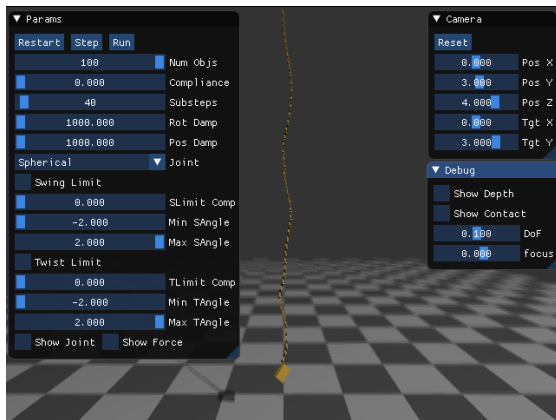


## 実装: Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics

2022年8月23日更新 中川展男



### 目的

この文章では、論文: [Detailed Rigid Body Simulation with Extended Position Based Dynamics](#) (2020) に関して、実際に動作するアプリケーションを用いて素早く理解することを目的としています。

### 配布物

- pbd\_rb

windows(x64) の実行形式を用意しています。float ビルド版、double ビルド版を各ディレクトリに用意しています。

### 操作方法

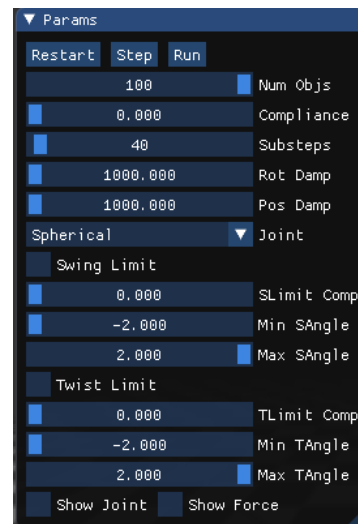
キーボード:

r: リスタート  
s: スクリーンショット取得  
d: デプスバッファ取得  
←→: シーン切り替え  
esc: アプリケーション終了

マウス:

左ボタン: imgui 操作、オブジェクト操作  
中ボタン: カメラズーム  
右ボタン: カメラ操作

### パラメータ操作



Restart: リスタート(r キー同様)

