

多種類の視覚特徴の分離と融合による3次元モデルの復元

大塚 哲朗 鄭 絳宇 田中 和明 安部 憲広

tetsuo@sein.mse.kyutech.ac.jp

九州工業大学 情報工学部

〒820 福岡県飯塚市川津 680 番 4

本研究は、回転物体の連続画像から様々な視覚情報を分離・抽出し、結果を融合することで3次元形状を取得することに関する研究である。ここでは画像上に存在するテクスチャ・角・物体と背景との境界・ハイライトなどの視覚特徴を明確な定性的分析を行なうことで分離・抽出を行なう。抽出された視覚特徴を各々の shape from X に適用し、得られた結果を各特徴の特性を生かしながら融合する。まず安定して取得できる特徴から形状を復元する。そして不確定な情報は明確に得られた情報に基づき判別する。このことを繰り返し行なうことにより不確定な情報を明確な情報に変換し、より正確な安定した3次元形状を取得することを目指す。

Multiple Visual Features Identification and Integration for 3D recovery of Rotation Objects

Tetsuo Ohtsuka, Jiang Yu Zheng, Kazuaki Tanaka and Norihiro Abe

Faculty of Computer Science and System Engineering

Kyushu Institute of Technology

680-4, Kawazu, Izuka, Fukuoka, 820 Japan

This paper proposes an approach to acquire 3D models of object for identifying multiple visual features in a continuous sequence of image from rotating objects. Features such as texture, edge, contour and highlight are discussed based on their obvious qualitative analysis. We apply each shape from X to extracted visual features and integrate the results according to their characteristics. We acquire shape from stable feature and distinguish unknown information using obtained stable information in our processing. Our goal is to establish correct 3D models in a stable processing.

1 まえがき

近年、3次元コンピュータグラフィックス技術の進歩および、仮想現実感・マルチメディアの広範囲な普及により、より複雑な3次元形状の正確かつ簡単な入力手法を考案する必要がある。

3次元モデルの復元法には投光法によるレンジファインダーを用いる手法が実用されているが機器が高価であるという欠点がある。そこで、我々は画像を用いる手法を提案する。この手法では低コストで3次元形状を取得できる。また、画像もネットワーク上で容易に転送できるようになってきたので、近くに復元システムを設置する必要がない。

画像を用いた3次元形状復元の研究には Shape from Xs ($X = \text{contour, motion, highlight, shadow} \dots$) などがあるが、いずれも1種類の視覚情報からの復元であり、任意環境で任意物体に対して形状取得を正確に行なうことは困難である。

一般的に、物体を撮像の際、物体本来の物理特性(形状・反射率など)と撮像環境(視点・運動・照明など)の2つの要素により画像が得られる。従って、画像には様々な視覚特徴(濃度・エッジ・視差・境界・影・ハイライトなど)が存在する。従来、対象物体の特徴と復元環境を簡略化し、単一の形状復元法を適用してきたが、一般性が欠けて画像の有効活用を妨げることになる。

本研究では、1台のカメラから入力される連続画像を用い、普通の照明条件において簡単かつ安定な3次元モデルの形状復元を実現する。まず物理条件に基づき、明確な定性的分析を行うことで画像中に存在する様々な特徴を分離・抽出する。そして、その結果を各々の Shape from X に適用し、得られた結果の融合を行なう。視覚特徴は各々異なる性質を持っているので定性的に分離し正しい復元法で復元することは不可欠である。本研究では安定して取得できる特徴から形状を復元する。そして、得られた情報に基づき不確定な視覚情報を判別する。このことを繰り返し行なうことで不確定な情報を明確な情報に変換し、より正確な形状を取得する。

以下に特徴の分離と融合の手順を述べ、物体復元例を示す。

2 回転物体の3次元形状復元手法

2.1 観測条件

1台のカメラから連続画像を取得するシステムを図1に示す。このシステムを用いて物体を復元するために、我々は以下の撮像環境を必要とする。

1. 回転量は既知、または画像から推定可能とする。

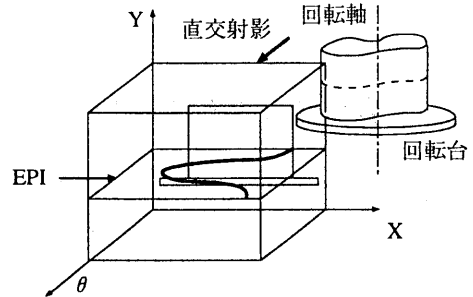


図1: EPI作成環境

2. カメラ軸は回転平面と平行とする。
3. 物体と背景は容易に分離できるとする。
4. 光源方向はカメラ方向と同じになるように設定する。すなわち、物体表面上に影が存在しない。

