

現実物体の観測に基づく線状柔軟物体の操作時の形状のモデル化

須藤 克仁[†] 角所 考^{††} 美濃 導彦^{††}

仮想物体操作におけるユーザへのリアルな視覚フィードバックの実現を目的として、仮想柔軟物体のモデルパラメータを、現実物体の観測結果から獲得する手法について議論する。従来から、mass-springモデル等を用いて、布をはじめとする様々な柔軟物体がモデル化されているが、このようなモデル化では、モデルパラメータの値は、人間がモデルの形状を確認しながら手動で設定する必要があり、労力が大きい。また、モデルパラメータの値は通常、物体全体にわたって同一であると仮定されるため、実現された形状が均質すぎてリアリティに欠ける場合も多い。本研究では、仮想物体に対する操作を現実世界において実行し、その観測結果に基づいて、現実物体と同一の見え方を再現できるようなモデルパラメータの値を求めることにより、ユーザによる物体操作に対してリアルな視覚フィードバックを実現できる仮想物体モデルを獲得することを旨とする。このための第1歩として、本稿では、線状の柔軟物体の2次元平面上での操作に対する静止形状を再現する処理について述べる。具体的には、線状の柔軟物体の伸びや曲げに対する特性を1次元mass-springモデルを用いて表現し、モデルが観測形状を静止・安定状態として持つようにモデルパラメータの値を定める。本手法を用いて実際のもの形状を再現する実験を行い、適切なパラメータが獲得できることを確認した。

Shape Modeling for String-like Deformable Objects in Manipulation by Observing Real Objects

KATSUHITO SUDOH,[†] KOH KAKUSHO^{††} and MICHHIKO MINOH^{††}

This paper discusses a method to acquire appropriate values for the parameters of a deformable object model from observation of a real object for virtual object manipulation. In previous work on deformable object modeling, various deformable objects are successfully modeled using mass-spring models. It is assumed in this work that the values of the model parameters to produce realistic shapes are given by the designer of the model. However, adjusting the parameter values is actually quite troublesome. It is also a problem in the previous work that the shapes produced by the models are too much uniform to be realistic because the same values are employed for the model parameters in each part of the model. We propose to acquire a deformable object model that gives realistic visual feedback to the user for virtual object manipulation, by estimating appropriate values of the model parameters from observation of a real object in manipulation. For the first step of this work, we consider static shapes of string-like deformable objects manipulated on a two dimensional plane. Our method employs a one-dimensional mass-spring model and determines its model parameter values so that the model takes the observed shapes in its steady states.

1. ま え が き

仮想世界における物体操作では、ユーザの様々な操作に対する物体の見え方を視覚フィードバックとしてユーザに提示するために、仮想物体のモデルが必要と

なる。対象物体が剛体の場合、操作によって変化するのは物体の位置と姿勢のみであるが、柔軟物体の場合には、物体の形状自体が様々な変化するため、これをどのようにモデル化するかが問題となる。これに関して、従来からコンピュータグラフィックス(CG)の分野では、mass-springモデル等を用いて柔軟物体の形状変化をモデル化することがさかに行われてきた。たとえば布のモデル化では、布の伸び、曲げ、せん断等の特性を、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、その形状をシミュレーションする手法^{1)~4)}が提案されている。布以外でも、イモムシやヘビの動き等を1次元

[†] 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

^{††} 京都大学学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies,
Kyoto University
現在、NTT コミュニケーション科学基礎研究所
Presently with NTT Communication Science Laboratories

の mass-spring モデルで表現することが試みられている⁵⁾。仮想物体操作への適用に関しても、弾性物体を 3次元の立体構造を持った mass-spring モデルで表現する提案がなされている⁶⁾。

これらの研究では、様々な柔軟物体の形状を、それぞれどのようなモデルによって表現するかというモデルの表現形式に議論の焦点が置かれているため、その提案内容は、対象物体の形状を表現するための質点の連結構造や質点間の制約の与え方等に関するものが中心である場合が多い。しかし、このようなモデルを用いて、実際に目標とする柔軟物体の形状を的確に表現できるかどうかは、モデルの表現形式自体の適切さに加えて、そのモデルパラメータの値にも依存する。たとえば、2次元 mass-spring モデルによって布形状を表現することを考えた場合、そのモデルの形状は、ばね係数等のモデルパラメータの値によって、目的とする布形状だけではなく、剛性の高い板状のものから、柔軟で伸縮性の高いゴム膜状のものまで、様々に変化する。したがって、このようなモデルを用いて柔軟物体の種類や材質の違いによる形状の相違を的確に表現するには、モデルのパラメータの値を適切に定める必要がある。しかし、このようなモデルパラメータの値の設定については、従来研究において具体的な手法を提案しているものは少なく、通常は、モデルの形状が現実物体と同一に見えるかどうかを人間が主観で評価しながら、手作業で調整することが暗黙の前提となっているものが多い。

このような方法では、モデルパラメータの調整を手作業で行わなければならないこと自体、労力を要するものであるのに加え、モデルによって再現される形状のリアリティを客観的に評価する基準が存在しないため、これを向上させるための具体的なパラメータの調整指針が定かでなく、調整作業は主観評価に基づく試行錯誤的なものとならざるをえない。上述の布のモデル化の研究では、現実の布の伸びや曲げ、剪断といった物理特性を、KES (Kawabata's Evaluation System for fabric \tilde{y}) と呼ばれる手法で測定し、得られたデータをモデルパラメータに反映させることによって、リアルな布の形状を再現するという方法^{8),9)}も試みられているが、このような物理特性の測定には、対象物体や物理特性の種類に応じてそれぞれ専用の特殊な計測機器が必要となる。

さらに、従来の柔軟物体のモデル化では、通常、モデルパラメータの値は物体全体にわたって同一であると仮定されることが多いため、実現された形状が均質すぎて逆にリアリティに欠ける場合も多い。不均質な特

