

令和5年度  
修士学位論文

身体運動及び体性感覚の要因が音源定位に  
与える影響

Effects of Body Motion and Somatosensory Factors  
on Sound Localization

1265110 細田 昂希

指導教員 繁榊 博昭

2024年2月28日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
情報学コース

# 要 旨

## 身体運動及び体性感覚の要因が音源定位に与える影響

細田 昂希

本研究では音源に対して能動的に関与した際の身体運動及び体性感覚が音源定位に与える影響について検討した。実験1では、ベルを鳴らす動作について到達運動、体性感覚、注意の3つの要素に分け、特にどの要素が音源定位に影響を与えるかを検討した。その結果、身体位置の固有感覚や触覚による体性感覚及び注意が音源定位に影響を与えることが示された。実験2では、自身の腕を叩いて音が出る時のように身体上に音源があり、受動的な触覚も与えられた場合、身体以外の音源に対して関与する場合と比べてその受動的な触覚情報がより音源定位に影響を与えるかを検討した。その結果、身体上に音源があると、より音源定位に影響を与えることが示された。

キーワード 音源定位, 到達運動, 体性感覚, 注意

# Abstract

## Effects of Body Motion and Somatosensory Factors on Sound Localization

Koki HOSODA

In this study, we investigated the effects of body movements and somatosensory perception on sound localization during active engagement with the sound source. In Experiment 1, the bell-ringing motion was divided into three components: reaching motion, somatosensory perception, and attention, and which component in particular affected sound localization was examined. The results showed that the intrinsic sensation of body position, somatosensory perception by tactile sensation, and attention affected the sound localization. In Experiment 2, we examined whether passive tactile information affects sound localization more when a sound source is located on the body and passive tactile information is also given, as in the case of a sound source produced by tapping one's arm. The results showed that the presence of a sound source on the body had a greater influence on sound localization.

*key words*    Sound Localization, Reaching Movement, Somatosensory Perception,  
Attention

# 目次

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 第 1 章 | はじめに            | 1  |
| 1.1   | 背景              | 1  |
| 1.2   | 目的              | 2  |
| 1.3   | バーチャルリアリティ (VR) | 2  |
| 1.4   | 音源定位            | 3  |
| 1.5   | 腹話術効果           | 4  |
| 1.6   | 体性感覚            | 6  |
| 第 2 章 | 実験 1            | 7  |
| 2.1   | 目的              | 7  |
| 2.2   | 実験参加者           | 7  |
| 2.3   | 装置              | 8  |
| 2.3.1 | 使用ソフトウェア        | 8  |
| 2.3.2 | 視覚刺激呈示装置        | 8  |
| 2.3.3 | 聴覚刺激呈示装置        | 8  |
| 2.3.4 | コントローラ          | 9  |
| 2.4   | 実験で用いた刺激        | 9  |
| 2.5   | 実験環境            | 11 |
| 2.6   | 実験条件            | 13 |
| 2.7   | 実験手続き           | 15 |
| 2.8   | 分析方法            | 15 |
| 2.9   | 結果              | 16 |
| 2.10  | 考察              | 18 |

## 目次

|              |                            |           |
|--------------|----------------------------|-----------|
| 2.11         | 追加の分析の結果と考察 . . . . .      | 18        |
| <b>第 3 章</b> | <b>実験 2</b>                | <b>20</b> |
| 3.1          | 目的 . . . . .               | 20        |
| 3.2          | 実験参加者 . . . . .            | 20        |
| 3.3          | 装置 . . . . .               | 20        |
| 3.3.1        | 使用ソフトウェア . . . . .         | 20        |
| 3.3.2        | 視覚刺激呈示装置 . . . . .         | 21        |
| 3.3.3        | 聴覚刺激呈示装置 . . . . .         | 21        |
| 3.4          | 実験で用いた刺激 . . . . .         | 23        |
| 3.5          | 実験条件 . . . . .             | 23        |
| 3.6          | 実験環境 . . . . .             | 24        |
| 3.7          | 実験手続き . . . . .            | 25        |
| 3.8          | 分析方法 . . . . .             | 26        |
| 3.9          | 結果 . . . . .               | 27        |
| 3.10         | 考察 . . . . .               | 29        |
| <b>第 4 章</b> | <b>まとめ</b>                 | <b>30</b> |
|              | 謝辞                         | <b>31</b> |
|              | 参考文献                       | <b>32</b> |
| 付録 A         | 個人のデータによるフィッティングの結果 (実験 1) | <b>35</b> |
| 付録 B         | 個人のデータによるフィッティングの結果 (実験 2) | <b>40</b> |

# 目次

|      |                                    |    |
|------|------------------------------------|----|
| 1.1  | ITD の例                             | 4  |
| 1.2  | ILD の例                             | 4  |
| 1.3  | 腹話術師と人形 [18]                       | 5  |
| 2.1  | HMD                                | 8  |
| 2.2  | ポータブルスピーカ                          | 9  |
| 2.3  | コントローラ                             | 9  |
| 2.4  | ベルのモデル                             | 10 |
| 2.5  | 実験に用いたベル                           | 11 |
| 2.6  | ベルとスピーカの位置                         | 12 |
| 2.7  | ずれの大きさごとに用意した板                     | 12 |
| 2.8  | 板にスピーカをセットした例                      | 13 |
| 2.9  | ずれの呈示方法                            | 13 |
| 2.10 | 実験 1 の条件                           | 14 |
| 2.11 | コントローラの固定方法                        | 15 |
| 2.12 | 縦軸を右から聞こえたときと答えた割合としたときの結果例 (実験 1) | 16 |
| 2.13 | 個人のデータによるフィッティングの結果例 (実験 1)        | 17 |
| 2.14 | 実験 1 の結果                           | 17 |
| 2.15 | 追加の分析の結果                           | 19 |
| 3.1  | HMD                                | 21 |
| 3.2  | 小型スピーカ                             | 22 |
| 3.3  | ヘッドホンアンプ                           | 22 |
| 3.4  | スピーカセクタ                            | 23 |

## 図目次

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.5  | 左腕と右手のモデル . . . . .                        | 23 |
| 3.6  | 実験 2 の条件 . . . . .                         | 24 |
| 3.7  | スピーカの配置 . . . . .                          | 25 |
| 3.8  | 実験環境 . . . . .                             | 25 |
| 3.9  | 縦軸を右から聞こえたと答えた割合としたときの結果例 (実験 2) . . . . . | 27 |
| 3.10 | 個人のデータによるフィッティングの結果例 (実験 2) . . . . .      | 28 |
| 3.11 | 実験 2 の結果 . . . . .                         | 28 |
| A.1  | 参加者 1 のフィッティング結果 . . . . .                 | 35 |
| A.2  | 参加者 2 のフィッティング結果 . . . . .                 | 35 |
| A.3  | 参加者 3 のフィッティング結果 . . . . .                 | 36 |
| A.4  | 参加者 4 のフィッティング結果 . . . . .                 | 36 |
| A.5  | 参加者 5 のフィッティング結果 . . . . .                 | 36 |
| A.6  | 参加者 6 のフィッティング結果 . . . . .                 | 36 |
| A.7  | 参加者 7 のフィッティング結果 . . . . .                 | 37 |
| A.8  | 参加者 8 のフィッティング結果 . . . . .                 | 37 |
| A.9  | 参加者 9 のフィッティング結果 . . . . .                 | 37 |
| A.10 | 参加者 10 のフィッティング結果 . . . . .                | 37 |
| A.11 | 参加者 11 のフィッティング結果 . . . . .                | 38 |
| A.12 | 参加者 12 のフィッティング結果 . . . . .                | 38 |
| A.13 | 参加者 13 のフィッティング結果 . . . . .                | 38 |
| A.14 | 参加者 14 のフィッティング結果 . . . . .                | 38 |
| A.15 | 参加者 15 のフィッティング結果 . . . . .                | 39 |
| A.16 | 参加者 16 のフィッティング結果 . . . . .                | 39 |
| B.1  | 参加者 A のフィッティング結果 . . . . .                 | 40 |
| B.2  | 参加者 B のフィッティング結果 . . . . .                 | 40 |

## 図目次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| B.3 参加者 C のフィッティング結果 . . . . .  | 41 |
| B.4 参加者 D のフィッティング結果 . . . . .  | 41 |
| B.5 参加者 E のフィッティング結果 . . . . .  | 41 |
| B.6 参加者 F のフィッティング結果 . . . . .  | 41 |
| B.7 参加者 G のフィッティング結果 . . . . .  | 42 |
| B.8 参加者 H のフィッティング結果 . . . . .  | 42 |
| B.9 参加者 I のフィッティング結果 . . . . .  | 42 |
| B.10 参加者 J のフィッティング結果 . . . . . | 42 |
| B.11 参加者 K のフィッティング結果 . . . . . | 43 |
| B.12 参加者 L のフィッティング結果 . . . . . | 43 |
| B.13 参加者 M のフィッティング結果 . . . . . | 43 |
| B.14 参加者 N のフィッティング結果 . . . . . | 43 |

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 背景

VR において臨場感を高めるために、音は不可欠な要素の 1 つである。3 次元の VR 空間で音源の位置を明確に定位することができると、その場にいる感覚が生じ臨場感が向上する。また、VR では多感覚の刺激が呈示され、自身の腕や頭を自由に動かすことが可能である。そのため、聴覚以外のこれらの情報が音源定位に及ぼす特性を明らかにする必要がある。VR 内で音源となるオブジェクトに触れて音が鳴るとき、身体運動や体性感覚のどの要素が音源定位に関係しているかが明らかになれば、臨場感のある体験に関わる音源定位を適切に演出することが可能になると考えられる。

