表論文	62
謝辞	63

第1章

序論

1.1 背景

本節では、現代における補聴器技術の主流であるディジタル補聴器に着目し、その進化と課題について述べる。ディジタル補聴器はディジタル信号処理技術を活用し、従来のアナログ補聴器に比べて高度な機能を実現していることが指摘されている [1][2]。具体的には、音声の增幅率を音圧レベルに応じて調整するノンリニア增幅機能や、雑音を低減しつつ目的の音声を強調するノイズリダクション機能などが挙げられる。しかしながら、補聴器の利用者からは、これらの機能にも関わらず十分な満足度が得られていないという問題が報告されている [3]。不満の一因として、ノンリニア增幅が不要な音まで增幅することに起因するという意見が存在する。このことは、ディジタル補聴器のさらなる性能改善への要求を示唆している。ディジタル補聴器の性能を向上させるためには、精緻なディジタル信号処理が必要であり、これには音声信号の周波数帯域を細分化することが求められる。しかしながら、周波数帯域の細分化は、処理に使用する音声信号の長さを増加させるという課題を伴う。ディジタル補聴器では、音声信号を数ミリ秒単位のフレームに分割して処理を行うため、入力から出力までにフレーム長に相当する時間の遅延が発生する。さらに、アナログ信号をディジタル信号に変換し、その後再びアナログに戻す AD/DA 変

換プロセスによっても遅延が生じる。このAD/DA変換とフレーム長に起因する遅延は、音声の入出力間で最低数ミリ秒のタイムラグを発生させる。したがって、デジタル信号処理に用いるフレーム長の長さが長くなると、補聴器における音声の入出力信号間の遅延時間も増大することになる。人間は能動的な活動を行う際、活動とそれに伴う感覚フィードバックを対応付けることで行動の調整を行っている。この中で、聴覚に関するフィードバックを聴覚フィードバックと呼んでいる[4]。聴覚フィードバックは、発話や身体運動において重要な役割を果たしている。例として、発話時に自身の声を聞くことにより、音声の高さや強さを調整する行為が挙げられる。遅延聴覚フィードバックは、発話者が自身の声を聞く際のタイミングが遅延することによって生じ、デジタル補聴器における入出力信号間の遅延がこれに該当する。一般に、この遅延時間が10[ms]を超えると発話に違和感を覚えることが知られている[5]。そのため、デジタル補聴器はこの遅延時間を超えないよう設計されている[1]。しかし、この設計制約がデジタル補聴器の性能向上における課題となっている。デジタル信号処理の精度を高めるためには音声信号の長さを長くする必要があり、これは必然的に入出力間の遅延時間を増加させる。そのため、デジタル信号処理における高度な処理と遅延時間の短縮という二つの要求を両立させることが困難である。一方で、高齢者においては、遅延時間が10[ms]を超えてても発話に違和感を覚えにくいことが示唆されている[8]。この知見を活用すれば、デジタル補聴器の入出力信号間の遅延時間を増大させ、それに伴い音声信号の長さを長くすることが可能となる。これにより、周波数帯域の細分化を進め、より高度なデジタル信号処理を実装することが期待される。このアプローチは、特に高齢者における補聴器の性能向上に寄与する可能性がある。

1.2 目的

本研究では、若年者と高齢者における聴覚フィードバックの遅延時間の許容範囲の差について検討する。文献[7]では、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の調査が行

第1章 序論

われたが、この調査は主観的な評価によるものであるため、個人差の影響を軽減する客観的な評価方法の必要性が指摘されている。そこで、文献 [6]において、著者らが行った調査のシステムについて改良を行い、遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査することで、客観的な評価方法を開発することを目指す。ここでは、身体運動への影響を幅広い年代の被験者間で比較することを想定して、高齢者でも簡単に実験を行うことのできるボタン押し課題を採用する。本研究で行うボタン押し課題は、一定の時間間隔ごとにコントローラのボタンを押すという動作を一定の回数行う課題である。被験者がボタンを押下する一定の時間間隔は、ボタン押し課題を行っている間、電子メトロノームの合図音によって提示する。そして、被験者は聴覚フィードバックに遅延が発生している状態で本研究のボタン押し課題を行う。遅延聴覚フィードバックが身体運動に何らかの影響を与えていれば、被験者がボタンを押下する時間間隔にばらつきが発生すると考えられる。そこで、被験者がボタンを押下する時間間隔の全体の分散およびボタンの押下回数が 4 の倍数に到達する直前の押下時間間隔と 4 の倍数に到達した直後の押下時間間隔の平均二乗誤差を評価指標として用いる。また、遅延によるボタン押し課題への影響が大きく現れる最適な実験条件を探るために、ボタン押し課題における最適なボタンの押下時間間隔、ボタン押し課題の長さおよび最適な遅延のタイミングについて検討する。そして、決定した条件の下で、聴力が正常な若年者と高齢者を対象に遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響について調査を行う。本研究は、聴覚フィードバックの遅延が人の身体運動にどのような影響を与えるか、特に年齢差がその影響にどのようにして関わってくるかを明らかにすることに寄与することが期待される。加えて、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の主観的な調査も継続するため、そのためのアプリケーションの改善も行う。本研究の成果は、高齢者向けの補聴器の設計において、重要な示唆を提供するものであると考えられる。

第2章

先行研究

本章では、過去に行われた遅延聴覚フィードバックの影響を調査する研究について紹介する。

2.1 遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の調査

先行研究 [7] では、主観調査による遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響の調査が行われた。この主観調査は、耳介付近に伝達された音に一定の遅延を発生させて外耳道に出力する装置（以後、音響測定装置と呼ぶ）を装着した被験者が、発話時の違和感を主観的に評価するという内容のものである。人は、自身の発話音声を聴取するタイミングに遅延が生じると、違和感を覚えて発話が阻害されると考えられるため、このときの違和感を遅延時間ごとに主観的に評価することにより、音声における入出力信号間の遅延時間の許容範囲を検討することが可能になる。この調査では、被験者が原稿を読み上げているとき、発話音声が音響測定装置を通して耳に戻るまでの時間を変化させ、被験者が感じる違和感の程度を調査した。被験者は、「読み上げるときにしゃべりにくくないか」および「遅れが気にならないか」の2つについて「優(4点)」「良(3点)」「可(2点)」「不可(1点)」の4段階で評価する。評価基準は、表2.1および表2.2のとおりである。得られた

表2.1 読み上げるときにしゃべりにくくないかの評価基準

評価	評価基準	評点
優	しゃべりにくくない	4
良	しゃべりにくいが気にならない	3
可	しゃべりにくい	2
不可	とてもしゃべりにくい	1

表2.2 遅れが気にならないかの評価基準

評価	評価基準	評点
優	遅れがまったくわからない	4
良	遅れが分かるが気にならない	3
可	遅れが気になる	2
不可	遅れがはっきり分かる	1

評価結果は被験者間で平均され、評点は、しゃべりやすさと遅延の気にならなさに比例する。若年者と高齢者の間で評点を比較することで、発話音声に発生させる遅延時間の大きさと違和感の程度が、若年者と高齢者の間でどのように異なるかを観察した。また、文献[8]での調査結果によると、若年者と高齢者の間で聴覚フィードバックの遅延時間の許容量には差異があったものの、両者で提示した遅延時間に違いがあったため、その差が統計的に有意であるかの分析が困難であった。そのため、文献[7]では両者の遅延時間を揃えるために高齢者に提示した遅延時間と同一の条件で若年者に対して主観評価実験を行った。遅延時間ごとに若年者と高齢者の結果の分布をコルモゴロフ・スミノルフ検定で比較したところ、90[ms]以上の遅延で若年者と高齢者の遅延の感じやすさに有意な差が存在することが示され、若年者は高齢者と比較して遅延の影響をより敏感に受けやすいという結果が得られた。一方で、この調査では、主観評価による個人差が比較的大きくなることも明らかとなった。

2.2 遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査

文献 [7] では、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響を検討したが、その評価は主観的な手法によるものであるため、個人差の影響を軽減する客観的な評価方法の必要性が指摘されている。そこで、重松らによる研究 [6] では、遅延聴覚フィードバックの影響を客観的に評価するために、テンポの画面提示アプリケーション [9] を活用したボタン押し課題を通じて、遅延聴覚フィードバックが身体運動に及ぼす影響の調査が行われた。ボタン押し課題は、遅延聴覚フィードバックの下で、一定のテンポでボタンを押すことを被験者に要求する課題である。テンポの画面表示アプリケーションは、画面の上部に表示される短いバーが画面下部の長いバーへ向けて一定速度で移動し、両バーが重なるタイミングで被験者がボタンを押下するタイミングが示される仕組みである。また、長いバーの点滅もタイミングの指示に利用される。この課題では、指定された遅延時間を用いて若年者 8 名を対象に実験が実施された。結果として、この課題による遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の観察が可能であることが分かった。その一方で、被験者間で遅延時間への反応に差異が認められ、特定の被験者では遅延時間の増加がボタン押下間隔に及ぼす影響が限定的であることが確認された。これは、被験者が遅延時間に関わらず聴覚フィードバックとしてボタン押下時の音を認識せずに画面のみに従ってボタン押し課題を行ってしまった可能性を示唆している。したがって、被験者が一貫してヘッドホンからの音を聴覚フィードバックとして認識できるようにテンポの提示方法の改良が必要であることが明らかになった。本研究は、このボタン押し課題のシステムを改良し、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響をより明確に観察することを目指している。

第 3 章

主観評価実験におけるアプリケーション開発

本章では、2.1 節で述べた主観評価実験で利用することを想定したアプリケーションの概要と機能について説明する。これまでの主観評価実験では、遅延聴覚フィードバック下での違和感を被験者に実験者が用意した用紙に記入させ、その後実験者が PC 上にデータを入力して結果の保存および分析を行っていた。このデータ移行には入力ミスのリスクがあり、注意深い作業が必要で研究にとって非効率であった。このアプリケーションはこの問題点を改善するために作成するもので、これを用いると被験者がアプリケーション上に直接評価結果を入力し、自動で外部ファイルに結果を出力できるようになる。これにより、実験者の負担が軽減され、効率的な実験および評価結果の分析が可能となり、短期間で多くの実験を実施することが期待できる。また、本節で述べる関数は、文献 [10] に基づいて利用した。

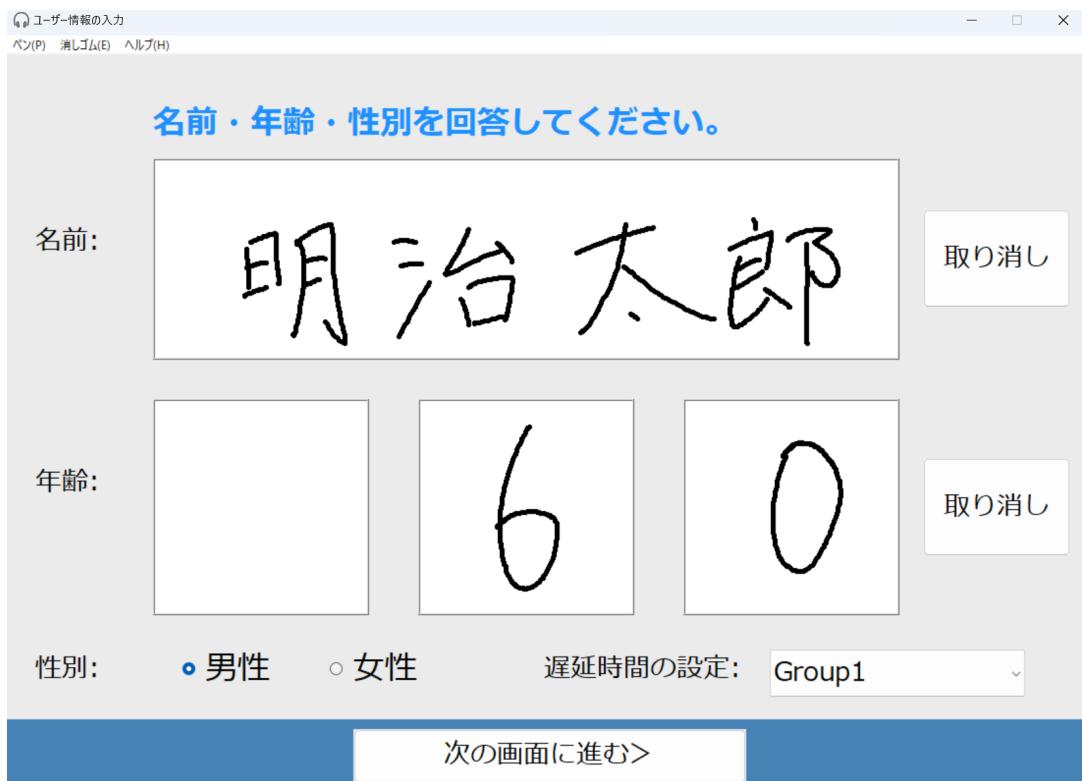


図 3.1 アプリケーション起動直後の画面

3.1 アプリケーションの概要

本研究では、Microsoft 社が提供する統合開発環境である Microsoft Visual Studio 2022 を使用し、C++ で開発した。アプリケーションの外観を図 3.1 および図 3.2 に示す。図 3.1 は、実験開始後に最初に表示されるアプリケーションの画面である。図 3.2 は、図 3.1 の画面で「次の画面に進む」ボタンを押下した後に表示される画面である。

また、開発したアプリケーションのプログラムを付録 B に掲載する。以下に、開発するアプリケーションの機能を示す。

- (1) 高齢者が使用することを想定し、タッチパネルのように名前と年齢を描画できる機能
(3.1.1 項参照)

