

令和 5 年度
修士学位論文

太さ知覚の視触覚統合における自己身体に
関連した情報の影響

Effects of Self-Body-Related Information on the
Visual-Haptic Integration of Thickness Perception

1265097 吉良 勇飛

指導教員 繁榎 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

太さ知覚の視触覚統合における自己身体に関連した情報の影響

吉良 勇飛

視触覚統合における重み付けを検討した先行研究では、視覚入力にノイズを付加して信頼性を低下させると触覚の重み付けが増加するという結果が得られている。しかし、触覚刺激が実物ではない力覚呈示であり、刺激までの距離や自己身体などの対象以外の視覚的な情報の効果も検討されていなかった。本研究では身体に関連する情報を操作することで視触覚の重み付けが動的に変わるかを、触覚刺激として実物の棒、視覚刺激として VR 空間上にバーチャルな棒を呈示し、太さ知覚によって検討した。各実験においては、太さ判断の基準となるモダリティによって重み付けが変わる可能性を検討するため、力触覚を基準に判断を行う触覚判断課題と、視覚を基準に判断を行う視覚判断課題を設定した。触覚判断課題では触覚刺激を基準に視覚刺激の太さを -10% , $\pm 0\%$, $+10\%$ で変化させ、視覚判断課題では視触覚の条件を逆転させて行った。実験 1 では自己身体から刺激対象までの距離条件を 200, 325, 450 mm の 3 種類設定した。対象に触れるときは自己身体の視覚情報を受け取るため、ハンドアバタの呈示で VR 視覚情報の信頼性が向上し、視覚の重み付けが相対的に大きくなると考えられる。そこで実験 2 では VR 空間に身体フィードバック（ハンドアバタ）を呈示することによる影響を検討した。実験の結果、実験 1, 2 ともに触覚判断課題において視覚の影響が見られず、視覚判断課題においては触覚の影響が見られた。今回は実物の触覚とバーチャルな視覚を用いたことで触覚がより信頼性があったからだと考える。また、実験 1 の視覚判断課題における視触覚の重み付けは距離条件で大きく変わったが、その変化は一様ではなく、視覚による大きさ恒常性の効果が重み付けに影響を及ぼしていることを示唆した。

キーワード VR, 多感覚統合, 視覚, 触覚, 重み付け

Abstract

Effects of Self-Body-Related Information on the Visual-Haptic Integration of Thickness Perception

KIRA, Yuhi

In a previous study examining weighting in visual-haptic integration, we found that tactile weighting increased when noise was added to the visual input to reduce its reliability. However, the tactile stimulus was a force presentation, not a real object, and the influence of visual information other than the object, such as distance to the stimulus and one's own body, had not been examined. In this study, we examined whether manipulation of body-related information dynamically changes the weighting of visuotactile stimuli by perceiving the thickness of a real stick as a tactile stimulus and a virtual stick in a VR space as a visual stimulus. In each experiment, we set up a tactile judgment task in which judgments were made based on tactile force and a visual judgment task in which judgments were made based on visual perception, and examined the possibility that stimulus weighting would change depending on the modality used as the criterion for judging thickness. In the tactile judgment task, the thickness of visual stimuli was varied by -10%, $\pm 0\%$, and +10% based on the tactile stimuli, while in the visual judgment task, the visual condition was reversed. In Experiment 1, the distance from the self to the target was 200 mm, 325 mm, and 450 mm. Since visual information of the self-body is received when the target is touched, the presentation of the hand avatar is expected to increase the reliability of VR visual information, resulting in relatively greater visual weighting. Therefore, in Experiment 2, we examined the effect

of presenting body feedback (hand avatar) in the VR space. In both Experiment 1 and Experiment 2, no visual effects were observed in the tactile judgment task, but tactile effects were observed in the visual judgment task. This may be due to the fact that tactile feedback was more reliable than visual feedback because both tactile and virtual vision were used. In Experiment 1, tactile weighting in the visual judgment task varied significantly with distance, but the variation was not uniform, suggesting that the effect of visual size constancy affected the weighting.

key words VR, Multimodal integration, Visual, Haptics, Weighting

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	多感覚統合	5
1.3	研究目的	6
第 2 章	実験方法	8
2.1	実験装置	8
2.1.1	VR 環境	8
2.1.2	実験環境	9
2.2	呈示刺激	10
2.2.1	触覚刺激	10
2.2.2	視覚刺激	10
2.3	実験 1：距離操作実験	12
2.3.1	触覚判断課題：標準刺激と比較刺激	12
2.3.2	触覚判断課題：手続き	13
2.3.3	視覚判断課題：標準刺激と比較刺激	14
2.3.4	視覚判断課題：手続き	15
2.3.5	リーチング課題	16
2.3.6	実験参加者	17
2.3.7	剰余変数の統制	17
2.4	実験 2：身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示実験	18
2.4.1	質問紙	18
2.4.2	実験参加者	20
2.5	分析方法	21

目次

2.5.1	使用ソフトウェア	21
2.5.2	主観的等価点 (PSE) の算出	21
2.5.3	重み付け算出	22
第3章	実験結果	23
3.1	主観的等価点 (PSE)	23
3.2	重み付け係数	25
3.3	リーチング課題の結果	26
3.4	各課題の距離条件における正答率	27
3.5	心理測定関数の傾きと距離の相関	28
3.6	質問紙の結果	30
3.7	解像度	31
第4章	考察	32
4.1	主観的等価点 (PSE)	32
4.2	重み付け係数	32
4.3	リーチング課題と奥行き知覚について	34
4.3.1	リーチング課題の結果	34
4.3.2	先行研究	35
4.4	各課題の距離条件における正答率について	35
4.5	心理測定関数の傾きと距離の相関について	36
4.6	質問紙の結果	36
4.7	研究の成果と今後の展望	36
第5章	おわりに	38
	謝辞	40

目次

参考文献	41
付録 A	44
A.1 実験 1	45
A.1.1 触覚判断課題における全参加者の心理測定関数	45
A.1.2 視覚判断課題における全参加者の心理測定関数	48
A.2 実験 2	51
A.2.1 触覚判断課題	51
A.2.2 視覚判断課題	52

目次

1.1	MANUS Prime II	1
1.2	SenseGlove Nova	1
1.3	VAQSO	2
1.4	刺激と把持の仕方	4
2.1	HMD(VIVE PRO)	8
2.2	Ender-3 S1	9
2.3	実物の棒	9
2.4	支柱	9
2.5	Controller	9
2.6	実験風景	9
2.7	21 種類の実物の棒	10
2.8	赤い固視点	10
2.9	バーチャルな棒	10
2.10	21 種類のバーチャルな棒	11
2.11	背景の板	11
2.12	距離条件の関係性	12
2.13	7 種類の実物の棒	12
2.14	触覚判断課題の手続き	14
2.15	7 種類のバーチャルな棒	15
2.16	視覚判断課題の手続き	15
2.17	リーチング課題の様子	16
2.18	距離 3 条件の標準のラテン方格	17
2.19	距離 3 条件の実施順番の全パターン	17

図目次

2.20	ラテン方格	18
2.21	ハンドアバタ	19
2.22	ハンドアバタ (指なし)	19
2.23	実験時の様子	19
2.24	心理測定関数のフィッティングの触覚判断課題の一例 (縦軸：標準刺激より比較刺激の方が太いと答えた割合, 横軸：触覚刺激の太さ (mm), 凡例：触覚と比べた視覚刺激の太さ)	22
2.25	心理測定関数のフィッティングの視覚判断課題の一例 (縦軸：標準刺激より比較刺激の方が太いと答えた割合, 横軸：視覚刺激の太さ (mm), 凡例：視覚と比べた触覚刺激の太さ)	22
3.1	距離操作実験：主観的等価点 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)	24
3.2	主観的等価点比較 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)	24
3.3	距離操作実験：重み付け係数 (左：触覚判断, 右：視覚判断)	25
3.4	重み付け係数比較 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)	26
3.5	リーチング課題の結果 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)	27
3.6	各判断課題の距離条件ごとの正答率 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)	28
3.7	実験 1 触覚判断課題における心理測定関数の傾きと距離の関係 (左：-10%条件, 中央：±0%条件, 右：+10%条件) (菱型：全参加者の平均値, 丸型：各参加者の平均値)	29

目次

3.8	実験1 視覚判断課題における心理測定関数の傾きと距離の関係 (左:-10%条件, 中央:±0%条件, 右:+10%条件) (菱型:全参加者の平均値, 丸型:各参加者の平均値)	30
3.9	アンケート結果 (菱型:全参加者の平均値, 丸型:各参加者の平均値) . . .	31
4.1	通常時 (±0%条件) (図左) および-10%条件 (図右) において刺激入力と刺激知覚が恒常性と関わる処理過程	33
4.2	+10%条件において刺激入力と刺激知覚が恒常性と関わる処理過程	34
A.1	実験1 触覚判断課題:近距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	45
A.2	実験1 触覚判断課題:中距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	46
A.3	実験1 触覚判断課題:遠距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	47
A.4	実験1 視覚判断課題:近距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	48
A.5	実験1 視覚判断課題:中距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	49
A.6	実験1 視覚判断課題:遠距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング	50
A.7	実験2 触覚判断課題:全参加者の心理測定関数のフィッティング	51
A.8	実験2 視覚判断課題:全参加者の心理測定関数のフィッティング	52

表目次

2.1 各条件ごとの触覚刺激と視覚刺激の外径	13
2.2 各条件ごとの触覚刺激と視覚刺激の外径	20

第 1 章

はじめに

1.1 背景

VR 元年を境に，VR 技術は急速に発展している．特に話題となっているのが，現実とは異なる世界に構築された仮想的な 3 次元空間であるメタバースである．メタバースは，仮想空間において他者と交流する以外にも，オンライン会議やゲームなど様々な応用が考えられる．それら応用においては，同じ空間内の他者やオブジェクト，あるいは自分自身に対して現実と同じ「そこにいる」感覚を感じることが重要である．現在の VR 技術は，主に映像・音響出力による視覚・聴覚刺激の呈示によって，仮想世界への没入感を与えている．しかし，現実感のある空間を目指すために，今後は触覚・味覚・嗅覚に刺激を呈示する VR 技術が現れるだろう．現に，既存のヘッドマウントディスプレイ（HMD）に追加して，触覚・味覚・嗅覚刺激を呈示するデバイスが開発されている．それぞれ刺激呈示デバイスとして，触覚においては「MANUS PRIME II（図 1.1）」や「SenseGlove Nova（図 1.2）[1]」，味覚においては「Tasted VR」，嗅覚においては「VAQSO（図 1.3）[2]」がある．触覚に関しては，



図 1.1 MANUS Prime II



図 1.2 SenseGlove Nova

1.1 背景



図 1.3 VAQSO

非線形波動と呼ばれる振動を与えることで錯覚を生じさせ触覚を感じさせる「3D 触力覚技術」、電気刺激で特定の筋肉を刺激することで銃の重みや射撃時の反動を感じさせる「アンリミテッドハンド」などもある。味覚・嗅覚と比べて開発例が多いのは、ゲームなどのエンターテインメントに限らず遠隔手術などの実用面においても応用力が高いからだと考えられる。人間は視覚という正確な情報をもたらすモダリティがあるにも関わらず、見えている物体を触りに行く行動をする。これについて、明確な状況では触覚よりも視覚を信頼し、曖昧な状況では触覚を信頼していて、触覚は事実確認に使用されている可能性があると報告されている [3]。これらのことから重要性和実用性を踏まえて、視覚・聴覚の次に VR に組み込まれる技術は触覚だと考える。将来的に VR で触覚が呈示されるようになったとき、遠隔手術などへの応用を考えるならば、誤った VR 映像が流れた際に視覚情報によって触覚感覚が操作されることがあってはならない。一方、視覚によって触覚感覚が操作されることがあれば、新しいアミューズメントに活用される可能性がある。そのため、バーチャルな視覚刺激が触覚刺激にどのような影響を与えるか検討する必要がある。

触覚に関する研究は数多く行われている。Stevens と Stone の先行研究 [4] では、木製ブロックを母指と中指で把持させることで、太さ知覚について検討している。この研究では、3つの尺度(マグニチュード推定尺度、カテゴリー尺度、JND 尺度)によって指の間隔で知覚された厚さがどのくらいか検討を行っている。実験に用いられた刺激は長さ 6 インチの木

1.1 背景

製ブロックであり、2.3 mm から 63.7 mm まで等しく幅を変化させた 13 個が用意された。マグニチュード推定法 (ME 法) では、知覚された厚さと刺激の幅 (mm) の関係がべき乗関数となったが、刺激の幅 5 mm 以下ではフィッティングが破綻することが報告された。JND 尺度において、標準刺激の長さが短くなるとウェーバー比が崩れて一定ではなくなることが示された。この研究からは、指の間隔はプロセティック連続体として振る舞い、刺激の大きさが大きくなるにつれて丁度可知差異 (JND) の主観的な大きさが大きくなることが報告されている。また、指の間隔の判断は、位置の判断ではなく長さの判断と考えられている。

Gaydos の研究 [5] は、指の間隔による円柱の長さ識別を調整法によって検討している。参加者は刺激が見えない状態で固定の長さに設定された標準刺激を母指と示指で挟み、自由に長さを変えられる可変刺激を標準刺激と同じ長さにするように教示された。この研究では、35.4 mm から 100 mm の間では標準刺激の長さと確率誤差 (ばらつき) の関係が直線的であり、その間ではウェーバーの法則が成り立つことが報告されている。しかし、標準刺激の長さが 35mm 以下では関係が崩れており、指の間隔に基づく長さの識別性の絶対閾が示されている。

上記 2 つの研究でウェーバーの法則が成り立たなくなった理由は、人間の差異に対する感度 (丁度可知差異) には限界があり、ある一定以下には下がらないからだとされている。ウェーバー比で言えば $\frac{\delta S}{S}$ の S は標準刺激を小さくすると減少し続けるものの、 δS はある一定以下には下がらないため法則が崩れる。もともと、ウェーバーの法則は極端に小さい刺激や大きい刺激の場合には成り立たないため、それが原因だと考えられる [6]。

高橋らの研究 [7] では、棒状刺激の長さ、円形・正方形・正三角形刺激の大きさ (内接円直径) に関する弁別実験および評定実験が行われ、その特性について定量的に分析されている。実験では棒状刺激を 1 次刺激と呼び、母指と示指で把持する条件または母指と中指で把持する条件があった。円形・正方形・正三角形刺激の 3 条件を 2 次刺激と呼び、円形・正三角形は母指と示指と中指で把持し、正方形は母指と示指と中指と薬指で把持した。刺激と把持の仕方は図 1.4 の通りである。1 次刺激を用いた長さの弁別実験は、30 mm と 70 mm の 2 種類の標準刺激を用意し、30 mm の標準刺激に対しては 16 mm から 44 mm までの等差