聴覚と他感覚の統合に関する現象としては、視覚情報と音源位置に相違がある場合に、音源位置が視覚情報の位置に定位する腹話術効果がある [1]。これは視覚と聴覚間の現象であるが、聴覚と触覚間においても同様の現象が生じる。視覚と聴覚の間に加えて触覚と聴覚の間でも、あるモダリティ刺激の位置が他のモダリティ刺激の位置にシフトすることが報告されている [2]。触覚と聴覚の関係についての先行研究では、前後にある音源に対してどちらから聞こえるかを回答する課題で、音源の位置と触覚を受ける空間的な位置が同じ場合、異なる場合と比べて自反応時間が減少したと報告されている [3]。また、音像の距離知覚に関して、触覚刺激の情報が音の距離知覚に影響を与えることが報告されている [4]。そのほかにも、聴覚刺激と同期した触覚刺激を両手に与え音源定位課題を行った結果、音源定位は触覚刺激呈示位置にシフトするという報告 [5] や、聴覚刺激と触覚刺激を順応させた後、音源定位は触覚刺激方向にシフトするという報告 [6] もあ

## 1.2 目的

る。さらに身体近傍空間では、頭部近傍に呈示された聴覚刺激が触覚刺激を誘発すると報告されている [7].

しかし、これらの先行研究では受動的に聴覚刺激が呈示されており、能動的に音源に対して働きかけるときの音源定位については明らかにされていない。そこで本研究では、能動的に音源に働きかけ、聴覚刺激を呈示するときの身体運動、体性感覚の情報が音源定位に与える影響について検討した。

## 1.2 目的

本研究では身体運動と体性感覚が音源定位に与える影響を検討する 2 つの実験を行った。実験 1 では、ベルを鳴らすという能動的な運動が音源定位に影響を与えるかを検討した。同時に、能動的な運動は到達運動、体性感覚、注意の要素に切り分けられるため、どの要素が音源定位に影響を与えるかを検討した。実験 2 では、身体以外の一般的な音源のオブジェクトではなく、身体を軽く叩くことで発する音のように、身体上に音源がある場合について、音源位置に呈示される受動的な触覚刺激が音源定位に与える影響について検討した。

## 1.3 バーチャルリアリティ (VR)

バーチャルリアリティ (VR: 人工現実感) とは、コンピュータによって作成した人工的な 3 次元の空間を、視覚やその他の感覚によって疑似的に体験することができる技術である。

VR を構成する際に重要な要素となるものが 3 つ存在する。1 つ目は、自然な 3 次元の空間が構成されているという「3 次元の空間性」である。2 つ目は、VR 環境と人間がリアルタイムで相互に影響しているという「実時間の相互作用性」である。3 つ目は、実際の空間と同様の感覚モダリティが VR 環境内にも存在し、自分自身が VR 環境内に入り込んでいるように感じるという「自己投射性」である。この 3 つの要素を満たすものが

## 1.4 音源定位

理想的な VR システムであるといえる [8].

これらを実現するために多く用いられているものがヘッドマウントディスプレイ (HMD) である. HMD を頭部に装着することで, センサによって頭部の動きを検知してリアルタイムでディスプレイに映像を映すことが可能である. 近年になって様々な HMD が発売されており, 日常においても目にすることが増えている.

## 1.4 音源定位

私たちは, 音が発せられられるとその音源の方位や距離を特定することが可能である. このような音の空間的な位置を把握する能力は音源定位と呼ばれる. 音源の位置を特定する手がかりに音の持つ情報が使われている. 水平方向の位置知覚には主に両耳情報が手がかりとなっており, 垂直方向の位置知覚には主にスペクトル情報が手がかりとなっている. 水平方向の音源定位の手がかりとなっている両耳情報には, 両耳間時間差 (interaural time difference: ITD) と, 両耳間音圧差 (interaural level difference: ILD) がある.

ITD とは, 左右の耳に音が到達する時間の差のことをいう. 2つの耳は左右で離れており, その距離の違いによって両耳に音が到達する時間が異なる (図 1.1). この時間差によって水平方向の音源位置を推定することが可能である.

ILD とは, 左右の耳に到達する音の音圧の差のことをいう. 耳に音が到達する際, 頭部によって遮蔽される (図 1.2). そのため両耳で音圧差が生じ, 水平方向の手がかりとなっている. 高周波音では ILD を使い, 低周波音では ITD を使っているとされている [9].

このように ITD と ILD の 2 種類の両耳情報により音源位置が知覚されることを音源定位の二元説と呼ぶ [10][11]. 垂直方向の音源定位には, ITD と ILD は差が生じないため, スペクトル情報が手がかりとなる. 各周波数成分の強度によって音源位置の知覚を行う. そのため, 純音の場合は音源定位の精度が低下する.

## 1.5 腹話術効果

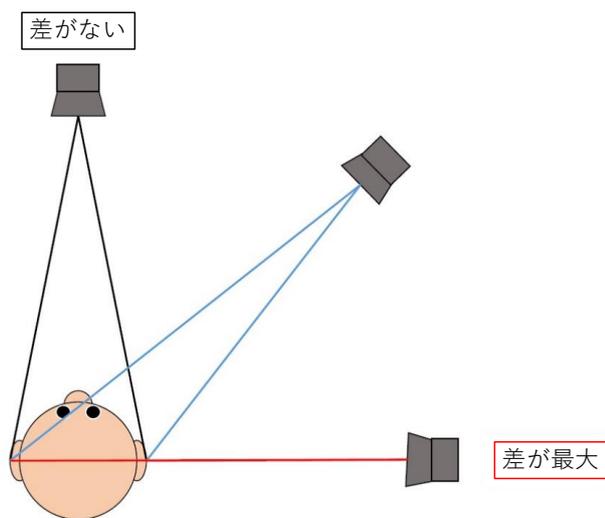


図 1.1 ITD の例

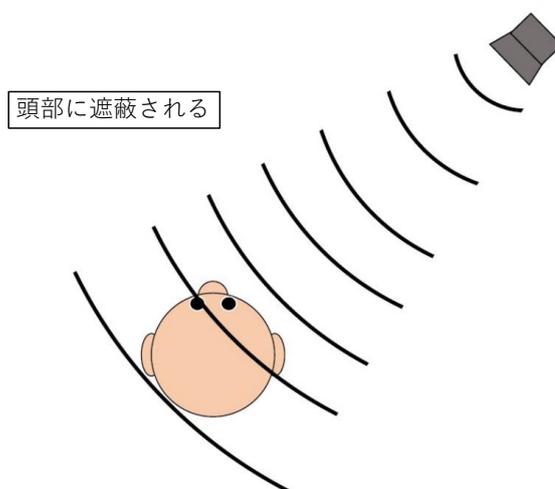


図 1.2 ILD の例

## 1.5 腹話術効果

実際の音源の位置と視覚情報による音源の位置が異なる場合、音源定位は実際の音源の位置から視覚情報の音源の位置にシフトする。このような現象は腹話術効果と呼ばれている [12]。腹話術師が人形を扱い、まるで人形が離れているように聞こえるというように、腹話術効果による影響である (図 1.3)。

腹話術効果について古くから知られており、現在までに多くの報告がされている。2

## 1.5 腹話術効果

つの電話機を使用し、一つを実験参加者の前に置き、もう一つを実際の音源として実験参加者には隠して実験を行った結果、2つの電話機を 12 deg 離すまでは音が実験参加者の前に置かれた電話機から聞こえているように知覚され、それ以上離すことで電話機と音が分離して聞こえると報告されている [13][14]。腹話術効果は、視覚刺激と聴覚刺激の距離が近く、同期した刺激を呈示するときに生じやすいといわれている [15][16]。また、「人の口から声が聞こえる」や「電話機から音が鳴る」というような普段の経験によって音源の位置が予測できる場合に、視覚情報の影響を受け音源定位が実際の音源位置からシフトする。腹話術で使用する人形から目や鼻といった人間的な特徴となるものを取り除いた場合、腹話術効果の影響が減少したと報告されている [16]。

このように、腹話術効果は経験的な要素が重要であり [17]，経験から音源位置が推測できる場合にその影響がみられる。



図 1.3 腹話術師と人形 [18]

## 1.6 体性感覚

体性感覚とは、触覚、温度覚、痛覚などの皮膚にある感覚受容器の情報である皮膚感覚と、運動覚、位置覚などの筋肉や関節にかかる力の感覚である深部感覚の2つを合わせた感覚である [19][20]。この体性感覚によって、皮膚に与えられた刺激や自身の身体の動きや姿勢を検知することによって、外界における自己身体に置かれた状況を知覚することができる。能動的に外界の対象物に接触することで対象物の特徴などの情報を中枢神経に送り、その後大脳皮質の第一体性感覚野に送られ情報処理される。そして、第二体性感覚野や他の高次脳領域に運ばれることで、自己身体や対象物の知覚が可能になる [21]。

体性感覚においても他の感覚と同様に統合され処理されることが知られており、視覚と体性感覚 [22]、視覚と聴覚と触覚 [23] などこれまでに様々な感覚統合の検討がされている。