第3章 主観評価実験におけるアプリケーション開発

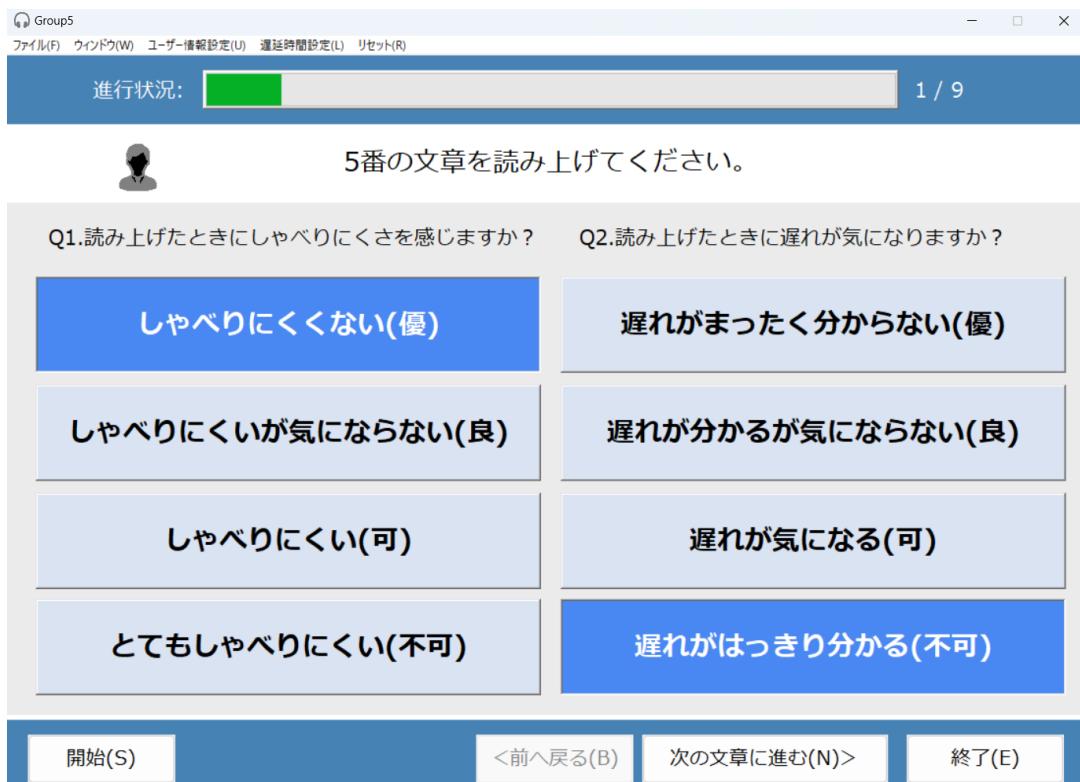


図 3.2 調査中の画面

- (2) 被験者の名前と年齢、性別、遅延時間の設定が書かれている画面をキャプチャすると同時にそれらを外部ファイルに書き込む機能（3.1.2 項参照）
- (3) 読み上げる文章の番号の順番をランダムに定義し、画面上に表示する機能
- (4) 2つの質問に対するそれぞれ4つの回答項目をプッシュボタンとして表示し、押下された結果を(1)と同じ外部ファイルに書き込む機能（3.1.3 項参照）

主観評価実験で被験者に読んでもらう文章の番号は、文献 [7] で使用された文章を使用することを想定し、10通り用意する。そのため、(3)では、1番から10番までの番号をランダムに並び替え、画面上に表示することで、被験者に提示する。

3.1.1 ユーザー情報の取得

指やペンなどの1つ以上のタッチポイントがタッチに依存するデジタイザーサーフェスに触れたときに、Windows API の「WM_TOUCH」メッセージがウィンドウに通知される [10]。「WM_TOUCH」メッセージは、タッチ入力に関する情報を含んでおり、アプリケーションはこのメッセージを処理して、タッチ操作に応じたアクションを実行することができる。このアクションには、例えばタッチするスクリーン上の位置、タッチの圧力、動きなどの情報が含まれる。このメッセージを取り扱うためには、ウィンドウ作成時に RegisterTouchWindow() 関数を使用してアプリケーションがタッチメッセージを受けとることができるようになる。その後、ウィンドウプロシージャで「WM_TOUCH」メッセージ内の処理を行うことにより、タッチパネルとしての機能を実装する。「WM_TOUCH」メッセージが通知されたら以下の処理を行うように設定する。

- (1) ウィンドウのデバイスコンテキストのハンドルを取得し、デバイスコンテキストに新しいペンのハンドルを割り当てる。
- (2) GetTouchInputInfo() 関数を使用して、各タッチメッセージの情報を取得する。
- (3) 取得したタッチメッセージの情報を元に、タッチポイントの座標を画面上の座標に変換し、タッチの位置がタッチパネル内にあるかどうかを確認する。タッチが続いている場合、以前のタッチポイントから現在のタッチポイントまで線を描画する。
- (4) 各タッチポイントについて、前回のタッチポイントの位置とタッチパネルの内か外かを記録する。これにより、タッチの移動を追跡し、描画を連続的に行うことができるようになる。
- (5) 描画が終わった後、使用したペンを削除し、デバイスコンテキストを解放する。

3.1.2 画像の取り込みおよび保存

図3.1に示したユーザーが手書きで入力した名前と年齢は、画面下部の「次の画面に進む」というプッシュボタンをユーザーが押下したことを合図にウィンドウの画像をキャプチャしたものを、画像ファイルとして保存することによって記録する。画像をキャプチャする方法は、以下の手順で実装する。

- (1) GetDC() 関数を使用して、ウィンドウのデバイスコンテキストを取得する。
- (2) GetClientRect() 関数を使用して、ウィンドウのクライアント領域の寸法を取得する。クライアント領域は、アプリケーションが描画できるウィンドウの部分であり、タイトルバーと境界線を除いた部分である。
- (3) クライアント領域の幅と高さ、および年齢の 100,10,1 枠を表す 3 つの領域の幅と高さを計算する。
- (4) CreateCompatibleDC() 関数と CreateCompatibleBitmap() 関数を使用して、ウィンドウ全体と 3 つの年齢を示す領域のメモリデバイスコンテキストおよびビットマップを作成する。
- (5) BitBlt() 関数を使用して、ウィンドウ全体と 3 つの年齢を示す領域のビットマップをメモリデバイスコンテキストにコピーする。
- (6) C++ の CImage クラスを使用して、ビットマップを読み込み。画像を指定したフォルダに JPEG として保存する。そのフォルダが存在しない場合、新しく画像を保存するためのフォルダを作成する。
- (7) 最後に CImage オブジェクトからビットマップを切り離し、ウィンドウのデバイスコンテキストを解放し、元のグラフィックオブジェクトをメモリデバイスコンテキストに再選択してから、ビットマップとメモリデバイスコンテキストを削除する。

3.1.3 評価結果の入力と出力

2.1節において記述した主観評価実験では、「文章の読み上げ時のしゃべりにくさ」と「文章の読み上げ時の遅れの感じ方」に関する2つの質問が提示される。被験者は、これらの質問に対して、4つの選択肢の中からWindows APIにより実装したオーナー描画ボタン[10]を通じて回答する。ボタンが選択されると、背景色は青色に、文字色が白色になる設計となっており、これにより高齢者を含む操作に不慣れなユーザーでも、選択状態を直感的に把握することが可能である。また、背景色と文字色の変更は、ボタン押下時にInvalidRect()関数によって明示的にウィンドウの再描画を要求することによって実現している。ウィンドウの再描画が必要な場合、「WM_ERASEBKGND」メッセージが受信され、ウィンドウの背景がクリアされた後、「WM_PAINT」メッセージによってウィンドウの内容が再描画される。この2つの処理ステップが画面のちらつきを引き起こすことがあるため、「WM_ERASEBKGND」メッセージの処理を明示的にスキップし、InvalidRect()で更新する領域を8つのボタンを含む領域の中で最小限に設定する。そうすることで、背景の再描画処理を行わずに直接「WM_PAINT」メッセージでの再描画に移行する。これにより、背景と前景の描画が一度に行われるため、ちらつきを減少させることができ、特に高齢者にとって快適な操作体験が実現できる。

また、全てのボタンの選択状況を常に監視し、両方のボタンが選択されていない場合、「次の文章に進む」ボタンを無効化する。これにより、結果の記録における誤りを防止する。さらに、調査の進行状況を示すプログレスバーを画面上部に設置し、調査の進捗状況をユーザーに視覚的にフィードバックする。「次の文章に進む」ボタン押下時には音声信号が本アプリケーションを起動しているデバイスから出力され、実験者はこの音声信号による合図を受けて、ユーザーの合図を待たずに次の調査へと移行できる。アンケート終了後、ユーザーが「次の文章に進む」ボタンを押下すると、アプリケーション起動時に選択したCSVファイルに、キャプチャした画面が保存されているファイルのパス、遅延時間

第3章 主観評価実験におけるアプリケーション開発

の提示順、読まれた文章の番号および被験者の回答結果が自動的に記録される。既存のファイルであれば、結果はファイルの末尾に追記される。このシステムにより、多数の被験者を対象とする実験でも、アプリケーションの再起動なしに迅速に実験を進行できるという利点がある。

第4章

ボタン押し課題のシステム

本章では、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を客観的に評価するための調査で行うボタン押し課題とこの調査を行うために構築した調査システムおよびWindows アプリケーションについて述べる。聴覚フィードバックは遅延時間が大きくなると、発話だけでなく身体運動に影響を与えることが知られている [11][12]。身体運動を遅延聴覚フィードバックが与える影響の調査に使用することが可能となれば、客観的なデータを計測しやすくなることが期待される。

4.1 ボタン押し課題

本研究で行う客観評価による調査では、被験者が行う課題にボタン押し課題を採用する。この調査で採用するボタン押し課題は、コントローラのボタンを押下するとクリック音が再生されるシステムを使用し、このクリック音に遅延を発生させて被験者に聞かせながら、被験者がメトロノームの合図音に合わせて一定の時間間隔でボタンを押下する課題を行うというものである。このボタン押し課題は、楽器演奏のような特別な技能を必要としないため、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を様々な年代の被験者について調査することが可能になると考えられる。ボタン押し課題を行っているとき、被験者

第4章 ボタン押し課題のシステム

がボタンを押下する時間間隔を記録すると、被験者に提示するボタン押下の時間間隔が毎分 60 回であれば、理想的には全てのボタンを押下する時間間隔が 1000[ms] となるが、人間の操作には誤差が生じるため多少のばらつきが発生すると考えられる。また、遅延聴覚フィードバックが身体運動に影響を与えていれば、ボタンを押下するときに出力される音の遅延時間によってこのばらつきは変化するものであると考えられる。そのため、遅延聴覚フィードバックを与えていたりで被験者がボタン押し課題を行うと、ボタンを押下する時間間隔に変化が現れることが期待される。したがって、遅延聴覚フィードバックの下で被験者がボタン押し課題を行うときのボタンを押下する時間間隔を、様々な遅延時間で観察することで遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を客観的に評価することができると考えられる。この調査で使用するシステムの図を図 4.1 に示し、使用機器を表 4.1 に示す。このシステムは表 4.1 の使用機器と遅延聴覚フィードバックを生成する音響信号への遅延生成アプリケーション、メトロノーム、研究室で開発したパルスジェネレータで構成されている。このパルスジェネレータでは、図 4.5 に示されたコントローラのボタンが押されると、アナログパルス信号が生成される。生成された信号はオペアンプを用いたボルテージフォロア回路によって出力インピーダンスを低減し、オーディオインターフェースに入力される。そして、オーディオインターフェースにアナログパルス信号が入力されると、オーディオインターフェースを経由して PC で信号を検出し、遅延生成アプリケーションおよびオーディオインターフェースを経由して、ヘッドホンからクリック音が出力されるという仕組みである。音響信号への遅延生成アプリケーションは、4.2 節で述べられるものと同様である。以下に、本研究で用いるボタン押し課題の手順と図 4.1 のシステムの動作について説明する。

- (1) 被験者はヘッドホンを装着し、コントローラを手に持つ。コントローラの A, B, C, D いずれかのボタンを押すと、任意の遅延時間が経過した後にヘッドホンからクリック音が出力される。
- (2) 電子メトロノームの合図音によって、一定間隔でボタンを押下するための合図を提示

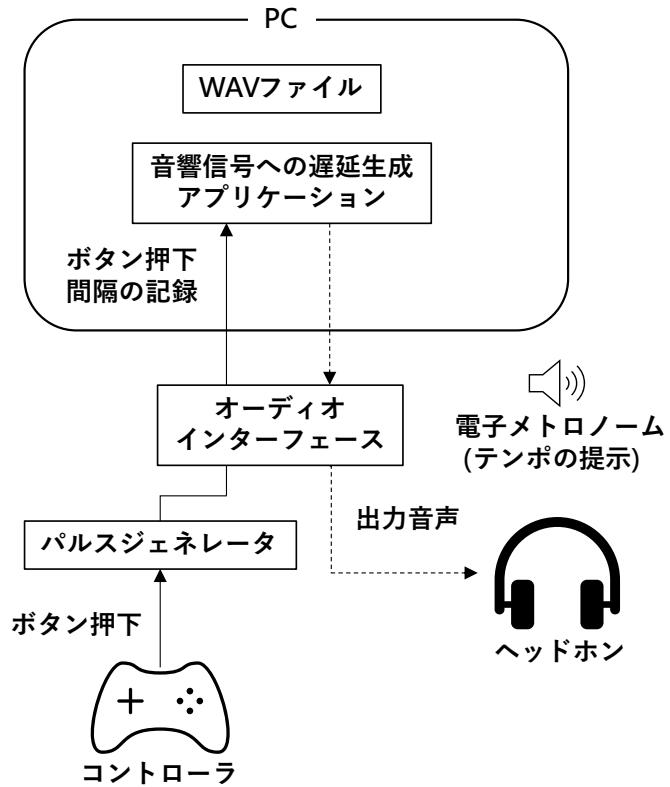


図 4.1 調査システムの構成

し、その合図に合わせて、被験者はボタン押し課題を実施する。ボタン押し課題で被験者がボタンを押下する回数は、アプリケーション上で実験者が設定する。課題中、PC に保存されたクリック音の WAV ファイルがオーディオインターフェースを介して、実験者が指定した時間だけ遅延してヘッドホンから出力される。この時、実験者が指定した遅延時間は被験者には非公開とする。また、音響信号への遅延生成アプリケーションは、被験者がボタンを押下する時間間隔の記録も行う。

手順 1 の後、被験者が装着しているヘッドホンから出力される音声の音量調節を行う。音量調節のとき、大きな遅延時間を提示すると調査で提示する全ての遅延時間について遅れていないと判断してしまう可能性が発話に関する調査で指摘されている [13]。そのため、音量調節時に音響信号への遅延生成アプリケーションで指定する遅延時間は、一般的に遅

表 4.1 使用機器

使用機器	製造会社	製品名
オーディオインターフェース	Focusrite	Scalett-Solo 3rd Generation
コントローラ	Nintendo	Super Famicom Controller
開放型ヘッドホン	beyerdynamic	DT 990 PRO
電子メトロノーム	SEIKO	DM71 Digital Metronome
PC	HP Inc.	HP ProBook 450 G7

延を感じないとされている 10[ms] 以下のものとする。また、音量調節時にヘッドホンから音声を出力している間、被験者には遅延のない音声を出力していると説明する。音量調節が完了したら、練習としてメトロノームの合図音に合わせて 20 回から 40 回ボタンを押下してもらい、実験の内容を理解させる。上記の手順によって記録されるボタンを押下する時間間隔および 5 章で説明する評価指標を用いて評価を行う。

4.2 音響信号への遅延生成アプリケーション

本研究で使用する音響信号への遅延生成アプリケーションは、Microsoft 社が提供する統合開発環境である Visual Studio 2022 を用いて C++ で開発した。このアプリケーションの表示例を図 4.2 に示す。図 4.2 は、ボタン押し課題を開始し、アプリケーションをスタートさせてから数回ボタンを押した後の状態である。被験者がボタンを押すと、押した時刻と直前に押した時刻からの経過時間 [ms] が画面左側のエディットボックス内に書き込まれる。実験が終了し、実験者が「ファイルを出力」というプッシュボタンをクリックすると、実験者が指定した CSV ファイルに結果が書き込まれる。そして、開発したアプリケーションのソースコードを付録 C に掲載する。以下にこのアプリケーションの主な機能を示す。

