



Position Based Dynamics Onramp: 物理シミュレーション関連の最新論文実装

中川 展男

nobuo_nakagawa@outlook.com

2022年8月23日

はじめに

- 本セッションのスライド、ソースコードは全て github で公開しております
 - https://github.com/nobuo_nakagawa/
- 本スライド内で引用した論文の図や動画の著作権は全て論文著者に帰属します



目的

- **Position Based Dynamics(PBD)**
 - 物理ベースシミュレーション手法
 - 基礎から最新研究まで理解し実装
- Onramp?
 - ハイウェイへの“進入路”
 - この分野への入り口



なぜ学ぶのか

- Position Based Dynamics(PBD)
 - ビデオゲーム・VFX 向けの高速で堅牢な手法
 - NVIDIA Omniverse by PhysX
 - Houdini Vellum



<https://www.nvidia.com/ja-jp/omniverse/>

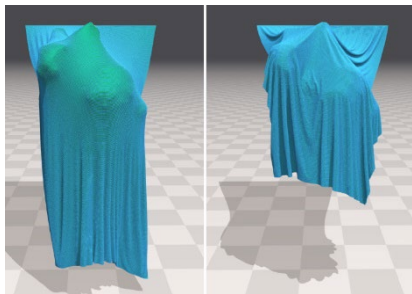


<https://www.sidefx.com/ja/tutorials/vellum-cloth-tips-tricks/>

どのように学ぶのか

- Position Based Dynamics(PBD)

- 2007年以降、発展している分野
- 前提知識が膨大(😵)→関連研究を遡って順に学ぶ必要がある
- PBD → XPBD をベースとして学び(😵)
 - substep XPBD → 剛体モデル → Neo-Hookean モデル(😵)



[MKMPNSM19]





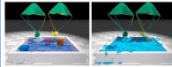
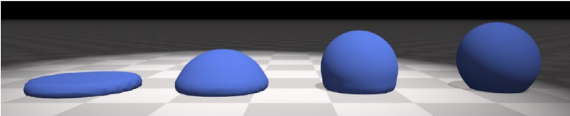
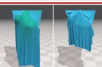


[MMNST20]



[MM21]



関連研究

発表年	論文タイトル	
2001	Advanced character physicx	
2007	Position based dynamics	
2014	Unified Particle Physics for Real-Time Applications	
2016	XPBD: position-based simulation of compliant constrained dynamics	
2019	Small Steps in Physics Simulation	
2020	Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics	
2001	A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials	



まとめ

- 目的
 - Position Based Dynamics (PBD) と呼ばれる力学ベースシミュレーション手法の理解と実装
- 目標
 - 2021年の最新論文の実装まで行なう
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials
- なぜ学ぶのか？
 - ビデオゲーム、VFX 用途にこれまでも今後も重要な技術

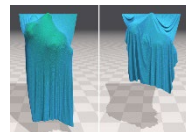


[MM21]



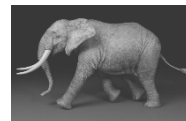
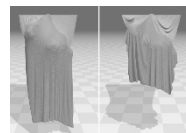
内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials



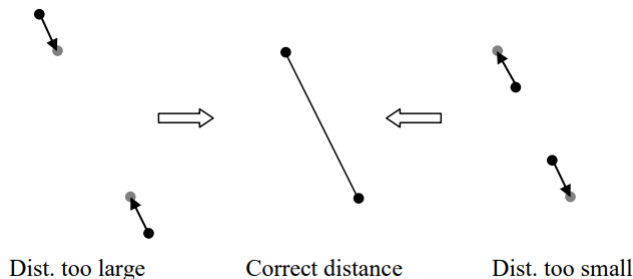
内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials



Position Based Dynamics 入門

- Advanced Character Physics (2001) [T01]
- Position Based Dynamics (2007) [MBMJ07]



[T01]



[MBMJ07]



Position Based Dynamics 入門

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



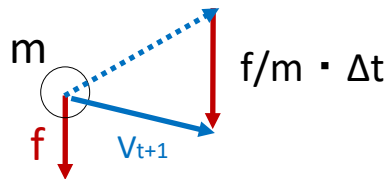
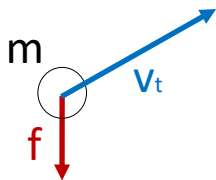
Position Based Dynamics 入門

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Position Based Dynamics 入門

- 陽解法オイラー(Explicit Euler)積分
 - 現在の時刻 t で陽にわかっている情報 'のみ' を使って積分する
 - 速度 v , 質量 m , 外力 f
 - overshoot 問題があることが知られている 😊

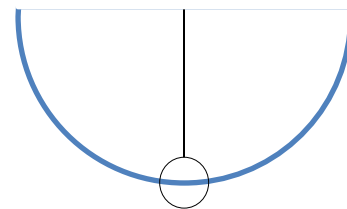


Position Based Dynamics 入門

- overshoot 問題

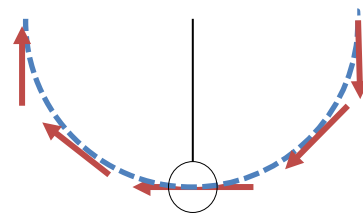
理想 😊

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \int_t^{t+\Delta t} v(t) dt$$



現実 😞

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t) \cdot \Delta t$$



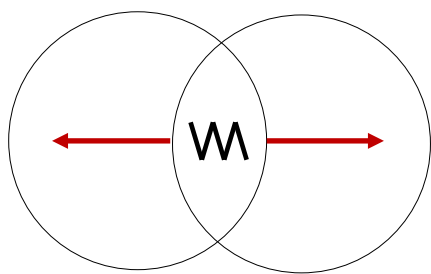
Position Based Dynamics 入門

- 陰解法オイラー(Implicit Euler)積分
 - 現在の時刻 t で陽にわかっている情報 '以外' も使って積分する
 - 未来のことはわからないので解くのが大変 😊

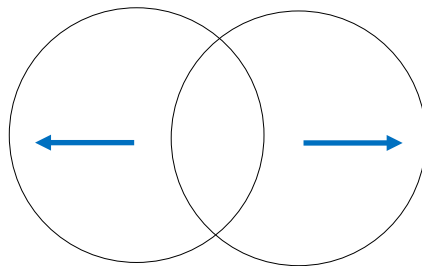


Position Based Dynamics 入門

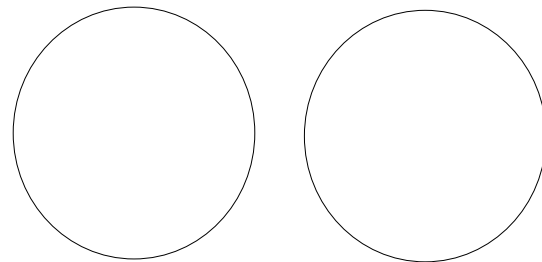
- 物理シミュレーションの従来手法での '押し出し処理'
 - 力ベースの手法(**Force** based dynamics)
 - 一回侵入する問題、押し出しすぎる問題(overshoot)等 😊



(仮想的なバネを考え) **力**発生



加速度で **速度** を求める

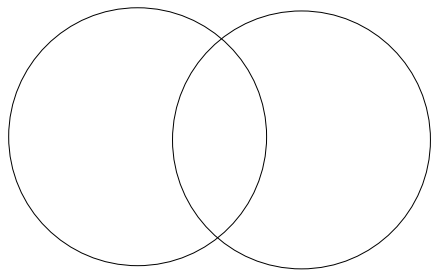


力で **加速度** を求める

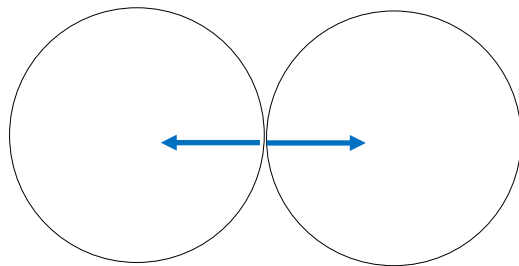
速度で **位置** を求める

Position Based Dynamics 入門

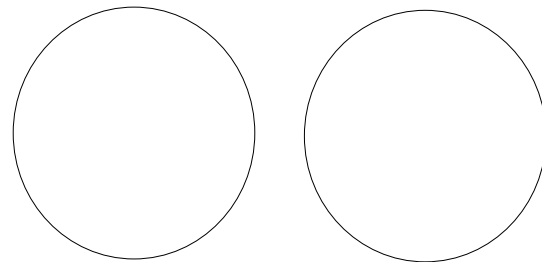
- 物理シミュレーションの提案手法での‘押し出し(correction)処理’
 - 位置ベースの手法(Position based dynamics)
 - 幾何的な解決なので押し出し(overshoot)することはない😍



