

Teleidoscopic-Imaging システムによる微小物体の多視点撮影

川原 僚^{1,a)} 延原 章平^{1,b)}

本稿は研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), "Teleidoscopic-Imaging システムによる微小物体の多視点撮影" (2017-CVIM-208(24, 1-7, 2017.9)) の著者バージョンです。最終稿については、<http://id.nii.ac.jp/1001/00183355/> をご覧ください。

概要：本研究は、球面屈折層を導入して複合鏡と被写体の間に配置した Teleidoscopic-Imaging システムを構築し、新たな計測モデルによって微視的な多視点撮影の実現を目指すものであり、特に十分な被写界深度の確保の実現できることを示すとともにキャリブレーション手法を提案する。シミュレーションによる被写界深度の評価と実環境での撮影実験により提案手法の有効性を示す。

Keywords: IPSJ Journal, L^AT_EX, style files, "Dos and Dont's" list

1. はじめに

1.1 研究背景

ミクロな対象世界におけるコンピュータ・ビジョンは、対象の位置・形状・色・運動をはじめとした視覚的情報を非接触・非破壊でかつ詳細に得る技術として、微小物体のセンシングおよび解析技術に貢献し、受精卵の形状計測・解析による生命情報学への応用や養殖などの第1次産業の情報化などが期待される。

一方で、微視的な環境へのコンピュータ・ビジョンの拡張として顕微鏡カメラの導入が考えられるが、多視点撮影環境のための空間的配置の制約や被写界深度の確保が問題となる。空間的配置の制約に対しては、鏡を用いて仮想的な多視点環境を構築する手法 [10] が挙げられ、Takahashi ら [11] によって単一参照点からの線形外部キャリブレーション法が提案されている。ただし、顕微鏡カメラを用いて複合鏡システムを構築した場合は物理的に小さな鏡を配置する必要があり、また光路差のある反射像についても被写界深度を確保する方法を考慮しなければならない。

これらの問題に対し、本研究では複合鏡と被写体の間に球面屈折層を導入した Teleidoscopic-Imaging システムを構築し、新たな計測モデルによって微視的な多視点撮影および被写界深度の確保が実現できることを示す (図 1.2)。また、この計測モデルのキャリブレーション法を提案し、シ

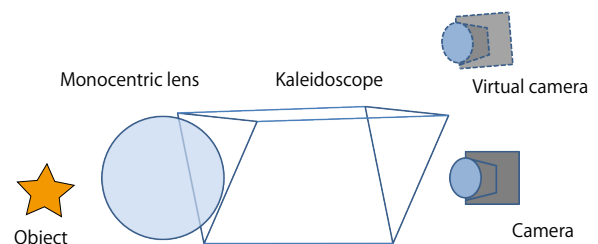


図 1 Teleidoscopic-Imaging システム

ミュレーションによる被写界深度の評価と実環境での撮影実験により提案手法の有効性を示す。

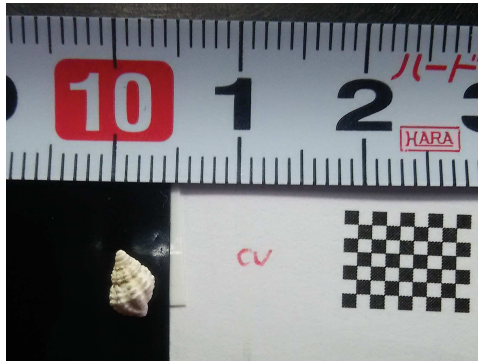
1.2 関連研究

球面屈折層 (球面レンズ) は一般的に光ファイバー同士のカップリングなどに用いられるが、内視鏡をはじめとして広い視野を撮影するためのレンズにも応用され、単一の焦点をもたないことが知られている [2], [3], [7]。また、球面屈折層は近似的に非常に短い焦点距離をもち、接写によって高い倍率が得られることから、17 世紀には Leeuwenhoek 式顕微鏡が考案されている。これらは球面屈折層が被写体側で光軸に対し深い角度の投影経路をもつことを利用したものであり、本研究では、同様に接写により高い倍率を得られること、および広い視野により球面屈折層自体の鏡像を介した仮想多視点撮影が可能であることを用いた Teleidoscopic-Imaging システムを提案する。また、球面屈折層の配置により微視的撮影と被写界深度の確保が両立できることを示す。

