

# 時間相関イメージングによる 半透明物体の振幅画像の変化の解析

井上 裕太<sup>1</sup> 田中 賢一郎<sup>1</sup> 久保 尋之<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** プラスチックなどの半透明物体を時間相関イメージングを利用して観測した場合、光の散乱により通常のカメラによる撮影とは異なった画像が得られる。本研究では散乱特性に基づく材質判別に向けた調査として、時間相関イメージングによって得られる振幅画像が材質によって異なる変化を示すことに着目し、通常のカメラで得られる陰影画像と振幅画像の間に生じるずれと、位相画像と振幅画像の間に生じるずれの解析を行う。まず、時間相関イメージングをモデル化し、半透明物体で生じるマルチパスの影響を定式化する。さらに、シミュレーションと実環境実験により、材質の違いによって振幅画像にどのような変化が現れるかを検証する。

## 1. はじめに

1枚の画像を用いた物体認識は、近年の深層学習技術の発達により性能向上が著しい。そのため、自動運転車や自律移動ロボットの走行制御、ロボットの特定物体の認識 [5], [6] などに応用が期待される。一般に物体認識では、形状、色、テクスチャ、位置関係などの特徴が手がかりとして利用されている。そのため、その物体が何であるかというカテゴリはわかっても、その材質まで特定することは容易ではない。例えば、テーブルの上に置かれた白く丸い物体が皿であるとわかっても、それが陶器なのかプラスチックなのか紙なのか見分けるのは難しい。ロボットが皿を把持する場合には、割れやすいのかつぶれやすいのかも大事な要素であり、そのためにも材質推定が必要となる。

特にプラスチックなどの半透明な物体の材質を見分けるためには、表面下散乱の広がり方の違いが手掛かりとして利用できる。表面下散乱の広がり方の違いは、時間相関イメージングを用いた距離計測器である Time-of-Flight (ToF) カメラにて観測できることが知られており、実際に材質推定が可能であることが示されている [8], [9]。ただし、これらの手法では一つの対象の計測に対して複数回の計測が必要であり、材質判別に時間がかかる問題があった。

本研究でも同様に ToF カメラによって半透明物体で生じる表面下散乱の影響を解析するが、1回の計測で済むように、新たに振幅画像の変化に着目する。ToF カメラでは、位相画像と同時に振幅画像も計測できる。本研究では、表

面下散乱によって、材質ごとに振幅画像が変化することにもとづいて、2通りの解析を試みる。一つ目は、ToF カメラと通常カメラの光の強度観測方法の違いを利用して、材質固有の表面下散乱の影響を観測する手法を検討する。通常のカメラでは観測光の強度がそのまま足しあわされるのに対し、ToF カメラの時間相関イメージングでは位相がずれた変調光が重なり合うことにより相関を弱めあう。この強度の観測方法の違いから材質固有の散乱特性を評価する。二つ目は、ToF カメラで計測される位相画像と振幅画像の関係に着目し、その整合性を調査する。位相画像と振幅画像は直接比較できないため、位相画像から陰影画像を合成し、観測された振幅画像と比較する。

## 2. 関連研究

従来の ToF カメラを用いた研究は、装置本来の目的である距離計測の精度向上に関するものが多い。複数の光路を通過した光の合成により位相が本来と異なった値として計測される問題は、ToF 計測における誤差の大きな原因であり、その解決に向けた研究が活発に行われている。例えば、照度差ステレオ法と組み合わせた精度の向上 [3], [11]、半透明物体における距離計測歪みの補正 [7]、相互反射の影響の除去 [1], [2] などが挙げられる。

一方で、ToF カメラにより材質判別の手がかりを得られることは Su ら [8] により検証され、ToF の計測値には計測対象の材質の影響を受けた値が観測されることが確認された。Tanaka ら [9] は ToF カメラによる距離の計測値に現れる微少な計測歪みをそのまま用いた材質判別法を提案した。また、Kitano ら [4] は ToF カメラを改良した時間応