また、物理条件に関しては以下の条件を想定する。

1. 表面パターンに関する制限はない。
2. 形状に関する制限はない。
3. 鏡面反射と乱反射が同時に存在可能である。
4. 物体は不透明である。

回転台に対象物体を搭載し、断面形状を取得したい高さでの1画素高の画像を回転角の増加にしたがって積み立てていくことにより、連続画像を得る。ここで得られる連続画像をエピソード平面画像 (Epipolar Plane Image[11], 以下 EPI と略す) と呼ぶ。

EPI は時間的情報を空間的情報で表現しているため、対応づけ・追跡などの困難な処理を行わずに、フィルタリング・細線化・ラベリングなどの比較的簡単な処理を施すことで形状を取得することができる。

我々はこの条件によって作成される EPI の背景との境界・テクスチャや角の軌跡・ハイライト注目した。

テクスチャ及び角の物体表面上の位置は回転角・視線に関わらず不変なので固定点と総称する。復元時に1点の動きに注目するので shape from motion [6] が適用される。物体と背景との境界及びハイライト軌跡を生ずる物体表面上の位置は回転角によって変化するので移動点と総称し、境界からの復元には shape from contour[1][2][4], ハイライトからの復元は shape from highlight [5][7] を適用する。

2.2 固定点からの復元理論

図2はシステムを上から見た図である。点Oは回転軸の位置で、点 $P(X(\theta), Z(\theta))$ は物体表面上の点である。点 O' は点Oの画面上への写像で、 $x(\theta)$ は点 O' から点 P の写像までの画像上での距離である。

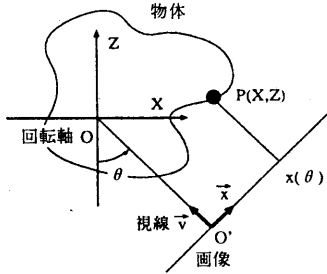


図 2: 固定点からの復元

点 O' から点 x への単位ベクトル \vec{x} は $(\cos \theta, \sin \theta)$, 視線方向の単位ベクトル \vec{v} は $(-\sin \theta, \cos \theta)$ となるので画像上での中心 O' から点 P の投影点までの距離 $x(\theta)$ は次式で表される.

$$x(\theta) = \overline{O'x} = \vec{x} \cdot \vec{P} = X(\theta) \cos \theta + Z(\theta) \sin \theta \quad (1)$$

(1) 式を微分すると次式を得る.

$$\frac{\partial x(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial X}{\partial \theta} \cos \theta + \frac{\partial Z}{\partial \theta} \sin \theta - X \sin \theta + Z \cos \theta \quad (2)$$

点 P は固定点だから (2) 式の微分値が 0 となる.

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial Z}{\partial \theta} = 0 \quad (3)$$

(1),(2),(3) 式から X, Z について解くと以下の復元式を得る.

$$\begin{aligned} X &= x \cos \theta - \frac{\partial x}{\partial \theta} \sin \theta \\ Z &= x \sin \theta + \frac{\partial x}{\partial \theta} \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式を用いて復元を行なうと, 結果は正確な点およびその周辺に分布する. そこで, この誤差を最小にするように復元式を導出する. 固定点軌跡上の全ての点で (1) 式が成り立つ. また, 点 P は固定点なので (1) 式で $X(\theta), Z(\theta)$ は各々定数になる. そこで, 誤差の 2 乗の和 $\sum (X \cos \theta + Z \sin \theta - x(\theta))^2$ が最小となる定数 X, Z を求めることで, 以下に示す固定点復元式を得る.

