

ステレオカメラと位相シフトによる拡散反射面と鏡面の3次元形状計測

徐 剛 牛 曉明 山崎 雅起 岩田 将

立命館大学情報理工学部

{xu, niuxm, ymasaki, masashi}@cvg.is.ritsumeikai.ac.jp

あらまし 文化財のデジタルアーカイブだけでなく、工業計測においても精緻で高精度な3次元形状計測が求められている。本稿では、ステレオカメラと位相シフトを用いて、拡散反射面の3次元形状計測について述べたあと、鏡面反射面の3次元計測に拡張する。高精度な3次元計測の前提として、ステレオカメラの高精度キャリブレーションが必要である。拡散反射面の計測の場合はプロジェクタを用いるが、鏡面反射面の計測にはディスプレイを用いる。拡散反射面の計測精度は平面のばらつきで評価したところ、20センチの計測範囲に対して20ミクロン程度であった。鏡面反射面の計測については実験中であり、結果が本稿には間に合わなかった。

キーワード 3次元形状計測, 位相シフト, 拡散反射面, 鏡面反射面

High-Accuracy Three-Dimensional Measurement of Lambertian and Specular Surfaces Using Stereo Cameras and Phase-Shift

Gang XU Xiaoming NIU Masaki YAMAZAKI Sho IWATA

Faculty of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract High accuracy 3D measurement is not only important for digital archiving of cultural heritage, but also very important for industrial inspection. In this paper, we first describe our system to measure 3D shape of Lambertian surfaces by stereo cameras and a phase-shift projector, and then we extend the method to measuring 3D shape of specular surfaces using stereo cameras and a display showing two-dimensional sine waves. To achieve high-accuracy measurement, high-accuracy calibration of stereo cameras is necessary. We achieved a 20 micrometer RMS for a planar Lambertian surface of 200 millimeter wide. Experiments are under way for specular surfaces.

Keyword 3D measurement, Phase-shift, Lambertian surfaces, Specular surfaces

1. まえがき

3次元画像計測は、その計測手法よりパッシブ計測とアクティブ計測に分類できる。パッシブ計測はカメラで計測対象を撮影し、その画像情報のみから特徴点の抽出、対応付けと3次元形状の復元を行う。しかし、工業機器の部品など模様がない対象に対してこの手法は使えない。アクティブ計測はプロジェクタなどを利用してパターン光を対象に投影し、それをカメラで撮影することにより全自動で形状計測を行う[8]。プロジェクタを利用することで画像情報の全画素について対応関係を解析することができるため、画像のみで行うパッシブ計測の場合より高精度、高精細な3次元形状復元ができる[1, 2]。

また、1台のカメラと1台のプロジェクタを使用する場合は、カメラとプロジェクタの間の幾何学関係を校

正する必要があるが、2台のカメラを使用する場合、カメラとプロジェクタの位置関係を計算することは必要なく、2台カメラの間の幾何学関係を調べるだけで十分である。カメラとプロジェクタの関係を調べるよりも、カメラとカメラの間の関係を調べやすい。従来の方法では高精度の機械を使ってキャリブレーションをする場合が多い[3, 7]。本研究では、キャリブレーションボードを使って数枚の写真を撮るだけで高精度キャリブレーションを実現した。

2枚の画像間の対応づけは、位相シフト法を用いる。位相シフト法のメリットは、カメラ画像の画素ごとに位相情報が得られるので、カメラ画像の画素数分の計測点を得られ、密度が高い[12]。

一方、プロジェクタで投影したパターンが拡散反射され、それぞれのカメラで見た像は同じものであることが前提となっている。しかし、ガラスや金属のような鏡

面反射をする表面の場合に、投射された光はある特定の方向にしか反射されず、一般的にカメラに向かわず、計測できない。そのため、パウダーを物体表面に噴射して、人工的に拡散反射を作り出すことで計測を行うのが一般的である。これは面倒なだけでなく、パウダーの厚みの影響もある。

そこで、ステレオカメラに加えて、プロジェクタのかわりにディスプレイを使用し、鏡面反射面の計測手法を提案する。ディスプレイが横方向と縦方向の位相シフトを行うと、それぞれのカメラでも観測できる。そして、鏡面反射の場合に入射角と反射角が等しいという関係を用いることにより、鏡面の各点の法線方向と3次元座標を同時に求められることを示す。

