

## ハンドヘルド型レンジファインダとカメラを用いた3次元形状計測

中井 裕文† 佐藤 宏介†

†大阪大学 大学院基礎工学研究科

560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel +81-6-6850-6371 nakai@sys.es.osaka-u.ac.jp

**あらまし:** 近年になって従来大型なものであったレーザーレンジファインダの小型化が大きく進捗している。本稿では Time-of-Flight 法に基づく1次元走査型のハンドヘルド型レンジファインダとカメラを用いたリアルタイム3次元計測手法を提案する。提案手法は内部パラメータが既知である前提のもと、レンジファインダから取得される断面距離データと、同時に投影されるレーザースリット光のマッチングをカメラ画像上で行うことによって射影変換行列を推定し、カメラとレンジファインダの相対位置を逐次求めることによって3次元形状を取得する。試作システムにおいて単純形状物体の計測を行った結果、実スケールで物体形状を得ることができた。

**キーワード** レンジファインダ, 3Dモデリング, ハンドスキャナ, スリット光投影法

## 3D Shape Measurement Using Fixed Camera and Handheld Laser Scanner

Hirofumi NAKAI† Kosuke SATO†

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

Tel +81-6-6850-6371 shinsaku@sys.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose a new 3D shape measurement system using a handheld laser rangefinder and a camera. We employ a one-dimensional range sensor based on Time-of-Flight method as the handheld device. To obtain the relative position of the rangefinder and the camera at each frame, we estimate the projective transformation matrix by matching between a range data and a slit image. As a demonstration of this system, we experimented using the experimental prototype and evaluated its accuracy.

**Keywords:** Range Finder, 3D Modeling, Handy Scanner, Slit light projection

### 1 はじめに

光学系を用いた非接触3次元計測は、文化財や美術品などの脆弱な考古遺物の形状取得するデジタルアーカイブの有力な手段として注目されている。池内らは距離データを高精度にかつ効率よく統合する手法を用いてカンボジア王国にあるバイヨン遺跡の正確な3次元形状取得に成功している [1]。また、Levoyらは美術品のデジタル化を行っており、より高精細に取得するために計測システムをハードウェア、ソフトウェアの両方の側面から提案している [2]。

しかし遺跡内には狭い場所や足場の悪い場所が多く存在し、その中にある複雑な形状を持つ遺物の計測や3次元地図を作成する際には構成要素が限定された大型計測器での計測は困難となる可能性がある。このような場所に対しては、データ統合手法の応用として研究されてい

る。計測装置を自由かつリアルタイムに移動させながら統合的に3次元形状を取得するハンドヘルド型計測器の使用が有効であると考えられる。

市販化されているものではテクノドリーム21社の3DWand[3]やPolhemus社のFastScan[4]が挙げられる。前者はLEDマーカと計測器から発するスリット状の光をビデオカメラで撮影することによって三角測量の原理で3次元形状を取得することができる。後者は磁気式位置姿勢センサを用いる方法で、計測器側に磁気発生源、カメラ、スリット光源が装着されており、磁気センサで計測器の位置関係を推定しながら前者と同じように光切断法で形状を取得する。しかし、LEDを用いる方法ではカメラでマーカを撮影しなければならないため、測定範囲が限定されてしまうことや、外界の光や反射物の影響を受けてしまうという欠点がある。一方磁気センサを用いる方法では磁性体・誘導体の影響を受けてしま

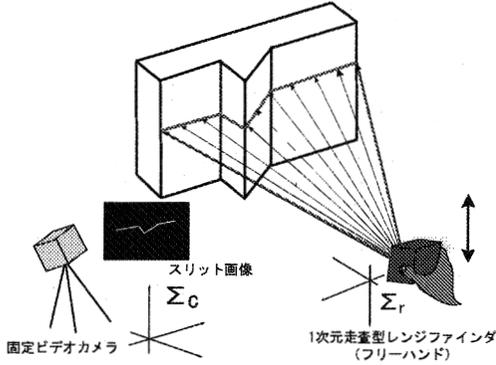


図1 システムの構成

うので環境に対するロバスト性は低くなることや、距離の2乗に比例して精度が悪くなるという欠点が存在する。計測器側にセンサを装着することによってセンサ側の誤差が測定結果に影響を及ぼしてしまい、計測器の位置を正確にトラッキングできない可能性がある。