## 第 2 章

# 実験 1

### 2.1 目的

実験 1 では、音源のオブジェクトに対する能動的な運動が音源定位に影響を与えるかを検討した。また、能動的な運動を到達運動、体性感覚、注意の 3 つの要素に分け、どの要素が音源定位に影響を与えるかを検討した。各要素が音源定位に影響を与える場合、音源を示すオブジェクトからずれた位置から音が呈示されたとき、音源定位は音源を示すオブジェクトの方向にシフトし、正確な定位ができなくなると考えられる。そのため本実験では、音源位置を正確に判断できるかどうかの指標として弁別閾を用い、条件間で比較した。

### 2.2 実験参加者

正常な視力 (矯正を含む)、聴力を有する男女 16 名の成人 (平均年齢 20.90,  $SD = 1.57$ , 男性 12 名, 女性 4 名) が実験に参加した。

## 2.3 装置

## 2.3 装置

### 2.3.1 使用ソフトウェア

視覚刺激の作成及び VR 環境の構築には，Unity (2021.3.4f1) を使用した。また，実験で得られたデータは作成した Unity 用の C#プログラムを用いて抽出した。各種検定には，R 言語 (3.6.2) [24] を使用し，分散分析を行う関数の ANOVA 君 [25] を用いて分析を行った。

### 2.3.2 視覚刺激呈示装置

視覚刺激の呈示にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) の Oculus Rift (Meta 社) を使用した (図 3.1)。



図 2.1 HMD

### 2.3.3 聴覚刺激呈示装置

聴覚刺激の呈示には，ポータブルスピーカ (JVC 社，型番: SP-A35M-S) を使用した (図 2.2. PC から出力した聴覚刺激をポータブルスピーカから呈示した)。

## 2.4 実験で用いた刺激



図 2.2 ポータブルスピーカ

### 2.3.4 コントローラ

右手のトラッキング及び実験参加者の回答用に Oculus Touch (Meta 社) を使用した (図 2.3).



図 2.3 コントローラ

## 2.4 実験で用いた刺激

聴覚刺激はベルの音を録音した音源をポータブルスピーカで呈示した。音圧レベルは受聴位置で約 60 dB であった。視覚刺激は右手のモデルと Unity で作成したベルのモデ

## 2.4 実験で用いた刺激

ル (図 2.4) を HMD で呈示した.



図 2.4 ベルのモデル

## 2.5 実験環境

### 2.5 実験環境

受聴位置から 50 cm の位置にスピーカを配置し，その手前にベル (図 2.5) を配置した．このベルからは音が出ず，実験参加者が現実のベルを押すとスピーカから聴覚刺激が呈示された．VR 上ではスピーカは呈示せずベルのモデルを呈示した．そしてスピーカの中心をベルの中心から水平方向に  $\pm 1^\circ$  ，  $\pm 2^\circ$  ，  $\pm 3^\circ$  ，  $\pm 4^\circ$  ずらした (図 2.6)．ずれの呈示方法は，ずれの大きさごとに用意した，図 2.7 のような板に，図 2.8 のように板上の棒に沿ってスピーカを置き，その板を図 2.9 のように板上の棒に沿って置くことで呈示した．板のセッティングの際に生じる音が手がかりとならないように，別の位置でスピーカをセットしてから実験参加者の前にセットした．



図 2.5 実験に用いたベル

## 2.5 実験環境

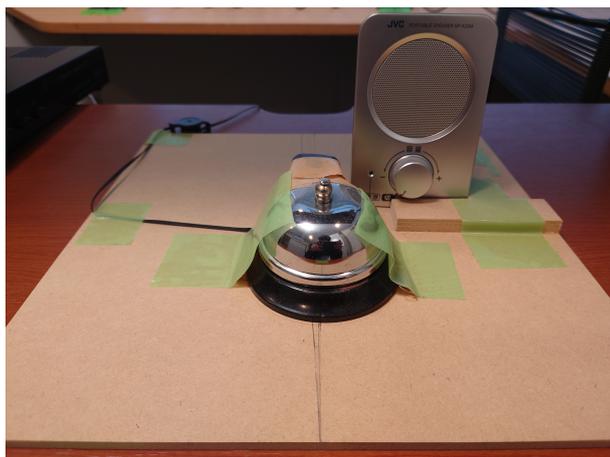


図 2.6 ベルとスピーカの位置



図 2.7 ずれの大きさごとに用意した板

## 2.6 実験条件



図 2.8 板にスピーカをセットした例

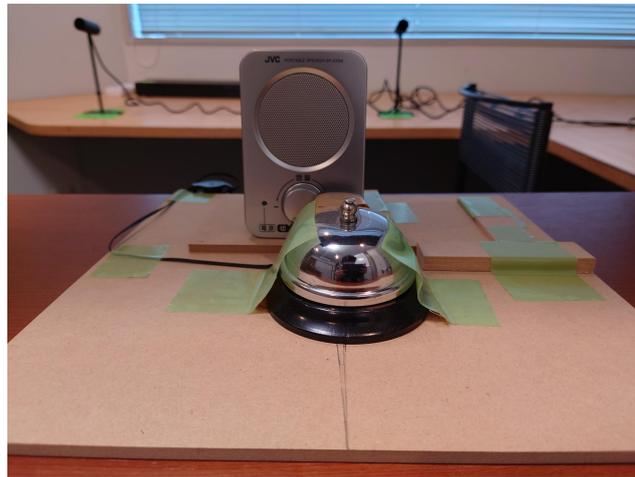


図 2.9 ずれの呈示方法

## 2.6 実験条件

聴覚刺激を呈示する条件は以下の 4 条件であった (図 2.10).

1 つ目は、手を膝の上からベルの位置に動かしてベルを鳴らす条件 (図 2.10 a) , 2 つ目は、あらかじめベルの位置に手をおき、ベルを鳴らす条件 (図 2.10 b) , 3 つ目は、ベルに向けた矢印を表示しその後ベルが鳴る条件 (図 2.10 c) , 4 つ目は、静止した状態でベルが鳴る統制条件 (図 2.10 d) であった。到達運動条件では、到達運動だけでなく、体性

## 2.6 実験条件

感覚と注意の要素が，体性感覚条件では，体性感覚だけでなく，注意の要素が含まれると考えられる．そのため，各条件間の弁別閾を比較することで，到達運動条件ではターゲットに向かって手を運ぶ運動出力の効果，体性感覚条件では手の位置の固有感覚，力触覚フィードバックの効果，注意条件では身体を伴わない視覚的な手がかりによって注意を向けることの効果を検討した．

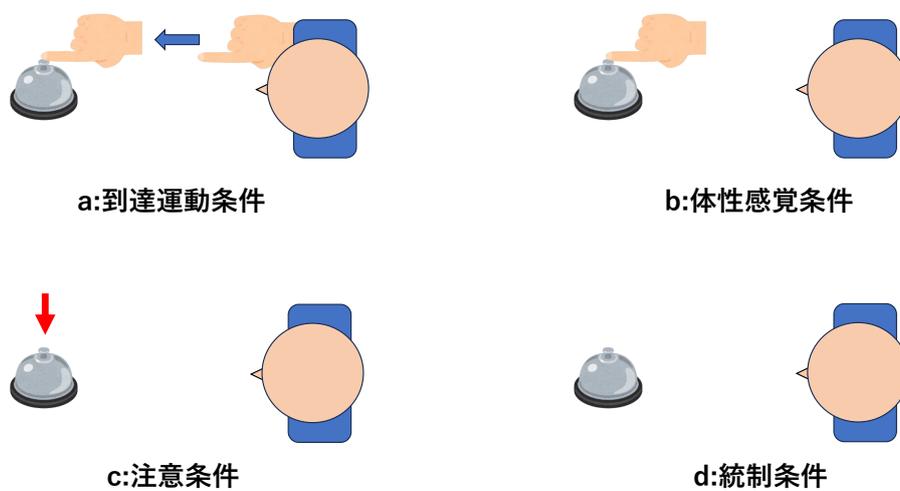


図 2.10 実験 1 の条件

## 2.7 実験手続き

### 2.7 実験手続き

実験参加者は椅子に座り，HMD を装着し，図 2.11 のように右手に手の位置をトラッキングするためのコントローラを固定した．試行開始後 VR 上にベルを表示し，各条件の手続きに従って聴覚刺激を呈示した．実験参加者は 2 肢強制選択法によって音源位置が VR 上のベルよりも右か左か回答した．音源のずれ 5 水準 ( $0^\circ$ ， $\pm 1^\circ$ ， $\pm 2^\circ$ ， $\pm 3^\circ$ ， $\pm 4^\circ$ ) を恒常法で各水準 20 試行を行い，参加者は 4 つの条件で課題を行って，1 人当たりの総試行数 400 試行を 2 日間に分けて行った．課題の条件は参加者間でカウンターバランスを取り，音源のずれはランダムな順で呈示した．