侵入が発生



侵入を解決する位置を直接求める
(幾何的な拘束条件を考える)



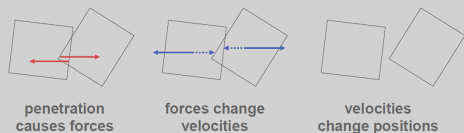
位置から速度を逆算する



Position Based Dynamics 入門

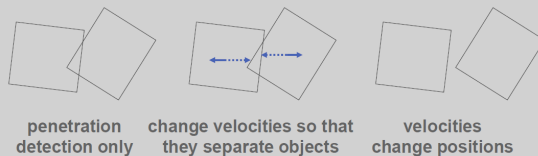
- 速度ベース(Velocity-based dynamics)
 - Overshoot を避けられるが Drift 問題がある

Force Based Update



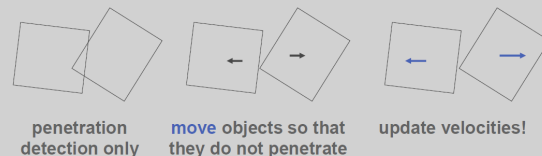
- Need overlap
- Reaction lag
- Strong force → stiff system, overshooting
- Weak force → squishy system

Velocity Based Update



- **Controlled** velocity change (via impulses)
- Only as much as needed → no overshooting
- **Drift**: Consistent velocities to not guarantee consistent positions!

Position Based Update



- **Controlled** position change
- Only as much as needed → no overshooting
- **No drift**
- Velocity update needed to get 2nd order system!



[MBMJ07]

Position Based Dynamics 入門

- 力ベース(Force-based dynamics)の押出し
 - 運動方程式を考え運動を力でモデル化
- 位置ベース(Position-based dynamics)押出し
 - 運動を満たすための幾何的な拘束を考え各オブジェクトの位置がどう動くべきかという観点でモデル化 (拘束のある系を考える)

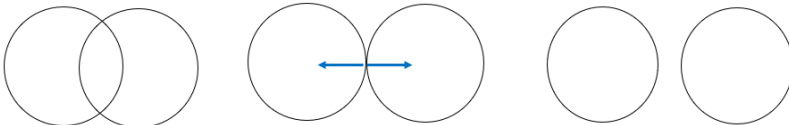


Position Based Dynamics 入門

- 先程の例を距離の拘束で捉えなおす

Position Based Dynamics 入門

- 物理シミュレーションの提案手法
 - 位置ベースの手法(Position based dynamics)
 - 幾何的な解決なので押し出し(overshoot)すぎることはない



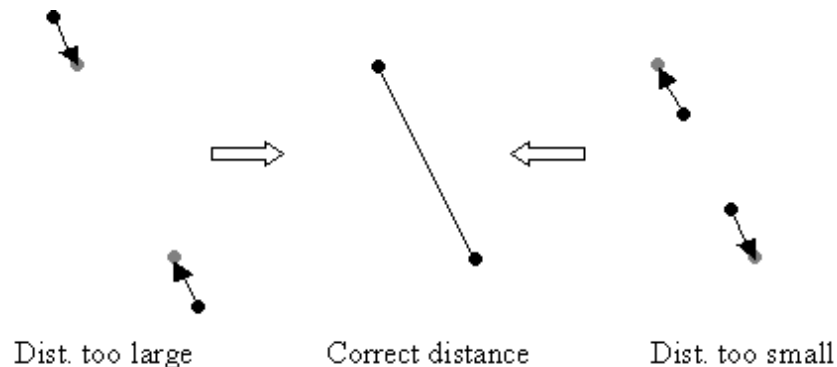
侵入が発生

侵入を解決する位置を直接求める
(幾何的な拘束条件を考える)

位置から速度を逆算する

12

CEDEC2022

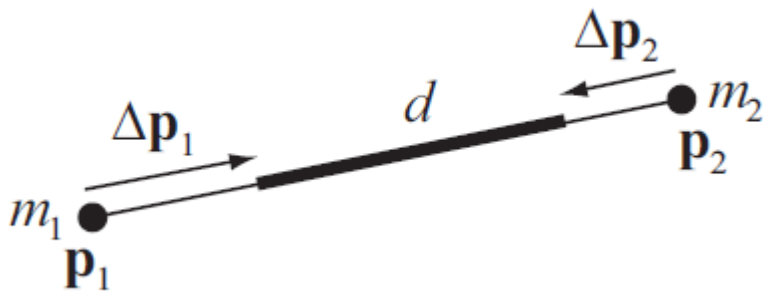


[T01]



Position Based Dynamics 入門

- 距離の拘束 $C_{\text{stretch}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ を数式で捉える



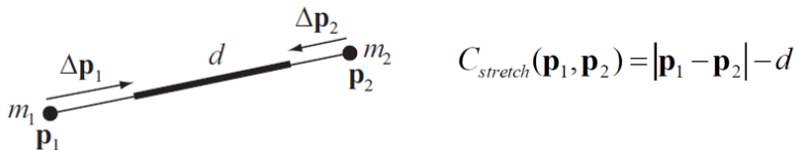
$$C_{\text{stretch}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d$$

[MBMJ07]



Position Based Dynamics 入門

- 拘束(Constraint)関数 $C(x)$ として一般化
 - $C(x) = 0$ は PBD 拘束が満たされた状態 😍
 - x が少し運動した $x + \Delta x$ においても拘束を満たしたい 😊
 - $C(x + \Delta x) = 0$ を満たす Δx を発見して適用(projection) 😍



[MBMJ07]



Position Based Dynamics 入門

- 陽解法オイラー(prediction) + 拘束(correction)

- 力ベースより正確な位置ベースの積分処理



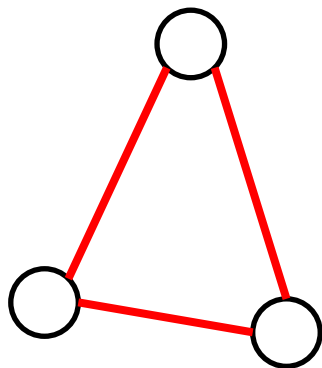
[MBMJ07]