1.1 背景

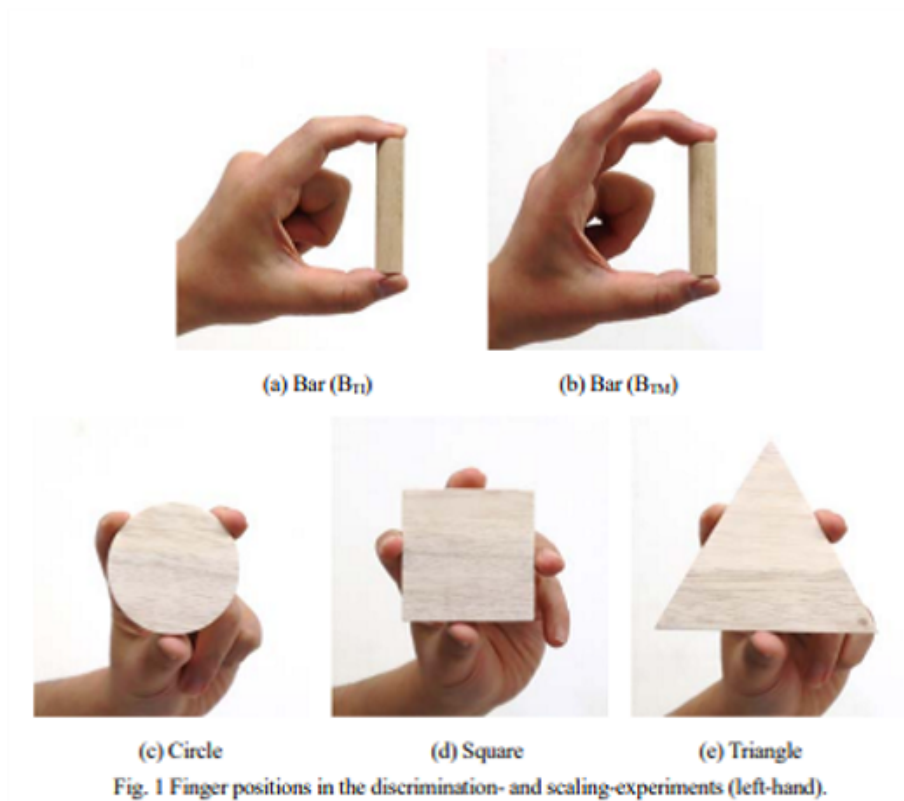


図 1.4 刺激と把持の仕方

ではない 10 種類の比較刺激が, 70 mm の標準刺激に対しては 55 mm から 84 mm の等差ではない 10 種類の比較刺激が用いられた. 2 次刺激を用いた大きさの弁別実験は, 70 mm の標準刺激および, 50 mm から 90 mm までの等差ではない 10 種類の比較刺激が用いられた. 1 次刺激を用いた長さの評定実験と 2 次刺激を用いた大きさの評定実験とともに, 30, 50, 70, 90 mm の 4 種類の標準刺激が用いられ, 各標準刺激に対して 30 から 90 mm の範囲から 4 種類の比較刺激が用いられた. 弁別実験は左手で標準刺激を把持し, 同時に右手で比較刺激を把持し, 標準刺激より長いかわりか (または大きいかわりか) を答えた. 評定実験においては ME 法を用いて, 標準刺激の知覚的な長さ (または大きさ) を 100 とし, 比較刺激の長さ (または大きさ) がいくつになるかを数値で答えた. 本研究で分かったことは, 把持に用いた指の違いで, 長さの弁別特性が変化しないということであった. 長さの弁別特性において, 標準刺激 30 mm の方が 70 mm より Weber 比が大きかった. Goydos の結果 [5] も踏まえて, 高橋らの研究における標準刺激 30 mm も Weber の法則の成立範囲外だっ

1.2 多感覚統合

たとえば、円形・正方形・正三角形の大きさ(内接円直径)の弁別特性において、円形・正方形刺激の Weber 比は 1 次刺激の Weber 比より小さかったが、正三角形の Weber 比は 1 次元と同等であると示された。この理由として、1 次刺激では指間の手がかりが 1 つのみであるが、2 次刺激では指間の手がかりが多く、確率加算の寄与が考えられる。このとき、円形・正方形条件では 3 点もしくは 4 点の接触点情報から推定されるサイズが一義的に規定されるが、正三角形条件では 3 点の情報から推定される図形のサイズが一義的に規定されない。そのため、正三角形条件は円形条件と正方形条件よりも大きな弁別閾値となったのだと考えられている。

上記の研究ではいずれも、視覚が用いられないようになっていた。しかし、現実において、視覚を用いず触覚のみで知覚判断が行われることは少ない。視覚刺激と同時に触覚刺激を呈示した場合についても検討をおこなうべきである。

1.2 多感覚統合

ヒトが持つ機能の中で多感覚統合と呼ばれるものがある。これは複数の感覚モダリティからの入力情報が統合されることである。我々は視覚、聴覚、触覚(体性感覚)、嗅覚、味覚の五感によって外界の情報を得ている。多くの場合に、二つ以上の感覚が組み合わさって情報を受け取っている。例えば、動物の見た目の情報(視覚)と鳴き声の情報(聴覚)を統合することで対象の知覚をすばやく行ったり、掴んだ物質の材質を目で見る情報(視覚)と触る感触の情報(触覚)で判断したりなどである。このように、複数の感覚器官からの情報を相互に照合しながら知覚を行うことを多感覚統合という。多感覚統合に関する研究は多く存在している。視覚・聴覚・触覚刺激の同時提示課題においては視覚情報の重要度が高いこと [8] や、聴覚・視覚的な手がかりは触覚的注意を向ける要因になり、触覚的な手がかりは聴覚・視覚的な注意を向ける要因になること [9] が報告されている。視覚的な光沢感と触覚的な光沢感が同時に増加した場合は光沢の増加を容易に感じられるが、視覚的な光沢感が増加して触覚的な光沢感が減少した場合は 2 つの感覚が打ち消し合うため、光沢の増加を少ししか

1.3 研究目的

感じられない [10]. 空間的な知覚において, 触覚刺激の知覚位置は同時に呈示された視覚刺激の方向へシフトする [11]. 視覚的触感が感じられる画像の観察中に触覚刺激に触れることで, 視覚的触感が触覚刺激の印象に近づく [12].

以上のように, 視覚と触覚の多感覚統合においては異なる感覚同士が相互に影響しあうことが報告されている. 触覚システムを現実に応用するためには, 視触覚統合において視覚の影響を触覚がどのくらい受けるかを検討するべきといえる.

1.3 研究目的

太さ知覚における視触覚統合の先行研究では, 視覚入力ノイズを付加し信頼性を低下させると, 触覚優位になるという報告がある [13][14]. Ernst と Banks の先行研究 [13] では, 視触覚統合において, 視覚と触覚のどちらが優位になるかについて焦点が当てられていた. また, 触覚刺激が実物ではなく 2 台のハプティクスデバイスによる力覚呈示であり, 視覚刺激はブラウン管の映像を鏡面で反射して Stereo glass を通したランダムドットによる呈示であった. Takahashi と Watt の先行研究 [15] でも, 触覚刺激は PHANTom 3.0 (SenseAble Technologies 社) を 2 台用いたフォースフィードバックであり, 視覚刺激は Wheatstone のステレオスコープ越しに液晶モニタを呈示するものであった. つまり, リアリティのある触覚刺激を用いた上で, 刺激までの距離や視覚的な情報の呈示内容による効果が検討されていない.

太さ知覚の視触覚統合において, 得られる情報や与えられる状況が変わることで重み付けが変わる可能性が考えられる. 現実において力覚呈示のみが行われることはなく, また, 実物の触覚においても視覚が優位となるのかを考える必要性は高い.

そこで本研究では, 身体に関連する情報を操作することで視触覚の重み付けが動的に変わるかを, 触覚刺激として実物の棒, 視覚刺激として VR 空間上にバーチャルな棒を呈示して検討した. このとき各実験においては, 判断基準によって重み付けの大小が変わる可能性を検討するため, 力触覚を基準に太さ判断を行う触覚判断課題と, 視覚情報を基準に太さ判断

1.3 研究目的

を行う視覚判断課題を設定した。

実験1では自己身体から刺激対象までの距離を操作する影響を検討した。また、対象物に手を伸ばすなどの触覚的な行動をするとき、通常は自身の手を身体の視覚情報として受け取る。そのため、ハンドアバタを呈示することでVR視覚情報の信頼性が向上すると考える。そこで実験2ではVR空間上に身体フィードバック（ハンドアバタ）を視覚情報として呈示することによる影響を検討した。

第 2 章

実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 VR 環境

視覚刺激の作成には Unity 2019.4.8f1 を使用した。視覚刺激の呈示には HTC 社のヘッドマウントディスプレイ (HMD) として VIVE PRO (図 2.1) を使用した。触覚刺激は Blender4.0.2.0 および Creality 社の 3D プリンター Ender-3 S1 (図 2.2) を用いて実物の筒状の棒 (図 2.3) を作成した。実物の棒の素材には Creality 社のフィラメント CR PLA を用いた [16]。触覚刺激の呈示には全高 415 mm の支柱 (図 2.4) を使用した。実験中の参加者の課題への回答入力には HTC 社の VIVE Controller を使用した (図 2.5)。



図 2.1 HMD(VIVE PRO)

2.1 実験装置

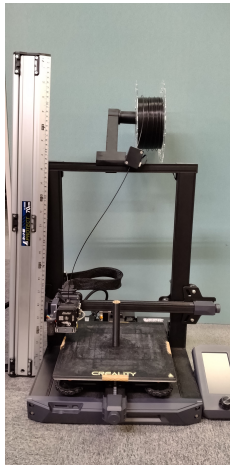


図 2.2 Ender-3 S1



図 2.3 実物の棒



図 2.4 支柱



図 2.5 Controller

2.1.2 実験環境

参加者は図 2.6 のようにイスに座り、左手にコントローラを持ち、右手の母指と示指で棒をつまむ姿勢で実験に参加した。参加者の頭部位置はあご台で固定した。



図 2.6 実験風景

2.2 呈示刺激

2.2 呈示刺激

2.2.1 触覚刺激

実験では触覚刺激として外径が異なる長さ 100 mm の実物の棒を 21 種類用意した (図 2.7) . 外径は 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 mm の 7 種類を基準として, 基準から -10% した 7 種類 (11.7 - 17.1 mm) , 基準から +10% した 7 種類 (14.3 - 20.9 mm) であった.



図 2.7 21 種類の実物の棒

2.2.2 視覚刺激

視覚刺激として VR 空間内に表示される赤い固視点 (図 2.8) もしくはバーチャルな棒 (図 2.9) を呈示した.

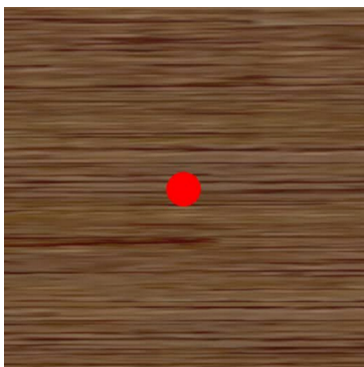


図 2.8 赤い固視点



図 2.9 バーチャルな棒

2.2 呈示刺激

赤い固視点は直径が 10 mm で、棒の視覚呈示を行わず触覚呈示のみを行う際に、棒の位置を示すガイドとして呈示した。バーチャルな棒は触覚刺激と同様に長さ 100 mm で、外径 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 mm の 7 種類を基準に、基準から $\pm 10\%$ した 14 種類を加えた 21 種類を用意した (図 2.10)。各視覚刺激の後方には サイズが 幅 5000 mm, 高さ 400 mm で、木目テクスチャを貼り付けた板を、参加者から見ると 500 mm 目線の先の位置に配置した (図 2.11)。



図 2.10 21 種類のバーチャルな棒

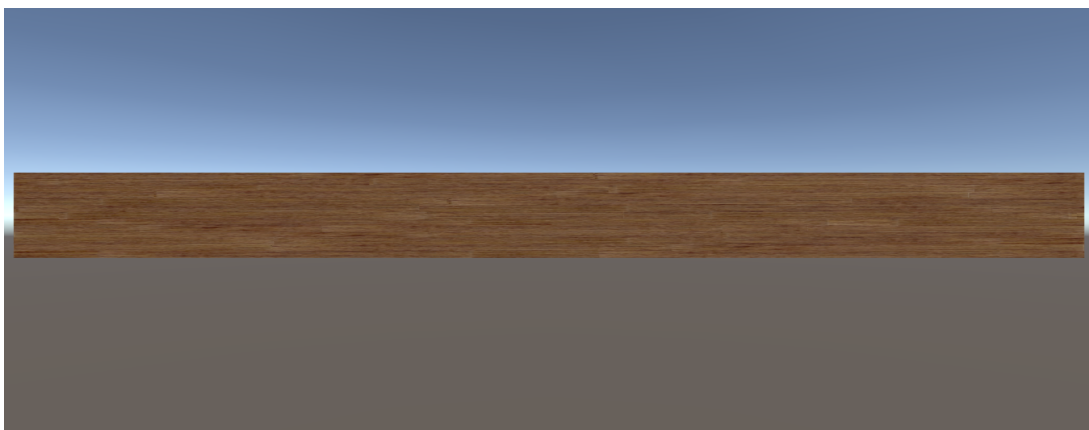


図 2.11 背景の板

2.3 実験 1：距離操作実験

2.3 実験 1：距離操作実験

実験 1 は参加者と刺激までの距離を 近 (200 mm)、中 (325 mm)、遠 (450 mm) の 3 種類を設定し、課題および条件ごとに全距離条件を行った (図 2.12)。

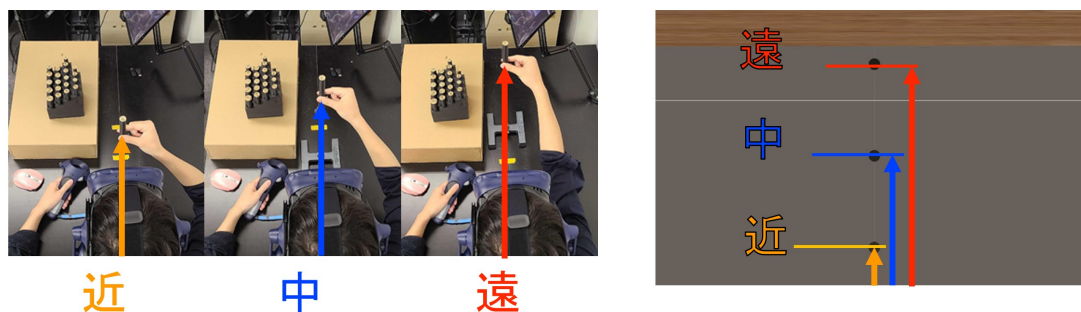


図 2.12 距離条件の関係性

距離条件間はカウンターバランスを取るためラテン方格法を用いた。

2.3.1 触覚判断課題：標準刺激と比較刺激

標準刺激は外径 16 mm の実物の棒を触覚呈示、および赤い固視点を視覚呈示した。比較刺激は外径 13-19 mm (7 種類) からランダムに選ばれた実物の棒 (図 2.13) を触覚呈示、呈示された触覚刺激を基準に太さを -10%, $\pm 0%$, +10% (3 種類) で変化させたバーチャルな棒を視覚呈示した。全 21 条件の関係性は表 2.1 に記す。



図 2.13 7 種類の実物の棒

2.3 実験 1：距離操作実験

表 2.1 各条件ごとの触覚刺激と視覚刺激の外径

触覚刺激	視覚-10%条件	視覚 ±0%条件	視覚+10%条件
13 mm	11.7 mm	13 mm	14.3 mm
14 mm	12.6 mm	14 mm	15.4 mm
15 mm	13.5 mm	15 mm	16.5 mm
16 mm	14.4 mm	16 mm	17.6 mm
17 mm	15.3 mm	17 mm	18.7 mm
18 mm	16.2 mm	18 mm	19.8 mm
19 mm	17.1 mm	19 mm	20.9 mm

