

テクスチャとシェーディングを利用した 回転物体の形状復元

柿木博 鄭絳宇 田中和明 安部憲広

h_kaki@sein.mse.kyutech.ac.jp

九州工業大学 情報工学部

〒820 飯塚市大字川津 680 番 4

本研究は拡散反射表面の回転物体における視覚特徴について解析を行ない、3次元形状を獲得するものである。物体を回転させながら連続画像を取得する。連続画像から得ることのできる固定点の軌跡からその点の空間的な位置を獲得する。つぎに、固定点間の反射率を一定と仮定し、推定する。推定した反射率からシェーディングの変化を利用し固定点間の形状を獲得する。固定点とシェーディングの変化から得た値をもとに回転物体の形状を復元する。

Shape Recovery from Fixed Point and Shading during Rotation

Hiroshi Kakinoki, 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 work investigates visual characteristics of diffused reflection surfaces during rotation, and gives some algorithms for shape recovery. Continuous images are taken when an object rotates. From traces of fixed points in these images, we get 3D locations of textures and corners. Assuming that reflectance has no gradation, we estimate the rate of reflectance between fixed points. We also show that the surface can be recovered by using shading information in continuous images of rotating object. We construct a graphics model from measured the data.

1 はじめに

今日では、コンピュータグラフィックスの目まぐるしい発達により、複雑な形状の表示が簡単に行なえるようになった。そのため、幾何学的形状の物体はもとより、非幾何学的な形状の物体をより簡潔に入力し表示することが必要となっている。

既に実用化されている形状獲得法としてレーザーレンジファインダーを利用した投稿法があるが、この手法は機器が非常に高価であるため入手にくい。一方、近年の研究では回転物体の形状を復元するものとして、シェーディングのみを利用したもの [1] やテクスチャーのみを利用したもの [3, 4]、シルエットを利用したもの [5] がある。シェーディングのみを利用した手法では、特異点の定義が困難である。また物体表面の反射率を一定と仮定しているため、テクスチャーのあるものを復元することができない。テクスチャーのみを利用したもの [3, 4] では、テクスチャーによって獲得したエッジの間の形状を取得することができない。シルエットを利用した手法 [5] では、凹形状の獲得が安定でない。本研究ではテクスチャーとシェーディングの両方を利用することにより、これらの研究で獲得できる形状よりも正確な物体の形状が獲得できる。

本研究は、物体表面上のテクスチャー及びシェーディングの変化を利用し、Shape from motion の原理から、3次元モデルの形状を獲得するものである。我々は、1台のカメラから入力した回転物体の連続画像上で固定点の軌跡とシェーディングの変化から対応づけを行ない、3次元モデルを獲得した。本手法を利用することにより、低コストでしかも従来の手法より安定した物体形状を簡潔に取得することができる。

以下にその手法を示し、いくつかの実験結果を示す。

2 観測条件

本研究では1台のカメラから、以下の条件で連続画像を取得した。その様子を図1に示す。(a) 物体は回転運動をする。(b) 回転台の回転軸とカメラ画像の y 軸とを平行に設置する。(c) 対象物体のカメラへの射影を直行射影とする (d) 照明方向は任意とし、点光源を使用する。(e) 物体表面には複数のテクスチャーが存在してもよい。(f) 物体表面は完全に拡散反射をする。このような条件のもとで回転台に対象物体を載せ、形状を獲得したい高さ y で物体を回転させながら連続的に画像を取得する。以下この画像

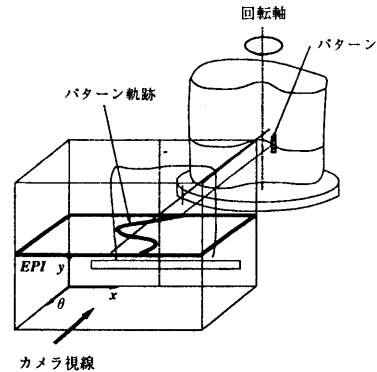


図1: 回転連続画像の入力図

をEPI(EpipolarPlaneImage)と称する [5, 3, 2].

