

パターン光投影に基づく物体表面構造情報の獲得

Acquisition of 3 D Surface Models Based on Structured Light Projection

正司 哲朗*

Tetsuo SHOJI

1. はじめに

近年、デジタル技術の飛躍的な進歩に伴い、世界的な規模で、文化遺産や資料、無形、有形文化財を対象としたデジタルアーカイブ化が進んでいる。例えば、日本国内において、東京大学では、カンボジア・バイヨン寺院のアーカイブプロジェクトが進められている¹⁾。

一方、国外ではIBMのピエタ・プロジェクト²⁾やスタンフォード大学のミケランジェロ・プロジェクト³⁾などがある。これらの研究プロジェクトでは、形状計測の獲得を目的としたもので、レーザレンジファインダ装置を用いて、遺跡などの対象を計測し、部分的に獲得された形状情報を統合することで、対象全体の形状獲得を行っている研究である。

本研究では、上記のような大規模な文化遺産を対象とはせず、比較的小さい遺物（土器や瓦の破片）を対象としたデジタルアーカイブを行う。国内外の発掘調査においては、出土された遺物の管理が難しく、安易に移動させることによって、遺物が損傷する可能性がある。また、国外での発掘においては、日本国内に遺物を持ち帰ることが困難である。このため、発掘調査で簡易にデジタルアーカイブすることができる技術の確立が必要不可欠である。そこで、本研究の目的は、このような対象に対して、非破壊・非接触のデジタルアーカイブ技術を活用し、表面構造情報を獲得することにある。国外の発掘調査において、出土した遺物の表面構造を獲得する場合、上記で述べたレーザレンジファインダ装置を利用するには電源等の確保が必要となるため、装置全体が大規模になり、環境構築が容易ではなく可搬性に欠けるという問題がある。

本研究では、国外の発掘調査でも利用でき、簡易に表面構造を獲得できるシステムを構築する。本システムの特徴は、モバイルプロジェクタと高解像度カメラを利用することで、より精度の高い表面構造を獲得することができ、従来のレーザレンジファインダ装置に比べて、安価に実現できる点である。

本稿は、2章で関連研究と本研究の位置づけについて述べ、3章では、プロジェクタとカメラを利用して、物体の表面構造を獲得する方法について説明する。さらに、4章では、モンゴルで出土した遺物を対象に実験を行い、本研究の有効性を示す。第5章では、本研究のまとめと今後

の課題を示す。

2. 関連研究

画像情報から物体表面構造情報を獲得する手法として、一般的には、画像特徴を利用する方法と構造化光を利用する方法の2種類がある。

画像特徴を利用する代表的な手法は、ステレオ画像を利用する方法であり、三角測量の原理を用いている。これは、異なる視点から同一の対象を撮影し、それぞれの画像上への投影位置の違いから物体表面の構造情報を獲得するものであり、Shape from Stereoとも呼ばれている⁴⁾。ただし、この手法の問題点は、異なる視点で撮影された画像間で、対応する点を探索する必要がある、明確な特徴がない対象物体に対しては有効ではない。

一方、構造化光を利用する代表的な手法は、対象物体に構造化光（スリット光やグレイコードパターンなど）を投影することで、物体表面の構造情報を獲得するものである。この手法では、レーザー光源を半円筒レンズにより扇状に拡大したスリット光を投射し、カメラでその像を撮影するものである。次に、撮影されたスリット光の検出を行い、その位置を、あらかじめキャリブレーションしたカメラパラメータ、スリット光パラメータを用いて、三角測量の原理によって、物体表面構造を獲得するものである⁵⁾。

上記の方法はいずれも画像情報を利用する方法であるが、これらの方法とは異なり、レーザーレンジファインダと呼ばれる計測装置を利用して、大規模な遺跡に対して3次元構造を獲得する研究がある⁶⁾。この研究で用いているレーザーレンジファインダは、レーザー光源から投射されたレーザー光が物体へ反射し、再びセンサへ戻るまでの伝達時間から距離を計測するTime-of-Flight方式である。レーザーレンジファインダを用いた場合には、非常に精度が高いデータを取得することが可能ではあるが、装置自体が高価であり可搬性に欠ける。

