



# PhysX 5 を用いた変形可能な VR 指先の試作

Prototype deformable VR fingertip with PhysX 5

古迫将希<sup>1)</sup>, 藤田欣也<sup>2)</sup>

Masaki FURUSAKO, Kinya FUJITA

- 1) 東京農工大学大学院工学府知能情報システム工学専攻 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)  
2) 東京農工大学工学研究院先端情報科学部門 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

**概要:** 運動・変形シミュレーションを両立可能な PhysX5 を使用し, 有限要素法でシミュレートされる四面体メッシュで構成された変形物体を用いて VR 指先を試作した. PhysX5 では反復法の計算回数に上限を設けることでリアルタイム変形シミュレーションを実現しているが, 十分に収束していない解を用いることで結果に誤差が生じ, 変形物体と剛体間で十分な摩擦力が生じて静止すると想定される状況でも相対運動が発生するなどの問題が明らかになった.

**キーワード:** PhysX 5, 有限要素法, VR 物体操作

## 1. はじめに

近年, エンターテインメント, 医療, 訓練など様々な分野で VR 技術の利用が進んでおり, 現実空間における作業を VR 環境で再現することが求められている. 現実における作業の多くは手指を用いた物体操作であることから, VR 環境においても手指による物体操作を可能であることが望ましい.

VR 手指による VR 物体操作を実現する方法として, VR 物体と VR 手指を相対的に固定するという手法[1]がある. しかし, 現実と異なり摩擦等の力学的な作用が働かないインタラクションはシミュレーション結果に感覚的な不一致を起こしやすいため, より没入感の高い VR 環境の構築のためには VR 手指と VR 物体間が力学的な相互作用によって干渉することが望ましい.

VR 物体と力学的に相互作用する VR 手指は, 簡単な手法では PhysX などの剛体物理シミュレータにおいて指先や手の骨格を剛体でモデル化することで実現できるが, 単純な剛体で構成された VR 手指は点での接触が発生しやすく, 把持した VR 物体の姿勢を固定できない等の問題が伴う. 把持物体の姿勢を固定するためには最低三点以上(または線や面)での接触が必要であり, 人の手指は皮膚などの軟部組織が変形することでこれを容易にしている. このことから VR 手指にも軟部組織をモデル化した変形可能な部位を持つという特性が求められる.

変形可能な VR 手指を実現するための手法として, 剛体をばねで接続して疑似的な変形を実現させる手法[2]や有限要素法などの変形シミュレーションを用いた手法[3]が存在する. 疑似変形は剛体物理シミュレータで実装できる分変形シミュレーションを用いるよりも実装が簡単であ

るが, 質点間に隙間が生まれ物体操作に影響する問題がある. 変形シミュレーションを用いた VR 手指は, 運動シミュレーションとの両立という観点から実装が困難であり, シミュレータを自作しなければならない等開発におけるハードルの高さがある.

本研究では 2022 年に PhysX が変形シミュレーションに対応したことに注目し, 変形可能な VR 手指の開発プラットフォームとして利用できる可能性を検討するため, 変形する VR 指先を試作し VR 物体(剛体)の把持・持ち上げについてのテストを行った.

## 2. PhysX 5

PhysX は NVIDIA が開発・提供しているリアルタイムの物理演算エンジンである. Unity などのゲーム開発エンジンにも搭載されており, 提供されている SDK を用いることでも開発が可能である. PhysX 4 までは剛体の運動シミュレーションにのみ対応していたが, 2022 年に公開され



図 1: SoftBody のメッシュの例 (出典: NVIDIA)  
左から Render Mesh, Collision Mesh, Simulation Mesh

た PhysX 5 では有限要素法を用いた変形シミュレーションや、Position-based Dynamics[4]をベースにした粒子シミュレーション等に対応した。

Physx 5 における変形シミュレーションは四面体メッシュを用いた有限要素法(FEM)によって計算される。変形する物体は SoftBody と呼ばれ、使用するためにはメッシュや各種パラメータの設定が必要になる。

