

# 物理ベース微分可能レンダリングによる Time-of-Flight カメラの計測誤差の低減

榎田 貴弘<sup>1,2,a)</sup> 藤村 友貴<sup>2,b)</sup> 船富 卓哉<sup>2,c)</sup> 向川 康博<sup>2,d)</sup>

## 概要

Time-of-Flight カメラによる距離計測は、相互反射の影響により誤差が生じることが知られている。本研究では、物理ベースの微分可能レンダリングを用いた計測誤差の低減手法を提案する。物理ベースの微分可能レンダラを Time-of-Flight カメラの観測画像を生成できるよう拡張し、最適化により形状の推定を行う。合成データを用いた実験により、提案手法の有効性を検証した。

## 1. はじめに

Time-of-Flight (ToF) カメラ計測対象に照射した光の飛行時間から対象までの距離を計測するカメラであり、スマートフォンにも搭載されているほか、ロボットの外界センシングなど様々な場面で活用されている。ToF カメラは小型で高速に計測できるという利点がある一方で、相互反射の影響により計測に誤差が生じてしまうことが知られている [5]。この問題は Multi-path interference (MPI) として知られており、これまでに構造化照明法と組み合わせる手法や複数の周波数を用いる手法、深層学習による補正など様々な手法が提案されてきた [8]。

本研究では、光学現象を正確に表現可能な物理ベースの微分可能レンダリングを用いた MPI の低減手法を提案する。物理ベースレンダリングは CG 分野でフォトリアルな画像の生成に活用されてきた手法である。近年、この物理ベースレンダリングを自動微分を用いて勾配を計算できるようにすることで、シーン解析に活用する研究が行われている [2], [6], [7]。本研究では、物理ベースの微分可能レンダリングを ToF カメラの計測を表現できるよう拡張し、相互反射を物理ベースでシミュレートする。シミュレートした画像と観測画像の誤差を最小化する最適化問題を解くことにより、ToF カメラの計測誤差の低減を試みる。

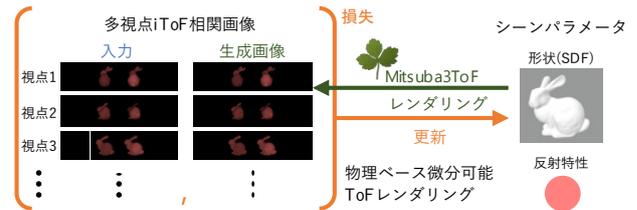


図 1 本研究の概要

微分可能レンダリングの入力として ToF カメラの画像を用いる研究はいくつか行われている [1] が、シーンを Radiance Fields として表現し、レイトレーシングによるボリュームレンダリングに基づいてレンダリングしているため、相互反射のような複雑な光学現象を扱うことができない。本研究は物理モデルに基づいて光学現象を正確に表現できる物理ベースレンダリングによる微分可能レンダリングを活用するため、相互反射に起因するような MPI の解析により適していると考えられる。

## 2. 物理ベース微分可能レンダリング

物理ベースレンダリングは、光の物理的な伝播を物理モデルに基づいて計算することで、フォトリアルな画像を生成する手法であり、次のレンダリング方程式を解くことでカメラでの観測画像を生成する。

$$I_j(\pi) = \int_{\mathcal{P}} f_j(x, \pi) dx \quad (1)$$

ここで  $j$  は画素のインデックス、 $\mathcal{P}$  は光の経路空間、 $x$  は光の経路、 $\pi$  は形状や反射特性等のシーンパラメータのベクトル、 $f_j$  は各経路が画素  $I_j$  への寄与を評価する関数であり、モンテカルロ法によるレイトレーシングで解くことが一般的である。

逆に、観測画像  $I_{\text{ref}}$  とレンダリングした画像  $I(\pi)$  の誤差を最小化する問題を解くことで、画像からシーン中のパラメータを推定できる。

$$\hat{\pi} = \underset{\pi}{\operatorname{argmin}} g(I(\pi), I_{\text{ref}}) \quad (2)$$

ここで、 $g$  は画像間の類似度を計算する関数である。この最適化問題は一般的に勾配法等のアルゴリズムにより解く

<sup>1</sup> 立命館大学

<sup>2</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

a) tkushida@fc.ritsumei.ac.jp

b) fujimura.yuki@is.naist.jp

c) funatomi@is.naist.jp

d) mukaigawa@is.naist.jp

ことができるが、この勾配を求める際にレンダリング方程式のシーンパラメータ  $\pi$  についての微分  $\partial_{\pi} I_j(\pi)$  が必要となる。物理ベース微分可能レンダリングは自動微分によってこの微分を与える手法であり、最近の研究 [2], [6], [7] により形状や反射特性の推定に利用できることが示されている。

