

力覚インタフェースを用いた塑性変形関節モデルに基づく キャラクターモーション作成手法の提案

A character motion creation Method with haptic interface based on plastic deformation joint model

松永 昇悟 (電通大) 長谷川 晶一 (電通大)

Shogo MATSUNAGA, The University of Electro-Communications
Shoichi HASEGAWA, The University of Electro-Communications

We propose character motion creation method with the feeling of manipulating puppets. In proposed system, characters is composed of the solid body and the plastic strain joint on a physical simulation. In addition, users operate characters by the haptic interface. To present the haptic sense of the transformation of a real puppet, the plastic strain joints is simulated. Plastic strain joints are simulated by using three elements model that is composed of a spring and two dampers. Moreover, the simulate of three elements model is integrated into LCP solver which compute constraints in the physics engine.

Key Word: Haptic Display, Deformable Models, Plastic deformation, Puppet, Posture

1 はじめに

近年, 3Dアニメーションの制作が活発に行われるようになり, 3Dアニメーション制作ソフトウェアの開発が進んでいる. 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. 一方, 直観的な操作を目的として人形に各種センサを取り付け, モーションキャプチャを行う方法が考案されているが, キャラクターごとに骨格構造を作る必要があり, 物理的な制限がある. そこで, 本研究では人形による直観的な操作性を確保し, 様々な人形を用意しなくても, 多様なキャラクターモデルに対応可能なキャラクターモーション作成手法を提案する.

2 従来の研究

2.1 人形式モーションキャプチャ

人形式モーションキャプチャは人形を直接触れるため, 誰でも簡単にポーズを作成することが可能である. 従来の人形式モーションキャプチャは関節人形で姿勢を作成し, 画像認識により姿勢を入力している. しかし, リアルタイムでの入力が難しい点や姿勢の再編集ができないという問題があった. そこで, センサを人形の関節に取り付けてポーズを設定する手法が提案されている.[1]しかし, この方式では骨格構造ごとの人形が必要であり, 多様なキャラクターのモーション作成が難しい. また, バーチャル空間での他のオブジェクトとの同期を取ることが困難であるといった問題がある.

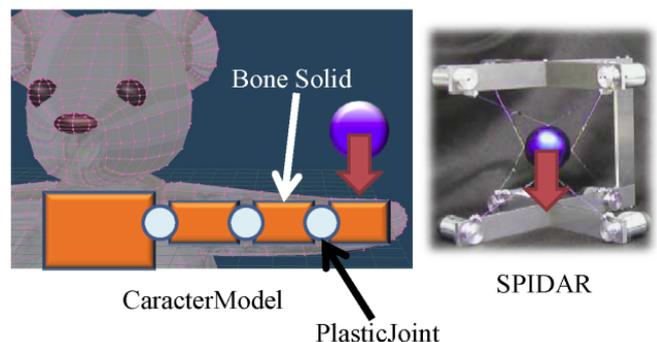


Fig. 1 System configuration.

2.2 バーチャルフィギュアによる手法

バーチャル空間に人形を作成し, 人形のボーンを3次元インタフェースで操作する手法が提案されている[2]. このシステムでは, バーチャル人形を用いることで骨格構造の変更が容易になっている. しかし, 以下のような問題点がある.

- 力覚提示がないので, 実際の人形を触っている感覚で操作ができない.
- ひねりに対する入出力への対応がない.
- バーチャル空間に存在する他の物体との衝突及びフィードバックの対応が取れない.

3 提案システム

提案システムをFig.1に示す. キャラクターに剛体(ボーン)を組み込み, ボーンを関節により接続し物理シミュレーションを行う. 6自由度力覚インタフェースSPIDARにより, バーチャル空間のキャラクターに触って関節を動かすことで, キーフレームを

作成する。物理シミュレーションの導入により、力覚提示、ひねりへの対応、他物体との衝突が可能となり、実物の球体関節人形の操作感に近づいている。また、実物の球体関節人形は関節部分において、力の入力に対し塑性的な変形を示す。この事より、関節部に塑性変形を導入することにより、実物の球体関節人形の操作性を再現することができる。塑性変形関節は球関節の角度にバネ・ダンパで構成した3要素モデルを組み込むことで行う。そこで、塑性関節をシミュレーションする手法について説明する。

4 塑性関節シミュレーション

4.1 動力学シミュレーション

物体の運動は、物体に働く力が求めれば、運動方程式の数値解としてシミュレーションできる。しかし、関節など複数物体の位置関係を部分的に拘束する力(拘束力)は、拘束の条件を満たすような力として与えられ、簡単には求まらない。