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum \cos^2 \theta \sum \sin^2 \theta - (\sum \sin \theta \cos \theta)^2} \times \begin{pmatrix} \sum \sin^2 \theta \sum x(\theta) \cos \theta - \sum \sin \theta \cos \theta \sum x(\theta) \sin \theta \\ -\sum \sin \theta \cos \theta \sum x(\theta) \cos \theta + \sum \cos^2 \theta \sum x(\theta) \sin \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

但し, \sum は \sum_{θ} とする. 実際の復元は (5) 式を用いる.

2.3 境界からの復元理論

物体表面が凸の場合, 境界を通る視線は, 物体表面の接線となるので x と接線方向のベクトルの内積は 0 となる. (図 3)

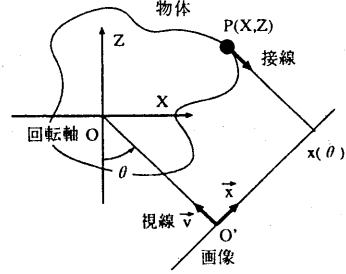


図 3: 境界からの復元

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \theta}, \frac{\partial Z}{\partial \theta} \right) \cdot (\cos \theta, \sin \theta) = 0 \quad (6)$$

(1), (2), (6) 式から以下に示す境界復元式を得る.

$$\begin{aligned} X &= x \cos \theta - \frac{\partial x}{\partial \theta} \sin \theta \\ Z &= x \sin \theta + \frac{\partial x}{\partial \theta} \cos \theta \end{aligned} \quad (7)$$

境界からの復元による結果は, あらゆる角度からの視線の包絡線になり, それ以外の部分 (未知領域) は復元されない. EPI 上では, この部分の境界軌跡は非平滑となるので, 左右の境界軌跡の列に対して 2 次微分を行ない, そのピークを調べることで未知領域を検出する. [1][2]

2.4 ハイライトからの復元理論

反射の法則から入射角が 0 の場合, 照明方向と反対方向の法線を持つ物体表面上の点でハイライトが生じる. 従って, あらゆる回転角度でハイライトが検出され, 連続した軌跡で現れるとは限らない.

図 4 に示すように, 照明方向とハイライトを生じている点の法線の内積は 0 となる. 従って, 以下の条件式を得る.

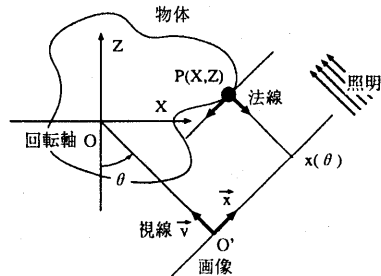


図 4: ハイライトからの復元

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \theta}, \frac{\partial Z}{\partial \theta} \right) (-\sin \theta, \cos \theta) = 0 \quad (8)$$

(1), (2), (8) 式より以下の微分方程式を得る.

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} X = \cos \theta \frac{\partial x}{\partial \theta} - \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} x \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} + \frac{\sin \theta}{\cos \theta} Z = \sin \theta \frac{\partial x}{\partial \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} x \quad (10)$$

(9), (10) 式を X, Z について解くと、以下のハイライト復元式を得る。

$$X(\theta) = \left(\int_{\theta_i}^{\theta} Q(\theta) e^{\int_{\theta_i}^{\theta} P(\theta) d\theta} d\theta + X_{\theta_i} \right) e^{-\int_{\theta_i}^{\theta} P(\theta) d\theta} \quad (11)$$

但し、

$$P(\theta) = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta}$$

$$Q(\theta) = \cos \theta \frac{\partial x}{\partial \theta} - \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} x$$

$$Z(\theta) = \left(\int_{\theta_i}^{\theta} Q(\theta) e^{\int_{\theta_i}^{\theta} P(\theta) d\theta} d\theta + Z_{\theta_i} \right) e^{-\int_{\theta_i}^{\theta} P(\theta) d\theta} \quad (12)$$

但し、

$$P(\theta) = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$Q(\theta) = \sin \theta \frac{\partial x}{\partial \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} x$$

$X_{\theta_i}, Z_{\theta_i}$ は初期条件であり、ハイライト軌跡上の任意の既知の3次元位置がこの初期条件を与える。通常、ハイライト軌跡と固定点軌跡との交点が固定点復元式によって求められ、初期条件として利用する。

