

等輝度線のステレオ視による曲面の復元

石山 豊* 富田 文明**

* スタンレー電気(株) 技術研究所

** 電子技術総合研究所

あらし ステレオは、三角測量の原理で受動的に距離情報を得る基本的な方法であり、人間の眼と同様に、将来のロボットに共通的な眼として利用されることが期待される。ステレオではまず、画像間で3次元空間の同じ部分を表す点の対を求めるいわゆる対応問題に直面する。これまで、エッジの対応を求める多くのアルゴリズムが開発されてきた。しかし、エッジベースステレオのもう1つの問題は、画像のエッジの部分の対応を求めることはできてもエッジの間の部分の対応を求めることができないことである。そこで、エッジの対応を求めた後、面のシェイディングの局所的な輝度勾配に基づく弛緩法を適用して、エッジの間を内挿する処理が行われている。これに対して、本論文では、面を直接的にステレオにより復元する方法として、シェイディングから検出される等輝度線をステレオの対応単位として用いる方法を提案する。

Recovery of Curved Surfaces from Stereo of Isoluminance Contours

Yutaka Ishiyama*

Fumiaki Tomita**

*Stanley Electric Co., Ltd. R&D

1-3-1 Edanishi, Midori, Yokohama, Kanagawa 225, Japan

**Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Abstract Stereo is expected to be the most common vision for intelligent robots in the future as it is for human beings. The first problem of stereo is to find corresponding points between the two images. Many algorithms have been proposed to solve this correspondence problem. Most of them use edge points, especially zero-crossings of the second derivatives of images, for units of correspondence. Another problem of edge-based stereo is that it cannot afford surface information between edges. Then, a surface is interpolated between edges by relaxation based on local intensity gradients of shading on the surface. This paper, on the other hand, presents a method to directly recover curved surfaces by stereo using isoluminance contours detected in shading for units of correspondence.

1 まえがき

ステレオは、三角測量の原理で受動的に距離情報を得る基本的な方法であり、人間の眼と同様に、将来のロボットに共通的な眼として利用されることが期待される。ステレオではまず、画像間で3次元空間の同じ部分を表す点の対を求めるいわゆる対応問題に直面する。これまで、対応問題を解決するために多くのアルゴリズムが開発されてきた⁽¹⁾。それらを粗密解析法、動的計画法、高次特徴法のいずれかに大別することができる。粗密解析法は、階層的に分解能の異なる画像を用意し、対応の容易な低分解能の画像間の対応を先に求めて、その対応結果を高分解能の画像間の対応の予測に用いる方法で、最も多用されている方法である^{(2)~(5)}。動的計画法は効率のよい総当たり探索法と言える^{(6)・(7)}。高次特徴法は、他の方法が通常エッジ点の対応を求めるのに対して、対応単位として少数で多くの情報を持つ高次特徴（例えば、エッジ点を連結したセグメント）を用いて、探索空間を小さくし、曖昧な対応を大幅に減少させる方法である^{(8)~(10)}。

エッジベースステレオのもう1つの問題は、画像のエッジの部分の対応を求めることはできてもエッジの間の部分の対応を求めることができない、すなわち、物体の境界線を復元できても面を復元できないのである。そこで、エッジの対応を求めた後、エッジの間を内挿（補間）する処理が行われるが、オクルージョンを考慮して偽の面を生成しないようにすることが肝要である。これまで、一様な平面に対しては、多面体の幾何表現（境界表現）に基づいて面を定める方法が開発されている⁽¹¹⁾。テクスチャ面に対しては、直接的に局所的相関を計算して対応を求める方法が開発されている⁽¹²⁾。しかし、シェイディング面に対しては、局所的な輝度勾配に基づく弛緩法を適用する間接的な方法しか開発されていない⁽¹³⁾。この他、ステレオではないが、シェイディング面を復元する方法として、Shape-from-Shading⁽¹⁴⁾やその拡張版であるフォトメトリックステレオ⁽¹⁵⁾が知られ

ている。しかし、これらは、光源と物体の材質を限定した上でその反射率マップを用意しなくてはならないし、面の法線方向しかわからないので、面の凹凸情報を予め与えておき、やはり弛緩法を適用するなど多くの制限がある。

そこで、本論文では、シェイディング面を直接的にステレオにより復元する方法として、シェイディングから検出される等輝度線をステレオの対応単位として用いる方法を提案する。