(1) 任意の外部ファイルから複数の遅延時間を設定する機能

第4章 ボタン押し課題のシステム



図 4.2 音響信号への遅延生成アプリケーションの画面の表示例

- (2) 実験者が画面上のコンボボックスで指定した時間だけ遅延させる機能 (4.2.2 項参照)
- (3) 被験者がボタンを押下する時間間隔を記録する機能 (4.2.3 項参照)
- (4) 被験者が押下するボタンの押下回数が実験者がアプリケーション上で指定した回数に到達したら合図音の出力を一時的に停止する機能
- (5) (3) で述べた記録とアプリケーション上での設定内容、被験者情報を外部ファイルに書き込む機能

(1) は Windows で主に使用される INI (Initialization) ファイル形式を採用している。遅延時間の一覧を INI ファイルに予め設定し、アプリケーションから任意の INI ファイルを選択し読み込むことで、コンボボックスから遅延時間を選択する機能を実現している。

(4) は、ボタンの押下回数が指定した回数に到達したら到達したことを示すメッセージボックスを表示させることで、アプリケーションが Enter キーか OK ボタンの入力を受け付けるまで合図音の出力を停止する機能である。(5) は、被験者がボタンを押下する時間間隔を記録する機能である。また、コンボボックスで選択された遅延時間をエディットボックスで指定したタイミングで発生させることも可能である。さらに、選択された遅延時間に基づき遅延を発生させ、ボタンの押下回数が指定した回数に達し結果がファイルに

書き込まれると、コンボボックスの選択項目は自動的に次に移行する。この機能により、ボタン押し課題はINIファイルの選択と結果を出力するプッシュボタンの押下のみで実施可能である。

4.2.1 ASIOにおける音声の同時入出力

本研究で開発するアプリケーションは、オーディオドライバにASIO（Audio Stream Input Output）を用いている。そこで、ASIOにおける音声の入出力方法について説明する。ASIOではマルチバッファリングの切り替えを独自のコールバック関数で行う。独自のコールバック関数を用いることで、バッファの切り替えはオーディオインターフェースによって行われるため、信号のバッファリング処理がOSの影響を受けないという利点がある。ASIOを用いた音声の同時入出力のシステムの動きを図4.3に示す。入力で2つのバッファ、出力で2つのバッファを利用してそれぞれでダブルバッファリングを行う。最初の入力バッファを入力バッファ1、次の入力バッファを入力バッファ2とし、最初の出力バッファを出力バッファ1、次の出力バッファを出力バッファ2とする。それぞれ、音声の同時入出力が行われる前に0に初期化しておく。入力バッファ1への入力信号の格納が開始した時点から音声が出力される時点までの同時入出力の仕組みを以下に示す。

- (1) はじめに入力バッファ1への入力信号の格納が開始され、それと同時に出力バッファ1に格納されたデータの再生が始まる。しかし、この時点で出力バッファ1には録音データが格納されていないため、無音になる。
- (2) 入力バッファ1に格納されるデータ量が入力バッファ1の格納可能な最大の許容量に達したとき、ASIOでコールバック関数が呼び出され、入力バッファ1と出力バッファ1がアプリケーションに受け渡される。それと同時に、入力バッファ2への録音データの格納が始まり、出力バッファ2の再生が始まる。ここでも、はじめは出力バッファ2にはまだ録音データが格納されていないため、無音となる。これと同時

に、アプリケーション側ではコールバックにより入力バッファ1のデータを出力バッファ1にコピーする。

- (3) 入力バッファ2に格納されるデータ量が入力バッファ2の格納可能な最大の許容量に達したとき、再びコールバック関数が呼び出され、出力バッファ1に格納された録音データの再生と入力バッファ1への入力信号の格納が開始する。これと同時に、アプリケーション側ではコールバックにより入力バッファ2のデータを出力バッファ2にコピーする。
- (4) 手順2に戻る。

以上を繰り返すことにより、音声の同時入出力を実現している。このダブルバッファリングを用いた方法では、2バッファ分の遅延時間が常に発生する。

4.2.2 任意の遅延時間後にボタン押下の合図音を再生させる機能

任意の遅延時間が経過した後にWAVデータを再生させる機能は、ASIOにおける音声の同時入出力の方法に基づいて実装した。ボタン押下の合図音の再生は、ボタン押下を検知した後に呼び出されるコールバック関数内で、保存されているWAVデータを入力バッファのデータの代わりに出力バッファに転送することで行われる。このWAVデータの出力バッファへの転送のタイミングを遅延時間ごとに調整することで、任意の遅延時間後にボタン押下の合図音を再生させる機能を実現させる。また、図4.3のようにボタンの押下検知からWAVデータの再生までに少なくとも2つのバッファ分の遅延が生成されることになる。バッファサイズが小さいほど、より高精度な遅延時間の設定が可能となる。オーディオインターフェースのバッファサイズを $n[\text{points}]$ 、サンプリング周波数を $f_s[\text{Hz}]$ 、ASIOにおけるインターフェースに固有の入力遅延を $i[\text{ms}]$ 、ASIOにおけるインターフェースの固有の出力遅延を $o[\text{ms}]$ 、所望の遅延時間を $d[\text{ms}]$ とするとき、遅延時間の生成は以下の手順で実現される。

(1) 初めに式 4.1 に基づき、クリック音の WAV データのコピーを開始し始めるタイミング T を定義する。この T は、ボタン押下の検出後、何回目のコールバック関数の呼び出し時にクリック音の WAV データのコピーを開始するかを示す指標である。例えば、 T が 3 の場合、ボタン押下の検出後、3 回目のコールバック関数呼び出し時にクリック音の WAV データのコピーを開始する。生成したい遅延時間 $d[\text{ms}]$ は、実験者がアプリケーション上で指定する。

$$T = \{d - (i + o)\} \times \frac{1}{n} \times \frac{f_s}{1000} \quad (4.1)$$

- (2) ボタンの押下を検知してから最初のコールバック関数呼び出し時を 1 回目として、 $T - 1$ 回目までは、入力バッファに格納されているデータを出力バッファにコピーする。このとき、入力バッファには 0 が格納されているため無音となる。
- (3) ボタンの押下を検知してから T 回目のコールバック関数呼び出し時になったら、入力バッファに格納されているデータの代わりにクリック音の WAV データの出力バッファへのコピーを開始する。

上記の手順を踏むことにより、任意の遅延時間の生成を実現する。

4.2.3 ボタンの押下時間間隔を記録する機能

ボタンの押下時間間隔を記録する機能は、ボタンを押下するごとに、ボタンの押下と押下の間の時間を計測する。例外として、1 回目のボタンの押下時間間隔は記録しないよう設定する。押下時間間隔の取得には、C++ の標準ライブラリである std::chrono を使用する。std::chrono は、C++11 以降で使用可能な時間に関する操作を提供するライブラリである。以下に押下と押下の間の時間を計測するための手順を示す。

- (1) ボタン押下を検知したら、関数 std::chrono::system_clock::now() を使用してエポック (1970 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒 UTC) からの経過時間を取り得し、用意した変数

第4章 ボタン押し課題のシステム

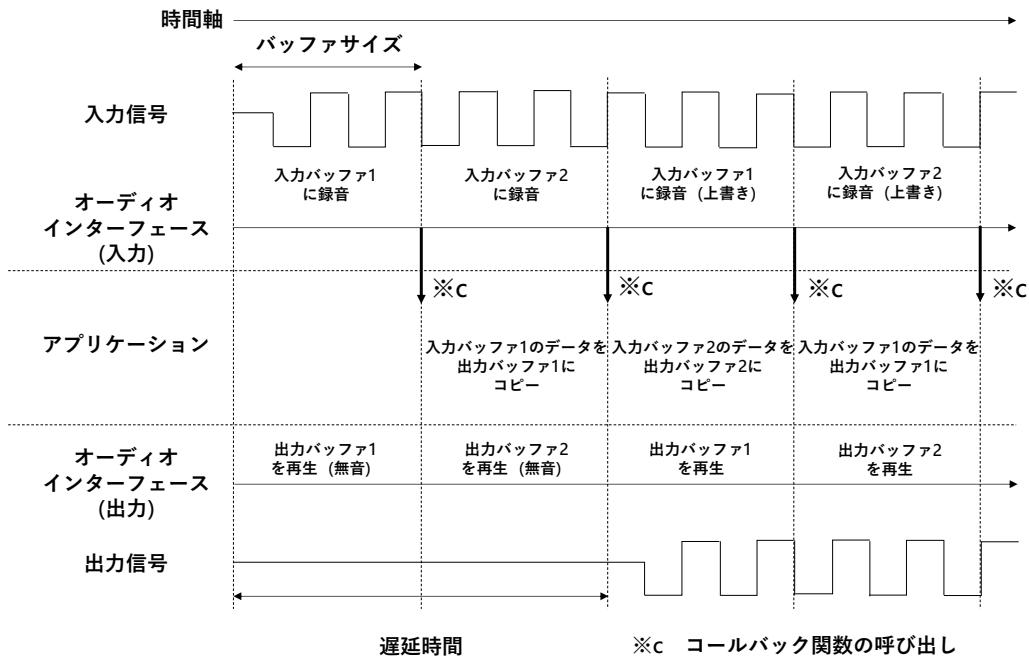


図 4.3 遅延時間の生成原理

A に代入する。

- (2) 再びボタンの押下を検知したら、変数 A を別の変数 B に代入し、変数 A に手順 1 と同様の方法でエポックからの経過時間を取りし、代入する。
- (3) ボタンの押下が 2 回目以降であれば、手順 2 の後に変数 B と変数 A の差を計算し、変数 C に代入する。
- (4) 関数 `std::chrono::duration_cast<std::chrono::milliseconds>()` によって変数 C をミリ秒単位の時間に変換する。
- (5) 手順 4 で変換した変数 C を随时、配列に追加していくことで全てのボタンの押下時間間隔を記録する。

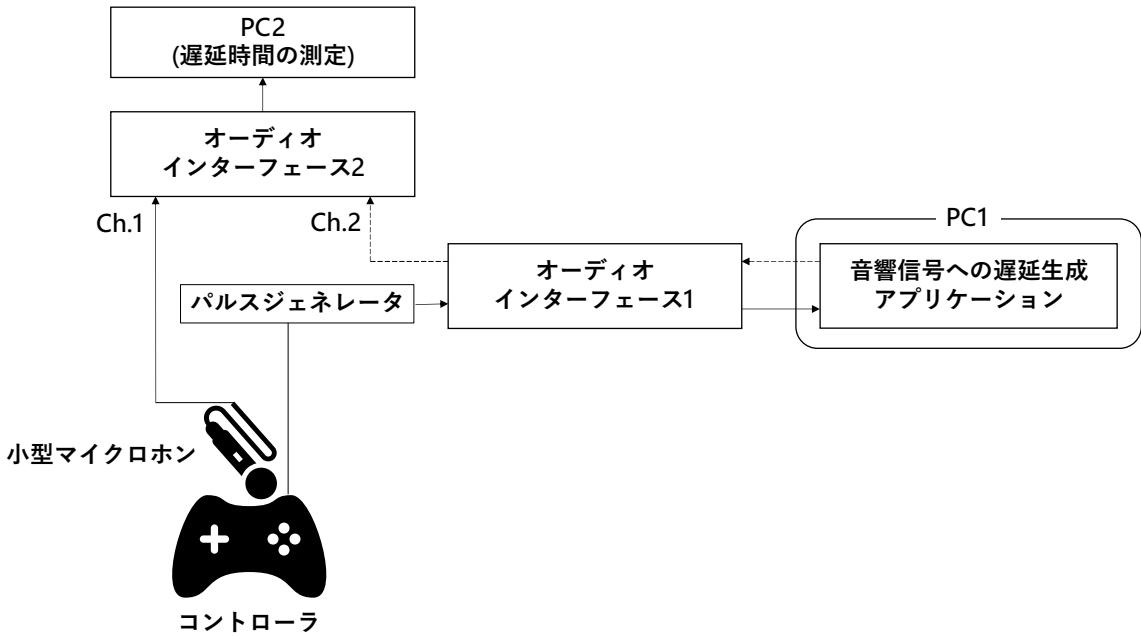


図 4.4 遅延時間測定のための接続図

4.3 生成する遅延時間の正確性の調査

4.3.1 遅延時間の測定方法

4.2節で述べたアプリケーションによって生成された遅延時間の正確性を検証する目的で、遅延時間の測定を行った。図4.4に遅延時間測定のための接続図を示す。測定手順は以下の通りである。

- (1) 測定システムを図4.4に示した構成で用意する。
- (2) 遅延時間測定のためのプログラムと遅延時間生成アプリケーションが起動してから十分に時間が経過した後、実験者がボタンを押下する。
- (3) 図4.5のような小型マイクロホンを取り付けたコントローラから取得した音をオーディオインターフェース2のチャンネル1へと入力する。
- (4) コントローラのボタンを押下することで、遅延生成アプリケーションを介して出力さ



図 4.5 小型マイクロホンを装着しているコントローラ

れる音声をオーディオインターフェース 2 のチャンネル 2 へ入力する。

- (5) 遅延時間測定のためのプログラムの実行後にチャンネル 1 に入力された信号の開始点から 1000 点目の点から 6000 点目の点の信号の振幅の標準偏差を求める。チャンネル 1 において、標準偏差の 2 倍を超えた点を検出し、チャンネル 1 に入力された信号（小型マイクロホンから取得した音響信号）の開始点とする。
- (6) チャンネル 2 においても同様に、標準偏差の 2 倍を超えた点を検出し、これをチャンネル 2 における信号（アプリケーションによって生成された音響信号）の開始点とする。
- (7) それぞれの開始点の時間差を計算し、これを遅延時間 [ms] として算出する。

システムの動作確認は、通常の CPU 負荷がない状態と CPU 使用率を 100 % に保つ重い計算を実行する状態の両方で行った。これにより、他のアプリケーションによる CPU 占有が生じてもシステムが正常に機能するか否かを検証する。遅延時間の測定は合計 10 回を行い、遅延時間の理論値と実測値の差の絶対値の平均および実測値の標準偏差を算出した。

表 4.2 測定に使用した機器

実験装置	製造会社	製品名
オーディオインターフェース 1	Focusrite	Scarlett-solo 3rd Generation
オーディオインターフェース 2	Roland	Duo-Capture EX
遅延時間生成用の PC	HP Inc.	HP ProBook 450 G7
遅延時間測定用の PC	HP Inc.	HP Pavilion Laptop 14-dv2xxx
マイクロホン	DPA Microphones	IMK-SC4060

