

# 1 対のウェッジプリズムを用いた 屈折型リサージュサンプリングによる光線空間計測

日垣 輝大<sup>1,a)</sup> 北野 和哉<sup>1</sup> 榎田 貴弘<sup>1</sup> 藤村 友貴<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

## 概要

従来の光線空間計測では、マイクロレンズ光学系の制約によるサンプリング数の固定や、部分開口画像が格子状にサンプリングされる事で、画像処理時に不自然なボケが生じる問題がある。本研究では、1対のウェッジプリズムを用いた屈折型光学系による光線空間の計測手法と、視点位置のキャリブレーション手法を提案する。プリズムの回転によって生じる光線のリサージュの軌跡に沿って部分開口画像を取得する事により、視点位置の可変サンプリングを実現する。光学系の設計・キャリブレーションを行い、計測した光線空間を用いたリフォーカス処理を通じて、本手法の有効性を検証した。

## 1. はじめに

ライトフィールド（光線空間）カメラは、カメラに入射する光線情報を4次元データとして記録する撮像系である。通常のカメラでは、積分されて消失する光線の入射方向を記録する事で、合成開口やリフォーカスなど従来の画像処理では原理上不可能であった撮影後に焦点を変える処理や全焦点画像の取得などが実現できる。

一般的な光線空間の計測手法として、平行移動ステージによる部分開口画像の撮影やマイクロレンズアレイを用いる方法が挙げられる。前者の手法は、平行移動ステージを用いてX-Y方向にカメラを走査する事で光線空間の撮影を実現する。後者の手法は、メインレンズとマイクロレンズを用いて4次元データを2次元空間に展開する。問題点として、前者の手法は大掛かりな装置になる点、後者の手法ではサンプリング間隔が固定される点が挙げられる。また、両者に共通する問題点として等間隔かつ格子状のサンプリングを行うためにリフォーカス時に不自然なボケが生じる点が挙げられる。

本論文では、自然なボケや可変サンプリングを実現するためのライトフィールド光学系と光線空間計測手法を提案する。本手法は、顕微鏡などの分野で利用される1対の

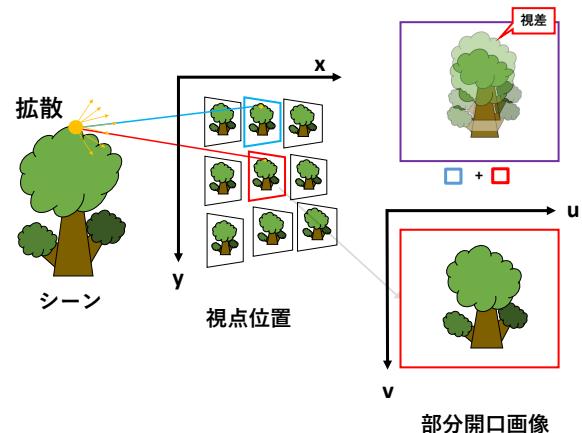


図 1 部分開口画像のデータ構造と座標系

ウェッジプリズムを用いたレーザ光線の走査手法 [1], [3]より着想を得た部分開口画像の計測手法と、部分開口画像間の視差や光学系のずれによって生じる部分開口画像間のパン・チルトを補正するキャリブレーション手法により構成される。具体的には、それぞれ独立な速度で回転する1対のウェッジプリズムを透過する光線が描くリサージュ图形の軌跡に沿って部分開口画像を取得し、無限遠を補正するキャリブレーションにより、円形開口に近い光線空間サンプリングと分解能の調整が容易な光線空間計測を実現する。また、ウェッジプリズムの角速度比を変化させる事で部分開口画像のサンプリング密度を自由に変更でき、理論上は仮想的な開口の内部を無制限にサンプリングできる。本研究の貢献は、次の2点である。1つ目は、不等間隔な部分開口画像のサンプリングによって自然なボケを実現したことである。2つ目は、リサージュサンプリングにより、従来手法では機械的制約によって困難であった光線空間の可変サンプリングを実現したことである。ウェッジプリズムの回転比を無理数にすることで理論上、機械的制約のない無制限な部分開口画像のサンプリングを可能とした。