2 画像の調整

基準となるステレオカメラの構成を図1に示す。左右2台のカメラの座標系は互いに平行であり、各カメラの投影中心 O_L と O_R を通る直線を x 軸、カメラの光軸を z 軸、 x 軸と z 軸に直交する方向を y 軸とする。いま、各カメラの z 軸に直交し、投影中心から f の距離にある画像への3次元空間上の1点 P の投影像の画像座標を $P_L(X_L, Y_L)$ 、 $P_R(X_R, Y_R)$ とすると、次の関係が成立する。

$$X_L > X_R$$

$$Y_L = Y_R$$

これは、一方の画像上の1点の他方の画像上での対応点は、同じ走査線の半直線上に存在することを表す。以下、これをエピソード条件と呼ぶ。しかし、実際のカメラの構成は、基準カメラのようにはなっていないので、カメラキャリブレーションによって得られるカメラパラメータを用いて、実際のカメラの画像を基準カメラの画像に変換する。

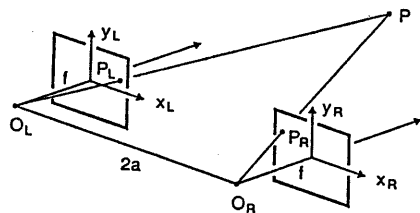


図1 基準ステレオカメラ構成

また、各カメラの光学的特性も異なるので、同じ光の強度に対して同じ輝度を与える輝度変換表を作成し、実際のカメラの画像の各点の輝度を調整する。

図2に、1方向から照明した石膏像（但し、必ずしもこのように能動的に照明する必要はない）の調整後の画像を示す。

3 等輝度線の抽出

いま、画像の輝度のダイナミックレンジを[1,

$t_{\max}$]とする。各画像から各輝度 $t = 1 \sim t_{\max}$ の等輝度線を次の手順によって求める。

- 1) 画像から輝度 t 以上の領域を抽出した後（図3(a)、各領域に収縮（1回）・膨張（3回）・収縮（2回）の処理を施して、領域の境界線のノイズ除去を行なう（図3(b)）。
- 2) 各領域をラベル付けすると同時に、各領域を包含する（同様にして得られる）輝度 $t-1$ 以上の領域のラベルを調べ、領域の包含関係を表す木構造を作成する（図4）。

