

時空間画像を用いた回転物体の形状復元

杉本茂樹[†] 奥富正敏[†]

実物体の3次元形状を簡単に計測・入力するため、回転する物体を撮影した動画像から、物体の形状を復元する手法を提案する。本手法では、入力された時系列画像から時空間断面画像を生成し、その濃淡画像中に現れる濃度一定のsin曲線を抽出することにより、物体表面上の点の回転半径を得る。また、sin曲線を抽出するために、物体表面が持つ濃淡値を利用した重み付投票を行う。画像に現れる濃淡値をそのまま利用することにより、特徴点やエッジを抽出する方法に比べ、物体表面の密な復元が可能であり、特徴点が存在しない滑らかな濃度変化を持つ面に対しても復元が可能である。さらに、物体の半径だけでなく、追跡するsin曲線の位置を同定することにより、表面の傾きも同時に推定できる可能性がある。合成画像と実画像を用いた実験を通じて、本手法の有効性を示す。

Shape Estimation of Rotating Object Using Spacio-temporal Images

SHIGEKI SUGIMOTO[†] and MASATOSHI OKUTOMI[†]

We propose a simple method to estimate the fine 3-D shape of a rotating object. We estimate radii of rotating points on the object's surface by extracting sine curves from a cross section of the spatio-temporal image. To extract a sine curve with a constant intensity, we use a *weighted voting method* which directly utilizes the intensity of the surface. Compared with the method using edges or feature points, we can recover a finer shape of the object, even if the intensity varies continuously on the object's surface. Furthermore, there is a possibility to estimate the direction of the surface normal by estimating not only the radius but the position of a curve observed. We show the effectiveness of our method through experiments using synthesized and real images.

1. はじめに

近年のコンピュータグラフィックスの進歩により、複雑な形をした実物体の簡単な3次元形状計測・入力方法が求められている。実物体の3次元形状を計測する手法としては、レーザレンジファインダを用いる方法が実用化されているが、機器が高価であることや、対象物体の表面反射特性などの計測環境の制約から、扱うための高い技術が必要とするなどの理由のため、手軽な方法とはいえない。

これに対し、単一のカメラを使用して物体を回転させながら撮影し、得られた画像を解析して3次元形状を復元する方法が提案されている。対象物体を回転させることにより全周のデータが得られること、また、単一のカメラからの画像を用いることにより、レンジファインダを用いる手法より簡単に扱えるなどの利点がある。

代表的な手法としては、シルエットを用いたもの^{1),2),6)}がある。これは、背景画像との差分などで取り出した対象のシルエットの輪郭から微分方程式を用いて断面形状を復元するものであり、シルエットが正確に抽出できればテクスチャのない表面でも安定に形状復元ができるため、有効な手法であるといえる。しかし、背景画像との差分をとるために、背景と似た濃度(色)が物体表面上に存在する場合や、ノイズを多く含んだ画像に対しては、正確なシルエットの抽出は容易ではなく、推定誤差の大きな原因となる。微分方程式を用いる手法に対し、シルエットから3-Dのボクセル空間に投影する手法を用い、再投影を行うことによりシルエットのエラーを軽減する手法が提案されている^{3),4)}。しかし、細かい変化を持つ密な形状を復元するためには、ボクセル空間を大きくする必要があり、計算コストは大きくなる。また、シルエットからの手法では、回転半径内の凹形状部分は原理的に復元が不可能である。

そのほかに、特徴点を抽出して追跡する手法^{7),8)}があるが、特徴点追跡の手法では、物体表面に特徴点の

[†] 東京工業大学大学院情報理工学専攻情報環境学専攻
Graduate School of Information Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

ない領域に対しては、補間するなどのあいまいな方法をとらざるをえない。また、エッジの軌跡、シルエット、鏡面反射軌跡などの視覚特徴を融合させる手法¹⁰⁾が提案されているが、この手法でも、特徴が得られない部分では補間が必要になる。

物体表面の濃淡値を利用し、密な形状を復元する手法として、オプティカルフローを用いた方法⁹⁾が提案されている。これは、2フレームごとに濃度のマッチングを行い、得られたフローを融合して形状を推定するが、2フレームごとに得られるフローはノイズに影響されやすい。