計測器に位置姿勢取得センサを装着しない方法として、日当りはペンタグラマと呼ばれる五線譜を補助光とし、自由にスリット線をスイープすることによって物体の形状を取得する手法を提案している [5]。

近年になり、従来大型であったレーザレンジファインダの小型化が進捗している。本稿では、Time-of-Flight法に基づくハンドヘルド型計測器を用いた計測システムを構築する。従来のハンドヘルド型計測器は三角測量法に基づく方法での計測が主流であったが、提案手法ではTime-of-Flight法に基づき、手持ちデバイスで1次元形状データの取得が可能であることに加え、手持ちデバイスに位置姿勢取得センサを装着しない点の特徴である。

## 2 提案計測手法

### 2.1 システムの構成

本研究では1次元走着型でフリーハンドのハンドヘルド型レンジファインダと固定ビデオカメラを用いて、リアルタイムに3次元形状を取得する手法を提案する(図1)。レンジファインダはTime-of-Flight方式で1ラインの距離データを取得すると同時に可視スリット光を照射するものとし、ユーザはこのスリット光にしたがって対象物体全体をくまなくスイープすることによって3次元形状を取得することが可能となる。

固定ビデオカメラはレンジファインダの位置姿勢を求めるために用いられる。固定ビデオカメラの座標系が世界座標となり、常に不定となるカメラとレンジファインダとの相対位置を、カメラで撮影したスリット光とレ

ンジファインダで取得した1次元距離データを元に、逐次剛体変換することによって実スケールでの3次元形状が復元される。

### 2.2 システムの計測原理

本研究では射影変換を用いて固定ビデオカメラとレンジファインダの位置関係を推定する(図2)。図3に本手法の3次元形状取得までの流れを示す。世界座標を  $\vec{X}_w = [x_w \ y_w \ z_w]$ 、レンジファインダの座標系を  $\vec{X}_r = [x_r \ y_r \ z_r]$  とすると、以下のような関係が得られる。

$$\vec{X}_w = R\vec{X}_r + t \quad (1)$$

ここで、 $R$  は回転成分、 $t$  は並進成分とする。また、固定カメラで撮影した画像上のスリット輝線の座標を  $\vec{x}_r = [u \ v]$  とすると射影変換は以下のように表すことができる。

$$\lambda \vec{x}_r = H\vec{X}_r = AD\vec{X}_r = A \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{X}_r \quad (2)$$

$H$  の射影変換行列は各座標間の対応点を求めることによって推定することができ、内部パラメータ  $A$  と外部パラメータ  $D$  に分解することができる。本研究においては内部パラメータを事前に Zhang の方法で求めて既知とするため、固定カメラで撮影した画像上のスリット座標とレンジファインダで取得した距離データとの射影変換行列を求めることができれば、外部パラメータ  $R, t$  を求めることができる。この操作をハンドヘルド型レンジファインダのスリット光で対象物体なぞるように操作し、この3次元復元処理を何フレームにも渡って繰り返すことにより、対象物体の全体形状が取得可能となる。