2.5 各手法の比較

各復元式をまとめると、表1のようになる。

固定点による復元は最小2乗法に基づき算出するので、軌跡が長いほど復元精度が高くなる。但し、復元結果は点になる。

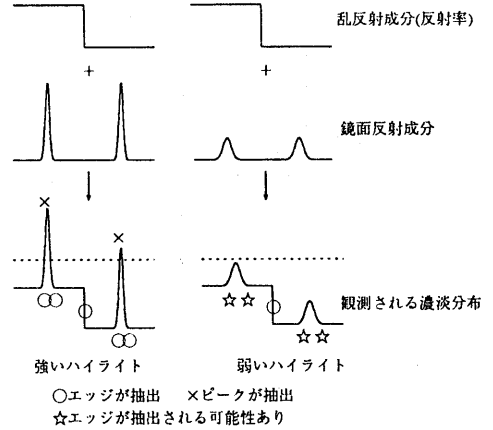
境界による復元結果の誤差は固定点による復元法より大きい、あらゆる角度からの視線の包絡線として復元される。従って、境界軌跡からは連続な曲線として復元される。

ハイライトによる復元では、積分を行なうので、軌跡が長くなるにつれ誤差が累積される。そのため精度は固定点、境界からの復元に比べ低くなる。また、初期値を必要とする。しかし、境界からは復元できない部分も復元できる。

3 視覚特徴の分離

3.1 視覚特徴の濃淡特性

EPI上の濃淡値は、物体の反射光に比例している。反射光には乱反射による成分、鏡面反射による成分があり、その2つの和で構成される。



上段: テクスチャの境界部分の乱反射による濃淡分布。
中段: 鏡面反射成分。

下段: 観測される濃淡分布。(上段と中段の濃淡値の和)

左: ハイライトが強い場合。右: ハイライトが弱い場合。

図5: EPI上での濃淡分布

テクスチャの境界での乱反射による濃淡分布は、図5の上段のようになる。ハイライトによる濃淡分布は、鏡面反射が強い場合には図5の中段左のような鋭いピークが観測され、鏡面反射が弱い場合には図5の中段右のように鈍いピークが観測される。

濃淡値はこの2つの成分の和になるのでEPI上では図5下のような濃淡分布になる。強いハイライトの場合にはある閾値以上のピークを抽出すればよい。そして、微分を行なうと、ピークの両端でエッジが検出される。弱いハイライトの場合には閾値以上のピークは抽出されない。この場合、微分操作によって両端にエッジが検出される場合と、検出されない場合がある。

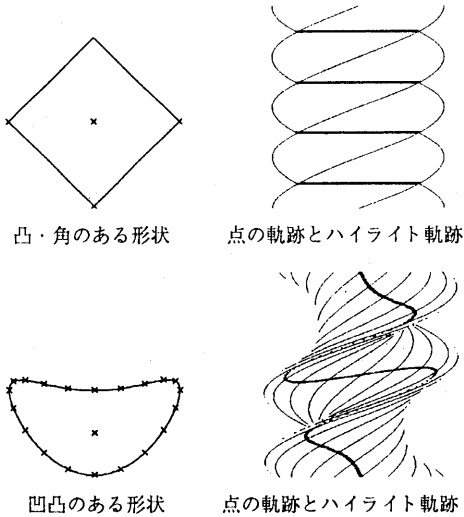
濃淡から視覚特徴を分離するのは不完全なので、我々は軌跡・復元された3次元形状の特性を考慮して、ハイライトの抽出を行なう。

3.2 視覚特徴のEPIでの軌跡

固定点軌跡は回転角度に関する正弦関数になっており、様々な角度から検出される。また、EPI上で固定点軌跡同士の交差は観測されない。(図6)

ハイライト軌跡は図7のように物体表面の曲率によって以下のように変化する[5][9]。

- ・ 曲率が $+\infty$ の領域では観測されない。
- ・ 曲率が正の領域での画面上の速度(画面速度)は固定点軌跡の画面速度より遅い。



左：断面図。右：左の断面形状を持つ物体のEPI。細線の軌跡が左図の×印の点の軌跡で、太線が視線方向と照明方向が同一の時に生じるハイライト軌跡。

図 6: 形状(曲率)による特徴点の動き(その1)

