

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

延原 章平 和田 俊和 松山 隆司

京都大学 大学院情報学研究科 知能情報学専攻

多視点画像から物体の3次元形状を高精度に復元する手法を提案する。提案手法では、視体積交差法によってシルエットという geometric な情報を用いて対象の概形を安定に求めた後、弾性メッシュの変形によって photometric な情報を用いて形状の高精度化を行う。つまり前半では安定な復元が、後半では復元の高精度化がなされ、安定性と高精度化の両立を目指す。本論文では弾性メッシュモデルを、1) “photo-consistency” 制約、2) シルエット保持制約、3) 単純閉曲面制約、という3つの制約条件を満たしながら変形を行うように設計するとともに、実験によって物体形状の高精度化が可能であることを示す。

3D Shape From Multi-viewpoint Images Using Deformable Mesh Model

Shohei Nobuhara, Toshikazu Wada and Takashi Matsuyama

Department of Intelligent Science and Technology,
Graduate School of informatics, Kyoto University

This paper presents a two-stage method for 3D shape reconstruction from multi-viewpoint images. In the first stage, a rough 3D shape of an object is estimated by using volumetric intersection from geometric information of the object, i.e., silhouettes. In the following stage, the estimated shape is refined by using “deformable mesh model”. This model changes its shape so as to satisfy the following constraints: 1) “photo-consistency” constraint, 2) silhouette constraint, 3) smoothness constraint. The volumetric intersection estimates rough but stable shape using geometric information, and the deformable model refines the shape using photometric information. Hence, the method has two advantages of stability and accuracy. Some experimental results are also shown for demonstrating these advantages.

1 はじめに

本論文では、複数カメラを用いて対象の詳細な3次元形状を復元する手法について述べる。これまで多視点2次元映像から立体形状を復元するアプローチとして、視体積交差法 [1] [2] [3] [4] とステレオ法が広く用いられてきた。視体積交差法はシルエット制約 [5] に基づく手法であり、シルエット制約とは2次元画像上のシルエットを3次元空間に逆投影して得られる錐体“視体積”の内側に対象が含まれるということである。この制約に基づいて、異なる視点の2次元シルエットから複数の視体積を求め、その交差領域をもって対象の形状とする(図1)。一方ステレオ法は、異なる視点から撮影された2次元画像上で物体表面上の点の対応づけを行い、三角測量の要領で対象までの距離を求める手法である。

これらの手法を比較すると、視体積交差法は対応づけを行わないために誤対応が生じず、安定な形状復元が行える。さらに出力は距離画像のような2.5次元データではなく、特に張り合わせを行わなくても物体の全周囲形状が復元できるというメリットがある。しかし原理的に形状の visual hull (図1) を求めているため、対象の詳細な形状は復元することはできない。このことは、視体積交差法が対象のシルエット情報(輪郭情報)という画像の geometric な情報しか利用していないことに起因している。

一方ステレオ法の場合、画像の photometric な情報に基づいて対応づけを行い、対応づけの後は幾何計算

によって奥行きを算出する。この場合正しい対応づけができれば物体表面上の窪みのある部分でもその3次元位置を計算することができるというメリットがある。しかし視点間の距離(基線長)が長ければ同じ物体表面上の点であっても異なる視点からでは見え方が大きく異なるために対応づけが困難になり、逆に短ければ得られる奥行きの分解能が低下するというトレードオフが常に存在する [6]。したがって、ステレオ法だけで対象の安定な形状復元を行うことは困難である。

そこで本論文ではこれら2つの情報を共に用いる手法、すなわちまず画像の geometric な情報に基づいて対象の概形を安定に復元し、さらに画像の photometric な情報に基づいて詳細な対象の3次元形状を得る方法を提案する。

このようなアプローチとしては、これまでも視体積交差法と space carving [7] を組み合わせた手法 [8] などが提案されている。しかし対象表面のうちテクスチャが一様な部分では、形状変化に対する “photo-consistency” [7] の変化がほとんどないため、真の物体形状を求めることは困難である。このような状況に対処する一つのアプローチとして、photo-consistency によって形状を決定できる部分はこれを採用し、そうでない部分はその周囲の形状を元に補間するというアプローチが考えられる。このような復元を行うため、本論文では対象形状を voxel 集合としてではなく、弾性メッシュモデルと呼ぶ表面モデルによって表し、この弾性メッシュモデルの変形によって形状復元を行うこととする [9][10][11]。このモデルによって形状を表現す

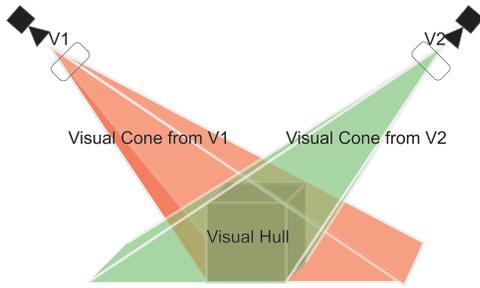


図 1: visual hull

カメラ v_1, v_2 それぞれから視体積 (visual cone) が生成され、その交差領域が visual hull となる。

ることにより、頂点間に連結関係が保証され、photo-consistency による形状の推定が信頼できない部分については、周囲の信頼できる部分との間で力学的制約に基づく補間を行うことができる。