### 2.3 マッチング手法

前述したとおり、射影変換行列を求めるためには1回のフレームで同時に取得したスリット画像と距離デー

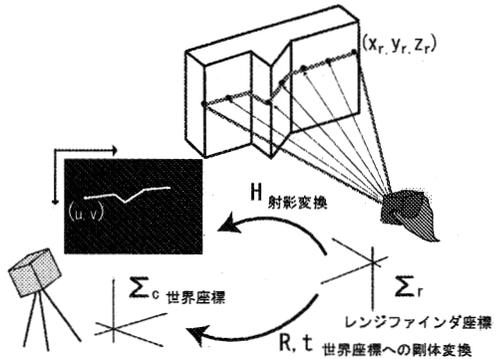


図2 計測原理

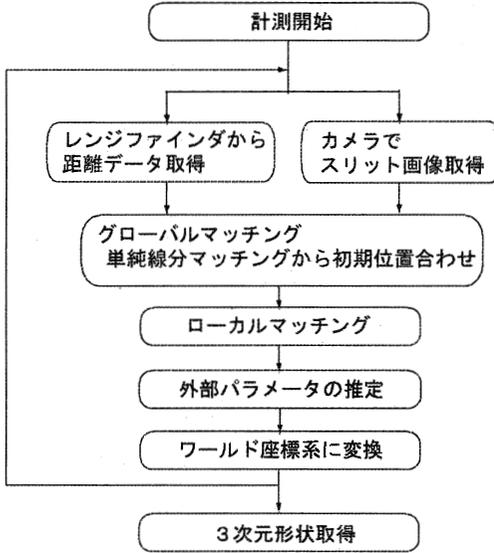


図3 1フレームの処理の流れ

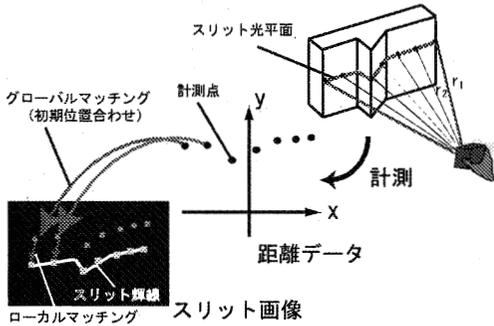


図4 距離データとスリット画像のマッチング

タの対応点を求める（以下マッチング）必要がある。本研究では、スリット画像上においてマッチングを行う。マッチングはグローバルマッチングとローカルマッチングの2段階処理で行われる（図4）。

グローバルマッチングは距離データを射影変換でスリット輝線の近傍に投影する操作であり、ローカルマッチングは対応点間の2次元ユークリッド距離の総和を目的関数として最適な対応点を求める操作である。以下に各マッチングの具体的な手法について述べる。

### 2.3.1 グローバルマッチング

スリット線と距離データは両方とも3次元空間内でレーザ光の投影平面に乗る拘束があるため、回転、平行移動、スケールの6自由度だけの変換を考えること

にする。

まずスリット画像上の輝線のラインセグメントの端点を取得し、それらから位置ベクトルを求め、 $b_{x_2}$  とする。さらにこのベクトルに直交し、端点を通るベクトルを  $b_{y_1}$  とする。同様に断面距離データのラインセグメントの基底を  $b_{x_2}$ 、 $b_{y_2}$  とする。さらにスリット輝線画像の基底を  $B_1 = {}^t[b_{x_1} \ b_{y_1}]$ 、断面距離データの基底を  $B_2 = {}^t[b_{x_2} \ b_{y_2}]$  とする。各基底ベクトルは正規化されているので  $B_1$ 、 $B_2$  は直交行列となる。またスリット画像におけるスリット輝線の重心座標を  $m_1 = {}^t[m_{x_1} \ m_{y_1}]$ 、断面距離データの重心座標を  $m_2 = {}^t[m_{x_2} \ m_{y_2}]$  とする。

一方の基底をもう一方の基底に変換するためには、

$${}^tB_1(x_1 - m_1) = SF_y B_2(x_2 - m_2) \quad (3)$$

が成り立つ。ここで、スリット画像上の新しい基底上の座標を  $x_1 = {}^t[x_1 \ y_1]$ 、断面距離データの新しい基底上の座標を  $x_2 = {}^t[x_2 \ y_2]$  とする。

ここで  $S$  はスケーリング係数、 $F_y$  は元の座標軸を変換するための行列であり、

$$F_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix}$$

である。(3)式から各セグメント端点の対応を求めて、この式を満たすスケーリング係数  $s_x$ 、 $s_y$  を求める。この係数を用い、変換後の座標を  $x'_2$  とすると

$$x'_2 = B_1 S F_y B_2 (x_2 - m_2) + m_1 \quad (4)$$

$$= R x_2 + t \quad (5)$$

となり、(1)式と(5)式から

$$R = B_1 S F_y B_2 \quad (6)$$

$$t = B_1 S F_y B_2 m_2 + m_1 \quad (7)$$

が成り立つ。今回は単純化のため、1フレーム目におけるグローバルマッチングのみ上記の変換を用いるが、2フレーム目以降は前回求めた射影変換行列を用いて投影することによって初期値とした。

