

球面画像の獲得のための魚眼カメラの校正

中野 誠士, 李 仕剛, 千葉 則茂

本論文では、半球以上の視野を持った魚眼コンバージョンレンズを取り付けたカメラ（本論文では魚眼カメラと呼ぶ）を用いて、レンズ中心を回転軸が通るように回転して撮像した前後2方向の半球画像から全天周の球面画像を獲得するための魚眼カメラの校正手法について述べる。3次元空間における平行な直線のもつ消失点対が半球画像上に現れることから、はじめに撮影した人工的な直線パターンの消失点を推定し、その性質を用いた魚眼カメラのパラメータの推定を行う。次に前後の半球画像が一つの球面画像になるという拘束条件を利用して、前後の半球画像が持つ重複部分領域の相関を計算することにより、前後の半球画像の相対回転姿勢と前に推定された内部パラメータの微調整を行う。また、背中合わせに取り付けた2台の魚眼カメラからなる実時間全天周球面画像撮像試作装置にその手法を適用する。

Calibration of Fish-eye Camera for Acquisition of Spherical Image

Masao Nakano, Shigang Li, Norishige Chiba

In this paper, we propose a method of calibration of a fish-eye camera for the acquisition of spherical images. The fish-eye camera is a normal one on which a fish-eye conversion lens is mounted so that it covers a field of view with 185 degree and a full spherical image can be acquired by combining the two backward and forward images. Since the fish-eye camera has a wide view more than a hemisphere, the vanishing points of parallel lines in space may be observed in images. We use this property to estimate the interior parameters of the fish-eye camera (focal point and focal length). Since the two backward and forward images cover the whole field of view, we refine the interior parameter of the camera and relative orientation of the two images by measuring the image correlation of the overlapping part. Finally, we extend the method to develop a prototype of spherical image capture device by using two such fish-eye cameras which are mounted together while pointing the opposite two sides, respectively.

1. はじめに or まえがき

没入型複合現実感やウォークスルー可能な景観シミュレーションなどにおいては全天周の球面画像が有効である[1,2,3]。広い視野をもつ画像の獲得に関しては、以下に示すような多くの研究が行われている。

- カメラを回転して撮影した重なりを持った複数の画像を繋ぎ合わせる、イメージモザイクと呼ばれる手法[1,2]がある。しかし、それぞれ異なる時刻において撮影した画像を用いるので静的な環境に適しているが、動的に変化する環境を扱うタスクには適していない。
- 実時間応用において、ミラーを利用した全方位視覚センサーが広く使われている[4,5,6,7]。しかし、全天周の画像を獲得するには、画像にカメラ自身が写りこんでしまうという問題

がある。

- 互いに視野を補い合う複数のカメラからなるクラスタを用いる手法も提案されている[8,14]。この手法では、カメラの台数が増えると装置全体が複雑になり処理時間が長くなる。実時間処理タスクには、できるだけ少ないカメラで球面画像を撮像する必要がある。

本研究では、少ない画像数で全天周の球面画像を獲得する手法の開発を目的に、現在は半球以上（約185度）の視野を持つ魚眼コンバージョンレンズを取り付けたカメラ（魚眼カメラ）を用いて前後方向を撮影した2枚の画像から全天周の球面画像を生成することについて検討を行っている（図1参照）。これを実現するためには、用いる魚眼カメラの内部パラメータと前後の画像間の相対姿勢を正確に知る必要がある。

カメラの校正法としては、特徴点間の距離が既知なパターン（例えばチェスパターン）を用いるメトリックな方法[9]と、撮影するパターンの幾

岩手大学大学院工学研究科

Faculty of Engineering, Iwate University

{mnakano,li,nchiba}@cis.iwate-u.ac.jp

何的な性質を利用するノンメトリックな手法[8]がある。本研究で用いる広い視野をもつ魚眼カメラは、特徴点間の距離が画像中心から離れるにつれ急激に狭まっていくため、チェスパターンを用いるようなメトリックな手法より、パターンの幾何的性質を利用するノンメトリックな校正方法が適していると思われる。本魚眼カメラの画像は半球以上の視野をカバーするので、図2に示すように、平行な直線パターンを撮影した場合、それらの直線が空間上の無限遠点で交わる点、いわゆる消失点[10,11]を画像上に得ることができる。そこで、本論文は、消失点の幾何的性質を利用したカメラのパラメータの初期推定と、画像相関によるパラメータの微調整を組み合わせた新しい校正法を提案する。まず、人工的な直線パターンの撮影を行い、推定した直線の消失点を用いて魚眼カメラの内部パラメータを推定する。次に前後の半球画像が一つの全球画像になるという拘束条件を利用して、その前後の半球画像が持つ重複部分領域の相関を計算することにより、前後の半球画像の相対姿勢と前に推定された内部パラメータの微調整を行う。

