

鏡面反射を含む回転画像からの 形状取込み

Acquiring 3D models from Image Sequence of a Rotating
Object with specular reflection.

小笠原 祐治* 高橋 強** 太田原 功*
Yuuji Ogasawara, Kyo Takahasi, Isao Ootawara

*岩手県立産業技術短期大学校 **岩手県立高度技術専門学院
*Iwate Industrial-tech junior college
**Iwate pref.high-tech college

キーワード：鏡面反射(Specular Reflection)、3次元形状(3D Model)、
ハフ変換(Hough Transform)、EPI(Epipolar Plane Image)

連絡先：〒028-36 岩手県紫波郡矢巾町大字南矢幅10-3-1 岩手県立産業技術短期大学校
情報技術科 小笠原 祐治, Tel.019-697-9085, Fax.019-697-9089

1. はじめに

近年のCGやバーチャルリアリティの研究等の進展に伴い、物体を計算機の仮想世界へ取り込むための3次元形状の入力方法は重要になっている。また、産業分野においても物体の3次元形状の入力は、ロボットによる作業の自動化等への応用において重要である。

従来の3次元形状の入力方法は、レーザやスリット光を対象物体に照射し、光が物体に当たった位置を測ることによって3次元形状を得ている^(1~4)。この他に、シルエット⁽⁵⁾や特徴点や鏡面反射によるハイライト⁽⁶⁾を利用す

る方法も提案されている。

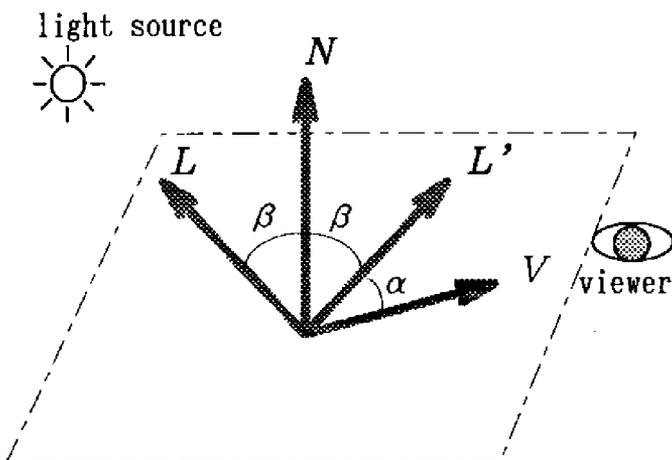
本論文では、ハフ変換を用いて対象物体のハイライトを含んだ回転画像から、3次元形状を獲得する方法について考える。まず、XY平面の遠方から対象物体全体に照明光をあて、物体をZ軸を中心に回転させながらX軸遠方から観測した画像をEPI (Epipolar Plane Image) に変換する。EPIをもとに、Lambertモデルに最もよくあう半径(回転軸から物体表面まで)を各方向について求め、断面形状を得る。つぎに、各高さの断面形状を求めることによって、3次元形状を獲得する。

照射光強度が既知であれば拡散反射係数が求められるので、3次元形状と共に光学的情報も取り込むことができる。

2. 3次元形状の獲得方法

2.1 PhongモデルとEPIの特徴

一般的に光学的モデルとして用いられるphongモデルでは、図1に示すように被測定物に光を照射した場合、その反射光 I は式(1)で示され、鏡面反射成分と拡散反射成分とから成る。鏡面反射成分は式(1)の第一項 ($s \cdot k_s \cos^n \alpha$) で示され、 L' 方向に近い方向(α が小さい) から見ると明るく、 L' 方向から離れる(α が大きい) に従って暗く見える。一方、拡散反射成分は式(1)の第二項 ($s \cdot k_D \cos \beta$) で示され、鏡面反射と異なり輝度は見る方向には関係なく光の入射角 β によって決まる。



- L : 入射光の方向ベクトル (Light source vector)
- N : 表面の法線ベクトル(Normal vector)
- V : 視線の方向ベクトル(View vector)

