

## 放物面鏡を用いた光線情報取得

一柳 壽孝<sup>†</sup> 圓道 知博<sup>†</sup> 藤井 俊彰<sup>†</sup> 谷本 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院工学研究科

〒464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: [fichiyangi@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:fichiyangi@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp), [††{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:††{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp)

あらまし 本稿では、光線空間取得システムで得られる歪んだ光線空間から理想の補正画像を生成する手法を検討する。光線空間法とは、空間中を伝播する光線情報を用いて3次元情報を記述・処理する手法である。光線空間法を適用するためには、密な光線空間の取得が必要となる。そこで放物面鏡と高速度カメラを用いて密な光線空間を取得可能なシステムが提案されている。これは放物面鏡で像を作り、その像をミラー走査させ、それを撮影するシステムである。しかしながら、放物面鏡を用いて得られる光線空間には歪みが現れる。そこで本研究では、放物面鏡での反射をある種の射影と考え、得られた光線空間から正しい補正画像を生成する手法を検討する。

キーワード 光線空間法, 光線空間, 放物面鏡, 光線情報取得システム, 歪み

## Ray Data Acquisition Using Parabolic Mirror

Toshitaka ICHIYANAGI<sup>†</sup>, Tomohiro YENDO<sup>†</sup>, Toshiaki FUJII<sup>†</sup>, and Masayuki TANIMOTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

E-mail: [fichiyangi@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:fichiyangi@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp), [††{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:††{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp)

**Abstract** In this paper, we analyzed the distortion of the image acquired with a Ray-Space acquisition system. The Ray-Space acquisition system using parabolic mirror makes it possible to acquire dense Ray-Space. This system consists of two parabolic mirrors, a synchronized galvanometer mirror and a high-speed camera. The principle of this system is generating a real image of object with two parabolic mirrors, and to scan the image with the mirror. However, distortion arises in the acquired image, in other words the Ray-Space. We examine a method to generate corrected image from acquired Ray-Space.

**Key words** Ray-Space method, Ray-Space, parabolic mirror, Ray data acquisition system, distortion

### 1. はじめに

実写画像をもとに任意の視点の見た画像を生成する技術は Image Based Rendering と呼ばれ、その代表例として、Light Field [1], 光線空間法 [2] が挙げられる。光線空間法とは、空間を伝播する光線を、その位置と方向を記述する手法である。この光線の位置と方向に、光線の輝度を対応させた情報を光線空間と呼ぶ。光線空間法を用いて任意視点画像を生成する場合、非常に密なカメラ間隔で撮影された映像を基に、4次元(3次元)+時間の空間データからその2次元部分の空間を切り出すことのみで可能となる。つまり十分な光線情報を取得さえできれば、簡単な処理でリアリティのある画像を生成することができる。

しかし、光線情報の取得には多くのコストが必要になる。特に隣接するカメラ間隔について、Chai らによる Plenoptic

Sampling [3] や國田らの等価被写界深度 [4] を満たす必要がある。このサンプリング間隔は、隣接カメラにおいて、対応点の視差が  $\pm 1$  pixel 以内という非常に密な間隔である。これを満たすために、静止シーンを対象とした一台のカメラを機械制御で微小に動かして撮影することが一般的であった。

近年、Wilburn らにより動的シーンを記録する Light Field Camera [5] と称したものが報告されている。これは基本的には多視点画像を取得するものであり、密な光線情報の取得は困難である。真に密な光線空間を取得する研究としては、4次元の光線空間を何らかの方法で2次元に変換し、それを2次元映像として取得する方法がある。レンズアレイを用いた LIFLET [6] や円筒ミラーを用いた方式 [7] がこれにあたる。

また、放物面鏡と高速度カメラを用いて真に密な光線空間を取得するシステム [8] が提案されている。このシステムの原理は、2枚の放物面鏡により物体の像を形成し、それを走査ミ

ラーで反射させ高速度カメラで撮影するものである。形成される像は物体と等価な像であることが理想だが、実際に形成される像には放物面鏡の光学的性質により歪みが生じるため、取得される画像に歪みが生じる。この現象は、取得した光線空間に歪みが生じると考えることができる。

そこで本研究では、取得した歪んだ画像を理想の画像へ変換する手法を検討する。

本稿の構成は、2章で光線空間法を解説し、3章では光線情報取得システムの原理を述べる。さらに4章では、取得した歪み画像から正しい画像への補正手法を示す。5章で画像生成の実験結果を示し、6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 光線空間法

