

現実物体操作の多視点観測による面状柔軟物体モデルのパラメタ推定

藪内 智浩[†] 角所 考^{††} 美濃 導彦^{††}

[†] 京都大学大学院情報学研究科, 〒606-8501, 京都市左京区吉田本町
^{††} 京都大学学術情報メディアセンター, 〒606-8501, 京都市左京区吉田二本松町
E-mail: †yabuuchi@mm.media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 操作中の面状柔軟物体を複数台カメラで観測することで得られる多視点シルエット画像を用いて, 面状柔軟物体の形状変化を記述する柔軟物体モデルのパラメタ値を推定する手法を提案する. 従来の柔軟物体モデルのパラメタ推定手法では, 再現対象である現実物体の3次元形状を利用する. 面状柔軟物体の形状は操作にともない様々に変化するが, 物体に計測方向から不可視な領域が存在する場合, 安定してその3次元形状を計測することは困難である. 従来は計測可能な形状となる操作のみを扱っているが, これはモデルが再現可能な操作・形状の種類に影響する. 本研究では, 3次元形状よりも安定して獲得できる多視点シルエット画像を用い, モデル形状と現実物体の形状が利用カメラの全てのシルエットと一致するパラメタ値を獲得することで, 現実物体形状を同一モデルの変形結果として再現可能なパラメタ値を推定する. シミュレーションデータを用いた実験により, 提案手法の有効性を評価した.
キーワード 多視点観測, シルエット画像, パラメタ推定, 面状柔軟物体, 物体操作

Model Parameters Estimation of Sheet-like Deformable Objects under Manipulations from Multi-viewpoint Images

Tomohiro YABUCHI[†], Koh KAKUSHO^{††}, and Michihiko MINOH^{††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan
^{††} Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, Yoshida Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan
E-mail: †yabuuchi@mm.media.kyoto-u.ac.jp

Abstract This paper discusses modeling real sheet-like deformable objects for creating a virtual object that reproduces the shapes of a real deformable object under manipulation. In the conventional work for producing the shapes of deformable objects, models with many parameters have been introduced. Those models can produce realistic shapes of deformable objects only when optimal values are set for their parameters. In this paper, we propose a method for estimating the optimal values of model parameters by using silhouette images, which can be acquired more easily than 3D shapes, captured from multi-viewpoint image sequences surround a real deformable object.

Key words Shape from Silhouette, Parameter Estimation, Multi-viewpoint Observation, Object Manipulation

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)システムを利用したリアルな物体操作の実現を目的として, 本研究では布などの面状柔軟物体(以下では“柔軟物体”と呼ぶ)を取り上げ, 現実世界でこのような物体を操作した際の形状変化を再現可能な仮想物体モデルのパラメタ推定を目指す.

柔軟物体に対して可能な操作は非常に多様である. このため, これらの多様な操作をVRシステムを用いて実現するために, 想定される操作に対する柔軟物体の形状変化を全て観測・記録

しておくことは現実的ではない. したがって, 対象物体を表現する仮想物体モデルを利用し, 操作に対する物体の形状変化をそのシミュレーション結果として提示することが必要となる.

柔軟物体の操作にともなう形状変化を, 仮想物体モデルを用いて視覚的にシミュレーションする手法は, 従来からコンピュータグラフィックス(CV)の分野で議論されている[1][2]. このような研究では, 柔軟物体の形状変化の特性を弾性に関わるパラメタなどで記述した仮想物体モデルを用いて表現する. このとき, 仮想物体モデルでシミュレーションされる変形の様子が現実物体のそれをどれほど正確に再現できるかは, モデル自体が

どれほど多様な形状変化を表現できるかに加え、特性を記述するモデルパラメタの値が適当な値に設定されているかに依存する。このため、モデルが表現可能な形状変化の多様性が適切であったとしたとしても、さらにモデルパラメタの値を適切なものとするために、モデルの形状変化が現実物体のそれと同一に見えるかどうかを主観的に評価し、パラメタの値を手作業で調整する作業が必要となる。しかし、これは利用するモデルの種類にかかわらず大変煩雑な作業である。また、それに加えてモデルの再現精度を客観的に評価できないという問題も生じる。

