

# 屈折型リサーチ光学系を用いた リサーチサンプリングによるライトフィールド計測

日垣 輝大<sup>1,a)</sup> 北野 和哉<sup>1</sup> 櫛田 貴弘<sup>2,1</sup> 藤村 友貴<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

## 概要

従来のライトフィールド計測では、マイクロレンズ光学系の制約によってサンプリング数が固定され、部分開口画像を撮像素子に展開するため解像度にも限界がある。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不等間隔な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チの軌跡に沿って部分開口画像を取得する事により、可変かつ、不等間隔な視点位置の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、リサーチ軌跡に沿った視点位置の変化により、本研究の有効性を検証した。

## 1. はじめに

従来のライトフィールドサンプリングでは、円形開口を仮定し、その内部を等間隔な格子状に部分開口サンプリングを行う方法が一般的である。例えば、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。後者の方法は、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、部分開口画像のサンプリング間隔がマイクロレンズアレイによって固定されるためライトフィールドの分解能を変更することが容易ではないことや、一枚の部分開口画像の解像度が低くなる問題がある。

これに対し本論文では、シンプルな光学系で、部分開口画像の開口位置の可変サンプリングを実現するためのライトフィールド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対のウェッジプリズムを用いたレーザー光線の走査手法 [1], [3] より着想を得た部分開口画像の計測手法と、光学系によって生じる部分開口画像間のパ

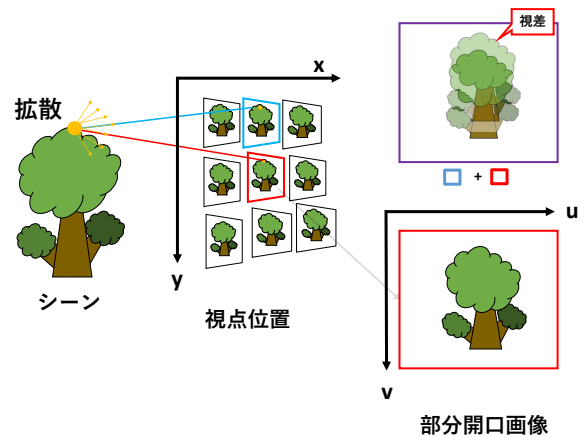


図 1 部分開口画像のデータ構造と座標系

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チ図形の軌跡に沿って部分開口画像を取得し、開口位置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。このリサーチ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円形開口に沿った不等間隔なサンプリングが可能となる。

本稿では、第 26 回 画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2023) で発表した「1対のウェッジプリズムを用いた屈折型リサーチサンプリングによる光線空間計測」[4] を用いて光学系を改良し、リサーチ図形に沿ったシーンのサンプリングをリアルタイムで実現した結果について報告する。

## 2. 屈折型リサーチ光学系によるライトフィールド計測

### 2.1 屈折型リサーチ光学系

本手法では、図 2 のようにカメラに入射する光線を光学

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

<sup>2</sup> 立命館大学

<sup>a)</sup> higaki.akihiko.ha1@is.naist.jp

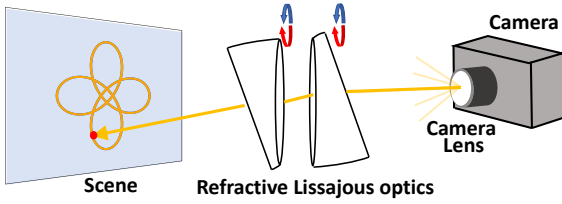
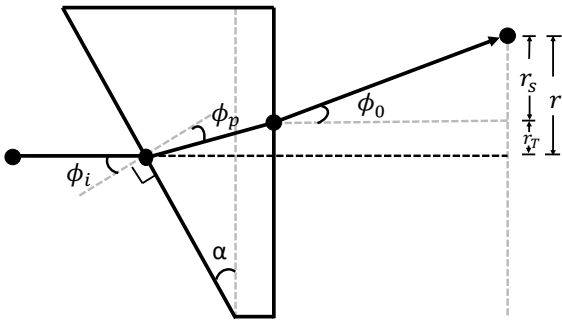
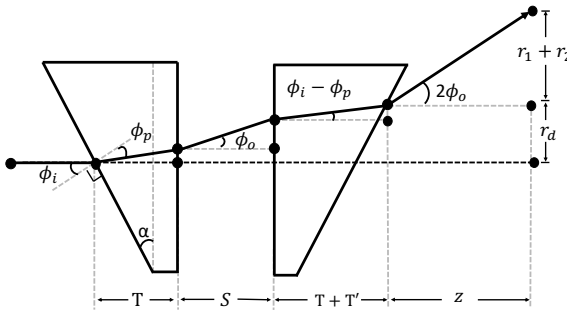


図 2 屈折型リサーチ光学系により光線を屈折させる様子



(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

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、光線空間を計測する。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) のように屈折して出射する。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

