

カラーフォトメトリックステレオ法による顔の3次元形状計測

一丸 勇二[†] 木村 篤史^{††} 佐治 斉[†] 中谷 広正^{†††}

[†]静岡大学 工学部 ^{††}静岡大学大学院 理工学研究科 ^{†††}静岡大学 情報学部

〒432-8561 静岡県 浜松市 城北 3-5-1

Phone 053-478-1380

E-mail saji@cs.inf.shizuoka.ac.jp

動きを持つ顔の3次元形状を被験者に負担をかけずに計測する方法を提案する。本手法は赤フィルターを付けた2光源と青フィルターを付けたスリットパターンプロジェクター、およびカラー CCD カメラを用いる。赤フィルターを付けた2光源を順番に高速に切替えて光線を顔面に照射すると同時に、青フィルターを付けたプロジェクターから常時スリット光を顔面に照射する。各光線を照射された顔面の画像を CCD カメラにより撮影し、取得した2枚のカラー画像を色情報を用いて陰影画像とスリット画像とに分離する。得られた2枚の陰影画像から、フォトメトリックステレオ法を用いて、顔面の各部分における法線ベクトルを計算する。スリット画像からは、光切断法を用いてスリット上の3次元形状を求める。最後に両者の結果を統合することで、顔の3次元形状を算出する。

キーワード： 3次元形状, フォトメトリックステレオ法, 光切断法

Measuring Three-Dimensional Shapes of a Human Face Using Color Photometric Stereo Method

Yuji Ichimaru[†], Atsushi Kimura^{††}, Hitoshi Saji[†], and Hiromasa Nakatani^{†††}

[†]Faculty of Engineering, Shizuoka University

^{††}Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

^{†††}Faculty of Information, Shizuoka University

Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan.

We propose a new method for measuring three dimensional facial shapes. This method uses two light sources with red filters and a slit pattern projector with a blue filter. The red light rays are projected onto a face by switching the two light sources at high speed. Meanwhile, the multiple blue light stripes are projected onto the face by the slit pattern projector at all times. First, the images of a human face are taken by the color CCD camera. The two facial images projected by the red light rays and the blue light stripes are separated into the two shading images and slit image using the color information. Next, the normal vectors at points on a face are computed from the two shading images using the photometric stereo method. The 3D coordinates of the points on the light stripes are measured from the slit image using the stereo vision algorithm. Finally, all the computed results are blended and the 3D shape of the face is computed.

Key words: 3D shape, photometric stereo method, light striping

1 はじめに

人体において、顔はその人の個性や感情の手がかりを得るための最も重要な部分である。近年、ビデオカメラやコンピューターを用いた自動かつ非接触な顔面解析システムがコンピュータビジョン・CG・ヒューマンインタフェースなどを始めとする多くのアプリケーション [1, 2, 3] に使われ、正確な顔面解析を行うことが要求されている。そのため、顔の3次元形状測定を正確に行うことは非常に重要である。

非接触で対象物の3次元情報を得る方法は受動的手法と能動的手法に大別される。受動的手法は3次元シーンが投影された画像からもとのシーンを復元することにより、対象物の3次元情報を得る手法である。代表的な方法として、1台のカメラを用いて対象物を撮影した画像から焦点距離により、3次元情報を得る単眼視法 [4],[5]、また、2台のカメラを用いて対象物を撮影し、3角測量の原理を用いて3次元情報を得る両眼ステレオ法 [6],[7] がある。さらに、両眼ステレオ法におけるオクルージョン部分を計測する手法として、3台以上のカメラを用いる多眼ステレオ法やカメラの台数を増加させる代わりにカメラ自身を移動させる運動ステレオ法が提案された。しかし、これらの手法は、複数画像間における、対象物の対応づけの問題が存在する。このような問題に対して、近年、動的計画法による対応づけや、点ではなく線や面といった大局的な対応づけなど、様々な解決策が提案されているが、実用に至ったシステムはない。

一方、能動的手法は、対象物にレーダーや光を照射し、レーダーの反射や光の投影位置から3次元情報を得る手法である。代表的な手法として、両眼ステレオ法における片方のカメラを発光源で置き換えて、3次元情報を得る光切断法 [8] がある。光切断法には、投光するパターンの種類により幾つかの方法がある。スリット光を投光するスリット光切断法、スポット光を投影するスポット光投影法、1回あるいは何回かのパターン光を投影する面パターン光投影法である。両眼ステレオ法では左右画像の対応づけの問題があるが、光切断法ではその問題を本質的に回避することができる。しかし、これら

