

## 鏡面球とパンチルトカメラを用いた3次元復元

神原 誠之† 浮田 宗伯† 木戸出正継† 横矢 直和†

† 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科  
〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{kanbara,ukita,kidode,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 本研究では、投影中心を固定したパンチルトカメラで、任意パスで移動する鏡面球を撮影し、その鏡面球に写りこんだ静的な実世界の画像列から、シーンの3次元復元を行う手法を提案する。パンチルトカメラを利用して、自由経路で移動する鏡面球を撮影することで、高視野の撮影が可能であるため、効率的にシーンの3次元復元を行うことが可能である。提案手法では、パンチルトカメラの姿勢パラメータを得ることで、画像中の鏡面球領域の抽出が可能であれば、従来の Shape from Motion のようなカメラパス推定や、複数のカメラ間のキャリブレーションを必要とせず、シーンの復元を行うことが可能である。本稿では、自由経路を移動する鏡面球を撮影した映像から、静的シーンの復元実験を行った結果を示す。

キーワード 3次元復元、パンチルトカメラ、鏡面球、反射画像

## 3D Scene Reconstruction from Reflection Images in a Spherical Mirror

Masayuki KANBARA†, Norimichi UKITA†, Masatsugu KIDODE†, and Naokazu YOKOYA†

† Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology  
8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192, Japan  
E-mail: †{kanbara,ukita,kidode,yokoya}@is.naist.jp

**Abstract** This paper proposes a method for reconstructing a 3D scene structure by using the images reflected in a spherical mirror. In our method, the mirror is moved freely within the field of view of a camera in order to observe a surrounding scene virtually from multiple viewpoints. The observation scheme, therefore, allows us to obtain the wide-angle multi-viewpoint images of a wide area. In addition, the following characteristics of this observation enable multi-view stereo with simple calibration of the geometric configuration between the mirror and the camera; (1) the distance and direction from the camera to the mirror can be estimated directly from the position and size of the mirror in the captured image and (2) the directions of detected points from each position of the moving mirror can be also estimated based on reflection on a spherical surface. Some experimental results show the effectiveness of our 3D reconstruction method.

**Key words** 3D reconstruction, Pan-tilt camera, Mirror sphere, Reflectance image

### 1. はじめに

コンピュータビジョン技術を用いて、実環境を復元する試みが多くなされてきている [1]~[3]。計算機の高性能化によ

り、少数の画像のみからでなく、多くの画像や動画列を用いて、実環境を復元する手法 [4] が提案されており、代表的なものとして、複数の静止画からマルチベースラインステレオ法により復元する手法 [5]~[7] が挙げられる。しかし、広範

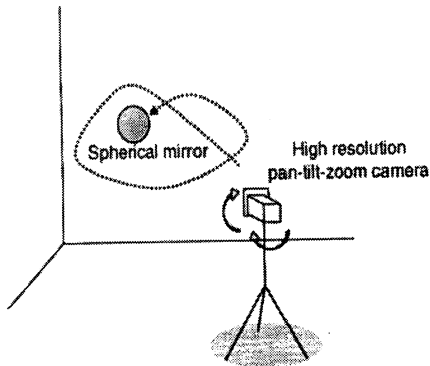


図1 3次元復元手法のアプローチ (自由経路で移動する鏡面球をパンチルトカメラにより撮影)

囲を対象としてシーンの復元を行うためには多くのカメラを用いる必要がある。その結果、多数のカメラ間のキャリブレーションが必要となるが、多数のカメラ間を正確にキャリブレーションするのは多くの作業コストが必要となるため、広範囲の環境を対象として復元を行うのは不向きである。

