This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2022 年 9 月）

指先への触覚分布レンダリングにおける バーチャルカップリングの必要性

佐瀬 一弥 [1)]，加藤 明樹 [2)]，森田 夏実 [3)], 一條 暁生 [3)], 永野 光 [4)], 昆陽 雅司 [3)]

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

2) 東北学院大学 工学研究科（〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1）

3) 東北大学 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）

4) 神戸大学 工学研究科（〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）

概要: バーチャルカップリング（VC）は力覚提示の安定化のために用いられるが，触覚分布提示において力覚フィードバックを伴わない場合の VC の必要性は低く，むしろ忠実性を低下させる．しかし，VC により対象物体の剛性の視覚的手がかりが生じ疑似力覚が発生すること，物理シミュレーションの安定性の向上，すり抜けや過剰な押し込みの低減の効果などが期待される．本論文では，剛体としてモデル化された指先により柔軟物体押し込みシミュレーションを行った際に，VC により柔軟物体の剛性の視覚的手がかりが生じることと，過剰な押し込みの低減により圧力分布の妥当性のある計算条件を確保しやすいことを示した．

キーワード： 触覚分布レンダリング，バーチャルカップリング，圧力分布

1. はじめに

人が物体を把持操作するとき，指腹に生じる分布的な皮膚感覚は物体の材質や力学特性を知る手掛かりとなる．VR において皮膚表面に生じる分布的な触覚刺激を再現することは，VR におけるさらなる臨場感の向上や，人の物体把持操作戦略の知覚的側面からの解明に役立つと考えられる．指先への触覚分布提示手法の研究は，ピンアレイ型 [1] や空中超音波触覚を用いたもの [2]，吸引口を高密度に配置したもの [3, 4] など，近年でも取り組まれている重要な課題である．

分布的な触覚刺激を生成するには，バーチャル物体との接触を考慮した物理シミュレーションが必要となる．その中で，分布的触覚提示は特に物体の把持操作において重要な役割を果たしていると我々は考えている．柔軟物体接触時の触覚分布（圧力分布）計算手法は，例えば，Barreiro ら [5] によって取り組まれているが，指腹への高解像度な触覚分布提示を目指しているものは少なく，必要な計算精度・解像度を実現できるかどうかは十分に議論されていない．我々もこれまでに指先と柔軟物体の接触に基づく，物体変形と接触圧力分布の実時間計算法の開発に取り組み，性能評価や解析解との比較による計算精度の評価を行ってきた [3, 6]．

我々のこれまでの取り組みでは，特に計算時間と計算精度の観点で評価を行ってきたが，実際に VR 環境で応用するためには，ユーザが触覚インタラクションを行う際の安定性が非常に重要な要素である．古典的な力覚提示においては，バーチャルカップリング（Virtual coupling, VC） [7] がよく用いられる．VC はバーチャルツールとハプティックデバイスハンドルを，バーチャルなバネダンパ要素（並進・回転）で結合するものであり，力覚フィードバックを伴う人間-機械系を安定化することができる．指先に力覚フィードバックを行う場合は，実際の指（あるいは指装着デバイス）とバーチャル指モデルの間にバネダンパ要素を設置することが考えられる．

しかし，力覚フィードバックを伴わない触覚分布提示においては，VC は必ずしも必要ではない．むしろ，対象物体と実際の指の間に VC のバネダンパ要素が直列に入り込んでしまうため，忠実性が低下してしまう．しかしながら，我々は VC には力覚フィードバックの安定化の側面のほかに，下記の利点があることを経験してきた．

1. VC により対象物体の剛性の視覚的手掛かりの発生（疑似力覚の誘発）
2. 物理シミュレーションにおける過剰な押し込みやすり抜けの低減

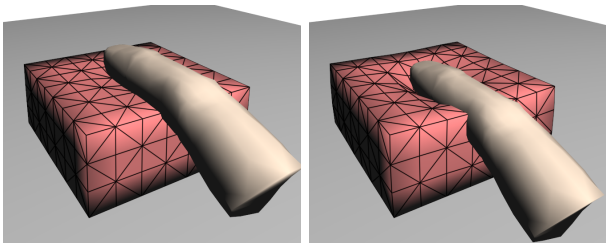
これらの利点は実用上，有用性があると考えられ，触覚分布提示における VC の利用は検討に値すると思われる．

本論文では，触覚分布提示（圧力分布提示）のための物理シミュレーションにおいて，VC の有無が結果に及ぼす影響を，具体例を示すことで議論する．特に，VC 利用時の剛性の視覚的手掛かりの例と，VC による過剰な押し込みの低減によって圧力分布の計算が破綻しなくなる例を紹介する．

2. 手法

柔軟物体の変形計算には corotational FEM を用い，幾何学的大変形を考慮した線形弾性体の挙動を模擬する．指については，指先のみを剛体でモデル化した．指と柔軟物体の間の接触判定は，signed distance field を用いて行い，

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会



(a) 接触前　　(b) 接触後

図 1: 柔軟物押し込みシミュレーションの様子.

表 1: 物理シミュレーションのパラメータ. I は 3×3 の単位テンソル.

