

平成 18 年度 修士論文

# 聴覚フィードバックによる運動学習の支援

電気通信大学大学院情報システム学研究科

情報ネットワーク学専攻

ヒューマンインターフェース学講座

0551039 山本 真献

指導教員

阪口 豊

出澤 正徳

中村 整

平成 19 年 1 月 30 日提出

# 目次

第 1 章	緒論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	聴覚フィードバックによる運動の支援	3
2.1	聴覚フィードバックの意義	3
2.1.1	運動に関連した情報の増加	3
2.1.2	熟達者との違いの強調	3
2.1.3	聴覚の特性の活用	4
2.2	類似するシステムに対する提案手法の位置づけ	4
2.3	応用範囲	5
2.4	実験概要	5
2.4.1	実験構成	5
2.4.2	実験環境	5
2.4.3	聴覚フィードバックの提示方法	6
2.4.4	視覚フィードバックの提示方法	6
2.4.5	ディレイの問題	7
第 3 章	聴覚フィードバックによる運動の制御特性	9
3.1	目的	9
3.2	実験方法	9
3.2.1	聴覚的なターゲットトラッキングタスク	9
3.2.2	設定条件	10
3.3	結果	11
3.3.1	トラッキングデータ	11
3.3.2	誤差 2 乗和	12
3.3.3	相互相関関数 - 時間のズレ	15
3.3.4	相互相関関数 - 波形の類似度	15

3.3.5	微係数 . . . . .	18
3.4	考察 . . . . .	18
<b>第 4 章</b>	<b>手本がある場合の支援効果</b>	<b>23</b>
4.1	目的 . . . . .	23
4.2	実験方法 . . . . .	23
4.3	結果 . . . . .	25
4.3.1	時間波形 . . . . .	25
4.3.2	誤差 2 乗和 . . . . .	25
4.3.3	相互相関関数 . . . . .	30
4.3.4	移動開始点のズレ . . . . .	30
4.3.5	立ち上がり点を揃えた場合の誤差 2 乗和 . . . . .	30
4.4	考察 . . . . .	35
<b>第 5 章</b>	<b>手本がない場合の支援効果</b>	<b>36</b>
5.1	目的 . . . . .	36
5.2	実験方法 . . . . .	36
5.3	結果 . . . . .	37
5.3.1	時間波形 . . . . .	37
5.3.2	評価値の推移 . . . . .	38
5.3.3	誤差 2 乗和 . . . . .	38
5.4	考察 . . . . .	38
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>45</b>
	謝辞	47
	参考文献	48

# 第1章

## 緒論

### 1.1 背景と目的

新しい運動の学習には練習をすることが欠かせない。我々が運動を身に付ける際は、練習を繰り返してパフォーマンスを向上させる。運動の種類により違いはあるものの、初心者が上級者や熟達者といえるレベルに達するまでには、多くの時間と月日が要求される。練習する際には、習得しようとする運動の上級者を手本にしたり、教示役の人からのアドバイスを参考にしたり、鏡を見たり、撮影した映像を視聴したり、イメージトレーニングといった工夫により、運動を上達させようという試みをする。このうち、鏡を見ることや映像を見るという行為は、自然の状態では取得できない情報を得ることにより学習の進行を促そうという試みである。このことは、道具によって自らの体性感覚や視覚の情報を補っているものと考えられる。すなわち、それらの運動に関わる情報を道具によって補うことにより、学習の進行が促されることが考えられる。運動学習を支援するための新しい手法として、筆者は身体の動きに関する情報を計測し、音響信号に変換してフィードバックすることで運動学習の支援をする方法が有効なのではないかと考えた。

これにより学習の支援が可能であると考えた理由として、我々の日常生活の中において、音を手がかりに身体の動きを調整することが挙げられる。例えば、切削加工時において加える力を部材から出る音の変化に注意しながら調整したり、自動車の運転時におけるエンジン音やタイヤ音でアクセルペダルの踏み込み量を調整したりする。このように、普段はあまり意識されないが、知らず知らずのうちに音を運動の制御に利用している場面がある。

運動者に関する情報を音を通じてフィードバックする意義として、運動者自身の過去の運動や、他者との運動との違いが音として比較できるようになり、学習者が修正点を発見しやすくなることが挙げられる。また、人間の聴覚系が持つ時間分解能などの特徴 [1, 2] を積極的に利用することにより、視覚などの他の感覚系を通じたフィードバックよりも運

動の詳細な情報が運動者にもたらされる可能性が考えられる。

以上のことから、聴覚から運動の情報を得られない状況下や視覚情報により運動を観察できない状況下において、外部のシステムにより運動に関わる情報を音響信号に変換して運動者に付加すれば、運動学習における聴覚的な機能の役割を積極的に増大させることが可能であると考えられる。

本研究は、運動者の動きに関する情報を音を通じて運動者にフィードバックすることで運動学習の支援をする可能性を検討するものである。本研究では、このような聴覚フィードバックの可能性を追求する上での第一段階として、手先の動きを音の高さに変換し、それを運動者にフィードバックする状況を設定して実験を行った。具体的には、身体全体の姿勢は考慮せずに手先の左右方向の位置だけを取り出して運動を単純化し、それを音の高さという1次元の変数に変換した条件で運動者にフィードバックする環境を設定した。

なお、本論文では運動者にフィードバックされる音響信号のことを、聴覚フィードバックと呼ぶこととする。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、緒論と結論を含め6章から構成される。

まず、2章において、聴覚フィードバックの意義についての詳細を述べ、類似の研究に対する本研究の位置づけと実験の概要について述べる。

次に、3章において、支援の可能性を調べる前に、聴覚フィードバックによる運動の制御特性について調べた結果について述べる。

次に、4章において、手本が明示される場合の運動学習を単純化した状況、つまり、ターゲットを提示した後にそれを再現するという形態の記憶再生課題が可能であるかを検討する。さらに、聴覚フィードバックとの比較を行うために、視覚フィードバック条件を設定し、併せて実験を行う。

次に、5章において、手本が明示されない場合の運動学習の場面を単純化した状況、つまり、明示的に与えられない理想軌道を評価値を頼りに探索するという条件下において支援の効果が得られるかを検討する。さらに、聴覚フィードバックとの比較を行うために、視覚フィードバック条件とフィードバックがない条件を設定し、併せて実験を行う。

結論として、6章において提案手法の有効性や可能性について総括的に考察する。

## 第2章

# 聴覚フィードバックによる運動の支援

### 2.1 聴覚フィードバックの意義

#### 2.1.1 運動に関連した情報の増加

意義のひとつとして考えられるのが、学習の元になる情報を増やすことである。これは、入力される情報が多ければ、人がそこから必要な情報を判断して利用するのではないかと、という推測に基づく。

別な見方からすると、自動車や自転車などの運転時における聴覚の役割が考えられる。自転車の運転時にヘッドホンを着用すると事故率が上昇するといわれており、多くのヘッドホンの取り扱い説明書には交通時には着用しないようにとの記述がされている。交通時のヘッドホンの着用が危険なのは、安全な通行のために必要な聴覚的な情報の獲得が、ヘッドホンから流れる情報により阻害されるためであると考えられる。この状況を逆に捉えると、提案手法を適用すれば、運動遂行時において元々なかった情報が補われ、通常は気がつかないことが情報として得られるようになり、運動学習がしやすくなると予想される。

#### 2.1.2 熟達者との違いの強調

次に、上級者と初級者との違いを明確にするという効果が挙げられる。違いが明確になるということは、運動者が修正点への意識を向けやすくなることと、上級者との比較がしやすくなることが考えられる。そして、修正点の早期発見は学習の効率化をもたらすことが期待できる。

### 2.1.3 聴覚の特性の活用

一般的に、人間は外界の情報の80%ほどを視覚により獲得していると言われている。また、視覚と聴覚を比較した場合、空間的な情報は視覚が優位であると言われている。しかしその一方で、時間的な情報は視覚より聴覚が優位な点もある。例えば、時間分解能が視覚は60Hz程度で連続であると知覚されるが、聴覚の場合はその程度の分解能では連続に知覚されない[1][2]。以上のことから、高い時間分解能を必要とする運動を知覚しようとした場合、聴覚の方がより有効な情報を獲得できる可能性がある。

つまり、速い運動を捉えるという状況においては、聴覚の時間解像度に関する特性が優位に働くことが考えられる。このことから、普段は音から情報を得ることのできないパラメータを音に置き換えた場合に、運動の細かい変化までをつかむことができるものと期待される。

## 2.2 類似するシステムに対する提案手法の位置づけ

類似する研究では、バイオフィードバック、拡張現実感、強調現実感やリハビリテーションなどの分野で運動を支援するシステムが提案されている。

バイオフィードバックとは、生体の現象を知覚可能な信号に変換し、その信号を継続的に、かつ現象発生と同時に知覚させることで、普通では知覚できない現象の随意的なコントロールが可能になるというものである[3]。バイオフィードバックの計測対象には、筋電、血圧、体温、関節角度などがある。フィードバックは、映像、音、振動など、人間の五感に対して行う。それらの研究の中で、筋電を音響信号に変換し、無駄な筋肉の使用を抑制する効果が得られたという報告がある[4][5]。本研究の立場としては、このバイオフィードバックの立場と同じアプローチである。

拡張現実感や強調現実感の分野では、VR技術を用いて体をワイヤフレームで表現し、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)などのディスプレイ装置を通じて運動を支援するための情報を視覚的に提示する手法が多く見られる。この分野では、スポーツスキル[6][7]や楽器の演奏[8][9][10]、筆記の学習支援システム[11]の報告がある。中には振動をフィードバック情報に用いている研究もある[12]が、支援の情報は視覚的に与えるものが多数を占める。

リハビリテーションの分野における音を用いた支援システムとしては、パーキンソン病患者の振戦を音圧に変換し、その音を提示することにより抑制方法を学習するバイオフィードバックシステムが提案され、その効果が検証されている[13]。また、歩行時にリズムを提示することで歩行のリハビリ支援をするシステムが提案されている[14]。

一方、工作機械作業において音を作業支援情報を提示する方法を提案している研究がある[15]

## 2.3 応用範囲

提案手法はいろいろな場面での応用が考えられる。

まず、スポーツなどの動作への応用である。例えば、ダーツなどの投擲運動に、腕の横ぶれを音に変換することや、リリースのタイミングに音色を変化させるなどの情報を付加し、運動を強調するといった方法が考えられる。ダンスなどの身振りが重要な運動についても有効であると考えられる。

次に、産業的な面でのスプレー塗りに要求される、速度を一定にするという行動を補助するのに、速度や加速度を音に変換するという方法が考えられる。また、書字のような運動に適用することも可能であると考えられる。

## 2.4 実験概要

### 2.4.1 実験構成

聴覚フィードバックによる運動学習の支援の効果を確かめるために、本研究では、運動学習の状況として、模倣すべき手本の動きが音として与えられる場合と手本の動きが与えられない場合という2つの場面を想定して実験を行った。手本が明示される場合については4章で、明示されない場合については5章で述べた。

また、本研究では、これらの実験により支援の可能性を調べることに先立って、聴覚フィードバックによる運動の制御特性について調べた。この実験については3章で述べた。

### 2.4.2 実験環境

本研究では、実験課題としてPCのマウスを使った単純な運動を用いた。(図2.1)実際の実験ではさらに単純化するためにマウスの左右の位置のみに着目した。

なお、本研究で協力を得た被験者は、該当の実験について未経験であり、マウスの操作に慣れている。マウスを持つ手は右手に統一したが、いずれの被験者も通常マウスを使用するのは右手である。実験に入る前には、聴覚か視覚かの条件に応じたフィードバックを提示した状態でマウスを動かしてもらい、マウスの動きとフィードバックとの対応がどのようなになっているかを知ってもらうためのタスクを課した。



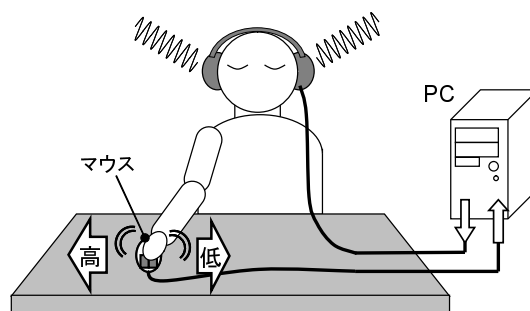


図 2.1 実験環境

### 2.4.3 聴覚フィードバックの提示方法

聴覚フィードバックの提示は、計測した情報をリアルタイムで音に変換し、ヘッドホンにより出力することで行う。具体的には、PCのマウスの座標位置情報をリアルタイムで周波数に変換し、その周波数の正弦波音をヘッドホンから出力する。音の周波数はマウス位置の  $x$  座標の位置に対応しており、マウスを左に動かすと音の周波数が低くなり、右に動かすと高くなる。なお、マウスは左右の動きにのみ反応し、上下の動きには反応しない。また、座標と音の高さはリニアに対応する。周波数が切り替わる際に位相を調整し、音が破断せずスムーズに繋がるように設計している。音声合成の頻度は 200Hz に設定した。以上の条件で、音の高さの変化が滑らかになっていることを確認した。

運動から音を生成して運動者に提示するまでのディレイを小さく抑えるため、PCからの音の出力には ASIO と呼ばれるリアルタイム性の高いインターフェースを用いた。これを用いた意義については後述する。

音の生成方法には、音の高さ、音の強さ、音色、リズムといった要素が挙げられるが、本研究においては計測データを音の高さに変換して表現する。音の高さを採用した理由は、先に挙げた 4 つと比較した際、音の強さと音色に対しては変化がわかりやすく、リズムに対しては短時間の認識が可能であると考えたためである。

### 2.4.4 視覚フィードバックの提示方法

本研究では、聴覚フィードバックとの対比のために、視覚フィードバック条件を設定して併せて実験を行った。

本論文の実験では、視覚フィードバックを聴覚フィードバックにおける音の高さをディスプレイの横方向の画素にリニアに対応させることで表現した。例えば 440Hz の音を映像に置き換えると 440pixel の位置に対応する。縦方向の変化は反映しないものとし、図 2.2 に示したような円や四角形などのカーソルが左右にのみ動くようにするようにした。

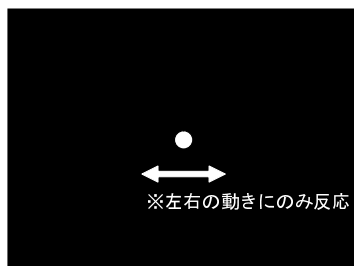


図 2.2 視覚的なターゲットの表現方法

なお、実験に使用したディスプレイのサイズは SXGA(1280 × 1024) で、リフレッシュレートは 60Hz に設定した。また、画面の描画には OpenGL を用いた。

#### 2.4.5 ディレイの問題

運動と音とに関連する研究として、人の発音に関する研究がある。それらの研究において注目される現象のひとつに、遅延聴覚フィードバック (DAF) がある[ 16 ]。遅延聴覚フィードバックとは、発話した音声に 200ms 程度の遅れを挿入すると、話者の会話の流暢さが損なわれたり、どもりが生じるというものである。

また、電子楽器においては、入力から音が出来されるまでの遅延が問題になる。スネアドラムとピアノを用いた実験では、30ms 以上の遅延だと認知され、50ms 以上の遅延だと演奏が困難になるという報告がある[ 17 ]。

本研究の聴覚フィードバックでは、運動を計測して音を変換していることから、運動から音が出来され、運動者の耳に届くまでのディレイが大きい場合、DAF のような現象が生じる可能性が考えられる。この場合、支援の効果が減少したり、学習が阻害される可能性も考え得る。

遅延の要因の要因としては、音の出力の遅れとセンサデータの取得の遅れが考えられる。

前者の遅れを解消するために、本研究では音の出力に ASIO を利用した。ASIO とは Steinberg 社が提唱するオーディオソフトウェアとオーディオハードウェアをつなぐドライバ規格である。コンピュータミュージックの分野において、少ない遅延で音を出力するための手法として用いられている。近年のシンセサイザーはハードウェア方式からソフトウェア方式への移行が進んでいるが、近年のソフトウェアシンセサイザーは ASIO を利用しているものが大半である。ASIO を利用した場合は演奏に違和感を感じないレベル以下にディレイを収めることができる。本研究では出力側のスペック上は 5ms 以内の遅れになるように設定した。

前者の遅れを解消するためには、時間的な遅れが小さいセンサを選定する必要がある。本論文で行った実験では入力装置としてマウスを利用した。マウスから出力される情報

は移動量であるが、直接は使わず、取得・管理が容易な、マウスが接続されたコンピュータシステム上のディスプレイのマウス座標位置を、音を生成するデータのベースにした。なお、マウスの座標位置の範囲は0～1280pixelであるため、音の帯域幅は0～1280Hzとなる。

センサはマウス以外にも、3次元位置計測装置、加速度センサ、重心動揺計など、運動に関する情報を計測するもので、ディスプレイの小さいものであれば利用可能である。提案手法を現実的な運動学習の場面で利用するためにはこれらのデバイスを用いることが想定される。本研究では、単純化と簡単化のためにマウスを用いた。

## 第3章

# 聴覚フィードバックによる運動の制御特性

### 3.1 目的

本章では、運動学習の支援の可能性を調べることに先立って、聴覚フィードバックによる運動の制御特性について調べた結果について述べる。具体的には、聴覚的なターゲットトラッキングタスクを用い、音を目標としてその音を学習者の聴覚フィードバックにより追うことができるかを検証する。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 聴覚的なターゲットトラッキングタスク

ターゲットトラッキングとは、ディスプレイ上に提示された動くターゲットを、ジョイスティックやマウスなどの入力装置でコントロールできるカーソルで追いかけるタスクで、運動制御に関する研究で用いられている[18][19]。ターゲットトラッキングが成立するのは、ターゲットとカーソルとの間の差を視覚的に捕らえ、差の大きさに合わせて入力装置を動かし、差を埋める、といった一連の行動が遂行できるためであると考えられる。