性を実現するには、モデルの各部分に対するパラメータの値を変えればよいが、その場合には、パラメータ数の増加を招き、パラメータ調整の問題はさらに深刻になる。

そこで、本研究では、このモデルパラメータの値の設定を自動化することを目標とする。

ところで、柔軟物体に限らず、一般に仮想物体操作において、ユーザに対する視覚フィードバックのリアリティとして要求されるのは、その仮想物体が仮に現実存在したとして、その現実物体に対して、仮想物体に対する場合と同一の操作を加えたときの見え方と同じ見え方がフィードバックされることである。したがって、逆に、これが満足されれば、仮想物体モデルの内部構造や物理特性が必ずしも現実物体と同一である必要はない。実際、前述のような mass-spring モデルによる柔軟物体のモデル化においても、mass-spring モデルは対象物体の構造や物理特性を厳密に再現したものではないが、モデルパラメータの値を、手作業にせよ、適切に設定することにより、現実物体とかなり近い見え方を再現できている。

本研究ではこのことに注目し、柔軟物体の形状を表現するためのモデルの表現形式としては、多様な柔軟物体を表現するために広く利用されている mass-spring モデルを用いることを前提として、その際の適切なモデルパラメータの値を自動的に獲得するために、モデル化したい柔軟物体に対する操作を現実世界において実行し、その観測結果に基づいて、現実物体と同一の見え方を再現できるようなモデルパラメータの値を求めることにより、ユーザによる物体操作に対してリアルな視覚フィードバックを実現できる仮想物体モデルを獲得するというアプローチを提案する。また、このアプローチを実現するための具体的な問題設定として、本稿では、線状の柔軟物体の 2次元平面上での操作に対する静止形状を再現する処理を取り上げ、この問題を対象として、上のアプローチの具体的な実現方法について提案する。

次章ではまず、本研究と同様、現実物体の観測結果に基づいて仮想物体のモデルを作成することを目指した従来研究をあげ、これに対する本研究の位置付けと、それに基づく上のような問題設定の具体的な内容について述べる。続く 3 章では、本稿で前提とする線状柔軟物体の形状表現のための mass-spring モデルについて述べる。その後、4 章において、この mass-spring モデルによって現実の様々な線状柔軟物体の形状を再現するための適切なモデルパラメータの値を現実物体の観測結果から獲得するための手法を提案する。さら

に5章では、この手法を用いてゴムひも、鎖、UTPケーブル、草の葉(線状の細いもの)という4種類の現実の線状柔軟物体を操作した場合の様々な静止形状を対象として、これを再現・予測するためのモデルパラメータを獲得する実験の結果を示す。最後に6章で本研究の今後の課題について議論する。

2. 現実物体の観測による仮想物体モデル作成

2.1 本研究の位置付け

柔軟物体の形状の見え方は、同一物体の場合、(1) 視点位置、(2) 照明条件、(3) 操作内容、(4) 観測時刻、(5) 他物体との相互作用、等の諸条件によって変化する。仮想柔軟物体操作のためのリアルな視覚フィードバックのためには、これらの各条件の変化に対して、それぞれ現実物体と同じ見え方を生成できる必要がある。

これに関して、近年、コンピュータビジョン(CV)の分野では、このような現実物体と同じ見え方を生成できる仮想物体モデルを、現実物体の観測結果に基づいて作成しようとする試みがさかんとされている。たとえば、Virtualized Realityと呼ばれる研究では、球技の試合等を多数のカメラで観測し、各時刻の3次元シーンをそれぞれシステム内部に再現することによって、各時刻における任意視点からの見え方を生成することが試みられている^{10),11)}。また、様々な照明条件下における現実物体をカメラで観測し、その結果から物体の表面反射率特性を獲得することによって、任意の照明条件下での見え方を生成する手法も提案されている^{12),13)}。

これらの研究は、上の(1)~(5)の条件のうち(1)、(2)にそれぞれ焦点を当て、視点位置や照明条件の変化に応じた視覚フィードバックを生成できる仮想物体モデルを獲得することを試みたものといえる。また、(1)、(2)の条件の変化に対して物体の形状は変化しないことから、これらの研究では、対象物体は剛体と仮定し、形状変化を考慮しないのが普通である。これに対し、本研究では、(3)の条件に焦点を当て、操作内容の変化に応じた視覚フィードバックを生成できる物体モデルを獲得することを目指す。したがって、対象物体としても、操作にともなって形状が変化する柔軟物体を考える。

2.2 問題設定

柔軟物体には、ひものような線状の物体から、布のような面状の物体、ゴムボールのような立体状の物体まで様々なものが存在する。また、再現すべき視覚フィードバックとしても、操作後の静止形状や操作中

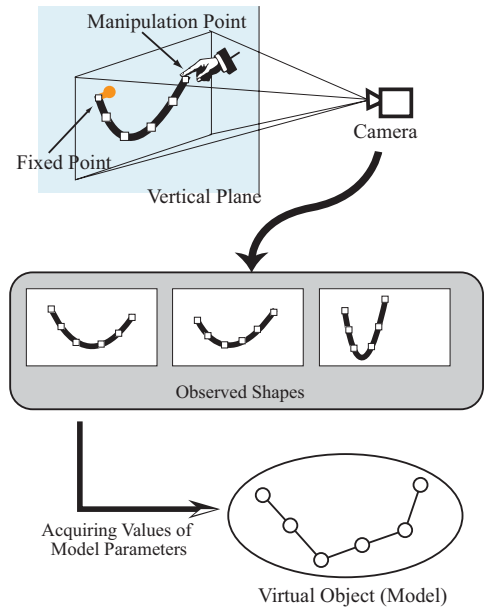


図1 カメラでの観測によるモデルパラメータ獲得
Fig. 1 Acquiring model parameters from observation by a camera.

の動的形状、質感等が考えられる。本研究では、2.1節にあげた(3)の条件(操作内容)に焦点を当てるため、本稿では、それ以外の(1)、(2)、(4)、(5)の条件が作用しない状況を考える。すなわち、第1に、視点位置による見え方の変化を考慮する必要のない状況として、2次元平面上の線状物体をその平面に正対して観測する状況を考える。第2に、照明条件に依存しない見え方として、対象物体の形状のみに注目し、色や質感は考慮しない。第3に、観測時刻によって見え方に違いが生じない形状として、操作にともなう物体自身の運動が終わった後の静止形状を考える。第4に、他物体との相互作用がない状況として、仮想空間中には対象物体のみが存在するものと仮定する。