我々は、EPI上のテクスチャーの軌跡とシェーディングの変化に注目した。

EPI上では図1に示すように、横軸が空間軸、縦軸が時間軸となる。このため物体表面上の固定点はEPI上で時間方向に連続した三角関数となって現れる。

また、EPI上で、物体の回転に伴う反射率の変化を推定する。推定した反射率の変化を利用して、テクスチャーのエッジとして獲得できない固定点の動きを予測し、形状を取得する。

条件(c)より、物体表面上の点は回転軸と直行する平面で動くので、3次元モデルの最構成は各回転平面で行なえる。

3 テクスチャーからの3次元形状の決定

EPI上で観測できるテクスチャーのエッジは、物体の回転にともなう固定点の軌跡となる(図2)。幾何学的関係を利用し、この軌跡から固定点の空間上の位置を決定する。

空間のある高さ y の平面(図3)を考え、物体の座標系を $X-Z$ 平面、画像上での座標系を $x-y$ 平面とする。このとき、空間上の回転中心と固定点の位置をそれぞれ $O, P(X, Z)$ 、画像上での回転中心と固定点の位置をそれぞれ $x_o, p(\theta)$ 、また物体の回転角を $\theta(t)$ とすると、 $\overrightarrow{x_o p(\theta)} = (\cos \theta, \sin \theta)$ 、 $\overrightarrow{pP} = (-\sin \theta, \cos \theta)$ 、 $\overrightarrow{OP} = (X, Z)$ を得ることができる。ここで、固定点とはテクスチャーのエッジ

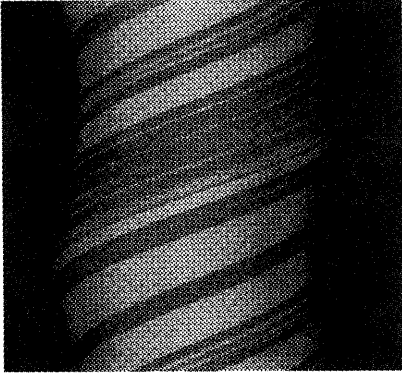


図 2: EPI 上のテクスチャーの動き

として EPI 画像上で獲得したものである。 \overrightarrow{OP} と $\overrightarrow{x_o p(\theta)}$ の内積を求めると、

$$\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{x_o p(\theta)} = (X, Z) \cdot (\cos \theta, \sin \theta) = \omega(\theta) \quad (1)$$

となり、 x_o と $p(\theta)$ との距離 $\omega(\theta)$ が求まる。また θ から $\Delta\theta$ だけ回転した回転角での点 $P(X, Z)$ の画像上の位置は、次式ようになる。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{x_o p(\theta + \Delta\theta)} \\ &= (X, Z) \cdot (\cos(\theta + \Delta\theta), \sin(\theta + \Delta\theta)) \\ &= \omega(\theta + \Delta\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

(1) 式と (2) 式より (3) 式が求まる。

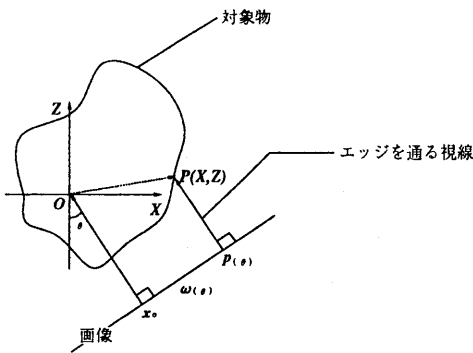


図 3: 回転平面でのエッジ (固定点) を通る視線

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \Delta\theta} \begin{pmatrix} \sin(\theta_1 + \Delta\theta) & -\sin \theta_1 \\ -\cos(\theta_1 + \Delta\theta) & \cos \theta_1 \end{pmatrix}$$

$$\times \begin{pmatrix} \omega_1(\theta_1) \\ \omega_2(\theta_1 + \Delta\theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