また、動的環境への対応を目的として、背中合わせに取り付けた2台の魚眼カメラからなる実時間全天周球面画像撮像装置を試作し、提案手法の適用を行った。

2. 球面画像

本研究における球面画像は、撮影地点を中心とする半径1の単位球面スクリーン上に周囲の環境を投影して得られる全方位画像である。

図3のように、球の中心点 O を原点とするワールド座標における点

$$P = [X \ Y \ Z]^t$$

が球面上の点 p に投影するとき、光線 PO の天頂角を θ 、方位角を ϕ とすると、

$$p = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} P$$

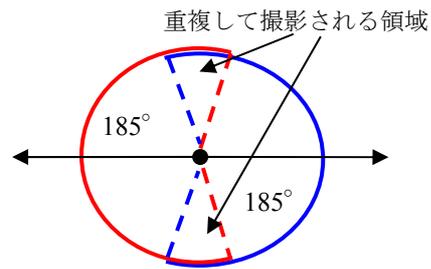


図1. 2つの半球画像が持つ重複領域

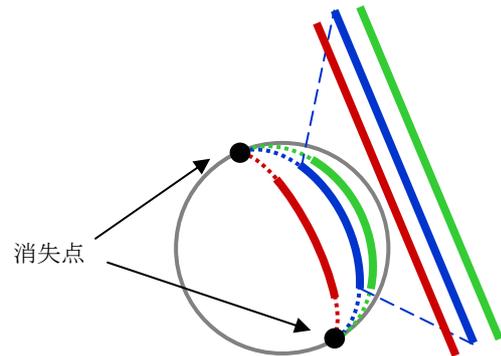


図2. 平行な直線が持つ共通の消失点

である。ここで

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

である。

本研究では等距離射影方式(図4参照)の魚眼レンズを用いており、その射影式は

$$\begin{bmatrix} r_i \\ \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix}$$

である。ここで f はレンズの焦点距離である。よって、画像上での光軸点の位置と f がわかれば、球面上に射影した点 p は以下のように求めることができる。

$$p = \begin{bmatrix} \sin \frac{r_i}{f} \cos \phi_i & \sin \frac{r_i}{f} \sin \phi_i & \cos \frac{r_i}{f} \end{bmatrix}^t$$

球面上への画素の配置方法等については、正二十面体を任意回数再分割して得られる測地ドーム[12]の頂点に六角形画素を配置する方法[13]を用いた。

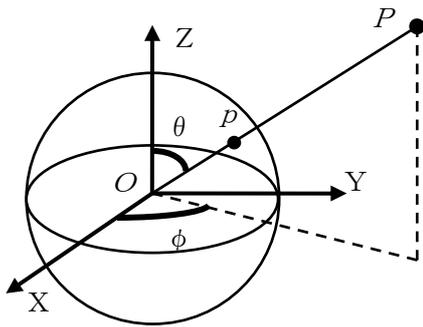


図 3. 空間上の点の球面への投影.

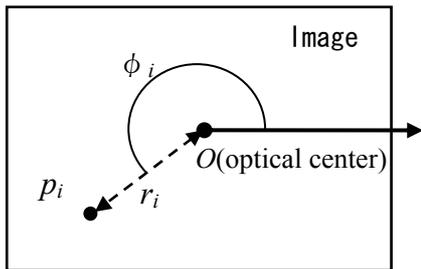


図 4. 空間上の点 P が画像上に投影された点 p_i の極座標位置.