上のような条件に対応する具体的な問題設定として、次のような処理の実現を目標とする(図1)。現実の線状物体の一端(これを“固定端”と呼ぶ)を固定し、他端(これを“操作端”と呼ぶ)を操作して、任意の位置に移動させる。このとき物体は、重力のために、固定端と操作端を含む鉛直面上に存在するので、その鉛直面に正対したカメラによって、物体の静止形状を観測する。一方、システム内部では、仮想的な線状物体の形状モデルを用いて、その一端を固定し、他端を操作点と同じ位置に移動したときの静止形状を生成する。これを現実物体の操作端の位置を様々に変えながら繰り返し、各操作端の位置に対して、仮想物体の形

状が観測形状と一致するようにパラメータの値を修正する．この処理は，現実物体に対する操作端位置の増加とともに，それ以上パラメータの値を修正しなくても，仮想物体モデルによって生成される静止形状が，対応する現実物体の観測形状と十分に近くなった時点で終了する．

2.3 観測形状の記述

2.2 節で述べたような方法で現実物体を観測する際には，対象物体にマーカを付加し，その位置を観測画像から抽出することにより，物体の観測形状を獲得する．現実物体の操作端を様々な位置に動かしながら，そのときの静止形状をカメラで観測する場合， j 番目の操作端位置に対する i 番目のマーカの画像中での位置を 2 次元ベクトル y_i^j で表す．ここで，マーカの総数を I ，操作端を動かす位置の総数を J で表し， $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$ とする．このとき， j 番目の操作端位置に対する現実物体の観測形状は，マーカ位置の集合 $C^j = \{ y_i^j \mid i = 1, \dots, I \}$ によって記述されることになる．ただし，このうち y_1^j が固定端， y_I^j が操作端であるとする．

以下では，このようにして得られた観測形状を再現するための仮想物体モデルを作成するための処理について述べる．

3. 仮想物体のモデル表現

3.1 1次元 mass-spring モデル

線状物体の形状モデルとして，図 2 に示すように，マーカ数と同じ I 個の質点からなる 1 次元の mass-spring モデルを用いる．このモデルの i 番目の質点 P_i ($i = 1, \dots, I$) の位置を x_i で表す．2.2 節で述べたように，本稿で扱うのは鉛直平面上での形状であるため， x_i は 2 次元ベクトルとなる．これを用いてモデルの伸び特性，曲げ特性を次のように表現する．

(1) 伸び特性

外力によって仮想物体が伸ばされると，物体内部には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 $S_{i,i+1}$ とすると，これは次式で定義される (図 3)．

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

ただし， s_i, l_i は P_i と P_{i+1} の間のばねのばね係数と，外力がないときの自然長である．

(2) 曲げ特性

外力によって仮想物体が曲げられると，物体内部には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 $B_{i,i+1}$ とすると，これは

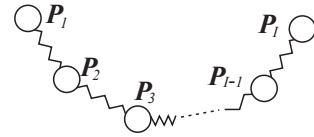


図 2 1次元 mass-spring モデル
Fig. 2 One-dimensional mass-spring model.

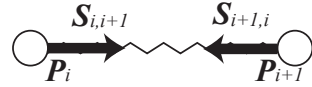


図 3 伸び回復力
Fig. 3 Recovering force for stretching.

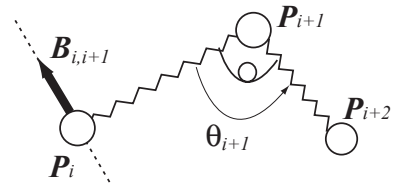


図 4 曲げ回復力
Fig. 4 Recovering force for bending.

次式で定義される (図 4)．

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

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

ただし， b_{i+1} は曲げ係数， θ_{i+1} は P_{i+1} まわりの曲げ角度である． $N_{i,i+1}$ はベクトル $x_{i+1} - x_i$ に対する単位法線ベクトルで，この曲げ角に対して外側に向かう向きを持つように選ぶ． ϕ_{i+1} は外力がないときの θ_{i+1} の大きさ (“自然曲げ” と呼ぶ) である．これは，理想的なひもにおいては π (radian) とすべきであるが，電気ケーブルやゴムひも等，実際の現実物体は，外力が働いていないときでも曲がった形状をとる場合があるため，このようなパラメータを導入する．

なお，上式によって P_i に曲げ回復力 $B_{i,i+1}$ が働く場合には，作用・反作用の法則に基づいて， P_{i+1} に $-B_{i,i+1}$ の力を与える．

3.2 形状シミュレーション

物体操作にともなうような mass-spring モデルの動作は，以下の式によってシミュレーションできる．時刻 t において質点 P_i に働く力を $F_i(t)$ で表すと，これは以下ようになる．

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

ただし, $S_{i,i-1}(t)$, $S_{i,i+1}(t)$, $B_{i,i-1}(t)$, $B_{i,i+1}(t)$, $-B_{i-1,i}(t)$, $-B_{i+1,i}(t)$, $r_i(t)$ 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 $-B_{i-1,i}$, $-B_{i+1,i}$ である. $m_i g$ は P_i に働く重力であり, m_i は P_i の質量, g は重力加速度ベクトルを表す. f_i^o は, 時刻 t において P_i に働く外力であり, 固定端および操作端にのみ, 合力を 0 とするように作用させる. $r_i(t)$ は時刻 t において P_i に働く空気抵抗を表し, 時刻 t での P_i の速度を $v_i(t)$ とすると, 次式で表される.

$$r_i(t) = -\rho v_i(t) \quad (4)$$

ただし, ρ は抵抗係数である.

このとき, 時刻 t での P_i の加速度 $a_i(t)$ は, 運動方程式に基づいて次式で計算される.

$$a_i(t) = \frac{1}{m_i} F_i(t) \quad (5)$$

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, $v_i(t + \Delta t)$, $x_i(t + \Delta t)$ は, オイラー法によって以下のように計算できる.

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

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

固定端および操作端の位置を物体操作に合わせて定め, 以上に基いてモデルの運動をシミュレーションすると, 物体操作に対する仮想物体の視覚フィードバックを生成できる. このシミュレーションにおいて, 与えられた固定端, 操作端の位置に対してモデルの運動が完了し, 静止安定状態となったときの形状がモデルの静止形状である. この静止形状は, モデルパラメータの値によって様々に変化するため, 本手法では, モデルパラメータの値を適切に設定することによって, 現実物体の観測形状をモデルの静止形状として再現する. 次章では, そのための具体的な手続きについて述べる.