ディスプレイに2次元の位相パターンを表示させる研究は報告されている[9]が、カメラが1台しか使用されていないため解は一意ではなく実用的ではない。

拡散反射面の計測精度を実験によって評価した。200mmの平面を計測した3次元点群の平面ばらつきが20ミクロン程度であった。

鏡面の計測実験を進めているところであり、結果は本稿に間に合わなかった。

2. 位相シフトと位相連結

位相シフト法では、正弦波形のパターン画像を作成し、プロジェクタによって物体に対して投射する。図1は縦縞の位相パターン画像を示す。同様に、横縞のパターン画像も作成できる。正弦波の位相を例えば4分の 2π だけ4回シフトさせる。図2に示すように、各画素で観測される4回の輝度も同様に4分の 2π だけの位相がシフトしたものとなる。その4つの輝度データから、式(1)により各画素の位相が求められる。

$$\alpha(u, v) = \tan^{-1} \frac{i_3(u, v) - i_1(u, v)}{i_0(u, v) - i_2(u, v)} \quad (1)$$

ただし、 (u, v) は画素の座標を示し、 $\alpha(u, v)$ はこの画素の位相であり、 $i_0(u, v), i_1(u, v), i_2(u, v), i_3(u, v)$ はこの画素の観測された4回の輝度である。

位相は $0 \sim 2\pi$ の間で求められるので、視野の中で繰り返され、一意ではない。左右の画像で対応を求める場合、複数の対応候補が存在する。そこで、位相が視野内において単調で増えていくように接続(unwrapping)を行う。図3はその概念を示す。

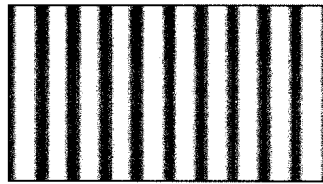


図 1: 縦縞の位相パターン画像

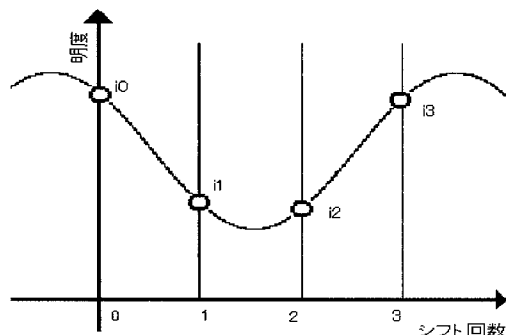


図 2: 位相シフトの概念図

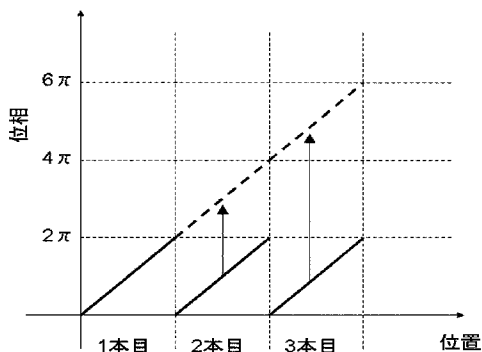


図 3: 位相の接続

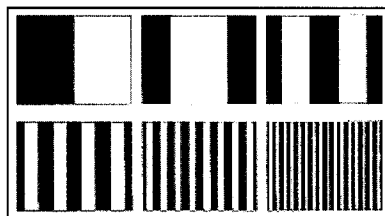


図 4: 縦縞のグレイコードのパターン

位相接続には様々な手法が提案されているが[4, 5, 6], 我々はグレイコード法を用いた。グレイコード法は、図4に示す縦縞模様パターンを順次投射する

ことで、空間をコード化する。各画素について独立に2値化することで、それぞれの画素がどの空間に属するかが分かる。この空間コードの細かさには限度がある。しかし、縞模様の範囲内で位相を求めることができれば、位相を接続するのに十分である。同様に横縞のグレイコードと横縞の位相シフトを組合せて使える。

グレイコード法は2値なので、ロバストであるが、十分に細かくない。一方、位相シフト法は細かいが、視野全体で一意ではない。両方の利点を組み合わせることにより視野全体で位相を接続する。

3. ステレオカメラ

普段我々が見る画像はデジタル画像と呼ばれるものである[10, 11]。図5に示すように、デジタル画像の座標系は座標の原点は左上にあり、右方向が横軸 u 、下方向が縦軸 v である。しかし、射影関係を記述する場合には、正規化画像座標系を用いた方が便利なので、デジタル画像座標系を正規化画像座標系へ変換する。変換式は以下のように表される。