の手法は、高速に光源を対象物全体にスキャンさせる必要があり、その対象が人間であるならば、被写体に変な負担がかかる。

近年、これらの欠点を補い、より簡単に3次元形状を計測する能動的手法が提案された。物体の形状とそれが投影された明るさの関係から求められた法線ベクトルを計算し、3次元形状を算出するフォトメトリックステレオ法である [9],[10]。この手法は、短時間で対象物の3次元情報を得ることができる。一方、対象物の条件として、物体表面は完全拡散面ではなくはならず、人の顔を正確に計測することはできない。そこで、精度向上のために、フォトメトリックステレオ法にスリットパターンプロジェクターを用いた、フォトメトリックステレオ法と光切断法を統合した手法が提案された [11]。この手法は3光源とスリットパターンプロジェクターを用いている。

本論では、被写体に負担をかけず、高速に顔の3次元情報を得る新たな手法を提案する。本手法は赤フィルターを付けた2光源(可視光源)と青フィルターを付けたスリットパターンプロジェクター(可視光源)、および分光感度特性が既知であるカラー CCD カメラを用いる。2光源は順番に切り替わり、スリットパターンプロジェクターは常射させ、カラー CCD カメラを用いて撮影する。このようにして得られた2枚の画像から顔の3次元情報を得る。

2 計測手法

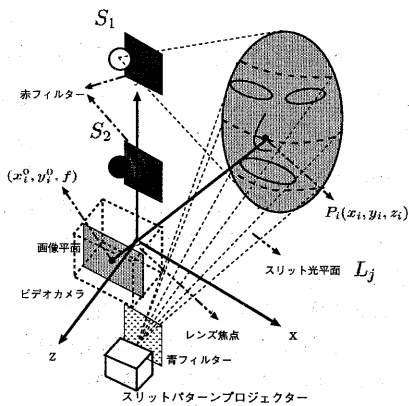
提案した3次元計測法の装置及び、測定のために用いる3次元直交座標系を図1(a),(b)に示し、各装置の設定条件を以下に記す。

- 分光感度特性が既知であるカラー CCD カメラを顔の前方に置く。
- 座標系の原点はカメラレンズの焦点とする。
- x軸は画像平面の横軸に平行で、y軸は縦軸に平行とする。
- 2光源(S_1, S_2) とスリットパターンプロジェクターはy軸に平行な1本の直線上に配置する。

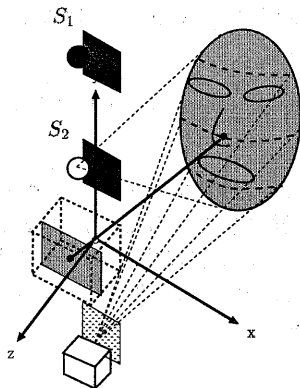
以上の条件のもとで、以下の6段階の処理を行う。

1. 色情報を用いた画像分離
2. 顔領域抽出
3. 顔領域における法線ベクトルの計算
4. スリット領域の3次元座標測定
5. 法線ベクトルの積分による形状算出
6. 重複領域の形状融合

次に各処理の詳細について記す。



(a) 光源 S_1 ・プロジェクターにより照射された顔面



(b) 光源 S_2 ・プロジェクターにより照射された顔面

図1 顔の3次元形状計測装置

2.1 色情報を用いた画像分離

分光感度特性が既知である CCD カメラを用いて撮影した画像を、光源によって照射された画像とスリットパターンプロジェクターによって照射された画像とに分離する。

2.1.1 カラー CCD カメラの分光感度特性

本装置に用いたカラー CCD カメラの分光感度特性を (図2) に示す。分光感度特性とは、どの帯域の光を赤・緑・青としてとらえるかを表した特性である。

この特性を考慮して、光源が照射する光を赤成分、スリットパターンプロジェクターが照射する光を青成分としてカラー CCD カメラが検知できるように、光の波長を制御する赤・青フィルターを選択する。

以上のように選択された、赤フィルターを2光源の前面に、青フィルターをスリットパターンプロジェクターの前面に付ける。CCD カメラは2光源により照射された部分を赤成分、スリットパターンプロジェクターによって照射された部分を青成分としてとらえる。ここで、赤成分としてとらえた画像を陰影画像、青成分としてとらえた画像をスリット画像と定義する。