図1. 反射モデル

$$I = s \cdot k_s \cos^n \alpha + s \cdot k_D \cos \beta \dots\dots (1)$$

- s : 入射光
- I : 反射光
- k_s : 鏡面反射係数
- k_D : 拡散反射係数
- n : 反射物体による係数

図2に示すように、対象物体全体に方向 $L(\cos l_z, 0, 0)$ から平行な照明光を当て、物体を Z 軸を中心に回転しながら遠方から方向 $V(1, 0, 0)$ からカメラで観測する。すると、物体表面の点 $P(r, 0, 0)$ は回転 (θ) とともに移動し、観測画像における u 座標は式(2)のように変化するが v 座標は変化しない。すなわち、物体表面の点が移動した軌跡は、図3に示すEPI

(Epipolar Plane Image)上で考えることができる。また、反射光強度 I はphongモデルに従うので、式(1)は式(3)の様に書ける。ここで、照明光方向 l_z 及び回転軸の位置は既知とする。

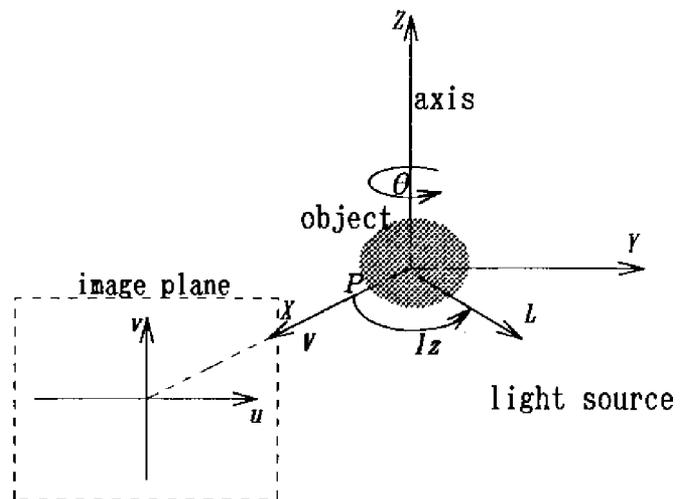


図2. 観測方法

$$u = r \cdot \sin \theta \dots\dots (2)$$

$$I = s \{ k_s (2(L \cdot N)(N \cdot V) - L \cdot V)^n + k_D L \cdot N \} \dots (3)$$

- n : 反射物体による係数
- N : 物体表面の法線ベクトル

$$(\cos n_z \cos n_y, \sin n_z \cos n_y, \sin n_y)$$

式(3)を単純化するために、拡散反射のみを考える(Lambertモデル)。すると、式(3)は式(4)の様に単純化でき、反射光強度 $I'(\theta)$ は回転角 θ に対し余弦波となる。

