

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

2023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

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	4
1.1	背景 . . . . .	4
1.2	目的 . . . . .	5
<b>第 2 章</b>	<b>先行研究</b>	7
2.1	遅延聴覚フィードバックが発話に及ぼす影響の調査 . . . . .	7
2.2	遅延聴覚フィードバックが身体運動に及ぼす影響の調査 . . . . .	8
<b>第 3 章</b>	<b>主観評価におけるアプリケーション開発</b>	9
3.1	アプリケーションの概要 . . . . .	9
3.1.1	タッチパネルによるユーザー情報の取得 . . . . .	11
3.1.2	画面のキャプチャ . . . . .	12
3.1.3	回答の入力と出力 . . . . .	13
<b>第 4 章</b>	<b>ボタン押し課題のシステム</b>	15
4.1	ボタン押し課題 . . . . .	15
4.2	音響信号への遅延生成アプリケーション . . . . .	18
4.2.1	ASIO における音声の入出力 . . . . .	19
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 . . . . .	21

## 目次

---

4.2.3 ボタンの押下時間間隔を記録する機能 . . . . .	22
4.3 生成する遅延時間の正確性の調査 . . . . .	23
4.3.1 遅延時間の測定方法 . . . . .	23
4.3.2 測定結果 . . . . .	25
<b>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</b>	<b>27</b>
5.1 分散 . . . . .	28
5.2 二乗誤差 . . . . .	29
<b>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</b>	<b>31</b>
6.1 ボタンを押下する間隔の最適な条件 . . . . .	32
6.2 ボタンを押下する回数の最適な条件 . . . . .	33
6.3 遅延を発生させる最適なタイミング . . . . .	34
6.3.1 調査方法 . . . . .	35
6.3.2 調査条件及び調査対象 . . . . .	35
6.3.3 調査結果 . . . . .	37
<b>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</b>	<b>40</b>
7.1 調査方法 . . . . .	40
7.2 調査条件及び調査対象 . . . . .	42
7.3 調査結果 . . . . .	43
7.3.1 観測値の分布 . . . . .	43
7.3.2 遅延時間と評価指標の関係 . . . . .	47
<b>第 8 章 結論</b>	<b>51</b>
8.1 まとめ . . . . .	51
8.2 今後の展望 . . . . .	52

## 目次

---

参考文献	53
発表論文	55
謝辞	56
付録 A 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資料	57
付録 B 主観調査におけるアプリケーションのソースコード	66

# 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]。具体的には、音声の増幅率を音圧レベルに応じて調整するノンリニア増幅機能や、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 [2]。不満の一因として、ノンリニア増幅が不要な音まで増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、ディジタル信号処理に用いる音声信号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[3]。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る違和感であり、ディ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。ディ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。しかし、この設計制約がディジタル補聴器の性能向上における課題となっている。ディ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、ディ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] を超えても発話に違和感を覚えにくくすることが示唆されている。この知見を活用すれば、ディ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、より高度なディ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。先行研究[5]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。ここでは、身体運動への

## 第1章 序論

---

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、メトロノームの電子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。

## 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及ぼす影響の調査

文献 [4] では、主観評価による遅延聴覚フィードバックの影響の調査が行われた。主観調査とは、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(以下、音響測定装置と呼ぶ)を装着した被験者が、発話したときの違和感を主観評価するという内容の調査である。先行研究 [4] では、聞こえの調査によって若年者と高齢者の間で遅延時間の許容量に差があるという結果が得られたが、両者で提示した遅延時間に違いがあり、その差が統計的に有意と言えるかについて分析することができなかった。そこで、文献 [香山さんの論文] 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じもので若年者に対して主観評価実験を実施した。聞こえの調査で得られた高齢者と若年者の結果についてコルモゴロフ・スミノルフ検定を用いた検定では、若年者と高齢者での遅延の感じやすさに有意な差が存在することが示唆されており、若年者は高齢者と比較してその影響を敏感に受けやすいという結果が得られた。

## 2.2 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

重松氏らによる研究 [5] では、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によるボタン押し課題（4 章を参照）を用いた遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響の調査が行われた。この課題では、指定された遅延時間（2.1 節参照）を用いて若年者 8 名に対する実験が行われた。結果として、遅延時間に応じた被験者ごとの反応には差異が見られ、一部の被験者では遅延時間の増加に伴うボタン押下間隔の変動が少ないことが確認された。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の音を認識していない可能性があることが示唆されている。したがって、全被験者がヘッドホンからの音を聴覚フィードバックとして認識するようテンポ提示方法を改良することが求められる。本研究では、このボタン押下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できるようにすることを目的とする。

## 第 3 章

# 主観評価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で利用する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入力させ、その後 PC 上にデータを移行して結果を保存していた。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を作成することで、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 csv 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 [6] に基づいて開発した。

### 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++ で開発する。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

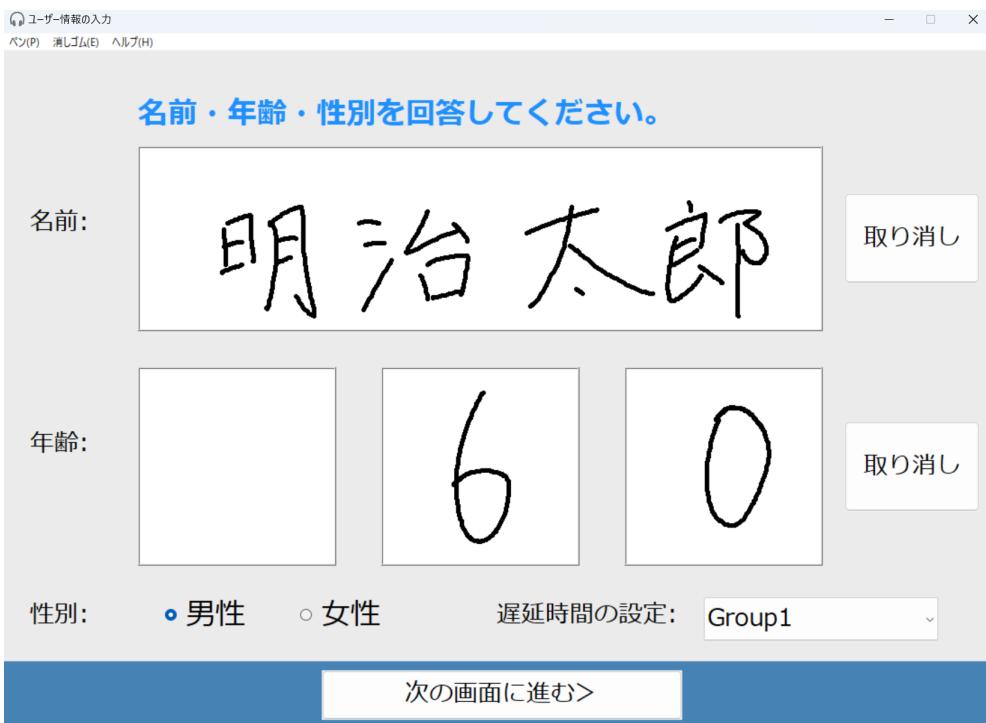


図 3.1: 最初の画面

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 節参照)
- (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 節参照)
- (3) 読む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 節参照)

### 第3章 主観評価におけるアプリケーション開発

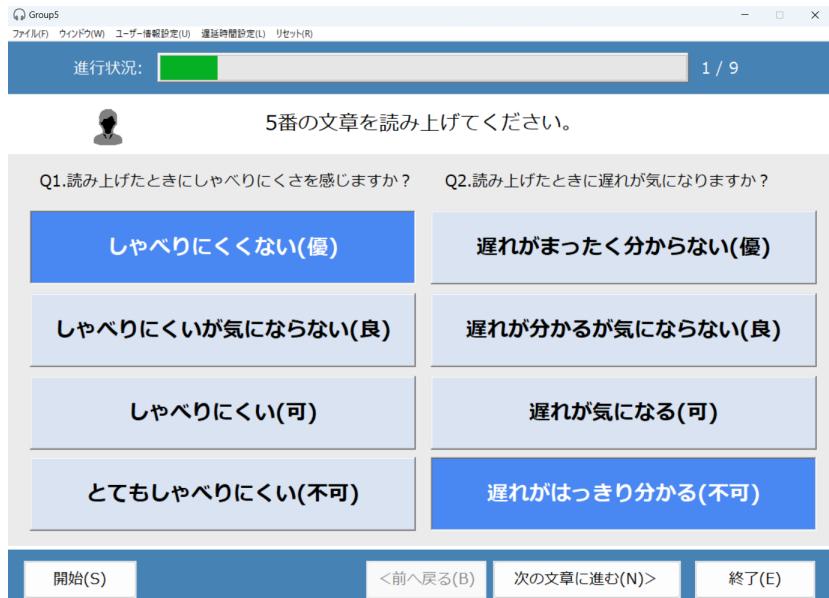


図 3.2: 2つ目の画面

主観評価で被験者に読んでもらう文章の番号は、文献 [4] 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 タッチパネルによる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。「WM\_TOUCH」イベントは、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イベントを処理して、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。このイベントを取り扱うためにまず、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イベントを受けとることができるようにする。その後、ウィンドウプロジェクトで「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」

イベント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、各タッチイベントの情報を取得する。
- (3) 取得したタッチイベントの情報を元に、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とする。
- (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　画面のキャプチャ

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、ウィンドウの画像を「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、JPEG 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 として保存される。 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が作成される。
- (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 回答の入力と出力

2.1.1 節において記述した主観調査では、「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 つの質問が画面上に提示される。 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ボタンを通じて回答する。 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できる。 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

### 第3章 主観評価におけるアプリケーション開発

---

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、背景のクリア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のハイパーリンク付き画像ファイルパス、遅延時間のグループ名、読まれた文章の番号、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、及びこの調査を行うために構築した調査システム及び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。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、ボタンを押下するときの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