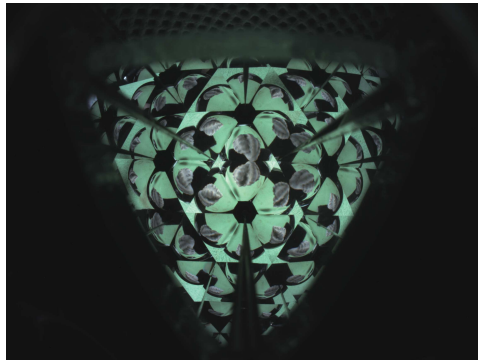
¹ 京都大学大学院 情報学研究科

^{a)} kawahara@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

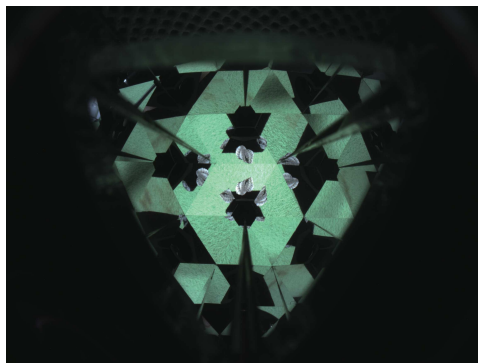
^{b)} nob@i.kyoto-u.ac.jp



(a)



(b)



(c)

図2 Teleidoscopic-Imaging システムによる撮影

(a):被写体(約5mm)(b):球面屈折層を導入した場合、(c):球面屈折層が存在しない場合．球面屈折層によってより多くの仮想視点から撮影できていることが分かる．

計測モデルのキャリブレーションに関連して，Agrawalら[1]は単一カメラから複数の球面屈折層を介して平面のキャリブレーション物体を撮影し，球面屈折層のパラメタを推定する手法を提案した．これに対し本研究では，球面屈折層は1つのみであるが，複合鏡により得られる鏡像の対応点から，球面屈折層のパラメタおよび鏡のパラメタを同時に推定する手法を提案する．

また，複合鏡を用いた撮影環境でのキャリブレーション[11]では，鏡像関係にある点の対応が必要である．しかしながら，球面レンズを導入した場合は屈折の影響によ

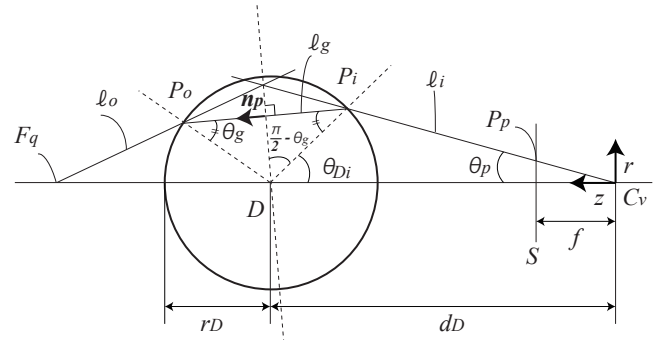


図3 球面屈折層を介した撮影の投影モデル

り鏡像関係にある点を画像上で対応付けることが容易ではない．つまり，鏡像関係の点を得るためには球面レンズのパラメタを得る必要があり，球面レンズのパラメタを得るには鏡のパラメタが必要となる．この問題を解決するために，本研究では鏡のパラメタを用いずに推定可能なカメラから球面レンズ中心へ方向ベクトルを用いて鏡のキャリブレーションを行う．

2. 計測モデル

2.1 球面屈折層を介した撮影の投影モデル

まずはじめに，本節では球面レンズを介した撮影におけるカメラの投影モデルを定義し，その計算過程を記述する．

- 空気中に撮影対象物体が存在し，半径 r_D の球面屈折層を介して結像した対象物体の実像をカメラ C で観測する配置であるものとする．
- カメラ C は空気中におけるピンホールカメラモデルとしてモデル化され，想定される配置においては球面収差，コマ収差および屈折の波長依存性の影響は考慮しないものとする．