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ 、 $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$ はそれぞれデジタル画像座標 (u, v) と正規化画像座標 (x, y) の同次座標ベクトルである。行列 \mathbf{A} はカメラ内部行列であり、以下のように表される。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ただし、 (u_0, v_0) は主点座標で、 f は画像の焦点距離(画素単位)である。

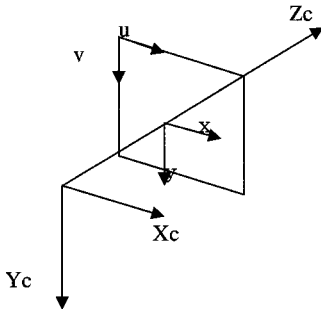


図5: カメラ座標系, デジタル画像座標系と正規化画像座標系

我々が生活する空間は3次元であり、画像は2次元である。そういう意味でカメラは射影する装置であるとも見ることができる。一般的に知られるように、射影は下記の式で表すことができる。

$$x = \frac{X_c}{Z_c}, y = \frac{Y_c}{Z_c}$$

ここで、 X_c, Y_c, Z_c は焦点を原点とするカメラ座標系における3次元空間の点の座標である(図5を参照)。この式を下記に書き直すこともできる。

$$\tilde{\mathbf{x}} \cong \mathbf{X}_c \quad (3)$$

ただし、 \cong は2つのベクトルが同じ方向を指すことを意味する。

今までの記述では、全ての式が線形であり3次元空間内の直線が、画像上でも直線に写る。しかし、実際にはレンズの歪みにより、3次元空間の直線が画像上で曲がったように写る。レンズによる歪みはそれほど大きくなく、人間の目には目立たないことも多いが、精度を上げる上では無視できず、補正を行う必要がある。レンズの歪みは式(4)で表すことができる。

$$\begin{aligned} u &= u_0 + fx(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6+\dots) + 2p_1xy + p_2(r^2+2x^2) \\ v &= v_0 + fy(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6+\dots) + p_1(r^2+2y^2) + 2p_2xy \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $r^2 = x^2 + y^2$ 、 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 は歪みパラメータである。歪みは主点(画像中心)から離れていけばいくほど大きくなる。カメラの焦点距離や主点座標、歪み係数をまとめてカメラの内部パラメータという。

一方、カメラ座標系と世界座標系との関係を記述する必要がある。世界座標系における座標を \mathbf{X}_w 、回転行列を \mathbf{R} 、並進ベクトルを \mathbf{t} とすると、変換式は次式のように表すことができる。

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{t} \quad (5)$$

カメラ座標系間の関係も同様に記述できる。これらのパラメータをカメラの外部パラメータという。

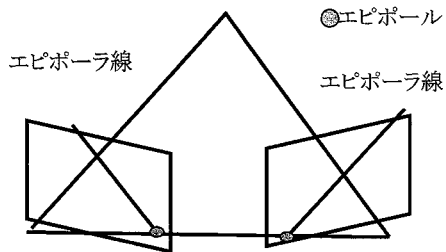


図6: ステレオカメラ

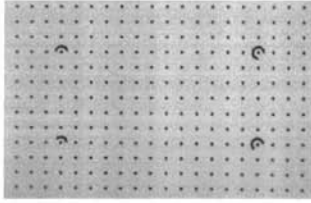


図 7: キャリブレーションパターン

図6はステレオカメラの概念を示す。空間の1点と2つのカメラの焦点を含む平面(エピポーラ平面)と2つの画像平面が交わり、その交線をエピポーラ線という。一方の画像上で1点が与えられると、もう一方の画像上にあるその対応点は必ず対応するエピポーラ線上にある。

本研究では図7に示すキャリブレーションパターンをステレオカメラに見せることにより、カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを求める。

ステレオカメラの外部パラメータが分かれば、一方の画像上の1点に対して、他方の画像上では対応するエピポーラ線が得られ、対応点はこのエピポーラ線に沿って探すことができる。位相解析によって、左画像も右画像も各画素の接続された位相が得られているので、対応点を容易に見つけることができる。

