

全方位カメラ画像からの 光線空間構築による任意視点画像生成

等々力 寛† 齋藤 英雄†, ††

抄録

近年、複合現実感システム等への応用のために、実環境を撮影した画像から仮想空間を構築する研究が進められている。本研究では全方位カメラ画像から光線空間を構築する事で任意視点画像の合成を行う。本手法で用いる全方位カメラとは通常のカメラに双曲面の鏡を取り付けたものであり、周囲 360° の情報を一枚の画像として撮影することが可能である。光線空間法とは対象空間の光線情報を記録したデータベースを構築し、任意の視点に応じて光線情報を取り出すことで画像を合成する手法である。本手法では空間内に空の円筒モデルを仮定し、光線と円筒モデルの交点をパラメータとする事で円筒モデル内を通る光線の明度値を記録する。また、構築した光線空間を用いて広範囲での任意視点画像の合成、およびウォークスルー映像の合成を行い、新しい広域環境の仮想化手法を提案する。

Arbitrary Viewpoint Image Synthesis via Light Field Rendering with Omni-directional Camera

Hiroshi Todoroki† Hideo Saito†, ††

ABSTRACT

This paper presents an approach to capturing the appearance of a large real environment. We propose the method for generating the arbitrary viewpoint images by building light field with the omni-directional camera, which can capture the wide circumferences. Omni-directional camera used in this technique is a special camera with the hyperbolic mirror in the upper part of a camera, so that we can capture the luminosity information on 360 degree of circumferences in one image. The light field method is one of the Image-Based-Rendering(IBR). It is a kind of the database that records the luminosity information in the object space. According to built light field, arbitrary viewpoint images can be synthesized. In this technique, an empty cylinder model is assumed in object space and making the intersection of light ray and a cylinder model into a parameter. Therefore, we apply light field method to omni-directional camera images. Our method allows the user to explore the wide scene, and feel more mixed reality.

† 慶應義塾大学工学部情報工学科

Department of Information and Computer Science, Keio University

†† 科学技術振興事業団さきがけ

PRESTO, Japan Science and Technology Corporation(JST)

1. はじめに

近年、ロボットの遠隔操作や複合現実感システム等への応用のため、実環境を撮影した画像から仮想空間を構築する技術が重要な課題となっている。特に広域環境の仮想化と提示に関する研究が数多く進められている。^{5,6} 本研究では周囲 360°を撮影した全方位カメラ画像を用いて光線空間を構築することで、仮想視点からの画像を合成する手法を提案する。

仮想現実などを目的として画像を合成する手法は、従来、Model-Based-Rendering (MBR) と総称される手法が主流であった。MBR とは、仮想物体や仮想環境の 3 次元幾何形状モデルを何らかの方法で作成し、コンピュータグラフィクス技術によって提示する手法である。明示的に形状モデルを持つことは、物体の操作に好都合であり、コンピュータグラフィクス技術との整合性も高いという利点を持つ。しかし、複雑な形状を持つ物体の表現や、忠実な質感の再現を行なうことに関しては、今なお課題が残っている。このような背景から、実画像を効果的に利用して新たな画像を合成する手法の研究が盛んに進められている。従来 MBR に対して、このような手法を Image-Based-Rendering (IBR) と呼ぶ。光線空間法^{1,4} は IBR の一種であり、様々な位置から撮影した入力画像から空間を伝播する光線情報を記録する手法である。構築した光線空間から任意の視点に応じて光線情報を取り出すことで任意視点画像の合成を行うことが可能となる。また、三次元モデルの作成が必要ないため複雑な環境などに対しても適用する事が可能である。小林ら³ は光線空間構築の際のカメラキャリブレーションの制約を軽減する手法を提案している。また、川崎ら² は MBR と光線空間法を組み合わせた手法の提案を行っている。