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

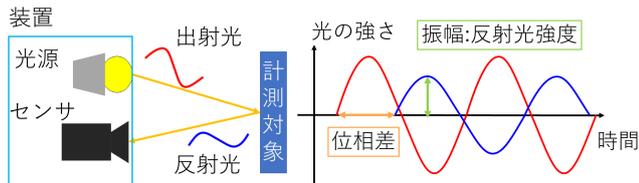


図 1: 連続波方式の ToF カメラは、参照光波形と反射光波形の位相差と反射光の振幅を計測する。

答の超解像計測により、散乱や反射といった光学的現象の ToF カメラによる観測を実現した。これらにより半透明物体の光の応答の差が ToF カメラで観測可能であることが示された。本研究でも、ToF カメラで半透明物体を撮影したときの計測値の変化を解析するが、ToF カメラで撮影可能な振幅画像の比較を新たに行う。

### 3. 時間相関イメージング

RGBD カメラとしてしばしば使用される ToF カメラは、シーンの反射光強度に相当する振幅画像 (近赤外画像) と、深度情報に相当する位相画像を同時に取得できるカメラである。図 1 に示すような振幅変調連続波 (AMCW) 方式 ToF カメラでは、振幅変調した光を照射し、反射光の振幅と位相を計測している。AMCW ToF カメラによって計測される振幅画像と位相画像は以下の式で表される。

$$\begin{cases} a(p) = I_0 r(p) \\ \phi(p) = \frac{4\pi f d(p)}{c} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $a(p)$  はカメラのピクセル  $p$  における振幅、 $I_0$  は光源が出す強度変調光の振幅、 $r$  はシーンの陰影、 $d$  は深度、 $c$  は光速、 $f$  は ToF カメラの変調周波数、 $\phi$  は位相である。以上の通り、計測される位相はシーンの深度に比例し、一般に近赤外画像とも呼ばれる振幅画像はシーンの陰影に直接対応する。

**マルチパス問題** シーンの幾何や物性によっては、マルチパス問題と呼ばれる計測の歪みが発生する [10]。マルチパス問題は、相互反射を起こすような形状や、表面下散乱を起こす半透明物体など、光源から出た光がセンサに届くまでに複数の光路が存在する場合に発生する。それぞれの光路ごとに振幅と位相が決まるものの、実際に観測される値は、それらすべての波を合成した波の振幅と位相となる。

ここでは、説明を簡単にするために、2つの波の合成を考える。 $i$  個目 ( $i \in \{1, 2\}$ ) の波の振幅と位相を  $a_i, \phi_i$  と表すと、 $i$  個目の強度振幅光  $L_i$  は次のように表される。

$$L_i(t) = a_i \sin(2\pi ft - \phi_i) \quad (2)$$

計測される波は、図 2 に示すように、2つの波の合成波の振幅  $a$  と位相  $\phi$  であり、三角関数の合成を用いて

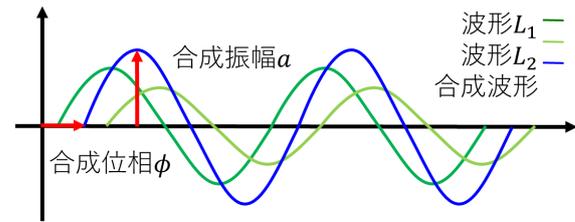


図 2: 緑で示されている二つの波は、青色の一つの波に合成される。ToF カメラでは、この合成された波の位相と振幅が計測される。

$$\begin{cases} a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ \phi = \sin^{-1} \frac{-a_1 \sin \phi_1 - a_2 \sin \phi_2}{a} \end{cases} \quad (3)$$

のように表される。一般に、ToF カメラは 10MHz から 100MHz 程度の周波数で駆動されることが多く、一周期が数 m から数十 m あるのに対し、半透明物体内部を散乱した光でカメラで観測できる強度を持った光の光路長の差は、長くても数 cm 程度であるため、各光路の位相のばらつきは十分小さく、実用上は、2つのパスの中間的な値となる。実際には、半透明物体内部では無数の光路が存在するため、計測される値は、それらすべての合成波の振幅と位相となる。

### 4. 計測の不整合の解析

前述の通り、対象物体が不透明であれば、ToF カメラで観測される振幅はシーンの陰影に、位相はシーンの形状に物理的に対応する。しかしながら、半透明物体のようにマルチパスが発生する場合には、振幅・位相ともに計測が変化し、シーンの陰影や形状といった物理量と一対一に対応しなくなってしまう。そのため、各計測に半透明度合いに応じた不整合が生じることとなる。図 3 に物理量と計測値の不整合の関係を示す。シーン中の形状と、ToF カメラによって計測される位相の不整合については、Tanaka らの論文 [10] に詳述されているので参照されたい。本稿では、主に、シーン中の陰影と ToF カメラによって計測される振幅の不整合、および、計測される振幅と位相間で発生する不整合について述べる。