4. 拡散反射面計測システムと実験結果

本システムは CCD カメラ(ニコン D70, 28mmレンズ)2台とシチゼン・アクティブ社の格子投影システムからなる。図 8 はシステムの写真を示す。

実験としてライオンの石像を対象物として計測を行った。パターン画像が投射された状態のライオンの石像を図 9 に示す。計測された3次元点群と、その一部を拡大表示した画像をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。滑らかな形状が細かく復元されていることが確認できる。

精度評価を行うために基準ボードを使用する。基準ボードに対して平面の3次元復元を行った。得られた点群から平面をフィッティングして各点とフィッティングした平面の距離の RMS 値を求めた。20センチのボードに対して 20 ミクロンの RMS 誤差が得られた。つまり、拡散反射面の計測精度は、20 センチの計測範囲に対して 20 ミクロン程度であることが確認できる。

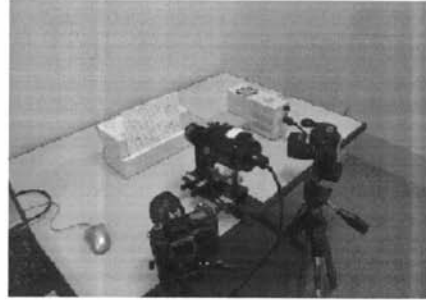


図 8: 計測システムの構成

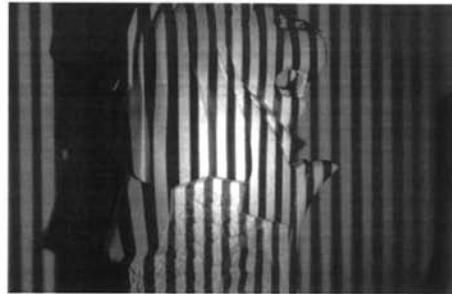


図 9: パターン投影されたライオン石像



図 10: ライオン石像の3次元点群



図 11: ライオン石像の一部の拡大図

5. 鏡面計測の原理

鏡面反射では、入射光、反射光と法線方向が共平面であり、かつ入射角と反射角が等しいという性質を持つ。従って、左右のカメラで物体表面の同じ点を見ても、異なる方向からの光が写る(図12)。もしどの方向からその光が来ているかが分かれば、問題は解ける。そこで、ディスプレイを使用する。ディスプレイで横方向と縦方向の位相を表示・シフトさせることにより、ディスプレイ上の各点に位相を持たせることができる。そして、その3次元座標を校正によって求めることができる(次節参照)ので、鏡面反射された光の位相を調べることでディスプレイ上のどの点から光が届いたかが分かる。

ディスプレイ上のどこから光が鏡面反射されてきたかが分かれば、この点と視線とで平面を構成する。奥行きが分かれば、法線方向は決まるが、1カメラだけの場合、解が一意には決まらない[9] (図13)。そこで、2カメラを用いる。2カメラがあると、共通の法線方向と奥行きを持つ解を探すことにより、解が一意に決まる。

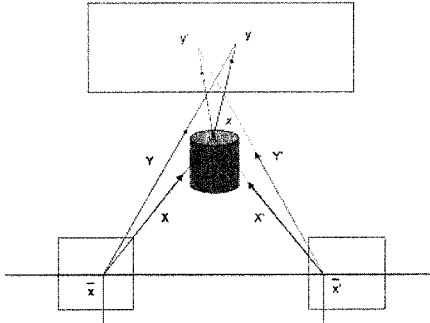


図 12: ステレオカメラとディスプレイによる鏡面計測

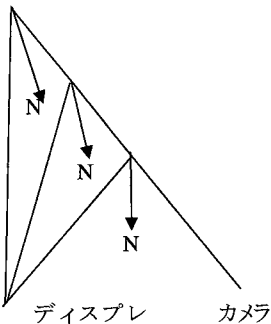


図 13: 1つのカメラでは、解が一意ではない

一般性を失うことなく、世界座標系を左のカメラ座標系と同じにする。左画像上の正規化画像座標 (x, y) を持つ点の位相を調べると、光は3次元座標ベクトル Y から来ていることが分かったとする。この点が見ている鏡面上の3次元座標は

$$X = s\tilde{x} \quad (6)$$

と表せる。ただし、 s は未知のスケールである。この点における鏡面の法線方向(正規化されていない)は

$$N = \frac{Y - s\tilde{x}}{\|Y - s\tilde{x}\|} - \frac{\tilde{x}}{\|\tilde{x}\|} \quad (7)$$