## 第4章 ボタン押し課題のシステム

---

ボタン押下の時間間隔が毎分 60 回であれば、理想的に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。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、このばらつきを提示するボタンを押下する音の遅延時間によって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る状態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言える。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と、メトロノームで構成されている。音響信号への遅延生成アプリケーションは、3 章で用いられてい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、コントローラーを持つ。コントローラーの 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に「ピッ」という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 WAV ファイルがオーディオインターフェイスを介して、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。

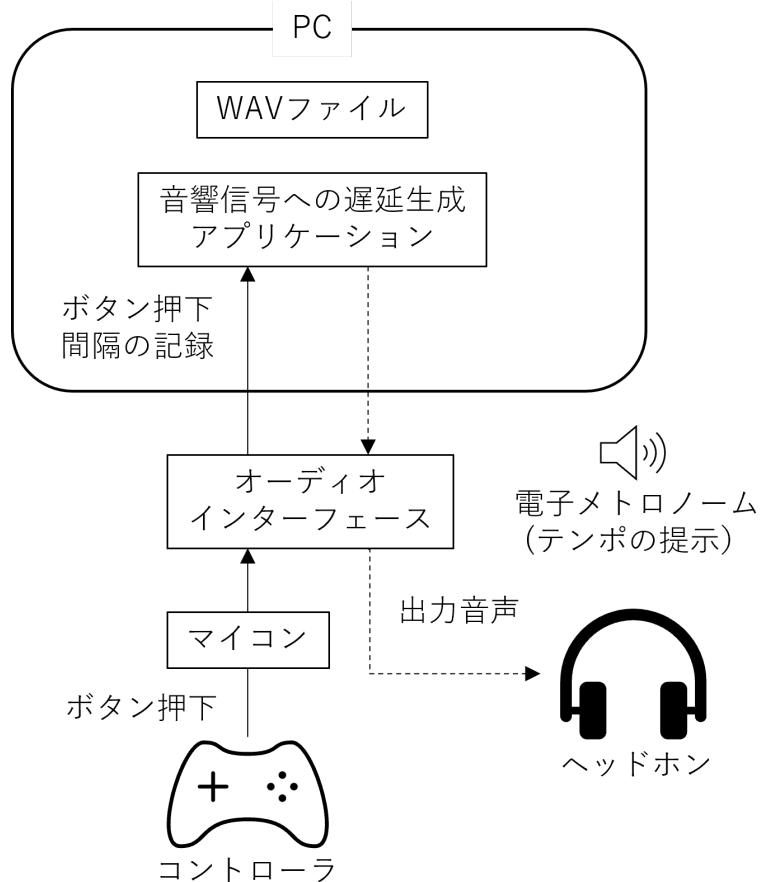


図 4.1: 調査システムの構成

このとき、大きな遅延時間を持つ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 [8]. 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及び、5 章で説明する評価指標を用いて評価を行う.

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イス	Focusrite	Scalett-Solo 3rd Generation
コントローラー	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.	5
電気回路	自作	

## 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++ で開発する。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、アプリケーションのスタート直後の状態である。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「ファイルへの出力」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 B に掲載する。以下に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
- (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
- (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) 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

## 第4章 ボタン押し課題のシステム

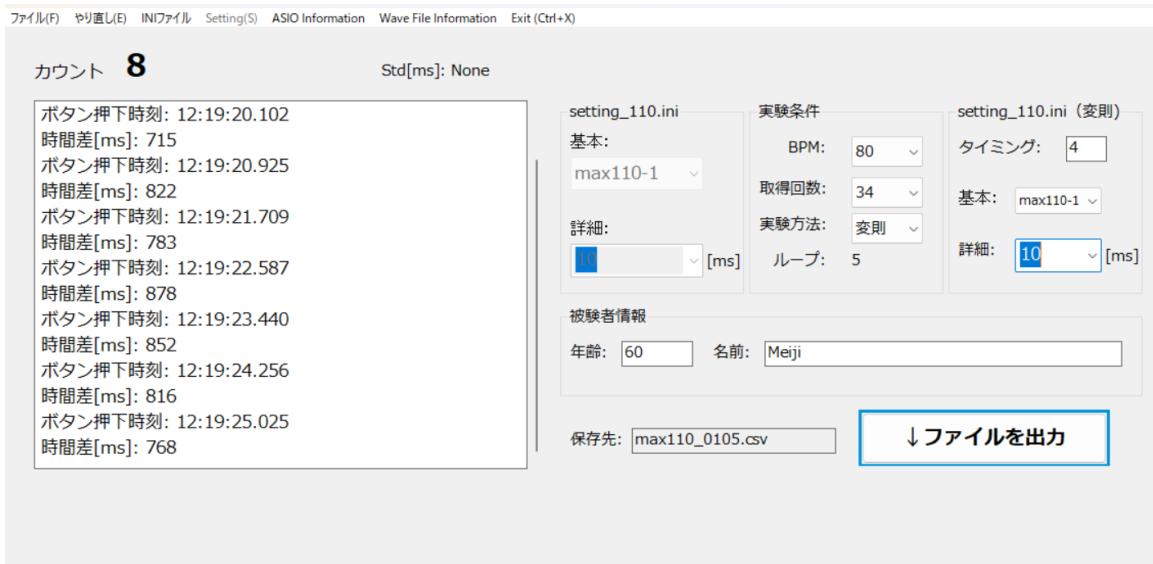


図 4.2: 実験開始直後の音響信号への遅延生成アプリケーションの画面

### csv 形式で書き込む機能

(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。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クリックのみで実施可能である。

### 4.2.1 ASIO における音声の入出力

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 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

## 第4章 ボタン押し課題のシステム

---

で、バッファの切り替えはオーディオインターフェイスによって行われるため、OSの影響を受けないという利点がある [9]。音声の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に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仕組みを以下に示す。

- (1) はじめに入力バッファ1に入力信号が格納され、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が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。
- (4) 手順2に戻る。

以上を繰り返すことにより、音声の入出力を可能としている。しかし、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する。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イ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イスに固有の入力遅延を  $i[\text{ms}]$ 、ASIO におけるインターフェイ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、遅延時間の生成は以下のよう手順で実現される。

- (1) 初めに式 4.1 に基づき、wav データのコピー時刻  $T$  を定義する。この時刻  $T$  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 wav データをコピーするかを示す指標である。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。

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

- (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 wav データを出力バッファにコピー

していく。

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。

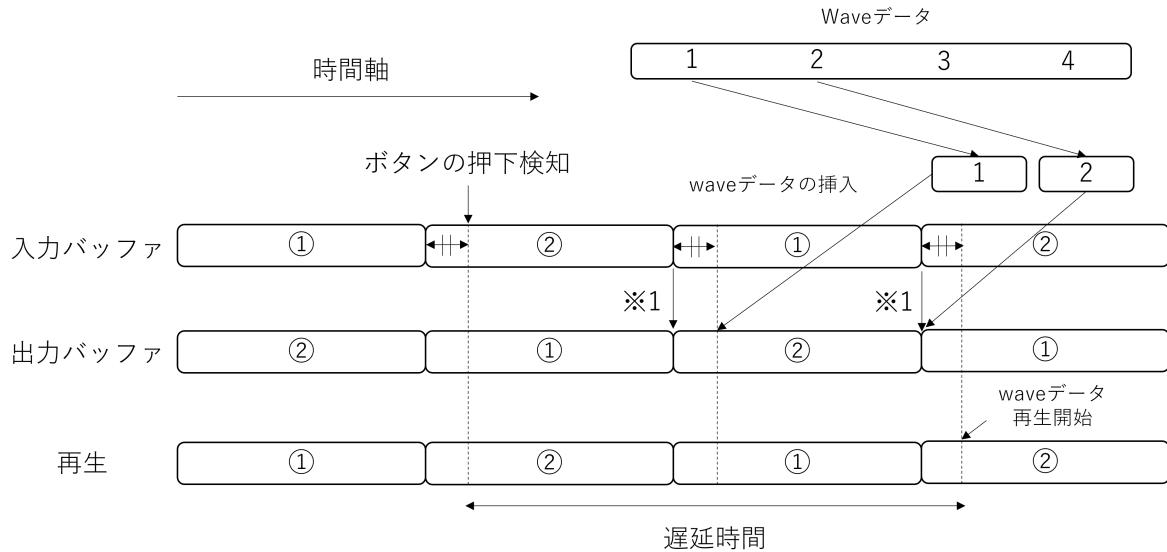


図 4.3: 遅延時間の生成原理

#### 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に設定する。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 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（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、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 3 で変換した変数 C を隨時、動的な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。

### 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

アプリケーションで生成した遅延時間が正確かどうか確かめるために、遅延時間の測定を行った。図 4.4 に遅延時間の測定の接続図を示す。測定手順は以下の通りである。

- (1) 図 4.4 のような測定システムを用意する。
- (2) 図 4.5 のようなコントローラーに付いた小型マイクロホンから拾った音をオーディオインターフェイス 1 のチャンネル 1 に入力する。
- (3) コントローラーのボタン押下によって音響信号への遅延生成アプリケーションを介して出力される音声をオーディオインターフェイス 1 のチャンネル 2 に入力する。
- (4) 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平均と標準偏差を求める。チャンネル 1 において、平均 +2 × 標準偏差を超えた点を求め、チャンネル 1 に入力された信号（マイクロホンから取得した音響信号）の開始点とする。