- ・曲率が0の領域では画像上で水平線を描く。
- ・曲率が負の領域での画面速度は固定点軌跡の画面速度より早い。

EPI上ではハイライト軌跡同士の間隔は観測されないが、固定点軌跡の一種であるテクスチャの軌跡とハイライト軌跡との交差は観測される。これは、ある視線から、ハイライトとテクスチャが同時に観測されることを意味する。

EPI				
曲率	負(凹)	0(平面)	正(凸)	$+\infty$ (角)

— 固定点軌跡(正弦関数) → ハイライト軌跡

図 7: 形状(曲率)による特徴点の動き(その2)

我々はこのような特徴量の動きの相違を踏まえ、EPI上で観測される特徴の分離を行なった。

3.3 画面特徴の分離手法

EPI上には多数の特徴が混在しており、抽出した特徴を誤った復元式に適用すると、間違った結果が得られる。そこで我々は特徴の濃淡変化・軌跡特性と3次元空間での振舞いに基づき以下に述べるよう

な定性的な分離法で特徴の分離を行なった。

境界軌跡は背景を走査することにより、安定して検出することができる。ハイライトを生じている点のEPI上での濃淡値はハイライトでない点の濃淡値より非常に大きい。そこで、濃淡値が周囲より大きい箇所がハイライトであるとして検出を行なう。

EPIを1次微分すると固定点軌跡・境界軌跡・ハイライト軌跡をはさむ2本の並行する軌跡が混在して得られる。この画像からさきに抽出した境界軌跡・ハイライト軌跡を除去することで、固定点軌跡を抽出する。

そして、抽出結果が正確かどうか確認するために3.2で述べた性質を満たしているか調べる。

まとめると、図9のような処理手順になる。

4 結果の融合

融合は、各特徴からの復元法の性質を考慮して、より高精度に形状が復元できるように行なう。

2.5で述べたように、固定点からの復元、境界からの復元、ハイライトからの復元の順で、復元誤差が大きくなるが、復元できる形状の制約は減少する。但し、ハイライト復元法は軌跡が短いほど精度が良くなるので、固定点軌跡と交差する点などでハイライト軌跡を分割し、交差する固定点の3次元位置を初期値として、その区間でハイライト復元法を適用すると、復元精度は改善される。

そこで我々は、固定点からの復元結果を基に、境界からの復元結果を融合し、未知な領域はハイライト復元法の結果もしくは直線で補間することにした。

図8に示す結果が得られた場合、点A, F, Gのように固定点・境界からの結果がある箇所では境界からの結果を固定点からの結果と一致するように融合する。B-C-D-Eのように境界からの結果がない区間はハイライトからの結果で補間する。ハイライト軌跡が観測されなければ直線で補間する。

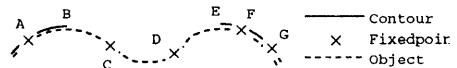


図 8: 結果の融合手法

5 実験結果

5.1 システム構成

我々は図10に示すシステムで実験を行なった。

5.2 復元例

図11のEPIを図12に示す。図12から境界を抽出した結果を図13に示す。また、図15は図12からピークを抽出した結果で、ハイライトが抽出できている。

特徴	条件	復元結果	計算量	誤差	視線との関係
固定点	物体表面にテクスチャ または、角の存在	点	最小2乗法	小	
境界	背景が抽出可能	物体を包絡 する凸曲線	1階微分	中	
ハイライト	照明方向が既知 並行線光源	凹凸曲線	1次微分方程式	大	

