

シルエットと法線マップに基づく物体形状計測

飯山 将晃[†] 角所 考[†] 美濃 導彦[†]

[†] 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: jiyama@media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 照度差ステレオより得られる法線マップを利用することで視体積交差法では計測することのできない物体の凹面や計測が困難な物体の滑らかな曲面を計測する手法を提案する。法線マップより距離画像を復元する際に奥行きエッジに起因する距離画像の誤りが発生する。この誤差を軽減させるために、他方向からのシルエットを利用する。奥行きエッジを考慮せずに復元された距離画像は他方向から得られたシルエットとの整合性を欠く場合が多いという性質を利用し、距離画像とシルエットとの整合性および距離画像と法線マップとの整合性を表すエネルギーを定義し、そのエネルギーを最小とする距離画像を得ることにより距離画像の誤りを軽減させる。シミュレーションデータおよび実物体に対して提案手法を適用した実験により、提案手法の有効性を評価した。

キーワード 視体積交差法, 照度差ステレオ, 奥行きエッジ

Shape from Silhouettes and Needle Maps

Masaaki IYAMA[†], Koh KAKUSHO[†], and Michihiko MINOH[†]

[†] Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, Yoshida-nihonmatsu-cho Sakyo-ku,
Kyoto 606-8501, Japan
E-mail: jiyama@media.kyoto-u.ac.jp

Abstract The method that reconstructs smooth or concave surface, the volume intersection method can not reconstruct, is proposed. The method reconstructs depth images from needle maps that are obtained with photometric stereo. In case the needle maps contain depth edges, incorrect depth images are reconstructed. An incorrect depth image is not consistent with the silhouettes taken from other view points. Based on this fact, our method minimizes two types of energy to reconstruct the depth image: One energy is based on a consistency between the depth image and the needle map, and the other is based on consistency between the depth image and the silhouettes. Experimental results with synthesis and real data evaluate the effectiveness of our method.

Key words volume intersection, photometric stereo, depth edge

1. はじめに

物体形状を手軽に計測することに対する要求が高まっている。例えば、個人の人体形状を計測し、それをオーダーメイド衣服のデザインに用いることや、工業製品の設計・開発の際、モックアップの形状を計測し、それを CAD データへと即座に変換することによって開発期間やコストを削減することなどが挙げられる。

従来、物体形状計測手法として普及している光切断法や空間コード化法などでは、スリットレーザやパターン光照射装置など高価な機材を用意する必要があった。手軽に物体形状を計測すること想定した場合、このような高価な機材を使用することなく物体形状を計測する手法が望ましい。

このような状況の中、近年低価格となったカメラを複数台用

いて物体形状を計測する手法が注目されている。複数台のカメラを用いた形状計測手法としてはマルチベースラインステレオや Space Carving [1], 視体積交差法 [2] などがある。

その中で、マルチベースラインステレオや Space Carving は色情報を用いてカメラ間で画素の対応付けを取る手法であり、計測対象となる物体の表面が texture-less である場合、対応付けの誤りによって形状が正確に得られなくなるという問題がある。人体やモックアップなどの texture-less な物体への適用にはこれらの手法は適さない。

一方、視体積交差法は複数のカメラから得られたシルエットから物体形状を獲得する手法であり、texture-less な物体に対しても適用可能であるという利点がある。しかしながら、視体積交差法によって得られる形状は物体に外接する凸包となるため、物体の滑らかな曲面や物体の凹面を計測することは困難も

しくは不可能であるという欠点がある。

そこで本研究では、カメラで観測される物体の陰影情報に着目し、物体のシルエットだけではなく陰影情報も利用することで視体積交差法では計測することのできない物体の滑らかな曲面や物体の凹面を計測する手法を提案する。

物体の陰影を利用した形状計測手法として、照度差ステレオ [3] がある。照度差ステレオは3つ以上の異なる方向から照明を照射して得られた(3枚以上の)画像組をもとに物体表面の法線方向を法線マップ (needle diagram) として獲得する手法であり、texture-less な物体に対しても適用可能である。この法線マップを利用して、視体積交差法では計測することのできない物体の滑らかな曲面や物体の凹面を計測する。