### 3. 提案手法

本研究では、物理ベース微分可能レンダリングを用いて ToF カメラの距離計測誤差を低減する。図 1 に示すように、複数視点からの ToF カメラの相関画像を入力とし、微分可能レンダラを用いてレンダリングした画像との誤差が小さくなるよう形状の最適化を行う。

ただし、従来の物理ベース微分可能レンダリングは一般的なカメラで撮影した画像の生成を目的としているため、ToF カメラのような光の飛行時間に基づく現象を再現できない。このような現象の再現は、レンダリングの際に光が伝播した軌跡の長さである経路長を同時に記録することで実現することが可能であり、これまでに [3] や [4] 等の研究が行われている。しかし、これらの研究は画像の生成のみを目的としているため、勾配計算に必要な微分を得ることはできない。そこで本研究では、従来の物理ベースの微分可能レンダリング [2] を経路長を記録できるよう拡張することで、ToF カメラの相関画像をレンダリング可能な物理ベースの微分可能 ToF レンダラを開発する。

#### 3.1 ToF カメラの画像生成モデル

ToF カメラは、計測対象に照射した光が反射して返ってくるまでの時間を計測することで、対象までの距離を計測する。連続波変調間接 ToF 方式の ToF カメラは、正弦波に変調した光を照射し、その反射光との相互相関から飛行時間を位相として計測する。観測される波形の位相と振幅をそれぞれ  $\phi, a$ 、角速度を  $\omega$  とすると、カメラで観測される反射光  $r$  は次式で表される。

$$r(t) = a(1 + \cos(\omega t - \phi)) \quad (3)$$

ToF カメラはこの反射光と復調信号  $s$  との相互相関を計算することで相関画像を得る。

$$\begin{aligned} s(t) &= \cos(\omega t), \\ C(\tau) &= r(t) \otimes s(t) \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} r(t)s(t+\tau) dt \\ &= a \cos(\phi + \omega\tau). \end{aligned} \quad (4)$$

相関画像から振幅と位相を復元するために、ToF カメラは復調信号の位相  $\omega\tau$  を  $\pi/2$  ずつ変化させた 4 枚の画像を用いる。

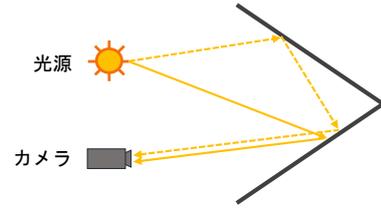


図 2 Multi-path interference(MPI)

$$\begin{aligned} C(\tau_0) &= a \cos(\phi), \\ C(\tau_{\frac{\pi}{2}}) &= a \sin(\phi), \\ C(\tau_{\pi}) &= -a \cos(\phi), \\ C(\tau_{\frac{3}{2}\pi}) &= -a \sin(\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

これら 4 枚の観測画像から次式により位相  $\phi$  と振幅  $a$  を得る。

$$\phi = \arctan \left( \frac{C(\tau_{\frac{3}{2}\pi}) - C(\tau_{\frac{\pi}{2}})}{C(\tau_0) - C(\tau_{\pi})} \right), \quad (7)$$

$$a = \sqrt{(C(\tau_{\frac{3}{2}\pi}) - C(\tau_{\frac{\pi}{2}}))^2 + (C(\tau_0) - C(\tau_{\pi}))^2} \quad (8)$$

計測対象までの距離  $d$  は、得られた位相  $\phi$  と光速  $c$  から次式で計算できる。

$$d = \frac{c\phi}{2\omega} \quad (9)$$

しかし、図 2 に示すような凹んだ形状を ToF カメラで観測すると、実線で示す直接反射光のほかに、点線で示す相互反射光も同時に観測される。このとき、ToF カメラで観測される相関画像は複数の経路を通る位相の異なる反射光の総和となるため、このような観測から式 (7)、式 (9) により位相と距離を計算すると、誤った距離が計測されてしまう。以上が MPI により計測誤差が生じる原因である。本研究では、物理ベース微分可能レンダリングを用いることで複数の経路を通る光の影響を考慮して相関画像をレンダリングし、最適化により形状を求めることで MPI による計測誤差を低減する。

ToF カメラの相関画像を物理ベースレンダラでレンダリングするには、光の飛行時間に基づく位相  $\phi$  が必要となる。ここで、式 (9) 光の飛行距離  $2d$  は式 (1) における光の経路の経路長  $\|x\|$  と一致する。よって位相  $\phi$  は式 (1) における経路長  $\|x\|$  を用いて次式により計算できる。

