

幾何学的位置計測手法と照度差ステレオの融合 による高精度形状計測

関 拓郎^{†1} 岡谷 貴之^{†1} 出口 光一郎^{†1}

物体の形状を計測する方法として、プロジェクタからパタン光を物体に投影したものをカメラで撮影して、カメラとプロジェクタの画像間の視差を利用するものがある。この方法では計測精度は画像の解像度などで決まる視差の精度で制約され、得られる形状には一定の誤差が残る。これと異なる方法として、照明方向を変化させて撮影した画像の濃淡から形状を推定する照度差ステレオがある。この方法は一般的に反射特性や照明条件を事前に知らなければならず、高精度な形状を得ることは難しい。一方で、法線を直接求めるため、隣り合う点の誤差が少ないという利点がある。本研究では、視差を用いて求めた形状の情報と、画像の濃淡から推定した形状の情報を組み合わせ、高精度な形状を得る方法を示す。

Accurate Shape Measurement By Integrating Information of Stereo Triangulation and Photometric Stereo

TAKURO SEKI,^{†1} TAKAYUKI OKATANI^{†1}
and KOICHIRO DEGUCHI^{†1}

There is a method for measuring the 3D shape of objects by using the parallax between the camera and projector images by taking a picture of the objects onto which striped pattern is projected. The accuracy of this measurement is limited by the accuracy of parallax, which is mostly determined by the image resolution. As a result, there have to be some errors in the measured shape. Another method is to estimate the object shape from its shading obtained when lit from different direction. In general, this method requires the knowledge of the reflection property of the surface and the lighting condition, and it is difficult to obtain accurate shapes. On the other hand, the method can directly obtain the surface normal and thus there tends to be small errors between neighboring pixels. This paper shows a hybrid method that can obtain an accurate shape by integrating the information of parallax and shading.

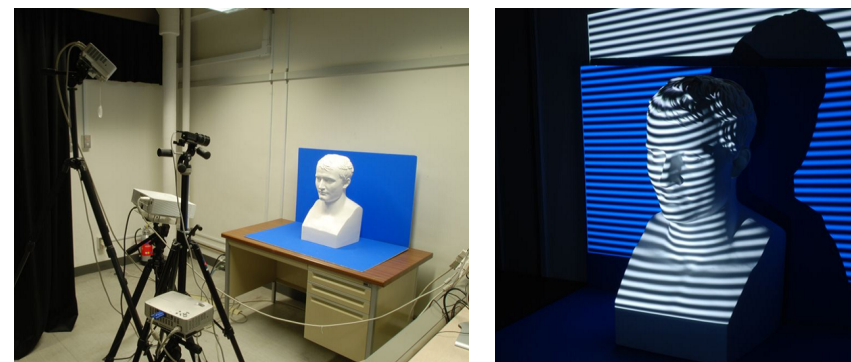


図1 幾何学ステレオによる形状計測の実験装置。右はパタン光投影の様子。

1. はじめに

本研究では、光を能動的に投射することにより物体の3次元形状を計測する方法について考える。形状計測はいくつかの原理に基づく方法が知られているが、最もよく使われているのが、カメラとプロジェクタを配置し、スリット光や2次元的なパタン光をプロジェクタから対象物に投影し、これをカメラで画像に収め、プロジェクタの位置から見た対象物とカメラの画像間の視差を用いて、三角測量の原理に基づいて奥行きを計算する方法である(以下、本論文ではこの方法を幾何学ステレオと呼ぶことにする)。しかし、この方法による形状計測の精度は、スリット光の制御角度の細かさや、パタン光あるいは画像の解像度等、視差の精度によって制約され、計測には一定の誤差が生じることが避けられない。

これと全く異なる原理による方法として、照度差ステレオがある¹⁾。一般的に物体にあたる照明方向が変わると、見え方が変わる。これは陰影(shading)と呼ばれ、物体表面での光の反射に基づいている。このことを利用して、照度差ステレオは物体にあたる照明の方向を変化させて撮影した画像の濃淡を使って法線を直接計測する。この方法は幾何学ステレオと異なり、面の法線(向き)を計算する。形状は計算された面の向きを積分することで得られる。照度差ステレオは表面反射特性および照明方向が既知であることが必要だが、相互反