2.3.2 触覚判断課題：手続き

図 2.14 は課題の概略図である。

まず、標準刺激の視覚刺激（固視点）を呈示し同時に純音を 200 ms 間呈示した。参加者には純音が鳴っている間のみ標準刺激の触覚刺激（16 mm 実棒）を右手の母指および示指で把持するよう教示した。その後、画面全体を 3000 ms 間暗転させ、その間に実験者は触覚刺激（実棒）を次の比較刺激で呈示するものに変更した。続いて、比較刺激の視覚刺激（触覚と比べて -10%, 0%, +10% な VR 棒）を呈示し、参加者には標準刺激と同様に 200 ms 間のみ比較刺激の触覚刺激（13-19 mm 実棒）を把持するよう教示した。比較刺激呈示後、「標準刺激より比較刺激の方が太いか」を“力触覚により判断”し、コントローラを用いて回答するよう参加者に教示した。このとき、回答までの時間に制限は設けてはいなかったが、直感を信じて迅速に判断を行うように教示していた。

以上の画面暗転、比較刺激呈示、回答を 1 試行とし、全 21 条件を連続で行い、21 条件終了後は再び標準刺激を呈示した。

この手続きを触覚（7 水準）× 視覚（3 水準）× 距離（3 水準）の全条件において 20 試行、計 1260 試行を行った。実験は 1 日あたり全条件において 5 試行、2.20 で示した通り 4

2.3 実験 1：距離操作実験

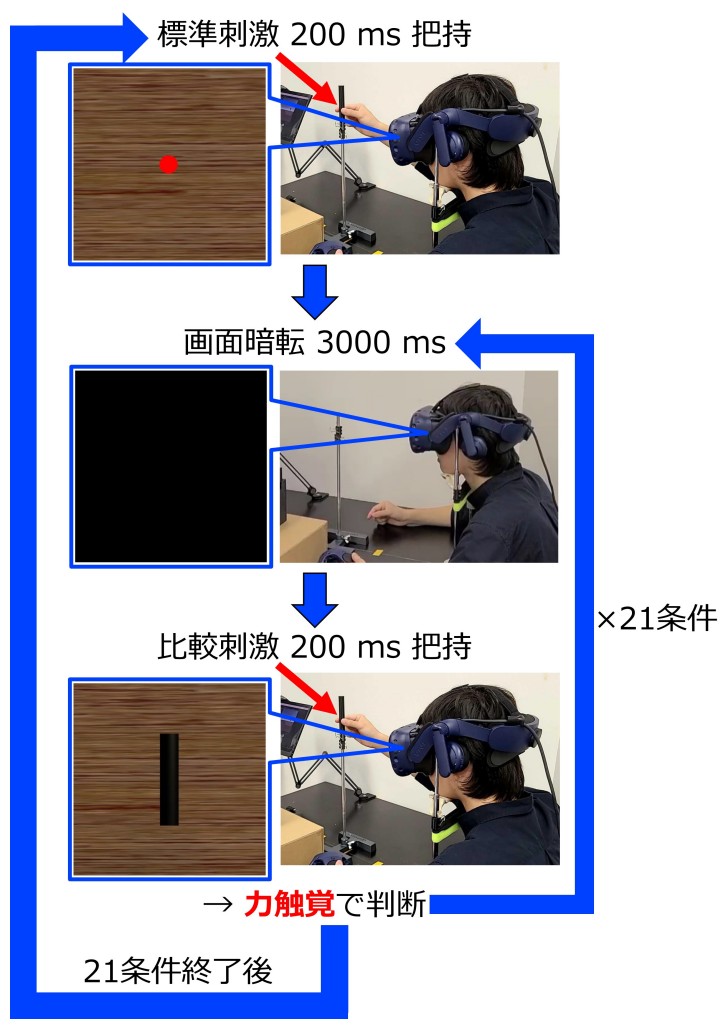


図 2.14 触覚判断課題の手続き

日に分けて実施した。1 日目は 21 試行分の練習試行を執り行ってから本実験へと移行する追加の手続きがあった。

2.3.3 視覚判断課題：標準刺激と比較刺激

触覚判断課題と比べて触覚と視覚の条件を入れ替えて課題を行った。標準刺激は外径 16 mm のバーチャルな棒を視覚呈示し、触覚呈示を行わなかった。比較刺激は外径 13-19 mm (7 種類) からランダムに選ばれたバーチャルな棒 (図 2.15) を視覚呈示、呈示された視覚刺激を基準に太さを -10%, $\pm 0\%$, +10% (3 種類) で変化させた実物の棒を触覚呈示した。

2.3 実験1：距離操作実験



図 2.15 7種類のバーチャルな棒

2.3.4 視覚判断課題：手続き

図 2.16 は視覚判断課題の概略図である。

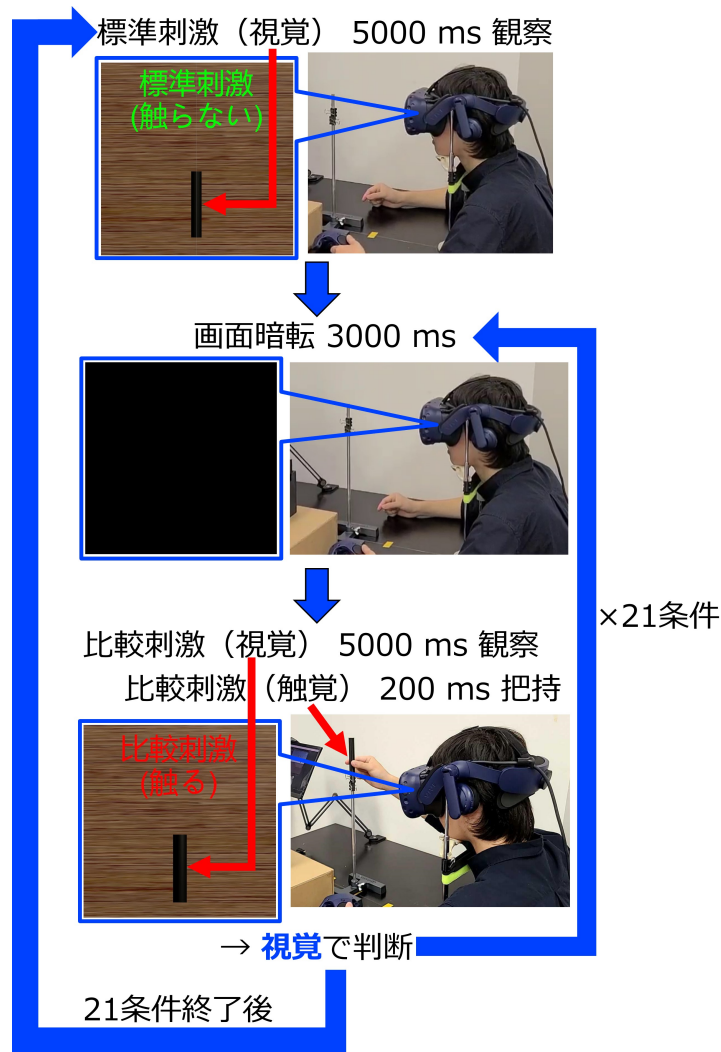


図 2.16 視覚判断課題の手続き

まず、標準刺激として「標準刺激（触らない）」という文字列および視覚刺激（16 mm VR 棒）を 5000 ms 間呈示し、参加者にはバーチャルな棒を観察するよう教示した。その

2.3 実験1：距離操作実験

後、画面全体を 3000 ms 間暗転させ、その間に実験者は触覚刺激（実棒）を次の比較刺激で呈示するものに変更した。続いて、比較刺激として「比較刺激（触る）」という文字列および視覚刺激を 5000 ms 間のみ呈示し、触覚判断課題と同様に 200 ms 間のみ触覚刺激を把持するように教示した。比較刺激呈示後、「標準刺激より比較刺激の方が太いか」を“視覚により判断”し、コントローラを用いて回答するよう参加者に教示した。以上の画面暗転、比較刺激呈示、回答を 1 試行とし、全 21 条件を連続で行った。21 条件終了後は再び標準刺激を呈示した。

この手続きを触覚判断課題と同様、全条件において 20 試行ずつ、4 日に分け実施し、1 日目のみ練習試行があった。

2.3.5 リーチング課題

視覚もしくは触覚の各判断課題の 1 日目の全条件全試行が終わった参加者は、知覚された距離量を測定するためにリーチング課題を行った。まず机上から支柱を取り除き、VR 空間上にバーチャルな棒を呈示した。参加者に「表示されている VR 棒があると思われる場所」を右手の示指で示すように教示した。参加者が指し示した位置を定規と曲尺を用いて、図 3.5 のようにして距離量を測定した。

以上の手続きをバーチャルな棒の位置を近（200 mm）、中（325 mm）、遠（450）、すべての距離条件で行い、1 つの距離条件につき 3 回測定した。



図 2.17 リーチング課題の様子

2.3 実験1：距離操作実験

2.3.6 実験参加者

触覚判断課題には正常な視力（矯正含む）を有する大学生 15 名（ 20.3 ± 0.94 歳）が参加した。視覚判断課題には触覚判断課題に参加していない 15 名（ 20.0 ± 0.88 歳）が参加した。リーチング課題には上記のすべての参加者が参加した。

2.3.7 剰余変数の統制

把持を行う時間を統制するために、純音が鳴っている 0.2 s の間のみ把持を行うように参加者に教示した。距離条件間でカウンターバランスを取るため、図 2.18 のような標準のラテン方格を作成した後、図 2.19 のような実施順の全パターンを網羅した表を作成し、図 2.20 のように参加者 15 名の中で全員が異なる順番で全ての順番パターンで実施されるようにした。

	1	2	3
1	遠	中	近
2	近	遠	中
3	中	近	遠

図 2.18 距離 3 条件の標準のラテン方格

遠中近	パターン1
遠近中	パターン2
中遠近	パターン3
中近遠	パターン4
近遠中	パターン5
近中遠	パターン6

図 2.19 距離 3 条件の実施順番の全パターン

2.4 実験2：身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示実験

参加者	パターン順	1日目	2日目	3日目	4日目
1	1,2,3,4	遠中近	遠近中	中遠近	中近遠
2	5,1,3,2	近遠中	遠中近	中遠近	遠近中
3	6,3,2,1	近中遠	中遠近	遠近中	遠中近
4	4,2,1,5	中近遠	遠近中	遠中近	近遠中
5	6,1,2,4	近中遠	遠中近	遠近中	中近遠
6	5,6,2,1	近遠中	近中遠	遠近中	遠中近
7	5,1,3,4	近遠中	遠中近	中遠近	中近遠
8	1,6,3,4	遠中近	近中遠	中遠近	中近遠
9	3,6,1,5	中遠近	近中遠	遠中近	近遠中
10	6,4,5,1	近中遠	中近遠	近遠中	遠中近
11	2,3,4,5	遠近中	中遠近	中近遠	近遠中
12	4,6,3,2	中近遠	近中遠	中遠近	遠近中
13	6,5,2,3	近中遠	近遠中	遠近中	中遠近
14	4,5,2,6	中近遠	近遠中	遠近中	近中遠
15	3,5,4,6	中遠近	近遠中	中近遠	近中遠

図 2.20 ラテン方格

2.4 実験2：身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示実験

実験1と共通している部分は省略して説明する。実験2では参加者と刺激までの距離を325 mmで固定し、VR空間上に図2.21のようなバーチャルな手（ハンドアバタ）を表示し、実験1と同様に触覚判断課題および視覚判断課題を行った。参加者が棒を把持する際、ハンドアバタの指の間隙によって棒の太さを類推されないため、あるいは指が棒を隠すことを防ぐために、棒と指が近づくと図2.22の指のないハンドアバタに切り替わるようにした（図2.23）。ハンドアバタはHMD正面のカメラが手を認識することで表示されるようになっていた。そのため表示には遅延が生じていた可能性があり、身体所有感などに影響がないかを節2.4.1で後述する質問紙にて確認した。

2.4.1 質問紙

先行研究[17]に基づいて、Q1からQ10までの質問文を作成した（表2.2）。Q1からQ3が自己肯定感、Q4からQ6が自己主体感、Q7からQ10が身体の位置に関する内容であっ

2.4 実験2：身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示実験



図 2.21 ハンドアバタ

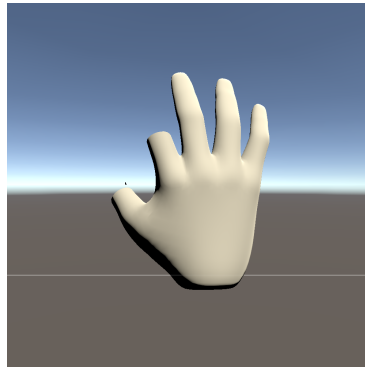


図 2.22 ハンドアバタ（指なし）

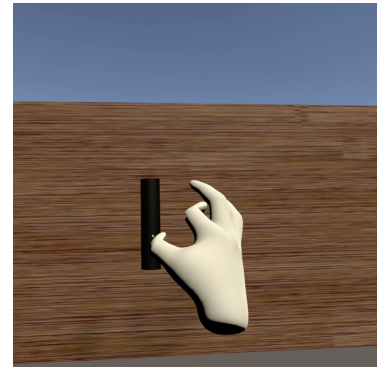


図 2.23 実験時の様子

た。これらの質問に対する判断を-3（強く反対）、-2（反対）、-1（やや反対）、0（どちらでもない）、1（やや同意）、2（同意）、3（強く同意）の7段階のリッカート尺度で回答するように求めた自己所有感は $(Q1-Q2)-Q3$ ，自己主体感は $Q4+Q5+Q6-Q7$ ，身体的位置は $Q8-Q9+Q10$ としてそれぞれ計算して指標とした。

参加者には全試行が終わった後，Q1 から順番に回答を行うよう指示した。

2.4 実験2：身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示実験

表 2.2 各条件ごとの触覚刺激と視覚刺激の外径

自己所有感	Q1	バーチャルな右手が自分の右手であるかのように感じた
	Q2	私が見たバーチャルな右手は、他の誰かのものであるかのように感じた
	Q3	自分には複数の右手があるかのように感じた
自己主体感	Q4	バーチャルな右手を、 自分の右手であるかのようにコントロールできると感じた
	Q5	バーチャルな右手の動きは、自分の動きによって引き起こされた
	Q6	バーチャルな右手の動きが自分の動きに影響を与えているように感じた
	Q7	バーチャルな右手が勝手に動いているように感じた
身体の位置	Q8	自分の右手がバーチャルな右手が見えた場所にあるような気がした
	Q9	自分の右手が身体の外にあるような気がした
	Q10	自分の右手がバーチャルな右手の方にドリフトしているような気がした あるいは バーチャルな右手が自分の右手の方にドリフトしているような気がした

2.4.2 実験参加者

実験1のどちらの課題にも参加していない大学生15名（23.1 ± 0.94歳）が参加した。

2.5 分析方法

2.5.1 使用ソフトウェア

実験で得られたデータは C# を用いて自作した実験プログラムで csv ファイルに格納した。参加者のコントローラによる回答の入力および図の作成には Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corporation, Redmond WA, USA) を使用した。心理測定関数のフィッティングには R 4.2.2 (R Core Team. 2022 [18]) 上でプロビット回帰分析を使用した。分散分析には R 4.2.2 上で ANOVA 君 4.8.7 (Iseki, 2023 [19]) を使用した。