図3のように，焦点の位置がカメラ C と同一で，光軸が球面レンズの中心 D を通るようなカメラ C_v を考えると， $C - C_v$ 間の座標変換が既知であればカメラ C_v 座標系で投影経路を記述しても一般性を失わないことが分かる．また，カメラ C_v の撮像面の点 P_p に投影される経路 $\ell_o - \ell_g - \ell_i$ はすべて同一平面上 (Plane-of-Refraction) に存在する．よって，以下では図3のように (r, z) の2次元座標系で考えるものとする．

まずカメラから角度 θ_p で出た光線が球面屈折層に入射する点 $P_i(r_{pi}, z_{pi})$ は，

$$z_{pi} = \frac{d_D - \sqrt{d_D^2 - (1 + \tan^2 \theta_p)(d_D^2 - r_D^2)}}{1 + \tan^2 \theta_p}, \quad (1)$$

$$r_{pi} = z_{pi} \tan \theta_p,$$

と記述できる．また，空気の屈折率を μ_a ，球面屈折層の屈折率を μ_g とすると，光路 $\ell_i - \ell_g$ 境界ではスネルの法則により，角 θ_g に関して以下の式が成り立つ．

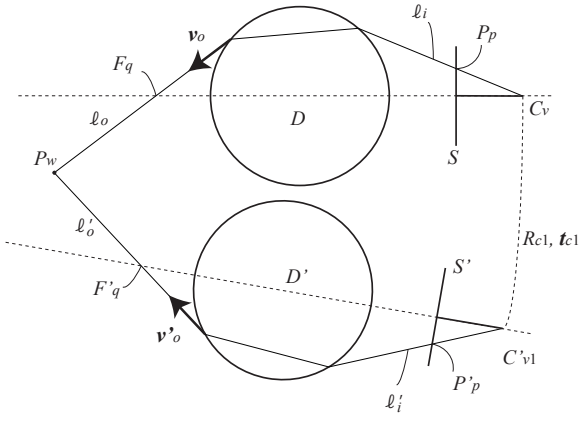


図5 仮想カメラによる三角測量

なる場合は以下のようにニュートン法によって反復的に $\phi_q(z_{fq}) = \theta_q(z_{fq})$ を満たす z_{fq} へと漸近できる。

まず, $G = \theta_q(z_{fq}) - \phi_q(z_{fq})$ とし, n 回目の反復計算における z_{fq} を $z_{fq}^{(n)}$ と表現することとすると,

$$\begin{aligned} z_{fq}^{(n+1)} &= z_{fq}^{(n)} - G \frac{\Delta z_{fq}}{\Delta G} \\ &= z_{fq}^{(n)} - \frac{\theta_q(z_{fq}^{(n)}) - \phi_q(z_{fq}^{(n)})}{\theta'_q(z_{fq}^{(n)}) - \phi'_q(z_{fq}^{(n)})}, \end{aligned} \quad (6)$$

として記述できる。よって表1の3行目のように, 微分 $\theta'_q(z_{fq})$ を $\theta'_q(z_{fqk}) = \theta_q(z_{fqk}) - \theta_q(z_{fqk-1})$ のように事前計算しておく, 式(6)によってLUTを参照しながら順投影が計算できる。

3.2 仮想カメラによる三角測量

本節では, 複数の球面屈折層とカメラの組が存在し, 対象空間上の同一の参照点を観測したときにその3次元位置を推定する手法について述べる。つまり, 図5においてカメラ C_v および C'_{v1} の画像平面上の点 P_p および P'_p が与えられたとき, 点 P_w の位置を推定する。

まず, C_v の Plane-of-Refracton 上において, 光路 ℓ_o 上の点 $P_w(r_{pw}, z_{pw})$, および点 $F_q(0, z_{fq})$ と光線の向き $\mathbf{v}_o = (r_{vo}, z_{vo})^\top$ の間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} r_{pw} &= \frac{r_{vo}}{z_{vo}}(z_{pw} - z_{fq}), \\ \iff r_{pw} - \frac{r_{vo}}{z_{vo}}z_{pw} &= -\frac{r_{vo}}{z_{vo}}z_{fq}. \end{aligned} \quad (7)$$