^{†1} 東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

射などモデル化しにくい現象や、反射特性既知などの前提が満たされることが少ないので、一般に形状計測の精度は低い。だが、幾何学ステレオと異なり面の向きを直接求めるので、隣り合う点のばらつき、ランダムな誤差が小さいという特長がある。

以上を踏まえ、幾何学ステレオと照度差ステレオによる面の向きの計測を組み合わせ、形状計測の精度向上を目指す研究がいくつかなされてきた。

田中²⁾、岡崎ら³⁾は、形状計測の結果をもとに物体表面の反射特性と面の向きを同時推定する方法で、プロジェクタから適当な映像を投影して対象物の反射特性を仮想的に変化させた。Nehabら⁴⁾は、最適化によって両者を巧妙に組み合わせる方法を提案した。この方法は、計測された形状は低周波成分は正確で、高周波成分は誤差が大きく、照度差ステレオで復元した形状は、逆に高周波成分について正しいが、低周波成分について不正確であるとの彼らの分析に基づく。

田中、岡崎らの方法は、その目的から正確な形状は必ずしも不要であり、基本的に照度差ステレオをベースにしたため、形状の絶対的な精度はあまり高くない。Nehabらの方法は、両手法の精度と空間周波数の関係の考察に基づくが、その物理的な意味は必ずしも明らかではない。また、いくつかのパラメータを外部から与える必要があるという問題がある。最適な形状を与えるパラメータは形状計測の結果によって手動で変える必要がある。

本研究では、統計的な原理に基づく、物理的に、より正しい方法の実現を目指す。具体的にはまず、幾何学ステレオおよび照度差ステレオから得た形状の微分について、統計的な誤差モデルを導入し、計測された形状と照度差ステレオから得た面の向きを観測データとする、事後確率最大化 (MAP) 推定を実行する。しかし、この計算は極めて多数の確率変数を対象に、大規模な積分計算を行うことが必要になり、現実的でない。そのため、確率伝搬法を用いて、画像の各局所領域ごとの計算を画像全体で繰り返す方法で、効率的に計算する方法を示す。

2. 事後確率最大化推定

画像の各画素を i と表し、その座標を (x_i, y_i) と書き、その座標での形状 (奥行) の観測値を z_i とする。画像上の全ての画素 (n 個とする) において、幾何学ステレオで得た形状の観測値の集合を $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ 、形状の真の値の集合を $\mathbf{m} = \{m_1, \dots, m_n\}$ とおく。一方、照度差ステレオでは、観測値として画素 i での対象の面の法線 $\mathbf{n}_i \propto [p_i, q_i, -1]^T$ が得られる ($p = \partial z / \partial x$, $q = \partial z / \partial y$)。隣り合う 3 画素の法線から計算した、形状の 2 階差分の集合を $\mathbf{H} = \{\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_n\}$, $\mathbf{h} = [p_x, q_y]^T$ ($p_x = \partial p / \partial x$, $q_y = \partial q / \partial y$) とおき、真の形状の 2 階

差分の集合を $\mathbf{m}^{(2)} = \{m_1^{(2)}, \dots, m_n^{(2)}\}$ とおく。

このとき Z, \mathbf{H} という 2 つの観測が与えられたときの \mathbf{m} の事後分布 $p(\mathbf{m}|Z, \mathbf{H})$ はベイズの定理を用いて

$$p(\mathbf{m}|Z, \mathbf{H}) = \frac{p(Z, \mathbf{H}|\mathbf{m})}{p(Z, \mathbf{H})} p(\mathbf{m}) \quad (1)$$