以上、本論文ではまず視体積交差法で対象の概形を求め、次にこれを“弾性メッシュモデル”に変換し、このメッシュを photo-consistency 制約、力学的制約、シルエット制約が成立するように変形させることによって詳細な形状を求める手法を提案する。以降、visual hull の取得とその特徴、弾性メッシュモデルの設計、評価実験の順に述べる。

2 Visual Hull

2.1 計算方法

visual hull の定義は先に述べた通りであるが、具体的には、対象が存在すると思われる空間を voxel に分割し、各 voxel について、“その voxel を撮像面に投影したとき、対象領域 (シルエット) 内に投影されるか否か”を各撮影視点で調べ、全ての視点でシルエット内であるものを残せばよい。こうして、視体積 (visual cone) の交差領域 (visual hull) が得られる。

2.2 特徴

先に述べたように、対象の真の形状は visual hull 内に含まれる。このことは、visual hull を求めることによって、対象の存在する領域が限定できることを意味する。さらに visual hull の定義から明らかのように、対象の真の形状は各視点でのシルエットを保つように visual hull に内接している (図 2)。したがって、最終的に復元される形状においても、各視点から見たシルエットは保存されるべきである。

以上のことから、visual hull からさらに変形を進める際には、“シルエット保持”という制約を課すべきであると言える。

3 弾性メッシュモデル

1 節で述べたように、以下の方針で形状復元の高精度化を行う。

視体積交差法によって得られた対象の voxel モデ

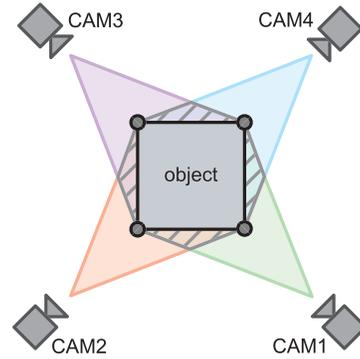


図 2: visual hull と対象の真の形状の接点

対象の真の形状と visual hull は必ず接している。そして接点は各カメラにおいてシルエットの輪郭として捉えられる (図中黒丸の点)。図 6 参照。

ルから対象の“表面モデル”を求め、それを photo-consistency が成立するように変形する。但し、変形によって表面同士が交差せず、しかもモデルを各カメラで撮影した場合に、各画像上の対象シルエットと一致するように変形を行う。

このような変形を行うための対象の表面モデルを“弾性メッシュモデル”と呼ぶことにする。以降、この弾性メッシュモデルの詳細な設計法について述べる。

3.1 初期形状の獲得

本手法では、対象の表面形状を三角形メッシュで表現する。また初期形状である visual hull は voxel 集合として得られるため、本論文ではこれを離散マーチングキューブ法 [14] を用いてメッシュデータに変換する。この手法を用いる理由は、

- m 連結離散閉曲面 ($m = 18, 26$) が得られることが保証されている。
- 2 値の voxel 集合からの変換が一意的である。

という特徴があるためである。

3.2 変形

弾性メッシュモデルの変形は、メッシュを構成する各頂点の移動によって実現する。このような変形を行う SNAKES [12] では全頂点で定義されるエネルギー関数が最適化されるように全頂点の移動を行うが、本研究の場合では、

- メッシュを構成する頂点・面数が膨大である。
- 後述する“シルエット保持力”を、エネルギーとして表現することが困難である。

などの理由から、各頂点に働く力を定義し、それに沿って各頂点に変形するという方式を採用する。

3.2.1 頂点に働く力

頂点 v に働く力 $F(v)$ を定義する。

visibility 頂点を v で表したとき、その 3 次元座標を q_v で表す。また、頂点 v を観測することができる

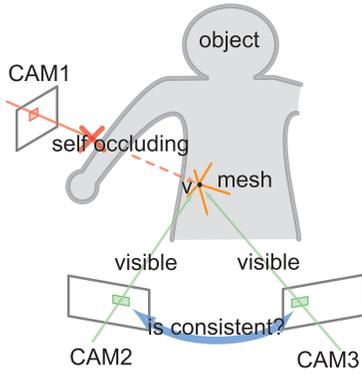


図 3: 外力項と visibility

頂点 v にとって, CAM₁ はセルフオクルージョンによって写っていないと判断され, CAM₂ と CAM₃ は写っていると判断される. このことから, photo-consistency の判定時には CAM₁ を除き, CAM₂・CAM₃ を用いる.