ここで、視覚的な情報を聴覚的な情報に置き換えた、聴覚的なターゲットトラッキングタスクを考える。これは、提示されたターゲット音を被験者の操作するカーソル音で追従するタスクである。本章ではこの状況下における運動の制御特性について、Miallらの方法に倣って条件を設定して実験を行う。

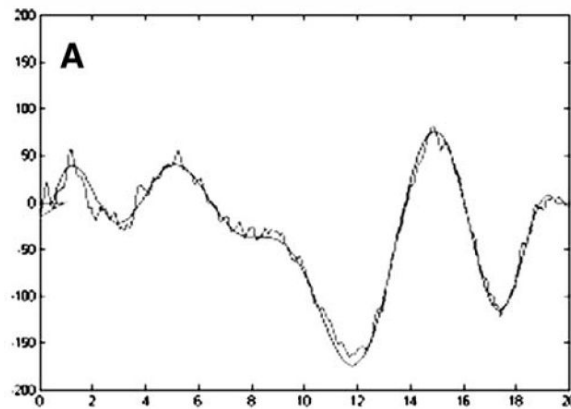


図 3.1 Miall らが計測したトラッキングデータ

参考文献 [18] より引用。Miall らはこの論文において、ディスプレイ上を 2 次元的に移動するターゲットを、ジョイスティックでコントロールできるカーソルで追うターゲットトラッキングタスクを用いている。グラフはこの実験のターゲットとカーソルデータの水平方向の時間的変化をプロットしたもので、横軸が時間 (s)、縦軸が位置 (pixel) である。Miall らはこの論文において入力からディスプレイへの出力に 300ms のディレイを入れた際のディレイへの適合について論じている。このグラフは遅延のない状態でのトラッキングデータである。

### 3.2.2 設定条件

音の提示は 2.4.3 節で述べた方法をベースにした。

ターゲットとなる音 (ターゲット音と呼ぶ) の提示とマウスでコントロールできる音 (カーソル音と呼ぶ) は、右側のスピーカーからターゲット音を、左側のスピーカーからカーソル音を出力することで提示した。ターゲット音とカーソル音を左右のスピーカーで振り分けたのは、同一のスピーカーで合成して出力するとターゲット音とカーソル音が近接した際にうなりが発生して不快で聞きにくくなってしまいうためである。

ターゲット音の変化のさせ方は Miall らのターゲットトラッキングタスクを用いた実験 [18] の設定条件に倣って定めた。音は 1 次元的な情報であることから、2 次元的な情報である視覚的なターゲットトラッキングタスクをそのまま流用することはできない。Miall らは、ターゲットとカーソルの変化を水平・垂直軸に分けて検討を行っていることから、1 次元的な表現にしても解析をするには問題ない。ターゲットの動き方は基本的な正弦波の周波数の組み合わせで生成されている。また、ターゲットは試行毎にランダムに変化するため、予測して音を合わせることを避けることができると考えられる。これらの点から、Miall らの実験様式に倣って聴覚的なトラッキングタスクを設定することとした。

Miall らのトラッキングデータの例を図 3.1 に示す。

本実験では、具体的に 0.05, 0.15, 0.25, 0.35Hz の 4 つの正弦波を合成してターゲット音の変化を表現した。位相は試行毎にランダムに設定し、ターゲットの変化の仕方が試行

毎に変わるようにした。なお、それぞれの正弦波の振幅は一定にした。合成波の振幅については、位相を試行毎にランダムに設定しているため、毎回異なっているが、おおよそ 440~880Hz の範囲に収まるように設定した。これは、予備実験の結果、オクターブ違いの音を聞き分けることが難しいことが明らかになったためである。また、すべての被験者に対して同じターゲット音の動きを与えた。一方、カーソル音は 2.4.3 で述べた環境を利用した。

以上のような条件で被験者に以下のようなタスクを課した。

「マウスを動かすと、ヘッドホンの右側のスピーカーから出る音の高さが変化します。ヘッドホンの左側のスピーカーから高さが変化する音が聞こえるので、マウスを操作して左右のスピーカーの音が同じ高さになるように音を追いかけて下さい」

1 試行は 20 秒で、試行間に 5 秒のインターバルを設定した。試行回数は、1 日 40 回の試行を 3 日、合計 120 回とした。最初の 5 回と、最後の 5 回のみ、基本波の各周波数値を 2 倍に設定した。この意図としては、間の 110 回の試行によって、ターゲットの変化が速いターゲットも追えるようになるかという、汎化効果が得られるかを確かめることにある。

ターゲット音の 20 秒のうち、最初と最後の周波数が 660Hz になるように設定し、最初の 3 秒間かけて緩やかに増幅して最後の 3 秒で緩やかに減衰するようにした。設定した。また、カーソル音の最初の音は、マウスの位置によらず、音の提示が始まる直前にマウスの座標位置を強制的に 660pixel の位置に、すなわち、開始時点で 660Hz の音が出来設定するようにした。このため、マウスの位置は絶対位置で音の高さが決まるのではなく、試行開始時の位置で音の高さが決まることになる。なお、最初の開始区間の 3 秒間にはターゲット音が若干アップトレンドになるようなバイアスが加えてある。このバイアスの大きさはターゲット生成時に乱数で生成した位相に依存して決まる。

なお、実験中は視覚の影響を避けるためにアイマスクを着用した状態で実験を行った。

時間毎のカーソル音とターゲット音の周波数をそれぞれ記録した。

実験の概観図を図 3.2 に示す。

## 3.3 結果

### 3.3.1 トラッキングデータ

計測したトラッキングデータの代表例として 5,20,80,120 試行目を抜粋したものを図 3.3 に示す。細い線がターゲット音、太い線がターゲット音を表す。5 試行目と 120 試行目は、ターゲットの周波数を 2 倍に設定しているため変化が速くなっている。

個別に見ると、図 3.1 に示した Miall らの視覚フィードバックのトラッキングデータと

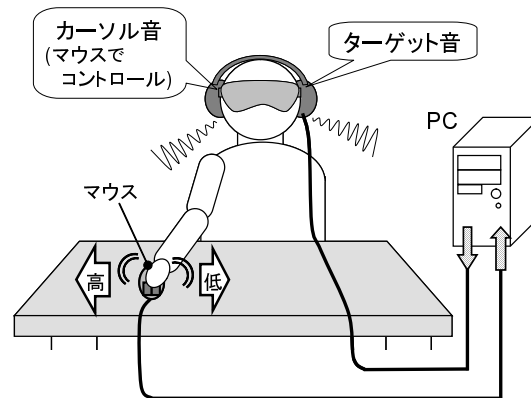


図 3.2 聴覚的なターゲットトラッキングタスクの実験概観図

比較して、入力装置がジョイスティックとマウスという違いはあるが、時間、振幅ともにズレが大きい。時間については、ターゲットに対してある程度一定に遅れて追従している。振幅については、ターゲットの変曲点での一致度が低い。被験者 B の 20 試行目の 13~15 秒付近のトラッキングデータにおいて、カーソル音がターゲット音に追いついておらず、差が開いているのにも関わらず、ダウントレンドのターゲットが少し高くなって再び下降する山のある箇所で、その山に反応してカーソル音を高くしている挙動をしている。これらのことは、音の高さではなく、変化を基準にしてトラッキングする傾向がある可能性があるといえる。

試行毎に見ると、いずれの被験者も試行を経る毎に被験者が生成した音の周波数変化と目標音とのズレが小さくなっていく傾向が読み取れる。

被験者間においては、パフォーマンスが大きく異なることが見受けられる。

### 3.3.2 誤差 2 乗和

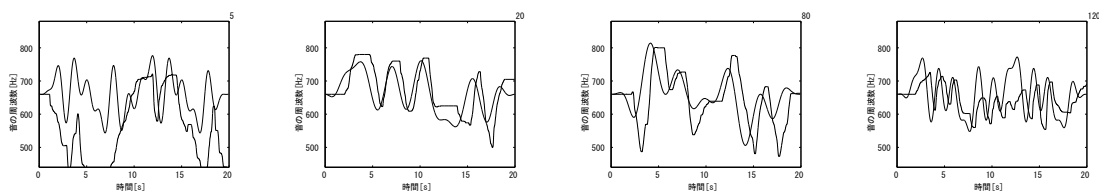
試行毎の誤差 2 乗和を図 3.4 に示す。

誤差 2 乗和は、サンプリング時刻毎にターゲット音とカーソル音の周波数の差の 2 乗の和を取ったものである。

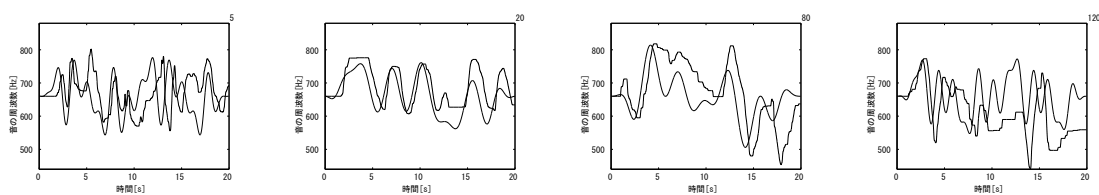
まず、最初と最後の 5 試行を除いた間の 110 試行についての結果を見る。各被験者の試行毎の誤差は、被験者 A,D,E について減少傾向が見られる。被験者 B,C については変化が見られない。

被験者毎の結果は大きく異なっている。特に音楽演奏経験の長い被験者 E のパフォーマンスは他の被験者より群を抜いて高い。

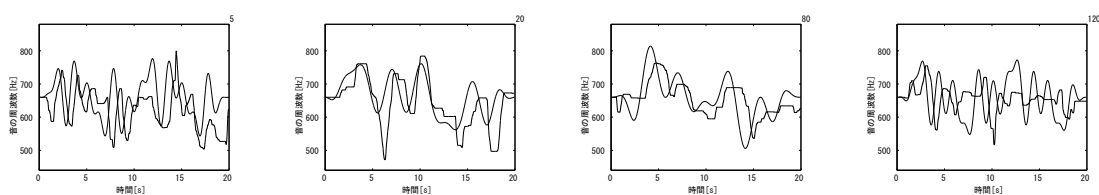
続いて、最初と最後の 5 試行を比較すると、いずれの被験者も後者の方が誤差が小さくなっている。一方でいずれの被験者も 111~115 試行目と最後の 5 試行の 116~120 試行目を比較すると、後者の方が誤差が大きくなっている。被験者 B については、最初の 5 試



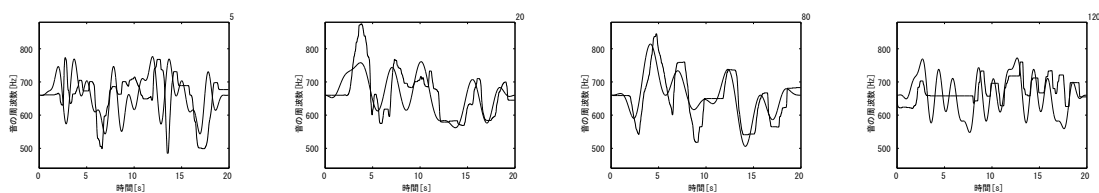
(a) 被験者 A



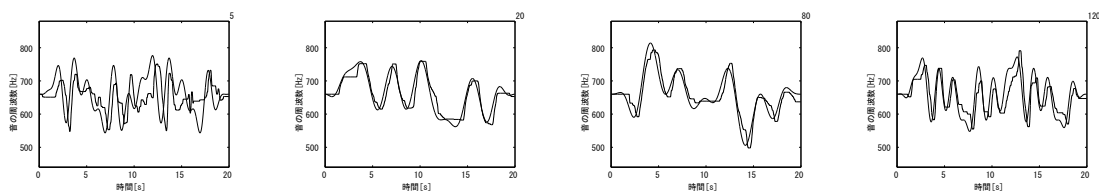
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C



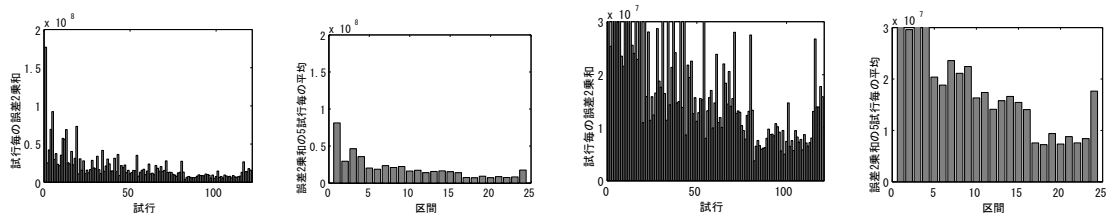
(d) 被験者 D



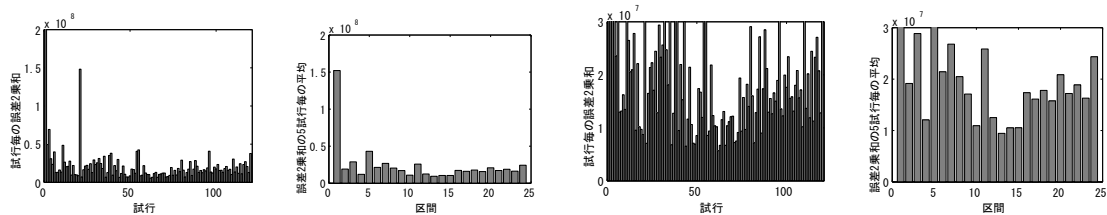
(e) 被験者 E

図 3.3 5,20,80,120 試行目のトラッキングデータ

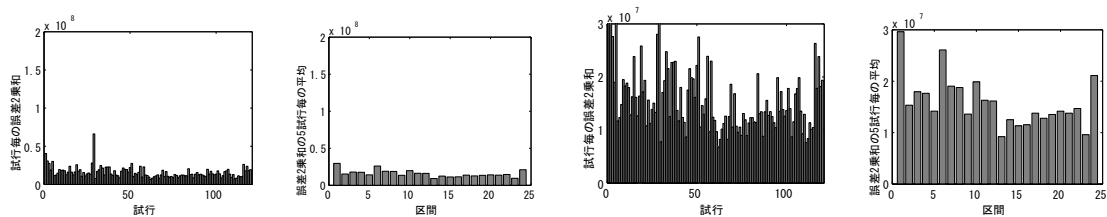




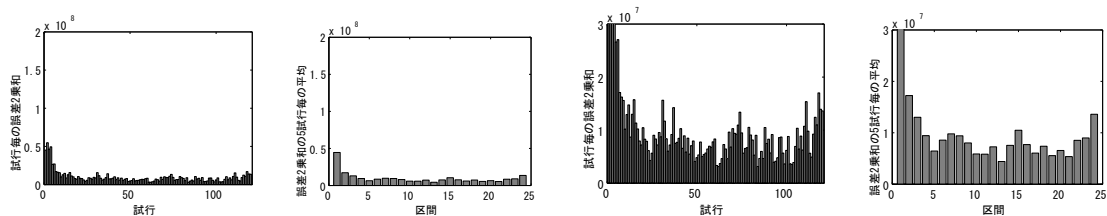
(a) 被験者 A



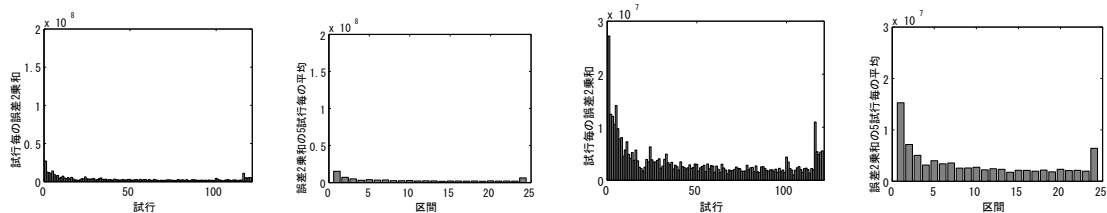
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C



(d) 被験者 D



(e) 被験者 E

図 3.4 誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]

行は著しく誤差が大きい、それ以外は誤差の減少が見られない。

### 3.3.3 相互相関関数 - 時間のズレ

相互相関関数により算出した時間のズレを図 3.5 に示す。

これらは 2 つの信号波形  $x(n)$ ,  $y(n)$  の相互相関関数を表す (3.1) 式を正規化した (3.2) 式より算出した。

$$r_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m}y_n \quad \{k = 0, 1, 2, \dots, n-1\} \quad (3.1)$$

$$R_{xy}(m) = \frac{r_{xy}(m)}{\sqrt{r_{xx}(0)}\sqrt{r_{yy}(0)}} \quad (3.2)$$

(3.2) 式は、(3.1) 式の 2 つの信号のそれぞれの自己相関関数の平方根の積で割ったもので、値の範囲は-1 ~ 1 となる。ここではずらし時間 0 ~ 2s 中のピークを時間のズレとした。

なお、相互相関関数の計算に用いた計測データは、最初と最後の 3 秒間を除いた 3 ~ 17 秒間を対象とした。

まず、最初と最後の 5 試行を除いた間の 110 試行についての結果を見る。被験者 A,D,E は試行毎に遅れが小さくなっていくことが分かる。それに対して、被験者 B,C は変化が見られない。

最初と最後の 5 試行を比較すると、被験者 A,D,E で時間の短縮が見られるが、被験者 B,C では見られない。111 ~ 115 試行と最後の 5 試行を比較すると、被験者 B 以外は時間のズレを維持している。