Position Based Dynamics 入門

- 複数の距離(stretch)拘束(Constraint) (🧐)

$$C_{stretch}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d$$

p1, p2: パーティクル位置
d: 赤い線の長さ

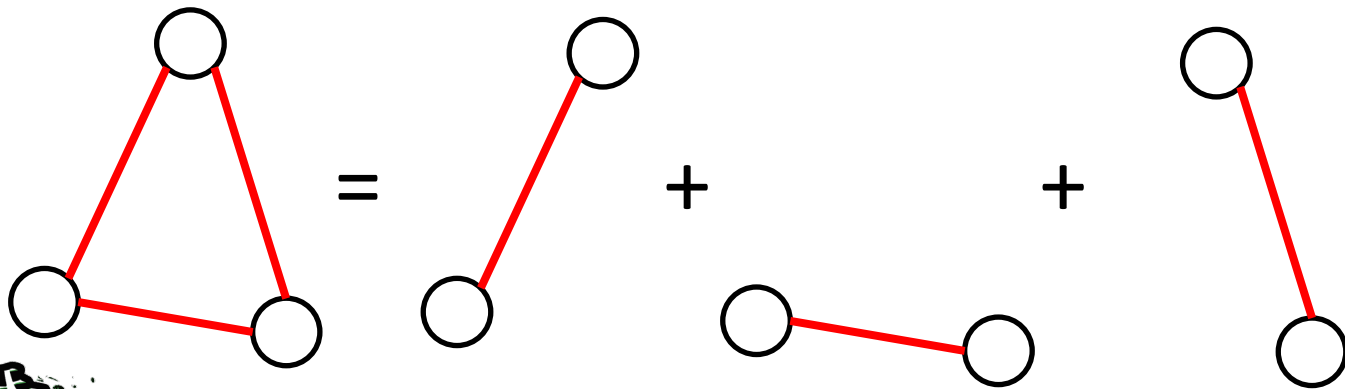


Position Based Dynamics 入門

- 複数の距離(stretch)拘束(Constraint) (🤖)

$$C_{stretch}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d$$

p1, p2: パーティクル位置
d: 赤い線の長さ



Position Based Dynamics 入門

- 複数の距離(stretch)拘束(Constraint) 😊

$$C_{stretch}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d$$

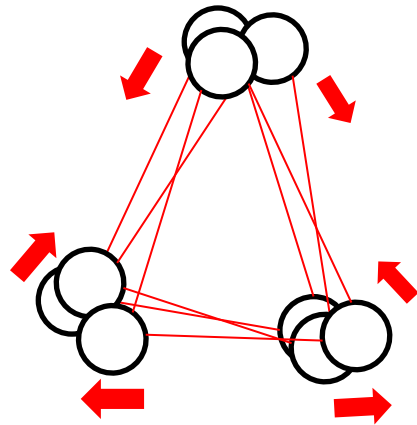
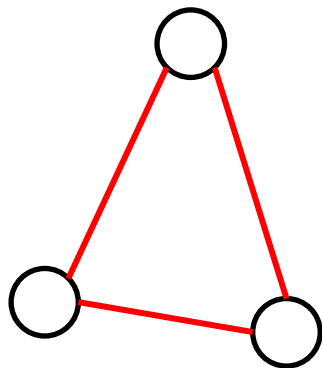
p1, p2: パーティクル位置
d: 赤い線の長さ

1つの拘束を満たす(projection)と
他の2つの拘束を満たさない 😊

順番に拘束を解く処理を繰り返す

繰り返し(イテレーション)毎に3つの拘束全てを
徐々に満たすようになっていきます

Projected Gauss-Seidel 法 😊

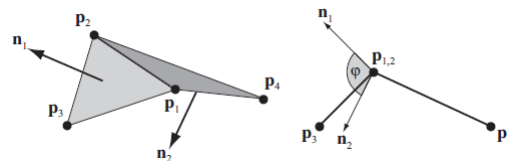


Position Based Dynamics 入門

- その他の拘束関数 [MHHR07]
 - 曲げ(bend)
 - 体積(volume)

$$C_{bend}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \arccos \left(\frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)}{|(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)|} \cdot \frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_1)}{|(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_1)|} \right) - \varphi_0$$

$$C_{volume}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = [(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)] \cdot (\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_1) - v_0$$



[MHHR07]



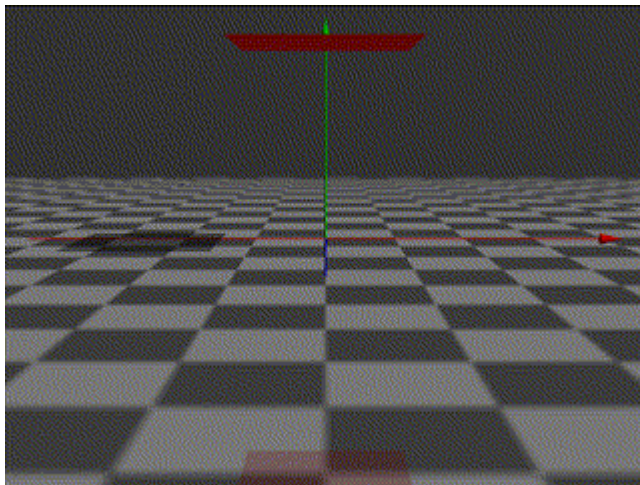
Position Based Dynamics 入門

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Position Based Dynamics 入門

- 繰り返し(イテレーション)回数変えた実験



Position Based Dynamics 入門

- 複数の距離(stretch)拘束(Constraint) 😞

$$C_{stretch}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d$$

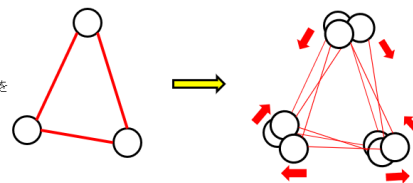
$\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$: パーティクル位置
 d : 赤い線の長さ

1つの拘束を満たす(projection)と他の2つの拘束を満たさない 😞

順番に拘束を解く処理を繰り返す

繰り返し(イテレーション)毎に3つの拘束全てを徐々に満たすようになっていきます

Projected Gauss-Seidel 法 😞



Position Based Dynamics 入門

- Jan Bender さんの実装を参考に
 - <https://github.com/InteractiveComputerGraphics/PositionBasedDynamics>



Position Based Dynamics 入門

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Position Based Dynamics 入門

- 長所
 - 幾何的に位置を拘束で解決するだけなので理解しやすく実装もシンプル
 - 無条件安定で発散しない・頂点位置とオブジェクト位置を直接制御できる
- 短所
 - 繰り返し(イテレーション)回数によって剛性が変化
 - →XPBD: position-based simulation of compliant constrained dynamics で解決
 - エネルギー減衰が大きめ
 - →Small Steps in Physics Simulation で解決
 - 全てを弾性体として扱っている
 - →Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics で剛体も扱えるように



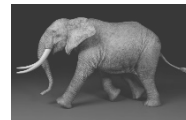
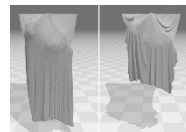
まとめ

- 従来手法(Force Based Dynamics)押出
 - 力を考える→速度を求める→位置を求める
- Position Based Dynamics(PBD) 手法押出
 - 拘束を考える→位置を修正→速度を逆算
- Position Based Dynamics
 - 陽解法オイラー(prediction) + 拘束(correction)でバネモデルよりもより正確な積分が行えるようになる



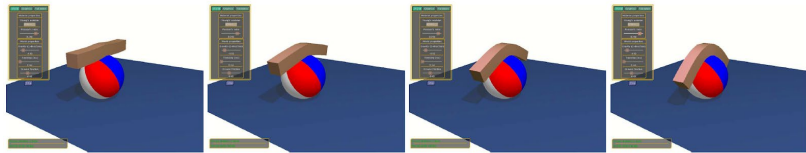
内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials

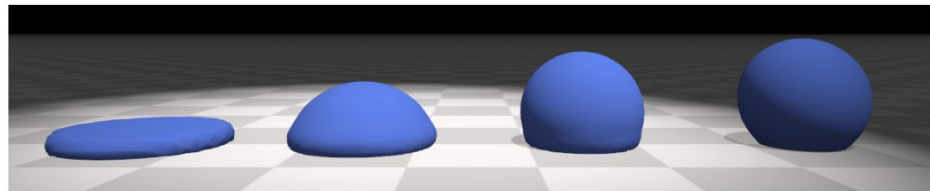


XPBD への拡張

- Interactive Simulation of Elastic Deformable Materials (2012)
- XPBD Position-Based Simulation of Compliant Constrained Dynamics (2016)



[JFE 12]



[MMN16]