カメラの集合を C_v で表す. 例えば図 3 の場合, $C_v = \{CAM_2, CAM_3\}$ となる. 明らかに, 各頂点毎にそれを観測することのできるカメラ集合 C_v は異なる. 以降 C_v を求めることを, “ v の visibility を調べる” と表現する.

外力 $F_e(v)$ まず, 弾性メッシュモデルを対象形状に近づけるための力として外力項 $F_e(v)$ を導入する.

$$F_e(v) \equiv -\nabla E_e(v). \quad (1)$$

ここで $E_e(v)$ は, その頂点における撮影画像間の相関値 (図 3) である. つまり, $F_e(v)$ は, より撮影画像間の相関が高くなる方向へと作用する力である. このために, $E_e(v)$ は, C_v に含まれるカメラ c から, 頂点 v に投影されるテクスチャ情報 $p_{v,c}$ と, その平均 \bar{p}_v を用いて,

$$E_e(v) \equiv \frac{1}{N(C_v)} \sum_{c \in C_v} \|p_{v,c} - \bar{p}_v\|^2 \quad (2)$$

と表すことができる (ただし $N(C_v)$ は C_v に含まれる要素の数).

内力 $F_i(v)$ 上記 $F_e(v)$ のみで変形を行うと, メッシュの交差が起きる可能性がある. 交差が起きると, 先に述べた visibility の判定などで不具合が生じる. これを防ぐために, 次式で定義される内力項 $F_i(v)$ を導入する.

$$F_i(v) \equiv \frac{\sum_j^n q_{v_j} - q_v}{n}, \quad (3)$$

但し v_j は v に隣接する頂点とする. これは頂点間の張力として働き (図 4), メッシュ形状の滑らかさを保つ働きを持つ.

シルエット保持力 $F_s(v)$ 2.2 節で述べたように, 弾性メッシュモデルは常に visual hull に外接し, 撮影視点から見たときの輪郭を保つべきである. このような条件を成立させるため, シルエット保持力 $F_s(v)$ を導入する. $F_s(v)$ は, カメラ c から見たときのシルエット

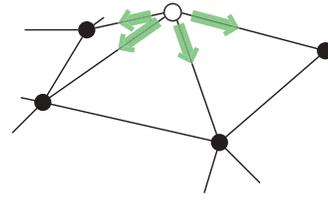


図 4: 内力

頂点 (白丸) には, 隣接する頂点 (黒丸) との間で張力 (矢印) が作用する.

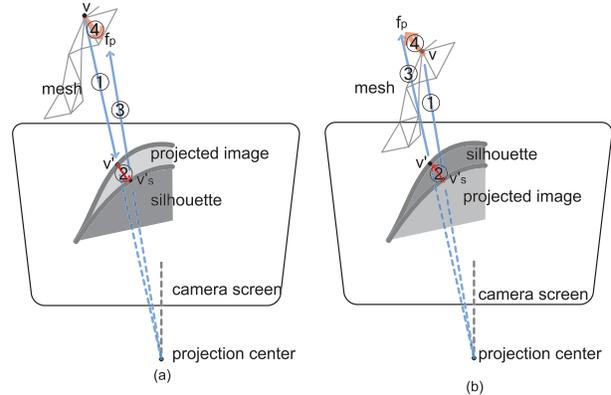


図 5: シルエット保持力

それぞれ, (a) 輪郭外に投影されたとき, (b) 輪郭内に occluding contour として投影されたとき. v が投影される先 (①) を, 撮影シルエットに近づける (②) ため, 逆に移動先を推定し (③), その方向への力 (④) を加える.

トを保持するために v に加える力 $f_s(v,c)$ を, 各カメラについて合成したものと定義する. 以降, 撮影画像から得られる対象本来のシルエットを “撮影シルエット”, 得られているメッシュを投影して得られるシルエットを “復元シルエット” と呼ぶ. $f_s(v,c)$ は, カメラ c での復元シルエットを撮影シルエットに近づける力である*1.

本論文では, $f_s(v,c)$ を以下のような各場合に分けて定義する.

- 1) [v が撮影シルエットの領域外に投影される時]
 v の投影位置 (図 5(a)①) を, 撮影シルエットの輪郭に一致させる最短移動ベクトル (図 5(a)②) を $f_s(v,c)$ とする (図 5(a)④).
- 2) [v が撮影シルエットの領域内に投影され, 且つ, 復元シルエットの輪郭を成すとき]
 上記 1) と同様 (図 5(b)).
- 3) [上記以外の場合]

*1 なお, 本論文では保持させるべきシルエットそのものの精度については議論していない. しかしシルエットの精度が, 本論文で提案する手法全体に強い影響を及ぼすことは事実である. この問題点と将来の解決案については, 後の考察の項で取り上げる.