と表される。 Z, \mathbf{H} は観測データであり、また、幾何学ステレオと照度差ステレオによる計測は独立に行われているため (1) 式は

$$p(\mathbf{m}|Z, \mathbf{H}) \propto p(Z, \mathbf{H}|\mathbf{m}) p(\mathbf{m}) \quad (2)$$

$$= p(Z|\mathbf{m}) \cdot p(\mathbf{H}|\mathbf{m}) p(\mathbf{m}) \quad (3)$$

となる。式 (3) において、 \mathbf{H} は形状 \mathbf{m} そのものではなくその 2 階差分に依存するため、

$$p(\mathbf{H}|\mathbf{m}) p(\mathbf{m}) = p(\mathbf{H}|\mathbf{m}^{(2)}) p(\mathbf{m}^{(2)}) \quad (4)$$

と変形できる。式 (3) (4) より

$$p(\mathbf{m}|Z, \mathbf{H}) \propto p(Z|\mathbf{m}) \cdot p(\mathbf{H}|\mathbf{m}^{(2)}) p(\mathbf{m}^{(2)}) \quad (5)$$

となる。ここで、 $p(Z|\mathbf{m})$ は幾何学ステレオ、 $p(\mathbf{H}|\mathbf{m}^{(2)}) p(\mathbf{m}^{(2)})$ は照度差ステレオによる形状計測における条件付確率を表す。次に、それぞれについての統計モデルを考えていく。

3. 計測の統計モデル

3.1 幾何学ステレオ

式 (5) の $p(Z|\mathbf{m})$ について、各画素の形状は独立に計測できるため、

$$p(Z|\mathbf{m}) = \prod_{i=1}^n p(z_i|m_i) \quad (6)$$

となる。よって形状計測の観測値 z_i はその真の値 m_i を平均とし、ある分散 σ^2 をもつ、以下のガウス分布に従うとする。

$$p(z_i|m_i) \propto \exp\left(-\frac{(z_i - m_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

σ^2 は計測誤差のばらつき量を表し、計測方法や装置の仕様などから事前に定められるとする (画素ごとに異なるとしてもよいが簡単のためここでは共通の定数とする)。

3.2 照度差ステレオ

式 (4) の $p(\mathbf{H}|\mathbf{m}^{(2)})p(\mathbf{m}^{(2)})$ について, このモデルは, 画像の x 方向の 3 画素についてのもとの y 方向のそれとの両方を考える必要があるが, ここでは, x 方向の 2 階差分 $p(p_x|m_{xx})p(m_{xx})$ のみ考えることにする.

照度差ステレオで得た法線から計算した形状の 2 階差分 p_x は, 真の形状の 2 階差分 m_{xx} を平均とした分布関数であると考えられる. しかし, 計測した法線に誤差が含まれるとその法線の変化は実際の法線の変化の符号と逆になることがありうる. このことを考慮すると正の p_x は m_{xx} を平均とし, 負の p_x は $-m_{xx}$ を平均とすると考えられる. 即ち $p(p_x|m_{xx})$ は分散を σ'^2 とすると

$$p(p_x|m_{xx}) = \exp\left(-\frac{(p_x - m_{xx})^2}{2\sigma'^2}\right) \quad (p_x > 0 \text{ のとき}) \quad (8)$$

$$p(p_x|m_{xx}) = \exp\left(-\frac{(p_x + m_{xx})^2}{2\sigma'^2}\right) \quad (p_x < 0 \text{ のとき}) \quad (9)$$

というガウス分布に従うとする. この $p(p_x|m_{xx})$ は図 2(a) のような分布となる.

さらに, 画像の輝度の微分は平均を 0 とする分布関数に従うことが一般的に知られ, 同じことが形状の微分にもあてはまるとする. この事前知識から $p(m_{xx})$ を平均を 0 とした分布関数で近似する. この分布関数は図 2(b) のようになる.