これを再び (x, y, z) の3次元座標系で表現すると,

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_{vo}}{z_{vo}} \\ 0 & 1 & -\frac{y_{vo}}{z_{vo}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{pw} \\ y_{pw} \\ z_{pw} \end{pmatrix} = -\frac{z_{fq}}{z_{vo}} \begin{pmatrix} x_{vo} \\ y_{vo} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\iff A_0 \mathbf{p}_w = \mathbf{b}_0,$$

となる。また, C'_{v1} についても同様に,

$$\begin{aligned} A_1(R_{c1}\mathbf{p}_w + \mathbf{t}_{c1}) &= \mathbf{b}_1, \\ \iff (A_1R_{c1})\mathbf{p}_w &= \mathbf{b}_1 - A_1\mathbf{t}_{c1}, \end{aligned} \quad (9)$$

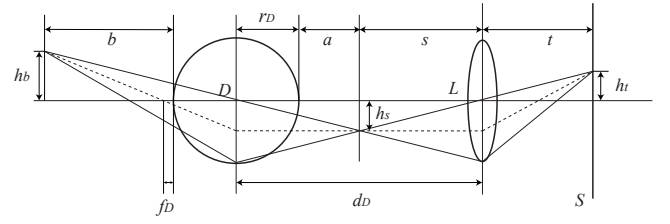


図6 球面屈折層とカメラのレンズを考慮した投影

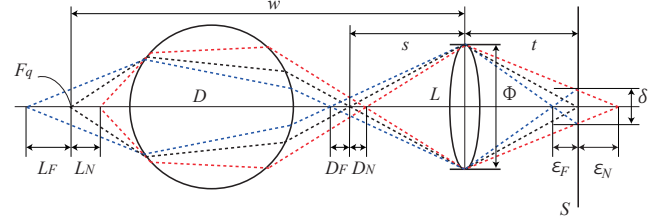


図7 球面屈折層を介した投影における被写界深度

が成り立つため, これらの式より,

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1R_{c1} \end{pmatrix} \mathbf{p}_w = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_1 - A_1\mathbf{t}_{c1} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

を解くことによって, 線形に点 P_w を求めることができる。また, 球面屈折層のカメラの組が3つ以上の場合についても, 式(10)を拡張することによって計算が可能である。

4. 球面屈折層を用いた場合の被写界深度

本節では, 球面屈折層を介して撮影環境での被写界深度の導出のために, カメラ C 内部のレンズを凸レンズとしてモデル化し, 球面屈折層および凸レンズを組み合わせた被写界深度を導出する。ただし, 図6のように, それぞれのレンズ間で一度実像を結ぶ配置であることと, 有効開口径はカメラの内部レンズ側によって決まることに留意されたい。

図7のように, 点 F_q が球面屈折層 D および凸レンズ L を介して撮像面 S で再び点として結像するとき, 光軸に沿って点 F_q の前後に位置する点は撮像面 S とは異なる位置で再び結像し, 撮像面 S においては凸レンズ L における有効開口径に応じた直径をもつ散乱円として観測される。したがって, 撮像面側に直径 δ の許容散乱円を定めると, 図7のように光学系全体としての前方被写界深度 L_N , 後方被写界深度 L_F を定めることができる。

ここで, 球面レンズが存在しない撮像系においては前方・後方被写界深度はそれぞれ図7において D_F , D_N として定められる。まず, $D-S$ 間において次の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{t} = \frac{1}{f}. \quad (11)$$

これより, 前方・後方被写界深度はそれぞれ,

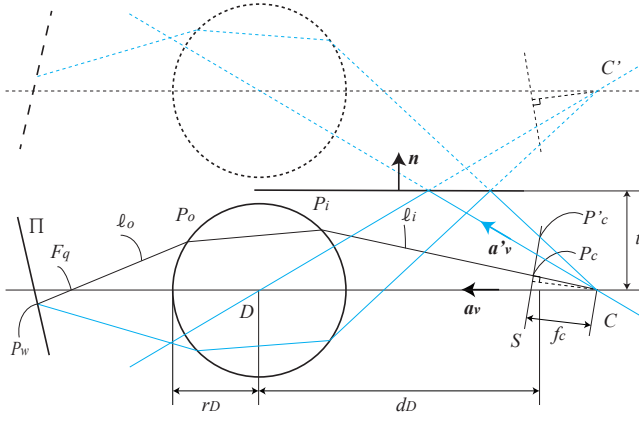


図8 Teleidoscopic-Imaging システムの計測のモデル

$$\begin{aligned} D_N &= \frac{\epsilon_N(s-f)^2}{f^2 + \epsilon_N(s-f)^2}, \\ D_F &= \frac{\epsilon_F(s-f)^2}{f^2 - \epsilon_F(s-f)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

