

リズレープリズム光学系の連続走査による イベントベース光線空間計測

藤枝 直輝¹ 日垣 輝大¹ 北野 和哉^{1,a)} 船富 卓哉² 藤村 友貴¹ 向川 康博¹

概要

リズレープリズム光学系とイベントカメラを組み合わせた光線空間計測手法を提案する。プリズムの連続回転により生じる視差をイベントとして観測し、疎なイベント列から高密度な部分開口画像群を再構成する。イベント頻度に基づく適応的な時間窓分割を導入する事で再構成品質を向上させる。実環境実験より、連続走査による密な部分開口画像の推定を通じて有効性を示し、従来手法より短時間かつ低容量での光線空間取得を実現した。

1. はじめに

光線空間の取得は、リフォーカスや全焦点画像の合成を可能にする技術として、コンピュータショナルフォトグラフィ分野において重要である。従来、カメラアレイやマイクロレンズアレイを用いた手法が主流であったが、装置の大型化や、空間解像度と角度解像度のトレードオフといった課題が存在する。これらの解決策として、Higaki ら [4] は、カメラのレンズ前方に回転する一対のウェッジプリズムを用いたリズレープリズム光学系を配置し、光学的に光線を偏向させて仮想的に視点を移動させる手法を提案した。この手法はエピトロコイド曲線に沿った非一様サンプリングにより、部分開口画像のサンプリングによって生じる等間隔なエイリアシングを抑制できる利点を持つ。しかし、フレームベースカメラを用いる従来手法では、露光時間中の視点移動によるモーションブラーを避けることが難しい。そのため、鮮明な部分開口画像を得るためにはプリズムの回転を停止させる、あるいは低速で回転させる必要があり、取得可能な視点数や計測時間に制約が生じる。特に、リズレープリズム光学系の利点である連続的な視点走査を十分に活用できない課題がある。

本研究では、リズレープリズム光学系の連続走査とイベントカメラを統合し、連続的な視点変化を部分開口サンプリングとして取得するイベントベースの光線空間計測手法

を提案する。イベントカメラの高い時間分解能を活用することで、従来のフレームベース手法で問題となる露光中の視点移動やフレームレートの制約を解決し、プリズムの連続回転に伴う視点変化による見えの変化を計測する。疎なイベント列から高密度な部分開口画像群を再構成することで、短時間で低データ量の光線空間取得を実現した。従来手法と同等枚数の部分開口画像を再構成する場合、1/1200 の計測時間かつ 1/8 のデータ量で実現した。

本研究の貢献は以下の通りである。

- リズレープリズム光学系とイベントカメラを組み合わせ、連続走査による光線空間計測手法を提案した。
- 疎なイベント列から高密度な部分開口画像群を再構成することで、従来のフレームベース法に比べて短時間かつ低データ量の光線空間計測を可能にした。

2. 関連研究

2.1 時分割多重化手法による光線空間計測

これまでに、カメラ自体を物理的に移動させる方法 [12] や符号化開口による方法 [6]、フォーカスタックから光線空間を再構成する方法 [7] が提案された。これらの手法は、一般的に視点の等間隔サンプリングに基づいている。そのため、サンプリングの周期性に起因する折り返し成分が特定の周波数に集中する問題を避けるためには、部分開口画像を密に取得する必要がある。また、機械的な走査が必要であるため、計測時間が長い点も課題である。

一方、新しい手法としてリズレープリズム光学系用いた手法がある。Higaki ら [4] は、回転する一対のウェッジプリズムをカメラ前方に配置し、光線を屈折させることで仮想的に視点を移動させる手法を提案した。リズレープリズムは、光軸を高速かつ精密に制御できるため、LiDAR のスキャン機構 [13] や単眼カメラを用いた 3 次元計測システム [5] として広く応用されている。この手法は、エピトロコイド曲線に沿った部分開口画像をサンプリングするため、サンプリングによる折り返し成分が特定の周波数に偏らない利点がある。しかしながら、フレームベースカメラの制約により、250 枚の部分開口画像群を取得するために約 20 分を要するため、計測時間において課題がある。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 京都大学