ただし、スリット輝線が断裂している場合や、スリット画像上にノイズが存在する場合は変換行列を求めることはできない。

### 2.3.2 ローカルマッチング

ローカルマッチングは、ICP アルゴリズムを基本とする。ICP アルゴリズムは3次元の点群同士の位置合わせを行う際に有効な方法とされている。以下に本手法で用いたアルゴリズムの詳細を示す。

STEP1 スリット画像に初期値としての点群を与える。ただし点群には距離データが格納されている。

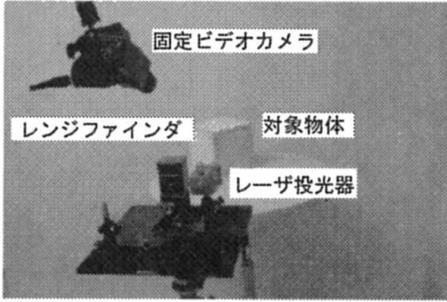


図5 システム概観

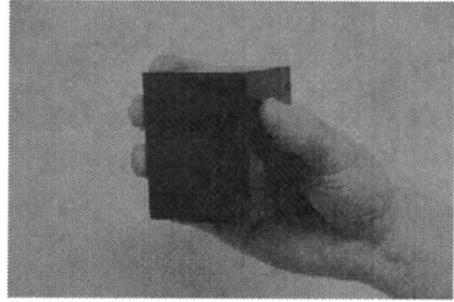


図6 使用したハンドヘルド型レンジファインダ

- STEP2 各点とスリット輝線との最短ユークリッド距離をそれぞれ求めて対応点とする。各最短ユークリッド距離の総和  $d$  を求める。
- STEP3 各対応点を用いて射影変換行列を推定し、それを用いてもとの距離データを再び画面上に投影する。
- STEP4  $d$  が十分小さくなるまで STEP2, STEP3 を繰り返す。

表1 レンジファインダの仕様

計測原理	Time-of-flight 方式
操作原理	MEMS スキャナ
測定速度	25 ライン/秒
測距精度	± 20mm
スキャン角分解能	45° を 100 分割
レーザー安全クラス	クラス 1
製造元	デベロソリューションズ

### 3 実験と結果

#### 3.1 試作システムの構成と実験方法

提案システムが実装可能であるか検証するために、試作システムを作成した。図5にシステム概観を示す。実験で用いる装置は固定ビデオカメラ、赤外線レーザー式の1次元走査型レンジファインダ(図6)、スリット光投光器である。スリット光投光器はレンジファインダを同一平面にし、カメラに撮影可能な補助光としての赤色レーザーを投光する。表1にレンジファインダの仕様を示す。計測器はデベロ社製の1次元走査型のレンジファインダ Bsight 045 を使用する。レンジファインダはPCとUSB接続でデータを取得する。出力データは1スキャンあたり100個の距離データ列となる。また、試作システムでは逐次オフラインで距離データとスリット画像を取得する。出力データは極座標系  $P = (r, \theta)$  で表現されているので、デカルト座標系  $c = (x, y, z)$  に  $x = r \sin \theta$ ,  $y = r \cos \theta$  を用いて変換を行っている。ただし、 $z = 0$  とする。対象物体として図7のような単純形状物体を用いた。枠線で囲まれた部分が今回計測を行った箇所である。

以下に実験の手順を記す。

1. 距離データとスリット画像を一組取得する。
2. 2.3.1節の方法でグローバルマッチングを行い、対応点から射影変換行列を求める。

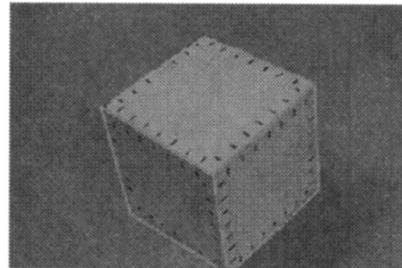


図7 使用した対象物体

3. 計測ヘッドを2 cm 間隔で鉛直方向に移動させ、再び距離データとスリット画像を取得する。
4. 前回求めた射影変換行列で距離データをスリット画像に投影し、対応点を求めて射影変換行列と外部パラメータを求める。
5. 求めた外部パラメータで距離データをカメラ座標系に変換し、3へ戻る。
6. 7点のサンプルを取得すると終了とする。