## 2. 光線空間の応用例と従来の計測手法

### 2.1 光線空間の表現方法

光線空間とは、シーンから撮像系へ入射する光線の位置

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

a) higaki.akihiro.ha1@is.naist.jp

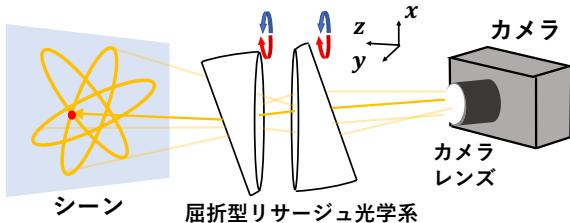


図 2 屈折型リサーチュ光学系により光線を屈折させる様子

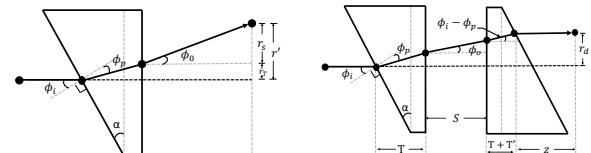
と方向を表現する 4 次元空間である。光線空間は図 1 のようなシーンを多視点から撮影した画像群と、その視点位置を記録した 4 次元データで構成される。ある視点位置における画像を部分開口画像と呼ぶ [4]。各部分開口画像間には、視点位置の差による視差が含まれている。本手法では、光線を視点位置と部分開口画像を対応付ける事でパラメータ化を行う（図 1 参照）。ある光線が視点位置  $(x, y)$ 、部分開口画像中の一点  $(u, v)$  を通過する時、視点位置と部分開口画像の点を結ぶ線を光線と定義する。本論文では、光線空間を 4 次元の関数  $I(x, y, u, v)$  で表現する。

## 2.2 光線空間の利用

光線空間データの応用例として次の 3 つが挙げられる。1 つ目は、撮像後のリフォーカスである。光線空間データは、シーンを複数の視点から計測する事で空間中の光線情報を取得でき、光学的に復元することができる。そのため、撮影後に特定の方向から入射する光線を選択すると任意の位置に合焦できる。2 つ目は、奥行き推定である。ライトフィールド光学系では、部分開口画像間の基線長が既知であるため、ステレオ法によってシーンの奥行き推定が可能である [2]。3 つ目は、空間レンダリングである。部分開口画像は多視点の視差画像であるため、視差マップを用いた被写体の立体画像合成が可能である。近年では、光線空間データをニューラルネットワークの入力として用いることで、反射や屈折を忠実に再現した立体画像の生成ができる [5] ことが示されている。

## 2.3 従来の光線空間計測手法

従来手法として、Ren [4] らは、主レンズとマイクロレンズからなる光学系を用いた光線空間の計測手法を提案した。シーンの一点から拡散され主レンズに入射した光線は、撮像素子の前面に配置されたマイクロレンズアレイにより、主レンズの入射位置に応じて分解され、撮像素子上の異なる画素に記録される。これにより 1 点から拡散した光線を入射位置ごとに分離できる。この手法では、ワンショットで光線空間を取得できる利点があるが、4 次元光線空間データを複数枚の部分開口画像として撮像素子に展開するため、記録される画像解像度が制限される。さらに、部分開口画像が格子状にサンプリングされるために、リフォーカス等の処理で不自然なボケが生じる。他方で



(a) ウェッジプリズムによる  
光線の屈折  
(b) 1 対のウェッジプリズム  
による光線の屈折

図 3 ウェッジプリズムによる光線の屈折過程

は、平行移動ステージを用いた手法が存在する。この方法は、カメラの光軸に対する平面上で二次元方向に平行移動させ、各視点位置で部分開口画像を撮影する。この方法は、部分開口画像を時分割で取得するため、撮像素子の解像度と同等の部分開口画像が取得できるが、カメラを走査するために大掛かりな装置が必要な点や時分割で撮影するためワンショットで撮影できない。以上が光線空間計測の代表的な手法である。従来手法では、視点位置を格子状に区切り、部分開口画像を等間隔にサンプリングしていた。

