

[論文]

(2007年12月28日 Accepted)

高速な3次元物体復元法の開発

松田 淳平¹, タン ジュークイ², 金 亨燮², 石川 聖二²

1) 九州工業大学大学院・工学研究科, 2) 九州工業大学・工学部

要約: 本論文は, 2台のビデオカメラを用いた高速な3次元物体復元手法を提案する. 近年, 立体テレビのコンテンツ制作技術の一つとして, 移動カメラによる高速な3次元復元手法の確立が望まれている. しかし, 現在確立している3次元復元手法では, 高速な復元は可能であるが, 移動カメラに対応できない. そこで, 我々は, Sugimoto & Xuの3次元静止物体復元手法を単純化することにより, モバイルカメラへの拡張が可能な, 2台の固定カメラによる3次元物体復元手法を提案する. さらに3次元復元処理のほとんどの処理を構成し, コンピュータへの大きな負荷となっている行列演算処理の高速化によって, 3次元復元処理全体の高速化を図る. 提案手法を用いて静止物体の3次元復元を行った結果, 復元計算は650 μ sで行えた. このことから提案手法の有効性が確認された.

キーワード: 3次元復元, カメラ回転行列, エピポーラ幾何, OpenCV

Development of a Fast 3-D Object Reconstruction Technique

Junpei MATSUDA¹, Joo Kooi TAN², HyoungSeop KIM², Seiji ISHIKAWA²

1) Graduate school of Engineering, Kyushu Institute of Technology

2) Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: This paper describes a fast three-dimensional object reconstruction technique. Recently, the establishment of a high-speed 3-D reconstruction technique with mobile cameras is expected as one of the contents production technologies of a 3-D television. However, it is not possible to conduct the 3-D reconstruction with mobile cameras by the existent reconstruction techniques. We propose a 3-D object reconstruction technique with two fixed cameras which could be extended to a mobile camera system by simplifying 3-D geostationary object reconstruction technique proposed by Sugimoto & Xu. In addition, we employ a software tool named OpenCV to speed up matrix computation which is included in most 3-D reconstruction algorithms and imposes a computer heavy computational load. An experiment was conducted for 3-D reconstruction of a static object by employing the proposed technique. The computation time for recovering the 3-D shape took only 650 μ s. This shows effectiveness of the proposed technique.

Keywords: 3-D reconstruction, high speed, camera rotation matrix, OpenCV, epipolar geometry

Junpei MATSUDA

Sensuicho 1-1, Tobata, Kitakyushu, 804-8550, Japan

Phone: +81-93-884-3191, Fax: +81-93-884-3183, E-mail: jmatsuda@ss10.cntl.kyutech.ac.jp

1. はじめに

近年のコンピュータの性能の大幅な向上により、3次元復元技術は、他の様々な分野にも取り入れられている。代表的なものに、スポーツ分野での運動解析やエンターテインメント分野での3Dキャラクタ製作、医療・福祉分野でのリハビリテーション支援などが挙げられる。さらに今後重要になるのが、立体テレビのコンテンツ制作技術としての3次元復元技術である。

現在の3次元復元手法は、用いる装置により2種類に大別される。1つは、磁気センサ・赤外線センサを使用して直接3次元位置を計測する装置であり、もう1つは複数台のビデオカメラを用いて画像処理により3次元位置を計測する装置である。前者は復元精度が高く、その処理も高速である。しかし、システムが高価になる傾向にあり、環境を整えるために専用のスタジオが必要である。後者は、復元精度や処理時間の速さは前者に及ばないが、システムを構成する装置がビデオカメラやPCのみであるため、前者に比べて安価である。よって本研究では、複数台のビデオカメラによる3次元復元手法を考える。

我々は、現在までに複数台のビデオカメラを用いた3次元復元システムをいくつか開発してきた[1,2]。しかし、これらは主に因子分解法をベースとした手法を用いているため、高速な3次元復元は望めず、また、手法の簡素化等による計算量の減少による処理の高速化なども不可能である。そこで本論文では、Sugimoto & Xu[4]により提案されたエピポラ幾何とオイラー角を用いた3次元静止物体復元手法を単純化することにより、モバイルカメラへの拡張が可能な、2台のビデオカメラによる高速な3次元物体復元手法を提案する。また、提案手法を用いて静止物体の3次元復元実験を行い、その効果を示す。