本研究では、簡易に物体表面構造を獲得できるシステムの構築を目的としており、モバイルプロジェクタとカメラのみを利用し精度向上を目指す。このため、上記に述べた手法のうち、構造化光を利用した方法を採用し、レーザー光源の代りにプロジェクタとPCを利用する。さらに、一般的には、このようなシステムで利用されるカメラはビデオカメラであり、解像度が低いものであるが、本研究では高解像度のデジタル一眼レフカメラを利用することで精度向上を目指す。将来、一眼レフカメラの解像度が向上すれば、容易に変更することができ、さらに精度の向上も期待できる。

3. パターン光投影に基づく物体表面構造情報の獲得

3.1 カメラキャリブレーション

画像から物体表面構造情報を獲得するためには、カメラの校正を行う必要がある。カメラの校正は、キャリブレーションと呼ばれ、カメラの内部パラメータと外部パラメータを求めることである。また、本研究では、プロジェクタを利用するために、カメラの校正と同様に、プロジェク

タのキャリブレーションも合わせて行う必要がある。図1に世界座標系、カメラ座標系、プロジェクタ座標系の関係を示す。

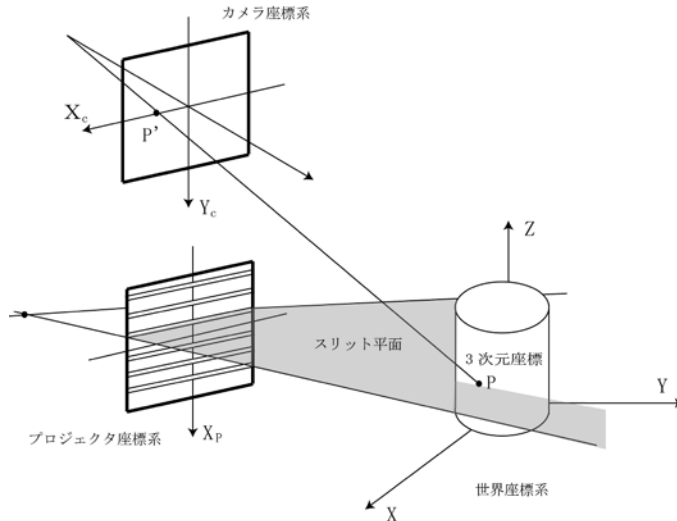


図1 世界座標系、カメラ座標系、プロジェクタ座標系の関係

一般的に、カメラキャリブレーションは次のようにして行う。まず、既知のパターンを撮影し、既知パターン上の3次元座標とパターンを撮影した画像上の2次元座標間の射影を定める射影行列を求める。次に、射影行列から内部パラメータと外部パラメータを求めることでキャリブレーションを行うことができる⁷⁾。

本研究では、Zhangのキャリブレーション手法⁸⁾を利用し、図2に示すような既知パターンを使用してキャリブレーションを行う。図2に示すような既知パターンを複数枚撮影することで、カメラのレンズ歪みを含む内部パラメータと外部パラメータを推定することができる。次に、キャリブレーションの原理について述べる。

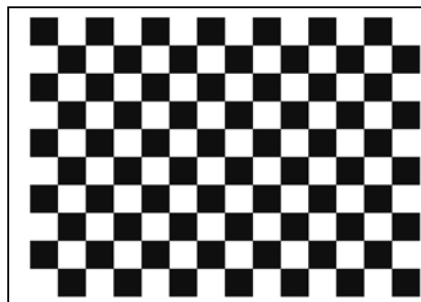


図2 キャリブレーションパターン

画像上の2次元座標と世界座標系との関係は、式(1)に示す射影方程式で表現することができる。

$$s_i m'_c = A[R, t] M'_c \quad (1)$$

ここで、 s_c はスケールファクタであり、 $m'_c = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix}$ は、画像平面に投影された点の2次元座標である。