表 1: 各復元法の比較

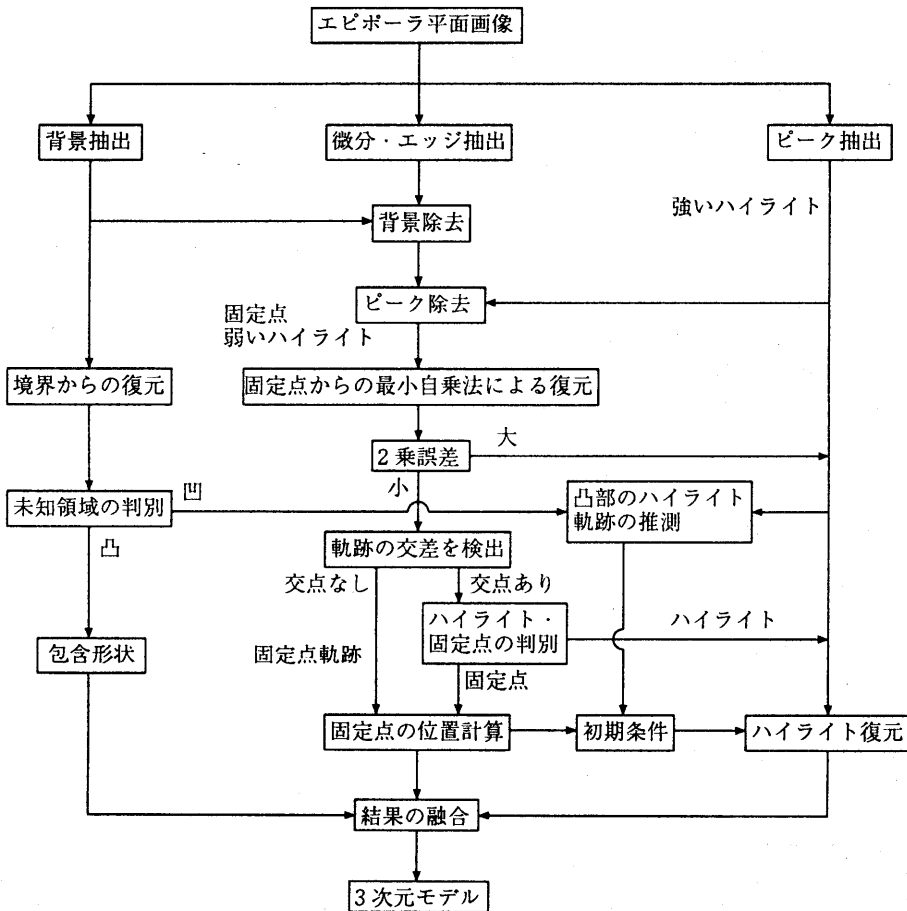


図 9: 処理の流れ図

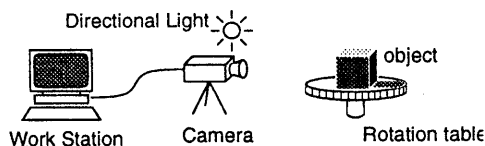


図 10: システム構成

図 15 は図 12 を微分・ピーク抽出した結果で、この中に固定点軌跡・境界軌跡・ハイライト軌跡に並行な 2 本の軌跡が混在している。図 15 から先ほど抽出したハイライト軌跡・境界軌跡を除去すると図 16 になり、この中には固定点のみが含まれている。

このようにして軌跡を分離したあと、正しく分離できたか確認し、各々の復元法を適用する。境界復元式にしたがって復元した結果が図 17 で、固定点復元式にしたがって復元した結果が図 18 である。図 17 での未知領域をハイライト復元式によって復元した結果が図 19 である。図 17, 18, 19 を融合した結果が図 20 である。様々な高さで断面形状を復元し、積み重ねた結果が図 21, 22 である。

6 討論

今回はハイライトを画像のピークを抽出することにより行なった。画面上で強いハイライトが観測される場合には微分画像中にハイライトによる 2 本の軌跡が存在しピーク画像中にもハイライトが存在するので微分画像からハイライトは完全に除去できる。しかし、弱いハイライトが観測される場合、画像処理時のパラメータによっては微分画像中にハイライトによる 2 本の軌跡が存在しているが、ピーク画像中からハイライトが検出されない場合が起こりうる。この場合にはハイライト軌跡を固定点軌跡と認識してしまう。今後は定性的な軌跡の分離だけでなく、画像処理上のパラメータ設定法などの定量的な軌跡の分離法を考案する必要がある。

7 むすび

本研究では、回転物体の連続画像に混在する様々な特徴量の性質を分析した。安定して抽出できる情報に基づき固定点・境界・ハイライトの定性的な分離と融合を行ない、各高さでの断面形状を得た。それらを積み重ねることで 3 次元形状を取得した。計測時の設備・環境条件が簡単であるため、物体の簡単な復元法を確立し、さらに展開されるマルチメディアにも広く利用されると予測する。