3. 魚眼カメラの校正

魚眼カメラの内部パラメータの推定のために、平行な直線パターン（図 5 (a)）を撮影することにより半球画像上に現れる消失点の性質を利用する。魚眼カメラを用いて直線パターンを撮影した画像を図 5 (b) に示す。実空間上での直線は画像上において曲線として現れ、平行な直線群は画像上で共通の消失点を持つ。

3. 1. 曲線推定

画像領域内における消失点の位置は、撮影した平行直線群が画像上で持つ共通の交点として求めることができる。そこでまず、画像のエッジ検出およびエッジ追跡によって得られた各曲線上のエッジ点群（図 6 (a)）を用いて、画像上の曲線を円錐曲線

$$f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

として、誤差評価関数

$$\sum_i (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f)^2$$

を、正規化のための束縛条件



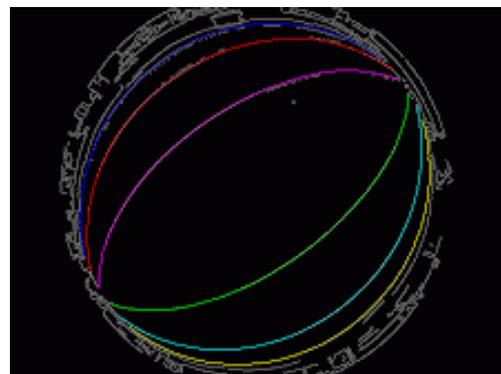
(a)



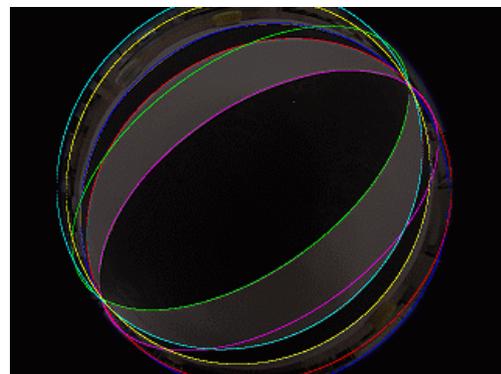
(b)

図 5. (a) 魚眼カメラの校正に用いる直線パターン.

(b) 直線パターンを撮影した画像.



(a)



(b)

図 6. (a) 曲線上のエッジ点の抽出結果.
(b) エッジ点の曲線フィッティング結果

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2 = 1$$

のもとで最小化することによりフィッティングを行う。結果を図 6 (b) に示す。

3. 2. 消失点の算出

次に、消失点の位置を算出する。理想的にはすべての曲線は同一の消失点を通るので、画像上での消失点の位置

$$p_v = (x_v, y_v)$$

は、推定された n 本の円錐曲線についての連立方程式

$$\begin{cases} a_1x_v^2 + b_1x_vy_v + c_1y_v^2 + d_1x_v + e_1y_v + f_1 = 0 \\ \dots \\ a_nx_v^2 + b_nx_vy_v + c_ny_v^2 + d_nx_v + e_ny_v + f_n = 0 \end{cases}$$

の解として得られる。

しかし実際にはフィッティングの際の誤差等の影響のため、得られた円錐曲線は求める消失点からいくらか離れてしまっている。そこで、消失点は、誤差評価関数を

$$\sum_j (a_jx_v^2 + b_jx_vy_v + c_jy_v^2 + d_jx_v + e_jy_v + f_j)^2$$

とする最小自乗法をニュートン-ラプソン法で解くことにより算出する。結果を図 7 に示す。

3. 3. 消失点を用いた内部パラメータの推定

本研究では内部パラメータとして、レンズの焦点距離と光軸点の位置の 2 つを推定する。光軸点の位置については、図 8 に示すように直線パターンをおおよそ垂直な 2 方向について撮影し、それぞれの画像で求めた消失点对を結ぶ線分の交点として算出する。

