

# 力覚インタラクションのための大域的な弾塑性変形手法

A method for global elastic-plastic deformation for haptic interaction.

松永昇悟<sup>1)</sup>, 長谷川晶一<sup>2)</sup>

Shogo Matsunaga and Shoishi Hasegawa

1)2) 電気通信大学大学院 知能機械工学専攻

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, 1)matsunaga,2)hase@hi.mce.uec.ac.jp)

**Abstract :** As realtime simulation of elastic-plastic deformation demands large amounts of calculation, it is limited to small-scale models. We propose a simulation method of global elastic-plastic deformation. In our method, elastic-plastic deformation is simulated by rheologic model using LCP solver for stable simulation. In addition we present skin mesh using SSD and adapt rheologic model for joints.

**Key Words:** *Haptic Display, Deformable Models, Plastic deformation*

## 1. 背景

近年, 3D アニメーションのキーフレーム制作のために 3D モデルの変形操作が行われている. アニメーションを製作する場合, モーションエディタと呼ばれるソフトウェアを使用し, キャラクターに埋め込んだボーンと呼ばれる制御軸の位置を動かすことで, 姿勢(キーフレーム)を生成する. しかし, 3次元の動きを生成するデバイスとして, マウス等の 2次元デバイスが用いられるため直観的な操作が困難である. そこで, 3次元空間での 3D モデルの変形操作における操作性の向上が課題となっている. 従来研究では人形にセンサを取り付け, モーションキャプチャを行う方法が考案されている. [1] この方法では高い操作性が得られるが, 3D キャラクターごとに骨格構造を作成しなければならぬ. そこで, 自由な骨格構造をもつ 3D モデルに適応可能な操作性の高い 3D モデルの変形手法が必要とされている.

## 2. 目的

本研究では, 3D モデルの変形操作の向上を目的とし, 物理シミュレーションと力覚提示により 3次元空間での VR 操作環境を構築する. そこで, 姿勢の作成に使われる球体関節人形の変形に着目し, 3D モデルの変形シミュレーションを作成する. 球体関節人形では一定以下の力では弾性, 一定以上の力では塑性の変形をする弾塑性変形を示す. この特性により, 力の入力仕方に対応した変形を示すので, 操作性が向上すると考えられる. そこで, 力の入力によって遷移する弾塑性変形をシミュレーションし, VR 環境での操作性の向上を目指す.

## 3. 提案手法

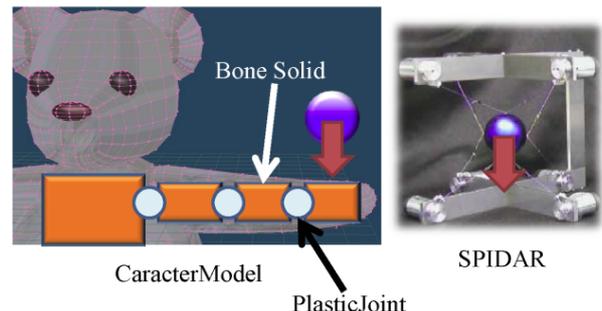


図 1 System configuration.

本研究では VR 環境の 3D モデルを直接接触することにより操作を行う. システム構成を Fig.1 に示す. 力覚提示デバイス (SPIDAR) と物理シミュレーションにより力覚インタラクション環境を構築する. 3D モデルは剛体と関節により近似し, 関節部に対して弾塑性変形関節を導入することにより変形を行う.

### 3.1 弾塑性変形の物理シミュレータへの組み込み

一定の力以下では弾性変形, 一定の力以上では塑性変形を示すシミュレーションを作成する. 弾性変形に関しては, バネとダンパを並列に繋いだフォークトモデル. 塑性変形に関しては, フォークトモデルにダンパを直列に接続した Fig.2 に示す 3要素モデルを用いる. フォークトモデルと 3要素モデルを関節のトルク量によって切り替えることで弾塑性変形関節を作成する. フォークトモデルに関しては長谷川らが安定なシミュレーション手法を提案

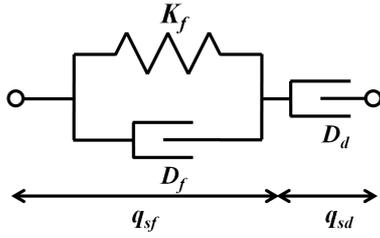


図 2 Three-element model.