本手法で用いる全方位カメラでは通常のカメラ上部に双曲面鏡を取り付けることによって周囲 360°の情報を同時に撮影する事が可能である。⁸ 本手法では空間内に空の円筒モデルを仮定し、光線と円筒モデルの交点をパラメータとする事で円筒モデル内を通る光線の明度値を記録した。これによって広域環境の仮想化を行うことが可能となる。また、360°の光線情報を記録しているため、仮想環境内での見回し映像が容易に作成できるという利点がある。なお、光線空間法の適用には各入力画像において正確なカメラ位置が求まっている必要があるが、本手法では 3 次元位置が既知である特徴点を画像上で追跡することによりカメラ位置の推定を行う。そのため、機械制御による撮影や、他の位置推定機器などは必要としない。特徴点の追跡に関しても、通常のカメラではカメラが動くにつれて特徴点が画角外へでてしまうといったことが起こりうるが、全方位カメラを用いることで、カメラが大きく動いた場合でも同一の特徴点の追跡を続けられるといった利点がある。

2. 理論

2.1. 全方位カメラ

全方位カメラとは鉛直上向きに設置したカメラと、その上に設置した双曲面状の鏡から構成される。この鏡は取り外しが可能であり、通常のカメラの上部に取り付けることで全方位の撮影が可能となる。本手法で用いた全方位カメラの構成を図 1 に示す。

鏡の焦点 O_M とカメラのレンズ中心 O_C は、二葉双曲面が持つ 2 つの焦点 $(0,0,+c), (0,0,-c)$ に位置し、画像面となる uv 平面は XY 平面に平行で、カメラのレンズ中心 O_C からカメラの焦点距離 f だけ離れた平面とする。鏡の双曲面および、 O_M, O_C は次式で示される。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (Z > 0) \quad (1)$$

ここで a, b は双曲面の形状を定義する定数である。鏡の焦点 O_M に集まる像は、双曲面の鏡を介してカメラのレンズ中心 O_C に集まる。したがって、 O_C にレンズ中心をおいたカメラで O_M への全方位画像を撮影することができる。

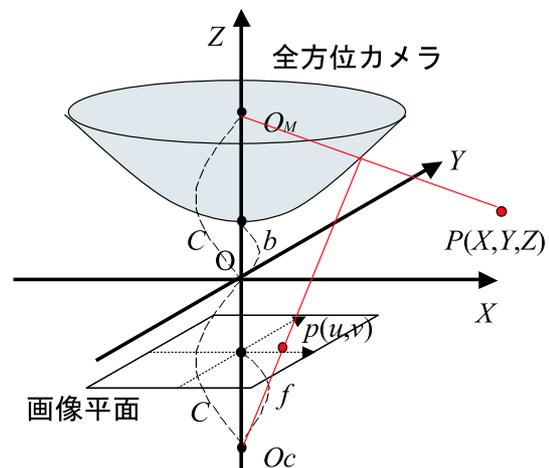


図 1. 全方位カメラの構成

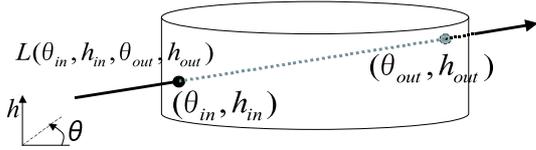


図 3. 本手法における光線の特定

鏡の焦点 O_M とカメラのレンズ中心 O_C の位置関係および、双曲面の特性により、3次元空間中の点 $P(X, Y, Z)$ と全方位画像上の写像点 $p(u, v)$ の間には式 2 の関係が成立する。⁸

$$\begin{cases} u = \frac{Xf(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \\ v = \frac{Yf(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

また、 $p(u, v)$ が与えられれば、式 3 より X と Z 、 Y と Z の関係がわかり、点 $P(X, Y, Z)$ と鏡の焦点 O_M を通る直線を求めることができる。また、式 3 を利用することで全方位カメラによって撮影した画像を透視射影画像やパノラマ画像へ変換することが可能となる。

$$\begin{cases} Z = \frac{-f(b^2 + c^2) + 2bc\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}}{(c^2 - b^2)u} X + c \\ Z = \frac{-f(b^2 + c^2) + 2bc\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}}{(c^2 - b^2)v} Y + c \end{cases} \quad (3)$$

2.2. 光線空間法

光線空間法は、空間を伝播する光線の情報によって実空間を表現する手法である。一般に、図 2 に示すように、空間中に ST 平面と UV 平面を仮定し、それぞれの平面と光線の交点 (u, v) および (s, t) を求め、4 つの変数 s, t, u, v を用いて光線の特定する手法が用いられている。^{1, 4} また、どのような変数を用いて光線情報を記述するかに関しては、現在、様々な方法が提案されている。⁷