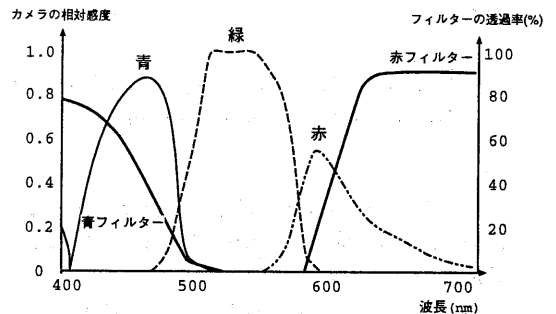


図2 カラー CCD カメラの分光感度特性

2.1.2 陰影画像とスリット画像への分離

まず、赤フィルターを付けた2光源 (S_1, S_2) 及び、青フィルターを付けたスリットパターンプロジェクターを用いて顔面を照射し、その画像を CCD カメラを用いて撮影を行う。この時、2光源 (S_1, S_2) は順番に高速に切り替わり、ス

リットパターンプロジェクターは常に照射している。

次に、得られた2枚の画像を光源 S_1, S_2 に照射された陰影画像と、スリット画像とに分離する。

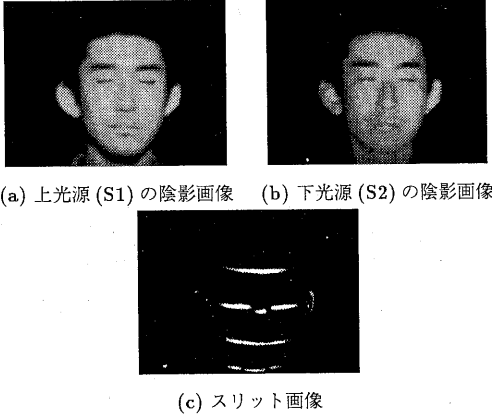


図3 上光源陰影画像, 下光源陰影画像, スリット画像とに分離された画像

光源 S_1 とスリットパターンプロジェクターにより照射された顔面の画像 $I_{S_1P}(x, y)$ と、光源 S_2 とスリットパターンプロジェクターにより照射された顔面の画像 $I_{S_2P}(x, y)$ を以下の式で定義する。

$$I_{S_1P}(x, y) = (R_{S_1P}(x, y), G_{S_1P}(x, y), B_{S_1P}(x, y)) \quad (1)$$

$$I_{S_2P}(x, y) = (R_{S_2P}(x, y), G_{S_2P}(x, y), B_{S_2P}(x, y)) \quad (2)$$

ここで、 $R_{S_iP}(x, y), G_{S_iP}(x, y), B_{S_iP}(x, y)$ ($i = 1, 2$) は画像 $I_{S_iP}(x, y)$ の赤成分・緑成分・青成分画像である。

次に、画像 $I_{S_1P}(x, y), I_{S_2P}(x, y)$ から分離した S_1, S_2 の陰影画像を $I_{S_1}(x, y), I_{S_2}(x, y)$ とし、スリット画像を $I_P(x, y)$ とすると

$$I_{S_1}(x, y) = R_{S_1P}(x, y) \quad (3)$$

$$I_{S_2}(x, y) = R_{S_2P}(x, y) \quad (4)$$

$$I_P(x, y) = B_{S_1P}(x, y) = B_{S_2P}(x, y) \quad (5)$$

である。

2.2 顔領域抽出

2枚の陰影画像とスリット画像上で顔領域抽出を行う。処理の手順を以下に示す。

1. 2枚の各陰影画像において、領域のラベリング処理を行い、得られた領域の内、最大面積の領域を抽出する。
2. 得られた領域の穴埋め処理を行う。
3. 2枚の画像和をとることによって、共通の顔領域を示すマスク画像を作成する。
4. マスク画像と、2枚の各陰影画像とスリット画像との画像積をとることにより、各画像における顔領域を抽出する。

2.3 顔領域における法線ベクトルの計算

2枚の陰影画像にフォトメトリックステレオ法を用いて、顔領域の各点における法線ベクトルを求める。従来のフォトメトリックステレオ法は3個の光源を必要としていたが、本方法では、法線の測定処理を高速に行うため、光源は2個 (S_1, S_2) とする。