Baraffら[3]は、拘束条件と運動方程式を連立させLCP(Linear Complementaly Problem)に帰着させて解く事で拘束力を求める手法を用いてアニメーションを生成している。拘束条件は接触の数に応じて次元が増えるため、たくさんの物体が接触した場合大規模なLCPを解く必要がある。そこでBaraffら[4]は、ガウス・サイデル法という繰り返しによって近似解を求める手法を用いて接触数が多い場合にも高速にシミュレーションする手法を提案している。

4.2 バネ・ダンパモデル

弾塑性変形の表現手法の1つとしてレオロジーモデルがある。レオロジーモデルは、バネとダンパの構成により残留変位と戻り変位を表現している。バネ・ダンパモデルをLCPに帰着させる手法として、Anitescuら[5]は、後退積分(Implicit Integration)によるバネ・ダンパモデルを拘束条件として連立させ、時間刻みが大い安定したシミュレーションを提案している。また、長谷川ら[6]はLCPをガウスサイデル法で解き、LCPソルバの初期値として反復解法の前回の解を用いることで、少ない反復解法で安定した動力学シミュレーションができることを示している。

4.3 LCPによる拘束のシミュレーション

時刻 t における剛体の位置、速度を表わす変数をそれぞれ $p(t)$ 、 $v(t)$ とおく。剛体に作用する拘束は等式拘束と相補性拘束に分けられる。等式拘束は、主に関節による剛体の連結を表現するために用い、相補性拘束は、主に剛体同士の接触を表現するために用いる。ここで等式拘束および相補性拘束によって拘束される速度変数をそれぞれ w_e 、 w_c とおく。また、対応する拘束力を λ_e 、 λ_c とおく。すると、これらは適

切なヤコビ行列を用いて

$$w_e(t) = J_e(t) v(t) \quad (1)$$

$$w_c(t) = J_c(t) v(t) \quad (2)$$

と表わせる。また、これらをまとめて

$$w = \begin{bmatrix} w_e \\ w_c \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_e \\ J_c \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_e \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表記する。

まず、剛体の運動はNewton-Eulerの運動方程式に基づき以下のように記述される。

$$M\dot{v}(t) = f(t) + J(t)^T \lambda(t) \quad (4)$$

ここで M は質量行列、 $f(t)$ は外力とコリオリ項を含むベクトルである。

一方、拘束条件は次のように記述される。

$$w_e(t) = 0 \quad (5)$$

$$w_c(t) \geq 0, \lambda_c(t) \geq 0, w_c(t)^T \lambda_c(t) = 0 \quad (6)$$

ただしベクトルに関する不等号は、各成分について不等号が成り立つことを意味する。

以下では t は離散化された時刻を表わすものとし、時刻 t の値を $[t]$ で表記する。本手法では各時刻 t において以下の手順で更新を行う。

1. 拘束力 $\lambda[t]$ の計算
2. 速度の更新

$$v[t+1] = v[t] + M^{-1}(f[t] + J[t]^T \lambda[t])h \quad (7)$$

3. 位置の更新

$$p[t+1] = p[t] + v[t+1]h \quad (8)$$

ここで h は積分ステップである。手順1において計算する拘束力 $\lambda[t]$ は、ステップ2(速度の更新)の直後、ステップ3(位置の更新)の直前において $v[t+1]$ が拘束条件を満たすように求める。すなわち、拘束条件は

$$w_e[t+1] = J_e[t]v[t+1] \quad (9)$$

$$w_c[t+1] = J_c[t]v[t+1] \quad (10)$$

と書ける。式(7)式(8)より、拘束力を求める問題は、次の線形相補性問題(LCP)に帰着される。

$$\begin{bmatrix} w_e[t+1] \\ w_c[t+1] \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \lambda_e[t] \\ \lambda_c[t] \end{bmatrix} + b \quad (11)$$

$$A = J[t]M^{-1}J[t]^T h \quad (12)$$

$$b = J[t]\{v[t] + M^{-1}f[t]h\} \quad (13)$$

$$w_e[t+1] = 0 \quad (14)$$

$$w_c[t+1] \geq 0, \lambda_c[t] \geq 0, w_c[t+1]^T \lambda_c[t] = 0 \quad (15)$$

次節では、上述の枠組みにバネ・ダンパによるレオロジー要素を組み入れる方法を述べる。

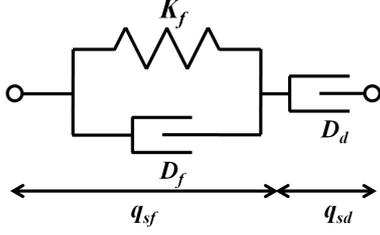


Fig. 2 Three-element model.