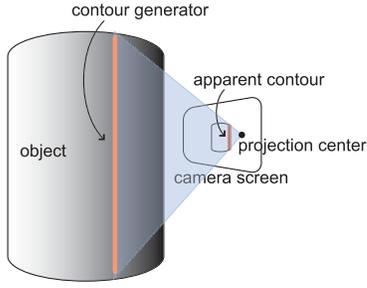


図 6: Contour Generator

撮影像に表れる輪郭 (apparent contour) は、物体表面上の“稜線” (contour generator) がカメラの投影中心に向かって投影されたものである。

$f_s(v, c) = 0$ とする。

そして先に述べたように、 $F_s(v)$ を $f_s(v, c)$ の和として定義する。

$$F_s(v) \equiv \sum_{c \in C_v} f_s(v, c). \quad (4)$$

このシルエット保持力は、見方を変えると見かけ上の輪郭に対応する対象表面上の点集合、すなわち contour generator [8] を推定していることに相当する (図 6)。

頂点に作用する力 以上から、係数 α, β, γ を用いて、頂点に作用する力 $F(v)$ を

$$F(v) \equiv \alpha F_i(v) + \beta F_e(v) + \gamma F_s(v) \quad (5)$$

と定義する。外力 $F_e(v)$ とシルエット保持力 $F_s(v)$ が対象形状を復元するための力であるのに対して、内力 $F_i(v)$ は平滑化および補間を行う力としての働きを持つ。これらについては後の節で考察を行う。

3.2.2 パラメータの動的制御

以上、式 (5) に示したように、頂点に働く力 $F(v)$ の 3 つの項の設計について述べた。しかし、これだけでは互いの力が干渉し、高精度な形状復元が達成できない。そこで以下の 2 つの場合について考察し、式 (5) を修正する。

1) F_e と F_i

常に一定の内力が働き続けてしまうと、外力による頂点の移動が阻害される。これを防ぐために、

外力が強いとき、つまり対象の真の形状に近づこうとしているときには、それに任せて変形を進めるために内力を弱める

ということを実現するための外力・内力の重み $W_e(v)$ 、 $W_i(v)$ を以下のように定義する。

まず外力によって形状を決定するためには、1 節で述べたように対象表面のテクスチャが一様な場合を考えると、式 (1) のような photo-consistency のみによって形状を決定するべきではない。逆に、画素値が空間的に大きく変化している頂点で、photo-consistency が

成立していれば、それによって形状を決定してもよいはずである。したがって、

- テクスチャ情報 $p_{v,c}$ の空間的变化量 $\|\nabla p_{v,c}\|$ が大きく、
- 且つその変化量の大きさが各カメラ間で互いに近いとき

に外力が強く働くべきである。このような重み付けを行うため、係数 $W_e(v)$ を、 $\|\nabla p_{v,c}\| \in C_v$ での標準偏差 $\sigma_{\nabla p_v}$ 、平均 $\overline{\nabla p_v}$ を用いて

$$W_e(v) \equiv \overline{\nabla p_v} - \sigma_{\nabla p_v} \quad (6)$$

とする。

次に内力の重み $W_i(v)$ は、外力の強さに応じた大きさとするため、常に $K > \|F_e(v)\|$ となるような定数 K を用いて

$$W_i(v) \equiv K - \|F_e'(v)\| \quad (7)$$

とする。

2) F_s と F_i

上とは逆に、シルエット保持力 $F_s(v)$ についてはパラメータの調整を行わない。これは以下の理由による。

- シルエット保持力は外力とは異なり、常に真の contour generator を選択しているとはいえず (図 7)、“contour generator 候補”を選択しているに過ぎない。
- 表面が滑らかな対象の場合、contour generator は、局所的に見れば対象表面上において連続的に分布しているはずである。先に述べたシルエット保持力 F_s の定義ではこのような“連続性”に対する制約は入っていないが、 F_s が内力 F_i と同時に働かならば、これらの相互作用によって contour generator 候補 (図 7) に対する絞り込みが行えると同時に、 F_i による滑らかな補間の結果、“局所的連続性”が確保できることが期待される。

以上、式 (5)、(6)、(7) から、頂点 v に働く力を

$$F(v) \equiv \alpha W_e(v) F_e(v) + \beta W_i(v) F_i(v) + \gamma F_s(v) \quad (8)$$

と定義する。

この式 (8) と先の式 (4) から、シルエット保持力は頂点に選択的に働くことがわかる。モデルの変形をエネルギー関数最適化としてでなく、力による変形としたことにより、このように柔軟な変形を実現することができる。