そして, $p(p_x|m_{xx})p(m_{xx})$ は, $p(p_x|m_{xx})$ の分布である図 2(a), $p(m_{xx})$ の分布である図 2(b) を掛け合わせた図 3 のような分布を持つと近似できる. この図は平均 0, 分散 p_x^2 をもつガウス分布である. 即ち, $p(p_x|m_{xx})p(m_{xx})$ を以下のガウス分布に従うと近似する.

$$p(p_x|m_{xx})p(m_{xx}) \propto \exp\left(-\frac{m_{xx}^2}{2p_x^2}\right) \quad (10)$$

3.3 統計モデルに基づく事後確率最大化推定

以上の統計モデルに基づき, 上述の 2 種類の観測値が与えられたときの事後確率

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{Z}, \mathbf{H}) = p(m_1, \dots, m_n | z_1, \dots, z_n, \mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_n) \quad (11)$$

を最大化する m_1, \dots, m_n を形状の真値の推定値とする. この関数の計算を画像に対して行うと極めて多くの確率変数を対象にした最適化計算が必要となるため, 現実的でない. そこで各画素 i の m_i について, それ以外の画素の $m_j (j \neq i)$ を周辺化し, 密度関数 $p(m_i|\cdot)$ を得ることを考える. ここではこの計算を効率よく行う確率伝搬法を用いる.

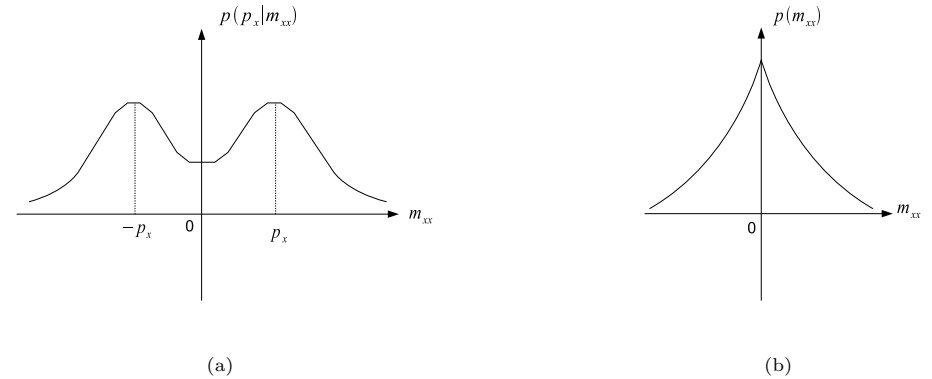


図 2 (a) 真の形状の 2 階差分が与えられたときの観測形状の 2 階差分の分布関数.(b) 近似した真の形状の分布関数.

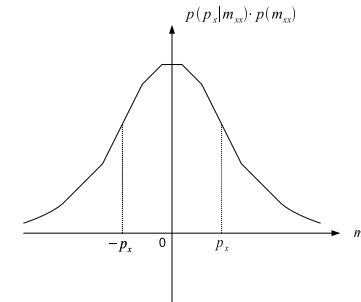


図 3 図 2(a) と図 2(b) の乗算により近似した $p(m_{xx}|p_x) \cdot p(m_{xx})$ の分布関数

4. 確率伝搬法 (Belief Propagation)

確率伝搬法とはある変数とその関数をノードとし、二つのノード同士をリンクでつないでグラフ (factor-graph という) を作り、隣り合うノードで確率分布 (メッセージ) を渡しあってノードにおける情報を逐一更新し、最終的にそのノードにおける確率分布を計算する手法である。このメッセージはノードからノードへの影響を確率分布の形で送るものである。また、無向グラフの場合にはリンクに向きがないので、一つのリンクに対して 2 つのメッセージを考える必要がある。

4.1 Sum-Product 法

まず、関数 f が x, y_1, \dots, y_n を変数にもち、関数 g_1, \dots, g_m が x を変数にもつとき図 4 のように factor-graph を作成する。このとき Sum-Product 法⁵⁾ により x から f に伝達されるメッセージ $\mu_{x \rightarrow f}(x)$ と f から x に伝達されるメッセージ $\mu_{f \rightarrow x}(x)$ を次のように計算する。

$$\mu_{x \rightarrow f}(x) = \prod_{i=1}^m \mu_{g_i \rightarrow x}(x) \quad (12)$$

$$\mu_{f \rightarrow x}(x) = \sum_{u \setminus x} f(u) \prod_{j=1}^n \mu_{y_j \rightarrow f}(y_j) \quad (13)$$