$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ は、カメラの内部パラメータであり、 f_x, f_y は、ピクセル単位で表される焦点距離、

(c_x, c_y) は、画像の中心座標を表す。 $[R, t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}$ は、カメラの外部パラメータを表し、

回転と並進を表す行列である。さらに $M'_c = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$ は、世界座標系の3次元座標を表す。これを整理

すると式(2)のようになる⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} s_c X_c \\ s_c Y_c \\ s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)の 3×4 の行列はカメラパラメータであり、これは既知パターンを複数枚撮影し、これらの画像上のキャリブレーションパターンの交点座標と図2に示す実際のキャリブレーションパターンの交点の座標との対応関係を用いて、最小二乗法を利用することで求めることができる。

また、プロジェクタのキャリブレーションは、光学系は異なるが、カメラキャリブレーションと同様に行うことができる。本研究では、プロジェクタを利用して、スリット光を対象物体に投影するため、スリット光は、スポット光が1列に連続して並んだものだと考えることができるので、結像面での2次元座標のうち、一方の座標値を無視することができる。

したがって、スリットの位置を表す座標 X_p と3次元空間上の点 (X, Y, Z) の関係式は、式(2)と同じであるが、結像面の2次元座標が1次元になっているため、式(3)のように表すことができる⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} s_p X_p \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式 (3) の 2×4 の行列はプロジェクタパラメータであり、これはプロジェクタから点列を図 2 に示すキャリブレーションパターンの交点に投影し、プロジェクタの座標と実際のキャリブレーションパターンの交点の座標との対応関係を用いて、最小二乗法を利用することで求めることができる。

3.2 3次元座標の計算

対象物体の3次元座標 (X, Y, Z) は、上記で得られたカメラパラメータとプロジェクタパラメータと式 (2)、(3) を連立させて解くことで求めることができる。式 (2)、(3) を連立して解くと式 (4) のようになる。

$$V=Q^{-1}F \tag{4}$$

$$\text{ただし、} V = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} C_{11} - C_{31} X_c & C_{12} - C_{32} X_c & C_{13} - C_{33} X_c \\ C_{21} - C_{31} Y_c & C_{22} - C_{32} Y_c & C_{23} - C_{33} Y_c \\ P_{11} - P_{21} X_p & P_{12} - P_{22} X_p & P_{13} - P_{23} X_p \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} C_{34} X_c - C_{14} \\ C_{34} Y_c - C_{24} \\ P_{24} X_p - P_{14} \end{bmatrix}$$

である。

3.3 投影されたスリット光の検出

本手法は、対象物体にスリット光を照射し、それを撮像し、得られた画像を解析することにより、対象の表面構造情報を獲得するものである。このため、スリット光が投影された対象物体を撮像した画像から、投影位置（画像上の座標位置）を検出する必要がある。

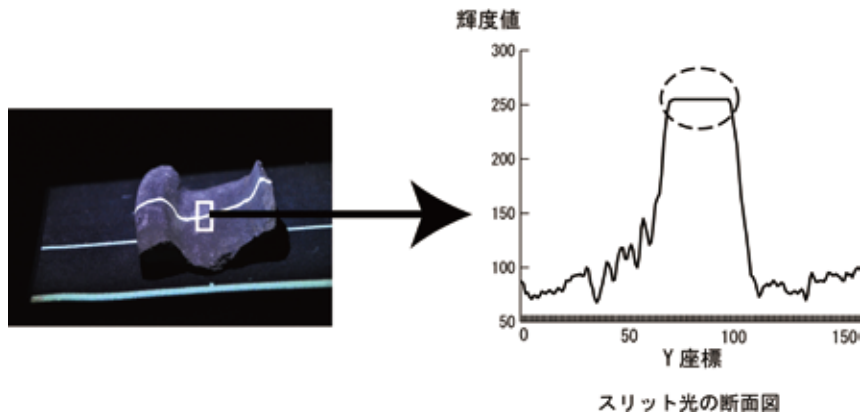


図 3 スリット光の断面図

図 3 (左) に示すように、対象物体にスリット光が投影されると、物体の形状に応じて、スリット光が歪む。この歪みが、物体表面の構造を表しているため、投影画像からスリット光を検出する必要がある。投影画像中で、Y方向（縦軸方向）に輝度値の分布を見ると、図 3 (右) に示すような波形になる。この波形からスリット光の投影位置を検出する必要があるが、最大輝度値で検出を試みた場合、図に示しているスリット光の断面図では点線の円で示している範囲とな