使用機器の詳細を表 4.2 に示す。設定されたバッファサイズはオーディオインターフェースで設定可能な最小のバッファサイズである 16, サンプリング周波数は 48[kHz], 量子化ビット数は 16[bit] とした。遅延時間は 10-40[ms] の範囲では 5[ms] ずつ, 40-150[ms] の範囲では 20[ms] ずつ変化させ, 各場合において遅延時間を測定した。

4.3.2 測定結果

表 4.3 に測定結果を示す。表 4.3 より CPU 利用率が平常時においては, 理論値の誤差と実測値の差が小さいことから, アプリケーションの正常な動作が確認された。一方で, CPU 利用率が 100 % の状態では, 理論値と実測値の差および実測値の標準偏差が著しく増加することが確認された。これは, 本研究で開発されたアプリケーションが, CPU 利用率が 100 % の際には正常に機能しないことを示している。したがって, 本研究で開発されたアプリケーションを用いてボタン押し課題を実施する際には, CPU 利用率が 100 % に至らないよう注意が必要であり, 実験を行う研究者は, 他のアプリケーションを終了させる等の措置を講じ, CPU 利用率が 100 % にならないように慎重に実験を進める必要がある。そのため, 本研究で実験を行う際には CPU 利用率が 100 % にならないように注意を払い, 実験を行うこととする。

表 4.3 測定結果

CPU 利用率	理論値と実測値の 差の絶対値の平均 [ms]	実測値の 標準偏差 [ms]
平常時	0.129	1.23
100[%] 時	5.08	4.93

第 5 章

遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の評価方法

本章では、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の評価方法について述べる。4章で説明した方法に従い、被験者がボタンを押下する時間を記録すると、被験者に提示するボタンの押下の時間間隔が毎分 60 回、即ち 1000[ms] の間隔でボタンが押下されることが理想である。しかし、実際には人のボタン押下時間間隔にはばらつきが生じると考えられる。遅延聴覚フィードバックが身体運動に影響を与える場合、このばらつきは聴覚フィードバックの遅延時間の大きさに応じて変化すると予想される。そこで、このボタン押下の時間間隔のばらつきを各遅延時間で評価することにより、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響を評価する。ばらつきの評価には、分散と平均二乗誤差を使用し、これらの指標が大きくなるほどばらつきが大きいと判断する。評価指標を算出する際には、評価指標の値の時間変化や使用するデータの個数が結果に影響を与えるため、これらをパラメータとして考慮する。

5.1 分散

ボタンを押下する時間間隔の不偏分散 s_a^2 は、被験者が行うボタン押下の時間間隔を用いて算出する。 s_a^2 は、以下の式により示される。

$$s_a^2 = \frac{1}{l-1} \sum_{i=k}^{k+l-1} (x_i - \bar{x}_{kl})^2 \quad (5.1)$$

ここで l [回] は分散を算出するために使用するデータの個数、 k は分析するデータの最初のインデックス、 x_i [ms] は、取得した i 番目のボタンの押下時間間隔のデータ、 \bar{x}_{kl} [ms] は、 k 番目のデータから l 個のデータを用いて算出するボタンの押下時間間隔のデータの平均値を指す。 s_a^2 において、任意の i で理想的な時刻にボタンが押下されなかった場合、 x_i と x_{i+1} の両方に理想的なボタンの押下時間間隔との差異が生じる。データの平均値との差異を分析する際、大きな誤差が発生した場合、その影響で分散が過大になり、適切な評価が困難になる可能性がある。この場合、各被験者のボタンの押下時間間隔のデータの中央値を真値とする分散を検討することが有効である。中央値を真値として用いることにより、データに極端な誤差が生じた場合でも、ボタンの押下時間間隔のばらつきを適切に評価することが可能になると考えられる。各被験者のボタンの押下時間間隔のデータの中央値を真値とする分散 s_b^2 は、以下の式により示される。

$$s_b^2 = \frac{1}{l} \sum_{i=k}^{k+l-1} (x_i - M_{kl})^2 \quad (5.2)$$

ここで、 M_{kl} は、 k 番目のデータから l 個のデータを用いて算出するボタンの押下時間間隔のデータの中央値を指す。次に、真値を理想的なボタンの押下時間間隔とする場合を考える。例えば、ボタン押下の回数が毎分 60 回であれば、理想的には 1000[ms] の間隔でボタンが押下される。しかし、実際の実験では、この理想的な間隔でボタンが押下されるとは考えにくく、その理想的な間隔との誤差の分散は、ばらつきが増加するとともに大きく

なると推測される。理想的なボタンの押下時間間隔との誤差の分散 s_c^2 は、以下の式により示される。

$$s_c^2 = \frac{1}{l} \sum_{i=k}^{k+l-1} (x_i - a)^2 \quad (5.3)$$

ここで、 a は理想的なボタンの押下時間間隔 [ms] を指す。

5.2 平均二乗誤差

本節では、聴覚フィードバックの遅延が変則的に発生する場合のばらつきの評価について検討する。ボタンの押下回数が t (t は 2 以上の整数) の倍数に到達したときのみ遅延が発生する状況を想定し、 t の倍数に到達する直前のボタン押下時間間隔と直後のボタン押下時間間隔のデータの差の平均二乗誤差 (Mean Squared Error, MSE) が、遅延聴覚フィードバックがボタン押下時間間隔に与える影響を反映すると仮定する。遅延時間が増加するにつれて、MSE も増加すると予測される。MSE を算出する際に用いる誤差の総数を表す関数 $f(n)$ と、使用するデータの最後のインデックスを示す関数 $s(n)$ は、ボタンの押下回数 n を用いて以下の式で表される。

$$f(n) = \left\lfloor \frac{n-t-1}{t} \right\rfloor + 1 \quad (5.4)$$

$$s(n) = \left\lfloor \frac{n-t-2}{t-1} \right\rfloor \quad (5.5)$$

ここで、 $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数を表す。これらの関数を用いて、MSE は次の式で定義される。

$$MSE = \frac{1}{f(n)} \sum_{i=0}^{s(n)} (d_{t-1+ti} - d_{t+ti})^2 \quad (5.6)$$

ここで、 d_{t-1+ti} はボタンの押下回数が t の倍数に達する直前のボタン押下時間間隔、 d_{t+ti} はボタンの押下回数が t の倍数に達した直後のボタン押下時間間隔のデータを示す。これ

により、聴覚フィードバックの遅延による影響を定量的に評価することが可能になると考えられる。さらに、 t の倍数に到達する直前のボタン押下時間間隔と到達した直後の間隔との誤差の中央値 (Median Squared Error, MedSE) での評価を検討する。この計算法により、誤差の中に極端な値が存在しても適切なばらつきの評価が行える可能性がある。誤差の中央値 MedSE は以下の式で定義される。

$$MedSE = Med((d_{t-1} - d_t)^2, (d_{2t-1} - d_{2t})^2, \dots, (d_{(1+s(n))t-1} - d_{(1+s(n))t})^2) \quad (5.7)$$

式 5.7 における $Med()$ は中央値を計算する関数であり、括弧内の各項はボタンの押下回数が t の倍数に到達する直前のボタン押下時間間隔と t の倍数に到達した直後のボタン押下時間間隔の差の二乗を表す。このように、MedSE を用いることで、データの極端なばらつきがあった場合でも、遅延聴覚フィードバックがボタン押下時間間隔に与える影響を適切に評価することが可能になると考えられる。

第 6 章

身体運動のばらつきを評価するため の最適な実験条件

4 章で述べたボタン押し課題でボタンの押下時間間隔を記録すると、聴覚フィードバックに遅延がない場合でも理想的なボタンの押下時間間隔にはならずいくらかのばらつきが発生する。これは、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査において発生する本質的なばらつきであると考えられる。そのため、聴覚フィードバックに遅延がない場合でのばらつきが小さくなるような実験条件を用いれば、遅延による影響がより顕著に現れることが期待される。そこで、本章ではこの調査における最適な実験条件を明らかにするために、以下の実験から実験条件によるばらつきの変化を調査した。

実験 (1) メトロノームの合図音の BPM を変化させたときのボタンの押下時間間隔のばらつきの変化を調べる。

実験 (2) 分散の計算に用いるデータの個数の違いによるばらつきの変化を調べる。

実験 (1) と実験 (2) では、聴覚フィードバックの遅延時間を一般的に影響のない遅延時間とされている 10[ms] に設定した。

6.1 ボタンを押下する間隔の最適な条件

この実験では、1分間にボタンを押下する回数を70回から110回までの5種類に変化させる。20代の被験者8人を対象に調査を行った。図6.1にボタンを押下する間隔と評価指標の関係を示す。この図から1分間に80回の間隔でボタンを押下するときが最も評価値が小さいことがわかる。このため、これ以降の実験では、ボタンを押下する時間間隔を1分間に80回とする。

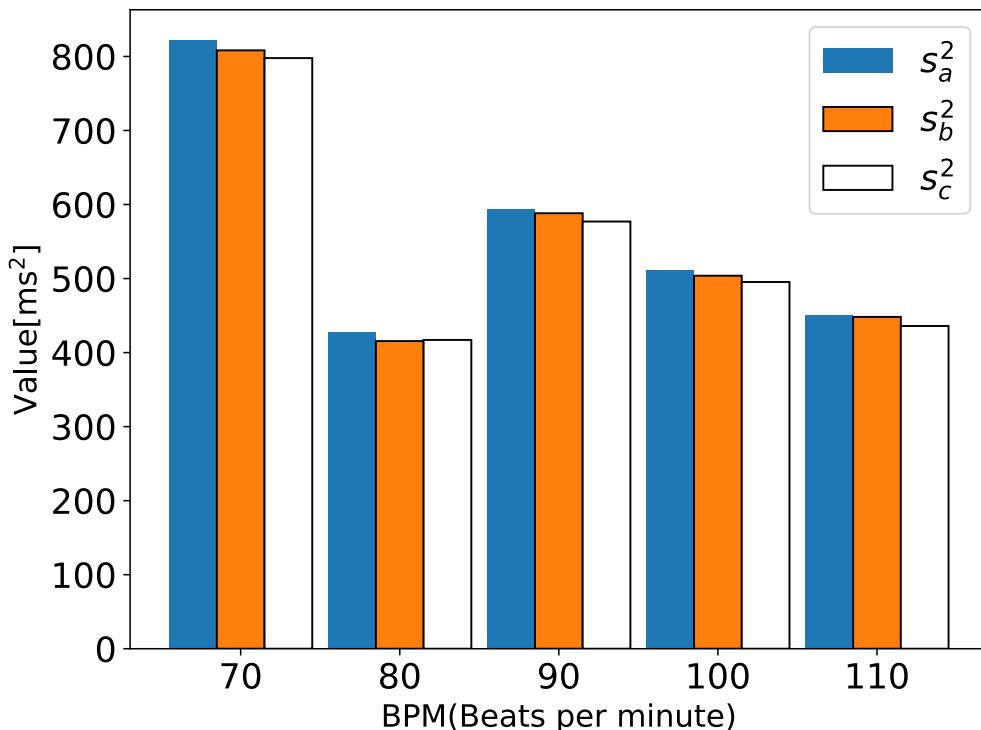


図6.1 ボタンを押下する間隔と評価指標の関係

6.2 ボタンを押下する回数の最適な条件

本節では、遅延時間を $10[\text{ms}]$ に設定し、インデックスが 4 未満のデータは練習区間として除外する。つまり、分析するデータの最初のインデックス k は 5 とする。図 6.2 および図 6.3 に使用するボタン押下時間間隔のデータの個数と評価指標の関係を示す。図 6.2 では、 l を 10 から 30 まで 1 ずつ変化させながら s_a^2 および s_c^2 を算出し、これらを被験者数で平均している。同様に、図 6.3 では s_b^2 を算出し、被験者数で平均している。これらの図から、評価指標の値の算出に使用するデータの個数が 20 を超える場合、データの個数の増加に伴い評価指標の値が大きくなることがわかる。この結果から、実験条件によるばらつきを最小限に抑えるためには、分析する対象のデータの個数を 20 個以下に設定することが望ましいと考えられる。したがって、以降の実験では観測値全体のばらつきを評価するときのデータのサイズは 20 とする。

6.3 遅延を発生させる最適なタイミング

本節では、6.1 節で規定された適切なボタン押下間隔を用いて、遅延を発生させる最適なタイミングを検証する。実験 (1) では、被験者による予備調査後の口頭アンケート結果から、「遅延を感じなかった」あるいは「遅延を感じたが操作感に影響はなかった」との意見が寄せられた。この結果を踏まえ、「ボタン押下時の合図音の遅延が一定であれば、被験者は遅延に適応し、ボタン押下の時間間隔に及ぼす影響が減少する」との仮説を立て、「合図音の遅延が毎回でない場合、慣れの影響が軽減され、遅延聴覚フィードバックの影響が明確に観察される」と考えた。この仮説を検証するために、実験 (2) では、ボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときのみ遅延を発生させるシステムを用いて、遅延聴覚フィードバックが身体運動に及ぼす影響を分析した。

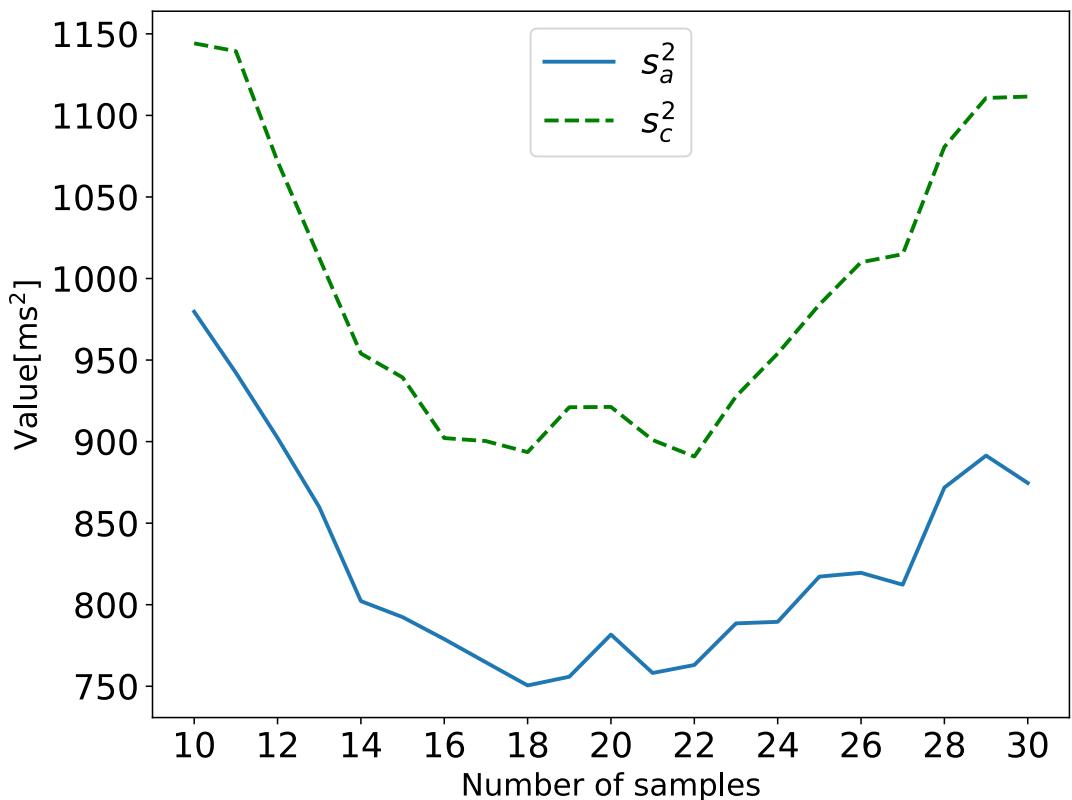


図 6.2 使用するボタン押下時間間隔のデータの個数と評価指標の関係

実験 (1) ボタンを押下したときの合図音が常に遅延する場合

実験 (2) ボタンを押下するときの合図音がボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときのみ遅延する場合