そこで、本稿では、仮想物体モデルに関しては従来から利用されているモデルを適当に選択することを前提として、そのモデルの適切なパラメタの値を、現実物体の観測結果にもとづいて推定する問題に焦点を当てる。本研究では、形状を再現できるモデルパラメタ値の推定が目的であるため、適切なパラメタ値は再現対象である柔軟物体の操作中の3次元形状を同一モデルの変形結果として再現可能なパラメタ値とする。このようなパラメタ値を推定するために、ここでは、柔軟物体の観測結果として物体を囲む様に配置した複数台カメラから得られる多視点シルエット画像を用いる。シルエット画像の獲得は、カメラ画像から物体領域を抽出することで実現できるため、柔軟物体の形状計測と比べて簡易・安定に実現可能である。一方で、シルエット画像には物体の凹面領域や全てのカメラに対して不可視な領域に対する形状情報は存在しないため、そのような領域において観測結果の形状に曖昧性を含む。本研究では、柔軟物体モデルという物体形状に対する情報と、物体操作にともない時系列に獲得できる多視点シルエット画像を相互利用することで、観測結果の形状に含まれる曖昧性を解消する。これらを、様々な形状を一組のパラメタ値で表現する柔軟物体モデルの性質のもとで利用することで、適切なパラメタ値を推定する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず2.でこのようなモデルパラメタ推定問題に関連する従来研究について述べるとともに、本研究の位置づけについて議論する。続く3.では、このようなパラメタ推定を実現するための具体例として用いるmass-springモデルによる柔軟物体の形状表現について述べる。続く4.では、再現対象である現実物体の観測方法について述べる。5.では、モデルによる観測形状の再現性の評価基準とこの基準にもとづいて観測形状を再現可能なパラメタ値の推定手法について述べる。続いて6.でシミュレーションによる評価実験の詳細を示し、7.でまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

2.1 柔軟物体のパラメタ推定

近年、ひもや布等の柔軟物体のモデルパラメタ値を現実物体操作の観測結果にもとづいて設定することが試みられている[3][4][5]。これらの試みは、現実物体の変形特性は操作中に変化せず、同一物体に対する同一の操作に関しては普遍的に同一の形状変化が生じ、その形状が何らかの計測装置によって獲得できるという前提の下、与えられた仮想物体モデルが、現実物体操作の観測結果を再現できるようなモデルパラメタの値を推定する。したがって、操作にともない時々刻々変化する柔軟

物体形状をなんらかの手法で獲得しなければならない。

物体の3次元形状計測に関してはCV分野で様々な研究が行われており、柔軟物体のパラメタ推定を目的とした従来研究においても、計測精度と計測速度が利用目的に適していると考えられる。レーザ光を用いた計測装置や、空間コード化法[6]が利用されている。これらの手法は物体色に依存せず物体表面の形状を高精度に計測可能であるが、計測方向に物体の不可視領域が存在する場合、正確な形状を獲得することができない。さらに、計測に時間を要するため、自由落下のように加速度をとともなう柔軟物体の形状変化は安定して計測することが困難である。このため、従来の柔軟物体のパラメタ推定を扱った研究では、再現対象である物体形状の計測の容易さを考慮して、行う操作内容、その操作にともなう物体形状の種類を決定している。具体的には、鉛直平面上でひも状物体の一部を固定したり、3次元空間上で布の端点や内側の一部の点を固定する環境において、それらの固定点を揺らす、移動するといった操作の中でも、計測方向から隠蔽領域を生じないような単純な曲げやたわみをともなう静止形状や微小曲げ運動を扱っている[3][4][5]。しかし、VRシステムでの利用という目的を考えると、同一のモデルでできる限り多様な操作を実現できることが望ましく、そのような多様な操作を仮想物体モデルを用いて実現するためには、再現対象である物体の多様な操作に対する観測結果を利用する必要がある[5]。このような場合の、柔軟物体操作において、特定方向の視点から物体に不可視領域が生じたり、物体の一部が加速度をとともなって変形する操作は頻繁に生じる。