4. モデルパラメータの獲得

4.1 観測形状の再現のための評価関数

仮想物体が物体操作に対する観測形状 C^j を再現するためには, モデルの両端の質点を観測形状 C^j の固定端・操作端と同じ位置に設定し, 3.2 節で述べた方法でモデルをシミュレーションしたときの静止形状が, C^j と一致していなくてはならない. このためには, (a) モデルの形状が C^j と一致しており, かつそのときに, (b) モデルの形状がモデルの静止・安定状態に対応している(ここでいったん動きを止めたらそれ

上動かない), という 2 つの条件が満足される必要がある. そこで, モデルが観測形状 C^j を再現しているときの質点 P_1, \dots, P_I の位置をそれぞれ, x_1^j, \dots, x_I^j ($x_1^j = y_1^j$, $x_I^j = y_I^j$) で表し, まずモデルが上の条件 (a) を満足するための制約として, 観測形状 C^j とモデルの形状とのずれを表す評価関数 E_s^j を以下のように定義する.

$$E_s^j = \sum_{i=1}^I \|x_i^j - y_i^j\|^2 \quad (8)$$

E_s^j は, 仮想物体モデルの各質点位置が観測形状 C^j と一致するときに最小値 0 をとる.

これに加えて, モデルがさらに条件 (b) を満足するには, 上式を満足する形状において各質点の加速度がすべて 0 にならなければならない. そこで, 質点位置 x_1^j, \dots, x_I^j において各質点に働く合力の大きさの和を評価する評価関数 E_f^j を以下のように定義する.

$$E_f^j = \sum_{i=1}^I \|F_i^j\|^2 \quad (9)$$

ただし, F_i^j は, モデルの各質点 P_i が, それぞれ位置 x_i^j に存在するときに, P_i に働く力 F_i を表す ($i = 1, \dots, I$). この E_f^j は, 与えられた質点位置において各質点に働く合力が 0 のときに最小値 0 をとる.

以上から, 仮想物体モデルに対して E_s^j と E_f^j がともに 0 となれば, そのモデルは, 上の条件 (a), (b) を満足し, 観測形状 C^j をモデルの静止・安定形状として再現できることになる. この制約を表現するために, c_s, c_f を係数とする E_s^j と E_f^j の線形加重和によって以下のような評価関数を定義する.

$$E^j = c_s E_s^j + c_f E_f^j \quad (10)$$

さらに, 操作端を異なる J 個の位置に動かしたときの観測形状 C_1, \dots, C_J すべてを, 同一のモデルパラメータによるモデルの静止・安定形状として再現するには, 同一のモデルパラメータの値によって, $j = 1, \dots, J$ に対する E^j をすべて 0 にする必要がある. すなわち, 観測形状 C_1, \dots, C_J を再現できる仮想物体モデルを獲得するには, 以下の評価関数の値を最小とするようなパラメータの値を求めればよい.

$$E_{all} = \sum_{j=1}^J E^j \quad (11)$$

4.2 評価関数の最小化

式 (11) の E_{all} は, 以下の $M = IJ + 2(I - 1) + 2(I - 2)$ 個の変数を含んだ評価関数であり, この中の x_i^j を除く $2(I - 1) + 2(I - 2)$ 個の変数がモデルパラ

メータである .

- j 番目の観測形状に対応するモデルの質点位置 : x_i^j ($1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J$)
- ばね係数 : s_i ($1 \leq i \leq I - 1$)
- 曲げ係数 : b_i ($2 \leq i \leq I - 1$)
- 質点間のばねの自然長 : l_i ($1 \leq i \leq I - 1$)
- 質点まわりの自然曲げ : ϕ_i ($2 \leq i \leq I - 1$)

J 個の観測形状すべてを再現できるようなモデルパラメータの値を求める際には, 評価関数 E_{all} を最小化するように, 上のすべての変数を繰返し演算によって更新する . このためのアルゴリズムとして, 本稿では, 最急降下法とニュートン法を組み合わせたアルゴリズムとして知られる Levenberg-Marquardt 法¹⁴⁾ を用いた . この方法の実装にあたっては, 上の変数を成分とする M 次元ベクトル p , および, $\sqrt{c_s} \|x_i^j - y_i^j\|$, $\sqrt{c_f} \|F_i^j\|$ ($i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$) を要素とする $2IJ$ 次元ベクトル \mathcal{F} を考え, MathWorks 社の数値計算ソフトウェア MATLAB の Optimization Toolbox として提供されている lsqnonlin 関数¹⁵⁾ を利用して, $E_{all} = \mathcal{F}^T \mathcal{F}$ を最小とする p を求めるための繰返し計算を実行した .

5. 実験結果

5.1 観測形状の再現性

本手法によって, 実際に現実の線状柔軟物体の観測形状をどの程度再現できるかどうかを調べるために, 互いに特性の異なる, ゴムひも, 鎖, UTP ケーブル, 草の葉 (幅 2mm 程度の線状の細いもの) の 4 種類の物体の観測形状の再現を試みた . このうち, ゴムひも, 鎖は, ほぼ均質な特性を持ったものであり, UTP ケーブルは, 保管時の折り曲げによる癖のために, 曲げ角に対する弾性が場所によって異なる不均質なものになっている . また, 草の葉は, おおむね均質ではあるものの自然の植物であるため, 根元からの位置によって特性が異なっている .

それぞれの物体に, ほぼ等間隔で, 両端を含めて合計 9 個のマーカを付加し ($I = 9$), 操作端の位置を異なる 4 つの位置に移動したときの観測形状 C_1, \dots, C_4 を獲得した ($J = 4$). これらを用いて 4.2 節で述べた MATLAB による繰返し計算を 50 回実行してモデルパラメータを獲得し, それを用いて観測時と同じ操作端位置に対する仮想物体の静止形状をシミュレーションによって求めた . このときの各物体に対する観測形状と再現結果を図 5, 図 6, 図 7, 図 8 に, 再現誤差 (各質点のマーカからのずれの平均) を表 1 に示す . なお, 画像サイズは, すべての実験を通じて 640×480