複数台設置したカメラそれぞれで、照度差ステレオによって得られた法線マップを元に距離画像を復元し、各カメラで得られた距離画像を三次元空間上で位置合わせすることで物体形状を計測することができることが Cho ら [4] や Chen ら [5] によって示されている。法線マップから距離画像の復元は、距離画像から計算される物体表面の法線と法線マップとの整合性が高くなるような距離画像を得ることによって実現され、また、距離画像の位置合わせは、シルエットとの整合性が高くなるような距離画像のオフセット値を探索することによって実現される。

法線マップから距離画像を復元する際に問題となるのが奥行きエッジの存在である。奥行きが不連続に変化する箇所(奥行きエッジ)では距離画像から法線が計算できないため、本来は法線マップとの整合性をとることができない。このとき、奥行きエッジを考慮せず、奥行きエッジが生じている箇所でも奥行きが連続的に変化しているとみなして物体表面の法線を計算し法線マップとの整合性をとってしまうと、奥行きエッジ付近で距離画像に誤りが生じてしまう。

そこで、奥行きエッジに起因する距離画像の誤りを軽減させるために、他方向からのシルエットを利用することを考える。奥行きエッジを考慮せずに復元された距離画像は、他方向から得られたシルエットとの整合性を欠く。本手法ではこの性質を利用して、距離画像と法線マップとの整合性および距離画像とシルエットとの整合性を表すエネルギーを定義し、そのエネルギーを最小とする形状を得る。これにより、各カメラから得られるシルエットとの整合性を保ちつつ、法線マップとの整合性が高くなるような距離画像を獲得し、奥行きエッジに起因する距離画像の誤りを軽減させる。

本研究と関連した研究として、Cho らや Chen らが提案した手法では、法線マップを元に距離画像を獲得し、複数台のカメラからそれぞれ得られた距離画像を三次元空間上で位置合わせすることで形状を獲得している。それらでは、距離画像をいかに正確に位置合わせするかについて検討されているが、距離画像を獲得する際に発生する奥行きエッジの影響については考慮されていない。一方、我々の手法は奥行きエッジの影響に対処するという点に特色がある。我々の手法ではシルエットとの整合性を距離画像の位置合わせに用いるだけではなく距離画像復元にも用いることで奥行きエッジの影響を軽減させており、奥行きエッジが存在するような物体に対する獲得形状の精度向上

が期待される。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2. で法線マップから距離画像を復元する際に問題となる奥行きエッジについて説明し、3. では距離画像と法線マップとの整合性と距離画像とシルエットとの整合性を表すエネルギーを定義し、そのエネルギーを最小化することによってこの奥行きエッジの問題を解消する手法について述べる。4. では、8台のカメラを用いて実物体に対して提案手法を適用した実験により、提案手法の有効性を評価する。5. はまとめてある。

2. 法線マップと奥行きエッジ

照度差ステレオは、光源を切り替えながら異なる方向から光源を照射して得られた画像組をもとに、物体表面の法線を法線マップとして獲得する手法である。原理的には異なる3方向から照射した画像が得られれば、法線方向の推定が可能である。

本手法では、 C 台のカメラそれぞれに対して、物体のシルエット $S_c(c=1, \dots, C)$ が得られ、かつ、 S_c に含まれる M_c 個のピクセル $m_i^c(i=1, \dots, M_c)$ が観測する物体表面の法線 n_i^c が照度差ステレオによって得られるものとする。

照度差ステレオには、物体表面が拡散反射面であるという制約があるものの、texture-less な物体に対しても法線マップを得ることができるという利点がある。しかしながら、照度差ステレオによって得られるのは物体表面の法線を表す法線マップであり、物体形状そのものではない。そのため、後処理として法線マップから距離画像を復元し、物体形状を獲得する処理が必要となる。