本研究では、複数台カメラで物体を観測することで得られる多視点シルエット画像を利用して適切なパラメタ値を推定する。シルエット画像はカメラ画像から物体領域を抽出することで獲得できるため、操作中の物体形状にかかわらず、3次元形状計測と比較して簡易かつ安定に獲得できる。一方、シルエット画像には物体の凹面領域やカメラで不可視な領域の形状情報は存在しない。本研究では柔軟物体モデルを用いるため、形状情報が存在しない領域でも、なんらかのシミュレーション形状を提示できるが、このような領域の再現には適切なモデルパラメタ値が必要という矛盾が生じる。そこで、本研究では適切なパラメタ値の推定と、推定に必要な形状情報の獲得を同時に行うことでこの矛盾を解決する。柔軟物体モデルは、操作中の柔軟物体形状から時系列に獲得される多視点シルエット画像を、一組のパラメタ値で表現する必要がある。したがって、時系列に獲得されるシルエット画像が増えるにつれて形状情報の曖昧性は減少する。ここでは、シルエット画像を時系列に多数獲得し、それら全てのシルエット画像とシルエットの整合性を満たすモデルパラメタ値を求める。これにより、シルエット画像の形状情報の曖昧性を解消しつつ、操作中の現実物体の形状を全て同一のモデルで再現できる適切なモデルパラメタ値を推定する。

2.2 多視点観測による3次元モデリング

CV分野では、従来から複数台カメラを用いて現実物体を撮影し、対象物体の形状を記述したモデルを撮影画像にフィッティングする処理を行うことで、画像から物体領域を抽出し、その抽出結果から物体の姿勢を推定する手法が提案されている[7]。

同様な処理を柔軟物体を対象物体として扱う場合、本研究のような物体形状を、操作を通して一組の値で表現するモデルパラメタの値はあらかじめ固定した状態で、モデルと撮影された現実物体がなるべく一致する状態にモデルを変形し、最終的に一致した画像を抽出する。従来手法では、この変形結果を規定する一時的な要素をパラメタとし、その要素を推定することが目的となる。したがって、撮影画像が与えられない場合、本研究で想定するパラメタ値は適切に設定されていないため、モデルは特定の物体の形状をシミュレーションできない。これに対し、本研究の目的は、操作中のある面状柔軟物体の形状やその変化を観測することで、その物体の未観測な操作に対する形状も再現可能なモデルパラメタ値の推定である。このパラメタ値は、物体の変形特性を表現する物体固有の値である。このため、本研究は物体のある形状を既定する一時的なパラメタ値ではなく、物体の変形特性を表現する恒久的なパラメタ値を推定する問題であり、従来研究とは推定対象のパラメタの性質が異なる。

また、複数台カメラで物体を多視点から同時に撮影し、撮影画像のシルエット情報を統合することで3次元形状を計測する手法も視体積交差法をはじめ様々に研究されている[8][9][10]。しかし、これらの手法は利用カメラから得られるシルエットを幾何学的に統合するという原理のため、カメラから死角になる領域の形状は正確に計測できない。それに加えて、獲得される形状の精度はカメラの解像度が大きく依存する。このため、これらの手法で得られる3次元形状は、前節で述べた従来手法で利用されている形状計測手法で得られる形状と比べて精度が低い。そこで、本研究では複数台カメラの環境で利用可能な、多視点シルエット画像とそのシルエット画像から獲得可能な3次元形状の2種類の情報のうち、多視点シルエット画像のみを利用する。安定して獲得可能な多視点シルエット画像を用いて、対象物体の形状を再現可能なモデルパラメタ値を推定する。

