

# 複数の曲面鏡像からの自由視点映像生成法

蛭田 雄也<sup>\*1</sup>

宍戸 英彦<sup>\*2</sup>

北原 格<sup>\*2</sup>

## A Generation Method of Free-viewpoint Video from Multiple Curved Mirror Images

Yuya Hiruta<sup>\*1</sup>, Hidehiko Shishido<sup>\*2</sup> and Itaru Kitahara<sup>\*2</sup>

**Abstract** --- This paper proposes a method for generating free-viewpoint video using multiple curved mirror images. The curved mirror is captured by a camera installed in the scene. The 3D information of a target scene is reconstructed from a single image shooting multiple curved mirrors at the same time, and the appearance from an arbitrary viewpoint is reproduced by using the 3D information. By forming a catadioptric system with the camera and curved mirror, it is possible to estimate the direction of the light ray from the object. Also, by using multiple curved mirrors, depth information of the object can be estimated. Finally, it is possible to synthesis free-viewpoint video, and the image is transformed so as to obtain a realistic perspective projection image.

**Keywords:** Curved Mirrors, Catadioptric System, Free-viewpoint Video, 3D Reconstruction

### 1 はじめに

反射屈折光学系(Catadioptric System)は、鏡とレンズにより構成される光学系であり、特に、レンズとしてカメラを使用したシステムは反射屈折撮像系と呼ばれる。鏡面で反射した光線をカメラを用いて撮影することで、一般的なカメラの画角より広い視野を観察することが可能となるため、全方位カメラなどに用いられている[5][6]。これまでに、反射屈折撮像系の解析に関する、研究[1][2]が活発に行われてきた。反射屈折撮像系を応用し、人の眼球を鏡の代わりとして用いることで、人の見ている情景の再現・理解に関する研究[3][4]にも注目が集まっている。

本稿では、図1に示すように、空間中に複数の曲面鏡が存在するシーンを想定し、反射屈折撮像系の解析によりシーンの3次元情報を推定し、その情報に基づいて自由視点映像を生成する手法を提案する。それにより、複数の曲面鏡を撮影した画像から任意の視点における見え方の生成を実現する。

本研究で扱う反射屈折撮像系は、球形の鏡面によって実現されたものである。反射屈折撮像系の解析には、物体からの鏡面への光線の入射方向や、鏡面上での反射位置の情報が重要となる。球形の鏡面に対するこの類の問題は Alhazen's Problem と呼ばれ、図2に示す2次元から3次元への投影(撮像平面上の位置から物体の光線行路)を推定する Backward Projection と、図

3に示す3次元から2次元への投影(物体位置から撮像平面への光線行路)を推定する Forward Projection の問題に二分される。

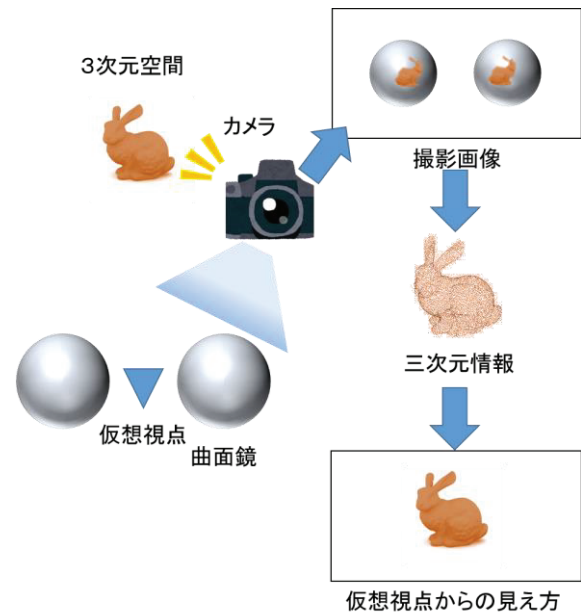


図1 複数の曲面鏡像からの自由視点映像生成:空間中に配置した複数の曲面鏡が観察されるように撮影した画像から、曲面鏡像に映る空間の3次元情報を推定し、任意視点からの見え方を再現する。

Fig.1 Generation of Free-viewpoint Video from Multiple Curved Mirror Images: Shooting multiple mirrors set in a target scene. Estimating 3D information from the multiple mirror images and generating appearance from an arbitrary viewpoint.