^{a)} kitnao.kazuya@is.naist.jp

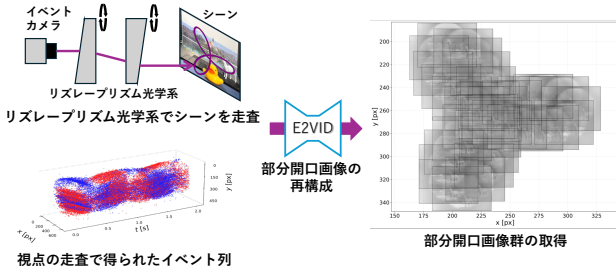
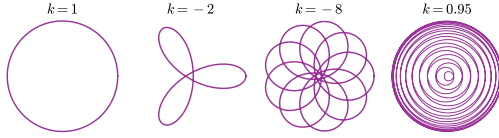


図 1: 提案手法の概要


 図 2: 異なる回転速度比 k におけるエピトロコイド軌跡

2.2 イベントカメラの原理と高速撮像への応用

高速な被写体の撮影が可能なカメラとして、イベントカメラが注目されている。このカメラは、マイクロ秒単位の高い時間分解能を持ち、すべての画素が非同期で動作するため、高速な被写体に対する撮影に最適である [1]。

さらに、イベントカメラの特性を生かした光線空間計測手法もいくつか提案されている。Habuchi ら [2] は、符号化開口とイベントカメラを組み合わせ、単一露光時間内における符号化パターンの変化をイベントとして取得することで、高速に光線空間を推定する手法を提案している。また、Qu ら [10] は万華鏡やガルバノミラーと組み合わせた方法でそれぞれ空間分割もしくは時分割による光線空間計測手法を提案した。しかし、部分開口内の走査は円形で評価しており、部分開口のサンプリングや部分開口画像の連続的な復元などについては議論されていない。

3. 提案手法

本研究では、図 1 に示すように、リズレープリズム光学系によって開口を走査し、イベントカメラを用いて連続的な視点移動に伴う部分開口画像の輝度変化を観測する。得られたイベント列を用いて機械学習により部分開口画像群を再構成することで光線空間の計測を実現する。

3.1 光学系の走査とイベントカメラによる部分開口の観測

リズレープリズム光学系は、ウェッジプリズムを 2 枚配置した構成である。2 つのプリズムをそれぞれ異なる速度で等速に回転させると、偏向される光線の軌跡はエピトロコイド曲線を描く。プリズムの回転比によって、偏向された光線の軌跡は多様な幾何学形状をとる。図 2 に、様々なプリズムの回転比における軌跡の様子の一例を示す。

エピトロコイド曲線上にある部分開口の座標を $\mathbf{u}(t) = (u(t), v(t))$ 、部分開口内の座標を $\mathbf{x} = (x, y)$ 、パン・チルトによる画像座標内での変位を $d\mathbf{x}(t) = (dx(t), dy(t))$ と置く

と、4 次元光線空間を $L(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ で表現すると、時刻 t_i における観測輝度は以下の通りである。

$$I(\mathbf{x}, t_i) = L(\mathbf{u}(t_i), \mathbf{x} + d\mathbf{x}(t_i)) \quad (1)$$

なお、 $\mathbf{x} + d\mathbf{x}(t)$ はキャリブレーション後の部分開口画像群で同一の画素に一致する。本手法では、Higaki ら [4] が用いる、パン・チルトを透視投影モデルと仮想的なカメラの並進移動とみなす手法によって、各部分開口間の並進ずれ量 $d\mathbf{x}(t_i)$ を補正する。詳細は補助資料に記載する。

ここで、イベントカメラは対数輝度 $I_L(t_i) = \log(I(\mathbf{x}, t_i))$ の変化量 $\Delta_t I_L(t_i)$ がしきい値 $C > 0$ に達した時にイベントを出力する。ある時刻 t_i における i 番目のイベント発火 p_i の関係は以下のとおりである [1]。

$$\Delta_t I_L(t_i) = I_L(t_i) - I_L(t_{i-1}), \quad (2)$$

$$|\Delta_t I_L(t_i)| \geq C, \quad p_i = \text{sgn}(\Delta_t I_L(t_i))$$

ここで、 t_{i-1} は直前にイベントが発火した時刻、 $\text{sgn}()$ は符号関数とする。発火するイベントの極性は、時刻 t_i における部分開口画像の対数輝度差分の符号に対応する。