XPBD への拡張

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



XPBD への拡張

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



XPBD への拡張

- XPBD

- e**X**tended + **P**osition **B**ased **D**ynamics
- Position Base Dynamics(PBD) の課題を解決
 - 繰り返し(イテレーション)回数によって剛性値が変わらないように 😊
- 弾性エネルギーに基づいており力の推定が可能
- 現実のコンプライアンス値(ヤング率の逆数)がそのまま使える

MATERIAL	STIFFNESS (N/M ²)	COMPLIANCE (M ² /N)
Concrete	25.0×10^9	0.04×10^{-9}
Wood	6.0×10^9	0.16×10^{-9}
Leather	1.0×10^8	1.0×10^{-8}
Tendon	5.0×10^7	0.2×10^{-7}
Rubber	1.0×10^6	1.0×10^{-6}
Muscle	5.0×10^3	0.2×10^{-3}
Fat	1.0×10^3	1.0×10^{-3}

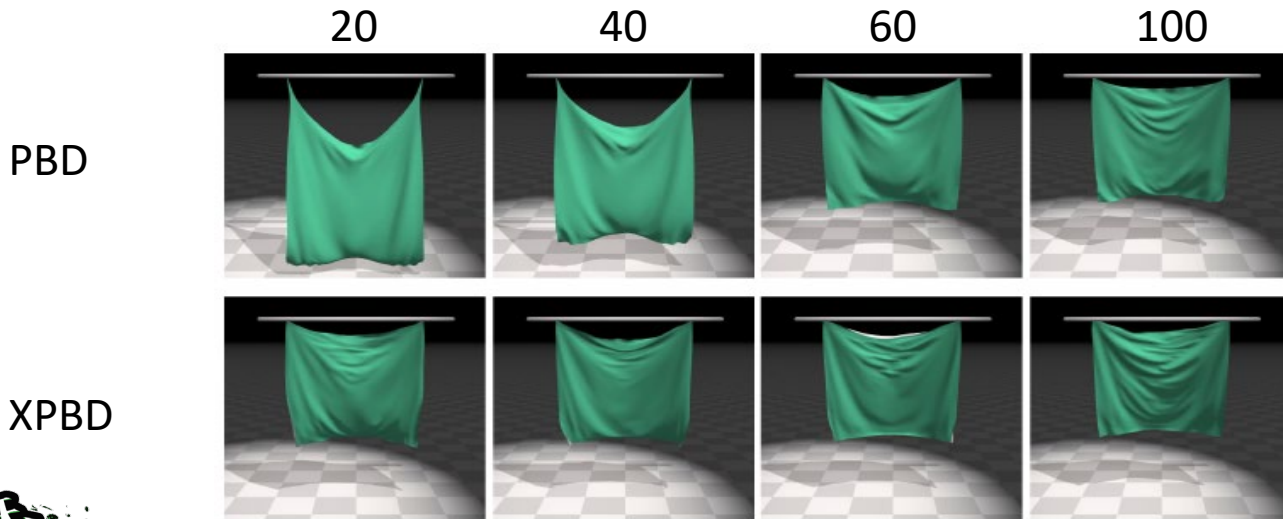
<http://blog.mmacklin.com/>



XPBD への拡張

- XPBD と PBD の比較

- 繰り返し(イテレーション)回数によって剛性値不変



[MMN16]

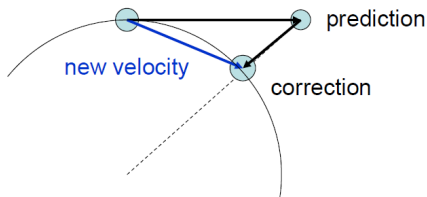


XPBD への拡張

- PBD(幾何的に移動) vs XPBD(変分法的に移動)

Position Correction

- Move vertices out of other objects
- Move vertices such that constraints are satisfied
- Example: Particle on circle



[MBMJ07]

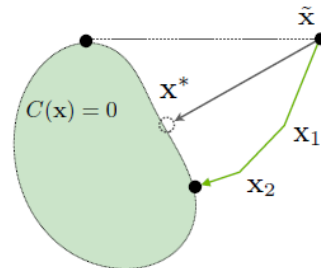
VARIATIONAL VIEWPOINT

Implicit Euler

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) \\ \text{subject to} & \mathbf{C}(\mathbf{x}) = 0 \end{array}$$

PBD

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)^T \mathbf{M}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \\ \text{subject to} & \mathbf{C}(\mathbf{x}) = 0 \end{array}$$



[MMN16]

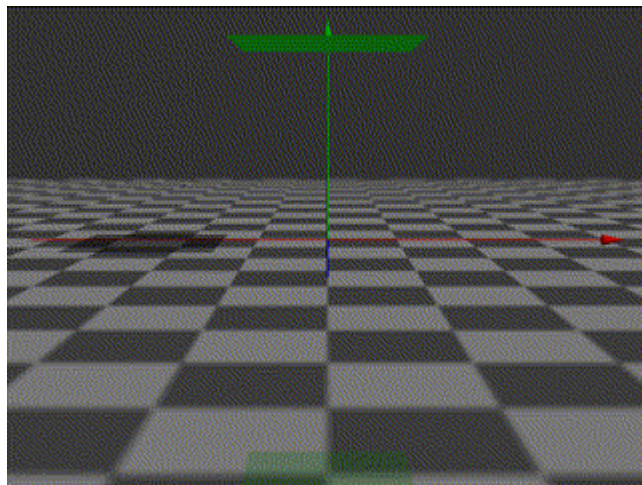
XPBD への拡張

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



XPBD への拡張

- PBD と比較しやすいような学習用のシンプルなデモ
- 現実の素材を扱える(Concrete, Wood, Leather, Tendon, Rubber, Muscle, Fat)。イテレーション回数の影響も確認可能



XPBD への拡張

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



XPBD への拡張

- 長所
 - 力を考慮した拘束なので現実のコンプライアンス値を反映できる
 - PBD の実装と互換性が高く、計算コストも同等で高速
 - 無条件安定で発散しない・頂点位置とオブジェクト位置を直接制御できる
- 短所
 - エネルギー減衰が大きめ
 - →Small Steps in Physics Simulation で解決
 - 全てを弾性体として扱っている
 - →Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics で剛体



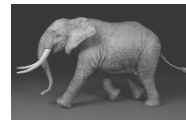
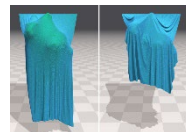
XPBD への拡張

- まとめ
 - PBD 幾何的な拘束条件
 - XPBD 弾性エネルギーに基づいた拘束条件
 - 繰り返し(イテレーション)回数によって剛性値が変わらないよう 😍
 - 現実のコンプライアンス値(ヤング率の逆数)がそのまま使える 😍



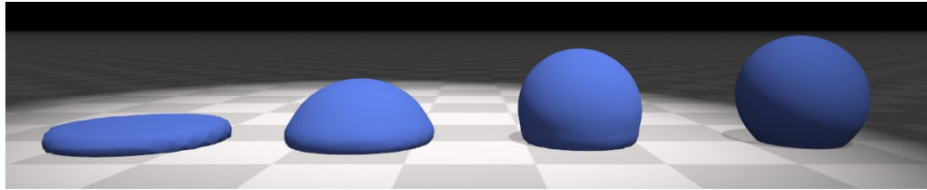
内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials

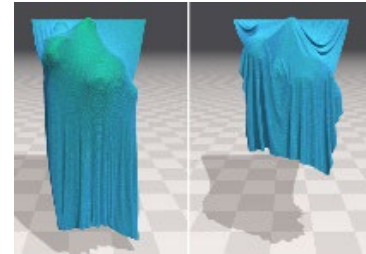


Small Steps in Physics Simulation

- XPBD Position-Based Simulation of Compliant Constrained Dynamics (2016)
- Small Steps in Physics Simulation (2019)



[MMN16]



[MKMPNSM19]



Small Steps in Physics Simulation

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Small Steps in Physics Simulation