また、シーンが撮影された動画像からカメラの動きと3次元モデルを同時に復元するアプローチ [8]~[10] などが挙げられる。この手法では、画像上の特徴点を追跡することにより、シーンの3次元形状とカメラの外部パラメータを同時に推定するため、本質的にはカメラの動きに制約はなく、カメラは任意経路で撮影可能である。代表的な手法として、アフィンカメラモデルを仮定して、3次元形状とカメラの経路を推定する因子分解法 [11] がよく知られている。しかし、復元対象のシーンの形状がアフィンカメラモデルに仮定できない場合、安定した推定が行えないといった問題点がある。また、動画像からの3次元復元手法 [12] が提案されているが、多くの手法は対象環境に制限がある場合が多い。

これらの従来手法では、カメラ以外の特別な機器を必要としないという利点がある反面、カメラ間のキャリブレーションや、動画像のカメラパスなどを精度よく推定する必要があるため、手法が複雑化や精度の不安定化が問題として挙げられる。さらに複雑な形状のシーンを復元するためには、より多くのカメラ間のキャリブレーションや長いカメラパスの推定が必要となり、手法が複雑になるといった問題がある。

一方、カメラで鏡面や鏡面球を撮影し、鏡に写りこんだシーンの画像から実環境のシーンの復元やカメラパスの推定する試みも行われている [13]~[15]。代表的なものに、鏡面に写る実シーンと直接カメラで撮影されるシーンの対応点を推定し形状を推定する手法 [16], [17] などがある。しかしこれらは、直接カメラに撮影され、かつ同じ点が鏡面に反射して撮影されなければならないなどの制約があるため、復元対象

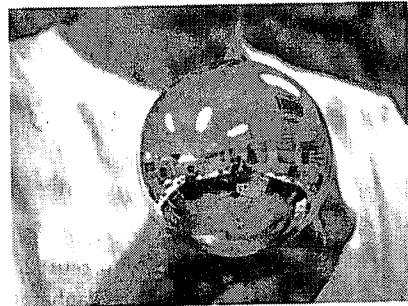


図2 鏡面球が撮影された入力画像の例 (1600×1200 画素, 14 frame/sec)

が局所的な箇所に限定されるといった問題がある。

本研究では、図1に示すように、投影中心を固定した高解像度パンチルトカメラで、任意経路で移動する鏡面球を撮影し、その鏡面球に写りこんだ静的な実世界の領域のみから、実環境のシーンを3次元復元する手法を提案する。また、鏡面球を撮影するカメラとして、高解像度動画カメラ (1600×1200 画素, 14 fps) を利用する。図2に、入力画像の例を示す。提案手法では、投影中心を1点に固定した単眼カメラにより撮影された映像より復元を行うため、カメラのパンチルト角のパラメータを用いれば、従来の Shape from Motion で必要であったカメラパス推定や、複数のカメラ間のキャリブレーションのような複雑な処理が不要となる。撮影された画像から鏡面球領域を検出し、カメラ座標系に対する鏡面球の位置を推定することで、鏡面に写りこんだ実環境が仮想的にどこから撮影されたかを求めることが可能である。これは、固定カメラの内部パラメータのみのキャリブレーションされればカメラ間のキャリブレーションや、動画像のカメラパス推定がのような複雑な処理を必要としないことを意味する。さらに、ミラーに写りこんだ画像中の領域のみから実環境を復元することで、多くの異なる視点からの映像を撮影することが可能となり、復元結果におけるオクルージョンによる未計測部分を軽減することが可能となる。提案手法では、映像中の鏡面球の領域を抽出することで、カメラに対する鏡面球の3次元位置を求める。反射画像内の特徴点を追跡することで、時系列反射画像における対応点を求め3次元復元を行う。

以下、2章では、投影中心固定のパンチルトカメラで撮影した鏡面球の反射画像を用いた3次元復元手法について、3章では、提案手法を用いたシーンの3次元復元実験について詳述する。最後4章で、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

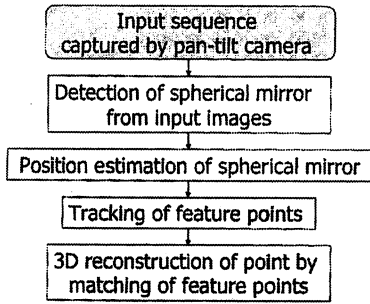


図3 提案手法の処理の流れ.