3.2 イベント発生頻度に基づく適応的な時間窓分割

本手法では、あるエピトロコイド軌跡上の部分開口位置の前後で発生した区間のイベント群を用いて部分開口画像を再構成する。しかし、エピトロコイド軌跡による走査は、視点の走査速度が周期的に変動する。そのため、取得したイベント列を一定時間で分割して画像再構成を行うと、走査速度が速い区間では再構成画像にモーションブラーが生じ、遅い区間では再構成品質が低下する。また、イベント数ごとに区切ってサンプリングすると、エピトロコイド軌跡上でサンプリングされる部分開口にばらつきが生じる。そこで、走査速度に応じて時間窓サイズを動的に変更する適応的なサンプリングを行う。光線の走査速度ノルムを $\|d\mathbf{u}(t)/dt\|$ とし、ある区間 j における時間窓を時刻 t_j から t_{j+1} とすると、サンプリングする区間は以下の条件を満たすように決定する。

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} \|d\mathbf{u}(t)/dt\| dt = D_{th} \quad (3)$$

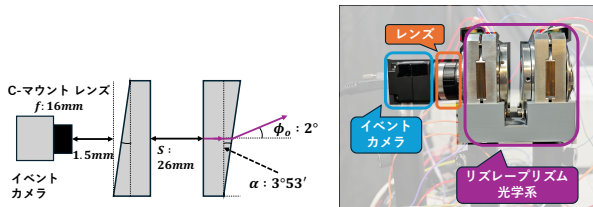
ここで、 D_{th} は 1 つの時間窓として扱うべき移動量を示すしきい値である。この処理により、走査速度が速い区間では時間窓 $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ を短く、遅い区間では長く設定することで、時間窓内の視点移動量を一定に保つ。これにより、プリズムの回転に伴う速度変動の影響を相殺し、軌跡全域にわたって均質かつモーションブラーの少ない再構成画像を取得することを可能とする。

3.3 イベント列を用いた部分開口画像群の再構成

計測されたイベントストリームは疎な時系列データであ

表 1: 実験に使用した機材の仕様

機材	型番	メーカー	仕様
イベントカメラ	SilkyEvCam (VGA)	CenturyArks	640 × 480 px
レンズ	HF16HA-1B	Fujifilm	焦点距離: 16 mm
ウェッジプリズム	PS810	Thorlabs	偏角: 2°
モータ	HSM-6017	旭エンジニアリング	-
LED 電球	LDR5DWE17RF5	Panasonic	-


 (a) 光学系のパラメータ (b) 構築した光学系
図 3: 実環境実験で用いた光学系

るため、そのままではリフォーカス等の処理に適用することが困難である。そこで本研究では、イベント列から輝度画像を再構成する深層学習モデルである E2VID [11] を用いる。E2VID は、時間窓内のイベント列を入力とし、再帰型ニューラルネットワーク (RNN) を用いて輝度画像を再構成する手法である。本研究では、あるエピトロコイド軌跡上の部分開口位置の前後で発生したイベント群を E2VID に入力することで、その視点位置における部分開口画像を再構成する。これにより、フレームレートの制約を受けずに高密度な部分開口画像群を取得することが可能となる。また、本手法では、E2VID の RNN の初期値を安定させる目的で、時系列反転パディングを導入する。具体的には、取得したイベント列に対し、時間軸方向に対して反転させたイベント列を生成し、これを元のデータの先頭に結合することで入力シーケンスを拡張する。

4. 実環境実験

光学系の構成: 実験で使用した機材を表 1 に、構築した光学系の構成を図 3 に示す。撮像素子はイベントカメラを使用し、レンズの前方には、偏角 2 度の 2 枚のウェッジプリズムを配置した。各プリズムはモータに固定されており、独立した速度での連続回転が可能である。2 枚のプリズム間の距離 S は 26 mm に設定した。