となる。

一方、右カメラ座標系と左カメラ座標系の間、下記の関係が成り立つとする。

$$X = RX' + t \quad (8)$$

右画像上の正規化画像座標 (x', y') を持つ点の位相を調べると、光は3次元座標ベクトル Y' から来ていることが分かったとする。この点が見ている鏡面上の3次元座標は

$$X' = s'R\tilde{x}' + t \quad (9)$$

となる。ただし、 s' は未知のスケールである。この点における法線方向(正規化されていない)は

$$N' = \frac{Y' - (s'R\tilde{x}' + t)}{\|Y' - (s'R\tilde{x}' + t)\|} - \frac{s'R\tilde{x}' + t}{\|s'R\tilde{x}' + t\|} \quad (10)$$

となる。左画像と右画像が同じ点を見ているとすれば、式

$$X = X' \quad (11)$$

と式

$$N \cong N' \quad (12)$$

が成り立たなければならない。エピポーラ線に沿って、式(12)を満たす対応点を探せば良い。

6. ステレオカメラとディスプレイの校正

ディスプレイの座標系を (I, J) とする。各点の位相 (P_x, P_y) が決まっているので、その位相から座標 (I, J) を求めることができる。一般的に位相は線形に付与するので、

$$I = P_x/a, \quad J = P_y/a \quad (13)$$

で変換できる。

仮にディスプレイも両方のカメラに写っているとすると、従来のステレオによって、ディスプレイ上の各点のステレオ対応が可能であり、その3次元座標 $(X(P_x, P_y), Y(P_x, P_y), Z(P_x, P_y))$ を求めることができる。この3次元

座標系とディスプレイの座標系との間に、

$$\begin{pmatrix} X_i(P_x, P_y) \\ Y_i(P_x, P_y) \\ Z_i(P_x, P_y) \end{pmatrix} = s_d \mathbf{R}_d \begin{pmatrix} I_i(P_x) \\ J_i(P_y) \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbf{t}_d \quad (14)$$

が成り立つ。ここで、 $\mathbf{R}_d, \mathbf{t}_d$ はそれぞれディスプレイの座標系とステレオカメラの座標系との間の回転行列と並進ベクトルである。また、 s_d はディスプレイの1画素の長さとかメラ座標系のスケールとの間の変換比率である。一定の点数がバランスよくサンプリングされていれば、 $\mathbf{R}_d, \mathbf{t}_d, s_d$ は次式にある評価関数 C を最小化することで容易に求めることができる。

$$C = \sum_{i=1}^n \left\| \begin{pmatrix} X_i(P_x, P_y) \\ Y_i(P_x, P_y) \\ Z_i(P_x, P_y) \end{pmatrix} - \left(s_d \mathbf{R}_d \begin{pmatrix} I_i(P_x) \\ J_i(P_y) \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbf{t}_d \right) \right\|^2$$

$\mathbf{R}_d, \mathbf{t}_d, s_d$ が求まれば、位相 P_x, P_y から直接、ステレオカメラ座標系における光の発する位置がわかる。

7. 鏡面計測の実験結果

鏡面計測の実験は進行中であり、途中結果を述べる。ステレオカメラは拡散反射面の計測時と同じカメラを使用している。ディスプレイはパソコンのディスプレイを使用した。鏡面反射物体は、家庭用の鏡を使用した。

図 14~15 は縦縞の原画像と、接続された位相を輝度に変換した画像を示す。右方向に沿って、接続された位相が滑らかに単調に増加している様子がわかる。

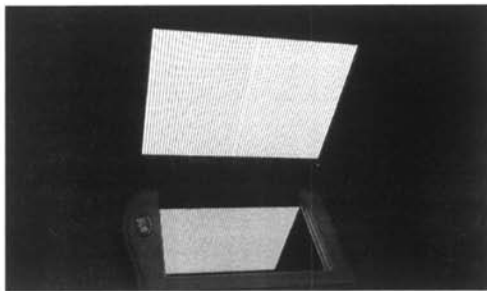


図 14: 縦縞の位相シフト画像例

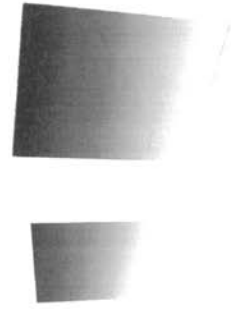


図 15: 縦縞の位相画像から接続された位相を輝度に変換した画像

図 16~17 はそれぞれ横縞の原画像、解析された位相を輝度に変換した画像と、接続された位相を輝度に変換した画像を示す。ディスプレイの下方向に沿って、また、鏡の上方向に沿って、接続された位相が滑らかに単調に増加している様子がわかる。