## 2. 鏡面球の反射画像を用いた3次元復元

本章では、投影中心固定のパンチルトカメラで、半径が既知の鏡面球を実環境下で任意パスで動かしたシーンを撮影し、その動画像列より実環境の3次元復元を行う手法について述べる。本研究では、パンチルトカメラは手法[18]によりあらかじめキャリブレーションされており、カメラの姿勢パラメータはパンチルトカメラ台より得ることが可能である。提案手法の処理の流れを、図3に示す。入力動画像として、静的環境において、鏡面球を動かし高解像度パンチルトカメラで撮影する。次に、入力動画像から鏡面球領域を抽出することでカメラに対する鏡面球の位置を推定し、その鏡面球領域内に写りこんだ画像内で特徴点を検出・追跡し対応点を求める。最後に、特徴点の追跡結果を用いて実環境の3次元モデル化を行う。以下に各処理について詳述する。

### 2.1 撮影環境

本研究は、図1に示すように、現実環境に固定された投影中心固定カメラで、任意経路で動かされた鏡面球を撮影した動画像系列を獲得する。画像中の鏡面領域の解像度を高めるため近年普及してきた高解像度の画像が撮影可能なカメラを利用する。本手法は、投影中心固定カメラを利用するため、通常の shape from motion や多眼カメラを用いる手法のように、カメラ間の外部パラメータを推定する必要がないという利点がある。そのため、正確な鏡面球の位置の推定や3次元復元を行うには、カメラの内部パラメータを正確に推定する必要がある。本研究では、カメラの内部パラメータは手法[19]によりあらかじめ推定を行った。

### 2.2 鏡面球領域の抽出

カメラ座標系に対する鏡面球の位置を推定するために、撮影された画像中から鏡面球の領域を抽出し、鏡面球領域の中心および半径を求める。提案手法では、真球の鏡面球をカメラで撮影するという性質上、鏡面領域の中心にはカメラが撮影される。この特徴を利用するために、カメラのレンズ周辺に色が既知のマークを設置する。このマークを用いてマーク

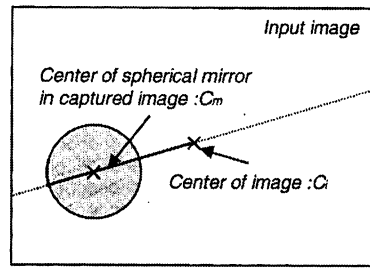


図4 画像上での鏡面球領域

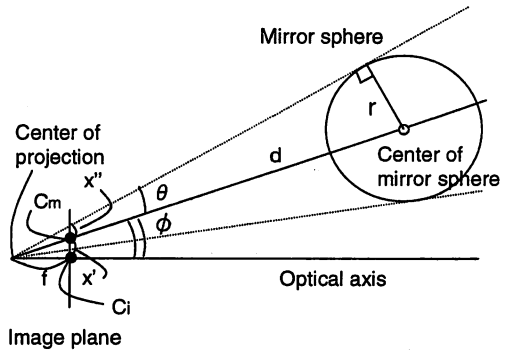


図5 カメラと鏡面球の位置関係

の中心位置を検出を行う。具体的には、前フレームでの鏡面球の中心の位置をもとに設定されたウィンドウ内で閾値処理し、検出されたマーク領域の重心を計算することで、鏡面球の中心を求める。次に、入力画像をエッジ検出を行い、鏡面球の中心から同心円状に円検出を行う。半径を変化させ、最もエッジ領域の含まれる割合の大きい半径を求める。