<sup>\*1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科

<sup>\*1</sup> Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>\*2</sup> 筑波大学計算科学研究センター

<sup>\*2</sup> Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

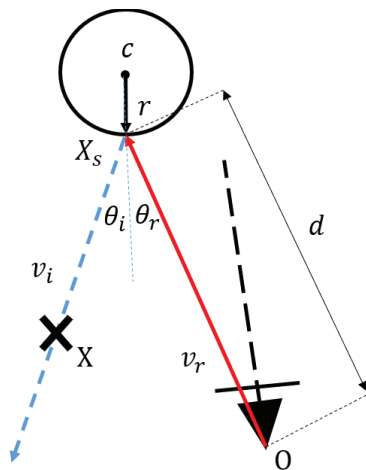


図2 Backward Projection: 2次元から3次元への投影  
Fig.2 Backward Projection: Projection from 2D to 3D.

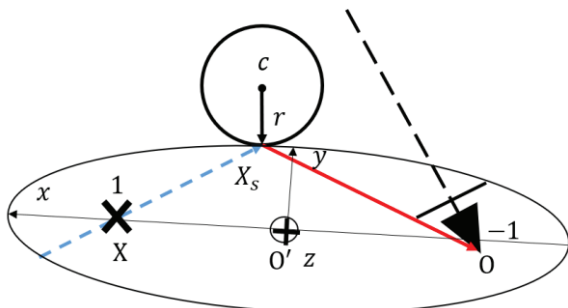


図3 Forward Projection: 3次元から2次元への投影  
Fig.3 Forward Projection: Projection from 3D to 2D.

## 2 関連研究

ここでは、2.1 節で反射屈折撮像系の投影モデル解析に関する研究について、2.2 節で角膜イメージング法について述べる。

### 2.1 反射屈折撮像系の投影モデル

反射屈折撮像系の投影をモデル化することにより、3次元空間中のある点と2次元画像上での観察点の間の対応関係を表現することができる。この場合、カメラと鏡の相対的な位置関係が固定されているか否かによって、投影モデルが大きく異なる。“固定方式”の場合、図4の左に示すように、鏡に対してカメラが固定されるため、投影のモデル化が簡易であるが、鏡とカメラが一体化した撮像系となるため、装置の大型化や被写体サイズ変更への対応が難しいなどの問題が存在する。本研究は、上述した問題を解消するために、図4の右に示すように、鏡とカメラの位置関係を柔軟に変更可能な“可変方式”を採用する。3節において“可変方式”の反射屈折撮像系の投影処理をモデル化し、観測された反射屈折像の解析を実現する。

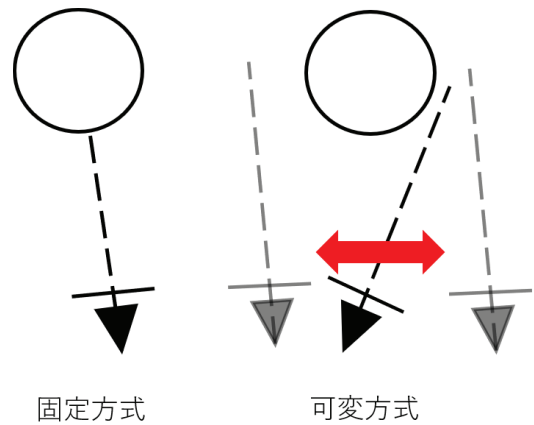


図4 反射屈折撮像系の投影モデル: “固定方式”は鏡に対するカメラの配置が固定である。“可変方式”は鏡に対するカメラ配置が変化する。

Fig.4 Projection Model of Catadioptric Imaging System: “Fixed” and “Movable”.