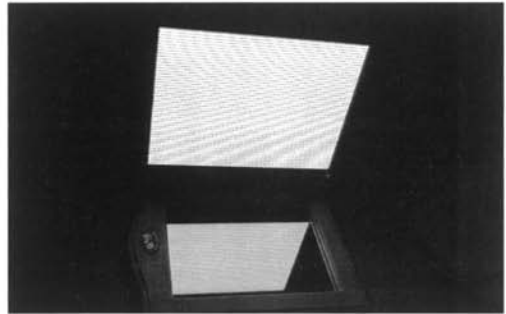


図 16: 横縞の位相シフト画像例

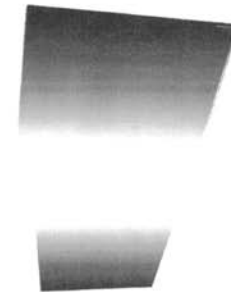


図 17: 横縞の位相画像から接続された位相を輝度に変換した画像

8. むすび

本研究では、ステレオカメラと位相シフトを組合せて、従来の拡散反射面の計測だけでなく、鏡面の計測方法を提案した。拡散反射面の計測においては、プロジェクタで縦縞のグレイコードのパターンと位相シフトのパターンを物体に投射することで画像の各画素の位相を解析することで左右の画像間の対応づけを行うことができ、各画素の3次元情報を得ることができ、高精度・高精細な3次元点群を得ることができる。

一方、鏡面計測においては、プロジェクタのかわりにディスプレイを用いる。パソコンに接続されたディスプレイ上に、縦縞と横縞のグレイコードパターンと位相シフトパターンを順次表示し、ステレオカメラで撮影することにより、左右の画像の、各画素の光がディスプレイのどこから来たかを解析することができる。入射光と反射光が共平面であり、入射角と反射角が等しいという条件を満たすように対応点を探索すれば良い。

拡散反射面の計測実験では、20センチの平面ボードに対して20ミクロンの平面ばらつきを得た。鏡面計測の実験は進行中であり、結果が本稿に間に合わなかった。

拡散反射面の計測については多くの成果が報告されているが、鏡面計測については少ない。金属やガラスなど応用が多い。実用化まで視野に入れて、研究を進めていきたい。

参考文献

- [1] J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm, and D. Fritsch, "Data Processing and Calibration of a Cross-pattern Stripe Projector." *ISPRS Congress 2000, IAPRS* 33(5), Amsterdam, 2000.
- [2] C. Brenner, J. Bohm, and J. Guhring, "Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector." *Photonics West Videometrics VI*, Vol. 3641, SPIE, San Jose, USA, 1999.
- [3] J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi, "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey." *Pattern Recognition*, Vol. 31, No. 7, pp. 963--982, 1998.
- [4] C. Reich, R. Ritter, J. Thesing, "3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection." *Optical Engineering*, Vol. 39, No.01, pp. 224--231, January 2000
- [5] J. Pagès, J. Salvi, R. García and C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for

automatic 3D profiling." *International Conference on Robotics and Automation 2003*, Vol. 1, pp. 133--138, Taipei, Taiwan, May 2003.

- [6] R. J. Valkenburg and A. M. McIvor, "Accurate 3D measurement using a structured light system." *Image and Vision Computing*, Vol. 16, No. 2, pp.99--110, February 1998.
- [7] A. Ivor and R. Valkenburg, "Calibrating a structured light system." *Image and Vision Computing New Zealand*, pp. 167--172, Lincoln, Aug. 1995
- [8] 「最新光三次元計測」, 吉澤徹編著, 朝倉書店, 2006年11月
- [9] Marco Tarini, Hendrik P. A. Lensch, Michael Gesele, Hans-Peter Seidel. "3D Acquisition of Mirroring Objects using Striped Patterns". *Journal of Graphical Models*, Vol. 67, No. 4, pp. 233--259, July 2005
- [10] 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 1998
- [11] 徐剛: 写真から作る3次元CG, 近代科学社, 2001
- [12] 牛曉明、徐剛, "位相シフト法とグレイコード法による高精度3次元計測", *VIEW2005*, pp.276--278, 2005