

東京大学新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

2022 年度
修士論文

超音波触覚場における 指の高さ制御の研究

2022 年 7 月 28 日提出
指導教員 篠田 裕之 教授

後藤 千裕

概要

本研究では、一次元的な強度勾配を持つ触覚刺激が提示される空間内において、触覚強度のフィードバックを知覚し指の動きを制御する手法について提案する。人は空中で指を動かす時、主に筋肉や腱、関節にある受容器によって知覚される深部感覚と、視覚情報によって指の位置を認識している。この二つの感覚を合わせることで精度よく姿勢制御は可能になるが、視覚情報がなく深部感覚のみの場合には、思った姿勢に制御できない場合が多い。例えば、よく知られた正月遊びである「福笑い」は、視覚情報なしで顔のパーツを平面上に並べていくが、ほとんどの人にとって正確な位置にパーツを並べることは難しい。

本研究では、「皮膚感覚」を用いることによって、深部感覚の曖昧性を補い、空中での指の移動制御を上げる方法について検討した。皮膚感覚とは、皮膚の表皮と真皮に存在する受容器によって知覚される感覚であり、温冷覚や痛覚、触覚などが含まれる。本研究では、皮膚感覚のうちの「触覚」に着目した。強度に空間勾配が存在するような触覚場を作成し、位置によって強度が変化するような皮膚感覚を指先に与えることで、指の空間的な移動を知覚させる手法について取り組んだ。このような触覚提示により、人は自身の指の高さの変化に気づき、適切な修正を加えることで意図した指の動きを実現可能であることを実験により確かめた。

実験の結果、触覚強度の変化により人は適切に指の高さを修正し、より高い精度で指を動かせることが明らかになった。また、触覚を提示しながら行った実験の前後には、触覚場のない状態において同様の実験を行い、対照実験とした、この触覚なしの対照実験では、実験前よりも実験後に行った試行において精度が高くなっていたことから、触覚によって指の移動軌跡を学習することも可能であることが示唆された。

本研究の結果は、VR 空間におけるスカルプティング操作やペインティング操作への応用が期待される。これらは、近年盛んに研究されている VR や AR の分野において、指で物体表面を一定の深さだけ押し下げた状態で表面をなぞるという操作を含む。そこに本研究の結果を応用することで、指の高さ制御を助け、安定した入力が可能になると考えられる。

目次

第 1 章	序文	1
1.1	研究背景	1
1.2	先行研究	2
1.3	論文構成	5
第 2 章	指位置教示手法の分類	6
第 3 章	触覚提示の原理	8
3.1	空中超音波フェーズドアレイ (AUPA)	8
3.2	触覚強度変化法	8
第 4 章	実験システム	11
4.1	ハードウェア構成	11
4.2	ソフトウェア処理構成	11
4.3	キャリブレーション手法	12
第 5 章	連続変化法と離散刺激法の比較	15
5.1	実験手法	15
5.2	結果	17
第 6 章	鋸歯関数型触覚場の提案	19
6.1	概要	19
6.2	提案手法	20
第 7 章	実験	24
7.1	被験者実験	24
7.2	解析	26
7.3	結果	27
第 8 章	結論	33
付録 A	各被験者の結果	34

第 1 章

序文

1.1 研究背景

VR 技術は 1989 年に初めて提唱されてから、今日まで盛り上がりを見せている。近年では次世代の VR 技術として、映像のみではなく映像に合わせた触覚を付与する研究が進められている。例えば、グローブ型コントローラーを装着しながら VR アプリをプレイすることで、VR 空間での手の動きをトラッキングしたり、触覚フィードバックを与えて皮膚感覚の一つである触覚を再現する製品などが既に発売されている。このような製品は、主要な VR コントローラーにも対応しており、現在さまざまな企業が開発を競っている状況である (図 1.1)。

これに対し、グローブを装着することなく、空中で触覚を提示する技術が注目を集めている。その一つに、超音波を用いるものがある [1, 2, 3]。空中超音波触覚提示技術は、デバイス非装着であるため指の自由な運動を可能にし、かつセンシングを妨げるものがないという点が利点である。また、非接触という特徴から衛生面でも優れている。その中でも超音波を用いる

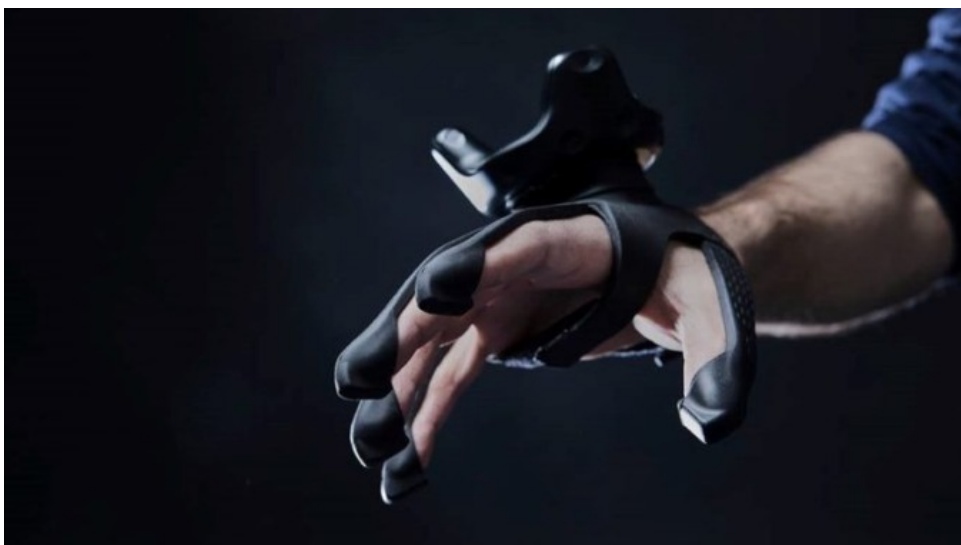


図 1.1. Plexus Immersive 社の触覚グローブ。Oculus や Vive などの主要 VR コントローラーと組み合わせて使用できる。

2 第1章 序文

ものは、音の搬送波が 40 kHz と時間分解能が大きく、さらに空間的な分解能も近年向上しているため、有望な技術である。

こうした特徴のある空中超音波を用いて触覚インターフェイスを構成する研究は複数あるが [4, 5]、本研究では特に指の軌道を制御するためのインターフェイスを検討した。人間が空中で指を動かす時、通常は深部感覚と視覚を頼りに動かしている。すなわち、肘関節の曲がり具合や筋肉の収縮具合と目から入る情報を複合的に処理することによって、指の位置を認識している。しかし、VR アプリケーションでは視覚情報が本来の目から得られる情報よりも劣るため、精度よくジェスチャーを行うことは通常よりも難しい。例えば、VR で三次元空間内に円を描こうとした時、指の奥行き位置が正確に知覚できていなければ螺旋状の軌道を描いてしまうと考えられる。本研究ではこの問題に着目し、触覚フィードバックによって人の指位置知覚の精度を向上させ、意図した通りの軌道の上を正確になぞるためのインターフェイスについて考察した。

本研究の結果は、VR スカルプティング (図 1.2) や VR ペインティング (図 1.3) 等のアプリケーションに応用可能だと考えられる。VR 空間におけるスカルプティングとは、ヘッドマウントディスプレイあるいは空中映像により空間上に映し出された 3D 物体を、ユーザー自身の指によって削る操作のことである。そのようなシステムが実現されれば、ユーザーは自身の指を用いて直感的に 3D 物体をモデリングすることが可能になる。また、VR ペインティングとは、同じくヘッドマウントディスプレイを装着しながら仮想のキャンバス上に線を描画するインターフェイスを想定しているが、キャンバスへの指の押し込み具合によってブラシ径が変化するとする。この時、ユーザーは自身の指がキャンバスに対してどんな位置関係にあるかをすることで、より高精度に思い描いたイメージをキャンバス上で実現できると考えられる。

1.2 先行研究

本研究を行うにあたって参考にした先行研究をまとめる。

1.2.1 超音波触覚を利用した物体とのインタラクション

空中超音波を利用して物体とインタラクションする研究として、松林らによる研究がある [6, 7]。この研究では、仮想物体と指とのインタラクションにおいて、空中超音波による触覚を提示することで実際にものに触れている感覚を提示する。またさらに、物体との接触面形状を考慮し、超音波触覚の提示面積を変更することでより現実に近い接触感覚を提示することに成功した。

接触表面のテクスチャーを空中超音波触覚によって再現した研究として、Freeman らの研究や Beattie らの研究がある [8, 9]。Freeman らの研究では、突起のある表面に触れた時の触覚として、複数焦点を同時に指に当てる手法を採用している。また、Beattie らの研究では深層学習を用いた手法により、テクスチャーから触覚のパラメータを推定している。

VR 空間における粘土インタラクションの研究としては、Barreiro らによる研究がある [10]。

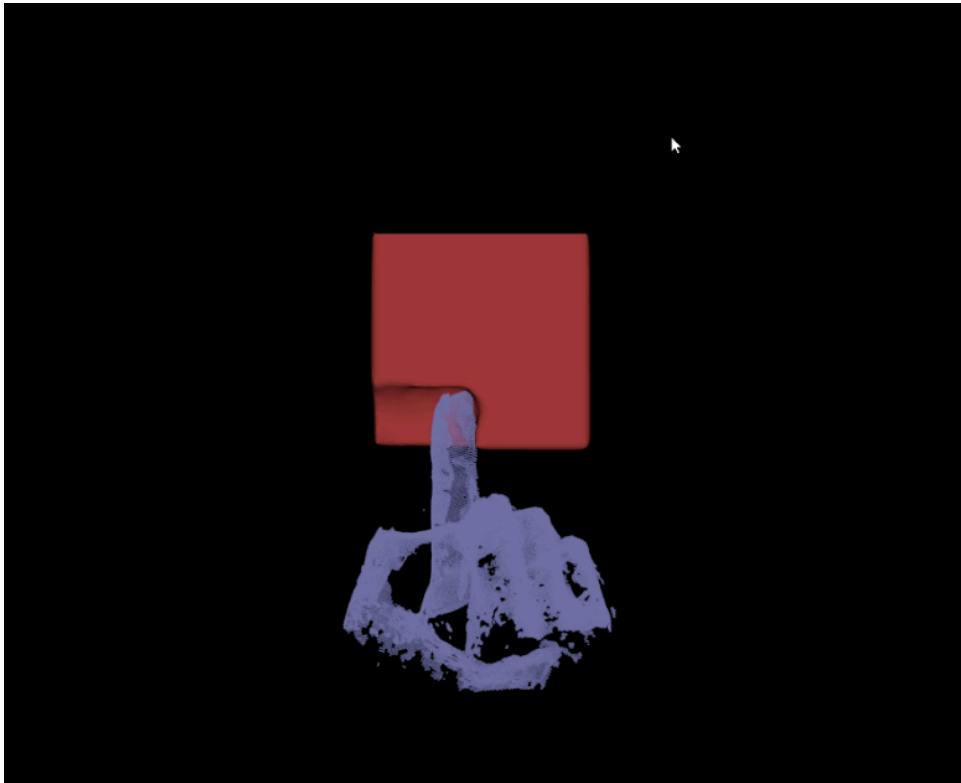


図 1.2. VR 空間におけるスカルプティング操作の様子.

彼らの研究では、VR 空間に存在する粘土を手で押したり切り離したりした時に感じる圧力分布を計算し、手のひらにフィードバックすることで、リアルな粘土インタラクションを実現している。この研究では、著者の主眼は粘土とのリアルなインタラクションに置かれており、弾塑性物体が外部の物体と相互作用した時の変形をコンピュータグラフィックスとしてシミュレーションし、その際に接触面に生じる力の分布から、手が感じる圧力分布を計算し触覚フィードバックを送った。本稿との差異は、Barreiro らの研究がリアリティを求める方向に進められたのに対し、本稿ではモデリング用途に使用できる粘土インタラクションシステムへの応用を考えている点である。

1.2.2 触覚による行動制御

これまで、人の身体に触覚を与えることで、触覚を与えられた身体の動く軌跡に影響を与える研究が行われてきた。例えば、梶本らによる肘関節部への「カチカチ感」付与に関する研究 [11, 12] では、人が腕立て伏せ運動をする際に、肘関節の屈折角度に応じてカチカチ感覚を与えることで、自身の肘関節の曲がり具合を知覚することができ、腕立て伏せ運動に役立つのではないかということが検証された。実験結果からは、腕立て伏せ運動時にカチカチ感覚を付与することで、予想に反して腕の屈折角度が小さくなるという結果が得られた。これは、カチカチ感覚によって過剰に運動感覚が刺激され、より小さい肘の角度で満足に屈折したと錯覚した可能性が考えられている。

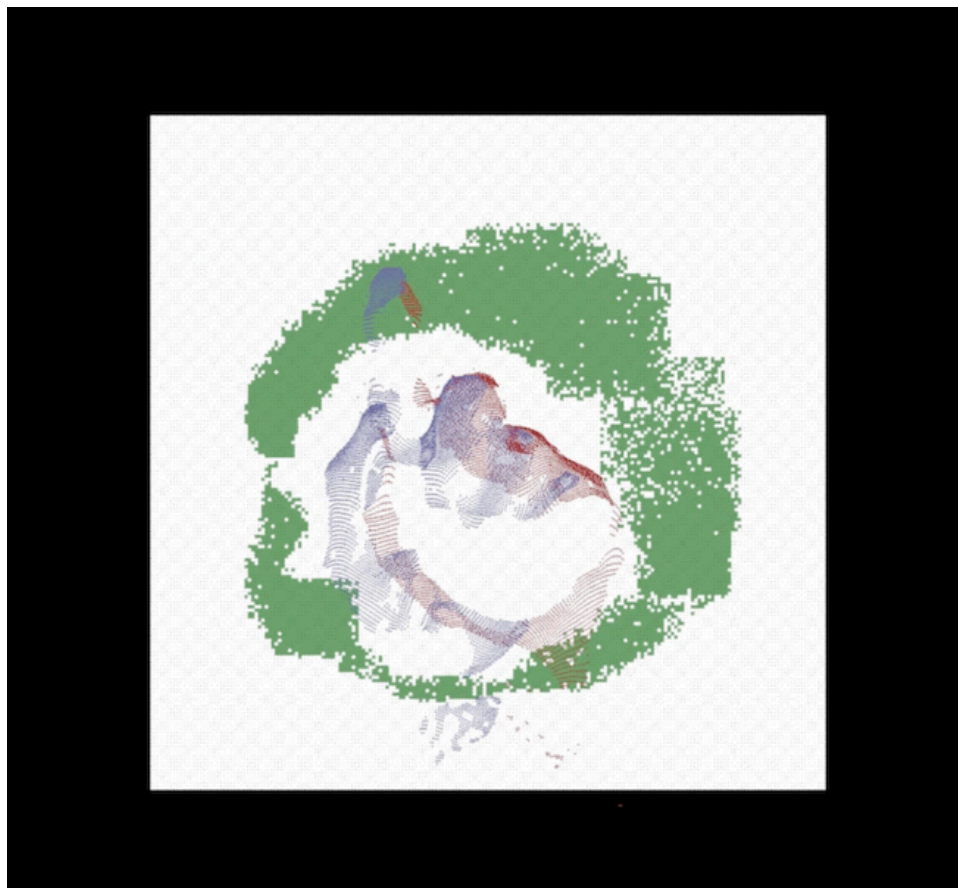


図 1.3. VR 空間におけるペイントアプリケーションのプロトタイプ実装.

このような「カチカチ感」は，身近な道具にも使われている．例えば，南京錠などによく使われているダイヤル式の錠前は，ダイヤルを一つずらした際に触覚がフィードバックされ，ダイヤルの回転を止めるべき箇所が視覚に頼らず分かりやすくなっている．また，最近は見かけなくなったダイヤル式の電話も，任意の数字にダイヤルを回す際にカチカチという触覚が役に立っている例である．

また，水野らによる「ボタンスイッチ押下時の振動刺激の有無が指の押下軌道に及ぼす影響」の研究では，ボタンを押した時に触覚振動刺激が存在することで，指の移動軌跡が変化することを調べた [13]．

超音波触覚により，人の行動を誘導する研究もある．鈴木らは，空中に超音波触覚による擬似手すりを導入し，人の歩行方向を誘導するシステムを開発した [14]．また，日浦らは円錐型の触覚提示を利用して，人が手を目的地まで動かせるように誘導する研究を行った [15]．本システムのユーザーは，初めに手のひらに円形の触覚が提示され，正しい方向に手のひらを移動させたときに限り触覚提示領域の円形が縮小するようなインターフェイスとなっており，手を微小距離動かすことで円半径の違いにより正しい方向を認識することができる．このようなシステムは，連続的な触覚変化により人の行動を誘導する例である．

1.3 論文構成

本稿では、まず第二章で指位置を空中で教示するための手法の概要と分類を述べる。次に、第三章では原理として、空中超音波フェーズドアレイの仕組みとその触覚強度変化法について述べる。第四章では、本研究の実験に使用したシステムの詳細を述べ、第五章では指位置教示のための二通りの手法を比較する。そして、第六章では第五章の結果を踏まえて、指位置教示の新たな手法として、鋸歯型の触覚場を提案する。第七章で、被験者実験による評価の結果を示し、第八章で結論を述べて論文を締めくくる。

第 2 章

指位置教示手法の分類

本章では，三次元空間内で人に自身の指の位置を教示する基本戦略を述べる．本研究では，以下二種類の手法を提案し検討する．

- 離散的手法
- 連続的手法

一つ目は，指が一定の距離を移動する度に触覚による合図を送る，離散的教示手法である．我々は日常的に，二次元空間内でこのような視覚的フィードバックを利用している．例えば方眼紙に印刷された 1 cm 間隔の目盛りは，二次元空間内の距離を視覚的にフィードバックするものである (図 2.1(a))．これを三次元空間かつ触覚フィードバックで実現しようとするのが本手法である．実際に似た例として，1.2 節で述べたような「カチカチ感 [11, 12]」がある．

二つ目は，指位置の微分によって位置をフィードバックする，連続的教示手法である．現実の物体と相互作用するとき，通常では相互作用が始まってから一定時間はこのような連続的な触覚の変化が得られる．例えば物体を机の上で水平に押す状況を考える．この時は，静止摩擦係数が働いている内は指先に加わる圧力は指が物体に加える力同様に増加していく (図 2.1(b))．また，物を掴んで力を加える時，同様に初めのうちは指先の形状変化が触覚の変化として感じられるはずである [16]．これらの状況では，徐々に指先に加わる触覚が変化していくことから，自身の指がどのような状態にあるか判断しているといえる．

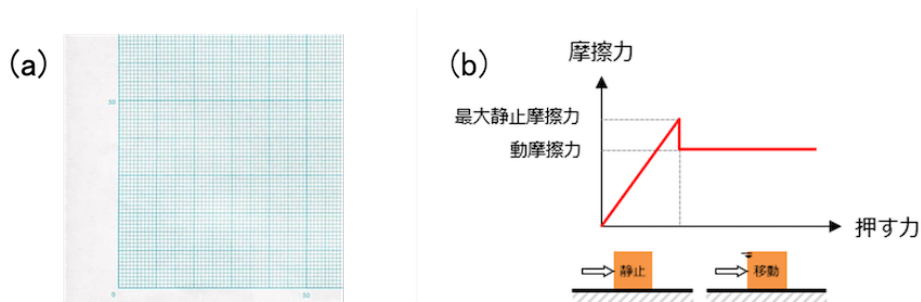


図 2.1. 離散刺激法と連続変化法のアナロジー．(a) 方眼紙．(b) 静止摩擦力/動摩擦力と印加する力の関係．

以上二つの提案手法には、それぞれに利点と欠点が存在する。まず離散的教示手法には利点として

- 提示空間の範囲に制限がない。
- 記号的であり、理解しやすい。

という特徴がある一方、欠点として

- 指位置教示の精度が触覚目盛りの解像度に依存する。
- 指の絶対的な位置はわからず、目盛りを数える必要がある。

という点が挙げられる。また、連続的教示手法には、利点として

- 絶対的な指位置が、触覚の強度として知覚できる。
- 微小な触覚強度の変化を知覚することで、指位置の小さな変化もフィードバックできる。

という特徴がある一方、欠点としては

- 触覚強度には上限と下限があるため、提示できる空間領域に制限がある。

という点が挙げられる。

次章では、まずこれらの手法を実現するための触覚提示原理とシステム構成を述べ、続く章で二つの手法を実験により比較する。

第 3 章

触覚提示の原理

本章では、実験システムを構成するに当たって使用した超音波触覚ディスプレイの原理について記述する。

3.1 空中超音波フェーズドアレイ (AUPA)

本研究では、超音波触覚の提示デバイスとして、空中超音波フェーズドアレイ (AUPA: Airborne Ultrasound Phased Array) を用いた [17] (図 3.1)。AUPA とは、位相を個別に制御できる超音波振動子を配列したデバイスであり、超音波の位相を制御することで、空間に任意の音場を生成することができる。AUPA を用いて収束させた音波のエネルギーは音響放射圧を生じ、この圧力を利用して人体の表面を非接触で押すことができる。本研究で用いる AUPA で生成できる圧力の上限は、約 50 mN/cm^2 から 5 gf/cm^2 である。また、空間分解能は使用する波長までとなり、 40 kHz の場合約 8.5 mm となる。搬送波の周波数が 40 kHz の超音波は人の指には知覚不可能であるため、触覚を生じさせるためには触覚変調が必要である。以下にその手法を述べる。

3.2 触覚強度変化法

AUPA による触覚提示では、時間的に変化しない放射圧を与え続けた場合に、十分な強度の刺激が得られない。そこでまず、人間にとって知覚しやすい強度の触覚刺激を得るために、以下のような手法を用いて搬送波に周波数変調をかける必要がある (図 3.2)。

- AM (Amplitude Modulation) 法 [18]
- LM (Lateral Modulation) 法 [19]

AM 法とは、超音波の搬送波に正弦波形状の時間的な変調をかけ、その包絡線の周波数を人に知覚可能な領域に設定することでより強く感じられる触覚を提示する手法である (図 3.2(a))。一方、近年は AM 法よりも強い変調手法として LM 法を用いた触覚提示方法が用いられている (図 3.2(b))。この手法では、放射圧の振幅は一定に保ちつつ、触覚提示位置を二点間あるい

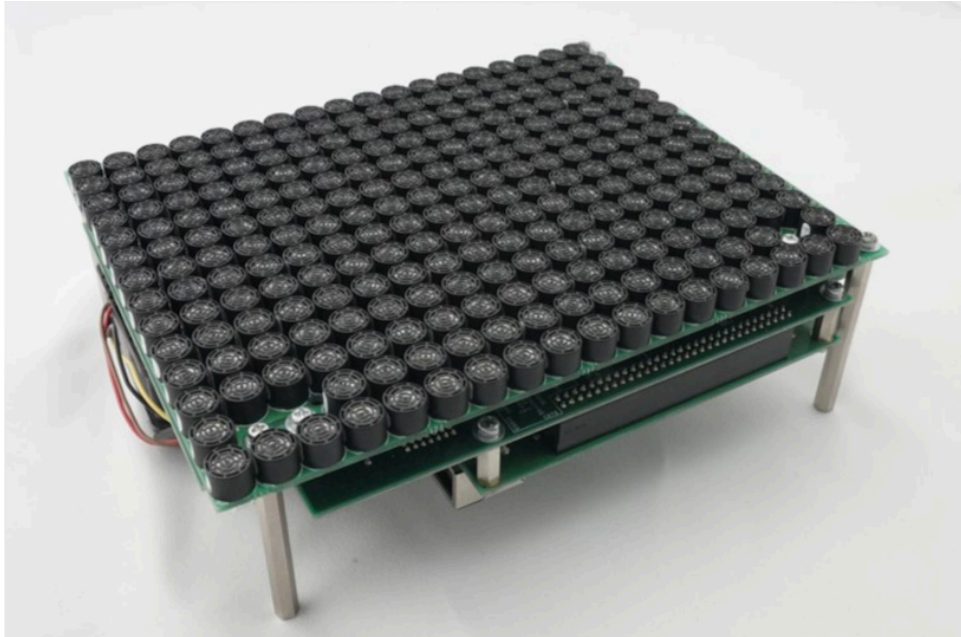


図 3.1. AUPA.