2. キャリブレーションと復元の原理

2.1 カメラ回転行列の単純化

一般的に、カメラ回転行列は3軸周りの回転で定義される。例えば、オイラー角を用いて定義された場合、式(1)のようにZYZ軸周りの回転で表現されることが多い。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(Z, \alpha)\mathbf{R}(Y, \beta)\mathbf{R}(Z, \gamma) \quad (1)$$

しかし、実際にビデオカメラで対象を撮影する場合、三脚に固定して撮影する場合でも、手に持って撮影す

る場合でも2台のカメラ間の光軸周りの回転は微小であると考えられる。そこで、カメラの光軸周りの回転行列を単位行列とし、全体のカメラ回転行列を2軸回転で表現する。このとき、カメラ回転行列は式(2)のようにYX軸回転で表現される。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(Y, \alpha)\mathbf{R}(X, \beta) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{R} はカメラ回転行列、 $\mathbf{R}(Y, \alpha)$ はY軸周りの回転、 $\mathbf{R}(X, \beta)$ はX軸周りの回転を表す。

2.2 カメラ回転角の導出

カメラ回転行列の回転角の導出法について説明する。カメラ回転角は、エピポラ幾何における2枚の対応する画像点間の対応により導出されるエピポラ方程式と、カメラ座標変換行列の展開式の近似により導出される[4]。エピポラ方程式とは、図1のように、ある画像と別の方向から観測した別の画像のそれぞれの座標の対応を式(3)により表現する式である。

$$\mathbf{m}'^T \mathbf{F} \mathbf{m} = 0 \quad (3)$$

ただし、式(3) \mathbf{m}, \mathbf{m}' はそれぞれのカメラから得られる対応点の画像座標の同次座標、 \mathbf{F} はアフィンカメラモデルにおける基礎行列であり、式(4)で与えられる。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & f_3 \\ 0 & 0 & f_4 \\ f_1 & f_2 & f_5 \end{pmatrix}, \mathbf{m} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{m}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)を用いて式(3)を展開すると、

$$f_1 x + f_2 y + f_3 x' + f_4 y' + f_5 = 0 \quad (5)$$

となる。また、カメラ間の座標変換式は一般的に式(6)のように表現される(図2)。

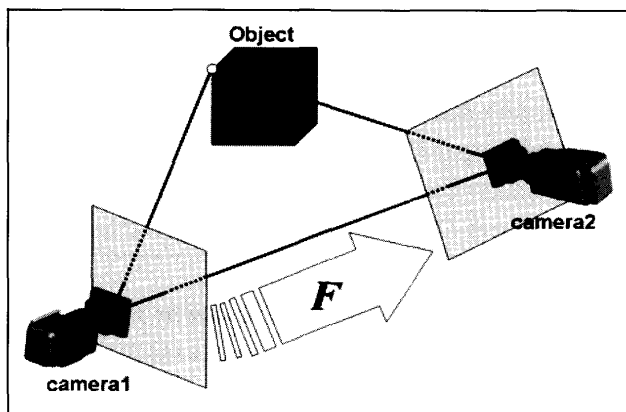


図1 エピポラ幾何

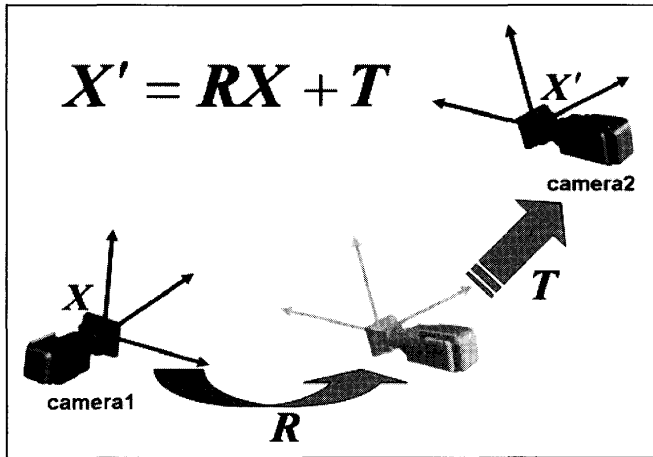


図2 カメラ座標変換

$$X' = RX + T \quad (6)$$

これは、カメラ1の座標系 X に回転行列 R をかけて回転させることによりカメラ2と同じ姿勢にし、その後 T だけ並進移動させカメラ2と同じ座標系 X' にすることを表している。ただし、それぞれ

$$X = (X \ Y \ Z)^T, \quad X' = (X' \ Y' \ Z')^T$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \quad T = (t_x \ t_y \ t_z)^T \quad (7)$$

