



吸引圧力の時空間分布制御に基づく装着型触覚ディスプレイ —柔軟物接触時に生じる力分布の実時間計算法—

佐瀬一弥¹⁾, 永野光²⁾, 昆陽雅司²⁾, 齊藤薫²⁾, 田所諭²⁾

1) 東北学院大学 工学部 (〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1 丁目 13-1, sase@mail.tohoku-gakuin.ac.jp)

2) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, nagano@rm.is.tohoku.ac.jp, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: 指腹における吸引圧分布を動的に変化させることで硬軟感や多方向の外力が生起される。この現象を用いた吸引圧触覚ディスプレイは指腹への高密度な力分布提示が可能であり、VR 物体把持における触覚のリアリティを大幅に向上させる可能性がある。そこで本研究では本装置に必要なとされるハプティックレンダリング手法を開発する。本論文では、剛体-柔軟物接触シミュレーションをベースとした接触力分布の実時間計算法とその性能評価について報告する。

キーワード: 吸引圧, 触覚, ハプティックレンダリング, 物理シミュレーション

1. 緒言

バーチャルリアリティ (VR) においてユーザと VR 環境の間で接触に伴う力学的相互作用が生じる場合、ユーザ身体に作用する外力などの力学的情報を提示するために触覚ディスプレイが必要となる。これまでに、様々な形態の触覚ディスプレイが提案されてきたが、指腹のような狭い領域に対し空間的に分布する外力を提示することは、デバイスの構造的な制約が厳しく現在においても実現が難しい。指腹に対する触覚提示の試みとして、指先に装着した小型モータで発生させた力をリンク機構やワイヤによって伝達し剛体部品を指腹に押し付けることで変形させる触覚ディスプレイが提案されている [2, 3]。これらは 3 自由度の接触力提示を実現しているが、接触部品が剛体であるため接触面積や圧力分布の制御が困難である。また、任意の圧力分布提示のために多自由度化を目指す方向性が考えられるが、多自由度化に伴い機構が複雑化していくため、小型軽量かつ高密度な圧力分布提示は困難である。別のアプローチとして、永野らは皮膚吸引圧刺激による押し込み圧錯覚に着目した指先装着型触覚ディスプレイを開発した [6]。同手法では、指先を覆う指サック状の柔軟部品において、指腹接触部分に多数の吸引口を設け、吸引口における吸引圧力を制御することで時空間圧力分布の制御を行う。ディスプレイと指腹間で接触状態を保持し、圧力印加によって多様な触覚を提示する原理であるため、小型軽量化・高密度化・大面積化において有利である。これまでの実験により、吸引圧力分布の提示による硬軟感や多方向の力の生起が確認され、今後は VR 物体把持における触覚提示への応用などへの展開が期待される。特に、剛体接触式触覚ディスプレイでは

接触力と接触面積の独立な制御が困難であったが、吸引式触覚ディスプレイではこれらの物理量を圧力分布制御により制御可能である。そのため、把持力によって接触面積が大きく変化する柔軟物体の把持において、特に優位な性能を示すことが期待される。

そこで本研究では、永野ら [6] の触覚ディスプレイを用いた、触覚を伴うインタラクティブな VR 柔軟物体把持の実現を目指し、そのために必要となるハプティックレンダリング手法を開発する。本論文では、接触対象物を柔軟物体、指先を剛体とし、実時間計算可能な物理シミュレーション手法、および、剛体表面の任意位置における圧力値の計算方法について述べる。また、提案手法の評価のために行った、指先による柔軟物体押し込みシミュレーションの結果を報告する。

2. ハプティックレンダリング手法

剛体 (指先) と柔軟物体の接触時における接触部圧力分布を計算するには、剛体の位置姿勢を入力とし、それに基づいて柔軟物体の変形および接触部反力を実時間計算する必要がある。一般的な接触シミュレーションでは以下のような計算の流れで行われることが多い。各時刻において、まず始めに剛体-柔軟物体間の接触判定を行う。もし物体同士が干渉していれば、それを解消するような拘束や接触反力を与え、剛体と柔軟物体頂点を適切に変位させる。さらに、触覚提示のためには、変位だけでなく接触部における反力を求める。