なお、法線マップから距離画像の復元は、距離画像から計算される物体表面の法線と法線マップとの整合性が高くなるような距離画像を決定することにより実現される。その際、奥行きエッジが生じる箇所については形状が不連続なため、本来法線が計算できず、法線マップとの整合性を取ることができないことに注意する必要がある。

例えば、図1(a)において、マスコットの胴体とマスコットが持つ棒の部分とは不連続であるため、胴体と棒が隣り合う箇所では法線を計算することはできない。法線マップ上でも、胴体と棒が隣り合う箇所では2つの異なる面が同一の画素に投影されるため、そこで得られる法線は誤りを含むものとなる。このとき、奥行きエッジを考慮せずに胴体と棒が連続しているとみなし、誤りを含んだ法線をもとに距離画像を復元すると、胴体と棒が滑らかに繋がるような形状が得られてしまう。

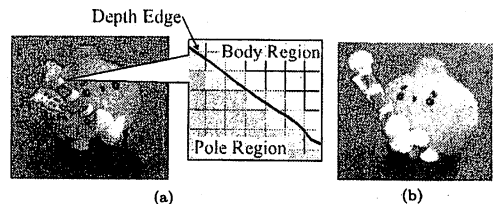


図1 奥行きエッジ
Fig. 1 Depth edge

3. シルエット・法線マップとの整合性の利用

前節で述べた奥行きエッジの影響を軽減させるため、他方向からのシルエットを利用することを考える。

例として、図1(a)では胴体と棒が隣り合う箇所が、別方向から観測した画像(図1(b))では隣り合っていない。図1(a)を用い、本来連続していない面を連続しているとみなして得られた形状を別方向から観測すると、図1(b)との整合性が取れなくなるが予想される。

そこで、距離画像と法線マップとの整合性、距離画像とシルエットとの整合性をそれぞれエネルギー関数として定義し、これら2つのエネルギー関数の和を最小化することによって、法線マップ・シルエットそれぞれと整合性のとれた距離画像を生成し、奥行きエッジの影響を軽減させる。

以降、シルエット S_c に含まれるピクセル m_i^c が占めている画像上の正方領域を $([x_i^c, x_i^c + 1], [y_i^c, y_i^c + 1])$ とし、点 (x_i^c, y_i^c) を m_i^c の代表点と呼ぶ。距離画像は、ピクセル m_i^c の代表点に投影される物体表面上の点 X_i^c からカメラの焦点までの奥行き $Z(x_i^c, y_i^c)$ を推定することにより得られる。

3.1 法線マップとの整合性

まず、距離画像と法線マップとの整合性について考える。

距離画像のあるピクセル m_i^c における奥行き $Z(x_i^c, y_i^c)$ と、そのピクセルが観測する物体表面の法線 $n_i^c = (p_i^c, q_i^c, 1)^T$ が与えられたとする(図2)。

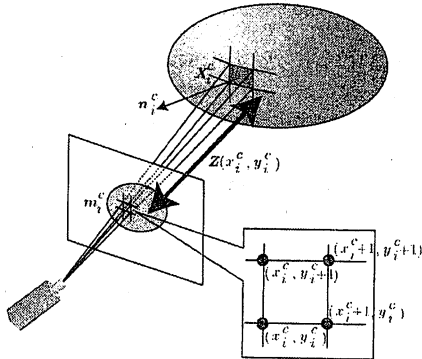


図2 法線マップとの整合性

Fig.2 Needle map vs surface normal

m_i^c に投影される物体表面が法線 n_i^c の平面であるとすると、距離画像上での3つの点 $(x_i^c + 1, y_i^c), (x_i^c, y_i^c + 1), (x_i^c + 1, y_i^c + 1)$ における奥行き $Z_{-1}, Z_{\pm 0}, Z_{-1}$ は、ピクセルの代表点 (x_i^c, y_i^c) での奥行き $Z(x_i^c, y_i^c)$ 、法線 n_i^c 、そしてカメラ c の焦点距離 f_c を用いてそれぞれ以下のように表される。