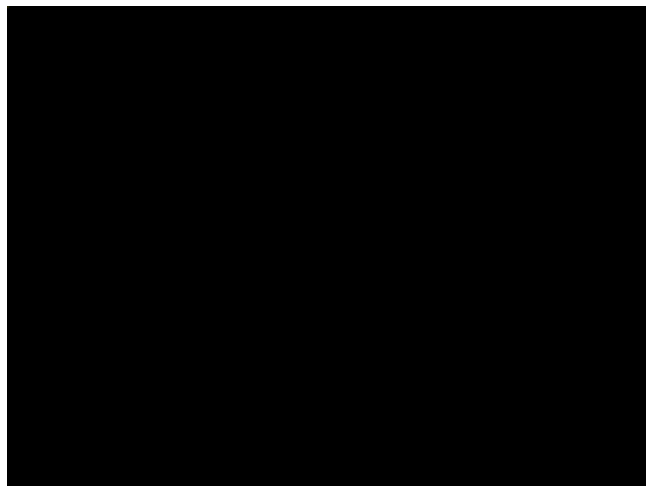
- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



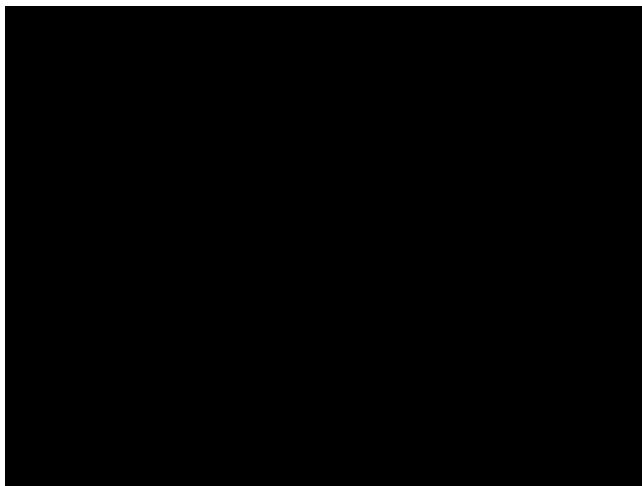
Small Steps in Physics Simulation

- いきなり結果比較

XPBD(100 iterations)



substep XPBD(100 substepss)

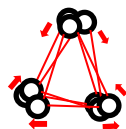


Small Steps in Physics Simulation

- XPBD のイテレーションを substep に分割
- substep XPBD: ($\Delta t/\text{substep}$) に時分割して substep 回実行
 - 交差判定は Δt に一回、交差応答は substep 回に分けて行う

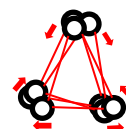
Algorithm 1 XPBD simulation loop

```
1: predict position  $\tilde{\mathbf{x}} \leftarrow \mathbf{x}^n + \Delta t \mathbf{v}^n + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}_{ext}(\mathbf{x}^n)$ 
2:
3: initialize solve  $\mathbf{x}_0 \leftarrow \tilde{\mathbf{x}}$ 
4: initialize multipliers  $\lambda_0 \leftarrow 0$ 
5: while  $i < \text{solverIterations}$  do
6:   for all constraints do
7:     compute  $\Delta \lambda$  using Eq (18)
8:     compute  $\Delta \mathbf{x}$  using Eq (17)
9:     update  $\lambda_{i+1} \leftarrow \lambda_i + \Delta \lambda$ 
10:    update  $\mathbf{x}_{i+1} \leftarrow \mathbf{x}_i + \Delta \mathbf{x}$ 
11:   end for
12:    $i \leftarrow i + 1$ 
13: end while
14:
15: update positions  $\mathbf{x}^{n+1} \leftarrow \mathbf{x}_i$ 
16: update velocities  $\mathbf{v}^{n+1} \leftarrow \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n)$ 
```



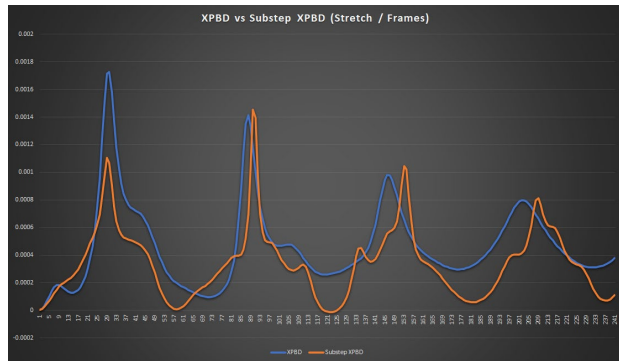
Algorithm 1 Substep XPBD simulation loop

```
1: perform collision detection using  $\mathbf{x}^n, \mathbf{v}^n$ 
2:  $\Delta t_s \leftarrow \frac{\Delta t_f}{n_{steps}}$ 
3: while  $n < n_{steps}$  do
4:   predict position  $\tilde{\mathbf{x}} \leftarrow \mathbf{x}^n + \Delta t_s \mathbf{v}^n + \Delta t_s^2 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}_{ext}(\mathbf{x}^n)$ 
5:   for all constraints do
6:     compute  $\Delta \lambda$  using Eq (7)
7:     compute  $\Delta \mathbf{x}$  using Eq (4)
8:     update  $\lambda^{n+1} \leftarrow \Delta \lambda$  (optional)
9:     update  $\mathbf{x}^{n+1} \leftarrow \Delta \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{x}}$ 
10:   end for
11:   update velocities  $\mathbf{v}^{n+1} \leftarrow \frac{1}{\Delta t_s} (\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n)$ 
12:    $n \leftarrow n + 1$ 
13: end while
14:
```

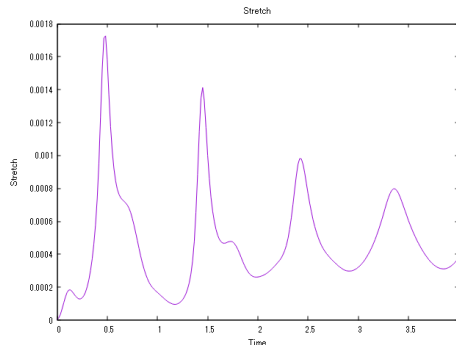
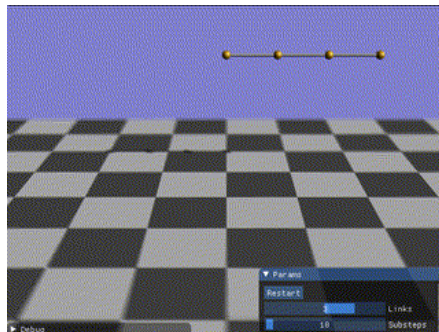


Small Steps in Physics Simulation

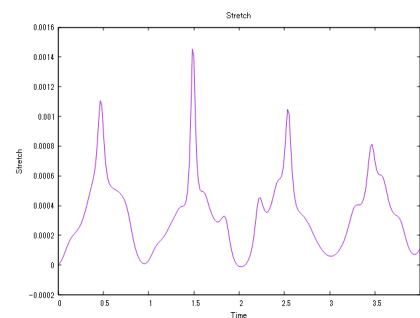
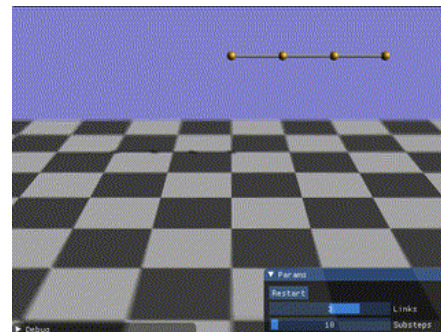
- Rope の伸び(=誤差)が減少



XPBD(10 iteration)