### 2.1 SoftBody のメッシュ

SoftBody は四面体メッシュから構成される。このとき衝突検出用の Collision Mesh と FEM 計算用の Simulation Mesh の 2 種類のメッシュを適用する必要がある。それぞれ別々のメッシュを使用するか、Collision Mesh として作成したメッシュを Simulation Mesh としても適用することが推奨されている。

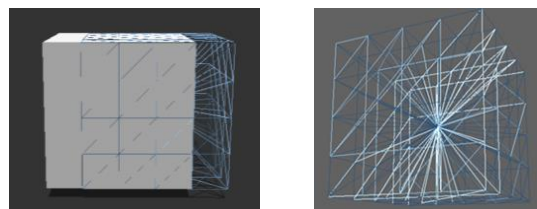
### 2.2 SoftBody のパラメータ

SoftBody は大きさや密度といった剛体と共通のパラメータ以外に、変形特性を決めるためのパラメータなど独自のパラメータを持つ。ヤング率やポアソン比といった物理的なパラメータや、メッシュ頂点への速度ダンパなどによって変形特性が決定される。また、Solver Iteration Count というパラメータは Solver の反復計算回数を決定するパラメータであり、SoftBody の変形や接触がどの程度正確に計算されるかに関わる。

## 3. SoftBody を用いた VR 指先の実装

PhysX 5 の SoftBody を用いた変形する VR 指先(以下、VR 変形指先)を試作した。

VR 変形指先は 1 辺 0.5 m の立方体の剛体と立方体の Softbody を組み合わせて作成した。剛体と Softbody は互いに干渉しないよう設定し、図 2(a)のように剛体と Softbody を X 軸上にずらし、体積が 75% ずつ重なるように配置した後 Attachment により接続した。Attachment は剛体の立方体の表面と内部に生成された 1,000 個の格子点のうち Softbody と重なっている点に生成されるようにしたため、今回は 750 個生成されている。Softbody のメッシュ数は 192 とし、図 2(b)のように立方体の表面で分割された直角三角形の各頂点と立方体の中心の 4 点を頂点とす



(a) VR 変形指先 (b) SoftBody(メッシュ数 192)

図 2 : VR 変形指先 SoftBody は辺だけ描画

る四面体により構成される。VR 変形指先の Softbody が露出している面を指腹と定義し、VR 変形指先間にスライダージェイントを設定することで常に指腹が向き合うようにした。

本システムは LeapMotion などを用いて手指の位置・姿勢を計測し、Virtual Coupling[5](以下、VC)によって反映させることを想定している。システム図を図 3 に示す。

## 4. 実験と結果

VR 変形指先による VR 物体操作の実現可能性を検討するために、試作した VR 変形指先による剛体立方体の把持・持ち上げを行った。

### 4.1 実験方法

VR 変形指先を 2 つ用意して剛体の立方体に対する把持・持ち上げを行った(図 4)。把持対象として 1 辺 1 m の立方体の剛体を用意し、VR 変形指先とは Softbody の部分のみが干渉する設定とした。剛体部分の重心に対する並進 VC 力によって VR 変形指先の位置を移動させ、指腹が向き合うように把持を行った後一定の高さまで持ち上げた。並進 VC に用いる実指先の位置はプログラム上で数値を設定し、把持時は VR 変形指先が把持対象剛体に触れてから 0.15 m、持ち上げ時は 0.5 m 移動させた。シミュレーションに用いたパラメータを表 1 に、シミュレーションに用いた PC の環境を表 2 に示す。

### 4.2 実験結果と考察

#### 4.2.1 実験結果

実験結果を図 5 に示す。図 5 は時間ごとの把持対象剛体の重心の Y 座標のグラフである。VR 剛体指先では持ち上げ後の把持対象剛体の Y 座標が一定で、落下することな