鏡面反射では、光線は反射則に従った行路を進む。Backward Projection では、鏡からカメラへの反射光線が分っているため、反射則に従った処理が可能である。一方で、Forward Projection は、入射光線と反射光線がともに未知であるため、より複雑な処理が必要となる。Agrawal ら[1]によって提案された一般2次曲面鏡に対する解析的アプローチでは、8次多項式で Forward Projection の解析解を記述している。鏡面が球体であることを仮定すると、比較的簡易な解を取ることができるため、4次多項式を用いた簡易記述が可能となる。Barone ら[2]は、解平面を定め、カメラと3次元点を焦点とする楕円と球面鏡の円の接点を考えることにより、簡易なパラメータでの4次多項式を記述している。本研究では、4節で述べるように Barone ら[2]の解析法を採用する。

### 2.2 角膜イメージング法

角膜イメージング法は Nakazawa ら[3]や Nishino ら[4]によって、提案された手法である。人の眼球の角膜が鏡の役割をすることで、カメラとの間で撮像系を構成する。この撮像系により取得した、角膜の画像(角膜表面反射画像)により、画像中の人物が見ている情景、つまり一人称視点映像を取得できる。しかし、角膜表面反射画像は、角膜の模様が周囲情景の反射像とともに残るため、反射画像のみでの観察が難しい場合がある。また、反射する情景の理解への研究は進んでいるが、通常に人が観察するような透視投影像への変換は行われていない。

本研究では、曲面鏡を採用するため、周囲情景の反射像以外が鏡面に現れにくく、最終的出力は、任意視点での見え方(透視投影画像)とする。

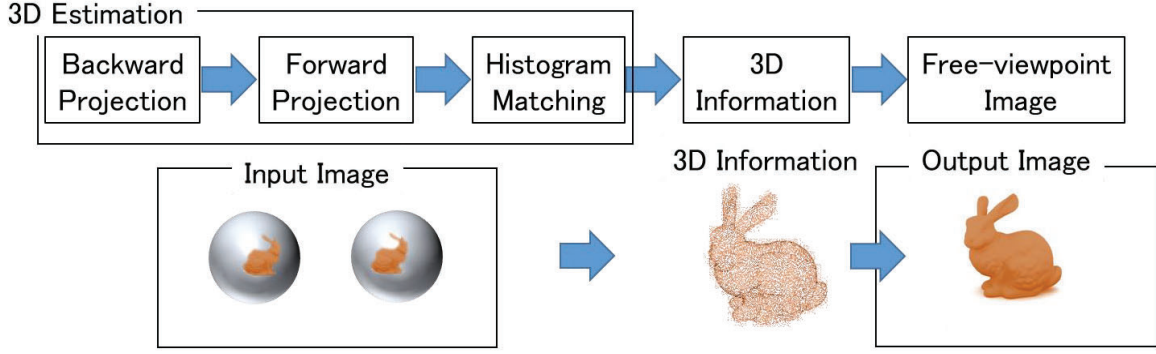


図5 複数の曲面鏡像からの自由視点映像生成処理の流れ

Fig.5 Processes to Generate Free-viewpoint Video from Multiple Curved Mirror Images

### 3 複数の曲面鏡像からの自由視点映像生成

本研究で提案する自由視点映像生成処理の手順を図5に示す。ここでは、図1で示したように、シーン内に複数の曲面鏡(本手法では球面鏡)が配置され、全ての鏡がフレーム内に収まるような撮影が行われていることを想定している。

撮影シーンの3次元情報を推定する処理について述べる。まず、Backward Projectionによって、球面鏡上の反射点と光線方向を推定する。次に、推定した光線方向に沿って物体の奥行き情報を仮定し、その奥行き情報に基づいたForward Projectionによって、他の球面鏡上での反射点候補を算出する。奥行きを変化させながら同様の処理を繰り返し、その結果得られる候補点群に対して、ステレオマッチングを用いて見え方の類似度を算出する。最終的に、最も類似度の高い奥行き情報として3次元情報が推定される。見え方の類似度は、球面反射による形状歪みを考慮して、色ヒストグラムを用いて算出する。注目している球面鏡の全画素に対して同様の処理を適用する。さらに、それ以外の球面鏡に対しても同様の処理を行うことで、複数視点から観測した3次元情報を得る。推定した3次元情報を用いて球面鏡上の反射像を射影変換することにより、任意の視点位置から見え方、つまり自由視点映像を生成する。

