

実物体の観測による柔軟物体のモデルパラメタ獲得 ～ ひも状物体の場合 ～

須藤 克仁^{*1}

角所 考^{*2}

美濃 導彦^{*2}

^{*1} 京都大学大学院情報学研究科

^{*2} 京都大学総合情報メディアセンター

本稿では、柔軟物体の形状モデルパラメタを実際の物体の観測を通じて獲得する手法について議論する。柔軟物体の例として、本稿では最も単純なひも状物体を取り上げる。そして、観測した実際のひもの形状変化を再現できるモデルパラメタを、観測結果に基づいて自動的に獲得するための手法について示す。また、提案手法を用いて形状再現に適切なパラメタが獲得できることを実験結果によって示す。

Acquiring model parameters' value for flexible objects from Observing the Real Object – Case of String-like Objects

Katsuhito SUDOH^{*1}

Koh KAKUSHO^{*2}

Michihiko MINOH^{*2}

^{*1} Graduate School of Informatics, Kyoto University

^{*2} Center for Information and Multimedia Studies, Kyoto University

This paper describes a method for acquiring parameters' value of the model for shapes of flexible objects. For the first step, string-like objects are considered. By the method, appropriate values of model parameters for visual feedback are acquired automatically based on observation of the real object. Experimental results show the validity of the method.

1 はじめに

本稿では仮想世界における柔軟物体のモデルを実物体の観測に基づいて作成する手法について議論する。仮想世界における物体操作は、従来からバーチャリアリティ(VR)の分野で議論されてきたが、その多くは、操作の過程で形状の変化しない剛体を対象としたものであった。その理由の1つとして、柔軟物体の場合、操作に伴って形状が様々に変化し、その変化の仕方が物体の種類によって異なるため、モデル作成のための負担が大きいが考えられる。

一方、コンピュータグラフィックス(CG)の分野では、多数のパラメタを持ったモデルを利用して、柔軟物体の形状変化をモデル化し、グラフィックス表示することが試みられている[1]-[7]。このようなモデルを用いて実際に様々な種類の柔軟物体の形状変化を正しく表現するためには、モデルパラメタの値を適切に定める必要があるが、これらの研究では、このパラメタ調整は、モデルのふるまいが実物体のそれと同一に見えるように、モデルの設計者が手動で行うことが前提となっ

ている。このような方法では、この調整作業自体が煩雑であるだけでなく、モデルによって再現される形状の正確さを客観的に評価する基準が存在しないため、再現結果を向上させるための具体的なパラメタの調整方法を定めにくい。これらの問題は、不均質な特性を持った物体をモデル化する際に、より深刻なものとなる。

以上を背景として、本研究では、柔軟物体のモデルを仮想世界での物体操作に利用することを前提として、そのモデルパラメタを、モデル化すべき実物の柔軟物体の観測を通じて獲得することを目指す。このための具体的なアプローチとして、仮想物体と実物体の物理特性を一致させることを目指す代わりに、仮想物体の操作の際のユーザへのフィードバックを、実物体の操作の場合と一致させるというアプローチを採る。次章ではまずこのアプローチについて述べる。

続く3~4章では、柔軟物体の例として、最も単純な1次元のひも状物体を、またユーザへのフィードバックの例として、視覚フィードバック(形状表示)を取り上げる。すなわち、上のアプ