シーンの配置: 提案手法によるリフォーカス性能を検証するため、カメラから異なる距離に複数の被写体を配置したシーンを構築した。実験環境の様子および被写体の配置関係を図 4 に示す。被写体には、イベントカメラがエッジを検出しやすいように、テクスチャがある物体を選定した。これらをレンズの先端から光軸方向に沿って、それぞれ手前 ($z \approx 0.5$ m) および奥 ($z \approx 1.55$ m) の位置とその間に配置した。照明条件については、低フリッカーな LED 電球を使用して実験を行った。また、パン・チルト補正のキャリブレーションについては、Higaki らの手法 [4] を用いた。

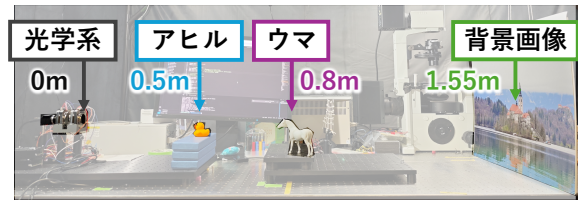


図 4: 実環境実験におけるシーンと被写体の配置

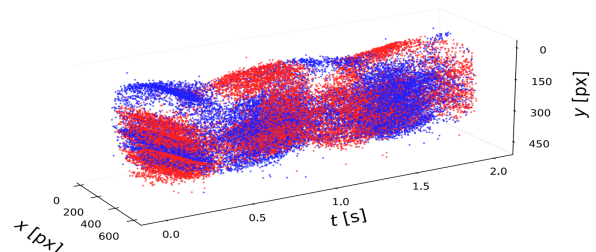
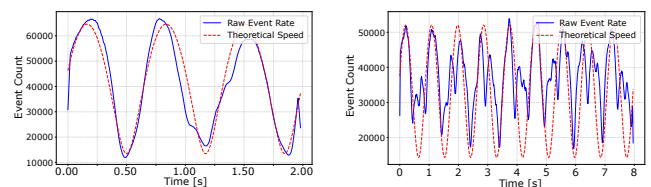

 図 5: 光学系の走査によって取得されたイベント列 ($k = -2$)

 (a) 回転速度比: $k = -2$ (b) 回転速度比: $k = -8$

図 6: イベント発生頻度と理論速度モデルの同期結果

4.1 適応的な時間窓分割による画像再構成品質の評価

本節では、適応的な時間窓分割による再構成品質の改善効果について検証する。取得したイベント列を図 5 に示す。図は $k = -2$ で走査した際の観測であり、イベントが時空間的に螺旋状の軌跡として発生していることが確認できる。このイベント列に対し、時系列反転パディングおよび適応的な時間窓分割を適用した。理想的には、回転速度比より求められる走査の速度ノルム $\|du(t)/dt\|$ に基づき時間窓を決定できるが、実環境ではモータの個体差によって理論値と実測値に時間差が生じる。そこで、回転速度比を既知として理論運動モデルを定め、イベント数の時間変化と理論速度波形との相関が最大となるように、入射側プリズムの回転数、時間差、プリズム同士の回転の位相差を推定した。図 6 に、回転速度比 $k = -2$ および $k = -8$ におけるフィッティング結果を示す。青線は実測イベント数、赤破線は推定されたパラメータを用いて計算した速度波形である。両条件においてイベント列と理論値の位相が同期されている様子が分かる。実際に取得したイベント列から再構成した部分開口画像群の例 ($k = -8$) を図 7 に示す。図は視点軌跡とその代表的な 4 視点における再構成結果を示している。光学系構成の都合で再構成画像にケラレが生じている。各視点間で手前物体と背景に視差が確認でき、部分開口画像が適切に再構成されていることがわかる。