2.5.2 主観的等価点 (*PSE*) の算出

図 2.24 は触覚判断課題のフィッティングの例であり、縦軸が太いと答えた割合、横軸が触覚刺激の太さ (mm)、凡例が触覚刺激と比べた視覚刺激の太さ 3 条件 (%) である。

図 2.25 は視覚判断課題のフィッティングの例であり、縦軸が太いと答えた割合、横軸が視覚刺激の太さ (mm)、凡例が視覚刺激と比べた触覚刺激の太さ 3 条件 (%) である。

すべての実験および課題の条件ごとに、この「標準刺激よりも比較刺激の方が太い」と回答した割合を算出して心理測定関数をフィッティングした。50%点を外径 16 mm の標準刺激と同じ太さを感じられた比較刺激の主観的等価点 (*PSE*: Point of Subjective Equality) とした。

2.5 分析方法

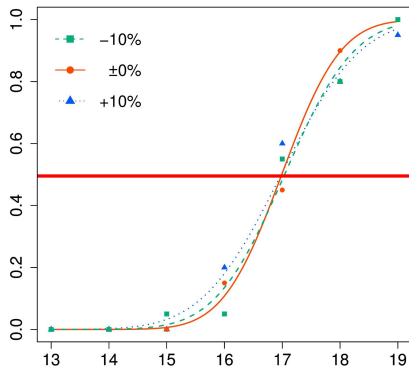


図 2.24 心理測定関数のフィッティングの触覚判断課題の一例
 (縦軸：標準刺激より比較刺激の方が太いと答えた割合,
 横軸：触覚刺激の太さ (mm),
 凡例:触覚と比べた視覚刺激の太さ)

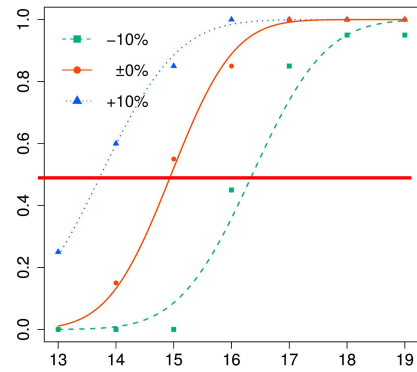


図 2.25 心理測定関数のフィッティングの視覚判断課題の一例
 (縦軸：標準刺激より比較刺激の方が太いと答えた割合,
 横軸：視覚刺激の太さ (mm),
 凡例:視覚と比べた触覚刺激の太さ)

2.5.3 重み付け算出

算出した PSE を基に, SS を標準刺激の太さ (mm) とし, $Ri = \frac{SS}{PSE}$ で表される Ri を視触覚統合時に知覚された太さの変化率 (%) とした. CS を各実験における判断基準となるモダリティ側の比較刺激の太さ (mm), S_v と S_h をそれぞれ視覚刺激と触覚刺激の太さ (mm) とした. 視触覚の重み付けは単純な線形結合であると考え, 以下の数式によって, 視覚と触覚の重み付け w_v と w_h をそれぞれ, すべての実験および課題と条件ごとに算出した.

$$CS \times Ri = S_v \times w_v + S_h \times w_h \quad (w_v + w_h = 1)$$

第 3 章

実験結果

3.1 主観的等価点 (PSE)

触覚判断課題における触覚と比べた視覚刺激の変化 (-10, ±0, +10%), 視覚判断課題における視覚に比べた触覚刺激の変化 (-10, ±0, +10%) をモダリティ間変化%とする。

図 3.1 は 横軸はモダリティ間変化% および 距離 3 条件, 縦軸は主観的等価点 PSE であり, 左が触覚判断課題で右が視覚判断課題のグラフを表しており, 実験 1 の各課題各条件における PSE を示す。また, 図における誤差線は標準誤差を表しており, これ以降のグラフについても誤差線は全て標準誤差を意味する。 PSE について, モダリティ間変化% (3 水準) × 距離 (3 水準) の対応あり二要因分散分析を行ったところ, 触覚判断実験の方ではどの条件間にも有意な差が見られなかった ($F(2,28) = 1.0819, p = .353, \eta_G^2 = 0.0048$) (図 3.1 左)。視覚判断課題 (図 3.1 右) ではモダリティ間変化% 及び距離の主効果が有意であり ($F(2,28) = 22.93, p < .001, \eta_G^2 = 0.21; F(2,28) = 8.92, p = .006, \eta_G^2 = 0.03$), 多重比較の結果, どちらの効果もすべての水準間に差が見られた ($p < .05$)。

3.1 主観的等価点 (PSE)

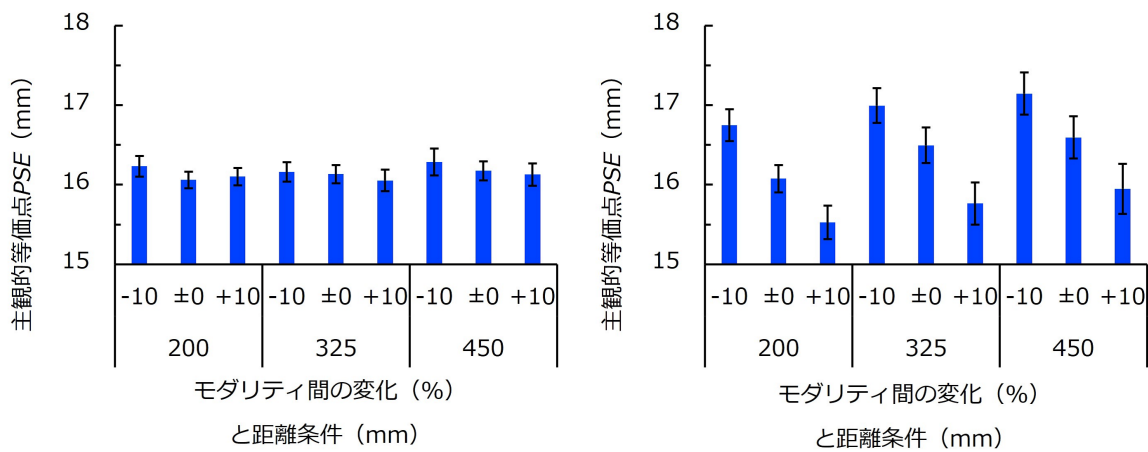


図 3.1 距離操作実験：主観的等価点（左：触覚判断課題，右：視覚判断課題）

実験 1 の 325 mm 距離条件（アバタなし）と実験 2 の各条件（アバタあり）を比較したグラフを図 3.2 に示す。各課題における PSE について、モダリティ間変化%（3 水準）× アバタ有無（2 水準）の二要因混合計画の分散分析を行ったところ、視覚判断課題におけるモダリティ間変化%（図 3.2 右）のみ有意な差が見られた。

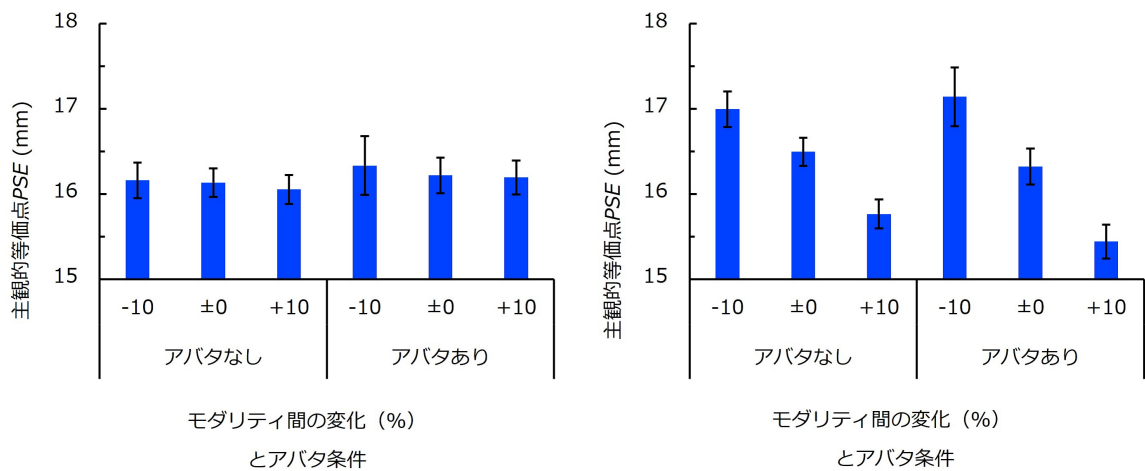


図 3.2 主観的等価点比較（左：触覚判断課題，右：視覚判断課題）

3.2 重み付け係数

3.2 重み付け係数

2.5.3 節で述べた方法で求めた重み付け係数を、各実験の各課題それぞれにおいて求めた。実験 1 について、横軸を距離条件、縦軸を重み付け係数とした $\pm 10\%$ のモダリティ間変化条件ごとの結果を、図 3.3 に示す。各課題の重み付けについて、 $\pm 10\%$ の変化 (2 水準) \times 距離 (3 水準) の対応あり二要因分散分析を行ったところ、視覚判断課題 (図 3.3 右) において交互作用が有意であった ($F(3,42) = 5.96, p = .019, \eta_G^2 = 0.02$)。

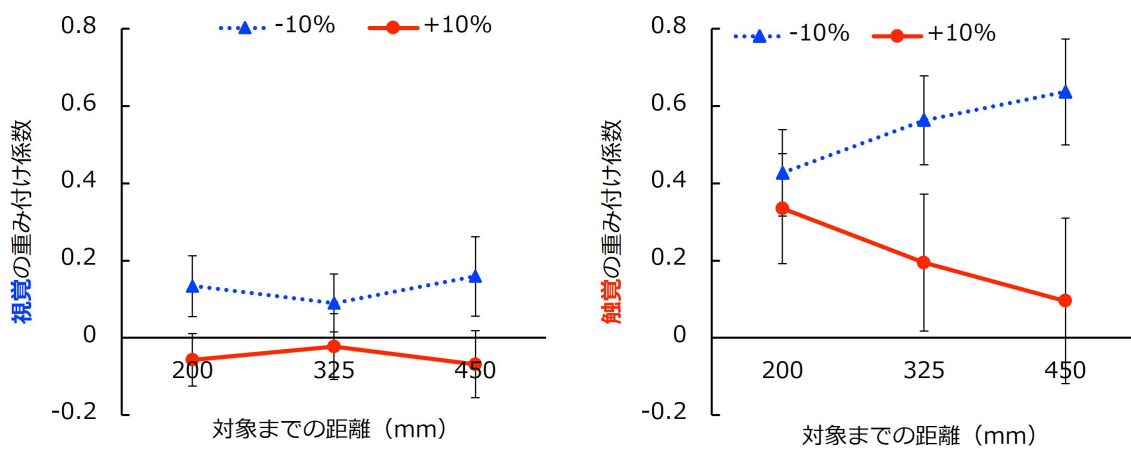


図 3.3 距離操作実験：重み付け係数 (左：触覚判断，右：視覚判断)

実験 1 と実験 2 の比較について、横軸を各判断課題 (アバタ有無)、縦軸を重み付け係数とした $\pm 10\%$ のモダリティ間変化条件ごとの結果を図 3.4 に示す。各実験の重み付けについて、 $\pm 10\%$ の変化 (3) \times アバタ有無 (2) の二要因混合計画の分散分析を行ったところ、どの条件間にも差が見られなかった。

3.3 リーチング課題の結果

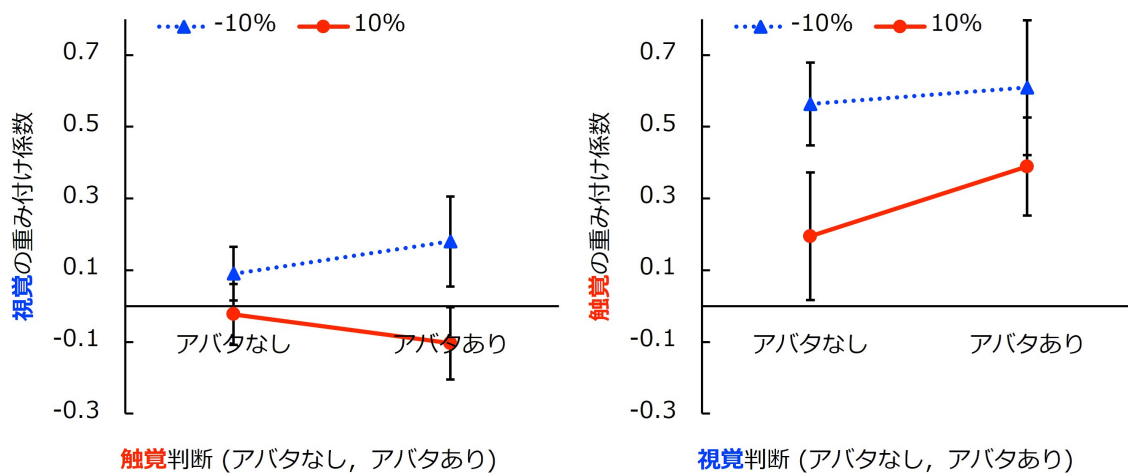


図 3.4 重み付け係数比較 (左：触覚判断課題, 右：視覚判断課題)

3.3 リーチング課題の結果

図 3.5 は実験 1 で行ったリーチング課題において、参加者が回答した距離量（平均値）と実際の距離量を各判断課題ごとに比較したグラフである。各課題において 距離（3 水準）× 距離量（2 水準）の二要因の対応あり分散分析を行った。その結果、触覚判断課題においては近距離（200 mm）と中距離（325 mm）条件で単純主効果がみられた（ $F(1,14) = 5.98$, $p = .028$, $\eta_G^2 = 0.176$; $F(1,14) = 8.52$, $p = .011$, $\eta_G^2 = 0.233$ ）。視覚判断課題においては交互作用は見られた（ $F(2,28) = 3.73$, $p = .037$, $\eta_G^2 = 0.0067$ ）が、単純主効果は見られなかった。なお、距離条件間は参加者の回答と実際の距離量、どちらにおいてもすべての間で差が見られた（統計量は省略する）。

3.4 各課題の距離条件における正答率

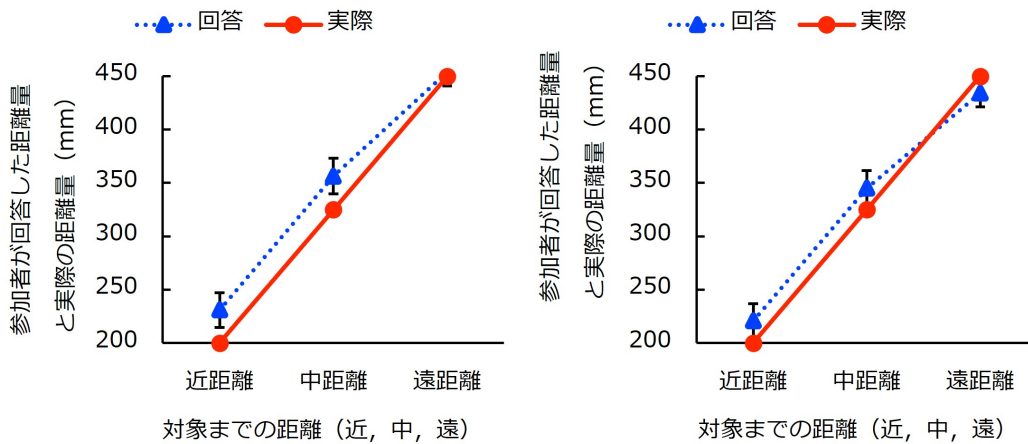


図 3.5 リーチング課題の結果（左：触覚判断課題，右：視覚判断課題）

3.4 各課題の距離条件における正答率

視触覚の両判断課題の距離条件ごとの正答率が図 3.6 である。判断課題間を参加者間、距離条件間を参加者内で行う 2 要因混合計画の結果、判断課題間のみ有意な差が見られた ($F(1,28) = 60.10, p < .001, \eta_G^2 = 0.629$)。距離条件間では正答率の有意な差は見られなかった ($F(1.47,41.18) = 0.97, p = .364, \eta_G^2 = 0.0026$)。