上記 2 つの実験を行い、聴覚フィードバックの遅延時間とボタンの押下時間間隔のばらつきの関係が読み取り可能である実験条件を探る。

6.3.1 調査方法

若年者を対象に行った遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査方法を以下に示す。実験 (1) と実験 (2) ともに調査の方法は同様である。

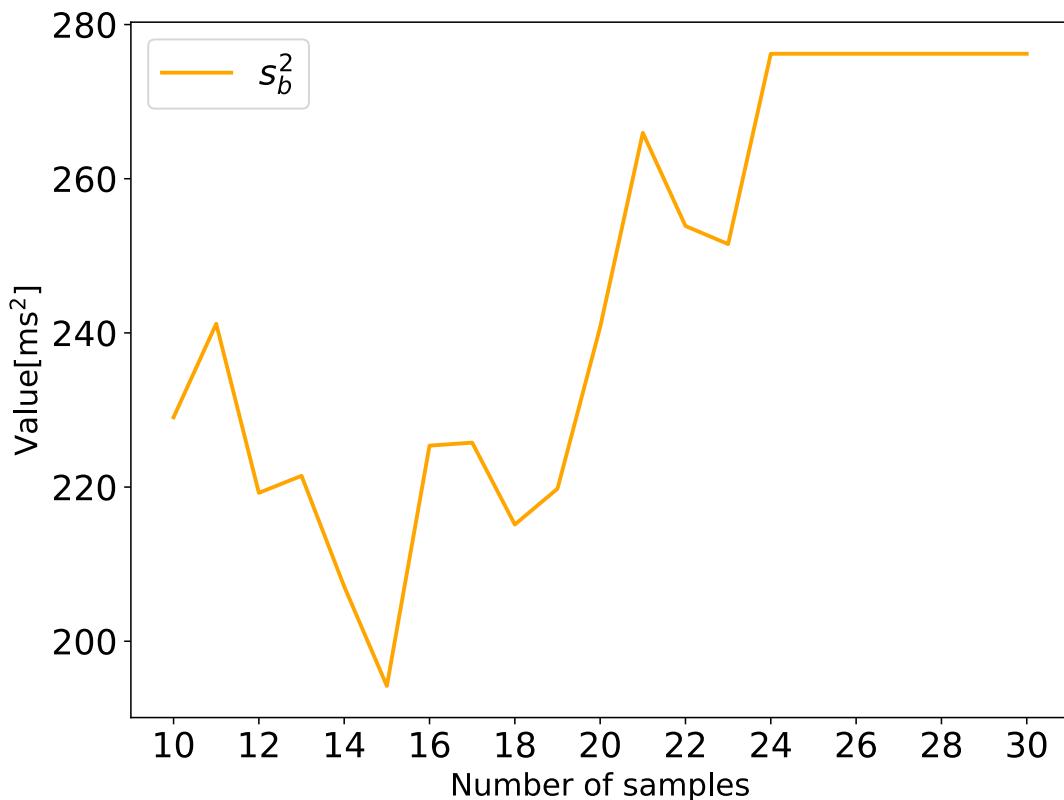


図 6.3 使用するボタン押下時間間隔のデータの個数と評価指標の関係

- (1) 被験者に図 4.1 のシステムを用意する.
- (2) 4.1 節で述べた手順 1 から手順 2 によって、ボタン押し課題を実施する.
- (3) ヘッドホンから出力されるボタン押下の合図音の遅延時間をランダムに変更して実験者が指定した回数だけ手順 2 を繰り返す. このとき、実験者が提示する回数は、6.3.2 項で提示する遅延時間の種類である. また、遅延時間を変更し、次の実験に移るときには 20 秒間の休憩を挟む.

6.3.2 調査条件および調査対象

先行研究 [7] においては、遅延聴覚フィードバックが発話に与える影響を若年者と高齢者に対して検証した. その結果、90[ms] を超える遅延時間において、若年者と高齢者の間

表 6.1 実験 (1) における遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小 - 最大))
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	3	22.0 (21 - 23)
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	5	22.4 (22 - 23)
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	4	23.0 (22 - 24)
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	4	22.5 (22 - 24)
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	5	21.8 (21 - 22)

で遅延聴覚フィードバックに対する違和感に有意な差が見られた。また、文献 [11] では、遅延なしの状態と比較して 100[ms] 以上の遅延があるとリズムを刻む作業が困難になることが示されている。これらを踏まえ、本研究では 100[ms] 未満の遅延時間においても身体運動に与える遅延聴覚フィードバックの影響を検証するため、遅延時間を 10, 30, 50, 70, 90, 110[ms] の 6 つに設定した。遅延時間の提示順序は、初めに 10[ms] を提示し、次に 10[ms] 以外の中からランダムに選択し提示する。その後、残る遅延時間に 10[ms] を加えたものをランダムに提示する。遅延時間が 10[ms] の時の評価値の算出については、最初に提示したものではなくランダムに提示したもののが結果を用いる。表 6.1 に実験 (1) における遅延時間の提示順序、被験者数および被験者の年齢の平均、最小値、最大値を示し、表 6.2 に実験 (2) における同様の情報を示す。調査結果は、実験 (1) では、提示する遅延時間ごとに 5.1 節の s_a^2 , s_b^2 および s_c^2 を算出し、実験 (2) では、提示する遅延時間ごとに 5.1 節の s_a^2 , s_b^2 および s_c^2 と 5.2 節で述べた MSE および MedSE を算出することで評価する。

6.3.3 調査結果

図 6.4 に実験 (1) による遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響の調査結果を、図 6.5 に実験 (2) における同様の影響の調査結果を、図 6.6 に実験 (2) における遅延時間と

表6.2 実験(2)における遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小-最大))
提示順1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	4	22.5 (22 - 24)
提示順2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	3	22.0 (22 - 22)
提示順3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	3	23.7 (22 - 25)
提示順4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	3	21.7 (21 - 22)
提示順5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	3	22.7 (21 - 25)

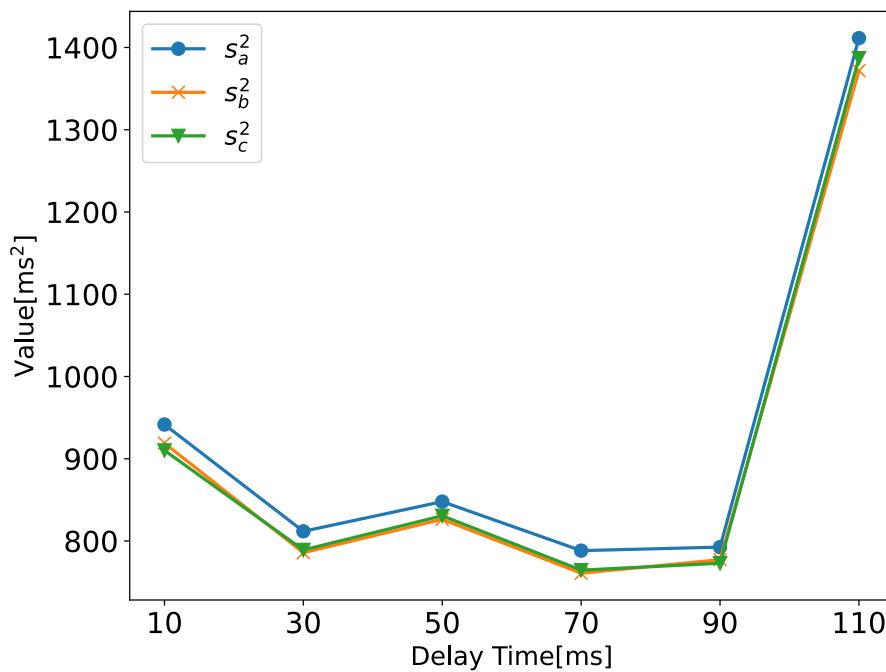


図6.4 実験(1)における遅延時間と評価指標の関係

MSE および MedSE の関係を示す。図6.4に示される結果から、10[ms] から 90[ms] の間で評価指標が減少する傾向が見られ、90[ms] から 110[ms] の範囲では評価指標が急激に増加していることが観察される。10[ms] から 90[ms] の間での評価指標の減少は、被験者が遅延に馴化した結果である可能性が高い。これは、一貫した遅延を持つシステムにおいて、繰り返されるボタン押し課題を通じて被験者が遅延に順応し、より大きな遅延にも

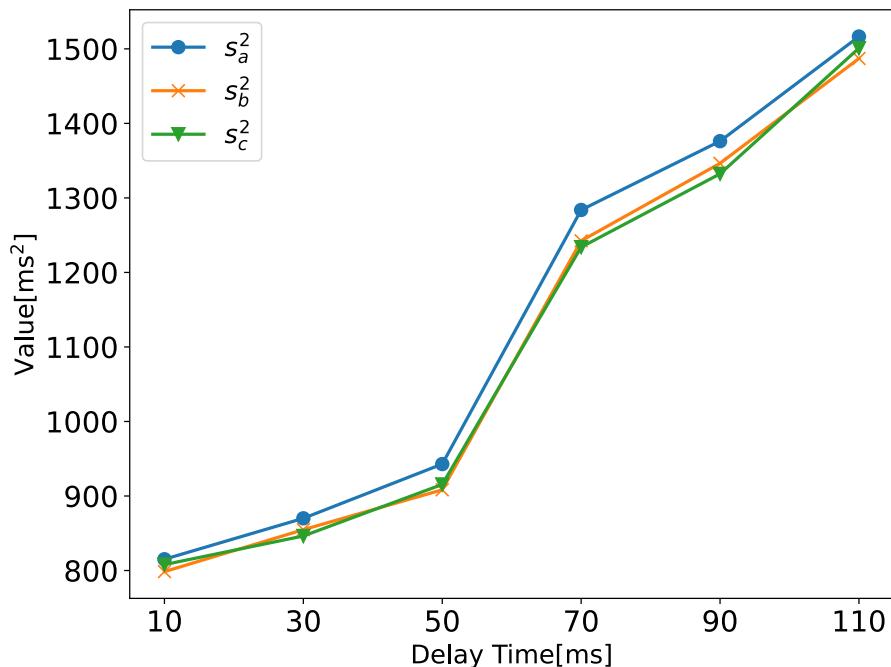


図 6.5 実験 (2) における遅延時間と評価指標の関係

対応できるようになることを示唆している。一方、図 6.5 の実験 (2) の結果では、10[ms] の評価値が最小であり、遅延時間の増加に伴い評価値が上昇する傾向が確認できる。さらに、図 6.6 では、10[ms] から 30[ms] の間で評価値が減少しているものの、30[ms] から 110[ms] にかけて評価値が増加する傾向が見られる。これは、不規則な遅延が身体運動に与える影響を示しており、4回に1度の遅延が特に影響を及ぼしている可能性がある。これらの結果から、遅延が一定である場合、被験者はその遅延に馴染み、ボタン押下時間間隔に及ぼす影響が減少するという仮説を支持する。したがって、本研究では次回以降の実験を実験 (2) の条件で進めることにする。これにより、遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響のより詳細な理解を目指す。

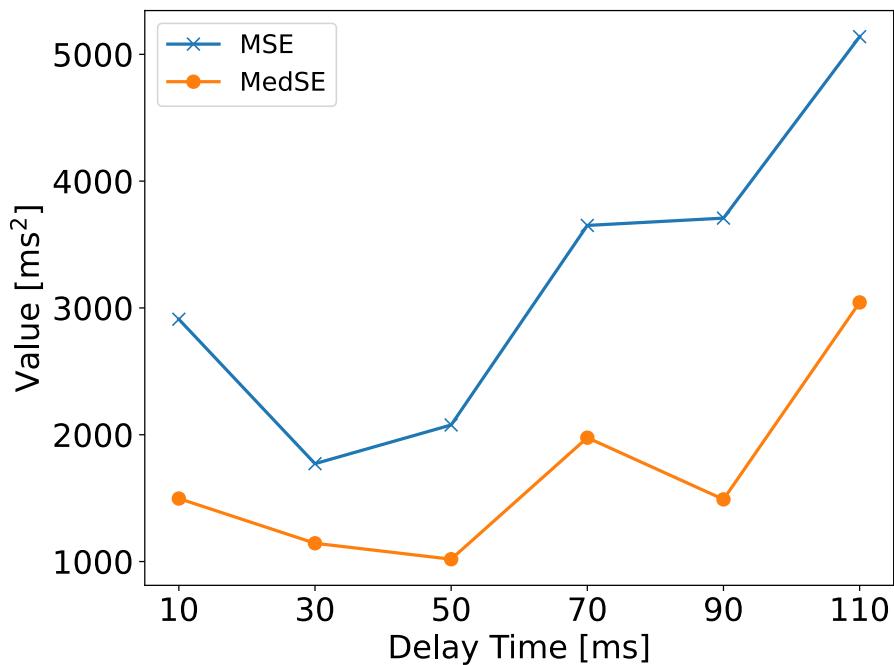


図 6.6 実験 (2) における遅延時間と MSE および MedSE の関係

第 7 章

遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査

本章では、第 4 章で開発されたシステムと第 6 章で決定された実験条件を用いて、遅延聴覚フィードバックが身体運動に及ぼす影響を聴力が正常な若年者および 60 歳以上の高齢者に対して調査した結果について述べる。「高齢者は若年者に比べて聴覚フィードバックの遅延に対する許容度が高い」という仮説を、ボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときのみ遅延を発生させるシステムを用いて検証する。第 6 章の予備実験により、ボタンの押下回数が 4 の倍数に達する直前の押下間隔と 4 の倍数に達した直後の押下間隔の差の二乗の平均値および中央値が遅延時間の増加に比例して増大すること、そしてボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときの遅延が全体のボタン押下間隔のばらつきを拡大させるという可能性が示唆された。これらの予備実験で得られた考察を基に、仮説の検証を行う。

7.1 調査方法

聴力の正常な若年者および高齢者を対象に行ったボタン押し課題による遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査の方法を以下に示す。