$$\phi(x) = \frac{\omega\|x\|}{c}. \quad (10)$$

よって ToF カメラの相関画像は、式 (1) と式 (6) を用いて次式により計算できる。

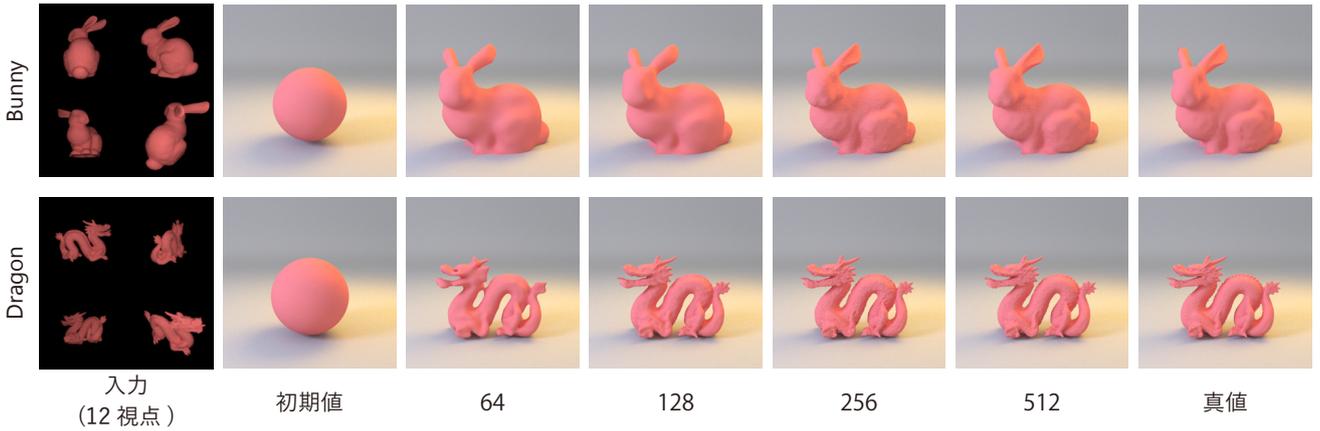


図 3 実験結果

$$\begin{aligned}
 C_j(\pi, \tau_0) &= \int_{\mathcal{P}} f_j(x, \pi) \cos(\phi(x)) dx, \\
 C_j(\pi, \tau_{\frac{\pi}{2}}) &= \int_{\mathcal{P}} f_j(x, \pi) \sin(\phi(x)) dx, \\
 C_j(\pi, \tau_{\pi}) &= \int_{\mathcal{P}} -f_j(x, \pi) \cos(\phi(x)) dx, \\
 C_j(\pi, \tau_{\frac{3}{2}\pi}) &= \int_{\mathcal{P}} -f_j(x, \pi) \sin(\phi(x)) dx \quad (11)
 \end{aligned}$$

式 (11) の勾配は従来手法 [2] と同様に自動微分により計算できる。

### 3.2 最適化による形状の推定

形状の推定には [7] を用いる。形状の表現には Signed Distance Function(SDF) を使用し、観測画像とレンダリングした画像の誤差を最小化する最適化問題を解くことで形状を推定する。ここで、推定するシーンパラメータ  $\pi$  は SDF を格納した 3 次元のボクセルの値であり、反射特性のパラメータは既知とする。ただし、単一の観測では局所解が存在するため、本研究では複数視点からの観測を入力する。異なる視点から観測では MPI の影響による計測誤差も異なるため、複数の視点からの観測を用いることで正しい形状が推定できることが期待される。よって入力に用いる視点数を  $N$  とすると、形状の推定は次式の最適化問題として定式化される。

$$\hat{\pi} = \operatorname{argmin}_{\pi} \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^3 \left| C^i(\pi, \tau_{\frac{k}{2}\pi}) - C_{\text{ref}}^i(\tau_{\frac{k}{2}\pi}) \right| \quad (12)$$

## 4. 実験

実装では物理ベース微分可能レンダリングを用いたシーンパラメータの推定手法である [7] を元に、式 (11) を用いて ToF カメラの関連画像を出力できるよう拡張した。最適化には [2] に実装されている Adam を用いた。入力画像の生成には開発したレンダラを用いた。最適化の反復回数は 512 回、SDF を格納するボクセルの解像度は  $128 \times 128 \times 128$ ,

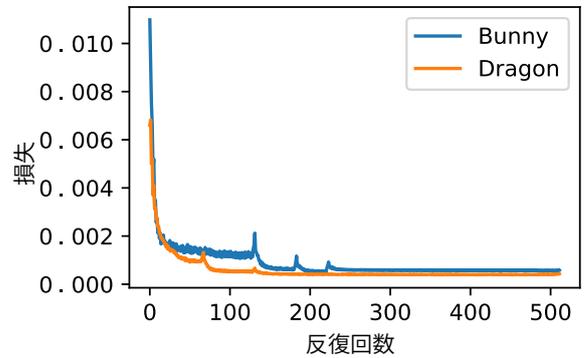


図 4 反復毎の損失の変化

入力画像の解像度は  $256 \times 256$  とした。形状の初期値として球を用いた。ToF カメラの光源には点光源を使用し、カメラと同じ位置に配置した。推定対象のシーンとして、Bunny, Dragon の 2 つのモデルを用いた。