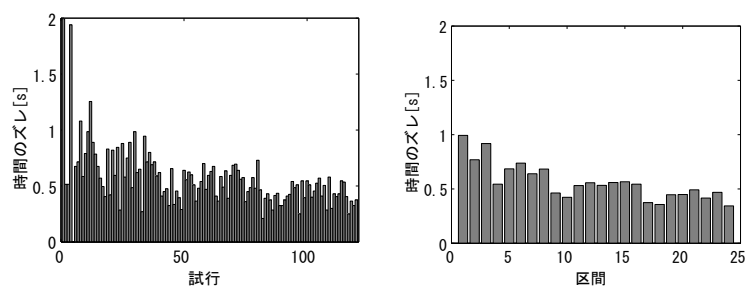
被験者 A,C,D,E の最後の 5 試行の時間のズレは、ターゲットの周波数が 2 倍になっているのにも関わらず、間の 110 試行のズレと変わっていない。

最も追従成績が高い被験者 E では最良時で 0.2 秒を切る程になっている。

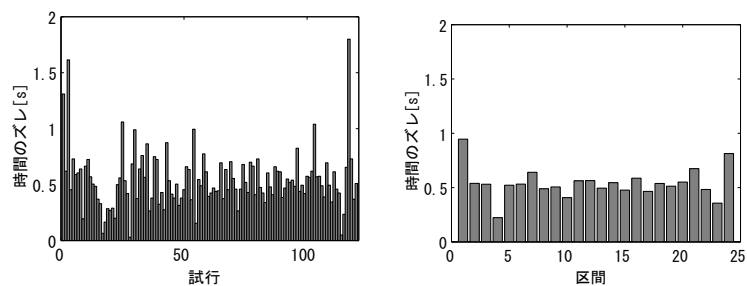
### 3.3.4 相互相関関数 - 波形の類似度

相互相関関数により算出した波形の類似度を図 3.6 に示す。波形の類似度は前節で求めたずらし時間 0 ~ 2s 間のピーク値をそれとみなしたものである。

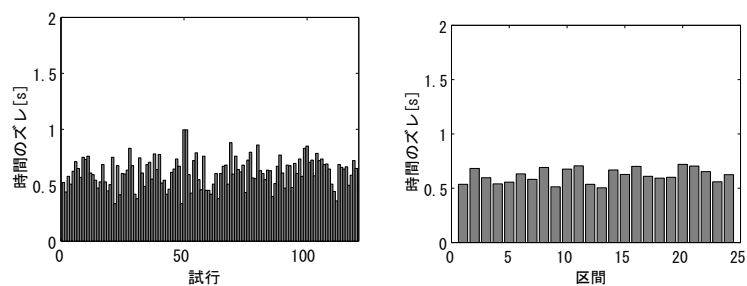
傾向としては誤差 2 乗和と似ている。被験者 A,B,D,E については、最初の 5 試行と最後の 5 試行で波形の類似度が向上しているが、被験者 C については悪化している。



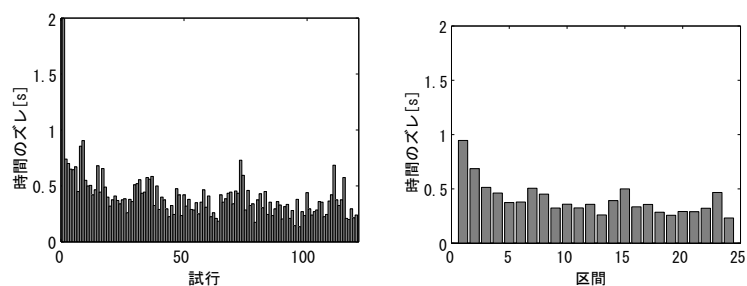
(a) 被験者 A



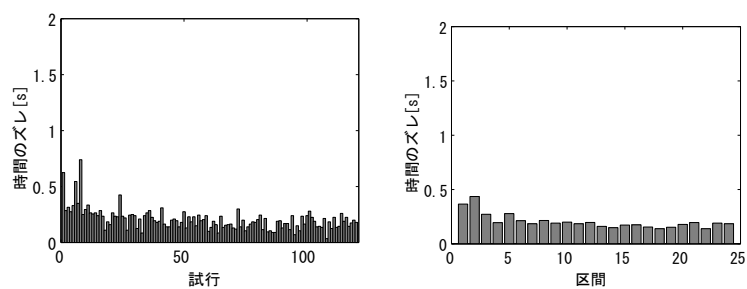
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

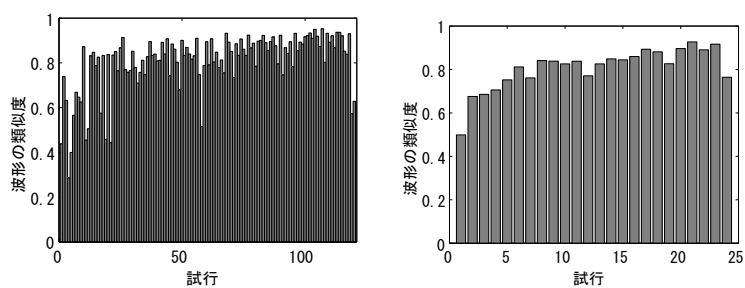


(d) 被験者 D

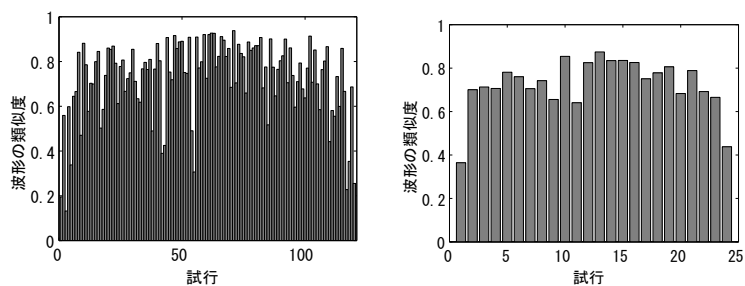


(e) 被験者 E

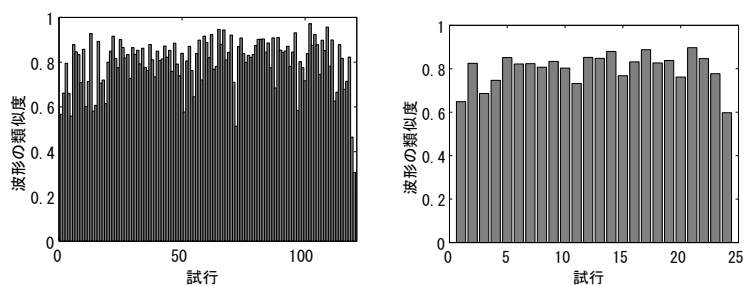
図 3.5 時間のズレ



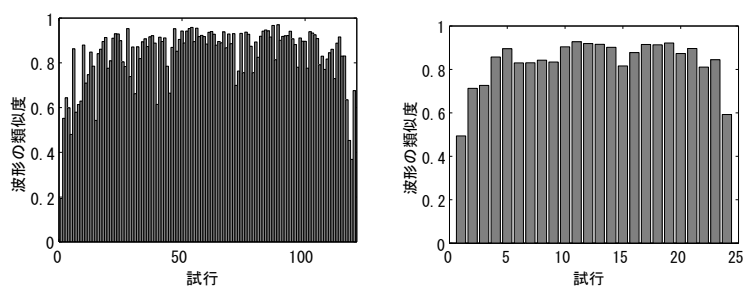
(a) 被験者 A



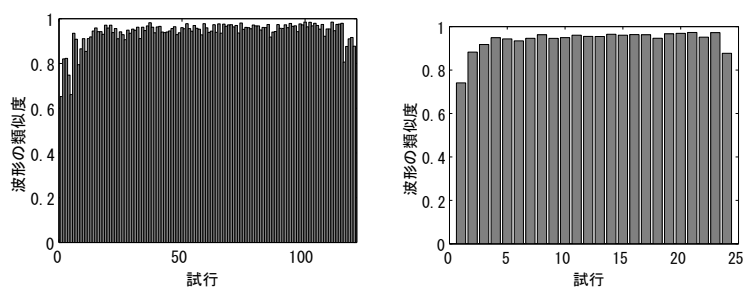
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C



(d) 被験者 D



(e) 被験者 E

図 3.6 波形の類似度

### 3.3.5 微係数

トラッキングデータの結果から、計測データがターゲット音の位置ではなく、その変化速度に対してデータが追従しているような傾向がみられたことから、速度に対して解析を行う。

なお、微係数を求める際に、計測誤差の影響を抑えるために元のデータを 100 サンプル (0.5 秒分) 点の移動平均を取って平滑化している。

図 3.7 に微係数の誤差 2 乗和を示す。いずれの被験者も、ターゲットの周波数が 2 倍の最初の 5 試行目と最後の 5 試行目の誤差が大きいことが見られる。また、いずれの被験者も最初の 5 試行より最後の 5 試行の方が誤差が小さい。

微係数を取る前と取った後との比較では、被験者 A の 3 日目 (81 ~ 120 試行) の誤差の減少が目立つ。しかし、全体的な傾向としては、誤差の減少の傾向に大きな違いは見受けられない。

図 3.7 に微係数の時間のズレを示す。時間のズレの求め方は、3.3.3 と同一である。傾向としては、3.3.3 と同様である。

図 3.7 に微係数の時間のズレを示す。この結果も、傾向としては、3.3.4 と同様である。

## 3.4 考察

最初と最後の 5 試行目を除いた 110 回の試行において、5 名の被験者中、3 名の被験者において、誤差や時間のズレが減少することが確認された。一方で 2 名の被験者にはその傾向が見られなかった。また、被験者間で誤差の違いが大きく、誤差が小さい被験者ほどばらつきが小さく安定したパフォーマンスを出す傾向が得られた。さらにパフォーマンスの最も高かった被験者は音楽演奏経験が最も長かった。

一方、被験者 B は最初の 5 回のみ誤差が著しく大きく、それ以外の試行では差が見られなかった。これは、最初の 5 試行で習熟しきってしまったものとも考えられるが、被験者 E は被験者 B の最小の誤差より平均して小さい誤差を出しているため、習熟したと言い切ることはできない。

以上により、聴覚フィードバックの情報を活用できる度合いには個人差がある可能性があり、音楽演奏経験の違いが誤差に影響を与えられと考えられる。さらに、最良のパフォーマンスであった音楽経験者の結果から、人間は最低でも時間遅れ 0.2 程度で目標音に対して追従できる能力があることが確認された。また、最初と最後の 5 試行の比較により、被験者 5 人全員に誤差の減少が見られたことから、間の 110 試行の経験により、速いターゲットを追うことに対する汎化能力が身に付いたことが示唆される。

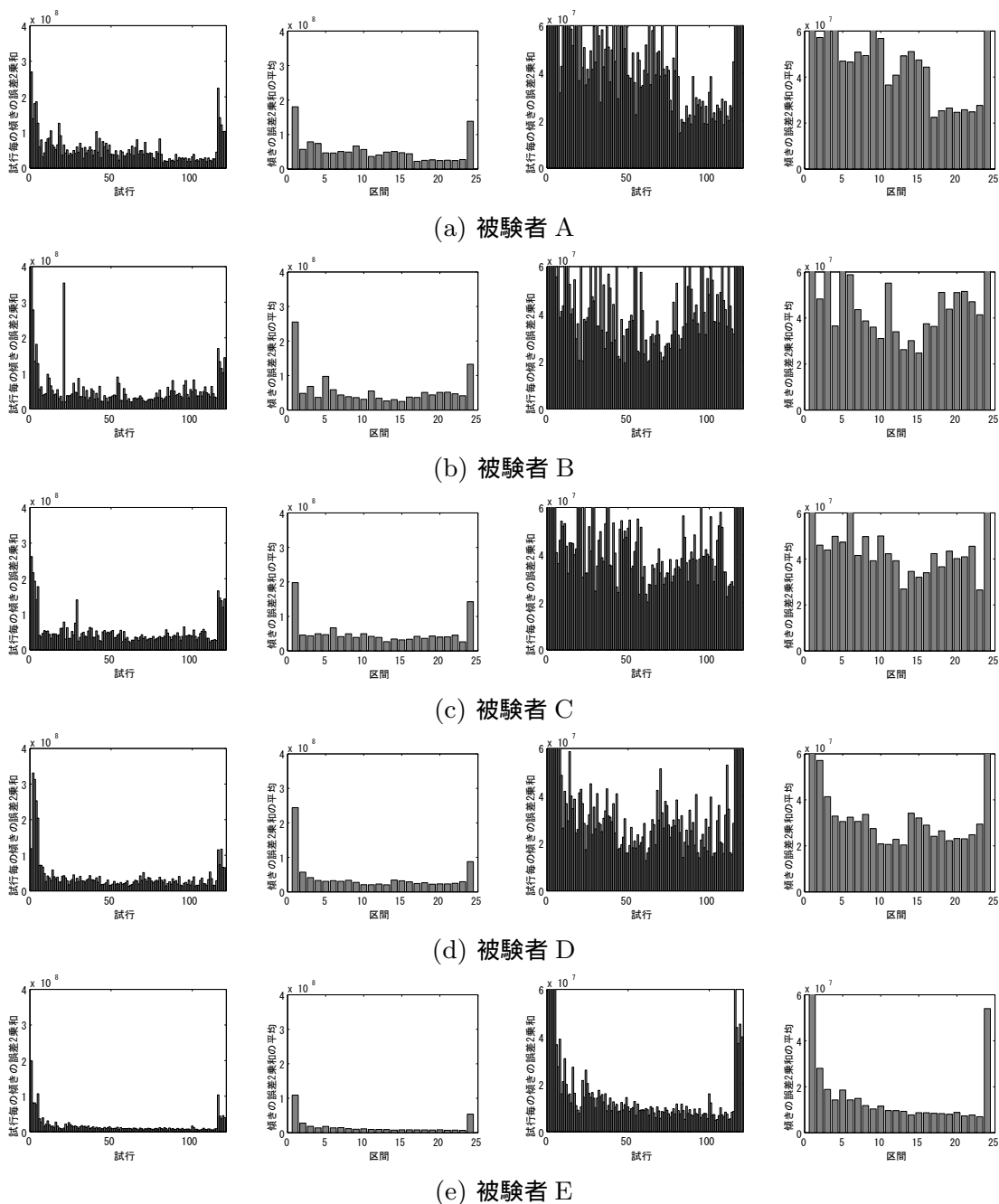
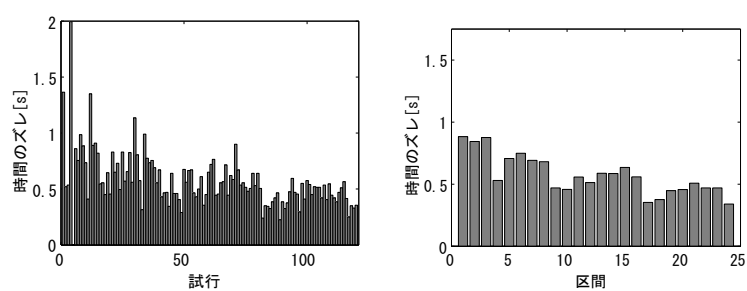
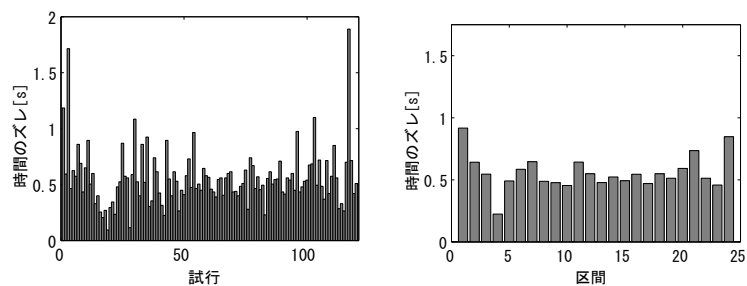


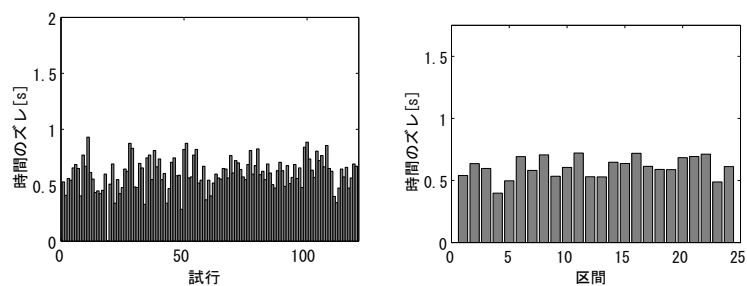
図 3.7 微係数の誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]



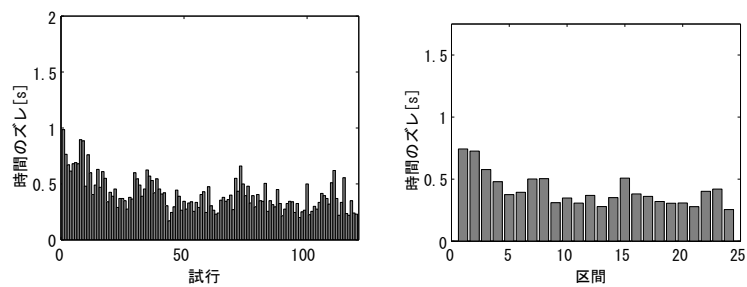
(a) 被験者 A



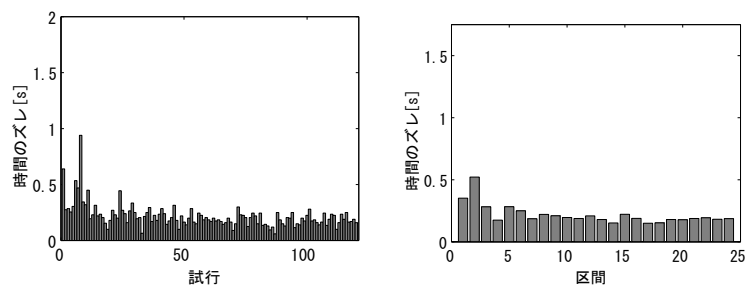
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