表7.1 若年者の実験Aにおける遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小-最大))
提示順1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	8	22.1 (21-23)
提示順2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	8	22.4 (21-24)
提示順3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	8	22.3 (21-25)
提示順4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	7	22.7 (22-24)
提示順5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	7	23.1 (22-24)

- (1) 被験者に図4.1のシステムを用意する。
- (2) 4章の手順1から手順2までに述べた方法によって、ボタン押し課題を実施する。
- (3) ヘッドホンから出力されるクリック音の遅延時間をランダムに変更して実験者がアプリケーション上で指定した回数だけ手順2を繰り返す。このとき、実験者が提示する回数は、7.2節で提示する遅延時間の種類によって異なる。

7.2 調査条件および調査対象

遅延時間の提示順序は、最初に10[ms]を提示し、次に10[ms]以外の中からランダムに選択し提示する。その後、残る遅延時間に10[ms]を加えたものをランダムに提示する。提示する遅延時間の種類を表7.1、表7.2、表7.3および表7.4に示す。本章では、10, 30, 50, 70, 90, 110[ms]の6種類の遅延時間を用いた実験を実験Aとし、10, 15, 20, 25, 35, 30, 40[ms]の7種類の遅延時間を用いた実験を実験Bと称する。

表7.2 若年者の実験Bにおける遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小-最大))
提示順1	10, 25, 35, 30, 40, 20, 10, 15	7	22.6 (21-24)
提示順2	10, 15, 40, 10, 35, 25, 30, 20	7	22.9 (21-25)
提示順3	10, 30, 25, 10, 40, 20, 35, 15	7	22.6 (21-25)
提示順4	10, 30, 20, 10, 15, 35, 25, 40	7	22.1 (20-24)
提示順5	10, 40, 10, 25, 30, 20, 15, 35	6	23.5 (22-24)

表7.3 高齢者の実験Aにおける遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小-最大))
提示順1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	8	63.5 (60-70)
提示順2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	8	70.1 (61-77)
提示順3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	8	68.4 (63-77)
提示順4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	9	70.2 (61-82)
提示順5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	8	74.1 (68-83)

表7.4 高齢者の実験Bにおける遅延時間の提示順

提示順	遅延時間 [ms]	被験者数	年齢
			(平均(最小-最大))
提示順1	10, 25, 35, 30, 40, 20, 10, 15	8	70.0 (60-80)
提示順2	10, 15, 40, 10, 35, 25, 30, 20	8	72.1 (60-90)
提示順3	10, 30, 25, 10, 40, 20, 35, 15	8	67.9 (60-88)
提示順4	10, 30, 20, 10, 15, 35, 25, 40	9	75.2 (62-84)
提示順5	10, 40, 10, 25, 30, 20, 15, 35	8	73.1 (65-80)

7.3 調査結果

7.3.1 観測値の分布

本節では、遅延時間ごとに得られたボタンの押下時間間隔のデータの分布を箱ひげ図を用いて示す。箱ひげ図は、観測値の中央値、第1四分位数、第3四分位数を示すことで、データの分布状況および中心的傾向を効果的に視覚化する。加えて、箱ひげ図に外れ値を示すことで、データのばらつきを直接的に評価することが可能となる。外れ値の算出は、以下の手順により行う。

- (1) 各遅延時間におけるボタンの押下時間間隔のデータを、被験者ごとに集計する。
- (2) 各遅延時間でのボタンの押下時間間隔のデータの中央値、第1四分位数、第3四分位数を算出する。
- (3) 第3四分位数から第1四分位数を引いた値である四分位範囲 (Interquartile Range, IQR) を計算する。
- (4) 手順3で求めた IQR を 1.5 倍し、この値を第三四分位数に加算および第一四分位数から減算した結果を上下の閾値と定める。
- (5) 閾値内の最も遠いデータまで箱からひげを引く。
- (6) 各データと閾値を比較し、手順4で求めた閾値の外にある値を全て外れ値とし、点で表す。

これにより、データの基本的な統計的特徴を簡潔に表現し、後続の分析におけるデータの解釈を支援する。図7.1、図7.2、図7.3および図7.4に遅延時間ごとのボタンの押下時間間隔のデータの分布を示す。これらの図より、それぞれの遅延時間でのボタンの押下時間間隔のデータには、一定数の外れ値が存在することがわかる。したがって、本研究では外れ値を除外したデータを用いて分析を行う。この方法により、これから行う分析において

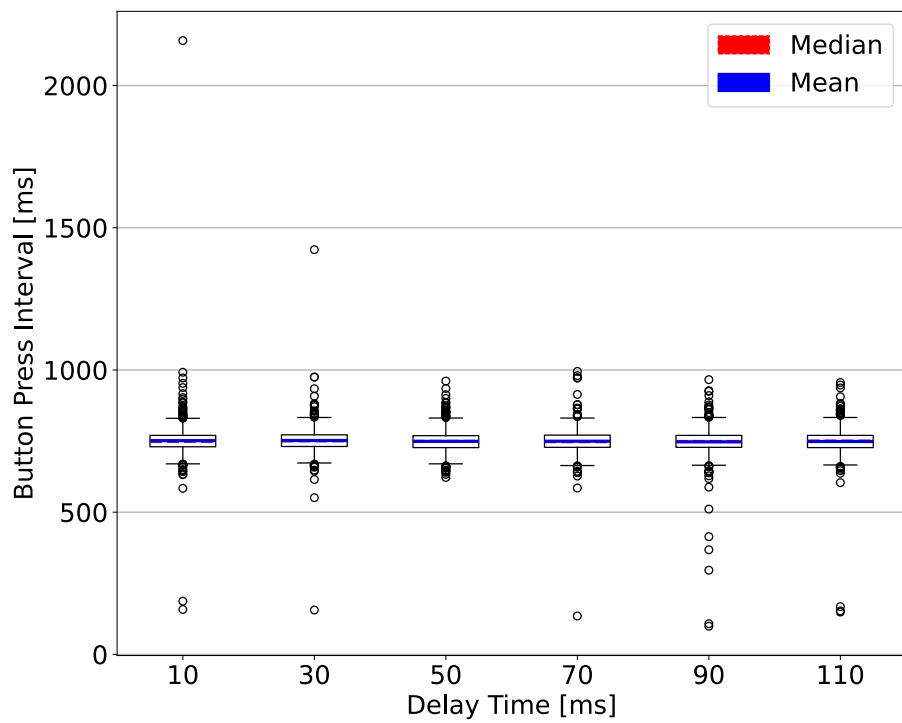


図 7.1 実験 A における遅延時間ごとの若年者のデータの分布

て、外れ値の影響を排除し、データの適切な評価を行うことができる。

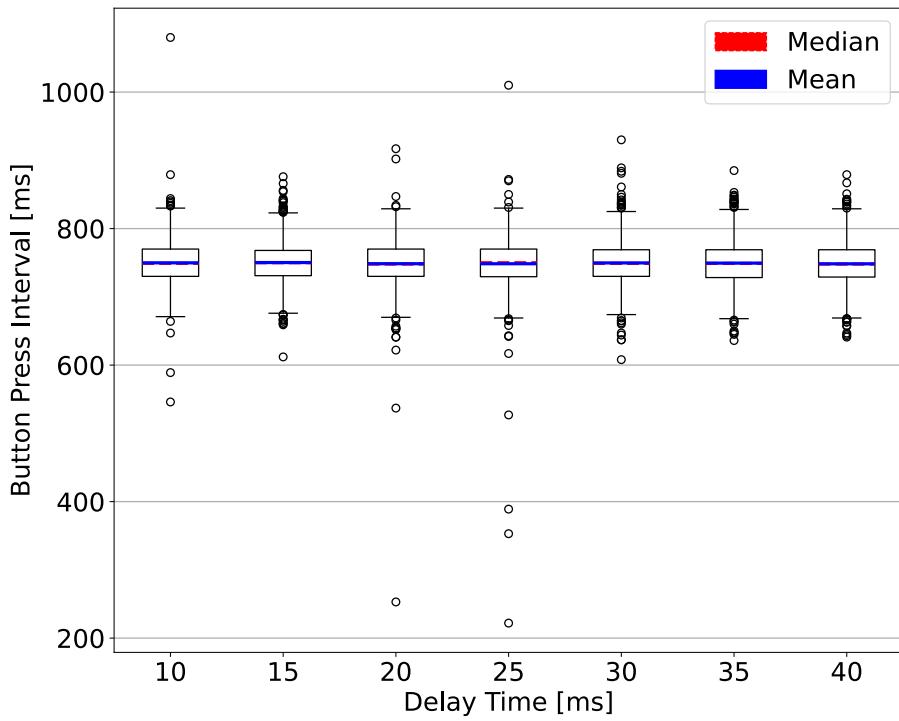


図 7.2 実験 B における遅延時間ごとの若年者のデータの分布

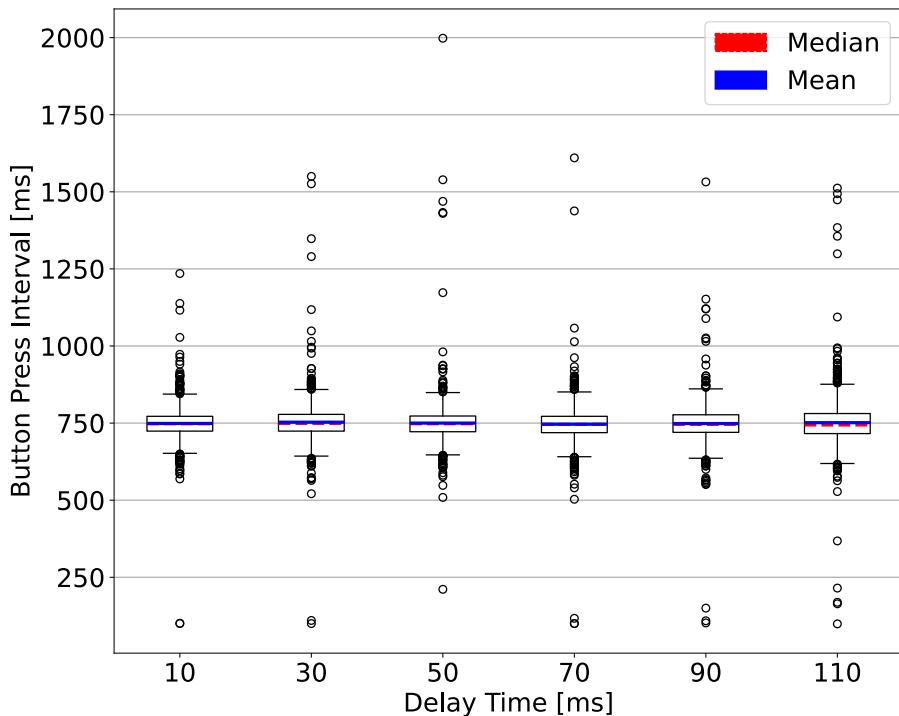


図 7.3 実験 A における遅延時間ごとの高齢者のデータの分布

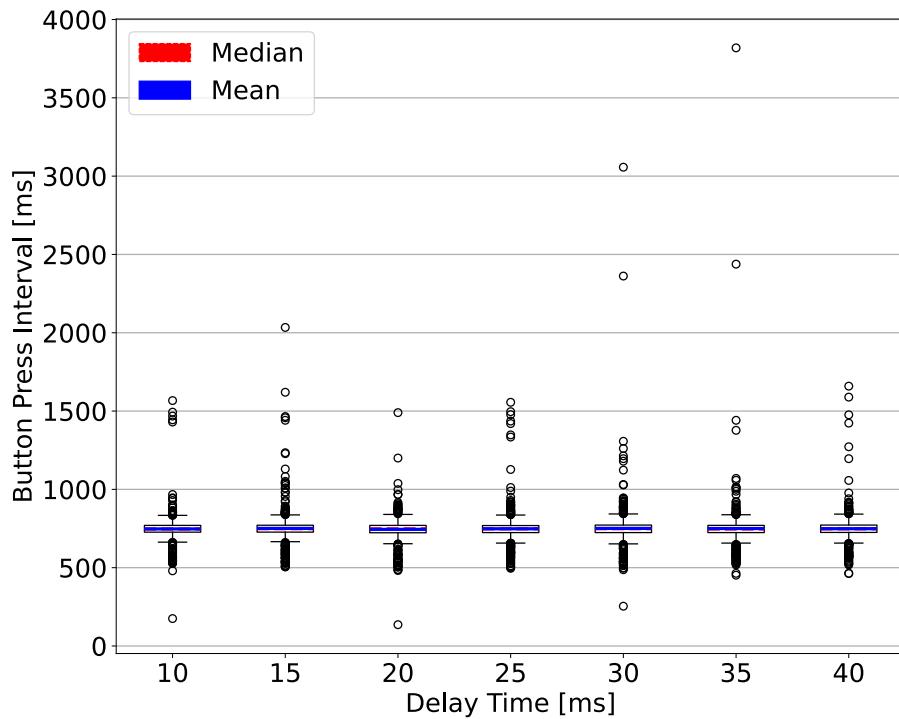


図 7.4 実験 B における遅延時間ごとの高齢者のデータの分布

7.3.2 遅延時間と評価指標の関係

本節では、7.3.1項で説明した方法によりデータの外れ値を除去した後の遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の調査結果を標本全体の分散、遅延直前および直後の押下時間間隔の差の二乗の平均値 (Mean Squared Error, MSE), 遅延直前および直後の押下間隔の差の中央値 (Median Squared Error, MedSE) の3つの評価指標を用いて示す。遅延時間と評価値の関係が若年者と高齢者で異なるかどうかを検証するために、若年者と高齢者それぞれの結果を同一グラフ上に表示し、比較する。図7.5, 図7.6に実験Aにおける遅延時間と分散の関係、図7.7, 図7.8に実験Bにおける遅延時間と分散の関係、図7.9, 図7.10に実験A、実験Bにおける遅延時間と分散の関係において、遅延時間が10[ms]時の評価値を基準に正規化した場合の結果を示す。また、図7.11, 図7.12にMSEおよびMedSEの結果を、図7.13, 図7.14にMSEおよびMedSEの結果を遅延時

間が 10[ms] 時の評価値で正規化した場合の結果を示す。

はじめに、実験 A における結果について述べる。実験 A の結果において、ボタンの押下時間間隔全体の分散を評価値とする指標によれば、正規化されたデータでは若年者と高齢者の反応に顕著な差異が見られる。若年者は、一貫して評価値が緩やかに増加するのに対し、高齢者は 110[ms] を境に分散が大幅に増加することが示された。また、実験 A における MSE および MedSE による評価からも、遅延時間の増加に伴い、若年者と高齢者双方の評価値に増加の傾向が確認された。この結果は、ボタン押し課題で提供される聴覚フィードバックの遅延が長くなるにつれて、遅延聴覚フィードバックの影響がより顕著になることを示唆している。若年者は遅延時間の増加に対して比較的均一な反応を示したが、対照的に高齢者は 70[ms] まで比較的緩やかな増加を見せた後、90[ms], 110[ms] の遅延時間において顕著な反応の増加を示した。これは、高齢者がある程度の遅延には許容度を持つことを示唆しており、遅延時間が 110[ms] に達した際には、若年者との差異が特に明確になった。これらの結果から、高齢者が若年者と比較して聴覚フィードバックの遅延に対する許容度が高い可能性が示され、結果として遅延時間の増加に対する高齢者の感知の鈍さが推測される。さらに、高齢者の評価値が若年者と比較して一貫性に欠けることからも、高齢者が遅延に対して鈍感である可能性も示唆される。