本研究の手法でも上記の流れで処理が行うが、特に計算量削減を考慮して手法を選択した。特徴は以下の通りである。

1. 接触判定は変形符号付距離場を利用。
2. 干渉の解消にペナルティ法を採用。

Kazuya SASE, Hikaru NAGANO, Masashi KONYO, Kaoru SAITO, and Satoshi TADOKORO

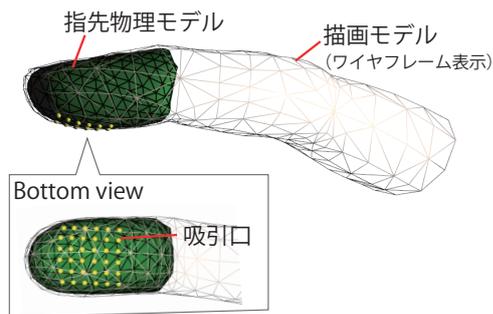


図 1: 指モデル

3. 柔軟物体の変形計算に有限要素法を採用。
4. 時間積分に陰解法（後退オイラー法）を採用。
5. 吸引口の圧力は、剛体頂点の圧力から補間。
6. 過剰変位抑制のためバーチャルカップリングを利用。

これらの手法について説明する。

特徴 1 接触判定

柔軟物体の接触判定は、形状が絶えず変形するため大量のプリミティブ同士の接触を考慮しなければならず、全体の処理の中でも特に計算量が多い部分である。本研究では前処理として初期形状における符号付距離場を作成し、各時刻における変形形状に基づいてその符号付距離場を変形させる変形符号付距離場（deformed distance field, DDF）のアプローチを用いる [1, 5]。DDF を用いることである点が物体体積の内側にあるか外側にあるかの判定（内外判定）と、内側にある場合に侵入方向と侵入深さを取得してその位置から最も近い表面位置を推定することができる。本手法では、剛体頂点に対して DDF を用いた内外判定および表面位置推定を行い、剛体頂点が物体内側にあれば推定した表面位置まで押し返すような拘束を与える。符号付距離場による表面位置推定は定数時間で完了するが、DDF では変形した四面体メッシュの中で剛体頂点を内包する四面体を探索する処理が追加される。四面体探索を高速化するため空間分割を用いた探索手法を実装した。

特徴 2, 3, 4 干渉の解消, 変形計算, 時間積分

ペナルティ法は、干渉を解消するペナルティを与えるものであり、本研究では剛体頂点と柔軟物体表面間にバネダンパ要素を設置する方法をとる。変形計算手法には、corotational linear FEM を採用し、回転を伴う大変形が可能な線形弾性体モデルとした。時間積分は、時間刻みを 16 ms 程度（60 FPS）を想定し、時間刻みが大きい場合でも安定性が得られる陰解法を用いる。

特徴 5 圧力分布計算

本研究における指モデルの例を図 1 に示す。なお、このモデルは後述の評価で用いたものである。指モデルは、接触判定対象として物理計算が行われる剛体である物理モデル（指先物理モデル）と、グラフィクス表示用の描画モデルからなる。物理モデルは閉じた三角形メッシュであり、接触を想定する部分は可能な限り一様の密度で配置した頂点で構

成される三角形ポリゴンである。物理モデル表面には触覚ディスプレイの吸引口に対応した点群が定義される。点群の配置パターンは任意に設定可能である。各吸引口における接触圧力は以下の順序で求められる。まず、物理演算の結果として指先物理モデルの各頂点において、接触の反作用力である接触力ベクトルが得られる。接触力ベクトルと指先物理モデルの頂点法線ベクトルとの内積をとって、頂点の等価面積（頂点周辺三角形の面積を 3 で除して総和を取った値）で除した値が、頂点における圧力となる。次に、吸引口における圧力を計算する。吸引口を内包する三角形ポリゴンを予め対応付けておき、三角形頂点における圧力値を線形補間して吸引口の値とする。このようにすることで触覚ディスプレイの構成と物理モデルを分離し、物理シミュレーションのハードウェア依存を小さくすることができる。また、吸引口が増加しても計算量にほとんど影響を与えないため、ソフトウェアの計算速度の制約を気にせずにハードウェアの設計を行うことができると期待される。