## 3. 光線空間のリサーチュサンプリング

本章では、光学系の動作原理と部分開口画像の取得方法、パン・チルトのキャリブレーション方法について説明する。本手法では、図 2 のようにカメラに入射する光線を屈折型リサーチュ光学系によって変化させる事で生じる視差を部分開口画像として取得し、光線空間データを計測する。

### 3.1 屈折型リサーチュ光学系の動作原理

視差を生じさせるために、円形ウェッジプリズムを用いる。ウェッジプリズムとは、一方が光軸に垂直な平面で、他方が傾斜した平面によって構成されるくさび型のプリズムである。このプリズムに光線が入射すると、図 3(a) のような屈折をして出射する。ここで、図中の点線は光軸である。図 3(a) のように、光線がウェッジ側から入射した場合、出射する光線の移動量は、入射面での屈折による移動量  $r_t$  と出射面での屈折による移動量  $r_s$  の和

$$r' = r_t + r_s \quad (1)$$

で表される。さらに、プリズムを光軸中心で回転させると、光線は式 (1) で求まる移動量  $r'$  を半径とした円を描く。プリズムが光軸に対して回転する際の回転方向を正とすると、観測平面上での光線の位置は、

$$y(\theta) = r' \sin(\theta), \quad x(\theta) = r' \cos(\theta) \quad (2)$$

により求まる。ここで、 $\omega$  を時間  $t$  で角度  $\theta$  回転する角速度として定義する。

$$\omega = \frac{\theta}{t} \Rightarrow \theta = \omega t \quad (3)$$

角速度を式 (2) に代入すると、ある時刻における光線の位置が得られる。

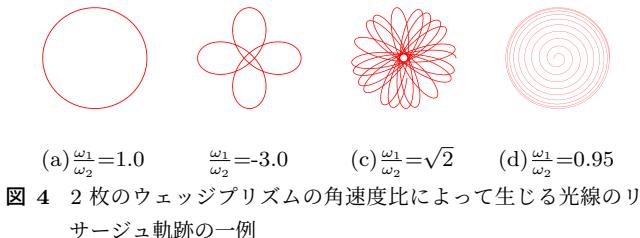


図 4 2 枚のウェッジプリズムの角速度比によって生じる光線のリサージュ軌跡の一例

$$y(t) = r' \sin(\omega t), \quad x(t) = r' \cos(\omega t) \quad (4)$$

プリズムが 1 枚の場合、光線は円を描くように変化するが、これでは空間中を密に走査できない。そこで、プリズムを 2 枚用いる事で、リサージュ図形に沿った空間の走査を実現する。図 3(b) のようにプリズム 2 枚を並べた光学系に光線を入射させた場合、各プリズムによる光線の移動量は相加的である。ここで、観測面上での光線の位置は、

$$y(\theta_1, \theta_2) = (r_1 + r_d) \sin(\theta_1) + r_2 \sin(\theta_2), \quad (5)$$

$$x(\theta_1, \theta_2) = (r_1 + r_d) \cos(\theta_1) + r_2 \cos(\theta_2) \quad (6)$$

により求まる。さらに、式 (3) により、式 (5)、式 (6) を拡張する事で、プリズムを 2 枚にした時の光線の位置と時間の関係式を得る。

$$y(t) = (r_1 + r_d) \sin(\omega_1 t) + r_2 \sin(\omega_2 t), \quad (7)$$

$$x(t) = (r_1 + r_d) \cos(\omega_1 t) + r_2 \cos(\omega_2 t) \quad (8)$$

ここで、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_d$  はプリズムの間隔、プリズムと撮像平面までの距離によって決定される。加えて、各プリズムの角速度  $\omega_1, \omega_2$  はプリズムの回転速度が一定のため定数である。式 (7)、式 (8) より、1 対のプリズムによって生じる光線の軌跡は、プリズム 1 とプリズム 2 の角速度比によって定まる。また、 $\sin$  波と  $\cos$  波の足し算であるため、光線の軌跡は  $\omega_1$  と  $\omega_2$  の比で決定されるリサージュ图形を描く。つまり、各プリズムの角度を調節する事で、光学系が射出可能な半径の範囲内にある全ての位置に光線を移動できる。このとき、1 対のプリズムの回転によって生じる、光線の移動量の最大値  $r_{max}$  は以下の式によって求まる。