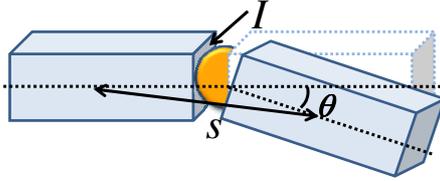


図 3 Balljoint model.

している.[2]そこで,本論文では3要素モデルの変形シミュレーションについて説明する.3要素モデルは戻り変位となるフォークト部  $q_{sf}$  と残留変位となるダンパー部  $q_{sd}$  を直列に接続したものとし,速度を  $w$ ,力を  $\lambda$  とする.力のつりあいと変位の関係から以下の式が成り立つ.

$$\begin{cases} \lambda_s = -K_f q_{sf} - D_f w_{sf} = -D_d w_{sd} \\ q_s = q_{sf} + q_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

式 Eq. (1) を後退積分となるように離散化し整理すると次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} w_s[t+1] &= -C\lambda_s[t+1] - Dq_{sf}[t] \\ C &= \frac{D_d + D_f + K_f h}{D_d(K_f h + D_f)} \\ D &= \frac{K_f}{K_f h + D_f} \end{aligned} \quad (2)$$

上式を拘束条件と運動方程式に連立させ LCP(Linear Complementaly Problem) に帰着させて解く事で安定した弾塑性変形シミュレーションを行うことができる.

### 3.2 球関節モデルによるシミュレーション

塑性変形関節をシミュレーションするため,3要素モデルを球関節の拘束シミュレーションに適用した.球関節のモデルを Fig.3 に示す.球関節の四元数に初期角度を原点とした3要素モデルを組み込むことで,角度方向に塑性変形する関節をシミュレーションすることができる.球関節モデルでは,トルク  $T$ ,角度変位  $\theta$ ,関節部の断面2次モーメント  $I$ ,剛体間の距離  $s$ ,係数  $e$  とすると次式が成り立つ.

$$T = \frac{eI}{s}\theta \quad (3)$$



図 4 Proposed character posture input system.

ここで係数  $e$  はバネ・ダンパ係数となる.式 (3) より  $K_f, D_f, D_d$  に対して次式が成り立つ.

$$K_f = \frac{eK_f I}{s}, D_f = \frac{eD_f I}{s}, D_d = \frac{eD_d I}{s} \quad (4)$$

式 (4) よりモデルの曲げ変形を3自由度の球関節でシミュレーションできるようになった.

## 4. 提案システムの実装

Fig.4. は弾塑性変形関節を組み込んだ3Dモデルを力覚インタフェースにより操作している様子を表している.提案システムによりVR空間で3Dモデルの変形操作を行うことができた.力覚提示を行わない場合,力の入力加減が難しく3次元空間での変形操作が難しく感じられた.しかし,力覚提示を行った場合,ひねりに対して関節部の抵抗が反力として感じられるため,入力が簡単になった.この事より,弾塑性関節を用いて力覚提示することで操作性が向上すると考えられる.

## 5. 課題

現在は1点のポインタにより操作を行っているため掴んで曲げる操作が難しくなっている.そこで,操作性向上のため,VR環境での2点のポインタによる把持操作を実現する.また,解析法による物理シミュレータ上における把持操作時の力覚提示を可能にするために,マルチレートシミュレーションによる力覚レンダリングを行う.[3]

### 参考文献

- [1] Mario Gear. オー・エイ・エス(株)製の人形式モーションキャプチャ.
- [2] 田崎勇一,長谷川晶一.拘束法の動力学シミュレータのための安定なバネダンパモデル.情報処理学会研究報告.グラフィクスとCAD研究会報告,第Vol.2006, No.91(20060817) pp.55-60版,2006.
- [3] 須佐育弥,長谷川晶一.解析法の物理シミュレータのための局所的な動力学計算を行う力覚レンダリング.ヒューマンインタフェース学会研究報告集,第Vol.10, No.2 pp.57-62版,2008.