### 2.3 鏡面球の位置推定

前節で推定した画像中に写りこんだ鏡面球の中心と半径から、カメラと鏡面球の位置関係を推定する。図4に、撮影された鏡面球の画像を示す。図4内の、画像中心点  $C_i$ 、鏡面球の中心  $C_m$  およびカメラの投影中心の3点で構成される平面での断面図を図5に示す。ここで  $\varphi$  と  $\theta$  の2つの角を以下のように定義する。

$\varphi$  : 投影中心と鏡面球の中心、投影中心と鏡面球の境界をそれぞれ結ぶ直線のなす角

$\theta$  : 投影中心と  $C_m$  および投影中心と  $C_i$  を結ぶ直線のなす角

$x'$  を画像中心から鏡面の中心までの画像上での距離、 $x''$  を画像上での鏡面球の半径、 $f$  を焦点距離とすると以下の式が成り立つ。

$$\tan \varphi = \frac{x'}{f} \quad (1)$$

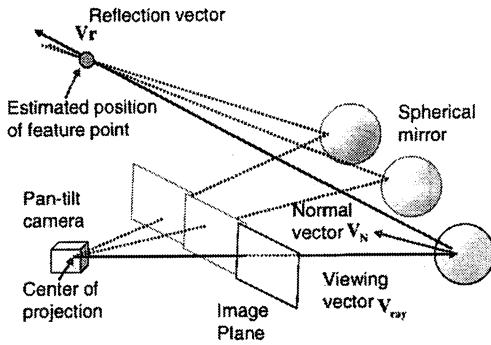


図6 鏡面球・カメラ・特徴点の3次元位置関係

$$\tan(\varphi + \theta) = \frac{x' + x''}{f} \quad (2)$$

このとき、 $x'$  と  $x''$  は画像上で鏡面球を検出することで推定でき、 $f$  はカメラの内部パラメータのキャリブレーションにより既知であるため、 $\varphi$  と  $\theta$  が計算可能となる。次に、図5に示すように、 $d$  を鏡面球までの距離、 $r$  を鏡面球の半径とすると以下の式が成り立つ。

$$d = \frac{r}{\sin \theta} \quad (3)$$

以上より、撮影画像中の鏡面球の中心  $C_m$  および、球の半径を推定することで鏡面球までの距離を求めることができる。球までの距離が求まれば、画像中の鏡面球の中心位置から、鏡面球の3次元位置が計算可能とある。

#### 2.4 追跡に基づく特徴点位置推定

検出された鏡面球領域内において、特徴点の追跡の行う。動画像系列で追跡を行うことで各フレームの特徴点の対応を求める。ここでは、手法 [20] により特徴点を検出し、前フレームにおいて追跡された特徴点付近のテンプレートを現フレームで抽出された特徴点に対応候補として、テンプレートマッチングを行うことで特徴点の追跡を行った。

#### 2.5 推定特徴点を用いた3次元復元

追跡された特徴点から、各点の3次元位置の推定を行う。あるフレームにおける特徴点は、鏡面球に反射しカメラに撮影されている。そのため、特徴点の位置は物体が存在すると推定された特徴点の画素が映り込んだ球面の位置の法線と視線方向から現実環境における物体方向を推定する。具体的には図6に示すとおり、視線方向と鏡面球の法線から物体の入射方向が計算できる。物体方向ベクトル  $V_r$  は、視線方向ベクトル  $V_{ray}$  と鏡面球の法線ベクトル  $V_N$  により以下の式(4)で表される。