として定められる．

また，球面屈折層を介した被写界深度 L_N, L_F については， D_F, D_N を用いて第 2.1 節で述べた過程によりそれぞれ求めることができる．

ここで式 (12) から明らかなように，焦点深度について $\epsilon_N \simeq \epsilon_F$ とすると $D_F > D_N$ であることがわかる．また，球面屈折層を近似的に焦点距離の短い凸レンズであると考えたとき，被写体側から見たレンズとしての前方・後方の位置関係はカメラ側とは逆の関係にある．よって前方・後方被写界深度の非対称性を考慮すると，最終的な被写界深度は L_N に対し L_F がより大きくなるような関係にあると考えることができる．

5. キャリブレーション

5.1 概要

本節では，内部パラメタは既知のカメラ C を用いて，複合鏡と球面屈折層を導入して撮影環境を構築した場合のキャリブレーション法について述べる．また，空気屈折率 μ_a は既知とする．

図 8 のようにカメラ C は，球面屈折層を介して平面 Π 上の点 P_w を撮像面 S 上で P_c として観測し，また球面屈折層と鏡を介して P'_c として観測するものとする．キャリブレーションの概要は以下の通りである．

入力: 対応する点 P_w, P_c, P'_c の組

出力:

球面屈折層 … 軸ベクトル a_v ，カメラ C との距離

d_D ，半径 r_D ，屈折率 μ_g

鏡 … 鏡の法線 n ，カメラ C との距離 t

平面 Π … カメラ C に対する姿勢 R_Π ，位置 t_Π

5.2 球面屈折層への中心軸の推定

まず，Agrawal ら [1] と同様に，投影経路を形成するベクトルについて， a_v, p_c, p_w は同一平面 (Plane-of-Refraction)

に存在することから，未知の変数 a_v, R_Π, t_Π について以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} p_c^\top (a_v \times (R_\Pi p_w + t_\Pi)) &= 0, \\ \Leftrightarrow p_c^\top (E_\Pi p_w + s_\Pi) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

ただし， $E_\Pi = a_v \times R_\Pi$ ， $s_\Pi = a_v \times t_\Pi$ である．このとき，平面パターン上の点 $P_w(x_{pw}, y_{pw}, 0)^\top$ を用いると未知数は 9 個であり，入力から球面屈折層への中心軸ベクトル a_v は

$$a_v = \frac{E_\Pi(:, 1) \times E_\Pi(:, 2)}{\|E_\Pi(:, 1) \times E_\Pi(:, 2)\|}, \quad (14)$$

として求められる．また，式 (13) は各ベクトルが同一平面上にあることの拘束であり，平面の軸 a_v 方向の位置は決定されない．したがって t_Π については a_v 方向の不定性が残るため，提案手法では以下に述べるように鏡による仮想的な複数視点の情報によって解決する．

5.3 鏡の法線の推定

第 5.2 節で述べた方法は図 8 のように鏡像に対しても同様に適用することができ，得られた軸を a'_v とすると，以下の関係から鏡の法線 n を求めることができる．

$$a_v^\top n \times a'_v = 0. \quad (15)$$

ただし， $n_\times$ は鏡の法線 n の歪対象行列である．

5.4 平面の姿勢推定

第 5.3 節で得られた鏡の法線から，仮想カメラ C' 側から共通の R_Π, t_Π に対して式 (13) と同じ拘束が成り立つ．

$$(H p'_c)^\top ((H a'_v) \times (R_\Pi p_w + t_\Pi)) = 0. \quad (16)$$

ここで， H は法線 n に関するハウスホルダー変換行列である．よって，式 (13) および式 (16) から平面の位置姿勢 R_Π, t_Π を推定することができる．

また，球面屈折層について，本研究では d_D, r_D, μ_g は同じ入力に対し第 2.1 節で述べた投影過程を用いて，初期値からの非線形最適化により得る方法を採用した．さらに，カメラ C と鏡の距離 t については球面屈折層の中心の鏡像関係から推定することができる．