3. 柔軟物体のモデル

3.1 mass-spring モデル

本研究ではモデル化の対象として、前章で述べた従来研究でも扱われてきた面状柔軟物体をとり上げる。また、VRシステムにおける仮想物体とのインタラクションでは、指示機器を用いることが一般的であるため、物体操作のクラスとしては、物体の一部を固定した状態で他の一部分を自由に移動させ形状変形を生じさせる操作を考える。本研究では、このような操作に対する現実物体の形状変化を記述するために、mass-springモデルを利用する。mass-springモデルは、質点とそれを結ぶばねの連結構造で現実物体を表現し、形状変化に関わる現実物体の特性をモデルの質点の質量や、ばねの伸び係数、運動の減衰項などのパラメタで表現することで、その形状変化がシミュレーションされる[11]。従来より、mass-springモデルは、布等の柔軟物体をはじめ、3次元立体的構造をもった弾性物体やイモムシやヘビの動きまで、多様な柔軟物体の形状変化を表現するために利用されている[12]。これらの利用において、mass-springモデルは、手作業等によりモデルパラメタの値を適切に設定することで、現実物体にかなり近い形状を再現でき

ていることから、上述のような操作に対する物体の形状変化を表現する上では十分実用的なモデルであると考えられる。

3.2 形状シミュレーション

一般的に、布は正方形格子や三角格子の構造を持つ2次元mass-springモデルで表現される。本研究ではmass-springモデルで記述される代表的な特性であり、かつ上述のクラスに属する操作を再現する特性として十分と考えられる質点の質量 m 、ばねの伸び特性を表すばね係数 k 、自然長 l 、減衰項 d を考慮した、mass-springモデルで表現された仮想物体を操作すると、それにとまらう形状変化は以下の式でシミュレーションできる。まず、伸び特性に関わる力 $K_{i,j}$ や質点の質量 m によって時刻 t において質点 P_i に働く力 $F_i(t)$ は次式で表現できる。

$$F_i(t) = mg + \sum_{j=1}^J K_{i,j}(t) \quad (1)$$

$$K_{i,j}(t) = k(\|p_i - p_j\| - l) \quad (2)$$

ただし、 $K_{i,j}(t)$ は図1に示すように、時刻 t において質点 P_i, P_j 間にかかる伸び特性に関わる弾性力 $K_{i,j}$ であり、 p_i, p_j はそれぞれ質点 P_i, P_j の3次元座標を表現する。 J はある質点 P_i とばねで直接連結する質点の総数である。また、 mg は P_i に働く重力であり、 g は重力加速度である。

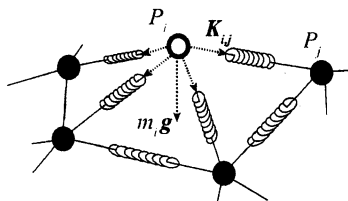


図1 Mass-spring モデル
Fig.1 Mass-spring model

このとき、時刻 t での P_i の加速度 $a_i(t)$ は運動方程式にもとづいて以下のように計算できる。

$$a_i(t) = \frac{1}{m} F_i(t) \quad (3)$$

時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ の間、質点 P_i が等加速度運動をするものと仮定すると、式(3)で求められる加速度にもとづく時刻 t での質点の速度 $\Delta v_i(t)$ および、位置の変化 $\Delta p_i(t)$ はEuler法で次式により計算できる[11]。

$$\Delta v_i(t) = v_i(t + \Delta t) - dv_i(t) = da_i(t) \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta p_i(t) = p_i(t + \Delta t) - p_i(t) = v_i(t) \Delta t + \frac{1}{2} a_i(t) (\Delta t)^2 \quad (5)$$

本研究の物体操作は、上述のように物体の一部分をある点(固定点)に固定した状態で把持点(操作点)を移動するという行為で記述できる。ある時間 t の現実物体操作における固定点、操作点に対応するモデルの質点の位置を与えて固定し、それ以外の自由に移動可能な質点の運動を上述のようにシミュレーションすると、全ての質点 P_i について位置 p_i を計算できる。これにより、物体形状がシミュレーションできる。この時、同一操作でも上述のパラメタ値が異なる場合、形状は様々に変化する。

4. 現実物体操作の多視点観測

本研究では、図2のように複数台カメラを配置し、操作中の柔軟物体形状を多視点から観測する。これらのカメラから得られる画像より、物体領域とそれ以外を分離したシルエット画像を作成する。シルエット画像の作成手順は以下のとおりである。