本論文では、複雑な表面形状を持つ対象物体に対して密な形状を復元するために、物体表面のテクスチャ濃度を利用して、濃度一定の曲線抽出を行う手法を用いる。まず入力された時系列画像から高さ一定の部分を取り出し、時空間断面画像を生成する。その濃淡画像中に現れる濃度一定の \sin 曲線を抽出することにより、物体表面上の各点の回転半径を得る。このとき、物体表面が持つ濃淡値を利用して、濃度の差に応じた重み付投票を行う¹¹⁾。半径の推定精度を良くするため、重み付投票を、各点の回転半径だけでなく、追跡する \sin 曲線の存在位置を含めた二次元投票空間で行う。

軌跡を抽出する手法は、2フレームごとにマッチングを行う手法に比べ、安定に形状を推定することができる。また、画像に現れる濃淡値をそのまま利用することにより、特徴点やエッジを抽出する方法に比べ、物体表面の密な復元が可能であり、天空光*のもとでは、反射成分を持つ表面でも復元ができる。さらに、シルエットを抽出しないので背景画像を必要とせず、シルエットからでは復元できない凹形状部分の復元も可能である。

さらに本論文では、重み付投票の有効性を実験的に検証し、重み付投票がノイズなどによる濃度変化を吸収して、その影響を軽減できることを示す。また、投票空間を二次元に拡張することにより、半径のみを推定する手法に比べ、推定半径の精度を改善すること、また、表面の傾きをも同時に推定できる可能性があることを示す。

2. 重み付投票による形状復元

2.1 撮影方法

回転テーブルの上に物体を置き、回転させながら撮影する(図1)。物体の回転軸は画像面の y 軸と平行

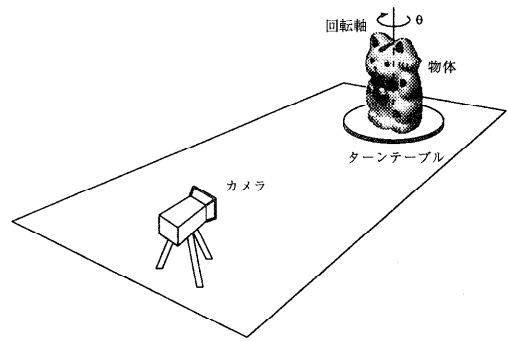


図1 撮影方法

Fig. 1 Camera and object location.

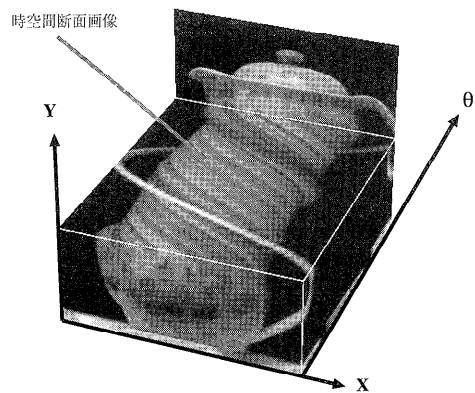


図2 時空間断面画像

Fig. 2 Spacio-temporal image and its cross section.

とし、物体はカメラから十分離れていて正射影で近似できると仮定する。回転速度は一定とし、回転角 θ に対応した画像を並べることで、時空間画像を生成する。そして、得られた時空間画像から、画像の高さ一定の部分を取り出し、時空間断面画像を作成する(図2)。この断面画像上の点は、画像面の x 方向と、回転角度 θ で表される。このとき、物体表面の点の軌跡は断面画像上で、 \sin 曲線を描く。この断面画像上に現れる \sin 曲線を抽出することにより物体の半径を得ることができる。