特徴 6 バーチャルカップリング

特徴 6 のバーチャルカップリング（VC）とは、VR 空間におけるユーザの操作対象物（指先物理モデル）と現実空間の触覚ディスプレイの間にバーチャルなバネダンパ要素を挿入する方法である。一般的には、応答性と安定性のバランスをとるために用いられるが、本手法では過剰な変位を抑えて視覚的妥当性を補償するために採用した。吸引圧触覚ディスプレイだけでは外界からの外力を発生できないため、現実空間のユーザの動きは外力の制約を受けない。そのため、指先物理モデルを実際の指先位置と一致させると、過剰に物体に指を押し込んでしまうことが予想される。このような過剰な変位を避けるために VC が有効と考えられる。また、VC を用いることで接地型触覚ディスプレイとの併用も容易に行うことができることも利点である。VC の採用に伴い剛体の動力学を考慮する必要があるが、ペナルティ法によるバネダンパ要素によって結合された剛体と柔軟物体の動力学をひとつの連立微分方程式として記述し、後退オイラー法により時間積分を行うことで高いペナルティ係数を用いても安定な実装とした [4]。

触覚提示のための変換処理

以上のようにして、指先の位置姿勢を入力として吸引口の提示圧力の計算を実現した。ただし、実際の触覚ディスプレイでは複数の吸引口が圧力供給源を共有しグループを構成しているので、計算された吸引口における圧力値を平均してグループの提示圧力とするなどの処理が必要となる。また、圧力をそのまま触覚ディスプレイの出力として用いることの有効性については議論の余地がある。せん断応力や皮膚に生じる変形のひずみエネルギーなどに変換して提示するなど、触覚ディスプレイによって生起する人間の感覚を考慮して適切に変換する必要がある。これらの検討については、本論文の内容を超えるので、ハプティックレンダリングの出力は圧力のみであることを想定して議論する。

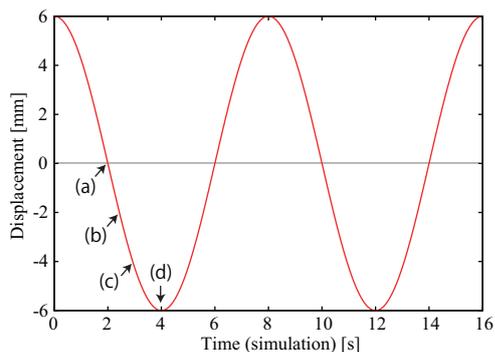


図 2: 入力指先軌道. 変位が 0 のとき対象物上面に接触した状態, 負のとき押し込んでいる状態である.

3. 評価

3.1 条件

提案手法の評価を行うため, 単純なモデルを用いた指先による柔軟物体 1 軸押し込みシミュレーションを行った.

計算機には Intel Core i7-4790K CPU (4.0 GHz, 4 cores), 16 GB RAM を搭載した Windows 10 PC を用いた. 数値計算は OpenMP を用いて並列化実装を行った.

指モデルは, NatureManufacture 社によるゲームエンジン Unity 用アセット VR Hands and FP Arms Pack¹ をベースに作成した. 指先物理モデルは, 頂点数 292, 三角形ポリゴン数 580 であった. 物理パラメータは VC パラメータ調整の結果として, 質量を 0.1 kg, 慣性モーメントを $5.0 \times 10^{-4}I$ とした. ただし, I は 3×3 の単位テンソルである. 吸引口は 36 個であり 6×6 の格子状に配置した. 指腹への吸引口設置は, まず指腹面中央に接する平面上に孔を整列し, それを指腹面に対し平面垂直方向に射影することで実現した. 射影前の孔間隔は 2 mm とした.

柔軟物体は一辺 50 mm の立方体であり, 節点数 216, 四面体要素数 625 であった. 材料特性は木綿豆腐程度を想定し, ヤング率 10 kPa, ポアソン比 0.45, 密度 1.0 g/cm^3 とした. 柔軟物体の底面頂点はバネダンパ要素 (自然長 0 m, バネ定数 50 N/m, 減衰係数 $0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$) により固定した. ペナルティ法で設置するバネダンパ要素はすべて一様に自然長 0 m, バネ定数 30 N/m, 減衰係数 $0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ とした. VC パラメータはバネ定数 500 N/m, 減衰係数 $1.0 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, ねじりバネ定数 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, ねじり減衰係数 $0.03 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ とした.