り、スリット光の投影座標値を一意に定めることができなくなる。このため、本研究では、図4に示すように、立ち上りと立ち下りの座標値を検出し、それらの座標値の中点となる位置をスリット光の投影位置とする。

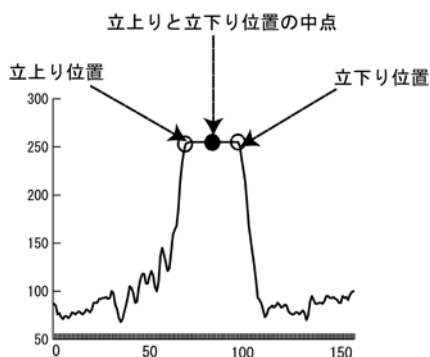


図4 スリット光位置の検出

投影画像において、この処理をX方向（横軸方向）に繰り返すことにより、スリット光の投影位置を検出することができる。さらに、スリット光を移動させながら撮影された複数枚の投影画像に対して、上記の処理を行うことで、対象物体全体のスリット光の投影座標値を検出することができる。

表面構造情報は、上記の方法で検出されたスリット光の投影座標値、スリット光の位置、キャリブレーションパラメータを利用することで、式（4）に基づき3次元座標位置を計算することで求めることができる。

4. 実験と結果

4.1 評価実験

本研究で構築した撮影装置を図5に示し、実験に使用した環境を表1に示す。開発には、Microsoft Visual Studio 2008 .netと画像処理ライブラリOpenCV 2.1を利用した。獲得した表面構造の表示には、VRML（Virtual Reality Modeling Language）を利用した。

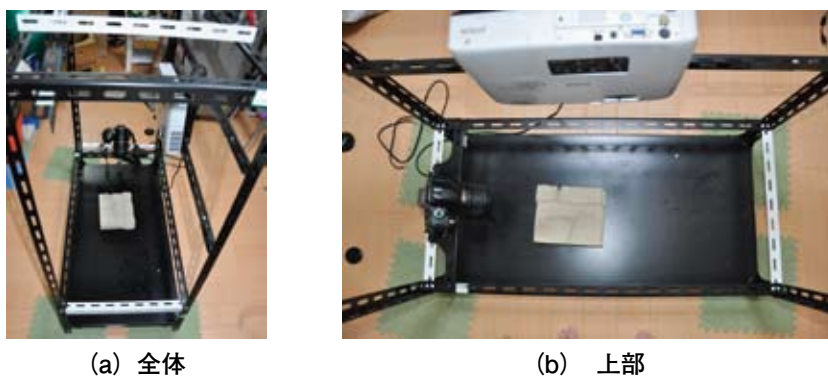


図5 撮影装置

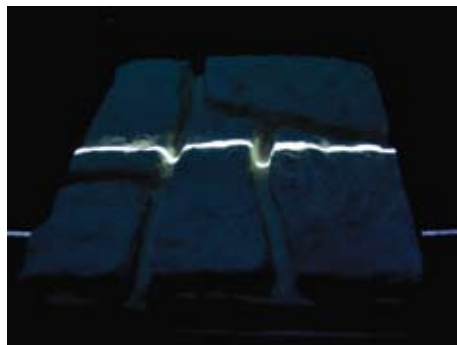
表 1 実験の環境

| 用途 | 型番 | 仕様 |
|-----------------|-------------------|---|
| パターン光投影用プロジェクタ | エプソンEB-1720 | 解像度 1024×768 |
| パターン光撮影用カメラ | Nikon D90 | 画素数 12.3メガピクセル |
| パターン光生成、画像処理用PC | Let's Note CF-R 7 | OS:WindowsXP、CPU: Core 2 Duo 1.20GHz、メモリ 2 GB |