2.2 重み付投票

回転軸が画像上に投影された x 座標を x_0 とし、断面画像上のこの軸上に基準点をとる。この基準点に対して回転半径の推定を行う。基準点の位置を (x_0, θ_0) とし、濃度を I_0 とする。次に、断面画像上の任意の点を取り、その位置を (x, θ) 、濃度を I とする。基準点の半径を r とすると、この2点を通る \sin 曲線は

$$x = r \sin(\theta_0 - \theta) + x_0 \quad (1)$$

となる。環境光を想定したとき、この点が物体上で

* ここでいう天空光は、すべての方向から均一の輝度で物体が照らされている場合を想定している。

準点と同一点であれば、この2点の濃度は一致するか、ほぼ同じであると予想される。そこで、濃度の差 $I - I_0$ に応じた重み W を計算し、式(1)で得られる半径 r に対し、その重みで投票を行う。濃度が近いほど大きな重みを与える重み関数として、ここでは正規分布型重み関数、

$$W = \exp \left\{ -\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_w^2} \right\} \quad (2)$$

を用いる。投票を、断面画像上のすべての点 (x, θ) に対応する半径 r に対して行うことにより、 r の得票値は、基準点を通る振幅 r の \sin 曲線上に重みを加算した結果となる。最終的に最大の得票を得た半径 \hat{r} を求めることにより推定半径とする。すなわち、

$$\hat{r} = \arg \max_r \left[\int_{\theta_0 - \frac{C}{2}}^{\theta_0 + \frac{C}{2}} \exp \left\{ -\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_w^2} \right\} d\theta \right] \quad (3)$$

ただし、 C は基準点の周りの積分範囲（投票を行う区間）である。この推定を $x = x_0$ 上のすべての基準点に関して行うことにより、密な断面形状を得る。

2.3 二次元重み付投票

断面画像上に \sin 曲線が描かれる範囲は、基準点が位置する物体表面上の点が、カメラから観測される範囲となる。物体表面の法線の向きの影響により、 \sin 曲線の描かれる範囲は、各基準点ごとに異なる。観測される \sin 曲線の例を図3に太線で示した。もし、式(3)を用いて投票を行う場合は、図3に灰色で示すように、基準点を中心とした範囲で積分を行うことにな

る。しかしながら、基準点が位置する物体表面法線の水平成分がカメラ方向を向いていない場合、図3に示すように、 \sin 曲線は θ_0 を中心としない範囲で観測される。この場合、積分範囲から外れた部分は、重み値が大きいにもかかわらず投票されず、一方、積分範囲に入っている \sin 曲線の延長部分は重み値が小さいまま投票される。このことは、正しい \sin 曲線の得票結果の値を小さくすることになり、相対的に、他の \sin 曲線が選ばれる可能性を高めてしまう結果となる。

そこで、積分範囲の大きさは固定したまま積分範囲を移動させ、その移動量を変数に加えた二次元投票空間を用いることにより、観測領域のずれがない投票を行うことができる。以下の式に示すように、最大の得票を得る半径 \hat{r} と積分範囲の移動量 $\hat{\rho}$ の組を推定する。

$$(\hat{r}, \hat{\rho}) = \arg \max_{(r, \rho)} \left[\int_{\theta_0 - \frac{C}{2} + \rho}^{\theta_0 + \frac{C}{2} + \rho} \exp \left\{ -\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_w^2} \right\} d\theta \right] \quad (4)$$

ρ は、積分範囲の中心が基準点と一致しているときに0となる。また、基準点は必ず積分範囲の中に入るものとして ρ の範囲は $\pm C/2$ である。

積分範囲の移動量 ρ は、物体表面法線の水平成分方向と密接な関係がある。法線の、断面に平行な水平成分を考え、その傾きを、物体上の点と回転中心を結ぶ線とのなす角 ϕ で表す（図3）。物体が凸形状および平面で構成されているとすると、物体上の点の描く \sin 曲線は π の範囲で観測される。法線の傾き ϕ が0のときは、曲線は断面画像上で、 θ_0 を中心とした $\pi(\theta_0 - \pi/2 \sim \theta_0 + \pi/2)$ の範囲で観測され、 ϕ の値により、観測される位置が移動する。すなわち、この移動量は ϕ と等しい。したがって、 $C = \pi$ として二次元重み付投票を行うと、重みが最大となる $\hat{\rho}$ は、表面法線の傾き ϕ と一致することになる。以上のことから、表面が凸形状および平面であれば、積分範囲 $C = \pi$ を用いることにより、回転半径だけでなく、表面の傾きをも推定できる可能性のあることが分かる。