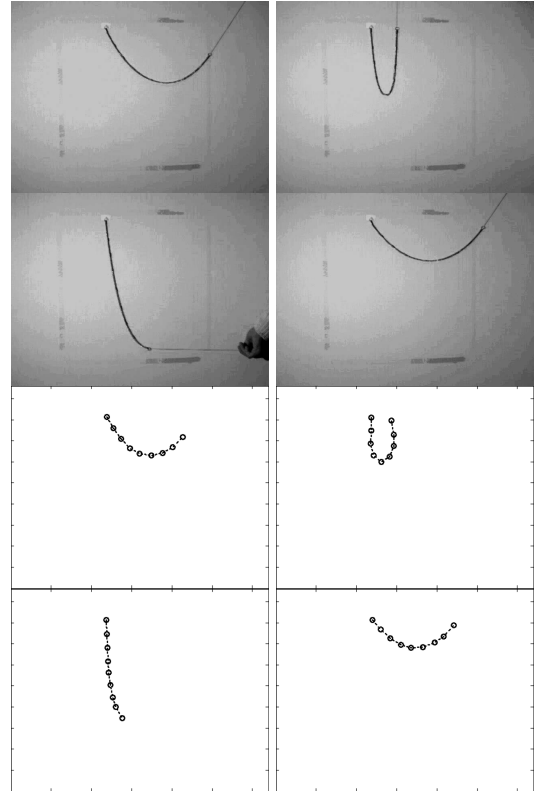


図 5 観測形状と再現形状 (ゴムひも)

Fig. 5 Observed shapes and reproduced shapes (rubber-string).

画素で, 画像とモデルのサイズ比率は, 1 画素を 2mm とした .

モデルパラメータを獲得する処理の実行において, 式 (10) の係数 c_s, c_f は, それぞれ E_s^j, E_f^j の値の増加量が, 観測形状の再現性のどの程度の悪化に相当するかを考慮して, $c_s = 100, c_f = 10$ と設定した . また, 式 (3) 中の各質点の質量 m_1, \dots, m_9 や, シミュレーションに用いる式 (4) 中の空気抵抗係数 ρ については, これらが必ずしも現実と同じ値になっている必要はなく, これらが何らかの値として与えられた下で, 視覚的に観測形状を再現できるモデルパラメータが獲得できれば, 本研究で目的とする視覚フィードバックの実現のうえでは十分と考えられるため, 質点の質量はすべて 1g, 空気抵抗係数は 3Ns/m に設定した .

各観測形状に対するモデルの各質点位置 x_i^j ($i = 1, \dots, 9, j = 1, \dots, 4$) の初期値は, $x_i^j = y_i^j$, すなわち, 対応する観測形状 C_1, \dots, C_4 中のマーカ位置と同一位置に設定した . また, モデルパラメータのうち, 質点間の自然長 l_1, \dots, l_8 , および質点まわりの自然曲げ ϕ_2, \dots, ϕ_8 の初期値は, 1 枚目の観測形状 C_1

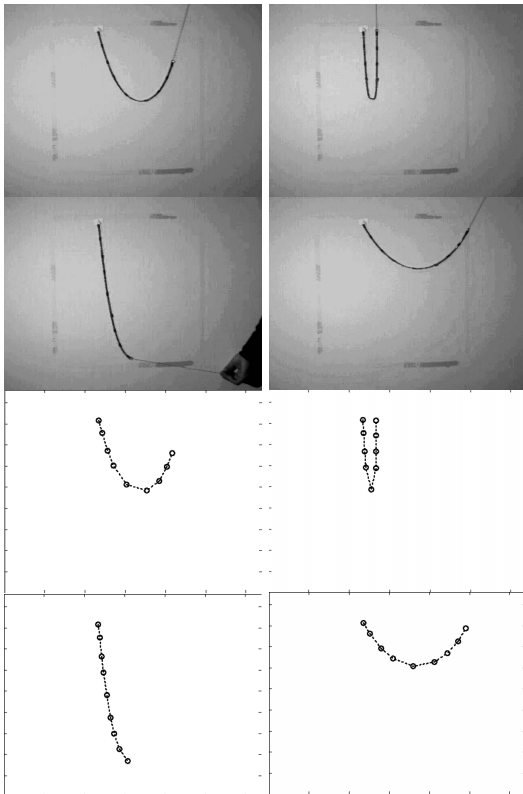


図 6 観測形状と再現形状 (鎖)

Fig. 6 Observed shapes and reproduced shapes (chain).

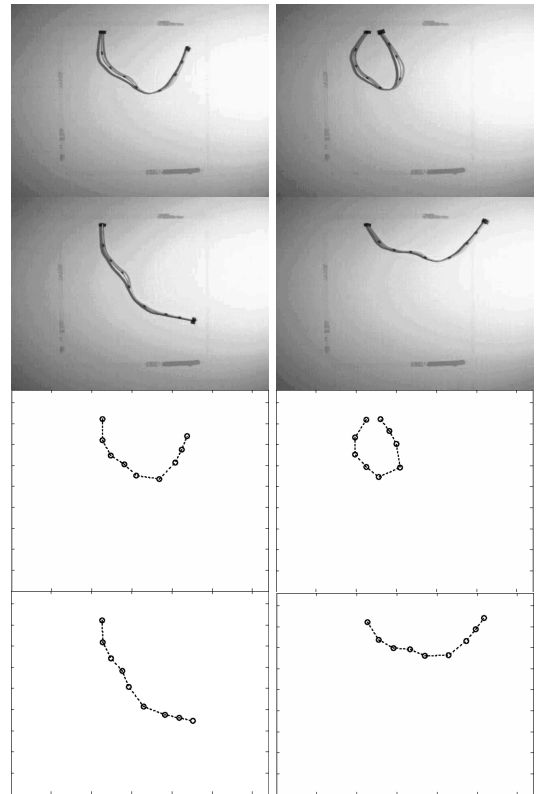


図 7 観測形状と再現形状 (UTP ケーブル)

Fig. 7 Observed shapes and reproduced shapes (UTP-cable).