実験では、図 6 (a) に示すような複雑な表面構造を持った対象物体に対して、表面構造の獲得を行う。まず、表面構造を獲得するにはスリット光の位置を変更しながら、対象物体表面上に連続的に投影して、投影画像を得る。対象物体にスリット光を投影したものを図 6 (b) に示す。次に、スリット光投影画像からスリット光の座標位置を検出する。検出された座標位置を用いて、3次元座標位置を計算する。最後に、計算された3次元座標位置をもとに、表面構造を3次元CGで表現する。この実験で得られた表面構造の獲得結果を図 7 に示す。図 7 では、物体の表面構造が獲得できていることがわかり、本手法の有効性を確認することができた。



(a) 対象物体



(b) スリット光投影画像

図 6 実験で用いた対象物体

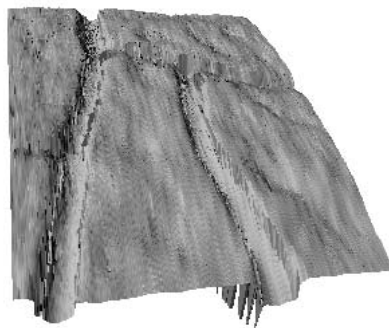


図 7 表面構造の獲得結果

4.2 発掘した遺物に対する表面構造の獲得結果

上記の手法を用いて、2010年8月にモンゴル草原にあるチントルゴイ城址の周辺で出土した遺物の表面構造を獲得する実験を行った。チントルゴイ城址は、トーラ川流域周辺の遼代城塞都市の1つであり、チントルゴイ城壁は、南北約1.25km、東西約0.65kmで、長方形の形状をしている。今回の調査研究では、遺構で出土した遺物は、日本国内への持ち込みができないため、図8に示すように、居住しているゲル内に簡易な撮影環境を構築して、現地で遺物の表面構造の獲得を行った。

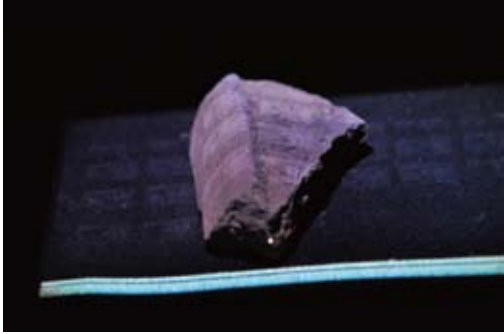


図8 モンゴルにおける実験環境（ゲル内）

実験に使用した環境は、表2の通りであり、装置の簡易化を図るために、プロジェクタの解像度は低いのが可搬性を重視した。この実験環境では、すべてバッテリーで駆動するため、発電機などにより電源の供給が必要ないため、簡易に表面構造を獲得することができる。モンゴルにおいて、出土した遺物の表面構造を獲得した結果を図9から図11に示す。これらの結果を見ると、遺物の表面構造が確認でき、発掘調査において本手法の有効性を示すことができた。

表2 実験環境

| 用途 | 型番 | 仕様 |
|-----------------------|-------------------------|--|
| パターン光投影用プロジェクタ | アドテック AD-MP15AW | 解像度640×480 |
| パターン光撮影用カメラ | Nikon D90 | 画素数 12.3メガピクセル |
| パターン光生成、 及び画像処理用PC | Lenovo ideapad S10-2 | OS:Windows 7 Starter、CPU: Atom 1.66GHz、メモリ 2 GB |