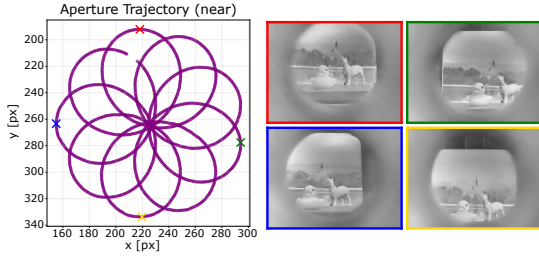


図 7: 計測した視点軌跡と再構成した部分開口画像群

再構成品質を評価するため、固定時間窓 (Fixed) と提案手法 (Variable) を比較した。再構成される部分開口画像の位置がそれぞれ異なるため、評価指標として Laplacian Variance [9]、Mean Gradient Magnitude (MGM) [3]、NIQE [8] を用いた。図 8 に評価結果を示す。Laplacian Variance と MGM は値が高いほどよい指標で、NIQE は値が低いほどよい指標である。 $k = -2$ および $k = -8$ の両条件において、提案手法は Fixed と比較して Laplacian Variance および MGM が向上し、モーションブラーの低減と再構成品質の改善が確認された。また NIQE においても改善が見られ、視覚的にも自然な画像が得られた。

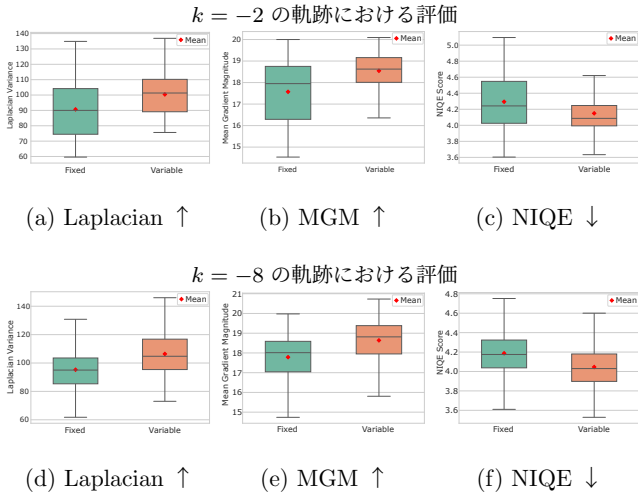


図 8: 再構成画像の定量評価

4.2 サンプルパターンごとのリフォーカス結果

本節では、再構成された部分開口画像が光線空間として機能していることを示すためにリフォーカスを行った。エピトロコイド軌跡は、疎なサンプリングとして $k = -2$ 、密なサンプリングとして $k = -8$ を用いた。

図 9 に部分開口画像群のサンプリング軌跡とリフォーカス結果を示す。リフォーカス処理には、Higaki らの手法 [4] を用いた。再構成した部分開口画像の視点数は $k = -2$ の軌跡で 516 視点、 $k = -8$ の軌跡で 1985 視点である。図 9 (a),(d) のグラフ中にある点群が再構成された部分開口画像の中心座標に対応する。視差 $d = 0.0$ では背景、 $d = 1.0$ では手前に配置されたアヒルに焦点が合っており、

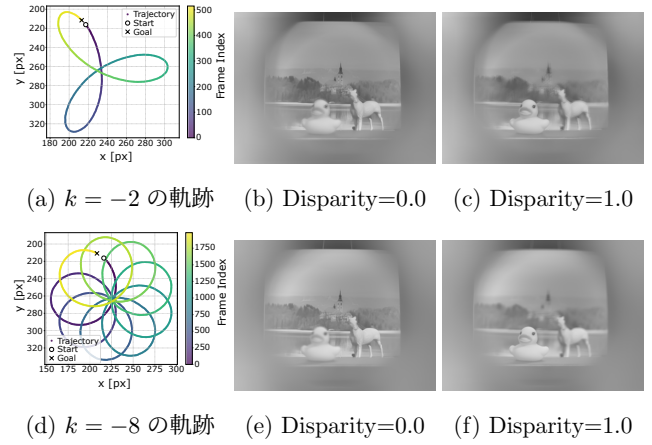


図 9: 各サンプリング軌跡によるリフォーカス結果

表 2: 撮影時間とデータ量の比較

手法	視点数	計測時間	画素数	画素当たり容量
従来手法 [4]	250	約 20 分	388,800	8 bit
提案手法	500	約 2 秒	307,200	0.72 bit