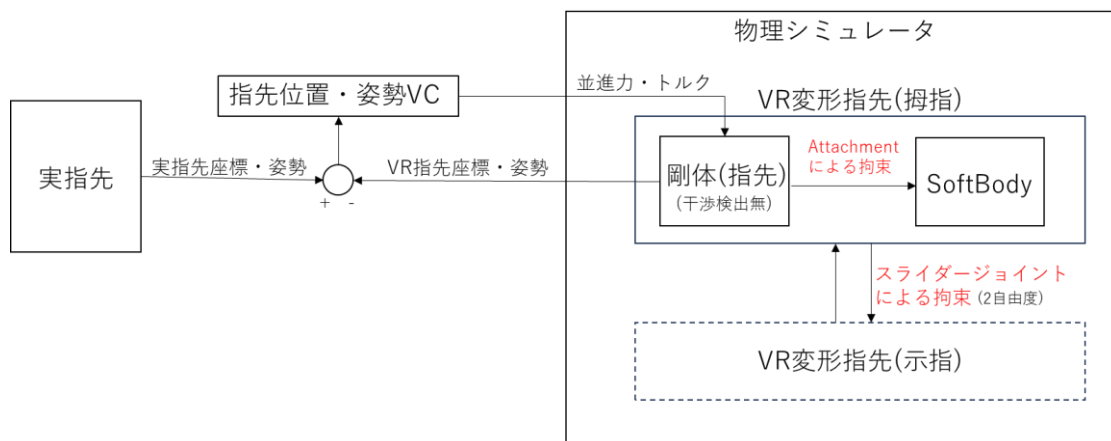


図 3: 本 VR 変形指先のシステム図(破線は干渉検出対象外)