$$r_{max} = (2T + T') \tan(\phi_i - \phi_p) + (2z + S) \tan(\phi_o) \quad (9)$$

2 枚のプリズムの角速度比  $\omega_1/\omega_2$  を変更した際のリサージュ軌跡を図 4 に示す。プリズムの角速度比を制御することで、軌跡に沿って光線を屈折させる事ができる。ここで、屈折型リサージュ光学系によって生じるリサージュ图形の軌跡を視差とみなすと、軌跡中のそれぞれの点でカメラを固定したまま部分開口画像が取得できる。本論文では、このリサージュ图形の軌跡に沿った部分開口画像サンプリングをリサージュサンプリングと呼ぶ。

### 3.2 光学系のキャリブレーション

屈折型リサージュ光学系で生じる屈折が光軸に対して並

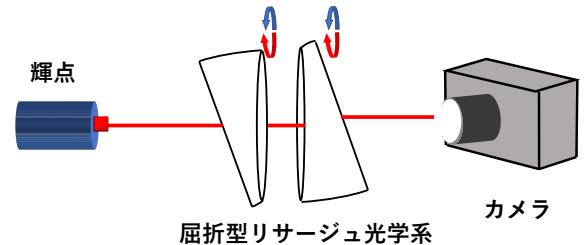


図 5 部分開口画像の視点位置を定めるための光学系構成

進移動の場合、無限遠点における視差は 0 となる。しかし、実際には製品の誤差や位置ずれ、ウェッジプリズムの回転角度によってパン・チルトが生じるために部分開口画像間の無限遠点がずれる。そこで、図 5 のような光学系を構築し、異なる 2 点の距離にカメラを配置して、ウェッジプリズムを回転させながら計測することで、2 点間を通過する光線ベクトルが得られる。得られた光線ベクトルを用いてパン・チルトの影響を相殺する。ここで、光線は空間中で直進すると仮定する。ある距離  $z_1$  でウェッジプリズムの角度  $(\theta_1, \theta_2)$  を変えた時に取得される部分開口画像中の輝点の座標を  $(u_{l_i}, v_{l_i})$  を  $P_{l_i} \in \mathbf{P}_l = \{P_{l_1}, \dots, P_{l_N}\}$  と定義する。次に、光学系とカメラの距離を変化させて異なる距離  $z_2$  で輝点の計測を行う必要があるが、カメラ位置を変化させると元の位置に戻す際に誤差が生じる。そこで、カメラを動かさずに異なる距離  $z_2$  で輝点の座標を計測する必要がある。そのため、全ての部分開口画像で観測された無限遠とみなせる被写体を用いて、距離  $z_1$  の計測と同様にそれぞれの部分開口画像で被写体の座標を求める。この処理で求めた座標を無限遠にある平面における光線の通過点  $P_{inf_i} \in \mathbf{P}_{inf} = \{P_{inf_1}, \dots, P_{inf_N}\}$  と定義する。 $\mathbf{P}_l$  と  $\mathbf{P}_{inf}$  より部分開口画像の開口位置  $P_{h_i} \in \mathbf{P}_h = \{P_{h_1}, \dots, P_{h_N}\}$  は以下のように求められる。