次に、実験 B における結果について述べる。実験 B においてもボタン押し課題の押下時間間隔全体の分散を通じて分析した結果、若年者と高齢者での間で異なる傾向が観察された。正規化されたデータに基づく評価では、10[ms] から 40[ms] の遅延時間帯において、若年者の分散は一貫して低い水準を維持しながらも緩やかに増加しているのに対し、高齢者は遅延時間と評価値の間に一貫した関係が認められない。非正規化されたデータに基づく分析でも、高齢者は遅延時間に対して比較的一貫した分散の値を示しているが、若年者に比べて全体的に高い分散値を記録している。これらのこととは、高齢者が遅延時間の増加に対して若年者よりも鈍感であることを示唆し、逆に若年者が遅延時間の変化に対してより敏感である可能性を示している。また、MSE および MedSE による評価では、10[ms]

から 40[ms] の比較的短い遅延時間帯において、若年者における評価値が緩やかに増加する傾向が認められ、若年者が遅延時間の増加に対して比較的敏感であること、そして遅延聴覚フィードバックによる影響をより感じやすいことを示唆している。一方で、高齢者においては、遅延時間と評価値の間に一貫した関係が見出されず、遅延に対する感受性の低さが示唆される。

以上の結果をまとめると、10[ms] から 40[ms] の短い遅延時間帯における観察結果から、若年者の反応は遅延時間の増加に伴い緩やかに増加する傾向にあるが、高齢者の反応には一貫した関係が認められないことが示された。このことは、若年者が遅延に対して敏感であり、一方で高齢者が遅延時間に対してある程度の許容度を持っていることを示唆している。一方、遅延時間を 10[ms] から 110[ms] に拡大した場合、特に 90[ms] を超える長い遅延時間帯における高齢者の反応に大幅な増加が観察され、高齢者が遅延時間の増加に対して比較的鈍感であるものの、90[ms] を超えるとタスクの一貫性を保つことが困難になることが示された。若年者も長い遅延時間において、反応の増加を示したが、この増加は高齢者ほど急激ではなかった。これらの結果は、遅延時間が増加するにつれて若年者と高齢者の反応の差異が顕著になることを示し、若年者は短い遅延時間帯でも遅延を感じやすく、高齢者は長い遅延時間において特に顕著な反応を示したこと明らかにする。さらに、遅延時間に対する年齢別の感受性の違いは、遅延聴覚フィードバックにおける効果を最大化するための異なるアプローチの重要性を協調するものと思われる。