3.2.3 変形計算

変形計算の目的は、先に定義した力の平衡する位置を求めることである。本手法ではこれを反復計算で求める。これは、

- モデルを構成する頂点数が膨大である。
- 各頂点に作用する力は、互いに影響を及ぼしあう。(ある頂点の移動による visibility の変化は、他の

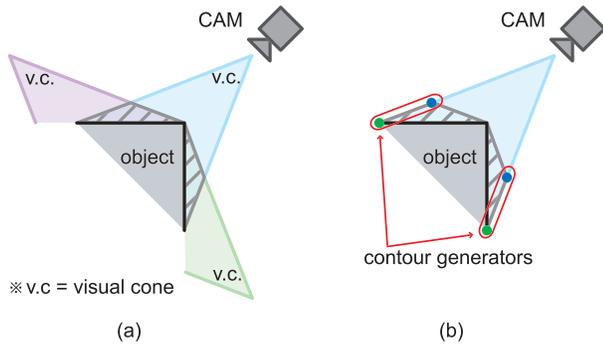


図 7: contour generator の選択

(a)visual hull (斜線部分), (b)contour generator の候補.
visual hull の段階では, 真の contour generator (図 (b) 内の緑の円) に対する候補として図 (b) の赤枠で囲まれた部分が得られている. 変形の途中の過程では, 本来ではない部分 (図 (b) 内の青の円など) もシルエット保持力の対象となりうる (最初から真の contour generator のみを選択できるとは限らない).

頂点の外力項を変化させる) ため, 部分最適化問題へと分割できない.

という理由から, 全頂点に働く力の平衡位置を一度に求めることが, 計算上困難であることによる. そこで反復計算の各反復内において, 頂点の移動を微小移動として互いの visibility の変化を無視することで計算を簡略化する. つまり各頂点に作用する力をそれぞれ独立に計算できることとする.

このような反復計算は, 反復が進むことを時間が経過することと見なせば, 物理現象のシミュレーションのように各頂点に働く力を微小時間ごとに求めながら, 変形過程を求めていることと同じである.

3.3 力の物理的意味

3 で設計した弾性メッシュモデルは, 物理的には

- contour generator (図 6) を “梁” とする
— シルエット保持力によって, contour generator の推定を行う.
- “梁” の上に極小曲面を張る膜を載せる (図 8(b))
— 内力によって, 表面を内挿する.
- 膜を支える点を追加してゆく (図 8(c))
— 外力によって, 対象の真の形状表面であるとされた部分は固定され, その間を再び内力によって内挿する (図 8(d)).

と解釈することができる. ただし, 実際には反復計算の過程で “梁”, “面”, “支える点” は同時に復元が進められる.

4 評価実験

4.1 シミュレーションによるモデルの評価

シミュレーションによって, 真の形状が既知である物体に対して, 1) 設計した力の各項の効果と, 2) 本論文

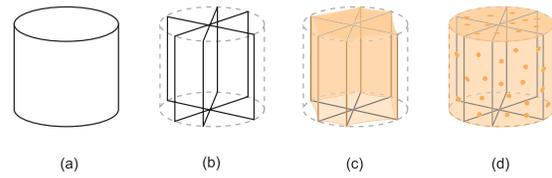


図 8: 弾性メッシュモデルの意味

左から (a) 真の形状, (b) “梁” としての contour generator, (c) “梁” のうえに内力 $F_i(v)$ による膜を載せたとき, (d) さらに外力 $F_e(v)$ で膜を支えるとき.
図 (b) の contour generator はシルエット保持力 $F_s(v)$ で復元される. 内力 $F_i(v)$ のみのときは, “梁” の間を内挿する膜ができる (図 (c)). この膜を支える点 (図 (d) 内の水玉模様の点) を外力 $F_e(v)$ で保持することで, 対象形状に近づける.

で設計した弾性メッシュモデルがどの程度適用可能であるかを示す.

まず, シミュレーションで用いる真の形状は超 2 次関数面 (super quadric ellipsoid) とする. これを図 9(b) のように配置し, 周囲の視点から仮想的に撮影し, 得られた撮影画像を用いて形状復元を行う*2. また評価基準として, 真の形状との誤差を用いる. これは, 復元された形状 (メッシュモデル) を構成する各頂点から楕円面までの距離の和とする.

カメラと対象を図 9(b) のように配置し, 実験を行った結果を図 9 に示す. 図 9 では, 3 つの頂の組み合わせに応じて復元結果が異なっており, 真の形状 (図 9(c)) に対し, 全ての頂を用いた場合 (図 9(i)) が最も復元精度が高いことが図 9(a) のグラフからわかる. この結果は表 1 のように解釈することができる. 特に図 9(i) から, 視体積交差法で得られた visual hull (9(d)) では復元できなかった部分 (図 9(c) 中の凹の部分) が, 提案手法では復元可能であることがわかる. なお 9(h) と 9(i) を比較すると, (h) に対してシルエット保持力 F_s を有効にした (i) の方が対象形状の輪郭がより正確に復元されていることが確認できるが, グラフ (図 9(a)) では他の場合に比べて差が小さい. これは, (h) と (i) の差となる部分 (この場合は対象形状の “端” の部分) が対象全体に占める割合が小さいためである.