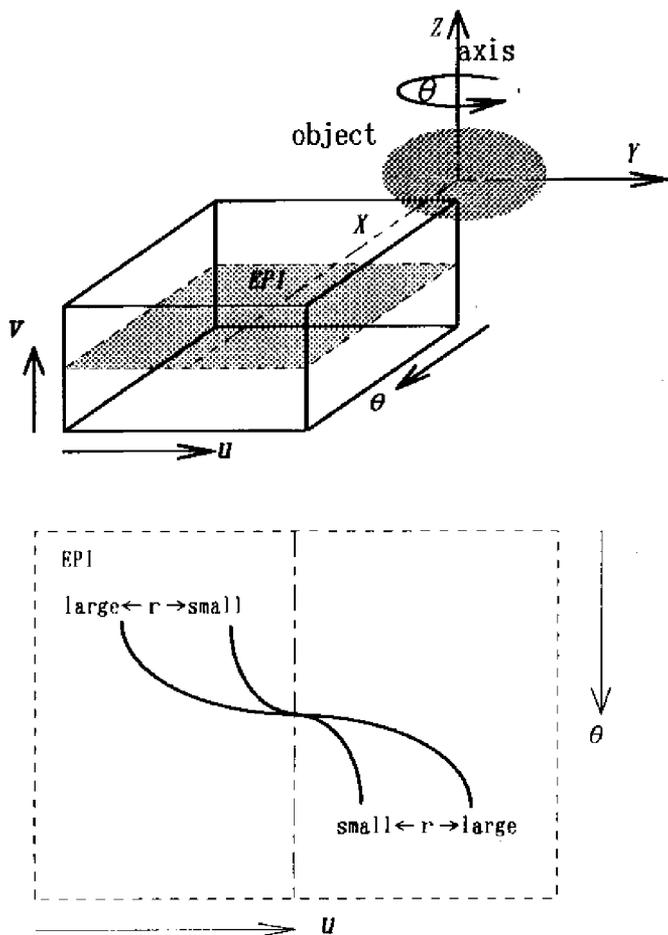


図3. EPI (Epipolar Plane Image)

$$I'(\theta) = s \cdot k \cdot \cos(\theta + n_z - l_z) \quad \dots\dots (4)$$

$$k = k_D \cdot \cos n_y$$

2.2 振幅及び位相の推定

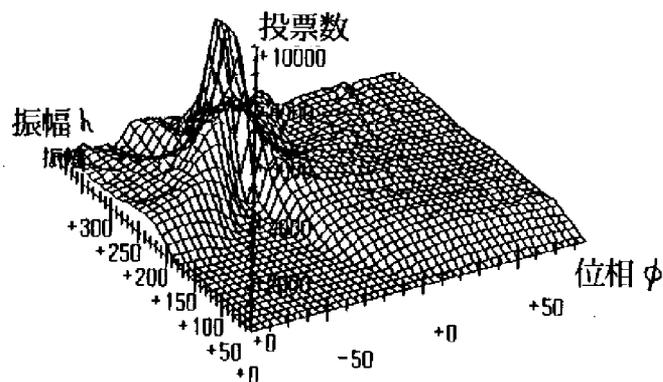
回転軸から物体表面までの距離(半径) r が指定された場合、観測画像から式(4)の振幅 $s \cdot k$ と位相 $n_z - l_z$ をハフ変換を用いることによって求める方法について考える。まず、測定画像(EPI)から式(2)に従って、各画素の輝度データ $I(\theta)$ を抽出する。そして、式(5)を用いて振幅と位相を表わす $h\phi$ 平面に投票する。

$$g = \frac{I(\theta)}{\sin(\theta - \phi)} \quad \dots\dots (5)$$

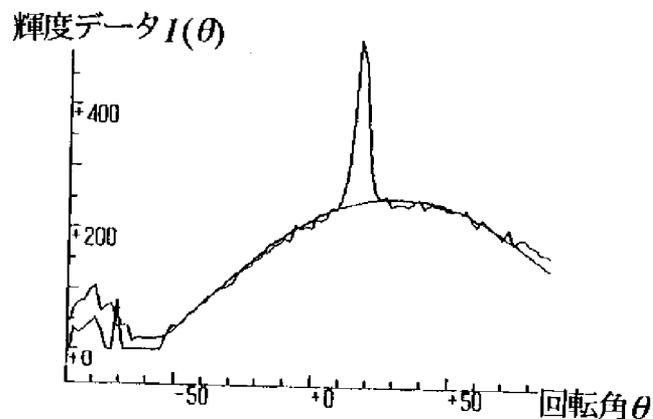
$$h = g + i \quad (i = -\Delta h \dots \Delta h)$$

$$v = (\Delta h - |i|)^2$$

投票を $h = g - \Delta h \sim g + \Delta h$ の範囲で行い、投票数は v (上式)とする。 $h\phi$ 平面で最も投票数が多いところを振幅 h' 及び位相 ϕ' とする。ここで、位相 ϕ' は、 $n_z - l_z$ に相当する。輝度データ $I(\theta)$ が鏡面反射成分や各種ノイズのためきれいな余弦になるとはかぎらないため、複数投票することによって主要な余弦部分を求める。鏡面反射成分が影響する回転角 θ の範囲は少ないものとしている。輝度データ $I(\theta)$ とその投票例を図4に示す。