$$Z_{-1}(x_i^c + 1, y_i^c) = Z(x_i^c, y_i^c) \left(1 + \frac{p_i^c}{f_c} \right) \quad (1)$$

$$Z_{\pm 0}(x_i^c, y_i^c + 1) = Z(x_i^c, y_i^c) \left(1 + \frac{q_i^c}{f_c} \right) \quad (2)$$

$$Z_{-1}(x_i^c + 1, y_i^c + 1) = Z(x_i^c, y_i^c) \left(1 + \frac{p_i^c}{f_c} + \frac{q_i^c}{f_c} \right) \quad (3)$$

このことより、距離画像上の点 (x_i^c, y_i^c) に対応する奥行きは、 $Z(x_i^c, y_i^c)$ 自身、式1を用いて $(x_i^c - 1, y_i^c)$ から計算される奥行き、式2を用いて $(x_i^c, y_i^c - 1)$ から計算される奥行き、そして式3を用いて $(x_i^c - 1, y_i^c - 1)$ から計算される奥行きの4通りの計算方法によって得ることができる。そこで、これら4通りの方法で得られる奥行きが一致すればするほど、距離画像と法線マップとの整合性が高いことに基づき、距離画像と法線マップとの整合性を表すエネルギーを次式で定義する。なお、整合性が高いほどエネルギーは小さくなる。

$$E_N = \sum_{m_i^c \in S_c} \left(\left| Z(x_i^c, y_i^c) - Z_{\pm 0}(x_i^c, y_i^c) \right|^2 + \left| Z(x_i^c, y_i^c) - Z_{-1}(x_i^c, y_i^c) \right|^2 + \left| Z(x_i^c, y_i^c) - Z_{-1}(x_i^c, y_i^c) \right|^2 \right) \quad (4)$$

3.2 シルエットとの整合性

次に、距離画像とシルエットとの整合性について考える。シルエットと整合性のとれた形状を獲得する手法として、視体積交差法がある。視体積は物体に外接する形で存在し、視体積をカメラに投影して得られる投影像とシルエットとが一致するという性質がある。視体積のこの性質を利用して距離画像とシルエットとの整合性を評価する。

3.2.1 視線分制約

シルエットに含まれるピクセルのうち、シルエットと背景との境界に位置するピクセル(境界ピクセル)に対し、カメラの焦点を端点とし境界ピクセルの代表点を通る視線を考える(図3)。なお、ここでは8近傍にシルエットに含まれないピクセルが存在するようなシルエット中のピクセルを境界ピクセルとする。

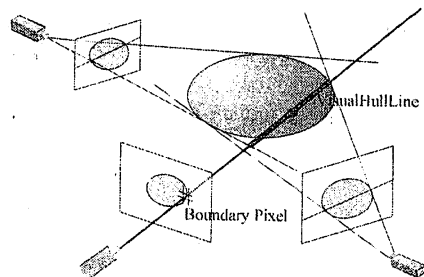


図3 視線分

Fig.3 Visual Hull Line

この視線を他のカメラへ投影すると、その投影像(投影像も

直線となる)はそのカメラでのシルエットと交差する。ここで、ある境界ピクセルの代表点を通る視線のうちその投影像が他のすべてのカメラでのシルエットに含まれるような区間を考えこれを視線分と呼ぶ。視線分は(最大で1画素の大きさ分の誤差はあるが)視体積の表面の一部となる。

この視線分と物体形状との関係を考えてとき、視体積の投影像とシルエットとが一致するという性質から、以下の2つの制約(視線分制約)が得られる。

- 物体はどの視線分とも交差ししない。(非交差制約)
- 物体は各々の視線分に対し、少なくとも一点で接する。(接触制約)

(非交差制約)