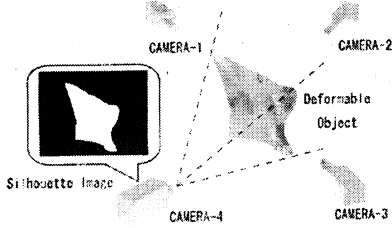


図2 観測環境

Fig.2 Environment of observation

- (1) 柔軟物体形状の観測前に、カメラごとに物体を含まないカメラ画像である背景画像(図3-(a))をあらかじめ獲得する。
- (2) (1)と同一の観測環境で、操作中の柔軟物体形状を撮影したカメラ画像である前景画像(図3-(b))を獲得する。
- (3) YUV色空間で前景画像と背景画像の差分をとり、物体領域を抽出した背景差分画像(図3-(c))を作成する。
- (4) 背景差分画像を手動で設定した閾値で2値化し、シルエット画像(背景領域:0, 物体領域:1)(図3-(d))を作成する。

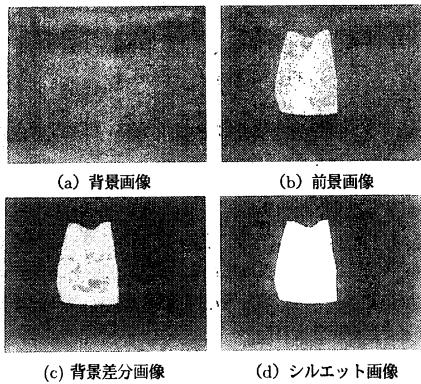


図3 シルエット画像作成手順

Fig.3 Creating process of silhouette images

5. 現実物体形状の再現性評価

仮想物体モデルが現実物体の形状変化を再現するためには、パラメタ値を設定したモデルが、現実物体と同一の操作を行った際に同一の形状を変形結果として生成する必要がある。ここでは、現実物体の形状領域を抽出したシルエット画像と対応するモデル形状領域を抽出したシルエット画像の誤差を最小化する

ことで、適切なパラメタ値を推定する。モデルのシルエット画像は3.の手続きで計算されたモデル形状と現実物体を撮影したカメラ設定(カメラの内部パラメタ, 外部パラメタ)から計算できる。操作に対する現実物体の N 個の形状を、 C 個のカメラで観測する環境を想定する。 n 個目の観測形状を c 番目のカメラから撮影したカメラ画像から得られる物体のシルエット画像の画素値を $S_{real}(h, w)$ ($1 \leq h \leq H, 1 \leq w \leq W$)とする。対応するモデルのシルエット画像の画素値を $S_{mod}(h, w)$ とすると、図4のように、 $S_{real}(h, w)$ と $S_{mod}(h, w)$ の排他的論理

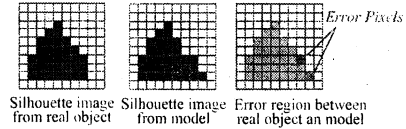


図4 現実物体とモデルのシルエット画像の誤差

Fig.4 Error of silhouettes between real object and model

和で現実物体のシルエットとモデルのシルエットの誤差を表現できる。ただし、シルエットにおける1画素の違いがそのシルエットから推測される形状に与える影響は、物体領域であるシルエットの画素数により異なると考えられる。シルエットの画素数は撮影時刻やカメラの位置と撮影方向により異なる。そこで、この誤差を現実物体のシルエットの画素数で正規化した値を、あるカメラで撮影した現実物体のシルエットとモデルのシルエットの誤差とし、次式 E_{sil} で定義する。

$$E_{sil} = \frac{\sum_{h=1}^H \sum_{w=1}^W \|S_{real}(h, w) - S_{mod}(h, w)\|}{\sum_{h=1}^H \sum_{w=1}^W S_{real}(h, w)} \quad (6)$$