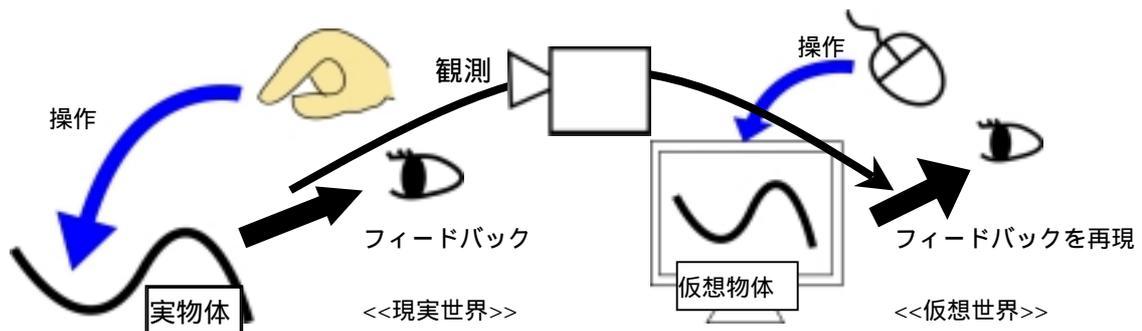


図 1: 本研究におけるモデル化のアプローチ

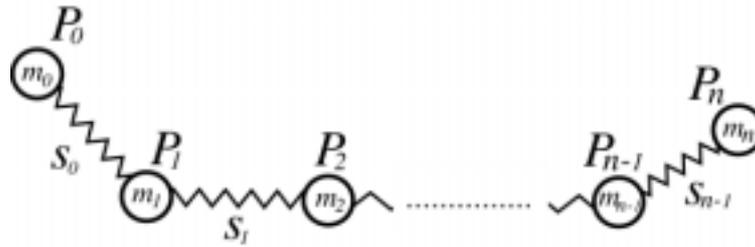


図 2: 1次元 mass-spring モデル

ローチに基づいて、ひもの形状変化を再現するモデルパラメタを獲得するための手法について述べる。具体的には、ひもを 1 次元の mass-spring モデルで表現し、実際の観測形状とモデルによる再現形状との相違が最小となるように、ひもの伸びや曲げに対するパラメタの値を修正する。この手法を用いた実物のひも形状の再現結果は 5 章で示す。さらに 6 章では関連する従来研究との相違について示し、最後に 7 章で結論と今後の研究目標について述べる。

2 ユーザへのフィードバックのリアリティを目指したモデルパラメタ推定

本研究では、柔軟物体のモデル化の利用目的として、仮想世界における物体操作の実現を考える。仮想物体操作では、ユーザによる物体操作に伴って、仮想物体の情報をユーザにフィードバックする必要がある。このようなフィードバックの実現において重要となるのは、いうまでもなくフィードバックのリアリティである。逆に言えば、仮想物体操作への利用を目的として柔軟物体をモデル化する場合、このユーザへのフィードバックが実物体を操作した場合とどの程度一致しているかが重要となる。

そこで、モデル化すべき柔軟物体を実世界でユーザが操作している状況において、操作の各時点で物体からユーザに返されるフィードバックをセンサによって観測し、仮想世界においてユーザが同じ操作を行った際に、同じフィードバックを

ユーザに与えることができるようなモデルパラメタの値を定めるというアプローチを考える。仮想物体操作におけるユーザへのフィードバックには、視覚や力覚など、様々な種類のものが存在するが、柔軟物体の形状変化は、ユーザへの視覚フィードバックに相当する。したがって、このようなアプローチに基づいて柔軟物体をモデル化するには、視覚センサとしてのカメラを利用し、実物体からユーザへの視覚フィードバックとしての形状変化を観測することになる。この概念図を図 1 に示す。

このようなアプローチに基づいて獲得されるモデルは、それ自体が実物体の忠実な表現となることを必ずしも保証しない。仮想物体操作においてユーザに提供されている全ての種類のフィードバックにおいて、それが実物体のそれと同一であれば、たとえモデルパラメタの値が実物と同一のもではなかったとしても、ユーザにとって実際にそれを知る術は無いので、この目的においてはこのアプローチで十分であると言える。

本稿では、このようなアプローチに基づく柔軟物体のモデルパラメタ獲得の第一歩として、1 次元の柔軟物体であるひもを取り上げ、これを操作したときのひもの静止形状を、カメラによる観測を通じて再現することを考える。このとき、カメラによるひもの静止形状の観測を簡単にするために、ひもに対する操作として鉛直平面内のものを考え、ひもの形状が鉛直平面内でのみ変化するようにする。

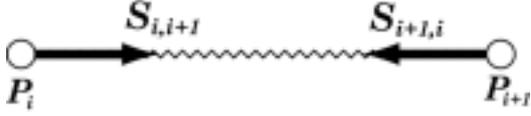


図 3: 伸び回復力

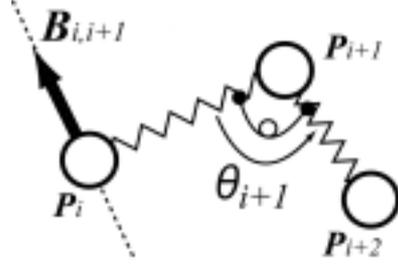


図 4: 曲げ回復力

3 ひものモデル表現

3.1 1次元 mass-spring モデル

柔軟物体に関する多くの研究[1]-[6]で、質点とそれを結ぶばねから成る mass-spring モデルを用いている。これらの研究では適切なモデルパラメータを与えることによって、満足のいくシミュレーション結果を残している。つまり、適切なパラメータを用いることによって、ひもの様々な形状をこのモデルによって再現することが可能であると考えられる。