以下、4節では[2]で述べられている反射屈折系幾何による反射点推定について、5節ではヒストグラムによる探索について、6節では任意視点からの見え方の生成について説明する。

#### 4 反射屈折撮像系幾何による反射点推定

ここでは、反射屈折撮像系の幾何学的関係を用いた球面鏡上での反射点の推定について述べる。

##### 4.1 Backward Projection

図2にBackward Projectionの概念図を示す。ここで

は、球面鏡上の反射点 $X_s$ と物体からの入射光線方向 $v_r$ を求める場合を考える。球の方程式、球での反射点からカメラに入る光線の方程式は、式(1)、(2)によって与えられる。ここで、 $d$ はカメラ中心と球面鏡上での反射点間の距離である。

$$|X_s - c|^2 = |r|^2 \quad (1)$$

$$0 = X_s + dv_r \quad (2)$$

式(1)、(2)から $X_s$ を削除すれば、式(3)が得られる。

$$d^2 - 2d(v_r \cdot c) + |c|^2 - |r|^2 = 0 \quad (3)$$

式(3)を $d$ について解くと、

$$d = (v_r \cdot c) \pm \sqrt{(v_r \cdot c)^2 - (|c|^2 - |r|^2)} \quad (4)$$

となる。 $d$ を式(2)に代入すると反射点 $X_s$ が求まる。また、物体から球面鏡上の反射点への入射光線方向 $v_i$ は、式(5)に示すように、鏡面反射より、鏡面の法線 $r$ に対して、入射角 $\theta_i$ と反射角 $\theta_r$ が等しくなるように定まる。

$$v_r = v_i - \frac{2(v_i \cdot r)r}{r \cdot r} \quad (5)$$

##### 4.2 Forward Projection

図3にForward Projectionの概念図を示す。Forward Projectionの解平面として、カメラ中心、物体位置、曲面球の中心が含まれる平面を考える。求める球面鏡上での反射点はカメラ中心と物体位置を焦点とした楕円と球面鏡の円との接点となる。このとき、焦点位置を $[1, 0, 0]$ 、 $[-1, 0, 0]$ となるように正規化する。カメラ中心から物体位置の方向を $x$ 軸、解平面の法線方向を $z$ 軸とする右手系になるように回転する。

以上から、接点  $(x, y)$  の方程式は、円の中心を  $[a, b, 0]$  とするとき、式(6)で表される。

$$(ay - bx)(x(x - a) + y(y - b)) - (x - a)(y - b) = 0 \quad (6)$$

式(6)の内、 $w = x - a, q = y - b$  と置き換えると式(7)で表される。

$$(aq - bw)(aw + bq + r^2) - wq = 0 \quad (7)$$

式(7)に  $w = r \cos \theta, q = r \sin \theta$  の極座標変換を適用する。さらに、 $\cos \theta = \frac{1-t^2}{1+t^2}, \sin \theta = \frac{2t}{1+t^2}$  を適用すれば、式(8)の1元4次多項式が導かれる。

$$(br - ab)t^4 + 2(ar + b^2 - a^2 + 1)t^3 + 6(ab)t^2 + 2(ar - b^2 + a^2 - 1)t + (-br - ab) = 0 \quad (8)$$

式(8)の  $t$  について四つの解が導出される。この内、式(9)に示すように、短径を  $\sqrt{\lambda}$  とする楕円方程式を当てはめると、 $\lambda < 0$  となる解は、円に接する双曲線を表す。一方、 $\lambda > 0$  となる解の内、大きいものは円に外接する楕円を表す。すなわち、 $\lambda > 0$  となる解の内、最も小さいものが求める解となる。

$$\frac{x^2}{(1 + \lambda)} + \frac{y^2}{\lambda} = 1 \quad (9)$$

## 5 色ヒストグラムによる探索

図 5 に色ヒストグラムによる探索の概念図を示す。Backward Projection により、ある球面鏡上での反射点と、物体からの入射する光線方向を求め、この光線方向に沿って物体位置(球の中心からの奥行き)を複数仮定する。仮定した物体位置に対して、Forward Projection を適用することにより、図 5 中央右の円上の曲線で示すように、注目している反射点は撮像平面上でエピソード曲線を描く。複数の球面鏡における反射点に対して、撮像平面上での見え方の類似度を算出し、仮定した物体位置の中から、最適な物体位置(奥行き)を推定する。