つまり、EPI 上で固定点の 2 つの投影が取得できるとその 3 次元位置が確定できる。

実際に固定点の軌跡は EPI の中でエッジとなり、エッジの追跡を行なうと、複数の投影位置が求まる。そのため、最小 2 乗法を用いることにより、正確な 3 次元位置の獲得ができる。回転台の各回転角で、(1) 式と画像から得た $\omega(\theta)$ の誤差を e とする。

$$e = \sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_n} (X \cos \theta + Z \sin \theta - \omega(\theta))^2 \quad (4)$$

e が最小となる $P(X, Z)$ を求めることにより、(5) 式を得た。

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

但し、 \sum は $\sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_n}$ とする。この式により、正確な固定点の位置を求めることができる。実際の復元にはこの式を利用した。

4 反射率の推定

物体表面の各テクスチャーの反射率はそれぞれ一定と仮定する。EPI 上のエッジ近傍のデータを用いて、各テクスチャーの反射率を推定する。テクスチャー間の形状復元に、推定した反射率を利用する。

放射照度 E と放射輝度 I の間には一般に以下のような関係が成立する。

$$I = ER \cos \nu \quad (6)$$

但し、 R は物体の表面反射率、 ν は物体表面の法線ベクトルと入射光のなす角度とする。

ここで、図 4 のような回転物体上のガウス球を考える。 Y 軸を回転軸とし、 Z 軸をカメラ光軸と一致させる。光源は十分遠くに設置してあるとし、対象物体を一樣に照射するとする。物体表面上の法線ベクトルを n 、光源の方向ベクトルを L とし、単位ベクトルとする。また、法線ベクトルと光源の方向ベクトルが $X-Z$ 平面となす角をそれぞれ ϕ, α 、 $X-Y$ 平面となす角を ρ, β とする。また、光源方向と法線ベクトルのなす角を ν とする。このとき、物体は時計回りに回転するとする。

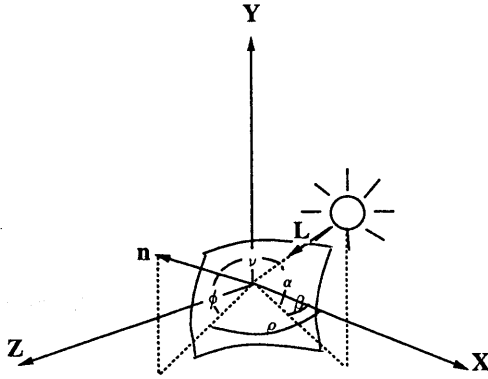


図 4: 回転平面での反射モデル

法線ベクトルと光源の方向ベクトルを X, Y, Z 成分に分解すると

$$n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \rho \\ \sin \phi \\ \cos \phi \sin \rho \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$L = \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \beta \end{pmatrix} \quad (8)$$

となる。式 (6) で $\cos \theta$ は、入射光と面の法線ベクトルとの内積なので、 $\cos \nu = L \cdot n$ となる。よって、式 (7) と式 (8) より次式を得る。

$$I = ER \cos \phi \cos \alpha \cos(\rho - \beta) + ER \sin \phi \sin \alpha \quad (9)$$

ここで、 $X-Z$ 平面は回転平面と平行なので、 ϕ, α は回転角に関係なく一定となる。したがって、式 (9) は次式のように簡略化できる。

$$I = A \cos(\rho - \beta) + B \quad (10)$$

但し、 $A = ER \cos \phi \cos \alpha, B = ER \sin \phi \sin \alpha$ とする。つまり、対応点の濃淡差比は回転に関する三角関数である。対象物体の回転角を θ とし、初期位置 $\theta = 0$ から Y 軸までの回転角を θ_0 とすると $\rho = \theta - \theta_0$ となる。したがって EPI で観測できる物体表面上の 1 点の濃淡変化は、回転角 θ の余弦関数と、定数に分けることができる (図 5)。また法線と光源の方向が最も接近したとき、すなわち $\rho = \beta, (\theta = \theta_0 + \beta)$ となったとき放射輝度が最大となる。