シミュレーションでは, 指先物理モデルの垂直方向の変位を固定し, 鉛直方向に上下する軌道を与えた. 鉛直方向の変位を図 2 に示す. 指先物理モデルは柔軟物体の表面端部を押し込み, 最大 6 mm の変位を与えるように設定されている. シミュレーションの時間刻みは 16 ms とした.

3.2 結果と考察

シミュレーション外観を図 3 に示す. 押し込み変位が小さく視認しづらいが, 不自然な振動がなく安定に接触し 6 mm

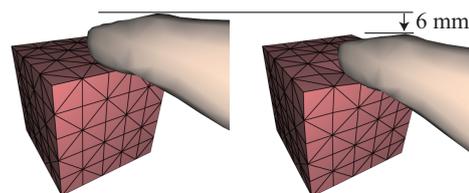


図 3: シミュレーション外観. 左図, 右図はそれぞれ図 2 中の (a), (d) に対応している.

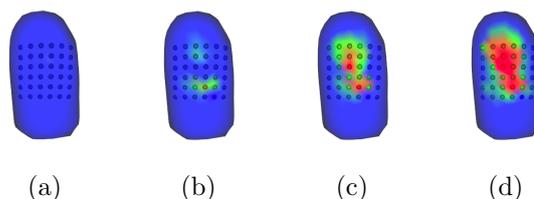


図 4: 圧力分布のコンター図. (a), (b), (c), (d) は図 2 中に示す記号に対応している. 図中の球体は吸引口の位置を示す.

の押し込みに成功した.

押し込み過程における指腹表面の圧力分布を図 4 に示す. 図中の (a), (b), (c), (d) はそれぞれ押し込み変位 0 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm 時の結果であることを示している. この結果から, 押し込みに伴い圧力発生領域が広がっていくことが確認できる. また, 指腹中央部の圧力が高く, 周縁部の圧力が低い傾向がみられる. これは, 指腹が凸形状をしており, 出っ張りが大きい部分が強く押しつけられるためであると推察され, 定性的に妥当な結果であると考えられる.

図 5 に接触面積の履歴を示す. この接触面積は, 指先物理モデルにおいて圧力が発生している (0 でない) 頂点の等価面積の総和を取ることによって求めたものである. この結果から, 押し込みに伴って接触面積が増加し, 押し込み開放に伴い接触面積が減少していく傾向がみられる. また, 接触面積は階段状に不連続な挙動を示すことが見られた. これは, 指先物理モデルの頂点密度が低いためと考えられる. 解決のために頂点密度を高めることでより滑らかにすることができるとは思うが, 計算量が増加する. したがって, この不連続性が触覚ディスプレイにおいて許容可能かどうかについて, 今後のハードウェアを用いた実験で明らかにしていく必要がある. また, その結果に応じて, 計算機の性能を考慮した適切な解像度調整を行う必要がある.

図 6 に 36 個の吸引口において計算されたすべての圧力値をプロットしたものを示す. この結果から, 指先物理モデル表面の圧力分布を補間することにより, 滑らかな出力が得られることが確認された. ただし, 一部の圧力ポートでは負の圧力 (柔軟物体側に向かう方向) が発生していることが確認された. この現象は DDF の利用に起因するものと考えられる. 接触位置が立方体角部周辺である場合, 干渉した頂点が正しい接触面ではなく, 角部を挟んで向こう側の面を接触面と判定する場合がある. このように鋭利な角や

¹<https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/humanoids/vr-hands-and-fp-arms-pack-77815>