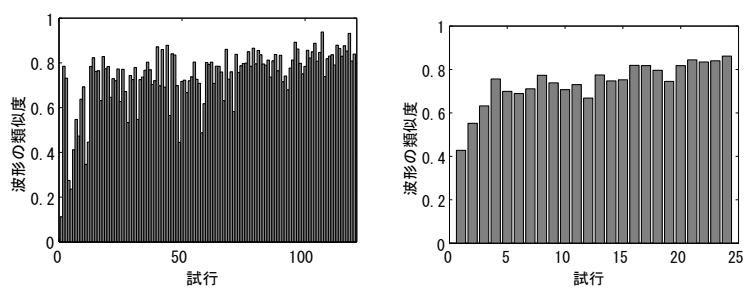


(d) 被験者 D

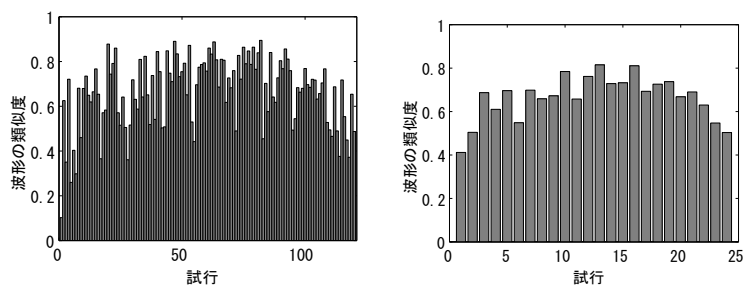


(e) 被験者 E

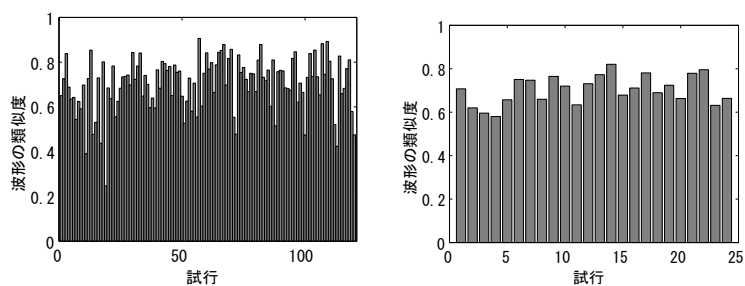
図 3.8 微係数の時間のズレ



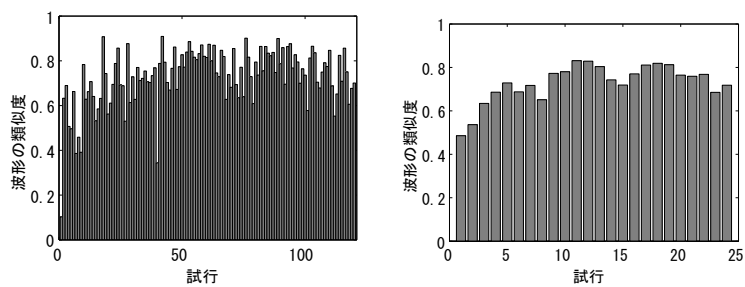
(a) 被験者 A



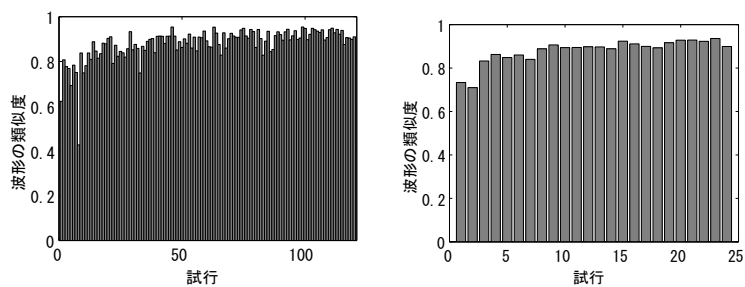
(b) 被験者 B



(c) 被験者 C



(d) 被験者 D



(e) 被験者 E

図 3.9 微係数の波形の類似度



音の高さの変化に対して、絶対的な音の高さに追従するのではなく、変化に対して追従する特性がある可能性が見出されたため、そこでトラッキングデータの微係数を求めて誤差の減少がより顕著に見られるかを検証を試みた。その結果、一部の被験者で実験日によって微係数のパフォーマンスに大きな差が生じていることが分かったが、全体的に微係数を取る前と後とに特に大きな差異は認められなかった。本実験の被験者はいずれも絶対音感を持っていないが、絶対音感を持つ人ではどのような特性が得られるのか興味深い点である。

## 第 4 章

# 手本がある場合の支援効果

### 4.1 目的

本章では、手本となる運動を模倣する状況を想定し、あとかじめ提示された目標音と同じ音を再現する課題を用いて実験を行った。

新しい運動を学ぼうとする際には、熟達者や上級者を手本とし、その動きを真似て練習する。例えば、教則ビデオを見ながら練習することがあるが、この場合、映像という視覚情報を元に自分の体を動かすことになる。本章の実験では、このような状況において映像を音に変えた場合のことを考える。これは、学習者が聴覚フィードバックを受ける状況下で、手本となる音を目標に、学習者が聴覚フィードバックを頼りにして運動を修正するという場面であると言える。つまり、提案手法が可能であるならば、手本が出力する聴覚フィードバックを目標として、学習者が自身の聴覚フィードバックを頼りに運動を上級者に近づけることが可能になるはずである。

前章の場合は、ターゲット音を聞きながら、運動に応じて変化するカーソル音でそれ追いかけるというタスクであったが、本章のタスクは、一度目標音を聞いて、その後その音を再現するように身体を動かす、というのが違いである。

本章では、聴覚フィードバックとの対比を行うために、視覚フィードバックの条件を設定して併せて実験し、聴覚フィードバックとの違いについても考察する。

### 4.2 実験方法

実験課題は、目標音が提示された後に、それを再現するようにマウスを動かすというものである。

目標音は長過ぎると記憶しきれず、目標音の再現が困難になる可能性があるため、時間を 1.5 秒と短く設定した。ターゲットの変化の方法は、0.06, 0.11, 0.13, 0.25, 0.33 Hz

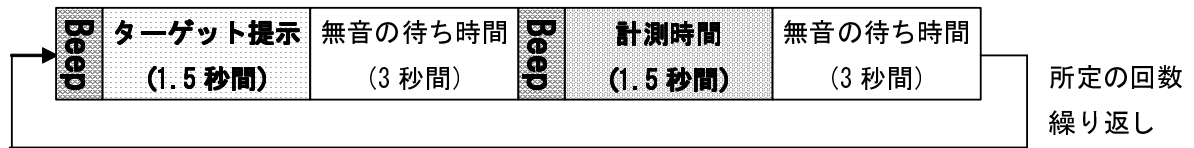


図 4.1 実験の流れ

の 5 つの周波数を組み合わせて生成した。スタート位置を合わせるために、最初の 0.5 秒は 660Hz の一定の高さで、次の 0.5 秒間で徐々に振幅が大きくなり、残りの 0.5 秒間で周波数の変化量が定常に達するようにした。振幅は一定とし、目標音を試行毎に変化させる場合は位相をランダムにすることで異なる波形が出るようにした。

1 試行は図 4.1 に示したような流れに設定した。1.5 秒の目標音の後、3 秒後の待ち時間の後に、マウスを使って目標音を再現する計測区間を設定した。この計測区間はターゲットの時間と同じ 1.5 秒である。スタートする音の高さは目標音のスタート時の音の高さと同じく 660Hz とし、計測区間に入る直前にマウスの相対位置を 660pixel にセットした。被験者には計測区間中にマウスを左右に動かすことで目標音と同じ音を再現することを課した。この際の音の提示方法は 2.4.3 で述べた方法と同じである。計測区間の後、3 秒間の待ち時間の後に再び目標音が提示される。ここまでの一連の流れが 1 試行で、被験者にはこの試行を計 40 回に渡って繰り返してもらった。

開始を示す合図として、目標音の前には矩形音状のピープ音を 2 回、計測区間の前には 1 回鳴るようにし、提示されている音が目標音なのか計測区間の音なのかがわかるようにした。なお、それぞれ矩形波音が提示される回数は異なるが、2 つの環境を極力同じにするためにピープ音の長さ自体は 0.4 秒になるように揃えた。

以上の設定は聴覚フィードバック条件のものである。本章では、視覚フィードバック条件でも実験を行った。基本的な流れは、フィードバックの方法を 2.4.4 で述べた方法に従って、聴覚フィードバックを視覚フィードバックに置き換えて条件を設定した。すなわち、聴覚フィードバック条件における 660Hz の音は、視覚フィードバック条件では 660pixel の位置に対応する。開始音を提示するためにヘッドホンを装着した状態で実験を行った。

被験者は聴覚フィードバック条件、視覚フィードバック条件でそれぞれ 6 名ずつ、計 12 名を対象に行った。さらに、6 名の被験者を 2 つの条件に分け、一方の 3 名は 40 試行すべてに同じターゲットを提示し、もう一方の 3 名は最初の 20 回は違うターゲットを提示した。ターゲットの生成は位相を乱数を振ることで表現し、同じターゲットの場合は毎回同じ乱数を使って同じ波形を表現した。また、すべての被験者に対して同じ目標音の動きを与えた。なお、20 試行が終わった時点で小休止を挟んだ。聴覚フィードバック条件の被験者には、視覚の影響を排除するために、実験中にアイマスクを装着した状態で実施

表 4.1 実験条件

	毎回同じターゲット	前半の 20 回は毎回異なるターゲット
聴覚フィードバック	3 名	3 名
視覚フィードバック	3 名	3 名

した。

設定条件の違いを表 4.1 にまとめた。なお、視覚フィードバック条件で毎回同じターゲットを提示した被験者 3 名のうち 2 名 (被験者 12 名 A~L のうちの被験者 H,I) は、聴覚フィードバック条件の予備実験に参加してもらっている。

## 4.3 結果

### 4.3.1 時間波形

10,20,30,40 試行目を抜粋した計測データを図 4.2,4.3 に示す。図 4.2 が聴覚フィードバック条件のカーソル音の周波数の時間変化で、図 4.3 が視覚フィードバック条件のカーソルの位置の時間変化である。細線がターゲットデータで、太線が計測データを表す。

立ち上がり時間に注目すると、殆どの試行では計測データが波形データに対して先行している。波形全体でみた場合では、試行毎にターゲットより先行している場合や、遅れている場合があることが見受けられる。

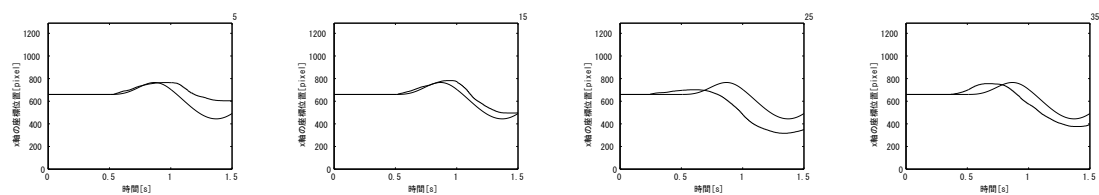
### 4.3.2 誤差 2 乗和

試行毎の誤差 2 乗和を図 4.4,4.5 に示す。

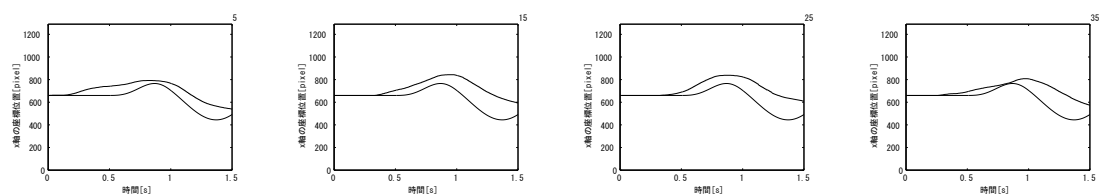
聴覚フィードバック条件では、被験者 A,D,E,F で誤差の減少が見られる。被験者 D,E,F は、最初の 20 試行を異なるターゲットを模倣しているが、被験者 E,F については、同じターゲットを追うタスクに変わっても、パフォーマンスが維持されている。被験者 D は悪化が見られるが、被験者 D,E,F の 21~40 試行の誤差は、被験者 A,B,C の 1~20 試行の誤差と同等かそれより小さい誤差である。また、被験者 B,C に関しては誤差の減少は認められない。

視覚フィードバック条件では、被験者 G,H で誤差の減少が見られるが、被験者 I,J,L については誤差の減少は認められず、被験者 K に関しては誤差が増加傾向にある。

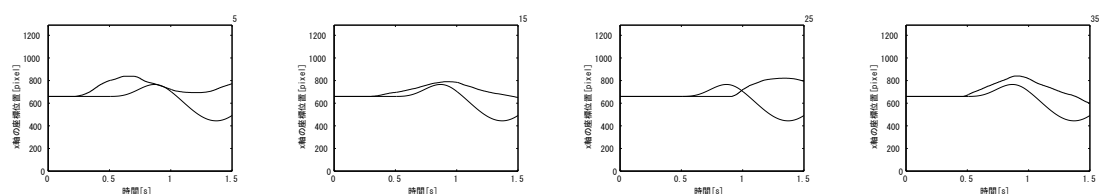
聴覚フィードバック条件と視覚フィードバック条件の比較をすると、誤差の幅は被験者に依存していることが分かる。最後の 5 試行の平均に注目すると、最良なパフォーマンスを示しているのは、聴覚フィードバック条件の被験者 E である。全体的にも聴覚フィー