EPI 上から獲得した固定点の軌跡近傍の濃淡値を獲得し式 (10) への同定を行なう。濃淡値の変化が観測できる範囲内の回転角を $\theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ そのときの輝度を $I = I_1, I_2, \dots, I_n$ として、最小 2 乗法を適用すると次式を得る。

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \left(n \sum \cos^2(\theta_i - \delta) - \left(\sum \cos(\theta_i - \delta) \right)^2 \right)^{-1} \\ \times \begin{pmatrix} n & -\sum \cos(\theta_i - \delta) \\ -\sum \cos(\theta_i - \delta) & \sum \cos^2(\theta_i - \delta) \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \sum I_i \cos(\theta_i - \delta) \\ \sum I_i \end{pmatrix} \quad (11)$$

但し、 $\sum = \sum_{i=1}^n$, $\delta = \theta_0 + \beta$ とする。また、このときの δ の値は、獲得した濃淡値が最大となるときの回転角である。この式から A, B を決定し、反射率の回転特性曲線を推定する (図 6)。このとき照明方向が既知であるならば、 α がわかり、次式より反射率が求まる。

$$ER = \sqrt{(A/\cos \alpha)^2 + (B/\sin \alpha)^2} \quad (12)$$

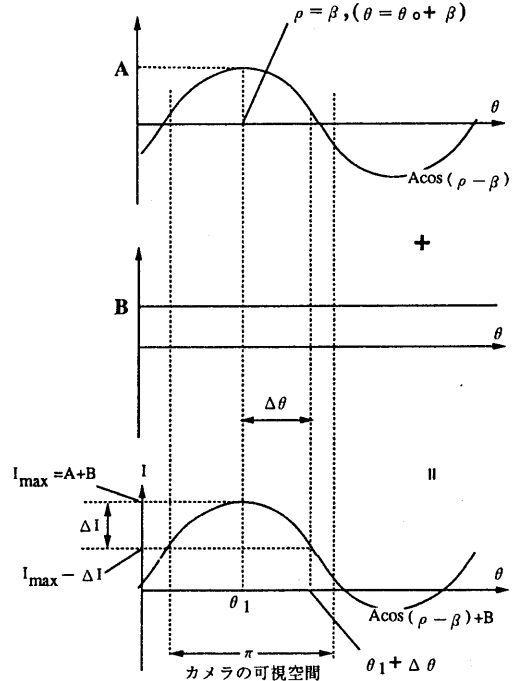


図 5: 反射率の回転特性曲線

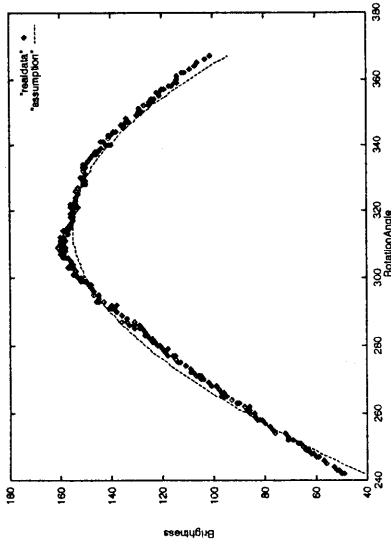


図 6: 計測により得たの反射率の変化と推定した反射率の回転特性曲線

5 シェーディングからの 3 次元形状の決定

物体表面上の点の 2 つの投影が分かると、固定点の場合と同様に 3 次元位置が求まる。前節で推定した反射率の回転特性曲線を利用して対応点を見つけ、各固定点間の形状を復元する。

