

3次元変形制御のための布状柔軟物体モデリング

矢野 巧造, 平井 慎一
立命館大学 理工学部

Modeling of Deformable Clothes for Their Deformation Control in 3D Space

Kouzoh YANO, Shinichi HIRAI
Dept. of Robotics, Ritsumeikan University

Abstract - Dynamic modeling of deformable clothes is presented. It is necessary to take account of dynamic behavior of deformable clothes in their quick manipulation. First, we will introduce a lattice structure to describe cloth deformation and will derive its equation of motion. Second, a simulation method to compute dynamic behavior of clothes is developed.

Keywords: deformable objects, dynamic behavior, modeling, manipulation, clothes, simulation

1. はじめに

ロボットや機械システムが求められている分野には、柔軟物体を対象とする作業が多い。その中には、動的な挙動を用いる作業がある。柔軟物体の動的挙動が予測可能ならば、柔軟物体を高速かつ正確に取り扱う作業の自動化がより容易になる。しかし、柔軟物体の動的な挙動に関しては、あまり解析が進められておらず、モデリング技法が確立していない。そこで、本報告では、布状柔軟物体を対象として、その動的モデルを構築する。

まず、布地に格子構造を導入し、布地の運動方程式を導く。次に、運動方程式から、変形形状を数値的に導くアルゴリズムを構築する。さらに、構築したアルゴリズムを用いて、動的な変形形状を計算した例を示す。

2. 動的モデリング

本報告では、布状物体を、Fig.1 に示す格子構造で表現する。布状物体は $m \times n$ 個の格子点から構成される。格子点は質点であり、格子間は Fig.2-(a) に示す Voigt 要素で連結されている。Voigt 要素のバネ定数を E 、ダンパー定数を η とする。

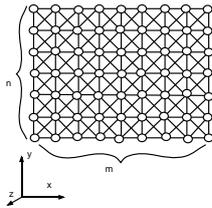


Fig.1: Description of deformable thin object

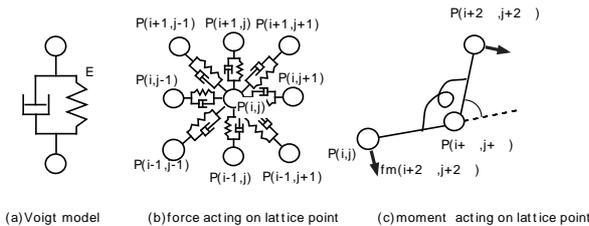


Fig.2: Connection of lattice points

空間内に座標系 $O-xyz$ を設定する。時刻 t における格子点の位置ベクトル $\mathbf{P}_{i,j,t} = [x_{i,j,t}, y_{i,j,t}, z_{i,j,t}]$ ($i = 0, 1, \dots, m-1, j = 0, 1, \dots, n-1$) と表す。格子点には、Fig.2-(b) に示すように、隣接する格子点との間にある Voigt 要素からの力が作用する。この力をベクトル $\mathbf{fd}_{i,j,t}$ とすると、

$$\mathbf{fd}_{i,j,t} = \sum_{\alpha=-1}^1 \sum_{\beta=-1}^1 (E\Delta_{\alpha,\beta,t} + \eta\dot{\Delta}_{\alpha,\beta,t}) \quad (1)$$

ここで $\Delta_{\alpha,\beta,t} = \mathbf{P}_{i,j,t} - \mathbf{P}_{i+\alpha,j+\beta,t}$ である。但し、総和は、 $\alpha = \beta = 0$ 以外に対して行う。また、格子点には、Fig.2-(c) に示すように、曲げに対する弾性力が作用すると仮定する。この力 $\mathbf{fm}_{i,j,t}$ は、連続する3つの質点の位置より、

$$\mathbf{fm}_{i,j,t} = \sum_{\alpha=-1}^1 \sum_{\beta=-1}^1 M(\theta) \frac{\mathbf{N}_{i+2\alpha,j+2\beta,t}}{\|\mathbf{N}_{i+2\alpha,j+2\beta,t}\|} \quad (2)$$

と表されると仮定する。ここで θ は、Fig.2-(c) に示す角度であり、 $M(\theta)$ は、角度 θ における弾性力の大きさである。また、 $\mathbf{N}_{i,j,t}$ は、3つの質点を含む平面の法線ベクトルを \mathbf{r} とすると、

$$\mathbf{N}_{i,j,t} = \mathbf{r} \times (\mathbf{P}_{i,j,t} - \mathbf{P}_{i+\alpha,j+\beta,t}) \quad (3)$$

格子点に作用する力は、 $\mathbf{fd}_{i,j,t}$ と $\mathbf{fm}_{i,j,t}$ であるので、運動方程式は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} m\ddot{\Delta} &= \mathbf{fd}_{i,j,t} + \mathbf{fm}_{i,j,t} \\ &= \sum_{\alpha=-1}^1 \sum_{\beta=-1}^1 \left(E\Delta + \eta\dot{\Delta} + M(\theta) \frac{\mathbf{N}_{i+2\alpha,j+2\beta,t}}{\|\mathbf{N}_{i+2\alpha,j+2\beta,t}\|} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

3. 動的変形のシミュレーション

前節で求めた運動方程式をもとにして、布状物体の動的な形状変形を計算機シミュレーションする。

数値的に運動方程式 (4) を解く。まず格子点 $\mathbf{P}_{i,j,t}$ の変位 $\Delta_{i,j,t}$ 、速度 $\dot{\Delta}_{i,j,t}$ を次式で表す。

$$\mathbf{D}_{i,j}(t) = \begin{bmatrix} \Delta_{i,j,t} \\ \dot{\Delta}_{i,j,t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) 式を時間微分すると次式を得る.