と表す。この式を展開すると、

$$\begin{cases} X' = r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x \\ Y' = r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y \\ Z' = r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z \end{cases} \quad (8)$$

となり、式(8)の第1式、第2式を用いて Z を消去すると、

$$g_1X + g_2Y + g_3X' + g_4Y' + g_5 = 0 \quad (9)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} g_1 &= -r_{23} \\ g_2 &= r_{13} \\ g_3 &= r_{11}r_{23} - r_{13}r_{21} = -r_{32} \\ g_4 &= r_{12}r_{23} - r_{13}r_{22} = r_{31} \\ g_5 &= r_{23}t_x - r_{13}t_y \end{aligned} \quad (10)$$

である。ここで、カメラ回転行列は式(2)のように2軸回転で定義しているため、式(10)は以下のように置き換えられる。

$$\begin{aligned} g_1 &= -\sin \beta \\ g_2 &= -\sin \alpha \cos \beta \\ g_3 &= \cos \alpha \sin \beta \\ g_4 &= \sin \alpha \\ g_5 &= \sin \beta \cdot t_x + \sin \alpha \cos \beta \cdot t_y \end{aligned} \quad (11)$$

次に射影式について考える。本稿では、弱透視投影 (Weak Perspective Projection) [6]を用いるため、射影式は式(12)のように表現される。

$$\begin{cases} X = \frac{Z_c}{f}(x - x_0) \\ Y = \frac{Z_c}{f}(y - y_0) \end{cases}, \quad \begin{cases} X' = \frac{Z'_c}{f'}(x' - x'_0) \\ Y' = \frac{Z'_c}{f'}(y' - y'_0) \end{cases} \quad (12)$$

ただし、 (f, f') , (Z_c, Z'_c) , $\{(x_0, y_0), (x'_0, y'_0)\}$ はカメラ1, カメラ2のそれぞれの焦点距離, 3次元物体の原点の Z 座標, 画像の原点を表す。これを式(9)に代入すると、

$$\begin{aligned} g_1 \frac{Z_c}{f}x + g_2 \frac{Z_c}{f}y + g_3 \frac{Z'_c}{f'}x' + g_4 \frac{Z'_c}{f'}y' \\ - g_1 \frac{Z_c}{f}x_0 - g_2 \frac{Z_c}{f}y_0 - g_3 \frac{Z'_c}{f'}x'_0 - g_4 \frac{Z'_c}{f'}y'_0 + g_5 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

となる。式(13)をエピポーラ方程式(5)と比較すると、

$$\begin{aligned} f_1 &= g_1 \frac{Z_c}{f}, f_2 = g_2 \frac{Z_c}{f}, f_3 = g_3 \frac{Z'_c}{f'}, f_4 = g_4 \frac{Z'_c}{f'} \\ f_5 &= -g_1 \frac{Z_c}{f}x_0 - g_2 \frac{Z_c}{f}y_0 - g_3 \frac{Z'_c}{f'}x'_0 - g_4 \frac{Z'_c}{f'}y'_0 + g_5 \end{aligned} \quad (14)$$

となる。この式に式(11)の各パラメータを代入すると、

$$\begin{aligned} f_1 &= g_1 \frac{Z_c}{f} = -\frac{Z_c}{f} \sin \beta \\ f_2 &= g_2 \frac{Z_c}{f} = -\frac{Z_c}{f} \sin \alpha \cos \beta \\ f_3 &= g_3 \frac{Z'_c}{f'} = \frac{Z'_c}{f'} \cos \alpha \sin \beta \\ f_4 &= g_4 \frac{Z'_c}{f'} = \frac{Z'_c}{f'} \sin \alpha \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。ここで、カメラ間スケールは次式により導出される。

$$s = \frac{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}{\sqrt{f_3^2 + f_4^2}} = \frac{\frac{Z_c}{f'}}{\frac{Z_c}{f'}} \quad (16)$$

よって、カメラ回転角 α 、 β は、次式により導出される。

$$\alpha = \cos^{-1}\left(-\frac{sf_3}{f_1}\right) \quad (17)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(-\frac{f_2}{sf_4}\right)$$