において対応するマーカ間の距離，およびマーカ位置での曲げ角と同一の値に設定した．さらに，ばね係数 s_1, \dots, s_8 および曲げ係数 b_2, \dots, b_8 の初期値は，それぞれの物体の種類から直感的に適切と思われる値を表 2 のように与えた．

再現誤差としてどの程度の大きさのものまでが許されるかは，物体をモデル化する目的によるが，上の実験結果では再現誤差が 1 画素程度であることから，物体の特性の違いを再現するうえで問題のない大きさであると考えられる．このような結果から，本手法によって，特性の異なる物体の観測形状をそれぞれ再現できるモデルパラメータが獲得できることを確認した．

5.2 未観測形状の再現性

現実物体の観測結果から仮想物体操作のための視覚フィードバックを実現する場合，可能なあらゆる操作に対する現実物体の見え方をすべて観測しつくすことは現実的ではないため，一部の操作に対する観測形状から，未観測の操作も含めて，現実物体の形状を再現できるモデルを獲得できる必要がある．本手法において，このような未観測形状に対する再現性は，観測形状の増加とともに向上していくことが予想されるが，

表 1 異なる観測形状に対するモデルの形状再現誤差
Table 1 Errors for different observed shapes.

| 形状 | 再現誤差 [画素] | | | |
|-------|-----------|------|------|------|
| | ゴム | 鎖 | UTP | 葉 |
| C_1 | 0.69 | 0.39 | 0.72 | 1.52 |
| C_2 | 0.72 | 0.40 | 0.37 | 0.82 |
| C_3 | 0.70 | 0.20 | 0.46 | 0.45 |
| C_4 | 0.81 | 0.31 | 0.61 | 1.68 |

表 2 モデルパラメータの初期値
Table 2 Initial values of the model parameters.

| パラメータ | ゴム | 鎖 | UTP | 葉 |
|----------------|------|------|-------|------|
| $s_1 \sim s_8$ | 0.02 | 1.00 | 10.00 | 3.00 |
| $b_2 \sim b_8$ | 0.02 | 0.01 | 0.10 | 0.04 |

その際，2.2 節の最後でも述べたように，観測形状の数がある程度増えた段階で，未観測形状に対する再現性が十分高くなり，それ以上観測形状数を増やす必要がなくなることが望ましい．

そこで，実際にこのような性質が実現されるかどうかを確認するために，観測形状数の増加に対する，未観測形状の再現性の変化について調べた．まず，前節

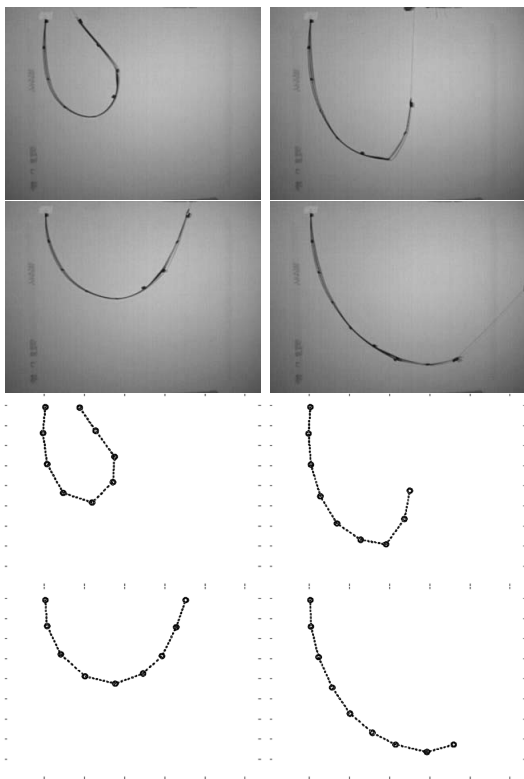


図 8 観測形状と再現形状 (草の葉)

Fig. 8 Observed shapes and reproduced shapes (leaf of grass).

と同じ 4 種類の物体の操作端を異なる 20 力所に移動した場合の形状を観測し、そのうちの 10 個を観測形状、残り 10 個を未観測形状として利用する。図 9、図 10 はゴムひもの場合のこのような形状の例である。このとき、観測形状として割り当てた形状のうちの J 枚 ($1 \leq J \leq 10$) を用いて、それらを再現できるパラメータの値を獲得し、得られた値を用いて、未観測形状として割り当てた形状 10 枚を再現した場合の平均の再現誤差 (各質点のマーカからのずれの未観測形状 10 枚についての平均) が、観測形状数 J の増加とともにどのように変化するかを調べた。モデルパラメータの初期値をそのまま用いた場合の再現誤差を表 3 に、観測形状から獲得したモデルパラメータの値を用いた場合の再現誤差を図 11 に示す。なお、モデルのパラメータの初期値の設定の仕方や、評価関数の最小化のための繰返し計算の回数等は、すべて 5.1 節と同一である。

観測形状数の増加とともに、未観測形状に対する再現誤差は減少し、ゴムひもと鎖のような均質な物体の場合には 3~4 個、UTP ケーブルや草の葉のような不均質な物体の場合でも 10 個程度の観測形状をパラ

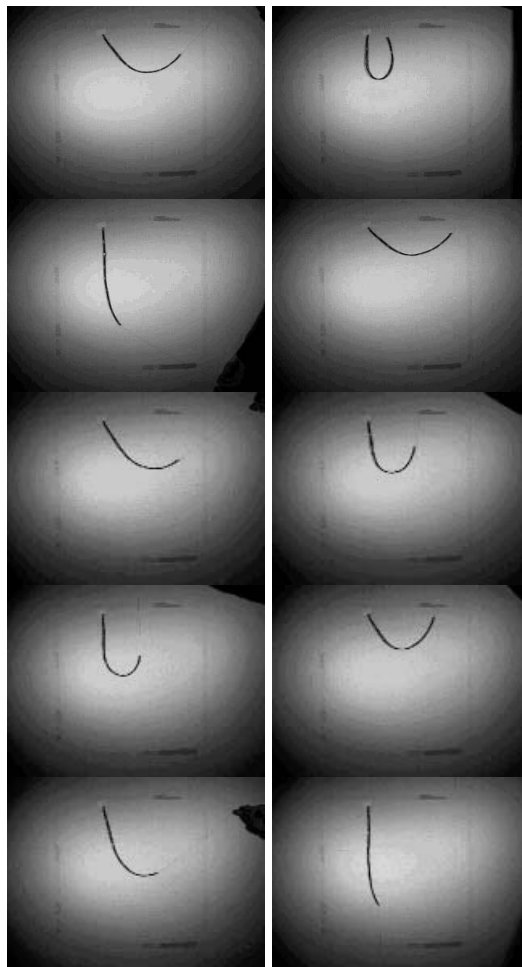


図 9 観測形状 (ゴムひも)

Fig. 9 Observed shapes (rubber string).