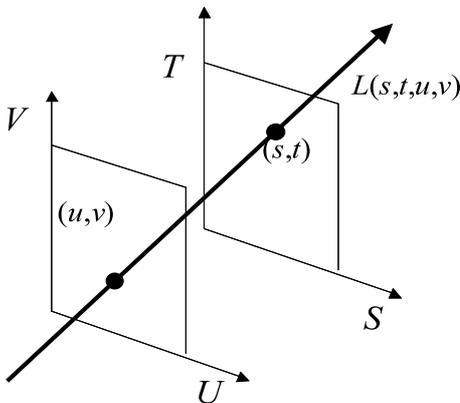


図 2. 2 枚の平面を用いた光線の特定

本手法では、図 3 に示すように、空間中に高さ無限の円筒モデルを仮定する。円筒モデル内には物体が存在しないものとし、これを満たす位置にモデルを配置する。これは、円筒モデル内において直進する光線の一定性を満たすためである。側面の点は角度 θ と高さ h の 2 次元のパラメータで定められるため光線が円筒モデル内に入るときに通る点 (θ_{in}, h_{in}) 出るときに点 (θ_{out}, h_{out}) の 4 つのパラメータを用いて光線の特定し、光線情報を記述することができる。このような変数を用いて、光線の明度値を記録した 4 次元情報空間 $L(\theta_{in}, h_{in}, \theta_{out}, h_{out})$ を構築する。

画像は、撮影された視点位置を通過する光線群の情報とみなすことができる。よって、一枚の画像から、視点位置を通過する光線が画素の数だけサンプルとして得られる。多視点の入力画像から、円筒モデル内を通過する光線のデータベースを作成することによって光線空間を構築する。なお、3次元空間中には無限の直線を引けるがメモリ領域には上限があり、記録できる光線数は有限であるため、 $L(\theta_{in}, h_{in}, \theta_{out}, h_{out})$ は各変数における整数値の位置にのみ記録するものとする。

3. 手法

本手法は“内部パラメータの推定”、“光線空間構築”、“レンダリング”の 3 段階に大きく分けることができる。なお、内部パラメータの推定は双曲面鏡を取り外した状態で撮影前に一度だけ行う処理である。光線空間構築は、双曲面鏡を取り付けて撮影した各フレームの画像に対して行う処理であり、モデルを用いる手法におけるモデル作成の段階に相当する。以後は、繰り返しレンダリングを行うことができる。本手法の撮影対象は屋内の静止環境であり、入力として全方位カメラによって撮影した画像列を用いる。ただし、全方位カメラは常に鉛直上方向を向いており、回転せず、床に沿って 2 次元的な平行移動のみをするものとする。

3.1. 内部パラメータの推定

ここでは全方位撮影用の双曲面鏡を取り外した状態で処理を行う。内部パラメータとは射影を表すパラメータであり、カメラのレンズに関するものである。なお、本手法では双曲面のパラメータは既知であるとして製品の規格書の値を用いる。

画像平面の横方向を u 軸、縦方向を v 軸とすると内部パラメータは式 4 のように示される。本手法では既存の手法から、複数枚のチェッカー画像を用いる Zhang の手法⁹を用いて内部パラメータの推定を行う。

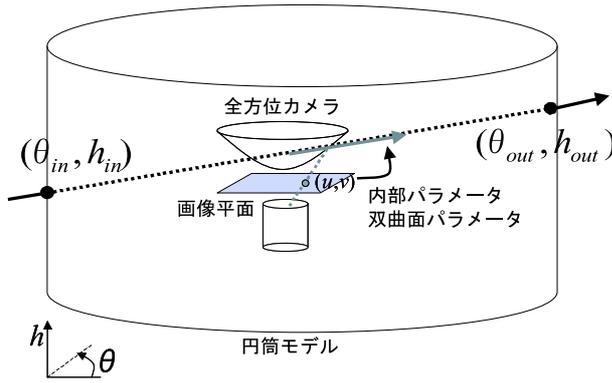


図 4. 光線のマッピング

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_u & -\alpha_u \cot \phi & u_0 \\ 0 & \alpha_v / \sin \phi & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\left(\begin{array}{l} \alpha_u, \alpha_v : u \text{ 軸}, v \text{ 軸のスケールファクタ} \\ (u_0, v_0) : \text{画像平面と光軸の交点} \\ \phi : \text{画像平面の2軸のなす角度} \end{array} \right)$$

