

博士論文

空中超音波制御による
手指表面への触覚レンダリング

松林 篤

概要

本論では、超音波振動子アレイを用いて指先皮膚上に圧力分布を生成する手法について記述する。指先圧力分布提示を通じて仮想物体を表現する場合、その応用先に応じて提示手法に必要とされる性質が異なる。医療手術シミュレーションのような場面では、柔らかい物体の触感を忠実に再現することが求められ、また 3D インターフェースでの触覚フィードバックとして利用する場合には、接触した物体の位置及び形状を強く表現する必要があると考えられる。本論ではそれに応じて、2 種の超音波触覚提示手法を提案する。

第 1 の手法では、物理的に正確な分布再現を目指し、手表面での音場の散乱を考慮したうえで、指先に生じる音圧分布を制御する。この手法では、デプスカメラで計測された手の形状に応じてリアルタイムにポリゴンメッシュモデルを生成し、その面上の音圧振幅分布を振動子位相最適化により制御する。この手法は所望の圧力分布を皮膚表面上にリアルタイムに生成する初の試みであり、その有効性は数値シミュレーション及び被験者実験により示された。

第 2 の手法では、指が物体に触れた際にその交差領域の形状を周回するように焦点を高速で動かすことで、その物体の局所的な形状及び面の相対位置を表現する。更にこの手法を用いて、仮想物体の直接操作が可能なシステムを構成する。このシステムは、指の接触時に触覚フィードバックを提示すると同時に、物体の物理的応答をシミュレートすることで、ユーザーが実際の物体に触れるかのように 3D 映像を操作することを可能にする。このシステムにおける触覚フィードバックの有効性を数値シミュレーション及び被験者実験により評価した。提案する触覚フィードバック手法により、接触した物体の形状、面の角度、及び相対位置の認識精度が高まり、更に物体を目視せずとも触覚情報のみでその操作が可能となることが示された。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	超音波の散乱を考慮したリアルタイム触覚レンダリング	4
2.1	背景	4
2.2	音響放射圧	5
2.3	手法	7
2.4	数値評価	13
2.5	被験者実験	22
2.6	指先以外の位置への圧力分布生成	25
2.7	今後の課題	28
2.8	本章のまとめ	30
第 3 章	超音波触覚フィードバックを伴う 3D 仮想物体の操作	32
3.1	背景	32
3.2	関連研究	34
3.3	システム	35
3.4	数値シミュレーション	43
3.5	被験者実験	44
3.6	課題	57
3.7	本章のまとめ	57
第 4 章	実験設定と実装	59
4.1	手形状の取得	59
4.2	動的メッシュモデル生成	61
4.3	面要素上の数値積分	69
4.4	メッシュモデルに対する内部判定と最短距離算出	71
4.5	超音波振動子アレイ	73
第 5 章	結論	76
第 6 章	参考文献	79

第 1 章

序論

昨今の視覚及び聴覚ディスプレイの発展と共に、現実世界を拡張または再構築する技術が一般的なものとなってきている。しかし、触覚もまた人間の知覚を構成する重要な要素であり、その再現技術は視聴覚と比べると未だ発展途上ではあるものの、現実感に寄与することは明らかである [45]。触覚ディスプレイとしては、設置型 [7]、グローブ型 [6]、指装着型 [38] 等多様なデバイスが提案、開発されているが、このような装着型のデバイスは、常に接触感やデバイスの重量感をユーザーに与えてしまい、現実感が損なわれるという課題を抱えている。何もない空中に触覚を提示する技術は、このような問題の解決策として近年注目を集め、これまでに様々な提示手法が提案されてきた。ヴォルテックスリングと呼ばれるリング状の空気流を用いた手法 [51] は単純な機構で安価に設置可能ではあるものの空間的にも時間的にも解像度は低く提示可能な触覚の範囲は狭い。レーザー [29][42] を使用した手法は、短波長光を使用するためその分解能は非常に高いと考えられるが、提示可能な圧力が非常に小さい。超音波による手法 [27] はその中間にあり、現状では最も実用に適した技術であるといえるだろう。

超音波フェーズドアレイを使用した触覚提示は、水中では Gavrilov ら [18]、空中では岩本ら [27] らによって提案され、ある点で超音波の位相を揃えることで超音波焦点を生成し、それに触れた皮膚の変形により触覚を生起させる。

知覚される触覚に多様性を持たせるために、多くの研究では焦点を生成する超音波に振幅変調を行い、刺激の強度を時間的に変化させている [39]。特に、実物体に触れた感覚の再現という観点では、接触位置に応じた強度の変化で物体の凹凸を表現する手法 [16] や、画像からテクスチャ情報を抽出しそれを変調周波数へと変換する手法 [5] が提案されている。しかし、これらの手法は触れた部分に生じる圧力パターンの大きさに変化はなく超音波焦点径で一定である。

一方で、物体形状を空中音場で再現することも試みられている。超音波焦点を高速に形状に沿って動かすことで、空間中に時分割的に触覚像を生成する手法 [31] や、空間中に設定した制御点上の音圧振幅分布を制御することで任意の形状の音場を生成する手法 [24][21][25] が提案されている。これらの手法では触れた部分の音圧強度分布に沿った形状の圧力パターンが指先に生じるが、音場は空中に広く分布するため提示される圧力はその分小さくなる。振動子数を増やすことで提示可能な圧力は増えるが、それでも振動子の指向性に由来する上限が存在す

2 第1章 序論

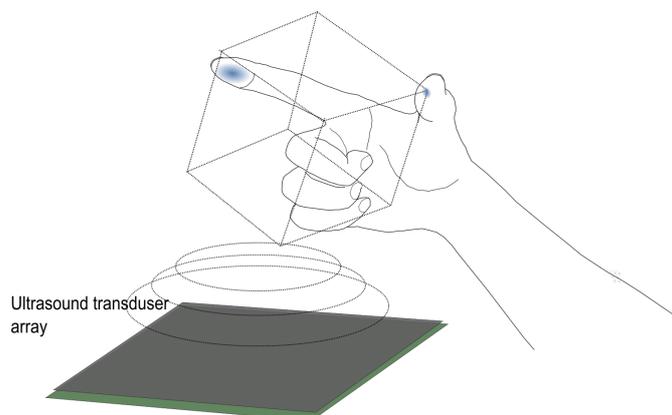


図 1.1. 指先表面に物体への接触面の大きさに応じた圧力分布を生成する。

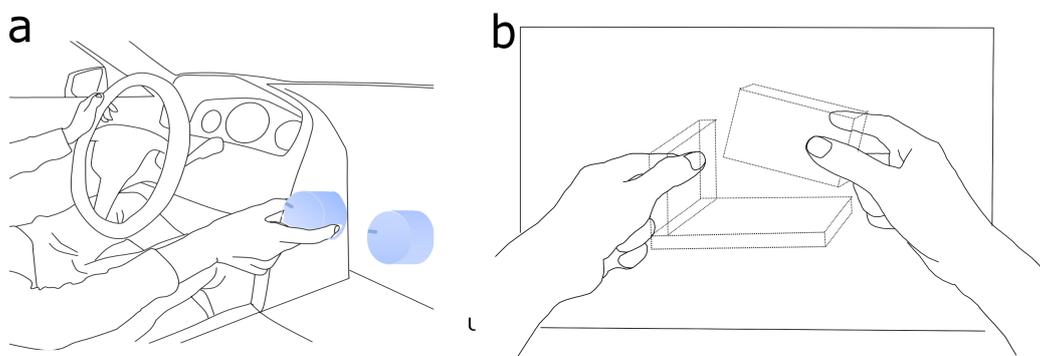


図 1.2. 超音波触覚を伴う空中インターフェース。(a) 車載タッチレスインターフェース。(b) 3Dモデリング

る。また、触覚像の空間分解能の低さから物体に触れているときの急激な圧力変化を表現することは困難である。

以上の問題を解決するために、図 1.1 のように、手の動きをトラッキングし、物体に触れている部分にその接触領域の大きさに応じた圧力分布を生成することを考える。人間が物体を操作する、あるいは触感を確認する際には指先を使用するのが一般的であるため、本論では特に指先への触覚提示を扱う。指先の物体への接触を検知し、その接触状況に応じた触覚情報を提示することで、物体の位置や形状、柔らかさ等の特性を伝達することを目的とする。

そのような手法の応用先としては、ゲーム、シミュレーション、テレイグジステンス等の VR システムがまず浮かぶが、インターフェースとしての利用もまた重要であるだろう。例えば、自動車の運転時等の、インターフェースを注視することのできない場面で有用な、触覚のみで操作可能なシステムが実現され得る (図 1.2(a))。また、2D ポインティングデバイスでは直感的な操作が難しい、3D モデリング等の奥行方向に意味を持つタスクに対し、実際の物体に触れているかのような操作を可能にするインターフェースを構築できる (図 1.2(b))。

それぞれの応用先に応じて触覚提示に求められる要件は異なる。VR としての利用を考えた場合には、可能な限り実物体に触れた触感に近い刺激が提示されることが求められる。特に、

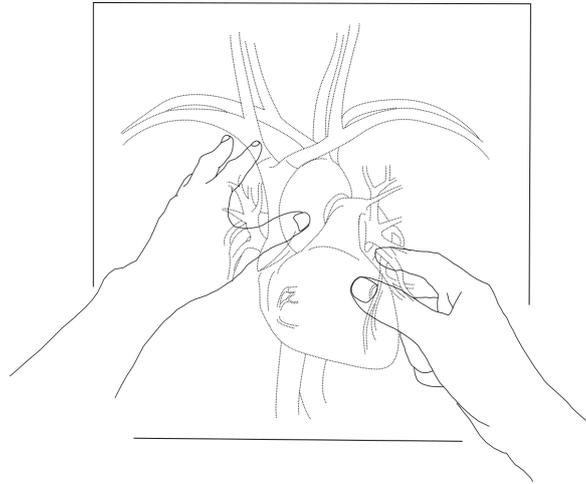


図 1.3. 手術シミュレーションへの超音波触覚技術の応用.

図 1.3 のような，手術シミュレーション等の柔らかい繊細な物体に触れる場面は，超音波による触覚再現に適した領域であるといえる。

一方で，インターフェースとしての利用を考えた場合にはその操作性を高めることが最も重要な目的となる．このような場合にも，実際のボタンや 3D モデルに触れた感覚を再現することが望ましいが，与えられる力に上限のある超音波触覚を使用して硬い物体の触感を再現することは難しい。

本論では，それらの応用先に応じた指先への圧力分布レンダリング手法を提案する．第 3 章では，VR での応用を考慮し，指先に所望の圧力分布を生成する手法について述べる．この手法は手表面での音場の散乱を考慮することで，正確な分布を指先に再現する初の試みであり，かつそのリアルタイム制御を可能としている．続く第 3 章で 3D インターフェースでの触覚フィードバック手法として，物体と指の交差領域を周回する焦点を生成することで物体の輪郭形状を強調する手法について述べる．更にこの手法を 3D ディスプレイと組み合わせることで，空中映像を直接指で操作できるシステムを構築し，それにおける触覚提示の有効性を検証する．第 4 章では，それまでに述べた実験における環境及び実装について詳述する．最後に第 5 章で結論を述べる。

第 2 章

超音波の散乱を考慮した リアルタイム触覚レンダリング

本章では、物理的に正確な触覚の再現を目的とした新たな超音波触覚提示手法を提案する。この手法では、超音波振動子アレイを制御することで所望の圧力分布を指先に再現する.. 本手法は手表面上の散乱音場のリアルタイム制御を試みた初の手法である。

2.1 背景

超音波振動子アレイを用いた空中触覚提示が実証されて以来 [27], 空中に特定の形状をもつ触覚像を生成する多くの試みが為されてきた。人体表面で知覚される触覚は、音響放射圧と呼ばれる、高圧音場で生じる非線形現象に由来する。皮膚表面での粒子速度が無視できる仮定の下では、音響放射圧は音圧の 2 乗に比例する。よって、空間中に特定の形状に沿った音圧分布を生成することで、その形状を持つ触覚像を提示することができる。一般に、空間中に配置された制御点上の音圧 p は、振動子アレイの複素振幅^{*1} q と伝達関数行列 G を用いて、

$$p = Gq$$

のように定式化される。触覚像を生成する試みの多くは、様々な制約の下でこの式に関する逆問題を解くことで、所望の音圧分布 p を生成する振動子の複素振幅 q を決定する。

複数制御点上の超音波音圧制御は古くは温熱療法の文脈で研究され、Ebini らは複数の点に同時に温熱作用を加えるために、上記の問題の重み付き最小ノルム解により振動子の複素振幅を求めている [13]。重み行列 W を適切に選ぶことで振動子ごとの振幅が均等になり、高いエネルギー効率を持つ解が得られる。Carter らはこのような手法を空中触覚提示に応用し、さらに、音圧が 0 となる点を制御点に加えることで余分な圧力の生成を防ぐよう手法を改良した [9]。また、星らは遠方での 2 次元平面上での音圧分布を振動子振幅のフーリエ変換で近似し、その逆変換により振動子複素振幅を決定する手法を提案した [24]。これらの手法では制御点状に所望の音圧複素振幅を生成することを目的としているが、触覚提示が目的の場合には音圧の

^{*1} 本論では、振動子駆動の振幅を $a \in \mathbb{R}$, 位相を $\theta \in \mathbb{R}$ としたとき, $ae^{j\theta}$ を複素振幅と呼ぶ。

振幅分布のみに関心があり、音圧位相は自由に設定してよい。より高いエネルギー効率で振動子を駆動するためには、制御点での音圧位相も同時に最適化する必要がある。そのような手法もいくつか提案されている。

Hertzberg らはホログラム生成技術において位相回復に使用される Gerchberg-Saxton アルゴリズムを応用することで、音圧位相を変更しながらエネルギー効率の高い解を求める手法を提案した。この手法は振動子振幅一定の制約のもとで、振動子の複素振幅 bmq と音圧分布 p の反復計算を行い、収束後の複素振幅を採用する。Long らの手法 [33] では、制御点の一つに焦点を生成した場合に他の制御点にできる音圧を並べた行列の最大固有値に対応する固有ベクトルを求め、その位相を制御点音圧の位相として採用する。これはお互いの制御点上の焦点が強めあうような位相であり、それを決定した後に最小ノルム解を求め振動子の複素振幅を決定する [33]。井上らは、制御点上の音圧位相に関する最小二乗問題の制約を緩和することで、半正定値計画問題に落とし込み音圧位相に関する近似解を求める手法を提案している [25]。

これらの手法は空間中の自由音場を制御するものであるが、それに手で触れる際の手表面での音場の散乱は考慮されていない。そのため、指先に生じる音圧分布が提示したい触覚像に沿って形成されるとは限らないという問題を抱えている。井上らは予め用意した指のポリゴンメッシュモデルを使用し、その表面での散乱を考慮することでより強い超音波焦点を生成する手法を提案している。しかし、指表面での分布の制御には至っておらず、リアルタイム制御も行われてはいない。

本章では、手表面上での音場の散乱を考慮した上で、指先に生じる音圧振幅分布をリアルタイムに制御する手法を提案する。この手法では、まず、手の形状をデプスカメラで取得しそれに応じてポリゴンメッシュモデルを動的に生成する。メッシュモデルの各面上の音圧分布と振動子の複素振幅の関係を音場の境界積分表現に基づき定式化し、それをもとに振動子の位相を決定する。上記の関連研究の場合と比較すると制御点の数が大幅に多く、そのまま上記の最適化手法を適用することはできない。本手法では、音圧振幅に関する最小二乗問題に帰着させることでリアルタイムに音圧分布及び振動子の位相を同時に最適化する。本章では、まず、次節で超音波触覚提示の基礎となる音響放射圧理論について概略を述べた後に、3節で手法の詳細を説明し、4節及び5節では本手法の有効性を検証する数値シミュレーション及び被験者実験について詳述する。

2.2 音響放射圧

通常の音響解析の範囲では空中の音圧は大気圧周りの微小交流成分であるとみなされ、ある点での音圧の時間平均は 0 となる。しかし音圧振幅が大きくなり、音場の満たす微分方程式の線型近似範囲を超えると、音圧が直流成分を持つようになる。人体表面に超音波を収束させるとこの作用により触覚が生起される。音響放射圧については、様々な理論が展開されている [60] が、ここでは吉岡らの理論 [56] に沿って放射圧導出の概略を述べる。

音波を伝える媒質は粘性や熱伝導性がないものと仮定し、その密度を ρ 、圧力を P 、粒子速

度を \mathbf{u} とすると、それらは以下の3つの支配方程式に従う。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} = -\nabla P, \quad (2.2)$$

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (2.3)$$

ただし、比熱比を γ 、音波が存在しない平衡状態での媒質の密度を ρ_0 としている。同様に、平衡状態での圧力を P_0 とすると、音波による密度変化量 ρ' 、圧力変動（音圧） p は、 $p = P - P_0$ 、 $\rho' = \rho - \rho_0$ のように表される。ここで、

$$\frac{|p|}{P_0} \approx \frac{|\rho'|}{\rho_0} \approx \frac{|\mathbf{u}|}{c_0} = \epsilon \ll 1 \quad (2.4)$$

と仮定する（[60] 参照）。ただし、 c_0 は媒質中の音速であり、 $\epsilon = |\mathbf{u}|/c_0$ を音響マッハ数と呼ぶ。この仮定の下で、音響マッハ数 ϵ について ρ 、 P 、 \mathbf{u} を冪級数展開すると、

$$\rho = \rho_0 + \rho'_1 \epsilon + \rho'_2 \epsilon^2 + \dots, \quad (2.5)$$

$$P = P_0 + p'_1 \epsilon + p'_2 \epsilon^2 + \dots, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}'_1 \epsilon + \mathbf{u}'_2 \epsilon^2 + \dots \quad (2.7)$$

とおく。ただし、平衡状態では粒子の運動はないものとして $\mathbf{u}_0 = 0$ としている。これらの式を流体の支配方程式 (2.1), (2.2) に代入し、 ϵ について1次のオーダーの項のみを集めると、

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p_1}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla p_1 + \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

となる。ただし、 $\epsilon p'_1 = p_1$, $\epsilon \mathbf{u}'_1 = \mathbf{u}_1$ と置きなおし、また、式 (2.8) の導出には式 (2.3) から導かれる $p_1 = c_0^2 \rho'_1$ という関係を利用した。式 (2.8), (2.9) は線型音響の範囲で近似した流体の支配方程式である。速度ポテンシャル ϕ_1 を導入して

$$\mathbf{u}_1 = -\nabla \phi_1 \quad (2.10)$$

と表し、2式をまとめると、

$$\nabla^2 \phi_1 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

となるが、これは波の伝搬を記述する代表的な波動方程式である。

同様にして ϵ について2次のオーダーの項のみを集めると、

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p_2}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}_2 = \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} (\gamma U + K) \quad (2.12)$$

$$\nabla p_2 + \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} = \nabla (U - K) \quad (2.13)$$

となる。ただし、一次の場合と同様に $\epsilon p'_2 = p_2$, $\epsilon \mathbf{u}'_2 = \mathbf{u}_2$ と置きなおし、また式 (2.3) から導かれる関係式

$$p_2 = c_0^2 \rho'_2 + \frac{c_0^2 (\gamma - 1)}{2\rho_0} \rho_1'^2 = c_0^2 \rho'_2 + \frac{\gamma - 1}{2\rho_0 c_0^2} p_1^2$$

を利用した。式 (2.12), (2.13) 中の U, K はそれぞれ音波の位置エネルギー密度、運動エネルギー密度を表し、

$$U = \frac{p_1^2}{2\rho_0 c_0^2}, \quad (2.14)$$

$$K = \frac{\rho_0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1}{2} \quad (2.15)$$

である。1 次の場合と同様に速度ポテンシャル ϕ_2 を導入して

$$\mathbf{u}_2 = -\nabla \phi_2 \quad (2.16)$$

と表すと、式 (2.12) より

$$p_2 = \rho_0 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} - K + U \quad (2.17)$$

となる。ここで、定常場について p_1, p_2 の時間平均 $\langle \cdot \rangle$ をとると、 $\langle \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \rangle = \langle \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \rangle = 0$ であるので、

$$\langle p_1 \rangle = 0 \quad (2.18)$$

$$\langle p_2 \rangle = \langle U - K \rangle = \left\langle \frac{p_1^2}{2\rho_0 c_0^2} - \frac{\rho_0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1}{2} \right\rangle \quad (2.19)$$

となる。よって、2 次の微小量まで考慮した場合には音圧が直流成分を持つ。

2.3 手法

手の皮膚表面上の線型音圧 p_1 及び粒子速度 \mathbf{u}_1 が与えられれば、皮膚にかかる音響放射圧 (圧力の直流成分) p_{arp} は

$$p_{arp} = \left\langle \frac{p_1^2}{2\rho_0 c_0^2} - \frac{\rho_0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1}{2} \right\rangle \quad (2.20)$$

で与えられる。皮膚を剛壁とみなし音波がそこに垂直に入射すると仮定すると、 $\mathbf{u}_1 = \mathbf{0}$ となるので、放射圧は p_1 にのみ依存する (仮定の影響については 2.4 節で検討する)。特に角周波数 ω で駆動する振動子がつくる音場を考え $p_1 = p_{amp} e^{j\omega t}$ と表すと、皮膚表面に生じる放射圧は音圧振幅 p_{amp} にのみに依存する。すなわち、皮膚表面上の音圧振幅を制御することで、所望の音響放射圧分布を再現することが可能である。本手法では、図 2.1 に示すように、次の手順で皮膚上の音圧振幅分布を制御する。

1. 超音波振動子アレイ上方に翳した手の形状を複数のデプスカメラで取得し、この形状に沿うようなポリゴンメッシュモデルを生成する。

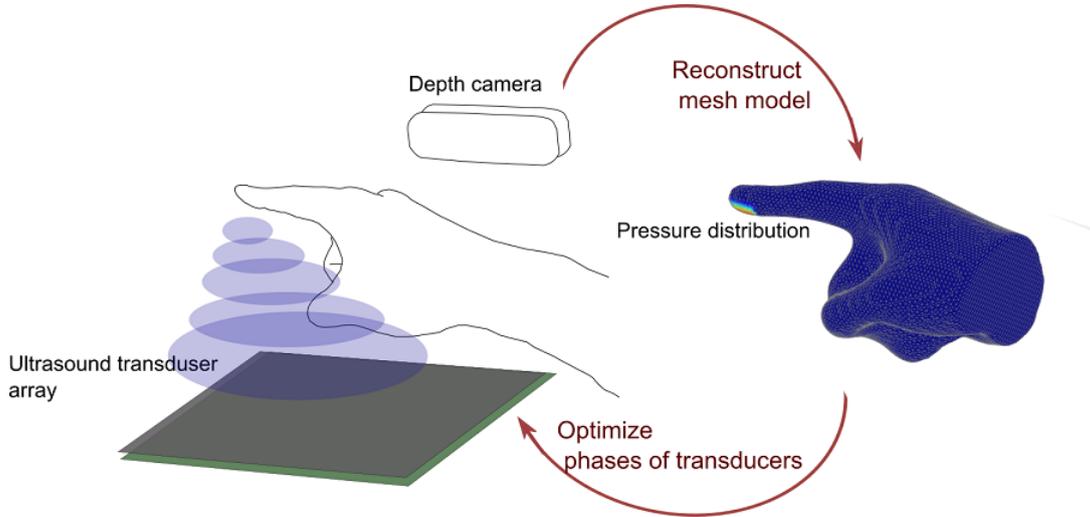


図 2.1. 手法の全体像. 手の形状を表すメッシュモデルを生成し, その上での音圧振幅分布を超音波振動子アレイを用いて制御する.

2. 得られたメッシュモデル表面での回折音場が満たす境界積分方程式に基づき, メッシュモデル上の音圧分布と各超音波振動子の位相の関係を定式化する.
3. この関係に基づいて, 超音波振動子位相と音圧分布位相の最適化を行う.

以下で各手順について詳述する.

2.3.1 動的メッシュモデル生成

手のポリゴンメッシュモデルを動的に生成するために, Zollhöfer ら [59] によって提案されたものと同様の動的メッシュモデル生成手法を用いる. メッシュ生成は 2 段階のプロセスで行われる. はじめに, 複数のデプスカメラを使用して形状を固定した手をスキャンすることでリジッドテンプレートを作成する. このテンプレートをリアルタイムにデプスカメラで計測される点群にフィッティングすることで, 手の変形に応じたメッシュモデルが得られる (図 2.2 参照). このようなフィッティングによる手法は, 例えば Leap Motion[2] のような骨格ベースでのハンドトラッキング技術を使用する場合と比較して, 実際の手の詳細な表面に近い形状が得られるという利点を持つ. これは, 手表面の圧力分布を正確に制御するために重要な特性である. アルゴリズムの詳細については 4 章を参照のこと.

2.3.2 境界要素による離散化

得られたメッシュモデル上の音圧と, 超音波振動子の振幅の関係を境界要素法の様式に従って求める. 入射波 p_{inc} が十分滑らかな境界表面 Ω で散乱するとき, 境界上の音圧 p_r は以下の Helmholtz-Huygens の積分方程式に従う [10]:

$$\frac{1}{2}p(\mathbf{r}) = p_{inc}(\mathbf{r}) - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} - jkz_0 \beta g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right) p(\mathbf{r}') dS. \quad (2.21)$$

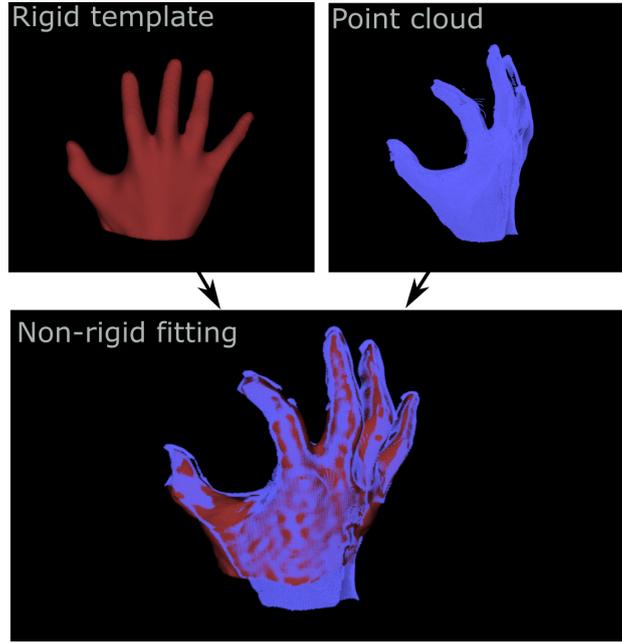


図 2.2. あらかじめ取得したリジッドテンプレートと点群にフィッティングすることで、リアルタイムに手の形状を表すメッシュモデルを生成する。

ただし、 z_0 は媒質の固有インピーダンスであり、 β は境界におけるノーマルアドミッタンスである。皮膚の音響インピーダンスが空気よりも十分大きいと仮定する ($\beta \simeq 0$) と、式 2.21 は以下のように単純化される。

$$\frac{1}{2}p(\mathbf{r}) = p_{inc}(\mathbf{r}) - \int_{\Omega} p(\mathbf{r}') \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS. \quad (2.22)$$

この積分方程式を解くために、メッシュモデルの各面要素ごとに積分値を近似する。これは境界要素法で一般的に用いられる手法であり様々な分割要素が提案されている [4] が、本手法では計算コストを考慮し線型要素による近似を行う。ポリゴンメッシュモデルの頂点を $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^3$, $i \in \{1, \dots, N\}$ とし、特に 3 角形 $S_k \in \{1, \dots, K\}$ を構成する頂点のインデックスを $\{k_l\}_{l=1}^3 \in \{1, \dots, N\}$ で表し、それぞれの頂点座標を \mathbf{v}_{k_1} , \mathbf{v}_{k_2} , \mathbf{v}_{k_3} とする。 $\mathbf{r}' \in \mathbb{R}^3$ がこの三角形上にあるとき、 \mathbf{r}' はパラメータ $(s, t) \in \mathbb{R}^2$, $s \geq 0$, $t \geq 0$, $(1 - s - t) \geq 0$ を用いて、

$$\mathbf{r}' = s\mathbf{v}_{k_1} + t\mathbf{v}_{k_2} + (1 - s - t)\mathbf{v}_{k_3}, \quad (2.23)$$

$$(2.24)$$

と表される。このとき、線型要素では三角形 S_k 上の音圧 $p(\mathbf{r}')$ を頂点音圧の線形結合で近似する：

$$p(\mathbf{r}') = sp(\mathbf{v}_{k_1}) + tp(\mathbf{v}_{k_2}) + (1 - s - t)p(\mathbf{v}_{k_3}). \quad (2.25)$$

また、入射波 p_{inc} は各振動子 $j \in \{1, \dots, M\}$ の生成する音場の重ね合わせとして、

$$p(\mathbf{r}) = \alpha \sum_{j=1}^M D(\theta_j(\mathbf{r})) \frac{e^{-jk\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_j\|}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_j\|} q_j \quad (2.26)$$

で近似する (4.4 節参照). ただし, $\mathbf{r}_j \in \mathbb{R}^3$ 及び $q_j \in \mathbb{C}$ は, それぞれ振動子 j の中心位置及び複素振幅である. また, α は $|q_j| \leq 1$ となるように規格化する係数であり, $D_j(\theta)$ は指向性関数を表す. 以上の近似を行うと, 境界積分方程式 2.22 は以下のように $q_j, p(\mathbf{v}_i)$ の線型和で表される:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2}p(\mathbf{r}) &= p_{inc}(\mathbf{r}) - \sum_{k=1}^K \int_{S_k} p(\mathbf{r}') \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS \\
&= p_{inc}(\mathbf{r}) - \sum_{k=1}^K \int_{S_k} \{sp(\mathbf{v}_{k_1}) + tp(\mathbf{v}_{k_2}) + (1-s-t)p(\mathbf{v}_{k_3})\} \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS \\
&= \alpha \sum_{j=1}^M q_j D(\theta_j(\mathbf{r})) \frac{e^{-jk\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_j\|}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_j\|} \\
&\quad - \sum_{k=1}^K p(\mathbf{v}_{k_1}) \int_{S_k} s \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS \\
&\quad - \sum_{k=1}^K p(\mathbf{v}_{k_2}) \int_{S_k} t \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS \\
&\quad - \sum_{k=1}^K p(\mathbf{v}_{k_3}) \int_{S_k} (1-s-t) \frac{\partial g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}} dS
\end{aligned} \tag{2.27}$$

この式の \mathbf{r} に $\{\mathbf{v}_i\}_{i=1}^N$ を代入すると, 以下の連立線形方程式の形になる:

$$\frac{1}{2}\mathbf{p} = G\mathbf{q} - V\mathbf{p}. \tag{2.28}$$

ただし,

$$\mathbf{p} = [p(\mathbf{v}_1), \dots, p(\mathbf{v}_N)]^T, \tag{2.29}$$

$$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_M]^T \tag{2.30}$$

とおいた. $B = \frac{1}{2}I - V$ とすることで,

$$\mathbf{p} = B^{-1}G\mathbf{q} \tag{2.31}$$

であるので, 振動子の複素振幅 \mathbf{q} が与えられたときの, メッシュモデル頂点上の音圧 \mathbf{p} が求められる. 本手法の目的は, メッシュモデルの頂点上の音圧振幅 $\mathbf{p}_{amp} \in \mathbb{R}^N$ が与えられたときに振動子の複素振幅 \mathbf{q} を求めることである. これは, $\mathbf{t} \in \mathbb{C}^N, |t_i| \leq 1$ が存在して,

$$\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} = B^{-1}G\mathbf{q}. \tag{2.32}$$

を満たす \mathbf{q} を求める問題に相当する. ただし, $\text{diag}(\mathbf{p}_{amp}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は \mathbf{p}_{amp} を対角要素を持つ対角行列である.