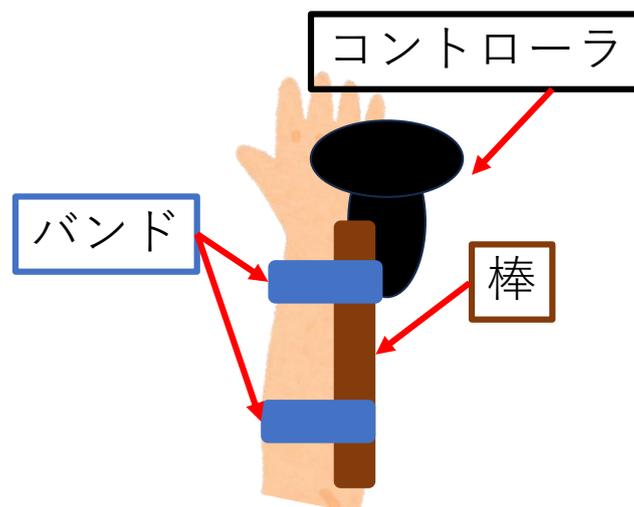


図 2.11 コントローラの固定方法

### 2.8 分析方法

本実験では，音源を示すオブジェクトの方向に音源定位がシフトすることが予想される．そのため，どちらから聞こえたか分からない領域が広がる．つまり，図 2.12 のように右から聞こえたと答えた割合が 0.5 付近になる領域が広がり，通常の心理測定関数の形にはならないことが考えられる．そのため，同じ大きさのずれをまとめて扱い，正答

## 2.9 結果

率を算出して、縦軸を正答率とし、75 %点を弁別閾として比較した。

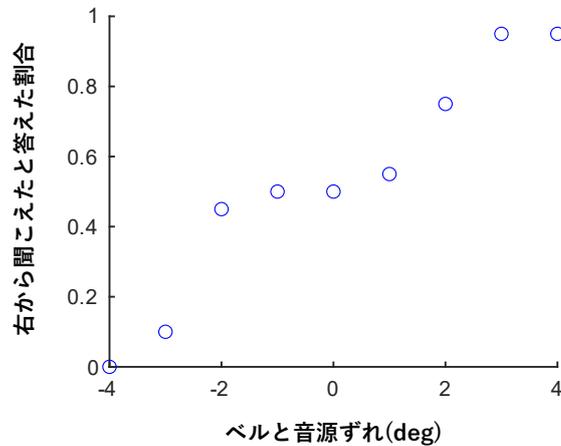


図 2.12 縦軸を右から聞こえたと答えた割合としたときの結果例 (実験 1)

## 2.9 結果

音源の左右のずれの方向に関わらず、ずれの絶対値でまとめて扱い、実験参加者ごとに各音源のずれの正答率を算出した。ずれごとの正答率に心理測定関数をフィッティングし (図 2.13), その関数の正答率 75%となる点を参加者ごとの音源位置判断の弁別閾とした。

各課題の条件の弁別閾の平均値を (図 2.14) に示す。誤差線は標準誤差を表す。課題の条件を要因とする対応あり 1 要因分散分析を行った結果、有意な差が認められた ( $F(3, 60) = 25.4, p = .000, \eta_G^2 = 0.29$ )。Shaffer の方法による多重比較の結果、到達運動条件より注意条件 ( $p < .05$ ), 到達運動より統制条件 ( $p < .01$ ), 体性感覚条件より注意条件 ( $p < .05$ ), 体性感覚条件より統制条件 ( $p < .01$ ), 注意条件より統制条件 ( $p < .05$ ), の弁別閾が有意に大きかった。

## 2.9 結果

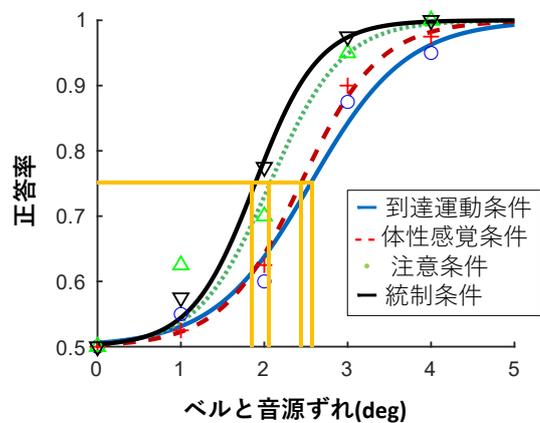


図 2.13 個人のデータによるフィッティングの結果例 (実験 1)

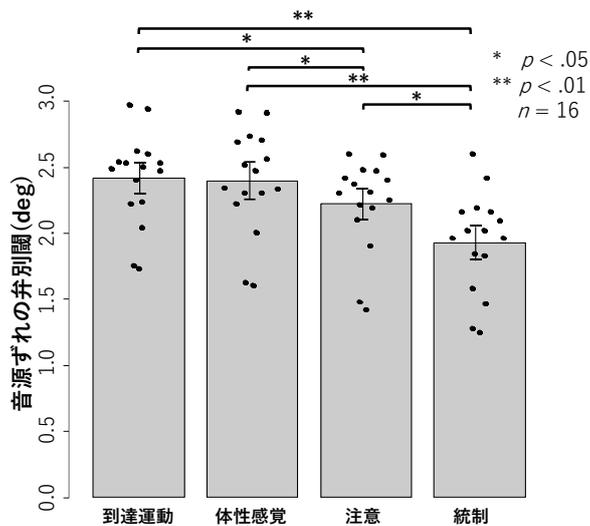


図 2.14 実験 1 の結果

## 2.10 考察

体性感覚条件と注意条件間、注意条件と統制条件間に有意差が見られたことから、手の位置の固有感覚、力触覚フィードバックの効果、身体を伴わない注意による視覚的な手がかりの効果が音源定位に影響を与えると考えられる。

到達運動条件と体性感覚条件間に有意な差が見られなかったことから、ターゲットに向かって手を運ぶ運動出力の効果は大きくないことが考えられる。先行研究において、身体近傍空間では、多感覚統合処理が特に促進されることが報告されている [26]。そのため、体性感覚による感覚入力の効果が大きく、音源に対する能動的な関与の効果が飽和し、到達運動による運動出力の効果が見られなかったと考えられる。

先行研究では注意が音源定位に影響を与えるとする報告と影響を与えないとする報告があるが [27][28]、本実験では注意は音源定位に影響を与えた。注意が音源定位に影響を与えないとしている先行研究では注意を向けるための光の刺激のみが呈示されていたのに対して、本実験では注意を向けるための矢印だけでなく、音源のオブジェクトも呈示したため、オブジェクト方向により強く注意が向き、音源定位がシフトしたことが考えられる。

## 2.11 追加の分析の結果と考察

追加の分析として、各実験参加者の条件間の弁別閾の差分を取り、比較をした。各条件間の弁別閾の差の平均値を図 2.15 に示す。課題の条件の組み合わせを要因とする対応あり 1 要因分散分析を行った結果、有意な差が認められた ( $F(2, 45) = 11.98, p = .00, \eta_G^2 = 0.30$ )。Shaffer の方法による多重比較の結果、到達運動条件—体性感覚条件間の差より体性感覚条件—注意条件間の差 ( $p < .01$ )、到達運動条件—体性感覚条件間の差より注意条件—統制条件間の差 ( $p < .01$ ) が有意に大きかった。到達運動条件—体性感覚条件間の差と体性感覚条件—注意条件間の差及び、到達運動条件—体性感覚条件間

## 2.11 追加の分析の結果と考察

の差より注意条件—統制条件間の差に有意差が見られたことから、到達運動によるターゲットに向かって手を運ぶ運動出力の効果よりも、手の位置の固有感覚、力触覚フィードバックの効果、身体を伴わない注意による視覚的な手がかりの効果が大きく音源定位に影響を与えることが示された。

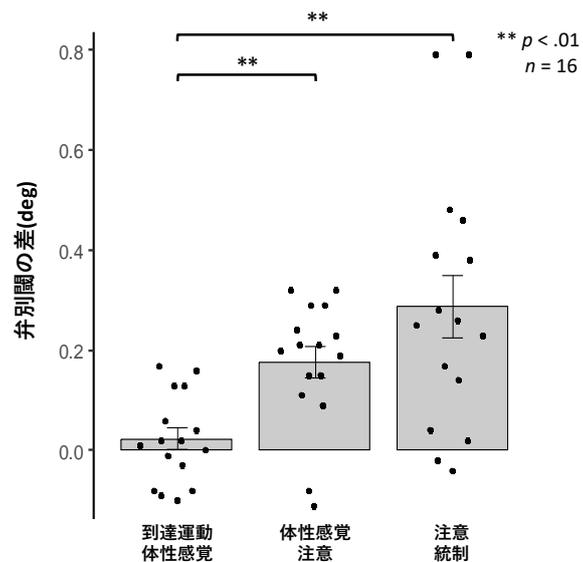


図 2.15 追加の分析の結果

# 第 3 章

## 実験 2

### 3.1 目的

実験 2 では、身体以外の一般的なオブジェクトではなく、身体を軽く叩くことで発する音のように、身体が音源となり、音源位置に受動的な触覚刺激がある場合に、より強く音源定位に影響を与えるか検討した。実験 1 と同様に、音源位置を正確に判断できるかどうかの指標として弁別閾を用い、条件間で比較した。

### 3.2 実験参加者

正常な視力（矯正を含む）、聴力を有する男女 14 名の成人（平均年齢 22.14, SD =2.28, 男性 12 名, 女性 2 名）が実験に参加した。

### 3.3 装置

#### 3.3.1 使用ソフトウェア

VR 環境の構築には、Unity (2021.3.4f1) を使用した。また、実験で得られたデータは作成した Unity 用の C# プログラムを用いて抽出した。各種検定には、R 言語 (3.6.2) [24] を使用した。

### 3.3 装置

#### 3.3.2 視覚刺激呈示装置

視覚刺激の呈示にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) の Oculus Rift (Meta 社) を使用した (図 3.1).