ただし、凹形状の場合、凹部の表面上の各点の観測される範囲は π より小さくなる。この場合、観測される範囲やその位置は、その周囲のセルフオクルージョンを生じさせている部分の形状に依存することになるため、凹部の表面法線の傾きは推定することができない。

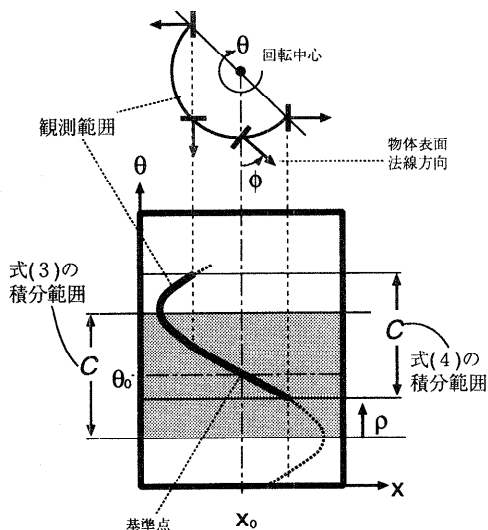


図3 積分範囲と観測される \sin 曲線

Fig. 3 Integral interval and the observed sine curve.

3. 合成画像による実験と検討

合成画像を用いてシミュレーションを行い、提案する手法の検討を行う。まず 3.1 節で、重みを付けた投票の効果をも、重みのない投票方法（濃度が一致している場合のみ投票を行うことになるため、以後「一致型投票」と呼ぶことにする）との比較により明らかにする。次に 3.2 節で、投票方法を二次元に拡張した効果を一次元投票と比較する。また、同一濃度領域の復元に対する考察を 3.3 節で行う。さらに、積分範囲の大きさを変化させて投票を行った実験を 3.4 節で示し、積分範囲が形状復元に及ぼす影響を検討する。

3.1 一致型投票との比較

濃度の差に応じた重み付を行うことの有効性を調べるため、一致型投票との比較を行った。一致型投票は、濃度が一致したときのみ重み 1 を与え、それ以外では重みが 0 になる投票方法とみなせる。重み付投票は、ここでは式 (3) を用い、 $C = \pi$ とした。対象は正方形の水平断面形状を持つ立方体で、面にはフラクタル的に濃度が変動するテクスチャを張り、さらに作成した画像に標準偏差 4.0 のランダムノイズを加えた。合成画像は、1 回転あたり 180 枚を作成し、それぞれの画像サイズは 640×480 である。合成画像の 1 枚を図 4 に、高さ 260 の位置の時空間断面画像を図 5 に示す。

図 5 を用いて復元した結果を図 6 に示す。一致型

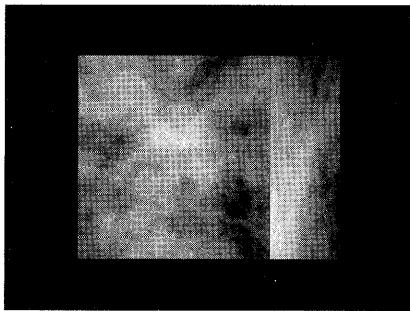


図 4 合成画像
Fig. 4 Synthesized image.

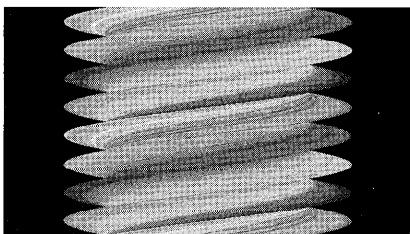


図 5 時空間断面画像
Fig. 5 Cross section of spacio-temporal image.