カメラの焦点距離 f は、対となる 2 消失点間の距離 r_π を用いて

$$f = \frac{r_\pi}{\pi}$$

として算出する。

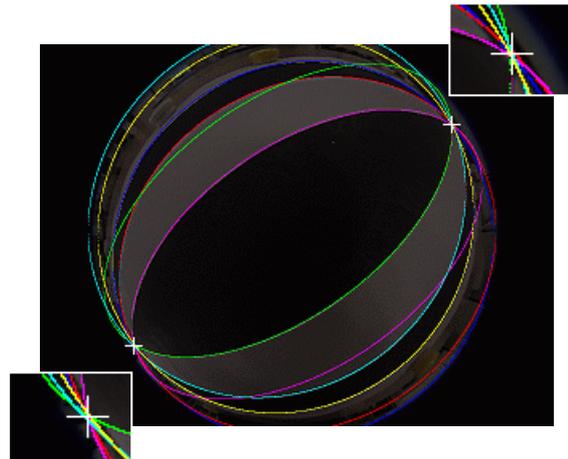


図 7. 消失点对の探索結果。推定された消失点の位置を+マークで示す。

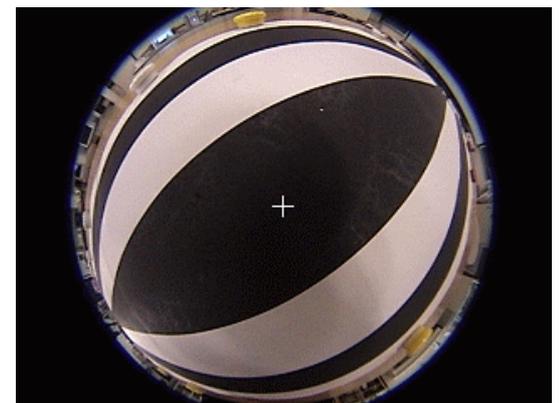
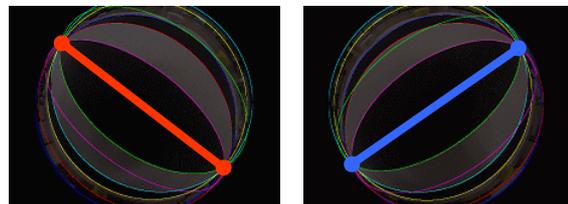


図 8. 2 つの画像の消失点からの光軸点の推定結果。推定された光軸点の位置を+マークで示す。

4. カメラ間相対姿勢と内部パラメータ推定値の微調整

魚眼カメラで撮影した画像は半球状の視野をカバーしているので、全天周の視野を持つ球面画像を獲得するためには、一方向についての撮影を行った後、カメラを 180 度回転して逆方向の画像の撮影を行い、得られた 2 つの半球画像を結合する必要がある。

しかしながら単純に結合した球面画像上では図 1 1 (b) 及び図 1 2 (b) に示すように繋ぎ目の部分においてずれや重複が生じる。接合部分のず

これは、2方向を撮影した際のカメラの相対的な回転姿勢 R が必ずしも正確な反対方向（180度回転した姿勢）となっていないことが原因であり、画像の重複は推定された内部パラメータ f の誤差に起因していると考えられる。光軸点の位置については、おおよそ垂直に交わる2線分の交点として算出しているため、誤差の影響は少ないと考えられる。よって、正確な球面画像を獲得するためには、推定値である回転姿勢 R および焦点距離 f の精度を高める微調整を行う必要がある。

今、ある地点から左右方向を撮影したとする。図1に示すように魚眼カメラは半球以上の視野を持っているので左右の半球画像上には重複した部分が存在する。左右の半球画像が持つ重複領域内における右半球上の点 p_r は左半球上では

$$p_l = Rp_r$$

であるから、左半球上での点 p_l の画素値 $L_l(p_l)$ と右半球上での点 p_r の画素値 $L_r(p_r)$ について理想的に

$$L_l(p_l) = L_r(Rp_r)$$

である。

そこで、以下の誤差評価関数 E を最小化することで R と f の微調整を行う。

$$E(R, f) = \frac{1}{N} \sum_i ((L_l(p_l) - \bar{L}_l) - (L_r(Rp_r) - \bar{L}_r))$$

ここで \bar{L}_l , \bar{L}_r は左右の半球における重複領域内の画素値の平均値、 N は領域内の画素数である。

具体的には、 R の初期値を正確に180度回転した姿勢、 f の初期値を3節で推定した値として、球面画像上における重複部分領域のテンプレートマッチングによる探索を行うことにより、2つの半球画像を結合すると球面画像になるという拘束条件のもとで R と f の精度を改善する。