2.3.3 超音波振動子位相の最適化

上記の問題を、頂点音圧に関する最小二乗問題として記述すると

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \|\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - B^{-1}G\mathbf{q}\|_2^2 \\ & \text{subject to} \quad |t_i| = 1, |q_i| \leq 1 \end{aligned} \quad (2.33)$$

となる。ここで計算コストの高い B^{-1} を求める ($B\mathbf{a} = \mathbf{b}$ となる \mathbf{a} を求める) 処理を避け、また、問題を単純化するために振動子の振幅は一定とする。このとき最小化問題は以下のように記述される：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \|B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - G\mathbf{q}\|_2^2 \\ & \text{subject to} \quad |t_i| = |q_i| = 1. \end{aligned} \quad (2.34)$$

この問題は制約付き非線形最小化問題であり大域解を求めることはできない。以下では、この問題の近似解（局所解）を十分高速に求められる 2 種の手法について述べる。

半正定値緩和法

半正定値緩和により凸最適化問題へと落とし込み近似解を求める。この手法は MAX-CUT 問題に対する解法として知られる [47] が、音圧振幅分布の再現にも応用されている [25]。変数をまとめて $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T, \mathbf{t}^T]^T$ とおき、最小化問題の目的関数を変形すると、

$$\|B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - G\mathbf{q}\|_2^2 \quad (2.35)$$

$$= \|[-G, B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})] \mathbf{x}\|_2^2 \quad (2.36)$$

$$= \mathbf{x}^* M \mathbf{x} \quad (2.37)$$

となる。ただし、 $M = [-G, B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})]^* [-G, B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})]$ である。

更に $X = \mathbf{x}\mathbf{x}^*$ とおくと、 $\mathbf{x}^* M \mathbf{x} = \text{Tr}(XM)$ と表せるので、最終的に最小化問題 2.34 は次の問題と等価となる：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \text{Tr}(XM) \\ & \text{subject to} \quad \text{diag}(X) = \mathbf{1}, \\ & \quad \quad \quad X \succeq 0, \text{Rank}(X) = 1. \end{aligned} \quad (2.38)$$

ここで、Rank 制約を取り除き問題を緩和することで以下の半正定値計画問題となる：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \text{Tr}(XM) \\ & \text{subject to} \quad \text{diag}(X) = \mathbf{1}, \\ & \quad \quad \quad X \succeq 0. \end{aligned} \quad (2.39)$$

これは凸問題であり容易に最適解が求められる。最適解 X の階数に制約はないが、 \mathbf{x} は X の最大固有値に対応する固有ベクトルを正規化することで推定できる。最大固有値は適当なベクトルに対し X を繰り返しかけることで高速に求められる。半正定値計画問題の解法とし

Algorithm 1 半正定値緩和法による位相最適化**Input:** \mathbf{x}_0 **Output:** \mathbf{x}

```

 $X \leftarrow \mathbf{x}_0 \mathbf{x}_0^*$ 
for  $k = 1$  to  $K$  do
  for  $i = 1$  to  $M + N$  do
     $\mathbf{h} \leftarrow X_{i^c, i^c} M_{i^c, i}$ 
     $\gamma \leftarrow \mathbf{h}^* M_{i^c, i}$ 
    if  $\gamma > 0$  then
       $X_{i^c, i} \leftarrow -\sqrt{\frac{1-\mu}{\gamma}} \mathbf{h}$ 
       $X_{i, i^c} \leftarrow -\sqrt{\frac{1-\mu}{\gamma}} \mathbf{h}^*$ 
    else
       $X_{i^c, i} \leftarrow \mathbf{0}$ 
       $X_{i, i^c} \leftarrow \mathbf{0}$ 
    end if
  end for
end for
 $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}_0$ 
for  $l = 1$  to  $L$  do
   $\mathbf{x} \leftarrow X \mathbf{x}$ 
end for
for  $i = 1$  to  $M + N$  do
   $x_i \leftarrow x_i / |x_i|$ 
end for

```

てブロック座標降下法を使用する場合の求解アルゴリズムを Algorithm1 に記述する。ただし、 i^c は添字集合 $\{1, \dots, n\}$ から i を除いたものであり、 X_{i^c, i^c} は X から i 行 i 列を除いた $(n-1) \times (n-1)$ 行列を示す。

Levenberg-Marquardt 法

Levenberg-Marquardt 法は、Gauss-Newton 法と比較して収束は遅いが初期値に依らず安定した解を与えるため、最小二乗問題に対し広く使用されている [35]。

まず、 $\mathbf{q} = [e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_M}]^T$, $\mathbf{t} = [e^{j\theta_{M+1}}, \dots, e^{j\theta_{M+N}}]^T$ とおくことで、問題 2.34 を

$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_{M+N}]^T$ に関する制約なし最小二乗問題へと単純化する:

$$\begin{aligned} & \min_{\boldsymbol{\theta}} F(\boldsymbol{\theta}) \\ & = \min_{\boldsymbol{\theta}} \|\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})\|_2^2 \\ & = \min_{\boldsymbol{\theta}} \|[-G, B\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})] \mathbf{x}\|_2^2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

ただし, $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T, \mathbf{t}^T]^T = [e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{M+N}}]^T$ である. Levenberg-Marquardt 法は, ダンピングファクター付きの Newton 法においてヘッセ行列をヤコビ行列の二乗で近似したものであり, $\boldsymbol{\theta}$ 周りでの目的関数 F を以下のように近似する:

$$\begin{aligned} F(\boldsymbol{\theta} + \mathbf{h}) & \simeq L(\mathbf{h}) \\ & = F(\boldsymbol{\theta}) + 2\mathbf{h}^T J(\boldsymbol{\theta})^T \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{h}^T J(\boldsymbol{\theta})^T J(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{h} \end{aligned} \quad (2.41)$$

ただし, J は \mathbf{f} のヤコビ行列である. ステップ \mathbf{h} は式 2.41 の最小化により求められ,

$$\mathbf{h} = -(J^T J + \lambda I)^{-1} J^T \mathbf{f}, \quad (2.42)$$

λ は収束の安定性に寄与するダンピングファクターである. Levenberg-Marquardt 法は, λ が大きいときは再急降下法に近い挙動を示し, λ が小さいときには Gauss-Newton 法に近い収束をみせる. λ の更新方法はいくつか提案されているが, ここでは [35] に従い, 近似式 L の当てはまりの良さ

$$\sigma = \frac{F(\boldsymbol{\theta} + \mathbf{h}) - F(\boldsymbol{\theta})}{L(\mathbf{h}) - L(\mathbf{0})} \quad (2.43)$$

に応じて,

$$\begin{aligned} & \text{if } \sigma > 0 \\ & \quad \lambda \leftarrow \lambda * \max\left(\frac{1}{2}, 1 - (2\sigma - 1)^3\right), \quad \nu \leftarrow 2 \\ & \text{else} \\ & \quad \lambda \leftarrow \lambda * \nu, \quad \nu \leftarrow 2 * \nu \end{aligned} \quad (2.44)$$

のように更新する. ν の初期値は 2 とする. 詳細を Algorithm2 に示す.

2.4 数値評価

振動子位相最適化により, どの程度目標に近い音圧振幅分布を再現できるのかを検証するために様々な数値シミュレーションを行った. 使用する手のメッシュモデルは, 2.3 節で述べた手法により実際に生成されたものであり, 8400 頂点及び 16796 面で構成される. また, 1494 個の超音波振動子をメッシュモデル下部に配置する. 振動子数及びその配置は, 使用するアレイユニットの形状と振動子の指向性 (4.4 節参照), 及びアルゴリズムの計算時間 (2.4.6 節参照) を考慮して決定した. メッシュモデルの形状と超音波振動子の配置を図 2.3 に示す.

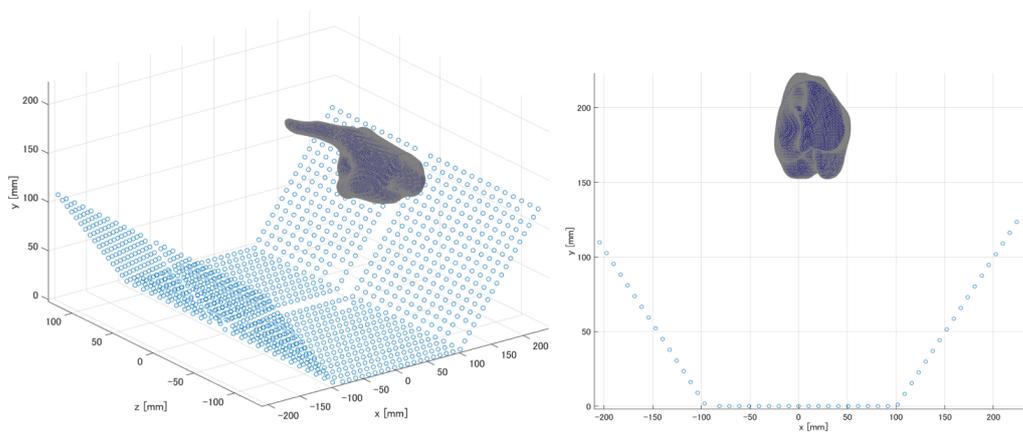
Algorithm 2 Levenberg-Marquardt 法による位相最適化**Input:** θ_0 **Output:** θ $\theta \leftarrow \theta_0$ $\nu \leftarrow 2$ $A \leftarrow J(\theta)^T J(\theta)$ $g \leftarrow J(\theta)^T f(\theta)$ $\lambda \leftarrow \gamma * \max A_{ii}$ **for** $k = 1$ to K **do** solve $((A + \lambda I)\mathbf{h} = -g)$ $\sigma \leftarrow (F(\theta + \mathbf{h}) - F(\theta)) / (L(\mathbf{h}) - L(\mathbf{0}))$ **if** $\sigma > 0$ **then** $\theta \leftarrow \theta + \mathbf{h}$ $\lambda \leftarrow \lambda * \max(\frac{1}{2}, 1 - (2\sigma - 1)^3)$ $A \leftarrow J(\theta)^T J(\theta)$ $g \leftarrow J(\theta)^T f(\theta)$ $\nu \leftarrow 2$ **else** $\lambda \leftarrow \lambda * \nu$ $\nu \leftarrow 2 * \nu$ **end if****end for**

図 2.3. 使用するメッシュモデルの形状と、超音波振動子アレイの配置.

2.4.1 最適化手法の比較

半正定値緩和法と Levenberg-Marquardt 法での最適化結果を比較する．同一の目標分布を設定しそれぞれの手法により振動子位相を決定する．一例として、目標分布は図 2.4(a) のよう

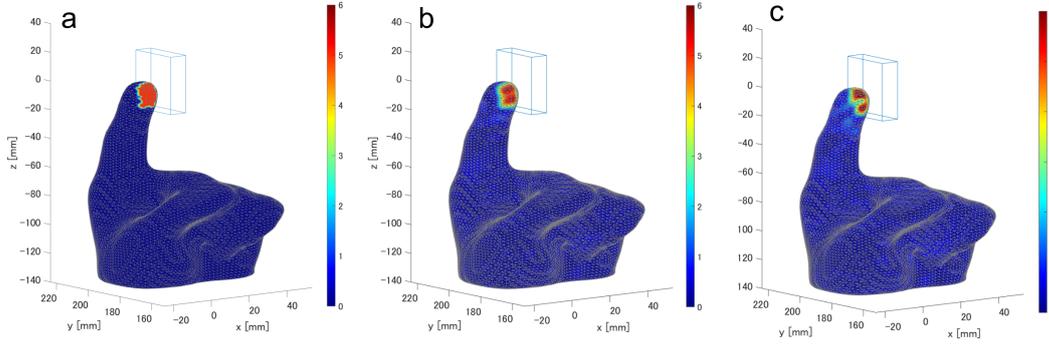


図 2.4. 手法間での音圧分布再現の比較（単位は kPa）. (a) 目標分布. (b) Levenberg-Marquardt 法での再現分布. (c) 半正定値緩和法での再現分布.

な，ある領域内に存在する頂点で一定の圧力（5 kPa）を持つ分布とする．それぞれの手法で初期値は $\mathbf{q} = \mathbf{t} = \mathbf{1}$ と設定し，反復は 30 回行った（各手法での反復回数とは，Algorithm1, 2 における K を指す）．両手法で 1 反復にかかる時間は同程度である．Levenberg-Marquardt 法の計算時間については 2.4.6 節で詳述する．以降に行う数値シミュレーションに関しても上記の条件で行う．このように決定された位相で駆動する振動子が作る音圧振幅分布を境界要素法により求めた結果を，図 2.4(b), (c) に結果を示す．境界要素法は本手法と同様，線形要素を使用した選点法による．Levenberg-Marquardt 法ではある程度目標に沿った分布が形成されているのに対し，半正定値緩和法では，形状が崩れている．

それぞれの手法での誤差関数の収束の様子を図 2.5 に示す．ここでの，誤差関数 $\text{error}(\mathbf{t}, \mathbf{q})$ とは

$$\text{error}(\mathbf{t}, \mathbf{q}) = \|\mathbf{B} \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - \mathbf{G}\mathbf{q}\|_2^2 \quad (2.45)$$

を指す．Levenberg-Marquardt 法と比べ，半正定値緩和法の収束は遅くかつ収束後の誤差が大きいことがこのグラフからも見て取れる．この結果を受け，以降では Levenberg-Marquardt 法を用いて振動子位相を決定するものとして，数値シミュレーション及び被験者実験を行う．

2.4.2 散乱モデルの影響

本手法では手の皮膚表面での音場の散乱を考慮して表面音圧を制御する．散乱を考慮する場合としない場合での分布再現精度を比較する．散乱を考慮しない場合には，式 2.28 において表面での反射を表す行列 $\mathbf{V} = 0$ とする．このとき，振動子位相は以下の最小二乗問題を解くことで求められる：

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \left\| \frac{1}{2} \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - \mathbf{G}\mathbf{q} \right\|_2^2 \\ & \text{subject to} \quad |t_i| = |q_i| = 1. \end{aligned} \quad (2.46)$$

散乱を考慮する場合と同様に，Levenberg-Marquardt 法を用いて振動子位相を決定する．

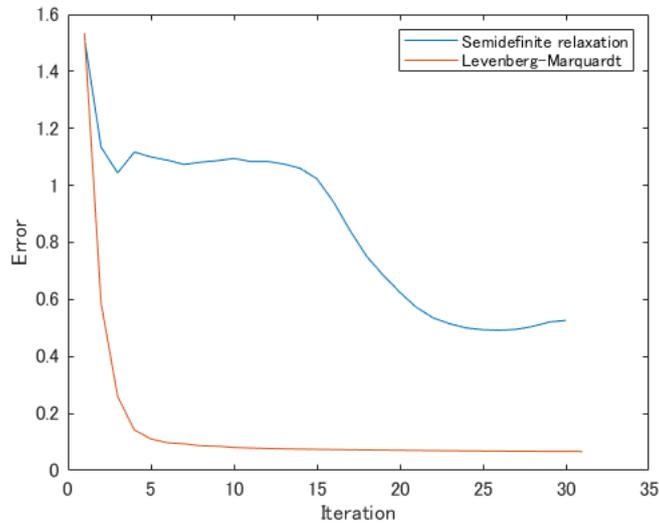


図 2.5. 2 手法での反復回数に対する誤差関数の収束.

図 2.6 に再現された音圧振幅分布を示す．目標分布 (1a-3a) はある領域内に存在する頂点で一定の圧力を持つ分布とし，各領域の幅は (5 mm, 8 mm, 11mm) であり，指は y 軸方向に 4mm 程領域に侵入している．散乱を考慮している場合 (1b-3b) では目標分布に近い形状の分布が生成されているのに対し，考慮しない場合では圧力の小さく分布の形状は崩れている．散乱を考慮したモデルを使用することで，より正確に目標圧力分布を生成可能であることが示されている．

2.4.3 メッシュモデルサイズの影響

指先に所望の分布を生成したい場合に，手の形状をどこまで取得すれば正確な再現が可能となるかを検証する．使用するメッシュモデルから指先 1 mm を切り出し，その部分のみを使用して振動子位相の最適化を行う．目標分布はこれまでと同様一様分布とする．x 軸方向の幅は 8mm で固定するが，音圧振幅は 3 kPa, 5 kPa の両方でシミュレーションを行う．結果を図 2.7 に示す．目標音圧振幅が 3 kPa である場合 (1a-4a) では，メッシュモデルの使用していない部分に不必要な圧力分布が生成されていることが観察される．一方で目標音圧振幅が 5 kPa である場合には，多少の意図しない分布が見られるものの，特に指先 60 mm 以上を使用した場合には結果に変化がないように思われる．各条件での使用するメッシュモデルのサイズと，収束後の誤差関数の関係を図 2.8 に示す．3 kPa の場合には，モデルサイズの増大にともなって誤差が小さくなるが，5 kPa の場合にはそのような傾向は見られない．振幅一定の振動子アレイの生成可能な音場の強度には制限があるが，その制限付近の分布を生成する場合には指先だけのモデルを使用してもある程度の再現が可能であることが示唆される．

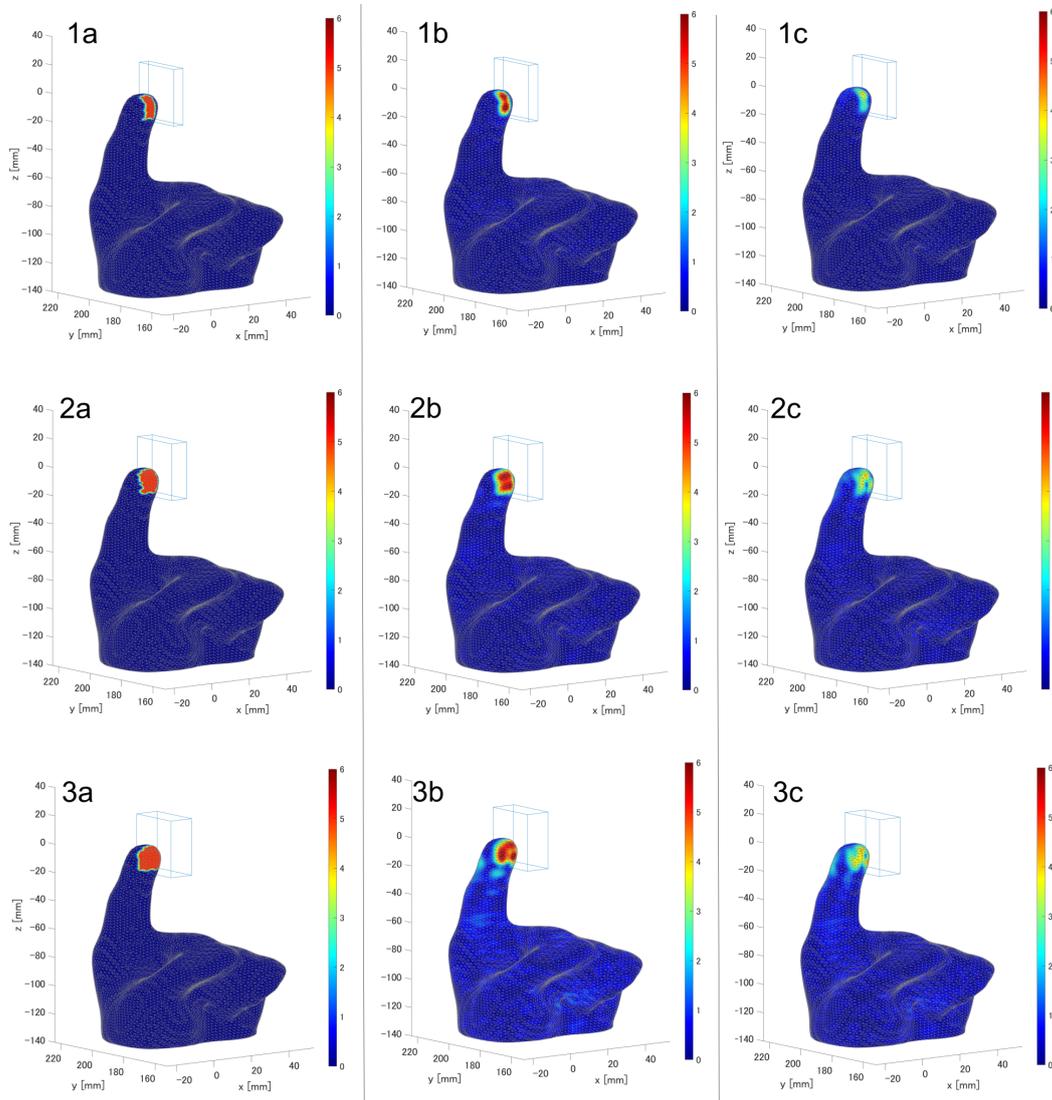


図 2.6. 幅の異なる一定振幅音圧の再現. (1a-3a) 目標分布. (1b-3b) 散乱を考慮した場合. (1c-3c) 散乱を考慮しない場合

2.4.4 侵入距離に応じた分布の生成

これまで、特定の領域に触れている部分に対して一定の音圧分布を生成することを考えてきた。しかし、実際の物体に触れている場合は触れている部分の外側から中心に向けて圧力が增大するような分布が指先に生じる。このような分布に対してのシミュレーション結果を図 2.9 に示す。領域内部に存在するメッシュモデルの各頂点に対し領域表面との距離に比例するような圧力となるように目標分布を設定する。(1a-5a)。生成された分布(1b-5b)は、指を領域内部に押し込む際の圧力の変化を再現していることが見て取れる。この結果は柔らかい物体に触れた際の指先圧力変化を忠実に再現できる可能性を示唆している。ただし、分布によっては

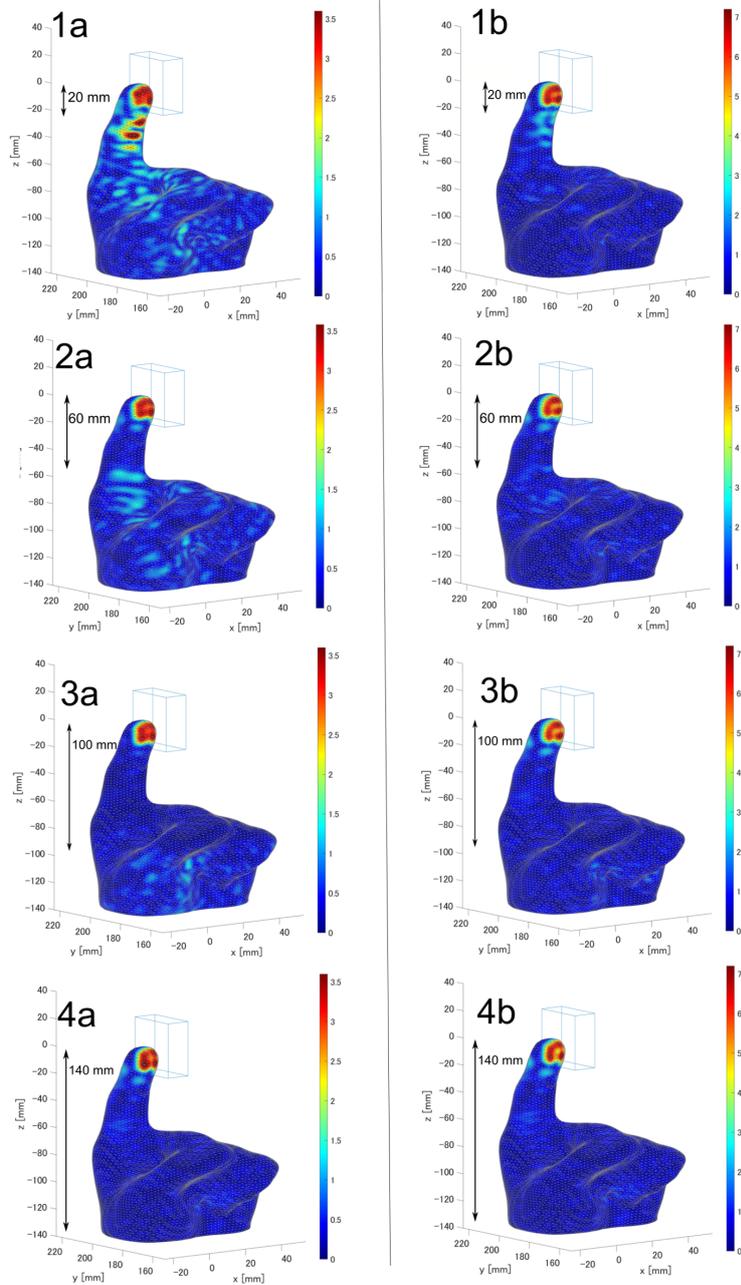


図 2.7. 位相最適化に用いるメッシュモデルのサイズと再現分布の関係. 図中の矢印はメッシュモデルの使用した部分を表す. (1a-4a) 目標音圧振幅を 3 kPa としたときのメッシュサイズに応じた再現分布の変化. (1b-4b) 目標振幅を 5 kPa とした場合の再現分布の変化.

(5b) のように形状に崩れが生じる. 目標分布の再現可能性については検討が必要である.

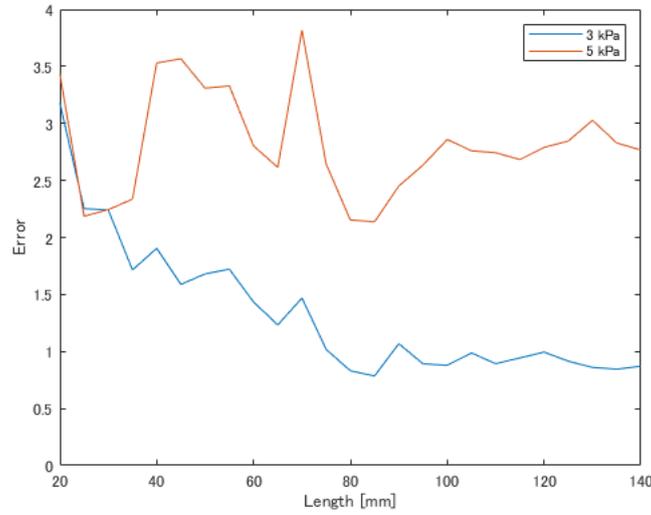


図 2.8. 位相最適化に用いるメッシュモデルのサイズと誤差の関係.