(a)投票例



(b)輝度データ $I(\theta)$

図4. ハフ変換の例

2.3 距離計算

半径が r の場合に、Lambertモデルとどの程度ずれているかの尺度として距離 d を考える。前述のハフ変換によって求めた振幅 h' 及び位相 ϕ' から算出した輝度 $I'(\theta)$ と、観測輝度データ $I(\theta)$ との差を距離 d とし、式(6)を用いて求める。

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{\theta} \{I'(\theta) - I(\theta)\}^2}{m}} \quad \dots (6)$$

$$I'(\theta) = h' \cdot \cos(\theta - \phi')$$

$I(\theta)$: 測定画像から抽出した輝度データ

h', ϕ' : ハフ変換で求めた振幅及び位相

m : データ数

つぎに、距離 d の計算を行う θ の範囲について考える。式(4)では鏡面反射を考えなかった。鏡面反射する物体の場合、鏡面反射成分が大きいか否かは、物体表面の法線ベクトルによって知ることができる。しかし、式(3)における法線ベクトル N の n_z は分かるが n_y が未知であるため、鏡面反射成分の大小を知ることができない。ただし、鏡面反射成分が大きいとすればその角度は $\theta = l_z/2 - n_z$ 付近である。そのため、 $\theta = -\phi' - l_z/2$ 付近を除いて距離計算を行なうことによって、鏡面反射の影響を小さくすることができる。距離計算を行う際の θ の範囲について、以下の2つの範囲を使用する。

・距離計算範囲1 :

$$-90 < \theta < 90 \text{ and } -\phi + l_z - 90 < \theta < -\phi + l_z + 90$$

ただし、鏡面反射

$$(-\phi - l_z/2 - \Delta s < \theta < -\phi - l_z/2 + \Delta s) \text{ を除く。}$$

着目点の周囲の輪郭が不明である場合に用いる。

・距離計算範囲2 :

$$-90 < \theta < 90 \text{ and } -\phi + l_z - 90 < \theta < -\phi + l_z + \theta_{\max}$$

ただし、鏡面反射

$(-\phi - l_z/2 - \Delta s < \theta < -\phi - l_z/2 + \Delta s)$ 及び着目している点が、対象物体の他の部分に遮られて見えない(対象物体の他の部分が見える)場合を除く。

2.4 断面形状の推定

各方向の半径を求めることによって、断面形状を得ることができる。また、各高さ(v 座標)の断面形状から、3次元形状を合成することができる。

本手法では、以下に示すステップに従って、断面形状を得る。まず、ステップ1では、ステップ2での処理の出発点(方向)を求める。そして、ステップ2では、ステップ1で求めた出発点から時計回転の方向に $\delta\phi$ 方向間隔で順次半径を求めて行く。