投票を行った結果を破線で示し、重み付投票を行った結果を実線で示している。重み付投票の重み関数のパラメータは $\sigma_w = 20.0$ である。一致型投票では誤差が大きくギザギザするのに対し、重み付投票で復元したものはより良い推定が得られている。濃度に応じた重みが画像ノイズの影響を吸収し、一致型より良い推定が得られ、重み付投票の有効性が示される。

3.2 一次元投票と二次元投票の比較

二次元投票の評価をするために、一次元投票（ r のみの投票）との比較を行った。対象は 3.1 節のものと同じものを用い、 $\sigma_w = 20.0$ 、 $C = \pi$ とした。

図 5 を用いて復元した結果を図 7 に示す。一次元投票を行った結果を破線で示し、式 (4) を用いた二次元投票による復元結果を実線で示した。破線で示した結果は、2.3 節で述べた理由により、角に近い部分では推定精度が悪い部分がある。一方、式 (4) を用いた場合は、 \sin 曲線の位置をも含めて推定するため、角

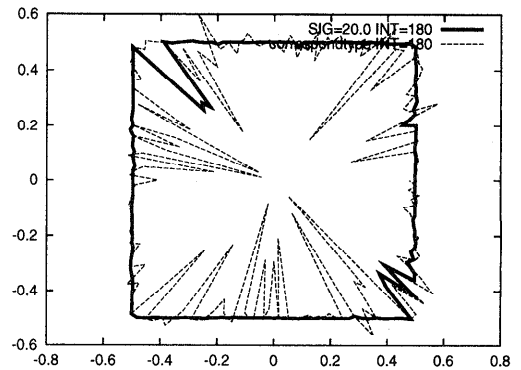


図 6 一致型投票との比較
Fig. 6 Comparison between weighted voting and simple (non-weighted) voting.

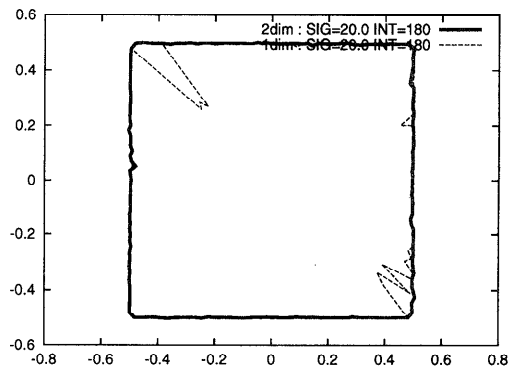


図 7 一次元投票と二次元投票との比較
Fig. 7 Comparison between 1-D voting and 2-D voting.

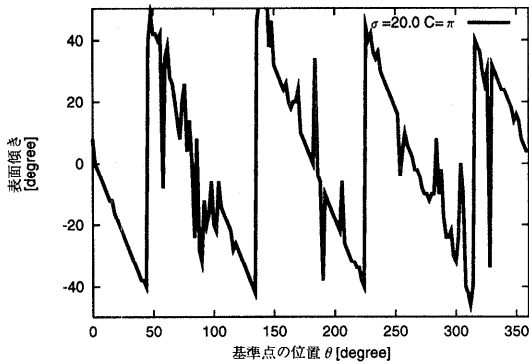


図8 二次元投票で推定した表面の傾き
Fig.8 Estimated direction of surface normal by 2-D voting.

の部分の推定結果が良くなっている。これにより、二次元投票が半径 r をより精度良く推定することが示される。

また、図8に、式(4)を用いて推定した表面の傾き $\hat{\rho}$ を示す。横軸に基準点の位置 θ_0 を角度で示し、縦軸に $\hat{\rho}$ を角度で示す。

ここでは、 $C = \pi$ としたが、実際には、 \sin 曲線上の濃度は必ずしも π の範囲で一定ではない。これは、回転による対象表面の傾きの変化にともない、1つの画素に観測される対象表面の領域の大きさが変化することや、画像に含まれるノイズが影響している。このような濃度変動が多少存在しても、正しい r から外れた \sin 曲線上の投票結果は一般に極端に小さくなるため、投票空間において r の違いによるピークは明確に現れる。一方、 ρ 方向のピークは非常になめらであるため、濃度変動の影響を受けて、 $\hat{\rho}$ の推定は不安定になる傾向がある。図8で示した結果で、 \hat{r} は精度が良いのに対し、 $\hat{\rho}$ は所々で精度が悪いが、これは、このような理由によるものと思われる。