$$V_r = -2(V_N \cdot V_{ray})V_N + V_{ray} \quad (4)$$

特徴点が追跡されたフレーム数だけの、物体方向ベクトルが

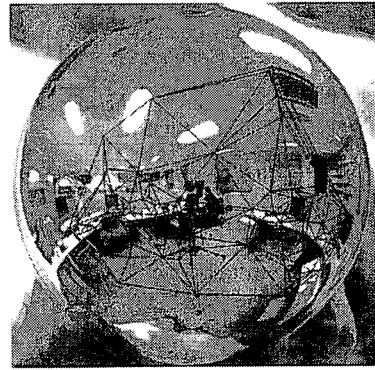


図7 鏡面球領域の三角分割結果の例

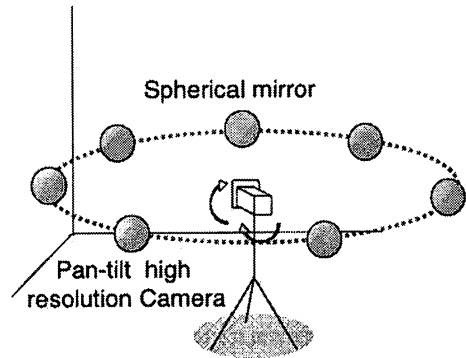


図8 実験における鏡面球とパンチルトカメラの位置関係

推定可能である。本研究では、推定された物体方向ベクトルのすべての組み合わせにおいて距離が最小となる箇所の中点を求め、それらを平均することで特徴点の3次元位置を推定する。最後に、3次元モデル化を行うために図7に示すようにDelaunayの三角分割法で特徴点群のパッチ化を行う。

### 3. 実験

本稿では、静的な屋内環境を復元対象としてパンチルトカメラにより鏡面球を撮影した画像列からシーンの3次元復元実験を行った。実験には、実環境を撮影するカメラとして、Pointgrey Research 社製 IEEE1394 カメラ Scorpion (1600×1200 画素, 14 frame/sec) を、利用し、投影中心が固定されるようにパンチルトカメラ台に設置した。また、鏡面球は山田光学社製(特注)で半径 101.6mm の真球を利用した。