## 第4章 ボタン押し課題のシステム

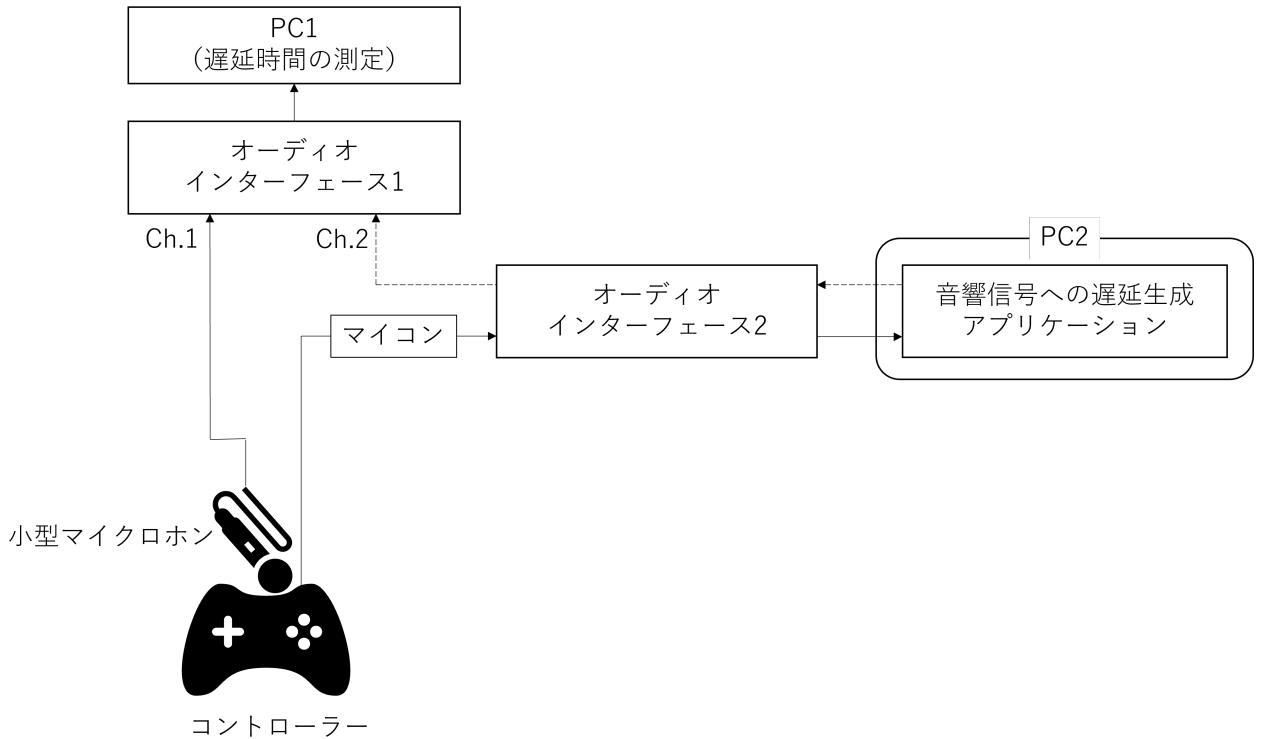


図 4.4: 遅延時間の測定の接続図

- (5) チャンネル 2において、平均  $+2 \times$  標準偏差を超えた点を求め、チャンネル 2に入力された信号(アプリケーションによって発生させた音響信号)の開始点とする。
- (6) それぞれの開始点の差を計算し、遅延時間 [ms] を計算する。

システムの動作確認は、次の方法で実施した。アプリケーションの遅延時間設定値を 10[ms] に設定し、生成される遅延時間を計測した。このプロセスでは、PC 上で他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を検証するため、遅延時間生成用 PC の全 CPU コアを利用して重い計算を実行し、CPU 使用率を 100 % に保ち、この状態と通常の CPU 負荷がない状態の両方で遅延時間を測定した。CPU 使用率を 100 % にするプログラムと遅延時間測定プログラムは、付録に掲載している。この測定は合計 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。使用した機器の詳細は表 4.2 に示す。



図 4.5: 小型マイクロホンを装着しているコントローラー

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イス 1	Roland	Duo-Capture EX
オーディオインターフェイス 2	Focusrite	Scarlett-solo 3rd Generation
遅延時間生成用の PC	HP	HP ProBook 450 G7
遅延時間測定用の PC	HP	pavilion
マイクロホン	DPA Microphones	IMK-SC4060

### 4.3.2 測定結果

設定するバッファサイズをオーディオインターフェイスで設定可能な最小のバッファサイズである 16 とし、遅延時間を 10-40[ms] の範囲では 5[ms] ずつ、50-150[ms] の範囲では 20[ms] ずつ変化させ、それぞれの場合において生成された遅延時間を 4.3.1 項で説明した方法で測定した。表 4.3 に測定結果を示す。表 4.3 より CPU 利用率が平常時の場合は、理論値の誤差と実測値の差は、少ないため正常に動作することが確認された。

表4.3: 測定結果

CPU 利用率	オーディオ入出力の バッファサイズ	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	16	0.129	1.23

## 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を述べる。4章で説明した方法で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、人がボタンを押下すると理想的なボタン押下の時間間隔にばらつきが生じると考えられる。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入れば、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よって変化するものであると考えられる。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で、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、分散と二乗誤差を用いる。これらの評価指標は、ばらつきが大きくなるほど値が大きくなるため、評価指標の計算結果の大小でばらつきの大きさを観察することが可能になると考えられる。そして、これらの評価指標を算出するとき、評価指標の値の時間変化や評価に使用するデータの個数によって値が変化を比較することを想定して、これらをパラメータとして用いる。

## 5.1 分散

まず、ボタンを押下する時間間隔の不偏分散  $s_1^2$  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。 $s_1^2$  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  $n$  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。 $s_1^2$  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。したがって、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  $s_2^2$  は、以下の式により示される。

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

を用いてここで、 $M_{kl}$  は、 $k$  番目のデータから  $n$  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  $s_3^2$  は、以下の式により示される。

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

## 5.2 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評価について検討する。遅延が  $t$  の倍数に到達した際のみ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間隔と直後のボタン押下間隔のデータの差の二乗平均 (MSE) が、遅延聴覚フィードバックがボタン押下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示す。

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  $t$  の倍数に達する直前のボタン押下間隔、 $d_{t+ti}$  は  $t$  の倍数に達した直後のボタン押下間隔のデータを示す  $MSE$ 、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となると考えられる。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(これ以降  $MedSE$  と呼ぶことにする)での評価を検討する。この計算法により、誤差の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。

$$MedSE = Med((d_3 - d_4)^2, (d_7 - d_8)^2, \dots, (d_{t-1+ts(n)} - d_{t+ts(n)})^2) \quad (5.7)$$

この式では、 $Med()$  は中央値を計算する関数であり、括弧内の各項は  $t$  の倍数に到達する直前後のボタン押下間隔の差の二乗を示す。このように、 $MedSE$  を用いることで、データの極端なばらつきによる影響を抑えつつ、遅延聴覚フィードバックの効果をより適切に評価することが期待される。