2枚の陰影画像から、完全拡散リフレクタンスマップを解くことにより、顔面上の各々の法線ベクトルにおける y 要素を求める。

この方法は短時間で顔面形状についての高密度な情報を求められる。

まず、顔面上 (x, y, z) における法線ベクトル $N(x, y)$ を

$$N(x, y) = (N_x(x, y), N_y(x, y), 1) \quad (6)$$

と定義する。

次に、光源を顔面の大きさに比例して十分離れた距離に設置すると仮定すると、顔面上 (x, y, z) における光源方向は一意に決定でき、顔面上 (x, y, z) から光源 (S_1, S_2) への方向ベクトル S_1, S_2 を、

$$S_1 = (0, S_{1y}, 1), S_2 = (0, S_{2y}, 1) \quad (7)$$

と定義する。

人間の顔面を完全拡散面と仮定すると、以下の式 (8), (9) がリフレクタンスマップとして得られる。

$$L_{S_1} = I_{S_1} R \cos \theta_1 \quad (8)$$

$$L_{S_2} = I_{S_2} R \cos \theta_2 \quad (9)$$

ここで、 I_{S_k} は光源 S_k ($k = 1, 2$) の明るさ、 L_{S_k} は光源 S_k により照射され、得られた画像上 (x, y) における輝度値、 R は反射係数、 θ_k は光源ベクトル S_k と法線ベクトル N とのなす角である。以上より

$$L_{S_1} = I_{S_1} R \frac{S_{1y} N_y + 1}{\sqrt{S_{1y}^2 + 1} \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + 1}} \quad (10)$$

$$L_{S_2} = I_{S_2} R \frac{S_{2y} N_y + 1}{\sqrt{S_{2y}^2 + 1} \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + 1}} \quad (11)$$

となり、式(10),(11)より $N_y(x, y)$ は

$$N_y(x, y) = \frac{1 - \alpha}{S_{2y} \alpha - S_{1y}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{L_{S_1} I_{S_2} \sqrt{S_{1y}^2 + 1}}{L_{S_2} I_{S_1} \sqrt{S_{2y}^2 + 1}}$$

と求まる。

2.4 スリット領域の3次元座標測定

顔面の3次元計測の基準となる領域の座標を求める。そのための手法として、本手法は光切断法を用いる。

スリットパターンプロジェクターを用いて幾つかのスリット光を顔面上に投射 [12][13] し、その領域上 (図3(c)) の3次元座標を求める。測定のためのアルゴリズムを以下に示す。なお、カメラの撮影方向は、スリットパターンプロジェクターの照射方向とは異なる方向とする。

1. スリット光平面の計算
2. スリット領域抽出
3. 三角測量を用いたスリット領域の3次元形状計測

2.4.1 スリット光平面の計算

まず、既知パターン上の点を測定することにより、スリット光平面と、カメラ位置との関係を求める。ここで求めたスリット光平面 L_j は以下の式(13)で表される。

$$x + l_{jy}y + l_{jz}z + d_j = 0 \quad (j = 1, 2, 3) \quad (13)$$

2.4.2 スリット領域抽出

スリット画像上で、 y 軸への射影画像と x 軸への射影画像を求め、各スリットが画像上で存在している領域を求める。次に各スリット領域の各 x 座標ごとに、閾値処理により、最も輝度値の高い画素を抽出し、これを連結させることでスリットの形状を求める。抽出された形状を各スリットのスリット線分と呼ぶ。

2.4.3 三角測量を用いたスリット部分の3次元形状計測

スリット線分とスリット平面との関係から、三角測量の原理より、顔領域上でスリットパターンで照射された部分の3次元情報を得る。

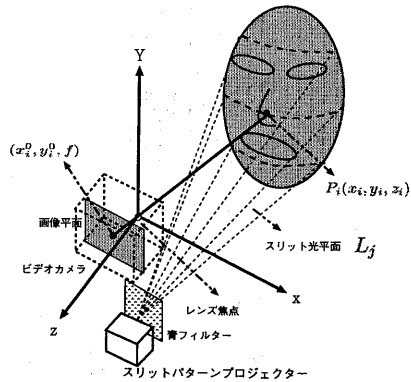


図4 スリット部分の3次元座標

図4に示すように、スリット光平面 L_j と顔面との交点を $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ と定義した時、 P_i は式(13)と、以下の式より求められる。

$$x_i = \frac{x_i^0}{f} z_i \quad (14)$$

$$y_i = \frac{y_i^0}{f} z_i \quad (15)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離、 (x_i^0, y_i^0) は交点 P_i とカメラ焦点を通る直線が画像平面と交差する点である。