3.2. 光線空間構築

3.2.1. 全方位カメラ位置の推定

入力画像列の各フレームに対して光線のマッピングに必要な全方位カメラの外部パラメータを計算する．ここでは特徴点の画像座標と実際の3次元座標の対応関係を用いてカメラ位置の推定を行う．あらかじめ3次元座標が既知である特徴点を画像列上で追跡することによって対応関係を得る．なお、追跡には豆電球をマーカーとしてテンプレートマッチング法を適用した．

通常のカメラ画像で追跡を行う場合、カメラの移動とともに特徴点が画角外に出てしまうことが考えられる．本手法では全方位カメラ画像列を入力としているため、カメラが大きく移動した場合でも特徴点の追跡を続けることができるという利点がある．

式3より、ある特徴点の画像座標が与えられると、双曲面のパラメータからその実際の3次元点と双曲面鏡の焦点 O_M を通る直線を求める事ができる．よって、特徴点の3次元位置が既知であれば、求めた直線上のいずれかに全方位カメラが存在することとなる．特徴点1点から1本の直線を求める事ができるため、2点以上の特徴点から求めた直線の交点を全方位カメラ位置であるとする．ただし、求めた直線は3次元空間中の直線であるため1点で交わるとは限らない．そのため、直線との距離の2乗和が最小となる点をカメラ位置として計算する．

3.2.2. 光線のマッピング

推定した全方位カメラ位置と仮定した円筒モデルの位置から光線のマッピングを行う．入力画像の各画素について実際の三次元点と全方位カメラ位置を通る直線を求め、図4に示したように円筒モデルとの2点の交点 $(\theta_{in}, h_{in}), (\theta_{out}, h_{out})$ を求める．また、これら4つのパラメータを用いて明度値を $L(\theta_{in}, h_{in}, \theta_{out}, h_{out})$ として記録する．

3.2.3. リサンプリング

光線の輝度情報 $L(\theta_{in}, h_{in}, \theta_{out}, h_{out})$ は各変数における整数値の位置にのみ記録するものとした．カメラの動きを機械的に制御して任意の位置から画像を撮影することが可能であれば、容易に目的とするサンプリング間隔の光線の情報を得ることができる．しかし、本手法の入力は全方位カメラを任意の方向へ動かしながら撮影した画像列であり、光線のサンプルは無秩序で非一様である．そのため、求めた交点の座標は整数値とは限らず、得られたサンプルは位置によって非常に粗密が激しい．そこで等間隔のデータを得るために図5に示したようにリサンプリングを行う．ここでは Gortler の手法¹を用いた．

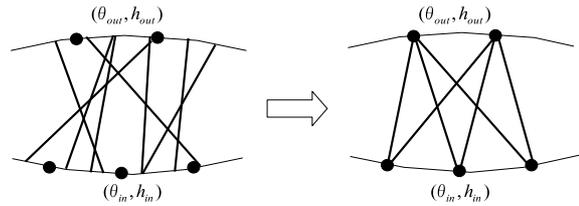


図 5. リサンプリング

3.3. レンダリング

3.3.1. 仮想視点の指定

仮想視点の3次元座標を指定し、画像を合成する焦点面を設定する．これはレンダリングを行うカメラの方向および画角を設定することに相当する．仮想視点の3次元座標および円筒モデルの位置から合成画像の各画素について光線のマッピングを行い、円筒モデルとの2点の交点 $(\theta_{in}, h_{in}), (\theta_{out}, h_{out})$ を求める．

3.3.2. 光線の抽出と内挿

リサンプリングした光線データの中に、画像合成に必要な光線と全く同じ $(\theta_{in}, h_{in}), (\theta_{out}, h_{out})$ のデータが存在しない場合には、周囲のデータから必要な情報の内挿を行う．図6に示すように、データが存在する格子点の中から、必要とする光線に (θ_{in}, h_{in}) 座標が最も近い4点および (θ_{out}, h_{out}) 座標が最も近い4点を選択する．これらの座標から周囲の16本の光線を抽出し、共一次内挿法と同様の方法で、距離に応じた重みをつけて内挿を行う．すべてのピクセルの色を以上の流れで決定し、画像を合成する．