## 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する。

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] に設定する。

## 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標準偏差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。

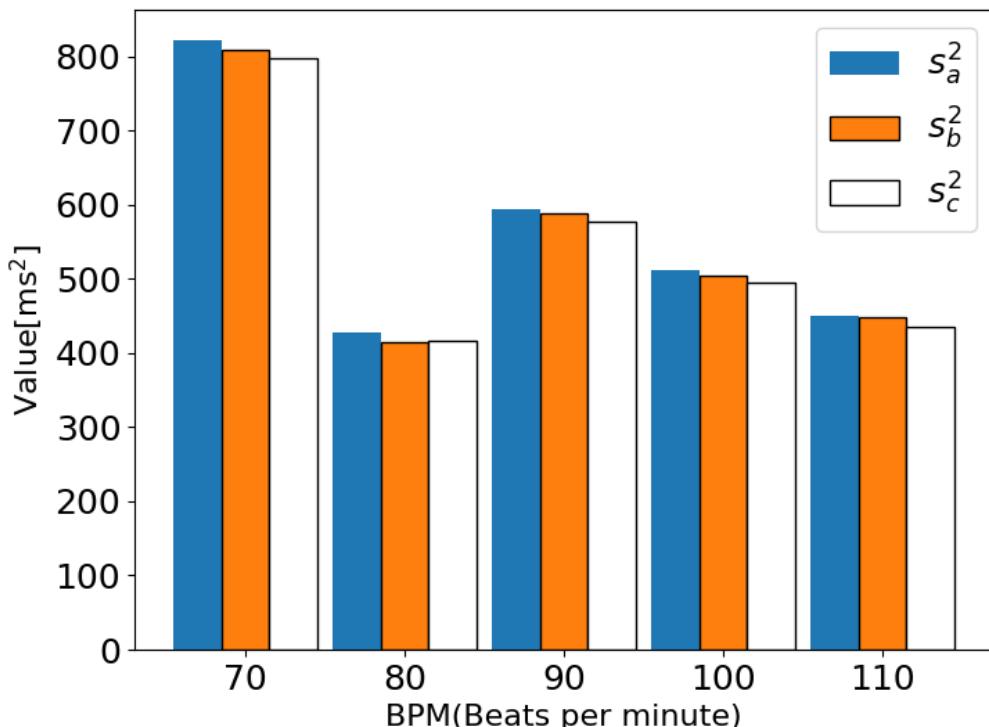


図6.1: ボタンを押下する間隔と評価指標の関係

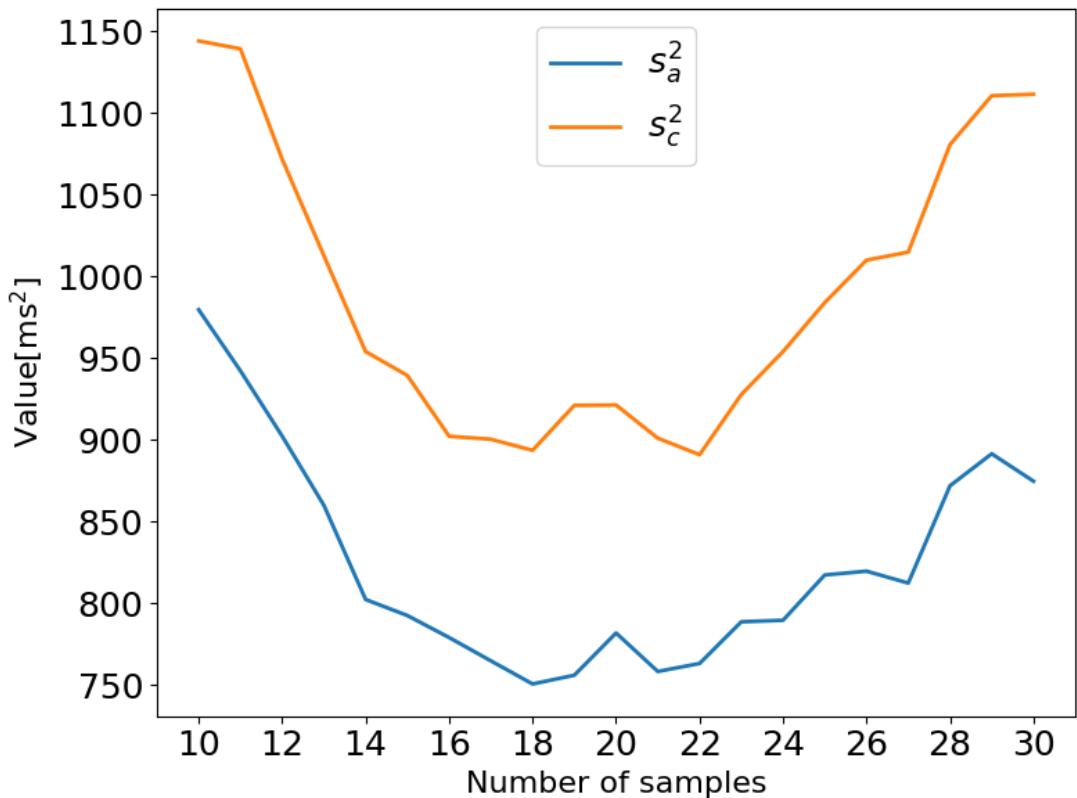


図 6.2: 使用するボタンの押下時間間隔のデータ個数と評価指標の関係

## 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[ms]、 $k$  を 9 に固定する。図 6.21 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、被験者数で平均している。図 6.3 では同様に  $s_b^2$  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 を超えると、値がデータの個数の増加に伴い、大きくなっていくことがわかる。そのため、実験条件によって発生するばらつきを最小限に抑えるためには分析するデータの個数を 20 個以下とすればよいと考えられる。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 個とする。

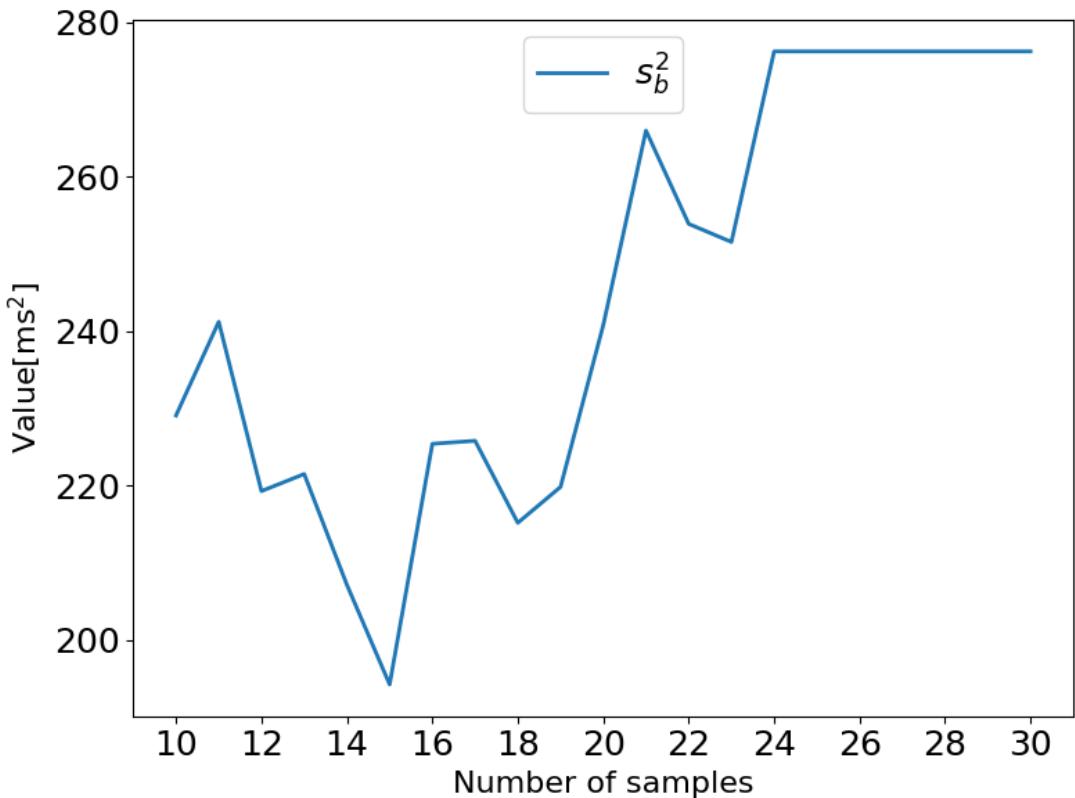


図 6.3: 使用するボタンの押下時間間隔のデータ個数と評価指標の関係

### 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 A 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 B では、ボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときだけ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。

実験 (A) 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 (B) 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 A と実験 B ともに調査の方法は同様である。

- (1) 被験者に図 4.1 のシステムを用意する。
- (2) 4 章の 4.1 節の手順 1 から手順 2 まで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、6.2 節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 調査条件及び調査対象

先行研究 [4] 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。文献 [7] 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

表 6.1: 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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	3	22.0 ± 0.84
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	5	22.5 ± 0.68
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	4	23.0 ± 0.72
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	4	22.5 ± 0.88
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	5	21.8 ± 0.41

表 6.2: 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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	4	22.5 ± 0.88
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	3	22.0 ± 0.0
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	3	23.7 ± 1.3
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	3	21.7 ± 0.49
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	3	22.7 ± 1.8

が示されている。これを踏まえ、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。10[ms] の条件については、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結果を用いる。表 6.1 に実験 A における遅延時間の提示順序、被験者数、被験者の年齢の平均及び標準偏差を示し、表 6.2 に実験 B の同様の情報を示す。調査結果は、提示する遅延時間ごとに 5.1 節の  $s_a^2$ ,  $s_b^2$  及び  $s_c^2$  を算出する。

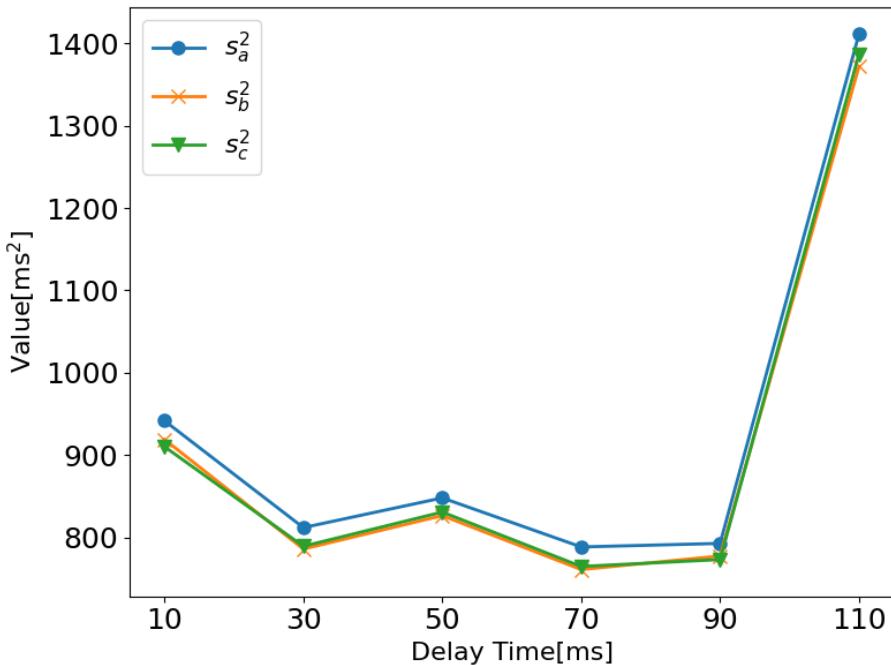


図 6.4: 遅延時間と評価指標の関係

### 6.3.3 調査結果

図 6.4 における実験 A 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と、図 6.5 における提示順 1 による同様の影響調査結果を提示する。図 6.4 に示される結果から、10[ms] から 70[ms] の間で評価指標が減少傾向を示し、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。30[ms] から 90[ms] の間で評価指標が減少した原因としては、被験者の馴化が挙げられる。合図音の遅延が一貫しているシステム設計においては、ボタン押し課題の繰り返しにより、被験者は課題に慣れ、大きな遅延にも順応してしまうことが示唆される。対照的に、図 6.5 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見られる。これは、4 回に 1 回の遅延が身体運動に与える影響を示唆する結果である。したがって、本研究では「ボタン押下時の合図音の遅延が一定であれば、被験者は遅延に馴染み、ボタン押下時間間隔に