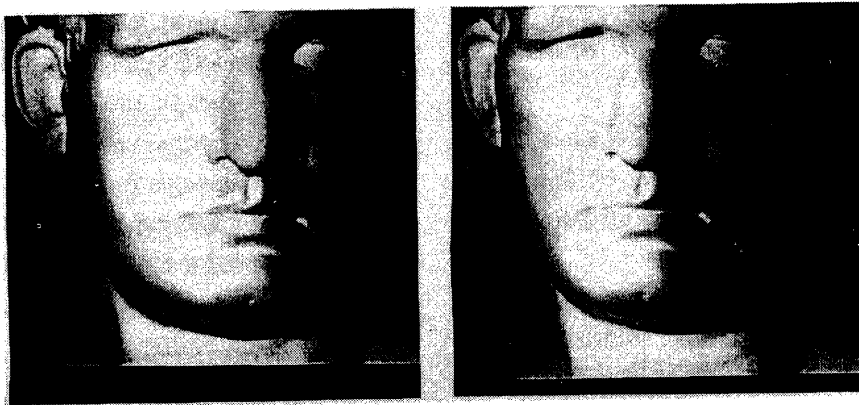


図2 石膏像のステレオ画像（第1光源）

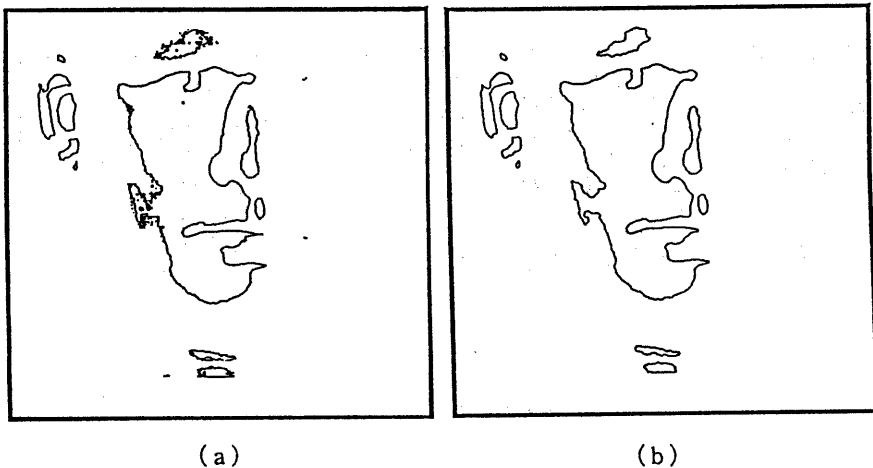


図3 一定輝度以上の領域の平滑化

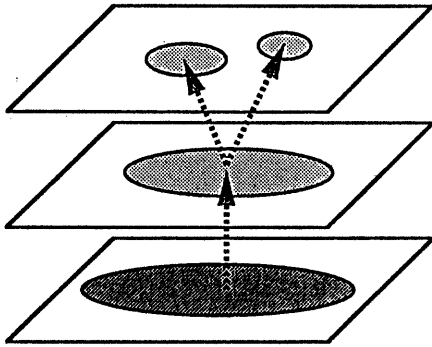


図4 一定輝度以上の領域の包含関係

- 3) 各領域から（同様にして得られる）輝度 t + 1 以上の領域の部分を除く。その結果得られる領域を等輝度領域、領域の境界線を等輝度線とする（図5）。
- 4) 各等輝度線に対して、領域を右側に見るように方向付けする。すなわち、外周境界線は右回り、内周（穴）境界線は左回りに表現される。そして、等輝度線上の各点に対して、局所的に2次曲線を当てはめて、その座標と傾きを与える。

4 等輝度線の対応

各輝度 t の等輝度線の対応を次の手順によって求める。

- 1) まず、等輝度領域間でラフな対応を求める。
左右画像の等輝度領域 R_L と R_R が対応する必要条件は以下の通りである。
 - ・各領域を包含する輝度 $t-1$ 以上の領域の等輝度線が対応する。
 - ・領域内に、エビボラ条件を満足する点が存在する。実際には、この判定を簡略化するために、領域の外接長方形の頂点の座標を利用する。いま、領域 R の点の x 座標の範囲を $[Xmin(R), Xmax(R)]$ 、 y 座標の範囲を $[Ymin(R), Ymax(R)]$ とすると、

$$Xmin(R_L) < Xmax(R_R)$$

$$Ymin(R_L) < Ymax(R_R)$$

$$Ymax(R_L) > Ymin(R_R)$$

- 2) 次に、等輝度線間で対応を求め、等輝度線上の対応点の視差を求める。2つの等輝度線が対応する必要条件は以下の通りである。
 - ・等輝度領域が対応している。
 - ・等輝度線に沿って、エビボラ条件を満足し、かつ、傾きが類似する点が連続的に存在する（後述するオクルージョンの場合を除く）。

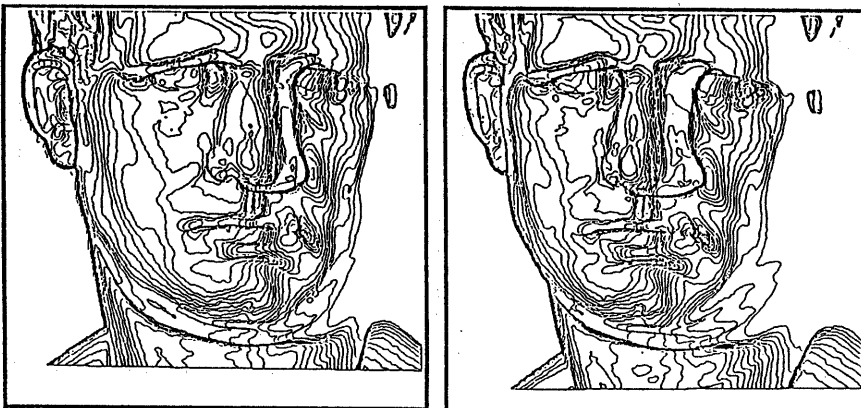


図5 石膏像の等輝度線

最後に、等輝度線の間に存在する点の視差を補間する。補間には、各点から水平または垂直方向に最も近い等輝度線を利用する。図6は、以上の処理により得られた視差分布図である。