2.5 法線ベクトルの積分

フォトメトリックステレオ法により求められた法線 $N_y(x, y)$ を、スリット上の点 P_i を基準に積分し、3次元形状を求める。

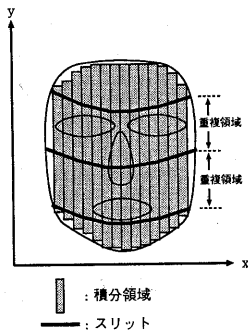


図5 顔の領域分割

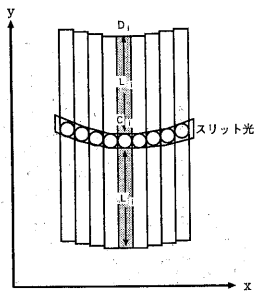


図6 積分領域

まず、各積分領域として、顔領域を xy 平面上に投影し、細かな領域に分割する(図5)。

図6は積分領域 D_i を示す。 C_i は xy 平面上に P_i を写像した点である。領域 D_i は C_i を中心とする y 軸に平行な2次元領域であり、その長さは $2L_i$ である。領域 D_i における (x, y) の z 座標 $Z_i(x, y)$ は以下の式で表される。

$$Z_i(x, y) = \begin{cases} Z_i(x_i, y_i) - \int_{y_i}^y N_y(x_i, Y) dY & (x = x_i) \\ 0 & (x \neq x_i) \end{cases} \quad (16)$$

領域 D_i において、式(16)に示したように、スリット上の点 C_i を基準に法線 $N(x, y)$ を積分することで3次元形状を求める。

2.6 重複領域の形状融合

重複領域における形状融合を行う。重複領域(図5)とは2本のスリットで挟まれた領域を示しており、その領域における顔の形状は、各々のスリットを基準に法線を積分した結果を融合することにより求める(図7)。ここで融合計算には以下に示す融合関数 h_i を用いる[14]。

$$h_i(x, y) = \begin{cases} a \left(\frac{L_i - |y - y_i|}{L_i} \right) & (|y - y_i| < L_i \text{ and } x = x_i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (17)$$

ここで、

$$a(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ \frac{b(t)}{b(t)+1(1-t)} & (0 < t < 1) \\ 1 & (1 \geq t) \end{cases}, \quad b(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ e^{-\frac{1}{t}} & (0 < t) \end{cases}$$

L_i は2本のスリットで挟まれた融合領域の y 方向の長さである。

融合された面 $Z(x, y)$ は

$$Z(x, y) = \frac{\sum h_i(x, y) Z_i(x, y)}{\sum h_i(x, y)} \quad (18)$$

と計算される。ここで、 $Z_i(x, y)$ は領域 D_i における点 (x, y) の z 座標である。

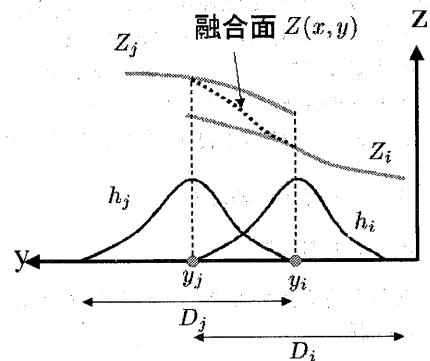


図7 融合面

3 実験結果

本論で提案した3次元計測法を、カラー CCD カメラを用いて撮影した画像に適用し、顔の3次元形状計測を行った。

3.1 実験機材

表1に本装置に用いた機材の一覧を示す。

表1 機材一覧

機材	型
カラー CCD カメラ	sony XC-003
ビデオデッキ	sony WV-D10000
赤フィルター	Kenko R-60
青フィルター	Kenko B-390
スリットパターンプロジェクター	FUJINON FM40

3.2 実験結果

図8に本装置を用いて撮影した原画像を示す。画像サイズは320×240画素である。図9が、計算された3次元形状である。なお、本手法では、1/15秒ごとに上光源・下光源が切り替わり、各々照射された画像を光源に同期してサンプルすることにより、顔の3次元形状を1/15秒ごとに求めることが可能である。

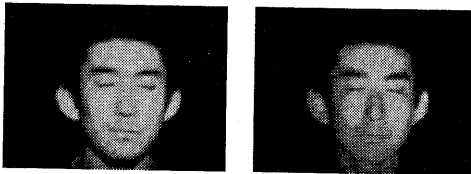
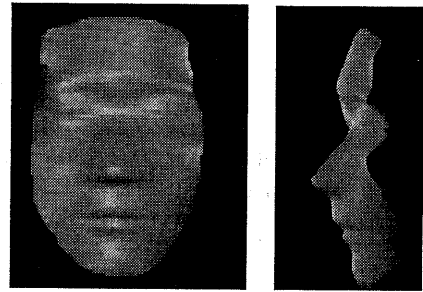