3.3 同一濃度平面の復元

重み付投票は濃淡値を利用したものであるのも、もし同一濃度の領域があった場合にどのような復元がされるのか検討する。

図9に示すように、物体表面の一部に濃度一定の平面部 P があり、面の両端をそれぞれ P_1, P_2 とする。断面画像上で P_1, P_2 の描く軌跡が $x = x_0$ となる角度をそれぞれ、 η_1, η_2 とし、軌跡どうしが交差する点を A, B とする。断面画像上の同一濃度の領域は、 P_1 と P_2 で描かれる軌跡に囲まれた部分となり、同一濃度の領域は点 A で生成され、点 B で消失する。いま、基準点を、この同一濃度の領域内 ($\eta_1 < \theta < \eta_2$) でとった場合を考える。基準点と点 A を通る \sin 曲線

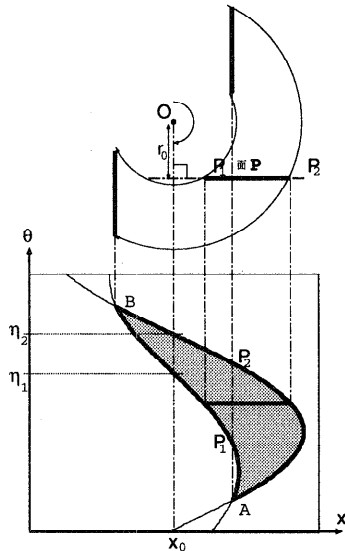


図9 同一濃度の領域
Fig.9 Region with a constant intensity.

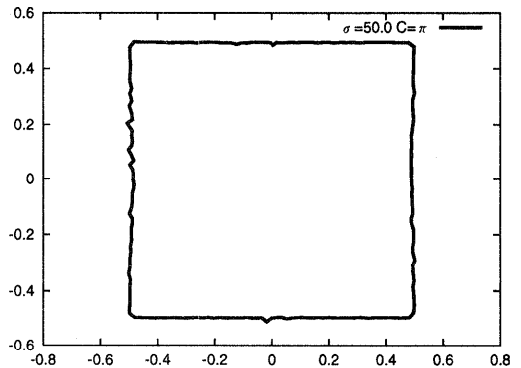


図10 同一濃度を持つ面の復元
Fig.10 Estimated shape of the surface with constant intensities.

は一意に決まり、この曲線は同時に点 B を通る。このとき、曲線上の同一濃度部分の θ の区間は π となって他の \sin 曲線より大きいため、この A, B を通る曲線上で得票値は最大値となる。一方、対象物体の平面 P 上の点は、点 A から可視状態になり点 B で隠れるため、点 A と点 B を通る \sin 曲線を描く。したがって、重み付投票で抽出された曲線により復元される点は、平面上の点となり、結果として、平面が正しく復元されることになる。

これを実験的に確かめるために、立方体の各面を、一様な濃度を持つように設定し、実験を行った。ただし、各面の濃度はそれぞれ違うものを用いた。図10に示した結果は、各面の濃度としてそれぞれ 64, 128, 194, 255 を使い、画像に標準偏差 4.0 のノイズを加

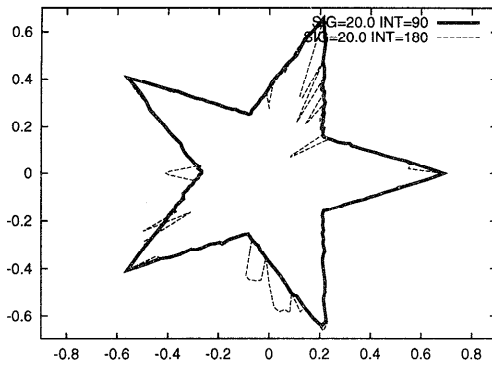


図 11 積分範囲の違いによる比較

Fig. 11 Result with a shorter interval of integration.

えて、 $C = \pi$ として 2 次元重み付投票を行ったものである。これにより、同一の濃度を持つ面に対しても、ほぼ正確な復元ができてることが示される。

3.4 積分区間の違いと凹形状

観測される \sin 曲線の長さが短い場合に、積分範囲 C の大きさによる復元精度の影響を調べる実験を行った。凹形状の部分では、観測される \sin 曲線の長さは短くなるが、この部分で $C = \pi$ を用いると、必然的に見えていない部分の投票値が加えられるため、場合によっては誤った半径を推定することが生じうる。