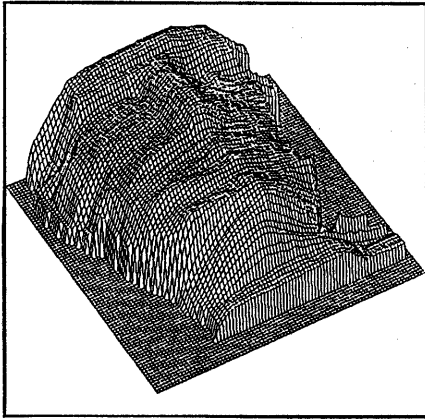


図6 石膏像の視差分布図

5 オクルージョンの検出

オクルージョンのために、ステレオの一方のカメラでは見えても他方のカメラでは見えない部分ができる。そして、このような部分をオクルージョンとして検出できないと、偽の面を生成する原因となる。等輝度線を利用すると、次のようにオクルージョンを検出することができる。

オクルージョンが生じると、図7のように、一方の画像の同じエピポーラ線上で離れている2つの等輝度線の部分 ($A_L B_L$ と $C_L D_L$) が、他方の画像では隣接するようになる ($A_R B_R$ と $C_R D_R$)。このとき、例えば、 A_L と A_R の視差を d_A 、 D_L と D_R の視差を d_D とする。もし $d_A < d_D$ ならば、 CD が遮蔽輪郭線であり、左画像の少なくとも $A_L B_L C_L D_L$ で囲まれた部分は右画像では見えない、したがって、距離を測定できないオクルージョン部分であることが判明する。勿論、 $A_L B_L$ と $A_R B_R$ は対応しない。図8の画像の等輝度線から検出されたオクルージョンを図9に示す。

従来の微分によるエッジを利用するステレオでは、2眼であると、エッジが曲面の見かけの遮蔽輪郭線を表している場合には、誤った距離を出力することになる。そこで、3眼（以上）にすることによって、遮蔽輪郭線の位置を推定する方法が提案されている⁽¹⁶⁾。ところが、等輝度線をステレオに利用すると、2眼でも、曲面の遮蔽輪郭線の距離を測定することができ、また、それによるオクルージョンを検出することができる。

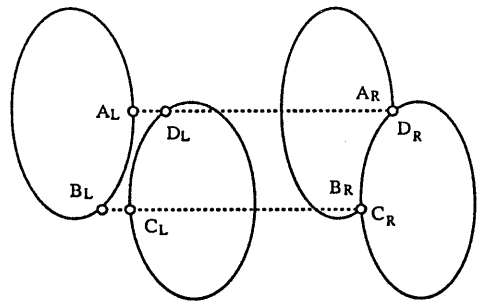
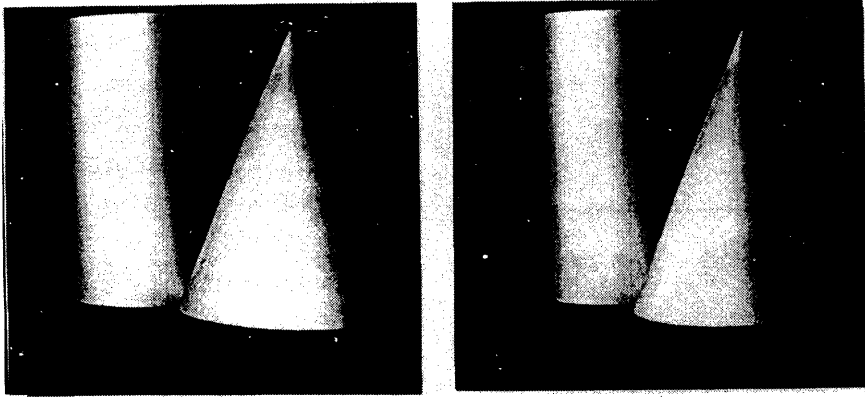