Step: ステップ実行、押すごとにフレームを進める

Run: 通常実行に切り替える

Num Objs: オブジェクト数変更してリスタート

Compliance: ジョイントのコンプライアンス値指定

Substep: Substep XPBD での物理シミュレーション全体の分割数を指定

Rot Damping: 回転減衰値指定

Pos Damping: 位置減衰値指定

Joint: ジョイント種類切り替え

Swing Limit: ジョイントの回転制限値 on/off

SLimit Comp: ジョイントの回転制限コンプライアンス

Min SAngle: ジョイントの最小回転制限角度

Max SAngle: ジョイントの最大回転制限角度

Twist Limit: ジョイントのねじり制限値 on/off

TLimit Comp: ジョイントのねじり制限コンプライアンス

Min TAngle: ジョイントの最小ねじり制限角度

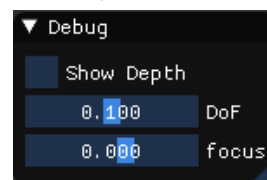
Max TAngle: ジョイントの最大ねじり制限角度

Show Joint: ジョイントのデバッグ表示 on/off

Show Force: ジョイントに働く力を表示 on/off

実際に操作することで挙動の変化を理解していただければと思います。すべてのパラメータは動的に変更可能で、即座に反映されます。

### デバッグ機能

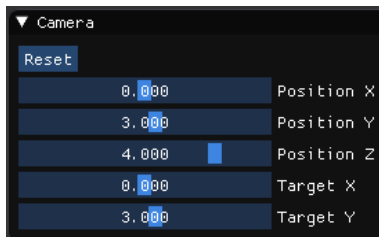


Show Depth: デプスバッファ表示

DoF: 被写界深度強度

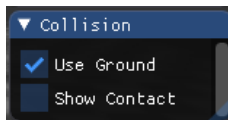
focus: 被写界深度フォーカス位置

### カメラ操作



Reset: カメラ位置初期  
 その他はカメラ位置と注視点を指定できます。

#### コリジョン操作

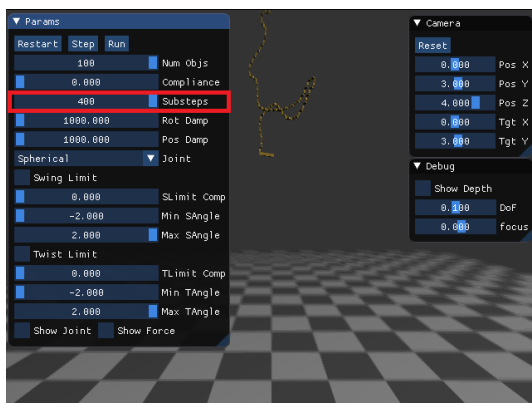


Use Ground: 地形を使う/使わない  
 Show Contact: 衝突位置、衝突法線表示

#### 実験

##### float と double の比較

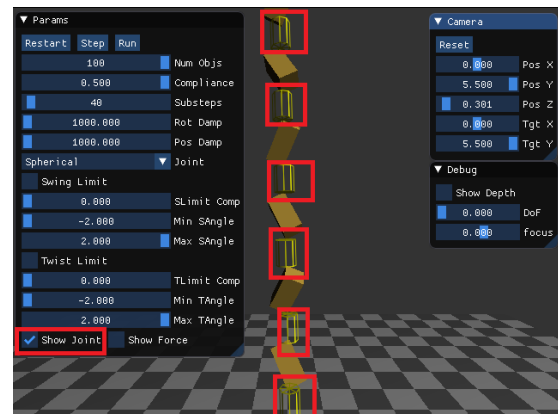
論文内に substep を細かくした場合に float だと計算精度の問題が出るとの記載がある。実際に float ビルドで、substep を 400 など大きくしたところ(下図参照)挙動がおかしくなるのが確認できた。double 版ではこのような問題は起こりにくい。substep XPBD の場合は、物理演算部に double を用いたほうが好ましいとは言えるだろう。GPU 実装の場合は(環境によるが)計算コストが増えてしまう事が本手法のデメリットになると言える。CPU 物理演算に double を用いる場合は、計算量というよりメモリサイズやローディング時間の都合で float と double を混在することになる事が考えられるが、その場合に実装が煩雑になるのもデメリットと言えるかもしれない。



##### コンプライアンス値と伸び

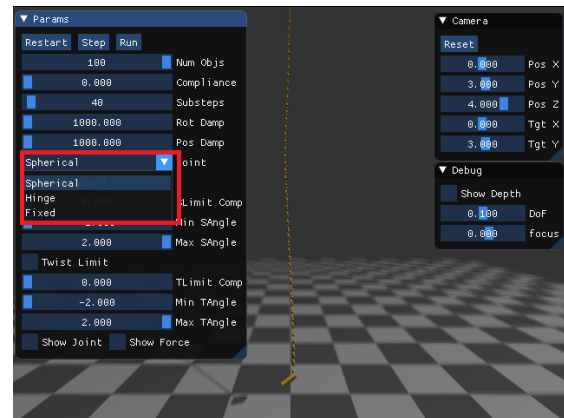
ジョイントは、剛体のペアを取り付け、剛体の相対的な位置および回転を制限するものです。コンプライアンス値を大きくすることでジョイントが伸びるのが確認できる。ぶら下がっている重りや鎖状に連なる部位は完全に剛体なので変形しない。ただし、剛体を接続するジョ

イントにコンプライアンス値を指定でき、弾性を持たせる事ができる。これは、論文の Figure 4 の実験と同等のものです。デバッグ表示で、ジョイント自体を表示する機能をつけた(下図参照)。弾性体と剛体を組み合わせたデモが作れると先行研究に対する本手法の有用性を示せることになるかと思います。

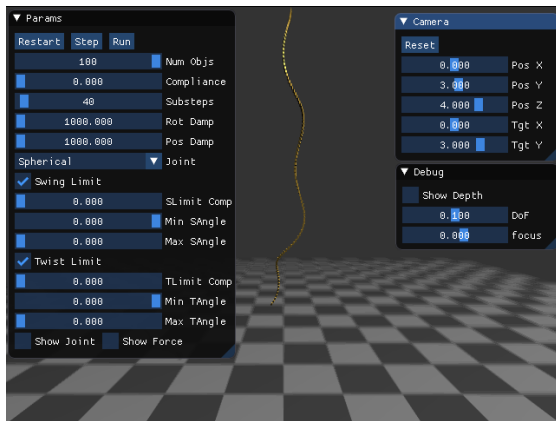


##### ジョイント種類の比較

論文で提案されている3種類のジョイント(Spherical, Hinge, Fixed)実装を行った。本実装では、これらを切り替えて動作の違いを比較できる。また、ジョイントの Swing 制限、Twist 制限の値も設定でき、それぞれのジョイントのコンプライアンス値を指定することで現実の物理パラメータを反映した複雑な制御が可能となる事がわかる。

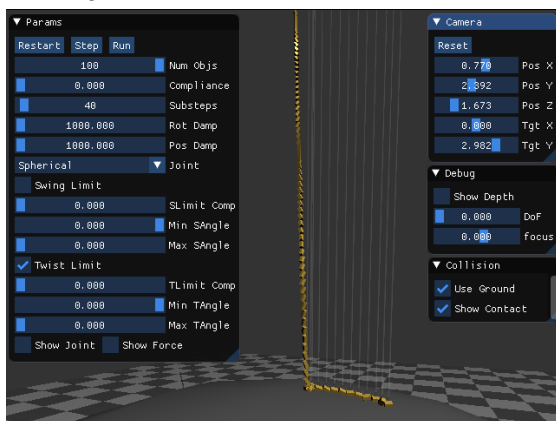


#### Swing Limit, Twist Limit



100個の剛体を螺旋状に配置して swing limit, twist limit に制限を加えたシーンを用意して実験した。これらのジョイント制限により接続された剛体の向きが制限されます。簡単なパーマヘアーのイメージですが、螺旋状の形状を維持したまま弾性のある動きが実現できている事を確認できた。ただし現在自己交差を含むコリジョンが未実装なため結び目などの論文にある表現は再現できていない。

### substep 単位での精密な衝突応答



簡単な球状オブジェクトとの剛体同士の衝突応答を実装した。交差判定は  $\Delta t$  毎に一回だけ行ない、サブステップ毎(デフォルト40)に押し出し処理とジョイントの拘束を適用することで極めて精密かつ安定した衝突応答ができることを確認した。上記100剛体を接続した場合でも振動することなく安定している。また、imgui の Collision / Use Ground を on / off して意図的に剛体に大きく侵入させた場合でも、ゆっくり浮かび上がるように押し出しができるのも確認できる。ビデオゲームで初期フレームでオブジェクトに食い込んでしまうような劣悪な環境でも安定した解が得られる事がわかる。