実験は、星型の断面形状を持つ物体の合成画像を作成して、フラクタル的に濃度が変動するテクスチャを張り、画像には標準偏差 4.0 のノイズを加えた。このような凹の部分を持つ物体は、シルエットを用いた形状復元では不可能である。

本手法により、 C の値を変えて復元した結果を図 11 に示す。 $C = \pi/2$ として復元したものを実線で示し、 $C = \pi$ として復元したものを破線で示す。星型の断面形状は、すべての部分で \sin 曲線が π より短く、最小部分で 108° である。したがって、 $C = \pi$ の場合では、正しい推定が行われない部分が現れる。これに対し、 $C = \pi/2$ とした場合、 \hat{r} の精度が良くなっていることが分かる。これにより C の大きさは、観測される \sin 曲線の長さより小さく設定することが望ましいことが分かる。

4. 実画像を用いた復元

本手法の実画像での有効性を調べるため、ぬいぐるみを撮影した画像からの復元を行った。用いた実画像を図 12 に示し、断面画像の 1 つを、図 13 に示す。光源は円形の蛍光灯を用い、ターンテーブルの真上から対象物体を照らした。また、曲線を抽出する際の背

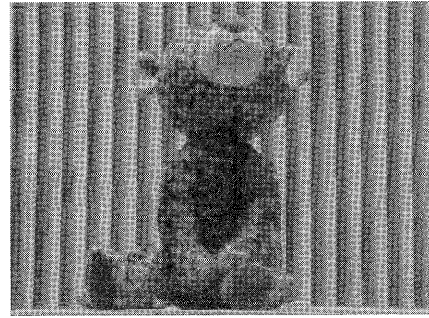


図 12 実画像

Fig. 12 Real image.

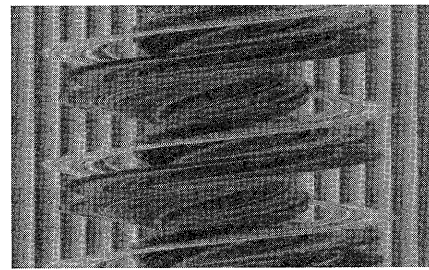


図 13 時空間断面画像

Fig. 13 Cross section of spatio-temporal image.

景の影響を少なくするために、鋸状の濃度変化を持つ背景板を設置した。画像は、 640×480 のモノクロ画像を用い、1 回転あたり 183 枚で画像を撮影した。

パラメータを $\sigma_w = 20.0$ 、 $C = \pi/2$ として復元し、さらに回転方向と高さ方向に 5×5 サイズのメディアンフィルタをかけた結果を図 14 に示す。計測した点の数は全部で $183 \times 400 = 73200$ 点であるが、ここではその $1/4$ を表示してある。計算時間は、Sun Ultra 1 (167 Hz) を用いて、全点を復元するのに 93 分であった。

また、図 14 において、明るく示してある断面部分に対応する断面形状を図 15 に示す。耳や腕の部分により生じる凹形状もうまく復元できていることが分かる。

5. おわりに

回転物体の 3 次元形状復元の方法として、重み付投票を用いて物体表面上の点の回転半径を推定する方法を提案した。合成画像を用いた実験を通して、単なる一致型投票より正確な断面形状を復元できることを示し、二次元の重み付投票を行うことにより、表面の傾きを考慮した推定が行えることを示した。また、抽出する \sin 曲線の長さを調整することにより、シルエットからの形状復元では不可能な凹形状を持つ対象に対しても安定な形状復元ができることが分かった。さら