光線空間法とは、空間中を伝播する光線の情報を用いて3次元空間情報を記述する手法であり、物体の形状などの3次元空間の幾何学的な情報を必要としない。空間中の光線を同定するパラメータは必要に応じて様々に選ぶことが可能だが、円形にカメラを配置した場合は極座標系で考える。

図1(a)に示すように $(x, y, z)$ 空間中の光線を考える。ただし、3次元空間中では光線は減衰せずに一直線に発すると仮定する。まず、光線の進行方向を極座標表示で $\theta, \phi$  ( $-\pi \leq \theta < \pi$ ,  $-\frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{\pi}{2}$ )とパラメータ表現する。次に、この光線に垂直な平面と交わる点の座標を $(\xi, \eta)$ とする。これら4つのパラメータ $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ により、光線を方向を含めて一意に表すことができる。この光線の光強度を表す関数を $f$ とすると、光線のパラメータ表現 $f(\xi, \eta, \theta, \phi)$ を得る。図1(b)に示すように、この光線パラメータで表される空間を光線空間と呼ぶ。

極座標系の光線空間の場合、実空間中の3次元情報 $(X, Y, Z)$ と光線の向き $(\theta, \phi)$ から4次元光線空間 $(\xi, \eta, \theta, \phi)$ への変換は以下の式で与えられる。

$$\xi = Y \cos \theta - X \sin \theta$$

$$\eta = -Y \sin \theta \sin \phi + Z \cos \phi - Z \cos \theta \sin \phi$$

ここで、縦方向の視差を無視した場合、 $\phi = 0$ となる。そして $\xi$ と $\theta$ については、以下のように変形できる。

$$\xi = \sqrt{X^2 + Y^2} \sin(\theta + \tan^{-1}(-Y/X))$$

この式より、実空間の一点を通る光線群は光線空間内でサインの軌跡を描くことがわかる。任意視点画像の生成は、欲しい視点に相当するサインの断面に沿って光線空間を切り出すことによって実現できる。

## 3. 光線情報取得システム

実現されているシステムを図2に示す。これは、2枚の放物面鏡と高速度カメラ、水平走査可能なガルバノミラーで構成されている。この光学系では、図3のように放物面鏡底部に置か

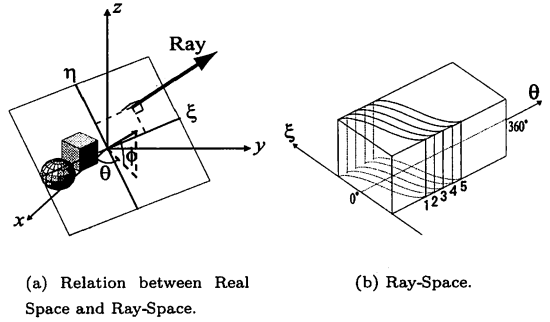


図1 Ray-Space method..



図2 Overview of the experimental system.

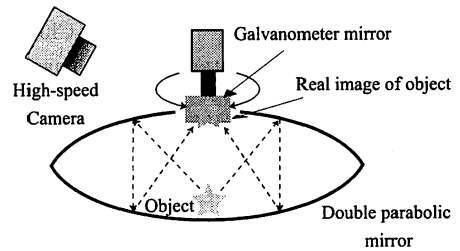


図3 Principle of Ray-Space acquisition system.

れた物体から出た光が2枚の放物面鏡で反射され、さらに光が上部で結像し、像が形成される。形成された像の位置にガルバノミラーを水平方向に走査させることで、像も水平方向に走査するので、その場で物体を様々な方向から観察することができる。次に、ガルバノミラーの角度に同期させて画像を撮影できる機能を持つ高速度カメラを用いて、ガルバノミラー内の像を撮影する。高速度カメラを用いることで、1回の走査時間内に多数の画像が撮影可能なので、非常に密なカメラ間隔で撮影した多視点画像、すなわち光線空間を得ることと等価になる。

また、このガルバノミラーの走査時間を非常に短く(ビデオレート程度)することで、動シーンの光線空間取得が可能になる。

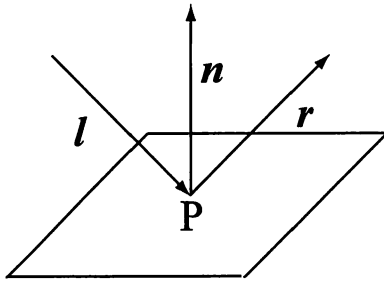


図 4 Reflect.