本実験では、図8に示すように、鏡面球をパンチルトカメラの周りをおおむね同一平面上を移動するように移動させた。ここでは、鏡面球の追跡は手動で行い、図9に示すよ

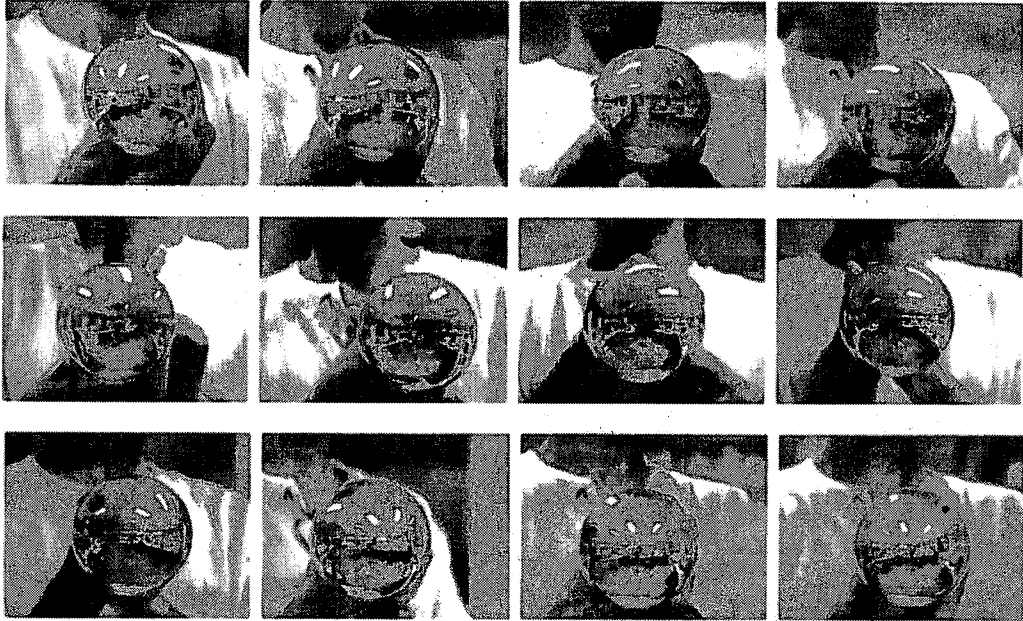


図9 実験における入力画像の例

うな 32 枚の鏡面球が撮影された入力画像を撮影した。図 10 に、鏡面球の位置の推定結果を示す。図中の赤、青、緑の軸は、それぞれ  $x, y, z$  軸を示している。図より、鏡面球の移動経路が計測できていることが確認できる。また、推定した特徴点を用いたモデル復元結果を図 11 に示す。追跡が行われた特徴点が少ないため復元された形状はシンプルであるが、鏡面球に写りこんだ画像からシーンの復元が行われていることが確認できる。本実験では通常のデスクトップ PC (CPU : 3.4GHz、メモリ 1 GB) 利用し、鏡面領域の抽出、鏡面球の位置推定、特徴点追跡および 3 次元復元を含む処理時間は数分程度であった。

#### 4. ま と め

本研究では、投影中心を固定したパンチルトカメラで、任意パスで移動する鏡面球を撮影し、その鏡面球に写りこんだ実環境の画像列から、シーンを 3 次元復元する手法を提案した。提案手法では、固定したパンチルトカメラにより撮影された映像より復元を行うため、パンチルト角のパラメータを獲得できれば、画像中の鏡面球領域から鏡面球の位置を求めることで、従来の Shape from Motion のような、カメラパス推定や、複数のカメラ間のキャリブレーションをすることなく、実環境の 3 次元復元を行うことが可能である。さらに、ミラーに写りこんだ鏡面球領域のみから、実環境を復元することで、多くの異なる視点からの映像を撮影することが可能

となり、オクルージョンの少ない広範囲の復元が可能となる。

今後の課題として、投影中心固定のパンチルトカメラを用いて、鏡面球の自動追跡することでシーンの 3 次元復元の自動化が挙げられる。また、カメラのシャッタースピードを変化による、複雑な光源環境下への対応や、パンチルトズームカメラを用いることで画像中の鏡面領域を拡大でき、より高精度な復元を行えると考えられる。

#### 文 献

- [1] N. Yokoya, T. Shakunaga and M. Kanbara: "Passive Range Sensing Techniques: Depth from Images," IE-ICE Trans. Information and Systems, Vol. E82-D, No. 3, pp. 523-533, 1999.
- [2] D. D. Morris and T. Kanade: "A Unified Factorization Algorithm for Points, Lines Segments and Planes with Uncertainty Models," Proc. 6th Int. Conf. on Computer Vision, pp. 696-702, 1998.
- [3] P. Beardsley, A. Zisserman and D. Murray: "Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion," Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 23, No. 3, pp. 235-259, 1997.
- [4] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya and H. Takemura: "Dense 3-D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-baseline Stereo Using a Hand-held Video Camera," Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 47, No. 1-3, pp. 119-129, 2002.
- [5] S. T. Barnard and M. A. Fischler: "Computational Stereo," ACM Computing Surveys, Vol. 14, No. 4, pp. 553-572, 1982.