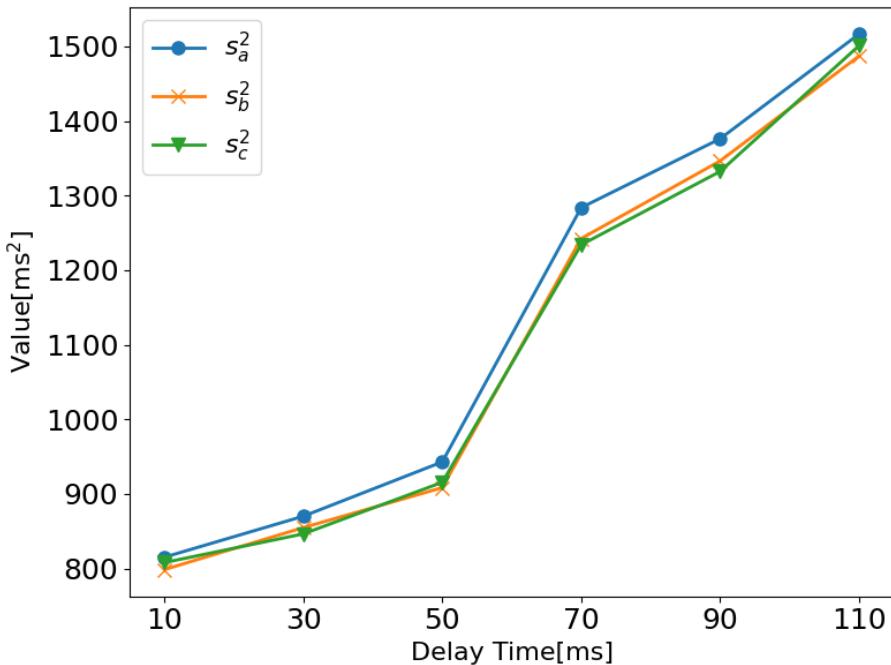


図 6.5: 遅延時間と評価指標の関係

及ぼす影響が減少する」という仮説を支持し、次回以降の実験では、実験 B の条件下での調査を実施することとする。

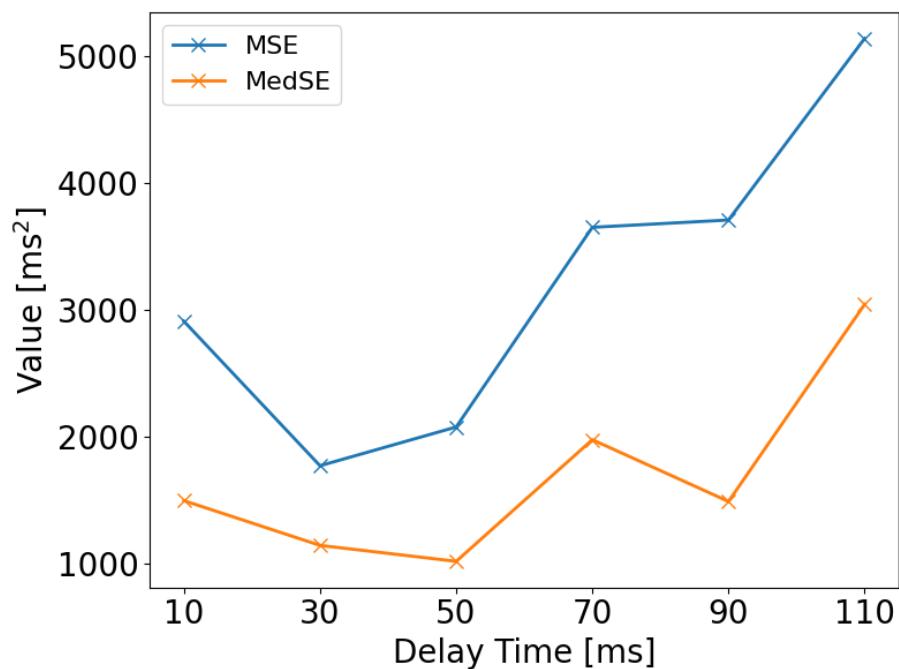


図 6.6: 遅延時間と MSE および MedSE の関係

## 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若年者及び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、4 の倍数に達したときに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、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及び中央値が遅延時間の増加に比例して増大すること、及び 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及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。

- (1) 被験者に図 4.1 のシステムを用意する。

## 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

---

- (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音声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である。

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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	8	22.1 ± 0.78
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	8	22.4 ± 0.99
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	8	22.3 ± 1.09
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	7	22.7 ± 0.88
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	7	23.1 ± 0.64

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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 25, 35, 30, 40, 20, 10, 15	7	22.6 ± 1.29
提示順 2	10, 15, 40, 10, 35, 25, 30, 20	7	22.9 ± 1.25
提示順 3	10, 30, 25, 10, 40, 20, 35, 15	7	23.6 ± 1.18
提示順 4	10, 30, 20, 10, 15, 35, 25, 40	7	22.1 ± 1.36
提示順 5	10, 40, 10, 25, 30, 20, 15, 35	6	23.5 ± 0.76

## 7.2 調査条件及び調査対象

遅延時間の提示の順番は、最初に 10[ms] を提示する。次に 10[ms] 以外の中からランダムに提示する。このとき、提示する遅延時間の種類は、10[ms], 30[ms], 50[ms], 70[ms], 90[ms], 110[ms] の 6 種類と 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 の 4 種類の計 10 種類とする。

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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	8	63.5 ± 3.94
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	8	70.1 ± 4.96
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	8	68.4 ± 4.50
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	9	70.2 ± 6.48
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	8	75.5 ± 4.72

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 ± 標準偏差]
提示順 1	10, 30, 110, 10, 70, 90, 50	4	22.5 ± 0.88
提示順 2	10, 70, 30, 110, 50, 90, 10	3	22.0 ± 0.0
提示順 3	10, 110, 90, 50, 10, 30, 70	3	23.7 ± 1.3
提示順 4	10, 50, 90, 10, 30, 70, 110	3	21.7 ± 0.49
提示順 5	10, 30, 10, 50, 110, 70, 90	3	22.7 ± 1.8

## 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) (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, 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, 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, 外れ値の影響を排除し, 適切な評価を行うためのデータを用いることができる.