#### 3.2 計測結果

##### 3.2.1 マッチング例

図8にローカルマッチングを行った例を示す。図8より、点群がグローバルマッチングで与えられた初期値か

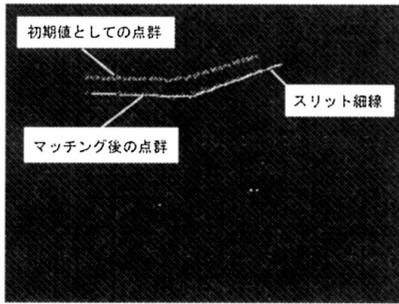


図8 ローカルマッチングの例

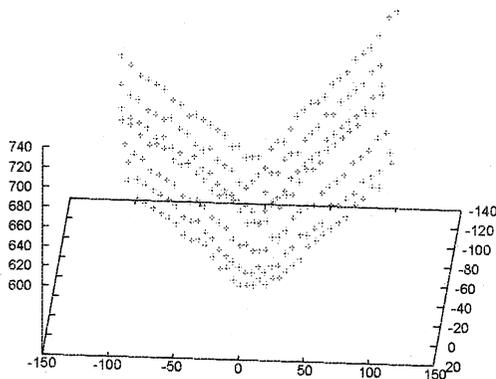


図9 計測結果 (7 スキャン分の同時表示)

らスリット輝線に重なるように対応点が取れていることが分かる。

### 3.2.2 データ統合図

図7に示す計測対象を提案手法を用いて測定した時の計測結果を図9に示す。各フレームで得られた距離データ群が同一平面で統合されており、実スケールで形状が復元されていることが見て取れる。計測結果には一部に凹凸が見られるため、精度面での改善が必要となる。

### 3.2.3 カメラの移動軌跡

図10に逐次推定した外部パラメータの並進移動成分をプロットしたものを示す。点群がほぼ直線上に乗っていることからレンジファインダの運動が推定できていることが分かる。また、点の間隔がすべて約20mmとなっており、実験上のレンジファインダの移動間隔とほぼ等しいことが分かる。

### 3.3 精度評価

計測結果の相対誤差を評価するために点群に対して、平面当てはめを行った。左右の面に対してそれぞれ基準となる平面は代表点を3点選ぶことで作成し、点と面と

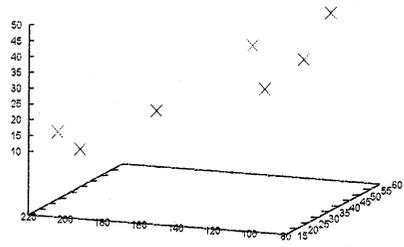


図10 カメラの動き推定 (単位: mm)

表2 点群と平面間の平均と標準偏差

	平均 [mm]	標準偏差 [mm]
右平面	3.44	2.60
左平面	4.09	2.54

の距離の分散を調べた。表2より、それぞれの面に対して2mm程度のばらつきがあることが確認できる。

## 4 考察

### 4.1 画像取得に関する考察

本システムは遺跡内での3次元形状計測が困難な場所で用いるものであり、さまざまな環境下での使用が考えられる。遺跡内の地下通路などの暗い場所であれば安定したスリットの抽出が可能であるが、環境によってはスリット輝線の抽出が困難となる場合が考えられる。本システムを野外で使用する場合は環境光の変化によってスリット輝線画像に大きなノイズが発生する可能性がある。本システムにおいては、画像内のある程度のノイズであれば、マッチングを行うことは可能であるが、細線の近傍に多数のノイズがある場合投影された距離データが誤ってノイズを対応点と認識してしまう可能性がある。

さまざまなノイズ処理の画像処理を組み込むと、1フレームで行う処理が大きくなり、フレームレートが小さくなるため、リアルタイムな計測に影響を与えてしまうことが考えられる。よってスリット輝線取得の信頼性とリアルタイム計測を行うのに十分なフレームレートを確保する問題はトレードオフの関係になり、今後考えなければならない問題の一つとなる。

### 4.2 マッチングに関する考察

距離データとスリット輝線の対応点を求める問題はデータ統合の正確さや計測精度に最も影響を与える要素の一つとなっている可能性が高い。今回はICPアルゴリズムを用いる際にスリット輝線と画面上に投影された距離データ最短ユークリッド距離のみを用いて最適解を