#### 4.1 振幅と陰影の不整合

まず、シーンに存在する陰影と、ToF カメラによって計測される振幅の不整合について考える。シーン中の陰影は、通常のカメラを用いることで計測可能である。ToF カメラの光源から、強度変調した光を照射したシーンを通常のカメラで撮影すると、カメラは露光時間  $T$  に到達する光の総量を記録するため、 $T \gg 1/f$  の時の計測値  $I'$  は

$$I'(p) = \frac{I_0}{\sqrt{2}} r(p) \quad (4)$$

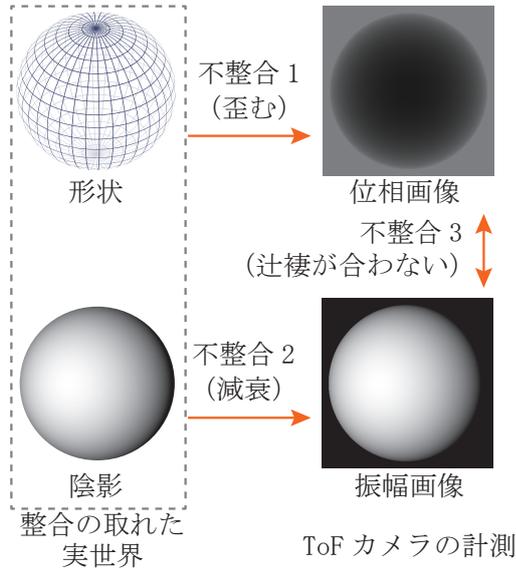


図 3: 計測の不整合の関係. ToF カメラの撮影画像は, 実世界の陰影や形状とは異なる画像となってしまふ. また, 撮影された位相と振幅の間でも不整合が発生する. 本稿では, 特に振幅画像に関連する不整合について解析を行う.

と表される. つまり, 通常カメラでの撮影では, 強度変調光を照射していたとしても, シーンの陰影を直接観測することができる. 説明の簡単化のため, 以降ではカメラの計測値は  $I = \sqrt{2}I'$  として正規化されているものとする. ここで重要な点は, 対象物体が不透明であれば, 通常カメラで撮影される陰影画像と, ToF カメラで撮影される振幅画像は同一となるということである.

2つのパスが存在するシーンの場合, カメラの計測値はすべての光の和であるため, 以下のように表される.

$$I(p) = I_1(p) + I_2(p) \quad (5)$$

ただし,  $I_i$  は  $i$  番目の光路に相当する計測値である. ここで, 表面下散乱光の2つのパスが異なる光路長を持つとき, つまり,  $\phi_i \neq \phi_2$  かつ  $|\phi_1 - \phi_2| \ll 2\pi$  の時,  $\cos(\phi_1 - \phi_2) < 1$  であるため,

$$I(p) > a(p) \quad (6)$$

が成り立つ. つまり, 散乱が生じないシーンでは同一の計測であったはずの, 通常カメラでの観測と ToF カメラでの振幅が, 表面下散乱があるシーンでは ToF カメラの振幅が相対的に小さくなる. 我々はこの2つの違いを, 振幅と陰影の不整合と呼ぶ.

実際の計測は, 散乱によって発生する無数の光路を辿った光の足し合わせである. ある時間遅れが発生する光路のすべての光の合成波を考えると, その合成波の振幅は, 時間的な PSF として考えることができる. この時間的な PSF は材質によって異なることが知られている [10]. 時間的な PSF が異なれば, 振幅の減衰量も変化するため, ToF カメラによる振幅が, 通常カメラで計測した陰影に対して

どれだけ減衰しているかを見ることによって, 材質の手掛かりを得ることができる.