メータ獲得に用いることで、未観測形状を 1 画素程度の誤差で再現・予測できている。観測形状数を増加させ、かつ評価関数の最小化の計算回数を増やすことによって、この再現誤差をさらに減少させることは可能と考えられるが、上の結果の時点で 1 画素程度の誤差で未観測形状を再現・予測できており、これは 5.1 節の実験結果と同様、問題のない程度の大きさであると考えられる。以上の結果から、現実物体の観測結果から仮想物体操作のための視覚フィードバックを実現するうえで、本手法が本節の冒頭で述べたような望ましい性質を有していることが確認できた。

なお、本手法で用いている mass-spring モデルによって観測形状を再現するために、モデルパラメータがとりうる値は 1 通りだけとは限らず、本手法は、そのような複数の解のうちの 1 つを評価関数の最小化を通じて探索していることに相当する。上の結果におい

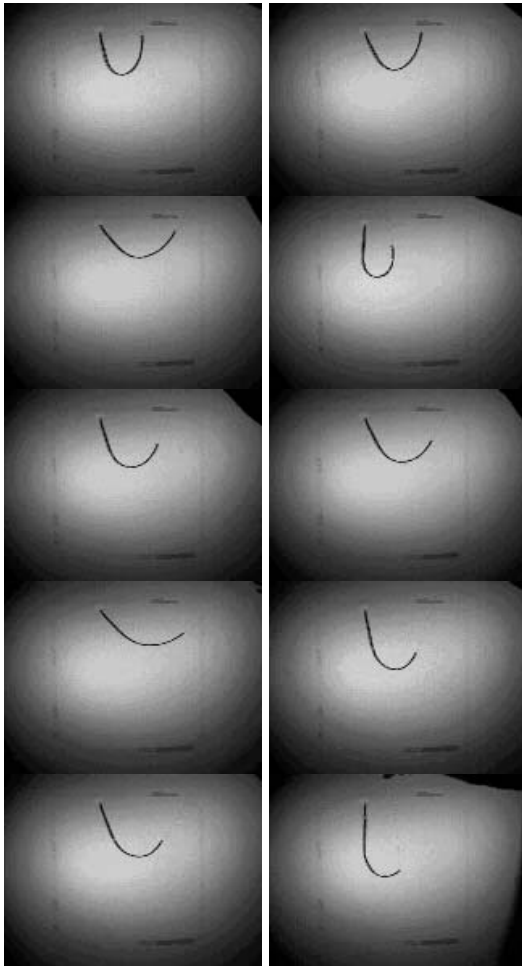


図 10 未観測形状(ゴムひも)

Fig. 10 Unobserved shapes (rubber string).

表 3 モデルパラメータの初期値による再現誤差

Table 3 Errors by initial values of the model parameters.

| 物体 | 再現誤差 [画素] |
|----------|-------------|
| ゴムひも | 6.34 |
| 鎖 | 34.54 |
| UTP ケーブル | 25.46 |
| 草の葉 | 115.34 |

て、モデルパラメータの初期値による再現誤差や、観測形状数の増加に対する再現誤差の減少の仕方が物体によって異なるのは、ゴムひものように均質でかつばねに近い物体ほど、このような探索における探索空間中の解が多数で、かつ密な分布をしているために、初期値を大まかに設定しても良い結果が得られやすく、かつ探索の過程でも解に到達しやすいためと考えられる。このことは、手作業でモデルパラメータを設定する際にも、均質でかつばねに近い物体ほど適切な値を

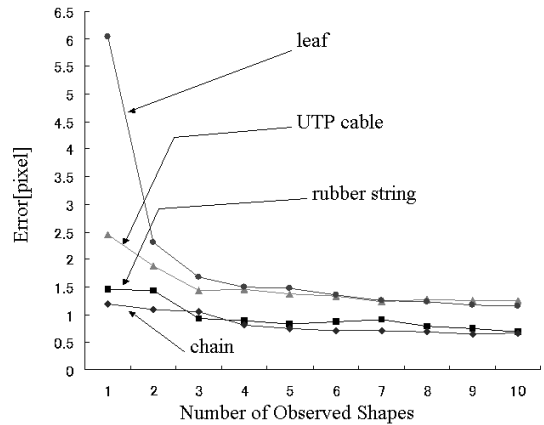


図 11 観測形状数に対する未観測形状の再現誤差

Fig. 11 Errors to reproduce unobserved shapes with increase of observed shapes.

試行錯誤的に見つけやすいことを示唆しているとも考えられる。

6. む す び

本稿では、現実物体の操作を観測することによって、柔軟物体のモデルパラメータを自動獲得するというアプローチを提案し、鉛直平面内での線状柔軟物体の静止形状を再現する問題を対象として、このアプローチに基づくモデルパラメータ獲得のための具体的な実現手法を提案した。また、この手法を用いて、4種類の物体に対する様々な操作時の形状を再現・予測する実験を行い、本手法が、線状柔軟物体の静止形状を再現するうえで有用であることを確認した。

CVの分野では、従来から、本研究で用いているような変形可能な物体モデルを画像にフィッティングすることにより、画像から物体形状を抽出する手法が多数提案されている^{16)~19)}。これらの研究では、ノイズを含む画像から、形状の滑らかさを制約条件として、対象物体の形状を抽出することが目的であるため、モデルのパラメータは、この形状の滑らかさを適切に表現するようにあらかじめ固定したうえで、モデルの質点位置を画像特徴と一致するように動かすことによって、モデルに合うような画像特徴を抽出する。したがって、画像を与えずにモデルの形状をシミュレーションした場合、画像中の対象物体の形状は当然再現されない。これに対し、本研究では、観測画像を静止・安定状態として再現できるモデルの特性を獲得することが目的であるため、画像特徴とモデルの形状の静止・安定性を満足するように、質点位置とモデルパラメータの両方を変化させることにより、上とは逆に、画像に合うようなモデルを求める。このように本研究は、

柔軟物体モデルのパラメータ獲得という、従来あまり議論されなかった問題の解決法として、変形可能な物体モデルと画像とのフィッティングを、従来とはまったく逆の形で利用するという、新たな利用法を示すものといえる。