反射率は各パターンにおいて一定と仮定する。このとき、あるパターン内の点において図 4 の ϕ が均一ではないため、 $\Delta\theta$ 回転したところの濃淡値は同一ではない。しかし A は同一であるため、その変化は一致する。したがって、回転角の違いによって生じる輝度の差を利用して形状を獲得した。

EPI 上の各回転角で最大輝度の箇所を取得すると、1 本の線となる。以下この線を最大輝度軌跡と称する。空間上のある回転平面 (図 7) を考え、物体の座標系を $X-Z$ 平面とする。このとき、物体表面上の 1 つの点の位置を $P(X, Z)$ 、画像上の回転中心を O とする。回転角 θ_i のとき、点 $P(X, Z)$ の法線ベクトル n の方向が照明の方向に最も近づいたとすると、この点は EPI 上の最大輝度軌跡にあらわれる (図 8)。このときの像を P_1 とし、輝度を I_i 、回転軸からの距離を $\omega(\theta_i)$ とする。この点が $\Delta\theta$ 回転した後の像を P_2 とし、このときの回転軸からの距離を

$\omega(\theta_i + \Delta\theta)$ とすると、 $\omega(\theta_i)$ と $\omega(\theta_i + \Delta\theta)$ は固定点の場合と同様に、式 (14) のようになる。

$$\begin{aligned} \omega(\theta_i + \Delta\theta) &= X \cos \theta_i + Z \sin \theta_i & (13) \\ &= X \cos(\theta_i + \Delta\theta) + Z \sin(\theta_i + \Delta\theta) & (14) \end{aligned}$$

この 2 つの式から次式が求まり、物体表面の点 $P(X, Z)$ は直接計算によって求めることができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \Delta\theta} \begin{pmatrix} \sin(\theta_i + \Delta\theta) & -\sin \theta_i \\ -\cos(\theta_i + \Delta\theta) & \cos \theta_i \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \omega(\theta_i) \\ \omega(\theta_i + \Delta\theta) \end{pmatrix} \quad (15)$$

(15) 式をつかって 3 次元位置を求めるには、 $\omega(\theta_i + \Delta\theta)$ を求める必要がある。この場合は固定点の場合と異なり、EPI から直接対応点を求めることができない。そこで、前節で取得した反射率の回転特性曲線 (図 6) を利用する。反射率の回転特性曲線 (図 5) 上から、最大輝度の値 I_{max} とそのときの回転角 $\theta = \theta_1$ ($\theta_1 = \theta_0 + \beta$) を取得する。つぎに、 $\theta = \theta_1$ から $\Delta\theta$ 回転したところの輝度を求め、 I_{max} との差 ΔI を求める。このとき像 P_2 の輝度は、法線ベクトルが回転平面となす角に関係なく $I_i - \Delta I$ となる。したがって θ_i から $\Delta\theta$ 回転した角度で、 $I_i - \Delta I$ の輝度を探索することによって、回転軸からの距離 $\omega(\theta_i + \Delta\theta)$ を取得することができ、(15) 式から点 $P(X, Z)$ を求めることができる。