2.3 3次元復元の原理

対象の3次元復元は、2.2節の手法により導出されるカメラ回転角を用いて以下のプロセスにより行われる。

まず、カメラ1、カメラ2の回転行列をそれぞれ R_1 、 R_2 とすると、

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (18)$$

となる。ここで、本稿ではカメラ1を基準とした復元を行うので、 R_1 は単位行列となっている。したがって、各カメラの投影式は以下ようになる。

$$\tilde{u}_1 = A_1 \tilde{X} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{u}_2 = A_2 \tilde{X} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} sx' \\ sy' \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} & t_x \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} & t_y \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

式(19)を統合すると次式が得られる。

$$\tilde{u} = A\tilde{X} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \\ sx' \\ sy' \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} & t_x \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} & t_y \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

よって、3次元復元式は次のように与えられる。

$$\tilde{X} = (A^T A)^{-1} A^T \tilde{u} \quad (21)$$

3. 行列演算の高速化

提案法において3次元復元処理の高速化を図る場合、考慮しなければならないのは、モバイルカメラへの拡張を前提とした高速化でなければならないということである。そこで、一般的な3次元復元アルゴリズムのほとんどが行列演算処理によって構成されていることに注目し、行列演算処理の高速化によって、カメラキャリブレーションを含めた3次元復元処理の高速化を行う。本稿では、高速な行列演算処理の関数を持つOpenCV (Open Source Computer Vision Library) を用いて高速化を図る。