2.4.5 音響放射圧の粒子速度項の影響

前章で述べたように、指先に生じる音響放射圧 p_{arp} は

$$p_{arp} = \left\langle \frac{p_1^2}{2\rho_0 c_0^2} - \frac{\rho_0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1}{2} \right\rangle \quad (2.47)$$

であるが、本手法では、粒子速度に関する項を無視できると仮定することで音圧振幅のみに関する問題へと単純化している。この影響を検証するために、粒子速度項を含めた場合との音響放射圧分布の比較を行う。図 2.10 に、5 kPa の一様分布を目標としたときの、粒子速度項を除いた音響放射圧分布 (1b-3b)、及び正確な音響放射圧分布 (1c-3c) を示す。音圧振幅に関する最小二乗問題を解いている関係で放射圧分布は目標分布よりも広がり小さくなっているが、粒子速度項の影響は小さく無視した場合にも大きく分布は変わらないことが見て取れる。

2.4.6 計算時間

Levenberg-Marquardt 法での振動子位相最適化の計算時間について考察する。アルゴリズムの主要な処理は、

1. 行列 G , B の生成.
2. 誤差 $\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) = [-G, B\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})]\mathbf{x}$, ヤコビ行列 $J(\boldsymbol{\theta})$ の計算.
3. $A = J^T J + \lambda I$, $\mathbf{g} = J^T \mathbf{f}$ の計算.
4. $A\mathbf{h} = -\mathbf{g}$ の求解.
5. σ の計算, λ の更新

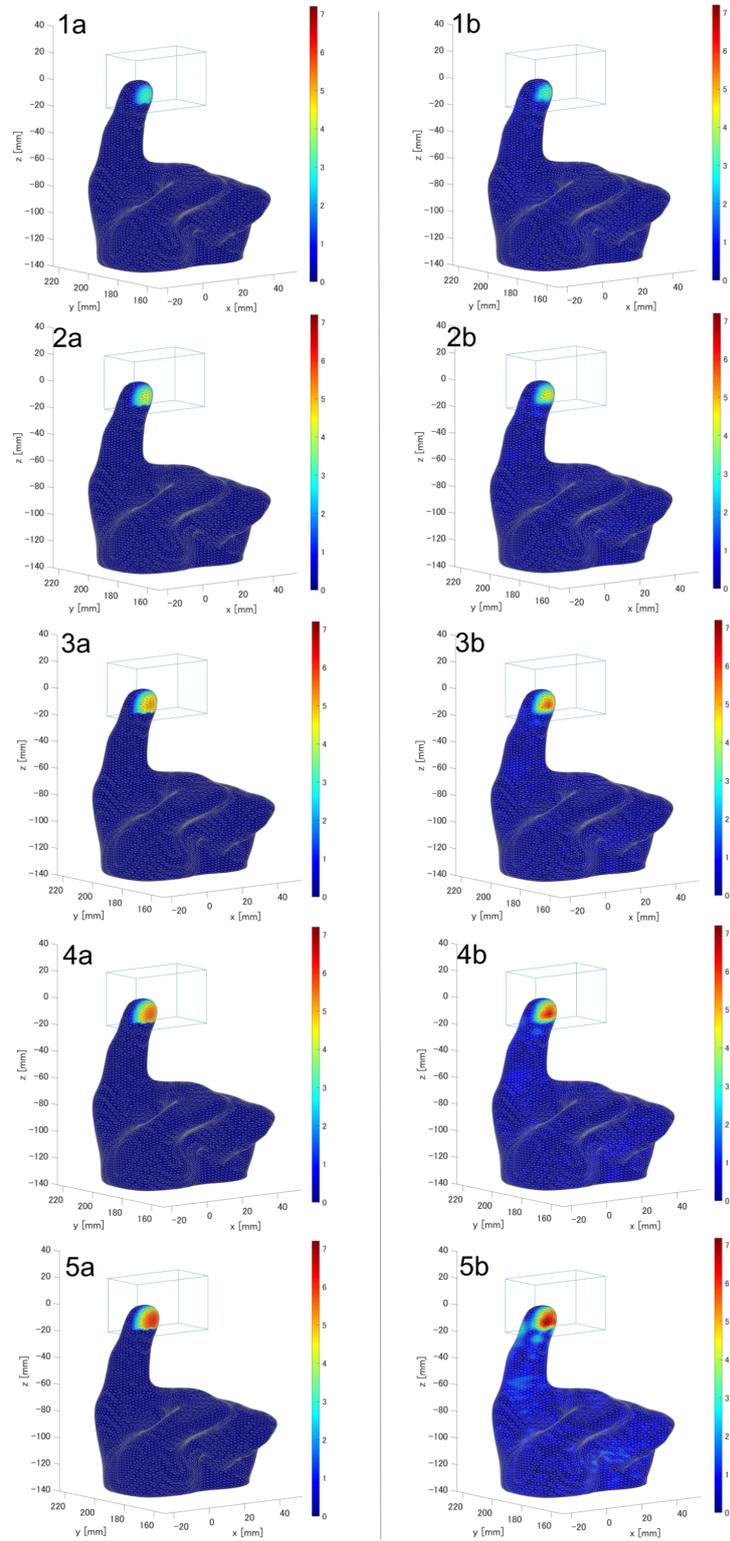


図 2.9. 指の侵入距離に応じた再現分布の変化. (a) 目標分布 (領域への侵入距離に比例する圧力分布). (b) 再現分布

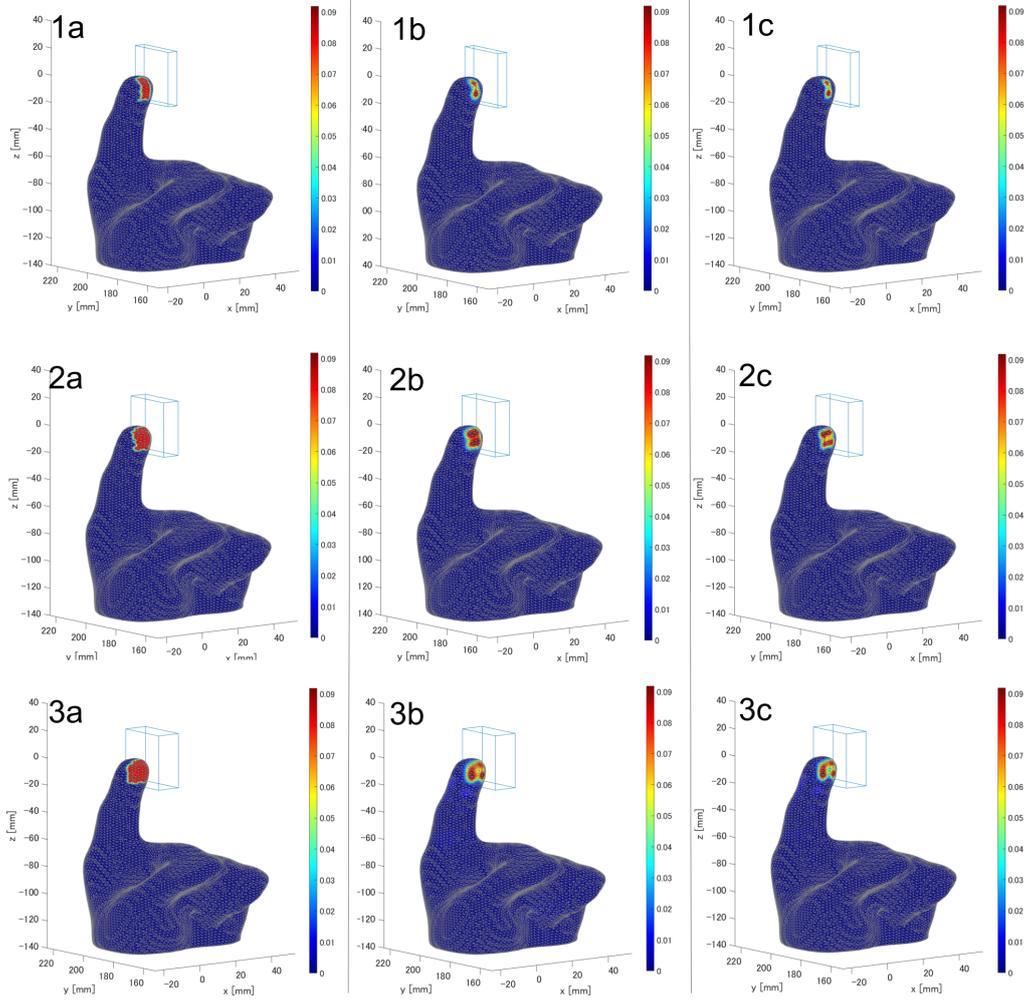


図 2.10. 再現分布における音響放射圧の粒子速度項の影響. (a) 目標分布. (b) 粒子速度項を除いた音響放射圧分布. (c) 正確な音響放射圧分布.

であり、2-5 が反復処理となる. メッシュモデルの頂点数 N は振動子数 M と比べて大きいので反復処理で行う $A = J^T J$ の計算がボトルネックとなる. ここで $M = [-G, B\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})]$ として, 具体的に $J(\theta)$ を求めると,

$$J_{mn} = \frac{\partial f_m}{\partial \theta_n} = jM_{mn}e^{j\theta_n} \quad (2.48)$$

となるので, $A = J^T J$ は,

$$A_{mn} = \sum_k (jM_{km}e^{j\theta_m})^* (jM_{kn}e^{j\theta_n}) \quad (2.49)$$

$$= -(M^* M)_{mn}e^{j(\theta_n - \theta_m)} \quad (2.50)$$

となる. よって, 反復処理を行う前に,

$$M^* M = [-G, B\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})]^* [-G, B\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})] \quad (2.51)$$

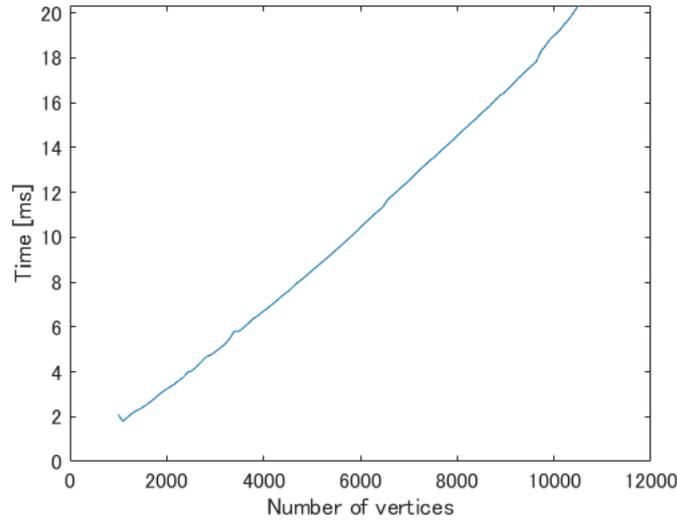


図 2.11. 振動子数を 1496 としたときの、メッシュモデル頂点数と前処理に要する時間の関係。

を計算しておくことで、反復内では $M \times M$ から直接 A を求めることができる。さらに、本手法は指先のような局所的な部分のみに音圧振幅分布を生成することを目的としているため、 B の生成及び $B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})$ の計算を、 $(\mathbf{p}_{amp})_i > 0$ であるメッシュモデルの頂点 i に関するのみ行うことで大幅に計算量を削減することが可能である。この場合の処理順は、

1. 行列 $G, B \text{diag}(\mathbf{p}_{amp})$ の生成.
2. $M \times M$ の計算.
3. A, \mathbf{g} を生成.
4. $A\mathbf{h} = -\mathbf{g}$ の求解.
5. σ の計算, λ の更新

となる。このアルゴリズムを CUDA GPGPU framework を用いて、Intel Core i7-6800K CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080Ti 上に実装し時間を計測した。このとき、 $A\mathbf{h} = -\mathbf{g}$ についてはコレスキー分解を用いて実装し、また、 $(\mathbf{p}_{amp})_i > 0$ である頂点の数は頂点全体の 1/100 に設定した。前処理 1-2 の計算時間はほぼメッシュモデルの頂点数のみに依存し、反復処理 3-5 の計算時間はほぼ振動子数にのみ依存する。それぞれの処理について、パラメータと計算時間との関係を図 2.12, 2.11 に示す。数値評価での設定である頂点数 $N = 8400$ 、振動子数 $M = 1494$ である場合、7 回の反復を行うと振動子位相のリフレッシュレートは約 30 Hz となる。2.4.1 節でみるように、7 回の反復は解の収束には十分であるといえる。

2.5 被験者実験

本手法により実際に識別可能な程の圧力分布の差をつくりだすことが可能かを検証するために、被験者実験を実施した。この実験では、被験者は 3 種類の分布に触れてそれを識別するタ

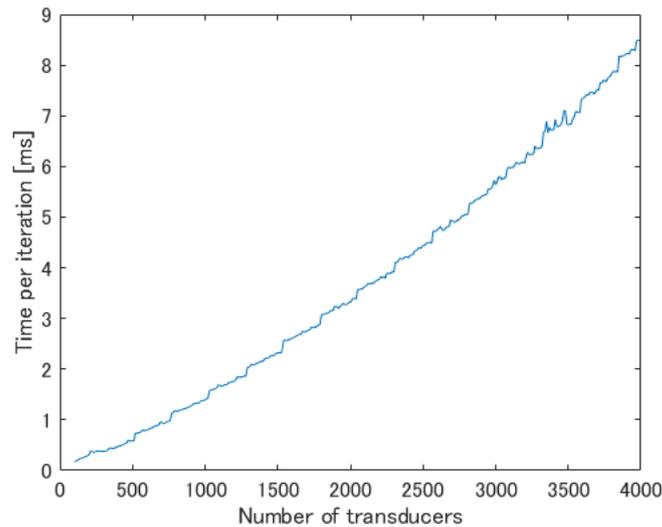


図 2.12. メッシュモデル頂点数を 8400 としたときの、振動子数と 1 反復に要する時間の関係.

スクを行う。手での音場の散乱を考慮することでより正確な分布提示が実現されているかを検証するために、散乱モデルを使用する場合としない場合の両方で実験を行った。

実験設定

実験のために構築されたシステムを、図 2.14 に示す。手形状の計測のため、Intel RealSense Depth Camera D415 を 4 台設置する。各カメラで取得するデプスマップの解像度は 640×360 で、動的メッシュ生成及び振動子位相の更新頻度は 30 Hz である。超音波振動子の配置は数値シミュレーションの場合と同様であり、振動子が発する超音波には、触覚刺激を知覚しやすくするために 200Hz の振幅変調が掛けられる。位相最適化には Levenberg-Marquardt 法を用いてその反復回数は 7 とする。

実験手順

被験者はシステムの前に座り、超音波振動子アレイ上方に手を伸ばす。メッシュモデル生成の安定性のために、実験全体を通じて被験者手の形は人差し指のみを伸ばした状態に限定する。被験者は手全体や人差し指は自由に動かすことができるが、他の指は閉じている状態を保つよう指示される。はじめに、参加者の手をスキャンしてリジッドテンプレートを作成する。この作業には 20 秒ほどかかる。このリジッドテンプレートの動的フィッティングが適切に機能していることを確認した後に、被験者は 3 つの異なる幅の圧力パターンをそれぞれ 15 秒間体験する。シミュレーションと同様に、直方体領域に指が触れると、領域内部にある部分に均一な圧力がかかる。領域の幅は 5 mm, 8 mm, 及び 11 mm であり、奥行き方向の長さは一律で 30mm である (図 2.6 (b1-b3) 参照)。図 2.14 に示すように被験者はディスプレイに表示される自分の手と直方体領域を確認しながら指を垂直に動かしてその幅を知覚する。水平に指を動かすことは禁止される。

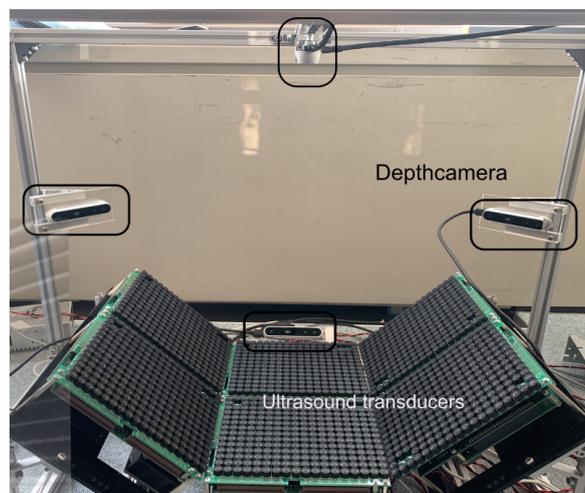


図 2.13. 実験のセットアップ. 4 つのデプスカメラが手の形状を取得し, 1494 個の振動子から超音波が発生する.

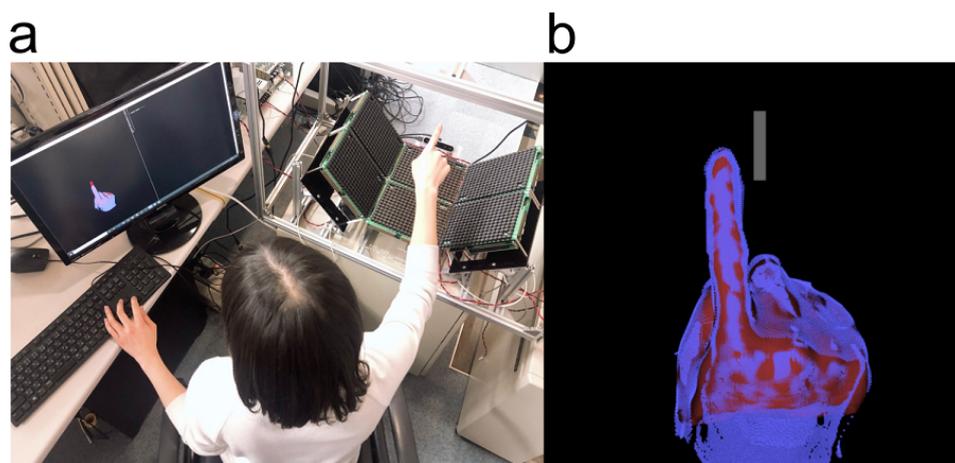


図 2.14. (a) 実験では, ディスプレイに表示される直方体領域と手のメッシュモデルを確認しながら, 指を垂直方向に動かして領域に触れる. (b) ディスプレイに表示される映像.

その後, 被験者は領域幅を識別するタスクを繰り返し行う. 一回のタスクでは, 被験者が領域に一度触れてから 15 秒間経過すると触覚提示が停止され, その後参加者は 3 つの幅のいずれかを回答する. 練習として 3 回のタスクを行った後に, 各幅で 10 タスク, 計 30 タスクをランダムな順序で実行する. 練習においても被験者は正解の幅を知ることはできない. 上記の手順を, 散乱を考慮した場合としない場合の両方で行う. 条件間の混乱を避けるために, 2 つの条件の下で別々に実験を行う.

結果

23 歳から 24 歳の 10 名の被験者 (男性 8 名, 女性 2 名) が実験を行った. 図 2.15 に, 各被験者の正答率とその平均を示す. 被験者 A から E は散乱モデルを使用した実験を先に行

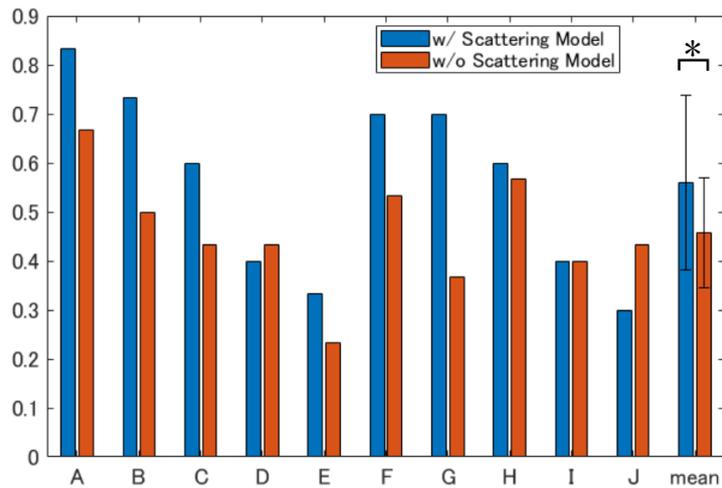


図 2.15. 各被験者の正答率とその平均，エラーバーは標準偏差を示す。

い，参加者 F から J は散乱モデルを使用しない実験を先に行った．参加者間の正解率の平均値は，散乱モデルを使用した場合に 0.56，使用しない場合で 0.47 であり，Wilcoxon の符号順位検定により 2 つの方法の間に有意差 ($p < 0.05$) が得られた．

考察

平均精度は，この方法で生成された分布の違いはある程度認識できるが，完全ではないことを示している．この理由の 1 つとして深度カメラの誤差が原因で正確なメッシュモデルが生成されなかった可能性が挙げられる．ただし，2 つの方法の精度の違いは，このような場合でも散乱を考慮することが効果的であることを示している．また，この実験では領域に触れる指の速度について指示をしなかった．動的メッシュ生成と，振動子の最適化のリフレッシュレートはともに 30 Hz である．そのため，手をデプスカメラで撮影してから触感を呈示するまでに遅延は，66 ms 程度は存在するといえる．そのため，指を領域境界付近で素早く動かすと，触覚提示時点での指の位置が撮影時と大きく異なり適切な分布を提示することができない．特に，参加者 E と J は，実験中に指が震えていたため遅延の影響を大きく受けたと考えられる．正確な遅延の計測と，それが結果にどのように影響するかの検証を行う必要がある．

2.6 指先以外の位置への圧力分布生成

前節まで，指先に所望の圧力分布を生成する手法について述べてきた．本節では図 2.16(a)(b) に示すような，音波の反射の影響が大きい部分に圧力分布を再現することを考える．本手法を適用したときの再現結果を図 2.16(c) に示す．生成された圧力分布は非常に強度が小さく，再現精度が低いことが観察される．指を閉じた内側のような閉じた部分での分布再現では，提示領域周囲に余分な圧力が生じるのを防ぐことが難しい．そのため，提示領域以外

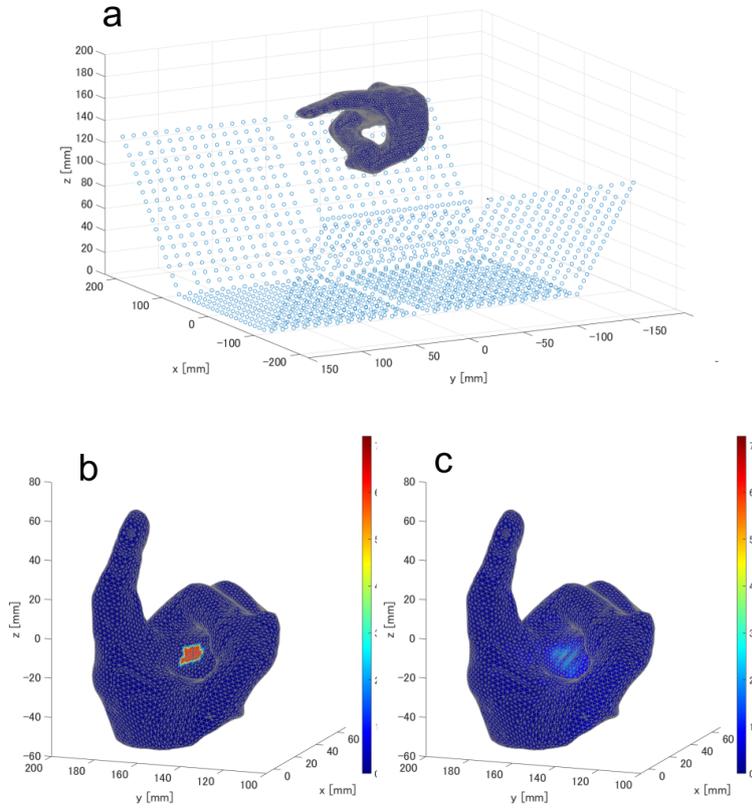


図 2.16. 音波の反射の影響が大きい部分での圧力分布再現. (a) シミュレーション設定, (b) 目標分布, (c) 再現分布

の圧力が0になるように調整する本手法を適用したときに望ましい圧力分布が生成されないと考えられる. 音響放射圧が音圧振幅の2乗に比例すること, そして絶対閾以下の皮膚への圧力刺激は知覚されないことを考慮すると, 提示領域以外の部分に生じる圧力はある程度許容できると考えられる. そこで, 以下の最適化問題を考える.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \|W(\text{diag}(\mathbf{p}_{amp})\mathbf{t} - B^{-1}G\mathbf{q})\|_2^2 \\ & \text{subject to} \quad |t_i| = |q_i| = 1. \end{aligned} \quad (2.52)$$

ただし, W は各頂点音圧に対しての重みを表す対角行列である. 目標分布において音圧振幅が0である頂点の集合を \mathcal{I}_0 としたときに, W の i 番目の対角要素 w_i について以下のように設定する:

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in \mathcal{I}_0 \\ \epsilon & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2.53)$$

$\epsilon < 1$ とすることで, 提示領域以外に生じる音圧をある程度許容することができる. 問題 2.52 に対して, 前節までと同様に Levenberg-Marquart 法を用いて振動子位相を決定した際の, ϵ に応じた再現分布の変化を図 2.17 に示す. $\epsilon = 1$ としたときには, 図 2.16 と同様に小さな圧力しか生成されないが, ϵ が大きくなるにつれて提示領域の圧力分布の再現精度が向上してい

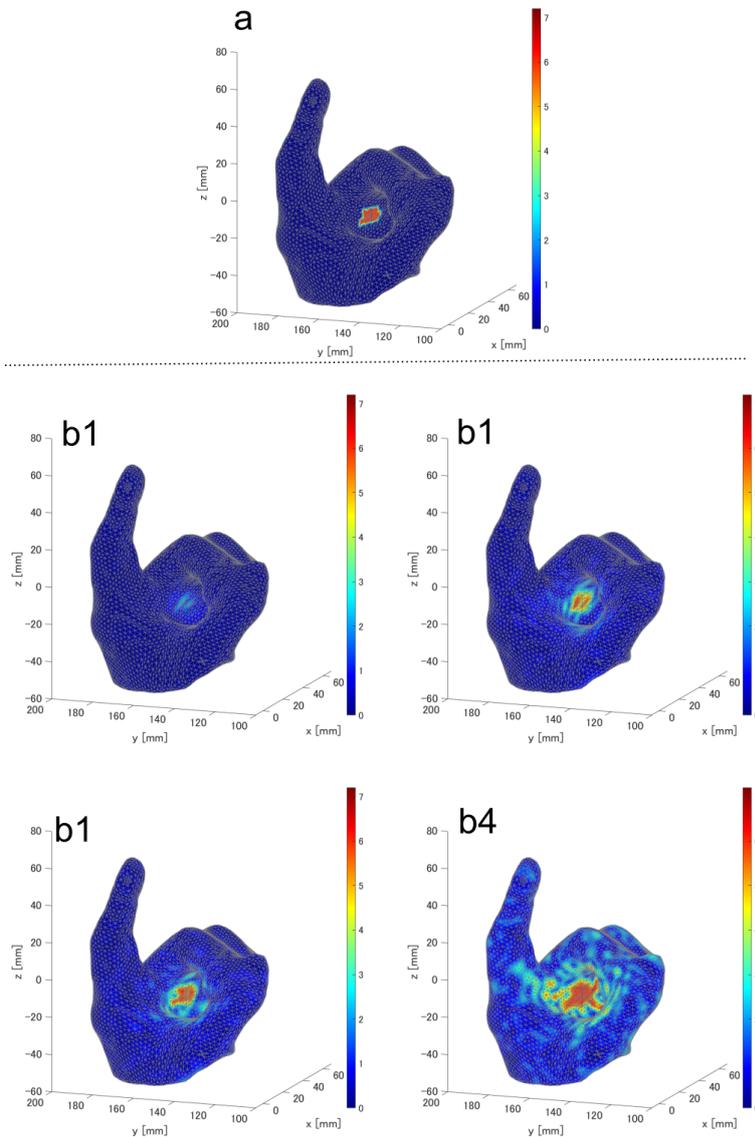


図 2.17. 各頂点に対し重みづけを行った際の圧力分布再現. (a) 目標分布, (b1-b4) 再現分布 (b1-b4 でそれぞれ $\epsilon = 1, 0.1, 0.2, 1$)

ることがみてとれる. それに伴い提示領域以外の圧力が増大し, $\epsilon = 1$ の場合には非常に大きな圧力が周囲に生じていることがわかる.

以上のように ϵ を適切に与えることで, 所望の分布に沿った触覚提示が可能となる. しかし, 問題 2.52 を解くためには $B^{-1}G$ を求める必要があり, この計算は非常にコストが高い. CUDA GPGPU framework を用いて, NVIDIA GeForce RTX 2080Ti 上で $B^{-1}G$ を計算した際の, 頂点数と計算時間の関係を図 2.18 に示す. 図 2.17 の場合のメッシュモデルの頂点数は 7108 である. このとき, $B^{-1}G$ の計算時間は 150 ms 程度であり, リアルタイムでの触覚提示を行うことができない. そこで, 得られたポリゴンメッシュの頂点数を削減した後に最適化を行うことを考える. 削減する頂点は, 圧力を提示する領域から一定以上の距離にあるもの

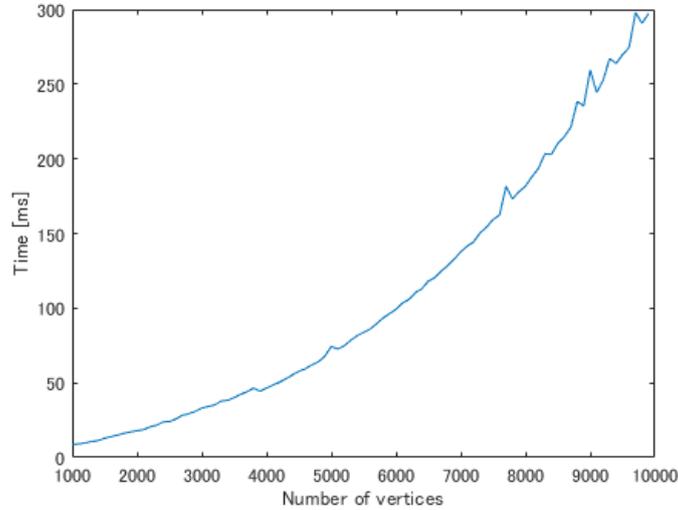


図 2.18. メッシュモデルの頂点数に応じた $B^{-1}G$ の計算時間の変化

から選ぶものとする．つまり、提示領域以外の頂点 i をランダムに選びそれが以下の条件を満たす場合に削減するという処理を、指定の数の頂点が削減されるまで繰り返す：

$$\exists j \in \mathcal{I}_p \quad (\|v_i - v_j\|_2 < \sigma) \quad (2.54)$$

ただし、 \mathcal{I}_p は圧力提示領域に含まれる頂点の添え字集合を表し、また、 σ は予め設定した閾値である．このようにして頂点数を削減した後に Levenberg-Marquart 法を用いて振動子位相を決定した際の、再現結果例を図 2.19 に示す．図 2.19(a1-a4) 及び (b1-b4) はそれぞれ、削減前及び削減後のメッシュモデル上に生成される音圧分布をシミュレートしたものである．削減される頂点数が大きいほど実際に生じる圧力との間に大きな差が生じていることがみてとれる．削減後のメッシュモデルの頂点数と、提示領域に関して再現分布の誤差の 2 乗和の関係を図 2.20 に示す．頂点数を 4000 に削減した場合には、再現分布の誤差は削減しない場合と比べ 50% 程度増加している．このとき、 $B^{-1}G$ の計算時間は図 2.18 より約 50 ms であり、頂点削減前のメッシュモデルを使用する場合と比べると計算時間は 3 分の 1 程度となる．しかし、最適化アルゴリズムの総計算時間は 85 ms 程度とリアルタイム触覚提示としては十分な値とは言えず更なる改善が求められる．

2.7 今後の課題

現状の手法で可能な触覚生成のリフレッシュレートは人間の触覚知覚特性と比べると非常に低い．リフレッシュレートは主に、メッシュモデルの頂点数と超音波振動子数によって決定される．

手全体を十分滑らかなメッシュモデルで表現するためにはある程度の頂点数が必要となるが、この数は最適化速度に大きく影響する．しかし、2.4 節のシミュレーション結果は、振動子の生成可能な圧力上限付近では、指先だけのメッシュモデルを使用した場合にも十分な精度

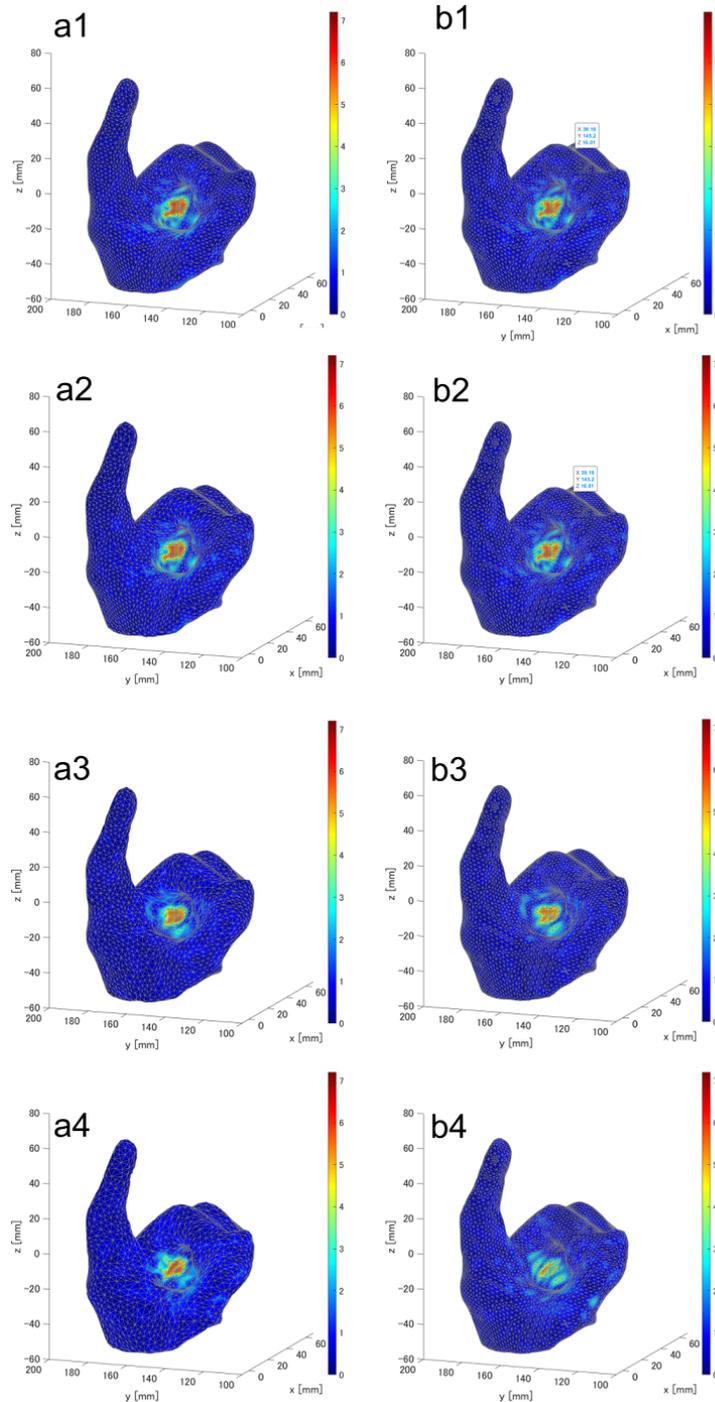


図 2.19. メッシュモデルの頂点数に応じた再現分布の変化. (a1-a4) 頂点削減後メッシュモデル上でのシミュレーション結果 (上から頂点数 5000,4000,3000,2000). (b1-b4) 頂点削減前メッシュモデル上でのシミュレーション結果.