6. 評価実験

6.1 被写界深度の評価

提案するモデルの被写界深度の評価として，同じカメラを用い，球面屈折層が存在する場合としない場合について，0.5mm の高さの物体がカメラ C の撮像面において同じ高さで撮像されたときの被写界深度を比較した．つまり，以下のような手順でシミュレーションを行った．

(1) 球面屈折層が存在する場合について，ある作動距離に

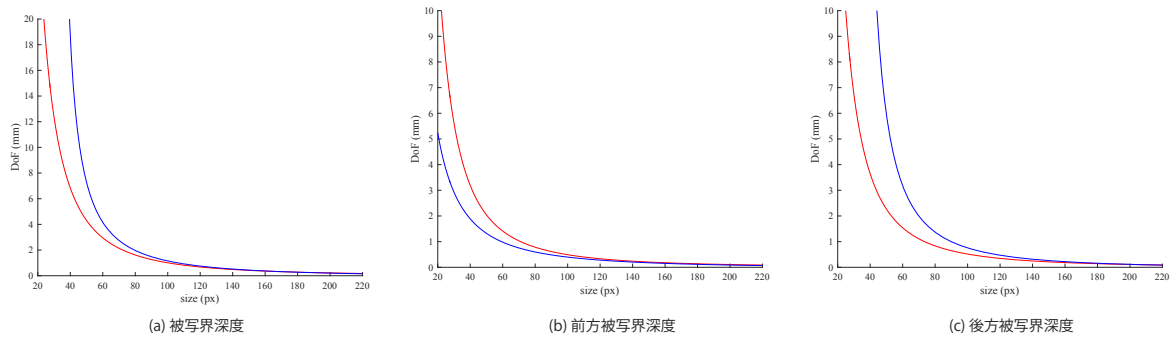


図9 撮像面上の像の高さと被写界深度の関係

青:球面屈折層あり, 赤:球面屈折層なし. ただし, カメラについては $F8$, $f_c = 3.0\text{mm}$, $\delta = 1.55\mu\text{m}$, $4000 \times 3000\text{px}$ とし, 球面屈折層ありの場合については $d_D = 65\text{mm}$, $r_D = 5.0\text{mm}$ として 0.5mm の高さの物体を撮影している.

表2 実環境におけるキャリブレーション結果
参照点: 平面の40点, カメラ: 二回反射像まで (計10).

再投影誤差 (二乗ノルム)	三角測量誤差 (RMS)
0.62px	0.17mm

についての被写界深度を第4節の方法で計算するとともに, 0.5mm の高さの物体の像の大きさを計算する.

(2) 球面屈折層が存在しない場合について, 手順(1)で得られた像の大きさに対応する作動距離を計算し, 被写界深度を式(12)によって計算する.

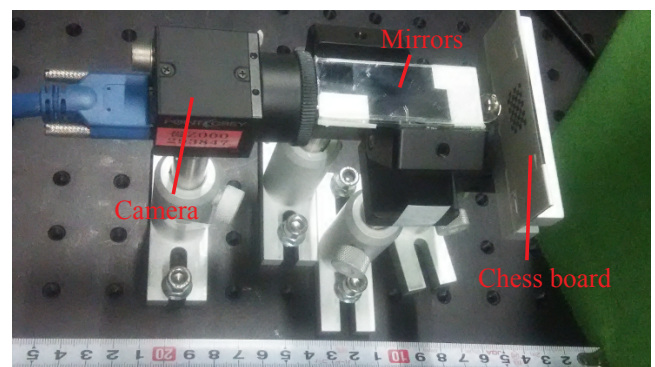
この結果について, 図9(a)からわかるように, 作動距離を短くすることによってより拡大して撮影するほど被写界深度が小さくなることは共通しているが, 球面屈折層を導入した場合のほうがより広範囲で物体の高さと同等かそれ以上の被写界深度を確保できていることが分かる. また, 今回の設計において想定した被写体の大きさ (約 5mm) に対し, 球面屈折層の導入は物体自体の奥行きだけでなく, さらに物体が移動した場合の被写界深度の確保においても有効であるといえる.