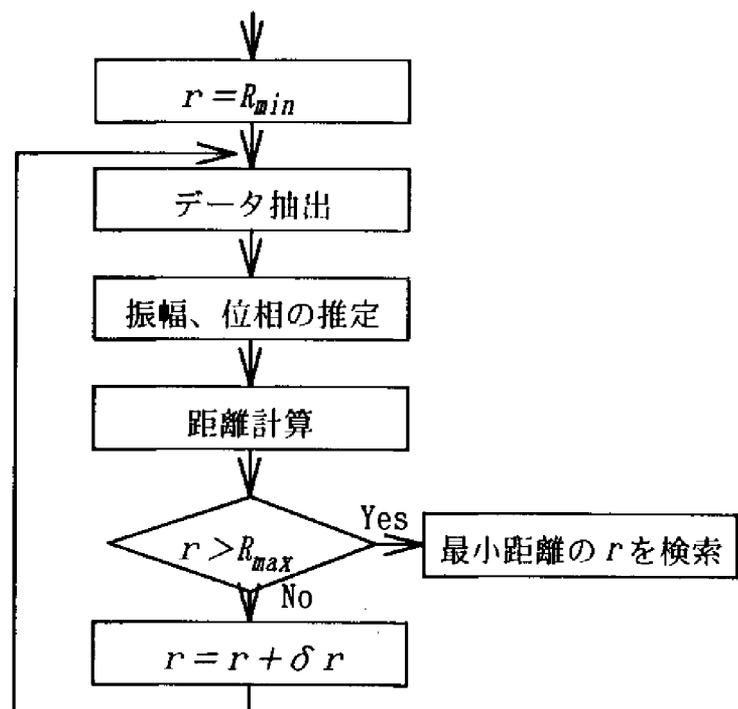


図5. 半径の推定

・ステップ1 半径を変えながら距離計算を行い、距離が最小の半径を推定半径とする。そのフローチャートを図5に示す。半径の範囲は $R_{\min} \sim R_{\max}$ (半径が十分入る範囲とする) とし、 δr 間隔で距離計算 (範囲1) を行う。各方向(φ)について上記処理を行ない、最も距離の小さい方向、半径を出発点とする。

・ステップ2 ステップ1で求めた出発点 (方向) から、ステップ1と同様に図5のフローチャートに従い時計回転の方向に $\delta\varphi$ 方向間隔で順次半径を求める (距離計算範囲2を使用)。ステップ1で求めた出発点 (方向、半径) から、ステップ1と同様に図5のフローに従って時計回転の方向に順次半径を求める。距離計算は式(7)で行い、(距離計算範囲2を使用) 傾斜 n_z を利用する。図13に傾斜 n_z と半径の関係を示す。 r' は $\varphi + \Delta\varphi$ 方向の半径 $r(\varphi + \Delta\varphi)$ と傾斜 n_z の関係から求められる半径であり、求める φ 方向の半径 $r(\varphi)$ と r' の差が大きくなると距離が大きくなるようにしている。これは、傾斜 n_z を用いて距離を計算することによって半径の変化と傾斜 n_z の整合をとっており、 σ は整合係数に相当することになる。

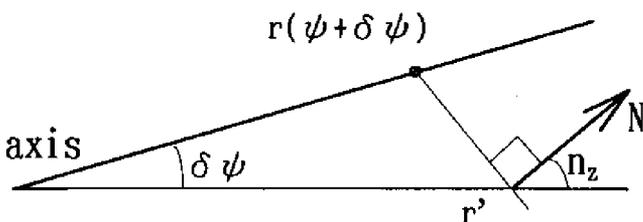


図6. 半径と法線の関係

$$r' = r(\varphi + \delta\varphi) \{ \cos \delta\varphi + \sin \delta\varphi \cdot \tan(n_z - \delta\varphi) \}$$

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{\theta} \{I'(\theta) - I(\theta)\}^2}{m}} \cdot \exp\{(r - r')^2 / \sigma^2\} \quad \dots(7)$$

各方向(φ)の半径を求めることにより、断面形状を合成する。

3. 3次元形状の取込実験

図7に示す人形 (最大半径約3.5cm) を用いて3次元形状の取込実験を行った。

3.1 処理手順

入力画像の及び出力形状は以下の通りである。

・入力画像 (図7(a)参照)

サイズ: 縦240、横320ドット

階調: 256 (白黒)、コマ数: 183

・出力形状 (図7(c)参照)

半径: 0.5ドット単位

方位: 2度間隔, 高さ: 2ドット間隔

処理の手順を以下に示す。

①回転させながら画像を取込む。

②EPIに変換する。

③各高さ毎に断面形状を求める。

・ $\Delta h = 20$ (最大振幅350)

・ $\Delta s = 10$ (鏡面反射を除外する範囲)

・ $\sigma = 5$ (最大半径50)