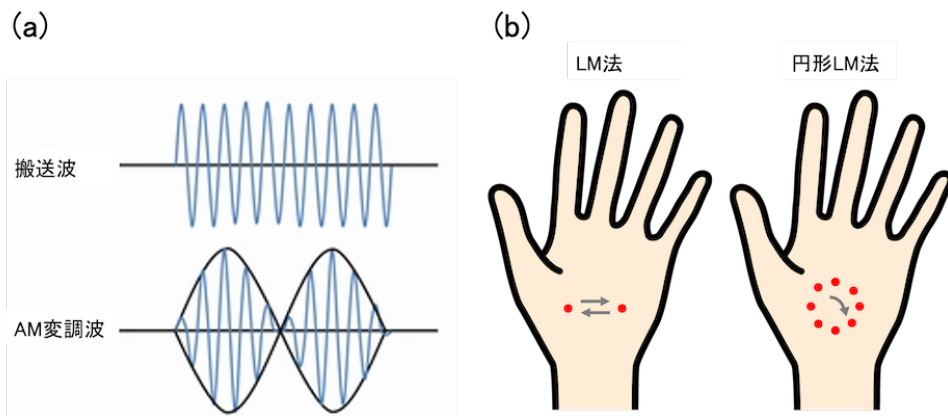


図 3.2. (a)AM 法と (b)LM 法の概念図.

は円形に動かすことで、人に知覚可能な周波数領域の触覚を提示する．それぞれの利点としては、AM 法では触覚提示点が空間的に一点となるため、より単純な触覚刺激に感じられ、さらに装置から出るノイズの音量も小さい傾向にある．一方で LM 法では、AM 法よりも強い刺激が与えられ、円運動のサンプリング点数や変調周波数などパラメータが多く、自由度が高い点が挙げられる．

次に、変調がかけられた超音波触覚の強度を変化させる方法について述べる．強度変化は、次の二通りの方法で行うことができる．

- 搬送波の振幅変調による手法
- AM 法/LM 法の変調周波数を変更する手法

一つ目の手法は、変調をかける前の搬送波自体の振幅を変更する手法である．この手法で

10 第3章 触覚提示の原理

は、AUPA の超音波出力自体を変更するため、滑らかで知覚しやすい触覚強度変化を与えられる。また、出力を 0 にすることで触覚強度の下限を 0 に設定することができ、最大出力との差を大きく設定しやすいという利点もある。

二つ目は、AM 法で用いる正弦波の周波数、あるいは LM 法で用いる円運動の周波数を変更する手法である。モジュレーション周波数と触覚強度の関係は、約 10 Hz から約 250 Hz の間では対数関数的になっており、この範囲では周波数が高いほど強い触覚を与えられる。しかしながら、この手法では触覚強度にオフセットが存在するため、強度変化の範囲は狭くなる。

本研究では、第五章で行った実験においては、触覚強度を完全に知覚不可能な強度 0.0 まで下げる必要がなく、また AM 法によって十分な強度の触覚フィードバックが確認できたため、AM 法による変調とその周波数変化による触覚強度変化を用いた。一方で、第七章で行った実験では、ディスプレイを見ながら触覚に注意を向けるために、より強い触覚フィードバックが必要であったため、LM 法による変調を行い、さらに触覚強度としては 0.0 からのスタートとするため、搬送波の振幅を変化させる手法を用いた。

第 4 章

実験システム

4.1 ハードウェア構成

実験システムとして、測距センサーと触覚提示デバイスからなるリアルタイムシステムを構成した (図 4.1(a)). AUPA は合計 6 台使用し、2 台を水平に、残りの 4 台を 45° の傾斜をつけた状態で左右に設置した. AUPA による触覚提示は、振動子が敷かれた面に垂直な中心軸に沿ったライン上で最も強くなるため、このように実験領域を囲むように AUPA を設置することで触覚強度を最大限生かすことができる. 手前中心に設置した AUPA の振動子のうち、最も手前かつ左に設置された振動子の表面中心をグローバル座標系の原点とし、 x 軸を右方向に、 y 軸を写真奥方向に、 z 軸を鉛直上方向に取った.

測距センサーとして Intel 製の RealSense Depth Camera D415 を 2 台使用した. このモデルは 2 つの赤外線カメラを備え、その視差から形状を求めるステレオカメラ方式を採用している. ステレオカメラ方式は、人間の目と同じ三角測量の方法を用いるため人間と同じ空間把握能力を持つという利点や、リアルタイムで安定した距離測定が可能であるという利点をもつ. また、赤外線を能動的に放射してその視差を求めるため、暗いところでも使用できるという利点もある. 実験領域を 2 方向から撮影するため、図 4.1(a) に示すように AUPA の奥側に、 x 軸負の方向に 45° 回転させる形で設置した. また、2 台の測距センサーにより左右から指を撮影することでオクルージョンを可能な限り排除した.

4.2 ソフトウェア処理構成

本システムの処理の流れは、大きく分けて三つの部分からなる (図 4.1(b)). すなわち、測距センサーによる指認識、取得したデータのコンピュータ処理と計算、AUPA による指への触覚フィードバックである. この一連の処理を、測距センサーのフレームレートに設定した 90 fps で繰り返すことによって、実世界に存在する指をリアルタイムに認識し、その結果に応じた出力を高速に行うことができる. 以下でこれらの処理の流れを簡単に記述する.

初めに、測距センサーにより手の Depth 画像を 1 フレーム取得し、それをコンピュータに送る. コンピュータに送られた Depth 画像の各画素における距離情報は、画素上の座標とそ

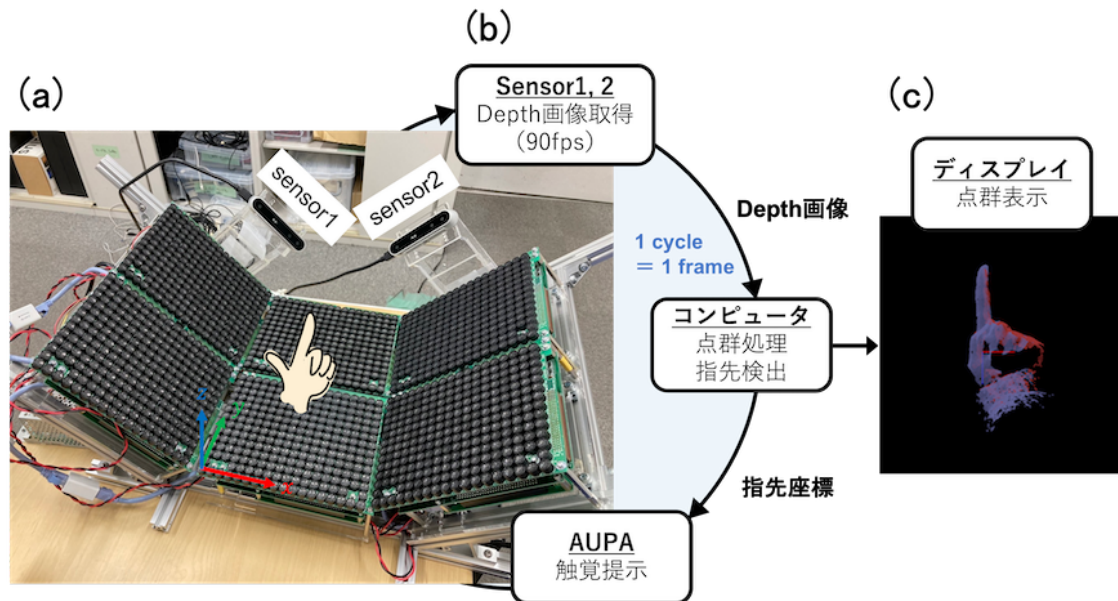


図 4.1. (a) 本研究で用いたシステム. 6 台の AUPA と 2 台の測距センサーによりシステムを構成した. (b) データ処理の流れ. 2 台の測距センサーで撮影した Depth 画像がコンピュータに送られ, 点群処理された後に後述のアルゴリズムにより指先座標が計算される. 指先座標は AUPA に送られ, 触覚が提示される. (c) コンピュータで計算した点群情報などがディスプレイに表示される.

の Depth 値から, 点群の xyz 座標に変換される (図 4.1(c)).

計算で得られた点群から, 第五章と第七章で説明する指先検出アルゴリズムを用いて指先の単一点の座標が計算される. また, グラフィクス処理によりディスプレイ上に点群が表示される.

計算された指先の座標は TwinCAT を通して AUPA に送られ, 各振動子から超音波を出力し指先へ触覚が提示される. TwinCAT とは, Beckoff 社が提供しているプログラミング開発とプログラム実行およびデバイスの設定が行えるサードパーティ製のソフトウェアパッケージである.

4.3 キャリブレーション手法

本節では, 装置のキャリブレーション手法について述べる. まず, 熱画像を用いて超音波焦点の収束を確認しながら AUPA 間でキャリブレーションをした. 次に, RGB 画像を用いて測距センサーの座標系から AUPA の座標系 (本研究ではこれをグローバル座標系として用いた) への変換行列を求めた. 以下にそれぞれの詳細を記述する.

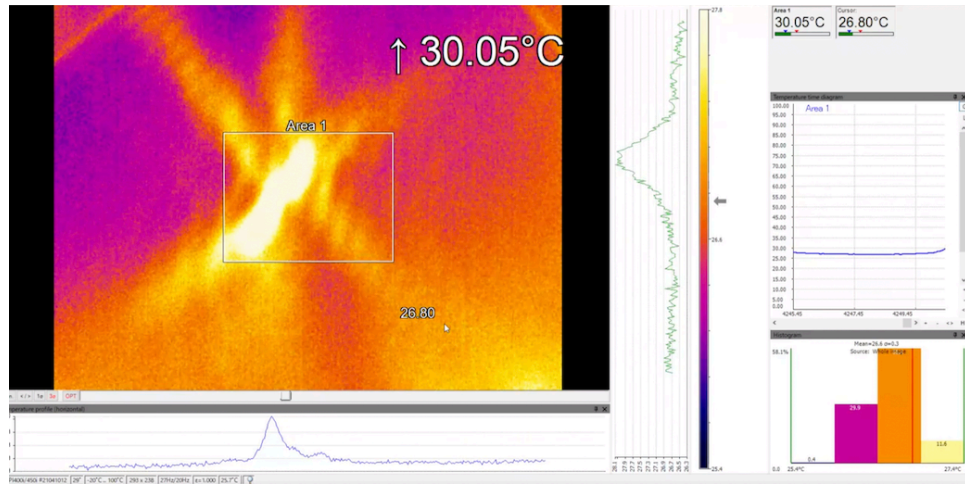


図 4.2. サーモカメラを用いて AUPA 焦点を可視化している様子。

4.3.1 複数台の AUPA 間のキャリブレーション

AUPA を複数台使用する場合、一つのグローバル座標系を決め、その座標系原点から個々の AUPA のローカル座標系の相対的な位置関係を登録することで、透過的に使用することが可能。ただし、実際に作成された装置は機械的なずれや歪み、AUPA の個体差などにより、必ずしも理論的に求められる位置関係とはならないことが多い。そのため、全ての AUPA が一つのグローバル座標系を基準に焦点を形成できるようキャリブレーションを行う必要がある。本研究では、まず装置作成時に生じた微小な装置間の隙間や、アルミフレームの傾きなどを可能な限りハードウェア側で取り除いた。続いて、ハードウェアの調整で取り除けなかった装置の傾きや隙間を、ソフトウェア側で補正した。位置合わせの精度を確認する手法として、ナイロン製のメッシュに超音波焦点を照射し、メッシュ表面の温度変化をサーモカメラにより確認するという手法を用いた。図 4.2 にサーモカメラにより可視化した AUPA 焦点の画像を示す。中心部に放射状に存在する黄白色の部分が、超音波焦点により高温となった部分である。AUPA を三方向に向けて設置したため、焦点形状も三方向に伸びた形状となっている。装置のキャリブレーションでは、この焦点領域が極小になるように繰り返し確認しながらハードウェア・ソフトウェア両側から補正を行った。

4.3.2 測距センサー座標系と AUPA 座標系のキャリブレーション

2 台の測距センサーはそれぞれ固有のローカル座標系を使用しており、それらはセンサーの撮影方向を z 軸とした右手系である。2 台の測距センサーで撮影されたフレームは PCL(Point Cloud Library) を使用してディスプレイ上に表示される。ディスプレイに表示されたフレームの座標系を Visualizer 座標系と呼ぶこととして、図 4.1 に示すように、向かって左の測距センサーをカメラ 1、その座標系をカメラ座標系 1、向かって右の測距センサーをカメラ 2、その座標系をカメラ座標系 2 とする。2 台の測距センサーから撮影されたフレームを Visualizer

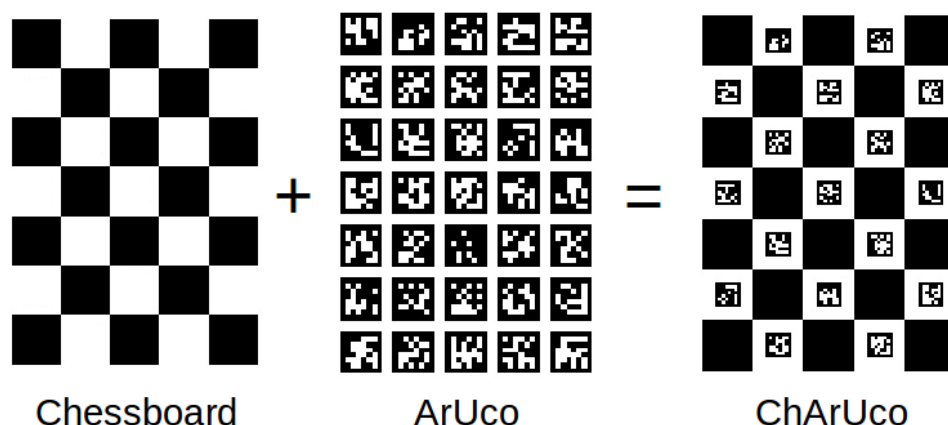


図 4.3. チェスボードと ArUco マーカー. OpenCV を用いて各 ArUco マーカーを検出する.

上で統合するには、カメラ座標系 1 から Visualizer 座標系への変換行列と、カメラ座標系 2 から Visualizer 座標系への変換行列をそれぞれ求める必要がある。その後、Visualizer 座標系から AUPA のグローバル座標系への変換行列を求めることで、AUPA の焦点提示座標と Visualizer 上での指先座標を合わせることができる。本研究では簡単のため、Visualizer 座標系と AUPA のグローバル座標系の原点と座標軸を合わせた。

次に、具体的なキャリブレーション手法の詳細に移る。まず、それぞれの測距センサーの RGB カメラでチェスボード (図 4.3) の画像を角度を変えながら 10 枚ずつ撮影し、Python の OpenCV のライブラリを用いて内部パラメータのキャリブレーションを行った。次に、座標の変換行列を求めるため、測距センサーの画角に収まるように 17 個の ArUco マーカー (図 4.3) を設置し、2 台の測距センサーでその RGB 画像を撮影した。OpenCV を用いて全ての ArUco マーカーを検出し、その座標軸への変換行列を求めた。最後に、中心のマーカーを基準に周囲のマーカーの座標軸を平行移動させ、全ての平均を取った。この座標変換行列を実験プログラム中で点群座標の変換処理に用いた。

第 5 章

連続変化法と離散刺激法の比較

本章では、第二章で述べた二種類の指位置教示手法の効果を検証するために行った実験の手法と結果について記述する。

それぞれの手法の効果を確かめるため、各手法二種類ずつの触覚場デザインを採用し比較した (図 5.1)。触覚場は z 軸方向に一次元的なパターンを持つものとし、その中で指を z 軸方向に動かすことで、指先に指位置に関する触覚フィードバックを与えた。実験では、被験者には予め決められた距離を指示し、触覚フィードバックを頼りに指示された距離だけ指を z 軸方向に動かしてもらい距離の精度を比較した。

5.1 実験手法

5.1.1 指先検出アルゴリズム

本実験では、第三章で説明したシステムに加え、実験領域に VR スカルプティング応用を想定した仮想物体を置いた (図 1.2)。この仮想物体は点群で表現されており、測距センサーで取得した手の点群が近づくと、指先からの SDF (Signed Distance Function) が計算され、指内部に侵入した点群が除去されるようになっている。このようにしてスカルプティング操作のグラフィクス処理を実現している。指先座標としては、この際に SDF の値が 0.0 である点、すなわち物体との接触面に当たる点を取得し、その重心を取ることで計算した。

触覚提示領域は、仮想物体が存在する $7.0\text{ cm} \times 7.0\text{ cm} \times 7.0\text{ cm}$ の立方体領域とした。

5.1.2 触覚パターン

触覚パターンとして、連続変化法と離散刺激法をそれぞれ二種類用意した (図 5.1)。

離散刺激法としては次の二種類の刺激を用いた。

- (a) 全ての深度に対して一様な 50 Hz の触覚+深さ方向に 1.0 cm 間隔で、2.0 mm 幅の 250 Hz の触覚

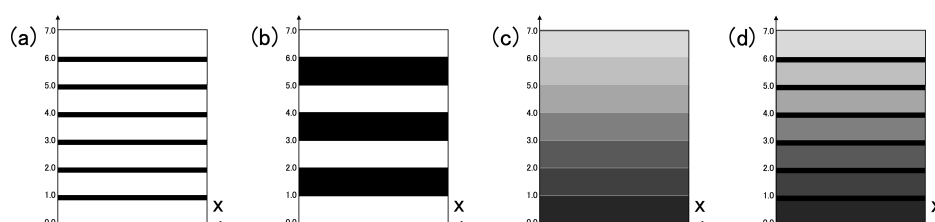


図 5.1. 触覚パターンの概念図. (a)(b) 離散刺激法として採用した二種類の触覚パターン.
(c)(d) 連続変化法として採用した二種類の触覚パターン

- (b) 最上部から最下部まで, 1.0 cm 間隔で 250 Hz と 10 Hz を交互に提示

(a) の刺激と (b) の刺激では, 強い触覚と弱い触覚を交互に提示する点は同じだが, その間隔が異なる. (a) の刺激では, 全体的に弱い刺激が提示される中で, パルス信号的に強い刺激により 1.0 cm 間隔の合図を送るが, (b) の刺激では弱い刺激と強い刺激を等間隔で提示し, その境目をさせるという手法を用いた. これら二種類の離散刺激を用いることにより, パルスの強い強刺激と触覚の強弱の境目のどちらが知覚しやすいかを明らかにすることを目指した.

続いて, 連続変化法としては次の触覚パターンを用いた.

- (c) 最上部 (10 Hz) から段階的に 1.0 cm 間隔で対数的に周波数を増加 (最下部は 250 Hz)
- (d) (c) + (a) で用いたパルス触覚

1.0 cm 間隔としたのは, 本研究を構成していた当時の関心が, 1.0 cm 間隔での指位置制御に関する, 離散的な刺激と連続的な刺激の影響にあったためである. 連続変化法では, このように段階的に強度が増す触覚場を用意し, 空間的な指の位置に対応づけられた触覚強度により指位置を知覚させる戦略をとった. 触覚強度の調整は, 3.2 節で説明したように, AM 法の変調周波数を変化させることにより行った. 触覚強度と変調周波数は, おおよそ対数の関係にあるため, 触覚強度を各段階で線形に変化させるために変調周波数は対数的に変化させた.