本稿では、図 2 に示すような 1 次元の mass-spring モデルを用いる。モデルは n 個(n :定数)の質点から成る。モデルの質点 P_i の位置、速度、加速度、質量をそれぞれ x_i, v_i, a_i, m_i で表す。また、 P_i に働く力の合力を F_i で表す。本稿で扱うのは鉛直平面上でのひもの形状であるため、ベクトルはすべて 2 次元である。

3.2 ひもの伸び特性

外力によってひもが伸ばされると、ひもに伸び回復力が発生する。 P_i と P_{i+1} の間の伸びに対して P_i に働く伸び回復力を $S_{i,i+1}$ とする(図 3)

$$S_{i,i+1} = k_i \frac{\|x_{i+1} - x_i\| - l_i}{l_i} \frac{x_{i+1} - x_i}{\|x_{i+1} - x_i\|} \quad (1)$$

ここで、 k_i, l_i は P_i と P_{i+1} の間のばねのばね係数と自然長である。

3.3 ひもの曲げ特性

外力によってひもが曲げられると、ひもに曲げ回復力が発生する。 P_{i+1} まわりの曲げに対して P_i に働く曲げ回復力を $B_{i,i+1}$ とする(図 4)。

$$B_{i,i+1} = \frac{b_{i+1}(\theta_{i+1} - \varphi_{i+1})}{\|x_{i+1} - x_i\|} N_{i,i+1} \quad (2)$$

ここで、 b_{i+1} は曲げ係数、 θ_{i+1} は P_{i+1} まわりの曲げ角度、 φ_{i+1} は P_{i+1} まわりの自然曲げ、 $N_{i,i+1}$ は $x_{i+1} - x_i$ に対する単位法線ベクトルである。理想的なひもにおいては自然曲げは π (rad) であるが、電気ケーブルやゴムひもなどの実物体においては、外力が働いていないときにいくらか曲がった形状をとることがある。そのような事実を考慮し、本稿では質点まわりの自然曲げというパラメータを導入する。

また、作用・反作用の原理により、 P_i に曲げ回復力 $B_{i,i+1}$ が働くと同時に、その反作用として $-B_{i,i+1}$ が P_{i+1} に働く。

3.4 オイラー法によるシミュレーション

P_i に働く力 F_i は、伸び回復力 $S_{i,i-1}, S_{i,i+1}$ 、曲げ回復力 $B_{i,i-1}, B_{i,i+1}$ 、曲げ回復力の反作用 $B_{i-1,i}, B_{i+1,i}$ 、重力 $m_i g$ (g は重力加速度)、空気抵抗 r_i の合力として表される。ある時刻 t における力 $F_i(t)$ と加速度 $a_i(t)$ は、運動方程式に基づいて以下のように求められる。

$$F_i(t) = m_i g + r_i(t) + S_{i,i-1}(t) + S_{i,i+1}(t) + B_{i,i-1}(t) + B_{i,i+1}(t) - B_{i-1,i}(t) - B_{i+1,i}(t) \quad (3)$$

$$(B_{n-1,n} = 0, B_{1,0} = 0)$$

$$a_i(t) = \frac{1}{m_i} F_i(t) \quad (4)$$

$S_{i,i-1}(t), S_{i,i+1}(t), B_{i,i-1}(t), B_{i,i+1}(t), B_{i-1,i}(t), B_{i+1,i}(t), r_i(t)$ は、それぞれ時刻 t における伸び回復力 $S_{i,i-1}, S_{i,i+1}$ 、曲げ回復力 $B_{i,i-1}, B_{i,i+1}$ 、曲げ回復力の反作用 $B_{i-1,i}, B_{i+1,i}$ 、空気抵抗 r_i である。

ここで r_i は質点の速度 v_i の大きさに比例し、逆向きに働く力であり、 ρ を抵抗係数として以下の式で表される。

$$r_i = -\rho v_i \quad (5)$$

時刻 t から時刻 $t+\Delta t$ の間、各質点が等加速度直線運動をするものと仮定すると、時刻 $t+\Delta t$ における v_i, x_i は、オイラー法によって以下の式で計算できる。

$$v_i(t + \Delta t) = a_i(t)\Delta t + v_i(t) \quad (6)$$

$$x_i(t + \Delta t) = v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2}a_i(t)(\Delta t)^2 + x_i(t) \quad (7)$$