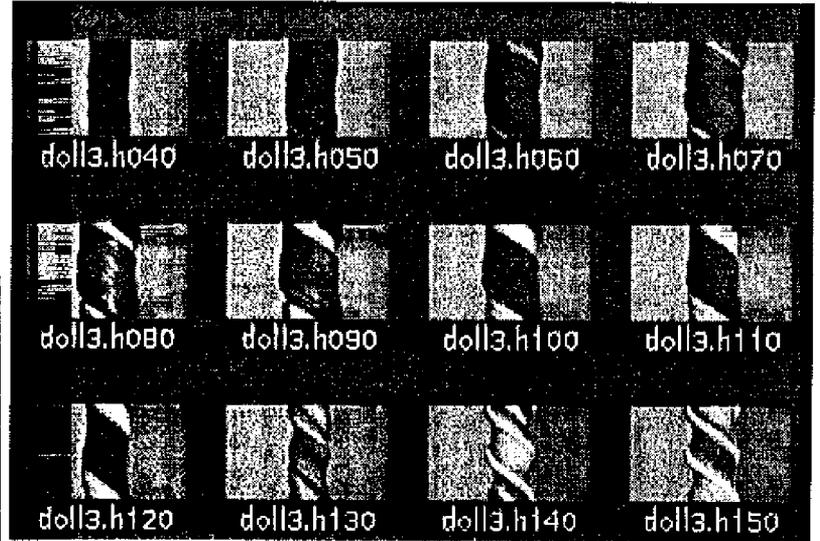
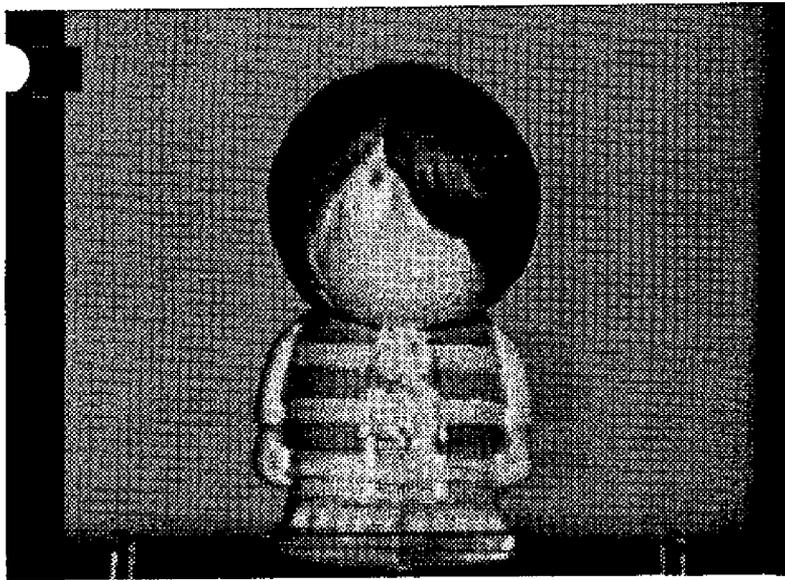
④断面形状から3次元形状を合成する。