鏡の形状によって、カメラで撮影された鏡像には曲面歪みが含まれている。その結果、両鏡像で観測される同一地点の見え方は大きく異なるため、テンプレートマッチングなど観測像の形状変化の影響を受ける類似度はマッチング指標としてふさわしくない。本研究では、形状変化に不変な特徴量である色ヒストグラムによって類似度を算出する。このとき、ヒストグラムを取得するマスクは反射点の3次元位置を考慮して設定する。球面を極座標で考えたときの角度情報からマスク領域を決定し、

撮像平面座標に変換する。色ヒストグラムの類似度の指標として Bhattacharyya 距離を採用する。

撮影画像  $I$  において比較対象となる二つの鏡像でのヒストグラムを  $H_1, H_2$  とするときの Bhattacharyya 距離  $d(H_1, H_2)$  は式(10)で与えられる。

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{\sum_i \frac{\sqrt{H_1(I) \cdot H_2(I)}}{\sqrt{\sum_i H_1(I) \sum_i H_2(I)}}} \quad (10)$$

式(10)より、類似度が 0~1 で示され、類似度が最も高いものは 1 となる。この指標に基づき、適切な物体位置を推定する。

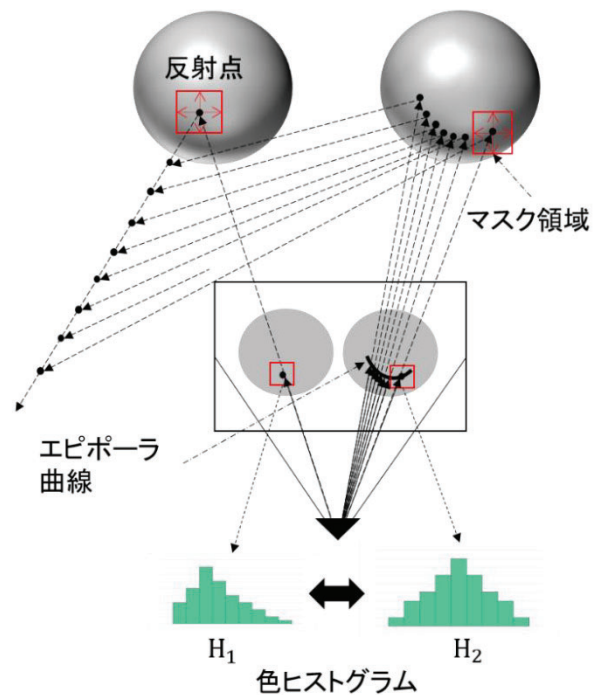


図6 色ヒストグラムによる探索

Fig.6 Matching by Color-Histogram

## 6 任意視点からの見え方の生成

ここでは、前節で推定した3次元点群から、任意視点画像を生成する手法について述べる。

### 6.1 3次元点群の信頼度

任意の位置姿勢で設定したバーチャルカメラの撮像平面に3次元点群を投影する。その際、複数点が一つの画素に投影される場合がある。一般的には、任意視点から見て手前の点群を上書きすることで、自然な見え方が生成されるが、3次元推定誤差の影響を受けやすくなる問題が存在する。そのため、本手法では、推定した3次元点に対して信頼度を定義し、信頼度が一定値



よりも高い点の内, 最前のものを選択的に描画する.