パラメータ	値	単位
時間刻み	5	ms
VC バネ定数（並進）	500	N/m
VC ダンパ定数（並進）	1	N s/m
VC バネ定数（回転）	0.3	N m/rad
VC ダンパ定数（回転）	0.03	N m s/rad
剛体質量	0.1	kg
剛体慣性モーメント	$0.0005 \times I$	kg m^2
ヤング率（3 種類）	10, 30, 50	kPa
ポアソン比	0.45	-
密度	1000	kg/m^3

接触応答はペナルティ法を用いた．物理シミュレーションの安定性を確保するため，後退オイラー法によって時間積分を実装した．詳細は [3, 8] を参照.

指の物理モデルはユーザが操作するオブジェクトである．本論文では指モデルの操作方法として，VC を利用した操作（「VC あり」と表記する）と，VC を利用しない直接操作（「VC なし」と表記する）の両方を実装した．これらの操作方法を切り替えて結果を比較する.

本論文では直方体形状の柔軟物体の上面を指先で垂直に押し付けるシミュレーションを行い結果を比較する．図 1 に柔軟物押し込みシミュレーションの様子を示す．表 1 に物理シミュレーションの各種パラメータを示す．柔軟物体の寸法は，幅 70 mm, 長さ 70 mm, 高さ 30 mm であり，四面体メッシュの節点数は 292，要素数は 747 である.

これらの条件の下で，下記の 3 つの検証を行った.

検証 1：物体剛性に対する VC の視覚的効果

VC ありの条件において，ハンドル（実際の指）に一定の変位（18 mm）を与えた場合の，指モデルの変位量を比較する.

検証 2：VC 有無における指モデルの軌跡の比較

VC あり，VC なしの両条件において，ハンドル（実際の指）を正弦波軌道で移動させたときの，指モデルの位置の軌跡を比較する.

検証 3：VC 有無における圧力分布の比較

VC あり，VC なしの両条件において，ハンドル（実際の指）に一定の変位（5, 10, 15 mm）を与えたときの圧力分布を比較する.

3. 結果・考察

3.1 検証 1：物体剛性に対する VC の視覚的効果

図 2 に結果を示す．青のメッシュは指先の物理モデル（剛体），赤のワイヤフレームは実際のハンドル位置，黒のワイヤフレームは指の描画用メッシュ，赤線は変形前の物体の表面位置（$z = 0.038$ m）を表す．柔軟物体のメッシュは非表示とした．いずれについても，ハンドル（実際の指）の位置を $z = 0.02$ m （弾性体表面に与える変位量 18 mm）とした．指モデルはハンドルと VC のバネダンパで接続されており，そのバネの力で柔軟物体に押し付けられる．柔軟物体が柔らかい場合は指モデルが物体に食い込む変位が大きく，硬くなるほど変位は小さくなる．このように，VC を用いることで対象物体の剛性が視覚的情報から推測できる．入力量（実際の指の変位）に対する提示量（表示される指の変位）が変化し，剛性によってその比率が変化する．これによって疑似力覚を誘発することが期待される.

3.2 検証 2：VC 有無における指モデルの軌跡の比較

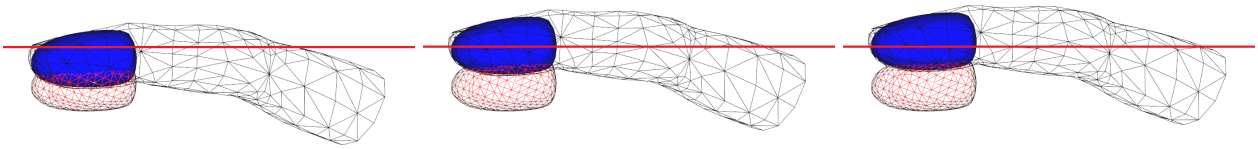
図 3 に結果を示す．VC なしの条件では当然ながらハンドルに与えた正弦波軌道と同一の軌道で動作している．VC ありの条件では，指モデルはハンドルと結合したバネダンパ要素からの力によって引っ張られて運動する．$z = 0.038$ [m] において物体表面と接触が生じ，接触後は VC のバネダンパ要素が接触反力によって伸びることにより，柔軟物体への食い込み変位量が小さくなっている.

このことは，現実の指の運動を忠実に反映していないという点では望ましくない．しかしながら，力覚フィードバックを伴わない触覚提示においては，指が物体に食い込むことにより生じる反力がユーザに提示されず，物体に対して大きい変位を与えることが容易に行われてしまう．現実的でない大きい変位は，物理シミュレーションを破綻させたり，非現実的な挙動を起したりする要因となる．これらの問題の対処として，VC の有効性が期待できる.

3.3 検証 3：VC 有無における圧力分布の比較

図 4，5 にそれぞれ，VC あり，VC なしの圧力分布の計算例を示す．VC 有無のいずれについても，圧力のピークが先端と根本方向に分かれていく傾向がみられる．VC なしについてはこの傾向が顕著で，定性的にも妥当とは言えない．このような結果は指が剛体である場合に生じることがこれまでに確認されている [6]．ただし，押し込み変位量が小さいときはこのような問題は軽微であり，実用上は問題にならない可能性がある．このように，VC を用いることで過大な押し込みを抑制し，物理シミュレーションが破綻しない条件に留めさせる効果が期待できる.