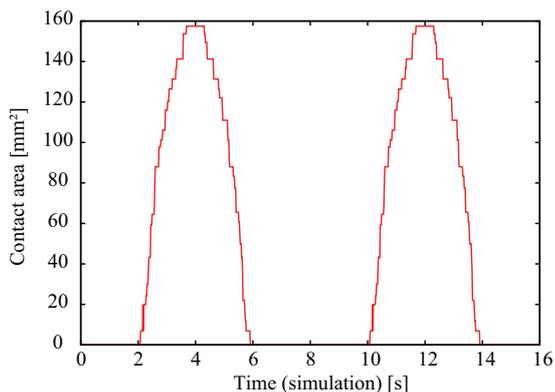


図 5: 接触面積の履歴

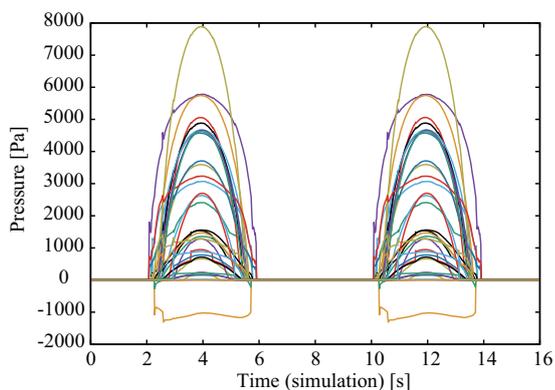


図 6: 吸引口における圧力

薄い形状を持つ対象物に対しては、本研究で採用した離散的接触判定では対処が困難であり、連続的接触判定の利用を検討しなければならない。

最後に、図 7 に各シミュレーションステップにおいて物理演算に要した計算時間を示す。通常の Windows OS を用いたため極端に計算時間が增加するステップがあるが、それを除けばシミュレーションの時間刻みである 16 ms 未満となり、触覚ディスプレイを用いた実時間シミュレーションが十分可能であることが示された。

4. 結言

本研究では吸引圧触覚ディスプレイを用いた触覚を伴うインタラクティブな VR 柔軟物体の把持の実現を目指し、接触対象物を柔軟物体、指先を剛体とした物理シミュレーション手法、および、剛体表面の任意位置に配置した吸引口における圧力値の計算方法を提案した。提案手法の評価のために行った指先による柔軟物体押し込みシミュレーションにより、押し込みに伴う接触面積の拡大や滑らかな提示圧力出力が確認された。また、今回用いた規模のモデルでは十分に実時間計算可能であることが確認された。

評価の結果、定性的に妥当な挙動が得られたが、定量的妥当性の検証については今後の課題である。また、今回の検討では表面圧力を出力としたが、それをそのまま触覚ディスプレイで提示する吸引圧とすることが適切とは考えてい

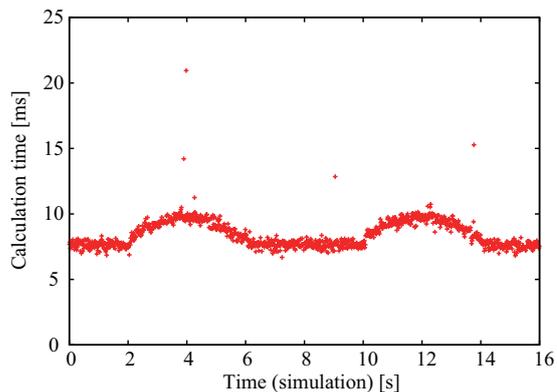


図 7: 物理演算に要した各ステップ毎の計算時間。

ない。今後、人間の知覚特性に応じて適切に変換していく手法についても検討したい。

謝辞

本研究の一部は ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」および JSPS 科研費 JP18H01401, JP18K13722 の助成を受けた。

参考文献

- [1] G. Hirota, S. Fisher, and A. State. An improved finite-element contact model for anatomical simulations. *The Visual Computer*, Vol. 19, No. 5, pp. 291–309, Aug 2003.
- [2] A. G. Perez, D. Lobo, F. Chinello, G. Cirio, M. Malvezzi, J. S. Martn, D. Prattichizzo, and M.Á. Otaduy. Optimization-based wearable tactile rendering. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, No. 2, pp. 254–264, April 2017.
- [3] D. Prattichizzo, F. Chinello, C. Pacchierotti, and M. Malvezzi. Towards wearability in fingertip haptics: A 3-dof wearable device for cutaneous force feedback. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 4, pp. 506–516, Oct 2013.
- [4] K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno. Haptic rendering of contact between rigid and deformable objects based on penalty method with implicit time integration. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1594–1600, Dec 2016.
- [5] K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno. Haptic interaction with segmented medical image embedded in finite element mesh. *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol. 19, No. 2, pp. 89–99, 2017.
- [6] 永野光, 昆陽雅司, 田所諭. 指腹における吸引圧力の空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ—多自由度の方向知覚の検証—. 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017.