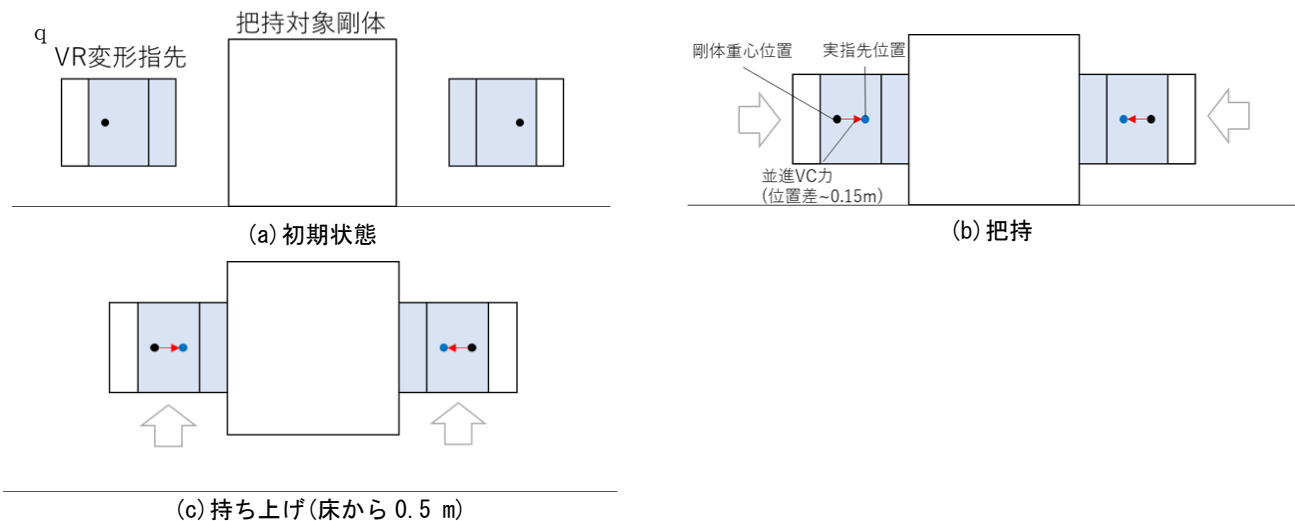


図 4: 実験の手順

く持ち上げができたことが確認できる。VR 変形指先でも持ち上げることができたが、上下運動をしながら徐々に落下して持ち上げから約 55 秒後に地面と接触した。パラメータ上では VR 剛体指先と VR 変形指先それぞれでのシミュレーションにおける摩擦係数や VC による把持力が同じであることから、VR 変形指先による把持・持ち上げでも把持対象剛体の相対的な位置固定が可能と思われたが、落下が発生してしまうという結果になった。上下運動に関しては 2 つの弾性体(SoftBody)に挟まれた剛体がバネ振り子のように運動していると考えられるが、落下に関しては摩擦以外の原因によって発生していると思われる。

物理シミュレーションでは干渉検出と侵入解消を繰り返しているため、剛体による VR 物体把持において、指先が物体表面でバウンドするような挙動をすることによって非接触状態が発生し落下する場合がある。これは計算精度が低いことで発生しやすいという知見から、今回の落下についても計算誤差に原因があるのではないかと考えた。

#### 4.2.2 Solver Iteration Count を変えた把持・持ち上げ

計算精度を変えるために表 1 のパラメータにおいて Solver Iteration Count を 16, 24, 32 の 3 種類に変化させて再度シミュレーションを行った。結果を図 6 に示す。

図 6 からは Solver Iteration Count を変えることで把持対象剛体の落下速度に変化が起きていることが確認できる。Solver Iteration Count が低い(16)と持ち上げから 20 秒程度で把持対象剛体が落下しきってしまうが、高い(32)と 24 のときよりも完全に落下するまでにかかる時間が長くなっている。

以上より、少ない Solver Iteration Count によって十分に収束していない解をシミュレーション計算結果として用いることで SoftBody のメッシュ頂点の位置誤差が大きくなり、接触状態と非接触状態が繰り返されていることが考えられる。また、すべてのメッシュ頂点が同時に非接触状態になっているとは考えづらいため、メッシュ頂点には接触状態のものと非接触状態のものが混在し、非接触状態のメッシュ頂点が前回と異なる位置で再接触することによ

って全体として尺取虫のように摩擦力によらない相対運動を許しているという仮説を立てた。

Solver Iteration Count を上げることは計算負荷を上げることになり、シミュレーションの速度を損なうため安易な解決方法にはならない。各試行における Time Step Per Second(計測したフレーム間の経過時間の逆数)の平均は表 3 のようになった。SoftBody が存在する状態で Solver Iteration Count を増やすと Time Step Per Second も低下してしまうことが確認できた。また、今回の実験環境では Solver Iteration Count を 40 以上に設定すると持ち上げ時に把持対象剛体を弾き飛ばしてしまうという結果になった。Solver Iteration Count が変化することで Time Step Per

表 1: シミュレーションに用いたパラメータ

パラメータ	値	単位
TimeStep(設定値)	$1.0 \times 10^1$	ms
VC並進バネ定数	$2.0 \times 10^5$	N/m
VC並進ダンパ定数	$1.0 \times 10^3$	N·s/m
VC回転バネ定数	$1.0 \times 10^5$	N/rad
VC回転ダンパ定数	$1.0 \times 10^2$	N·s/rad
剛体(指先)密度	$5.0 \times 10^2$	kg/m <sup>3</sup>
SoftBody(指先)密度	$5.0 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
剛体(把持対象)密度	$1.0 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
剛体静止摩擦係数	$1.0 \times 10^9$	
剛体動摩擦係数	$1.0 \times 10^9$	
SoftBody動摩擦係数	$1.0 \times 10^9$	
ヤング率	10	MPa
ポアソン比	0.45	
SoftBodyメッシュ数	192	個
Solver Iteration Count	24	

表 2: シミュレーションに用いた PC 環境

CPU	Intel corei5-10400F
GPU	RTX3070 8GB
メモリ	DDR4 3200MHz 8GB×2
実行環境	Visual Studio 2022