## 4.2 振幅と位相の不整合

次に, 計測された振幅と位相の間に存在する不整合について考える. この場合は通常カメラを併用する必要はなく, ToF カメラだけを用いて評価することが可能である. 理想的なランバート面を観測していると仮定すると, ToF カメラで計測される形状を微分することで法線を求め, ランバート面の陰影をレンダリングすることで, 陰影画像を生成することができる. こうして生成された陰影画像は, 理想的には, ToF カメラで計測される振幅画像と同一となる. 法線  $\mathbf{n}$  は, 形状の勾配に垂直な方向であるため, 外積  $\times$  を用いて以下のように表される.

$$\mathbf{n} \propto \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{\partial d}{\partial x} \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} 0 & 1 & \frac{\partial d}{\partial y} \end{pmatrix}^T \quad (7)$$

$$= \begin{pmatrix} -\frac{\partial d}{\partial y} & -\frac{\partial d}{\partial x} & 1 \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

ただし,  $\mathbf{n}$  は正規化されるものとする. ここで, 光源方向を  $\mathbf{s}$  としたとき, レンダリングされる陰影  $\hat{I}$  は, 反射率に相当する係数を適当に調節すれば, 通常カメラで観測される陰影や振幅画像と同一となる.

$$\hat{I}(p) = I_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}(p) \quad (9)$$

$$\propto I(p) = a(p) \quad (10)$$

一方, 半透明物体を計測すると, ToF カメラ内部でも不整合が生じた観測結果となることがある. 式 (3) に示す通り, 半透明物体を計測して得られる位相は, もはや物体表面から返ってきた光の位相よりも遅れている. つまり, 位相から求められる幾何情報は, 本来の形状から変化してしまう. 変化した形状を変化量  $\vec{d}$  を用いて  $d + \vec{d}$  と表すと, 形状を微分した法線  $\hat{\mathbf{n}}$  は以下のように表される.

$$\hat{\mathbf{n}} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial(d+\vec{d})}{\partial y} & -\frac{\partial(d+\vec{d})}{\partial x} & 1 \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

$$= \mathbf{n} + \begin{pmatrix} -\frac{\partial \vec{d}}{\partial y} & -\frac{\partial \vec{d}}{\partial x} & 0 \end{pmatrix}^T \quad (12)$$

形状の変化量は, 材質によって一意に定まるため [10], 第2項目はゼロであり,  $\mathbf{n} = \hat{\mathbf{n}}$  である. したがって, ランバート面を仮定したレンダリングを行うと, 不透明物体の時と同じ陰影を得ることができる.

一方で, ToF カメラが計測する振幅画像は, 式 (3) に示すように, 本来よりも減衰して観測されるため, 以下のように, 形状からレンダリングした陰影との不整合が生じる.

$$\hat{I}(p) > a(p) \quad (13)$$

これを, 振幅と位相の不整合と呼ぶ. これにより, 通常カメラを用いて複数の撮影を行わなくても, 一台の ToF カメラの計測から, 不整合を評価することができる. ただし,

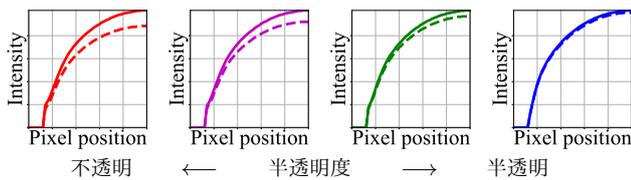


図 4: 2種類のカメラによる観測光強度シミュレーション結果と、球の中心と端を結ぶ経路に沿った観測光強度プロファイル。破線は振幅画像の観測光強度、実線は陰影画像の観測光強度。

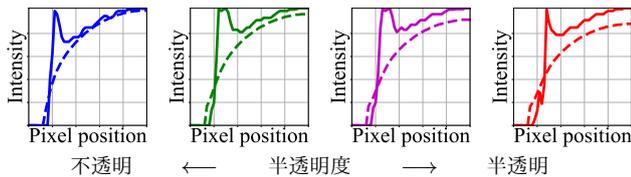


図 5: ToF カメラによる観測光強度シミュレーション結果と、球の中心と端を結ぶ経路に沿った観測光強度プロファイル。破線は振幅画像の観測光強度、実線は合成した陰影画像の観測光強度。

物体表面の反射率の違いをキャンセルすることができないので、相対的な評価となる点は注意が必要である。

## 5. 実験

**シミュレーション** 対象物体の半透明度合いに応じて、通常カメラで撮影した陰影と ToF カメラで撮影した振幅の間に不整合が生じることを、シミュレーションにより確認する。本シミュレーションでは、ノイズは付加せず、通常カメラによる陰影画像と、ToF カメラによる振幅画像がどのように変化するかを確認した。図 4 に、レンダリングした画像の強度プロファイルを示す。左から最も不透明な材質、右に行くほど半透明になるように散乱パラメータを設定した。実線は普通のカメラにより撮影された陰影であり、どの材質でもほぼ同様の明るさが観測されていることが確認できる。一方で、破線で示している ToF カメラの振幅の値は、半透明度合いが高くなるほど減衰していることが確認できる。