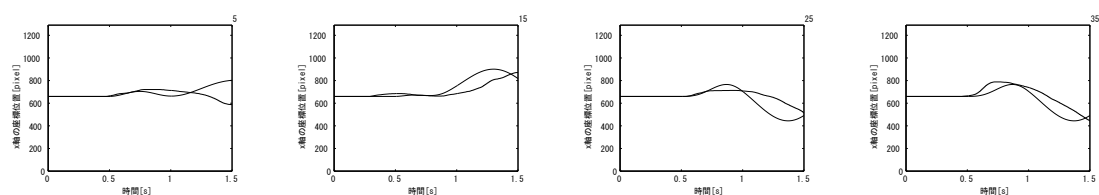
(a) 被験者 A



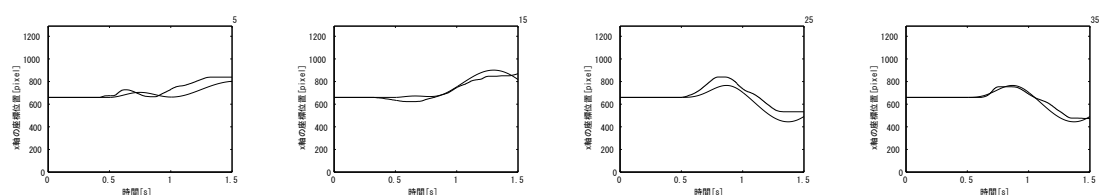
(b) 被験者 B



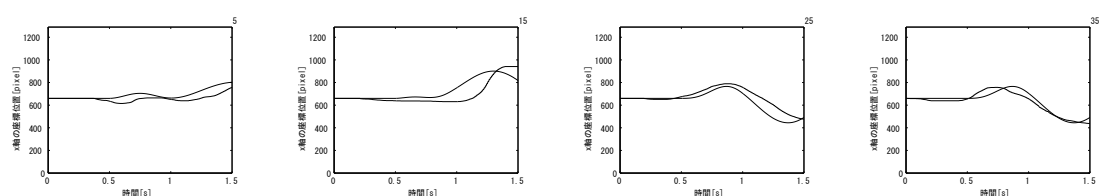
(c) 被験者 C



(d) 被験者 D

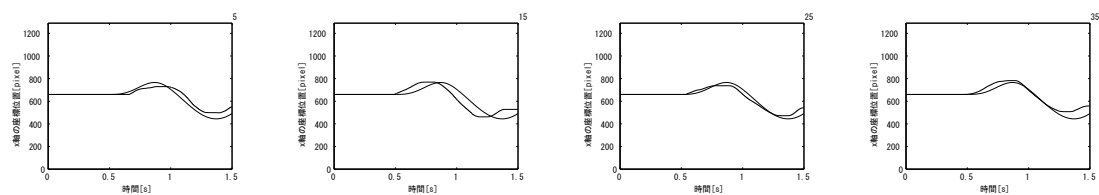


(e) 被験者 E

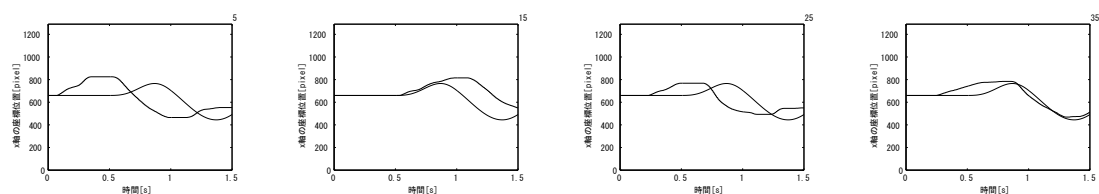


(f) 被験者 F

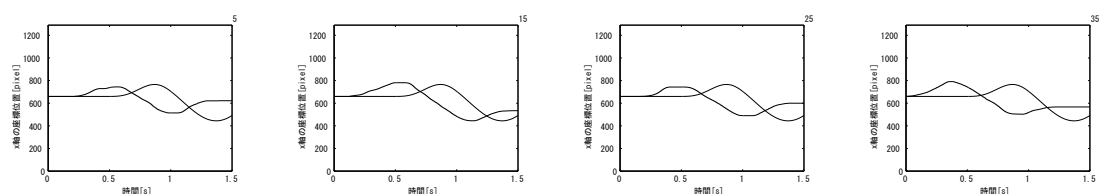
図 4.2 聴覚フィードバック群の時間波形



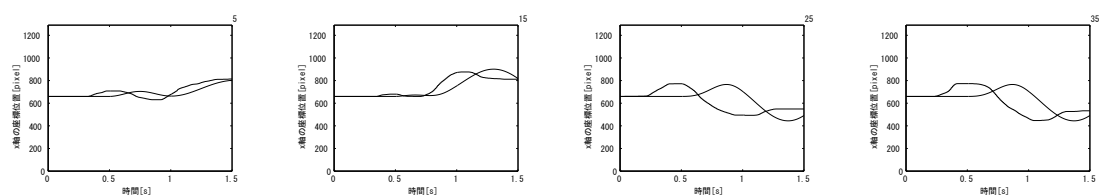
(g) 被験者 G



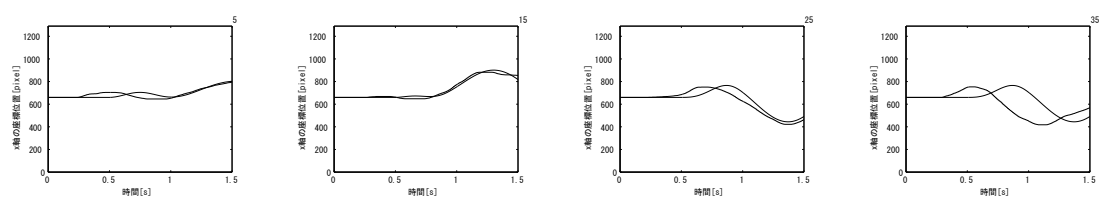
(h) 被験者 H



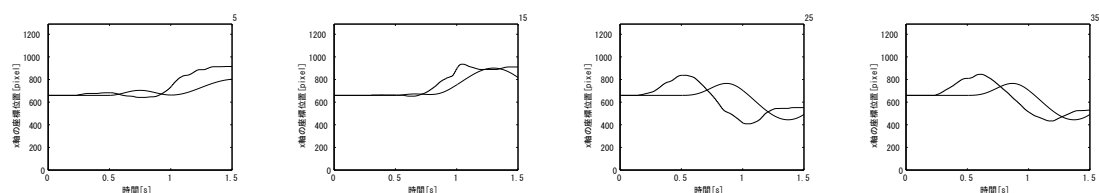
(i) 被験者 I



(j) 被験者 J



(k) 被験者 K



(l) 被験者 L

図 4.3 視覚フィードバック群の時間波形

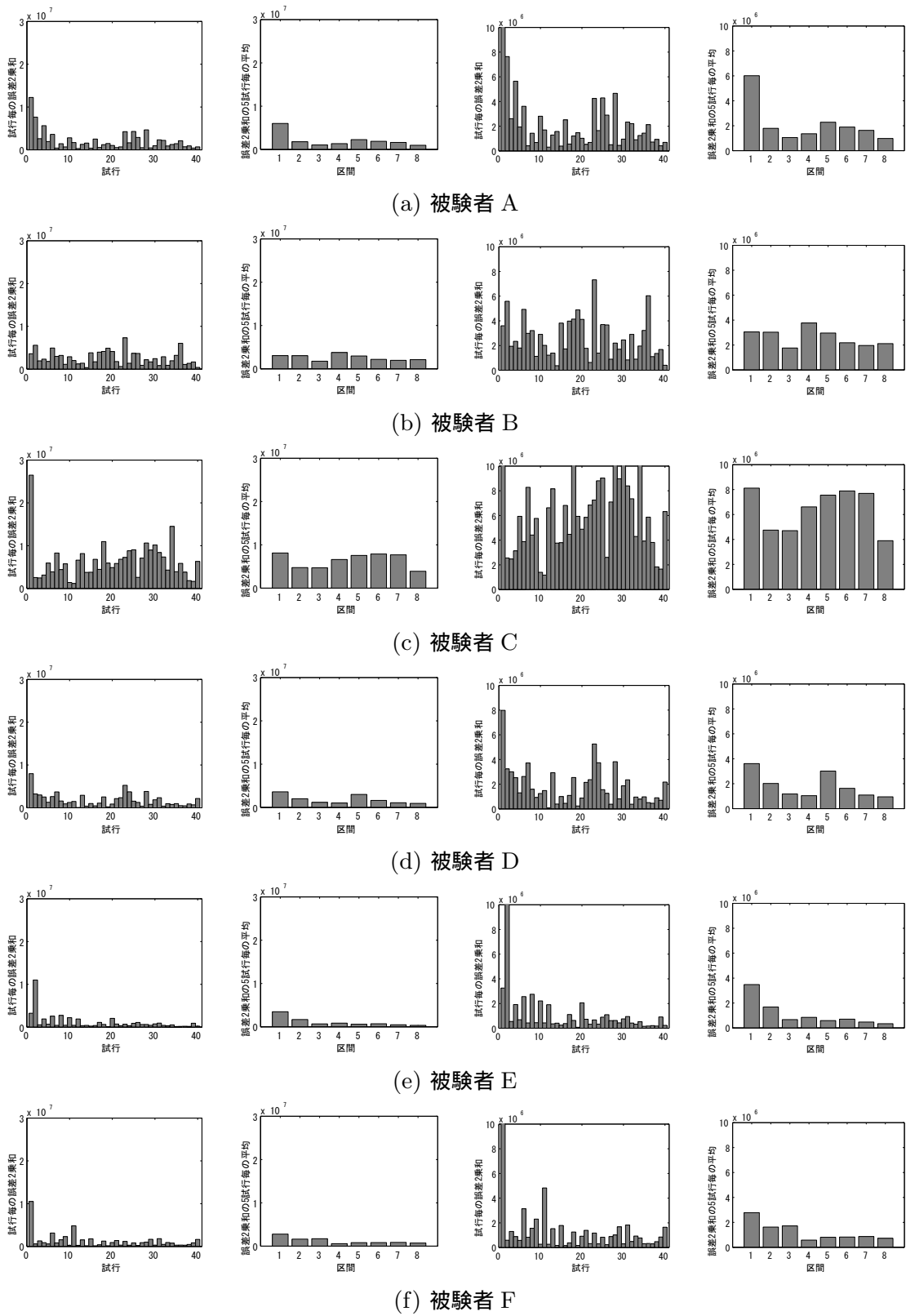
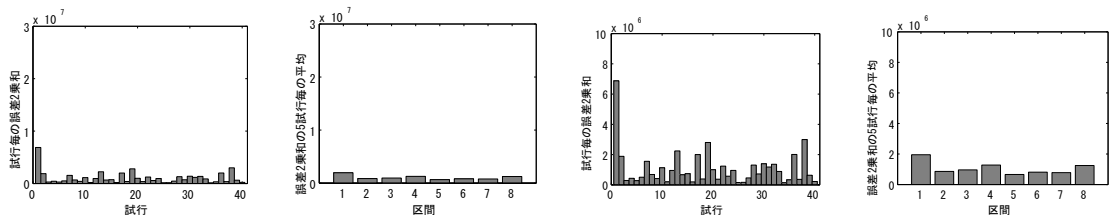
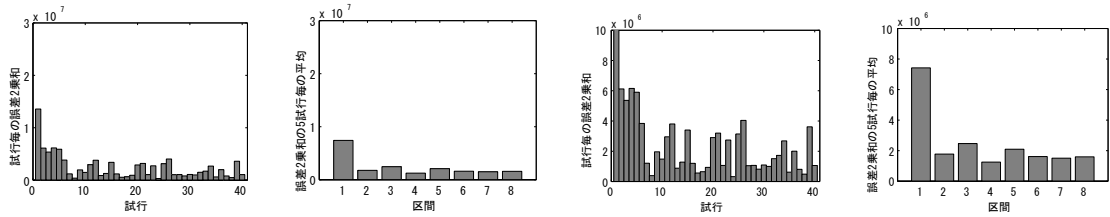


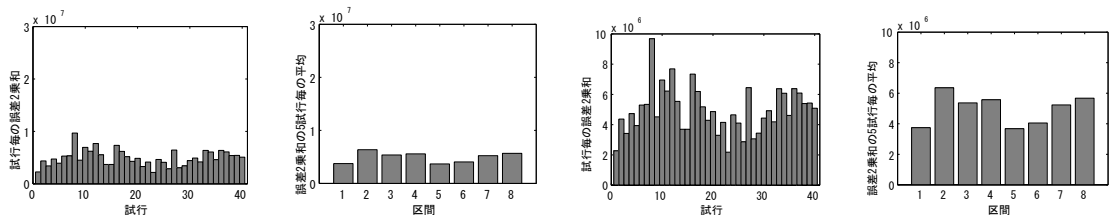
図 4.4 聴覚フィードバック群の誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]



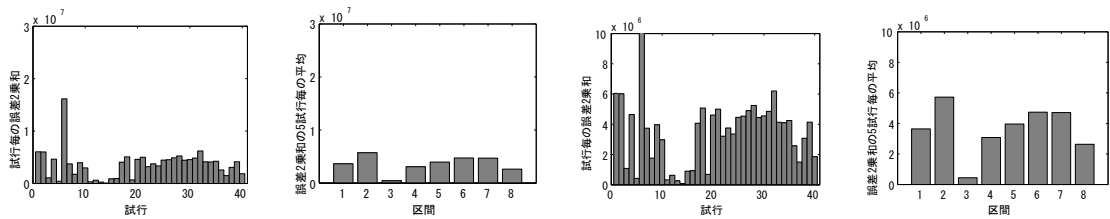
(g) 被験者 G



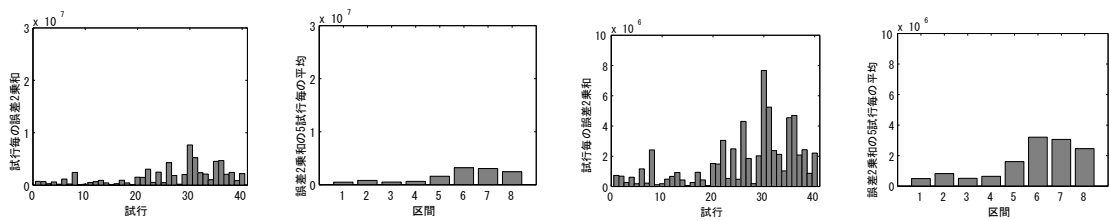
(h) 被験者 H



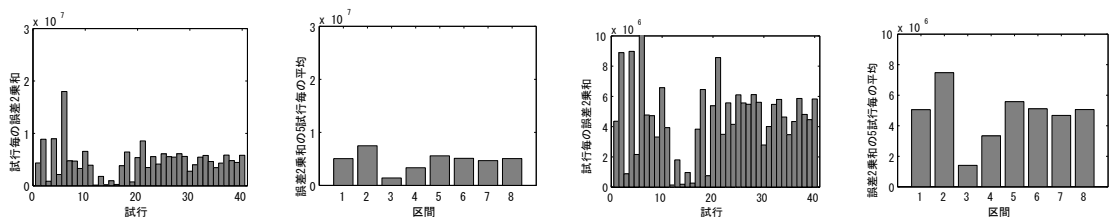
(i) 被験者 I



(j) 被験者 J



(k) 被験者 K



(l) 被験者 L

図 4.5 視覚フィードバック群の誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]



ドバック条件の方が誤差が小さいことが認められる。

### 4.3.3 相互相関関数

相互相関関数により算出した時間のズレを図 4.6,4.7 に示す。

時間のズレは、相互相関関数の $-0.5 \sim 0.5$ [s]のずらし時間の間のピークをそれとみなした。

聴覚フィードバック条件では、被験者 A,D,E,F が試行を経る毎に時間のずれが小さくなっていることが見受けられる。最初の 20 回で違うターゲットを追っている被験者 D~F のうち、被験者 E,F では後半 20 試行の時間のズレが小さい。被験者 D は 20 試行台の前半で 2 回ほど大きな遅れが生じているが、その後は遅れが小さくなっている。

視覚フィードバック条件では、すべての被験者 6 名でターゲットより計測データに先行の傾向があることが見受けられる。特に、被験者 J,K,L は同じターゲットを再現している 21~40 試行でその傾向が強く現れている。違うターゲットを再現している 1~20 試行において、被験者 J,L は時間のズレのばらつきが大きい。

### 4.3.4 移動開始点のズレ

ターゲットの長さの 1.5 秒中、最初の 0.5 秒は一定となっているが、4.3.1 の結果から、ターゲットと計測データの移動開始点にばらつきが見られた。そこで、ターゲットの移動開始点に対する計測データのズレを試行毎に観察する。その結果を図 4.8,4.9 に示す。

視覚フィードバック条件の被験者 G 以外は、条件によらず、ターゲットに対して先行して立ち上がる傾向がある。

相互相関関数により求めた波形全体で見た時間のズレを示す図 4.6,4.7 と比較すると、聴覚フィードバック条件の立ち上がり点はターゲットに対して先行する傾向があるものの、波形全体で見た場合の時間のズレはそのような傾向は現れていない。

### 4.3.5 立ち上がり点を揃えた場合の誤差 2 乗和

ターゲットと計測データの立ち上がり点を揃えた場合の誤差 2 乗和を図 4.10,4.11 に示す。なお、このデータは立ち上がり点を揃えたことによる試行毎のデータ数の違いを埋めるために、誤差 2 乗和をデータ数で割って平均化を施した。

聴覚フィードバック条件においては、被験者 E 以外明確な誤差の減少が見られない。条件間で比較すると、全体的に聴覚フィードバック条件に比べ、視覚フィードバック条件の方が誤差が小さい。