図9(b),(c)に示す結果からわかるように, 球面レンズが存在する場合は, 球面レンズが存在しない場合に対して前方被写界深度が浅くなり, 後方被写界深度が深くなっていることがわかる. よって第4節で述べたように, 凸レンズを途中で実像ができるように組み合わせることでその実像を観測する計測系では, 許容散乱円に対する被写界深度の非対称性が最終的な被写界深度に影響していると考えられる.

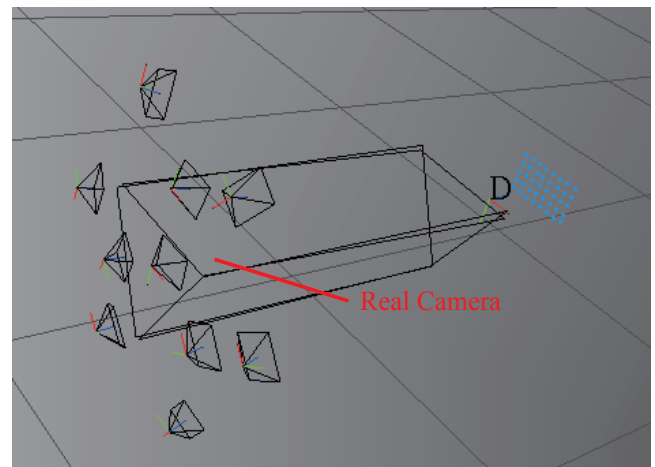
6.2 キャリブレーションの評価

図10(a)のように撮影環境を構築し, 撮影によるキャリブレーション実験を行った. 用いた環境は第6.1節のシミュレーション時とほぼ同じであり, 用いたカメラは Flea3 FL3-U3-88S2C-C (4000×3000 , 画素サイズ $1.55\mu\text{m}$), またレンズは焦点距離 3mm , $F8$ のものを使用した.

図11(c)に示す球面屈折層を介した平面パターンの撮影



(a)

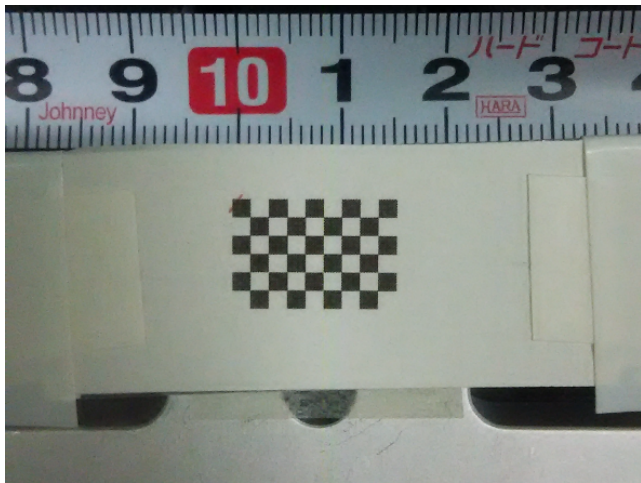


(b)

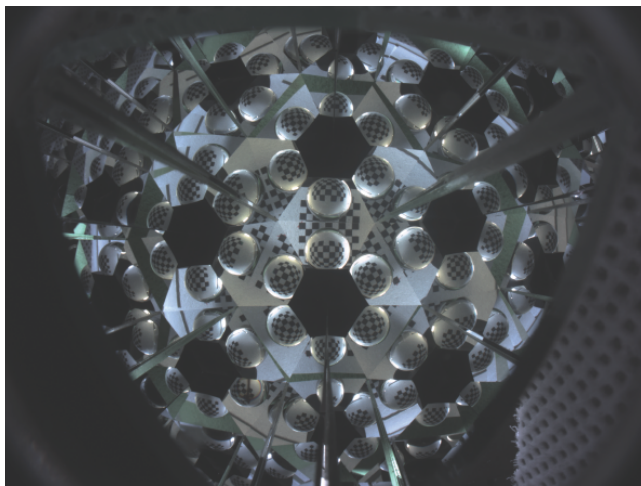
図10 実環境でのキャリブレーション
(a):撮影環境, (b) キャリブレーション結果.

画像から, 第5節で述べた方法でキャリブレーションを行い, 最終的に第2反射像までを用いてカメラの内部パラメータを含むすべてのモデルパラメータの非線形最適化を行った.