仮想世界におけるモデルの運動は上の式によってシミュレーションができる。この運動が止まったときの形状が、モデルの静止形状となる。

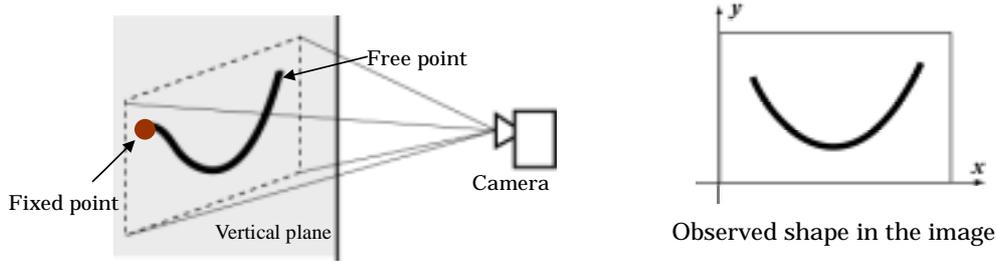


図5: カメラによる鉛直平面上でのひも形状の観測

モデルはこれらの力によって変形するため、その結果得られる静止形状は、モデルパラメタ $k_i, l_i, b_i, \phi_i, m_i$ の値によってさまざまに変化する。これらの値を適切に設定することができれば、モデルは実際ひもの形状を再現することができると思われる。次章でこれらのパラメタの値を実物体の観測を通じて獲得する手法を述べる。

なお、2章の最後でも述べたように、本稿では研究の第一歩として、ひも形状のうち、静止形状を観測形状と一致させることに焦点を当てているため、静止に至るまでのモデルの運動そのものが、実際のひものそれと一致することまでは保証できていない。

4 実物体観測によるパラメタ値決定

4.1 観測形状の記述

前章で示したモデルによって再現すべき、鉛直平面内での実際のひもの形状は以下のようにして観測される。図5に示すように、ひもの一端を鉛直平面上で固定し、他端を平面上で移動させる。ひもは背景となる鉛直平面と異なる色にし、カメラによって水平方向から撮影する。

カメラモデルを透視投影と仮定すると、各観測形状はその時刻における実際のひもの形状と、そのスケールを除いて一致している。本稿ではスケールの要素を無視した上で、観測形状を再現する。

撮影画像中の観測形状は、その特徴線によって記述される。ひもの特徴線は、画像に細線化処理を施し、画像中でひもを表す領域の中心線を抽出することで得られる。特徴線をなす画素のうち、画像中で $y_{xy} = (x, y)$ に位置するものを Y_{xy} とし、特徴線をなす画素の集合 C と表す。図6に撮影された画像と抽出された特徴線の例を示す。

4.2 観測形状を再現するためのモデルの制約

モデルが観測形状を再現するためには、モデルはその静止・安定状態において各観測形状と同一の形状をとる必要がある。観測形状を再現の際の、「観測形状と同一の形状をとる」モデルが静止・

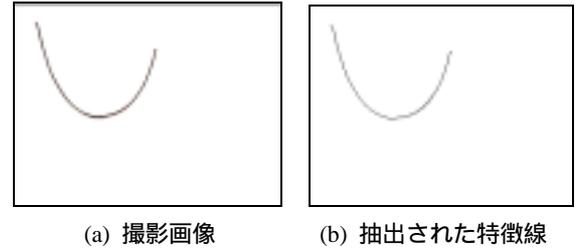


図6: 観測形状の記述

安定状態にある」というふたつのモデルに対する制約からのずれを、以下に示すようなエネルギー関数で表す。

まず、観測形状とモデルの形状とのずれを表すエネルギー関数 E_s を以下のように定義する。

$$E_s = \sum_{i=0}^n D(x_i) \quad (8)$$

ここで $D(x_i)$ は x_i から観測形状の特徴線までの最短距離である。特徴線は画素の集合 C で表されているので、 $D(x_i)$ は以下のように、質点の直近の特徴線上の画素までの距離と定義する。

$$D(x_i) = \min_{Y_{xy} \in C} \|x_i - y_{xy}\| \quad (9)$$

エネルギー関数 E_s は、モデルの各質点が観測形状の特徴線上にあるときに最小値0をとる。

また、モデルはその静止・安定状態において、各質点に働く力がすべてつりあっていないとしない。したがって、各質点に働く合力の大きさの和を表すようなエネルギー関数 E_f を以下のように定義する。