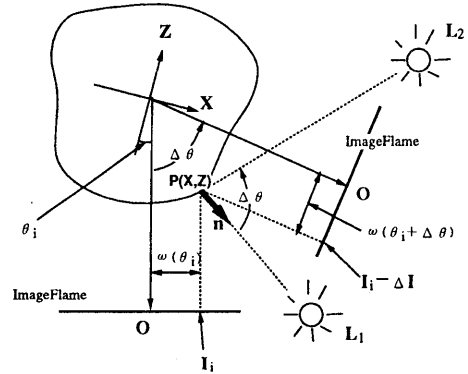


図 7: 回転平面上的の輝度の変化

6 対象物体のモデル構築

実際に物体のモデルをグラフィクスで表示するためには、3章と 5章の手法から決定した物体表面上の

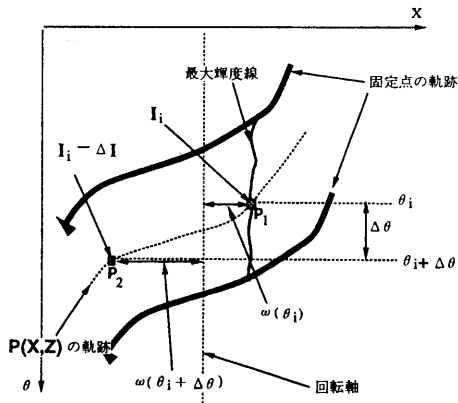


図 8: EPI 上での最大輝度の軌跡

3次元位置を結合する必要がある。そのために、3次元位置の結合順序を決定する。

反射率の推定を行なうには、同一反射率の範囲を認識する必要がある。そのため、テクスチャーから求めた固定点の結合順序を先に決定する。対象物体は回転軸を中心に時計回りに回転しているため、EPI上の固定点の軌跡は回転角の変化に従い画像上で右から左へと移動する。そこでEPI上のある1つの回転角で左から右へ検索していき、出現した固定点の軌跡を順に結合すると、その回転角における固定点の結合順序がわかる。しかしオクルージョンのために1つの回転角にすべての固定点が見れることはないため、異なった回転角間での検索が必要となる。本研究では次のアルゴリズムを用いて固定点の結合順序を決定した。

```

rotation angle  $\theta$ ;
label number  $x$ ;
starting from  $\theta = 0$ ;
traces set  $L = \Phi$ ;
for(increasing  $\theta$ )
{
    search an edge  $e(\theta, x)$  rightward in EPI;
    if( $e(\theta, x)$  follows a focused trace  $t_j$  in  $L$ ) {
        register  $e(\theta, x)$  as end of  $t_j$ ;
    }
}

```

決定した3次元位置の結合順序 L を利用して、各固定点間での最大輝度軌跡を獲得する。反射率の回

転特性曲線を推定し、最大輝度軌跡から形状復元を行なう。最大輝度軌跡は物体表面上の連続する面素を通過するため、求めた3次元位置は、その最大輝度軌跡を追跡するだけで結合順序が決定できる。

次に、各回転平面で獲得した断面形状を連結することにより、3次元モデルをコンピュータ内に表示する。連続する回転平面内で最も近い点どうしを結合することにより三角形パッチを構成し、モデルを獲得した。また同時に、推定した反射率の表示も行なった。

7 実験結果

拡散反射表面の物体を用いて実験を行なった。エッジ抽出を安定に行なうため背景の色は均一にし、光源は1つとし任意の方向から点光源で照射した。このときの対象物体のカメラへの射影を図9に示す。

EPIに細線化処理を施し固定点の軌跡を抽出する。このとき背景と物体の間に生じるエッジ(図11)は、必ずしも固定点とはならないので除去した(図12)。各固定点についてラベル付けを行なった後、ラベル毎に追跡を行ない、式(5)を適用して3次元位置を求めた。

次に、固定点間の反射率の回転特性曲線を抽出するために、固定点の結合順序を決定した。EPI上でテクスチャーが顕著に現れない場合(図14)、エッジが切れる可能性がある。前述のアルゴリズムから結合順序を決定すると、切れたエッジからは間違った順序関係が決定される。本研究ではこの誤認識を防ぐために、求めた3次元位置から固定点の軌跡を推定し、エッジの延長を行なった(図16)。

求めた固定点の順序関係を利用してテクスチャー毎の最大輝度軌跡(図8)を抽出し、固定点間の形状を獲得する。EPIを平滑化した後、固定点の軌跡の近傍からデータを取得し、反射率の回転特性曲線を推定する(図6)。

各回転平面で同じ処理を行ない断面形状を求め、それを連結して三角形パッチを構成し、3次元モデルを獲得した(図19, 図20)。

8 まとめ及び考察

本研究では、EPIを用いて物体表面上のテクスチャーとシェーディングから物体の形状を復元した。本手法はテクスチャーとシェーディングの両方を利用することにより、テクスチャーのみから形状を復