5.1.3 実験手順

以下に実験の流れを記述する (図 5.2).

1. 指を仮想物体 (触覚提示領域) よりも上側にセットし, 実験を始める
2. $n \in \mathbb{N} \mid n \leq 6$ cm 押し下げるという指示に従い, 触覚提示領域から下に押し下げてもらう
3. 終了時点で, 実際に押し下げた距離を, 指先座標の移動距離から測定する
4. これを, 各 n について 10 回ずつ, 合計 30 回行ってもらい, さらに対照実験として用意した 250 Hz の一様な触覚パターンでも 10 回行う

実験は著者自身と, 1 人の協力者により行った. また, 触覚提示がなされている間はホワイトノイズを聞き, 実験中は指ではなくディスプレイの仮想物体を見ていた.

データの解析としては, 指示された距離に対して実際に押し下げた距離との誤差を, 各指示

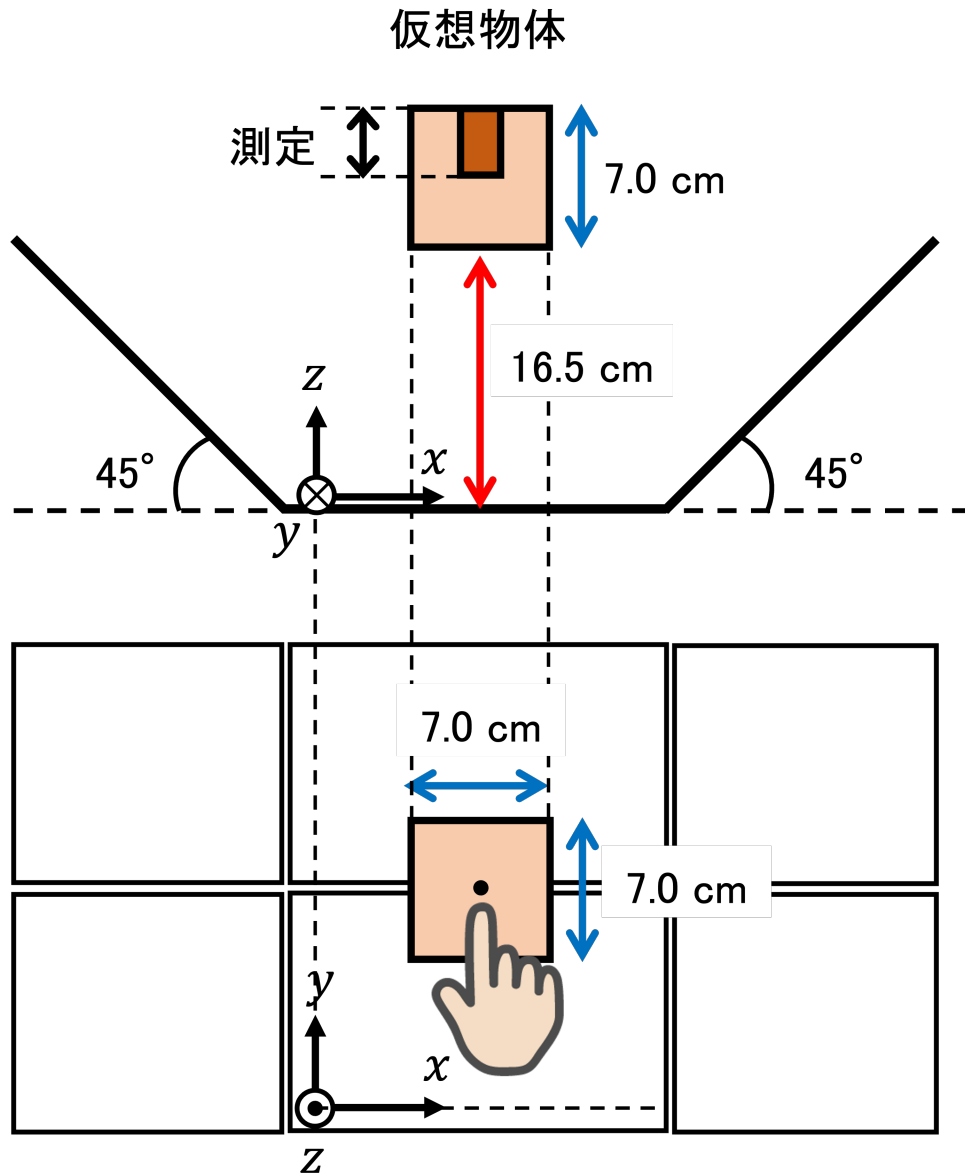


図 5.2. 実験手順の概念図. 橙色の仮想物体を、指示された深さまで押し下げるといふ実験を行った. 実際に押し下げられた距離を測定した.

深さ 10 回分の試行で平均し、折れ線グラフとしてプロットした.

5.2 結果

実験の結果を図 5.3 に示す. 図 5.1 で説明した 4 種類の触覚パターンに加え、対照実験として 250 Hz の一様な触覚を提示し続ける場合を追加した. また、本結果は 1 人の被験者の結果に不備があったため、他方の被験者の結果をまとめたものである. 離散刺激法に分類される (a)(b) と連続変化法に分類される (c)(d) を比較すると、離散刺激法で有意に誤差が小さくなっていることが分かる. 離散刺激法の 2 種類を比較すると、強度の異なる触覚の境目を知覚

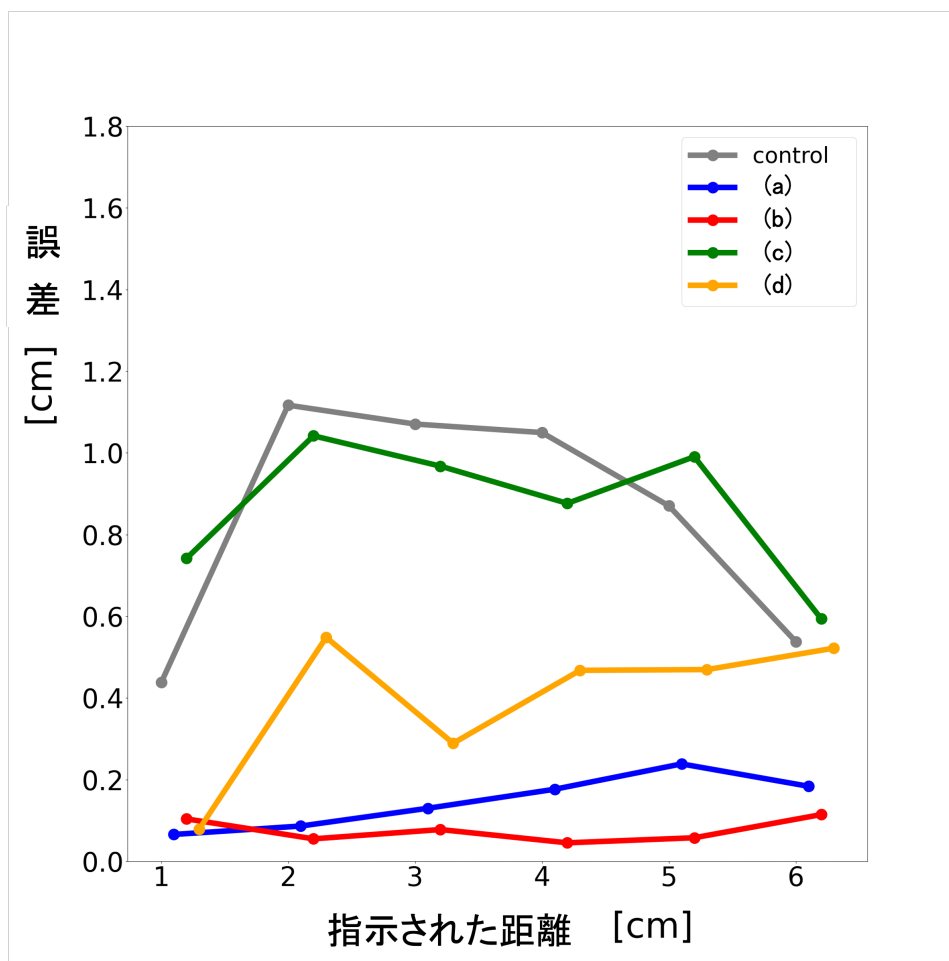


図 5.3. 実験結果のグラフ. control として, 250 Hz で一様に触覚を提示し続けた場合の実験を行った. (a) (d) は図 5.1 に対応する.

する (b) の方が誤差が小さい結果となった. 連続変化法に関しては, 強度変化の際にパルス状の触覚が与えられる方が誤差が小さくなるという結果となった. また, いずれの場合でも対照実験よりも誤差が小さくなっているため, 触覚パターンにより指位置知覚をするという手法は有望だと考えられる.

実験結果からは, 連続変化法と比較して離散刺激法の方が指位置知覚には有利であると結論づけられる. しかしながら被験者からのコメントでは, 離散刺激法では確かに指の移動距離が知覚しやすかった一方で,

- 連続変化法の方が, 次第に深くなっていく感覚が得られやすかった

というものがあ, 連続変化法も追加実験により引き続き性質を明らかにする必要があると感じられた.

第 6 章

鋸歯関数型触覚場の提案

本章では，前章までの内容を踏まえて，鋸歯関数型触覚場（以後，鋸歯型触覚場と呼ぶ）という新たな指位置教示手法を提案する．

6.1 概要

鋸歯型触覚場とは，前章で検証した連続変化法と離散刺激法の長所・短所を補完し合うようにデザインされた触覚場である．図 6.1 に鋸歯型触覚場の概念図を示す．

6.1.1 離散刺激法における解像度に関する問題の解消

前節で見たように，離散刺激法の欠点としては離散的なパルス刺激の合間において指位置のフィードバックが存在しないため，予め設定した触覚空間目盛りの解像度以上の指位置制御ができない点が挙げられる．そこで，連続変化法において利点となる，「微小な指位置フィード

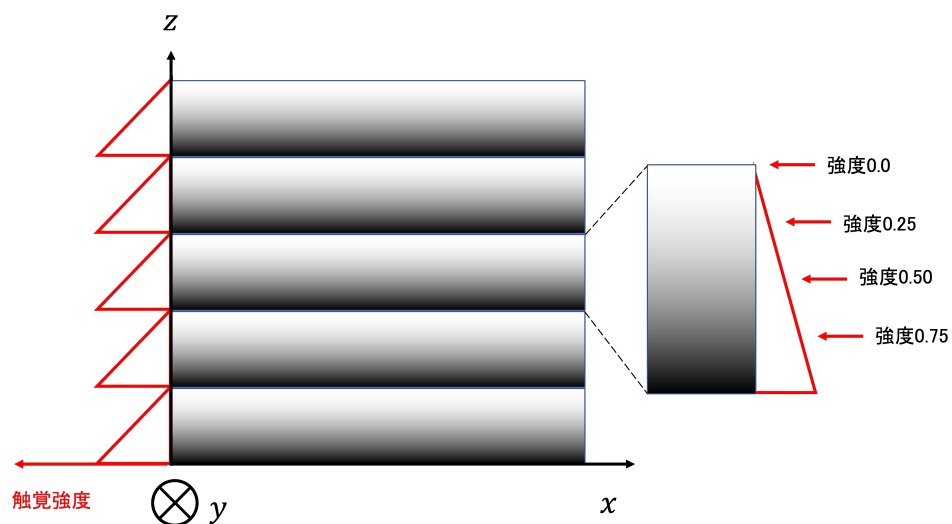


図 6.1. 鋸歯型触覚場を横から見た際のイメージ図．

バックに有利である」「触覚強度と絶対的な指位置を対応づけて、指位置を詳細な精度で知覚可能」という点に着目し、離散刺激の合間に連続的に強度が変化する触覚場を加えることで離散刺激法の欠点を補うことを提案し、これを「鋸歯型触覚場」と名付けた。この際、連続変化する触覚場の境界では、触覚強度が最大から最小へと変化するため、前章で説明した (b) のパターンが依然として有効となっているといえる。すなわち、本提案手法では離散刺激法の利点をそのまま生かしながら連続変化法の利点を取り入れたことになる。

6.1.2 連続変化法における触覚提示領域に関する問題の解消

このようなデザインにすることで、連続変化法の欠点と思われる特徴も、離散刺激法の利点により補完できると考えられる。すなわち、連続変化法では「触覚強度に上限と下限が存在するため、触覚の提示範囲に限界がある」という点が制限となっていた。しかし、離散刺激の間に連続変化する触覚場を繰り返すことで、空間的な制限無く触覚場を提示することが可能になる。

6.1.3 検証項目

次の章からは、この鋸歯型触覚場の効果を確かめるための実験について記載する。前章の実験では、離散刺激法によって 1.0 cm 精度の指位置の制御がしやすくなることが分かった。そこで次章の実験では、前章で確認した離散刺激法の効果は鋸歯型触覚場においても引き続き有効であると考え、連続的に変化する領域内における指位置フィードバックに焦点を当ててその効果を調べた。実験デザインとしては、前章では連続変化法として 1.0 cm ステップで強度変化するものを使用したが、今回の実験では完全に連続な触覚場を使用し、その触覚場における指位置制御の精度を確かめた。考えられる実験手法としては、「指を縦方向に動かして指示された高さで止める」という前章と同様の手法と、「指を横方向に動かして触覚フィードバックによる高さ制御精度を測る」という手法が挙げられる。これらは本質的に同じ内容であり、後者の方が一度の実験で得られるデータ量が多いと考えられることから、次章では後者の手法を採用した。

6.2 提案手法

6.2.1 触覚場デザイン

図 6.1 に示したように、鋸歯型触覚場とは、空間の z 軸方向に対し鋸歯関数型に触覚強度が変化する触覚パターンである。座標軸として水平に xy 平面を取り、鉛直上向きに z 軸を取った。触覚強度の下限を 0.0 とし (触覚が全く感じられない強度)、最大出力を 1.0 とすると、鋸歯型触覚場は、下限から最大出力まで強度が線形に増加する領域 (以後、「層」と呼ぶ) が繰り返された構造となっている。

触覚提示とデータ取得を行う実験領域は、測距センサーの視野角 (水平 × 垂直 × 斜め) が

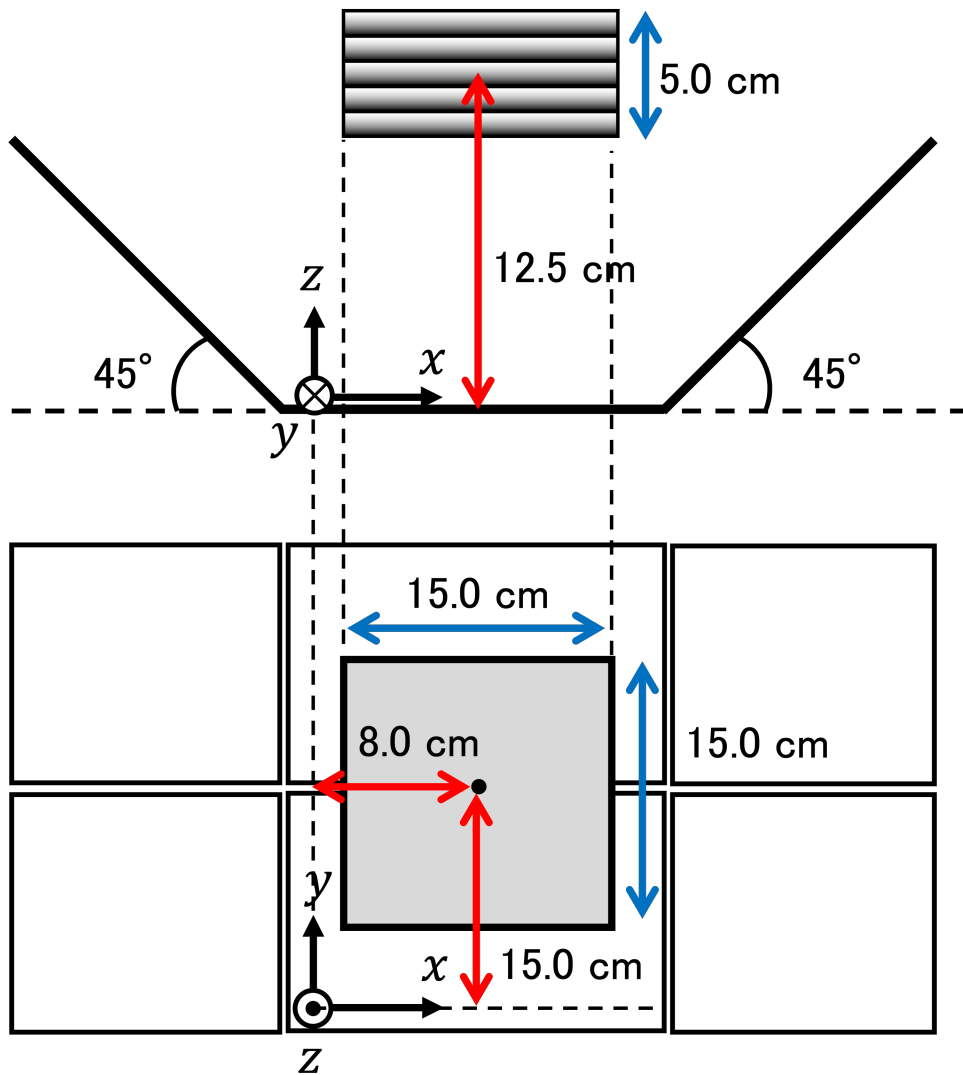


図 6.2. 実空間における触覚提示領域の位置. 触覚提示範囲は, x 軸 \times y 軸 \times z 軸が $15.0\text{ cm} \times 15.0\text{ cm} \times 5.0\text{ cm}$, グローバル座標系原点から触覚提示領域の中心までは, $8.0\text{ cm} \times 15.0\text{ cm} \times 12.5\text{ cm}$ とした.

$69.4^\circ \times 42.5^\circ \times 77.0^\circ (\pm 3.0^\circ)$ であることから, AUPA 上の x 軸 \times y 軸 \times z 軸方向に $8.0\text{ cm} \times 15.0\text{ cm} \times 12.5\text{ cm}$ ずれる形とした (図 6.2).

このような触覚場の中で指を動かすことで, 指の上下方向の微小な位置のずれに対して, 触覚強度の変化によるフィードバックが与えられる. そのため, 常に一定の触覚強度が感じられるように指を動かすことで, 指の軌道を一つの平面上に制限することができると考えられる.

6.2.2 パラメーター

鋸歯触覚場を構成する際に考慮すべきパラメータとして, 連続変化領域を繰り返す間隔, すなわち層の幅が挙げられる. 前章ではこのパラメータを 1.0 cm として実験を行ったが, 次

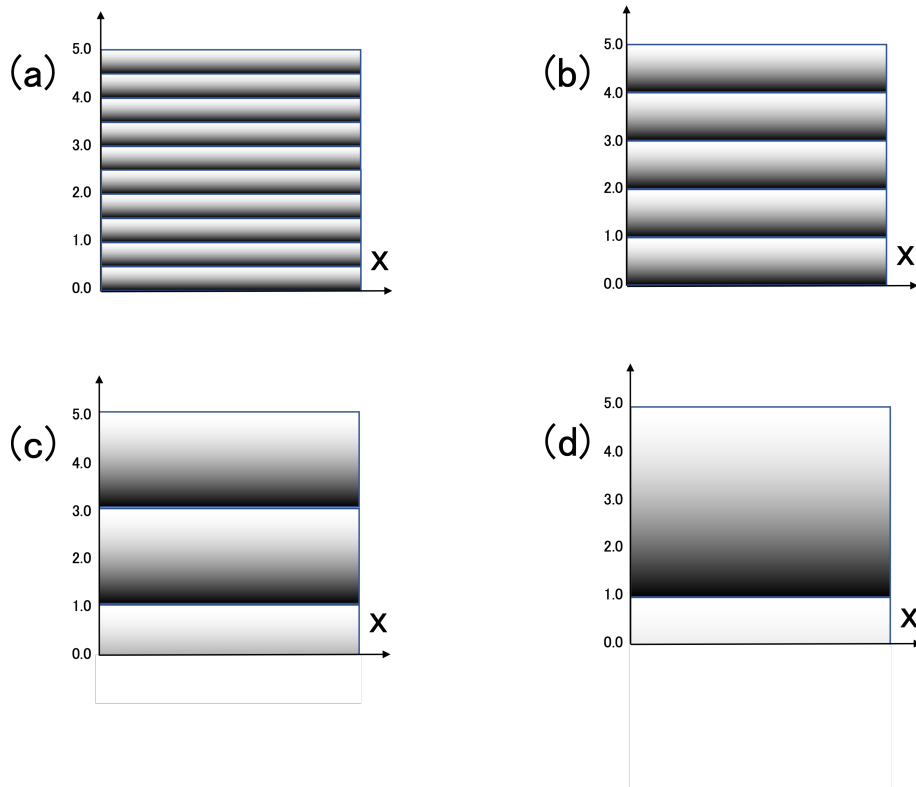


図 6.3. 実験で採用した層幅の値. (a)0.5 cm. (b)1.0 cm. (c)2.0 cm. (d)4.0 cm.