3.5 心理測定関数の傾きと距離の相関

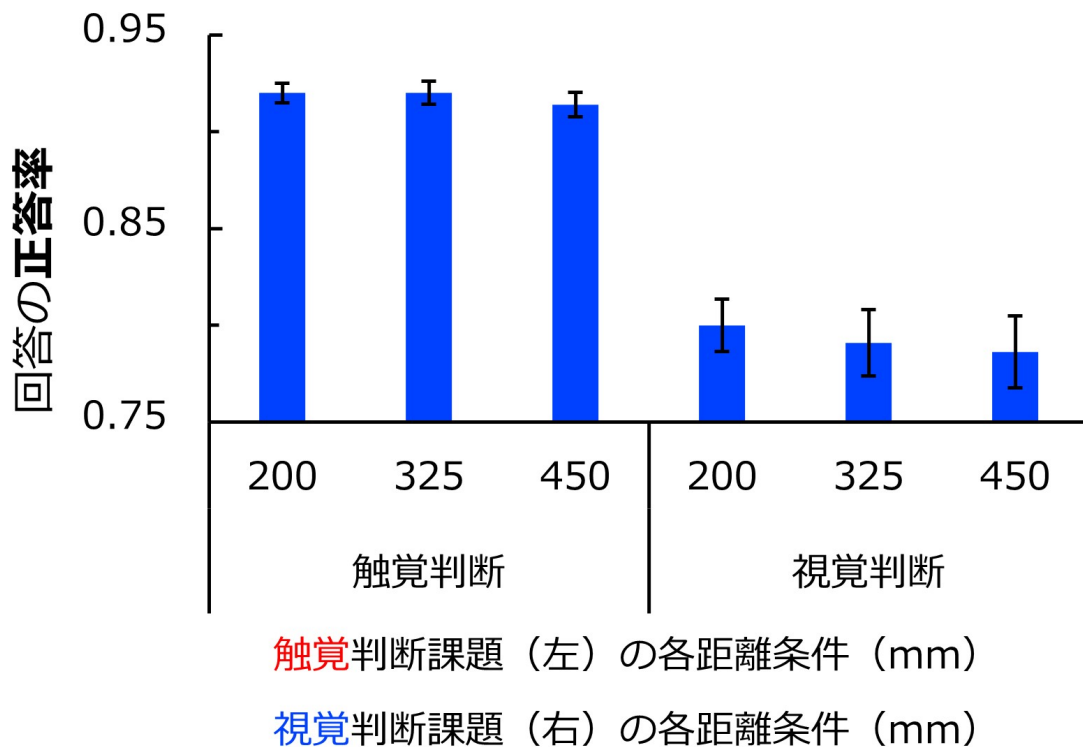


図 3.6 各判断課題の距離条件ごとの正答率 (左：触覚判断課題，右：視覚判断課題)

3.5 心理測定関数の傾きと距離の相関

実験 1 では距離条件間で視覚刺激に補正を掛けておらず，距離が変わると見え方は変わるようになっていた．そのため，距離条件が遠距離になるほど視覚刺激が小さく不明瞭に見えていた可能性がある．心理測定関数の傾きに注目すると，この値が大きいほど弁別閾が低く，判断基準ではないモダリティの影響が少ないことを表している．そこで，遠距離条件になるほど触覚（視覚）判断課題における心理測定関数の傾きが大きく（小さく）なる場合，視覚刺激の呈示が見えづらく結果に影響があった可能性が考えられる．

図 3.7 は横軸を距離条件，縦軸を参加者ごとの心理測定関数の傾きとした実験 1 の触覚判断課題における結果である．左のグラフが -10%，中央が $\pm 0\%$ ，右が +10% のモダリティ間変化条件における結果を表している．各モダリティ間変化条件において Pearson の無相関検定を行ったところ，-10%条件は相関係数 -0.013 ($t = -0.088(43)$, $p = .930$)， $\pm 0\%$ 条件は

3.5 心理測定関数の傾きと距離の相関

相関係数 -0.056 ($t = -0.36(43)$, $p = .717$), $+10\%$ 条件は相関係数 0.261 ($t = 1.7708(43)$, $p = .084$) であり, 遠距離になるほど心理測定関数の傾きが増加する相関は見られなかった.

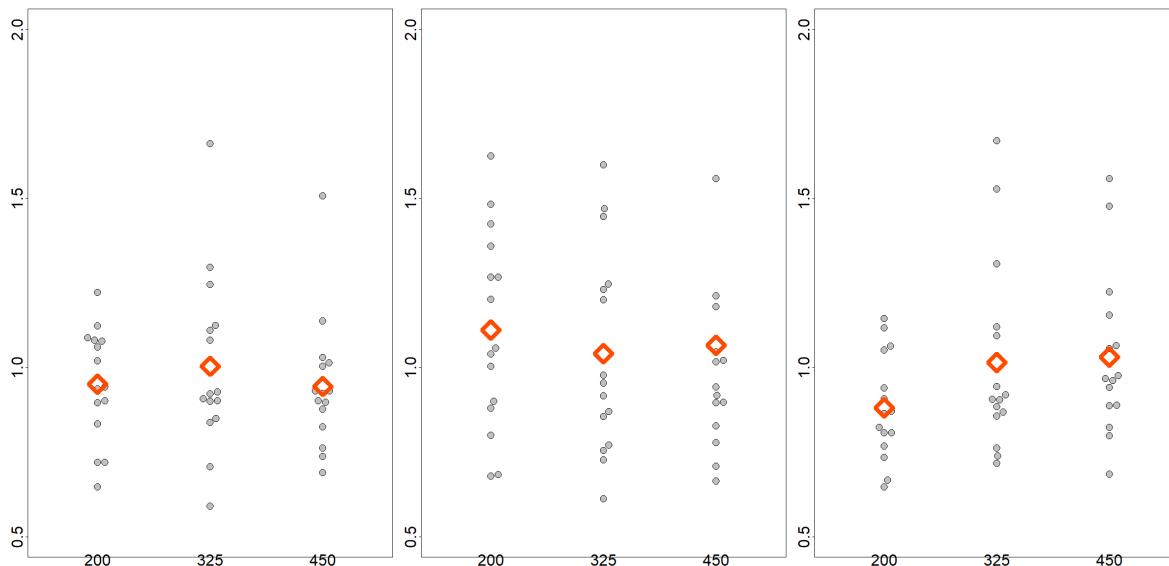


図 3.7 実験 1 触覚判断課題における心理測定関数の傾きと距離の関係

(左: -10% 条件, 中央: $\pm 0\%$ 条件, 右: $+10\%$ 条件)

(菱型: 全参加者の平均値, 丸型: 各参加者の平均値)

図 3.8 は図 3.7 と同じく横軸を距離条件, 縦軸を参加者ごとの心理測定関数の傾きとし, 実験 1 の視覚判断課題における全モダリティ間変化条件の結果である. 各モダリティ間変化条件において Pearson の無相関検定を行ったところ, -10% 条件は相関係数 0.106 ($t = 0.70(43)$, $p = .488$), $\pm 0\%$ 条件は相関係数 -0.094 ($t = -0.62(43)$, $p = .539$), $+10\%$ 条件は相関係数 -0.146 ($t = -0.97(43)$, $p = .340$) であり, 遠距離になるほど心理測定関数の傾きが減少する相関は見られなかった.

3.6 質問紙の結果

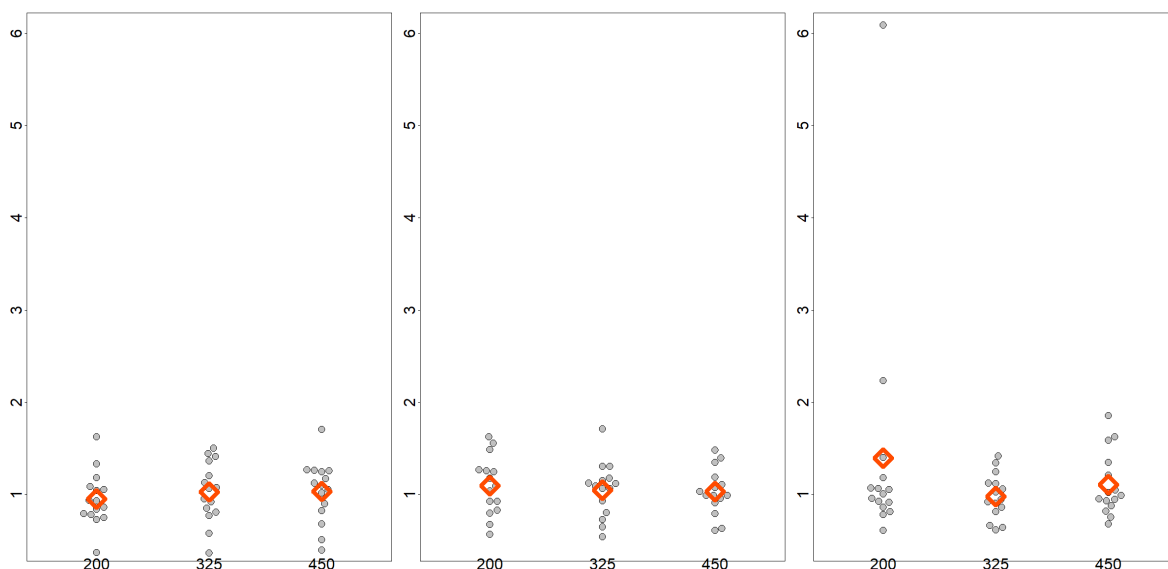


図 3.8 実験 1 視覚判断課題における心理測定関数の傾きと距離の関係

(左：-10%条件，中央：±0%条件，右：+10%条件)

(菱型：全参加者の平均値，丸型：各参加者の平均値)

3.6 質問紙の結果

図 3.9 は実験 2 終了後に行った質問紙の結果である。縦軸が評価点の平均値，横軸が左から順番に自己所有感および自己主体感および身体の位置の各評価項目を表している。自己所有感，自己主体感，身体の位置，それぞれの評価点に対して 1 標本の対応ありウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果，どの評価項目も有意に 0 より高い結果が得られた ($p < .01, r = 0.8154699$; $p < .01, r = 0.7997114$; $p < .01, r = 0.5692854$)。

3.7 解像度

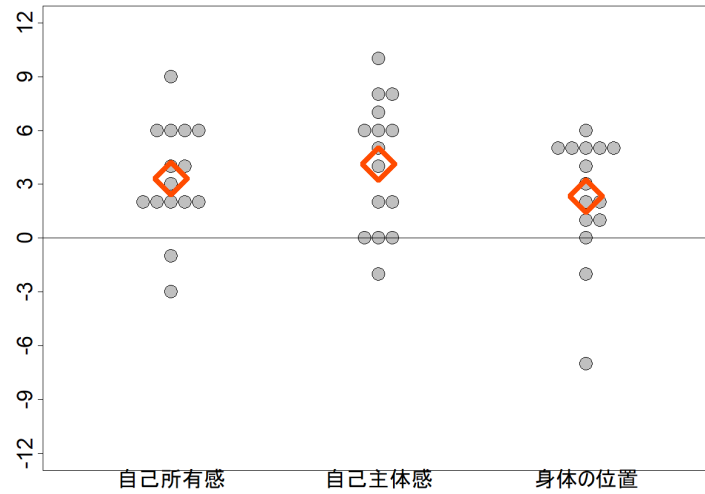


図 3.9 アンケート結果（菱形：全参加者の平均値，丸型：各参加者の平均値）

3.7 解像度

VIVE Pro で本実験の刺激を見たときのビジュアルアングル（視角）を以下の計算式で求めた。

$$v = \frac{360}{\pi * \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{s}{2d} \right) \right\}} \quad (v: \text{視角}, s: \text{物体の大きさ}, d: \text{観察距離}) \quad (3.1)$$

上記の式に 450 mm（最遠）で物体の大きさ 1.3 mm（最小）だと、 $v = 0.165$ 度である。VIVE Pro の性能として解像度は 1440x1600（片目）、視野角 110 度である。これに 0.165 度あたりの解像度を求めると $\frac{1440}{110} * 0.165 = 2.16$ pixel である。そのため、1 ピクセル以上で描画自体はされており、性能は十分であったといえる。

第 4 章

考察

4.1 主観的等価点 (PSE)

実験 1 および 2 ともに、触覚判断課題では視覚情報付加の影響が見られなかったが、視覚判断課題では触覚情報付加の影響が見られた。これは、触覚の信頼性が高くなったことが理由だと考えられる。視覚情報は距離に依存して網膜像が変化するのに対して触覚は依存しない。また、本実験では触覚は実物であったが視覚はバーチャルであった。先行研究 [13] でもモダリティ情報にノイズを加えると信頼性が下がり重み付けが低下したと報告があるため、本実験の刺激では触覚が優位となった可能性がある。

また、実験 1 と 2 で差が見られなかったことから本実験のアバタでは信頼性や重み付けに影響を及ぼさなかったと考える。

4.2 重み付け係数

実験 1 の視覚判断課題において、触覚の重み付けが距離に依存して変化したが、条件によって結果に非対称性が見られた。Ogawa と Macaluso の先行研究 [20] では、背景に映る物体の変化と比べて前景の物体の変化はより精度が高く、反応までの時間も短いと報告されている。しかし、本実験では-10%の触覚情報条件では距離が遠いほど触覚（視覚）の重み付けは大きく（小さく）なり、+10%の触覚情報条件では距離が遠いほど触覚（視覚）の重み付けは小さく（大きく）なった。どちらの感覚モダリティがより大きいか依存してその距離の影響の傾向が異なった。

4.2 重み付け係数

これらには視覚による「大きさの恒常性の効果」が関わっている可能性があると考えた。図 4.1 は通常時（この実験では $\pm 0\%$ 条件）と -10% 条件において恒常性がどのように関わっているかを表している。通常は遠い物体を見た時、入力（刺激の大きさ）そのものは視覚入力 < 触覚入力 という関係であるが、恒常性が働いて知覚される段階では視覚入力が拡大されて視知覚 = 触知覚 というように視触覚が釣り合うようになる。ところが、 -10% 条件では入力の時点で視覚入力 > 触覚入力である。ここで恒常性が働くと視知覚 > 触知覚 となり矛盾が生じる。「触覚入力は距離で変わらない」かつ「視覚は距離によって見積もりが変わる」という前提があるため、誤りがあるのは視覚の方であると判断され視覚が信頼されなくなり、視覚の重み付けが相対的に小さくなったと考える。