#### 4. 歪みの解析

##### 4.1 放物面鏡の光学的特性

放物面鏡の高さを  $d$  とすると、2 枚の放物面鏡は以下の式で表すことができる。

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f_1} \quad (1)$$

$$z = -\frac{x^2 + y^2}{4f_2} + d \quad (2)$$

図 2 のような 2 枚の放物面鏡では、上に凸の放物面鏡 (放物面鏡 1 とする) の焦点  $f_1$  が上部にあり、下に凸の放物面鏡 (放物面鏡 2 とする) の焦点  $f_2$  は、放物面鏡 1 の底部にある。

また、放物面鏡の反射特性は図 4 のように、入射ベクトルを  $l$ 、反射ベクトルを  $r$ 、入射ベクトルを持つ光線と放物面鏡の交点 P の接平面の法線ベクトルを  $n$  とすれば、

$$r = l - 2n(l \cdot n) \quad (3)$$

と表すことができる。

そして、図 5(a) のように  $f_2$  から出た光線は  $f_1$  の一点に集まる特性がある。また、2 枚の放物面鏡の焦点を結ぶ軸のまわりに  $180^\circ$  回転した像が形成される。しかし、焦点からずれた点から発する光線は図 5(b) のように一点に集まらない。

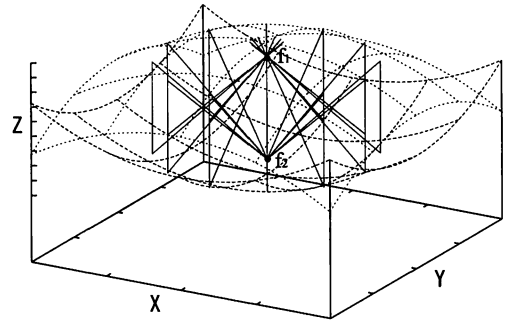
理想的には、底部に置かれた物体と等価な像が形成されることが望ましいが、上記の理由により実際は図 6(a) のように形成される像には歪みが生じる。そこで、本章ではこの歪みを補正するための手法を検討する。

実際の光線空間取得システムではガルバノミラーを、生成される像の位置に設置している。ガルバノミラーで反射させた像を撮影することは、ミラーの面に対して対称の位置に置いたカメラで撮影することと等価である。そのため、以下の解析ではガルバノミラーを考慮しない。

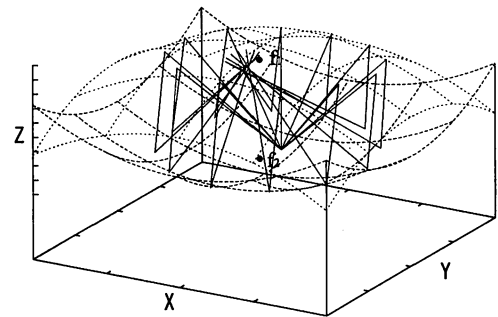
##### 4.2 光線追跡による光線群の軌跡

前章までに説明した放物面鏡により形成される像の歪みを、放物面鏡内部の点から発する光線群の軌跡により調べる。

ある 3 次元位置に面を仮定し、放物面鏡内部の点から出た光線群がその面を通過する位置と方向を記録する。その軌跡 (Distorted) を図 7 に示す。また理想の光線群の軌跡 (Ideal) もあわせて示す。

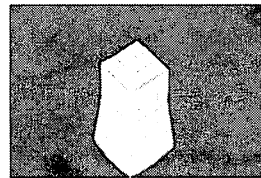


(a) Ray trace from focal point.

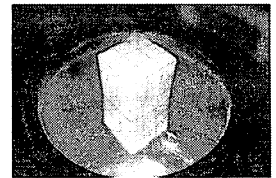


(b) Ray trace from not focal point

図 5 Characteristic of two parabolic mirrors.



(a) Object.



(b) Image of object.

図 6 Generate image from parabolic mirror.