次のようにメッセージをやりとりする。まず (13) 式において $\mu_{y_j \rightarrow f}(y_j)$ の初期値を与え、 $\mu_{f \rightarrow x}(x)$ を求める。即ち関数ノードから変数ノードへのメッセージがわかっているので、(12) 式に $\mu_{g_i \rightarrow x}(x)$ を代入し、再び $\mu_{x \rightarrow f}(x)$ を求める。こうして $\mu_{x \rightarrow f}(x)$ を更新することができる。

この更新を繰り返して得た $\mu_{f \rightarrow x}(x)$ を用いると、注目している変数ノードの周辺事後分布は最終的に以下のように計算される。

$$p_x(x) = \prod_{k \in N(x)} \mu_{k \rightarrow x}(x) \quad (14)$$

ここで $N(x)$ は変数ノード x にリンクしている関数ノード k の集合である (図 4 では $k = g_1, \dots, g_m, f$)。

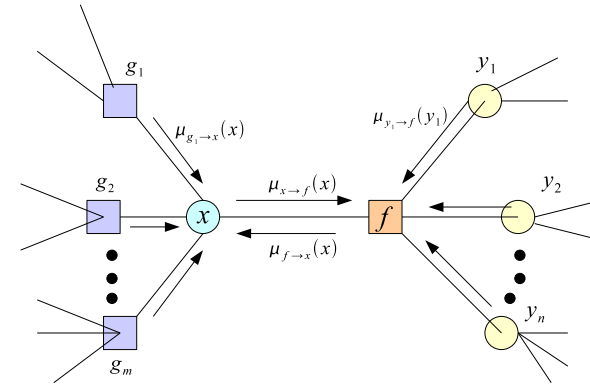


図 4 確率伝搬法のネットワーク構造。Sum-Product 法の更新ルールを表す。

4.2 本手法への適用

3章で示したように、幾何学ステレオ及び照度差ステレオによる形状計測では形状、形状の x 方向と y 方向の 2 階差分の確率分布を得ることができる。このため、3 種類の関数ノードを考え、ファクターグラフを作成した (図 5)。この図で円は変数ノード、三角形はステレオ形状計測の関数ノードを表し、(7) 式の $p(z_i | m_i)$ となる。横方向、縦方向にリンクされた四角形は照度差ステレオの関数ノードを表し、(10) 式に対応する。本来メッセージは確率分布そのものとなるが、3章で示したように扱う確率分布はガウス性であり、分散と平均により記述されるため、図 5 のグラフ上でやりとりするメッセージも分散と平均となる。

5. 実 験

図 6 のシステムを用いて、位相シフト法における正弦波パターンを物体表面に投影しそれをカメラで撮影する。正弦波の周期はプロジェクタ画像上で縦方向 24 画素、横方向 32 画素として、それぞれ位相のシフト数を 10 回ずつとして投影した。また位相接続のためにバイナリパターンを投影するが、その幅は (最小値が) 縦方向に 12 画素、横方向に 16 画素である。各プロジェクタとカメラの焦点距離を除くパラメータはあらかじめ取得してあり既知とする。

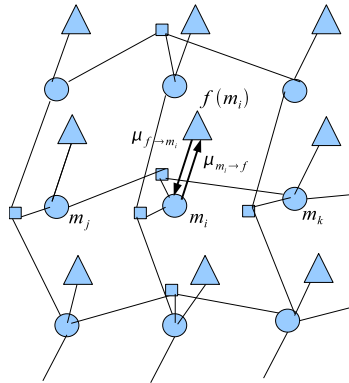


図5 本論文のネットワーク構造．円：変数ノード，四角形：照度差ステレオの与える拘束，三角形：計測形状の与える拘束を表す．

さらに，パタン光の正弦波の周期をプロジェクタ画像上で縦方向 12 画素，横方向 16 画素として，それぞれ位相のシフト数を 100 回ずつとして長い時間をかけて投影し，形状を得る．この形状を真の形状として，精度評価を行う．