で分布再現が可能であることを示していた. よって, 圧力の大きさに合わせて振動子振幅を調整し, かつ, メッシュモデルの接触部分のみを使用して最適化を行うことで再現精度を維持し

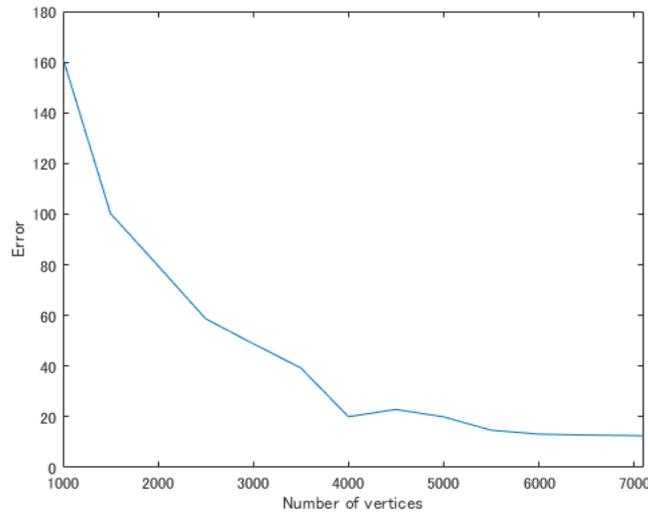


図 2.20. メッシュモデルの頂点数と、シミュレーション誤差の関係 ($\epsilon = 0.1$)

つつ、頂点数を抑えることができると考えられる。そのようにアルゴリズムを改良することで、圧力分布の更新速度が上がるだけでなく、 B^{-1} を高速に計算できるようになることでより高度な音響放射圧制御が実現される可能性がある。

また、本手法を使用して多様な圧力分布を生成するためには多くの振動子を必要とするが、振動子数はアルゴリズムの反復回数に大きく影響する。この問題はデバイス面から解決さえる。現在使用している振動子は一定の周波数で駆動するが、周波数可変の振動子アレイを構成することができれば、パラメータ数を抑えつつより多彩なパターンを指先に生じさせることが可能となるだろう。

本章では、一定振幅音圧の再現とその幅の知覚に関する実験結果について述べたが、2.4 節でみたように本手法は一様でない分布の再現も可能である。物体に触れた際の指先圧力分布は外側から中心に向けてその強度を増すが、その勾配を変化させることで物体の硬さを表現できると考えられる [40]。図 2.21 のように、物理シミュレーション上に用意した物体に対して、指の押し込み量に応じた力を加えて変形させ、それと同時に指先に生じる圧力分布を計算し超音波振動子制御により分布再現を行うことで物体の触感を再現することが可能だと考えられる。そのような手法を提案し、更に 3D ディスプレイと組み合わせることで、現実感の高いシミュレーションシステムを構築することが今後の目標となる。

2.8 本章のまとめ

本章では、手表面での音場の散乱を考慮したうえで、指先に生じる音圧分布をリアルタイムに制御する手法を提案した。この手法では、デプスカメラで計測された手の形状に応じてリアルタイムにポリゴンメッシュモデルを生成する。その面上の音圧分布と振動子の複素振幅の関係を音場の境界積分表現に基づき定式化し、それをもとに振動子の位相を最小二乗法に基づき

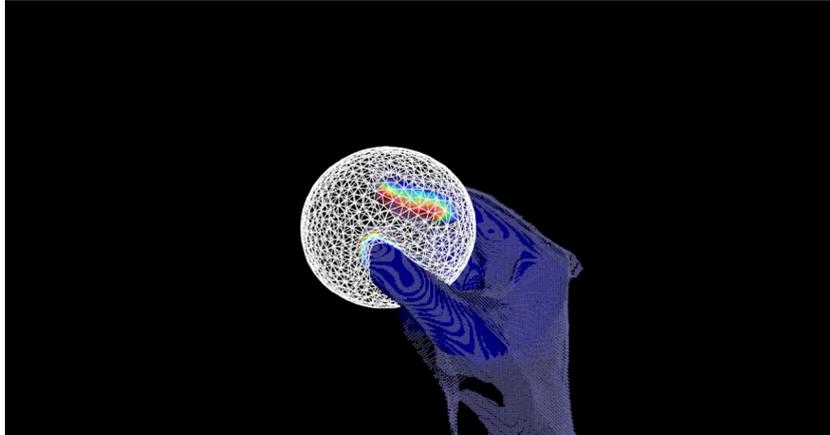


図 2.21. 柔らかい物体に触れた触感の再現.

決定する。数値シミュレーションにより、本手法を用いること様々な形状の圧力振幅分布をリアルタイムに指先に再現することが可能であることが示された。また、本手法において散乱モデルを使用することが正確な圧力分布生成に繋がり、かつ手全体のメッシュモデルを使用することで指先以外の部分に生じる圧力を抑えられることが明らかとなった。被験者実験では、本手法で指先に生成された一定振幅圧力分布の幅をある程度認識可能であることが示された。

第3章

超音波触覚フィードバックを伴う 3D 仮想物体の操作

本章では、体に何も装着せずに 3D 仮想物体の直接操作が可能なシステムを提案する。このシステムでは、その操作性を向上させるために超音波触覚フィードバックを提示する。物体に触れた断面の形状に沿って超音波触焦点を動かすことで、物体の局所的な形状を触覚を通じて表現することができる。

3.1 背景

3D ディスプレイやセンシング技術の発展と共に、3D インタラクションシステムの需要が高まっている。ユーザーが 3D 映像に触れて直接操作できるシステムは、シミュレーション、トレーニング、ゲーム等の用途で使用されるが、直感的に操作できるインターフェースとしての利用もまた重要な応用先である。実際の物体を操作するかのように、ユーザーが自然かつ直感的に操作できるインタラクティブなシステムは、さまざまなタスクを簡単かつ効率的なものにするだろう。特に、2D ディスプレイやポインティングデバイスを使用してでは直感的に行うことのできなかつた、3D モデリング等のタスクの操作性を大きく向上させる可能性を秘めている。

このようなインターフェースでは、視覚情報のみならず触覚情報をも同時にユーザーに提供することで、より直感的かつ自然な操作が実現されと考えられる。視覚及び触覚提示デバイスは体に何も装着せずとも使用できることが望ましい。ヘッドマウントディスプレイや接触型の触覚提示デバイスの装着はシステムの簡便性を損ない、また、常にデバイスが接触している感覚は日常生活での体験と異なるため操作が十分に自然なものとならないと考えられる。裸眼立体視ディスプレイと超音波触覚技術を組み合わせることで、このような非装着のナチュラルインターフェースが実現され得る。

本章では、体に何も装着することなく 3D 仮想物体とのインタラククションを行うことのできるシステムを提案する。たとえば、図 3.1 に示すようにユーザーは 2 本の指で 3D 仮想オブジェクトを把持し、それを自由に移動させることができる。このシステムは、デプスカメラに

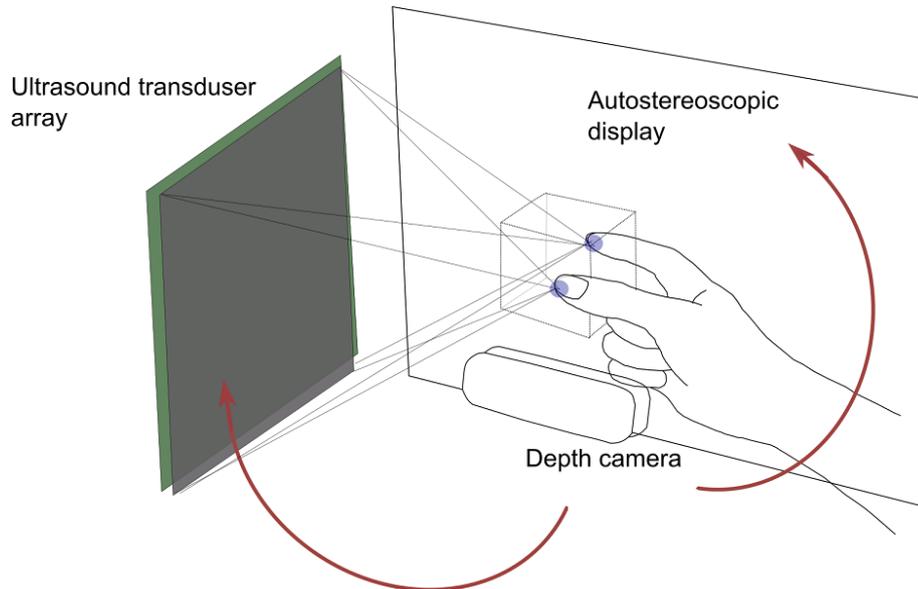


図 3.1. 超音波触覚フィードバックを伴う 3D 物体操作システムの概要. デプスカメラから取得された手の形状をもとに焦点を生成する共に, 物体の応答をシミュレートし, 3D ディスプレイに反映させる.

よって測定された手の姿勢に応じて物理シミュレーションを実行し, その結果を 3D ディスプレイの画像に反映させる. それと同時に, 触覚フィードバックを超音波振動子アレイによって提示する. 各トランスデューサーの位相を制御することにより, 空中の任意の位置に触覚を提示可能であり, ユーザーは視覚, 触覚情報を得ながら 3D 映像を実際の物体に触れるかのように操作することができる.

どのような超音波触覚提示がこのようなシステムの操作性を高めるのかは考察の余地がある. 既存の多くの超音波触覚を使用したアプリケーションでは焦点生成による触覚提示を行っている [23], [39], [36]. 本システムのような 3D インタラクションシステムにおいても, 皮膚表面上に超音波焦点を生成することで物体への接触をユーザーに伝えることが可能であるが, 例えば物体の形状やそれに対する手の相対位置等のそれ以上を情報を伝達することは難しい. このような情報は特に, 物体を注視せずに操作する, 或いは, オクルージョンが存在するような場合において, ユーザーの操作を補助し触覚情報のみでの操作を可能にすると考えられる. 直感的システムの構築のためには, 実際に物体に触れた際の圧力を物理的に再現することが好ましいが, 前章で述べたような指先分布制御は適用範囲に制限があり, 十分な強度の触覚刺激を全方位からリアルタイムに提示することは困難である. 特に超音波を利用して提示可能な圧力には限界があり, 硬い物体に触れた感触を再現することは原理的に難しい.

そこで, 本システムでは, 超音波の焦点を指との交差領域周囲を高速で移動させることにより, 物体の輪郭形状を強調する触覚提示手法を用いる (図 3.2 参照). 近年, 超音波焦点を高速で移動させることでより知覚強度の高い触覚を提示できることが報告されている [50],[17]. 本フィードバック手法は, 指先が物体に侵入した際にその断面形状を推定しその周囲を焦点を移動させることで, 強い触覚を生起させつつ物体の局所的な形状に関する情報をユーザーに伝達

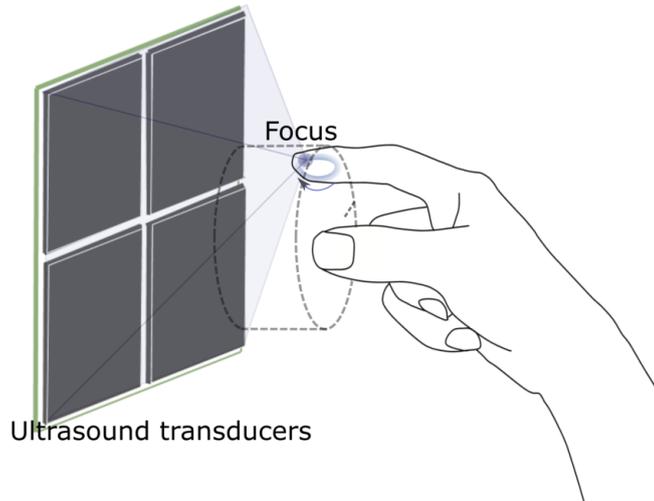


図 3.2. 物体との交差領域周囲に圧力分布を生成することで物体形状を提示する。

することができる。焦点の移動は知覚できない程度に速く、そのためユーザーは指先に生じる圧力分布の時間平均を知覚すると考えられる。作業空間が多数の振動子に囲まれている場合、超音波焦点の直径は十分に小さく、焦点周囲により生成される時間平均圧力分布は断面形状に沿って形成される。

本章では、次章で 3D 映像とのインタラクション及び超音波を使用したインターフェースシステムに関連する研究を紹介する。その後、3 節で提案システムの詳細を述べた後に、4 節、5 節で本システムにおける触覚フィードバックの評価を行う。3D 物体操作に対する超音波触覚の影響については、未だ調査例がない。そのため、4 節、5 節では従来の単焦点提示と新たに提案する周回焦点提示の両方について、物体操作における有効性を数値シミュレーション及び被験者実験により検証する。

3.2 関連研究

3.2.1 3D 物体とのインタラクション

マウスとキーボードによる入力コンピュータの操作方法として未だ標準的であるが、近年ではマルチタッチディスプレイやジェスチャー入力もまた、一般的なものとなっている。より自然で直感的な操作が可能なインターフェースを求め様々なシステムが開発されているが、中でも、裸眼立体視ディスプレイの映像に直接触れて操作するシステムは、被装着で日常に近い動作で操作を行えるという点で非常に直感的であるといえる。Kim らは、指先を使用したインタラクションシステムを提案している [30]。このシステムでは、指先の画像が 2 台のカメラによって取得されその位置はステレオマッチングによって求められる。ユーザーは、3D ディスプレイに映し出された映像に指先で触れることができる。Butler らは、Vermeer と呼ばれ

る 360° 方向に表示可能な 3D ディスプレイとインタラクションを行えるシステムを提案している [8]. このシステムでは回転する光拡散板と高速プロジェクターによって生成された映像を, 向かい合わせに配置した放物面鏡によって空中に再構築することで, 触れることのできる 3D 物体を表現している. Hilliges らの提案する Holodesk[22] は, 透過型のディスプレイと Kinect カメラを組み合わせ, ユーザーの頭の位置に応じてレンダリングされる 3D 映像をユーザーが直接掴んで操作することを可能にしている. Wang らは, センシングデバイスとディスプレイを一体化したシステムを提案している. [53] [51]. このシステムでは, 赤外線センサがディスプレイに埋め込まれ, 角度方向に走査する照明からの反射画像を分析することで指先位置が検出される. 山口らは, ライトフィールドディスプレイが発する光の, ユーザーの指先での散乱を計測することで, 映像に触れたことを検知するシステムを提案している [54],[55]. 上記のいずれのシステムにおいても触覚フィードバックは提示されない. 超音波触覚提示技術は, 非接触性を保ちながら触覚情報をユーザーに提供することでシステムの操作性を向上させる可能性を秘めている.

3.2.2 空中映像との超音波触覚インタラクション

空中映像と超音波触覚フィードバックを組み合わせたシステムは既にいくつか提案されている. 星らは, 凹面鏡を利用して提示した 2D 空中映像とハンドトラッカー, 超音波振動子アレイを組み合わせ, 触れることのできる空中像を作り出すシステムを構成した [23]. 門内らによって提案された Haptomime [39] は, マイクロミラーアレイを使用して空中に結像した 2次元インターフェースに対して触覚フィードバック付きの操作を行うシステムである. 同様に, フォグスクリーン上のインターフェースを操作するシステムも提案されている [48],[43]. Sand らは, ヘッドマウントディスプレイと超音波トランスデューサーアレイを組み合わせたシステムを使用して, ヘッドマウントディスプレイに表示された仮想キーボードを使用した 2D インタラクションにおける超音波触覚の影響を検証している. これらのシステムは全て触覚を伴う 2D 映像の操作を実現している.

牧野らによって提案された HaptoClone [36] は, 3D 空中像とリアルタイムのインタラクションを実現している. ただし, 3D 空中像は実際に存在する物体をマイクロミラーアレイにより結像させたものであり, 自由に 3D 物体を作成してそれを操作することはできない.

本章で提案するシステムは, 3D 映像の操作を触覚フィードバック付きで行える初のシステムである. また, 既存システムでは指の接触位置に一つの超音波焦点を作成することによりユーザーに接触しているという情報を与えているが, 本システムでは焦点を指と物体の交差領域を周回させることでより多くの情報を伝達することが可能である.

3.3 システム

本章で提案する超音波触覚フィードバックを伴う 3D 物体操作システムについて述べる. このシステムは, 3D ディスプレイ, デプスカメラ, 及び超音波振動子アレイから構成される.

複数のデプスカメラから取得された手の形状を表す点群が仮想物体内部に存在する場合に、その点群から手と物体の交差領域を推定し、それを周回するように超音波焦点を移動させる。それと同時に手接触時の仮想物体の応答をシミュレートし3D映像に反映させる。デプスマップの前処理及び点群の仮想物体に対する内部判定については4章を参照のこと。本節では、そのようにして得られた仮想物体内部の点群から、超音波焦点の通過経路を決定する手法及び仮想物体の応答をシミュレートする手法について詳述する。

3.3.1 触覚フィードバック

手形状を示す点群が仮想物体内部に存在する場合に、指と物体の交差領域を周回するように超音波焦点を動かすことを考える。使用する振動子アレイが特定の周期で焦点位置を変更するものとして(4.4節参照)、交差領域周囲にその道筋となる通過点 $\mathbf{r}_m \in \mathbb{R}^3$, $m \in \{1, \dots, M\}$ を設定する。ポリゴンメッシュで表現される仮想物体に触れた際に、交差領域周囲に均等に分布するように M 個の通過点を設定する2種類の方法について以下で述べる。

広い面で構成される物体に触れた場合

ポリゴンメッシュを構成する面が指の接触領域よりも広い場合には、指と物体の交差領域は楕円に近い形状であると考えられる。そのような場合には、図3.3のように物体の表面付近の点群を楕円近似することで焦点パスを決定することができる。楕円の中心を $\mathbf{r}_c = (x_c, y_c) \in \mathbb{R}^2$ 、軸の長さを l_1, l_2 、傾きを θ とすると、楕円の式は

$$\left[\frac{(x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta}{l_1} \right]^2 + \left[\frac{-(x - x_c) \sin \theta + (y - y_c) \cos \theta}{l_2} \right]^2 - 1 = 0 \quad (3.1)$$

で与えられる。これを整理すると、

$$\begin{aligned} ax - 2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f &= 0, \\ a &= \frac{\cos^2 \theta}{l_1^2} + \frac{\sin^2 \theta}{l_2^2}, \\ b &= 2 \left(\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2} \right) \sin \theta \cos \theta, \\ c &= \frac{\sin^2 \theta}{l_1^2} + \frac{\cos^2 \theta}{l_2^2}, \\ d &= -2 \left(\frac{x_c \cos^2 \theta + y_c \sin \theta \cos \theta}{l_1^2} + \frac{x_c \sin^2 \theta - y_c \sin \theta \cos \theta}{l_2^2} \right), \\ e &= -2 \left(\frac{x_c \sin \theta \cos \theta + y_c \sin^2 \theta}{l_1^2} + \frac{y_c \cos^2 \theta - x_c \sin \theta \cos \theta}{l_2^2} \right), \\ f &= \frac{x_c^2 \cos^2 \theta + 2x_c y_c \sin \theta \cos \theta + y_c^2 \sin^2 \theta}{l_1^2} + \frac{x_c^2 \sin^2 \theta - 2x_c y_c \sin \theta \cos \theta + y_c^2 \cos^2 \theta}{l_2^2} - 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

となる。物体内部の点群から、表面からの距離があらかじめ設定した閾値 σ_d 以下の点を取り出し、最短距離の面に対して射影する。射影後の点群を2次元座標 $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$

, $i \in \{1, \dots, I\}$ で表すと, これらの I 個の点に対する最小二乗楕円近似問題は以下のように定式化される [14]:

$$\min_{\mathbf{a}} \|D\mathbf{a}\|_2^2 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{a}^T C \mathbf{a} = 1. \quad (3.3)$$

ただし, ベクトル $\mathbf{a} = (a, b, c, d, e, f)^T$ であり, 行列 $D \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ は,

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1^2 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_i y_i^2 & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_I^2 & x_I y_I^2 & y_I^2 & x_I & y_I & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

である. また, $C \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は,

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

であり, これは 2 次曲線の式 3.2 が楕円を表すための制約を課す行列である. Lagrange の未定乗数法により, 最小二乗解は以下の条件を満たす:

$$D^T D \mathbf{a} = \lambda C \mathbf{a}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{a}^T C \mathbf{a} = 1. \quad (3.7)$$

式 3.6, を満たすベクトル $\hat{\mathbf{a}}$ に対して,

$$\|D\hat{\mathbf{a}}\|_2^2 = \lambda \hat{\mathbf{a}}^T C \hat{\mathbf{a}} = \lambda \quad (3.8)$$

であるので, 式 3.6 の一般化固有ベクトルの内, 固有値が最も小さいものを選び, それを式 3.3.1 を満たすようスケーリングしたものが最小二乗解となる. 実際にはより計算の安定性の高い計算手法を用いる ([19] 参照) が, そのようにして最小二乗解 $\mathbf{a} = (a, b, c, d, e, f)^T$ が与えられれば楕円のパラメータは,

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{2(be - cd)}{4ac - b^2} \\ y_c &= \frac{2(bd - ac)}{4ac - b^2} \\ l_1 &= 2 \frac{(cd - be) * d + (ae - bd)e - (4ac - b^2)f}{(4ac - b^2)(a + c + \sqrt{(a - c)^2 + b^2}} \\ l_2 &= 2 \frac{(cd - be) * d + (ae - bd)e - (4ac - b^2)f}{(4ac - b^2)(a + c - \sqrt{(a - c)^2 + b^2}} \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctan \frac{b}{a - c} \end{aligned} \quad (3.9)$$

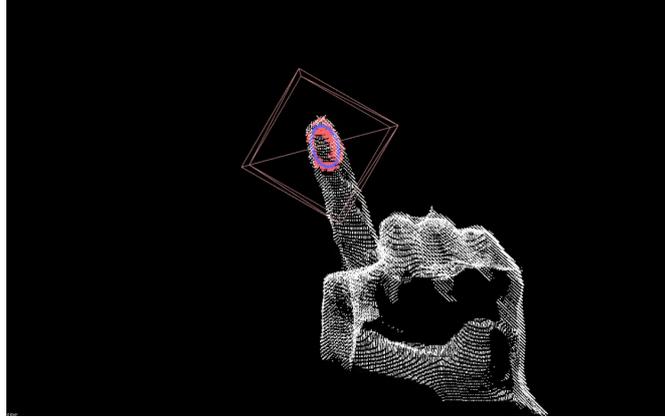


図 3.3. 物体表面付近の点群の楕円近似

により求められる．この楕円を中心からの角度で M 分割した点 $\mathbf{r}'_m \in \mathbb{R}^2$ を求める：

$$\mathbf{r}'_m = \begin{pmatrix} l_1 \cos \theta \cos \frac{2\pi}{M} - l_2 \sin \theta \sin \frac{2\pi}{M} \\ l_1 \sin \theta \cos \frac{2\pi}{M} + l_2 \cos \theta \sin \frac{2\pi}{M} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

\mathbf{r}'_m を 3 次元空間に再投影し，通過点 \mathbf{r}_m を得る．この焦点パス決定手法はノイズに対して頑健であるが，面の端に触れた場合や細かな面で構成される物体に触れた場合には適切な通過点を設定することができない．

小さな面で構成される物体に触れた場合

指と比較して小さな面で構成される物体に対しても焦点の通過点を決定するために，広い面の場合と同様に表面近傍の点を何らかの平面に射影した後に角度に基づいて分割することを考える．はじめに，表面近傍の点群 (図 3.4(a)) に対して，主成分分析を行い射影する平面を決定する．近傍点群を $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3, i = \{1, \dots, I\}$ で表し，その重心を $\bar{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^3$ とする．この点群の分散共分散行列の固有値分解は，

$$\frac{1}{I} \bar{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{W} \Lambda \mathbf{W}^T = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3) \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1^T \\ \mathbf{w}_2^T \\ \mathbf{w}_3^T \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

のように表される．ただし，

$$\bar{\mathbf{X}} = (\mathbf{x}_1 - \bar{\mathbf{x}}, \dots, \mathbf{x}_I - \bar{\mathbf{x}})^T \quad (3.12)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0. \quad (3.13)$$

である．各点 \mathbf{x}_i を，第一主成分と第二主成分の張る平面に対して射影する (図 3.4(b))．このとき，各成分方向に対する分散が等しくなるように調整する．射影後の点 $\mathbf{x}_i^* \in \mathbb{R}^2$ は以下のように与えられる：

$$\mathbf{x}_i^* = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \mathbf{w}_1^T \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \mathbf{w}_2^T \end{pmatrix} (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}). \quad (3.14)$$

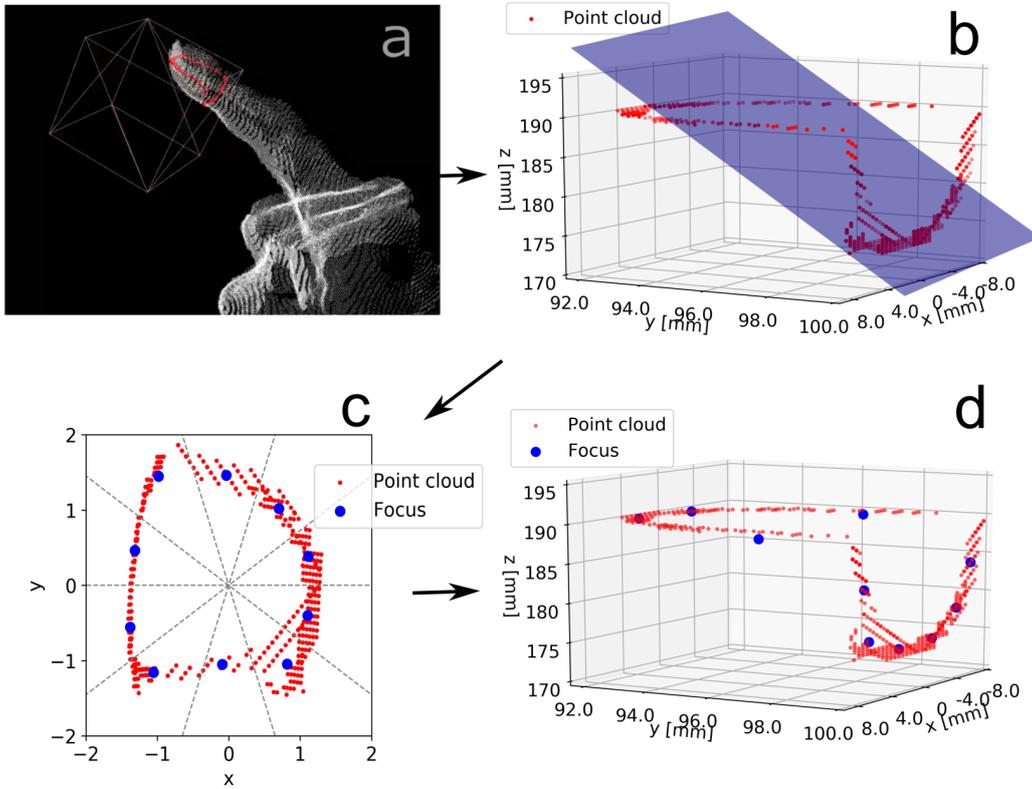


図 3.4. (a) 表面近傍の点が抽出される。(b) 主成分分析により点群を射影する平面を決定する。(c) 射影された点群を角度に基づき分割する。(d) 分割後の各点集合の重心を焦点通過点とする。

次に、図 3.4(c) のように、点群 \mathbf{x}_i を、射影後の \mathbf{x}_i^* の角度に基づき M 個の集合に分割する。各集合について点群の重心を求め、それを焦点の通過点 \mathbf{r}_m とする (図 3.4 (d))。 \mathbf{r}_m は、

$$\mathbf{r}_m = \frac{1}{|C_n|} \sum_{i \in C_n} \mathbf{x}_i \quad (3.15)$$

$$C_n = \left\{ i \mid \frac{2\pi(n-1)}{N} \leq \arg(\mathbf{x}_i^*) < \frac{2\pi n}{N} \right\} \quad (3.16)$$

と表される。ただし、 $\arg(\mathbf{x}_i^*) \in [0, 2\pi)$ は、 \mathbf{x}_i^* と $(1, 0)^T$ が成す角を表す。

以降、上記の 2 手法をそれぞれ楕円近似法、射影法と呼ぶ。これらの手法により、ポリゴンメッシュで表現される任意の物体に対して焦点通過パスを決定することが可能である。これまで、一本の指で触れている状況を想定していたが、あらかじめ距離に基づいて物体表面近傍の点群を複数のクラスタに分割した後に、それぞれのクラスタに対し上記手法を適用することで、物体に触れている複数の指のそれぞれに対し焦点パスを設定することが可能である。図 3.5 に 2 本の指で物体に触れた際に決定された焦点パスを示す。 N 本の指で触れている場合



図 3.5. 複数の指で触れた場合の焦点パス.