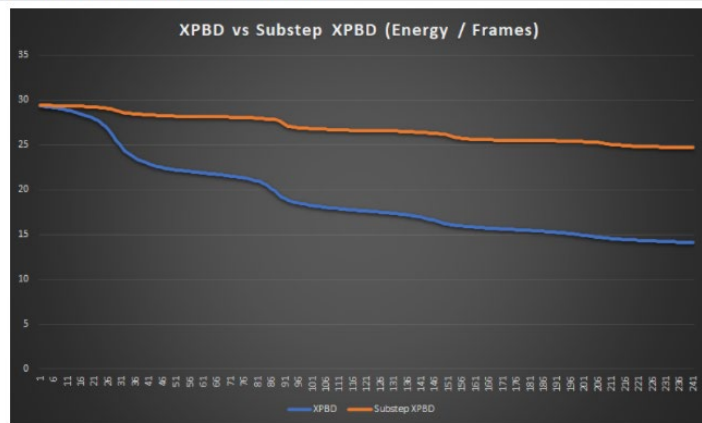
Substep XPBD(10 substep)



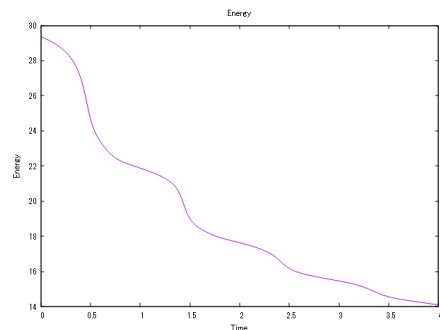
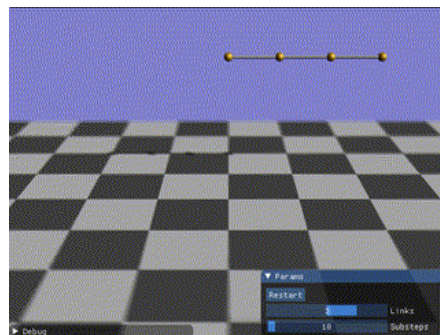
Small Steps in Physics Simulation

- エネルギー保存性の劇的改善

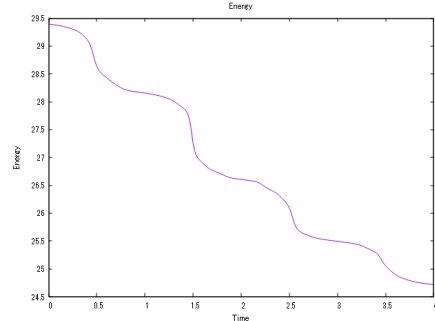
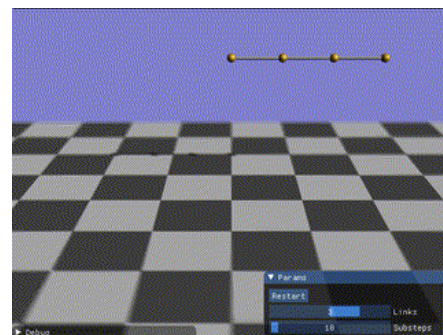
[Energy Comparison] XPBD vs Substep XPBD



XPBD(10 iteration)



Substep XPBD(10 substep)



Small Steps in Physics Simulation

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所

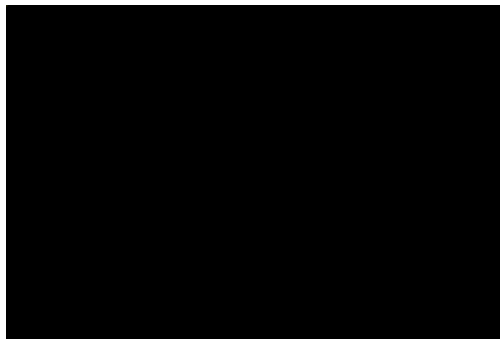


Small Steps in Physics Simulation

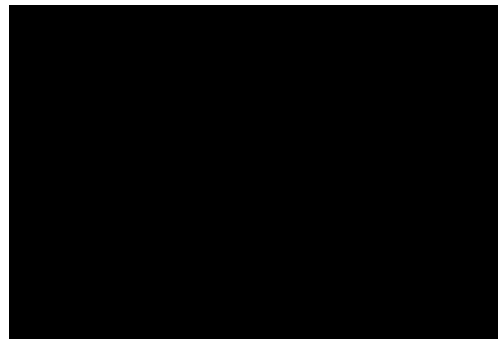
- 実装デモ

- XPBD と比較しやすいような学習用のシンプルなデモ
- 実装は筆者提供のものを参考→実装が正確なはず

XPBD(100 iteration)



Substep XPBD(100 substep)



Small Steps in Physics Simulation

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Small Steps in Physics Simulation

- 長所
 - XPBD 同等の計算コストでエネルギー減衰の少ない処理が可能
- 短所
 - substep 数が多いと float では精度が足りなくなることがある
 - substep 単位での衝突検出を逃すことがある
 - ローカル解法は方程式を同時に解く場合よりも誤差補正の伝搬が遅く剛性が高い問題に適していない
 - →完全な剛体に関しては、Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics



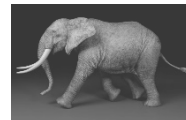
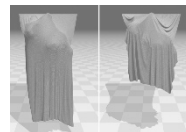
Small Steps in Physics Simulation

- まとめ
 - XPBD のイテレーションを substep に分割
 - $\Delta t \rightarrow \Delta t / \text{substep}$ に時分割して substep 回イテレーションを実行
 - XPBD 同等の計算コストでエネルギー減衰の少ない処理が可能 😍



内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials



- The third dimension. Game Developer Magazine (1997)
- Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics (2019)



[MMNST20]



- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所

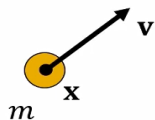


- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



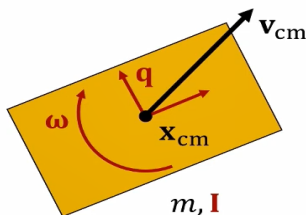
- substep XPBD + 剛体

粒子(≡質点)



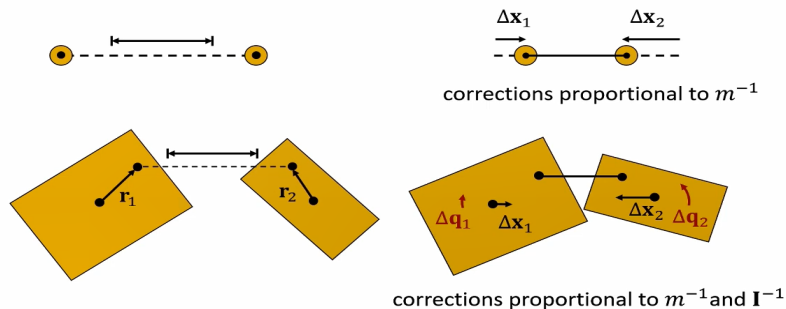
\mathbf{x} position
 \mathbf{v} velocity
 m mass

剛体



\mathbf{q} orientation
 ω angular velocity
 \mathbf{I} inertia

距離(stretch)拘束を拡張して剛体も扱う



[MMNST20]

Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics

- substep XPBD + 剛体
- 剛体をつなぐジョイントの制限が豊富
 - swing 角度制限 / swing角度コンプライアンス
 - twist 角度制限 / twist 角度コンプライアンス



swing



twist

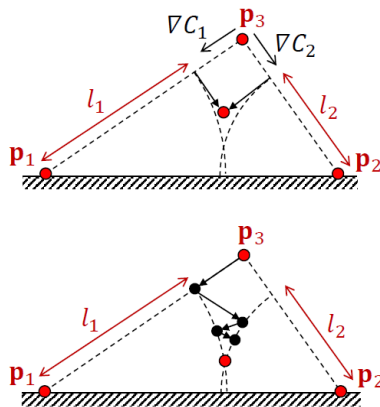
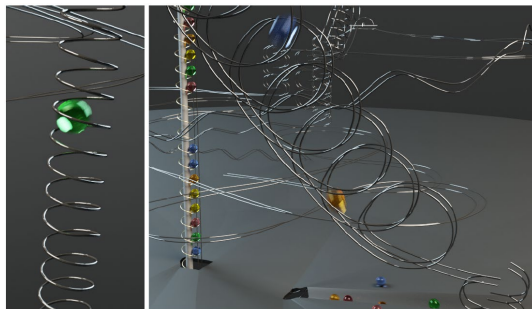
- 剛体と弾性体を自然に接続可能
 - ホイール(剛体)とタイヤ(弾性体)