章では、複数の層幅を比較する実験を行った．図 6.3 に示すように、0.5 cm, 1.0 cm, 2.0 cm, 4.0 cm の合計 4 種類の層幅を比較した．

6.2.3 指先検出アルゴリズム

第七章の実験では、仮想物体が無い状態で実験を行ったため、異なる指先検出アルゴリズムを用いた．すなわち、物体との接触有無に関わらず、指先に属する点群を一定数抽出しその重心を計算した．指先座標を先端の一点としないのは、ノイズに対するロバスト性を高めるためである．一定数以上の点群を取得してその重心を取ることで、ノイズの影響を低減することができる．

指先の座標取得の様子を図 6.4 に示す．まず、手に属する全ての点群を y 座標によりソートし、 y 座標の値が大きい点から順番に 1,000 点を選び出す．この際、隣り合う点同士の距離が事前に定めた基準以上である場合は、それ以前の点はノイズに属する点群として除去した．続いて、前のステップで選出された点群をさらに z 座標によってソートし、 z 座標の値が小さい点から順番に 500 点を選び出した．また、この際にもノイズに属する点群の判定を行った．このようにして選出された 500 点以下の点群の座標値を平均することで、指先の座標を一点の空間座標として求めた．

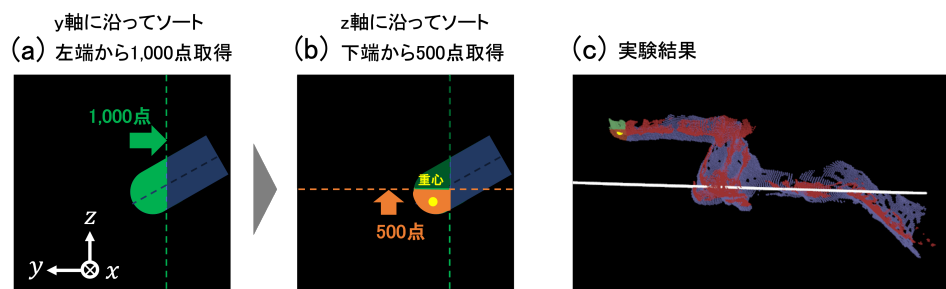


図 6.4. 指先判定の概念図と実験の様子. (a) 初めに全ての点群を y 軸に沿ってソートし, y 軸正の方向から 1,000 点を抽出する. (b) 次に, 抽出された点群を z 軸に沿ってソートし, z 軸負の方向から 500 点を抽出する. 最後に, 抽出された 500 点の重心座標を求め, 指先の座標として用いた. (c) 中の緑色+オレンジ色の領域が, 指先から 1,000 点を抽出したものであり (a), オレンジ色の領域はそれをさらに指の腹側から 500 点抽出したものである (b).

第 7 章

実験

7.1 被験者実験

被験者実験では、鋸歯型触覚場において利き手の人差し指を xy 平面内で指示された軌道に沿って水平に動かすという内容で実験を行った。データとして指先の z 座標のずれを取得し、統計的に処理した。

実験は、女性 4 名、男性 10 名の計 14 名の被験者から協力を得た。被験者の年齢は、22 歳から 28 歳までの範囲であった。このうち、一名の被験者は左利きであったため、左手で実験を行ってもらったが、その他の被験者は右手で実験を行った。

7.1.1 実験手順

図 7.1 に実験中の様子を示す。実験データの取得は、全てプログラム上で自動的に行った。初めに準備として、被験者に指を図 7.1(a) のスタート位置においてもらい、全ての層幅において 0.0 強度の位置が指の腹の位置に当たるように、層全体の z 座標を平行移動させた。これは、被験者ごとに指の大きさやアクリル板への固定位置が異なる影響を排除するためである。次に、解析で使用する基準の z 座標を取得するため、被験者に指を初期位置で固定してもらったまま、試行一回分のデータを取得した。その後、44 回の実験に移った。

被験者には指をアクリル板の横にセットし終え、画面に目を移したタイミングで口頭で合図を出してもらい、一回の試行をスタートした。全ての試行で毎回同じ高さからスタートしてもらうため、被験者には指とアクリル板との相対位置を自分でわかりやすいように覚えておくように伝えた。ディスプレイには、触覚提示領域を示す正方形の目印と、測距センサーで測定した手の点群、計算により求めた指先座標が表示されており (図 7.1(b))、それぞれの試行が始まるごとに正方形の目印の上を赤いマーカーが動く (図 7.1(c,d))。この状態で被験者には画面を見てもらい、画面上を左から右あるいは上から下に動く赤いマーカーを指が追従するように、指が水平になるように意識しながら動かしてもらった。マーカーが画面上を動く速さは、2.25 cm/s であった。このマーカーの速度は、ゆっくりにするほど触覚強度のフィードバックが知覚しやすくなるが、同時に腕の疲れも発生しやすくなる。そのため、予備実験において、

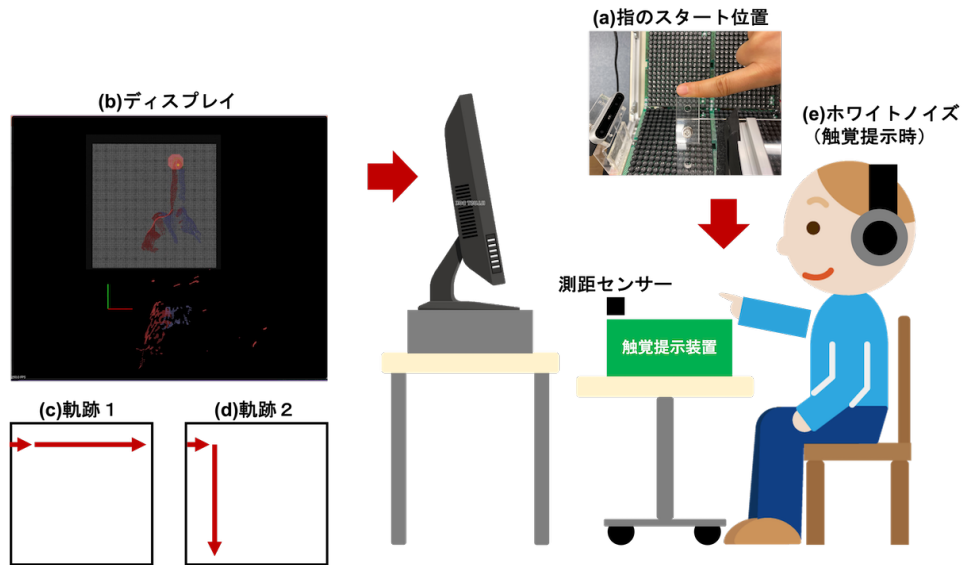


図 7.1. 実験中の様子. 被験者はディスプレイに映した点群とマーカーを見ながら全ての実験を行った. (a) 実験開始ごとに, 装置上に設置したアクリル板に指を密着させるようにして開始位置を固定した. (b) PC ディスプレイ上に二種類の軌跡 (c,d) が赤いマークの移動によって示され, 被験者はそのマークを辿るように AUPA 上で指を動かした. (e) 触覚を提示する実験の間は, 被験者にホワイトノイズを聞いてもらった.

自然な指の動きでありながら触覚フィードバックも感じられる適切な速度を採用した. マーカーが動き始めると同時に, 被験者の指の z 座標を測距センサーのフレームごとに一件ずつ取得し, ファイルに記録した. 赤いマーカーが画面から消えたタイミングで一回の試行は終了し, 同時に指の z 座標の取得も終えた. 15 cm の距離を, 90 fps のフレームレートで 2.25 cm/s の速度で動くため, 一回の試行の合計のデータ件数は最大で 600 となる (マーカーよりも先に実験領域から抜けた場合はこれよりも少なくなる). 全ての実験が終わった後に, 触覚ありとなしで指の動かしやすさにどのような違いがあるか, また触覚の層の厚さやスタート時の触覚強度が変わった時に, 違いを感じるかなどの質問に答えてもらった. また, 実験について自由にコメントをしてもらった.

7.1.2 出題順序

実験は被験者 1 人に対して合計 44 回行い, このうち始めの 6 回と最後の 6 回は対照実験として AUPA による触覚提示が無い状態で行った. 残りの 32 回は, 2.1 節で説明した鋸歯型の触覚を提示して行った (図 6.1). 触覚を提示して実験をする間は, 装置から発生する音による影響を排除するため, 被験者はホワイトノイズを聞いていた (図 7.1(e)). 鋸歯型触覚の各層幅パラメータ 0.5 cm, 1.0 cm, 2.0 cm, 4.0 cm に対して実験スタート時の触覚強度は 0.0 の地点 (層の境目), 強度 0.25 地点, 強度 0.50 地点, 強度 0.75 地点を採用した (図 6.1). また, 各層幅とスタート地点の組み合わせについて, マーカーの軌跡はディスプレイの「右から左」方向と「上から下」方向を順に出題した (図 7.2). 試行への慣れや疲れは実験結果に影響を与える

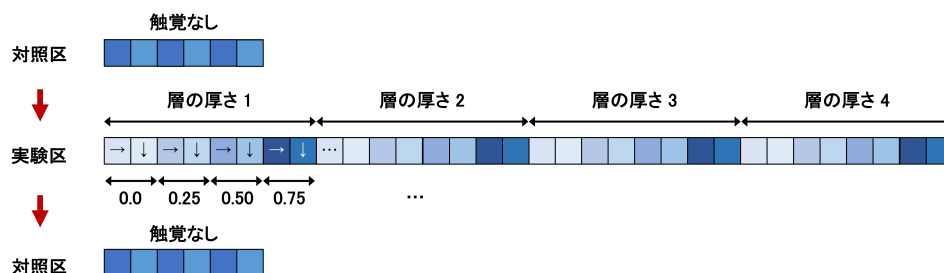


図 7.2. 被験者ごとに行った実験の流れを示す。対照区では、AUPA による触覚の提示が行われず、左右の軌跡と上下の軌跡が交互に出題された。実験区では、各層幅に対して 8 回の実験が行われ、それぞれの幅においてスタート時の触覚強度は 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 と移動した。さらに、各「層幅とスタート時の触覚強度の組み合わせ」に対して、左右の軌跡と上下の軌跡が一度ずつ出題された。AUPA による触覚提示ありの実験の後に、再び触覚提示なしの対照実験が行われた。

ため、被験者ごとに層幅の出題順序を入れ替え、その影響を低減した。

以下に、実験前に被験者に伝えた指示内容をまとめる。

- 実験は、AUPA による触覚提示なしで 6 回、その後触覚提示ありで 32 回、最後に再び触覚提示なしで 6 回行う。
- 実験開始時にはスタート地点の亚克力板に指をセットし、毎度同じ高さからのスタートにする。
- 指の軌道が水平に保たれるように、画面上のマーカーを追跡する。
- ディスプレイの右方向にグローバル座標系の x 軸方向を、上方向に y 軸を取る。
- 4 種類の層幅で実験し、幅が変わる前に実験者が被験者に知らせ練習時間を設ける。
- スタート時の触覚強度は、強度 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 をこの順で出題する。
- 指が上下にずれた際に与えられる触覚強度の変化を頼りに、指の高さを補正する。

7.2 解析

本節では、被験者実験により得られた z 座標データの解析手法について記述する。

7.2.1 生データの可視化

実験中、被験者の指先座標が実験領域の中に入っている間は、指先の z 座標が 1 フレームにつき一行のレコードとして記録される。解析では、このレコードを一行ずつ読み込み、横軸にレコード行番号、縦軸に z 座標を取って散布図としてプロットした。実験は 1 人の被験者について、AUPA による触覚提示ありの実験は 4 種類の層幅、4 種類のスタート時の触覚強度、2 種類の軌跡の条件を組み合わせで行ったため、合計 32 個のグラフにより結果を可視化した。また、AUPA による触覚提示なしの実験は触覚提示ありの実験の前後に 6 回ずつ行ったが、それぞれ左右移動の軌跡 3 回、上下移動の軌跡 3 回の同じ条件の実験は同じグラフ上に

プロットした。そのため、AUPA による触覚あり/なしの実験の結果を合わせて合計で被験者あたり 36 個のグラフにより可視化した。

7.2.2 統計量の計算と可視化

また、各被験者の各条件における試行結果について、「標準偏差」と「スタート時の指の z 座標からの二乗平均誤差」の分析を行った。標準偏差は、各試行で全ての z 座標のレコードを平均し、平均からの二乗平均誤差の平方根を取ることで計算した。データの処理には Python を使用し、標準偏差の計算には Python のライブラリである Numpy の関数を使用した。スタート時の指の z 座標からの二乗平均誤差としては、前の説で説明した、指を初期位置で固定したまま取得した一回分の z 座標データの平均値を用いて、各試行で得られた z 座標値との差の二乗を平均した値を算出した。ここで得た二種類の統計データを、層幅を横軸に取ったグラフとスタート時の触覚強度を横軸に取ったグラフに散布図としてプロットし、合計 4 種類のグラフにまとめた。ただし、AUPA による触覚なしの対照実験の結果は、触覚ありの実験前の結果を灰色、触覚ありの実験後の結果は黒色のラインで示した。

7.2.3 全被験者の平均値の計算

続いて、個人差や層幅の実験順序の影響を平均化した結果を得るため、全被験者の統計量を平均した。36 種類の条件で被験者ごとに算出した「標準偏差」と「二乗平均誤差」を、14 名の被験者で平均し、36 種類の平均統計データを取得した。これらの結果を、各被験者の結果と同じ形式でグラフにまとめた。次節で結果と考察を述べる。

7.3 結果

7.3.1 個人的傾向

図 7.37.4 に、1 人の被験者の実験結果の生データを示す。ディスプレイの左右方向にマーカーが動く試行の結果からは、触覚ありの実験を行う前の触覚なしの対照実験では軌道が z 軸正の方向にずれていることが分かる。触覚ありの実験では、層幅 2.0 cm かつスタート強度 0.0、層幅 4.0 cm かつスタート強度 0.5、層幅 0.5 cm かつスタート強度 0.75、層幅 1.0 cm かつスタート強度 0.75 の条件での試行において、標準偏差が 0.4 cm を超えた。この被験者の結果からは、層幅やスタート強度による高さ制御の精度への傾向は見られなかった。また、他の 13 人の被験者に関しても、層幅とスタート強度に関する傾向は見られなかった。一方、触覚ありの実験後に行った触覚なしの対照実験の結果からは、触覚ありの実験を行う前よりも標準偏差 0.344、二乗誤差 0.974 の改善が見られた。これは、鋸歯型の触覚により指を水平に保って動かすという運動が学習されたためと考えられるが、慣れの影響を排除できていない。

ディスプレイの上下方向にマーカーが動く試行の結果からは、初めの対照実験で指が下方向にずれた後、上方向にずれるか、そのままの高さをキープしていることが分かる。この傾向は

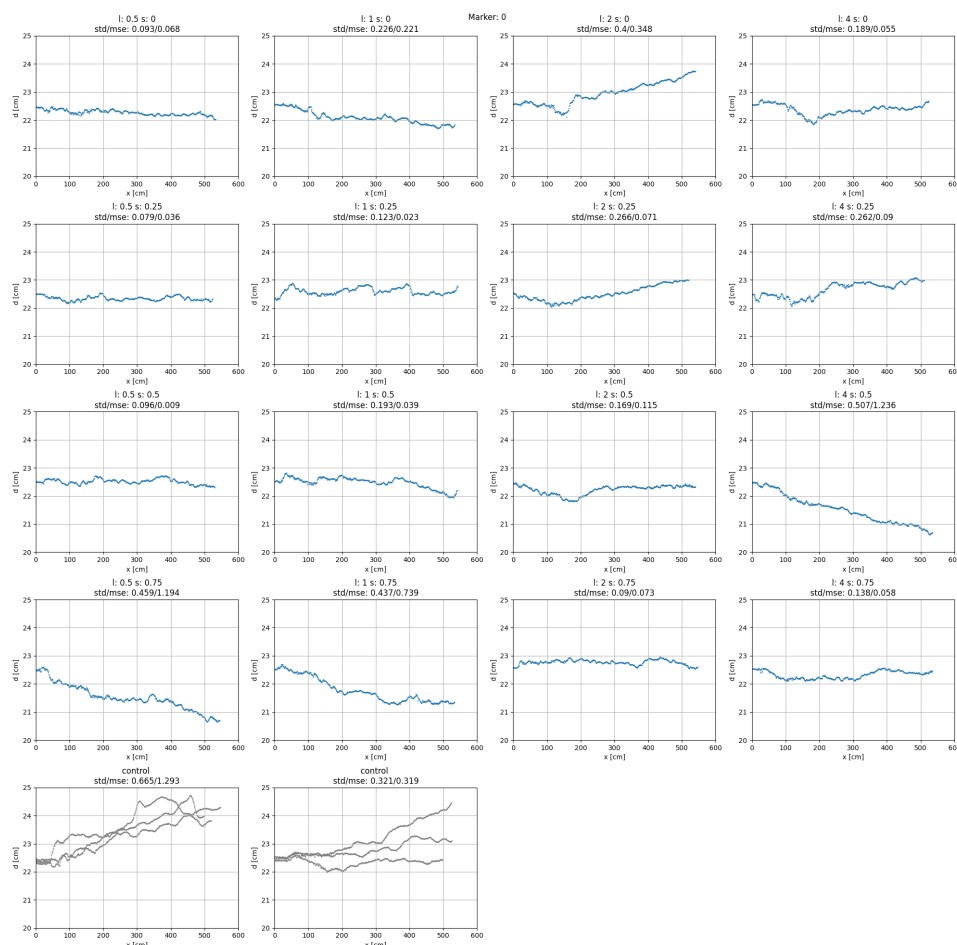


図 7.3. ディスプレイ上で左右に動く軌跡における結果の 1 人の被験者の生データ。

被験者ごとに異なり、多くの被験者では指が下の方向にずれていくという結果となった。この現象について、ある被験者のコメントでは、「ディスプレイ上でマーカーが上下に動くにも関わらず、実際は指を水平に動かすため、マーカーの動きに釣られてしまった」とあり、マーカーと指の動く方向が異なっていることが原因の一つである可能性が考えられる。また、別の被験者のコメントには「肘の構造上、どうしても下にずれやすいと思う」というものもあり、人間の関節の動きの特性と実験中の姿勢が、指を手前方向に動かすのに不都合であった可能性が考えられる。したがって、実験中の姿勢を変更したり、椅子の高さを変更することで異なる結果が得られる可能性も考慮する必要がある。触覚ありの実験では、層幅 2.0 cm かつスタート強度 0.25、層幅 4.0 cm かつスタート強度 0.25、層幅 2.0 cm かつスタート強度 0.5、層幅 4.0 cm かつスタート強度 0.5 の条件での試行において、標準偏差が 0.3 cm を超えた。この結果からは、層幅が広い条件で精度が低下することや、スタート地点に関する傾向が読み取れるが、他の被験者にも共通の傾向とは言えないため、被験者の個人的傾向であると言える。また、この実験でも、触覚ありの実験後の対照実験では前の対照実験と比べて標準偏差 0.132、二乗誤差 0.135 の精度の改善が見られた。

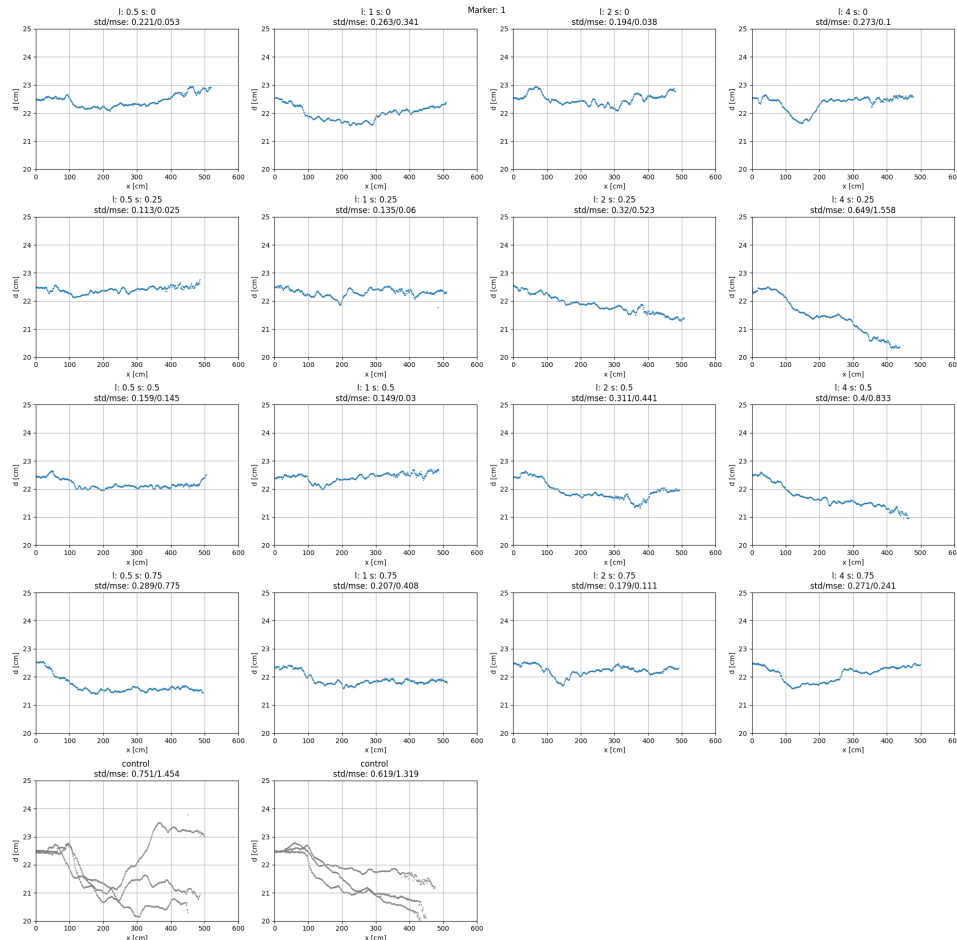


図 7.4. ディスプレイ上を上下に動く軌跡における結果の 1 人の被験者の生データ。

7.3.2 全被験者による平均

図 7.5, 7.6 に被験者 14 名の標準偏差と二乗誤差をそれぞれ平均したものを、層幅ごと、スタート強度ごとに示す。一度目の対照実験と比べて、触覚ありの実験では全ての条件において標準偏差が下回っており、精度の改善が見られた。また、二乗誤差についても、層幅 1.0 cm かつスタート強度 0.75 あるいは 0.25 の条件で対照実験よりも精度が悪化したのみで、その他の条件では精度向上が見られた。2 度目の対照実験では、触覚ありの全ての実験の平均ほどの結果となった。実際に被験者の自由コメントでも、