非交差制約が満たされない場合、視線分は視体積の表面であることから、視体積が物体に外接しているという制約が満たされなくなる。また、接触制約が満たされない場合、この視線上には物体は存在しない。つまり、この視線を構成する境界ピクセルがシルエットに含まれないこととなり、視体積とシルエットとの整合性がとれなくなる。

距離画像とシルエットとの整合性は、この視線分制約をどの程度満たしているかによって評価することができる。

3.2.2 視線分制約の利用

ここで、視線分のうち、どの視線分が距離画像に対して制約を与えるかを考える。視線分の中には、あるカメラから観測できるものもあれば、他の視線分によって隠されそのカメラからは観測されないものもあり、視線分がそのカメラからどの程度観測できるのかによって、そのカメラから得られる距離画像に対して制約を与えるかどうか異なる。

ある視線分について、その全体がカメラAから観測可能である場合(図4(a))、その視線分はカメラAでの距離画像に対して2つの視線分制約の両方を与える。一方、視線分がカメラから観測不可能である場合(図4(c))、距離画像に対して何の制約も与えない。また、視線分の一部分だけが観測可能である場合(図4(b))、視線分制約の非交差制約—物体は視線分と交差ししないという制約—については距離画像に対して与えられるが、接触制約—物体は視線分の少なくとも一点で接するという制約—については、視線分のうちカメラから観測されない部分で物体と接している可能性があるため、距離画像に対する制約として利用することができない。なお、ある視線分が観測可能であるかどうかは、一旦すべての視線分を画像に投影することによってZバッファを構築し、Zバッファとの比較を行うことによって判定することができる。

以上のことを踏まえ、視線分を距離画像上に投影し、距離画像の画素格子との交点(図4)を抽出し、視線分制約をどの程度満たしているかどうかを、カメラから視線分までの奥行きと距離画像から得られるカメラから物体表面までの奥行きを各交点において比較することによって評価する。

視線分のうち観測可能な部分の投影像と画素格子との交点を $(v_{x1}, v_{y1}), \dots, (v_{xK}, v_{yK})$ とする。ある交点 (v_{xk}, v_{yk}) におけるカメラから物体表面までの奥行き $Z(v_{xk}, v_{yk})$ は、代表点を $([v_{xk}], [v_{yk}])$ とする画素が持つ奥行き $Z([v_{xk}], [v_{yk}])$ と、その画素に対応する法線 $\mathbf{n}_k = (p_k, q_k, 1)^T$ を用いて以下の式で計

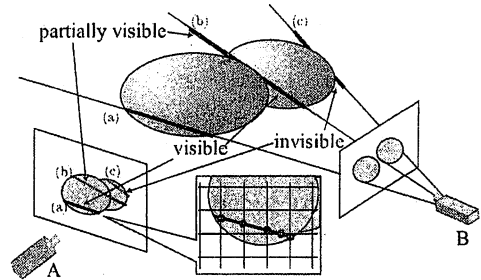


図4 視線分の観測可能性

Fig.4 Visible/Invisible visual hull line

算することができる。

$$Z(v_{xk}, v_{yk}) = Z([v_{xk}], [v_{yk}]) \cdot \left(1 + \frac{v_{xk} - [v_{xk}]}{f_c} p_k + \frac{v_{yk} - [v_{yk}]}{f_c} q_k \right) \quad (5)$$

視線分制約の非交差制約より、視線分のうち観測可能な部分については視線分より手前には物体表面は存在しないため、すべての交点において、視線分の奥行きの方が物体表面までの奥行きよりも小さくなる。

また、視線分制約の接触制約よりある視線分全体が観測可能であれば、交点のうちの少なくとも一点で、視線分の奥行きと物体表面までの奥行きが一致する。

式5によって得られるカメラから物体表面までの奥行きと、交点 (v_{xk}, v_{yk}) におけるカメラから視線分までの奥行きとの差を δZ_k , $\delta Z_k (k = 1, \dots, K)$ の中で最小となるものを δZ_{min} とすると、視線分制約のひとつめの制約より、すべての k に対して $\delta Z_k \geq 0$ となり、また、視線分制約のふたつめの制約より、視線分全体が観測可能であれば $\delta Z_{min} = 0$ となる。以上のことを踏まえ、この視線分が距離画像に与える制約に基づくエネルギーを以下の式で定義する。

$$E_{VL} = \begin{cases} 0 & \text{if } \delta Z_{min} \geq 0 \text{ かつ} \\ & \text{視線分の一部が観測不可} \\ \delta Z_{min}^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