$$P_{h_i} = (P_{l_i} - P_{inf_i})d + P_{inf_i} \quad (10)$$

なお、 $d$  は、無限遠を 0 とした実数値  $d \in \mathbf{D} = \{0, \dots, n\}$  をとする。

### 3.3 リサージュサンプリングによるリフォーカス計算

式 (10) より、合焦したい焦点位置での部分開口画像の開

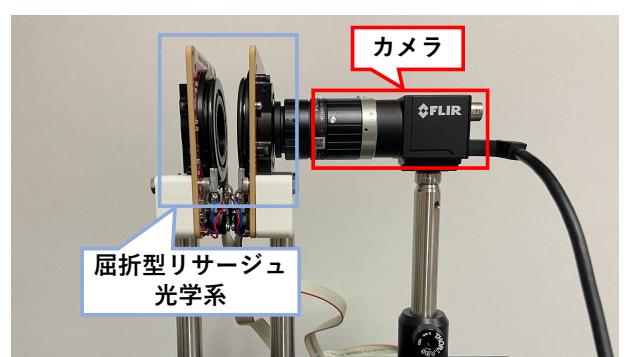
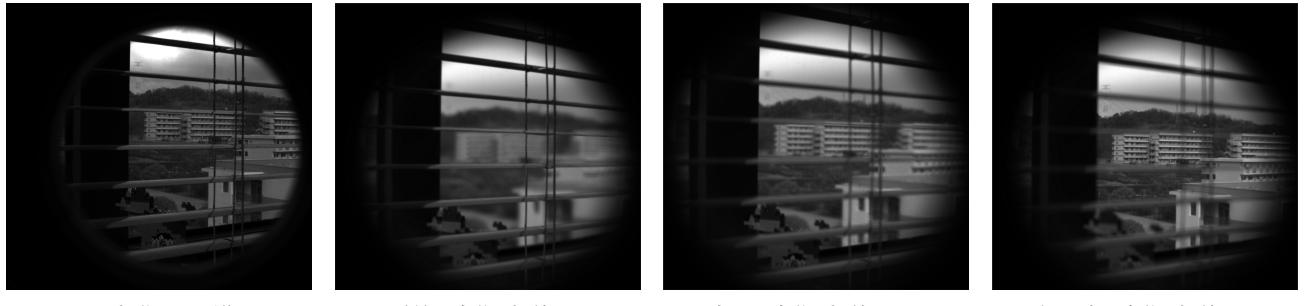


図 6 実環境実験で用いた光学系



(a) 部分開口画像 (b) 手前に合焦 (視差  $d = 1$ ) (c) 中間に合焦 (視差  $d = 0.5$ ) (d) 無限遠に合焦 (視差  $d = 0$ )  
**図 7** 部分開口画像群の 1 枚を全焦点画像として本手法のリフォーカス結果と比較.  
 視差を変化させるとそれぞれ手前から奥に合焦している様子が分かる.

口位置  $\mathbf{P}_h$  を求める.  $\mathbf{P}_h$  の重心  $C_h = (u_{ch}, v_{ch})$  を基準として、各開口位置と重心のずれ量を計算する事でリフォーカスを行う. 開口中心の座標  $C_h$  を基準とした際の各部分開口画像のずれ量  $M_i \in \mathbf{M} = \{(m_{u_1}, m_{v_1}), \dots, (m_{u_N}, m_{v_N})\}$  は以下の処理で求められる.

$$M_i = P_{h_i} - C_h \quad (11)$$

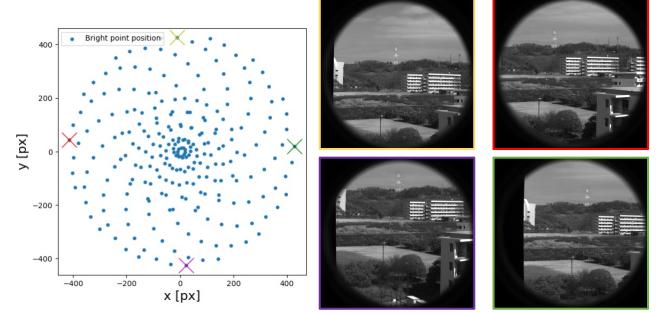
式 (11) で得られた、ずれ量  $\mathbf{M}$  より、リフォーカス画像  $L$  は以下の式で求められる.