- 視覚のみの対照実験では一番制御しにくく感じた。
- 触覚があった方が制御しやすかった。

などがあり、主観的にも触覚ありの実験では指の高さを制御しやすかったことが言える。層幅とスタート強度による精度への影響は、層幅が大きいほどスタート強度による精度のばらつきが大きく、スタート強度が 0.0 の際に層幅の違いによる精度のばらつきが大きいことが分か

る。本研究の結果からは、層幅 4.0 cm かつスタート強度 0.0 の条件において最も高い効果が現れていることが分かる。実際に被験者の自由コメントとして、

- 0.0 強度で合わせるのが全ての厚さの中で最も容易だった。

というものがある。このような結果が得られた理由としては、スタート強度 0.0 では z 軸正方向に 0-1 強度の強いフィードバックが与えられるため、z 軸負方向のフィードバックのみに集中できた可能性が考えられる。ただし、他の被験者のコメントとして

- 層の違いによる制御しやすさの違いは感じられなかった。
- 1.0 cm, 2.0 cm の層幅では制御しやすいと感じたが、極端に狭いあるいは広い層幅だと制御しにくかった。
- 最後に行った層幅 (4.0 cm) は、慣れのせいか制御しやすく感じた。

などがあり、被験者ごとの個人差に加えて慣れの影響もあることが分かった。

さらに別のコメントとしては、

- 最初の触覚強度を覚えていないと、どこでキープすべきか分からなくなる。
- 画面を見てマークを追従しながら触覚にも気をつけるのは難しかった。
- より強い触覚フィードバックを与えた方が、制御しやすいかもしれない。
- 練習中に感覚が掴めたとしても、実験中は画面を見ていたので、練習の時ほど指位置が分からなかった。

などがあり、今後実験デザインについて再検討する必要性も示唆された。

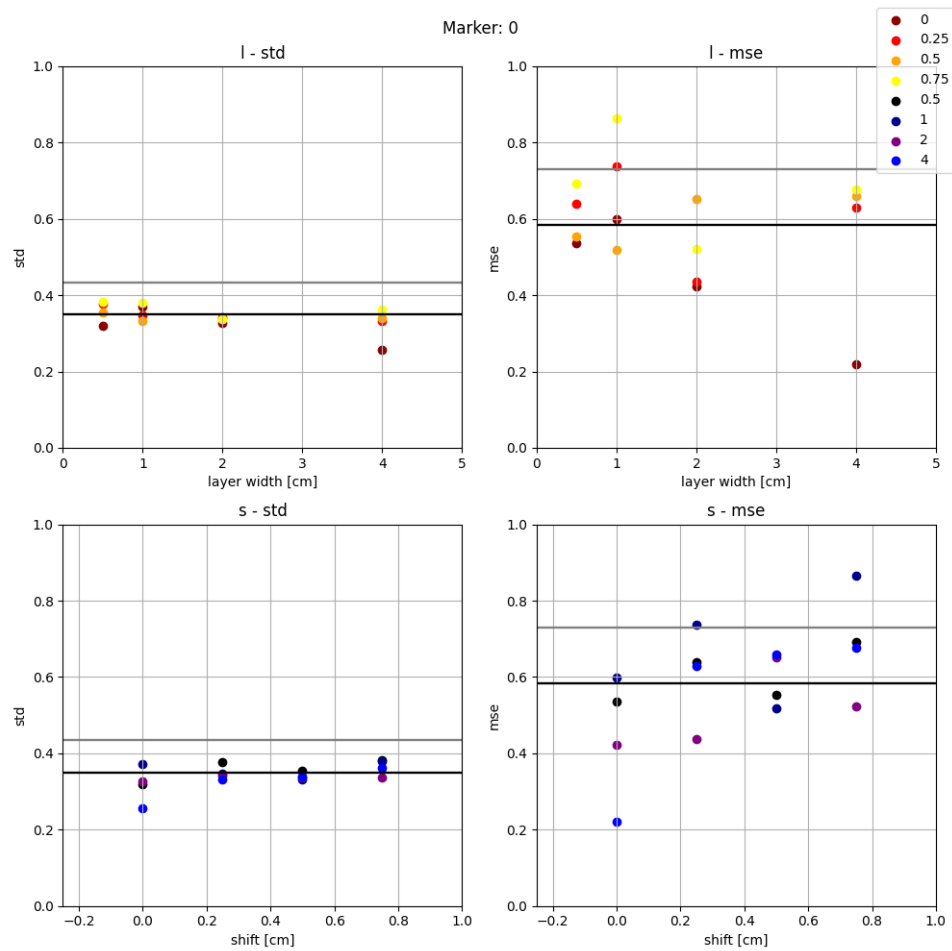


図 7.5. 軌跡 1 の全被験者の統計データを平均した結果.

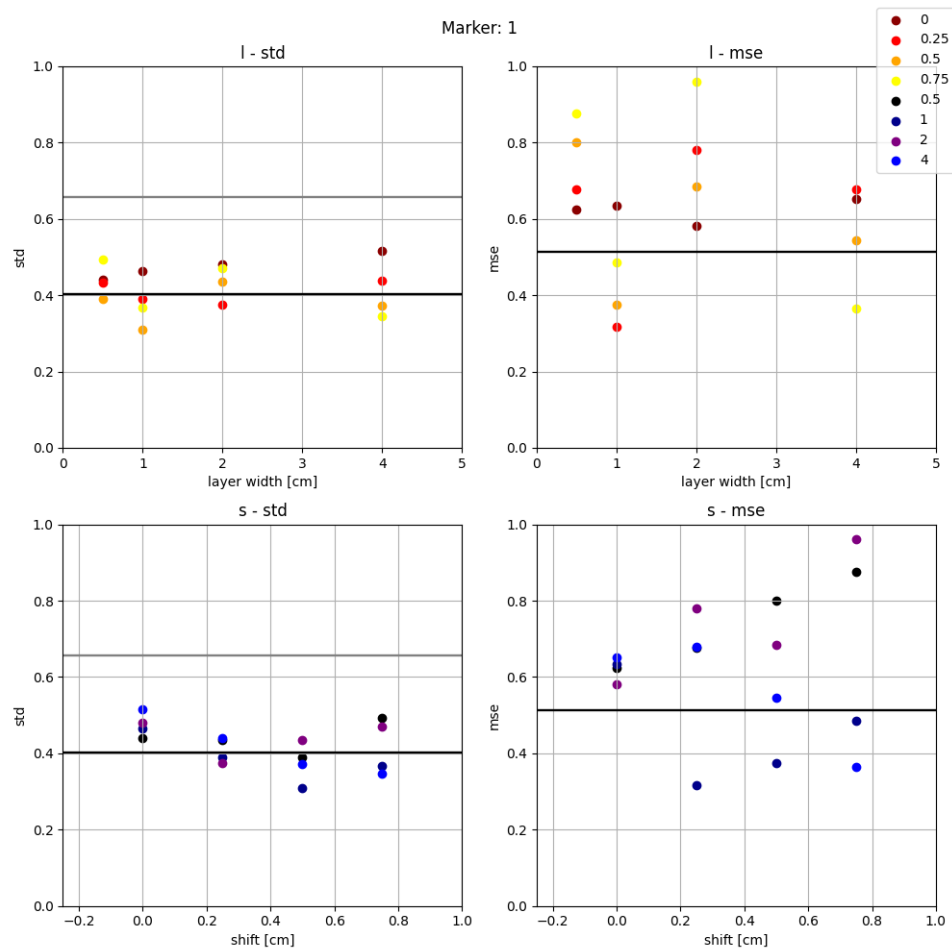


図 7.6. 軌跡 2 の全被験者の統計データを平均した結果.

第 8 章

結論

本研究では、空中超音波フェーズドアレイにより指先に触覚提示をすることで指位置を教示し、移動軌道を制御する手法について検討した。指位置教示の手法としては、空間上で離散的に強度が変化する触覚場を用いる「離散刺激法」と、連続的に触覚強度が変化する場において触覚強度の微分を利用する「連続変化法」を考案した。これらの手法により 1.0 cm 精度の指位置知覚を行う実験を行った結果、離散刺激法ではより小さな誤差で目標の位置まで指を移動させることができた。一方で連続変化法では、指の位置と触覚強度が一对一の関係になるため、指の移動に伴って次第に位置が変わる感覚が得られやすかったことが被験者のコメントから分かった。これらを受け、新たな手法として離散刺激法と連続変化法の長所を取り入れた鋸歯型触覚場を提案し、その効果を検証した。実験では、離散刺激法では困難であった目盛り間隔以上の精度での指位置制御に取り組んだ。実験の結果、鋸歯型の触覚場を用いることで、目盛り幅内においても指位置の制御が容易になることが示唆された。本研究の成果は、VR 空間におけるスカルプティング操作やペインティング操作などの、指位置の正確な知覚が必要となる VR アプリケーションでの応用が期待される。

付録 A

各被験者の結果

ディスプレイ左右方向に動く軌跡 (図 A.1 から A.13)
ディスプレイ上下方向に動く軌跡 (図 A.14 から A.26)

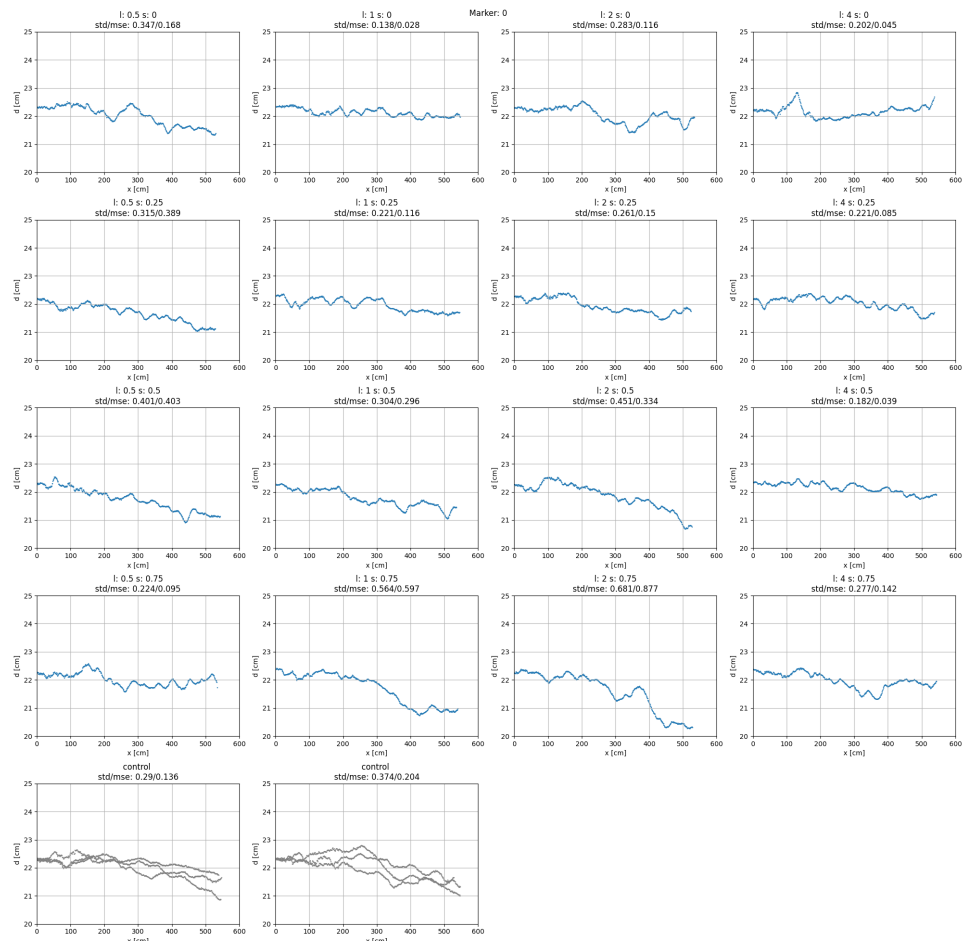
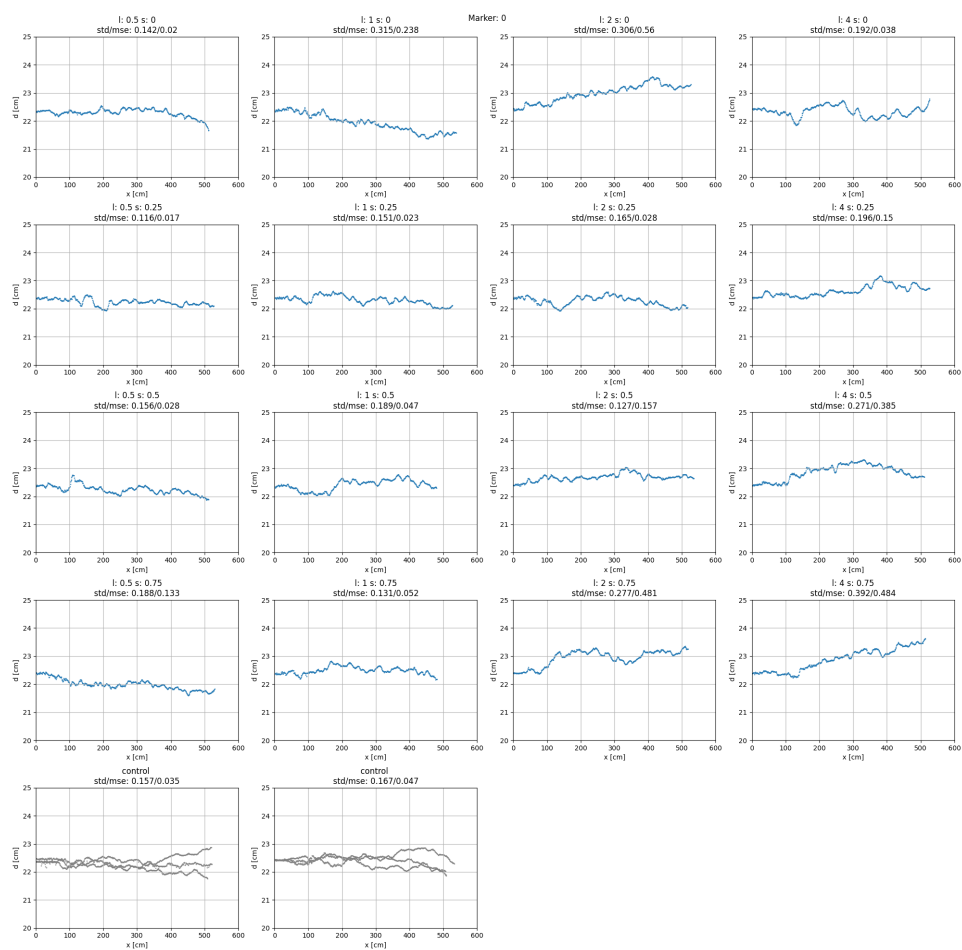


図 A.1.



A.2.

36 付録 A 各被験者の結果

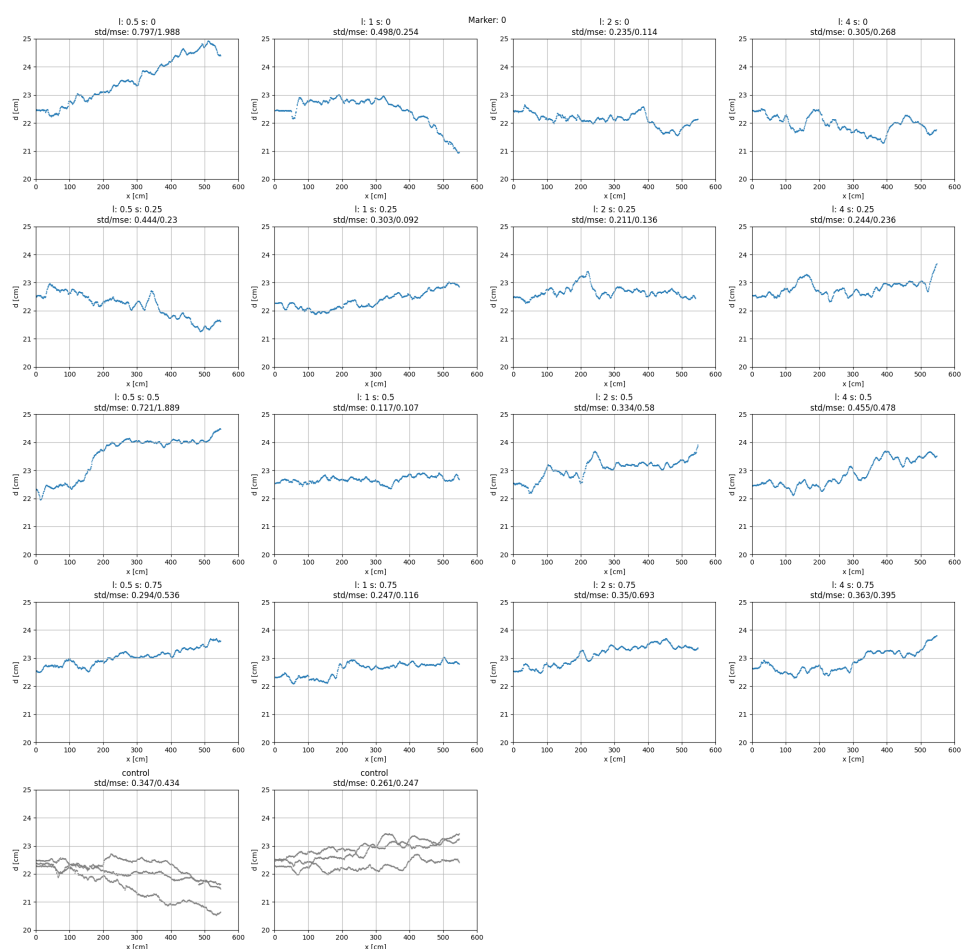
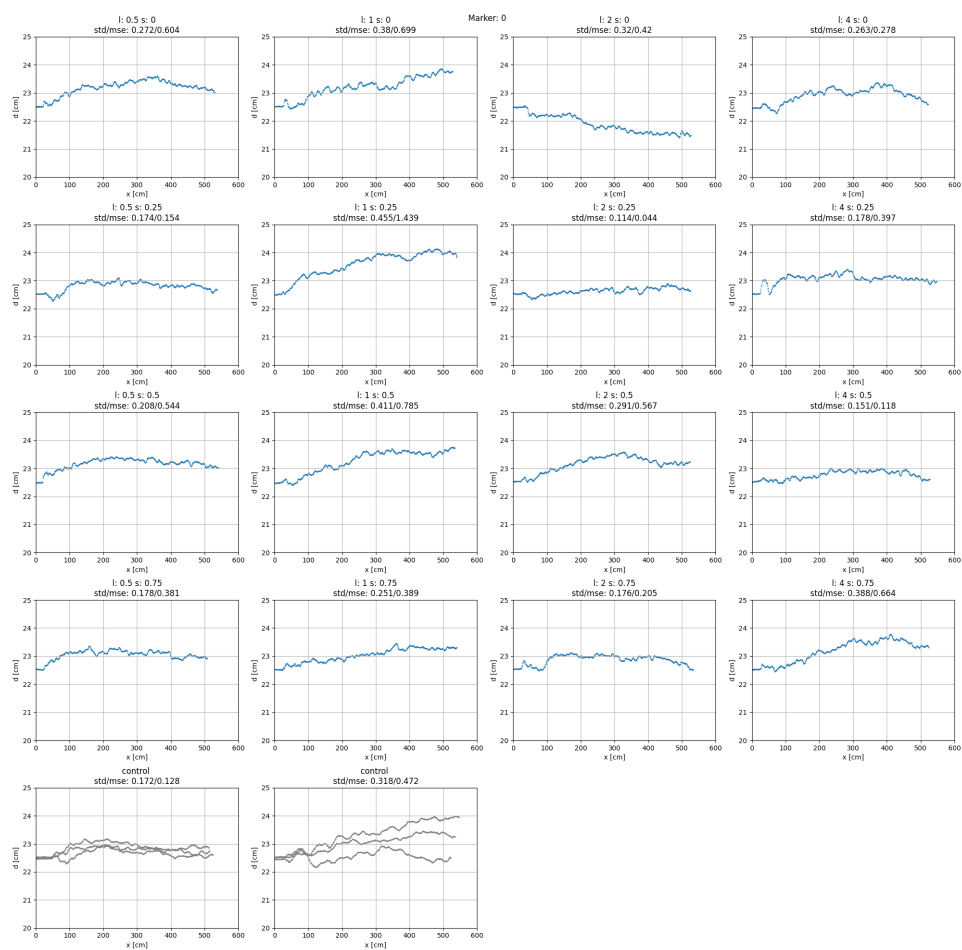


図 A.3.



A.4.