実験結果および考察

幾何学ステレオにより得た奥行きを濃淡値として表すデプスマップは図 7 のようになった．また図 7 の四角で示した局所領域 (32 × 32 ピクセル) に注目し 3 次元表示すると図 8 のようになった．長い時間をかけ計測した真の形状 (図 10) と本手法により得た形状 (図 11) を比較すると，形状計測で得た形状のランダムな誤差，照度差ステレオで得た形状の全体的な誤差の発生がともに抑えられ，真の形状に最もフィッティングしているといえる．さらに，幾何学ステレオにより得た形状と本手法により得た形状を比較するため，真の形状との誤差を画像化すると図 7 の四角領域については図 12 のようになった．この図からも幾何学ステレオにより得た形状よりも誤差が小さくなっていることが確認できる．しかし，まだ誤差が残っているのは，対象をランバート面と仮定したこと，さらにモデル化が不完全であることなどが考えられる．



図6 実験システム全景．プロジェクタは 3 台用い，対象物体は拡散反射が支配的な反射特性である，石膏でできた像を選んだ．



図7 形状計測により得たデプスマップ．

6. ま と め

幾何学ステレオと照度差ステレオによる形状を観測データとし，その観測データが与えられたときの真の形状の事後確率を得ることを考えた．そしてこの事後確率を最大化する形状を，真の形状の推定値とした．

この事後確率を得るためには，観測データの誤差をモデル化する必要がある．形状計測に

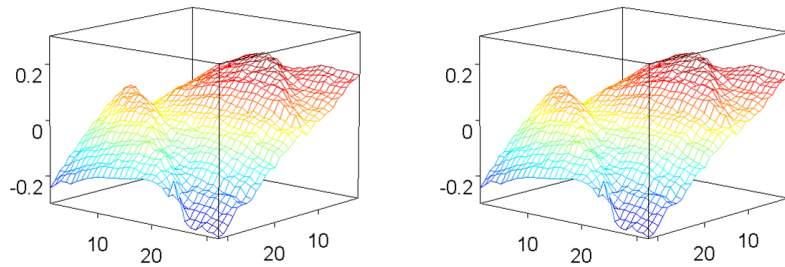


図 8 形状計測の結果．図 7 の四角領域を 3 次元表示したもの．

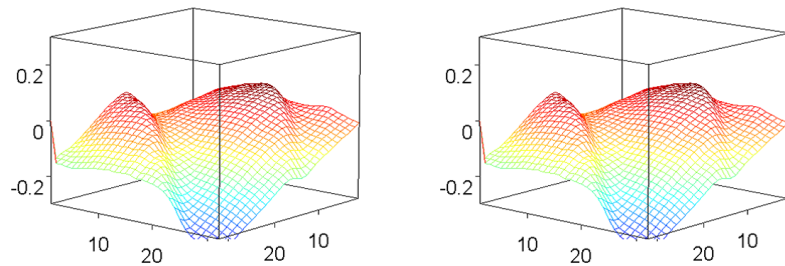


図 9 照度差ステレオにより求めた形状を 3 次元表示したもの．

よる形状は隣り合う点でランダムな誤差が発生するものの、形状全体で見ると誤差が小さいと考えられるため、平均を観測形状とし分散を計測誤差にばらつきとするガウス分布を誤差モデルとして採用した。また照度差ステレオによる形状は形状全体の誤差こそ大きい、隣り合う法線の角度の誤差が少ないことを考慮し、平均を 0 とし分散を観測形状の 2 階差分とするガウス分布を誤差モデルとして採用した。