$$\mathbf{D}_{i,j} \dot{(t)} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta}_{i,j,t} \\ \dot{\Delta}_{i,j,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta}_{i,j,t} \\ \frac{\mathbf{f}d_{i,i,t} + \mathbf{f}m_{i,i,t}}{M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

時刻 t を時間間隔 T で離散化する. 時刻 kT における $\mathbf{D}_{i,j}(t)$ の値を $\mathbf{D}_{i,j}^k$ と記す. (6) 式は, 時刻 kT における値と時刻 $(k+1)T$ における値との関係式に変換できる. すなわち漸化式 $G(\mathbf{D}_{i,j}^{k+1}, \mathbf{D}_{i,j}^k) = 0$ が得られる. 時刻 $k=0$ のときの $\Delta_{i,j}^0, \dot{\Delta}_{i,j}^0$ を与え $\mathbf{D}_{i,j}^0$ を求める. それを漸化式に代入することにより $\mathbf{D}_{i,j}^k$ ($k=1, 2, \dots$) を求めることができる. 算出した $\mathbf{D}_{i,j}^k$ を (5) 式に代入する事により $\Delta_{i,j,t}, \dot{\Delta}_{i,j,t}$ を求めることができる.

$m \times n$ 個の格子点すべてについて, 以上の過程を繰り返し, 布地全体の变形形状を計算する.

4. シミュレーションの実行結果

本報告で構築した布状柔軟物体の計算機シミュレーション例を示す. 格子点間のバネ定数 $E=1$, ダッシュポット定数 $\eta=1$ である. 曲げの力の大きさは, $M(\theta) = \theta$ とする. また, 本報告においては, 重力項を無視し, また床面から干渉を受けないと仮定する.

Fig.3 は, 長さ 100mm , 質量 1g の布状柔軟物体の1端辺を 15mm 持ち上げ, その状態から端辺を開放したときの解析結果である.

Fig.4 は, 50mm 四方の布状柔軟物を軽く折り曲げた状態から, 手を放した解析結果である.

Fig.5 は, 曲げの力の項が入っていない布状柔軟物のモデルである. 1端点をはじめ下げて, その後グラフの位置まで持ち上げた解析結果である.

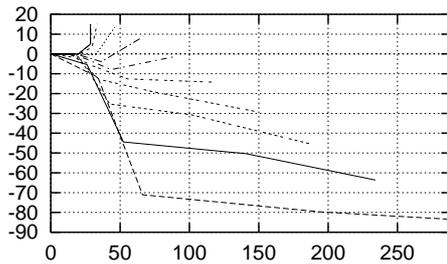


Fig.3: Deformation after releasing one end point

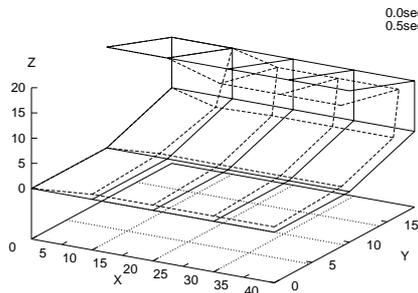


Fig.4: Deformation after bending

5. 考察

Fig.3 の計算結果において, 柔軟物体の全長が延びるのは, 曲げの力の方向に問題があると考えられる. ま

T = 0.5(s) —

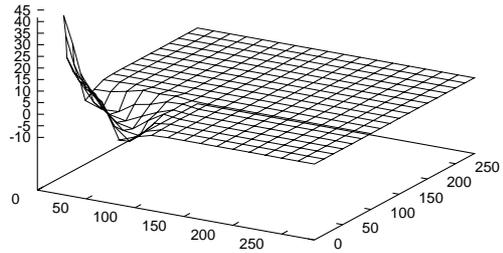


Fig.5: Deformation with one point waving

た, 時間が経過するとこの計算結果は発散する. これは, 曲げ角度に対して, 曲げの力が単に比例しているからと考える. 対策として, 本報告で構築した柔軟物モデルに, 曲げ角に対する減衰項を入れることが考えられる.

Fig.4 において, つり上げた端辺が平らに戻らないのは, 本報告で構築した布状柔軟物モデルの曲げに対する力が, 隣りあう3個の質点の位置によってのみ決定され, Fig.6-(a) のように曲げに対する力が働く点と働かない点が存在することに問題があると考えられる. 対策として, Fig.6-(b) のように, もっと多くの質点からの曲げの力を作用させることが挙げられる. また, $X=0$ に沿った質点が動かないのは, 解析プログラムの境界条件の問題と思われる.

Fig.5 の布状柔軟物モデルは, 曲げに対して力が働かないので, 方向によって曲がりやすさが異なる.

Fig.3, Fig.4, Fig.5 のいずれの場合も実際の柔軟物と比較出来るように, 計算に必要なパラメータを同定しなければならない.

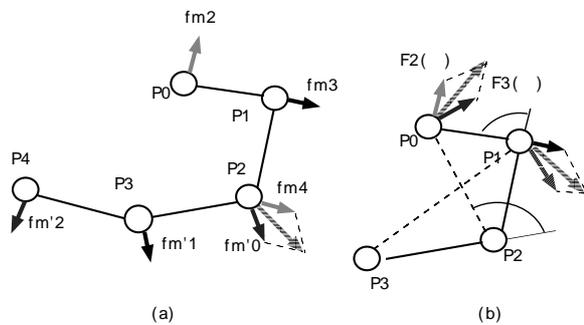


Fig.6: Resultant of bending forces

6. おわりに

本報告では格子構造を持つ布状柔軟物体の動的モデルを提案し, その計算機シミュレーションの結果を示した.

今後は, 本報告のモデルに残る問題点を解決するとともに, 実際の布状柔軟物との变形挙動の比較ができるように, モデル中のパラメータの同定を行う.