信頼度としては, 二つの指標を用いる. 一つは, 3.3 節で述べた Bhattacharyya 距離である. もう一つは鏡像における解像度を考慮する. 先に述べた通り, 鏡像は曲面形状による歪みを含む. このとき, 鏡像内の位置によって解像度が変化する. 図 6 に示すように, カメラへの光線の入射角  $\theta_r$  は, 法線と  $\theta_r = 0$  となる基準線間の角度  $\alpha$  と, カメラに入射する光線と  $\theta_r = 0$  の基準線間の角度  $\varphi$  によって式(11)で表すことができる.

$$\theta_r = \alpha + \varphi \quad (11)$$

このとき,  $\theta_r$  に対する  $\sin \alpha$  方向の変化を考えれば, 解像度の変化を示す指標となり, 式(12)で表される.

$$\frac{d \sin \alpha}{d \theta_r} = \cos(\theta_r - \varphi) \quad (12)$$

式(12)より,  $\theta_r = 0$  で  $\theta_r$  に対する  $\sin \alpha$  方向の変化は 0 であり, 鏡像で反射する最大角度  $\theta_r = 90^\circ$  で  $\theta_r$  に対する  $\sin \alpha$  方向の変化が最大となり, この間を正弦的に変化する. 角度  $\varphi$  は  $\theta_r > \varphi$  であるため, 角度  $\varphi$  を無視すれば,  $\cos \theta_r$  となる. これを二つ目の指標とする. 値は 0~1 で類似度が最も高いものは 1 となり, Bhattacharyya 距離と同様の値域をとる.

上述した二つの指標に重み  $s_{bht}, s_{cos}$  をつけ, その和を信頼度として式(13)のように定義する. 信頼度は 0~1 の値域をとる. 信頼度について点を選別した後, 最前点を選択(描画)する.

$$\text{信頼度} = s_{bht} \cdot d(H_1, H_2) + s_{cos} \cdot \cos \theta_r \quad (13)$$

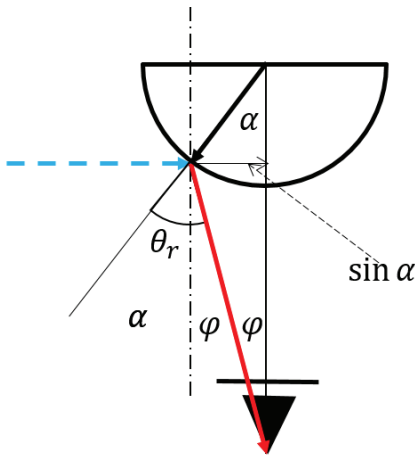


図7 撮像平面での鏡像解像度

Fig.7 Mirror-Resolution on Image Plane

## 6.2 欠損領域の補正

6.1 節で生成された画像は, 点が密ではなく描画する点を得られない欠損領域が存在する. しかし, 点群を描画した画像の欠損領域をメディアンフィルタなどで穴埋めを試みる際, ぼやけた画像になってしまう. そこで, 深度画像の領域において, 欠損領域を穴埋めするために, 深度画像に対してメディアンフィルタを施す. このときのメディアンフィルタは, 欠損部分を考慮せず, すでに埋められている画素の値から中央値を選択する. 埋められていない欠損領域は, 仮定した推定値域の最大値をとるものとする.

欠損領域が埋められた深度画像に対してテクスチャの貼り付けを行う. 用いるテクスチャは, 新たな物体位置に対して, 再度 4.2 節で示した Forward Projection を適用し, 元の撮影画像からテクスチャを取得する.

## 7 実証実験

撮影は, キヤノン社の一眼レフカメラ EOS 5D mark II を使用して行った. 撮影画像の解像度は 5616 画素  $\times$  3744 画素である. 撮影画像の一例を図 8 に示す. 本実験の処理には, CPU: Intel Core i7-9700 3.00Ghz, メモリ: 16.00GB RAM を搭載したデスクトップ PC を使用した. 球面鏡は, 金属球を用い, 固定するために光学台に設置した.

本手法により, 撮影画像から撮影空間の3次元情報を推定し, その情報から任意視点からの見え方を生成した一例を図 9 に示す. 図 8 の左に写っている球面鏡の中心から撮影カメラを向いた姿勢で画角 60 度の見え方を再現したものである. 図 8 の撮影画像からは二つの鏡像から約 40 万点が推定された. 処理に要した時間は全体で約 3 時間, 主な処理として, 4, 5 節で述べた手法を用いた3次元推定に約2時間, 6 節で述べた3次元推定情報からの見え方の生成に約 30 分を要した.