には, N 個の焦点を同時に生成し, それぞれを別のパスに沿って移動させる. 焦点の位置を $\mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^3, n = \{1, \dots, N\}$, 振動子の位置を $\mathbf{x}_m \in \mathbb{R}^3, m = \{1, \dots, M\}$ と表したとき, 振動子の複素振幅 $q_m \in \mathbb{C}$ を以下のように設定することで, N 個の焦点を同時に生成することができる:

$$q_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_m\| e^{jk\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_m\|} \quad (3.17)$$

超音波振動子の位相と振幅は一定の周期で切り替えられるため, 指先で生成される圧力分布の空間的な滑らかさと刺激の同時性との間にトレードオフが存在する. 焦点の通過点の数が多いほど, 指先圧力分布の時間平均は滑らかな形状を持つが, 周回の周期が小さくなることで刺激の同時性が低くなり焦点の移動が知覚可能となる問題が生じる. 実験時の振動子の更新頻度と, 通過点の数の設定については後に説明する.

3.3.2 物体の衝突応答

仮想物体内に点群が侵入したとき手が物体に接触したとみなし, その状況に応じて物体に適切な力を付加することで, 物体の把持を可能にする. 本システムではポリゴンメッシュで表現される剛体のみを対象とする. 物体に加える力は, god-object 法 [58] と呼ばれる手法に基づいて決定する. god-object 法は, 主に Phantom [7] 等の 3D ポインティングデバイスで使用されるしゅほうで, ポインティングデバイスの位置に対応するシミュレーション空間上の点を haptic interface point (HIP) と呼び, 物体表面上に設置した god-object と HIP の位置関係に応じて物体に力を加える.

本システムでは, 物体内部に存在する点群の重心を HIP とする. 図 3.6 (a) に示すように, 点群が初めて物体に侵入したフレームにおいて HIP と最短距離にある物体表面上に god-object を配置する. god-object の位置は物体に力を加える点を表すが, これは物体の姿勢変化後も物体との相対的位置を保つように移動するので, 以降では物体の姿勢パラメータを \mathcal{T} として god-object の位置を $\mathbf{x}_g(\mathcal{T}) \in \mathbb{R}^3$ と表す. 物体との接触後, 点群が物体内部に存在しなくなる

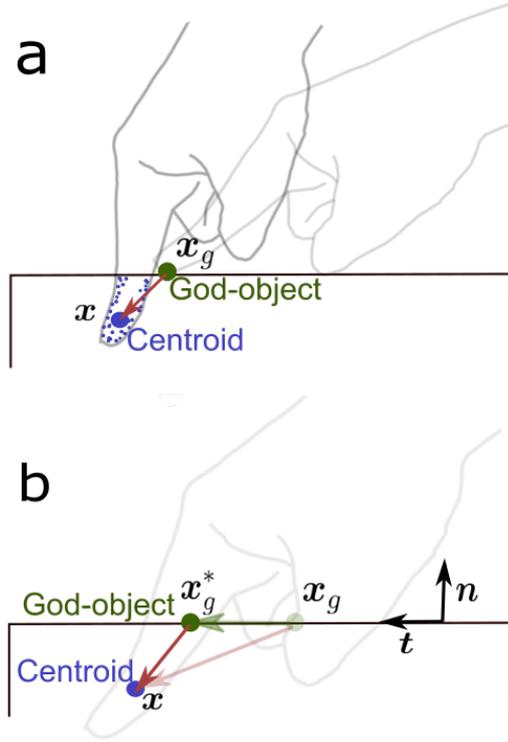


図 3.6. (a) 指先が触れた点に god-object が配置され、以降その位置に力が加えられる．(b) 最大静止摩擦力を越える面に水平方向の力が働くとき、それに応じて god-object が移動する．

まで、HIP と god-object がバネ及びダンパで接続されているかのように x_g に力が加えられる．HIP の位置を $x \in \mathbb{R}^3$ とすると、物体に適用される力 $f \in \mathbb{R}^3$ は次のように決定される：

$$f = K(x - x_g(\mathcal{T})) + D(\dot{x} - \dot{x}_g(\mathcal{T})). \quad (3.18)$$

ただし、 K 及び D はそれぞれ、god-object に対する HIP の相対位置及び相対速度に掛かる比例定数である．この力 f の接触面に平行な成分は摩擦力とみなすことができる．Coulomb の摩擦モデルに基づき、この力が最大静止摩擦力を越えたときには、物体に対して指が滑り状態にあるとみなす．このとき、図 3.6(b) に示すように水平方向の力が動摩擦力となる位置に god-object が移動する． $\mu_s \in \mathbb{R}, \mu_d \in \mathbb{R}$ をそれぞれ静止摩擦係数、動摩擦係数とし、また、 $n \in \mathbb{R}^3$ を god-object の設置された面の法線ベクトルとする．あるフレームにおいて

$$\|x - x_g(\mathcal{T}) - ((x - x_g(\mathcal{T})) \cdot n)n\| > \mu_s (x - x_g(\mathcal{T})) \cdot n \quad (3.19)$$

であるとき、god-objectno の最終位置 $x_g^*(\mathcal{T}) \in \mathbb{R}^3$ は次のように変更される：

$$x_g^*(\mathcal{T}) = x_g(\mathcal{T}) + ((x - x_g(\mathcal{T})) \cdot t - \mu_d (x - x_g(\mathcal{T})) \cdot n)t. \quad (3.20)$$

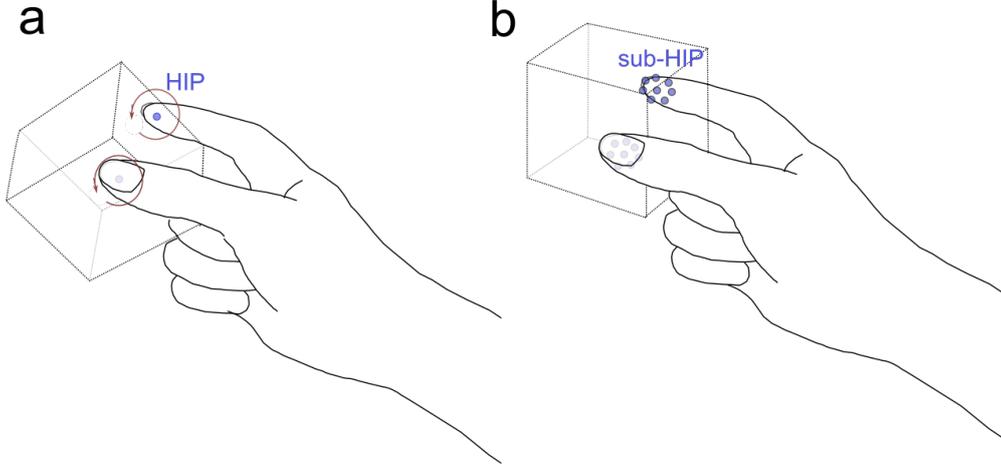


図 3.7. 複数の sub-HIP を設置することによる指先周りでの物体の回転を防ぐことができる。

ただし, $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ は水平成分の単位ベクトルであり,

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_g(\mathcal{T}) - ((\mathbf{x} - \mathbf{x}_g(\mathcal{T})) \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_g(\mathcal{T}) - ((\mathbf{x} - \mathbf{x}_g(\mathcal{T})) \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}\|} \quad (3.21)$$

で与えられる. 上記の式で示されるように, 摩擦力に関する判定は式 3.18 の弾性項のみで行うが, これはシミュレーションの安定性のためである. また, 物体の面 (ポリゴン) を跨ぐようにして god-object が移動する場合の処理については [37] 参照. このようにして決定された god-object の最終位置に応じて物体に付加される力が式 3.18 により定まり, 物理シミュレーションに従い次フレームでの物体の姿勢が求められる.

触覚フィードバックと同様, 複数の指で触れている場合に対応するよう, 物体内部の点群をクラスタリングした後に各クラスタに対して上記の処理が行われる. さらに, 指先周りでの物体の回転を防ぐため本システムでは, 各クラスタ (指) に対して複数の HIP を設定する. 図 3.7 に示すように, 点群重心の HIP から距離が r の位置に, 接触面と並行かつ均等に分布するように複数の sub-HIP を設定する. sub-HIP の数を N_{sub} とすると, 各 sub-HIP の位置 $\mathbf{x}_{sub} \in \mathbb{R}^3$ は以下のように表される:

$$\mathbf{x}_{sub} = \mathbf{x} + r \sin\left(\frac{2\pi}{N_{sub}}\right) \mathbf{t}_1 + r_s \cos\left(\frac{2\pi}{N_{sub}}\right) \mathbf{t}_2 \quad (3.22)$$

ただし, $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2 \in \mathbb{R}^3$ は接触面に平行な互いに直行する単位ベクトルである. 各 sub-HIP はそれぞれ sub-god-object と接続され同様に物体に対して力を及ぼす. sub-god-object は god-object が設置されるときに, sub-HIP と同様, god-object と距離が r の位置に, 接触面と並行かつ均等に分布するように配置される. 滑り時の sub-god-object の移動は, god-object と同様かつ個々で独立して行われる.

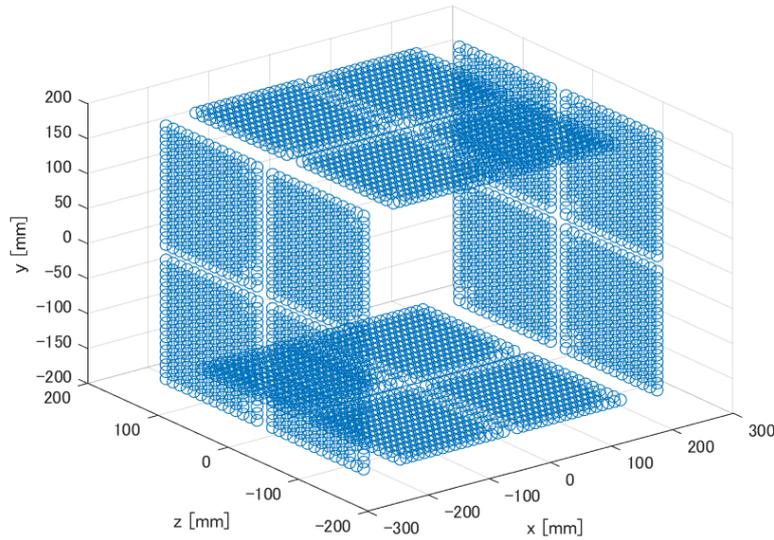


図 3.8. システムの座標系と超音波振動子の配置.

3.4 数値シミュレーション

本システムにおける触覚フィードバック手法の有効性を示すために指先に生じる圧力分布の数値シミュレーションを行った。指先から 5cm 程の 4322 面で構成されるポリゴンメッシュモデルを使用して、境界要素法により指表面の音響放射圧力分布を算出した。図 3.8 に、本システムにおける座標系と、シミュレーションに使用した超音波振動子アレイ配置を示す。メッシュモデルの頂点を、デプスカメラから取得された点群と見なして本フィードバック手法を適用することで、指が表面に触れたときの焦点通過点を決定した。物体表面近傍の点群を抽出するための閾値 σ_d は 1.5 mm とし、通過点の数 $M = 10$ とした。各焦点を生成する際の超音波振動子アレイの複素振幅を求め、それに応じて生成される指表面の音響放射圧分布を算出した。図 3.9 に圧力分布の例を示す。これはアスタリスクで示される通過点のいずれかに焦点を形成した時の音響放射圧分布の平均を示している。圧力の大きい部分は、焦点位置にそった形状をしていることが見て取れる。また、トランスデューサーは指を囲むように配置されているが指の後ろに大きな圧力は発生していない。

指の接触に応じた圧力分布の変化

図 3.10 は、触れている面の指に対する相対位置が変化していく場合の平均圧力分布の移り変わりを示している。図の左列 (1a - 1d) は、本システムでのフィードバック手法 (楕円法による焦点パス決定) の場合のシミュレーション結果を、右列 (2a-2d) は焦点パスの重心に一つの焦点を生成した場合のシミュレーション結果を示している。以降では、2 手法をそれぞれ周回焦点法、単焦点法と呼ぶ。単焦点法と異なり、周回焦点法を用いることで指先が触れる面

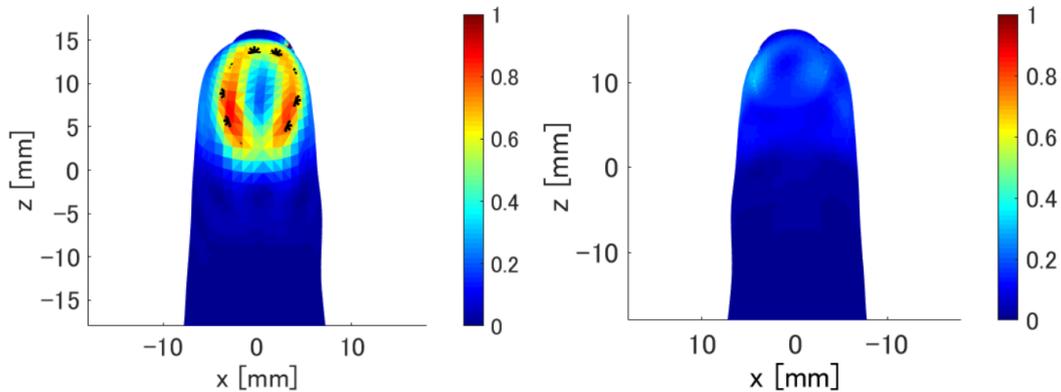


図 3.9. 時間平均音響放射圧分布の例. 分布は最大値が1になるように正規化されている. (左) 指の腹部分に生じる圧力分布. (右) 指の背に生じる圧力分布

積が大きくなるほど広い圧力分布が形成されることが見て取れる (a-c). このような分布の広がりには実際の物体に触れている場合にも生じる現象であり, ユーザーの物体に触れているという感覚の現実感を高める可能性がある. また, 指を深く面に貫通させた場合 (d) では, 指周囲の面が存在する位置に分布が形成されている. この分布から指に対する面の相対的な位置を知覚することで, 操作性が向上する可能性がある. 例えば, 指の過度な物体への侵入による意図しない物体の衝突応答を引き出してしまうことを防ぐことができるかもしれない. 周回焦点法による, システムの現実感, 操作感に対する影響を検証した実験については次節で述べる.

物体の局所的な形状に応じた圧力分布の変化

周回焦点法を用いたときに, 物体の局所的な形状によりどのように生成される圧力分布が変化するかを検証した. 図 3.11 (1a-4a) は, 異なる4つの物体 (立方体, 半球, 四角錐, 三角柱) に触れた際に射影法により決定された焦点位置を示している. 立方体の辺の長さは4 cm, 半球の半径は2 cm, ピラミッドとプリズムの底面は一辺が4cmの正方形で頂角は 45° である. 各物体は, 上部の y 座標が0になるように配置され, 指の位置は一定で各物体上部に3mm程度侵入している. 図 3.11 (1b-4b) は, 指先での時間平均圧力分布の広がり示している. 指と物体の交差領域の形状に沿った圧力分布が形成されていることが観察される. 物体の形状によって, 圧力の高い部分の大きさや形が異なり, 物体の局所的な形状に応じた特徴を持つことが見て取れる. これらの結果は, 物体上部に軽く触れただけでその形状を識別できる可能性を示唆する. 形状識別に関して行った実験については次節で述べる.

3.5 被験者実験

本システムにおける触覚フィードバックの有効性を示すために被験者実験を行った. 行われた3つの実験はそれぞれ,

- 実験1: 物体の形状認識

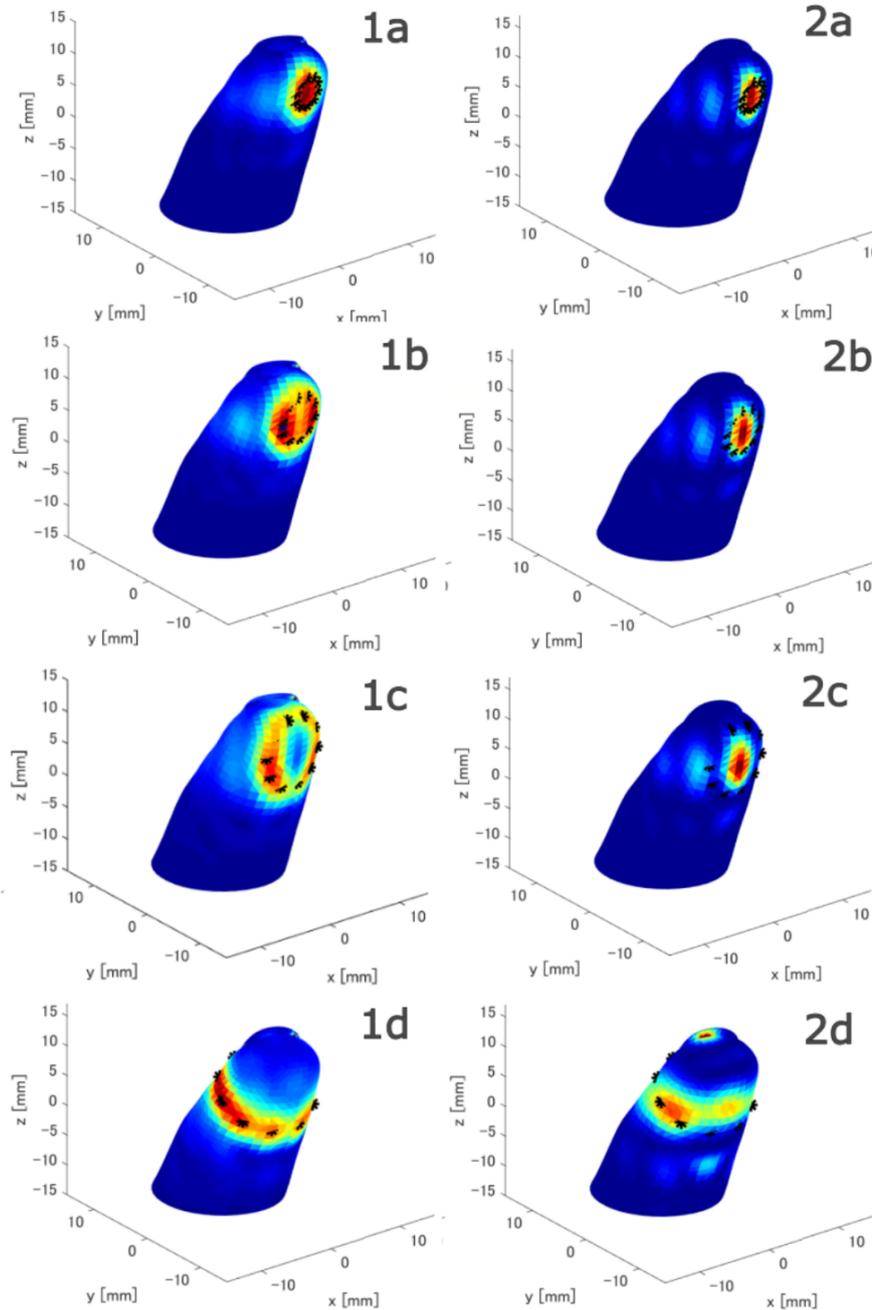


図 3.10. 触れている面の指に対する相対位置変化に応じた，時間平均圧力分布の移り変わり．
 (1a-1d) 周回焦点法により決定された 10 点のそれぞれに焦点を生成した場合に生じる
 圧力分布の平均．(2a-2d) 10 点の重心に単焦点を生成した場合の圧力分布．

- 実験 2 : 面の姿勢推定
- 実験 3 : 物体の操作性及び現実感

に関して，周回焦点法及び単焦点法の影響を検証するものである．以下でそれぞれの実験の設定，過程及び結果について詳述する．

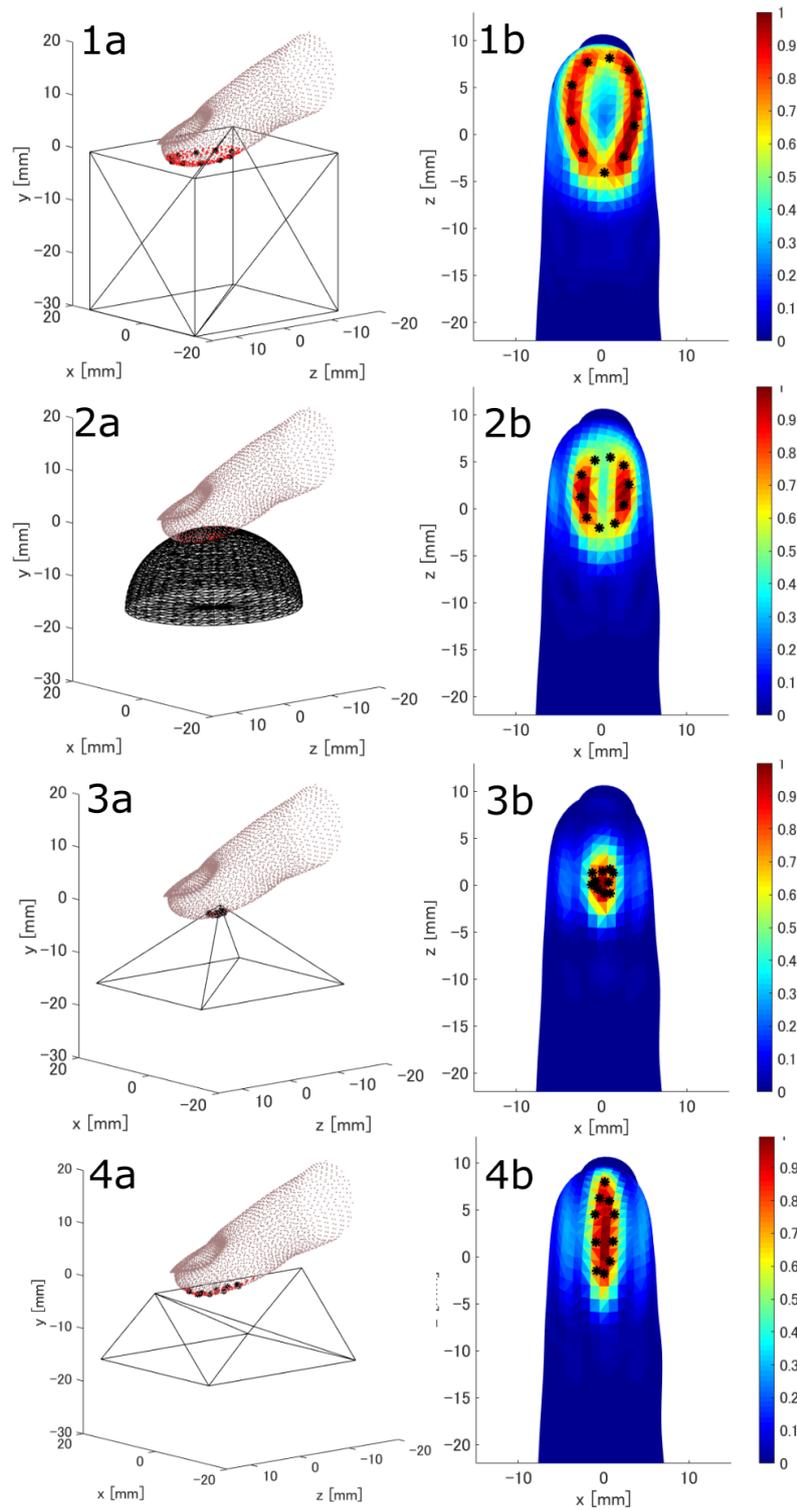


図 3.11. 形状の異なる物体に触れた際に指先に生じる時間平均圧力分布 (1a-4a) 射影法により物体表面近傍の点群から、10 個の焦点位置を決定される。(1b-4b) 10 点のそれぞれに焦点を生成した場合に生じる圧力分布の平均。

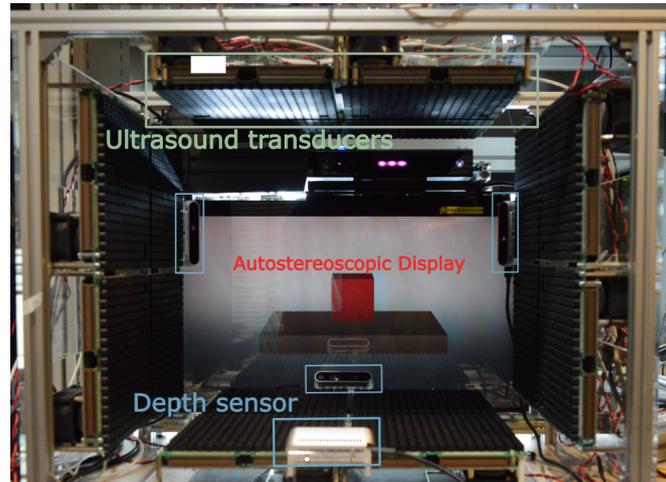


図 3.12. 実験 1 のセットアップ．3つのデプスカメラが手の形状を取得し，3984 個の振動子から超音波が発生する．ワークスペースの奥には裸眼立体視ディスプレイが設置されている．

3.5.1 実験 1：物体の形状認識

この実験では，被験者は触覚で表現された 4 種類の物体（立方体，半球，四角錐，三角柱）に触れそれを識別するタスクを行う．周回焦点法と，単焦点法とで実験を行い識別精度を比較する．

セットアップ

実験を行うために構成したプロトタイプシステムを図 3.12 に示す．このシステムでは，Intel RealSense Depth Camera D415[1] を 3 台使用して被験者の手の形状を測定する．各カメラで取得するデプスマップの解像度は 848×480 ，リフレッシュレートは 90 Hz に設定した．ワークスペースの周囲には，数値シミュレーションと同様の位置に 3984 個の超音波振動子が配置されている．振動子の中心周波数は 40 kHz であり，すべての振動子の振幅及び位相は 1.5 ms ごとに同時に更新される．掛谷らによって作成された裸眼立体視ディスプレイ [28][57] がワークスペース奥に配置されている．触覚フィードバックの焦点パスは射影法により決定する．アルゴリズムの実装は OpenCL API を用いて行い，Intel Xeon W-2123 CPU，Radeon Pro WX7100 GPU により，デプスカメラのリフレッシュレートと同様 90 Hz で処理される．アルゴリズムのパラメータについては，数値シミュレーションと同様，表面からの距離の閾値 $\sigma_d = 1.5[mm]$ ，焦点の通過点数 $M = 10$ とする．一度の振動子アレイの更新につき，焦点はこの通過点を 2 つおきに移動する．その場合，焦点は指先表面を 1 秒間に 200 回転するので，指先の一点に生じる振動触覚刺激は 200 Hz 成分が支配的となる．これは，触覚機械受容器が最も敏感な周波数である [32]．

実験手順

図 3.13(a) のように、被験者は実験をプロトタイプシステムの正面に座り実験を行う。実験中被験者は、振動子アレイの発するノイズの影響を防ぐためホワイトノイズの流れるヘッドフォンを装着する。

はじめに、実験で使用する物体の形状を知るために、被験者は 3D ディスプレイ上に表示した各物体に触れる。図 3.13(b) に示すように物体上部にマーカーとして小さなタイルが表示されている。被験者はマーカーを始点に指を上下に動かし物体に触れる。ただし、被験者は物体の上部 1.5 cm のみに触れることができ、それ未満の位置にデプスカメラで捉えた点群が存在する場合には触覚フィードバックが停止される。ひとつの物体につき 10 秒間、4 つの物体それぞれについてこれを繰り返す。

次に、被験者は物体の映像表示を消した状態で、物体に触れる時間を 3 分間与えられる。図 3.13(c) のように、この間には 3D ディスプレイにはマーカーのみが表示され、この間被験者はキーボード操作で物体の形状を自由に切り替えることができ、指に感じられる触覚の違いを感じ取ることができる。

その後被験者は、触覚フィードバックのみから物体形状を特定するタスクを繰り返し行う。これまでと同様に被験者はマーカーを始点とした上下方向の指の動きのみから、物体形状を識別する。10 秒間触れると触覚フィードバックが停止され、その後 4 つの形状の中から提示された形状を回答する。被験者は形状ごとに 10 回のタスク（計 40 回）を実行するが、それらのタスクは無作為な順序で行われる。上記のプロセスは手法間の混乱を避けるために、手法ごとに独立して行う。

結果

22 歳から 26 歳の 10 名の被験者（男性 6 名、女性 4 名）が実験を行った。図 3.14 に各被験者の正答率を示す。被験者 1-5 が単焦点法で先に実験を行い、参加者 6-10 が周回焦点法で抱きに実験を行った。全被験者での正答率の平均値は、単焦点法で 0.390、周回焦点法で 0.653 であり、ウィルコクソン符号順位検定により 2 手法間に有意差 ($p < 0.01$) が得られた。また、表 3.1, 3.2 に、各手法での混同行列を示す。

考察

すべての被験者において、周回焦点法で単焦点法よりも高い正答率となった。数値シミュレーションの結果を合わせて考慮すると、周回焦点法により指表面に発生する圧力分布から物体の形状を推定できることが示唆される。単焦点法でもある程度の正答率が得られたが、単焦点法では圧力が感じられる方向から指と物体の交差領域の高さを推定することができるためであるだろう。そのため、指を物体に侵入させたときに指先に対する相対的な交差領域の高さの変化が大きい立方体での正答率が高い。周回焦点法では高さに加え、交差領域の広さ情報をも得ることが可能であるため、その他の形状、特に特徴的な断面形状を持つ四角錐、三角柱での正答率が大きく上がるものと考えられる。正答率は被験者間で大きく異なるが、手法間での相関