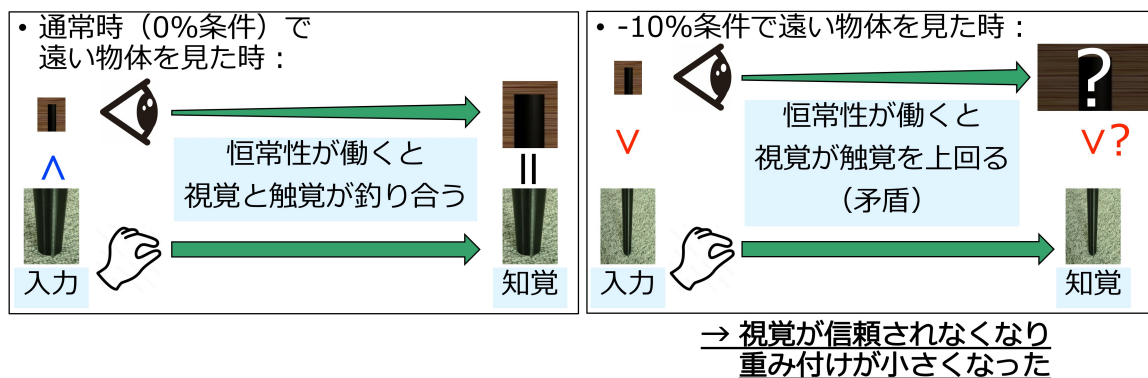


図 4.1 通常時（ $\pm 0\%$ 条件）（図左）および -10% 条件（図右）において刺激入力と刺激知覚が恒常性と関わる処理過程

図 4.2 は $+10\%$ 条件において恒常性がどのように関わっているかを表している。 $+10\%$ 条件では入力の時点で視覚入力 < 触覚入力であり、恒常性が働いたとしても視知覚 \leq 触知覚、少なくとも視覚は触覚と同じか下回る程度の知覚量となる。これは恒常性と矛盾していないため視覚が信頼され、その重み付けが相対的に大きくなったと考える。ただし、視覚判断課題は視覚を信じて判断を行うように教示していた課題であったため、判断基準をそのまま採用した結果であるともいえる。

4.3 リーチング課題と奥行き知覚について

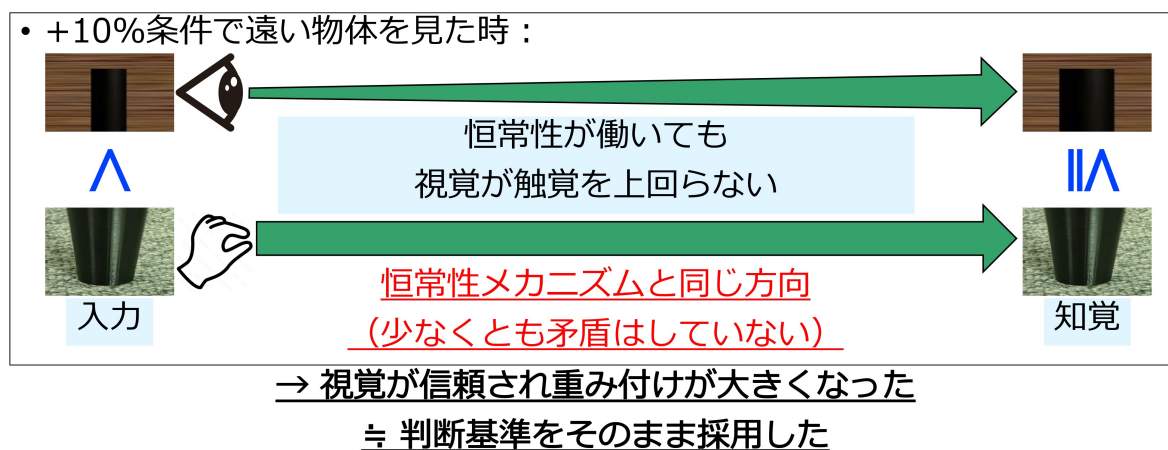


図 4.2 +10%条件において刺激入力と刺激知覚が恒常性に関わる処理過程

4.3 リーチング課題と奥行き知覚について

今回、図 3.3 と図 3.4 を参照しても全体として視覚の重み付け係数が低かった。本実験では VR 空間内で視覚距離を変更しており、水晶体調節 (accommodation) が HMD の焦点距離で固定になっていた。距離に応じて調節が変化しなかったことで正しい距離知覚が行えず、視覚の重み付けの低下につながった可能性が考えられる。

4.3.1 リーチング課題の結果

実際に距離知覚が正しく行われているかリーチング課題の結果 (3.5) を参照すると、確かに触覚判断課題の近距離と中距離条件の時に遠くに知覚されている。これについては、参加者が実験時に把持していた位置を記憶しており、同じ位置に手を持っていき指先だけを伸ばしていたため遠くに測定された可能性もある。その場合、遠距離条件は腕のリーチングの限界によりそれ以上先を指し示すことができなかったと考える。

Shigemasu と Sato による奥行き知覚の先行研究 [21] では、570 mm の近視距離においては運動手がかりよりも情報量が多いとされる視覚 (両眼視差) による手がかりが使われたと報告がある。本実験の距離条件のように 570 mm よりも近い視距離では、運動手がかりと視覚による手がかりのどちらを使うかは動的に変化した可能性もある。ただし、距離条件

4.4 各課題の距離条件における正答率について

間はすべてにおいて差が見られたことから、条件の違いは知覚されていたといえる。

4.3.2 先行研究

過去の先行研究では調節を固定して輻輳 (convergence) と不一致させたときは、輻輳を手がかりとして奥行きを知覚していたという報告がある [22][23]。ただし、Swenson の研究 [22] では改良されたミラーステレオスコープを用いて、Richards と Miller の研究 [23] の研究ではプリズムとレンズのディオプターを変化させて、調節と輻輳のどちらか一方あるいは両方を設定していた。そして、Swenson の研究では輻輳が奥行き知覚の手がかりとして高い割合で採用されていたものの、調節による影響も 0 ではなかった。Richards と Miller の研究では輻輳情報を奥行き知覚の手がかりとできる参加者とできない参加者で二分されており、前者が 15/25 人、後者が 10/25 人 という関係であった。

つまり、(水晶体) 調節が固定化されていたとしても奥行き知覚に関しては輻輳の要因の方が大きいため問題ないと考える。しかし、先行研究とは刺激呈示の実験環境が違う上、リーチング課題で実際と違う距離量の回答もあったことから、調節が変化しないことが奥行き知覚、および視覚の重み付けに影響を及ぼした可能性もあると考える。

4.4 各課題の距離条件における正答率について

どの距離条件においても触覚判断課題が視覚判断課題より有意に正答率が高かった。これについても *PSE* の結果や重み付けと同様、触覚が実物で視覚がバーチャルであったことが理由の 1 つとして挙げられるだろう。ただし、他にも理由は考えられる。今回用いた標準刺激が 16 mm であり、比較刺激は 13 から 19 mm まで 1 mm ずつの 7 種類であった。この範囲が太さ知覚における触覚知覚にとって最適な刺激の太さであり、視覚にとっては最適ではなかった可能性も考えられる。

4.5 心理測定関数の傾きと距離の相関について

4.5 心理測定関数の傾きと距離の相関について

心理測定関数の傾きと距離に相関は見られなかった。そのことから、遠距離条件は視覚刺激が不明瞭でありそれがノイズとなってモダリティの信頼性に影響を与えたわけではなく、同様に重み付けにも影響を及ぼしたわけではないといえる。

4.6 質問紙の結果

図 3.9 の質問紙の内容では、どの評価項目も 0 より有意に高いスコアであるという結果が得られた。ただし、自己所有感、自己主体感、身体的位置はそれぞれ 9, 12, 9 点が最高スコアである。どの評価項目も平均値は最高スコアの半分に満たない上、マイナスのスコアを示している参加者も存在している。そのため、本実験の身体フィードバック（アバタの呈示）は最適であったとは言い難い。今後はこの成績が向上する呈示を行うことができれば、視覚の信頼性に寄与することができる可能性もある。

4.7 研究の成果と今後の展望

本研究では太さの視触覚統合において、少なくとも $\pm 10\%$ のモダリティ間変化では触覚判断課題で視覚の影響を確認することができなかった。一方、視覚判断課題では触覚の影響が見られた。このことは実験 1 だけでなく実験 2 においても同じ結果が得られている。

今後の展望としては、モダリティ間の変化条件を変えたり、標準刺激と比較刺激の太さを変えたり、視覚を実物にすることでさらなる検討ができると考える。

まずモダリティ間変化を変えることについて、例えば $\pm 5\%$ に縮小することで視覚の重み付けが増大する場合、今回の条件では差が大きすぎたことで信頼性に影響があったと考えることができる。反対に $\pm 20\%$ など拡大することで視覚の重み付けが増大するならば、今回の条件では視覚的に差を感じるができなかったために重み付けが変化しなかったと考えることができる。

次に、標準刺激と比較刺激の太さを変えることについて考える。本研究では標準刺激を

4.7 研究の成果と今後の展望

16 mm, 比較刺激を 13 から 19 mm で検定を行った. 今回設定した範囲外の太さで検定することで, 視覚が得意とする太さと触覚が得意とする太さが異なることが判明し, 視触覚の重み付けが逆転する可能性も考えられる.

最後に視覚をリアルな実物にすることについて考える. 視触覚をともに実物にする場合, 机上に視覚刺激, 机下に触覚刺激を配置する方法などが考えられる. この場合, VR や鏡面を通す環境と違い位置関係が必ず不一致になってしまうため, そのことが優位となる感覚モダリティが変わることに繋がる可能性もある.

第 5 章

おわりに

本研究では、視触覚統合の太さ知覚において実物の触覚とバーチャルな視覚を用いた上で、刺激対象までの距離やアバタ有無などの自己身体周辺の環境を変化させる効果を検討した。

実験 1 および 2 ともに触覚判断課題では視覚情報の付加の影響が見られなかったが、視覚判断課題では触覚情報の付加の影響が見られた。距離に依存して網膜像が変化する視覚情報に対して触覚は距離に依存して変化しないことに加えて、実物の触覚刺激に対してバーチャルな視覚刺激を用いたため、本実験の刺激では触覚が優位となった可能性がある。

視触覚の重み付けは距離に依存して変化するが、距離が近いほど視覚の重み付けが一律に大きくなるのではなく、-10%の触覚情報を付加した条件では逆に距離が遠いほど重み付けは大きくなった。どちらの感覚モダリティがより大きいかに依存してその距離の影響の傾向が異なった。視触覚の重み付けは、距離によって変わるものの、視覚と触覚の相対的關係にも依存して変化したといえる。

実験 1 の 325 mm 距離条件と実験 2 の比較より、身体フィードバック（ハンドアバタ）呈示の影響は見られなかった。ハンドアバタの呈示は VR の視覚情報自体の信頼性に寄与せず、視覚の重み付けが増加しなかったと考えられる。

リーチング課題における距離知覚量は、触覚判断課題の近距離と中距離において実際の距離量より遠い位置を示していた。これについては、運動手がかりが働いた可能性や水晶体調節が HMD の焦点距離で固定化されていたことが原因であった可能性が考えられる。

正答率は触覚判断課題がどの距離条件においても視覚判断課題より有意に高かった。視触覚のリアリティの差だけでなく、今回用いた刺激の太さが触覚にとって最適で視覚には最適でなかった可能性もある。

心理測定関数の傾きと距離に相関は見られなかったため、距離によるノイズの影響を受けてモダリティの信頼性が低くなったわけではなく、それが重み付けに影響を及ぼしたわけではないといえる。

質問紙は、自己所有感も自己主体感も身体的位置も有意に0より高いスコアであった。ただし、この結果自体は本実験のアバタの呈示が最適であったことを表すわけではない。今後はスコアが向上するような呈示を行うことで、視覚の信頼性や重み付けにどのような影響を与えるか検討していく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって，多大なるご指導をいただいた高知工科大学繁柵博昭教授と理化学研究所専任技師の竹市博臣氏に深く感謝いたします。研究目的を達成するために設定すべき実験条件，得られた結果から考察できることなど，様々な議論をしていただきました。また，本研究の副査として審査をしていただいた篠森敬三教授，門田宏准教授に深く感謝いたします。実験条件や今後の展望に関する指摘をしていただきました。加えて，実験に参加していただいた同輩後輩諸氏に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] SensGlove, “SensGlove Nova”, <https://www.senseglove.com/product/nova/?cn-reloaded=1>, 2022年2月28日閲覧.
- [2] VAQSO, “VAQSO VR”, <https://vaqso.com/>, 2022年2月28日閲覧.
- [3] Fairhurst MT, Travers E, Vincent H, and Deroy O, “Confidence is higher in touch than in vision in cases of perceptual ambiguity”, Scientific Report, 2018.
- [4] Stevens SS and Stone G, “Finger span: Ratio scale, category scale, and JND scale”, Journal of Experimental Psychology, Vol.57, No.2, pp.91-95, 1959.
- [5] Gaydos HF, “Sensitivity in the judgment of size by finger-span”, Journal of Psychology, Vol.71, No.3, pp.557-562, 1958.
- [6] 日本視覚学会, “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, 2000.
- [7] 高橋智, 岡本京介, 武之⁷85⁹², 高彬月, 大谷芳夫, 江島義道, 吳景龍, “触覚による物体のサイズ知覚に関する研究 (長さ・大きさの弁別及び評定特性の解析)”, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.884, pp.19-00437, 2020.
- [8] 岡村友俊, “感覚統合における視・聴・触覚の重要度”, 日本感覚工学会論文誌, Vol.11, No.3, pp.503-507, 2012.
- [9] Spence C, Nicholls M, Gillespie NA, and Driver J, “Cross-modal links in exogenous covert spatial orienting between touch, audition, and vision”, Perception & Psychophysics, Vol.60, No.4, pp.544-557, 1998.
- [10] Adams WJ, Kerrigan IS, and Graf EW, “Touch influences perceived gloss”, Scientific Report, Vol.6, 21866, 2016.
- [11] Badde S, Navarro KT, and Landy MS, “Modality-specific attention attenuates visual-tactile integration and recalibration effects by reducing prior expectations of a common source for vision and touch”, Cognition, Vol. 197, 104170, 2020.

参考文献

- [12] 山本健太郎, 崔原齊, 三浦佳世, “視覚的触感に触覚情報情報が及ぼす影響”, 基礎心理学研究, Vol.33, No.1, pp.9-18, 2014.
- [13] Ernst MO and Banks MS, “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion”, Nature, Vol.415, pp.429-443, 2002.
- [14] 高橋康介, 齋木潤, “動的な情報に対するヒトの視触覚間統合過程に関する実験的検討”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.12, No.2, 2010.
- [15] Takahashi C and Watt SJ, “Visual-haptic integration with pliers and tongs: signal “weights” take account of changes in haptic sensitivity caused by different tools”, Front Psychol, pp.5-109, 2014.
- [16] Creality, “CR PLA フィラメント 1kg”, URL <https://store.creality.com/jp/products/cr-pla-%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%A9%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88-1kg>, (最終閲覧日: 2024/02/16).
- [17] Gonzalez-Franco M and Peck TC, “Avatar Embodiment. Towards a Standardized Questionnaire”, Frontiers Robotics AI, Vol.5, Issue JUN, 2018.
- [18] R Core Team (2022), R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>.
- [19] Iseki R, Anovakun version 4.8.7. 2023, URL <http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90%9B>, 最終閲覧日 2024 年 2 月 23 日.
- [20] Ogawa A and Macaluso E, “Orienting of visuo-spatial attention in complex 3D space: Search and detection”, Human Brain Mapping, Vol.36, No.6, pp.2231-2247, 2015.
- [21] Shigemasu H and Sato T, “Effects of the amount of monocular shape information on stereo scaling problem”, Japanese Psychological Research, Vol.54, No.1, pp.27-37, 2012.
- [22] Swenson HA, “The Relative Influence of Accommodation and Convergence in the

参考文献

- Judgment of Distance”, *The Journal of General Psychology*, 7:2, 360-380, 1932.
- [23] Richards W and Miller JF, “Convergence as a cue to depth”, *Perception & Psychophysics*, Vol.5(5), 317-320, 1969.