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i, y_i, u - m_{u_i}, v - m_{v_i}) \quad (12)$$

#### 4. 実環境実験

本手法の有効性を示すために、部分開口画像群の計測と各視差パラメータにおけるリフォーカス画像の生成を行う. 実験で用いた光学系を図 6 に示す. カメラはモノクロカメラ (FLIR BFS-U3-200S6) を、レンズは焦点距離 16 mm の C マウントレンズ (Fujifilm HFX16A-5M) を、ウェッジプリズムは直径 25.4 mm で 2 度の傾きを持つ光学素子 (Thorlabs PS810) を使用した. また、設置したウェッジプリズムの間隔  $S$  は 26 mm である.

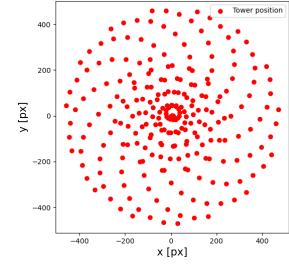
この光学系を用いて、角速度比  $\omega_1/\omega_2 = 0.99$  でプリズムを回転させ、部分開口画像を取得した. 図 5 の構成で計測した視点位置と部分開口画像を図 8 に示す. 上下左右にある部分開口画像それぞれで視差が生じている様子が分かる. また、光学系の無限遠点を補正するために、図 9(a) の被写体が無限遠にあると仮定して、各部分開口画像における被写体の位置をパターンマッチングにより算出した. 得られた位置の重心を求め、各点から重心までの距離を計算し無限遠の補正值として用いた. 図 9(b) に各視点位置における無限遠補正值を示す. 得られた視点位置と無限遠補正值を用いてリフォーカスを行った結果を図 7 に示す. 図 7(a) の全焦点画像と比較して、図 7(b), (c), (d) の 3 枚で手前から奥に焦点位置が変化している様子が分かる. 結果より、与えた視差に応じてリフォーカス画像が生成された. リフォーカス画像が生成されている点より、本手法を用いて光線空間の計測が可能であると示された.



**図 8** 輝点のセンサ座標と部分開口画像群. 輝点位置の  $\times$  印の色と部分開口画像群の枠の色が対応している.



(a) 補正に用いた被写体



(b) 得られた無限遠補正值  
**図 9** 無限遠点の補正に用いた被写体と補正值

#### 5. 結論

本研究では、屈折型リサーチュ光学系を用いた光線空間の計測手法と、そのキャリブレーション手法を提案した. 実験では、手前から遠景に被写体が存在するシーンの光線空間を計測し、視差に応じたリフォーカス画像の生成を行った. 結果、任意の位置にある物体に合焦されたリフォーカス画像が生成され、本手法の有効性が示された. 課題として、部分開口画像の撮影時に回転ステージを停止しているために 250 枚の部分開口画像の撮影に 20 分程度かかる点が挙げられる. これはプリズムの高速回転と高速な撮像が可能なカメラを用いることで解決できると考えている.

**謝辞** 本研究の一部は JST さきがけ JPMJPR2025, JSPS 科研費 JP23K16902 の支援を受けた.

## 参考文献

- [1] Bawart, M., Bregenzer, N., Bernet, S. and Ritsch-Marte, M.: Dynamic beam-steering by a pair of rotating diffractive elements, *Optics Communications*, Vol. 460, p. 125071 (2020).
- [2] Jeon, H.-G., Park, J., Choe, G., Park, J., Bok, Y., Tai, Y.-W. and Kweon, I. S.: Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera, *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1547–1555 (2015).
- [3] Liu, X., Henderson, K., Rego, J., Jayasuriya, S. and Koppal, S.: Dense Lissajous sampling and interpolation for dynamic light-transport, *Opt. Express*, Vol. 29, No. 12, pp. 18362–18381 (2021).
- [4] Ng, R., Levoy, M., Brédif, M., Duval, G., Horowitz, M. and Hanrahan, P.: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, Research Report CSTR 2005-02, Stanford university (2005).
- [5] Suhail, M., Esteves, C., Sigal, L. and Makadia, A.: Light Field Neural Rendering (2021).