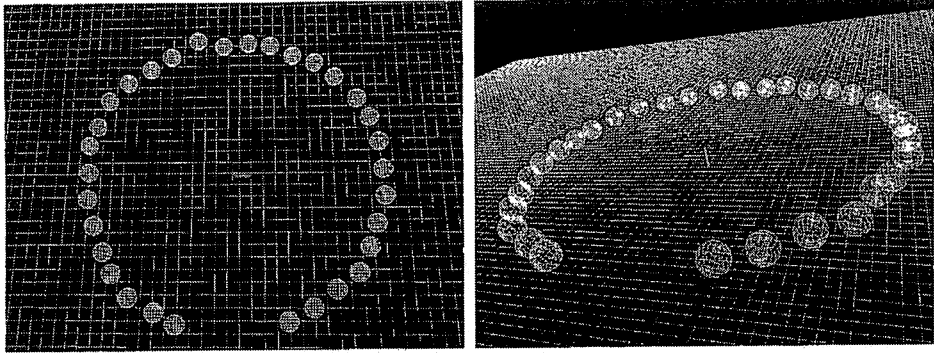


図 10 鏡面球の位置の推定結果

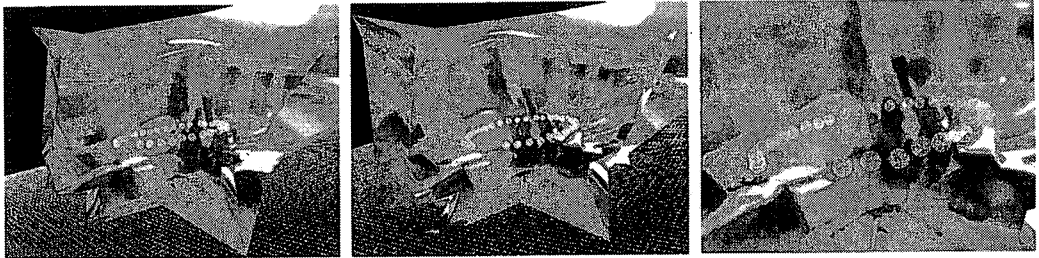


図 11 3次元復元結果

- [6] A. Chaen, K. Yamazawa, N. Yokoya and H. Take-mura: "Acquisition of Three-dimensional Information Using Omnidirectional Stereo Vision," Proc. Asian Conf. on Computer Vision, Vol. I, pp. 288-295, 1998.
- [7] M. Okutomi and T. Kanade: "Multiple-baseline Stereo," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353-363, 1993.
- [8] T. Sato and N. Yokoya: "Extrinsic Camera Parameter Recovery from Multiple Image Sequences Captured by an Omni-directional Multi-camera System," Proc. European Conf. on Computer Vision, Vol. 47, No. 1-3, pp. 326-340, 2004.
- [9] T. Sato and N. Yokoya: "New Multi-baseline Stereo by Counting Interest Points," Proc. Canadian Conf. on Computer and Robot Vision, pp. 96-103, 2005.
- [10] G. Roth and A. Whitehead: "Using Projective Vision to Find Camera Positions in an Image Sequence," Proc. 13th Int. Conf. on Vision Interface, pp. 87-94, 2000.
- [11] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: A Factorization Method," Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 9, No. 2, pp. 134-154, 1992.
- [12] M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, A. A. Deknuydt and L. J. V. Gool: "Three-dimensional Scene Reconstruction from Images," Proc. SPIE, Vol. 3958, pp. 215-226, 2000.
- [13] S. Savarese, L. F. Fei and P. Perona: "What Do Reflections Tell Us about the Shape of a Mirror?," Proc. Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, pp. 115-118, 2004.
- [14] M. Oren and S. K. Nayar: "A Theory of Specular Surface Geometry," Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 24, No. 2, pp. 105-124, 1996.
- [15] B. Micusik and T. Pajdla: "Autocalibration and 3D Reconstruction with Non-Central Catadioptric Cameras," Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 58-65, 2004.
- [16] S. Savarese, M. Chen and P. Perona: "Local Shape from Mirror Reflections," Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 64, No. 1, pp. 31-67, 2005.
- [17] M. Halstead, B. Barsky, S. Klein and R. Mandell: "Reconstructing Curved Surfaces from Specular Reflection Patterns Using Spline Surface Fitting of Normals," Proc. SIGGRAPH'96, pp. 335-342, 1996.
- [18] T. Wada and T. Matsuyama: "Appearance Sphere: Background Model for Pan-Tilt-Zoom Camera," Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. A, pp. 718-722, 1996.
- [19] Z. Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [20] C. J. Harris and M. Stephens: "A Combined Corner and Edge Detector," Proc. 4th Alvey Vision Conf., pp. 147-151, 1988.