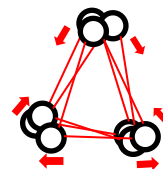
[MMNST20]

- 精密な衝突応答が可能

- 理由: substep 単位で非線形に拘束(押し出し)の解決



従来手法: 複数の拘束(押し出し)があっても線形化が入る



繰り返し解法

本手法: 複数の拘束(押し出し)を非線形に繰り返し適用



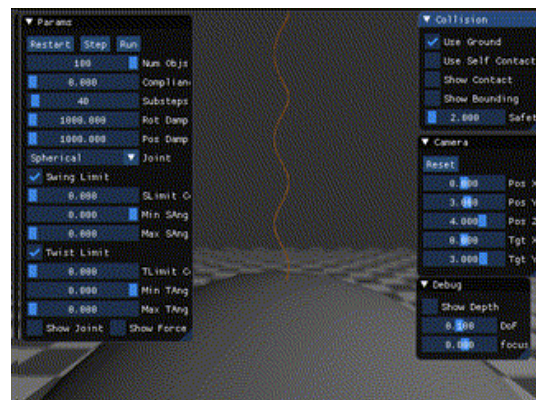
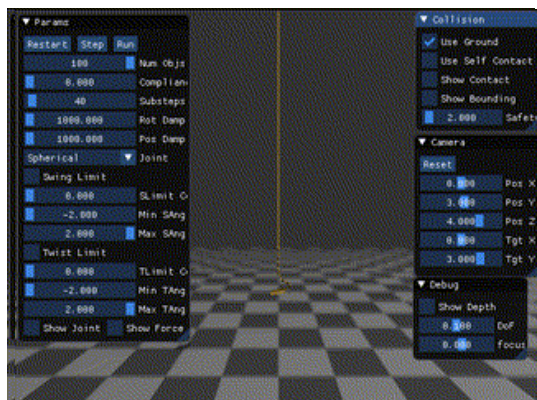
- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics

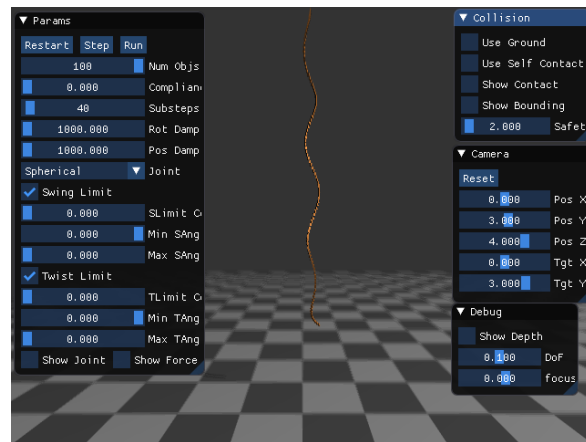
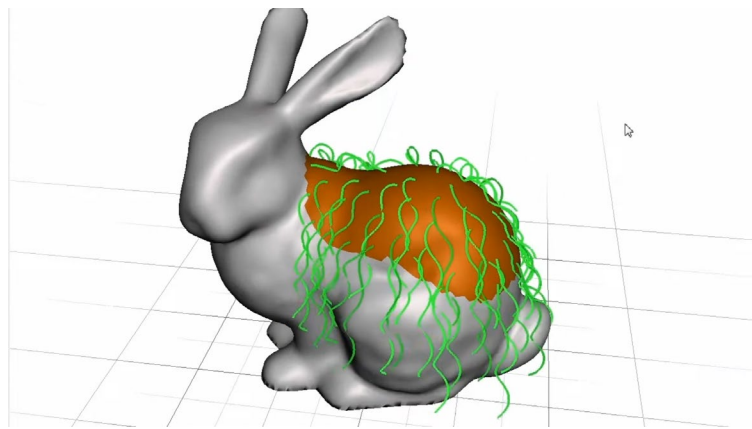
• 実装デモ

- 全ジョイント機能/先行研究比較/コリジョン実装/double/float
- 実装は筆者提供のものを参考→実装が正確なはず



Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics

- 先行研究の再現実験
- Position Based Elastic Rods



[NRJ14]

- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



- 長所
 - 剛体と弾性体を自然に組み合わせたシュミレーションが可能
 - ジョイントや接続点での力やトルクを計算できる
 - ジョイントの twist, swing 制限でねじれた紐の表現が可能
 - 曲面に沿った運動などで精密な衝突応答が可能
 - 質量比が大きい場合でも安定した剛体シミュレーションが可能
- 短所
 - substep 法では、double 精度が必要になることがある
 - →ハードウェアの進化で解決できそう？
 - 剛性の高い弾性体や、メッシュの解像度が高い場合に収束が遅い

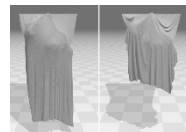


- まとめ
 - Substep XPBD + 剛体
 - 剛体と弾性体の組み合わせで有益だろう
 - ジョイントの機能も豊富で使いやすい



内容

- Position Based Dynamics 入門
- XPBD への拡張
- 最新研究紹介
 - Small Steps in Physics Simulation
 - Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials



A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials

- Stable Neo-Hookean Flesh Simulation(2018)
- A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials(2021)



[BFT18]



[MM21]



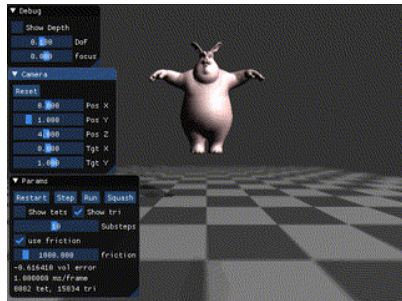
- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



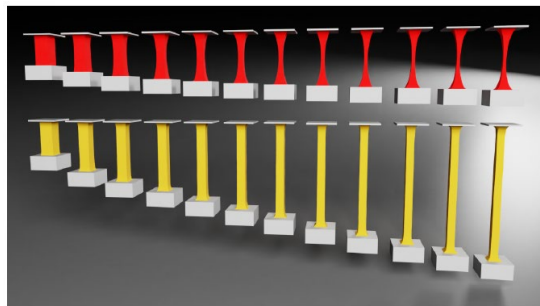
- Neo-Hookean モデル + PBD
 - Neo-Hookean エネルギーの拘束ベースモデル
 - 歪み+体積保存の拘束を substep XPBDで解く
 - 四面体メッシュを入力とする
 - 既存ニュートン法実装 [BFT18]より 20x高速
 - 完全に潰れた状態を扱える→安定



- Neo-Hookean モデル
 - 体積保存性
 - [TD20] で詳細を学べる

Continuous
Hookean model

Volume
Conserving model

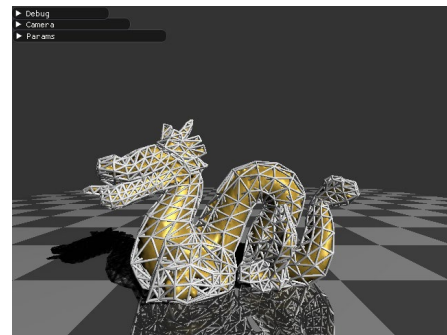


[MM21]