本研究で観測する柔軟物体の形状は、ある瞬間の形状だけでなく操作にともない時系列に観測できる全ての形状である。これらの形状から得られる全てのシルエットと矛盾の無いパラメタ値を推定する。したがって、観測したカメラ C における観測形状数 N 個に対する現実物体とモデルのシルエットの誤差は次式のように評価関数 E_{all} で評価できる。

$$E_{all} = \sum_{n=1}^N \sum_{c=1}^C E_{sil} \quad (7)$$

ここでは、シルエットの誤差に関わる上式 E_{all} をモデルパラメタ値 m, k, l, d について最小化することで、観測形状を再現可能なモデルパラメタ値を推定する。なお、 E_{all} を最小化するために、ここでは、実数値遺伝的アルゴリズム(RCGA)[13][14]を用いた。RCGAは、 E_{all} のように複雑な評価関数であっても、評価関数の導関数を利用することなく最適化が可能である。これに加えて、実数値であるモデルパラメタ値をコーディングにそのまま利用可能であり、多峰性関数の最小化にも有効とされることから、本研究における最小化への利用に適していると考えられる。

6. 評価実験

6.1 実験の設定条件

本手法の有効性を確認するため、シミュレーション実験を行った。本実験では、450個の三角格子で1辺10cmの正方形の布を表現する2次元 mass-spring モデルを利用した。観測環境には、図5のように18台のカメラを物体を囲む様に配置した本研究室既存のカメラシステムでの観測を想定し、このシステムにおけるカメラパラメータを利用した。このようなシステムにおいて、

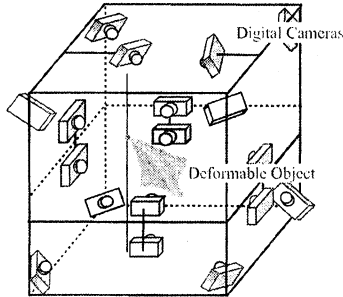
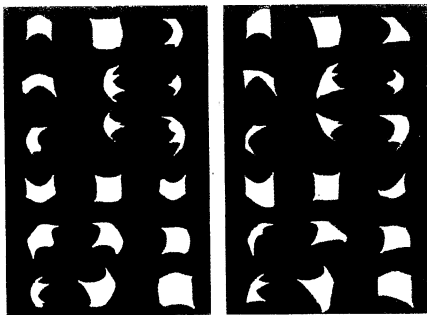


図5 布形状撮影環境
Fig. 5 Camera arrangement

モデルの四隅の質点を固定した状態から、そのうちの1つの固定を解除した際の自由落下にともなうモデル形状を18台のカメラで撮影することを想定し、シミュレーションを行った。この時、シミュレーションで得られるシルエット画像をパラメータ推定のための学習データ、および検証のためのテストデータとして利用した。ただし、実環境でのシルエット獲得を想定して、本実験で利用したシルエット画像には物体領域の境界部分に対して、境界部分の画素数の約5%のノイズ(余剰・削減画素)をランダムに付加している。なお、これらのシルエット画像は、固定を解除した時間を $t = 0$ (秒)として0.05秒間隔に30形状を撮影したときの、 $30 \times 18 = 540$ (枚)のシミュレーション画像である。これに対して、 $t = 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50$ の時に撮影した15形状に対



(a) time = 0.10 (b) time = 1.50
図6 利用シルエット
Fig. 6 Examples of input silhouette images

するシルエット画像270枚をパラメータ推定用の学習データ、 $t = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25, 1.35, 1.45$ の時に撮影された残りの15形状に対するシルエット画像270枚を検証用のテストデータとして利用した。利用したシルエット画像の例として $t = 0.10, 1.50$ で18台の全カメラから撮影されたシルエット画像を図6に示す。なお、利用カメラの解像度は 480×640 [pixel] ($H = 480, W = 640$)である。

本実験はシミュレーション実験であるため、布の正確な形状が計算可能である。ここでは検証用に利用したシルエット画像の元となるシミュレーション布形状を検証用の正確な3次元形状として利用する。例として、 $t = 0.10, 1.50$ の場合のシミュレーション布形状を図7に示す。