これらの傾向は、図 4.4,4.5 で示した、開始点を揃えない状態での誤差 2 乗和では確認

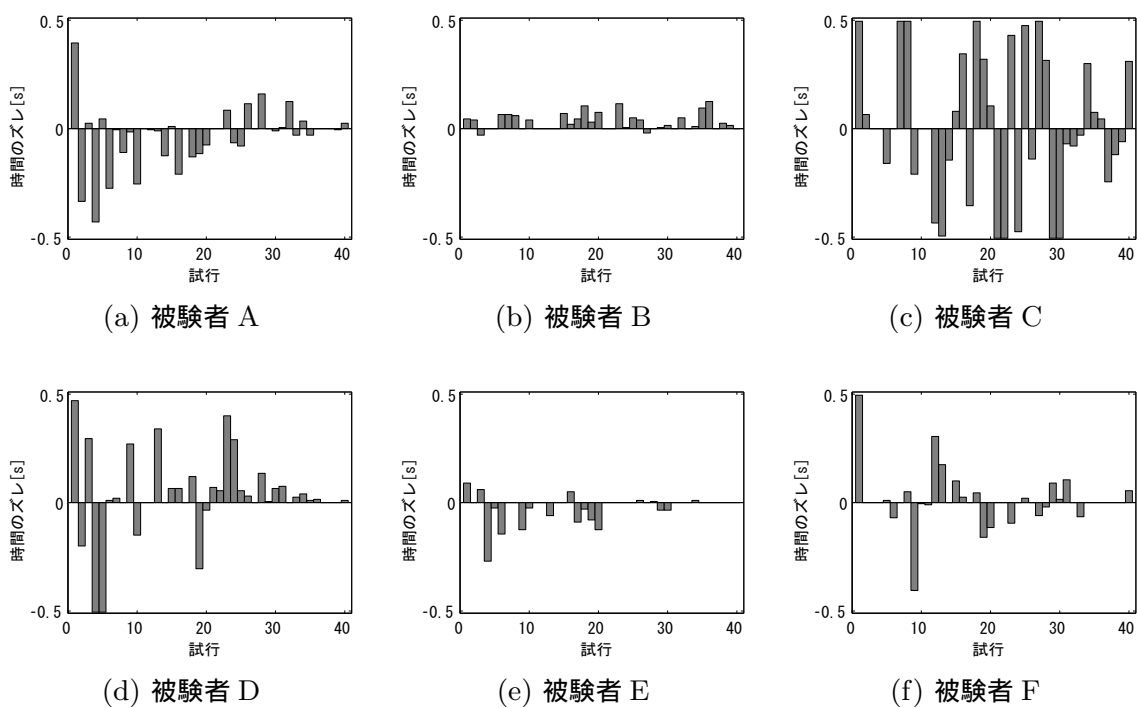


図 4.6 聴覚フィードバック群の時間のズレ

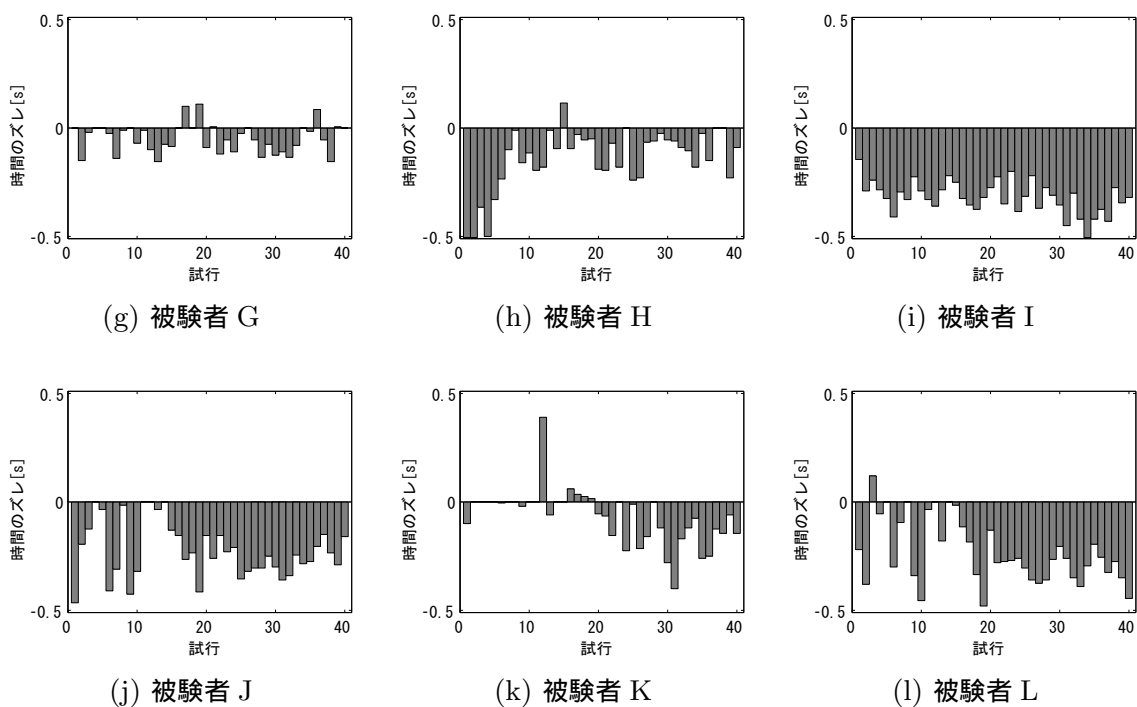


図 4.7 視覚フィードバック群の時間のズレ

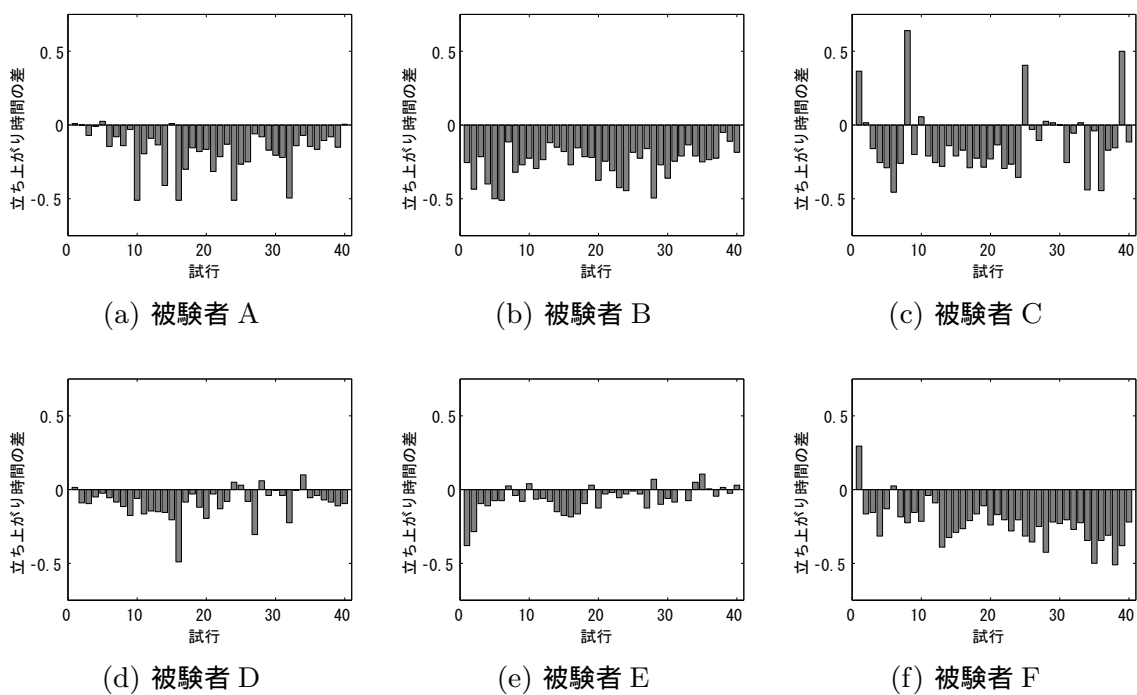


図 4.8 聴覚フィードバック群の移動開始点のズレ

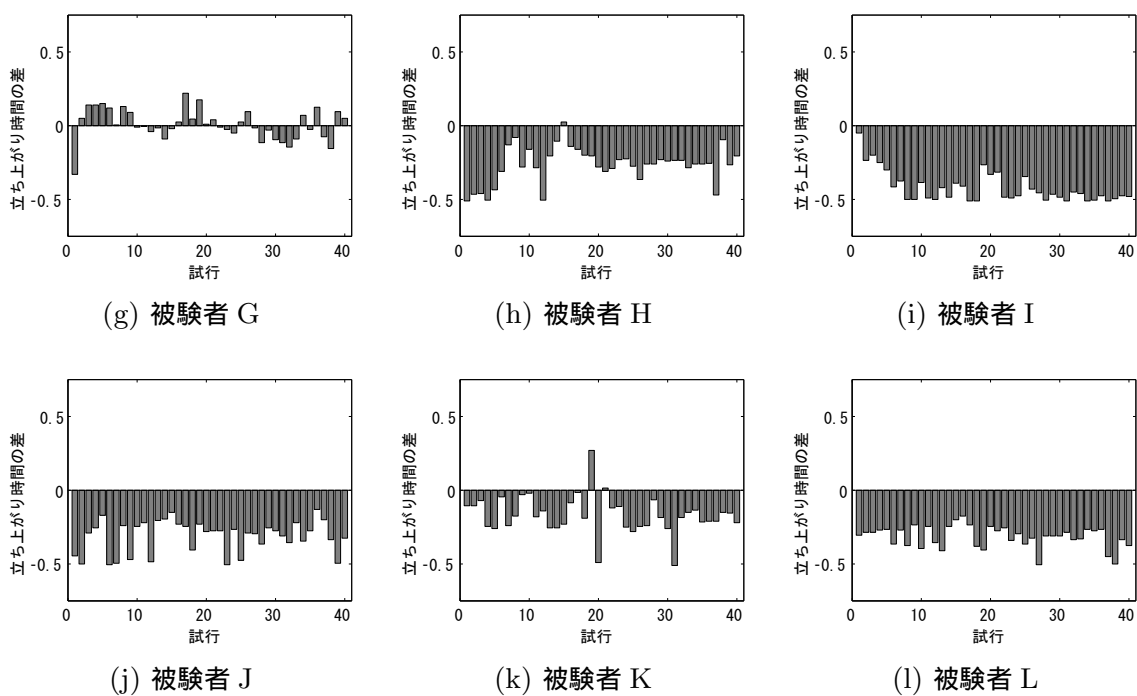


図 4.9 視覚フィードバック群の移動開始点のズレ

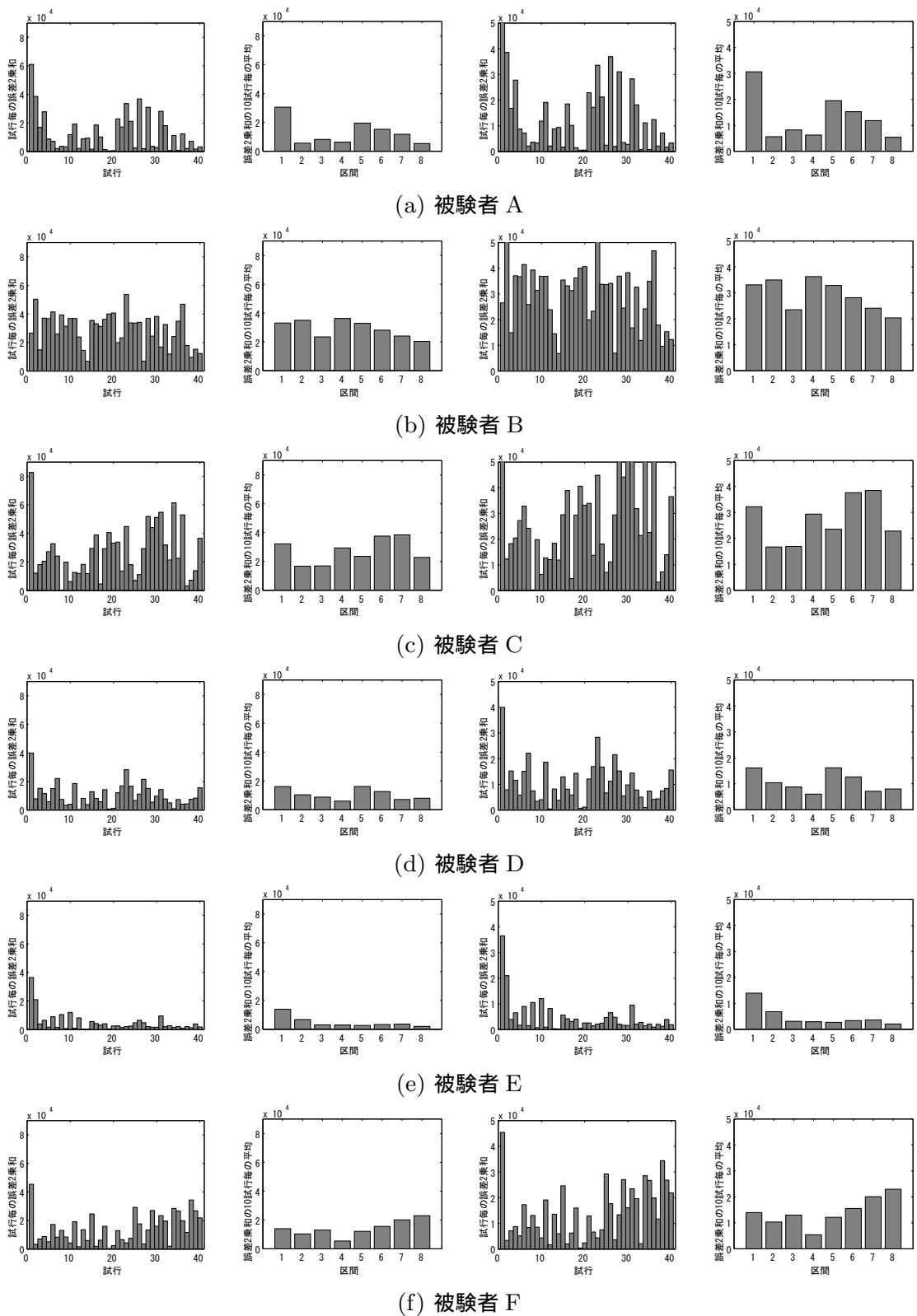
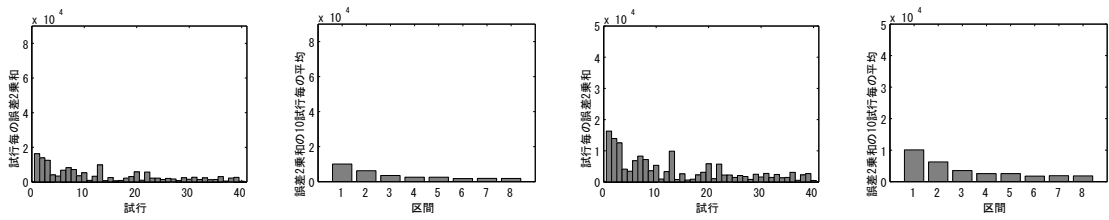
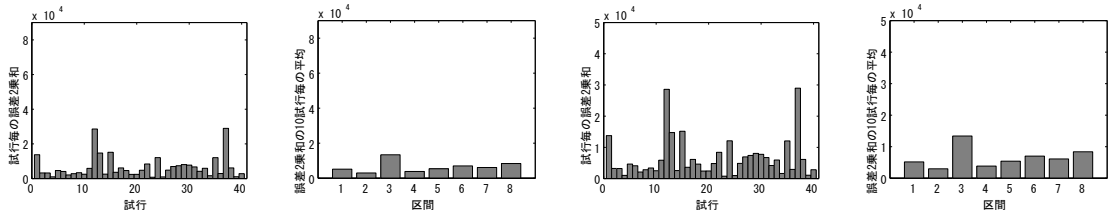


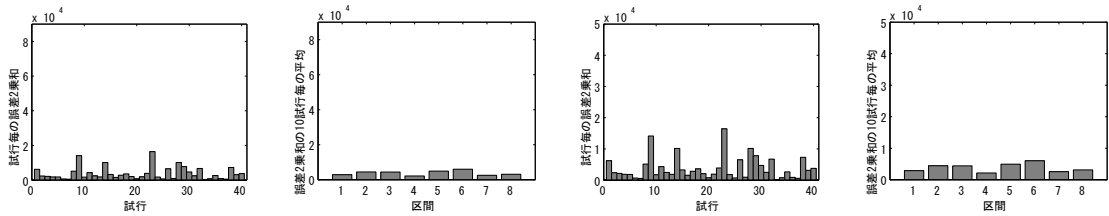
図 4.10 聴覚フィードバック群の立ち上がり点をそろえた場合の誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]



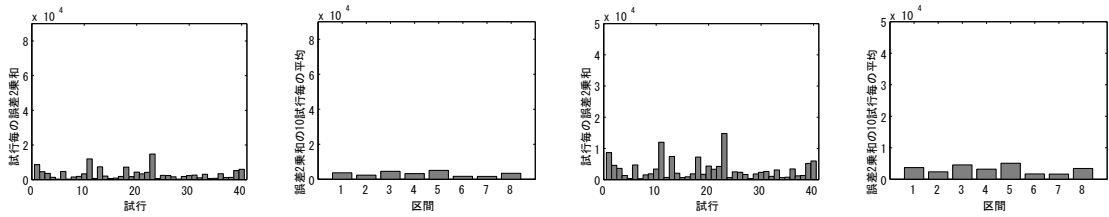
(g) 被験者 G



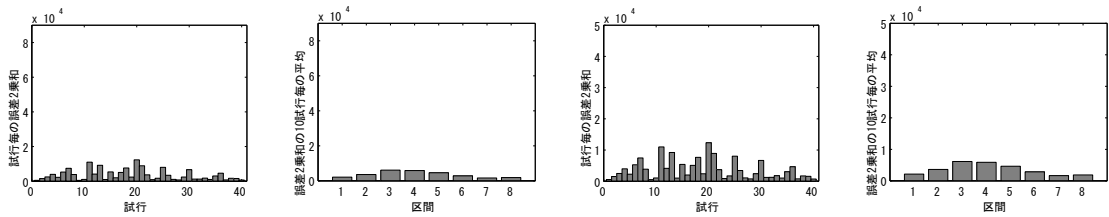
(h) 被験者 H



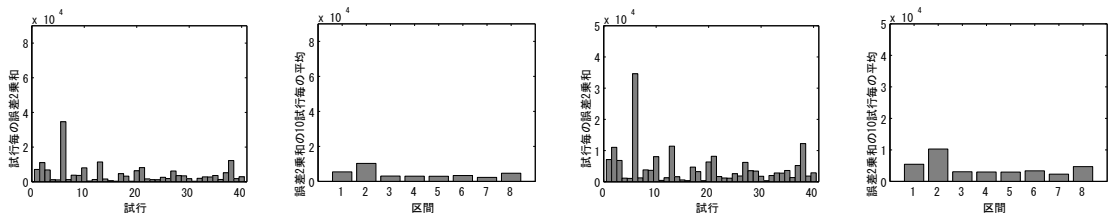
(i) 被験者 I



(j) 被験者 J



(k) 被験者 K



(l) 被験者 L

図 4.11 視覚フィードバック群の立ち上がり点をそろえた場合の誤差 2 乗和 [1,2 列目と 3,4 列目はスケールが異なる] [2,4 列目は 1,3 列目の 5 試行毎の平均]

されなかった傾向である。

## 4.4 考察

誤差 2 乗和の結果より、聴覚フィードバック条件で、誤差の減少が 6 名中 4 名で確認された。視覚フィードバック条件では、6 名中 2 名で誤差の減少が確認された。

聴覚フィードバック条件の被験者間において、前半の 20 回で違うターゲットを追った被験者 D~F の後半の 20 回の試行が、同じターゲットを追う被験者 A~C の前半 20 回の誤差より小さい傾向があることが確認された。このことは、違うターゲットを追うという 20 回のタスクによる練習の効果が得られたものと考えられる。

試行毎の誤差の大きさは、条件の違いによる影響よりも、被験者の違いによる影響の方が大きいことが確認された。一方で、移動開始点を揃えた場合では、聴覚フィードバック条件より視覚フィードバック条件の方が誤差が小さい。

相互相関関数により求めた時間のズレの結果より、視覚フィードバック条件は全体的に先行の傾向があり、特に同じターゲットを追うタスクにおいてその傾向が顕著に見られた。一方で、移動開始点に着目すると、フィードバック条件によらず、ターゲットに対して先行する傾向が得られた。その際の誤差 2 乗和は、聴覚フィードバック条件より視覚フィードバック条件の方が小さい傾向であった。

これらの結果より、時間的な評価を差し引いた場合の誤差は視覚フィードバック条件の方が優位であるが、時間的な評価を含めた場合の誤差は条件間で差が出ないと考えられる。このことから、聴覚フィードバック条件では視覚フィードバック条件に比べて手本の動きのタイミングを正確に再生できることが示唆される。

ただし、本実験で用いた 1.5 秒のターゲットは最初 0.5 秒の静止区間の部分で、被験者によってそれを無視している可能性が否定できない。この影響が結果として、先行の傾向を示すものとして出た可能性がある。しかし、条件間で時間のズレを比較した際に視覚フィードバック条件の先行の傾向が強く出たのは、この影響だけを受けているとは考えにくい。この問題を避けるために、静止している時間も含めて再現するというタスクに設定したり、静止時間をランダムにするなど条件を織り込んで実験を行えばこれらのことが明確に抽出されることが期待できる。

## 第5章

# 手本がない場合の支援効果

### 5.1 目的

本章では、手本となる運動が明示されない状況下における聴覚フィードバックの運動学習の支援効果について調べる。

実験では、目標軌道が明示的に与えられず、代わりに運動の成績が与えられる状況を設定した。具体的に、仮想の目標軌道を設定し、被験者にその軌道に近くなるよう運動を繰り返してもらった。この時、被験者の運動を計測し、理想軌道との比較を行って、パフォーマンスの判定を行い、数値化して運動後に提示する。被験者は試行毎に試行錯誤的に最適な軌道を探る。