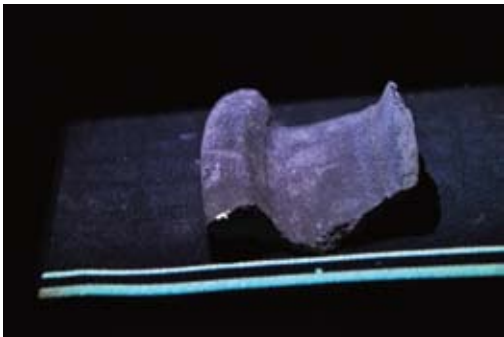


(a) 土器の破片



(b) 表面構造の獲得結果

図9 チントルゴイ城址周辺の窯址から出土した土器の破片

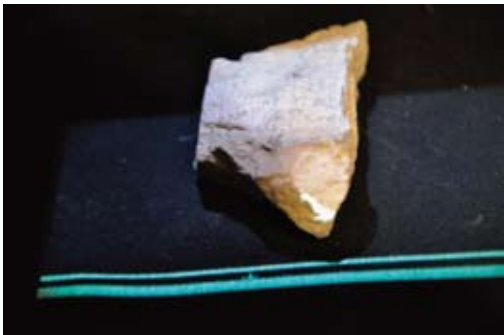


(a) 土器の破片

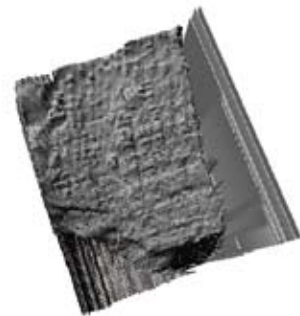


(b) 表面構造の獲得結果

図10 チントルゴイ城址周辺の窯址から出土した土器の破片



(a) 瓦の破片



(b) 表面構造の獲得結果

図11 チントルゴイ城址から出土した瓦の破片

5. おわりに

本研究では、プロジェクタとデジタル一眼レフカメラを用いて、対象物体にスリット光を照射し、スリット光が投影された画像を解析することで、簡易に物体表面の構造情報を獲得することが可能となった。本手法は、簡易な環境でも表面構造を獲得することができるため、国外の発

掘調査においても、非常に有効的であることがわかった。

今後は、様々な波長を持つスリット光を対象物体に照射し、スリット光を解析（マルチスペクトル解析）することで、物体表面の内部構造も含めた構造情報の獲得を目指す。さらに、本研究では、比較的小さい遺物などを扱ってきたが、屋外にある中規模な遺構などにも適用できるようにスリット光の照射方法を検討する。具体的には、本研究の手法では、暗室等の暗い撮影環境を準備する必要があるが、屋外の発掘調査では暗室等を準備することは難しいため、スリット光を検出することができない。このため、日中の明るい環境でスリット光を検出するには、スリット光の投影方法を検討する必要がある。それには、プロジェクタを利用するのではなく、非可視光の波長を持つスリット光を発生させ、カメラ側にもこのスリット光を検出できる光学系を設計する必要がある。今後はこのような光学系の設定を検討する。

付記

本研究は、平成21年度の奈良大学研究助成「パターン光投影に基づく物体表面構造情報の獲得」(研究代表者)の一部である。

参考文献

- 1) Banno, T. Masuda, T. Oishi, and K. Ikeuchi, "Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project," International Journal of Computer Vision, Vol. 78, No. 2-3, pp. 207-222, Jul. 2008.
- 2) F. Bernardini and H. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline" Computer Graphics Forum, Vol. 21, Issue 2, pp. 149-172, 2002.
- 3) Levoy et. al., "The Digital Michelangelo Project", In Proc. SIGGRAPH 00, pp. 131-144, 2000.
- 4) 奥富正敏、金出武雄、「複数の基線長を利用したステレオマッチング」、電子情報通信学会論文誌、vol. J75-D-II、no. 8、pp. 1317-1327、1992。
- 5) Xiao-Xue Cheng, Xian-Yu Su, and Lu-Rong Guo, "Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects", Applied Optics, Vol. 30, Issue 10, pp. 1274-1278, 1991.
- 6) K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, "Digital Bayon Temple -e-monumentalization of large-scale cultural-heritage objects-," Proc. ASIAGRAPH 2007, Vol. 1, No. 2, pp. 99-106, 2007.
- 7) O.D. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint, MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- 8) Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22 (11) :1330-1334, 2000.
- 9) 井口征士、佐藤宏介、「三次元画像計測」、昭晃堂、1994年。