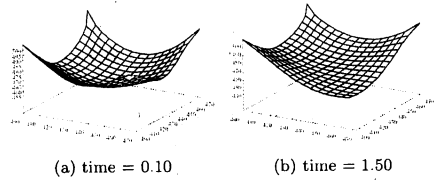


図7 利用形状
Fig. 7 Examples of cloth shapes

6.2 カメラ台数と形状再現性の関係

本手法で推定したパラメータ値を用いて、観測した操作に対する形状を再現できるか確認するために、パラメータ推定のためのシルエット画像を撮影する利用カメラ数が1, 2, 4, 8, 16台の環境でそれぞれ実験を行った。これらの環境で、前述の学習データのうち利用カメラから得られるシルエット画像のみを用いてパラメータを推定した。推定したパラメータ値を設定したモデルが操作に対する形状を再現できているか評価するために、テストデータに属するシルエット画像のうちパラメータ推定に利用していないカメラから得られるシルエット画像との誤差、およびテ

表1 カメラ台数によるテストデータ再現性

利用カメラ数 [台]	1	2	4	8	16
シルエット誤差 [%]	6.243	3.495	3.051	1.893	0.767
形状誤差 [mm]	5.999	4.328	3.399	2.740	2.160

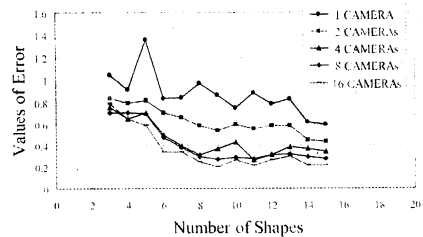


図8 カメラ台数と形状再現精度
Fig. 8 Error of 3D shapes between real object and model

ストデータの形状を表現するモデル質点の位置との誤差の2種類を調べた。この結果を表1に示す。表1におけるシルエット誤差は、画像1枚における $E_{sil}(\times 100)$ の平均値であり、形状誤差は1形状におけるモデルの質点位置の平均誤差である。この結果、カメラ台数が16台の場合、形状誤差は十分に小さく、シルエット誤差についても学習データのシルエット画像に付加したノイズを考慮すると、テストデータのシルエットを高精度に再現できていることから、十分な精度で形状が推定できていると言える。また、学習データの形状数の増加($3 \leq N \leq 15$)による形状再現精度の変化を調べた。この結果を図8に示す。図8より、パラメタ推定に利用するカメラ数や学習データの形状数の増加にともない、大局的に形状誤差が減少することがわかる。また、与える形状数の増加にともない誤差値が収束する傾向にあることから、カメラを大量に利用すれば、時系列に獲得されるシルエット画像を利用することで、操作中の観測形状を再現可能なモデルパラメタ値が推定できることがわかる。

6.3 観測空間解像度と形状再現性の関係

パラメタ推定に利用する観測用カメラの解像度と形状再現精度の関係調べる実験を行った。カメラ台数が2, 4, 8台の3種類のカメラ環境に対して、それぞれカメラ解像度 60×80 , 120×160 , 240×320 [pixel]の3種類で同一操作に対する形状を撮影し、本手法でパラメタ値を推定した。この時、上述の学習データから得られるシルエット画像を用いてパラメタ値を推定した。このとき、テストデータのうち利用していないカメラから得られるシルエット画像とのシルエット誤差 $E_{sil}(\times 100)$ を比較した。その結果を表2に示す。なお、シルエット誤差に

表2 観測空間解像度とシルエット再現性

Table 2 Relation between camera resolution and silhouette error

利用カメラ数 [台]	2	4	8
H=60, W=80	5.1243	3.1907	2.4966
H=120, W=160	4.7966	3.1548	2.4185
H=240, W=320	4.0927	2.9281	2.2197