4.2 実画像による評価

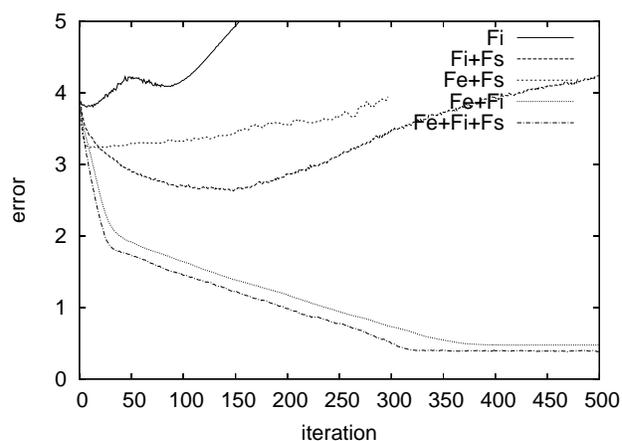
実際の撮影像で実験を行い, 本手法で復元精度が改善できることを示す. ただしこの場合, 対象の真の形状は不明であるため, 形状の評価尺度として “復元に用いなかった視点から見たシルエットの一致度” を用いる. つまり図 10 の CAM₅ のように形状復元に用いなかった視点から見たとき, 復元されたシルエットが対象本来のシルエットに近づくかどうかを調べる.

カメラ配置を図 10 のように復元用 4 台・検証用 1 台のカメラを用いて実験を行った結果を図 11, 12 に示す.

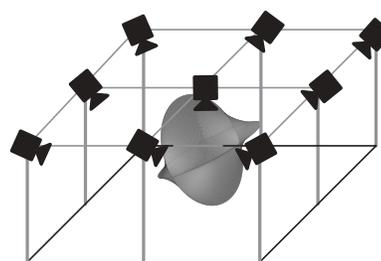
*2 印刷の関係上, 立体感を出すために図 9 では表面テクスチャを消しているが, 実際には対象表面全体にランダムに生成された十分細かなテクスチャが存在する.

F_e	F_i	F_s	
-	-		visual hull (初期形状) の段階でシルエットは保存されているため、変形は起こらない。
-		-	縮小する (図 9(e)) .
-			復元に用いた視点ではシルエットが保存されるが、用いなかった視点ではシルエットが崩れる (図 9(f)) .
	-	-	各頂点が初期位置近傍の局部的に photometric な評価が高い位置へと移動し、変形が止まる .
	-		多くの頂点で (, - , -) の組み合わせと同じであり、 F_s が作用した箇所では変形が進む . しかし次第に局部的交差の発生によって visibility の判定に支障をきたしはじめ、変形計算が破綻する (図 9(g)) .
		-	変形によって多くの頂点で真の形状に近づく . しかし全体として輪郭が崩れる (図 9(h)) .
			(, - , -) の組み合わせに加え、撮影視点でのシルエットを保存する (図 9(i)) .

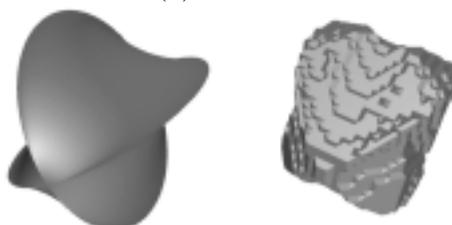
表 1: 使用する力と復元結果の関係



(a) 反復回数に対する誤差

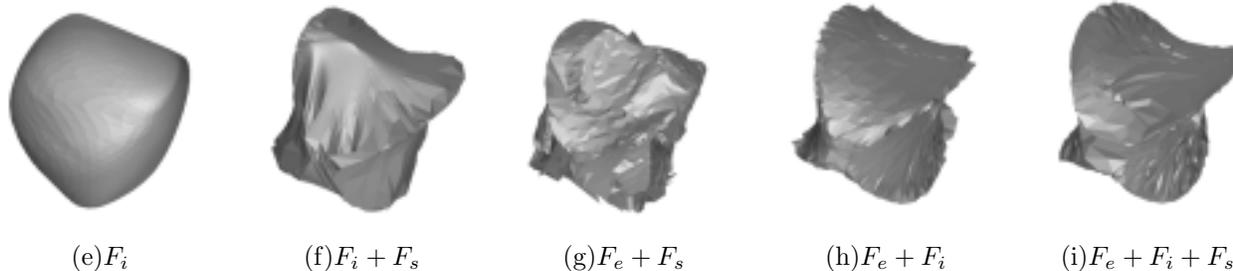


(b) カメラ配置



(c) 真の形状

(d) visual hull



(e) F_i

(f) $F_i + F_s$

(g) $F_e + F_s$

(h) $F_e + F_i$

(i) $F_e + F_i + F_s$

図 9: シミュレーションによる実験

(e) は縮小してつぶれるため、(g) はメッシュの交差によって変形計算が破綻するため、途中で処理を打ち切っている。また (f) では図 8 で述べた“梁”とその間に膜を張った状態になっている。しかし“梁”の推定に失敗した箇所近辺では、大きく形状が崩れていることがわかる。なお図 (b) のように、カメラは対象を見下ろすように配置されている。このため、どのカメラからも撮影されない部分 ((c) ~ (i) の左下側) は変形・評価の対象外としている。