4.4 レオロジー要素のLCPへの組み込み

本節ではレオロジー要素をLCPの拘束シミュレーションへ組み込むことを提案する．前節で定義した w_e, w_c に加えて，バネ・ダンパが作用する速度変数として w_s を考える． w_s についても他と同様に適切なヤコビ行列を用いて

$$w_s(t) = J_s(t) v(t) \quad (16)$$

と表わせる．また，対応する拘束力（バネ・ダンパ力）を λ_s とする．ここで，1次元レオロジー要素をFig.1に示すバネとダンパによる3要素モデルにより構築する．3要素モデルは戻り変位となるフォークト部 x_{sf} と残留変位となるダンパー部 x_{sd} を直列に接続したものとする．3要素モデルは力のつりあいと変位の関係から以下の式が成り立つ．

$$\begin{cases} \lambda_s = -K_f q_{sf} - D_f w_{sf} = -D_d w_{sd} \\ q_s = q_{sf} + q_{sd} \\ w_s = w_{sf} + w_{sd} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)より $w_{sd} = w_s - w_{sf}$ と $K_f q_{sf} + D_f w_{sf} = D_d w_{sd}$ から w_{sf} について整理する．

$$w_{sf} = \frac{D_d w_s - K_f q_{sf}}{D_d + D_f} \quad (18)$$

式(18)より時刻 $[t+1]$ において次式が成立する．

$$w_{sf}[t+1] = -\frac{K_f}{D_d + D_f} q_{sf}[t+1] + \frac{D_d}{D_d + D_f} w_s[t+1] \quad (19)$$

ここで $w_{sf}[t+1]$ を離散化すると，

$$w_{sf}[t+1] = \frac{q_{sf}[t+1] - q_{sf}[t]}{h} \quad (20)$$

式(19)より次式を導くことができる．

$$q_{sf}[t+1] = D_q q_{sf}[t] + D_w w_s[t+1] \quad (21)$$

$$D_q = \frac{D_d + D_f}{D_d + D_f + K_f h}$$

$$D_w = \frac{D_d h}{D_d + D_f + K_f h}$$

(22)

また，時刻 $t+1$ において式(17)が成り立つので

$$\lambda_s[t+1] = -K_f q_{sf}[t+1] - D_f w_{sf}[t+1] \quad (23)$$

式(23)の $w_{sf}[t+1]$ に式(19)に代入することで次式が導かれる．

$$\lambda_s[t+1] = -\frac{D_d K_f}{D_d + D_f} q_{sf}[t+1] - \frac{D_f D_d}{D_d + D_f} w_s[t+1] \quad (24)$$

次に，式(24)の $q_{sd}[t+1]$ に式(21)を代入し， $w_s[t+1]$ について解くと

$$w_s[t+1] = -C \lambda_s[t+1] - D q_{sf}[t] \quad (25)$$

$$C = \frac{D_d + D_f + K_f h}{D_d (K_f h + D_f)}$$

$$D = \frac{K_f}{K_f h + D_f}$$

(26)

ここで改めて

$$w = \begin{bmatrix} w_e \\ w_c \\ w_s \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_e \\ J_c \\ J_s \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_e \\ \lambda_c \\ \lambda_s \end{bmatrix} \quad (27)$$

と再定義すると，前節と同様にして

$$\begin{bmatrix} w_e \\ w_c \\ w_s \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \lambda_e \\ \lambda_c \\ \lambda_s \end{bmatrix} + b \quad (28)$$

$$A = J[t] M^{-1} J[t]^T h \quad (29)$$

$$b = J[t] \{v[t] + M^{-1} f[t] h\} \quad (30)$$

となる．ここで式(28)に式(25)を代入し，これを右辺

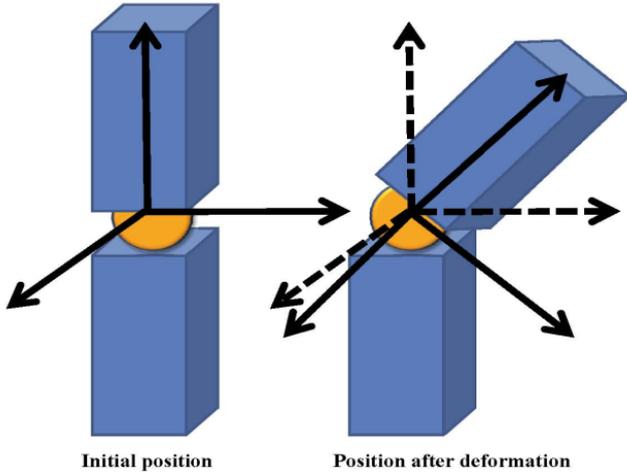


Fig. 3 Ball joint model.