図 7 より、本来ならば Ideal のように光線群の軌跡が直線になるのだが、Distorted は非直線となっている。これは放物面鏡で反射された光線群は一点に結像していないことをあらわしている。また、Ideal と Distorted を比較すると、像の奥行きが異なっていることが説明できる。視点依存によって奥行きが異なって見えるため、一枚の画像から正しい画像に補正するためには、その視点ごとにさらなる詳細な解析が必要となってしまう。

##### 4.3 光線空間の変換

4.1 節で述べたとおり、放物面鏡では 2 枚の放物面鏡の焦点を結ぶ軸のまわりに  $180^\circ$  回転した像が形成される。図 8 で物

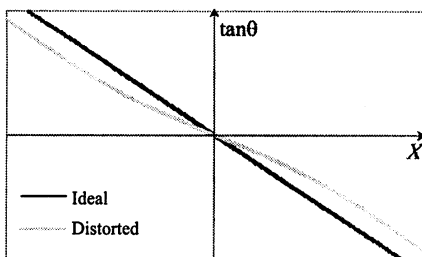


図 7 Trajectory of Rays.

体が  $f_2$  を中心にあるものとして、カメラ 2 が  $f_2$  を原点とする極座標系で  $(r', \theta', \phi')$  の位置で注視点を  $f_2$  として撮影した画像を画像 2 とする。次に、図 9 で物体が  $f_1$  の位置で、カメラ 1 が  $f_1$  を原点とする極座標系で  $(r, \theta, \phi) = (r', \theta' + 180^\circ, \phi')$  の位置で注視点を  $f_1$  として撮影した画像を画像 1 とする。理想的には画像 1 と画像 2 が等価でありたいが、実際には異なる。

前述したとおり、放物面鏡の性質として、焦点から発する光は一点に集光する。しかし、焦点以外の点から発する光は一点に集光しない。これは放物面鏡で反射された光が理想の角度で反射されないことにある。そこで、放物面鏡での光線の反射がある種の射影と考えた場合、光線空間が放物面鏡を介して射影されると考えることができる。この考え方より、放物面鏡より得られる画像群から正しい画像を生成する。以下に解決手法を示す。

カメラ 2 で取得している光線から、その光線に垂直な基準面を通過する位置  $(\xi, \eta)$  を求める。その光線のベクトルを  $l$  とする。次に図 9 に示すように、 $(\xi, \eta)$  から  $-l$  方向に光線が向かうとする。その光線が 2 枚の放物面鏡で反射され、反射光が  $f_1$  を原点とする極座標系のどの位置を通過し、どの角度で入射するかを求める。それにより、補正に必要な光線情報を求めることができるため、正しい画像を生成することができる。

これは光線空間を  $f_1$  を中心とする光線空間と  $f_2$  を中心とする光線空間の 2 つで考え、 $f_1$  を中心とする光線空間を  $f_2$  の光線空間に射影させると考えることができる。

## 5. 画像生成実験

### 5.1 $\phi$ 方向の視差画像を考慮しない場合の補正画像生成

4.3 節の手法で入力画像群から補正画像を生成する。光線情報取得システムでは、カメラは図 9 において  $r$  と  $\phi$  は一定で  $\theta$  が任意であることと等価である。入力画像群を図 10 で示す。ここで条件として、式 (1)、式 (2)、図 9 のとおり、放物面鏡の底部を原点に設置し上下の放物面鏡の焦点距離は 8、立方体のサイズは 4 で  $f_2$  を中心に設置。入力画像群を取得したカメラはピンホールカメラで、カメラ位置は  $(35, \theta, 45^\circ)$ 、画像サイズは  $360 \times 360$  で、画角は  $20^\circ$  であり、カメラの注視点は  $f_2$  とする。また、 $\theta$  は  $0^\circ \sim 180^\circ$  で  $0.5^\circ$  間隔で撮影したものである。理想的な画像を図 11 に、結果画像を図 12 に示す。

図 12 において、黒色の部分はカメラの画角を超えた光線の場合であり、灰色の部分は未取得の光線の場合である。この結

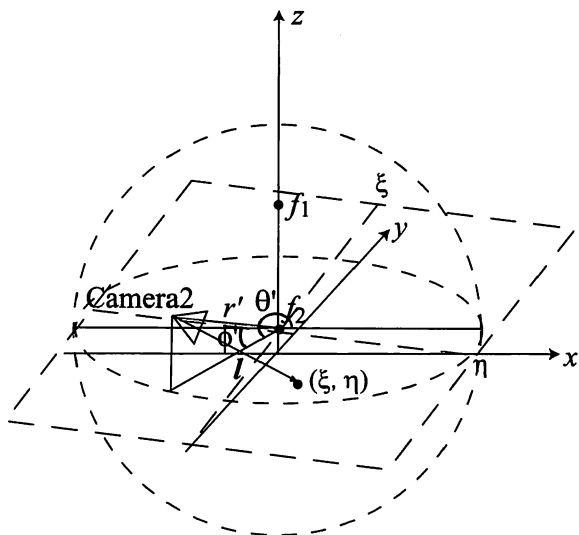


図 8 Polar coordinate system with  $f_2$  as the origin.