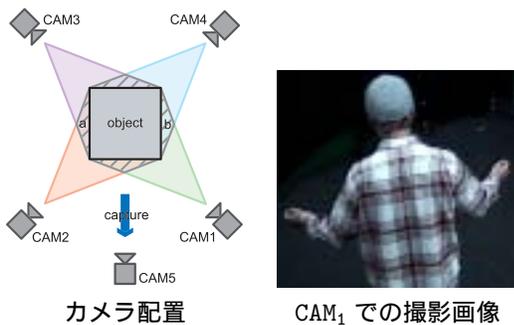


図 10: 評価実験時のカメラ配置

CAM₁ ~ CAM₄ は形状復元に使用し, CAM₅ は評価用として用いる.
CAM₅ から見たとき, visual hull の段階では図内の領域 a および b が, 対象本来のシルエットの外側にはみ出して見えるはずである.
なおこれはカメラ配置を上から見た図であり, 実際には各カメラは対象をやや見下ろす状態になっている.

この結果から, 復元に用いなかった視点(図 11)においても, シルエットが復元されていることがわかり, 本手法が実画像に対しても適用可能であることがわかる.

5 結論

本論文では多視点映像からの 3 次元形状復元という問題に対し, 対象の輪郭形状という geometric な情報から安定に対象形状を絞り込んだ上で, photometric な情報を用いて高精度に 3 次元形状復元を行う手法を提案し, 実験・評価を行った.

提案した手法は, space carving にシルエット制約を導入したものと比較することができる. 提案手法がモデルフィッティングによる復元であるのに対して, space carving は voxel 集合の削り込みによって形状の復元を進めるものであるが, いずれにしてもテクスチャが一樣な部分では, 復元を行うことは本質的に困難である. この問題への自然なアプローチの 1 つとして “テクスチャが一樣な部分では周囲の信頼できる復元結果を基に補間を行う” という手法が考えられるが, 本手法ではこれが “内力” として自然な形で取り入れられている. これは本手法が space carving とは異なり, 表面モデルで対象を表現していることの利点であると言える.

本論文のモデルフィッティングによる手法は, 異なる時刻の多視点画像へのフィッティングへと拡張が可能である. このことは, フィッティング先の時刻における対象形状が求まると同時に, 異なる時刻間での対象表面上の点の対応関係が得られることを意味している. この対応関係は, 対象の動作解析や記録した 3 次元形状のデータ圧縮のために必須の情報であることから, モデルフィッティングによる 3 次元形状復元の将来性が期待できる.

また提案手法で得られる 3 次元形状の精度は, 対象シルエットの切り出し精度に強く依存する. このためシルエットの輪郭推定を行う “シルエットモデル” を導

入し, 提案した弾性メッシュモデルと各視点のシルエットモデルがそれぞれ同時に対象形状と対象輪郭を復元するなどしてこの制約を緩和することが今後の課題としてあげられる.

謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究 A 13308017 の補助を受けて行った.

参考文献

- [1] H. Baker. Three-dimensional modelling. In *Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 649–655, 1977.
- [2] B. G. Baumgart. Geometric modeling for computer vision. Technical Report AIM-249, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, October 1974.
- [3] W. N. Martin and J. K. Aggarwal. Volumetric description of objects from multiple views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5(2):150–158, 1987.
- [4] P. Srivasan, P. Liang, and S. Hackwood. Computational geometric methods in volumetric intersections for 3d reconstruction. *Pattern Recognition*, 23(8):843–857, 1990.
- [5] A. Laurentini, “How far 3d shapes can be understood from 2d silhouettes”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(2), pp. 188–195, 1995.
- [6] Philip Pritchett and Andrew Zisserman, “Wide Baseline Stereo Matching”, *International Conference on Computer Vision*, pp. 754–760, 1998.
- [7] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz, “A theory of shape by space carving”, *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 307–314, 1999.
- [8] Geoffrey Cross and Andrew Zisserman, “Surface reconstruction from multiple views using apparent contours and surface texture”, *Conference of Computer Vision and Computer Graphics*, NATO Science Series 3. High Technology, Vol. 84, Kluwer, Dordrecht, 2000, pp. 25–48.
- [9] W. Brent Seales and Oliver D. Faugeras, “Building Three-Dimensional Object Models from Image Sequences”, *Computer Vision and Image Understanding* 61(3), pp. 308–324.
- [10] P. Fua and Y. G. Leclerc, “Object-Centered Surface Reconstruction: Combining Multi-Image Stereo and Shading”, *International Journal of Computer Vision*, 16, 1995, pp. 35–56
- [11] M. Hebert, K. Ikeuchi, and H. Delingette, “A Spherical Representation for Recognition