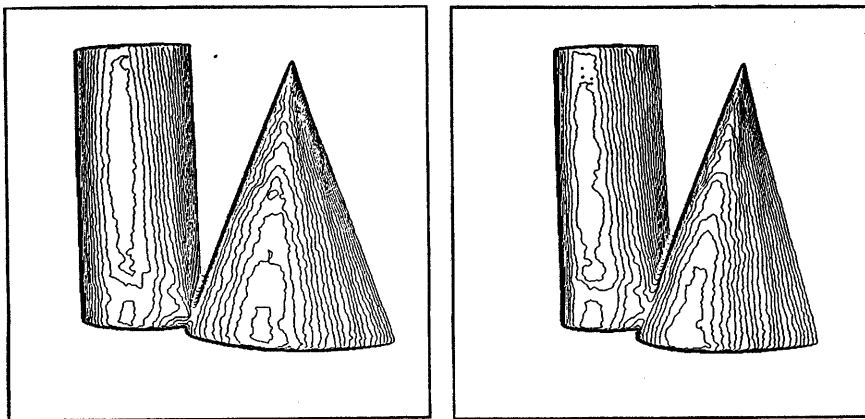
図7 オクルージョン

6 複数光源の利用

ステレオ、Shape-from-Shading、フォトメトリックステレオにかかわらず、シェイディングから曲面を復元する方法が有効であるためには、対象とする面が完全なランバート面（乱反射面）であることが前提である。しかし、現実に観測する物体の面は完全な乱反射面ではなく、多少の正反射成分を含むことが多い。ステレオの場合には、正反射成分のある部分はエピポーラ条件が成立しなくなるので、誤った対応から誤った距離を得ることになる。この正反射問題は、複数光源を利用することにより、解決することができる。但し、正反射成分は、正反射の起こる角度から離れるにしたがって急激に減少する、すなわち、たとえ正反射成分が存在しても、画像の最も明るい部分にのみ影響すると仮定する。



(a)



(b)

図8 円柱と円錐：(a) ステレオ画像、(b) 等輝度線

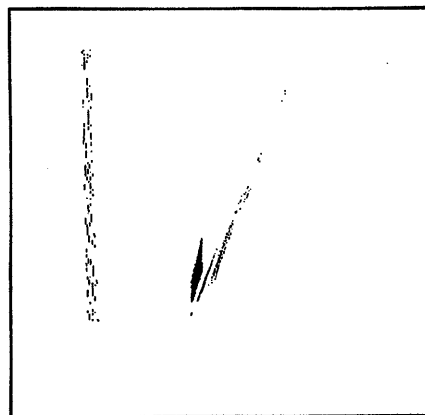


図9 オクルージョンの検出 (左画像)

いま、2つの光源を用い、第1の光源の照明による画像 I_{1L} と I_{1R} （図2）から得られた視差分布図を D_1 、第2の光源の照明による画像 I_{2L} と I_{2R} （図10）から得られた視差分布図を D_2 とする。2つの光源の照明方向が異なるので、画像の明るい部分の位置も異なっている。そこで、最終視差分布図 D^* として、次のように、各点 (i, j) 毎に、 D_1 と D_2 のうち、対応する画像の輝度がダイナミックレンジの中間値（ $t_{max}/2$ ）に近い方の視差を選ぶようにすれば、画像の非常に明るい部分（正反射成分が存在するかもしれない）または非常に暗い部分（等輝度線が得られない）の疑わしい視差を避

けることができる。

if $|I_1(i, j) - t_{max}/2| < |I_2(i, j) - t_{max}/2|$,
 then $D^*(i, j) = D_1(i, j)$
 otherwise,
 then $D^*(i, j) = D_2(i, j)$

図11は、このようにして得られた石膏像の最終視差分布図である。図6の場合と比べて、石膏像の右の頬の部分や左半面の部分が改善されているのがわかる。また、図12は、石膏像の3次元復元の後、画像の各点で計算した面の法線方向を示す。