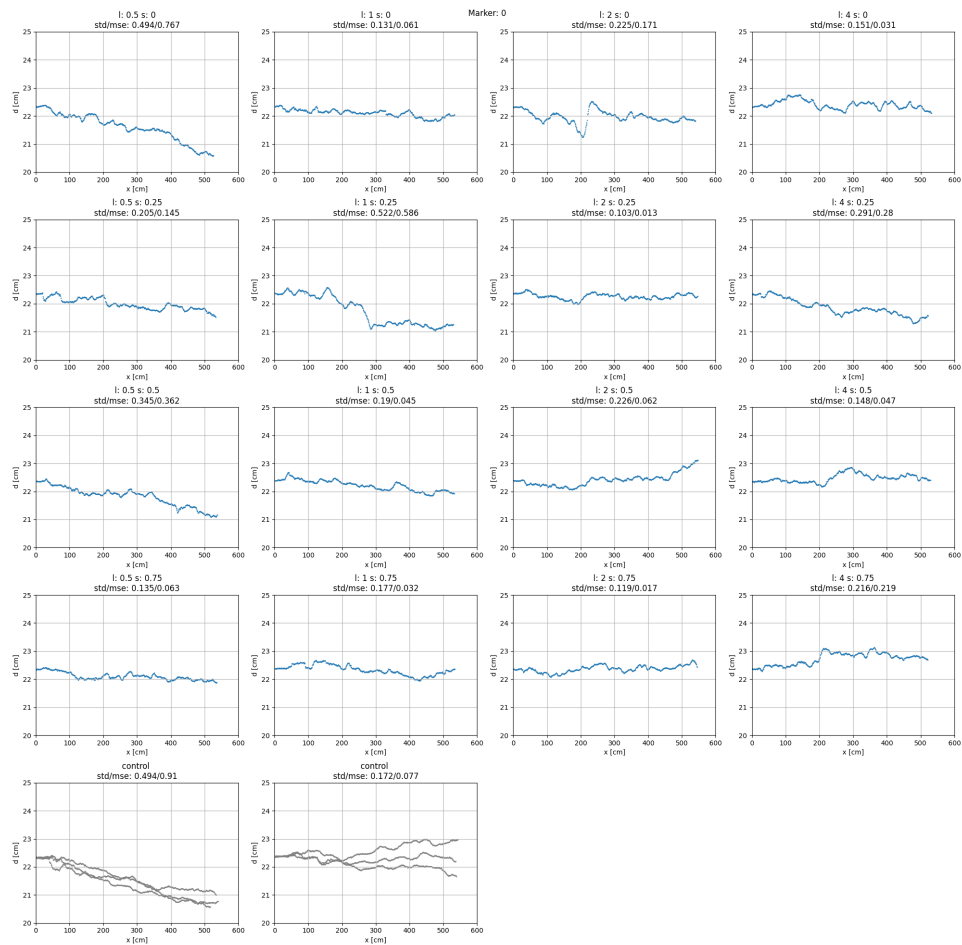
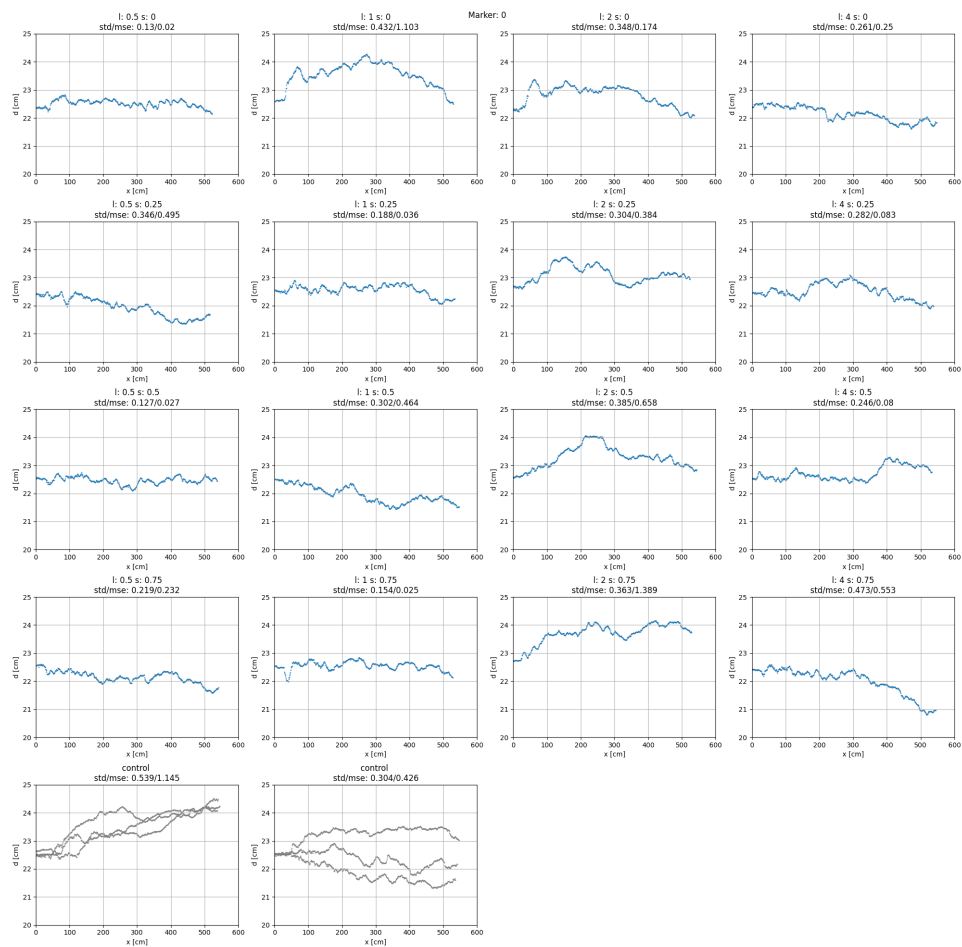


図 A.5.



A.6.

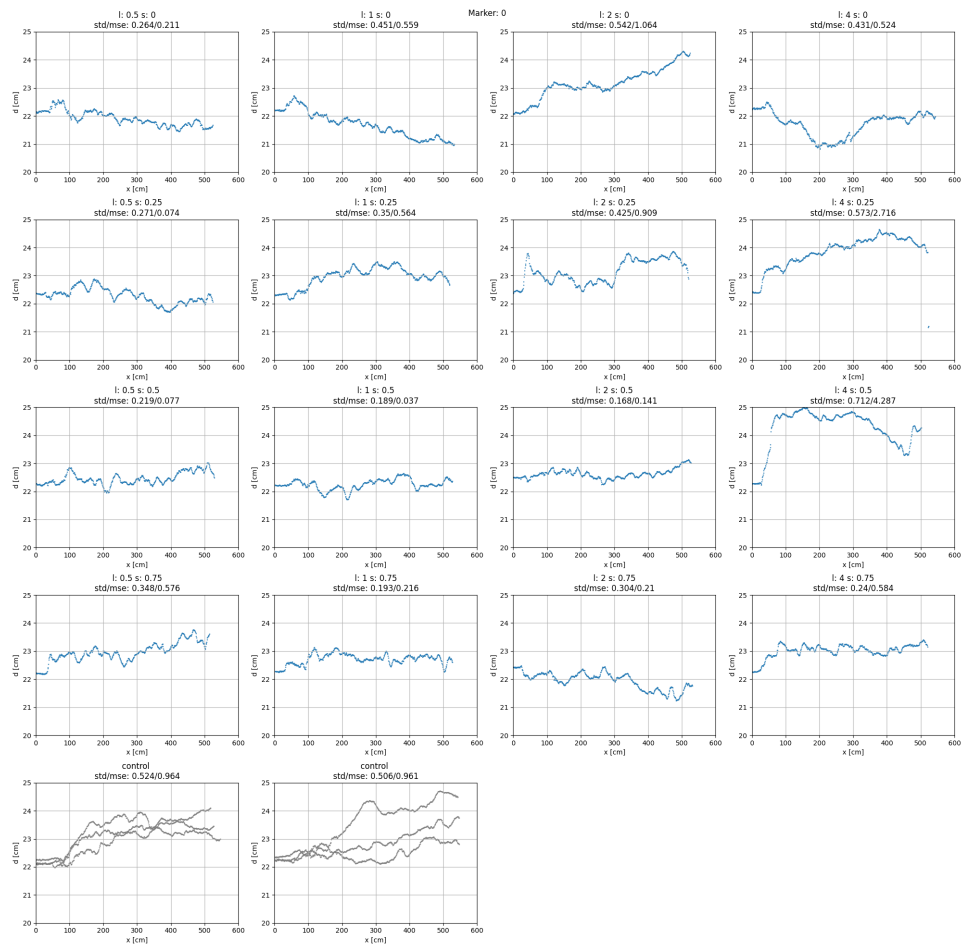
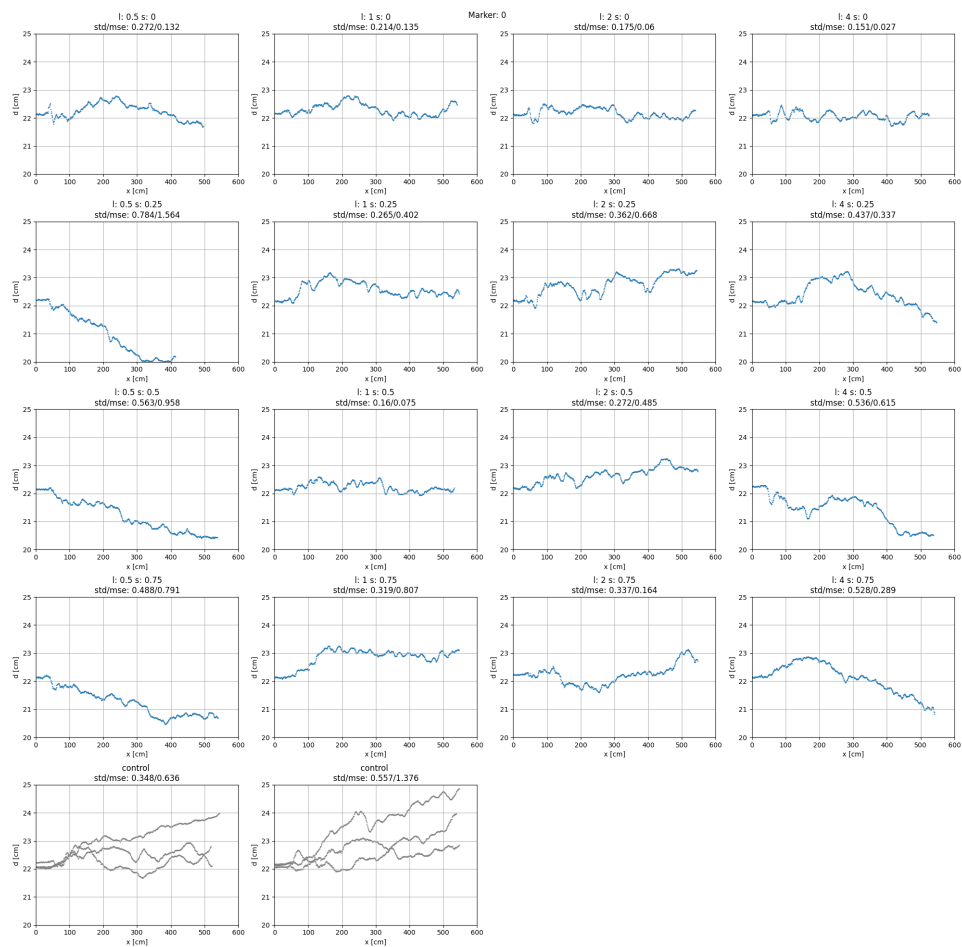


図 A.7.



A.8.

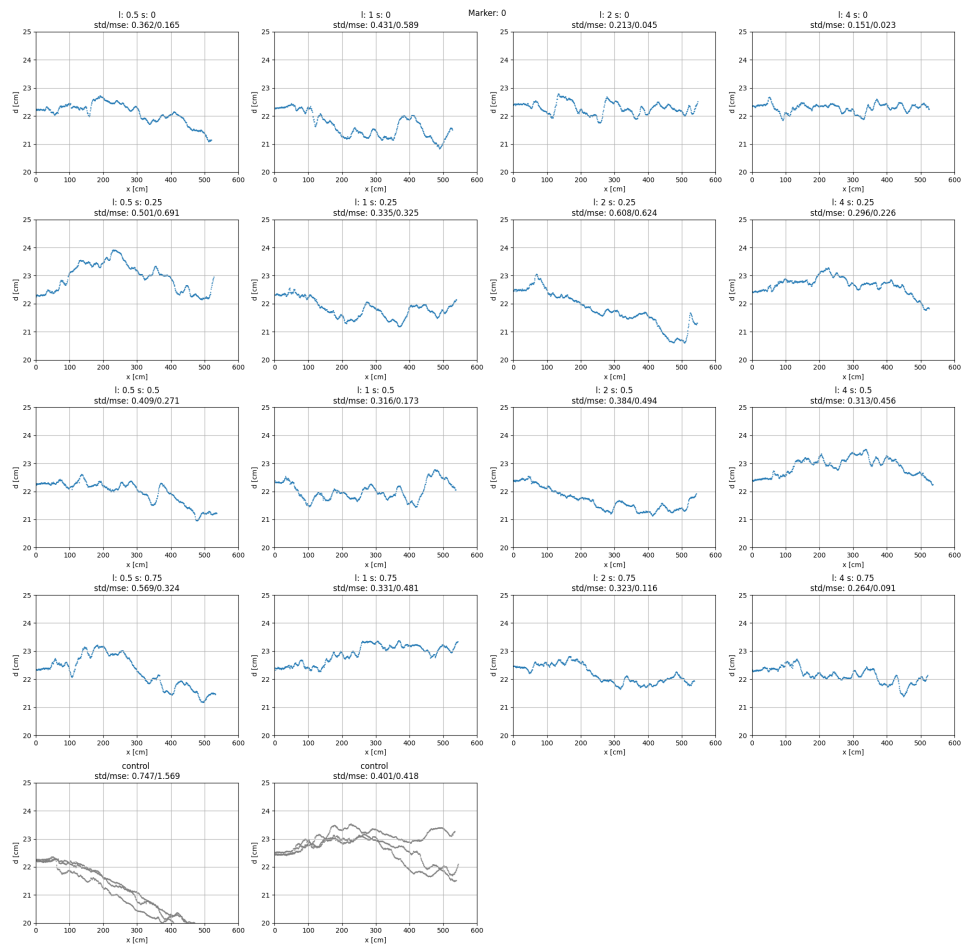


図 A.9.

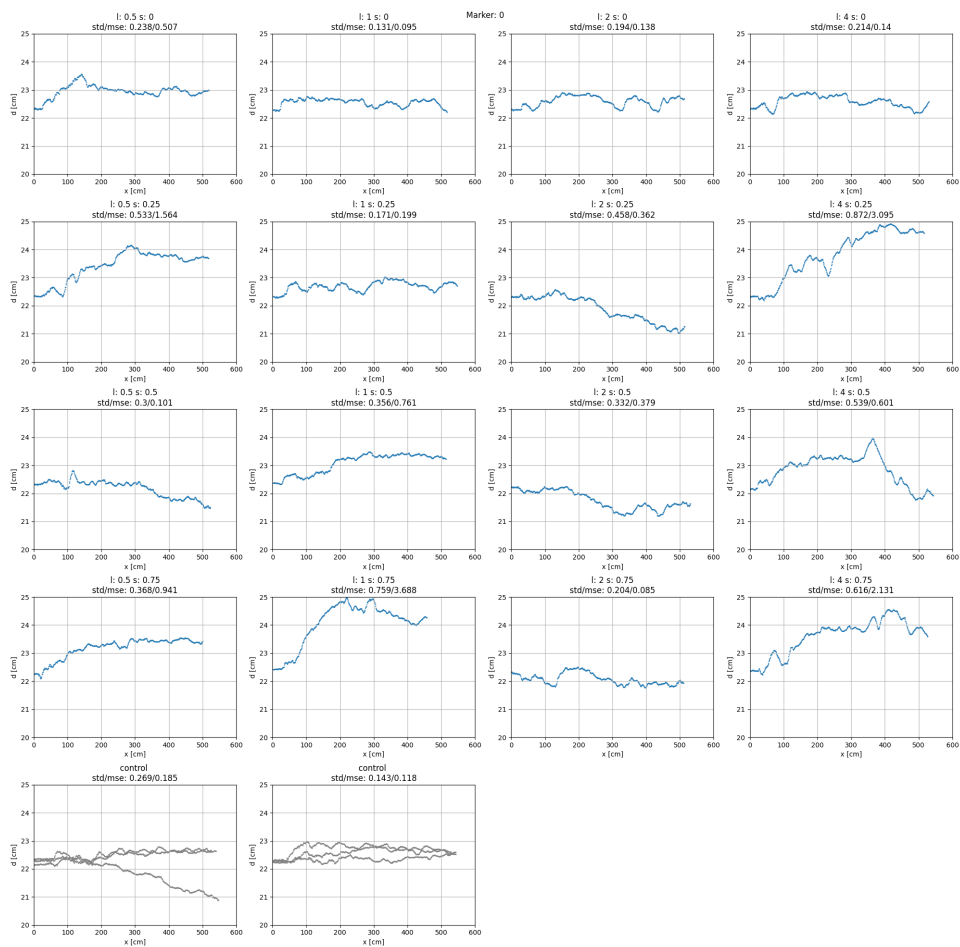


图 A.10.

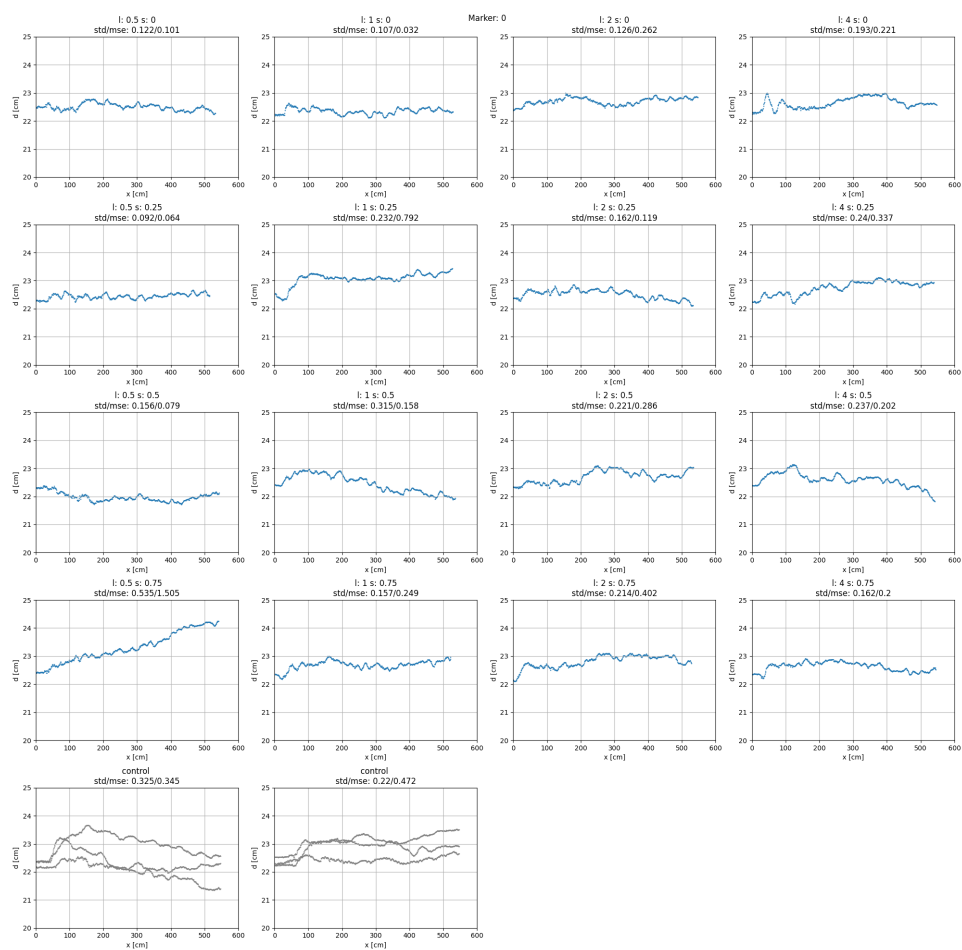


図 A.11.

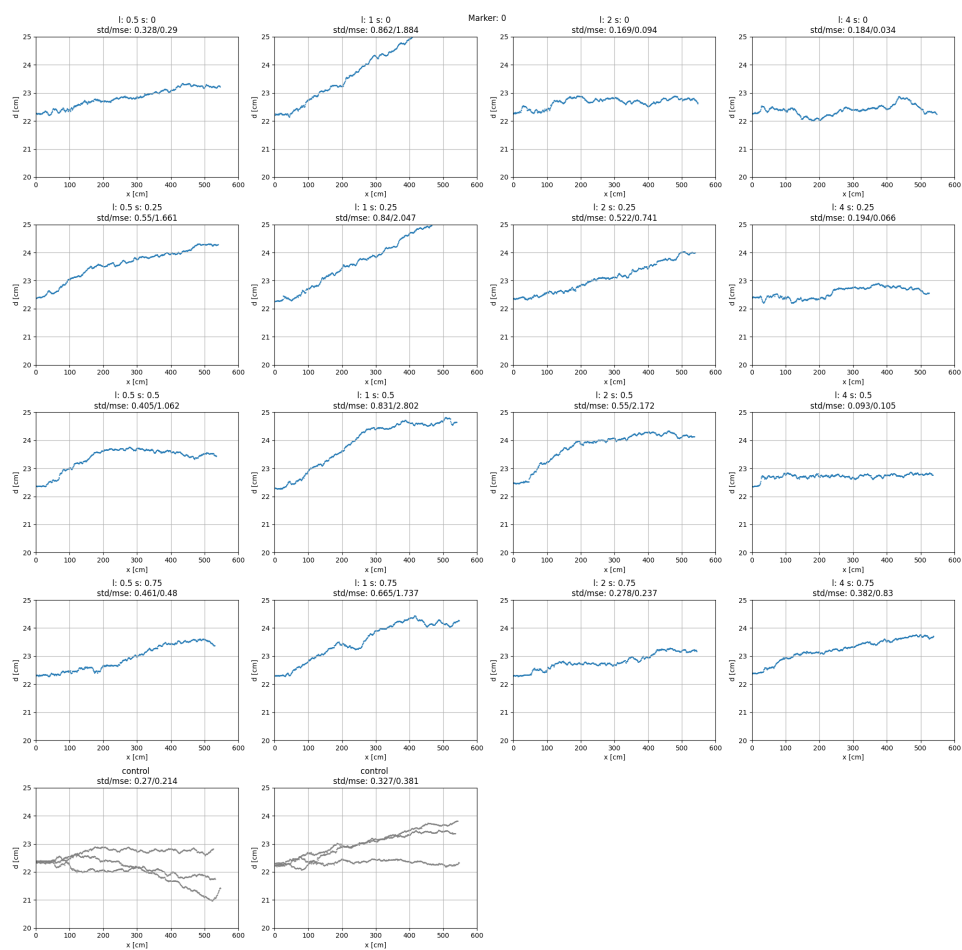


图 A.12.