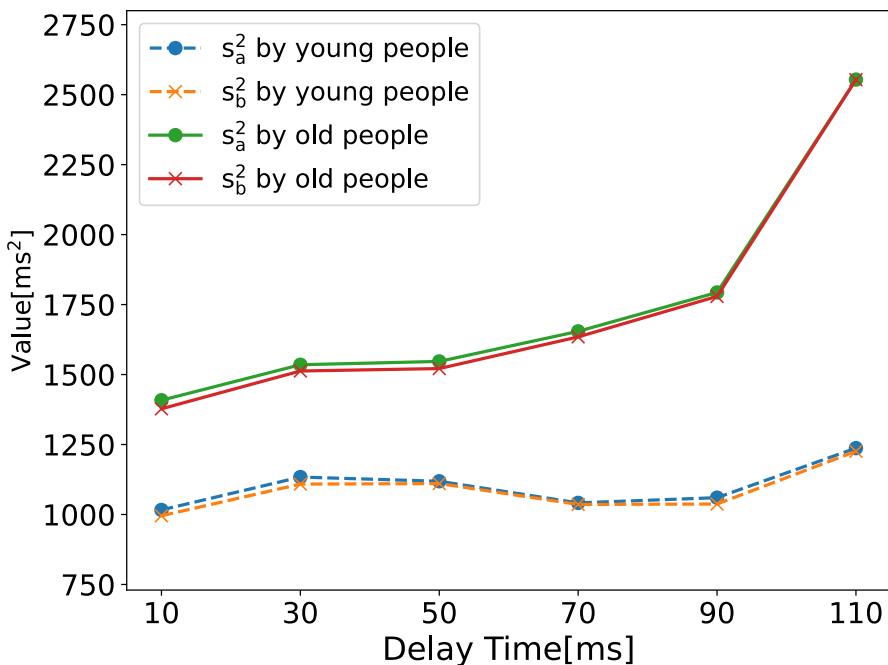


図 7.5 実験 A における若年者と高齢者の分散の比較 1

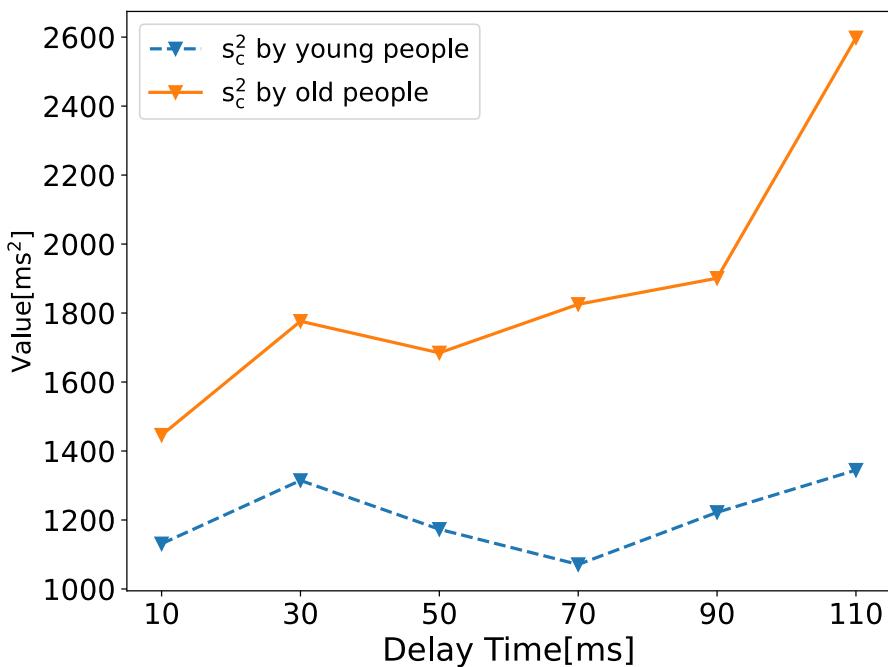


図 7.6 実験 A における若年者と高齢者の分散の比較 2

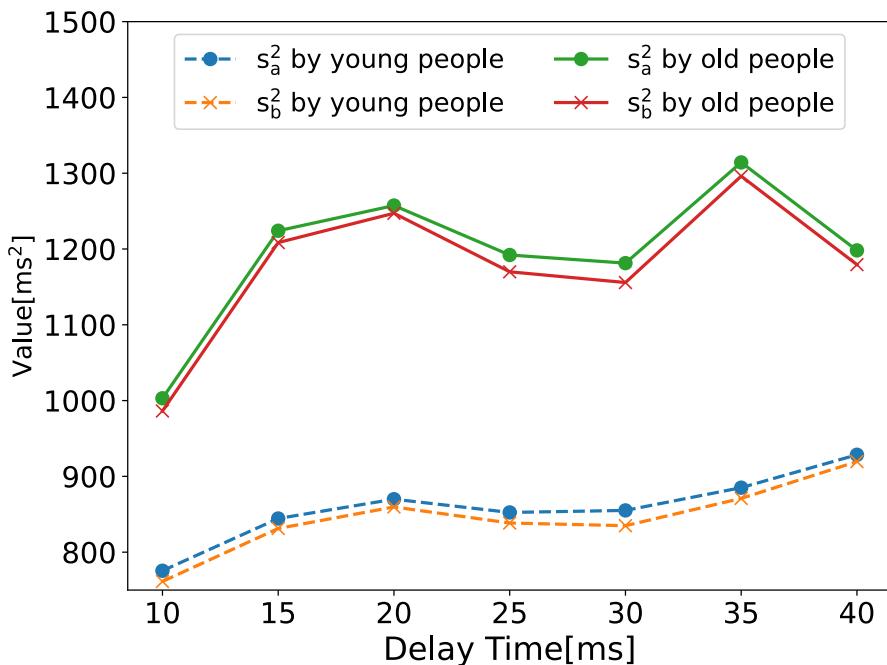


図 7.7 実験 B における若年者と高齢者の分散の比較 1

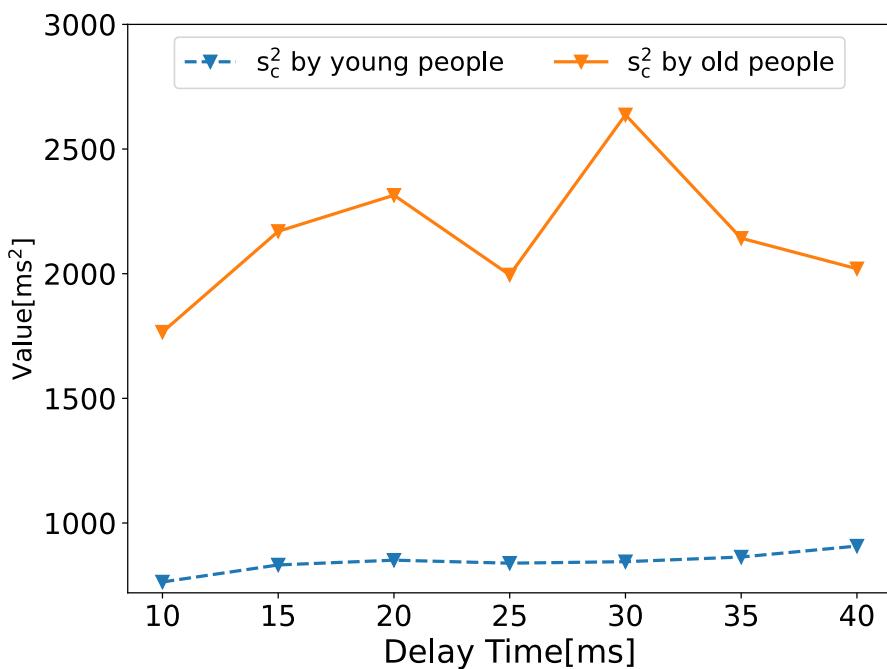


図 7.8 実験 B における若年者と高齢者の分散の比較 2

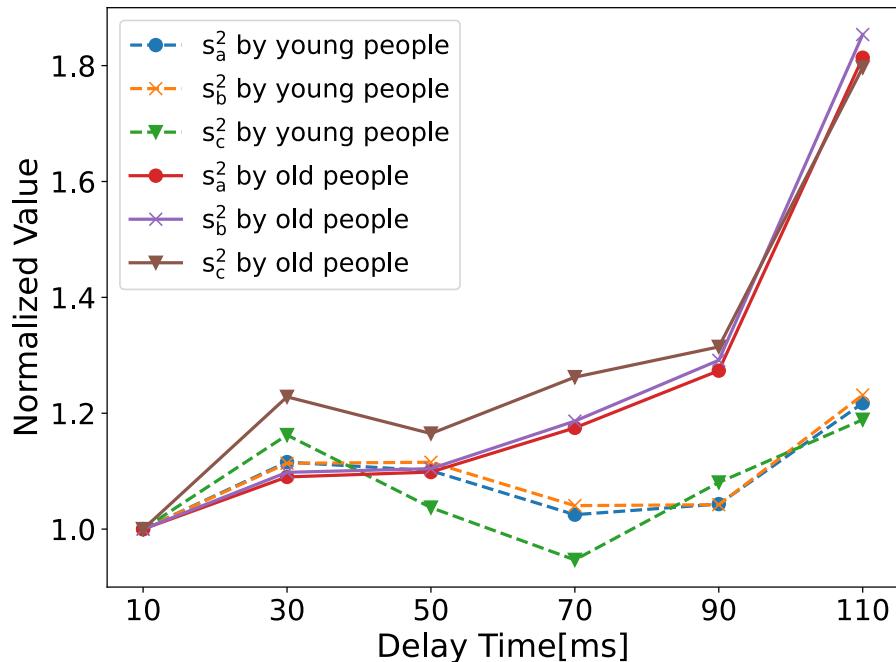


図 7.9 実験 A における若年者と高齢者の正規化後の評価値の比較

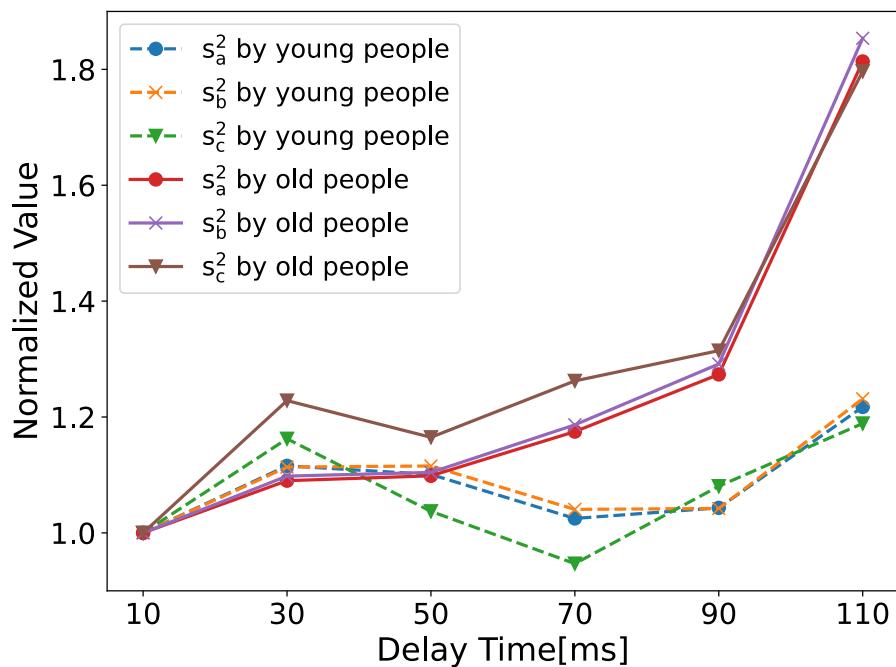


図 7.10 実験 B における若年者と高齢者の正規化後の評価値の比較

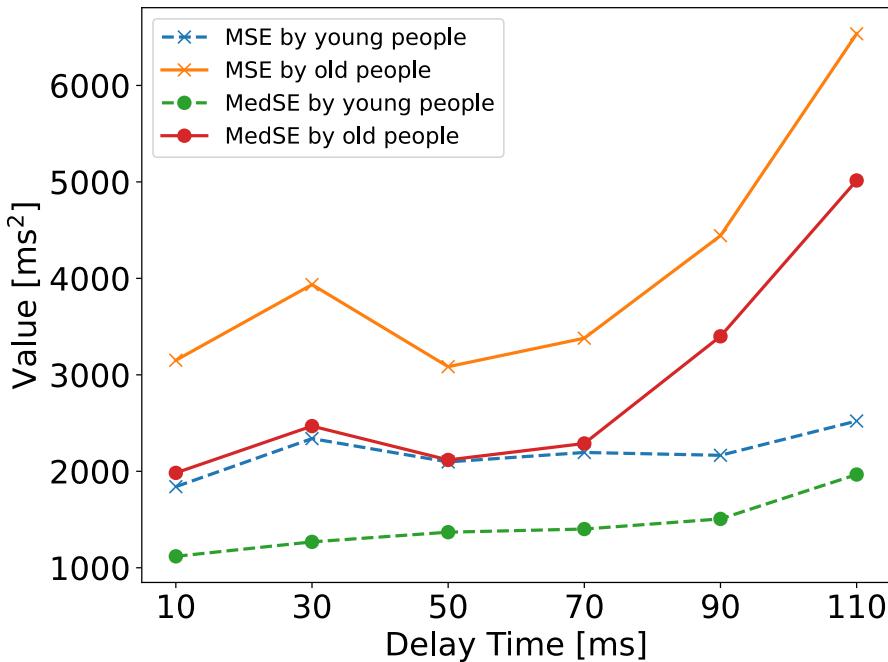


図 7.11 実験 A における若年者と高齢者の MSE と MedSE の比較

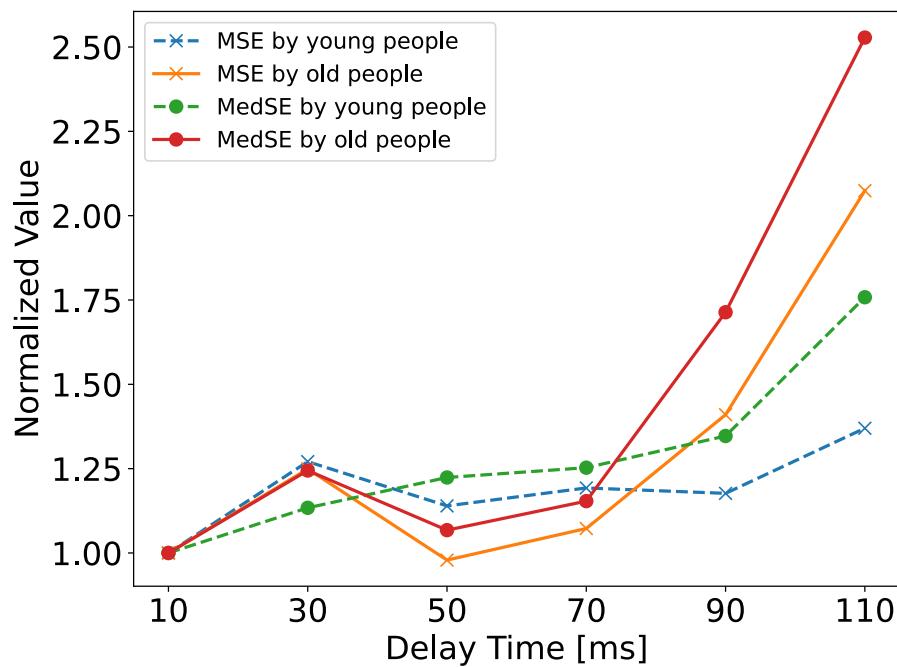


図 7.12 実験 A における若年者と高齢者の正規化後の MSE と MedSE の比較

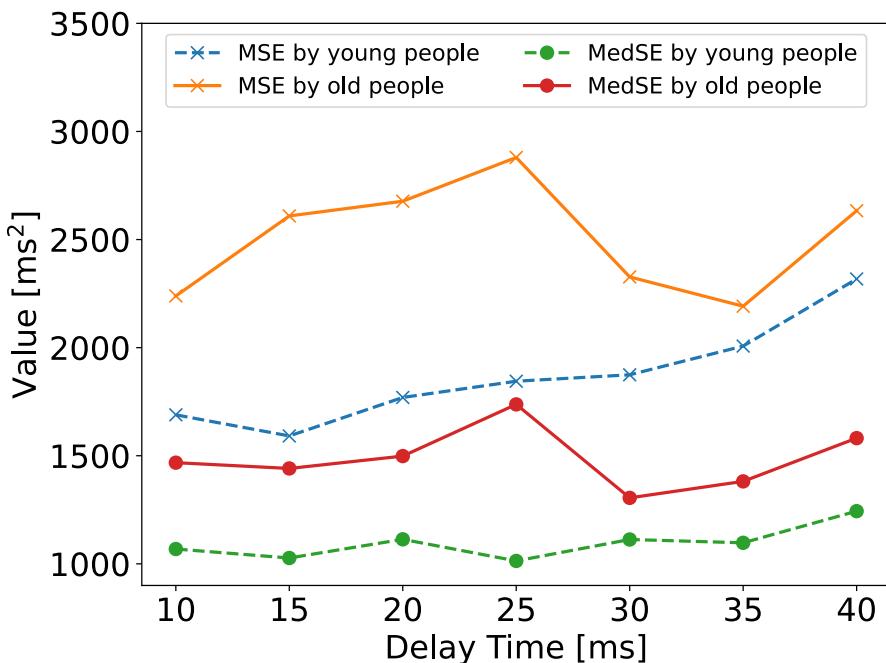


図 7.13 実験 B における若年者と高齢者の MSE と MedSE の比較

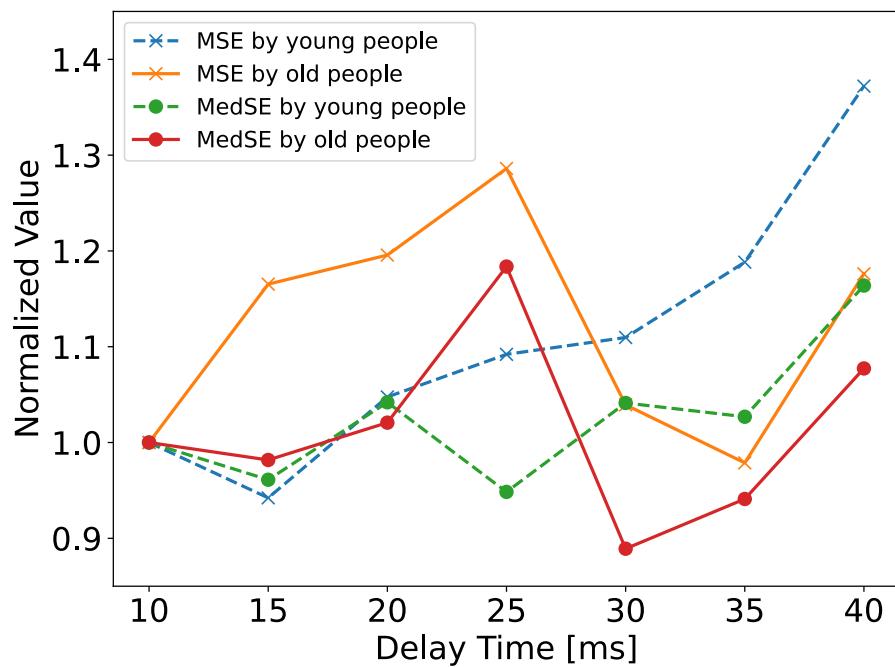


図 7.14 実験 B における若年者と高齢者の正規化後の MSE と MedSE の比較

第8章

結論

8.1 まとめ

本研究では、先行研究から継続して実施予定の遅延聴覚フィードバックが発話に及ぼす影響の調査に向け、アプリケーションを開発した。このアプリケーションは、被験者がアプリケーション上に直接評価結果を入力でき、その結果を外部ファイルに出力する機能を備えている。この開発したアプリケーションを用いることにより、実験の効率化および評価結果の分析が容易になることが期待される。

加えて、聴覚フィードバックによる違和感を客観的に評価するために、先行研究 [6] で開発されたシステムを改良し、また、ボタン押し課題を用いた客観的な評価方法を開発した。そして、これらを用いて遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査した。開発したボタン押し課題では、被験者は一定の時間間隔でボタンを押下し、ヘッドホンからの聴覚フィードバックの遅延がボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときのみ発生するように設定した。また、この方法において、遅延聴覚フィードバックの影響によるボタンの押下時間間隔のばらつきを観察しやすくなるよう、客観的な評価指標および調査条件を定めた。その結果、ボタン押し課題では、ボタンを押下する間隔を 1 分間に 80 回とし、客観的な評価指標としてボタン押下間隔の平均および中央値を真値とする分散、およびボタ

ンの押下回数が4の倍数に到達する直前の押下間隔と4の倍数に到達した直後の押下間隔の平均二乗誤差および中央値二乗誤差を用いることが適切であると判断した。

そして、聴力の正常な若年者と高齢者を対象に、本研究で開発したボタン押し課題を用いて遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響を調査した。その結果、10[ms]から40[ms]の短い遅延時間では、若年者の評価値は遅延時間の増加に伴って、緩やかに増加する傾向が見られたが、高齢者の評価値には一貫した関係が見出されなかった。これは、若年者が遅延に敏感である一方で、高齢者が遅延時間に対して一定の許容度を持っていることを示している。遅延時間が10[ms]から110[ms]におよぶ実験では、高齢者が遅延時間の増加に対して比較的鈍感であるものの、一定の遅延時間を超えるとタスクの一貫性を保つことが困難になることが明らかになった。これらの結果は、聴覚フィードバックの遅延に対する年齢別の感受性の違いを浮き彫りにし、高齢者向けの補聴器設計における重要な知見を提供するものであると考えられる。さらに、高齢者が若年者に比べてすべての遅延時間で高い評価値を示したという結果は、高齢者と若年者間の潜在的な運動能力の差異がこれらの反応に影響している可能性を示唆している。

8.2 今後の展望

今後は、高齢者と若年者の運動能力の差異を調整して遅延聴覚フィードバックの影響をより公平に評価するために、被験者の運動能力を考慮した課題を検討する必要がある。その一例として、運動能力の基本的な側面を評価するためのタスクを導入し、参加者の反応速度や運動の一貫性を測定することで、運動能力の基準値を設定し、遅延時間に対する反応の差異を適切に解釈することができるようになることが考えられる。さらに、課題の難易度を調整することで、運動能力以外の要因が遅延聴覚フィードバックの影響をどのように受けるかを評価し、運動能力以外の要素が影響を与えるかどうかを調査することが可能になるとと考えられる。また、遅延聴覚フィードバックが発話に及ぼす影響の客観的な評価方法の検討および本研究で得られたデータとの比較も必要である。これらのアプローチ

第8章 結論

を通じて、遅延聴覚フィードバックの影響をより深く理解し、それが補聴器の設計に繋がることが期待される。

参考文献

- [1] 細井裕司, “補聴器この 20 年間の進歩”, 日本耳鼻咽喉科科学会会報, 114 卷, 12 号, pp.905-911, Jan. 2015.
- [2] 神田幸彦, “補聴器の進歩と聴覚医学「補聴器の歴史と変遷-最新補聴器の紹介-」”, Audiology Japan, 60 卷, 2 号, pp. 121-128, Apr. 2017.
- [3] 西山崇経, 新田清一, 鈴木大介, 岡崎宏, 坂本耕二, 中村伸太郎, 上野恵, 小川郁, “補聴器装用者の満足度に関する要因の検討”, Audiology Japan, 57 卷, 3 号, pp.189-194, Jun. 2014.
- [4] 河原英紀, “聴覚フィードバックの発話への影響: ヒトは自分の話声を聞いているのか?”, 日本音響学会誌, 59 卷, 11 号, pp.670-675, Nov. 2003.
- [5] 研田猛真, 中村陽裕, 福本儀智, 長谷川賢作, 北野博也, “ディレイタイムの認知閾値”, Ausiology Japan, 46 卷, 5 号, pp.465-467, Sep. 2007.
- [6] 重松颯人, 丹治寛樹, 村上隆啓, 松本直樹, “遅延聴覚フィードバックが身体運動に与える影響の客観的な評価方法の検討”, 日本音響学会聴覚研究会資料, pp.499-504, Nov. 2019.
- [7] 香山実結花, 山下一樹, 丹治寛樹, 村上隆啓, “若年者と高齢者の聴覚フィードバックにおける遅延時間の許容量の統計的分析による比較”, 2022 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, pp.113, Mar. 2023.
- [8] 重松颯人, 村上隆啓, “高齢者の聴覚における遅延時間の許容量の評価”, 平成 29 年

参考文献

- 度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, pp.143, Mar. 2018.
- [9] 重松颯人, “補聴器を想定した音声における入出力の遅延時間の許容範囲についての検討”, 明治大学大学院理工学研究科知能信号処理研究室, 2019 年度修士学位請求論文.
- [10] Microsoft, “Win32 API のプログラミング リファレンス”, <https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/win32/api/>, 参照 2024 年 1 月 24 日.
- [11] P. Q. Pfördresher and C. Palmer, “Effects of delayed auditory feedback on timing of music performance”, Psychological Research, Vol. 16, pp.71-79, Jan. 2002.
- [12] 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎, “身体運動に伴う遅延聴覚フィードバックの知覚順応”, 日本認知科学会大会, pp.493-497, Dec. 2013.
- [13] 高橋浩貴, 村上隆啓, “補聴器における遅延時間の許容量の評価”, 平成 26 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, p168, Sep. 2015.

発表論文

[P1] 山下一樹, 安田和生, 丹治寛樹, 村上隆啓, “若年者と高齢者の遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響の比較”, 2023 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, Mar. 2024.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導、ご助言を頂きました明治大学理工学部電気電子生命学科所属の村上隆啓専任講師に心から感謝いたします。また、日頃の研究活動に多大なご助言を頂きました、明治大学理工学部電気電子生命学科所属の丹治寛樹助教に心から感謝いたします。遅延時間の許容量の調査における被験者募集にご協力いただいた情報科学科の井口幸洋教授、井口道子様、宮口祥子様、福島様および明大サポートの山本浩志様にも感謝の意を表します。また、本研究にご協力いただいた多くの被験者の方々に厚く御礼申し上げます。共同研究者として多くのご協力を頂いた知能信号処理研究室所属の安田和生氏と研究に関しまして多数のご助言をくださいました知能信号処理研究室の同期と後輩の皆様に心から感謝いたします。

2024年2月9日
明治大学大学院 理工学研究科
電気工学専攻 博士前期課程
知能信号処理研究室
山下 一樹