図10 石膏像のステレオ画像（第2光源）

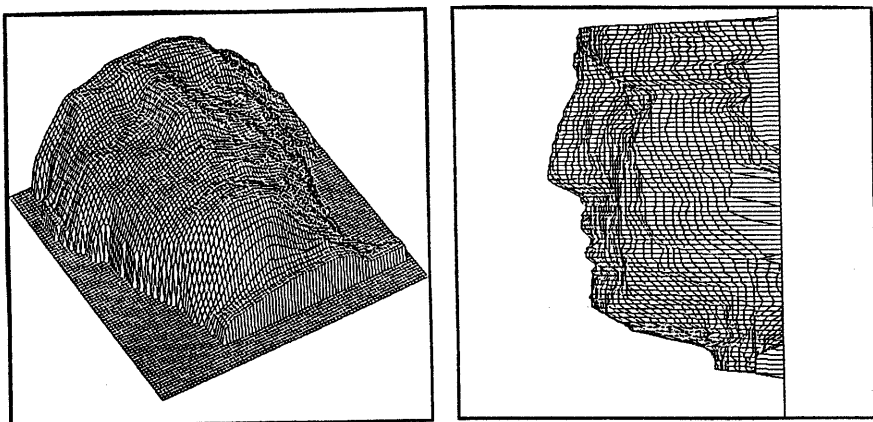


図11 石膏像の視差分布図（複数光源）

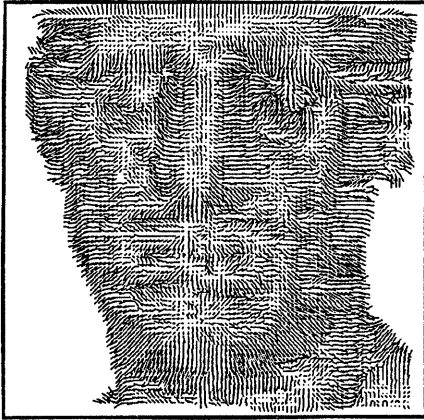


図 1.2 石膏像の法線分布図

7 あとがき

等輝度線を対応単位として用いる方法は、ステレオの対応アルゴリズムとしては高次特徴法に属する。等輝度線の対応には、輝度情報の他、閉ループであるので、等輝度線上の各点の傾きと対応の連続性がエッジの条件とともに利用できること、さらに、等輝度線間の包含関係が非常に強力な拘束として利用できる。したがって、その探索空間は小さく、対応は安定している。そして、オクルージョンを明確に検出することができる。

また、たとえ様な平面、テクスチャー面、および、シェイディング曲面が混在している場合でも、それぞれを部分的に同定することはでき、それぞれに応じた処理を適用すればよいので、問題はない。今後は、曲面の認識に応用する予定である。

参考文献

- (1) Barnard, S.T. and Fischler, M.A.: Computational stereo, Computing Surveys, 14, pp.553-572 (1982).
- (2) Baker, H.H.: Edge-based stereo correlation, Proc. Image Understanding Workshop, pp.168-175 (1980).
- (3) Lucas, B.D. and Kanade, T.: An effective image registration technique with an application to stereo vision, Proc. Image Understanding Workshop, pp.121-130 (1981).
- (4) Grimson, W.E.L.: Computational experiments with a feature based stereo algorithm, IEEE Trans., PAMI-7, 1, pp.17-34 (1985).
- (5) Weng, J., Ahuja, N., and Huang, T.: Two-view matching, Proc. 2nd ICCV, pp.64-73 (1988).
- (6) Baker, H.H. and Binford, T.O.: Depth from edge and intensity based stereo, Proc. 6th IJCAI, pp.631-636 (1979).
- (7) Ohta, Y. and Kanade, T.: Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming, IEEE Trans., PAMI-7, 2, pp.139-154 (1985).
- (8) Medioni, G. and Nevatia, R.: Segment-based stereo matching, CVGIP, 31, pp.2-18 (1985).
- (9) Ayache, N. and Lustman, F.: Fast and reliable passive trinocular stereo vision, Proc.1st ICCV, pp.422-427 (1987).
- (10) 富田, 高橋: ステレオ画像の境界表現に基づく対応, 信学論 (D), J71-D, 6, pp.1074-1082 (1988).
- (11) 杉本, 高橋, 富田: ステレオによるシーンの解釈, 情処研報, CV-55-4 (1988).
- (12) 佐藤, 富田: テクスチャー領域の両眼立体視, 情処研報, CV-54-5 (1988).
- (13) Grimson, W.E.L.: Binocular shading and visual surface reconstruction, CVGIP, 28, 1, pp.19-43 (1984).
- (14) Horn, B.K.P.: Understanding image intensities, Artificial Intelligence, 8, pp.201-231 (1977).
- (15) Woodham, R.J.: Analyzing images of curved surfaces, Artificial Intelligence, 17, pp.117-140 (1981).
- (16) 植芝, 富田: 水平三眼ステレオによる遮蔽輪郭線からの曲面形状復元, 情処研報, CV-70-2 (1991).