本研究の今後の課題の1つとして、より多様な問題設定への適用があげられる。たとえば、従来から、柔軟物体のモデル化として多く取り扱われている布等の面状柔軟物体に対して本アプローチを適用することを考えた場合には、モデルの構造を1次元から2次元に拡張し、対象物体の3次元形状を表現することになる。このような現実物体の3次元形状をカメラによる観測結果に基づいて再現するには、本手法をさらに2.1節で述べたVirtualized Reality等の手法と組み合わせ、対象物体を複数の視点から観測したときの観測画像を、対応する視点位置に対して再現するようなモデルパラメータを求めるといった処理が必要となる。また、2.2節で述べたように、本稿では仮想物体の形状のうち、静止形状を現実物体と一致させることを目標としているため、本稿で述べた手法は、3.2節で述べた形状シミュレーションによって生成される形状のうち、モデルが静止に至るまでに暫定的に現れる動的形状については、現実物体のそれと一致することを必ずしも保証しない。このような物体自身の運動にともなう動的変化も含めた観測形状を再現するには、現実物体の運動を時系列画像として観測し、そこから得られる速度や加速度を再現するようなモデルパラメータを求める必要がある。以上のような処理は、基本的には本稿で提案した手法の拡張によって実現が可能であると考えているが、操作内容の変化に加え、2.1節で述べた(1)や(4)の条件の変化をとともなう状況への対応を図ることが必要であり、本稿で議論した問題の解決の上に立って議論される別の新たな問題となるため、そのための具体的な手法については、稿を改めて議論したい。

さらに、5.2節でも示したように、本手法では、ある程度の数の観測形状を与えることにより、未観測形状も含めて再現可能なモデルが獲得できることから、さらに、システム自体が対象物体を能動的に操作し、未観測形状の再現性を向上するうえで望ましい観測形状を獲得するという処理を導入することが考えられる。このためには、システムによる対象物体の操作・観測のプランニングが必要となり、このような処理の実現も本研究の今後の重要な検討課題の1つである。

謝辞 本稿の実験に関して多大のご支援をいただいた、京都大学大学院情報学研究所知能情報学専攻修士

課程の君田和也氏に深謝します。

参考文献

- 1) Volino, V., Courchesne, M. and Thalmann, N.M.: Versatile and Efficient Techniques for Simulating Cloth and Other Deformable Objects, *Proc. SIGGRAPH*, pp.137-144 (1995).
- 2) Provot, X.: Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, *Proc. Graphics Interface*, pp.147-154 (1995).
- 3) Ogino, T., Kameda, Y., Sakaguchi, Y., Minoh, M. and Ikeda, K.: A Collision Detection Method for Interacting with Virtual Woven Cloth, *Proc. VSMM*, pp.129-135 (1996).
- 4) Howlett P., et al.: Mass-Spring Simulation using Adaptive Non-Active Points, *Proc. EUROGRAPHICS* (1998).
- 5) Miller, G.S.P.: The Motion Dynamics of Snakes and Worms, *Proc. SIGGRAPH*, pp.169-178 (1988).
- 6) 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想柔軟物体の対話操作のためのモデル化と実現, *信学論(A)*, Vol.J79-A, No.11, pp.1919-1926 (1996).
- 7) 川端季雄: 風合い評価の標準化と解析(第2版), 日本繊維機械学会風合い計量と規格化研究委員会 (1980).
- 8) 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫: 仮想服飾環境PARTY—動的変形可能な布のための数値計算法, *信学論(D-II)*, Vol.J77-D-II, No.5, pp.912-921 (1994).
- 9) Breen, D.E., House, D.H. and Wozny, J.: Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, *Proc. SIGGRAPH*, pp.365-372 (1994).
- 10) Kanade, T., Narayanan, P.J. and Rander, P.W.: Virtualized Reality: Concepts and Early Results, *Proc. IEEE Workshop on the Representation of Visual Scenes* (1995).
- 11) Rander, P., Narayanan, P.J. and Kanade, T.: Virtualized Reality: Constructing Time-Varying Virtual Worlds From Real World Events, *Proc. IEEE Visualization* (1997).
- 12) Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Object Shape and Reflectance Modeling from Observation, *Proc. SIGGRAPH*, pp.379-387 (1997).
- 13) 町田貴史, 横矢直和: 相互反射を伴う物体表面反射特性の推定, *信学技報*, PRMU2001-225 (2002).
- 14) 西川禎一, 三宮信夫, 茨木俊秀: 最適化, 岩波書店 (1982).
- 15) MATLAB Optimization Toolbox ユーザーズガ

イド (ver.2), The Math-Works Inc.

http://www.mathworks.com/access/helpdesk/jhelp/pdf_doc/optim/optim.tb.pdf

- 16) Terzopoulos, D., Witkin, A. and Kass, M.: Symmetry-Seeking Models for 3D Object Reconstruction, *Proc. ICCV*, pp.269-276 (1987).
- 17) Kass, M. Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models, *Int. J. Computer Vision*, pp.321-331 (1988).
- 18) 坂上勝彦, 山本和彦: 動的な網のモデル Active Net とその領域抽出への応用, *テレビジョン学会誌*, Vol.45, No.10, pp.1155-1163 (1991).
- 19) Yuille, A. and Hallinan, P.: Deformable Templates, *Active Vision*, Blake, A. and Yuille, A. (Eds.), MIT Press (1992).

(平成 14 年 4 月 10 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



須藤 克仁

平成 12 年京都大学工学部情報学科卒業。平成 14 年同大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了。同年 NTT 入社。在学中、システムと現実物体とのインタラクション

による物体のモデリングに関する研究に従事。



角所 考 (正会員)

昭和 63 年名古屋大学工学部電気学科卒業。平成 5 年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了。平成 4 年～6 年日本学術振興会特別研究員, 平成 5 年～6 年スタンフォード大学ロボティクス研究所客員研究員, 平成 6 年大阪大学産業科学研究所助手, 平成 9 年京都大学総合情報メディアセンター助教授, 平成 14 年同大学学術情報メディアセンター助教授。博士 (工学)。視覚メディア処理, インタラクション, コミュニケーションに関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 人工知能学会, システム制御情報学会各会員。



美濃 導彦 (正会員)

昭和 53 年京都大学工学部情報工学科卒業。昭和 58 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。同年同大学工学部助手, 昭和 62 年～63 年マサチューセッツ州立大学客員研究員, 平成元年京都大学工学部附属高度情報開発実験施設助教授, 平成 7 年同教授, 平成 9 年同大学総合情報メディアセンター教授, 平成 14 年同大学学術情報メディアセンター教授。工学博士。画像処理, 人工知能, 知的コミュニケーション関係の研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会, 画像電子学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。