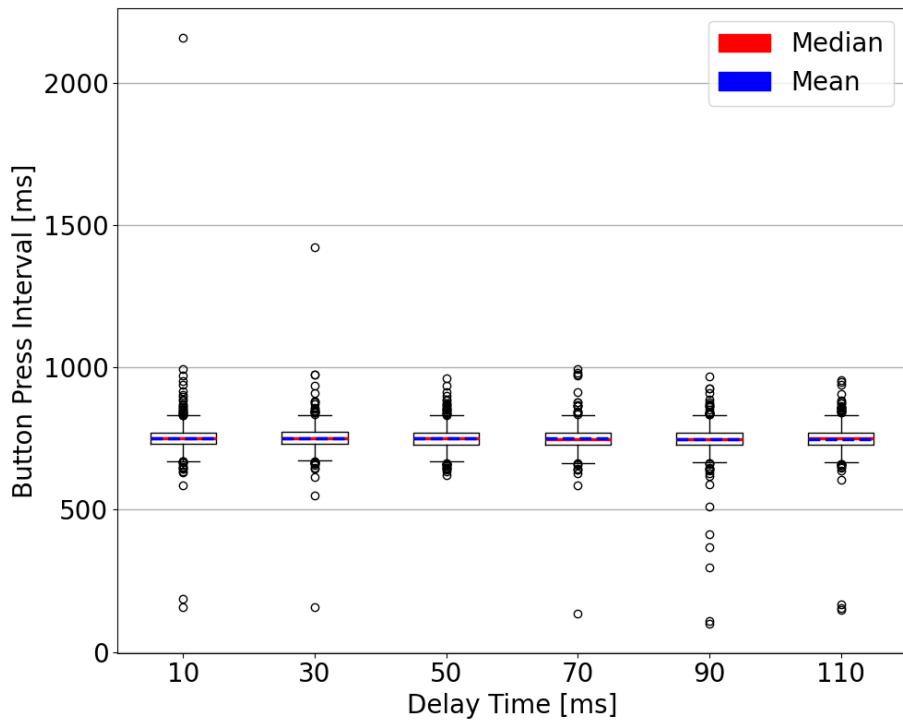


図 7.1: 実験 A における遅延時間ごとの若年者のデータの分布

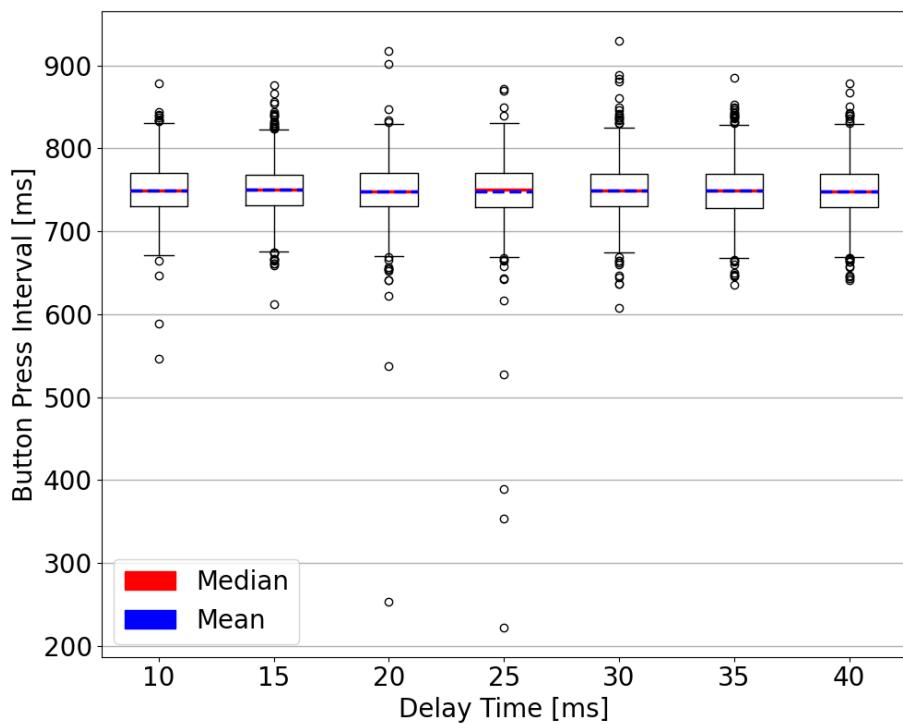


図 7.2: 実験 B における遅延時間ごとの若年者のデータの分布

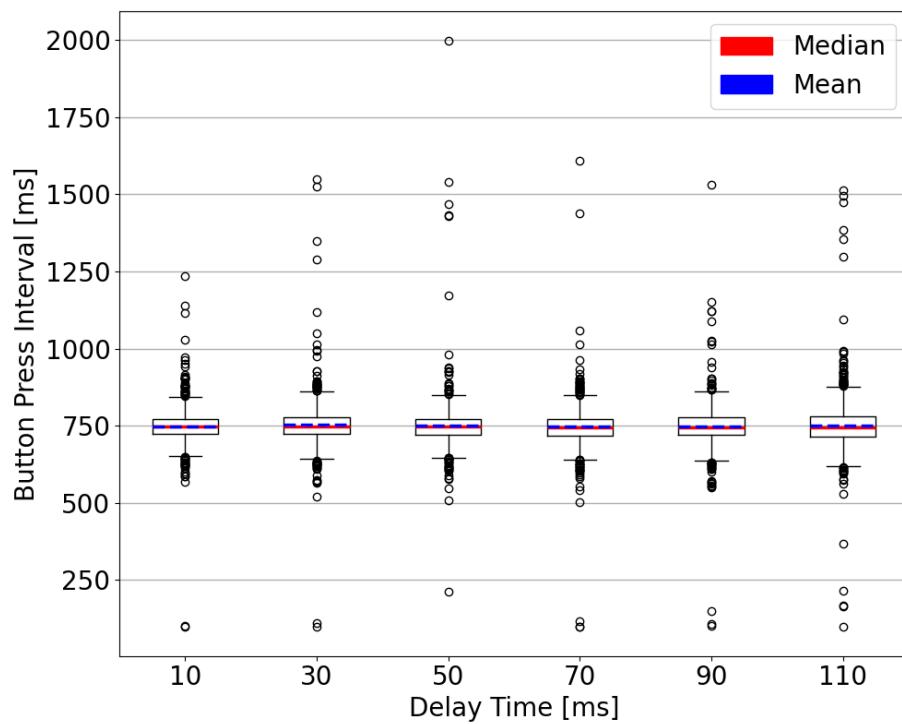


図 7.3: 実験 A における遅延時間ごとの高齢者のデータの分布

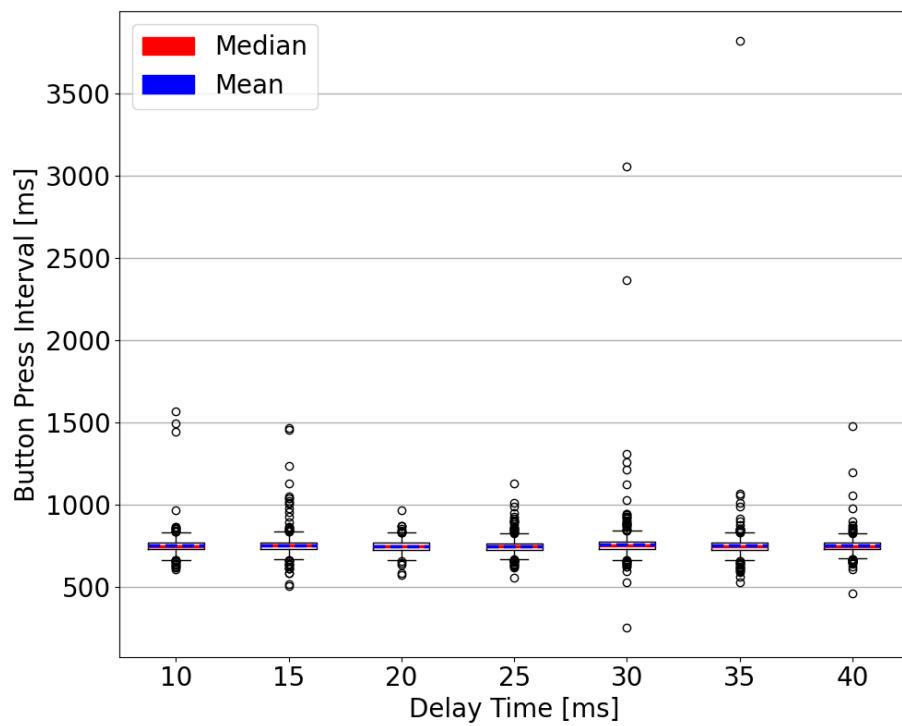


図 7.4: 実験 B における遅延時間ごとの高齢者のデータの分布

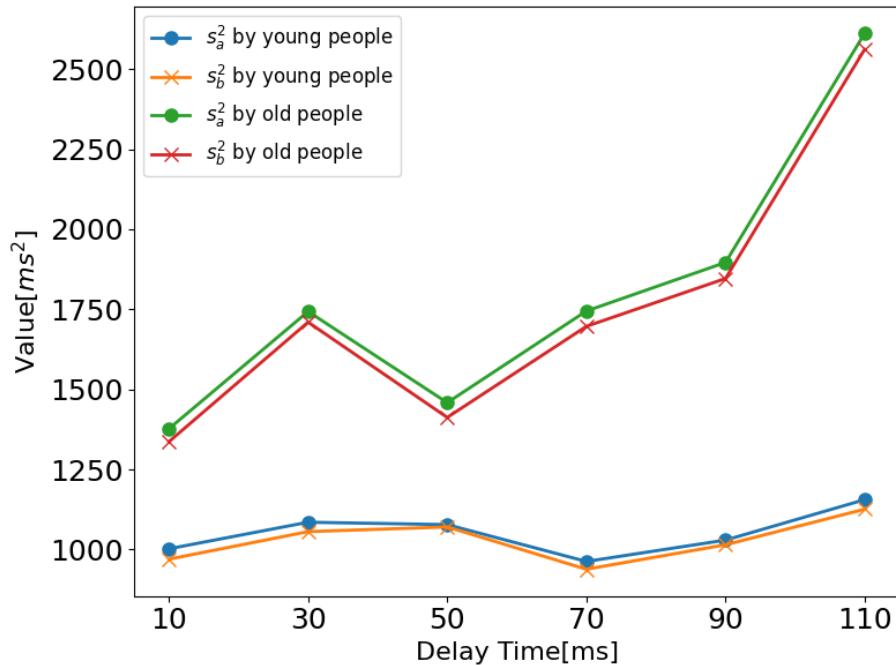


図 7.5: 実験 A における若年者と高齢者の評価値の遅延時間変動の比較

### 7.3.2 遅延時間と評価指標の関係

図 7.5, 図 7.6, 図 7.7, 図 7.8 に, 遅延時間ごとの若年者と高齢者の MSE と MedSE の比較を示す.