いく予定である。

参 考 文 献

- 1) Giblin, P. and Weiss, R.: Reconstruction of Surface from Profiles, *1st ICCV*, pp.136-144 (1987).
- 2) 鄭, 岸野: 連続シルエットを用いた3次元モデルの復元とその未知領域の検出, *信学論*, Vol.J76-D-II, No.6, pp.1114-1122 (1993).
- 3) Matsumoto, T. Terasaki, H. and Sugimoto, K.: A Portable Three-dimensional Digitizer, *Proc. Int. Conf. Recent Advances in 3D Imaging and Modeling*, pp.197-204 (1997).
- 4) Szeliski, R.: Rapid octree construction from image sequences, *CVGIP: Image Understanding*, Vol.58, No.1, pp.23-32 (1993).
- 5) Cipolla, R. and Black, A.: The Dynamic Analysis of apparent contours, *3rd ICCV*, pp.616-623 (1990).
- 6) Szeliski, R. and Weiss, R.: Robust Shape Recovery from Occluding Contours using a Linear Smoother, *Image Understanding Workshop*, pp.939-948 (Apr. 1993).
- 7) Sawhney, H.P., Oliensis, J. and Hanson, A.R.: Image Description and 3D Reconstruction from Image Trajectories of Rotational Motion, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.15 No.9, pp.885-898 (1993).
- 8) 日浦, 佐藤, 井口: 対象物体の回転による形状と反射率の同時計測, *MIRU'94*, Vol.II, No.13, pp.279-286 (1994).
- 9) Szeliski, R.: Shape from Rotation, *Proc. IEEE CVPR*, pp.625-630 (1991).
- 10) 大塚, 鄭, 田中, 阿部: 多種類の視覚特徴の分離と統合による3次元モデルの復元, *信学論*, Vol.J80-D-II, No.9, pp.2324-2332 (1997).
- 11) 上田, 奥富: 重み付投票による回転物体の密な形状復元, *電子情報通信学会全国大会*, D-582 (Mar. 1996).

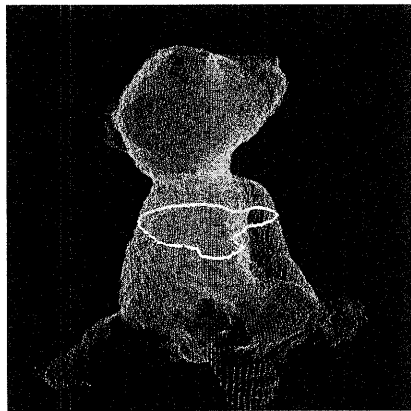
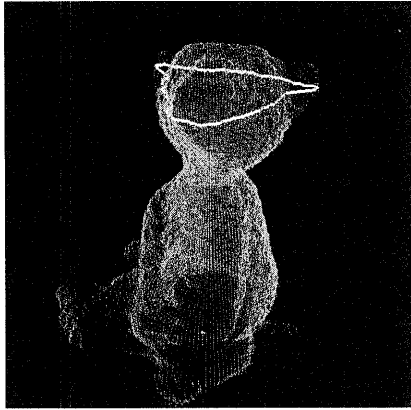


図 14 実画像からの復元結果

Fig.14 Estimated shape with real images.

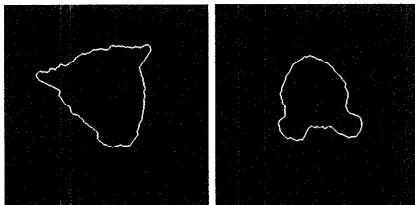


図 15 実画像からの断面復元結果

Fig.15 Cross sections of the estimated shape.

(平成 10 年 8 月 11 日受付)

(平成 11 年 3 月 5 日採録)

に、実画像に対する復元結果を示し、本手法の有効性を確認した。

本論文では正射影を想定したが、透視投影においても、時空間画像中に描かれる回転半径 r に対応した曲線の濃度を追跡することにより、拡張が可能である。物体の凹形状部では、実際に観測される \sin 曲線の長さは、本来対象表面上の点ごとに異なるので、現在固定している C では不十分であると考え、 C を適応的に変化させることが今後の課題である。さらに、計測された点からの表面モデルの作成などを、今後行って



杉本 茂樹

平成 5 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。現在同大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程在学中。コンピュータビジョンに関する研究に従事。電子情報通信学会

会員。



奥富 正敏（正会員）

昭和 56 年東京大学工学部計数工
学科卒業。昭和 58 年東京工業大学
大学院理工学研究科制御工学専攻修
士課程修了。同年キャノン（株）入
社。昭和 62 年～平成 2 年カーネギー
メロン大学コンピュータサイエンス学科客員研究員。
平成 6 年東京工業大学大学院情報理工学研究科助教
授。コンピュータビジョン、画像処理、画像計測に関
する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、日本
ロボット学会、計測自動制御学会、IEEE 各会員。