求める方法を用いているため、対応付けが3次元形状の精度に大きな影響を与える要因になっている可能性が高い。例えば、この方法では図8の結果に見られるように点群どうしのスケールが異なれば端点の対応付けが正確にできないなどの問題が生じる。

もし対象物体の形状が複雑であればあるほど特徴点が増え、これを用いることによって対応関係もある程度拘束することができる可能性がある。例えば曲率などの特徴量を計算することによって、点群の重み付けを行い、重みの大きなところから順に、統計的に対応点を取っていくなどの戦略が考えられる。しかし、このような処理による行うことによる計算量の増大が1フレームで行う処理を圧迫しかねない。よって如何にしてできるだけ正確な対応点をシステムのリアルタイム性を損なわないような少ない計算量で行うかが今後の課題となる。

#### 4.3 レンジファインダが及ぼす影響

本研究で用いるレンジファインダは計測平面に対して垂直な方向で複数回取得した距離の平均をとって距離データとしているため物体のエッジ部や、複雑な物体では正しいデータを得られない可能性がある。そのため、このような場所ではレンジファインダとスリット投影機がたとえ同軸になっていたとしても、スリット輝線と距離データが異なった形状で出力される場合がある。マッチングを行う際には点群同士がある程度同じ形でなければ正確な対応関係を取得することができないため、正しい射影変換行列が取得できない可能性があり、計測精度に大きな悪影響を及ぼす可能性がある。

#### 4.4 データ統合に関する考察

今回の実験ではレンジファインダを鉛直方向にのみ移動させたが、レンジファインダが滑らかな動きをする場合には制約の元、理論的に本手法が適用できると考えられる。もしレンジファインダの動きが不連続になると前フレームで求めた射影変換行列を用いてグローバルマッチングを行ったとしても、距離データがスリット輝線の近傍に投影されない可能性がある。よってフリーハンドであるといえ、レンジファインダの運動に関しても制限を設ける必要があると考えられる。

また、カメラとレンジファインダの位置関係についても問題が残る。スリット輝線が複雑な形状をもっていたとしても、レーザー光平面がカメラ中心に乗ってしまった場合、カメラからは1本の直線に見える位置が存在する。このような場合、画面上でマッチングを行う場合はスリット輝線は全く情報を持たないため、距離データとのマッチングが行えないことが容易に想像できる。

## 5 結論

本研究では1次元走査型レンジファインダとカメラを用いた位置姿勢取得センサを装着しないハンドヘルド型計測手法を提案した。また試作システムによる実験を行い、提案したハンドヘルド型システムで単純形状物体の測定が可能であることが分かった。

今後の課題としてはまず、十分な精度が得られていないため、計測結果から誤差要因を明らかにして、詳細な精度評価を行うことが挙げられる。

また今回の実験で提案する方法論が実装可能かどうかを検証する実験を行ったが、計測のリアルタイム性については検証していない。距離とスリット画像取得の同期を行い、画像処理の高速化からリアルタイムでの形状計測を目指す。

さらには、外装を駆使して、洞窟内など考古現場で使用可能な実用的なシステムを構築する。

## 参考文献

- [1] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda: "Bayon Digital Archival Project", In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pp 334-343, November 2004.
- [2] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk: "The digital michelangelo: 3d scanning of large statues.", SIGGRAPH 2000, Proceedings, pp. 131-44, 2000.
- [3] TechnoDream21 社  
<http://www.td21.jp/3Dwand.html>
- [4] Polhemus 社 <http://www.fastscan3d.com/products/>
- [5] 日向匡史, 佐藤宏介: "ハンドスイープされたスリット輝線の幾何拘束に基づく三次元計測", システム制御情報学会論文誌, Vol. 20, No. 3, pp. 98-106 (2007).
- [6] P.J. Besl and N.D. McKay: "A method for registration of 3-d shapes." IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, Vol. 14, No. 2, pp. 239-56, 1992.
- [7] Z. Zhang: "Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations", Technical Report, MSR-TR-98-71, 1998.
- [8] 井口征士, 佐藤宏介: "三次元画像計測", 昭晃堂, 1990.