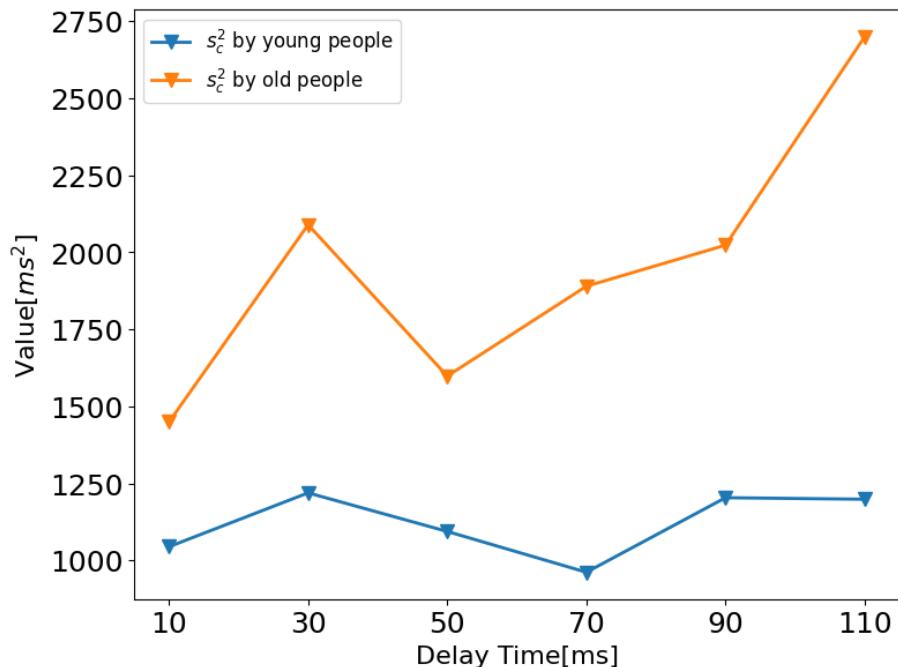


図 7.6: 実験 A における若年者と高齢者の評価値の遅延時間変動の比較

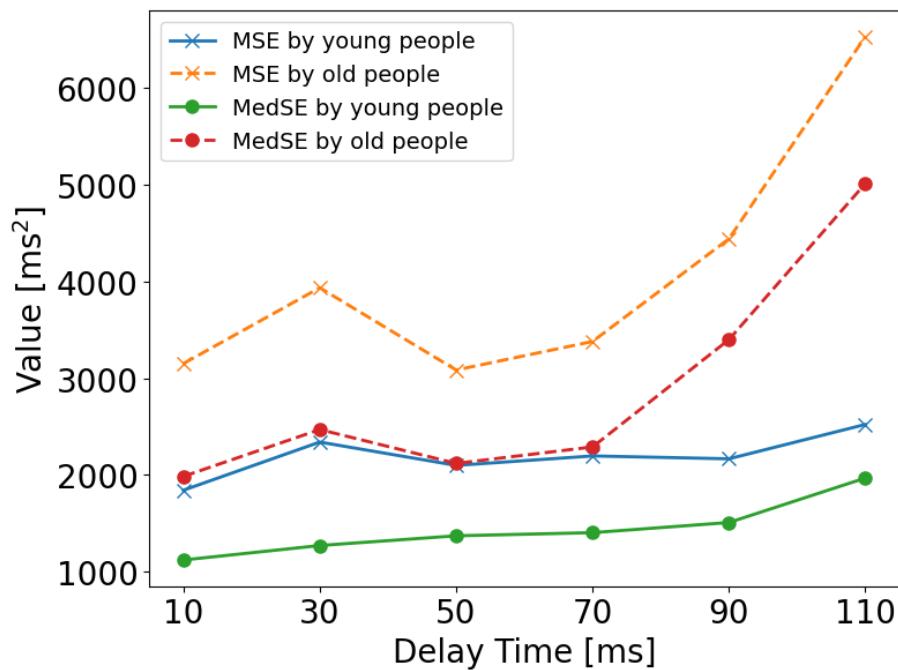


図 7.7: 実験 A における遅延時間ごとの若年者と高齢者の MSE と MedSE の比較

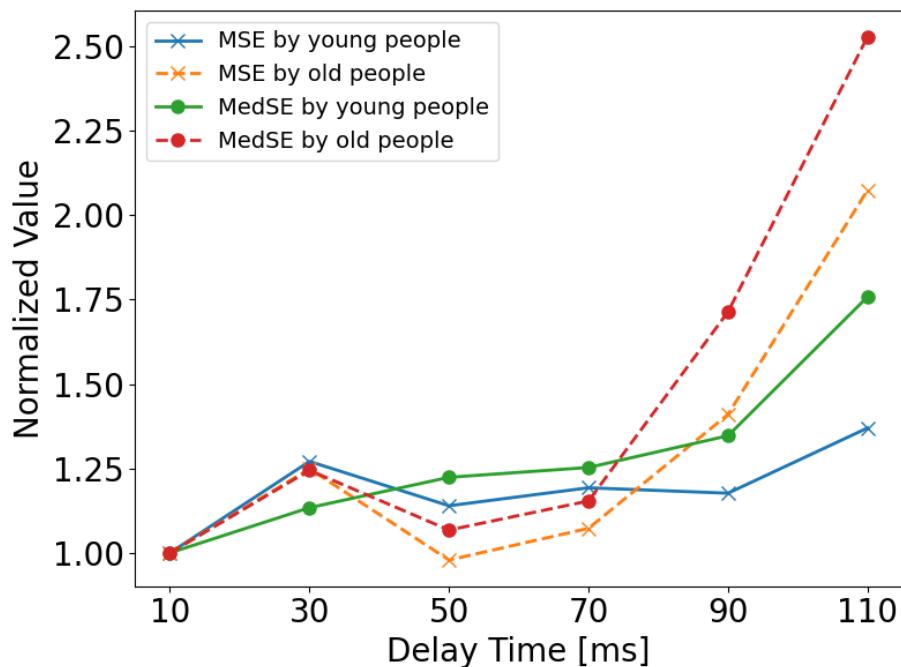


図 7.8: 実験 A における遅延時間ごとの若年者と高齢者の正規化した MSE と MedSE の比較

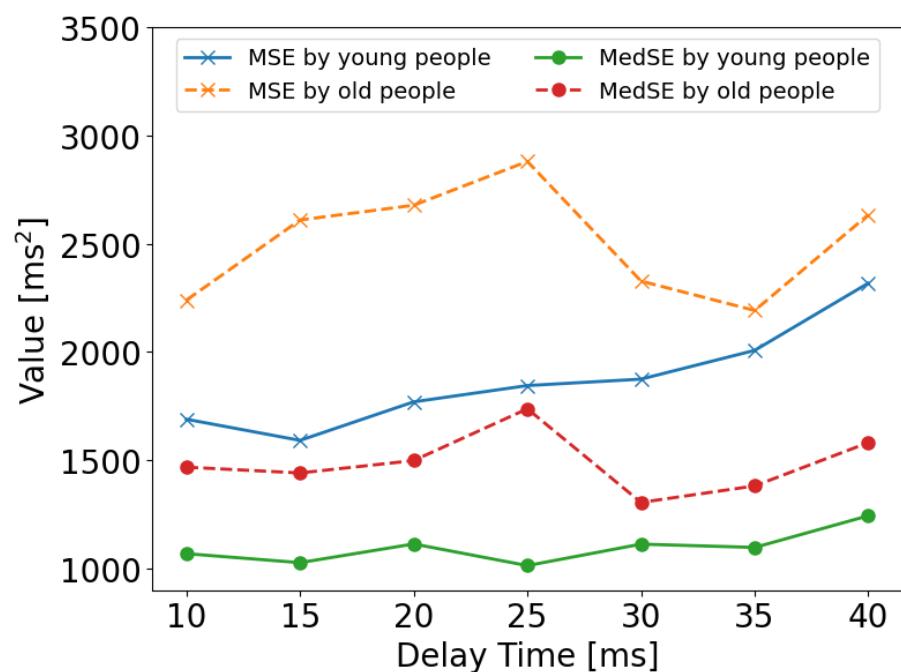


図 7.9: 実験 B における遅延時間ごとの若年者と高齢者の MSE と MedSE の比較

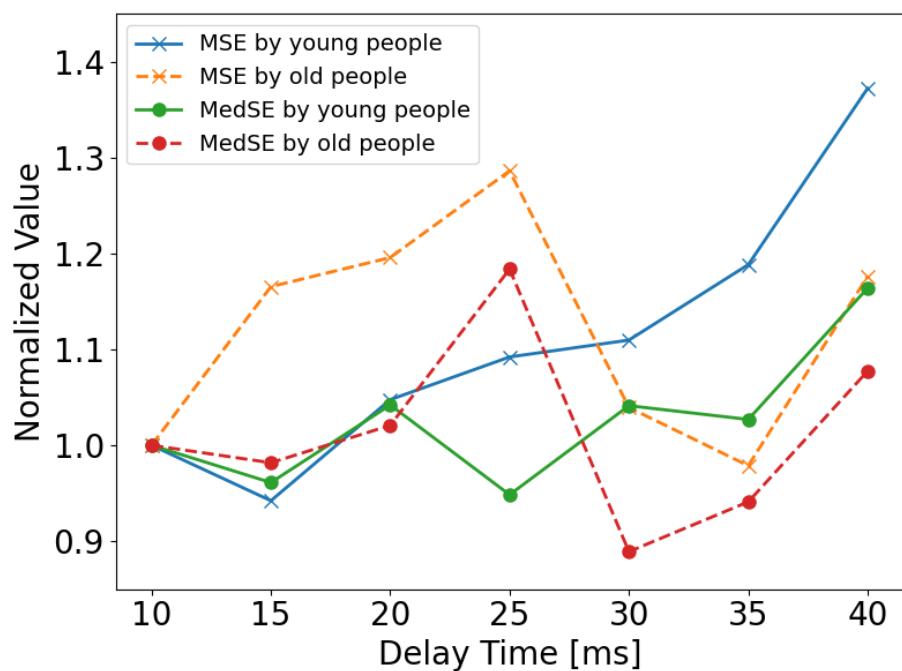


図 7.10: 実験 A における遅延時間ごとの若年者と高齢者の正規化した MSE と MedSE の比較

## 第8章

### 結論

#### 8.1 まとめ

本研究では、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、先行研究のシステムを改良して、遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響をボタン押し課題で調査した。このボタン押し課題は、一定の時間間隔ごとに一定回数ボタンを押すという課題である。被験者がボタンを押下する間隔は、電子メトロノームによる合図音によって規定される。ボタンを押下したときに、ヘッドホンから聴覚フィードバックとして音が output される。この音をボタンの押下回数が 4 の倍数に達したときのみ遅延させることで、遅延聴覚フィードバックの影響を調査した。そして、聴覚フィードバックの遅延による影響によるボタンの押下間隔のばらつきが観察しやすくなるように、客観的な評価指標および調査条件を決定するための実験を行った。その結果から、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、客観的な評価に用いる指標をボタン押下間隔の平均および中央値を真値とする分散、ならびに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とすることが適切であることが示唆された。そして、聴力の正常な若年者と高齢者を対象に、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、高齢

者は若年者と比較して、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唆された。

## 8.2 今後の展望

- ・3の倍数でもよくないか？
- ・聴力に異常がある人との差があるのか？
- ・より細かい遅延時間で調査する必要があるのか？
- ・潜在的な身体能力の影響を軽減させるような課題を考える必要がある。

## 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] 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わる要因の検討” Audiology Japan, 57 卷, 3 号, pp.189-194, Jun.2014.
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 重松楓人, 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.
- [6] 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 2023 年 1 月 24 日
- [7] P. Q. Pfardresher and C. Palmer, “Effects of delayed auditory feedback on timing of music performance” Psychological Research, Vol. 16, pp.71-79, Jan.2002.
- [8] 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

## 参考文献

---

- 報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, p168, pp.71–79, Sep.2015
- [9] 佐藤和志, “ASIO を利用した音響測定装置の開発及び遅延時間の許容量の調査”, 明治大学理工学部電気電子生命学科知能信号処理研究室, 2015 年度卒業論文

# 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, Vol. XX, No. YY, pp.ZZ1–ZZ2, Sep,2011

## 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、日頃の研究活動及び本論文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及び井口道子様、明大サポートの山本様、福島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後輩の皆様に心から感謝いたします。

2023年2月5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

## 付録A 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資料

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を行うときに用いた、研究参加同意書（明治大学生用・明治大学生以外の60歳未満の方用・明治大学生以外の60歳以上の方用）、実験概要説明ボード（60歳の未満の方用・60歳以上の方用）、聴力検査手順説明ボード、実験手順説明ボード、音量調整ボードを掲載する。

## 付録 A 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資料

---

(明治大学生用)

### 研究参加同意書 (聴覚に与える遅延によって**身体運動に現れる影響**の調査)

【研究責任者の所属・職・氏名】  
明治大学理工学部電気電子生命学科・専任講師・村上隆啓

【研究課題名】  
補聴器における入出力時間差の許容量の年齢による変化と老人性難聴用補聴器への応用

#### <被験者の方へ>

本研究では、老人性難聴用補聴器の開発に向けて、音に遅延が発生した場合に**身体運動に現れる影響**の調査を行っています。今回ご参加いただく研究では、**市販の音響機器およびゲームコントローラを用いた測定装置**を使用します。以下の項目についてご同意いただける場合は、本同意書にご署名ください。