A.1 実験 1

付録 A

A.1 実験 1

A.1.1 触覚判断課題における全参加者の心理測定関数のフィッティング

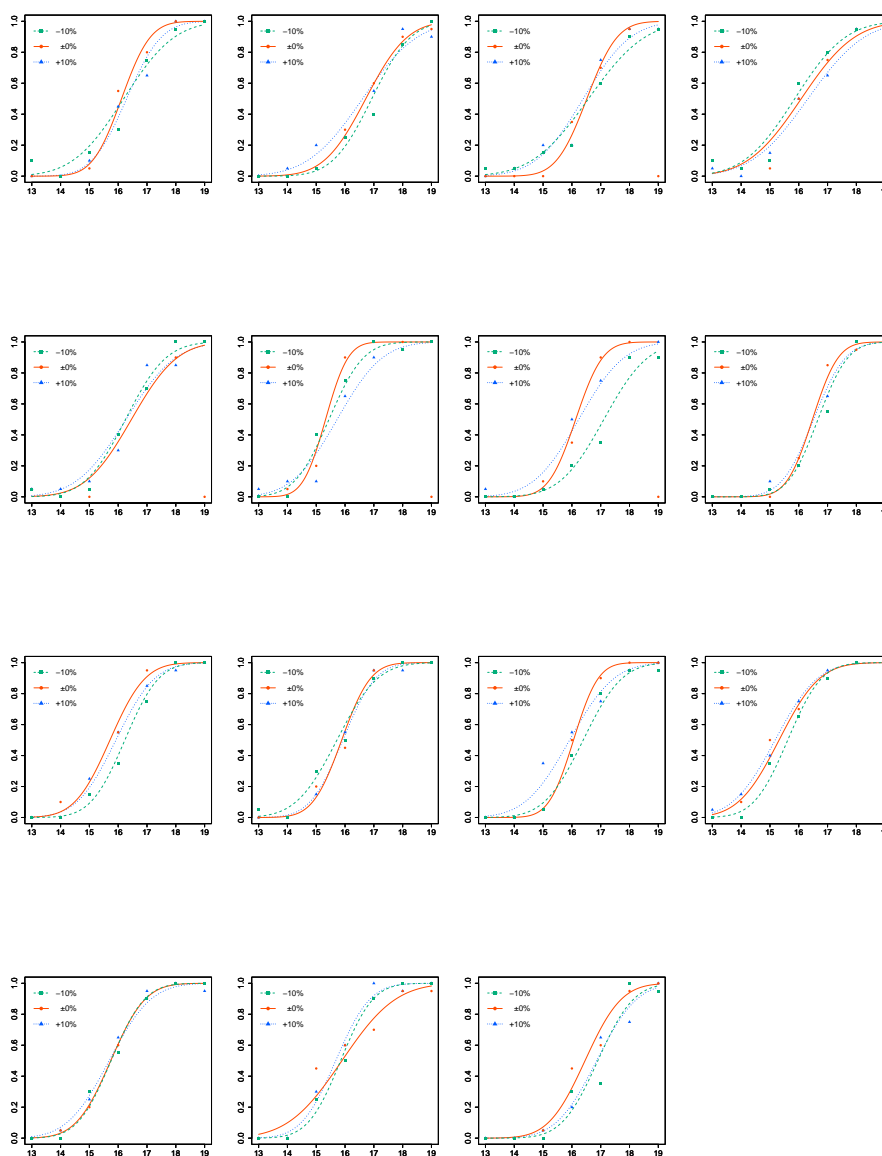


図 A.1 実験 1 触覚判断課題：近距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.1 実験 1

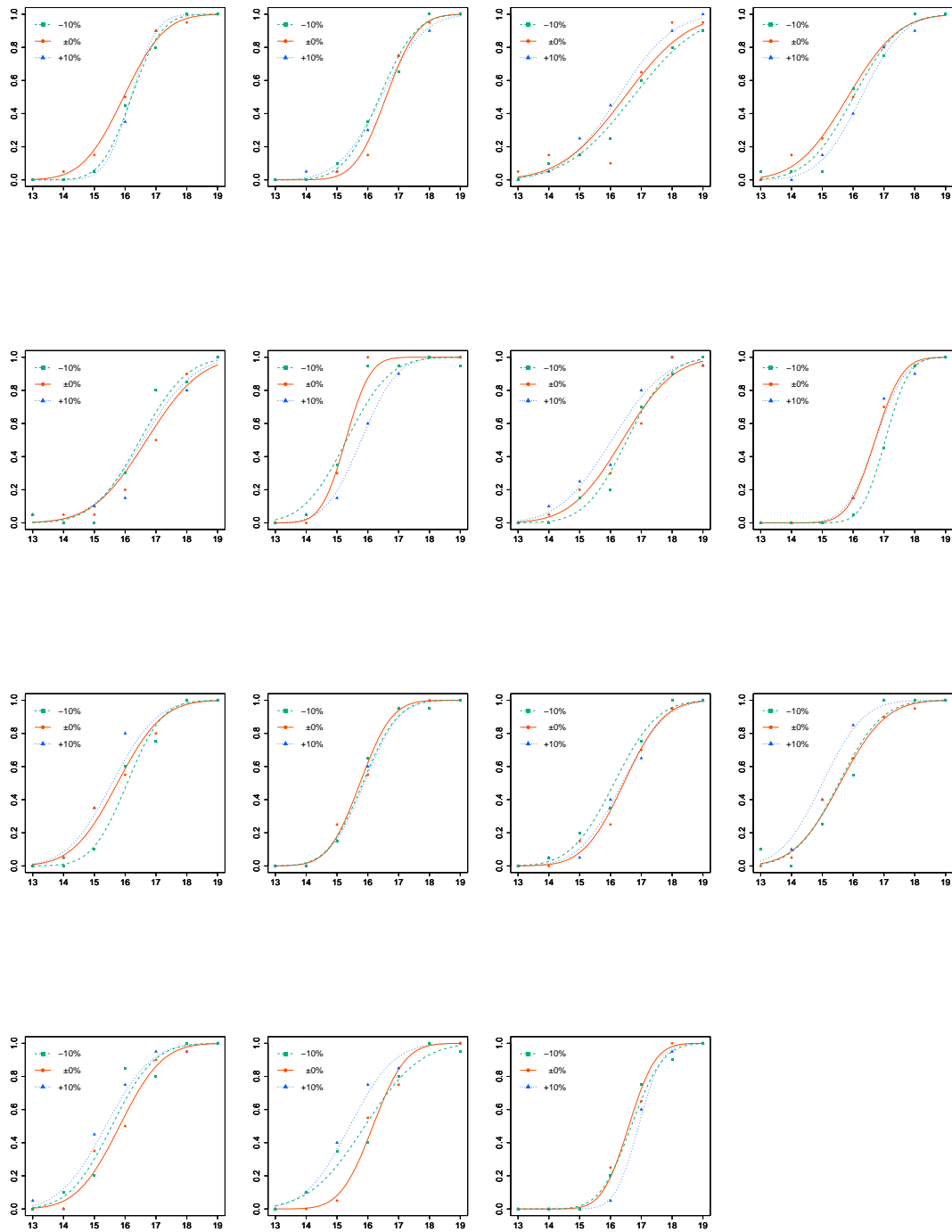


図 A.2 実験 1 触覚判断課題：中距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.1 実験1

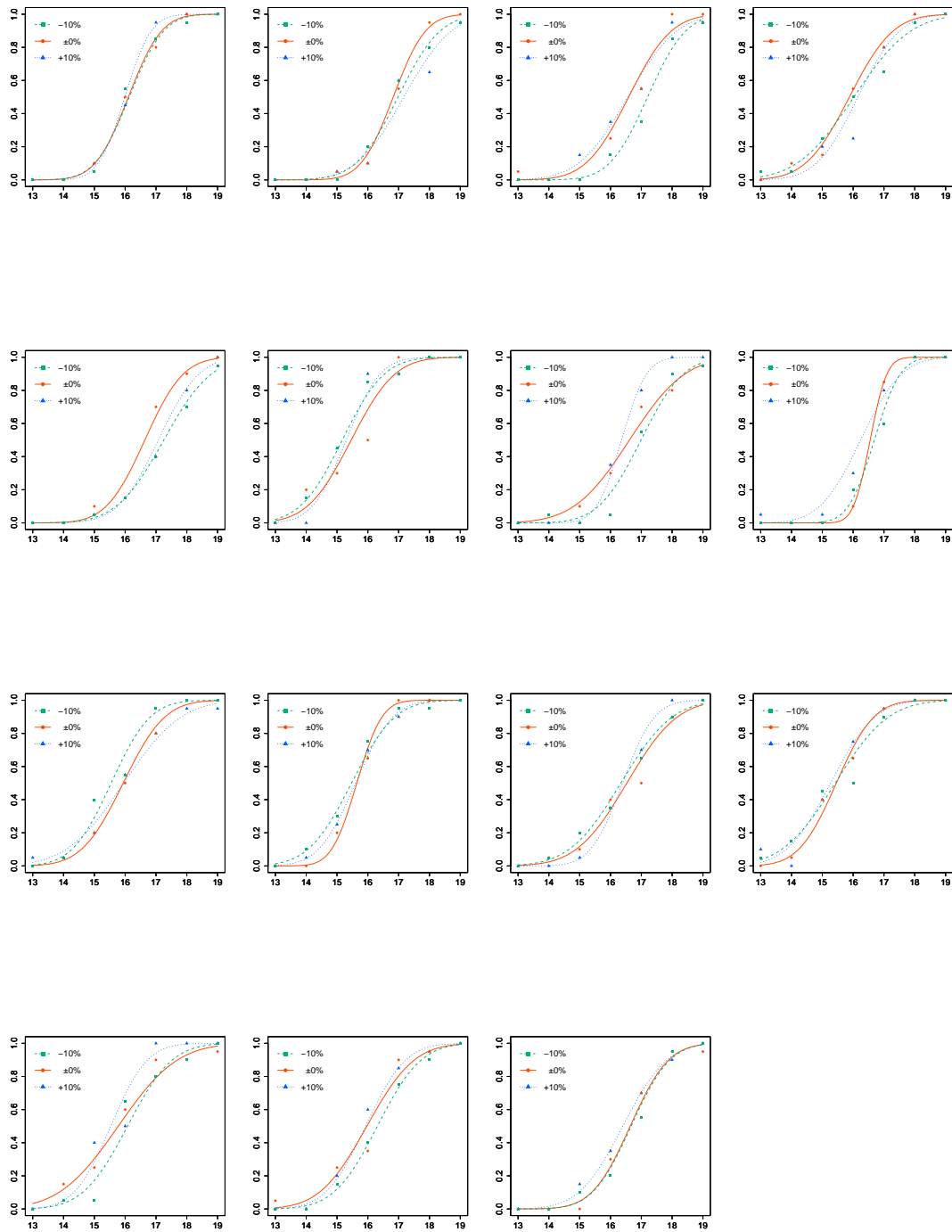


図 A.3 実験1 触覚判断課題：遠距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.1 実験 1

A.1.2 視覚判断課題における全参加者の心理測定関数のフィッティング

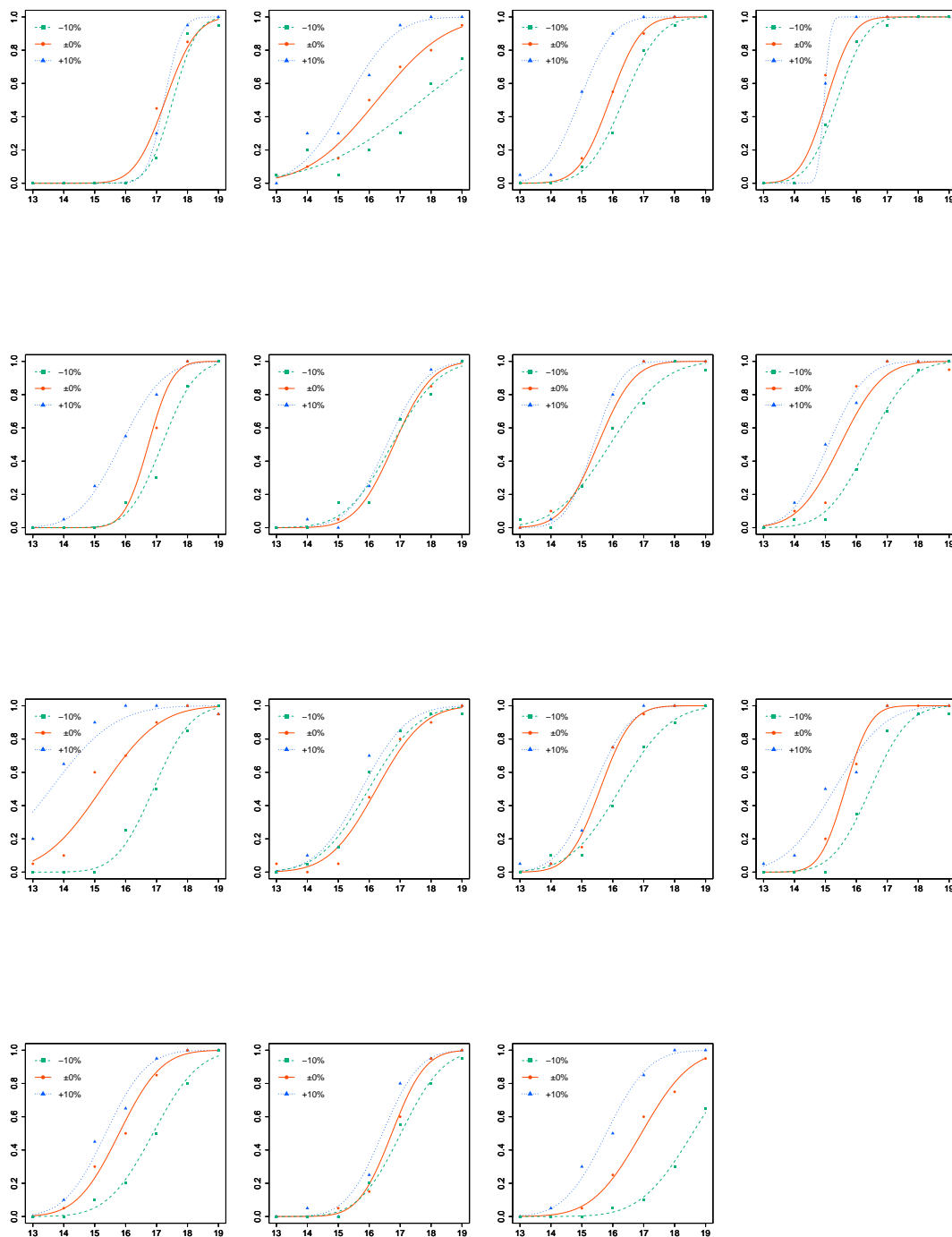