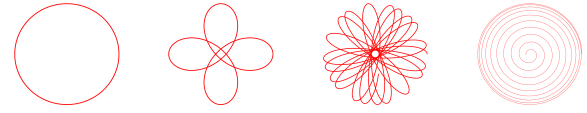
$$r' = r_T + r_S \quad (1)$$

で表される。

さらに、プリズムを光軸中心まわりで回転させると、光線は式 (1) で求まる移動量  $r'$  を半径とした円を描く。観測平面上での光線の位置は、

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

により求まる。ここで、 $\theta_i$  は、 $-2\pi$  から  $2\pi$  の任意の値



(a)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}=1.0$       (b)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}=-3.0$       (c)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}=\sqrt{2}$       (d)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}=0.95$

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チ軌跡の一例

$\theta_i \in \theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}, (i = 1, 2, \dots, N)$  とする。

プリズムが 1 枚の場合、光線は円を描くように変化しますが、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、リサーチ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。1 枚目のプリズムの回転角を  $\theta_1$ , 2 枚目のプリズムの回転角を  $\theta_2$  とする時に、プリズム 1 とプリズム 2 に  $\theta_2 = k\theta_1$  の関係 ( $k \in \mathbb{R}$ ) があるとすると、観測面上での光線の位置は、

$$\begin{cases} y(\theta_1, k\theta_1) = (r_1 + r_d) \sin(\theta_i) + r_2 \sin(k\theta_i) \\ x(\theta_1, k\theta_1) = (r_1 + r_d) \cos(\theta_i) + r_2 \cos(k\theta_i) \end{cases} \quad (3)$$

と表せる。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。式 (3) 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 の回転比  $k$  によって定まる。また、光線の軌跡は  $k$  で決定されるリサーチ図形を描く。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。

$$r_{\max} = (2T + T') \tan(\phi_i - \phi_p) + (2z + S) \tan(\phi_o) \quad (4)$$

2 枚のプリズムの回転比  $k$  を変更した際のリサーチ軌跡を図 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、屈折型リサーチ光学系によって生じるリサーチ図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、このリサーチ図形の軌跡に沿った部分開口画像サンプリングをリサーチサンプリングと呼ぶ。

## 2.2 光学系のキャリブレーション

ウェッジプリズムを通した撮影した画像は、厳密には透視投影モデルに従わなくなる。[2] では、ウェッジプリズムのウェッジ角度  $\alpha$  が 14 度のプリズムを用いて画像を計測した際に、画像の周辺部に歪みが生じることが報告されている。しかし、十分に  $\alpha$  が小さい場合には透視投影モデルで近似することが可能である。以降では、歪みの影響が少ないウェッジプリズムを用いることを仮定し、ウェッジプ

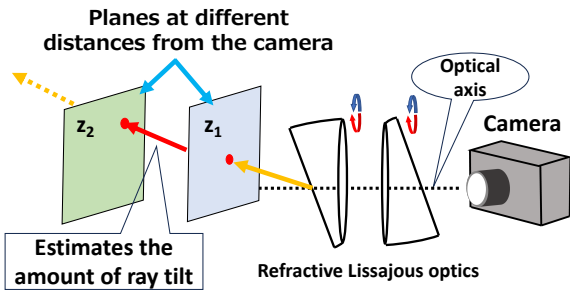


図 5 部分開口画像の開口位置を定めるための光学系のキャリブレーション手法の概念図

リズムを通した撮影した画像をアフィン変換によって部分開口画像に変換するキャリブレーション手法を提案する。

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進移動するとみなせる場合、無限遠点における視差は 0 となる。しかし、実際には、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。ライトフィールドの開口位置を決めるためには、このパン・チルトをキャリブレーションする必要がある。そこで図 5 に示す概念図のように、カメラから異なる距離にある平面に存在する静止物体を、ウェッジプリズムを回転させながら計測する。この時、2 点間を通過する光線のベクトルを用いて光学系によるパン・チルトの量を推定することで、パン・チルトの補正量を得る。

まず、ウェッジプリズムの角度を  $(\theta_1, \theta_2)$  としたとき、取得される部分開口画像中のカメラからの距離  $z_l$  に位置する点の座標  $(u_l, v_l)$  を  $P_l \in \mathbf{P}_l = \{P_{l_1}, \dots, P_{l_N}\}$  と定義する。次に、この位置とは異なる、十分遠い距離  $z_{inf}$  に存在する異なる点の計測を行い、この点の座標を  $P_{inf_i} \in \mathbf{P}_{inf} = \{P_{inf_1}, \dots, P_{inf_N}\}$  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。

$$P_{h_i} = (P_{l_i} - P_{inf_i})d + P_{inf_i} \quad (5)$$

なお、 $d$  は  $z_{inf}$  での値を 0 とした実数値  $d \in \mathbf{D} = \{0, \dots, n\}$  をとる。

### 3. 実環境実験

本手法の有効性を示すために、構築した光学系を用いたシーン計測と、キャリブレーションによる、ある焦点位置における部分開口画像の開口位置の補正を行う。

#### 3.1 光学系の構成

実験で用いた光学系を図 6 に示す。カメラはカラーカメラ (FLIR BFS-U3-04S2C-CS) を、レンズは焦点距離 16 mm の C マウントレンズ (Fujifilm HF16XA-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 35 mm である。プリズムを回転させ