図 3.1 HMD

#### 3.3.3 聴覚刺激呈示装置

聴覚刺激の呈示には、腕の上で細かく音源位置を設定するため、直径 28 mm の小型スピーカ (uxcell 社, 型番: a15080600ux0275) (図 3.2) を使用し、ヘッドホンアンプ FX-AUDIO-FX202A/FX-36A PRO (North Flat Japan 社) (図 3.3) と 8 チャンネルスピーカセレクトタ (MONOPRICE 社) (図 3.4) を使用して制御した。これらの装置は、PC から出力した聴覚刺激をヘッドホンアンプで増幅し、スピーカセレクトタによって各スピーカに聴覚刺激を分配するように構築した。

### 3.3 装置

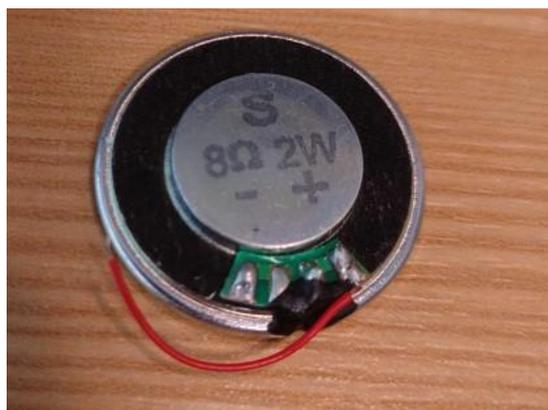


図 3.2 小型スピーカ



図 3.3 ヘッドホンアンプ

### 3.4 実験で用いた刺激



図 3.4 スピーカセレクタ

### 3.4 実験で用いた刺激

聴覚刺激は肌を叩いたと知覚される効果音を用い、小型スピーカで呈示した。音圧レベルは受聴位置で約 45 dB であった。視覚刺激は左腕のモデルと右手のモデルを HMD で呈示した (図 3.5)。



図 3.5 左腕と右手のモデル

### 3.5 実験条件

聴覚刺激を呈示する条件は以下の 2 条件であった (図 3.6)。

1 つ目の条件 (受動的な触覚刺激あり条件) は、左腕を前方に置き右手の人差し指で左腕を軽く叩くことで音を鳴らす条件であり、音源を示す視覚刺激の位置に受動的な触覚

### 3.6 実験環境

刺激がある条件であった。2つ目の条件（受動的な触覚刺激なし条件）は、叩いた時の感覚が肌に似ている保冷剤を人の体温程度に温め前方に置き、右手の人差し指で軽く叩くことで音を鳴らす条件であり、音源を示す視覚刺激の位置に受動的な触覚刺激がない条件であった。

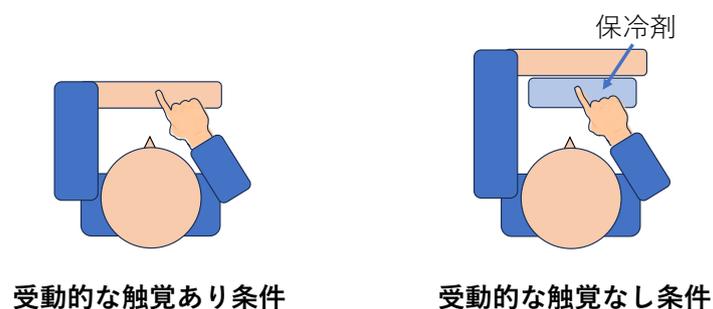


図 3.6 実験 2 の条件

### 3.6 実験環境

実験参加者は、受聴位置を中心として、左右に 3.5, 7, 10.5, 14 cm の位置にスピーカを設置したアームカバーを腕または保冷剤に装着した（図 3.7）。腕または保冷剤は受聴位置から 20 cm 離れた位置に置いた（図 3.8）。どちらの条件においても VR 上にはスピーカは呈示せず、現実の腕または保冷剤の位置に腕のモデルを呈示した。手の位置の固有感覚の影響を統制するため、受動的な触覚刺激なし条件においても保冷剤の奥に腕を置いた。現実の叩いた音を軽減するため、実験参加者には腕を軽く叩くように指示した。また、腕の下にタオルを敷いた。

### 3.7 実験手続き



図 3.7 スピーカの配置



図 3.8 実験環境

### 3.7 実験手続き

実験参加者が HMD を装着するまで、スピーカが見えないように黒い布で隠した。実験参加者は椅子に座り、HMD を装着し、右手にトラッキング用のコントローラを持ち、左手に回答用のコントローラを持った。そして左腕を前方に置き、条件 1 では腕にスピーカが付いたアームカバーを取り付け、条件 2 ではアームカバーを付けた保冷剤を置いた。その後、定めた位置を正確に叩けるように練習試行を行った。本試行開始後、VR

### 3.8 分析方法

上の左腕のモデルの叩く位置に赤色の印が表示された。実験参加者が VR 上に表示された右手の人差し指で赤色の印を軽く叩くと、それに同期してスピーカから音が鳴り、赤色の印が消えた。事件参加者はスピーカの音が叩いた位置よりも右から聞こえたか左から聞こえたかを 2 肢強制選択法によって回答した。

音源のずれ 4 水準 ( $\pm 3.5$ ,  $\pm 7$ ,  $\pm 10.5$ ,  $\pm 14$  cm) を恒常法で各水準 18 試行を行い、実験参加者は 2 つの条件で課題を行って、1 人当たりの総試行数 288 試行を 2 日間に分けて行った。課題の条件は参加者間でカウンターバランスを取り、音源のずれはランダムな順で呈示した。また、叩く位置とスピーカの位置の関係から判断することを防ぐため、1 日で行う試行を 3 セットに分け、1 セットごとに腕を左右に 3 cm ずらし、アームカバーを腕と反対方向に 3 cm ずらした。

### 3.8 分析方法

実験 2 においても実験 1 と同様に、図 3.9 のように右から聞こえたと答えた割合が 0.5 付近になる領域が広がり、通常の心理測定関数の形にはならないことが考えられる。そのため、同じ大きさのずれをまとめて扱い、正答率を算出して、縦軸を正答率とし、75 % 点を弁別閾として比較した。

### 3.9 結果

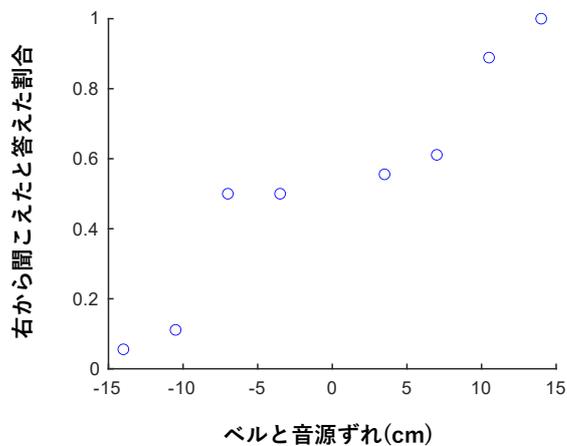


図 3.9 縦軸を右から聞こえたと答えた割合としたときの結果例 (実験 2)

### 3.9 結果

実験 1 と同様に、実験参加者ごとに各音源のずれの正答率を算出した。ずれごとの正答率に心理測定関数をフィッティングし (図 3.10)、その関数の正答率 75%となる点を参加者ごとの音源位置判断の弁別閾とした。各課題の条件の弁別閾の平均値を図 3.11 に示す。誤差線は標準誤差を表す。対応あり  $t$  検定の結果、音源位置に触覚刺激がある条件の方が、音源位置に触覚刺激がない条件よりも閾値が有意に大きかった ( $t(26) = 2.69$ ,  $p = .018$ ,  $d = .47$ )。

### 3.9 結果

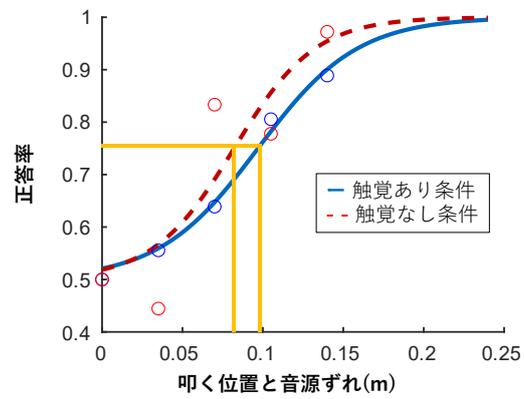


図 3.10 個人のデータによるフィッティングの結果例 (実験 2)