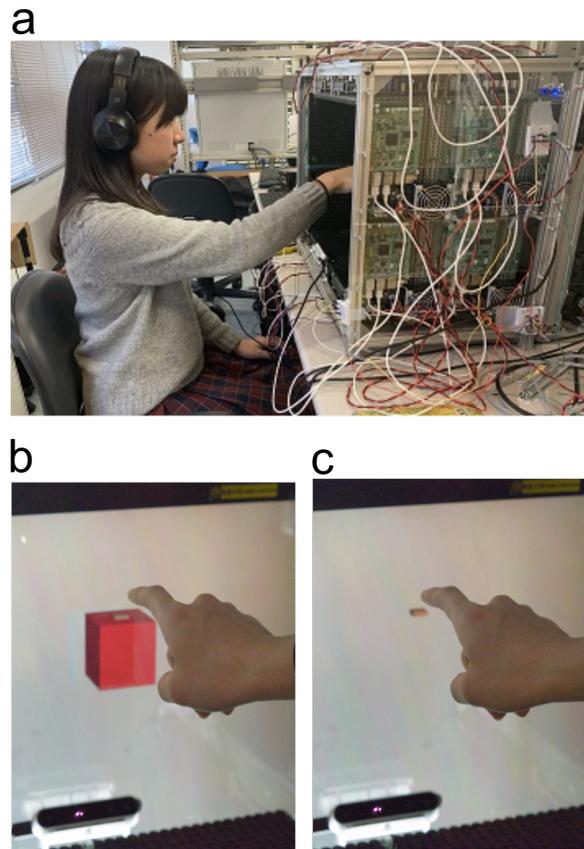


図 3.13. (a) 被験者は、ホワイトノイズをヘッドホンで聞きながらタスクを行う。(b) はじめに被験者は 3D ディスプレイに表示される物体に触れる。(c) 識別タスクを行う間は 3D ディスプレイはマーカーのみを表示する。

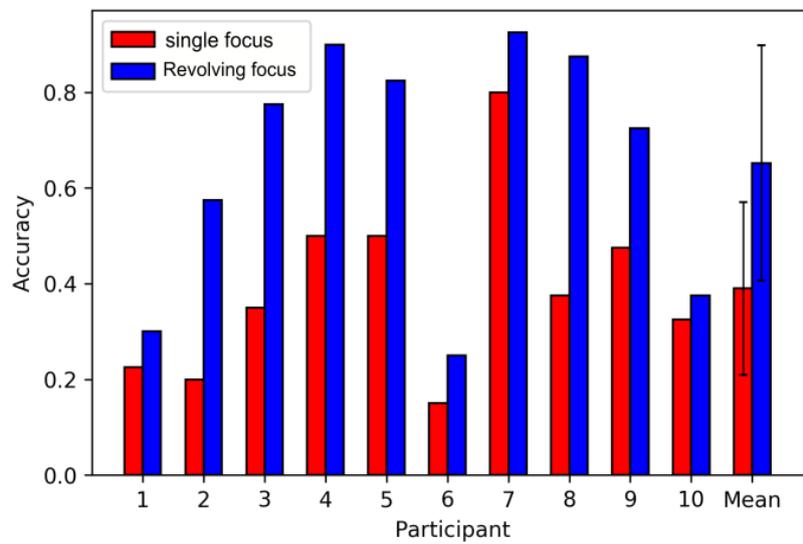


図 3.14. 各被験者の正答率とその平均値。エラーバーは標準偏差を示す。

表 3.1. 単焦点法での混同行列

actual \ predicted	立方体	半球	四角錐	三角柱
立方体	0.50	0.30	0.09	0.11
半球	0.23	0.42	0.16	0.19
四角錐	0.13	0.37	0.26	0.24
三角柱	0.17	0.18	0.27	0.38

表 3.2. 周回焦点法での混同行列

actual \ predicted	立方体	半球	四角錐	三角柱
立方体	0.74	0.14	0.02	0.10
半球	0.05	0.59	0.11	0.25
四角錐	0.02	0.30	0.65	0.03
三角柱	0.14	0.10	0.13	0.63

は非常に高い（相関係数 $r = 0.77$ ）。被験者によって物体の触りかたに大きな違いがあったことが原因の一つであると考えられる。この実験では物体に触れる速度や、物体ごとの特徴について説明をしていないが、適切な指示とトレーニングを行った場合には正答率がどのように変化するかを検証する必要がある。

3.5.2 実験 2 : 面の姿勢推定

この実験では、被験者は触覚フィードバックから物体表面の角度と位置を推定するタスクを行う。実験 1 と同様に、周回焦点法と単焦点法で推定精度を比較する。

セットアップ

図 3.15 にセットアップを示す。超音波振動子の数は 2490 であり、焦点パスは楕円法により決定する。また、デプスカメラとして一台の Intel RealSense SR300 を使用している。その他の点では実験 1 と同様である。

実験手順

はじめに図 3.16(a) のように、正方形の面が 3D ディスプレイに表示され、被験者はその面に触れながら提示される触覚フィードバックに慣れる時間を 2 分間与えられる。この間、被験者はキーボードを使用して面の角度と位置を自由に変更し、対応する触覚フィードバックの変化を知覚することができる。その後、被験者は触覚情報のみから面の位置と角度を推定するタスクを繰り返し行う。図 3.16(b) のように、触れることのみ可能な面 (haptic surface) と 3D ディスプレイに表示されるが触覚は提示されない面 (visual surface) が異なる位置に表示される。被験者は、触覚フィードバックのみを頼りに haptic surface と一致するように、visual

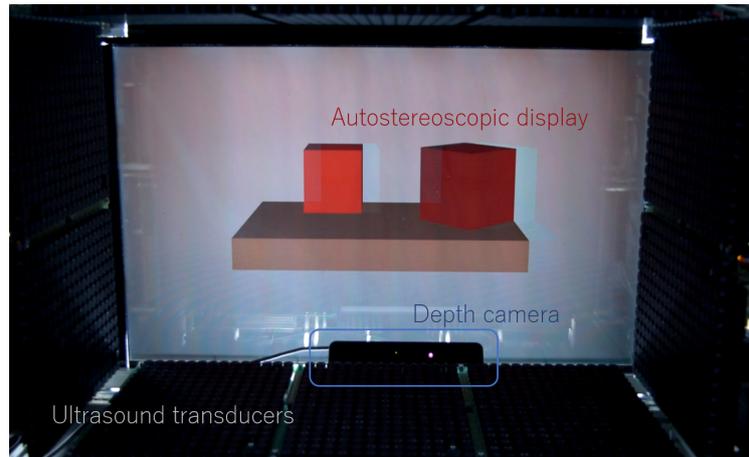


図 3.15. 実験 2 のセットアップ.

surface の位置と角度を変更する．2 つの面の位置及び角度が一致すると感じるまでこの操作を続け、操作後の 2 つの面の姿勢の差からその認識精度を評価する．visual surface は一辺 5 cm の正方形であるのに対し、haptic surface は半径 1 cm の円であり、近似された楕円の中心がこの円の内側にある場合にのみ、触覚フィードバックが提示される．上記のタスクを被験者は、周回焦点法と単焦点法のそれぞれで 20 回実行する．手法間での混同を避けるためにそれぞれの手法で別々に実験を行う．面の角度変化は、視線に対するロール方向に制限され、haptic surface の角度は各タスクで -45 - 45 度の間でランダムに変化する．1 回のキーボード操作で角度は 0.5 度変わる．面の位置は垂直方向の動きに限定され、各タスクで 2 cm の範囲でランダムに変化する．一回のキーボード操作で、位置を 0.5 mm 変更される．また、実験 1 と同様に被験者は、振動子アレイの発するノイズの影響を防ぐためホワイトノイズの流れるヘッドフォンを装着してタスクを行う．

結果

この実験では、21 歳から 26 歳までの 11 名の被験者（男性 6 名、女性 5 名）が実験を行った．推定誤差の平均と標準偏差を図 3.17 と 3.18 に示す．角度推定では、周回焦点法での平均値は単焦点法の場合よりも小さく、対応のある t 検定で有意差が得られた ($p < 0.05$)．一方で、位置推定では、2 手法間での差は小さく、対応のある t 検定に有意差は得られなかった ($p > 0.05$)．

考察

角度推定の結果は、超音波触覚フィードバックが表面の角度の認識に効果的であることを示唆している．特に周回焦点法では、角度情報をより高い精度（約 9 度の誤差）でユーザーに伝えることが可能であることが見て取れる．位置推定では、2 つの方法の間に有意差は得られなかったが、どちらの推定誤差も約 4.5 mm であり、これは、どちらの手法でも表面の位置を推定できることを示している．触覚情報のみから、触れた面の姿勢を推定することで、仮想物体

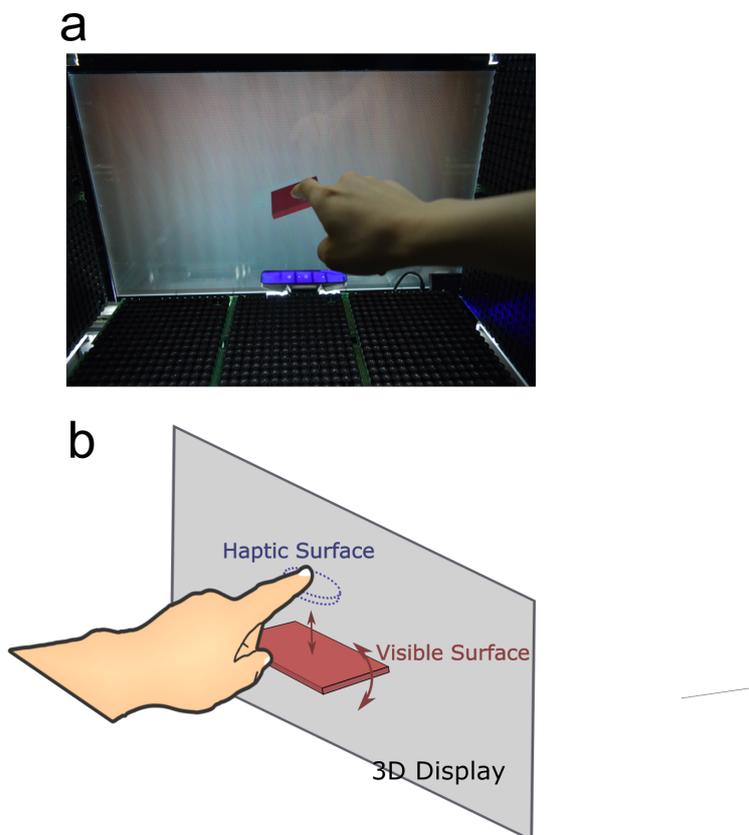


図 3.16. (a) 被験者は 3D ディスプレイに表示される面に触れてその角度、位置を推定するタスクを行う。(b) 被験者は haptic surface に一致するように、visual surface をキーボード操作で動かし回答する。

を目視せずに操作することが可能になると考えられる。

3.5.3 実験 3：物体の操作性と現実感

この実験では、仮想物体操作の一例として、立方体を把持して持ち上げる動作に関して触覚フィードバックの有効性を検証する。立方体が見えている条件と、遮蔽に隠れて見えていない条件のもとで実験を行い持ち上げる動作に必要な時間から操作性を評価する。また、アンケートを行い主観的な操作性及び現実感についても同時に評価する。

セットアップ

焦点パスは楕円法により決定する。その他の点では実験 1 と同様である。

実験手順

[手順 1]

図 3.19(a) に示すよう 3D ディスプレイ上に立方体が表示され、参加者は 3 つの触覚フィードバック条件（周回焦点法、単焦点法、フィードバックなし）のいずれかの下でそれを把持

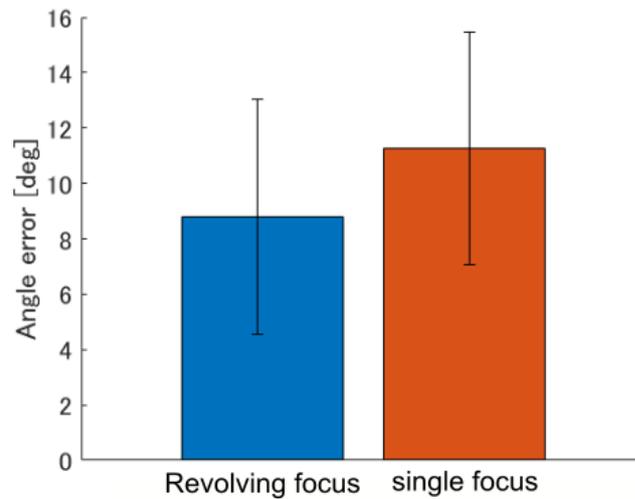


図 3.17. 角度推定における被験者平均と標準偏差

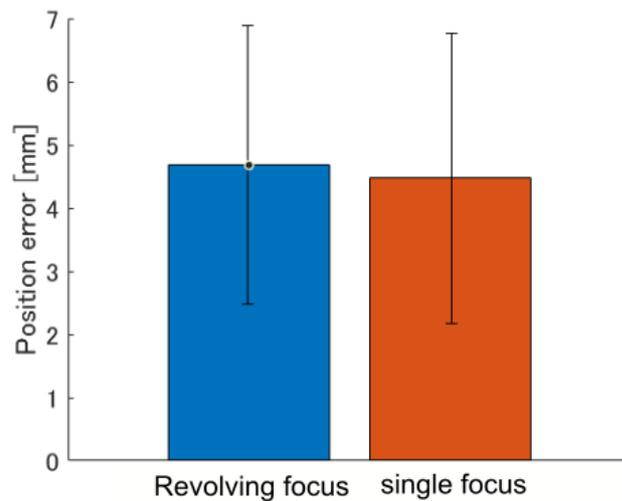


図 3.18. 位置推定における被験者平均と標準偏差

し持ち上げるタスクを繰り返し実行する。キューブを 1.5 秒間 5 cm 以上持ち上げると 1 つのタスクが完了する。立方体に触れた瞬間からタスクが完了するまでの時間を計測する。3 つのフィードバック条件のもとで一度ずつタスクを行うことを 1 セットと見なし、被験者は 25 セットのタスク（合計 75 タスク）を実行する。1 つのセット内のフィードバック条件の順序はランダムである。これまでと同様被験者は触覚フィードバック提示中に生成されるノイズの影響を防ぐためにヘッドフォンを着用する。図 3.19(b) に示すように、操作領域は不可視の壁で覆われているため立方体はその領域から出ることはない。立方体の初期位置と角度は、タスクごとに操作領域内でランダムに決定される。立方体の一辺の長さも 3~5 cm の間でランダムに変化する。75 回のタスクを完了した後、参加者は次のアンケートに回答する。

(Q1) 立方体を思い通りに持ち上げられたか。

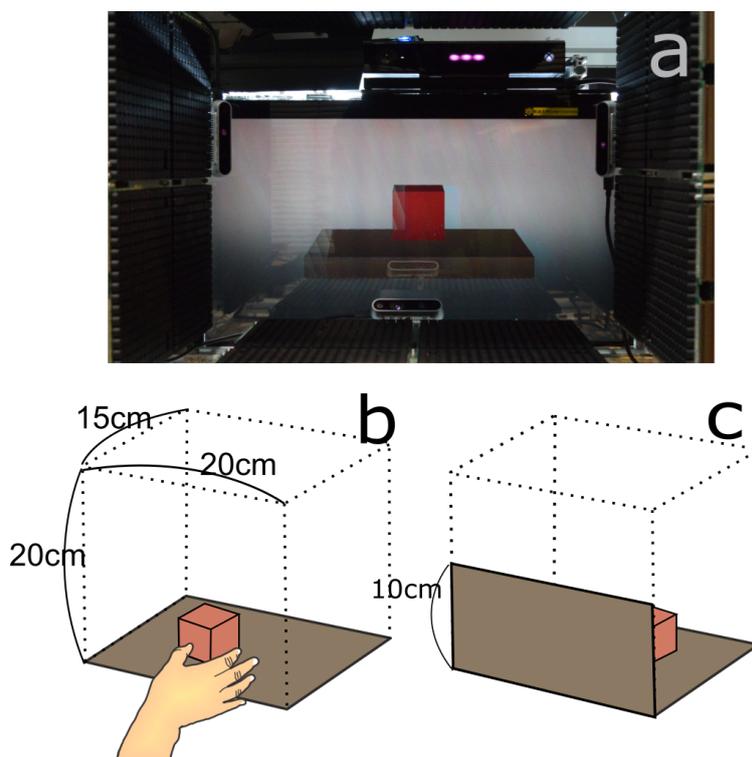


図 3.19. (a)3D ディスプレイ表示される立方体を持ち上げるタスクを行う. (b) 操作領域の周囲は見えない壁で覆われ, 立方体が落下することはない. (c) 被験者は壁の後ろの見えない立方体に対してもタスクを行う.

(Q2) 実際の物体が存在するように感じられたか.

被験者は, フィードバック条件ごとにこれらの質問に 1-7 の番号を割り当てて回答する. 1 は「全くそうではない」, 7 は「全くそうである」を意味する.

[手順 2]

次に被験者は, 図 3.16(c) に示すように, 手順 1 と同じタスクを操作領域の前に壁が存在する状態で実行した. 被験者からは壁に隠れて立方体の場所を視覚的に認識できない状況で持ち上げるタスクを行う. この壁に触ったときに触覚フィードバックは提示されない. 壁の高度は 10 cm であり, 被験者は立方体を壁の上から覗くことはできないが, 立方体を持ち上げると壁の上に出た部分を見ることができる. 2つのフィードバック条件(周回焦点法と単焦点法)のそれぞれの下で一度ずつタスクを行うことを1つのセットと見なし, 25セットのタスク(合計 50 タスク)を実行する. その後, 2つのフィードバック方法のそれぞれについて手順 1 と同様のアンケートに回答する.

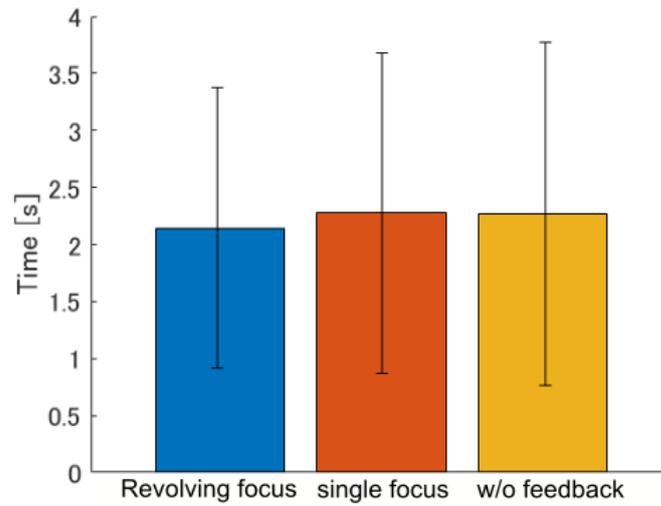


図 3.20. 立方体が見えている条件での持ち上げ動作にかかる時間の平均

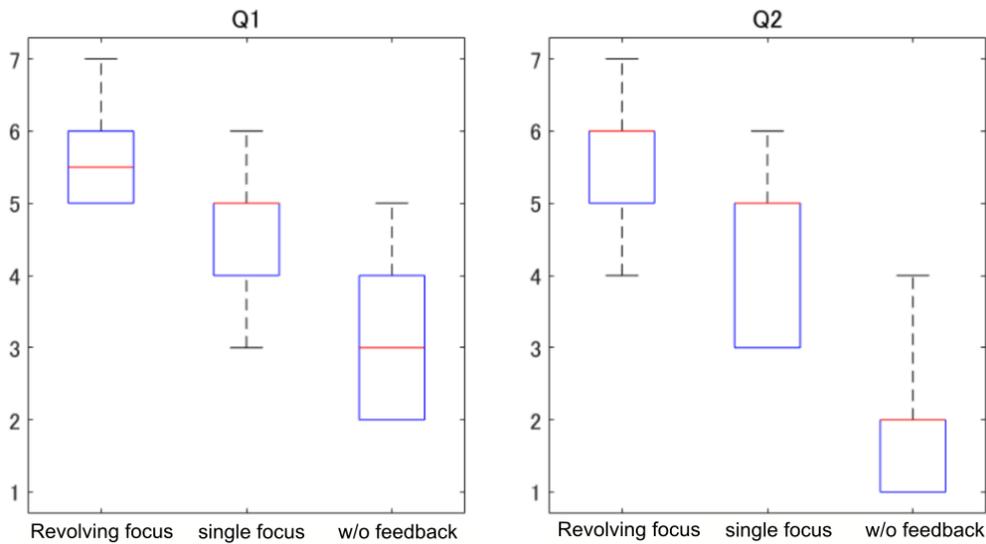


図 3.21. 立方体が見えている条件でのアンケートスコア

結果

21 歳から 25 歳までの 10 人（男性 3 名，女性 7 名）の被験者が実験を行った．図 3.20 及び 3.21 に手順 1 の結果を示す．タスクの実行時間に関して，1 元配置反復測定分散分析で 3 つのフィードバック条件の間に有意差は得られなかった．アンケートスコアについては，Friedman 検定で 3 つのフィードバック条件の間に有意差が得られた ($p < 0.05$)．事後検定として実行された Wilcoxon の符号順位検定 (Bonferroni 修正) は，フィードバック条件のすべての組み合わせ間で有意差を示した ($p < 0.05$)．

手順 2 の結果を図 3.22, 3.23 に示す．タスクの実行時間に関して，対応のある t 検定で 2

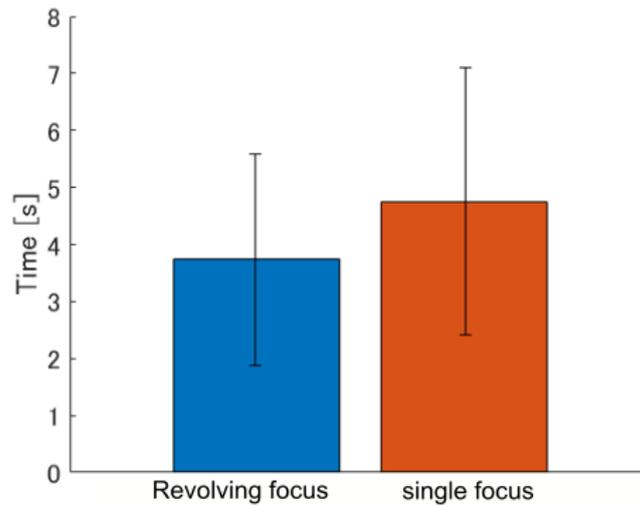


図 3.22. 立方体が見えていない条件での持ち上げ動作にかかる時間の平均

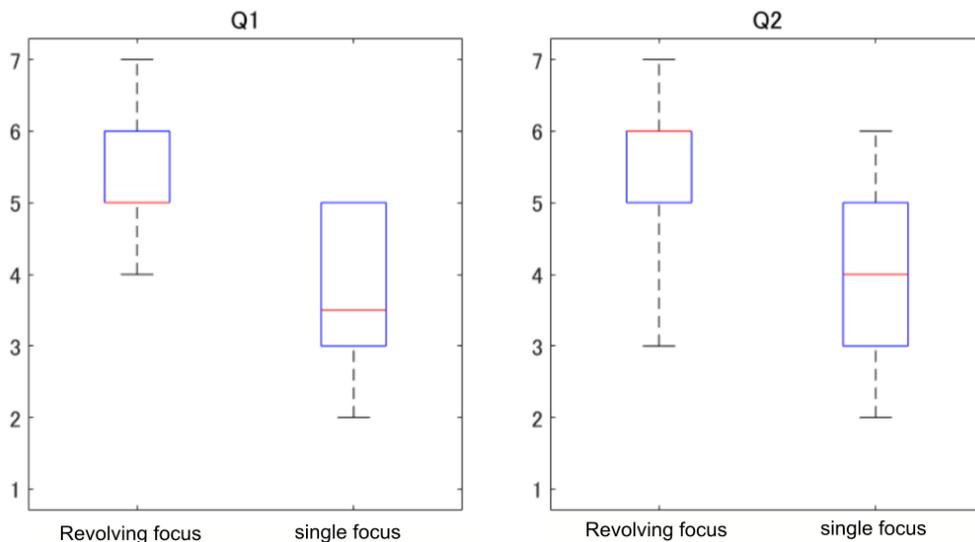


図 3.23. 立方体が見えていない条件でのアンケートスコア

つの条件の間に有意差が得られた ($p < 0.05$). アンケートのスコアに関しても, Wilcoxon の符号順位検定が有意差を示した ($p < 0.05$).

考察

手順 1 では, 触覚フィードバック提示の有無に関わらずタスク実行時間はほぼ同じである. 立方体を持ち上げた後に維持するための 1.5 秒が平均値に含まれていることを考慮すると, このシステムにおいてユーザーは視覚的な情報のみを使用して簡単にキューブを操作できることが見て取れる. しかし, アンケートスコアは, 触覚フィードバックがユーザーの主観的な操作性を向上させていることを示している. 特に周回焦点法は主観的操作性を大きく高めている.

同様の結果が主観的現実にも当てはまり、接触面積の増加に応じた圧力分布の広がりや物体の現実感を高めることが示唆される。

手順2の結果は、周回焦点法が見えない立方体を把持し持ち上げる操作を容易にすることを示している。実験2の結果を考慮すると、周回焦点法を使用した面の姿勢推定により立方体の2つの面の位置を素早く認識したことが、高速操作につながったことが示唆される。

3.6 課題

現在のシステムにはいくつかの制限がある。まず、生成される超音波分布の解像度が限られているため物体のエッジやコーナーを表現するのが困難であるという問題がある。形状表現に関する数値シミュレーション結果でみたように、エッジに触れている場合は細い分布、コーナーに触れている場合は単焦点に近い分布が生成されるが、焦点径よりも小さい分布は生成し得ない。触覚による形状認識においてはエッジやコーナーのような局所特徴の認識が重要な位置を占めていると考えられるが、現状の触覚提示方式では、面に触れた場合と比較して直感的にそれがエッジやコーナーであると認識できるほどの触覚の差を生み出すことができない。これは周波数の高い振動子を使用したより空間解像度の高い触覚ディスプレイを用いることで改善され得る。それにより多彩な触覚を表現することが可能となれば、より操作性の高いシステムが実現されるであろう。

また、手のセンシングにも課題がある。デプスカメラは可能な限り手の全面が見えるような位置に配置されているが、特定の姿勢（小さい物体をつかむ等）にある場合には死角が存在し、その部分で触れても触覚が提示されない問題が生じる。前章で使用したようなメッシュ生成手法はこの問題を解決し得るが、はじめにテンプレートモデルを作成しなければならない点、安定性が低いという問題が新たに生じる。メッシュ生成手法と手の骨格推定技術を組み合わせ、レジストレーションを必要としない安定した手表面形状の取得手法を考案することが次の目標のひとつである。

3.7 本章のまとめ

本章では、体に何も装着せずに触覚フィードバック伴う3D仮想物体の直接操作が可能なシステムを提案した。このシステムでは、深度センサーによって測定された手の姿勢に応じて物理シミュレーションを実行し、その結果を3Dディスプレイの画像に反映させる。それと同時に、触覚フィードバックを超音波フェーズドアレイによって提示する。触覚フィードバックは超音波焦点を手と物体の交差領域を周回することで提示され、それにより物体の局所的形状や面の指に対する相対位置に関する情報をユーザーに伝達することが可能である。数値シミュレーションの結果は、焦点周回経路に沿った時間平均圧力分布が生成されることを示している。

現在までに、3D映像と超音波触覚を伴うインタラクションを行えるシステムは提案されていない。そのため、被験者実験を行いそのようなシステムにおける触覚フィードバックの有効

性を、最もシンプルな触覚提示方法である単焦点法と、提案手法である周回焦点法の両方で検証した。実験結果は、単焦点法でもある程度の局所的な形状知覚が可能であるが周回焦点法はより高い精度で認識可能であることを示している。同様に、面の角度、位置認識及び見えない物体の操作精度においても周回焦点法がより良い結果となることが判明した。また、周回焦点法は操作している物体の主観的現実感をも高めることが明らかとなった。

第 4 章

実験設定と実装

本章では、第 2, 3 章で述べた実験における装置の設定及び実装したアルゴリズムについて詳述する。

4.1 手形状の取得

手指表面に適切に超音波を集束させるためには、その形状をリアルタイムに適切に計測する必要がある。2, 3 章で述べた触覚提示システムでは、市販の深度カメラである Intel RealSense [1] を複数台使用した。これらのカメラはケーブルで接続され、シャッタータイミングは同期されている [3]。

得られた深度画像についてピクセル $\mathbf{u}^D = (u^D, v^D)^T$ における値を $D(\mathbf{u}^D)$ とすると、対応するカメラ座標系における三次元位置 $\mathbf{v} = (x, y, z)^T$ は以下のようにして与えられる。

$$x = (u^D - c_u^D) / f_u^D * D(\mathbf{u}^D), \quad (4.1)$$

$$y = (v^D - c_v^D) / f_v^D * D(\mathbf{u}^D), \quad (4.2)$$

$$z = D(\mathbf{u}^D) \quad (4.3)$$

ただし、 f_u, f_v はレンズから撮像面までのピクセル単位での距離であり、 c_u, c_v はカメラ座標中心のピクセル座標である。

この式に従って、各ピクセルを 3 次元空間へ投影することで手形状を表す点群が得られる。しかし、得られた深度画像にはノイズが多く、特に異なる深度に存在する物体同士の境界付近での値は非常に不安定である。そこで、RealSense D415 に深度カメラと共に搭載されている RGB カメラを利用して、深度画像のトリミングを行う (図 4.1)。上式で得られた点 \mathbf{v} を RGB カメラのピクセル座標系 $\mathbf{u}^C = (u^C, v^C)^T$ に射影し、その位置での RGB 値 $C(\mathbf{u}^C)$ を取得する。深度画像ピクセル \mathbf{u}^D に対応する RGB 画像ピクセル \mathbf{u}^C は、

$$u^C = \lfloor x/z * f_u^C + c_u^C \rfloor, \quad (4.4)$$

$$v^C = \lfloor y/z * f_v^C + c_v^C \rfloor \quad (4.5)$$

で与えられる。

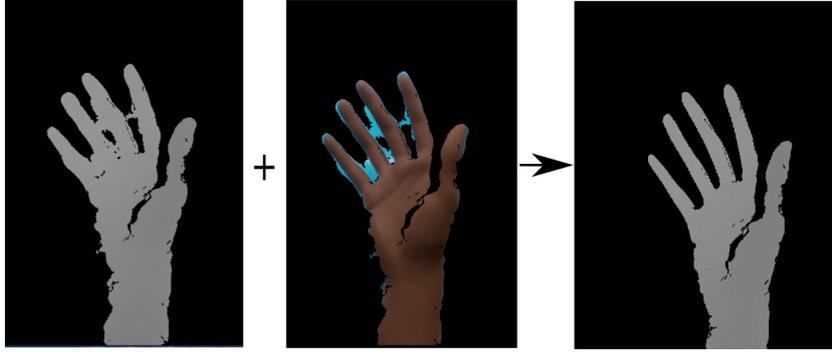


図 4.1. カラーに基づく深度マップのトリミング

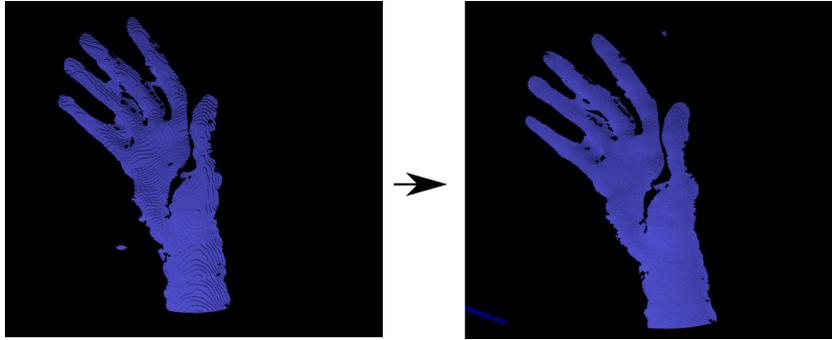


図 4.2. バイラテラルフィルタによる平滑化.