この誤差モデルを用いて、各画素における真の形状の事後確率を周辺化した密度関数を得ることを考えたが、この計算のためには大規模な積分計算が必要となり、現実的でない。そこで確率伝搬法を用いて画像の局所領域ごとの計算を画像全体で行うことにより、効率的な計算を行った。そして最終的に得た形状は形状計測、照度差ステレオによる形状よりも正しいものが得られ、本手法の有効性を確認できた。

今後は他の手法との比較を行いその精度を検証していく。また、今回は照度差ステレオの

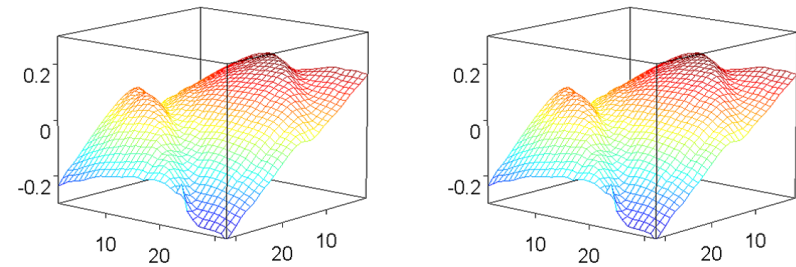


図 10 パタン光の周波数を大きくし、投影枚数を増やして形状計測した結果．この形状を真の形状とする．

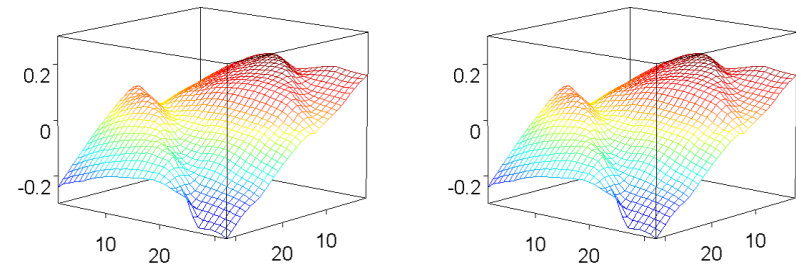


図 11 本手法により求めた形状を 3 次元表示したもの（更新を 4 回行った）．

誤差モデルを x, y 方向の 2 階差分 z_{xx}, z_{yy} のみを考えたが、実際には z_{xy}, z_{yx} も考える必要がある。このことを考慮してより正確なモデル化を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) R.J.Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, Vol. 19, No.1, pp. 139-144, 1980.
- 2) 田中文武. プロジェクタ・カメラシステムを用いる反射特性の再現による仮想現実感生成の研究. 東北大学修士論文, 2006.
- 3) Tomoya Okazaki, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi. Shape reconstruction by combination of structured-light projection and photometric stereo using a projector-camera system. *IPSI Trans CVA*, 2010.
- 4) Diego Nehab, Szymon Rusinkiewicz, James Davis, and Ravi Ramamoorthi. Effi-

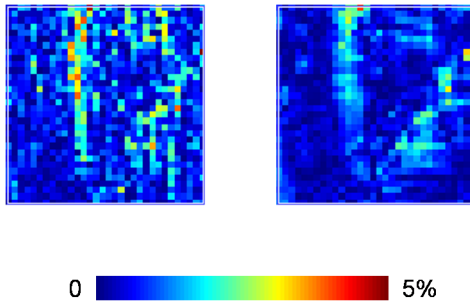


図 12 形状計測により得た形状（左）と本手法により得た形状（右）の真の形状との誤差を画像化したもの（図 7 の四角領域）。

ciently combining positions and normals for precise 3d geometry. *ACM Transactions on Graphics(Proc. of ACM SIGGRAPH 2005)*, pp. 536–543, 2005.

- 5) Frank R.Kschischang, BrendanJ. Frey, and Hans-Andrea Loeliger. Factor graphs and the sum-product algorithm. *Transactions on Information Theory*, Vol. 47,No.2, pp. 498–519, 2001.