3.2 実験結果

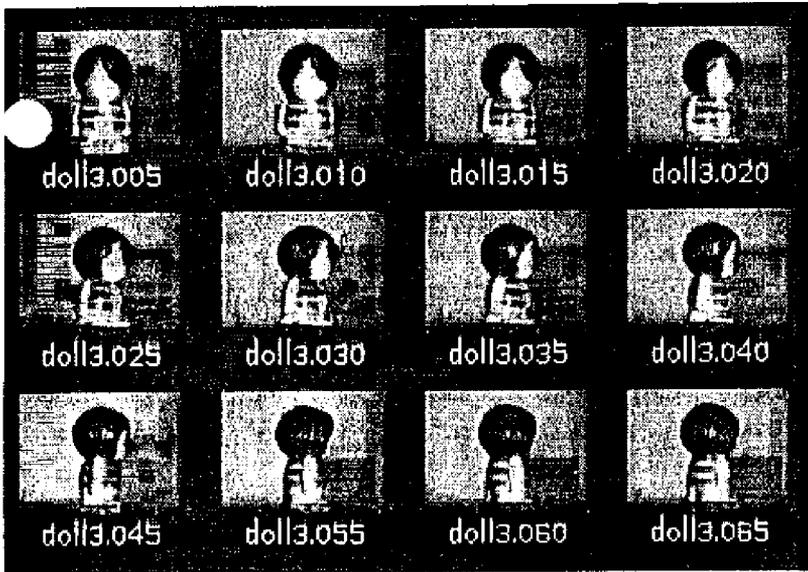
入力画像、処理結果の3次元形状を図7に示

す。求めた3次元形状はほぼ実物に近いが、半径の変化が大きい部分（凹凸の激しい部分）は歪みが大きくなっている。図7(a)では鏡面反射によるハイライト部分が数カ所みられるが、鏡面反射による悪影響は見られない。これは、鏡面反射が大きくなる θ の領域が意図したように距離計算の対象からうまく外れていることを示している。歪みの原因としては、以下のことが考えられる。

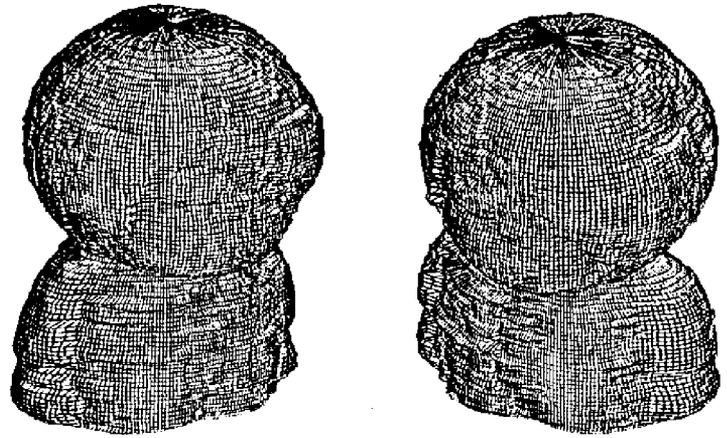
- ・広がり誤差
(照明光及びカメラは回転軸から約3m)
- ・相互反射を考慮していない
- ・画像入力時のノイズ



(b)EPI



(a)入力画像



(c)復元3次元形状

図7 復元結果

4. まとめ

対象物体の回転による反射光強度の変化から、物体の3次元形状を獲得する方法について考えた。そして、人形を用いて3次元形状の取込み実験を行なって、本手法の有効性を確認をした。また、完全ではないが、鏡面反射に対しても適

用できることを示した。

本手法は、照射光強度が既知であれば拡散反射係数が求められるので、3次元形状と共に光学的情報も取り込むことができる。

今後の課題としては、求めた断面形状の定量的な誤差の評価が必要である。また、形状がより複雑な物体への対応はもとより、測定条件の緩和についての検討が必要である。

文 献

- [1]VUYLSTEKE and A. OOSTERLINCK, "Range Image Acquisition with a Single Binary-Encoded Light Pattern," IEEE PAMI, vol.12, no.2, pp148-164, Feb.1990.
- [2]GONGZHU HU and GEORGE STOCKMAN, "3-D Surface Solution Using Structured Light and Constraint Propagation", IEEE PAMI, vol.11, no.4, pp390-402, April.1989.
- [3]服部数幸, 佐藤幸男, "スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダー", 信学論(D-II), vol.J76-DII, no.8, pp.1528-1535, August 1993.
- [4]井口征士, 佐藤宏介, "3次元画像計測," 昭晃堂 (1990)
- [5]jiang yu zheng, 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," 信学論(D-II), vol.J76-DII, no.6, pp.1114-1122, June 1993.
- [6]深川義裕, jiang yu zheng, 田中和明, 安部憲広, "ハイライトの検出による3次元形状の獲得", 信学論(D-II), vol.J79-DII, no.5, pp.719-726, May 1996.
- [7]Zheng, H. Kakinoki, K. Tanaka, and N.Abe, "Com

puting 3D Models of Rotating Objects from Moving Shading", 13th ICPR, Vol.1 pp. 800-804, 1996.