深度画像から，対応する RGB 値 $C(\mathbf{u}^D)$ を HSV 値に変換したの後に，人間の手の色に近いピクセルだけを抽出する．さらに物体境界付近の点は値が不安定であるため，収縮処理を複数回行い取り除く．収縮とは，抽出されたピクセルの内，周囲 8 ピクセルも同様に抽出されているもののみを取り出す処理を指す．

このようにしてトリミングされた深度画像にバイラテラルフィルタをかけて平滑化する（図 4.2）．平滑化後の深度値 $D'(\mathbf{u}^D)$ は，

$$D'(\mathbf{u}^D, v^D) = \frac{1}{W} \sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w D(\mathbf{u}^D + n, v^D + m) \exp \left\{ -\frac{(D(\mathbf{u}^D, v^D) - D(\mathbf{u}^D + n, v^D + m))^2}{2\sigma_D^2} - \frac{(n^2 + m^2)}{2\sigma_P^2} \right\} \quad (4.6)$$

で表される．ただし， σ^D 及び σ^P は各画素についての重み計算に必要な，深度値及びピクセル距離に関するガウス関数の分散に対応するパラメータであり，また W は重みの和を表す． w はフィルタのウィンドウサイズであるが，ウィンドウ内でのピクセルの内トリミングされたもののみで平均化している．その後再度式 (4.1)～(4.3) 従い三次元空間に投影することで，各カメラについて最終的な点群マップ $\mathbf{v}(\mathbf{u}^D)$ が得られる．実験で使用した各パラメータの値を表 4.1 に示す．ただし，各カメラパラメータの値については，は Intel RealSense SDK を通じて機器ごとの値を取得したものを使用する．上記のアルゴリズムを CUDA GPGPU framework を用いて実装し，Intel Core i7-6800K CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080Ti で実際に手の形状を取得する処理を行った場合の合計計算時間は 5.5 ms 程度である．

HSV の最小値 (8bit)	(0, 30, 0)
HSV の最大値 (8bit)	(0, 200, 255)
収縮回数	5
w	5
σ_D^2	0.1 [mm ²]
σ_P^2	1

表 4.1. 手形状を表す点群の取得における, 各パラメータの実験設定値.

4.2 動的メッシュモデル生成

第2章で述べたように, 指先触覚レンダリングシステムでは, 音場の散乱を考慮するために手形状をポリゴンメッシュモデルとしてリアルタイムに取得している. これは基本的には文献 [12][41] の手法を組み合わせたものであるが, 要所でシステムに適するよう調整を加えているので, 本節でそのアルゴリズムの概要を示す. この手法では, はじめに手を変形させない状態で動かしている (並進及び回転) 状態を複数のデプスカメラでスキャンしていくことで, 静止したテンプレートモデルを作成する. その後, 手の形状を変化させた際に得られた点群にに沿うようにテンプレートをフィッティングすることで, リアルタイムにメッシュモデルを生成する.

4.2.1 テンプレートモデルの作成

Newcomber らの手法 [41] に基づくが, 複数のカメラを使用する点, カメラではなく被写体を動かす点で異なる. この手法では, 手の形状を取得する範囲をグリッドに区切り, 各グリッドについて Signed Distance Function (SDF) の値を毎フレーム更新していくことで手の形状を表現する. 図 4.3 に示すように, SDF は物体の表面からの符号付き距離を表す位置の関数であり, 十分更新を重ねた上でグリッド上に定義される SDF に対してマーチングキューブ法 [34] を用いることで手の形状に応じたメッシュモデルを抽出することができる. 図 4.4 にアルゴリズム全体の流れを示す. ループ内では, まず 4.1 節で述べた処理により得られるカメラ i のフレーム k での点群マップ $\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) \in \mathbb{R}^3$ と, SDF から推定される手の表面位置を比較することで, そのフレームでのグローバル座標系に対する手の姿勢 $T_k \in \text{SE}_3$ を推定する. ただし,

$$T_k = \begin{pmatrix} R_k & \mathbf{t}_k \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

であり, $R_k \in \text{SO}_3$, $\mathbf{t}_k \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ回転行列, 並進ベクトルである. その後, 点群マップと手の姿勢から, グリッド上の SDF を更新する. このとき, グリッドは手の座標系上に区切られたものであり, 手の姿勢とともに位置が変化することに注意する. 以下で, 図 4.4 の各ブロックについて説明する. 以下では, グローバル座標系に対するカメラ i の姿勢行列を

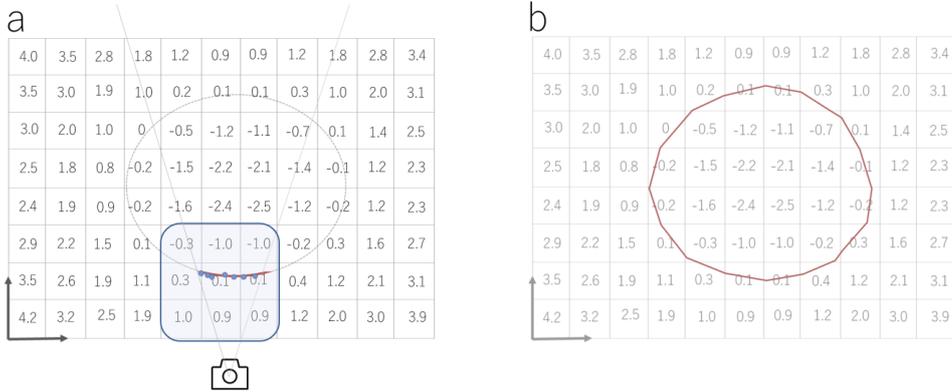


図 4.3. (a) デプスカメラで取得したデータに基づく SDF 値の更新. (b) SDF からマーチングキューブ法によりメッシュモデルを抽出.

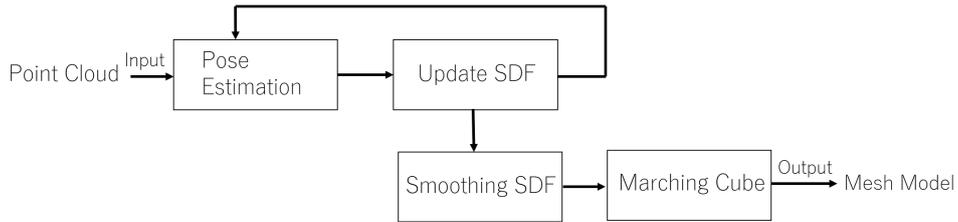


図 4.4. リジッドテンプレート作成の流れ.

$M^i \in \text{SE}_3$ とする:

$$M^i = \begin{pmatrix} R^i & \mathbf{t}^i \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

また, グローバル座標系での位置 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ をカメラ i の撮像面に射影した時のピクセル座標を $\mathbf{u}^i(\mathbf{r}) \in \mathbb{N}^2$ と表す. (式(4.4),(4.5) 参照).

SDF 更新

フレーム k でのカメラ i のみから計算される, グリッド上の点 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ の SDF 値 $f_k^i(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}$ は,

$$f_k^i(\mathbf{p}) = \psi(\|T_k \mathbf{p} - \mathbf{t}^i - M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}^i(T_k \mathbf{p}))\|) \quad (4.9)$$

$$\psi(\eta) = \begin{cases} \min(\eta, \mu) \text{sgn}(\eta) & \text{iff } \eta \geq -\mu \\ \text{null} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

となる. これは, \mathbf{p} とカメラ i の点群マップ上で \mathbf{p} の方向にある点 $\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}^i(T_k \mathbf{p}))$ の符号付距離を表している. ただし, カメラ i から見て手の表面から奥の情報は不確かなため, 関数 ϕ に

より切り取られ、 \mathbf{p} が対応する点の奥側に μ 以上離れている場合には $f_k^i(\mathbf{p})$ は値を持たない。 $k-1$ フレームでの SDF 値 $F_{k-1}(\mathbf{p})$ は、複数のカメラから得られる $f_k^i(\mathbf{p})$ との重み付き平均によって次のように更新される：

$$F_k(\mathbf{p}) = \frac{W_{k-1}(\mathbf{p})F_{k-1}(\mathbf{p}) + \sum_{i \in I_k(\mathbf{p})} f_k^i(\mathbf{p})}{W_k(\mathbf{p})}, \quad (4.11)$$

$$W_k(\mathbf{p}) = \min(W_{k-1}(\mathbf{p}) + |I_k(\mathbf{p})|, W_{max}), \quad (4.12)$$

$$I_k(\mathbf{p}) = \{i \mid f_k^i(\mathbf{p}) \neq null\} \quad (4.13)$$

$F(\mathbf{p})$ は重み W_k を持つが、 k が大きい場合に値が更新されなくなることを防ぐために、重みの最大値 W_{max} を設定する。

手の姿勢推定

フレーム $k-1$ での SDF 値 F_{k-1} から推定される手表面形状に対し、フレーム k で得られる点群をフィッティングすることでの手の姿勢 T_k を推定する。フレーム k での手表面形状推定では、SDF 値 F_k から各カメラ i の画角上にみえる手表面形状について手座標系における頂点マップ $\mathbf{V}_k^i(\mathbf{u}) \in \mathbb{R}^3$ 、法線マップ $\mathbf{N}_k^i(\mathbf{u}) \in \mathbb{R}^3$ を作成する。計測空間は SDF で記述されているため、 $\mathbf{V}_k^i(\mathbf{u})$ はレイマーチングにより求められる [44]。レイマーチングは、カメラ i のピクセル \mathbf{u} からでた光線をその場の SDF 値だけ進める操作を繰り返す手法であり、高速に手形状との交差点 $\mathbf{V}_k^i(\mathbf{u})$ を求めることが可能である。また、手の形状は SDF 値が 0 の点の集合としてあらわされるのでその点での SDF の勾配は表面に対して直交していると考えられる。よって、 $\mathbf{V}_k^i(\mathbf{u})$ での法線 $\mathbf{N}_k^i(\mathbf{u})$ は

$$\mathbf{N}_k^i(\mathbf{u}) = \nabla F_k(\mathbf{p})|_{\mathbf{p}=\mathbf{V}_k^i(\mathbf{u})} \quad (4.14)$$

のように求められる。

フレーム k で得られる点群 $\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u})$ が入力されると、まず、各点での法線 $\mathbf{n}_k^i(\mathbf{u}) \in \mathbb{R}^3$ を以下のように求められる：

$$\mathbf{n}_k^i(\mathbf{u}) = \frac{(\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}+1, v) - \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}, v)) \times (\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}, v+1) - \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}+1, v))}{\|(\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}+1, v) - \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}, v)) \times (\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}, v+1) - \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}+1, v))\|}. \quad (4.15)$$

次に、前フレーム $k-1$ で推定した手表面形状 ($\mathbf{V}_{k-1}^i(\mathbf{u}), \mathbf{N}_{k-1}^i(\mathbf{u})$) と、 $(\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}), \mathbf{n}_k^i(\mathbf{u}))$ が揃うように手の姿勢 T_k を反復法により決定する。具体的には、反復回数 t での姿勢を $T_{k,t}$ としたとき、以下のコスト関数を最小化するような $T_{k,t+1}$ を求める：

$$E(T_{k,t+1}) = \sum_i \sum_{f(\mathbf{u}) \neq null} \left\{ \left(T_{k,t+1}^{-1} M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) - \mathbf{V}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) \right)^T \mathbf{N}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) \right\}^2, \quad (4.16)$$

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{u}^i \left(T_{k-1}^{-1} T_{k,t}^{-1} M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) \right). \quad (4.17)$$

ただし $T_k^0 = T_{k-1}$ であり、また、 $\mathbf{V}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}})$ は点 $\mathbf{v}_k^i(\mathbf{u})$ に対応する頂点を示すが、その距離または法線に大きな差がある場合にはコスト関数には含めない：

$$f(\mathbf{u}) = null \text{ iff } \begin{cases} \|T_{k-1}^{-1} M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) - \mathbf{V}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}})\| & \leq \epsilon_d \\ (R^i R_k \mathbf{n}_k^i(\mathbf{u})) \cdot \mathbf{N}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) & \leq \epsilon_\theta \end{cases} \quad (4.18)$$

ここで, $T_{k,t+1}$ は $T_{k,t}$ からの変化が小さいと仮定すると,

$$T_{inc,t} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha & -\gamma & t_x \\ -\alpha & 1 & \beta & t_y \\ \gamma & -\beta & 1 & t_z \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

を用いて, $T_{k,t+1}^{-1} = T_{inc,t} T_{k,t}^{-1}$ と表せる. さらにベクトル

$$\mathbf{x} = (\beta, \gamma, \alpha, t_x, t_y, t_z)^T \quad (4.20)$$

を導入すると, コスト関数の式は線形化され,

$$E = \sum_i \sum_{f(\mathbf{u}) \neq null} \left\{ \left(G(\mathbf{u})\mathbf{x} + T_{k,t}^{-1} M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) - \mathbf{V}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) \right)^T \mathbf{N}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) \right\}^2, \quad (4.21)$$

$$G(\mathbf{u}) = \left(\left(T_{k,t}^{-1} M^i \mathbf{v} \right)_{\times} \middle| I_{3 \times 3} \right) \quad (4.22)$$

のように表される. ただし $(\mathbf{a})_{\times}$ はベクトル \mathbf{a} に関する交代行列を示す. 式 (4.20) の勾配を 0 とすることで, E を最小化する \mathbf{x} の満たす式が次のように得られる:

$$\sum_i \sum_{f(\mathbf{u}) \neq null} A^T A \mathbf{x} = \sum_i \sum_{f(\mathbf{u}) \neq null} A^T \mathbf{b}, \quad (4.23)$$

$$A^T = G^T(\mathbf{u}) \mathbf{N}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}), \quad (4.24)$$

$$\mathbf{b} = -\mathbf{N}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}})^T \left(T_{k,t}^{-1} M^i \mathbf{v}_k^i(\mathbf{u}) - \mathbf{V}_{k-1}^i(\hat{\mathbf{u}}) \right). \quad (4.25)$$

これを解いて \mathbf{x} を求め代入することで $T_{k,t+1}$ が決定される. これを繰り返し予め決められた反復回数を超えたら $T_k = T_{k,t_{max}}$ とすることで, 手の姿勢が推定される.

メッシュモデルの抽出

以上の過程を繰り返すことで手の形状に応じたグリッド上での SDF の値が決定される. しかし, 指の隙間等の点群が計測されづらい部分の SDF 値は十分に更新されず, 抽出されるメッシュに穴が生じる可能性がある. 第2章で述べた境界要素モデルを適用するために必要な多様体メッシュを構成するために, 抽出前に SDF の平滑化を行う [11]. 上記の過程で求められた SDF 値 $F(\mathbf{p})$ とその重み $W(\mathbf{p})$ をもとに, 反復的に平滑化後の SDF 値 $F_t(\mathbf{p})$ とその点が無効であるかどうかを示す 2 値関数 $\nu_t(\mathbf{p}) \in [-1, 1]$ を更新していく. はじめに,

$$(F_0, \nu_0) = (F, [W > 0]) \quad (4.26)$$

とする. 一回の反復で,

$$(\hat{F}_{t+1}, \nu_{t+1}) = h * (F_t, \nu_t), \quad (4.27)$$

$$F_{t+1} = \frac{W}{W_{max}} F + \left(1 - \frac{W}{W_{max}} \right) \hat{F}_{t+1} \quad (4.28)$$

と更新される. 式 (4.26) における h との畳み込みはローパスフィルターとなればその種類を問わないが, 本研究では周囲 $3 \times 3 \times 3$ 個の値の平均をとることを意味する.

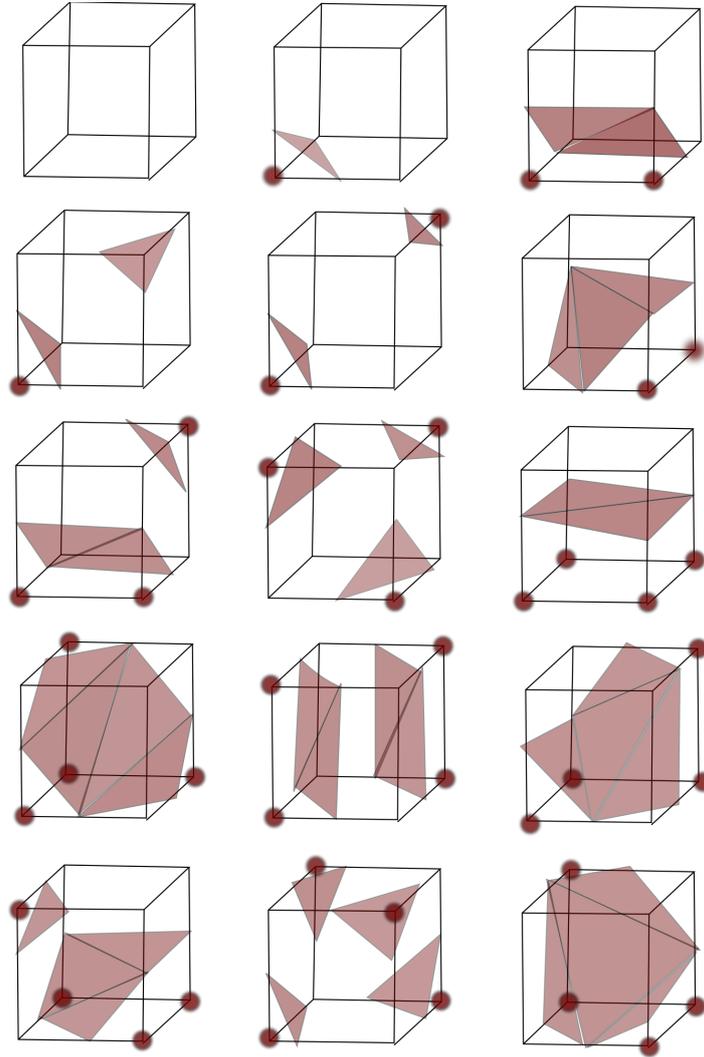


図 4.5. マーチングキューブ法によるポリゴン生成

平滑化後の SDF を利用して，マーチングキューブ法によりメッシュモデルを抽出する．マーチングキューブ法では，グリッド上の立方体を成す 8 つの点の組の SDF 値 F_1, F_2 の符号の組み合わせに応じて三角形を生成する．符号の組み合わせは 2^8 通りあるが，対称性を考慮すると図 4.2.1 の 15 通りにまとめられる．グリッド上の隣接する 2 点 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ について，それぞれの SDF 値 F_1, F_2 の符号が異なる場合，位置 \mathbf{v} ：

$$\mathbf{v} = \frac{|F_2|}{|F_1 - F_2|} \mathbf{p}_1 + \frac{|F_1|}{|F_1 - F_2|} \mathbf{p}_2 \quad (4.29)$$

が頂点になるような三角形が生成される．これをグリッド全体で行うことで，表面上で SDF 値が 0 であるポリゴンメッシュモデルを抽出することができる．

得られるメッシュモデルは測定ノイズの影響で，不適切な凹凸形状を持つ場合がある．これを取り除くためにラプラシアン平滑化 [52] を繰り返し行う． t 回の平滑化後のメッシュモデルの頂点 i の座標を $\mathbf{v}_i^t \in \mathbb{R}^3$ とし，それと辺を共有する頂点の集合を A_i としたとき， $t+1$ 回の



図 4.6. 生成されたリジッドテンプレートの例

データ取得領域	200 [mm] × 300 [mm] × 200 [mm]
ボクセル数	100 × 100 × 100
μ	8 [mm]
W_{max}	40
ϵ_d	0.002 [mm ²]
ϵ_θ	0.65
SDF 平滑化反復回数	10
λ	0.1
メッシュモデル平滑化反復回数	5

表 4.2. リジッドテンプレート生成における、各パラメータの実験設定値.

平滑化後の頂点は,

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \frac{\lambda}{|A_i|} \sum_{j \in A_i} (v_j^t - v_i^t) \quad (4.30)$$

となる. $\lambda \in (0, 1)$ は, 平滑化の程度を決める定数である. 以上の過程より実際に取得されたメッシュモデルを 4.2.1 に示す. また, 実験時の各パラメータを表 4.2.1 に示す. 上記のアルゴリズムを CUDA GPGPU framework を用いて Intel Core i7-6800K CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080Ti GPU 上に実装し, リジッドテンプレートを生成した場合の 1 ループでの計算時間は 8.2 ms 程度である.

4.2.2 テンプレートの動的フィッティング

リアルタイムに手の形状を表すメッシュモデルを生成する. 概ね Dou らの手法 [12] に基づくが, 前節で述べた手法によりあらかじめ取得されたリジッドテンプレートを用いるという点で異なる. デプスセンサから得られる点群に対し, コスト関数が小さくなるような変形パラメータを求めることでリジッドテンプレートをフィッティングする.

本手法では、少数のパラメータを用いて手の形状の変化を表すために、embedded deformation (ED) model [49] を用いる。リジッドテンプレートモデルの頂点の中から ED ノードを K 個選び、その位置を $\mathbf{g}_k \in \mathbb{R}^3, k \in \{1, \dots, K\}$ とする。テンプレートモデルの各頂点 $\mathbf{v}_m \in \mathbb{R}^3$ は、近傍の N 個の ED ノード $\mathcal{S}_m \subseteq \{1, \dots, K\}$ にスキニングされ、その移動に応じて位置が変化する。ED ノード k は、アフィン変換行列 $A_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ と並進ベクトル $\mathbf{t}_k \in \mathbb{R}^3$ を持ち、メッシュモデル全体のグローバルな姿勢変化を表す回転行列 $R \in \mathbb{SO}_3$ 、並進ベクトル $T \in \mathbb{R}^3$ と併せて変形パラメータ集合 $G = \{R, T\} \cup \{A_k, \mathbf{t}_k\}_{k=1}^K$ とする。このとき、テンプレートモデルの頂点 m の変形後の位置 $\hat{\mathbf{v}}_m(G) \in \mathbb{R}^3$ は、

$$\hat{\mathbf{v}}_m(G) = R \sum_{k \in \mathcal{S}_m} w_k^m [A_k(\mathbf{v}_m - \mathbf{g}_k) + \mathbf{g}_k + \mathbf{t}_k] + T \quad (4.31)$$

で表される。ただし、 w_k^m は頂点 m の ED ノード k に対するスキニングの重みであり、

$$w_k^m = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{v}_m - \mathbf{g}_k\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.32)$$

とする。ただし、 Z は $\sum_{k \in \mathcal{S}_m} w_k^m = 1$ となるための正規化定数であり、 σ^2 は予め定められた ED ノードの分散パラメータである。同様に、各頂点での法線ベクトル \mathbf{n}_m は変形後に、

$$\hat{\mathbf{n}}_m(G) = R \sum_{k \in \mathcal{S}_m} w_k^m A_k^{-T} \mathbf{n}_k \quad (4.33)$$

となる。これらの関係式をもとに、デプスセンサから得られた点群集合に沿うように変形するようパラメータ集合 G を決定する。具体的には、以下のコスト関数 $E(G)$ を最小化する問題を考える：

$$E(G) = \lambda_{data} E_{data}(G) + \lambda_{rot} E_{rot}(G) + \lambda_{smooth} E_{smooth}(G) + \lambda_{hull} E_{hull}(G). \quad (4.34)$$

λ はコスト関数における各項の重みを決定する定数である。各項の詳細については、以下で説明する。

$E_{data}(G)$

コスト関数の主要項であり、 N 個のデプスセンサから得られた点群マップ $\mathbf{p}_n(\mathbf{u}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ 、法線マップ $\mathbf{x}_n(\mathbf{u}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ へのフィッティングの程度を表す：

$$E_{data}(G) = \sum_{n=1}^N \sum_{m \in V_n(G)} (\hat{\mathbf{n}}_m^T (\hat{\mathbf{v}}_m - \mathbf{p}_n(\Pi_n(\hat{\mathbf{v}}_m))))^2. \quad (4.35)$$

ただし、 $\Pi_n(\mathbf{v}) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ はデプスカメラ n の点群マップのピクセル座標への投影を表す。また、 $V_n \subseteq \{1, \dots, M\}$ はデプスカメラ n に対して有効な（見えている）頂点の集合であり、以下のように決定される：

$$m \in V_n \text{ if } \begin{cases} \Pi_n(\hat{\mathbf{v}}_m) \text{ is valid} \\ \text{and } \|\hat{\mathbf{v}}_m - \mathbf{p}_n(\Pi_n(\hat{\mathbf{v}}_m))\|_2 \leq \epsilon_d \\ \text{and } \hat{\mathbf{n}}_m^T \mathbf{x}_n(\Pi_n(\hat{\mathbf{v}}_m)) \leq \epsilon_n \end{cases} \quad (4.36)$$

ただし、 ϵ_d, ϵ_n は位置誤差、角度誤差の許容範囲を表す定数である。

$E_{rot}(G)$

アフィン変換行列 $A_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ の回転行列への近さを表す項であり

$$E_{rot}(G) = \sum_{k=1}^K \|A_k^T A_k - I\|_F + \sum_{k=1}^K (\det(A_k) - 1)^2 \quad (4.37)$$

のように表される。ただし、 $\|A\|_F$ はフロベニウスノルム、 $\det(A)$ は行列式を表す。

$E_{smooth}(G)$

近傍の ED ノードのアフィン変換行列 $A_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ の類似度に関する項であり、

$$E_{smooth}(G) = \sum_{k=1}^K \sum_{j \in \mathcal{N}_k} w_{j,k} (\|A_j(\mathbf{g}_k - \mathbf{g}_j) + \mathbf{g}_j + \mathbf{t}_j - (\mathbf{g}_k + \mathbf{t}_k)\|_2^2) \quad (4.38)$$

と表される。ただし、 $w_{j,k}$ は ED ノード同士の距離に基づく重みを表し、

$$\exp\left(-\frac{\|\mathbf{g}_k - \mathbf{g}_j\|_2^2}{2\sigma_{ed}^2}\right) \quad (4.39)$$

で定められる。 σ_{ed} は、すべての ED ノードの組に関する距離の平均とする。また、 $\mathcal{N}_k \subseteq \{1, \dots, K\}$ は ED ノード k の近傍の ED ノードの集合であり、その大きさ $|\mathcal{N}_k|$ は k によらず一定である。上記の 2 項 $E_{rot}(G)$, $E_{smooth}(G)$ はメッシュモデルにある程度の剛性を持たせ、非合理的な変形を妨げる効果を持つ。

$E_{hull}(G)$

$E_{data}(G)$ は、変形モデルが点群に十分近い場合にのみ有効であるため、その範囲から外れた部分に対しての拘束力を持たない。そのため、各デプスセンサから得られるシルエットの外に頂点が存在する場合にそれを内側に引き戻すような拘束力を与える visual hull 制約項 $E_{hull}(G)$ をコスト関数に追加する。 $E_{hull}(G)$ は、各頂点がすべてのデプスカメラのシルエット内に収まっている場合に 0 であり、外側にある場合内部までの最短距離を示す関数 $H(\mathbf{v}) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ を用いて以下のように定義される：

$$E_{hull}(G) = \sum_{m=1}^M H(\hat{\mathbf{v}}_m)^2 \quad (4.40)$$

厳密に $H(\mathbf{v})$ を求めることは計算コストが非常に大きいため、代わりに近似関数 $H'(\mathbf{v})$ を構成する。まず、データ取得領域を格子状に分割し、各格子点 $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z)$ に対し定義される関数 $h(\mathbf{g}) \in (0, 1)$ を考える。格子点 \mathbf{g} を各デプスカメラのピクセル座標に投影し、すべてのデプスマップで前景に含まれる場合には $h(\mathbf{g}) = 1$ とし、それ以外では $h(\mathbf{g}) = 0$ とする。その後 h に対しガウシアンフィルタをかける：

$$h'(\mathbf{g}) = \sum_{x=-W_g}^{W_g} \sum_{y=-W_g}^{W_g} \sum_{z=-W_g}^{W_g} \exp\left\{-\frac{(h(\mathbf{g}) - h(\mathbf{g} + (x, y, z)))^2}{2\sigma_g^2}\right\} \quad (4.41)$$

その後 $1 - h'$ を線型補完をすることで、 $H'(\mathbf{v})$ が求められる。

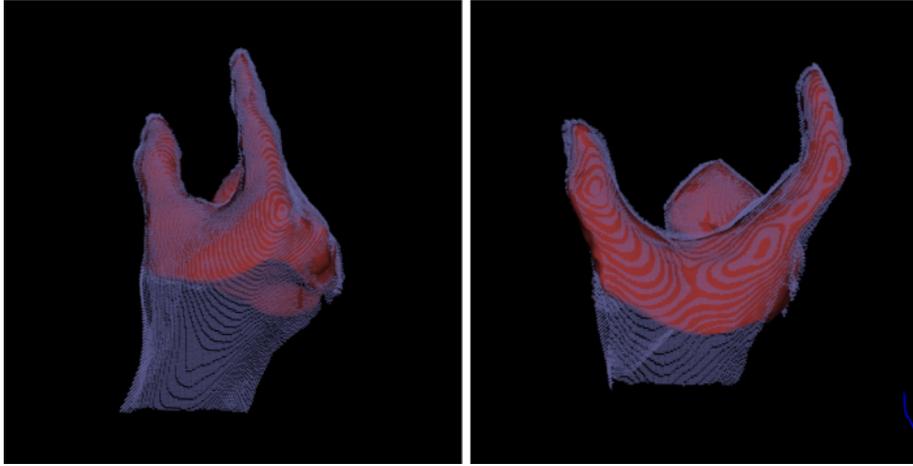


図 4.7. 動的メッシュモデル生成

パラメータの最適化

上記のコスト関数は二乗和の形になっているので、Levenberg-Marquardt 法によりパラメータ集合 G の最適化を行う。パラメータを並べたベクトル $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^D$ に対してコスト関数を $E(\mathbf{h}) = \mathbf{f}^T \mathbf{f}$ と表すと、1 反復でのステップ $d\mathbf{h} \in \mathbb{R}^D$ は、

$$(J^T J + \mu I) d\mathbf{h} = -J^T \mathbf{f} \quad (4.42)$$

を解くことで求められる (第二章参照)。 $J^T J + \mu I$ は疎な正定値対称行列であるので、共役勾配法 [15] を用いることで高速に求解可能である。