キャリブレーション結果は図10(b)および表2に示す通りであり, 仮想カメラを含むすべてのカメラの再投影誤差の二乗ノルムは 0.62px , 三角測量誤差の RMS は 0.17mm となった. ただし, それぞれ参照点である40点で平均した結果である.



(a)



(b)

図 11 実環境における撮影画像

(a):キャリブレーションに用いた平面パターン, (b):キャリブレーションの入力画像, (b)において平面パターンが大きく拡大されていないのは平面を配置した位置によるものであることに留意されたい。

7. 考察

球面収差

Teleidoscopic-Imaging システムにおいては, 球面屈折層に起因する球面収差を原理的に回避することはできない。本研究では, カメラの開口を小さくすることによって, 球面収差の影響を抑えた。しかし, 開口を小さくすると回折による小絞りボケが顕著になるため, 球面収差と小絞りボケの間でトレードオフが生じる。

この問題に対しては, Cossairt ら [2] が提案したように Computational Photography の考え方に基づいて, 逆フィルタを設計する方針が考えられる。

水中物体撮影

水中物体を撮影するためには, 提案した Teleidoscopic-

Imaging において物体が存在する媒質としての水との屈折を考慮しなければならない。

この問題に対しては, 球面屈折層を水に直接液浸させるアプローチが考えられる。この場合, 図 3 で示した l_i と l_o の対称性は成り立たないが, 同様の議論によって光路を導出できる。

8. まとめと今後の課題

本研究では, 微小な物体の多視点撮影による形状復元の実現を目的とし, 提案する Teleidoscopic-Imaging システムにより微視的な多視点撮影環境および被写界深度の確保が同時に実現可能であることを示した。また, この計測モデルのキャリブレーション法を提案し, 実環境での撮影実験により評価し, 本手法の有効性を示した。

今後の課題としては, 被写体の大きさに応じた鏡の大きさ・配置を含めたシステム全体の設計の理論的検討や, 被写体に応じて計測モデルの水中撮影環境への応用などが挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP26240023 および JP15J07706 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Agrawal, A. and Ramalingam, S.: Single Image Calibration of Multi-axial Imaging Systems, *Proc. CVPR*, pp. 1399 – 1406 (2013).
- [2] Cossairt, O. S., Miao, D. and Nayar, S. K.: Gigapixel Computational Imaging, *2011 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–8 (2011).
- [3] Dansereau, D. G., Schuster, G., Ford, J. and Wetzstein, G.: A Wide-Field-Of-View Monocentric Light Field Camera, *Proc. CVPR* (2017).
- [4] Gregson, J., Krimerman, M., Hullin, M. B. and Heidrich, W.: Stochastic Tomography and its Applications in 3D Imaging of Mixing Fluids, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 52:1–52:10 (2012).
- [5] Grossberg, M. D. and Nayar, S. K.: The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration, *IJCV*, Vol. 61, No. 2, pp. 119–137 (2005).
- [6] Kawahara, R., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: Dynamic 3D capture of swimming fish by underwater active stereo, *Methods in Oceanography*, Vol. 17, pp. 118 – 137 (2016).
- [7] Krishnan, G. and Nayar, S. K.: Towards a true spherical camera, *Proc. SPIE*, Vol. 7240, 724002, pp. 1–13 (2009).
- [8] Narasimhan, S., Nayar, S., Sun, B. and Koppal, S.: Structured light in scattering media, *Proc. ICCV*, Vol. I, pp. 420–427 (2005).
- [9] Nishimura, M., Nobuhara, S., Matsuyama, T., Shimizu, S. and Fujii, K.: A Linear Generalized Camera Calibration From Three Intersecting Reference Planes, *Proc. ICCV* (2015).
- [10] Reshetouski, I., Manakov, A., Seidel, H.-P. and Ihrke, I.: Three-Dimensional Kaleidoscopic Imaging, *Proc. CVPR*, pp. 353–360 (2011).
- [11] Takahashi, K., Miyata, A., Nobuhara, S. and Matsuyama,

T.: A Linear Extrinsic Calibration of Kaleidoscopic Imaging System From Single 3D Point, *Proc. CVPR* (2017).

- [12] Yano, T., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: 3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-view Synthesis, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 5, pp. 65–69 (2013).