また、重複部分の輝度平均値の差

$$|\bar{L}_l - \bar{L}_r|$$

を、撮影された左右方向の画像のうち暗い方の画像の輝度値に加えることで、左右の画像の明るさの違いの補正を行う。



図9. 実験に用いた魚眼カメラと回転台



図10. 試作した球面画像撮像装置

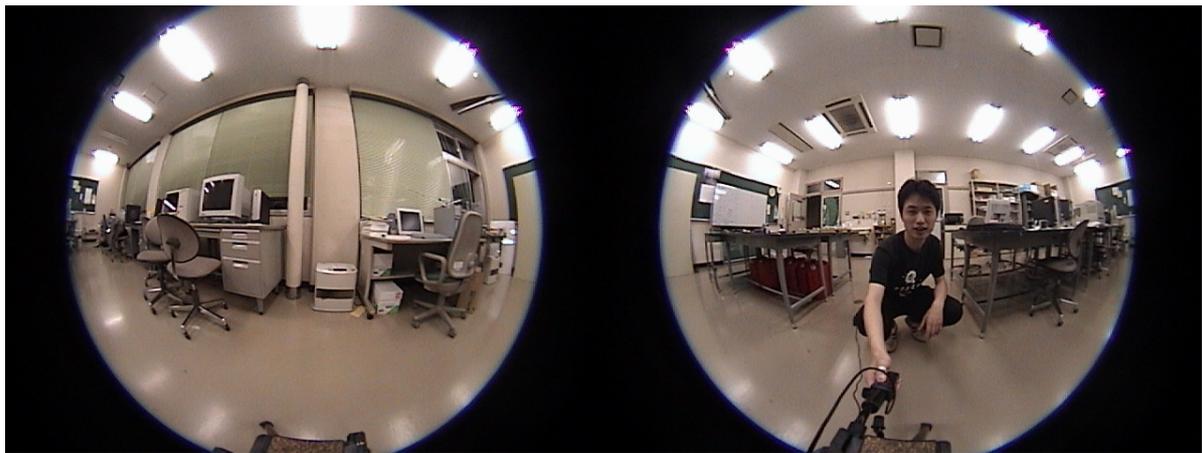
5. 実験結果

5. 1. 一台の魚眼カメラによる球面画像の獲得

単一の魚眼カメラを用いて前後2方向の撮影を行い、静止した屋内シーンの球面画像を作成する。

実験に用いる魚眼カメラは185度の視野を持つ魚眼コンバージョンレンズ Olympus FCON-02 を SONY のデジタルハンディカムに取り付けることで構成し、図9に示すようにこの魚眼カメラを回転台を介して三脚の上に取り付け、撮影を行った。前方を撮影した後、この回転台を用いることで、回転軸がおおよそレンズの焦点を通るようにカメラを180度回転させ、後方の画像を撮影した。撮影した2枚の画像を図11(a)に示す。この2枚の画像から得られた2つの半球画像を単純に結合して得られた球面画像を図11(b)に示す。また、図11(c)に4節に示した方法でパラメータの改善を行い最終的に得られた球面画像を示す。図11(b)において2つの半球の繋ぎ目部分に見られた画像のずれや重複が最終的な球面画像では改善されているのがわかる。

(実験の結果得られた球面画像を回転させて様々なアングルで見た様子を <http://cvlin.lk.cis.iwate-u.ac.jp/~li/labPage/labResearch.htm> に示す.)



(a)

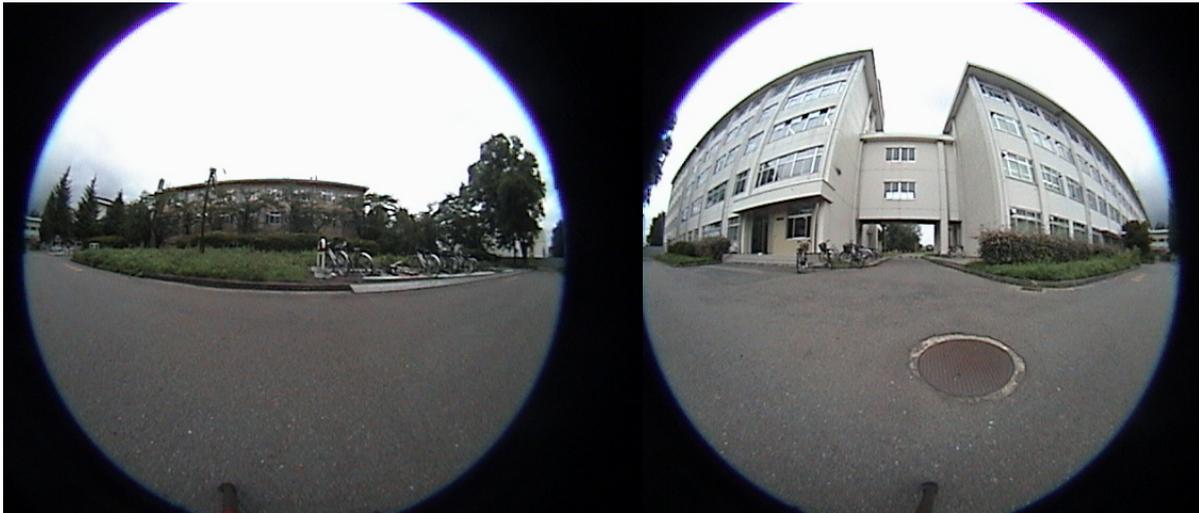


(b)



(c)

図 1 1. 一台の魚眼カメラによる実験結果. (a) 回転台を用いて撮影した2方向の画像. (b) 2つの半球画像を単純に結合した球面画像の両側繋ぎ目部分. (c) パラメータの調整を行い最終的に得られた球面画像.