図 A.4 実験 1 視覚判断課題：近距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.1 実験1

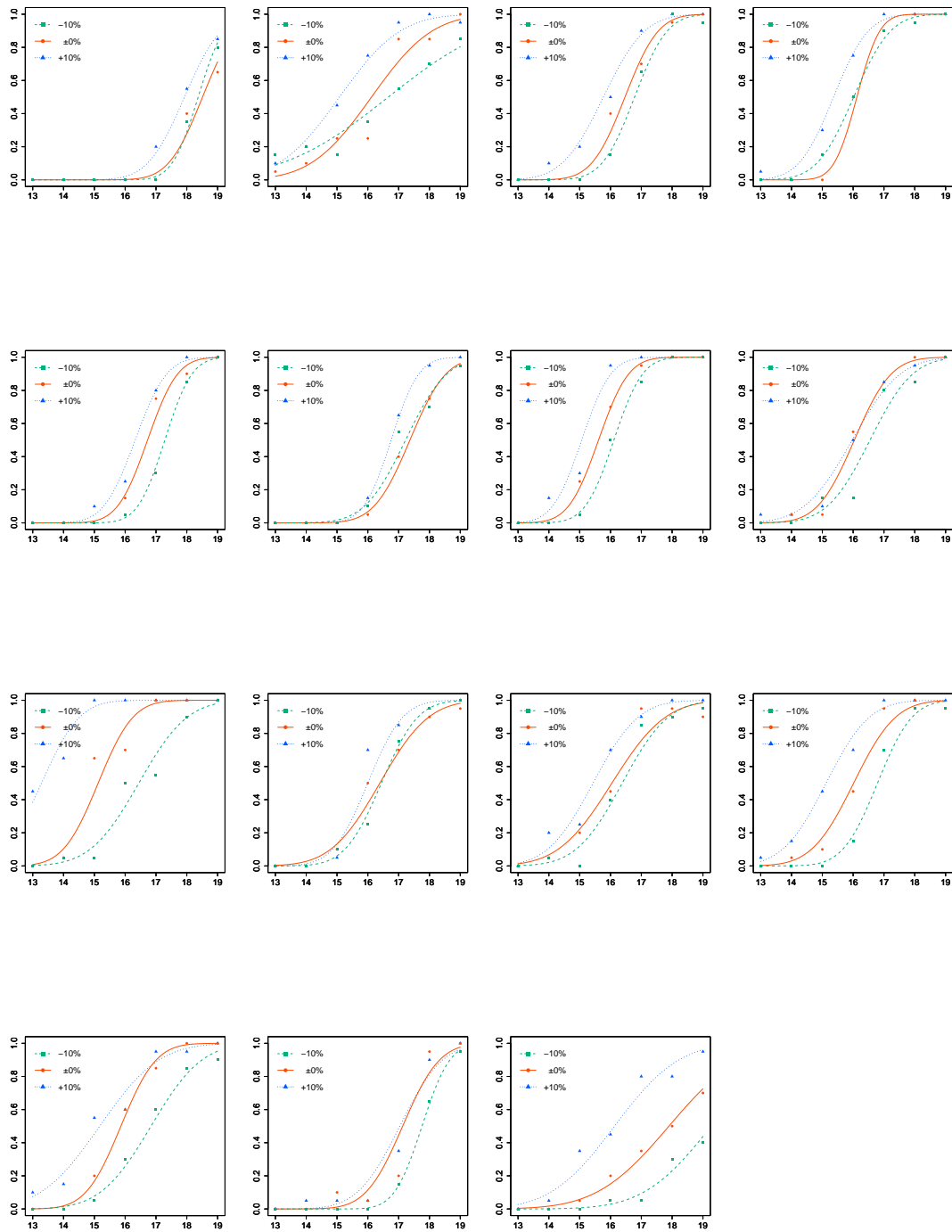


図 A.5 実験1 視覚判断課題：中距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.1 実験 1

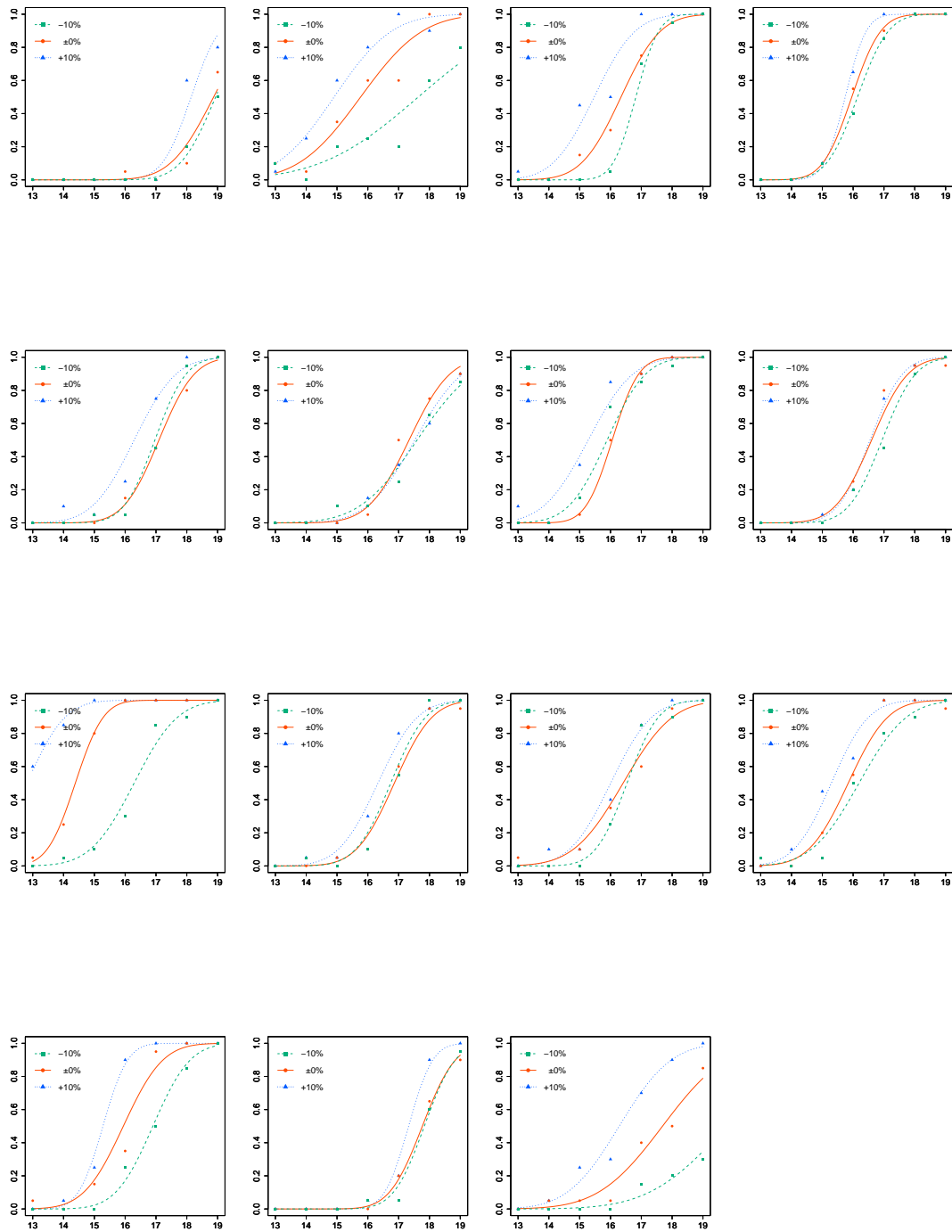


図 A.6 実験 1 視覚判断課題：遠距離条件における全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.2 実験 2

A.2 実験 2

A.2.1 触覚判断課題

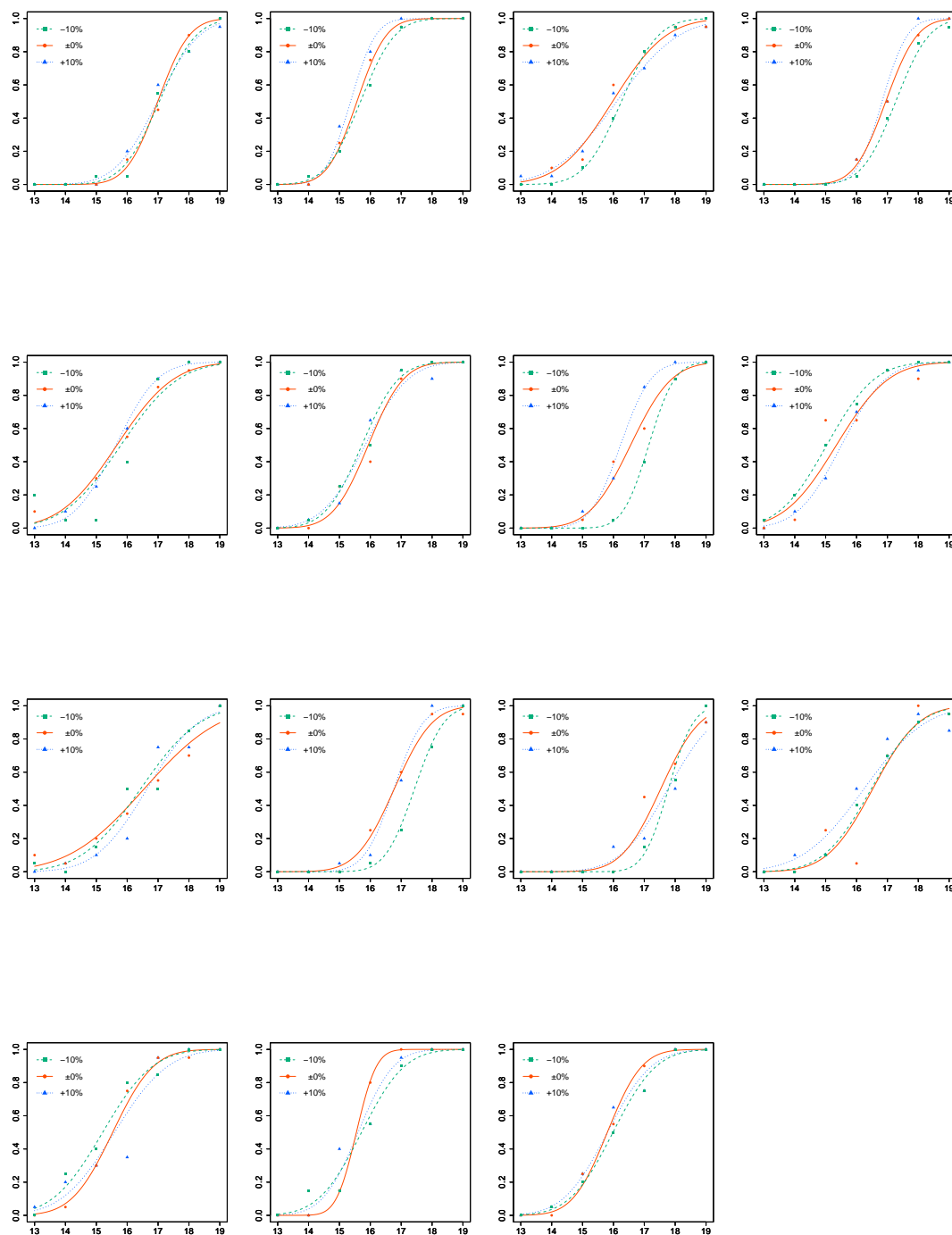


図 A.7 実験 2 触覚判断課題：全参加者の心理測定関数のフィッティング

A.2 実験 2

A.2.2 視覚判断課題

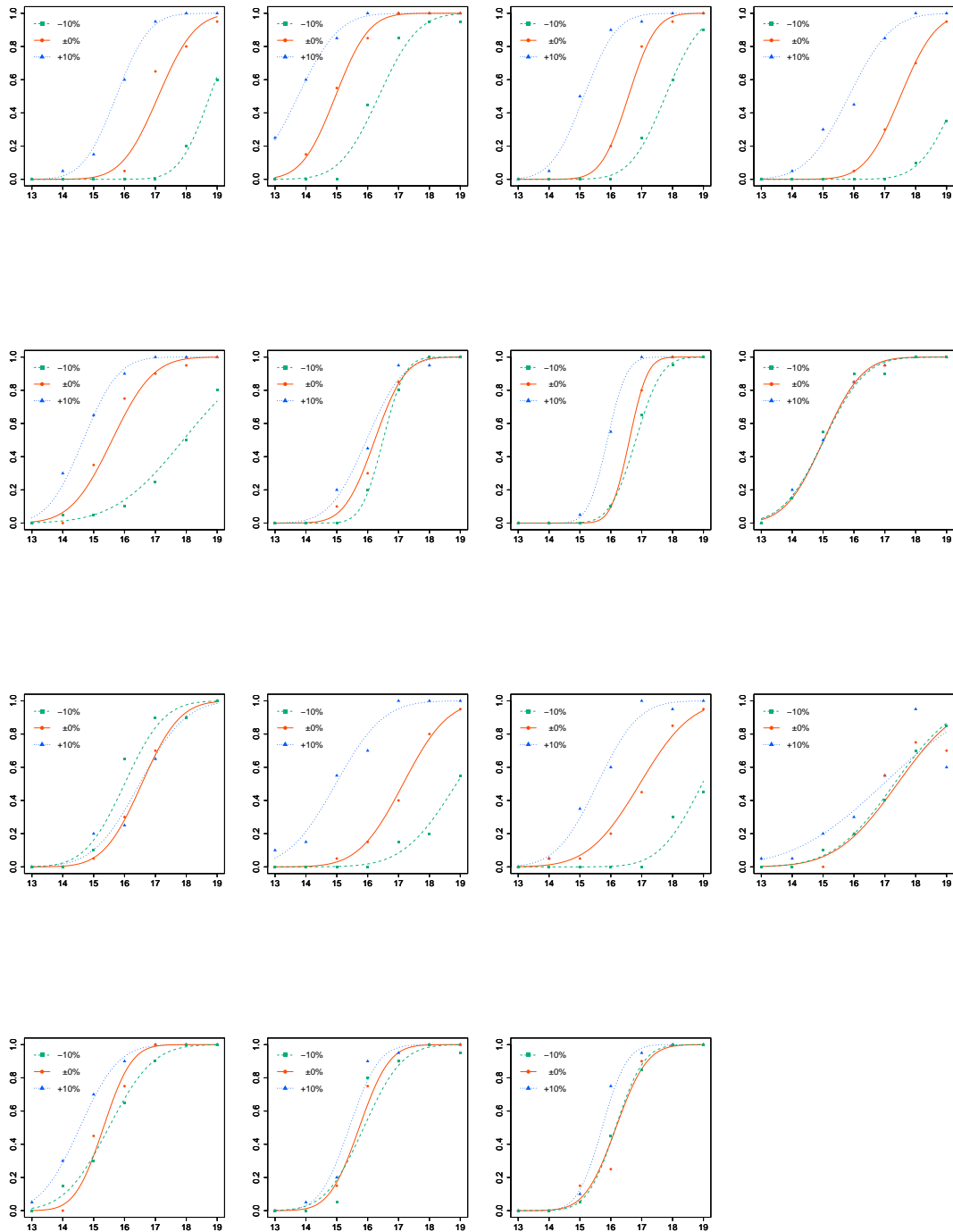


図 A.8 実験 2 視覚判断課題：全参加者の心理測定関数のフィッティング