これをすべての視線分に対して合計したものが距離画像とシルエットとの整合性に基づくエネルギーとなる。

3.3 エネルギー最小化

3.1で定義した距離画像と法線マップとの整合性に基づくエネルギーと3.2で定義した距離画像とシルエットとの整合性に基づくエネルギーとの和 E_{all} をアニーリング法[6]によって最小化し、距離画像を得る。

$$E_{all} = E_N + \lambda E_{VL} \quad (7)$$

ここで λ は視線分制約の重みである。 λ に十分大きな値を与えておくことによって、視線分制約を満たす範囲内で法線マップとできるだけ整合するような距離画像が得られる。これにより、奥行きエッジが生じている部分ではシルエットとの整合性を重

視して奥行き値が推定され、奥行きエッジが生じていない部分では法線マップとの整合性に基づいて奥行き値が推定される。

3.4 距離画像の統合

各カメラについて得られた距離画像を統合することにより三次元形状を得る。ピクセルの代表点 (x_i^c, y_i^c) に対応する物体表面の三次元位置 X_i^c は、奥行き $Z(x_i^c, y_i^c)$ とカメラ c の焦点距離 f_c 、およびカメラのレンズ中心 (e_x^c, e_y^c) を用いて次式で表される。

$$X_i^c = \begin{pmatrix} \frac{Z(x_i^c, y_i^c)}{f_c} (x_i - e_x^c) \\ \frac{Z(x_i^c, y_i^c)}{f_c} (y_i - e_y^c) \\ Z(x_i^c, y_i^c) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式8を用いて距離画像から計算される物体表面の三次元位置はカメラの焦点を原点としたカメラ座標系であるため、カメラ c におけるカメラ座標系から世界座標系への変換を表す回転行列 R_c と平行移動ベクトル T_c を用いて $\widehat{X}_i^c = R_c X_i^c + T_c$ とすることによって世界座標系での物体表面の三次元位置 \widehat{X}_i^c を得る。

4. 実験

提案手法の有効性を検証するため、形状が既知のシミュレーションデータを用いた実験と、実物体を用いた実験を行った。

図5(a)(b)で示される恐竜のシミュレーションデータに対して20方向から照明を照射した様子を、この対象を取り囲むように配置した9台の仮想カメラ(640×480画素)で撮影した画像を入力とした。

図5の(d),(e),(f)はそれぞれシルエットとの整合性のエネルギー E_{VL} のみ、法線マップとの整合性のエネルギー E_N のみ、シルエットとの整合性と法線マップとの整合性のエネルギーの和 E_{all} 、をあるカメラ(図5(c))について最小化して得られた距離画像より復元される物体形状を表している。

図5(d)と図5(f)より、シルエットとの整合性のみを考慮した場合と比較して、法線マップの整合性を用いた方が滑らかな面を復元できていることが確認できる。また、画像(図5(c))で左右の脚の境界部分で奥行きエッジが生じている。その結果、シルエットの整合性を考慮しない場合、左右の脚が隣り合う箇所が滑らかにつながるように形状が構築され、本来の形状と異なってしまっていることが図5(e)より確認できる。それに対し、シルエットの整合性を考慮した場合、奥行きエッジの大部分が他のカメラでのシルエットとの整合性を取るにより検出され、より本来の形状に近い形状が得られていることが図5(f)より確認できる。