1. 本研究への参加は、**被験者の自由意思**によるものです。
2. 本研究への被験者としての参加を決定した後でも、また、研究が進行中であっても、自由意思により参加を中止することができます。
3. 本研究では、説明を含めて約30分間(1名あたり)の実験時間を予定しています。
4. 本研究で使用する実験機器は**市販の音響機器およびゲームコントローラを組み合わせたもの**であり、安全性が確認されています。
5. 研究の内容や安全性について疑問がある場合は、**研究者に質問**して答えを求めるることができます。
6. 予め被験者へ説明することなくテストや測定を行うことはありません。もしそのような事柄が実施されようとしたときは、直ちに**研究への参加を拒否**することができます。
7. 研究データは、研究者によって厳重に保管されます。**被験者のプライバシーに関する情報および個人名を公開することはありません。**
8. 本研究への参加の拒否、または参加の途中中止による**成績や単位など学業への影響はありません。**

私は、上記の研究内容について適切かつ十分な説明を受け、研究目的、被験者の人権保護および安全確保への対策をよく理解しましたので、この研究への被験者としての参加に同意いたします。

調査実施日 西暦 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

ご署名 \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ 歳) (男・女)

図 A.1: 研究参加同意書 (明治大学生用)

## 付録 A 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資料

---

(明治大学生以外の 60 歳未満の方用)

### 研究参加同意書 (聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査)

#### 【研究責任者の所属・職・氏名】

明治大学理工学部電気電子生命学科・専任講師・村上隆啓

#### 【研究課題名】

補聴器における入出力時間差の許容量の年齢による変化と老人性難聴用補聴器への応用

#### <被験者の方へ>

本研究では、老人性難聴用補聴器の開発に向けて、音に遅延が発生した場合に身体運動に現れる影響の調査を行っています。今回ご参加いただく研究では、市販の音響機器およびゲームコントローラを用いた測定装置を使用します。以下の項目についてご同意いただける場合は、本同意書にご署名ください。

1. 本研究への参加は、被験者の自由意思によるものです。
2. 本研究への被験者としての参加を決定した後でも、また、研究が進行中であっても、自由意思により参加を中止することができます。
3. 本研究では、説明を含めて約 30 分間（1 名あたり）の実験時間を予定しています。
4. 本研究で使用する実験機器は市販の音響機器およびゲームコントローラを組み合わせたものであり、安全性が確認されています。
5. 研究の内容や安全性について疑問がある場合は、研究者に質問して答えを求めるすることができます。
6. 予め被験者へ説明することなくテストや測定を行うことはありません。もしそのような事柄が実施されようとしたときは、直ちに研究への参加を拒否することができます。
7. 研究データは、研究者によって厳重に保管されます。被験者のプライバシーに関する情報および個人名を公開することはありません。

私は、上記の研究内容について適切かつ十分な説明を受け、研究目的、被験者的人権保護および安全確保への対策をよく理解しましたので、この研究への被験者としての参加に同意いたします。

調査実施日 西暦 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

ご署名 \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ 歳) (男・女)

図 A.2: 研究参加同意書 (明治大学生以外の 60 歳未満の方用)

## 付録 A 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資料

---

(明治大学生以外の 60 歳以上の方用)

### 研究参加同意書 (聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査)

#### 【研究責任者の所属・職・氏名】

明治大学理工学部電気電子生命学科・専任講師・村上隆啓

#### 【研究課題名】

補聴器における入出力時間差の許容量の年齢による変化と老人性難聴用補聴器への応用

#### <被験者の方へ>

本研究では、老人性難聴用補聴器の開発に向けて、音に遅延が発生した場合に身体運動に現れる影響の調査を行っています。今回ご参加いただく研究では、市販の音響機器とゲームコントローラを用いた測定装置、および市販の聴力検査装置を使用します。以下の項目についてご同意いただける場合は、本同意書にご署名ください。

1. 本研究への参加は、被験者の自由意思によるものです。
2. 本研究への被験者としての参加を決定した後でも、また、研究が進行中であっても、自由意思により参加を中止することができます。
3. 本研究では、説明、聴力検査を含めて約 30 分間（1 名あたり）の実験時間を予定しています。
4. 本研究で使用する実験機器は市販の音響機器およびゲームコントローラを組み合わせたものであり、安全性が確認されています。
5. 研究の内容や安全性について疑問がある場合は、研究者に質問して答えを求めるることができます。
6. 予め被験者へ説明することなくテストや測定を行うことはありません。もしそのような事柄が実施されようとしたときは、直ちに研究への参加を拒否することができます。
7. 研究データは、研究者によって厳重に保管されます。被験者のプライバシーに関する情報および個人名を公開することはできません。
8. 聴力検査（閾値検査）の結果は、データ分析のみに使用します。得られた聴力検査結果に基づいて医学的な診断を行うことは一切ありません。

私は、上記の研究内容について適切かつ十分な説明を受け、研究目的、被験者的人権保護および安全確保への対策をよく理解しましたので、この研究への被験者としての参加に同意いたします。

調査実施日 西暦 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

ご署名 \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ 歳) (男・女)

図 A.3: 研究参加同意書 (明治大学生以外の 60 歳以上の方用)

## 付録 A 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資料

---

(60歳未満の方用)

<実験の概要（聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査）>

私たちの研究では、よりよい補聴器を開発するためのデータを集めています。

もしも、補聴器から聞こえてくる音が、実際の音よりも遅れて聞こえたら、人によっては、身体の動作も音につられて遅れる、などの影響が現れるかもしません。

本日は、その影響を測定する実験を行います。

この実験では、一定のリズムで鳴るメトロノームの合図音に合わせて、ゲームコントローラのボタンを何回か押していただきます。

ゲームコントローラのボタンを押すと、ヘッドホンから「ピッ」という音がボタンを押した瞬間に聞こえたり、ボタンを押してから少し遅れて聞こえたりします。

実験の開始と終了は、こちらが合図します。

ボタンを押し間違えたり、押すタイミングがずれたりしても構いませんので、リラックスしてボタンを押してください。

図 A.4: 実験概要説明ボード (60歳未満の方用)

## 付録 A 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資料

---

(60歳以上の方用)

<実験の概要（聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査）>

私たちの研究では、よりよい補聴器を開発するためのデータを集めています。

もしも、補聴器から聞こえてくる音が、実際の音よりも遅れて聞こえたら、人によっては、身体の動作も音につられて遅れる、などの影響が現れるかもしれません。  
本日は、その影響を測定する実験と、聽力検査（閾値検査）を行います。

影響を測定する実験では、一定のリズムで鳴るメトロノームの合図音に合わせて、ゲームコントローラのボタンを何回か押していただきます。  
ゲームコントローラのボタンを押すと、ヘッドホンから「ピッ」という音がボタンを押した瞬間に聞こえたり、ボタンを押してから少し遅れて聞こえたりします。

実験の開始と終了は、こちらが合図します。

ボタンを押し間違えたり、押すタイミングがずれたりしても構いませんので、リラックスしてボタンを押してください。

図 A.5: 実験概要説明ボード（60歳以上の方用）

## 付録 A 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資料

---

(60歳以上の方用)

### <聴力検査（閾値検査）の概要>

- (1) ヘッドホンを、耳全体を覆うように装着してください。  
「L（青）」が左耳、「R（赤）」が右耳です。
- (2) 応答ボタンスティックを、黒いボタンを押せるように持ってください。  
持つ手は片手でも両手でも大丈夫ですが、片手で持って親指でボタンを押すと押しやすいです。
- (3) 試しに、黒いボタンを何回か押してください。
- (4) こちらが合図したら、聴力検査が始まります。  
検査時間は5分程度です。
- (5) ヘッドホンから「ピーッピーッ」という音が、いろいろな高さで鳴ります。  
「ピーッピーッ」が聞こえたら、聞こえている間ずっとボタンを押し続けてください。  
「ピーッピーッ」が聞こえなくなったら、ボタンをはなしてください。
- (6) こちらが合図したら、聴力検査が終了します。

図 A.6: 聴力検査手順説明ボード

## 付録 A 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資料

---

<実験の手順（聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査）>

- (1) ヘッドホンを装着してください。
- (2) ゲームコントローラを両手で持ってください。  
ゲームコントローラを持った後に、音量を調整します。
- (3) こちらが合図したら、メトロノームの合図音に合わせて  
ゲームコントローラの丸いボタンを  
右手親指で約20回押してください。  
終了も、こちらが合図します。  
丸いボタンは「A (赤)」「B (黄)」「X (青)」「Y (緑)」のどれでも構いません。  
ボタンを押し間違えたり、押すタイミングがずれたりしても構いませんので、リラックスしてボタンを押してください。
- (4) 上記(3)の実験を、5～10回、実施していただきます。  
途中で手順が分からなくなったり、気分が悪くなったりしたら、気軽に申し出でください。

図 A.7: 実験手順説明ボード（60歳未満の方用）

## 付録 A 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資料

---

<音量の調整（聴覚に与える遅延によって身体運動に現れる影響の調査）>

- ・ゲームコントローラの丸いボタンを押すと、ヘッドホンから「ピッ」という音が聞こえます。

ためしに、ゲームコントローラの丸いボタンを押してみてください。

丸いボタンは「A (赤)」「B (黄)」「X (青)」「Y (緑)」のどれでも構いません。

- ・ヘッドホンから 「ピッ」という音は聞こえましたか？
- ・ヘッドホンからの 「ピッ」という音は、小さくなかったですか？
- ・ヘッドホンからの 「ピッ」という音は、大きすぎなかったですか？

図 A.8: 音量調整ボード

## 付録B 主観調査におけるアプリケーションのソースコード