そして、被験者毎に、聴覚フィードバックを行うグループ、視覚フィードバックを行うグループ、何もフィードバックしないグループに分け、それ以外の条件を同じにして目標軌道の探索を課す。

提案手法が成立するのであれば、2.1 で述べたような効果により、何もフィードバックしない状態と比較して、パフォーマンスの向上の速度が速い傾向が見られるはずである。

### 5.2 実験方法

ターゲットは図 5.1 の波形に設定した。この波形が本章での実験の正解波形となる。ターゲットの提示方法は、マウスの座標位置をそれぞれの条件に合わせて、聴覚フィードバックについては 2.4.3、視覚フィードバックについては 2.4.4 で述べた提示方法をベースにして提示した。すなわち、最初の値は聴覚フィードバックの場合が 660Hz の高さ、視覚フィードバックの場合は 660pixel の位置となる。

評価値は、正規化相互相関関数の-0.25~0.25s 間のピークを基 100 倍し、小数点以下第一位を四捨五入した値をとった。このため、ピーク値が 0.995 以上の場合は 100 点が得ら

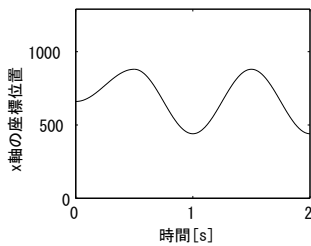


図 5.1 ターゲット軌道

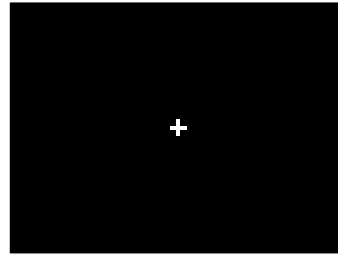


図 5.2 注視点

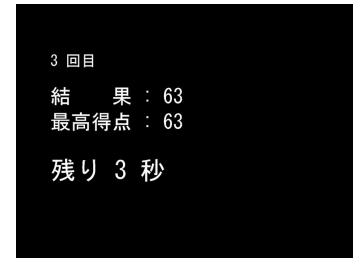


図 5.3 結果表示画面の例

れる。一方、相互相関関数の値がマイナス値の場合はターゲットに対して逆の動きをしていることになるが、本実験ではマイナスの場合は0点を示すようにした。なお、マウスを計測区間中ずっと静止させた場合も結果が0点になるようにした。

被験者はこの点数の値が良くなるようにターゲットを探索する。判定に相互相関関数を利用しているため、振幅の違いは判定値にあまり影響を及ぼさず、位相や波の数、波形が判定値の大きさを左右する。

計測時間はターゲットの時間と同じ2秒間で、計測時間に入る前に開始を示す合図として、矩形波音状のピーブ音を2回提示する。計測直後に判定値の計算を行うが、演算時間は1秒にも満たず、計測終了後すぐに表示される。結果の表示時間は5秒で、その間画面には、試行回数、判定結果、これまでの最高得点、待ち時間の残り秒数が表示される。結果表示画面の例を図5.3に示す。5秒の表示時間の後、次の試行に移る。

以上が1試行の流れで、これを計100回繰り返した。なお、50試行を終えたところで小休止を入れた。小休止の後、最高得点はリセットしたが、正解波形や判定方法は100回とも共通である。

被験者は、聴覚フィードバックグループ、視覚フィードバックグループ、フィードバックなしグループでそれぞれ3名ずつ、計9名を対象にした。被験者には、実験の流れと「毎試行毎に結果が良くなるようにマウスを動かして下さい」という情報、「判定方法はかなり厳しい」という情報を与えた。

聴覚フィードバックグループとフィードバックなしグループは視線を拘束するために、試行中は図5.2のような、画面中央の白い十字に視線を向けるように指示した。

## 5.3 結果

### 5.3.1 時間波形

10,20,40,60,80,100 試行目を抜粋した計測データの時間波形を図5.4, 5.5, 5.6に示す。図5.4が聴覚フィードバック条件のカーソル音の周波数の時間変化、図5.5が視覚フィードバック条件のカーソルの位置の時間変化、図5.6がフィードバックなし条件のマウスの



水平位置の時間変化を表す。細線がターゲットデータで、太線が計測データを表す。

被験者毎に振幅が大きく異なっていることが見受けられる。特に、被験者 B の振幅が小さく、被験者 A,G,H,I は測定対象の範囲である 0~1280pixel に達するまでマウスを動かしている。

波形的には、被験者毎に周期的な波形であったり、単調な増加や減少をさせたりと、様々に試行錯誤をしていることが見受けられる。被験者 K は 10 回目にしてすでに正解波形にかなり近い動作をしている。

### 5.3.2 評価値の推移

評価値の推移を図 5.7, 5.8, 5.9 に示す。破線がターゲットデータで、太線が計測データを表す。

聴覚フィードバック条件では、被験者 A が実験の後半から、被験者 B が前半から高いパフォーマンスを示している。一方、被験者 C は結果のばらつきが大きい。

条件間で比較すると、被験者 B,E,I は他の被験者と比べてパフォーマンスが高い。被験者 G はゆるやかなパフォーマンスの向上が見られ、被験者 A は 70 試行目付近から 90 点以上の結果が安定して出ている。被験者 C,H はある程度のパフォーマンスを出しているが、結果が大きくばらついている。被験者 F は 80 点以上の結果が出ていない。被験者 A,C,D,F,G,H は最初の 10 試行程度ではさほど変わらないパフォーマンスであるが、その後の結果は大きく異なっている。

### 5.3.3 誤差 2 乗和

試行毎の誤差 2 乗和を図 5.10, 5.11, 5.12 に示す。

被験者 F は誤差が増加している。この結果は評価値の変動が殆どなかったことに反している。

被験者 A,E,G は誤差が減少傾向にある。被験者 B は 15 試行付近から急激に誤差が落ちている。その他の被験者は試行回数ごとのばらつきが大きい。

## 5.4 考察

音響フィードバック条件の被験者において、3 名中 2 名の被験者にパフォーマンスの向上が認められた。パフォーマンスの向上具合は、条件の違いによらず、80 点以上の結果を出さず被験者もいるのに対し、開始から数試行で 90 点以上のパフォーマンスを出さず被験者がいるように、被験者毎に大きく異なった。実験開始直後で結果が大きく異なるのは、実験前に被験者が取ろうとしていた戦略の影響を受けていることが考えられる。また、実験開

始時にはさほど変わらない結果だったのに対し、試行の経過する毎に結果が大きく変わっているのは、被験者が結果から得る価値基準の違いが考えうる。例えば「80点」という結果に対して、被験者によって「周期はこれで良く、後は振幅を合わせるだけ」や「他に良い結果の出る周期があるのではないか」というような判断をするかが分かれることが考えられる。つまり、初期の行動と途中の行動の戦略による影響により被験者毎のばらつきが大きくなったと考えられる。

本実験では、評価値に相互相関関数を利用したが、この方法は時間のズレや波形の類似度の判定は厳しいが、振幅の判定には曖昧であるため、振幅を模索する行動に混乱を引き起こした可能性があることが考えられる。ひとつの結果から、タイミングや振幅の大きさを判別しなければならぬため、一方では振幅を一定にしながら周期を変え、一方では周期を一定にしながら振幅を変える、といった多くの探索が必要になる。さらに、例えば、1度正解に近い波形でトレースした場合に、位相のズレの判定の効果により、良好な結果が出なかったような場合には、その行動を再び取ることは考えにくいいため、さらなる混乱を招いたものであると考えられる。

以上の点から、被験者毎に結果が大きく異なったのは、探索空間が広く、判定方法が波形と時間のズレを両立して達成しなければならない反面、振幅は曖昧でも比較的良好な結果を出せることから、被験者の価値観の違いによる影響があったものと考えられる。条件の違いによる習熟度の違いも見られなかったことから、少なくとも本実験のような、正解軌道に到達するための手がかりが少なく、かつ、探索空間が広いタスクにおいては、聴覚フィードバックによる支援の効果を得ることは難しいと考えられる。