$$E_f = \sum_{i=0}^n \|F_i\|^2 \quad (10)$$

モデルがある形状に対して安定状態にあって静止しているとき、 E_f は最小値0をとる。

あるモデルの形状に対して E_s と E_f の双方が最小となれば、モデルはその安定状態において、観測形状を再現することができるようになる。モデ

ルの形状はモデルパラメタの値によって決まるので、 E_s と E_f をとともに最小にするようなパラメタを決定すればよい。

E_s と E_f を同時に最小化するために、両者に重み付けをした以下のようなエネルギー関数を定義し、これを最小化することを考える。

$$E = c_s E_s + c_f E_f \quad (11)$$

ここで、 c_s, c_f は E_s と E_f に対する重みである。

ひもは操作によって様々な形状をとる。そのそれぞれを再現するために、各観測形状に対応するエネルギー関数を最小化する必要がある。実際のひもを観測して得た N 個の形状に対して、以下のエネルギー関数を最小化する。

$$E_{all} = \sum_{h=1}^N E(h) \quad (12)$$

ここで $E(h)$ は h 番目($h=1, \dots, N$)の観測形状に対するエネルギー関数 E である。 h 番目の観測形状の特徴線をなす画素の集合を C^h で表し、 $E(h)$ を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} E(h) &= c_s E_s(h) + c_f E_f(h) \\ &= c_s \sum_{i=0}^n D(\mathbf{x}_i^h) + c_f \sum_{i=0}^n \|\mathbf{F}_i^h\|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$D(\mathbf{x}_i) = \min_{Y_{xy}^h \in C_h} \|\mathbf{x}_i^h - \mathbf{y}_{xy}^h\| \quad (14)$$

ここで Y_{xy}^h は h 番目の観測画像に対する画素 Y_{xy} であり、 \mathbf{y}_{xy}^h はその位置を表す。同様に、 \mathbf{x}_i^h は h 番目の観測形状をモデルで再現するときの P_i の位置、 \mathbf{F}_i^h はそのとき P_i に働く合力である。

この E_{all} を最小化することによって、与えられた N 個の観測形状すべてに対して、その形状を再現することができるモデルパラメタが獲得できる。次節でこのエネルギー関数を最小化する方法について述べる。

4.3 最急降下法によるエネルギー最小化

(12)の E_{all} は、以下のパラメタを持つエネルギー関数である。

h 番目の観測形状に対応するモデルの質点位置:

$$\mathbf{x}_i^h \quad (0 \leq i \leq n, 1 \leq h \leq N)$$

$$\text{ばね係数: } k_i \quad (0 \leq i \leq n-1)$$

$$\text{曲げ係数: } b_i \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

$$\text{質点間のばねの自然長: } l_i \quad (0 \leq i \leq n-1)$$

$$\text{質点まわりの自然曲げ: } \varphi_i \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

質点の質量: $m_i \quad (1 \leq i \leq n-1)$

観測形状を再現できるようなそれぞれのパラメタの値を求めるために、各パラメタの値を最急降下法に基づく以下の式によって更新する。

$$\mathbf{x}_i^h(j) = \mathbf{x}_i^h(j-1) - \alpha_x \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial \mathbf{x}_i^h(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (15)$$

$$k_i(j) = k_i(j-1) - \alpha_b \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial k_i(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (16)$$

$$b_i(j) = b_i(j-1) - \alpha_b \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial b_i(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (17)$$

$$l_i(j) = l_i(j-1) - \alpha_l \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial l_i(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (18)$$

$$\varphi_i(j) = \varphi_i(j-1) - \alpha_\varphi \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial \varphi_i(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (19)$$

$$m_i(j) = m_i(j-1) - \alpha_m \left\{ \frac{\partial E_{all}}{\partial m_i(\tau)} \right\}_{\tau=j-1} \quad (20)$$

ここで j は繰り返しの回数であり、 $\alpha_x, \alpha_k, \alpha_b, \alpha_l, \alpha_\varphi, \alpha_m$ はこの更新プロセスのステップ幅を決める定数である。

5 実験結果

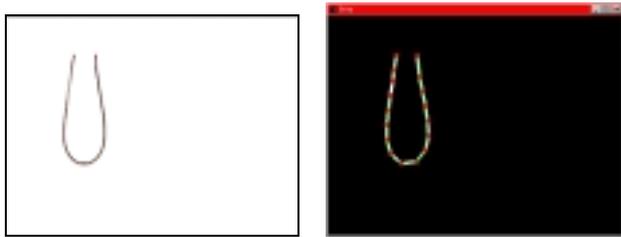
本手法の有効性を評価するために、いくつかの実際のひもを用いた実験を行った。その結果を示す。