に移項すると

$$\begin{bmatrix} w_e[t+1] \\ w_c[t+1] \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} \lambda_e[t] \\ \lambda_c[t] \\ \lambda_s[t] \end{bmatrix} + \tilde{b} \quad (31)$$

$$\tilde{A} = J[t]M^{-1}J[t]^T h + \begin{bmatrix} O & O & O \\ O & O & O \\ O & O & C \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\tilde{b} = J[t]\{v[t] + M^{-1}f[t]h\} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ D \end{bmatrix} \quad (33)$$

を得る．上式より，バネ・ダンパ拘束は，修正された係数行列・係数ベクトル \tilde{A} , \tilde{b} によって定義されるLCPにおける等式拘束として等価的に表現できることが分かる．

4.5 球関節シミュレーション

塑性変形関節をシミュレーションするため，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レオロジー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．

5 提案システムの実装と評価

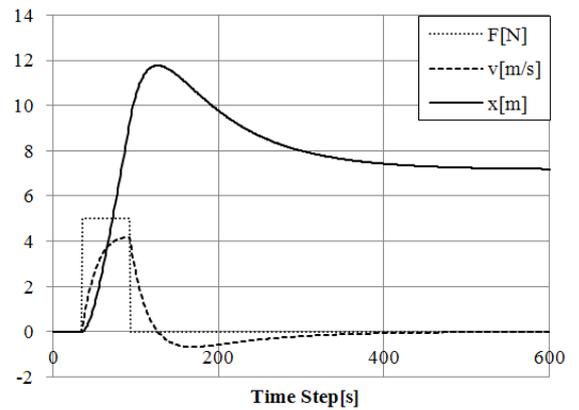
提案システムの実装図をFig.4に示す．力覚インタフェースSPIDARを用いて，力覚環境下でのキャラクターの操作を可能にした．また，キー入力により把持モード（6自由度バーチャルカップリングで掴む）とフリーモードで切り替えできるようにした．

5.1 レオロジーモデルの評価

提案手法によるレオロジーモデルのシミュレーションについて評価する．剛体を地面に3要素モデルで接



Fig. 4 Proposed character posture input system.



$$K_f = 1, D_f = 10, D_d = 100$$

Fig. 5 Simulation of three element model.

続し，剛体に一定時間力を加えた後に，変位の挙動を観察した．剛体の質量を0.1[kg]，積分幅を0.02[s]とした時の時系列をFig.5に示す．横軸は時刻[s]，縦軸は剛体の変位[m]，速度[m/s]，力[N]である．Fig.5より力Fを除荷した後に変位xの減少を確認することができる．このことから，レオロジーモデルの特徴である残留変位と戻り変位を再現できているといえる．また，リアルタイムで安定したレオロジーモデルのシミュレーションを行うことができた．

5.2 提案システムの操作性

提案システムの操作感として，球体関節人形を操作する感覚が得られた．力覚提示を行わない場合，力の入力加減が難しく3次元空間での姿勢作成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，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．

6 おわりに

本研究では、キャラクターのモーション作成手法として、力覚インタフェースを用いてバーチャル関節人形に触りながら操作することを提案した。バーチャル空間において実際の人形を操作する感覚で操作できることにより、直観的な操作が可能となった。また従来研究と比較して、他物体とキャラクターのインタラクションが可能となり、他物体に対して自然なモーションの作成が可能となった。

将来の課題として以下のことが挙げられる

- 提案システムの操作性についての定量的な評価を行う。
- 操作性が力覚インタフェースの操作自由度に依存する。
- レオロジーモデルのバネダンパ係数の決定方法を考案する必要がある

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ブチャ.
- [2] 芹澤隆史, 柳田康幸. バーチャルフィギュアを用いたアバター動作の直観的オーサリング. 日本バーチャルリアリティ学会, 第12回大会論文集, 2007.
- [3] D. Baraff. *Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies*. Computer Graphics Proceedings(SIGGRAPH 89), vol. 23, pp. 223-232. edition, 1989.
- [4] D. Baraff. *Fast contact force computation for non-penetrating rigid bodies*. Computer Graphics Proceedings(SIGGRAPH94), pp. 23-34. edition, 1994.
- [5] F. A. Potra M. Anitescu. *A time-stepping method for stiff multibody dynamics with contact and friction*. Intl. J. for Numerical Methods in Engineering 2002, 55, pp.753-784 edition, 2002.
- [6] 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.