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会



(a) ヤング率 10 kPa　(b) ヤング率 30 kPa　(c) ヤング率 50 kPa

図 2: VC 利用時の対象物の硬さに対する視覚的効果.

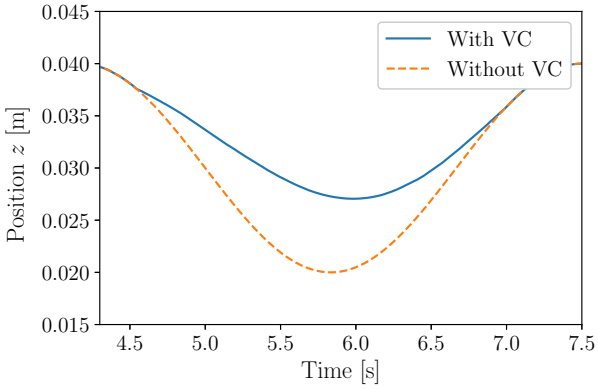
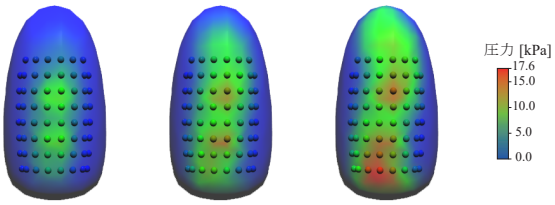
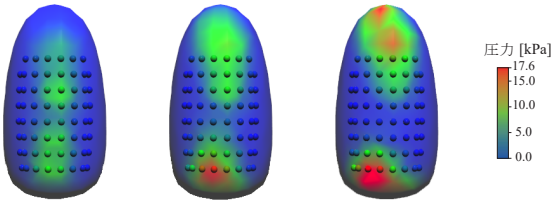


図 3: VC 有無による指モデル軌跡の比較.



(a) 5 mm　(b) 10 mm　(c) 15 mm

図 4: VC ありの時の圧力分布の計算例



(a) 5 mm　(b) 10 mm　(c) 15 mm

図 5: VC なしの時の圧力分布の計算例

4. おわりに

本論文では，触覚分布提示（圧力分布提示）のための物理シミュレーションにおいて，VC の有無が結果に及ぼす影響を具体例を示し議論した．3 つの検証として，VC 利用時の剛性の視覚的手掛かりの例，VC による過剰な押し込みの低減，押し込み低減による圧力分布計算の破綻の回避の例を示した．

今後は，指の柔軟物体としてのモデル化や，多指による把持，指の関節の剛性としての VC の適用などの観点で，触覚分布提示における VC の効果的な利用法の研究を進める．

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21H04542, JP22K17936 の助成を受けたものです.

参考文献

[1] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, K. Hirota：Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display, IEEE Access,Vol. 8, pp. 145107-–145114, 2020.

[2] A. Matsubayashi, Y. Makino, H. Shinoda: Rendering Softness Using Airborne Ultrasound, Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 355–360, 2021.

[3] H. Nagano, K. Sase, M. Konyo, S. Tadokoro: Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad, Proc. the 2019 IEEE World Haptics Conference, pp. 389–394, 2019.

[4] 森田夏実，佐瀬一弥，永野光，昆陽雅司：指腹部高解像吸引触覚ディスプレイによる把持感覚の再現第 1 報：高解像ディスプレイの開発と硬軟感提示性能の確認，第 22 回システムインテグレーション部門講演会（SI2021），pp. 1892–1895, 2021.

[5] H. Barreiro, J. Torres and M. A. Otaduy, Natural Tactile Interaction with Virtual Clay, Proc. the 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 403-408, 2021.

[6] 佐瀬一弥，加藤明樹，永野光，昆陽雅司：柔軟物体同士の実時間接触シミュレーションにおける接触圧力分布の妥当性評価，電気学会研究会資料 知覚情報研究会（ハプティクス研究委員会第 28 回研究会）予稿集，pp. 23–26 (PI-22-006), 2022.

[7] J.E. Colgate, M.C. Stanley, J.M. Brown: Issues in the Haptic Display of Tool Use, Proc. 1995 IEEE/RSJ

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

Int. Conf. Intell. Robot. Syst. Hum. Robot Interact. Coop. Robot., Vol. 3, pp. 140-–145, 1995.

[8] K. Sase, T. Tsujita, A. Konno: Haptic Rendering of Contact Between Rigid and Deformable Objects Based on Penalty Method with Implicit Time Integration, Proc. the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1594–1600, 2016.

[9] 佐瀬一弥，永野光，昆陽雅司，田所諭：剛体指モデルを用いた柔軟物接触圧分布レンダリングの評価と改善，電気学会研究会資料 知覚情報研究会 （ハプティクス研究委員会第 22 回研究会）予稿集, pp. 17–20 (PI-19-037), 2019.

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会