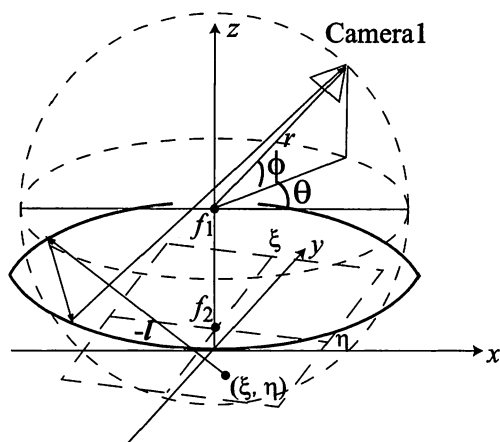


図 9 Polar coordinate system with  $f_1$  as the origin.



図 10 Input images.(without angle  $\phi$ )

果より、 $\phi$  方向の視差を無視すると画像に歪みが大きく現れることがわかる。また境界付近ではノイズが現れるが、これは入力画像群が十分なサンプリング間隔を満たしていないためと考えられる。次節で、 $\phi$  方向の視差を考慮した場合の補正画像生成を行う。



図 11 Ideal image

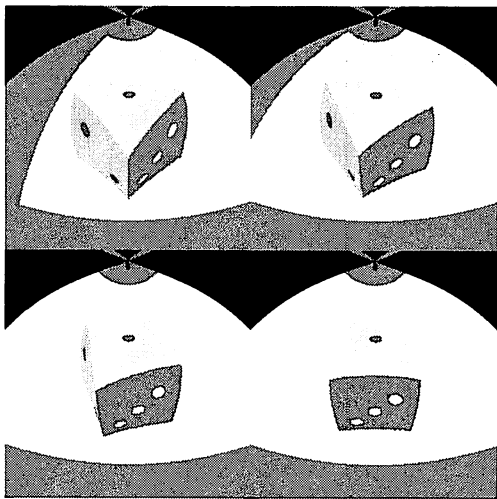


図 12 Results.(without angle  $\phi$ )

## 5.2 $\phi$ 方向の視差画像を考慮した場合の補正画像生成

今節では、 $\phi$  方向の視差画像も考慮した場合の画像生成を行う。入力画像群を図 13 で示す。5.1 節と同様の条件で、入力画像群のカメラ位置は  $(35, \theta, \phi)$ 、画角は  $20^\circ$  であり、カメラの注視点は  $f_2$  とする。また、 $\theta$  は  $0^\circ \sim 180^\circ$  で  $0.5^\circ$  間隔で、 $\phi$  は  $10^\circ \sim 80^\circ$  で  $0.5^\circ$  間隔とする。結果画像を図 14 に示す。

図 14 において、黒色の部分はカメラの画角を超えた光線の場合であり、灰色の部分は未取得の光線の場合である。この結果より、補正画像は理想画像とほぼ同じであることが確認できる。図 12 と同様に境界部分にノイズが現れるが、この現象も同様に入力画像群が十分なサンプリング間隔を満たしていないためと考えられる。

## 5.3 自由視点画像生成

5.2 節の結果をもとに、光線空間法より自由視点画像の生成を行う。結果を図 15 に示す。図 15 を見てわかるとおり、カメ

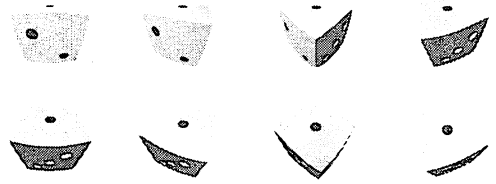


図 13 Input images.(consideration of angle  $\phi$ )