獲得された距離画像中の各画素 m_i^c に対し、奥行き値の推定誤差を計算した。それを対数ヒストグラムで表したものを図5(g)に、推定誤差の平均値と累積度数分布を表1に示す。なお、物体の全長を1としたときの奥行き値の推定誤差の大きさを誤差値としている。

シルエットとの整合性のみを利用した場合、画素の半数以上が0.01(全長に対して1%の長さ)以上の誤差を持つものに対し、法線マップとの整合性を利用することにより0.01以上の誤差

を持つ画素が全体数の15%程度にまで低下しており、法線マップの利用による精度向上が確認できる。また、法線マップとの整合性のみを用いた結果と提案手法を用いた結果とを比較すると、提案手法の方が全般的に良い精度で距離画像を獲得できていることが表1より明らかになっている。特に、0.05以上の誤差を持つ画素数が法線マップとの整合性のみを用いた結果と比較して大きく減少していることが図5(g)から読み取れる。これは、左右の脚が隣り合う箇所が滑らかにつながるように構築されていた形状が提案手法によって改善されたことに起因するものであると考えられる。

表1 奥行き値の推定誤差

Table 1 Depth Error.

	シルエットとの整合性のみ	法線マップとの整合性のみ	提案手法
平均誤差	0.019	0.011	0.0063
誤差1%以上	55.4%	21.5%	15.0%
誤差2%以上	31.9%	14.8%	8.4%
誤差5%以上	8.9%	7.0%	2.4%

次に、実物体を用いて実験を行った。計測対象となる物体を計測装置の中央に設置し、640×480画素のカメラを物体の前方に4台、後方に4台の計8台設置し、物体の前方から12方向、後方から12方向の計24方向から照明を照射した。

あるカメラ(図6(a))について、 E_{VL} のみ(図6(b))、 E_N のみ(図6(c))、 E_{all} (図6(d))のそれぞれを最小化することによって得られた距離画像をもとに物体形状を復元した結果を図6に示す。

図6(b)と図6(d)より、シミュレーションデータを用いた実験結果と同様、シルエットとの整合性のみを考慮した場合と比較して、法線マップの整合性を用いたほうが滑らかな面を復元できていることが確認できる。また、画像上で物体の胴体と物体が持つ棒が隣り合う箇所奥行きエッジが生じている。この奥行きエッジによる影響をシルエットとの整合性を利用することによって対処できていることが、図6(c)と図6(d)との比較により確認できる。

また、各カメラから得られた距離画像を統合した結果を図7に示す。視体積交差法では獲得することの困難な物体の滑らかな表面や凹んだ表面が提案手法によって計測できていることが確認できる。