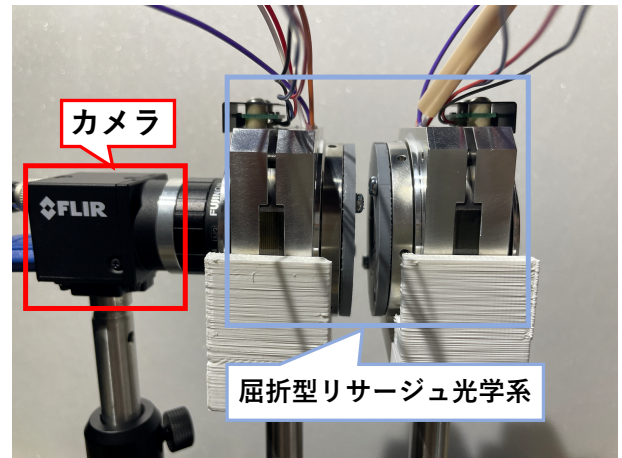


図 6 実環境実験で用いた光学系

るための中空モータは旭エンジニアリング製のステッピングモータ HSM-6017(V/H) を用いた。モータを回転させるための PWM 信号は RaspberryPi4 を用いて、GPIO からモータに入力した。この時、カメラによって取得される画像の計測タイミングを、モータの PWM 信号に同期させることにより、モータの角度  $(\theta_i)$  と、画像が取得されたタイミングをペアで保存することができる。

#### 3.2 事前キャリブレーション

パン・チルトを補正するためのキャリブレーションデータを、前節で述べたモータの角度と、それに対応する画像のペアを取得することで作成する。プリズムを回転比  $k = -2$  で回転させながら、シーン中のカメラからの距離  $z_l$  の距離に存在する静止した輝点を計測した結果を図 7 に示す。点の数は 490 個あり、本稿の光学系では、10 秒で取得することができる。この点群は、プリズムの回転によって生じるパン・チルトによる画像中心の変化を表している。したがって、この点群の重心と各点の差分を計算し、各点に対応するシーンの画像を求めた  $xy$  方向の平行移動量に基づいて補正することで、カメラからの距離  $z_l$  に位置する部分開口画像の開口位置を補正することができる。

#### 3.3 リアルタイム処理

リサージュ光学系を用いて、プリズムを回転させたときに取得された画像を図 8 に示す。前節で述べたように、開口位置を事前に取得することで、リアルタイムでのライトフィールド計測が可能となる。

### 4. 結論

本稿では、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を実現するシステムの構築を行い、実験を通してライトフィールド計測が可能であることを示した。

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。

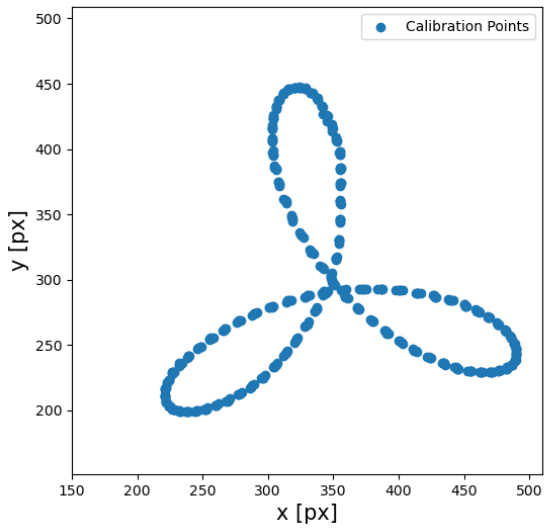


図 7  $z_l$  におけるライトフィールドの開口位置

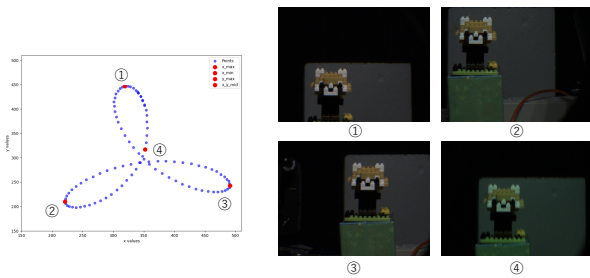


図 8  $z_l$  における開口位置と対応する画像

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] Huang, F., Ren, H., Wu, X. and Wang, P.: Flexible foveated imaging using a single Risley-prism imaging system, *Opt. Express*, Vol. 29, No. 24, pp. 40072–40090 (2021).
- [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] 日垣 輝大 北野 和哉 櫛田 貴弘 藤村 友貴 船富 卓哉 向川 康博: 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, MIRU 画像の理解・認識シンポジウム (2023).