取得した部分開口画像群からリフォーカスが可能であることが確認できる。

4.3 撮影時間とデータ量の比較

撮影時間とデータ量を従来手法 [4] と比較した結果を表 2 に示す。データ量については記載がないため、モノクロ 8 ビット画像を 250 視点撮影した場合データ量を記載する。また、従来手法と提案手法で撮像素子の解像度が一致しないため、一つの部分開口画像における画素当たりのデータ量が正規化した。実験環境は、静的なシーンであるため、視差による輝度変化はエッジ付近のみに生じることから、輝度変化のみを捉えるイベントカメラの特性上、データ量が小さくなったと考えられる。光学系構成の都合によりケラレが生じているが、この領域は最大でも 50 % 以下であるため、それを加味したとしても容量比で 4 倍の差がある。

5. まとめ

本研究では、リズレープリズム光学系による連続走査とイベントカメラを組み合わせた光線空間計測手法を提案した。また、イベント列を適応的に分割し、部分開口画像を再構成することで、モーションブラーの発生を抑制し、エピトロコイド軌跡上に等間隔な部分開口画像サンプリングを実現した。実環境実験より、リフォーカス処理を通じて再構成した部分開口画像群が光線空間計測として成立していることを示した。さらに、従来手法と比較して短時間の計測かつ少ないデータ量で光線空間計測を実現した。今後の課題としては、イベント列から光線空間を直接推定する手法への拡張や、パン・チルトを考慮した光線空間計測モデルの導入が挙げられる。

参考文献

- [1] Gallego, G., Delbrück, T., Orchard, G., Bartolozzi, C., Taba, B., Censi, A., Leutenegger, S., Davison, A. J., Conradt, J., Daniilidis, K. et al.: Event-based vision: A survey, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 44, No. 1, pp. 154–180 (2020).
- [2] Habuchi, S., Takahashi, K., Tsutake, C., Fujii, T. and Nagahara, H.: Time-efficient light-field acquisition using coded aperture and events, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 24923–24933 (2024).
- [3] Herrmann, C., Bowen, R., Wadhwa, N., Garg, R., He, Q., Barron, J. and Zabih, R.: Learning to Autofocus, pp. 2227–2236 (2020).
- [4] Higaki, A., Kitano, K., Fujimura, Y., Kushida, T., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: Refractive epitrochoids sampling for light field measurement using wedge prisms, *Opt. Express*, Vol. 33, No. 2, pp. 2604–2619 (2025).
- [5] Li, A. and Zhong, S.: Calibration method of Risley-prism imaging system, *Optics Communications*, Vol. 459, p. 124975 (2020).
- [6] Liang, C.-K., Lin, T.-H., Wong, B.-Y., Liu, C. and Chen, H. H.: Programmable aperture photography: Multiplexed light field acquisition, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 27, No. 3, pp. 1–10 (2008).
- [7] Liu, C., Qiu, J. and Jiang, M.: Light field reconstruction from projection modeling of focal stack, *Optics Express*, Vol. 25, No. 10, pp. 11377–11388 (2017).
- [8] Mittal, A., Soundararajan, R. and Bovik, A. C.: Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 20, No. 3, pp. 209–212 (2013).
- [9] Pech Pacheco, J. L., Cristobal, G., Chamorro-Martinez, J. and Fernandez-Valdivia, J.: Diatom autofocusing in brightfield microscopy: A comparative study, Vol. 3, pp. 314–317 vol.3 (2000).
- [10] Qu, Z., Zou, Z., Boominathan, V., Chakravarthula, P. and Pediredla, A.: Event Fields: Capturing Light Fields at High Speed, Resolution, and Dynamic Range, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 26910–26920 (2025).
- [11] Rebecq, H., Ranftl, R., Koltun, V. and Scaramuzza, D.: High Speed and High Dynamic Range Video with an Event Camera (2019).
- [12] Unger, J., Wenger, A., Hawkins, T., Gardner, A. and Debevec, P.: Capturing and rendering with incident light fields, *Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering*, EGRW '03, Goslar, DEU, Eurographics Association, p. 141–149 (2003).
- [13] Vuthea, C. and Toshiyoshi, H.: A design of Risley scanner for LiDAR applications, *2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, IEEE, pp. 1–2 (2018).