(a)



(b)



図 1 2. 試作した実時間全天周球面画像撮像装置による屋外シーンの実験結果.

- (a) 撮影した前後 2 方向の画像.
- (b) 単純に結合した球面画像の両側結合部分とその中央部拡大図.
- (c) 最終的に得られた球面画像とその中央部拡大図.

5. 2. 実時間全天周球面画像撮像装置の試作

実時間で全天周視野の画像撮影を行うためには、2方向の半球視野を同時に撮影する必要がある。そこで、2台の魚眼カメラを背中合わせに配置した実時間全天周球面画像撮像装置を試作し、上述の手法に基づく実験を行った。作成した撮像装置を図10に示す。この装置を用いて屋外のシーンを撮影した画像を図12(a)、その撮影画像から得られた半球画像を単純に結合した球面画像を同図(b)、最終的な調整を行った結果得られた球面画像を同図(c)に示す。

6. おわりに

本論文では、魚眼カメラを用いて球面画像を獲得する手法を示した。本手法には以下のような特徴がある。

- 本論文は、消失点の幾何的性質を利用したカメラのパラメータの初期推定と、画像相関によるパラメータの微調整を組み合わせた新しい校正法を提案した。
- 本手法では、2枚の画像で全天周球面画像を獲得することができるので、効率的に球面画像を生成できる。実験5.2に示すように2台のカメラを用いれば、実時間で全天周球面画像を獲得することが可能である。

2台のカメラを用いる際、共通な視点を持たないため画像間に視差が生じるという問題点があるが、その影響はカメラ間の位置のずれを短縮すれば軽減でき、一定距離以上離れているシーンに対しては殆ど影響しなくなる[8]。よりサイズの小さいカメラを使用した装着可能な撮像装置の開発は将来の課題である。

[参考文献]

- [1] S.Coorg and S.Teller, Spherical Mosaics with quaternions and dense correlation, IJCV, Vol.37, No.3, pp.259-273, 2000.
- [2] A.Kropp, N.Master and S.Teller, "Acquiring and rendering high-resolution spherical mosaics", Proc. of IEEE Workshop on OmniVision, 2000.
- [3] S.Li, F.Ishizawa and N.Chiba, Wandering in VR environment by estimating head pose using an omniscam, Prof. of the 10th Pacific Conference on

- Computer Graphics and Applications, pp.1126-1132, 2002.
- [4] S.B.Kang, Catadioptric self-calibration, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition, pp.201-207, 2000.
- [5] S.Nayar, Catadioptric Omnidirectional Camera, Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition, pp.482-488, 1997.
- [6] Y.Yagi, S.Kawato and S.Tsuji, Real-time Omni-Directional Vision for Robot Navigation, Trans. on Robotics and Automation, 10:11-22, 1994.
- [7] Y.Yagi, W.Nishizawa, K.Yamazawa and M.Yachida, Rolling Motion Estimation for Mobile Robot by Using Omnidirectional Image Sensor HyperOmniVision, Proc. of Pattern Recognition, pp.946-950, 1996.
- [8] R.Swaminathan and S.K.Nayer, Nonmetric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras, IEEE Trans. PAMI, Vol.22, No.10, 2000.
- [9] Z.Zhang, A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), pp.1330-1334, 2000.
- [10] T.Kanade, Geometrical aspects of interpreting images as a three-dimensional scene, Proc. IEEE, Vol.71, No.7, pp.789-802, 1983.
- [11] S.Li, S.Tsuji and M.Imai, Determining camera Rotation from vanishing points of lines on horizontal planes, Prof. ICCV, pp.499-502, 1990.
- [12] B.K.P.Horn, Robot Vision, MIT Press, 1986.
- [13] Y.Kimuro and T Nagata, Image Processing on an Omni-directional View Using a Spherical Hexagonal Pyramid, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp 809-819, 1996.
- [14] 遠藤隆明,谷川智洋,広田光一,広瀬通孝, 超多眼カメラによる全天周画像の再校正, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.SIG11(CVIM5), 2002.