図 3 に推定結果を示す。左から入力画像、初期値、各反復回数ごとの推定形状 (64, 128, 256, 512), 真値を示している。入力画像は各視点の相関画像を用いているが、ここでは見やすさのため振幅画像を示している。実験結果から、反復ごとに真値の形状に近づいていることがわかる。また、最適化時の反復毎の損失を図 4 に示す。反復毎に損失も低下しており、正しく推定できていることがわかる。

図 5 に、入力と異なる新規視点からレンダリングした結果と真値との誤差マップを示す。従来手法として MPI の影響を受けた距離計測結果を示している。結果から、提案手法により MPI の誤差が小さくなっていることがわかる。特に MPI の影響を受けやすい凹んだ部分の誤差が提案手法では大きく改善されている。一方で、物体の境界付近では提案手法の誤差が大きくなっていることがわかる。これは境界付近は形状が少しずれるだけで背景との差を計算してしまうため、誤差が大きくなってしまふことが原因であると考えられる。

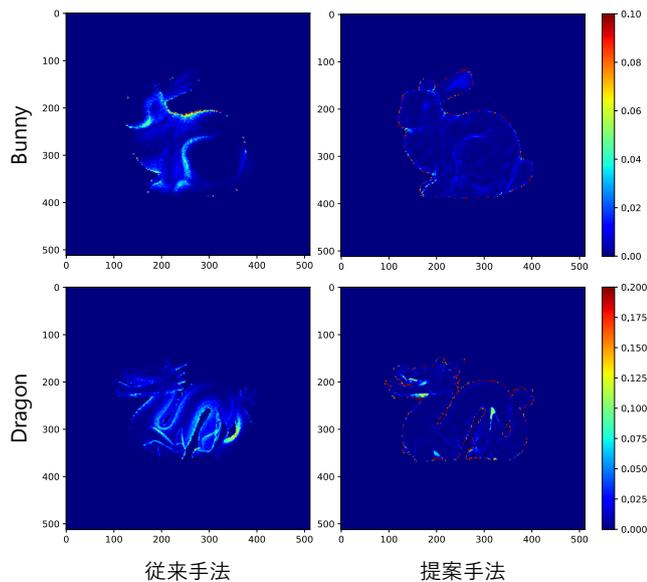


図 5 誤差マップ

## 5. おわりに

本研究では、物理ベース微分可能レンダリングによる ToF カメラの相互反射による計測誤差の低減手法を提案した。従来の物理ベースの微分可能レンダリングを ToF カメラの相関画像をレンダリングできるよう拡張し、最適化により形状を推定した。合成データを用いた実験により、提案手法を用いて距離の計測誤差を低減できることを示した。今後は実測データへの適用に向けたキャリブレーション方法の検討を進める予定である。

**謝辞** 本研究の一部は、JST CREST JPMJCR1764 からの支援を受けた。

## 参考文献

- [1] Attal, B., Laidlaw, E., Gokaslan, A., Kim, C., Richardt, C., Tompkin, J. and O’Toole, M.: TöRF: Time-of-Flight Radiance Fields for Dynamic Scene View Synthesis, *Advances in neural information processing systems*, Vol. 34 (2021).
- [2] Jakob, W., Speierer, S., Roussel, N., Nimier-David, M., Vicini, D., Zeltner, T., Nicolet, B., Crespo, M., Leroy, V. and Zhang, Z.: Mitsuba 3 renderer.
- [3] Jarabo, A., Marco, J., Munoz, A., Buisan, R., Jarosz, W. and Gutierrez, D.: A Framework for Transient Rendering, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia)*, Vol. 33, No. 6 (2014).
- [4] Pediredla, A., Veeraraghavan, A. and Gkioulekas, I.: Ellipsoidal Path Connections for Time-Gated Rendering, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 38, No. 4 (2019).
- [5] Su, S., Heide, F., Wetzstein, G. and Heidrich, W.: Deep End-to-End Time-of-Flight Imaging, *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 6383–6392 (2018).
- [6] Vicini, D., Speierer, S. and Jakob, W.: Path Replay Back-propagation: Differentiating Light Paths using Constant Memory and Linear Time, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)*, Vol. 40, No. 4, pp. 108:1–108:14 (2021).
- [7] Vicini, D., Speierer, S. and Jakob, W.: Differentiable Signed Distance Function Rendering, *Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)*, Vol. 41, No. 4, pp. 125:1–125:18 (2022).
- [8] Whyte, R., Streeter, L., Cree, M. J. and Dorrington, A. A.: Review of methods for resolving multi-path interference in Time-of-Flight range cameras, *SENSORS, 2014 IEEE*, pp. 629–632 (2014).