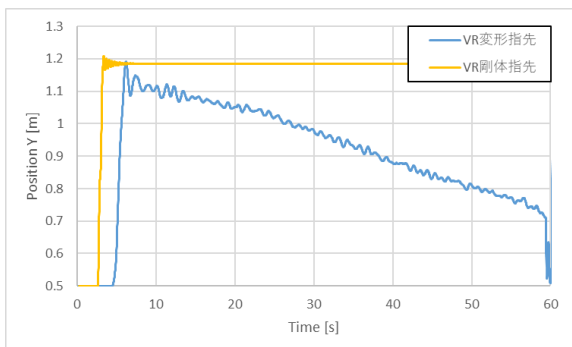


図 5: 把持対象剛体の Y 座標の変化

Second の低下以外にも SoftBody の固さの再現精度や変形精度の変化など多様な変化を引き起こすため、他のパラメータとの兼ね合いを探る必要がある。

## 5. おわりに

本論文では PhysX 5 の SoftBody を用いて VR 変形指先を試作し、SoftBody によって剛体を持ち上げることができるのか検証した。検証の結果、VR 変形指先による剛体の把持持ち上げには摩擦力によらない落下が伴う場合があった。原因として、少ない Solver Iteration Count を設定することによって変形シミュレーションの計算誤差が大きくなり、非接触状態のメッシュ頂点が生まれることで相対

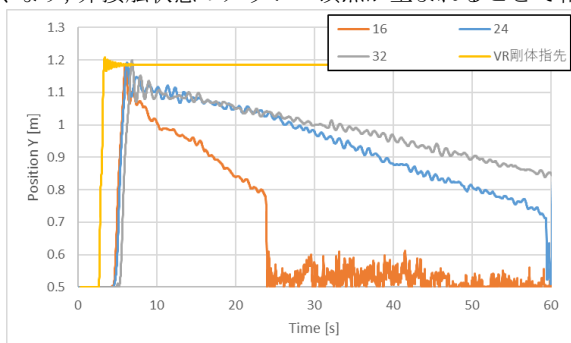


図 6: Solver Iteration Count を変化させたときの把持対象剛体の Y 座標の変化

表 3: Solver Iteration Count ごとの Time Step Per Second

Solver Iteration Count	Time Step Per Second(平均)
16	51.71
24	50.04
32	47.63
VR剛体指先	103.00

運動を許しているという仮説を立てた。PhysX 5 の SoftBody の扱いにおいて Solver Iteration Count は重要なパラメータであるが、十分な VR 物体操作が可能な VR 変形指先の作成においては他のパラメータとの兼ね合いを探りながら調整していく必要がある。

## 参考文献

- [1] S Oprea, P Martinez-Gonzalez, A Garcia-Garcia, J Alejandro Castro-Vargas, S Orts-Escolano, and J GarciaRodriguez: A Visually Plausible Grasping System for Object Manipulation and Interaction in Virtual Reality Environments; Proc. Computers and Graphics, Vol. 83, pp.77-86, 2019.
- [2] 高橋拓夢, 松本倫太郎, 藤田欣也: 二指での高い物体把持剛性を実現する柔軟な VR 指先モデル; 第 26 回日本バーチャルリアリティ大会論文集, No.3E2-3, 2021
- [3] VERSCHOOR, Mickeal; LOBO, Daniel; OTADUY, Miguel A. Soft hand simulation for smooth and robust natural interaction. In: 2018 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces (VR). IEEE, 2018. p. 183-190.
- [4] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff. 2007. Position based dynamics. J. Vis. Commun. Image Represent. 18, 2 (April 2007), 109–118.
- [5] Colgate, J. Edward, Michael C. Stanley, and J. Michael Brown. "Issues in the haptic display of tool use." Proceedings 1995 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Human robot interaction and cooperative robots. Vol. 3. IEEE, 1995.