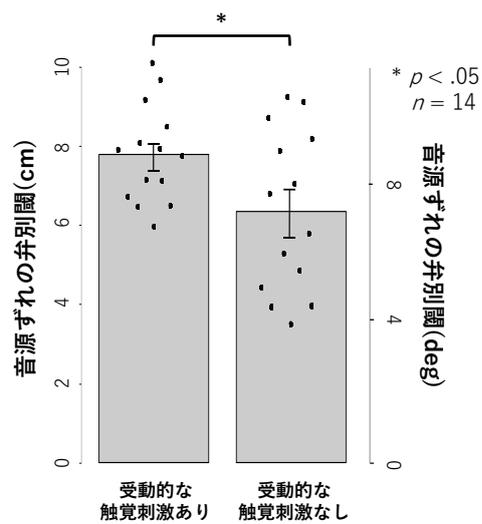


図 3.11 実験 2 の結果

## 3.10 考察

この結果から、視覚における音源位置に呈示された聴覚刺激と同期した触覚刺激は音源定位に影響を与えることが示された。先行研究では、ラバーハンドイリュージョンのように他感覚と同期した触覚刺激が与えられるとより強く多感覚統合処理が行われ、錯覚が強く生じることが報告されている [26]。また、身体近傍空間では多感覚統合処理が促進されることが報告されている [29]。さらに、視覚刺激が身体近傍空間に接近することで、その後与えられる触覚刺激の予測を促進させることが報告されている [30]。本実験の受動的な触覚刺激なし条件では、視覚や聴覚と同期した触覚刺激が右手だけに生じるのに対して、あり条件では、左腕にも同時に生じること、なし条件では身体付近に音源があるのに対し、あり条件では音源が身体上にあること、右手の人差し指を腕に接近させ軽く叩くことで、なし条件よりもあり条件の多感覚統合処理がより強力に行われ、錯覚が大きくなったことが考えられる。

## 第 4 章

### まとめ

本研究では、能動的に音源に対して働きかけるときの身体運動、体性感覚の情報が音源定位に与える影響について検討した。その結果、実験 1 では、能動的な運動の要素である体性感覚と注意が音源定位に影響を与えることが示された。実験 2 では、視覚による音源を示す位置にある受動的な触覚刺激が音源定位に影響を与えることが示された。本実験の結果より、3 次元の VR 空間では、視覚の音源位置に自分の身体があること、視覚の音源位置に対して注意を向けること、手を叩いて音を出すなどの自分の身体が音源となる場合は、視覚刺激や聴覚刺激と同期した受動的な触覚刺激を視覚の音源位置に与えることで、視覚の音源位置から音が鳴っていると知覚し、より臨場感のある音源定位に寄与する可能性を示した。

# 謝辞

本研究の実施及び論文の作成にあたり，多大なご支援と指導を賜りました繁榊博昭先生には深く感謝いたします。また，本論文の副査を務めていただいた篠森敬三先生及び門田宏先生にも深く感謝いたします。最後に，本研究の実験に参加仕手いただいた 30 名の皆様にも感謝いたします。

# 参考文献

- [1] G. J. Thomas, “Experimental study of the influence of vision on sound localization.” , *Journal of Experimental Psychology*, 28, 163–177, 1941.
- [2] A. Caclin, S. Soto-Faraco, A. Kingstone and C. Spence, “Tactile ‘capture’ of audition” , *Perception and Psychophysics*, 64 (4), 616-630, 2002.
- [3] M. Zampini, D. Torresan, C. Spence, M. M. Murray, “auditory-somatosensory multisensory interactions in front and rear space” , *Neuropsychologia*, vol.45, no.8, pp.1869-1877, 2007.
- [4] 近藤雄治, 寺本渉, 大谷真 “聴触覚相互作用が音像の距離弁別精度に与える影響”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 21 巻 1 号, pp.49-52, 2016.
- [5] P. Bruns, B. Roder, “Tactile capture of auditory localization: an event-related potential study” , *Eur. J. Neurosci*, vol.31, no.10, pp.1844-1857, 2010.
- [6] P. Bruns, C. Spence and B. Roder, “Tactile recalibration of auditory spatial representations” , *Experimental Brain Research*, 209, 333–344, 2011.
- [7] N. KITAGAWA, Y. IGARASHI, “Tickle sensation induced by hearing a sound” , *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, Volume 24 Issue 1, pp. 121-122, 2005.
- [8] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝, “バーチャルリアリティ学”, コロナ社, 2011.
- [9] C. J. Moore, “An Introduction to the Psychology of Hearing”, Brill Academic Publishers, 2013.
- [10] 古川茂人, “音を聞く仕組みを探る”, *計測と制御*, 43 巻 4 号, pp.294-300, 2004.
- [11] M. F. ベアー, B. W. コノーズ, M. A. パラディーソ著, 加藤宏司, 後藤薫, 藤井聡, 山崎良彦監訳, “神経科学 脳の探求”, 西村書店, pp.284-286, 2012.
- [12] R. B. Welch, D. H. Warren, “Immediate perceptual response to intersensory dis-

## 参考文献

- crepancy.”, *Psychological Bullentin*, vol.88, no.3, pp.638-667, 1980.
- [13] O. Klemm, “Lokalisation von Sinneseindrcken bei disparaten Nebenreizen. Habilitationsschrift.”, *Psychological Studies*. 5, pp.73-162, 1909.
- [14] 小宮山 撰, “視覚と聴覚による音源定位”, *音響技術学会誌*, 52 卷 1 号, pp.46-50, 1996.
- [15] D. A. Slutsky, G. H. Recanzone, “Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect”, *Neuroreport*, vol.12, pp.7-10, 2001.
- [16] C. E. Jack, W. R. Thurlow, “Effect of degree of visual association and angle of displacement on the ‘Ventriloquism’ effect”, *Perceptual and Motor Skills*, 37, pp.967-979, 1973.
- [17] R. I. Bermant, R. B. Welch, “Effect of degree of separation of visual-auditory stimulus and eye position upon spatial interaction of vision and audition”, *Percept Mot Skills*, vol.42, no.43, pp.487-493, 1976.
- [18] *Encyclopedia Britannica*, “ventriloquism” , *BRITANNICA KIDS*, “<https://kids.britannica.com/students/article/ventriloquism/277566>”, 2024.
- [19] 橋本 照男, 入來 篤史, *体性感覚, 脳科学辞典*, “<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/体性感覚>” , 2024.
- [20] 岩田洋夫, “体性感覚呈示技術”, *バイオメカニズム学会誌*, 31 卷 2 号, p.78-81, 2007.
- [21] 田岡三希, “対象物と自己身体の理解につながる体性感覚野の役割”, *心身健康科学*, 16 卷 1 号 p.23-28, 2020.
- [22] 片山正純, 川人光男, “視覚, 体性感覚と運動司令を統合する神経回路モデル”, *日本ロボット学会誌*, 16 卷 1 号, p.23-28, 1990.
- [23] 花光宣尚, 田井秀昭, 元木龍也, 佐藤文彦, 清水啓太郎, 神山洋一, 南澤孝太, evala, 水口哲也, “Synesthesia X1-2.44 : 聴覚・触覚・視覚を活用した共感覚体験装置”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 27 卷 1 号, p.51-64, 2022.
- [24] R Core Team, *The R Project for Statistical Computing*, “<https://www.R->

## 参考文献

- project.org/” , 2024.
- [25] Ryuta Iseki, Anovakun version 4.8.6, “<http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90>”
- [26] M. Botvinick and J. Cohen, “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see” , *Nature*, 391, 756, 1998.
- [27] 北島律之・山下由己男, “視覚的注意が音源定位に及ぼす影響” , *The Japanese Journal of Psychology*, 69(6), 459-467, 1999.
- [28] P. Bertelson, J. Vroomen, B. D. Gelder and J. Driver, “The ventriloquist effect does not depend on the direction of deliberate visual attention” , *Perception and Psychophysics*, 62(2), 321-332, 2000.
- [29] G. Rizzolatti, C. Scandolara, M. Matelli and M. Gentilucci, “Afferent properties of periarculate neurons in macaque monkeys. II. Visual responses” , *Behavioural Brain Research*, 2.2, 147–63, 1981.
- [30] T. Kimura and J. Katayama, “Visual stimuli in the peripersonal space facilitate the spatial prediction of tactile events—A comparison between approach and nearness effects” , *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 2023.