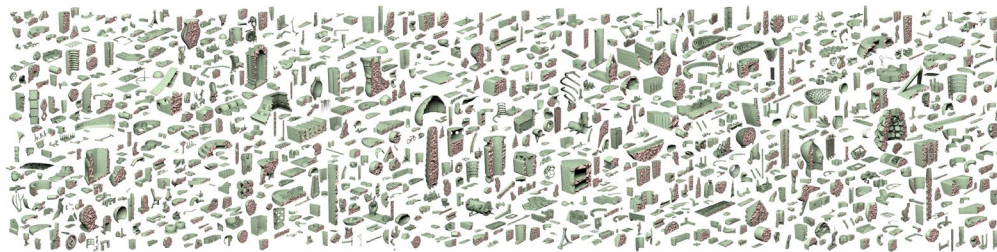


A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials

- 実装上の工夫
 - 表示用メッシュの埋め込み
 - 描画用: 三角形メッシュ
 - シミュレーション用: 四面体メッシュ
 - 重心座標を用いて三角形と四面体の対応
 - Ten Minute Physics / 12 100x speedup for soft body simulations
 - <https://matthias-research.github.io/pages/tenMinutePhysics/>



- 四面体メッシュ生成(1/3)
 - 三角形メッシュから生成できる
 - ロバストな実装は難しい問題
 - fTetWild [YTBDD20]などの最新研究がある
 - 実装も公開されている <https://github.com/wildmeshing/fTetWild>



- 四面体メッシュ生成(2/3)

- Muller さんの Blender Plugin が良い

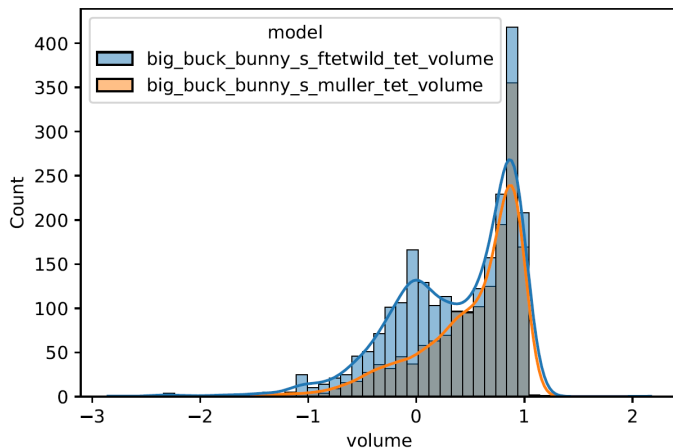
- Ten Minute Physics / 13 Writing a Tetrahedralizer for Blender
 - <https://matthias-research.github.io/pages/tenMinutePhysics/>



- PBD 向けの四面体品質評価が入っている
 - 四面体品質の議論は [MNTM 15]



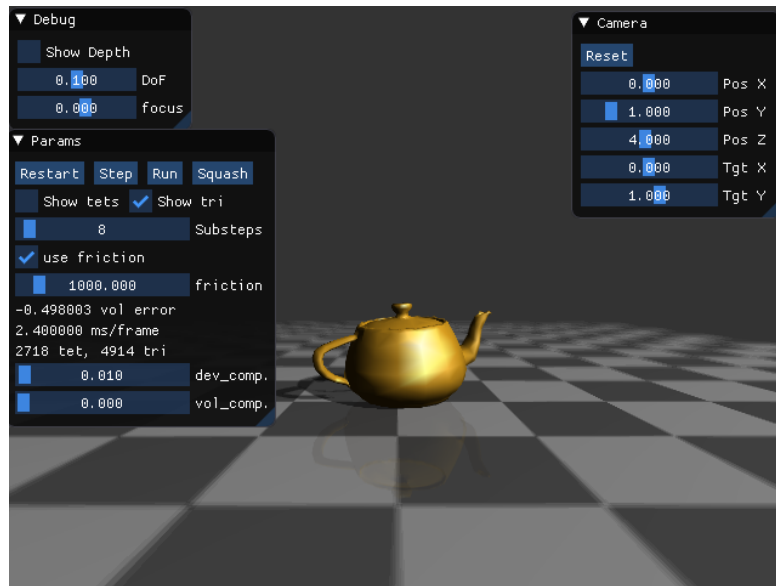
- 四面体メッシュ生成(2/3)
 - fTetWild vs Muller さん Blender Plugin
 - 体積 0 近辺の四面体が少ない → PBD向き



- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials



- 解説の流れ
 - 基本概念
 - 実装デモ
 - 長所・短所



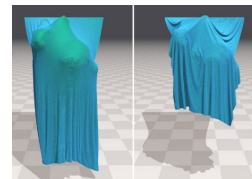
- 長所
 - シンプル、高速、**体積保存性**
 - 完全に潰れるケース(**体積0**)も扱える
- 短所
 - 適切な**四面体生成が必要**だが難しい



Position Based Dynamics

- 最新研究紹介

- Small Steps in Physics Simulation
 - XPBD のイテレーションを substep に分割で高品質化
- Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics
 - (substep XPBD + 剛体)で弾性体と剛体を結合して扱える
- A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials
 - Neo-Hookean (歪み+体積保存) モデルの拘束を substep XPBD で解く



[MKMPNSM19]



[MMNST20]



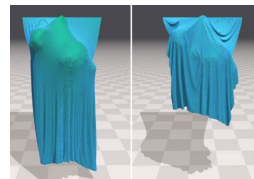
[MM21]



Position Based Dynamics

- まとめ

- 安定性、高速性はそのままに**多用途**、**高品質化**
 - XPBD 以降、現実のコンプライアンス値が使えるように
 - substep XPBD(2020) 以降、シミュレーション品質向上
 - 剛体(2020)や、Neo-Hookean モデル(2021)など多用途化
- 一方当初の**シンプル**さは**失われて難解**になっている
- **今後も発展が期待**できる分野
- ビデオゲームでの採用が増えることが予想される



[MKMPNSM19]



[MMNST20]



[MM21]



参考文献

- [MKMPNSM19] M. Macklin, K. Storey, M. Lu, P. Terdiman, N. Chentanez, S. Jeschke, M. Muller: Small Steps in Physics Simulation, Symposium on Computer Animation (SCA 2019)
- [MMNST20] M. Müller, M. Macklin, N. Chentanez, S. Jeschke, T. Y. Kim: Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics, Symposium on Computer Animation (SCA 2020)
- [MM21] M. Macklin, M. Muller: A Constraint-based Formulation of Stable Neo-Hookean Materials, Motion, Interaction and Games (MIG 2021)
- [T01] Thomas Jakobsen: Advanced character physics, GAME DEVELOPERS CONFERENCE (2001)
- [MBMJ07] Position based dynamics, Journal of Visual Communication and Image Representation, Volume 18, Issue 2, April, 2007
- [MMN16] Miles Macklin, Matthias Muller, Nuttapong Chentanez: XPBD: position-based simulation of compliant constrained dynamics, Motion, Interaction and Games (MIG 2016)
- [JFE 12] Jernej Barbi, Funshing Sin, Eitan Grinspun: Interactive editing of deformable simulations, ACM Transactions on Graphics, Volume 31, Issue 4, July 2012



参考文献(2/2)

- [Hec97] HECKER C.: The third dimension. Game Developer Magazine (June 1997).
- [NRJ14] Nobuyuki Umetani, Ryan Schmidt, Jos Stam: Position-based elastic rods, SCA '14, (July 2014)
- [BFT18] Breannan Smith, Fernando De Goes, and Theodore Kim: Stable Neo-Hookean Flesh Simulation. ACM Trans. Graph. 37, 2, Article 12 (March 2018),
- [YTBDD20] Yixin Hu, Teseo Schneider, Bolun Wang, Denis Zorin, Daniele Panozzo: Fast Tetrahedral Meshing in the Wild. ACM Trans. Graph. 39, 4, (July 2020)
- [MNTM 15] Matthias Muller, Nuttapong Chentanez, Tae-Yong Kim, Miles Macklin: Air Meshes for Robust Collision Handling, ACM Trans. Graph. 39, 4, (August 2015)
- [TD20] Theodore Kim, David Eberle: Dynamic deformables: implementation and production practicalities, ACM SIGGRAPH 2020 Courses (August 2020)