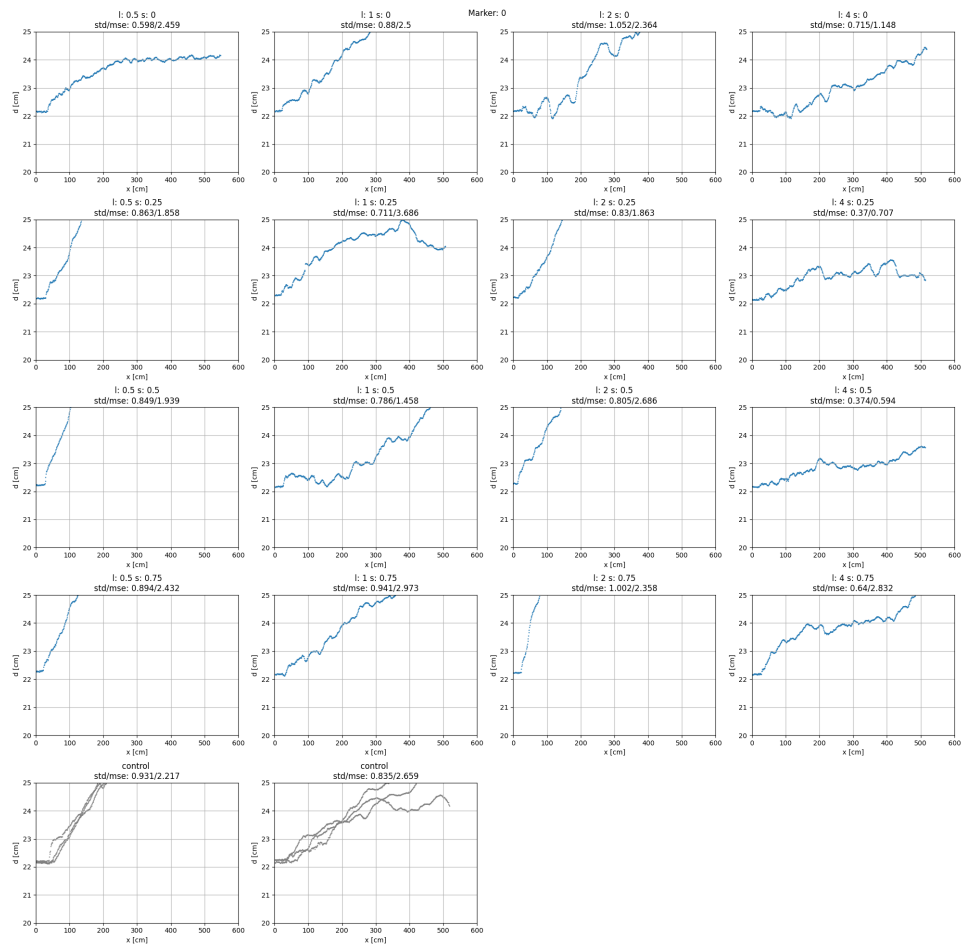


図 A.13.

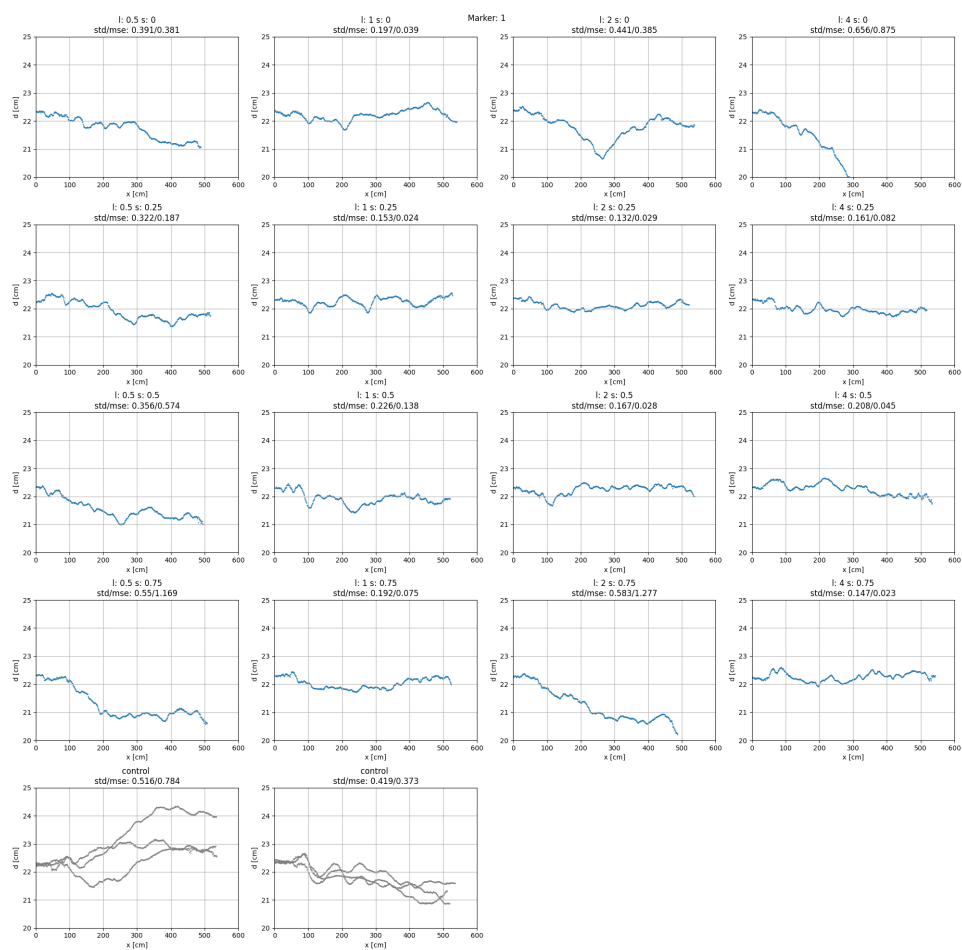


图 A.14.

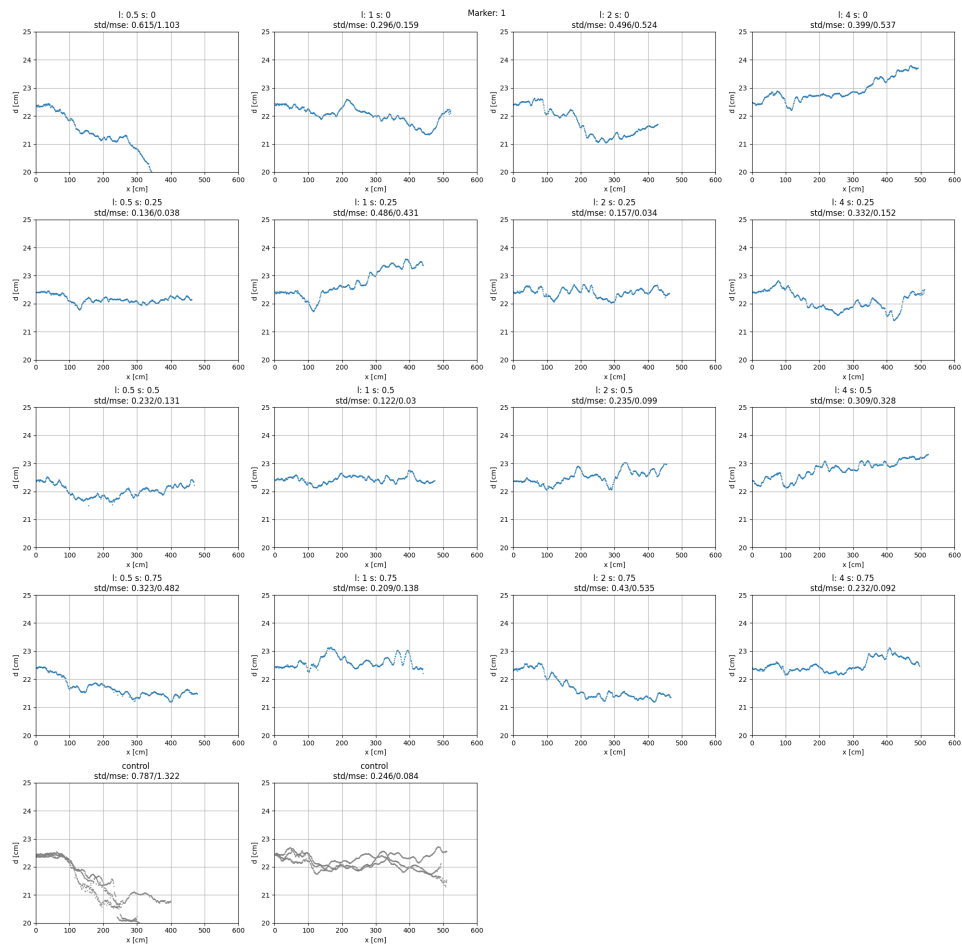


図 A.15.

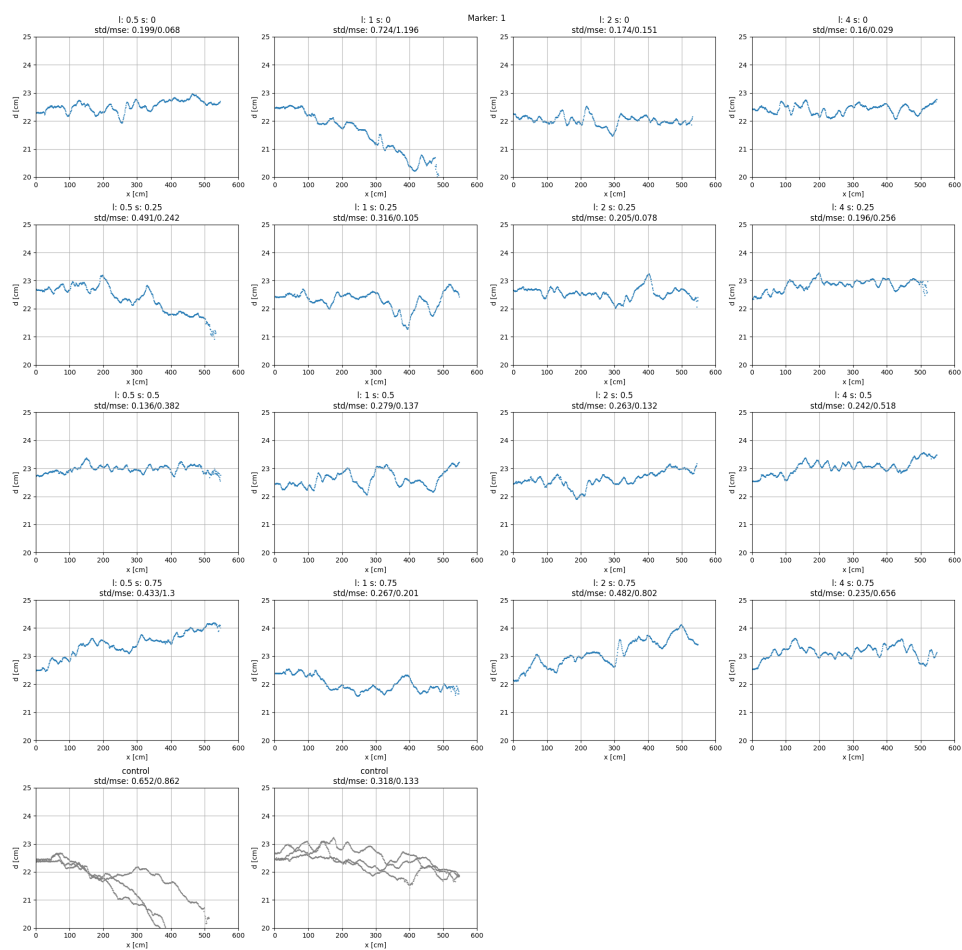


图 A.16.

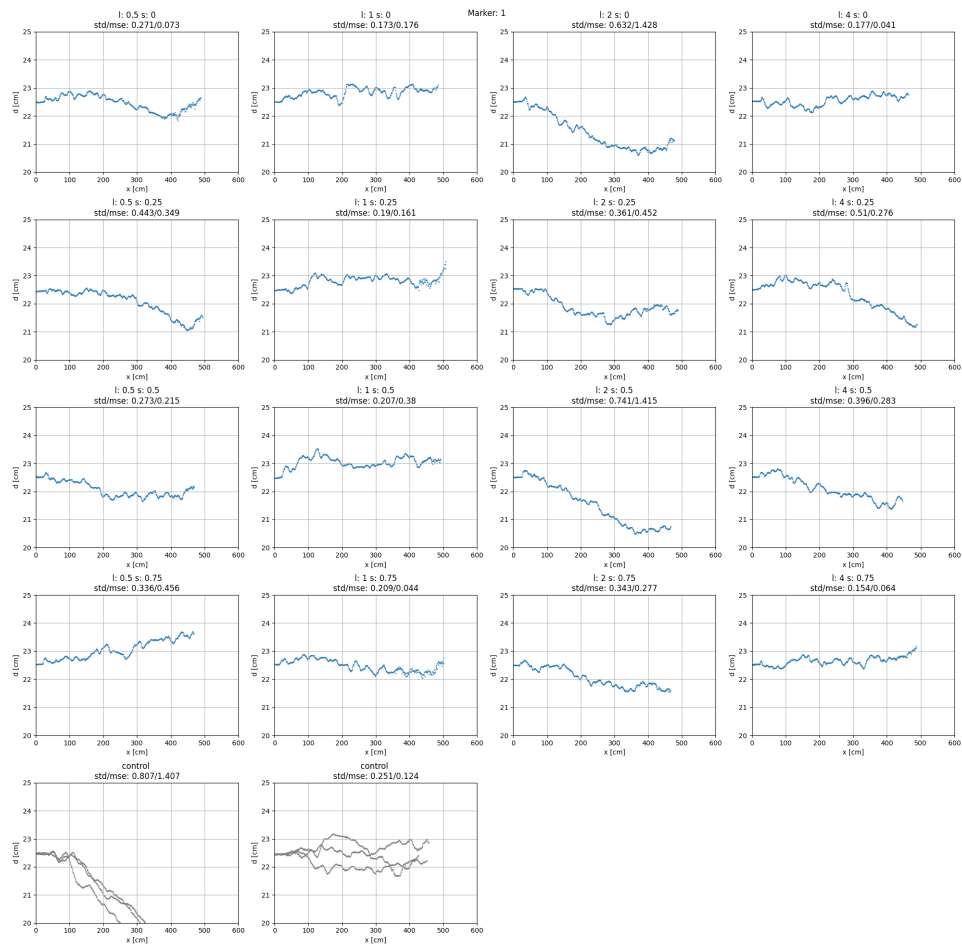


図 A.17.

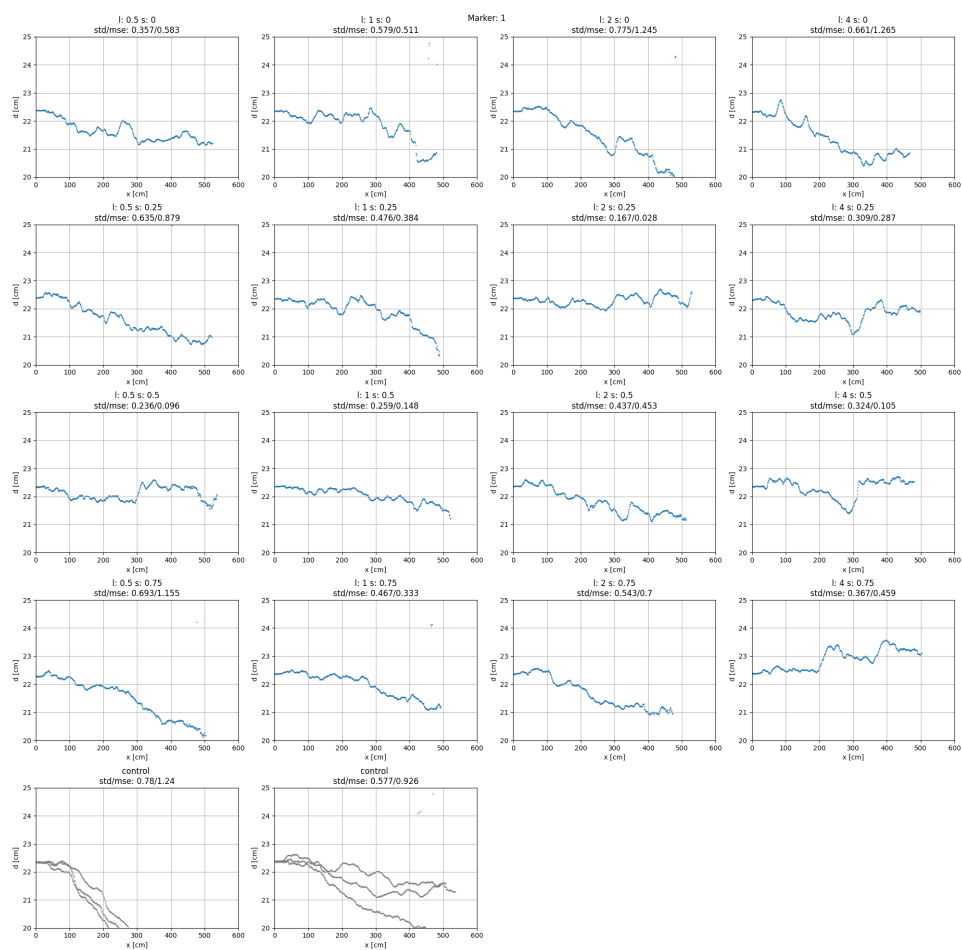


图 A.18.

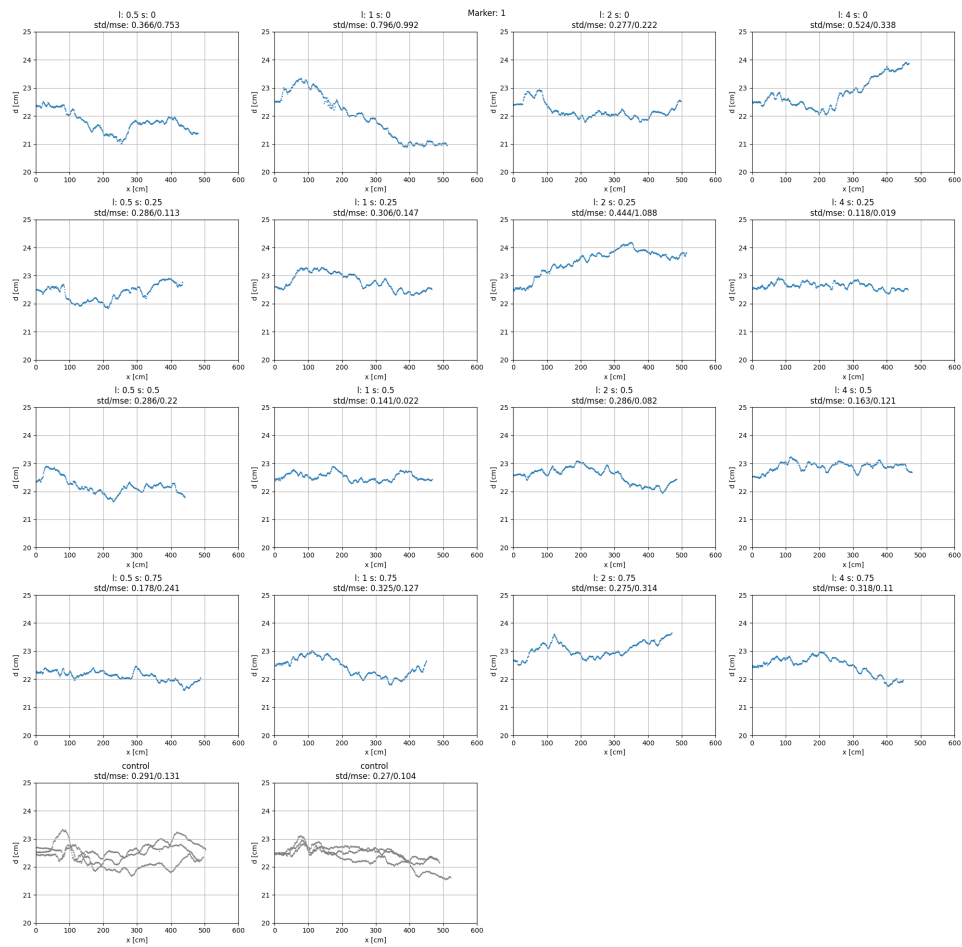


図 A.19.