図8 原画像 ((a)光源 S_1 とプロジェクターにより照射された顔面, (b)光源 S_2 とプロジェクターにより照射された顔面)

4 精度評価

本手法の有効性を検証するために、計測精度が高いステレオ法との比較評価を行った。被写体の横から撮影した画像をもとに算出した顔の3次元形状と、本手法により求めた顔の3次



(a) 正面顔 (b) 右顔

図9 3次元計測結果

元形状との比較を行うことにより、精度評価を行った。図10に、鼻筋にそって y 方向に計測した2つの方法の z 座標値の分布を示す。顔の上下端においては精度が悪く7mm程度の誤差が生じたが、スリットにはさまれた顔の内部では3mm以内に誤差が抑えられ、ほぼ顔形状が正しく復元されている。

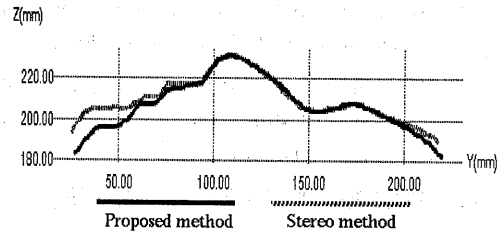


図10 提案手法とステレオ法との比較

5 まとめと将来研究

本論では、顔の3次元形状計測のための新たな手法を提案した。赤フィルターを付けた2光源と青フィルターを付けたスリットパターンプロジェクター、および分光感度特性が既知であるカラー CCD カメラを用い、顔の3次元形状を計測した。本手法では、光源を高速に切替えることにより、1/15秒ごとの顔の計測が可能である。またレーザ光などの特殊光を利用していないので、被写体への負担も軽減されている。今後は、動作中における各瞬間の顔形状の計測に適用し、人物識別・表情認識・アニメーション生成への応用を検討している。

参考文献

- [1] 池田正樹, 田中弘美, “3次元曲率の球体相関による顔認識,” 信学技法, PRU95-193, pp.29-36, 1993.
- [2] 高田聡, 小池秀樹, 石井健一郎, “顔の向きによらない人物識別の評価,” 信学技法, PRU93-79, pp.23-29, 1993.
- [3] 太田寛志, 佐治斉, 中谷広正, “顔面筋に基づいた顔面構成要素モデルによる表情変化の追跡,” 信学論 (D-II), vol. J81-D-II, no.1, pp.198-202, Jan 1998.
- [4] B. Horn and M. Brooks, “The variational approach to shape from shading,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol.33, no.2, pp.174-208, 1986.
- [5] B.K.P Horn and M.J. Brooks, ed., *Shape from Shading*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [6] S. Barnard and M. Fischler, “Computational stereo,” *ACM Computing Surveys*, vol.14, no.4, pp.553-572, Dec 1982.
- [7] 黒川隆夫, “顔と人体の3次元計測およびデータベース,” 映像情報メディア学会誌, vol.51, no.8, pp.1124-1127, 1993.
- [8] 谷内田正彦, ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990.
- [9] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical Engineering*, vol.19, no.1, pp.139-144, 1980.
- [10] H. Saji, H. Hioki, Y. Shinagawa, K. Yoshida and T. Kunii, “Extraction of 3d shapes from the moving human face using lighting switch photometry,” *Computer Animation 92*, pp.69-86, 1992.
- [11] H. Saji, Y. Shinagawa, S. Takahashi, H. Hioki and T. kunii, “Measuring three-dimensional shapes of human face by incorporating stereo vision with photometry blending function,” *Fundamentals of Computer Graphics*, pp.3-18, 1994.
- [12] R.A.Jarvis, “A perspective on range finding techniques for computer vision,” *IEEE Trans. Anal & Mach. Intell*, vol.5, no.2, pp.122-139, 1983.
- [13] F. Rocker and A. Kiessling, “Methods for analyzing three dimensional scenes,” *4th. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.669-673, 1975.
- [14] S. Takahashi and T.L.Kunii, “Manifold-based multiple viewpoint cad: A case study of mountain guide map generation,” *Computer Aided Design*, vol.26, no.8, pp.622-631, Aug.1994.