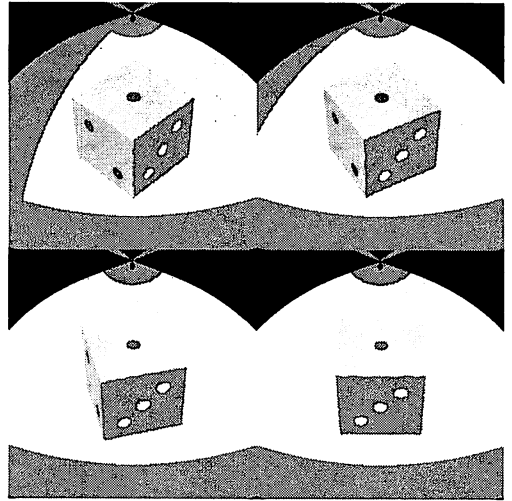


図 14 Results. (consideration of angle  $\phi$ )

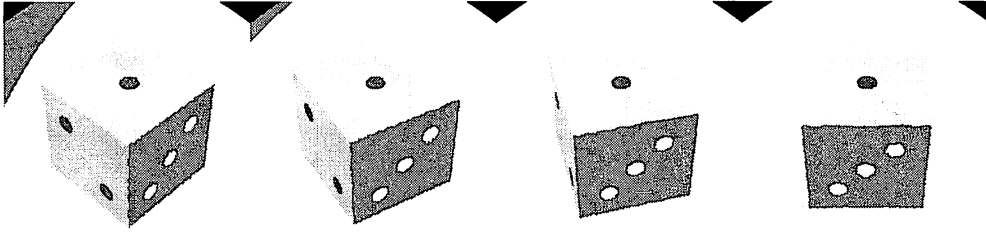
ラを前進させた画像や後退させた画像が生成できていることがわかる。

## 6. おわりに

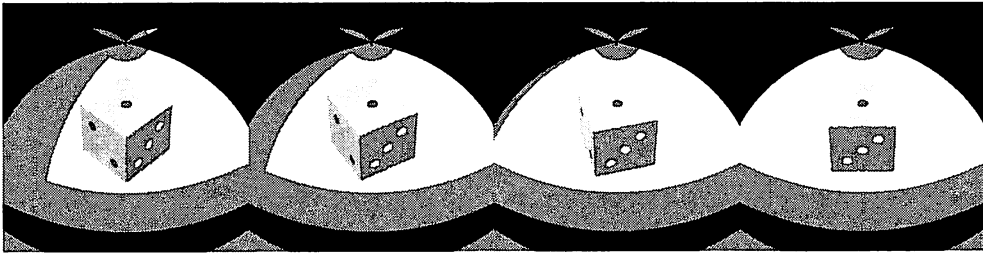
本稿では、光線空間の射影を考えることで、光線情報取得システムで取得された画像の歪みを正しい画像に補正した。結果として、 $\phi$  方向の視差画像を考慮した場合には、理想の画像に近い補正画像が得られた。また、自由視点画像の生成に成功した。しかし、 $\phi$  方向の視差画像を考慮しない場合には、補正画像に大きく歪みが現れていた。両場合ともに、取得光線がサンプリング間隔を満たしていないために、境界付近にノイズが現れる。今後の課題としては、縦方向の視差画像を考慮しない場合に、理想の画像に近づく手法の検討が挙げられる。

## 文 献

- [1] M.Levoy, P.Hanrahan, "Light Field Rendering", ACM SIGGRAPH '96, pp.31-42, (1996).
- [2] 藤井, 金子, 原島, "光線群による 3 次元空間情報の表現とその応用", テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, pp.1312-1318, (1996).
- [3] J.Chai, X.Tong, S.Chan, H.Shum, "Plenoptic Sampling", SIGGRAPH '96, pp.307-318, (2000).
- [4] 國田, 稲見, 前田, 館, "多眼カメラを用いた任意視点人物像の実時間生成システム", 信学論, J84-D- , No.1, pp.129-138, (2001).
- [5] B.Wilburn, M.Smolski, K.Lee, M.Horowitz, "The Light



(a) Image at a forward position.



(b) Image at a backward position.

図 15 Free view point image.

Field Video Camera”, SPIE Electronic Imaging, 4676, (2002).

- [6] 金, 河, 田口, 高橋, 苗村, “自由視点画像合成における見え方を考慮したレンズアレイ撮像系設計”, 3次元画像コンファレンス 2006, pp73-76, (2006)
- [7] A.Jones, M.Bolas, I.McDowall, P.Debevec, “Concave Surround Optics for Rapid Multiview Imaging.”, SIGGRAPH2006, 98, (2006)
- [8] 藤井, 谷本 “走査光学系と高速度カメラを用いた光線空間のリアルタイム取得装置”, 3次元画像コンファレンス 2004, pp.197-200, (2004)