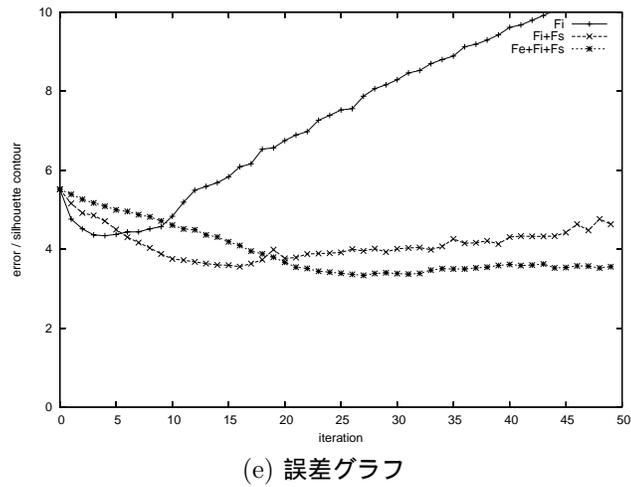
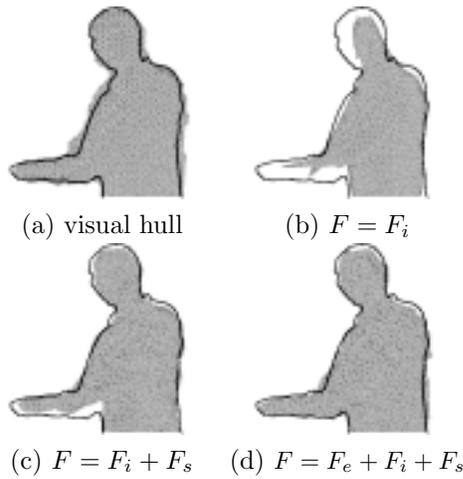


図 11: 実画像による実験 (CAM₅)
 (a) - (d) 中の黒線が撮影シルエットの輪郭 . (e) の横軸は反復回数 , 縦軸は撮影シルエットと復元シルエットの誤差 .

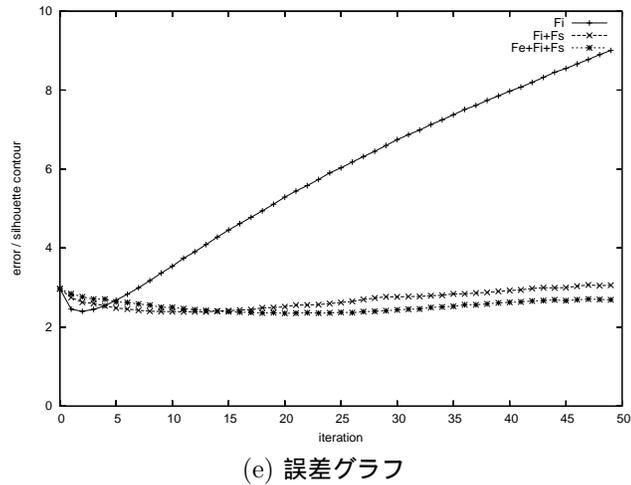
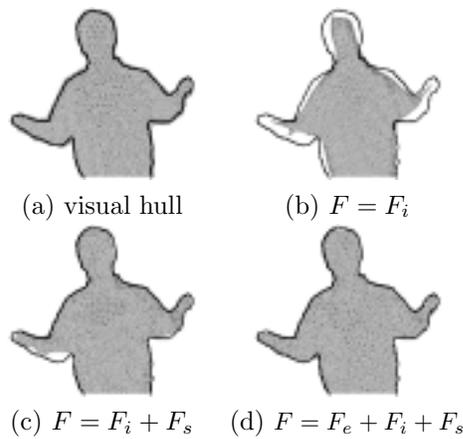


図 12: 実画像による実験 (CAM₁)
 各図の意味は図 11 と同じ .

of Free-Form Surfaces”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 7, July, 1995, pp. 681-690.

- [12] M. Kass and A. Witkin and D. Terzopoulos, “Snakes: Active Contour Models”, *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision*, 8-11, pp. 259-268, London, England, 1987.
- [13] Tony Heap and David Hogg, “Towards 3D Hand Tracking using a Deformable Model”, *Second International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG96)*, Vermont, New England, October 1996.
- [14] 剣持 雪子, 小谷 一孔, 井宮 淳, “点の連結性を考慮したマーチング・キューブ法”, 信学技報 *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, IE98-218 (1999-01), pp. 197-204.
- [15] 高井勇志, 松山隆司, “3D ビデオ映像の生成・編集・

表示”, 映像情報メディア学会技術報告 VOL.25, NO.53, pp. 17-22, 2001.