4. 実験

4.1 実験の概要

提案手法の有効性の確認のために、実物体画像に基づく3次元復元実験を行った。実験に用いたシステム

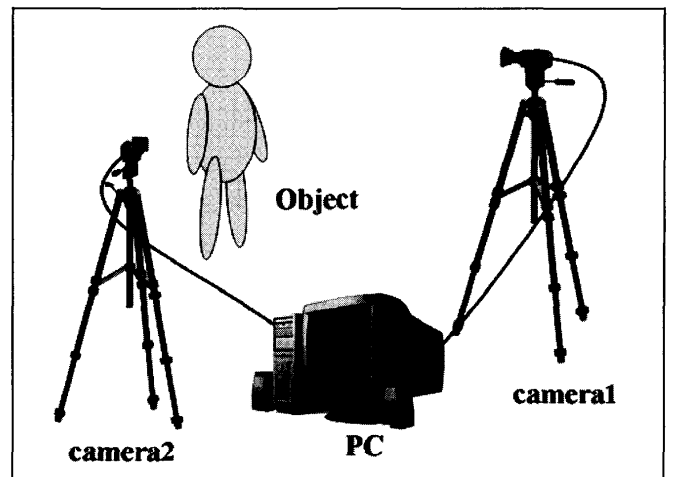


図3 システム構成

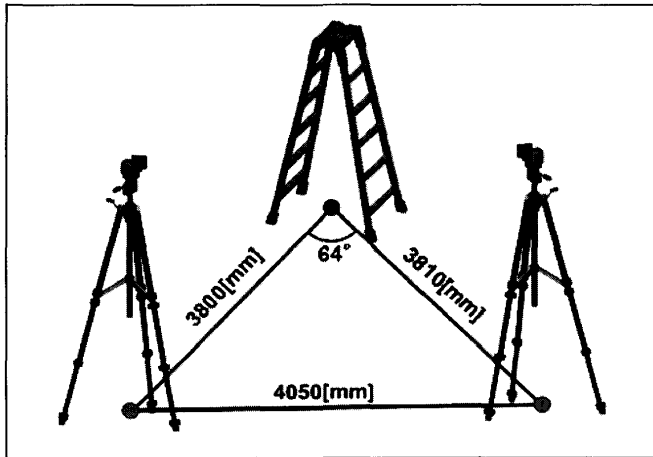


図4 実験環境

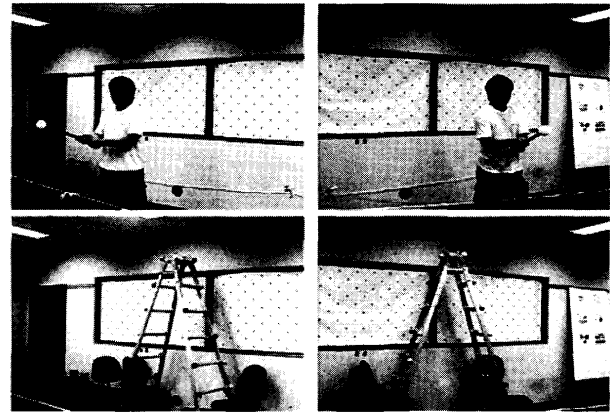


図5 実験風景 (a) camera1, (b) camera2

は、図3のように1台のPCと、それに接続され三脚に固定された2台のビデオカメラセットで構成される。実験は、カメラキャリブレーション処理と3次元復元処理の2段階で構成される。図4に復元対象と2台のカメラとの位置関係を示す。カメラキャリブレーションは、2台のビデオカメラの前の空間でマーカ付きの棒を振り、各カメラの画像上で対応する画像特徴点を取得することにより行われる。次に、復元対象物体の撮影を行って各カメラ画像を取得し、得られた特徴点から3次元形状の復元処理を行う。実験は、図5に示すような梯子を用いて行った。カメラキャリブレーションに用いた画像特徴点の数は2610点、梯子に付けた特徴点の数は28点である。また、用いたPCのスペックは表1に示すとおりである。

4.2 実験結果

3次元復元の結果を図6に示す。また、表3に復元結果の評価を示す。評価は、梯子の前面部分と背面部分の相対誤差を用いた。評価式は、

$$R(i) = \frac{|F(i) - B(i)|}{F(i)} \times 100[\%] \quad (22)$$

である。ただし、 $F(i)$ は図7に示すような各辺の長さであり、 $B(i)$ は $F(i)$ に対応する背面部分の長さである。図6、表3より、相対誤差が5%以下となり、梯子の3次元形状がほぼ正確に復元されていることがわかる。また、処理速度を表2に示す。表2に示すように、3次元復元処理はOpenCVを使用することにより非常に高速になった。ただし3-D reconstructionはキャリブレーション後の3次元復元のみ処理、

Calibration + reconstruction は特徴点取得後から3次元座標導出までの処理を示す。ここで、表に示すカメラキャリブレーションとは、画像特徴点を取得し終わってからカメラ回転行列を導出するまでの処理を示す。

表1に示すような低スペックのPCにおいても、3次元復元処理のみの場合だけでなくカメラキャリブレーションを含めた場合の処理時間も17msとなり、フレームレートの33msよりもはるかに小さい処理時間となっていることから、モバイルカメラでの実時間復元の可能性が高いことがわかる。

5. まとめ

提案したカメラ回転行列の単純化とOpenCVを用いた行列演算処理により、3次元物体の高速な復元が達成できた。しかし本結果は静止物体の復元である。さらにカメラキャリブレーションも事前にマーカ付きの棒を振るという作業を行い、マーカの座標の抽出も手動で行っている。これは、今後解決しなければならない課題である。

今後は、人間の動きのような変形物体の復元を行う予定である。固定カメラの場合は、一度カメラキャリブレーションを行えば動作の復元は可能となるが、モバイルカメラを用いる場合、サンプルタイムごとのカメラキャリブレーションが必要となる。この問題の解決方法としては、特徴点の自動抽出や2台のカメラの画像特徴点間のマッチングに色情報や初期時刻または逐次時刻の形状情報を用いることが考えられる。復元処理時間は高速なので、特徴点抽出とマッチング処理を含んだ全体的な復元処理がビデオレートで実現できる可能性がある。

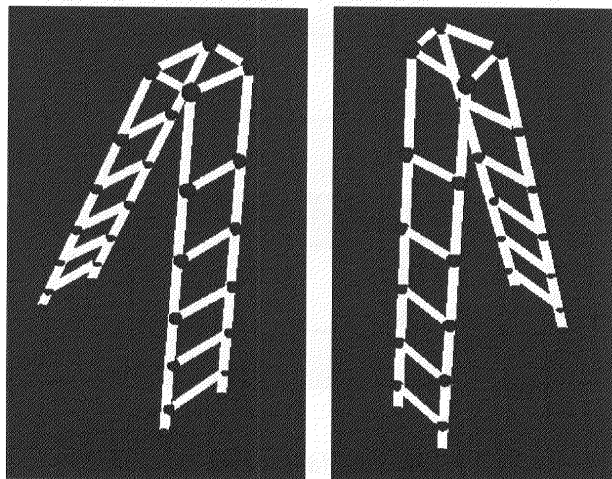


図6 梯子の復元結果

表1 PCのスペック

OS	Microsoft Windows2000 professional
CPU	Pentium III 1.0[GHz]
Memory	256[MB]

表2 処理速度

	Processing time
3-D reconstruction	650[μ s]
Calibration + reconstruction	17[ms]