5.1 異なる種類のひもの観測形状再現

実際のひもとして「ゴムひも」「鎖」「ビデオケーブル」の3種類に対して本手法を適用した。それぞれのひもに対してひとつの観測形状を得、その形状を再現できるようなモデルパラメタの獲得を行い、観測時と同じ位置にモデルの端点を配置してシミュレーションによって形状を再現した結果を示す。図7、図8、図9はそれぞれゴムひも、鎖、ビデオケーブルに対する観測形状(各図の(a))、モデルによる再現形状(同(b))である。

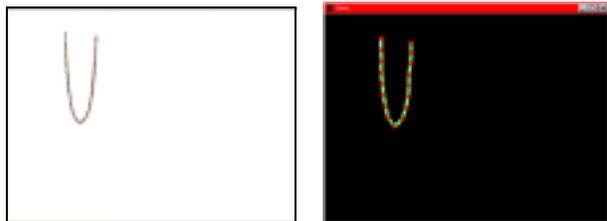
いずれについても観測形状の再現ができていいる。特に図9のような不均質な形状に対しては、自然曲げのパラメタが変化することによって適切な形状再現が可能になっていることが確認された。また、いずれの形状についても、曲げ係数や自然曲げという曲げ特性に関係するパラメタが再現さ

れる形状に大きな影響を与える傾向が見られた。



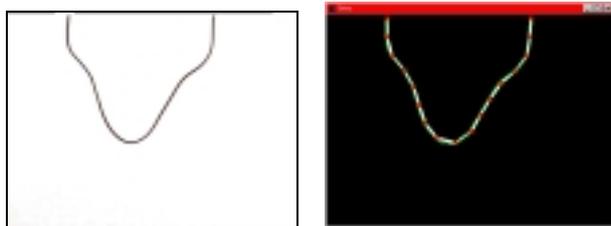
(a) 観測形状 (b) 再現形状

図7 ゴムひもに対する実験結果



(a) 観測形状 (b) 再現形状

図8 鎖に対する実験結果



(a) 観測形状 (b) 再現形状

図9 ビデオケーブルに対する実験結果

5.2 同一物体に対する複数の形状の再現実験

続いて、同一物体の複数の形状をそれぞれ再現できるようなモデルパラメタを獲得する実験を行った。用いたひもは前節の実験で用いたものと同じゴムひもであり、4種類の形状を観測形状として用いた。表1に、4種類の形状すべてを用いてパラメタ獲得を行った場合のそれぞれの形状再現誤差(中央列)、前節の実験と同様に再現する形状のみを用いてパラメタ獲得を行った場合の形状再現誤差(右列)を示す。なお、再現画像の大きさは320ピクセル×240ピクセルである。

観測形状	各質点あたりの再現形状誤差 (pixel)	
	すべての形状を利用	単一形状のみ利用
A	0.776640	0.042283
B	0.608693	0.000000
C	1.016388	0.105225
D	0.913885	0.099770

表1: 再現形状の誤差

表1の結果から、複数の形状に対して本手法を適用した場合にも、各質点平均でおおむね1ピク

セル以下となり、十分な再現精度が得られていることが確認された。

5.3 観測形状の追加による再現能力向上

観測形状を追加していくことで、さまざまな形状に対するモデルの形状再現能力を向上させる実験を行った。図10に示した形状のうちのいくつかを観測形状としてパラメタ獲得に利用し、得られたパラメタを用いて図10に示す7つの未観測形状を再現した。図12はこのときの観測形状の増加に伴う再現誤差の変化を示したもので、実線は7つの未観測形状についての再現誤差の平均、破線は最大値を表している。観測形状の数が増加すると、未観測形状に対する形状再現能力が向上していることが確認された。