関するテストデータとの比較は、全てのシルエット画像の解像度を 480×640 で行った。表2より、利用カメラ数が少ない場合、学習データの解像度が 60×80 のように低解像度であると、解像度が 240×320 のように比較的高解像度の学習データを利用した場合と比べてシルエット誤差が非常に大きく、形状再現精度が大きく損なわれていることがわかる。一方、カメラ台数の増加とともに低解像度でも形状再現精度が向上していることが確認できる。このことから、シルエット画像に対して境界部分などに若干の曖昧性が存在しても、柔軟物体モデルという物体形状に対する情報と、操作にともなう複数の形状をできるだけ多くのカメラで多視点から観測することで得られるシルエット画像との相互補完により、観測形状を再現可能なパラメタ値が推定できることがわかる。このため、本手法を実環境で適応する場合、シルエットの境界領域には若干のノイズが生じることが予想されるが、このような場合でも対象物体の形状を再現可能な適切なパラメタ値を推定できることが期待できる。

7. むすび

現実物体の3次元形状計測を行わずに、操作にともなう現実物体の形状変化を再現可能な仮想物体モデルを獲得するために、複数台カメラで同時に得られる物体領域のシルエット注目し、それら全ての整合性がとれるパラメタ値を求めることで、柔軟物体モデルのパラメタ値を適切に推定する手法を提案した。また、シミュレーション実験でその有効性を確認した。

今後は当研究室に既存の大量カメラシステムを用いて実際の布操作を撮影し、パラメタ値の推定実験を行うことで本手法が実環境でも有効に機能することを確認する予定である。また、可能な限り少ない観測回数かつ利用シルエット画像数でパラメタ推定を実現できることが、推定処理に要する時間からも望ましい。このため、大量カメラシステムから得られる複数シルエットの中でパラメタ推定に有効なカメラ、つまりシルエット画像を検出するための利用カメラの最適化も行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の補助による。

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.134-144, 1995
- [2] Breen, D.E., House, D.H. and Wozny, J.: Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, Proc. SIGGRAPH, pp.365-372, 1994.
- [3] 須藤克仁, 角所考, 美濃導彦, “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”, 情報処理学会論文誌, Vol.43 No.12 pp.3632-3642, 2002.
- [4] Kiran S. Bhat, Christopher D. Twigg, Jessica K. Hodgins, Pradeep K. Khosla, Zoran Popovic and Steven M. Seitz: Estimating Cloth Simulation Parameters from Video, Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.37-51, 2003.
- [5] 齋内智浩, 角所考, 美濃導彦, “現実物体操作の逐次観測にもとづく柔軟物体モデルの漸進的なパラメタ推定”, 信学技法, マルチメディア・仮想環境基礎研究会 (MVE), pp.65-72, 2005-06.
- [6] 佐藤宏介, 井口征士, “空間コード化による距離画像入力”, 信学論, (D-II), vol. J68-D, no.3, pp.369-375, March 1985.
- [7] 桐原俊, 森政之, 斉藤英雄, “遺伝的アルゴリズムを用いた多視点画像からの3次元物体モデリング”, 信学論, (D-II), Vol. J81-D-II, No.7, pp.1-545-1555, 1998.
- [8] W.N. Martin and J.K. Aggarwal, “Volumetric description of objects from multiple views,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.5, no.2, pp.150-158, 1983.
- [9] A. Laurentini, “How far 3D shapes can be understood from 2D silhouettes,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.17, no.2, pp.188-195, 1995.
- [10] 延原章平, 和田俊和, 松山隆司, “弾性メッシュモデルを用いた多視点画像からの高精度3次元形状復元”, 情報処理学会 CVIM 研究会論文誌, Vol.43, SIG11(CVIM5), pp.53-63, 2002.12
- [11] David Baraff, Andrew Witkin, “Large Step in Cloth Simulation,” Proceedings of SIGGRAPH98, pp.43-54, July, 1998.
- [12] Gavin S.P. Miller, “The Motion Dynamics of Snakes and Worms,” Proceedings of SIGGRAPH'88, pp.179-188, 1988.
- [13] 小野功, 山村雅幸, 喜多一, “実数値 GA とその応用”, 人工知能学会学会誌, Vol. 7, No.2, pp.259-266, 2000.
- [14] 樋口隆英, 筒井茂義, 山村雅幸, “実数値 GA におけるシンプレックス交叉の提案”, 人工知能学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.147-155, 2001.