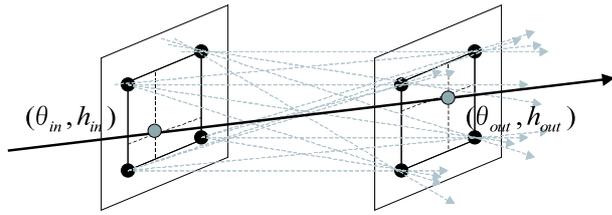


図 6. 光線の内挿

4. 実験

ここでは、全方位カメラ台に固定し、図7のように平行移動させながら撮影した実画像列を入力とし、提案する手法を用いて光線空間を構築した。また、任意の視点からの透視射影画像を連続的に合成することで仮想環境内でのウォークスルー、見直しなどを行うバーチャルツアー映像を作成した。

撮影対象として研究室内の静止環境を扱い、その入力画像の例を図8に示した。画像サイズは 512×384 であり、入力フレーム数は合計 190 フレームである。光線空間のパラメータはメモリ領域の上限から $(\theta_{in}, h_{in}, \theta_{out}, h_{out}) = (50, 25, 800, 320)$ と設定した。また円筒モデルの半径は部屋の大きさにあわせて 2.5m とし、モデル内に物体が存在しない位置に設定した。位置推定に用いるマーカーは 4 点とし、円筒モデルの前後左右の床面に配置した。

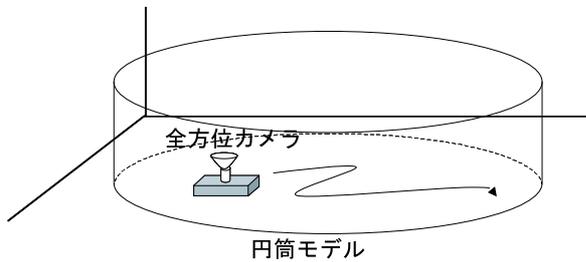
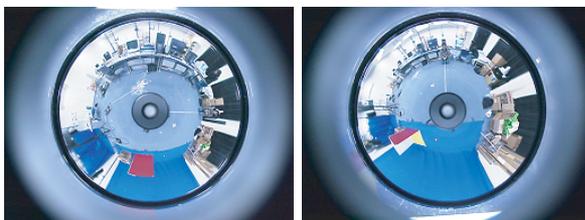


図 7. 全方位カメラを用いた撮影

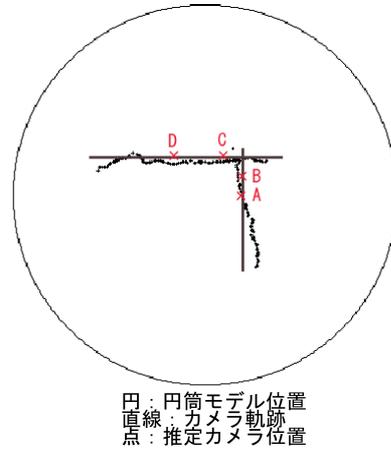


(a) フレーム 50

(b) フレーム 120

図 8. 入力画像の例

推定したカメラ位置を図9に示した。図9は撮影対象である部屋の平面図であり円は仮定した円筒モデル位置、実線はカメラの実際の軌跡、点は推定カメラ位置を表している。



円：円筒モデル位置
直線：カメラ軌跡
点：推定カメラ位置

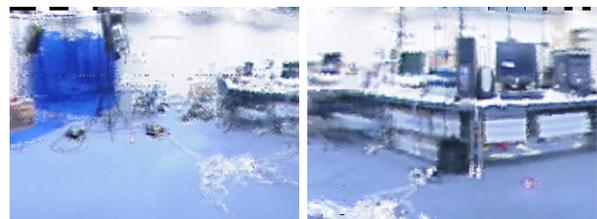
図 9. 推定カメラ位置（平面図）

バーチャルツアー映像における合成画像の例を図10に示した。合成画像の下に示したパラメータは図9で示した視点位置、およびカメラの3次元座標と水平角の向きを示している。ここでの座標系は床面における円筒モデルの中心を原点としている。また、本手法では全方位の光線情報を記録しているため、任意の視点からパノラマ画像として合成することが可能である。図11には合成したパノラマ画像の例を示した。



(a) A:(50,0,0),(0)

(b) B:(50,20,0),(90)



(c) C:(30,55,0),(180)

(d) D:(-50,55,0),(260)

(視点の2次元位置は図9に示したものである.)