元する手法 [3, 4] やシェーディングのみから形状を復元する手法 [1] よりも正確な形状を獲得した。

本稿では拡散反射表面の物体のみを扱ってきたが、自然物体を対象としたときには、鏡面反射成分を含んだ物体が多数存在する。このような物体の場合、EPI 上で観測できるハイライト [2] を除去することにより本手法から形状の獲得ができると考える。

また、物体表面上の反射率を推定した。形状を復元した後の反射率の推定は行なっていないため、回転軸と物体表面の法線ベクトルのなす角度と、回転軸と光源方向のなす角度の計測が不可能である。よって、求めた反射率はおおよそのものであって正確ではない。今後は、形状復元後の反射率の推定も行ない、より正確な反射率を獲得することが必要だと考える。

参考文献

- [1] J. Lu and J. Little. Reflectance function estimation and shape recovery from image sequence of a rotating object. *5th ICCV*, pp. 80-86, 1995.
- [2] J. Y. Zheng, Y. Fukagawa, and N. Abe. Shape and model from specular motion. *5th ICCV*, pp. 72-79, 1995.
- [3] J. Y. Zheng, H. Kakinoki, K. Tanaka, and N. Abe. Acquiring 3d models from fixed point during rotation. *3th International Conference on Automation, Robotics, and Computer Vision*, Vol. 1, pp. 459-463, 1994.
- [4] 日浦慎作, 佐藤宏介, 井口征士. 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, 7月 1994.
- [5] 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.

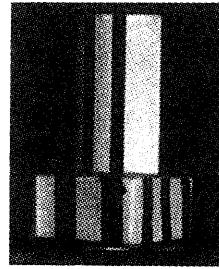


図 9: 対象物体



図 10: 取得した EPI



図 11: 図 10 に細線化処理を施した画像



図 12: 図 11の背景とのエッジを消去した画像

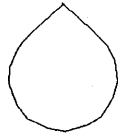


図 13: 図 12 から復元した 3 次元断面形状

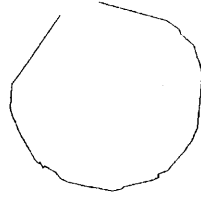


図 17: 図 16 から復元した 3 次元断面形状

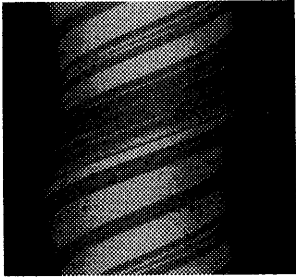


図 14: テクスチャーが顕著でない EPI

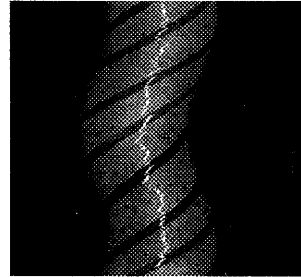


図 18: EPI 上での最大輝度の軌跡

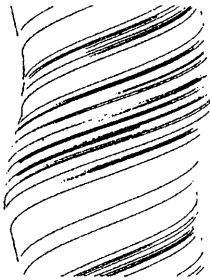


図 15: 図 14 に細線化処理を施した画像

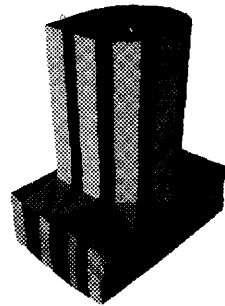


図 19: 復元した 3 次元モデル

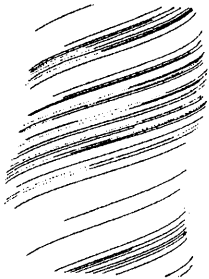


図 16: 図 15 の切れたエッジを延長させた画像

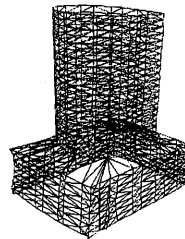


図 20: 図 19 のワイヤーフレームモデル