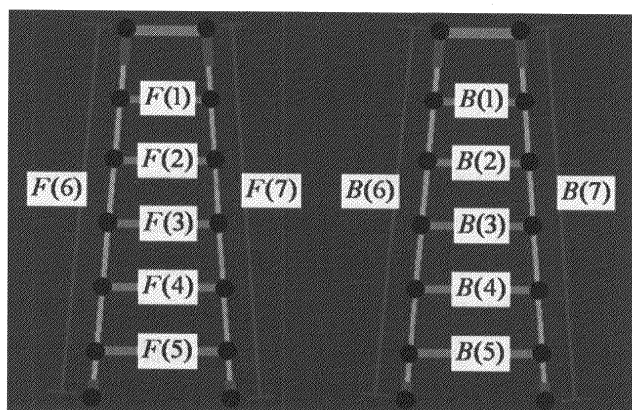


図7 梯子の各辺を表す記号

表3 復元結果の評価

評価箇所	相対誤差[%]
$R(1)$	2.53
$R(2)$	4.09
$R(3)$	4.40
$R(4)$	6.33
$R(5)$	4.38
$R(6)$	5.63
$R(7)$	5.56
Average	4.70

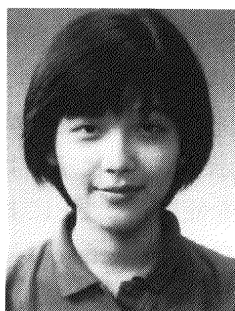
参考文献

- [1] Tan, J. K., Ishikawa, S.: "Deformable shape recovery by factorization based on a spatio-temporal measurement matrix", *Computer Vision and Image Understanding*, 82, 2, 101-109, 2001.
- [2] Yamaguchi, I., Tan, J. K., Ishikawa, S.: "A mobile motion capture technique excelling in 3-D modeling of temporary events", *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 1613-1617, 2006.
- [3] Hartley, R., Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge Univ. Press, 2000.
- [4] Sugimoto, N., Xu, G.: "A linear algorithm for motion from three weak perspective images using Euler angles", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.1, 54-57, January 1999.
- [5] Mikolajczyk, K., Schmidt, C.: "Scale & affine invariant interest point detectors", *International Journal of Computer Vision*, Vol.60, No.1, 63-86, 2004.
- [6] 佐藤淳, "コンピュータビジョン—視覚の幾何学—", コロナ社, pp.14-15, 1999.



松田 淳平 (まつだ じゅんぺい)

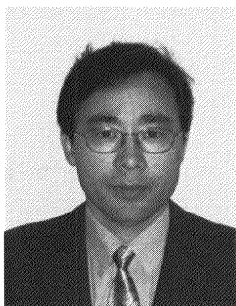
九州工業大学工学部機械知能工学科卒。現在、九州工業大学大学院工学研究科機械知能工学専攻博士前期課程在学中。画像処理並びに3次元計測、ソフトウェア開発に興味を持つ。計測自動制御学会学生会員。



タン ジュークイ (たんじゅーくい)

九州工業大学大学院設計生産工学専攻博士後期課程修了。博士工学。同大SVBLポストドク研究員を経て、現在、同大工学部機械知能工学科助教。平11、計測自動制御学会九州支部奨励賞、平16、情報処理学会九州支部第13回奨励賞、平17、知能生命・ロボット

国際シンポジウム若手奨励賞受賞。主に画像計測・解析、動作認識、コンピュータビジョンなどに関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、情報処理学会等会員。



金 亨變 (きむ ひよんそふ)

1994年九州工業大学工学部卒。1996年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1997年より九州工業大学工学部助手(機械知能工学科)。2005年、同大学工学部講師を経て、現在、同大工学部准教授。画像計測、対称性解析、医用画像処理、パターン認識に関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会、日本

医用画像工学会、バイオメディカルファジィシステム学会、医用画像情報学会、IEEE各会員。



石川 聖二 (いしかわ せいじ)

東京大学工学部計数工学科卒。東京大学大学院工学系研究科博士課程了。工学博士。九州工業大学情報工学科講師を経て、現在、九州工業大学工学部教授(機械知能工学科)。この間、連合王国シェフィールド大学客員研究員。オランダ王国ユトレヒト大学客員教授。3次元画像計測、医学画像処理の研究に従事。計測自動制

御学会、電子情報通信学会、画像電子学会、IEEE各会員。