本実験の例では、9~10個以上の形状を観測形状としてパラメタ獲得に用いることで、再現誤差を1ピクセル以下に抑えることができています。

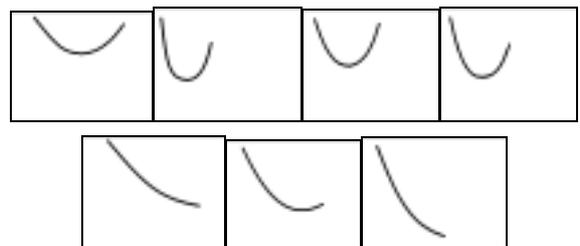


図10 未観測形状として用いた形状

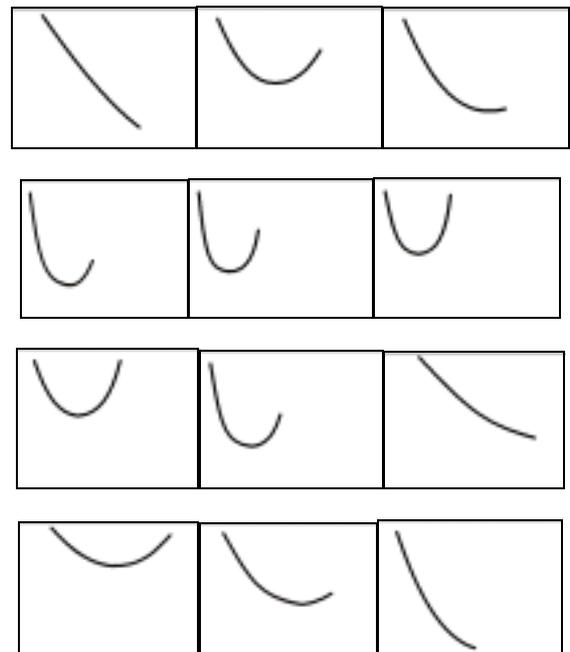


図11 観測形状として用いた形状

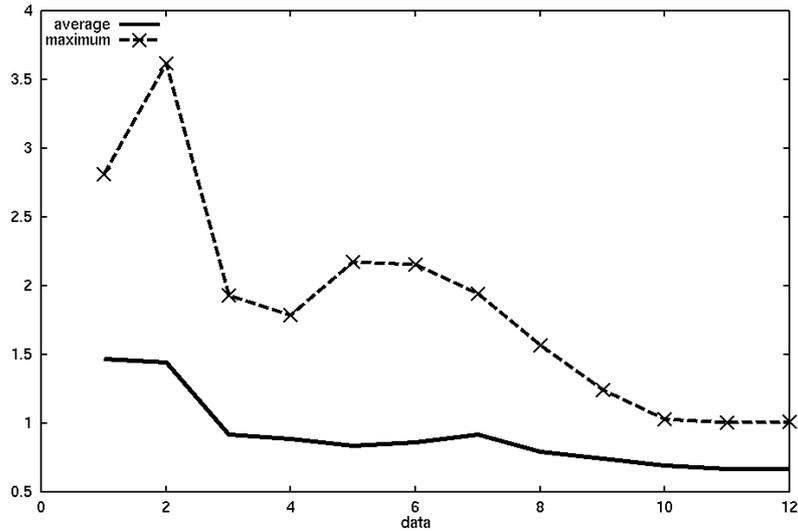


図 12 観測形状増加に対する未観測形状の再現誤差変化

6 関連研究

6.1 柔軟物体のモデル化

コンピュータグラフィクス(CG)の分野において、柔軟物体を mass-spring モデルを用いてモデル化することは広く行われている。その典型的な例は布形状シミュレーションである。布の伸び、曲げ、せん断などの特性を、正方形格子や三角形格子の構造を持つ2次元の mass-spring モデルを用いて表現し、形状をモデル化する、という研究が行われている[1]-[4]。

布以外のものに対する柔軟物体のモデル化の研究としては、Miller[5]による、イモムシやヘビの動きを mass-spring モデルを用いたシミュレーションがある。

これらの手法では、モデルに適切なパラメタを与えることができれば、柔軟物体の形状を再現することができる。しかし、適切なパラメタを決めることは非常に手間のかかる作業となる。

そこで、坂口ら[6]は、KES(Kawabata's Evaluation System)と呼ばれる手法によって測定された、布の伸びや曲げに対する物理的特性を導入することにより、布のモデル化を実現した。また、Breen[7]も KES の曲げやせん断特性を導入して、綿や羊毛など材質の異なる布の形状シミュレーションを実現した。しかし、KES では特性を測定するための特殊な機器が必要となる。

6.2 画像へのモデルフィッティング

コンピュータビジョン(CV)の分野において、変形するモデルを画像にフィッティングすることによって物体の形状を抽出する、という手法が提案されている。

Kass ら[8]は SNAKES と呼ばれるモデルを用いて、画像から物体の輪郭を抽出する手法を提案した。また、Terzopolulos[9]は対称性のある3次元の表面を、その2次元画像から抽出する手法を提案した。坂上ら[10]は Active Net と呼ばれる2次元のネットワークモデルを用いて、2次元の画像から物体領域を抽出する手法を提案した。Yuille[11]は人間の顔から目の部分を抽出するために、変形可能なテンプレートを用いた。

これらの研究では、モデルが物体の特性を表現することではなく単に画像から形状を抽出することを目標としている。したがってモデルを画像にフィッティングするというプロセスはモデルのパラメタを変化させることなく、形状のみを変化させることで実現されている。