謝 辞

本研究に対し大川情報通信基金の助成を受けていることを感謝致します。

文 献

- [1] J.Y.Zheng: "Acquiring 3D models from sequence of contours", IEEE Trans. PAMI Vol.16 No.2, pp.163-178, 1994.
- [2] 鄭 絳宇, 岸野 文郎: "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", 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J76-D-II No.6, pp.1114-1122, 1993.
- [3] J.Y.Zheng, F.Kishino: "Verifying and combining different visual cues into a 3D model", IEEE Conf. CVPR pp.777-780, 1992.
- [4] J.Y.Zheng, F.Kishino: "3D model from contours: further identification of unexposed areas", 11th ICPR Vol.1, pp.349-353, 1992.
- [5] J.Y.Zheng, Y.Fukagawa, T.Ohtsuka and N.Abe: "Acquiring 3D models from rotation and highlights", 12th ICPR Vol.1, pp.349-353, 1994.
- [6] J.Y.Zheng, H.Kakinoki, K.Tanaka and N.Abe: "Acquiring 3D models from fixed points during rotation", 3th International Conference on Automation, Robotics, and Computer Vision Vol.1, pp.459-463, 1994.
- [7] J.Y.Zheng, Y.Fukagawa and N.Abe: "Shape and model from specular motion", 5th ICCV, pp.72-79, 1995.
- [8] J.Lu, F.Little: "Reflectance function estimation and shape recovery from image sequence of a rotating object", 5th ICCV, pp.80-86, 1995.
- [9] 深川 義裕, 田中 和明, 鄭 絳宇, 安部 憲広: "Highlight の検出による 3 次元形状の復元", 信学技報 Vol.94 No.445, pp.63-70, 1995.
- [10] H.Baker, R.Bolles: "Generalizing epipolar-plane image analysis on the spatiotemporal surface", CVPR-88, pp.2-9, 1988.
- [11] R.Vaillant, O.D.Faugeras: "Using extremal boundaries for 3-D object modeling", IEEE Trans. PAMI., vol.14, no.2, pp.157-173, Feb.1992.

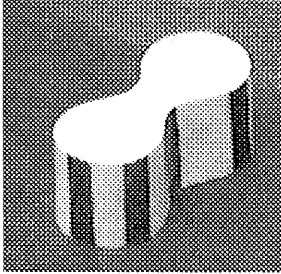


図 11: 復元対象

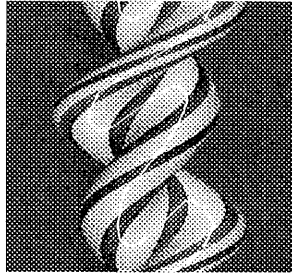


図 12: EPI

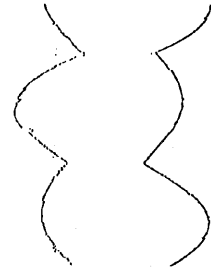


図 13: 境界を抽出した結果



図 14: ピークを抽出した結果



図 15: EPI を微分した結果

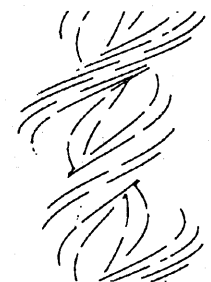


図 16: 境界・ハイライトの除去結果

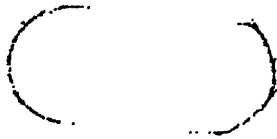


図 17: 境界軌跡からの復元結果

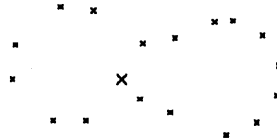


図 18: 固定点軌跡からの復元結果



図 19: ハイライト軌跡から復元結果

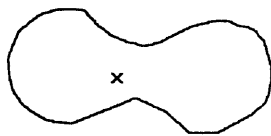


図 20: 断面形状を融合した結果

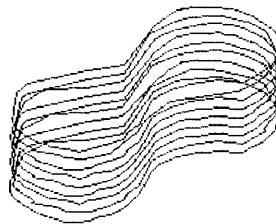


図 21: 断面形状を積み重ねた結果

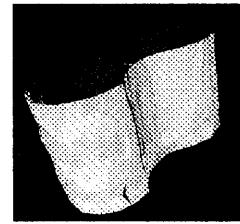


図 22: 復元された 3 次元モデル