以上の過程により、リジッドテンプレートの手の形状変化に応じたフィッティングが行われる。フィッティングの例を図 4.7 に示す。また、実験時の各パラメータを表 4.3 に示す。上記のアルゴリズムを CUDA GPGPU framework を用いて実装し、Intel Core i7-6800K CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080Ti GPU 上で処理する場合、実験設定では 1 ループに要する計算時間は 22.1 ms 程度である。

4.3 面要素上の数値積分

2 章で手表面での反射を表す行列 V を求めるためには、メッシュモデルを構成する三角形上での積分値が必要となるが、このような面要素上の積分では計算効率と精度を考慮し Gauss-Legendre 求積法が広く使用されている。三角形上で Gauss-Legendre 求積を行う手法は数多く提案されているが、ここでは [20] に従う。三角形上の点をパラメータ $(s, t) \in \mathbb{R}^2$, $s \geq 0, t \geq 0, (1 - s - t) \geq 0$ で表したとき、関数 $f(s, t)$ の三角形上での積分値 I は

$$I = \int_0^1 \int_0^{1-t} f(s, t) ds dt \quad (4.43)$$

データ取得領域	250 [mm] × 500 [mm] × 250 [mm]
E_{hull} での格子点数	100 × 100 × 100
λ_{data}	1
λ_{rot}	0.1
λ_{smooth}	0.1
λ_{hull}	0.0001
$ \mathcal{S}_m $	8
$ \mathcal{N}_k $	4
σ^2	4 [mm ²]
ϵ_d	7 [mm]
ϵ_n	0.5
W_g	3
σ_g^2	1

表 4.3. メッシュモデルのフィッティングにおける、各パラメータの実験設定値。

で与えられる。ここで

$$s = \frac{1+u}{2}, \quad t = \frac{(1-u)(1-v)}{4} \quad (4.44)$$

となるような変数 $(u, v) \in \mathbb{R}^2$, $-1 \leq u, v \leq 1$ に変換すると、ヤコビ行列の行列式は、

$$\frac{\partial s}{\partial u} \frac{\partial t}{\partial v} - \frac{\partial s}{\partial v} \frac{\partial t}{\partial u} = \frac{1-u}{8} \quad (4.45)$$

となるので、式 4.46 より、

$$\begin{aligned} I &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f\left(\frac{1+u}{2}, \frac{(1-u)(1-v)}{4}\right) \frac{1-u}{8} dudv \\ &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g(u, v) dudv \end{aligned} \quad (4.46)$$

となる。これは Gauss-Legendre 求積の標準形であり、

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g(u, v) dudv \simeq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j g(u_i, v_i) \quad (4.47)$$

で近似される。ただし、 u_i, v_j は n 次の Legendre 多項式 $P_n(x)$ の零点であり、重み w_i は、

$$w_i = \frac{2}{(1-u_i^2)[P_n'(u_i)]^2} \quad (4.48)$$

で求められる。次数 n を適切に選ぶことで式 4.47 により任意の精度で I の近似値が求められる。このとき

$$s_{ij} = \frac{1+u_i}{2}, \quad t_{ij} = \frac{(1-u_i)(1-v_j)}{4} \quad (4.49)$$

s_{ij}	t_{ij}	c_{ij}
0.112701665	0.10000000	0.068464377
0.112701665	0.443649167	0.109543004
0.112701665	0.787298334	0.068464377
0.500000000	0.056350832	0.061728394
0.500000000	0.250000000	0.098765432
0.500000000	0.443649167	0.061728395
0.887298334	0.012701665	0.008696116
0.887298334	0.056350832	0.013913785
0.887298334	0.100000000	0.008696116

表 4.4. Gauss-Legendre 求積に用いる点 s_{ij}, t_{ij} と重み c_{ij}

として, $c_{ij} = w_i w_j \frac{1-u_i}{8}$ を用いると,

$$\begin{aligned}
 I &\simeq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j f g(u_i, v_i) \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} f(s_{ij}, t_{ij})
 \end{aligned} \tag{4.50}$$

のように近似値を $f(s_{ij}, t_{ij})$ の線形結合記述できる. 2章の実験では計算効率を考慮し $n = 3$ とした. そのときの, s_{ij}, t_{ij}, c_{ij} の値を表 4.3 に示す (参考 [46]).

4.4 メッシュモデルに対する内部判定と最短距離算出

3章での物理シミュレーションを行うためには, デプスカメラから得られた各点が仮想物体内部に存在するかを判定し, さらに内部に存在する点に関しては表面との最短距離を求めることが必要となる. 以下では, 仮想物体が三角形で構成されるポリゴンメッシュモデルで表現される場合を考える.

内部判定

図 4.8 のように, ある点 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ がメッシュモデル内部に存在する場合には, \mathbf{r} を通る半直線が横切る面要素 (三角形) の数が奇数となり, 外部に存在する場合には偶数となる. ここでは, z 軸正方向に伸ばした半直線で判定することを考える. 三角形を構成する頂点座標を $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^3$, $i \in \{1, 2, 3\}$ としたとき, \mathbf{r} から z 軸方向に伸ばした直線とそれらを通る平面の交点 $\bar{\mathbf{r}} \in \mathbb{R}^3$ をパラメータ u, t を用いて,

$$\bar{\mathbf{r}} = (1 - u - t)\mathbf{v}_1 + u\mathbf{v}_2 + t\mathbf{v}_3 \tag{4.51}$$

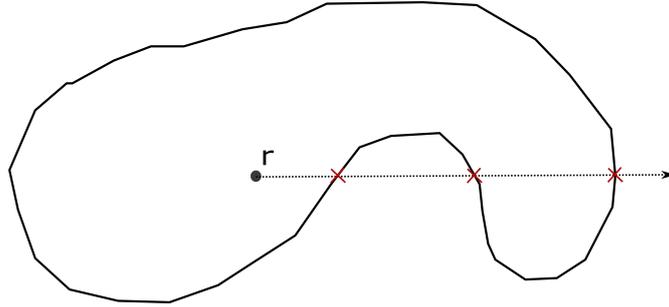


図 4.8. メッシュモデルに対する内部判定. そこから伸ばした半直線との交点が奇数の点はモデル内部に存在する.

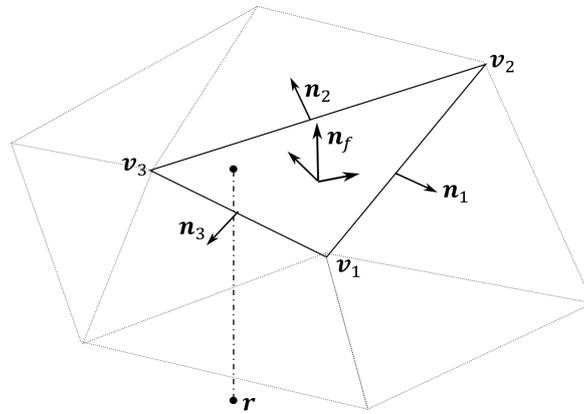


図 4.9. 最短距離の算出

と表すと, $dz = \|\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{r}\|_2$ を用いて,

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ t \\ dz \end{pmatrix} \quad (4.52)$$

となるので, 線型方程式を解くことで, u, t, dz が求められる. 上式が解を持ち $u \leq 1, t \leq 1, (1 - u - t) \leq 1$, 及び $dz \geq 0$ となるとき, \mathbf{r} から z 軸正方向に伸ばした半直線と三角形は交点を持つ. 並列演算装置を利用してそのような三角形の数を数え上げることで, 高速に点群の内部判定を行うことが可能である.

4.4.1 表面との最短距離算出

点 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ のメッシュモデル表面に対する最短距離は, メッシュを構成するすべての三角形に対する最短距離のうち最小のものである. 図 4.9 のように, 三角形を構成する頂点座標を $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^3, i \in \{1, 2, 3\}$, 三角形を含む平面の外向き法線を $\mathbf{n}_f \in \mathbb{R}^3$, 三角形の各辺に関しての平面上外向きの法線を $\mathbf{n}_i \in \mathbb{R}^3, i \in \{1, 2, 3\}$ とする. このとき, \mathbf{r} から三角形を含む平面に下した垂線の足は $\bar{\mathbf{r}}$ は,

$$\bar{\mathbf{r}} = \mathbf{r} - (\mathbf{r} - \mathbf{v}_1)^T \mathbf{n}_f \quad (4.53)$$

である。ただし、 $(\mathbf{r} - \mathbf{v}_1)^T \mathbf{n}_f \geq 0$ の場合には、その面との最短距離が最小となることはない。このため、この計算は行わない。そうでない場合には、三角形の各辺と $\bar{\mathbf{r}}$ との符号付距離

$$d_i = (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{v}_i)^T \mathbf{n}_i \quad (4.54)$$

を求める。すべての辺 i に対し $d_i \geq 0$ の場合には、垂線の足 $\bar{\mathbf{r}}$ は三角形内部にあるため、最短距離は、

$$(\mathbf{r} - \mathbf{v}_1)^T \mathbf{n}_f \quad (4.55)$$

となる。それ以外の場合には、 $d_i > 0$ となる辺 i に対し \mathbf{r} との最短距離を求める。 $j = i + 1 \pmod{3}$ とおき、

$$t = \frac{(\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{v}_i)^T (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i)}{\|\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i\|} \quad (4.56)$$

としたとき、辺 i と \mathbf{r} の最短距離 d_{min} は以下のように表される。

$$d_{min} = \begin{cases} \|\mathbf{r} - \mathbf{v}_i\| & \text{if } t < 0 \\ \|\mathbf{r} - \mathbf{v}_j\| & \text{if } t > 0 \\ \|\mathbf{r} - (1-t)\mathbf{v}_i - t\mathbf{v}_j\| & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (4.57)$$

すべての辺に対する最小距離を求め、メッシュモデルを構成するすべての面での比較を行うことで、点 \mathbf{r} のメッシュモデル表面への最小距離とその位置が得られる。上記の方法の計算コストは大きく、デプスセンサで得られるすべての点に対してリアルタイムに最短距離を求めることはできない。しかし、物体内部にある点を予め求めた後にそれらの点に対してのみ処理を行えば、十分な速度で距離算出が可能である。上記のアルゴリズムを CUDA GPGPU framework を用いて実装し、Intel Core i7-6800K CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080Ti GPU 上で処理する場合、5000 面の三角形で構成されるメッシュモデルに対して 200 点の最短距離計算を行った際の計算時間は 5.0ms 程度である。

4.5 超音波振動子アレイ

本研究では、大規模な超音波振動子アレイを構成するために図 4.10 のようなアレイユニットを複数使用した。一つのユニットにつき、249 の振動子 (日本セラミック T4010A1) が格子状に配置されている。振動子の開口部の直径は 9.8 mm であり、中心周波数は 40 kHz である。これらの振動子は [26] で提案されたアーキテクチャにより、イーサネットケーブルで接続された他のユニットと同期して駆動する。同期したすべての振動子の振幅および周波数は独立して変更することができ、そのリフレッシュレートは 1000Hz である。

一つの振動子が振動する際に生成される音場を考える。これを無限平面上の開口から出る平面波による回折音場とみなすと、位置 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}$ での音圧 $p(\mathbf{r}) \in \mathbb{C}$ は開口 S に関する Rayleigh-Sommerfeld 積分により次のように与えられる [13] :

$$p(\mathbf{r}) = \frac{j\rho c k u}{2\pi} \int_S \frac{e^{-jk\|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\|}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\|} dS. \quad (4.58)$$

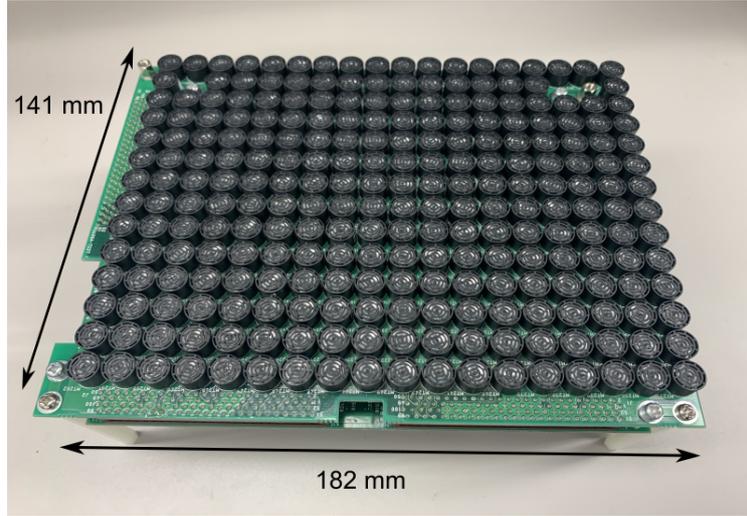


図 4.10. 振動子アレイユニット

ただし, j は虚数単位, ρ, c は媒質の密度及び音速, $k = \omega/c$ は波数を表す. また, $ue^{j\omega t} \in \mathbb{C}$ は, 振動子表面での粒子速度である. 開口が半径 a の円であり \mathbf{r} の開口からの距離が十分大きい場合には, 上式は次のように近似される [61]:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{j\omega\rho ua^2}{2\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c\|} e^{-jk\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c\|} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}. \quad (4.59)$$

ただし, \mathbf{r}_c は開口中心であり, θ は $\mathbf{r} - \mathbf{r}_c$ と開口の法線の成す角度を表す. また J_1 1 次のベッセル関数である.

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (4.60)$$

を指向性関数と呼ぶ. 図 4.11 に $a = 4.9$ であるときの指向性関数のプロットを示す.

以上から, 同一の速度で駆動する M 個の振動子が \mathbf{r} につくる音場は,

$$p(\mathbf{r}) = A \sum_{m=1}^M D(\theta_m(\mathbf{r})) \frac{e^{-jk\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c^m\|}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c^m\|} \quad (4.61)$$

と近似される. ただし, $A = j\omega\rho ua^2/2$ とした.

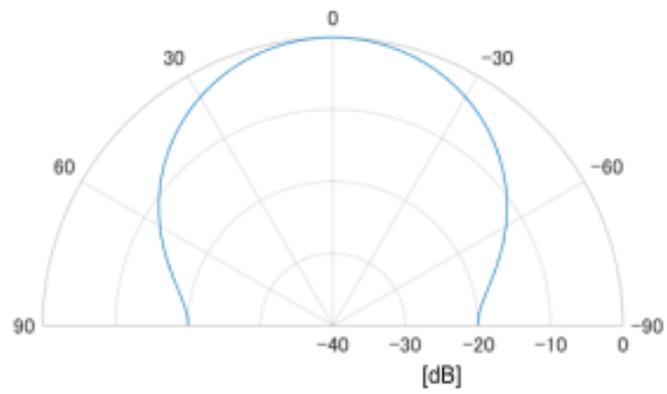


図 4.11. 振動子の指向性

第5章

結論

本論では、超音波振動子ドアレイを用いて指先皮膚上に圧力分布を生成する手法について述べた。特に、その応用先に応じて2種の触覚フィードバック手法を提案した。

第2章では、物理的に正確な分布再現を目指し、手表面での音場の散乱を考慮したうえで、指先に生じる音圧分布をリアルタイムに制御する手法について述べた。この手法は、デプスカメラで計測された手の形状に応じてリアルタイムにポリゴンメッシュモデルを生成し、その面上の音圧振幅分布を振動子位相の最適化により制御する数値シミュレーションにより、この手法を用いることで様々な形状の圧力振幅分布をリアルタイム再現可能であることが示された。また、被験者実験では指先に生成された一定振幅圧力分布の幅をある程度認識可能であることが示された。

第2章では、指が物体に触れた時にその交差領域の形状を周回するように焦点を高速で動かすことで、その物体の局所的な形状及び面の相対位置を表現する触覚フィードバック手法を提案した。更に、それを利用して3D仮想物体の直接操作が可能なシステムを構成し、そのシステムにおける触覚フィードバックの有効性について検証した。既存の超音波触覚アプリケーションで一般的に使用される単焦点法と、提案手法の両方で検証を行ったところ、結果は単焦点法でもある程度の局所的な形状知覚が可能であるが周回焦点法はより高い精度で認識可能であることを示した。同様に、面の角度、位置認識及び見えない物体の操作精度においても周回焦点法がより良い結果となることが判明した。また、周回焦点法は操作対象物体の主観的現実感をも高めることが明らかとなった。

この2種のフィードバック手法は完全に独立するものではない。2章での分布再現法は振動子複素振幅と指先に生じる圧力の関係が与えられる一方で、3章で述べた超音波焦点の高速周回による手法は、知覚強度の高い触覚刺激を提示できるという利点を持つ。それらを組み合わせ、指先に生じる時間平均圧力分布を再現できるような焦点の移動経路を求めることで、両者の利点を併せ持つ手法が構成され得る。そのような手法の提案や、それを利用したインタラクションシステムの構築が今後の展開と一つとなるだろう。

手法及びデバイスの改良を行いより詳細な圧力分布の制御が可能となれば、人間の知覚特性を検証する上でも有用な手段となるだろう。指先に何も接触させることなく皮膚上の圧力パターンを自由に変化させて実験を行うことができれば、様々な知覚特性の評価が可能となり、

それにより触覚フィードバック手法の更なる改善へと繋がるだろう。本論で述べた数値シミュレーション及び被験者実験では指先への圧力提示のみを扱ったが、本論で提案した触覚提示手法は本来指先以外にも適用可能である。手のひらや顔表面での使用も可能でありそれらにおける解明すべき人間の触覚特性は多く残されている。

謝辞

博士課程3年間の研究生活において非常に多くの方々のお力添えを頂きました。指導教員である篠田裕之教授には、研究方針に関する助言や論文原稿の精査のみならず、様々な部分で大変お世話になりました。特に、研究者として考え方、在り方について多くのことを教授して頂いたことに深く感謝しております。牧野泰才准教授からは研究発表や論文執筆に対する姿勢について学ばせていただきました。理解の難しい発表に対し、的確にその理由を説明し改善策を提案する姿を見て、非常に感銘を受けたことを記憶しております。また、研究の応用先を見出す独創的な発想には常に驚かされていました。藤原正浩特任助教には、篠田・牧野研究室で研究生活をおくる上での基盤を整備して頂いたことに深く感謝しております。定期的な学生間でのミーティングや、メンター制度が導入されたことで、研究室全体での効率が大きく向上したように思います。

篠田・牧野研究室の皆様には、研究内容の相談から、研究室外での生活まで、様々なことについて支援して頂きました。皆様に日々刺激を受け、非常に充実した研究生活を送ることができたことに感謝致します。

第 6 章

参考文献

- [1] Intel realsense (2020), <https://www.intelrealsense.com/>
- [2] Ultraleap ltd. (2020), <https://www.ultraleap.com/>
- [3] Using the intel realsense depth cameras d4xx in multi-camera configurations (2020), <https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/emerging-technologies/intel>
- [4] Aliabadi, M.H.: The boundary element method, volume 2: applications in solids and structures, vol. 2. John Wiley & Sons (2002)
- [5] Beattie, D., Georgiou, O., Harwood, A., Clark, R., Long, B., Carter, T.: Mid-air haptic textures from graphics. Proc. IEEE World Haptics (WiP paper) (2019)
- [6] Bergamasco, M., Allotta, B., Bosio, L., Ferretti, L., Parrini, G., Prisco, G., Salsedo, F., Sartini, G.: An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1449–1454. IEEE (1994)
- [7] Bianchi, G., Knoerlein, B., Szekely, G., Harders, M.: High precision augmented reality haptics. In: Proceedings of EuroHaptics. vol. 6, pp. 169–178 (2006)
- [8] Butler, A., Hilliges, O., Izadi, S., Hodges, S., Molyneaux, D., Kim, D., Kong, D.: Vermeer: Direct interaction with a 360° viewable 3d display. In: Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp. 569–576. ACM (2011)
- [9] Carter, T., Seah, S.A., Long, B., Drinkwater, B., Subramanian, S.: UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology. pp. 505–514. ACM (2013)
- [10] Chandler-Wilde, S.N., Graham, I.G., Langdon, S., Spence, E.A.: Numerical-asymptotic boundary integral methods in high-frequency acoustic scattering. *Acta numerica* **21**, 89–305 (2012)
- [11] Davis, J., Marschner, S.R., Garr, M., Levoy, M.: Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. In: Proceedings. First International Symposium on 3D

- Data Processing Visualization and Transmission. pp. 428–441. IEEE (2002)
- [12] Dou, M., Khamis, S., Degtyarev, Y., Davidson, P., Fanello, S.R., Kowdle, A., Escolano, S.O., Rhemann, C., Kim, D., Taylor, J., et al.: Fusion4d: Real-time performance capture of challenging scenes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **35**(4), 1–13 (2016)
- [13] Ebbini, E.S., Cain, C.A.: Multiple-focus ultrasound phased-array pattern synthesis: optimal driving-signal distributions for hyperthermia. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* **36**(5), 540–548 (1989)
- [14] Fitzgibbon, A., Pilu, M., Fisher, R.B.: Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **21**(5), 476–480 (1999)
- [15] Fletcher, R., Reeves, C.M.: Function minimization by conjugate gradients. *The computer journal* **7**(2), 149–154 (1964)
- [16] Freeman, E., Anderson, R., Williamson, J., Wilson, G., Brewster, S.A.: Textured surfaces for ultrasound haptic displays. In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction*. pp. 491–492 (2017)
- [17] Frier, W., Ablart, D., Chilles, J., Long, B., Giordano, M., Obrist, M., Subramanian, S.: Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air. In: *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. pp. 270–281. Springer (2018)
- [18] Gavrilov, L.R.: The possibility of generating focal regions of complex configurations in application to the problems of stimulation of human receptor structures by focused ultrasound. *Acoustical Physics* **54**(2), 269–278 (2008)
- [19] Halir, R., Flusser, J.: Numerically stable direct least squares fitting of ellipses. In: *Proceedings of 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization*. vol. 98, pp. 125–132. Citeseer (1998)
- [20] Hammer, P., Marlowe, O., Stroud, A.: Numerical integration over simplexes and cones. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation* **10**(55), 130–137 (1956)
- [21] Hasegawa, K., Shinoda, H.: A method for distribution control of aerial ultrasound radiation pressure for remote vibrotactile display. In: *SICE Annual Conference , 2013 Proceedings of.* pp. 223–228. IEEE (2013)
- [22] Hilliges, O., Kim, D., Izadi, S., Weiss, M., Wilson, A.: HoloDesk: Direct 3d interactions with a situated see-through display. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. pp. 2421–2430. ACM (2012)
- [23] Hoshi, T., Abe, D., Shinoda, H.: Adding tactile reaction to hologram. In: *RO-MAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. pp. 7–11. IEEE (2009)
- [24] Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T., Shinoda, H.: Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*

- 3**(3), 155–165 (2010)
- [25] Inoue, S., Makino, Y., Shinoda, H.: Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram. In: Proceedings of the World Haptics Conference. pp. 362–367. IEEE (2015)
- [26] Inoue, S., Makino, Y., Shinoda, H.: Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In: Proceedings of the International AsiaHaptics conference. pp. 99–103. Springer (2016)
- [27] Iwamoto, T., Tatzono, M., Shinoda, H.: Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In: Proceedings of the International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. pp. 504–513. Springer (2008)
- [28] Kakeya, H., Okada, K., Takahashi, H.: [papers] time-division quadruplexing parallax barrier with subpixel-based slit control. *ITE Transactions on Media Technology and Applications* **6**(3), 237–246 (2018)
- [29] Kim, H.S., Kim, J.S., Jung, G.I., Jun, J.H., Park, J.R., Kim, S.P., Choi, S., Park, S.J., Choi, M.H., Chung, S.C.: Evaluation of the possibility and response characteristics of laser-induced tactile sensation. *Neuroscience letters* **602**, 68–72 (2015)
- [30] Kim, N.W., Shin, D.H., Kim, D.J., Lee, B.G., Kim, E.S.: Vision-based 3d fingertip interface for spatial interaction in 3d integral imaging system. In: Proceedings of the International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems. pp. 1006–1011 (2009)
- [31] Korres, G., Eid, M.: Haptogram: ultrasonic point-cloud tactile stimulation. *IEEE Access* **4**, 7758–7769 (2016)
- [32] Lamore, P., Muijsers, H., Keemink, C.: Envelope detection of amplitude-modulated high-frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors. *The Journal of the Acoustical Society of America* **79**(4), 1082–1085 (1986)
- [33] Long, B., Seah, S.A., Carter, T., Subramanian, S.: Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound. *ACM Trans. Graph.* **33**(6), 181:1–181:10 (2014–11)
- [34] Lorensen, W.E., Cline, H.E.: Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *ACM siggraph computer graphics* **21**(4), 163–169 (1987)
- [35] Madsen, K., Nielsen, H., Tingleff, O.: Methods for non-linear least squares problems (2nd ed.) p. 60 (01 2004)
- [36] Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S., Shinoda, H.: HaptoClone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback. In: Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 1980–1990. ACM (2016)
- [37] Melder, N., Harwin, W.S.: Extending the friction cone algorithm for arbitrary poly-

- gon based haptic objects. In: 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proceedings. pp. 234–241. IEEE (2004)
- [38] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, pp. 8–es (2007)
- [39] Monnai, Y., Hasegawa, K., Fujiwara, M., Yoshino, K., Inoue, S., Shinoda, H.: HaptoMime: Mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In: Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp. 663–667. ACM (2014)
- [40] Nagano, H., Sase, K., Konyo, M., Tadokoro, S.: Wearable suction haptic display with spatiotemporal stimulus distribution on a finger pad. In: 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC). pp. 389–394. IEEE (2019)
- [41] Newcombe, R.A., Izadi, S., Hilliges, O., Molyneaux, D., Kim, D., Davison, A.J., Kohi, P., Shotton, J., Hodges, S., Fitzgibbon, A.: Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp. 127–136. IEEE (2011)
- [42] Ochiai, Y., Kumagai, K., Hoshi, T., Rekimoto, J., Hasegawa, S., Hayasaki, Y.: Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **35**(2), 17 (2016)
- [43] Palovuori, K., Rakkolainen, I., Sand, A.: Bidirectional touch interaction for immaterial displays. In: Proceedings of the 18th International Academic MindTrek Conference: Media Business, Management, Content & Services. pp. 74–76 (2014)
- [44] Parker, S., Shirley, P., Livnat, Y., Hansen, C., Sloan, P.P.: Interactive ray tracing for isosurface rendering. In: Proceedings Visualization'98 (Cat. No. 98CB36276). pp. 233–238. IEEE (1998)
- [45] Rakkolainen, I., Sand, A., Raisamo, R.: A survey of mid-air ultrasonic tactile feedback. In: 2019 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM). pp. 94–944. IEEE (2019)
- [46] Rathod, H., Kallur, N., Br, V., RAMESH, N.: Gauss legendre quadrature over a triangle. *Journal of the Indian Institute of Science* **84** (09 2004)
- [47] Rendl, F., Rinaldi, G., Wiegale, A.: Solving max-cut to optimality by intersecting semidefinite and polyhedral relaxations. *Mathematical Programming* **121**(2), 307 (2010)
- [48] Sand, A., Rakkolainen, I., Isokoski, P., Raisamo, R., Palovuori, K.: Light-weight immaterial particle displays with mid-air tactile feedback. In: 2015 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE). pp. 1–5.

IEEE (2015)

- [49] Sumner, R.W., Schmid, J., Pauly, M.: Embedded deformation for shape manipulation. In: ACM SIGGRAPH 2007 papers, pp. 80–es (2007)
- [50] Takahashi, R., Hasegawa, K., Shinoda, H.: Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli. In: Proceedings of the International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. pp. 276–288. Springer (2018)
- [51] Ting, C., Jen, T., Chen, C., Shieh, H.D., Huang, Y.: 3d air-touch user interface with high touch accuracy on stereoscopic displays. *Journal of Display Technology* **12**(5), 429–434 (2016)
- [52] Vollmer, J., Mencl, R., Mueller, H.: Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes. In: Computer graphics forum. vol. 18, pp. 131–138. Wiley Online Library (1999)
- [53] Wang, G.Z., Huang, Y.P., Chang, T.S., Chen, T.H.: Bare finger 3d air-touch system using an embedded optical sensor array for mobile displays. *Journal of Display Technology* **10**(1), 13–18 (2014)
- [54] Yamaguchi, M., Higashida, R.: Holographic 3d touch sensing display. In: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. pp. DM3A–1. Optical Society of America (2015)
- [55] Yamaguchi, M., Higashida, R.: 3d touchable holographic light-field display. *Applied optics* **55**(3), A178–A183 (2016)
- [56] Yosioka, K., Kawasima, Y.: Acoustic radiation pressure on a compressible sphere. *Acta Acustica United with Acustica* **5**(3), 167–173 (1955)
- [57] Zhang, Q., Kakeya, H.: A high quality autostereoscopy system based on time-division quadplexing parallax barrier **E97-C**(11), 1074–1080 (2014)
- [58] Zilles, C.B., Salisbury, J.K.: A constraint-based god-object method for haptic display. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. vol. 3, pp. 146–151. IEEE (1995)
- [59] Zollhöfer, M., Nießner, M., Izadi, S., Rehmann, C., Zach, C., Fisher, M., Wu, C., Fitzgibbon, A., Loop, C., Theobalt, C., et al.: Real-time non-rigid reconstruction using an rgb-d camera. *ACM Transactions on Graphics (ToG)* **33**(4), 1–12 (2014)
- [60] 鎌倉友男: 非線形音響学の基礎. 愛智出版 (1996)
- [61] 三井田惇郎: 音響工学 (21世紀を指向した電子・通信・情報カリキュラムシリーズ). 昭晃堂 (1987)