# 付録 A

## 個人のデータによるフィッティングの結果（実験 1）

実験 1 の各参加者のフィッティング結果を以下に示す。

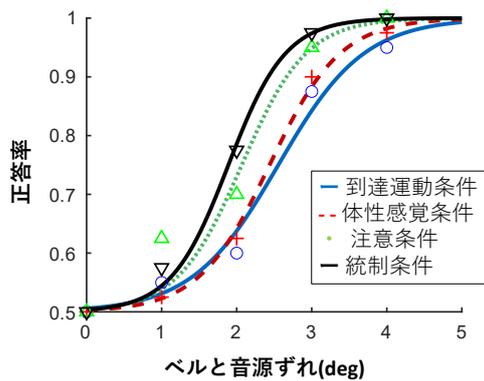


図 A.1 参加者 1 のフィッティング結果

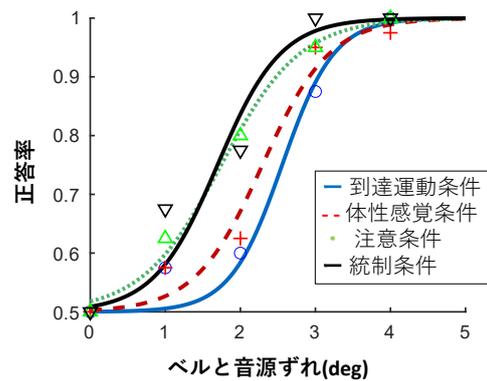


図 A.2 参加者 2 のフィッティング結果

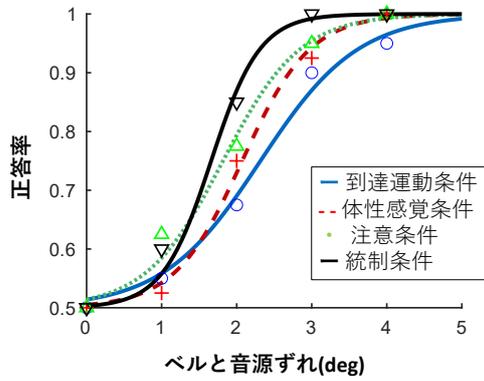


図 A.3 参加者 3 のフィッティング結果

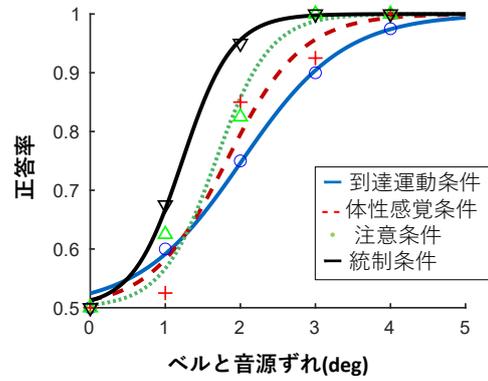


図 A.4 参加者 4 のフィッティング結果

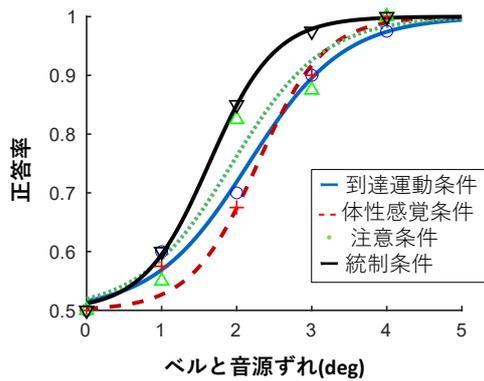


図 A.5 参加者 5 のフィッティング結果

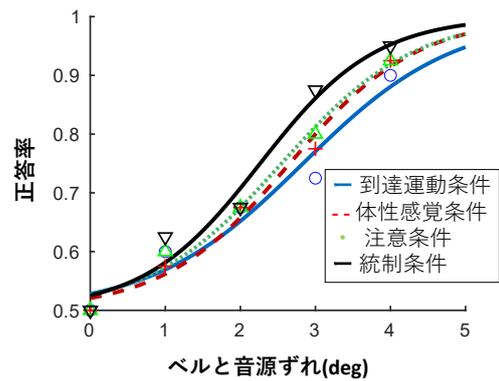


図 A.6 参加者 6 のフィッティング結果

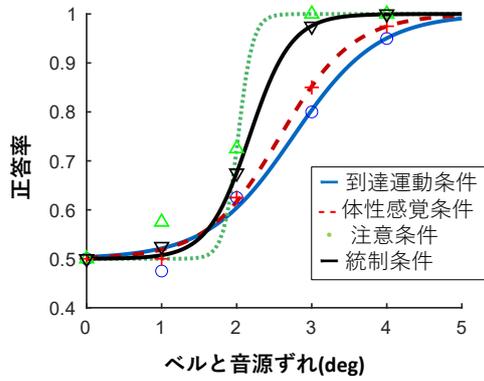


図 A.7 参加者 7 のフィッティング結果

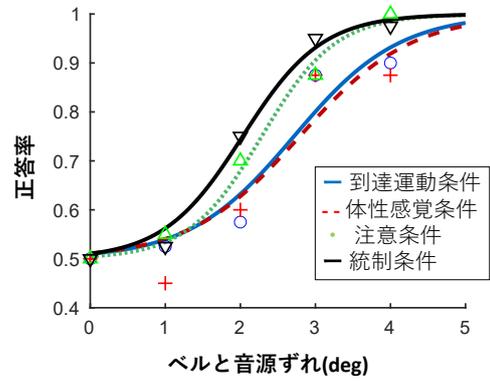


図 A.8 参加者 8 のフィッティング結果

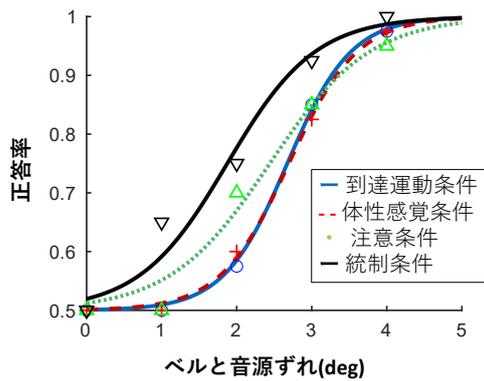


図 A.9 参加者 9 のフィッティング結果

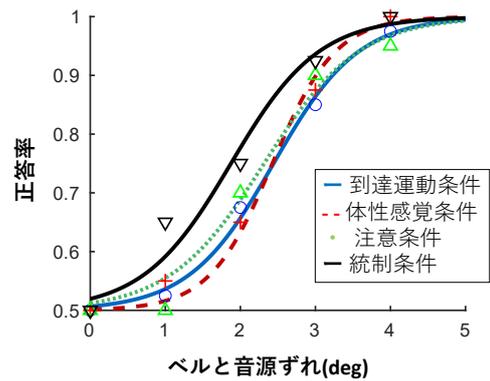


図 A.10 参加者 10 のフィッティング結果

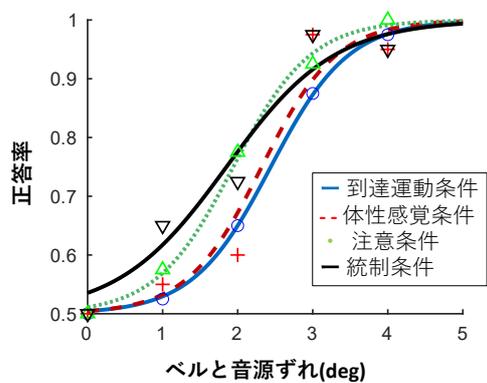


図 A.11 参加者 11 のフィッティング結果

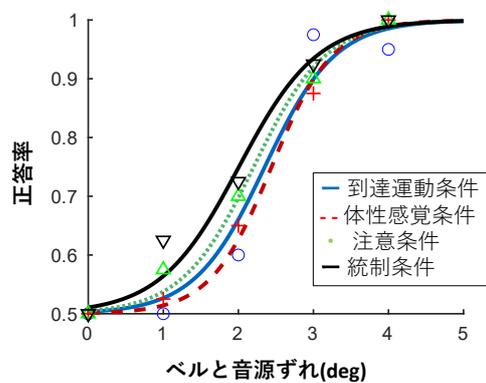


図 A.12 参加者 12 のフィッティング結果

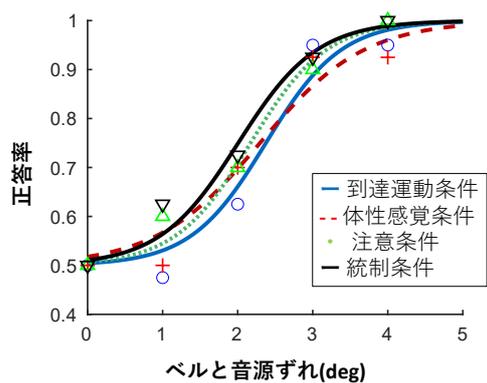


図 A.13 参加者 13 のフィッティング結果

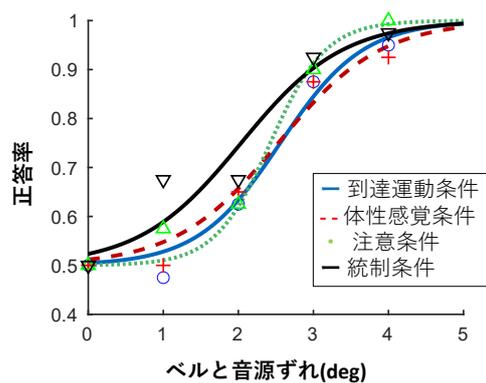


図 A.14 参加者 14 のフィッティング結果

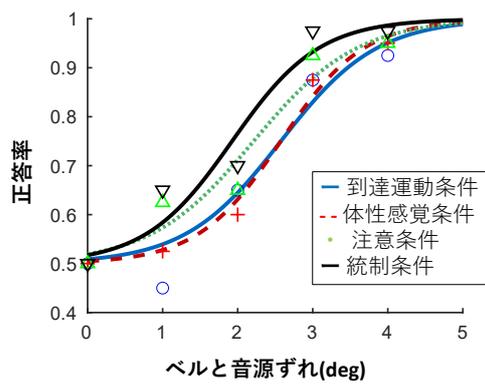


図 A.15 参加者 15 のフィッティング結果