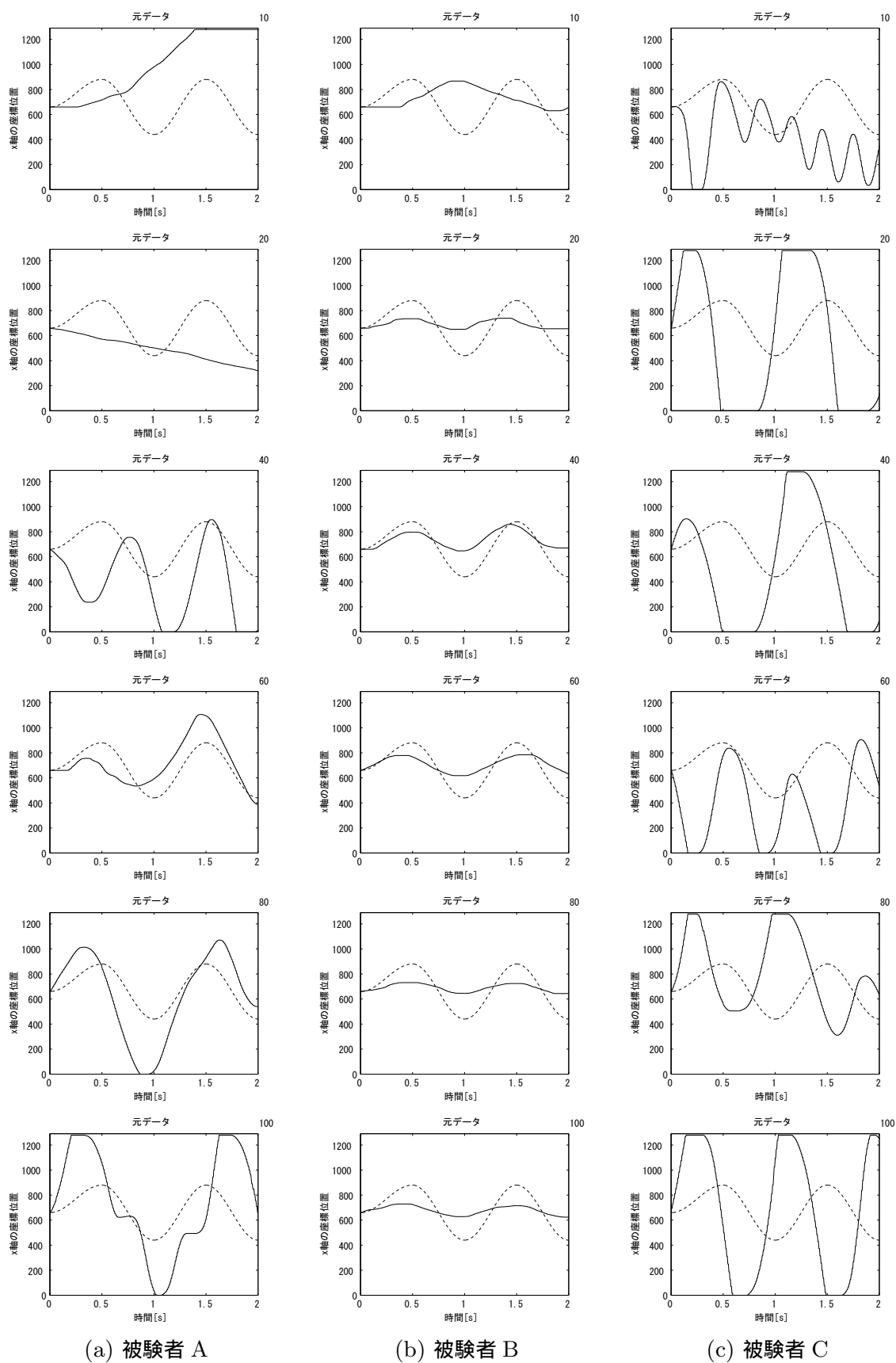


図 5.4 聴覚フィードバック群の時間波形

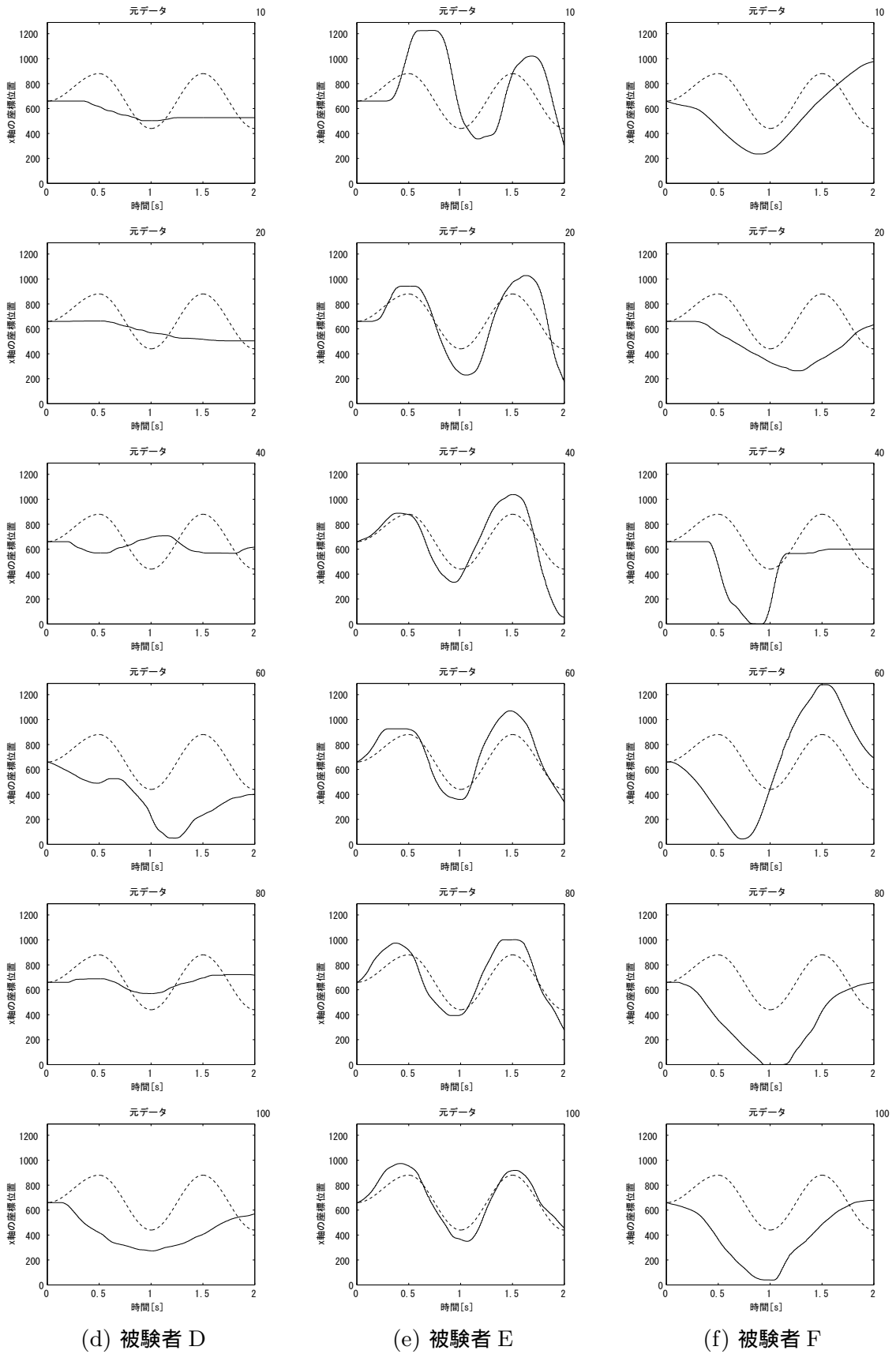


図 5.5 視覚フィードバック群の時間波形

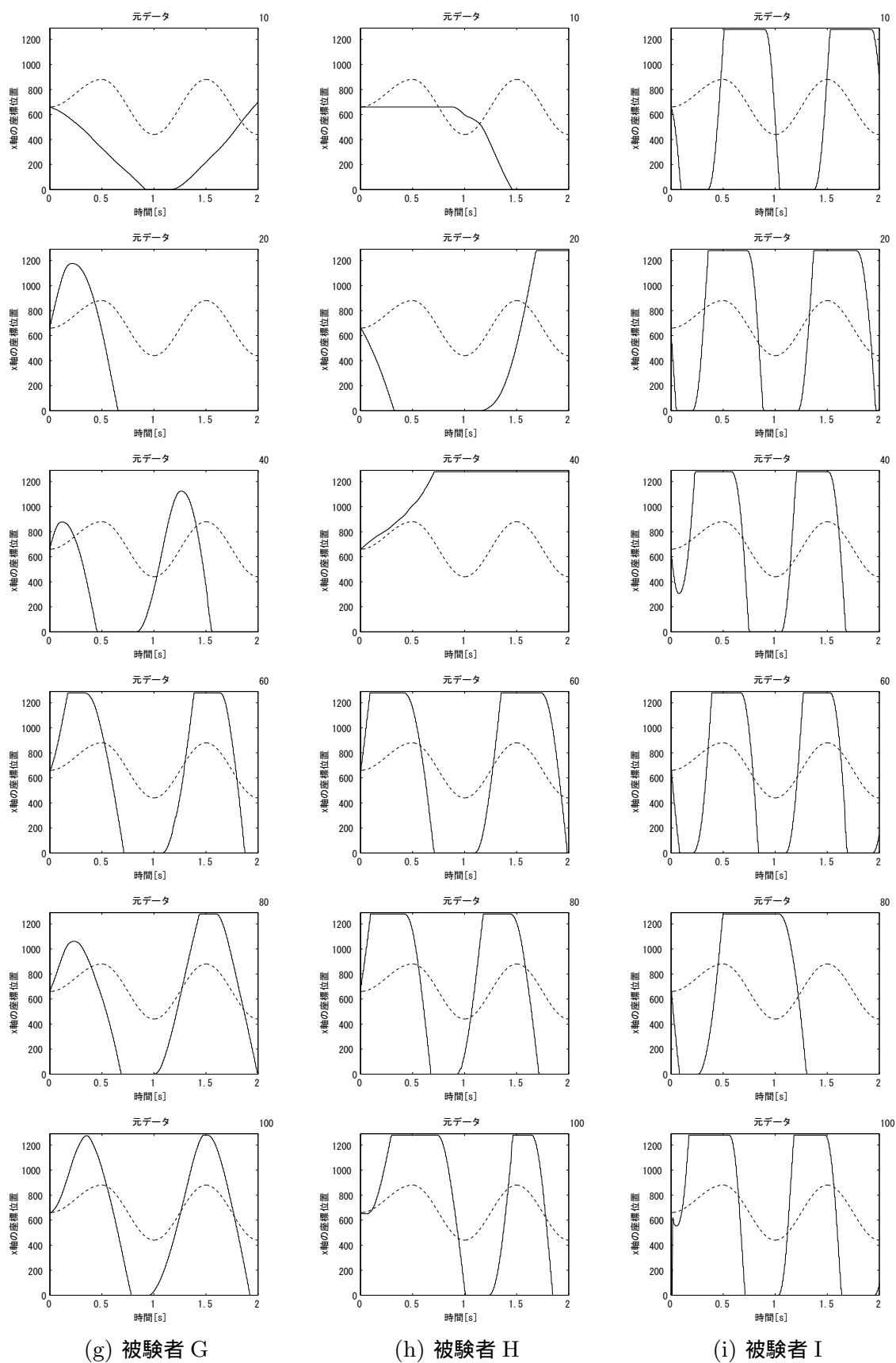


図 5.6 フィードバックなし群の時間波形

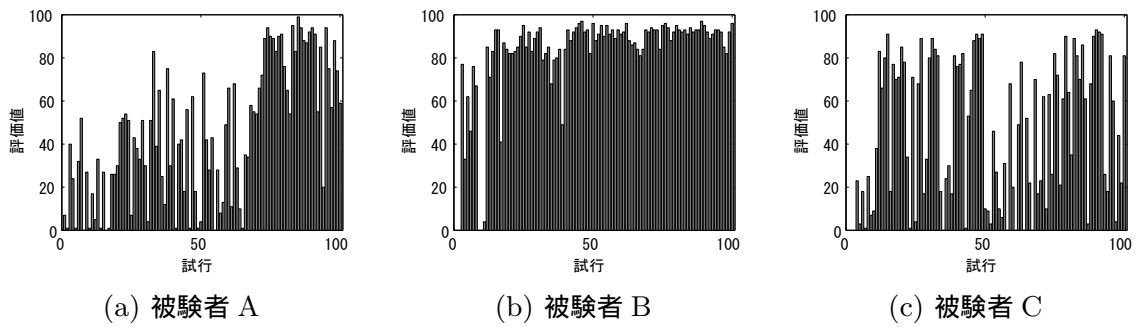


図 5.7 聴覚フィードバック群の評価値の推移

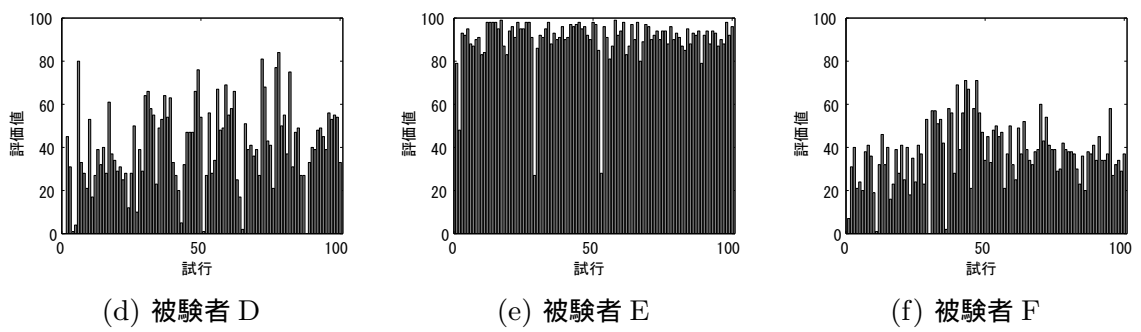


図 5.8 視覚フィードバック群の評価値の推移

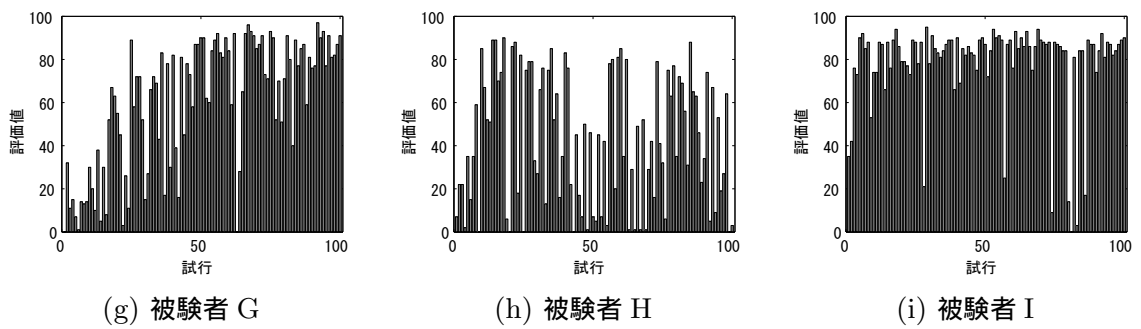


図 5.9 フィードバックなし群の評価値の推移

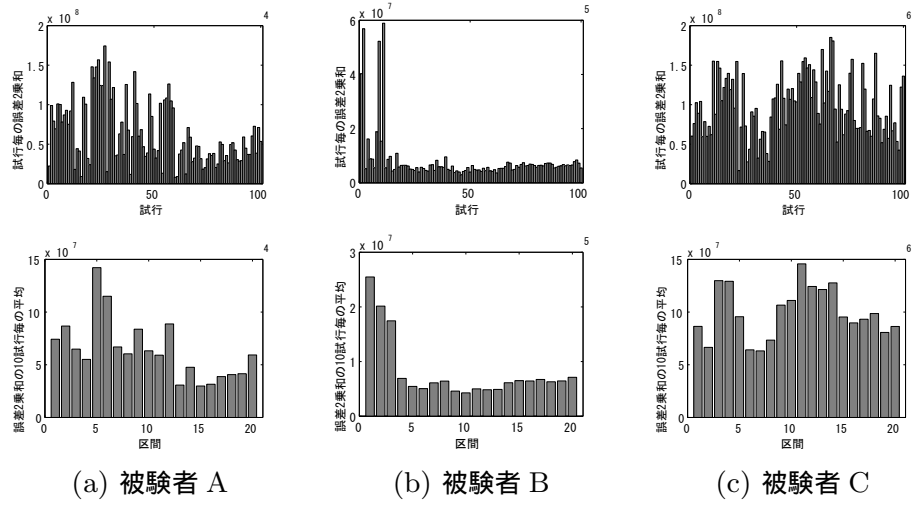


図 5.10 聴覚フィードバック群の誤差 2 乗和 [下段は上段の 5 試行毎の平均を表す]

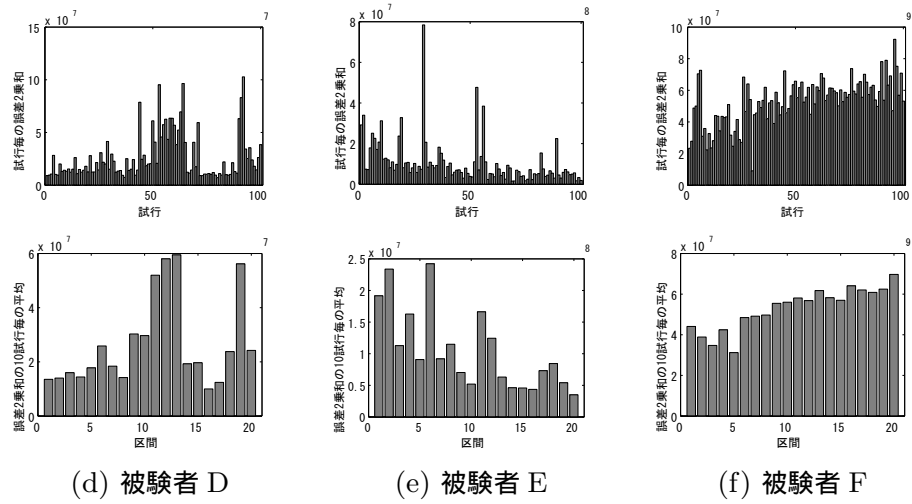


図 5.11 視覚フィードバック群の誤差 2 乗和 [下段は上段の 5 試行毎の平均を表す]

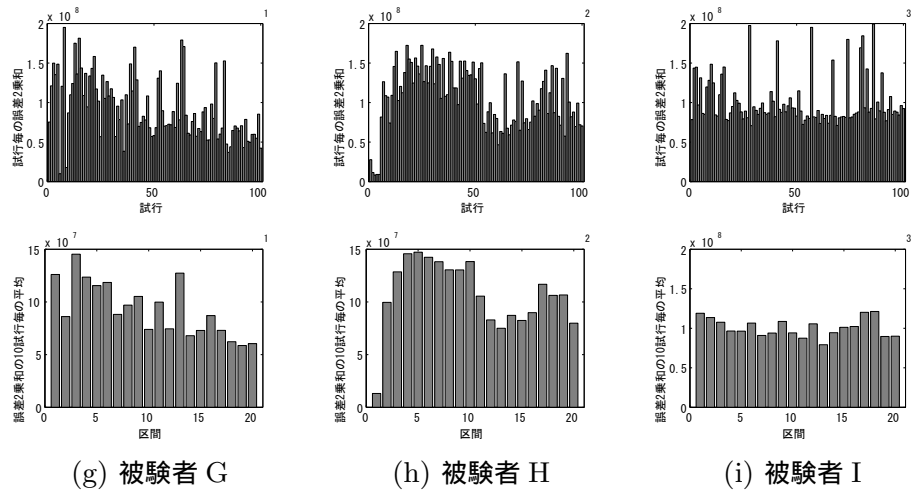


図 5.12 フィードバックなし群の誤差 2 乗和 [下段は上段の 5 試行毎の平均を表す]

## 第6章

# 結論

本研究では、身体の動きに関する情報を音に変換してフィードバックするという聴覚フィードバックにより運動学習の支援が可能であるかを、模倣すべき手本がある場合とない場合という2つの条件下で検証した。

本研究では、まず、支援の可能性を調べることに先立って、聴覚フィードバックによる運動の制御特性について調べた。具体的には、ターゲットとなる音を聴覚フィードバックによる音を頼りに追いかけるという聴覚的なターゲットトラッキングタスクを用いた実験を行った。この結果、被験者5名中3名に試行毎の明確な誤差の減少と時間のズレの明確な短縮が見られたことから、聴覚フィードバックにより音を音で追従することが可能であることが分かった。また、最良のパフォーマンスの被験者の結果から、人間は最低でも時間遅れ0.2程度で目標音に対して追従できる能力があることが確認された。一方で、被験者2名には変化が見られなかったことから、追従のパフォーマンスの向上には個人差が生じることが示唆された。

模倣すべき手本が与えられる場面については、あらかじめ提示された目標音と同じ音になるようにマウスを動かすという、記憶再生課題を用いた実験を行った。この結果、被験者6名中4名に誤差の減少が見られた。このことは、聴覚フィードバックにより音を模倣し、再現することが可能であることが分かった。一方で、2名の被験者では変化が見られなかったことから、模倣のパフォーマンスの向上にも個人差が生じることが示唆された。また、視覚フィードバックとの比較により、相互相関関数を用いて求めた時間のズレは視覚フィードバックより聴覚フィードバックの方が小さいが、誤差は聴覚フィードバックと視覚フィードバックとの間に差がないことが分かった。このことは、聴覚フィードバックの視覚に対する優位性が現れたものであることが示唆された。ただし、この傾向は被験者によってターゲットの初期の静止を無視していた可能性が否定できないため、本実験からこれを断定することは難しいが、静止を含めて模倣するようにタスクを課すなどタスクを改めて実験することでこれを明らかにする可能性があることを示した。



模倣すべき手本が与えられない場面については、運動後に提示される判定値を頼りに理想的な運動を探るというタスクを設定して聴覚フィードバックの効果を検証した。その結果、聴覚フィードバックを頼りにターゲットを探ることが可能であることを示した。被験者毎のばらつきが大きく、条件の違いが抽出できないことから、聴覚フィードバックによる支援の効果を検証することはできないが、判定方法を調整することで、この方法を用いて支援の効果を検証ができる可能性があることを示した。

以上の実験により、手本として与えられた音を再生する課題を通じて、聴覚フィードバックにより望ましい運動を取得できる可能性があることを示すことができた。さらに、視覚フィードバックとの比較により、聴覚フィードバックには時間的な精度を要求される運動において優位性があることが示された。

本研究で検証したのはごく一部の場面のみであり、あくまで単純な状況における限られた運動を用いて行った実験の結果に過ぎないことから、現実的な運動学習の支援の場で利用できるかを検証する必要がある。これらが検証されることにより、より複雑な運動課題の学習の支援をすることに可能性が広がることが期待される。また、他のフィードバック方法との違いを明確にし、聴覚フィードバックの生成方法の違いによる影響、例えば、音の帯域幅、音圧、音色の違いや、複数の音を提示した場合、運動を計測するパラメータを変化させた場合などの効果が検証されることにより、支援の効果がさらに高められることが期待される。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、阪口豊助教授には終始丁寧なご指導、ご助言を賜りました。頭が固く、飲み込みの悪い私に対して、ご多忙の中、度々数時間の議論に付き合って頂いたことには感謝の念に堪えません。ここに謹んで御礼申し上げます。

出澤正徳教授、石田文彦助手、島井博行助手には、研究に対する取り組み方、方針に対して鋭い指摘や激励を頂きました。また、阪口研究室、博士後期過程の松村光司さんには、私の研究に対する理解と興味を示して頂き、終始相談に応じて頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に、2年間の苦楽を共にした本年度修了生の皆様、ヒューマンインターフェース学講座の皆様に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [ 1 ] B. C. J. ムーア: “聴覚心理学概論”, 誠信書房, 2003 pp.171-209
- [ 2 ] 日本音響学会 (編): “聴覚と音響心理”, コロナ社, 1978 pp.97-106
- [ 3 ] 平井: “バイオフィードバックの展開”, 電子通信学会誌, Vol.68, No.12 pp. 1342-1349
- [ 4 ] 熊本: “バイオフィードバックのスポーツトレーニングへの応用”, バイオメカニズム学会誌, Vol.10, No.3 pp. 120-127
- [ 5 ] 阿江: “スポーツ技術の改善と計測”, 計測と制御, Vol.31, No.3 (19920310) pp. 430-436
- [ 6 ] 志村, 西原: “輪郭線追跡を応用したリアルタイムスポーツトレーニング支援システムの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告. CAS, Vol.104 No.114 pp.13-17
- [ 7 ] 本莊, 伊坂, 満田, 川村: “HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.1 (20050331) pp. 63-70
- [ 8 ] 大塚, 袖山, 吉田, 村中, 今西: “VR を用いたピアノ教育支援システムの構築”, 電気学会論文誌. C, Vol.116, No.11 (19961020) pp. 1288-1294
- [ 9 ] 辻, 西方: “リズムと打拍フォームに基づく打楽器学習支援システムの開発と評価”, 電子情報通信学会論文誌. D-I, Vol.J88-D-I, No.2(20050201) pp. 508-516
- [ 10 ] 元川, 斎藤: “拡張現実による演奏支援のためのギターのオンライントラッキング”, 情報処理学会研究報告, Vol.2006 No.51 pp. 189-196
- [ 11 ] 村中, 徳丸, 今西: “ペン習字 (筆記学習) 支援システム: 道筆用動画手本の教育効果”, 電子情報通信学会技術研究報告. ET, Vol.105, No.632(20060225) pp. 151-156
- [ 12 ] 横小路, 河合, 吉川: “振動と教師視覚提示を用いた運動技能伝達法の提案と基礎実験”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.2 (1999/06) pp. 431 ~ 438
- [ 13 ] 山田, 松本, 吉村, 平川, 川瀬, 福本: “純音による振戦バイオフィードバックシステムの構築”, 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, Vol.106, No.253(20060918) pp. 41-44
- [ 14 ] 鳶田, 杉山, 大塚, 澤田, 新井: “リハビリテーションにおける荷重調節歩行の訓練支援システム”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.24, No.51(20000914) pp. 17-24

- [ 15 ] 加藤, 楊: “ 工作機械作業における能動感覚フィードバック : 切削力の聴覚フィードバックにおけるフィードバック情報と特性の影響 ”, 精密工学会誌, Vol.67, No.4(20010405) pp. 586-590
- [ 16 ] B.S.Lee, “ Effect of Delayed speech feedback ”, J.Accoustic.Soc.Am,22824-826 (1950)
- [ 17 ] 西, 多田, 曾根: “ 遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察 ”, 情報処理学会研究報告. [音楽情報科学], Vol.2003, No.127(20031221) pp. 37-42
- [ 18 ] Miall, R. C., & Jackson, J. K. Adaptation to visual feedback delays in manual tracking: evidence against the Smith Predictor model of human visually guided action. *Experimental Brain Research*, 172(1), 77-84, 2006
- [ 19 ] DW Reed, X Liu and RC Miall. On-line feedback control of visually guided slow ramp tracking: Effects of spatial separation of visual cues. *Neuroscience Letters*, 338: 209-12, 2003