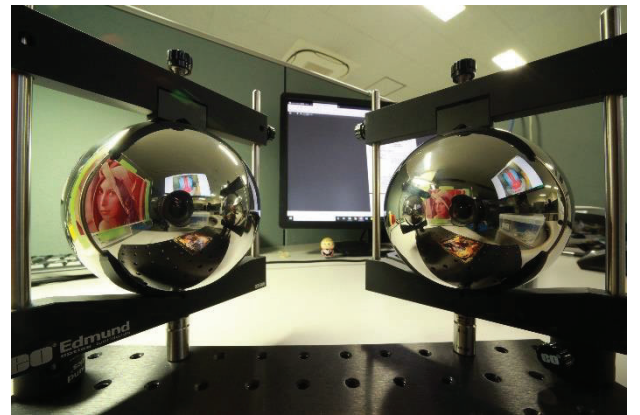


図8 撮影画像の一例

Fig.8 An Example of Shooting Image



図9 任意視点における見え方

Fig.9 Image from an Arbitrary Viewpoint

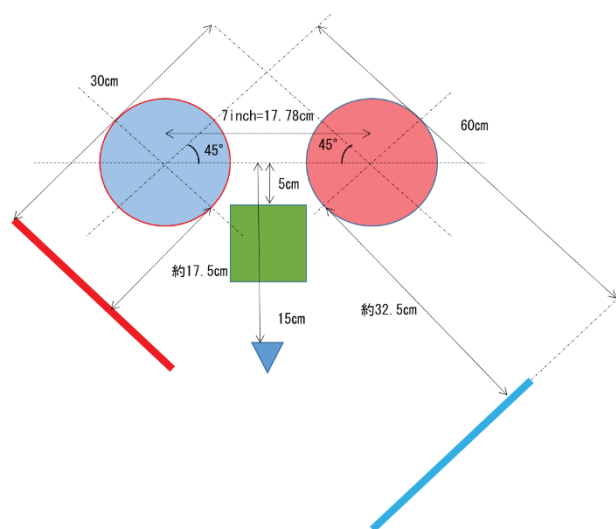


図10 撮影実験の見取り図: 図左下の赤線, 図右下の青線, 図中央の緑四角の位置にそれぞれ図柄を配置している。

Fig.10 Layout Image for Shooting Experiment : Place each images on red line at left-under, on blue line at right-under, on green square at center.

## 8 おわりに

本稿では, 複数の曲面鏡を撮影した画像から自由視点映像を生成する手法を提案した. 反射屈折系における解析的な反射点と光線方向の推定, 色ヒストグラムを用いたステレオマッチングにより, 撮影空間の3次元情報を推定する. 推定した3次元情報に基づき, 任意視点位置からの見え方を生成した. 本研究は, JSPS 科研費 17H01772 の助成を受けたものである.

## 参考文献

- [1] Amit Agrawal, Yuichi Taguchi, Srikumar Ramalingam. "Beyond Alhazen's Problem: Analytical Projection Model for Non-central Catadioptric Cameras with Quadric Mirrors". IEEE Conference on CVPR, Colorado Springs, CO, USA, 20–25 June 2011.
- [2] Sandro Barone, Marina Carulli, Paolo Neri, Alessandro Paoli, Armando Viviano Razonale. "An

Omnidirectional Vision Sensor Based on a Spherical Mirror Catadioptric System", Sensors 31 Jan 2018.

[3] Christian Nitschke, Atsushi Nakazawa, Haruo Takemura. "Corneal Imaging Revisited: An Overview of Corneal Reflection Analysis and Applications". IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications Vol.5 1–18, Jan, 2013.

[4] Ko Nishino, Shree K. Nayar. "Corneal Imaging System: Environment from Eyes". International Journal of Computer Vision 70(1), 23–40, 2006.

[5] Kazumasa Yamazawa, Yasushi Yagi, Masahiko. Yachida. "HyperOmni Vision: Visual navigation with an omnidirectional image sensor". Systems and Computers in Japan, Vol. 28, No. 4, 36-47, Apr, 1997.

[6] 山澤 一誠, 八木 康史, 谷内田 正彦. "移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚系 HyperOmni Vision の提案". 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 5, 698–707, May 1996.

© 2020 by the Virtual Reality Society of Japan ( VRSJ )