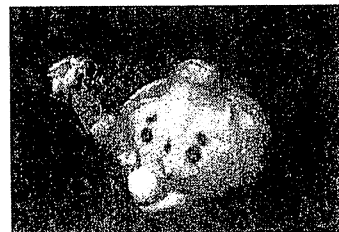


図7 復元形状

Fig.7 Recovered shape

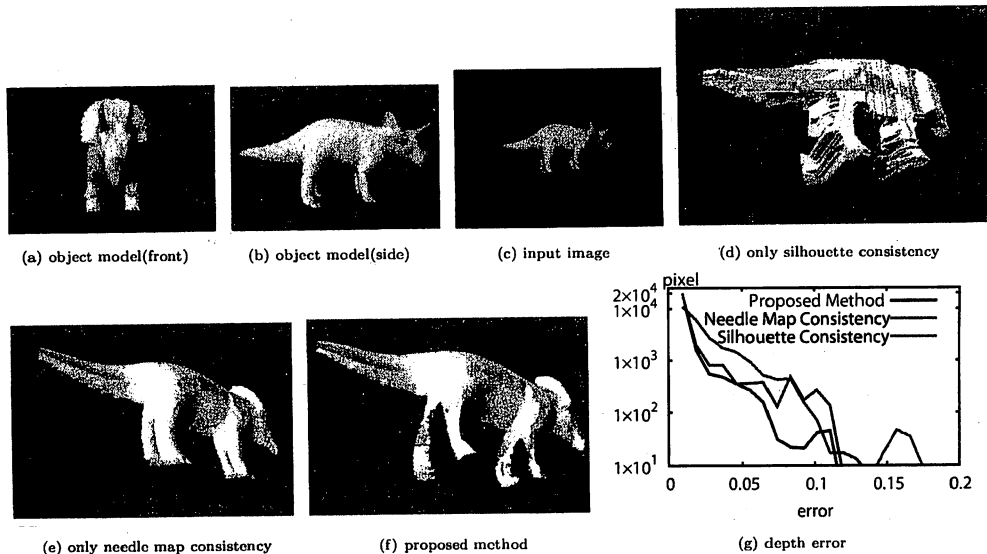


図 5 距離画像から復元された部分形状 (シミュレーションデータ)

Fig. 5 Partial shape from a depth map (synthetic data)

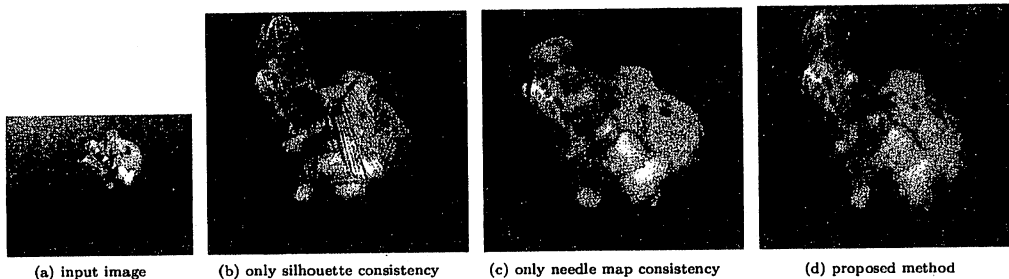


図 6 距離画像から復元された部分形状 (実物体)

Fig. 6 Partial shape from a depth map (real data)

5. まとめ

本研究では、物体のシルエットに加え、カメラで観測される物体の陰影情報に着目し、陰影情報を利用することで視体積交差法では計測することのできない物体の滑らかな曲面や物体の凹面を計測する手法を提案した。照度差ステレオによって得られた法線マップより距離画像を生成する際、奥行きエッジを考慮しないと、奥行きエッジが発生する箇所付近で距離画像に誤差が生じる。奥行きエッジを考慮せずに復元された距離画像は、他方向から得られたシルエットとの整合性を欠く場合が多いという性質を利用し、距離画像とシルエットとの整合性および距離画像と法線マップとの整合性を表すエネルギーを定義し、そのエネルギーを最小とする形状を得ることにより距離画像の誤りを軽減させた。

今後の課題として、異なるカメラから得られた距離画像同士の重ね合わせの問題が挙げられる。図 7 において距離画像同士の重なるのずれが生じているが、その原因として、法線の推定

誤差やカメラ位置の推定誤差、シルエットの抽出誤差などが考えられる。これらの誤差を軽減させる手法について今後研究する必要がある。

文 献

- [1] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz, "A Theory of Shape by Space Carving," International Journal of Computer Vision, Marr Prize Special Issue, 38(3), pp. 199-218, 2000.
- [2] W.N. Martin and J.K. Aggarwal, "Volumetric Descriptions of Objects from Multiple Views," PAMI, Vol.5, No.2, pp.150-158, 1983.
- [3] R.J. Woodham, "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images," Optical Eng., Vol.19, No.1, pp.139-144, 1980.
- [4] Changsuk Cho, H. Minamitani, "3-D reconstruction using photometric stereo and silhouette informations," IECON'94, vol.2, p.806-809, 1994.
- [5] C.Y. Chen, R. Klette and C.F. Chen, "3D Reconstruction Using Shape from Photometric Stereo and Contours," Proc. IVCNZ, p. 251-255, 2003.
- [6] Press, W., et al., "Numerical Recipes in C," Cambridge University Press, 1992.