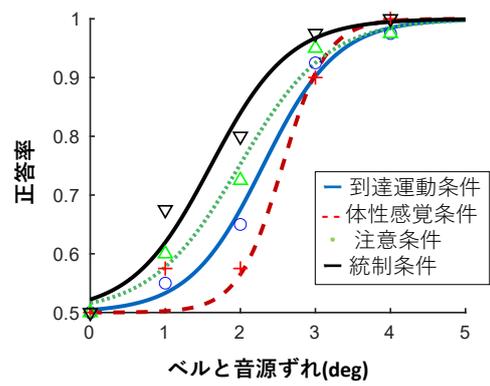


図 A.16 参加者 16 のフィッティング結果

## 付録 B

# 個人のデータによるフィッティングの結果（実験 2）

実験 2 の各参加者のフィッティング結果を以下に示す。縦軸は正答率，横軸は叩く位置と音源位置のズレである。

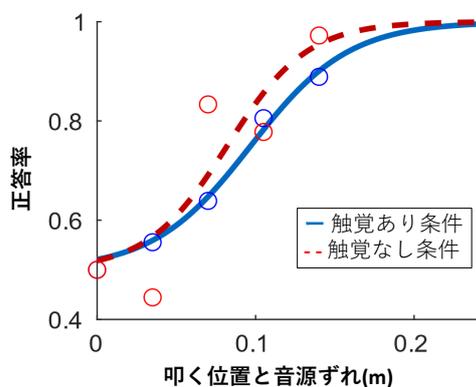


図 B.1 参加者 A のフィッティング結果

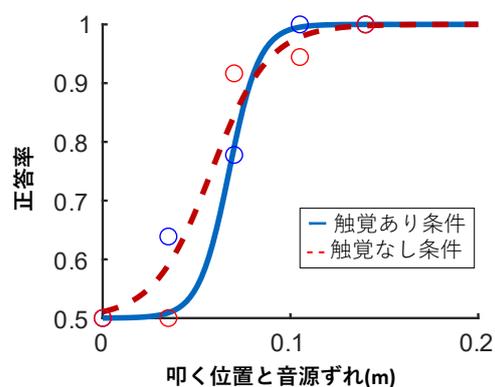


図 B.2 参加者 B のフィッティング結果

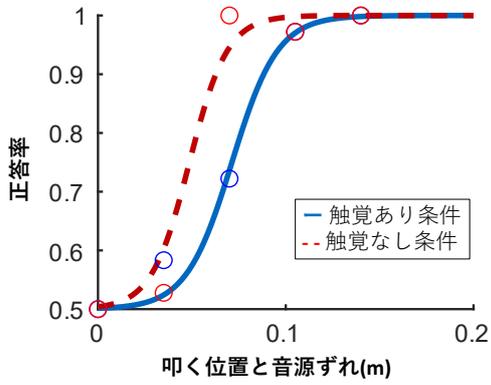


図 B.3 参加者 C のフィッティング結果

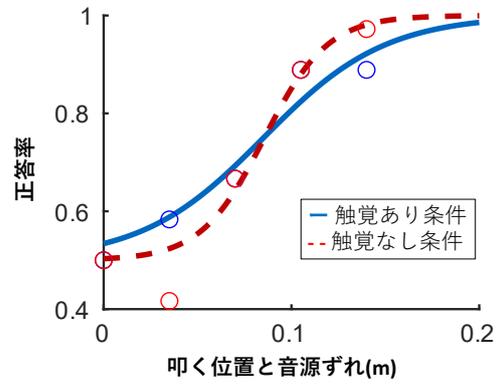


図 B.4 参加者 D のフィッティング結果

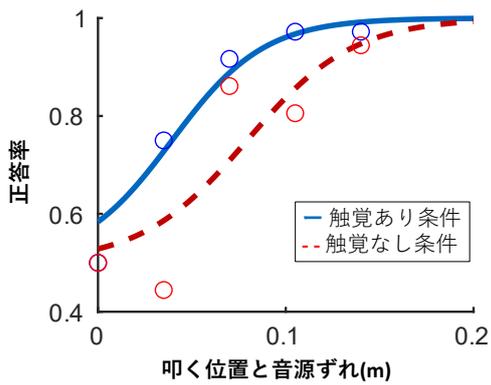


図 B.5 参加者 E のフィッティング結果

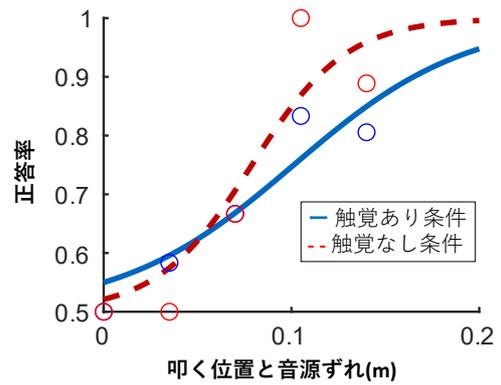


図 B.6 参加者 F のフィッティング結果

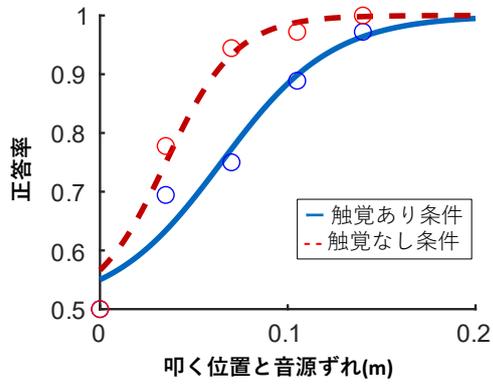


図 B.7 参加者 G のフィッティング結果

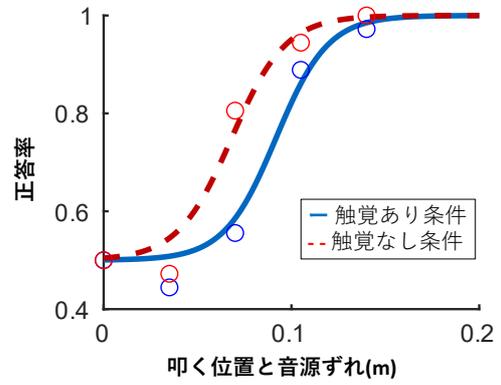


図 B.8 参加者 H のフィッティング結果

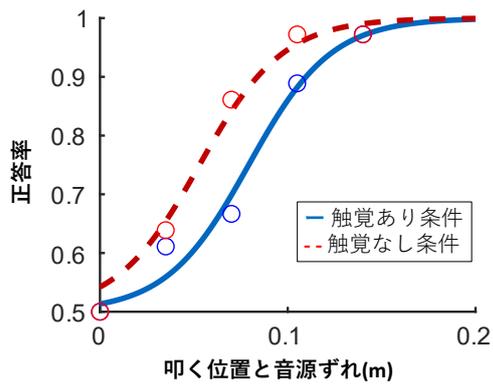


図 B.9 参加者 I のフィッティング結果

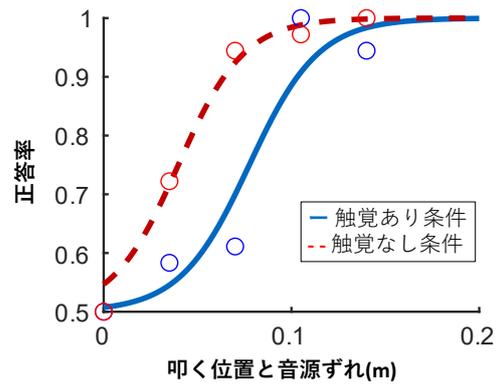


図 B.10 参加者 J のフィッティング結果

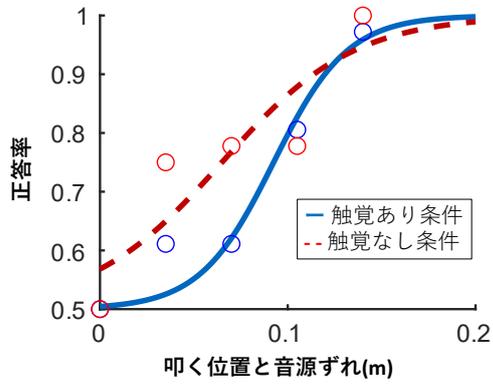


図 B.11 参加者 K のフィッティング結果

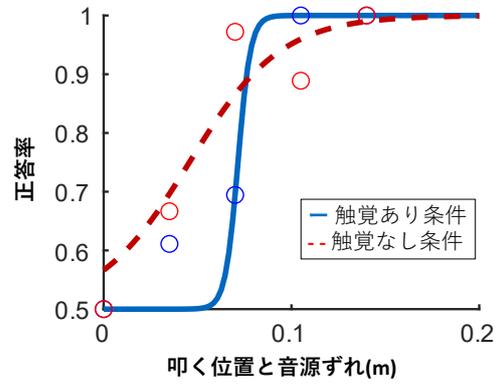


図 B.12 参加者 L のフィッティング結果

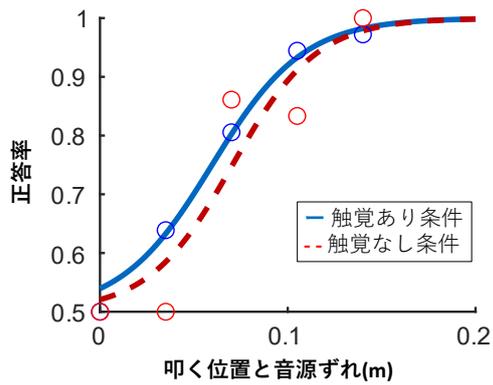


図 B.13 参加者 M のフィッティング結果

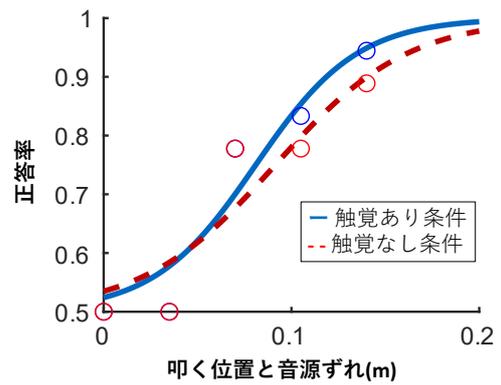


図 B.14 参加者 N のフィッティング結果