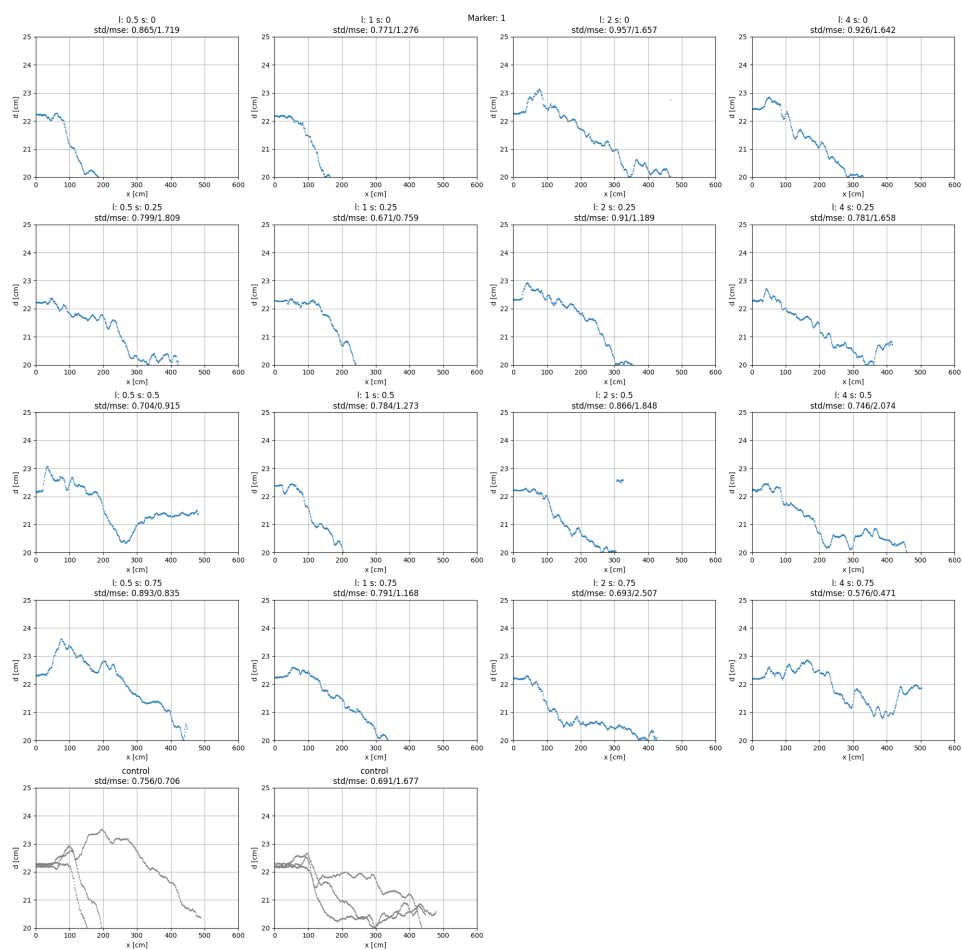


图 A.20.

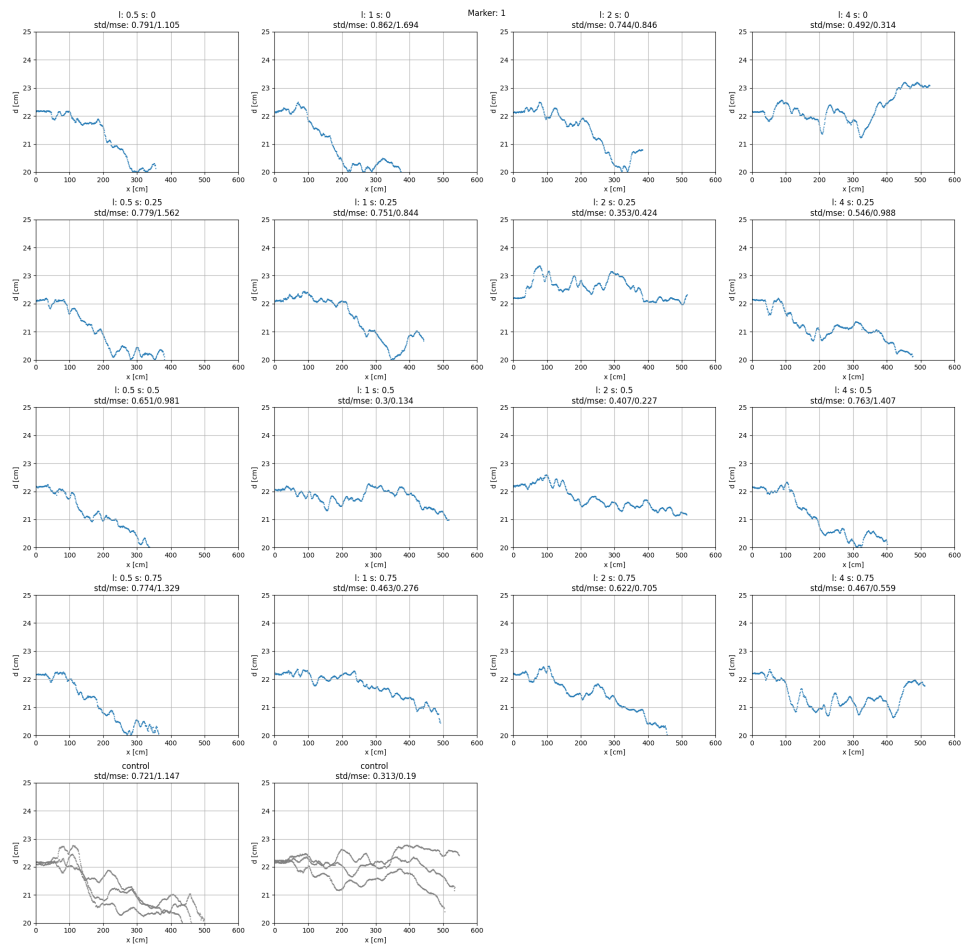


図 A.21.



图 A.22.

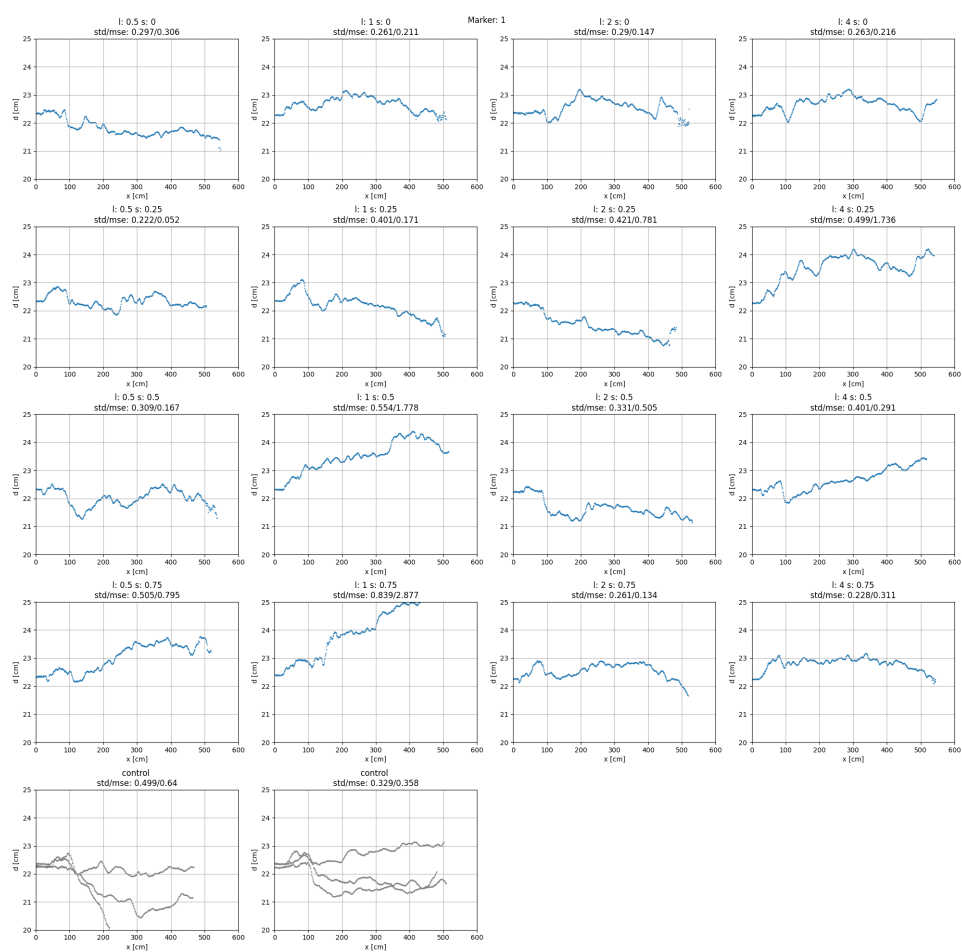


図 A.23.

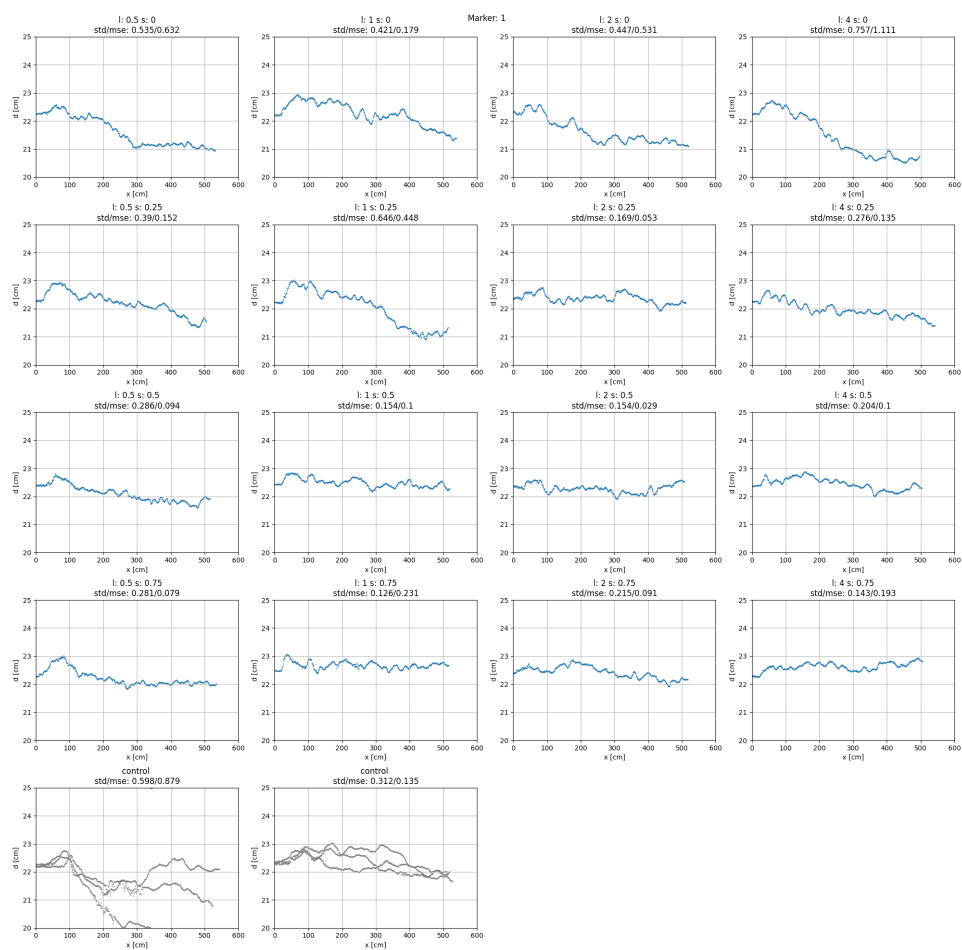


图 A.24.

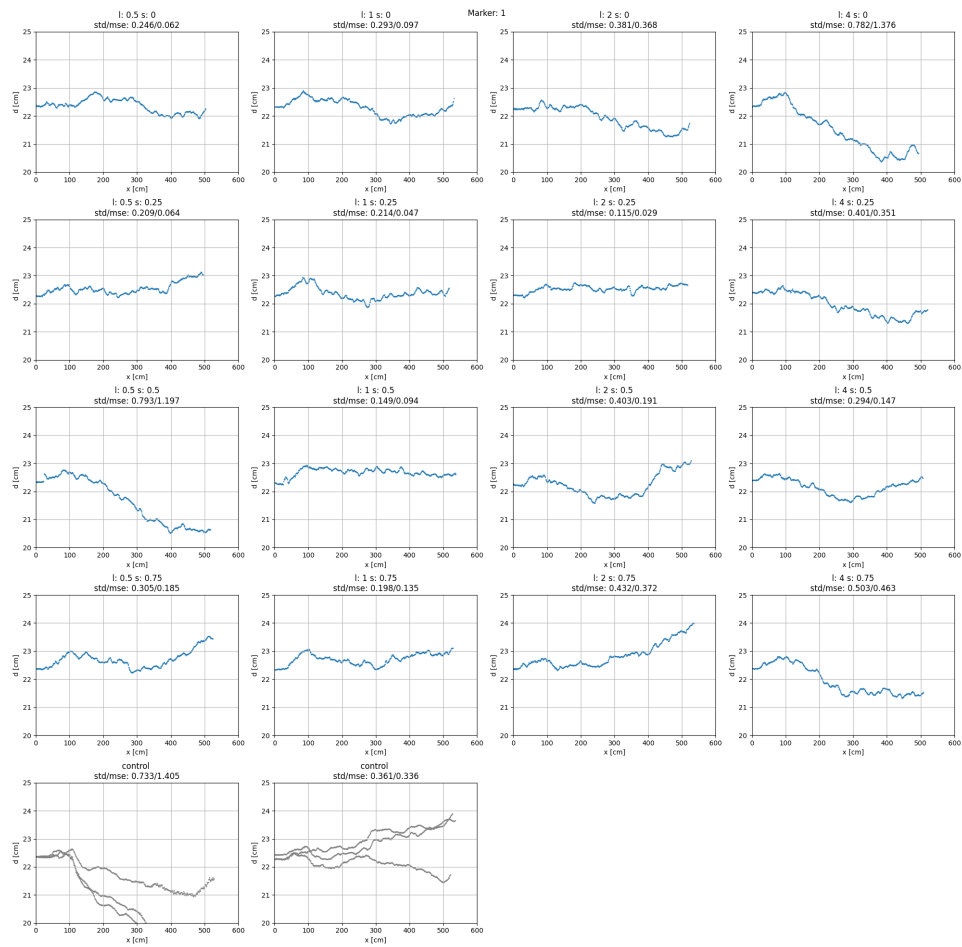


図 A.25.

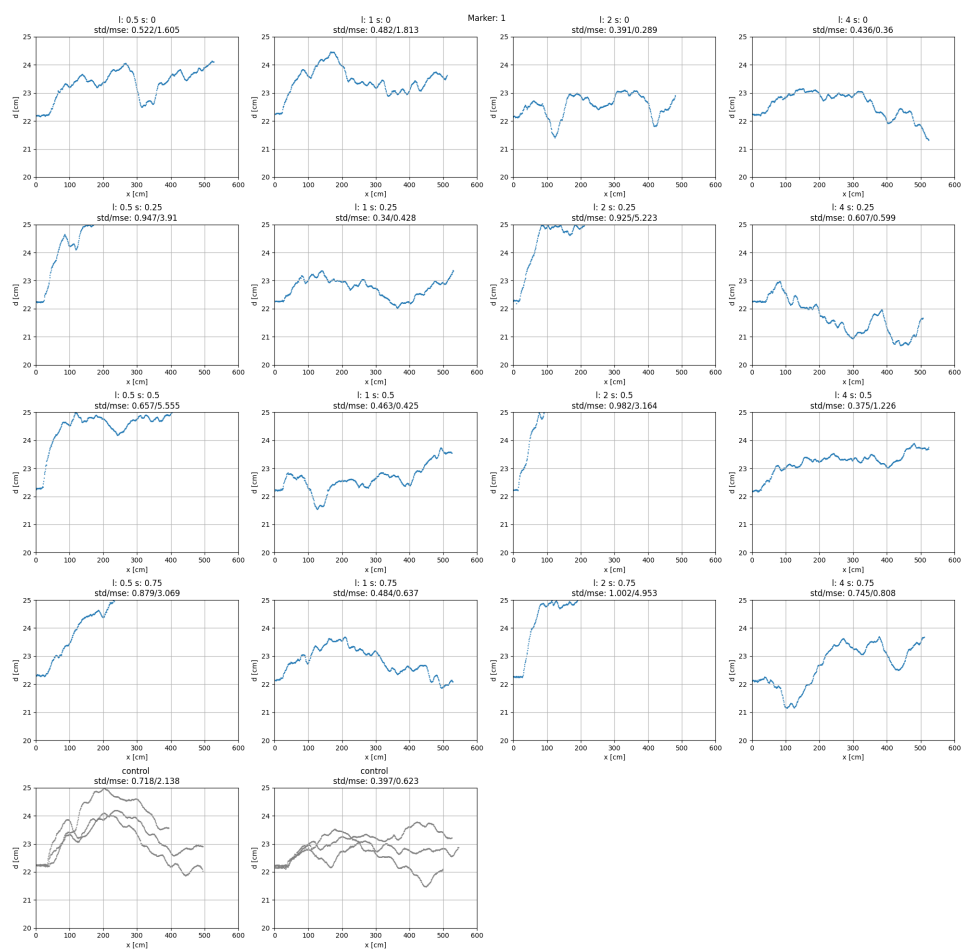


图 A.26.

参考文献

- [1] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In Manuel Ferre, editor, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp. 504–513, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [3] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. Ultrahaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, p. 505–514, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [4] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Hapto-clone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1980–1990, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [5] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptomime: Mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, p. 663–667, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [6] Atsushi Matsubayashi, Hiroki Oikawa, Saya Mizutani, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Display of haptic shape using ultrasound pressure distribution forming cross-sectional shape. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 419–424, 2019.
- [7] Atsushi Matsubayashi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Rendering ultrasound pressure distribution on hand surface in real-time. In Ilana Nisky, Jess Hartcher-O'Brien, Michaël Wiertlewski, and Jeroen Smeets, editors, *Haptics: Sci-*

- ence, *Technology, Applications*, pp. 407–415, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [8] Euan Freeman, Ross Anderson, Julie Williamson, Graham Wilson, and Stephen A. Brewster. Textured surfaces for ultrasound haptic displays. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '17*, p. 491–492, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
 - [9] David Beattie, William Frier, Orestis Georgiou, Benjamin Long, and Damien Ablart. Incorporating the perception of visual roughness into the design of mid-air haptic textures. In *ACM Symposium on Applied Perception 2020, SAP '20*, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
 - [10] Héctor Barreiro, Joan Torres, and Miguel A. Otaduy. Natural tactile interaction with virtual clay. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 403–408, 2021.
 - [11] 栗原洋輔, 國安裕生, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. 腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動感覚の拡張. エンタテインメントコンピューティング, 2011.
 - [12] 栗原洋輔, 國安裕生, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. 腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動量錯覚. 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011.
 - [13] 水野統太, 木村瑞生, 久米祐一郎. ボタンスイッチ押下時の振動刺激の有無が 指の押下軌道に及ぼす影響. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 9 2018.
 - [14] Shun Suzuki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Midair hand guidance by an ultrasound virtual handrail. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 271–276, 2019.
 - [15] 日浦宏哉. 空中超音波円錐提示による 手の非接触 3 次元誘導, 2021.
 - [16] 金一煥, 仕入英武, 猪岡光. 人間の把持力制御特性の実験的考察. 人間工学, 4 1993.
 - [17] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 740–749, 2021.
 - [18] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda. Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 11, No. 3, pp. 367–377, 2018.
 - [19] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 2, pp. 334–342, 2020.

謝辞

本論文は筆者が東京大学大学院新領域創生科学研究科複雑理工学専攻篠田・牧野研究室において、修士課程2年間に渡って行った研究をまとめたものです。本論文の執筆にあたり多くの方のご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

指導教員の篠田裕之教授には、研究テーマの相談から研究に対する姿勢など、さまざまなことを教えていただきました。特に、研究が思うように進まずテーマに悩んでいる時に、私のテーマ案に対して学術的な解釈の仕方やより良い方向性をご提案くださったことには非常に感謝しています。ありがとうございました。

牧野泰才准教授には、普段のミーティングで自分が今まで思い付かなかったような案やアドバイスをいただき、自分の研究に対して新しい見方を得ることができました。研究の面白さを追求しておられる姿勢をみて、自身も前向きに研究に取り組むことができました。心より感謝申し上げます。

研究員の松林さんには、実験システムのプログラムや研究方針に関する相談をさせていただき、この修士論文を書き上げるまで導いていただきました。

博士課程の水谷さんには、研究中に生じた小さな疑問に答えていただいたり、研究室生活全般の相談に乗っていただいたりしました。

三河さんには、修士1年の間にメンターとしてシステム開発のノウハウを丁寧に教えていただきました。

加えて、藤原正浩特任助教をはじめ、特任研究員の神垣さん、増田さん、博士課程の鈴木さん、森崎さんには、研究発表の資料をみていただいたり、小規模ミーティングで研究のつまづきにアドバイスをいただいたりと、大変お世話になりました。事務補佐員の小永井さんには、研究に必要なさまざまな手続きをしていただき、大変お世話になりました。

同期である和田さん、下村さん、佐竹さん、阿部さん、本山さん、板井さん、安藤さん、Zilli Zhu さん、Zhang Yue さんからは、一緒に研究を進める仲間として刺激をいただき、おかげで研究生活がより充実したものとなりました。大変感謝しています。

最後に、私の東京生活と大学院への進学を応援し最後まで支えていただいた家族親戚と、地元、東京の友人たちに最大の敬意と感謝を表し謝辞といたします。