7 結論

本稿では実物体を観測することによって、柔軟物体のモデルパラメタを自動獲得するアプローチについて提案した。本アプローチによって、パラメタを調整するという手間のかかる作業や、特殊な機器を用いた計測をすることなく、モデルの表現能力の範囲内で最適なモデルパラメタを決定し、柔軟物体の形状を仮想化することができる。

このアプローチに基づく具体的な例として、本稿では、鉛直平面内での1次元のひも状柔軟物体の静止形状の再現についてのみ述べたが、今後は本アプローチに基づいて、動的な形状変化や、他の種類の柔軟物体の形状変化のためのモデルパラメタ獲得を実現していくことを考えている。

前者に関しては、本稿で定義した E_f を加速度を持つ質点に対して拡張するために、運動方程式

の両辺(力、質量×加速度)の差を、質点の運動と画像上の見かけの運動との誤差として考えたエネルギー関数を用いることで実現が可能であると考えられる。

後者に関しては、従来から、柔軟物体のモデル化に関する研究で主に対象となっているのは布などの2次元柔軟物体であるため、今後の研究においては、モデルの構造を2次元に拡張し、布などの物体の形状シミュレーションを実現することを考えている。具体的には、従来研究で用いられてきた種類の形状制約(伸び・曲げ・せん断など)を用い、距離画像センサによって獲得した実物体形状からモデルのパラメタを獲得することを考えている。

また、視覚フィードバックだけではなく、トルクセンサなどを利用した実物体の観測によって、力覚フィードバックの実現のためのモデルパラメタ獲得についても検討していく予定である。

なお、本手法ではエネルギー最小化のために最急降下法を用いているため、エネルギー関数の局所解に陥る可能性がある。本稿のモデルではパラメタの変化に対してエネルギー関数の変化が滑らかであり、現在のパラメタの周辺の値で解が得られているため、現在のところそれほど重大な問題には至っていない。しかし、対称物体が2次元になり、観測形状が増加すると、エネルギー関数が複雑になり、最急降下法による適切な解への到達が困難になる可能性がある。この問題への対処は、本研究の今後の課題の1つである。

さらに、パラメタ獲得のプロセスを学習問題として議論することも重要である。パラメタ獲得に際して、現実の物体が操作の過程でとり得る全ての形状を用いれば、実物体のいかなる形状をも再現できるようになると考えられる。しかし、現実の物体と同一のフィードバックを実現する上で、実際にこのようにすべての形状を用いてパラメタ獲得をする必要があるとは限らない。図9でも示したように、十分な数の観測形状を与えることで、モデルは未観測の形状をも再現できるようになる。そこで、可能な限り少ない観測形状を用いて、可能な限り多くの形状を再現できるようなモデルパラメタを獲得できるようにするために、システム自体が対象物体を能動的に操作して、そのフィードバックを観測するという、行動・観測のプランニングの実現についても今後検討していく予定である。

参考文献

- [1] P.Volino *et al*, Versatile and Efficient Techniques for Simulating Cloth and Other Deformable Objects, *Computer Graphics* (SIGGRAPH Proceedings), pp.137-144 (1995).
- [2] X.Provot, Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, *Proc. of Graphics Interface*, pp.147-154 (1995).
- [3] T.Ogino *et al*, A Collision Detection Method for Interacting with Virtual Weaven Cloth, *Proc. VSMM '96*, pp.129-135 (1996).
- [4] P.Howlett *et al*, Mass-Spring Simulation using Adaptive Non-Active Points, *EUROGRAPHICS '98* (1998)
- [5] G.S.P.Miller, The Motion Dynamics of Snakes and Worms, *Computer Graphics* (SIGGRAPH Proceedings) pp.169-178 (1988)
- [6] Y.Sakaguchi *et al*, PARTY: A Numerical Calculation Method for a Dynamically Deformable Cloth Model, *System and Computers in Japan*, 26, 8, pp.75-87 (1995)
- [7] D.E.Breen *et al*, Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, *Computer Graphics* (SIGGRAPH Proceedings) pp.365-372 (1994)
- [8] M.Kass *et al*, Snakes: Active Contour Models, *IJCV* pp.321-331 (1988)
- [9] D.Terzopoulos *et al*, SYMMETRY-SEEKING MODELS FOR 3D OBJECT RECONSTRUCTION, *ICCV* pp.269-276 (1987)
- [10] K.Sakaue *et al*, Active Net Model and Its Application to Region Extraction, *Journal of ITEJ* pp.1155-1163 (1991) (In Japanese)
- [11] A.Yuille *et al*, ACTIVE VISION Chapter.2 "Deformable Templates", MIT Press (1992)