図 10. 合成画像例

本手法で用いた全方位カメラは通常のカメラの上部に双曲面状の鏡を取り付ける事で周囲 360°の撮影を同時に行う事が可能となっている。その反面、1枚の CCD により全方位を撮像するため、入力画像の角度分解能が低いという欠点をもつ。特に、全方位カメラ画像では円形に撮像されるため、俯角に対する角度分解能が低いという問題がある。本手法では様々な位置で全方位カメラによる撮影を行い、各画像の光線データを統合して光線空間を構築するため各全方位カメラ画像の角度分解能の低さを互いに補い合い、全体として合成画像の解像度を向上させていると言える。

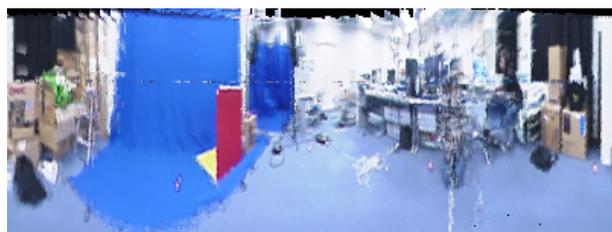


図 11. A:(50,0,0) における合成パノラマ画像

5. 結論

本研究では、全方位カメラ画像を用いて光線空間を構築する事によって、任意視点画像を合成する手法を提案した。光線空間を構築する際に必要となるカメラ位置に関しては画像から推定しているため、全方位カメラの移動速度が一定でない場合でも全方位カメラ位置を推定することができる。これによって、機械による制御などを必要とせず、撮影時にかかる制約を軽減している。また、部屋の 3次元モデルを作成することなく任意視点からの画像を合成することができ、様々な環境において適用可能な手法であると考えられる。実際に全方位カメラ画像列を入力として、周囲 360°の広域環境の仮想化を行い、自然なウォークスルー映像や見回し映像を合成することで本手法の有用性を示した。

今後の展開としては、広域環境の膨大な光線データ量が問題点となっているため、光線データに適したデータ構造の開発やデータの圧縮等について検討を行っていく。

参考文献

- [1] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard, Szeliski, Michael F. Cohen, "The Lumigraph". SIGGRAPH96, Computer Graphics Proceeding,1996
- [2] Hiroshi Kawasaki, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, "Light Field Rendering for Large-Scale Scenes" IEEE Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2001), Hawaii,USA,2001
- [3] 小林賢吉, 斎藤英雄, "未校正画像列からの光線空間生成に基づく任意視点画像合成". 電子情報通信学会論文誌 D-II, VoL.J86-D-II, No.2, pp.272-281, Feb.2003
- [4] Marc Levoy, Pat Hanrahan, "Light Field Rendering". SIGGRAPH96, Computer Graphics Proceeding,1996
- [5] Shinji Morita, Kazumasa Yamazawa, and Naokazu Yokoya, "Internet telepresence by real-Time view-dependent image generation with omnidirectional video camera". Proc. SPIE Electronic Imaging, Vol. 5018, pp. 51-60,2003
- [6] Camillo J Taylor, "VideoPlus". IEEE Workshop on Omnidirectional Vision,2000
- [7] Daniel N. Wood, Daniel I. Azuma, Ken Aldinger, Brian Curless, Tom Duchamp, David H. Salesin, Werner Stuetzle, "Surface Light Fields for 3D Photography". SIGGRAPH2000,2000.
- [8] Kazumasa Yamazawa, Yasushi Yagi, and Masahiko Yachida, "HyperOmni Vision: Visual Navigation with an Omnidirectional Image Sensor". Systems and Computers in Japan, Vol.28, No.4, pp.36-47,1997
- [9] Zhengyou Zhang, "Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations". International Conference on Computer Vision,1999