次に、ToF カメラの振幅と位相の不整合を調べた。形状を微分するため、エッジ付近では正しく陰影は復元できないものの、球の中心付近では半透明度合いに応じて振幅が減少している様子が確認できる。

**実験環境** 次に、材質によって計測に不整合が生じることを、材質の異なる球を用いた実験によって確認する。図 6 に示すように、物体を通常のカメラと ToF カメラで撮影するシステムを構築した。カメラと ToF カメラはビームスプリッタを使って光学的に同じ位置に配置し、同一の点を観測している。計測装置として、ToF カメラには Texas Instrument 社製の OPT-8241-CDK-EVM、通常のカメラには FLIR 社製の Grasshopper3 2.8 MP Mono

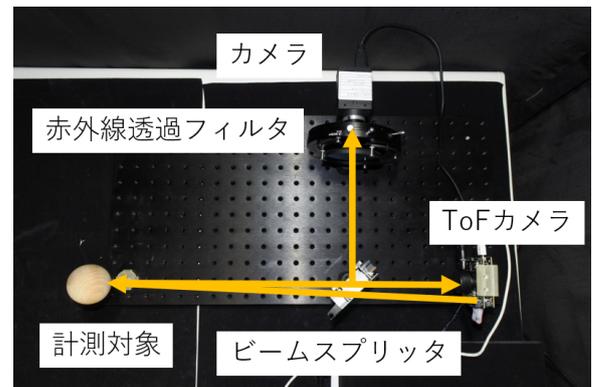


図 6: 実験環境。ToF カメラと通常のカメラをビームスプリッタを用いて光学的に同一位置に配置した。

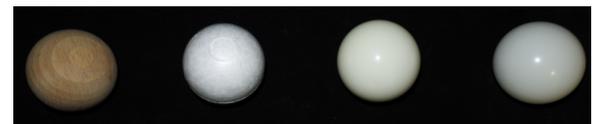


図 7: 計測対象。拡散反射に近い木と発泡スチロール、半透明なポリプロピレンとポリエチレンでできた、同じ大きさの球。

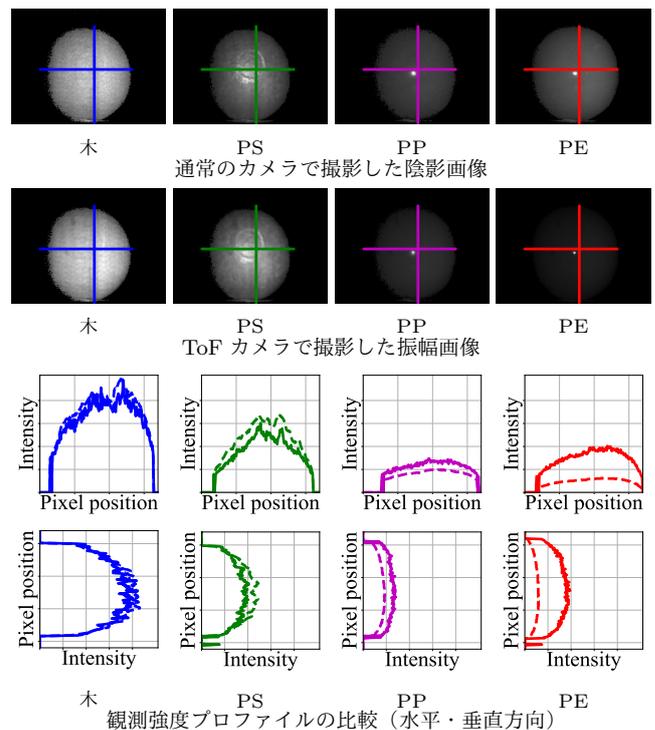


図 8: 通常カメラ及び ToF カメラによる観測とその強度プロファイル、破線は振幅画像の観測光強度、実線は陰影画像の観測光強度。

USB3 Vision を使用した。また、ToF カメラのレンズを Edmund 社製の焦点距離 25.0mm のレンズに変更した。ここで使用している赤外線透過フィルタは、ToF カメラのインジケータ LED の点滅の影響を防ぐために使用した。通常のカメラの露光設定は、拡散反射物体を計測したときに ToF カメラで撮影した振幅の強度と合致するようにマニュアルで設定した。

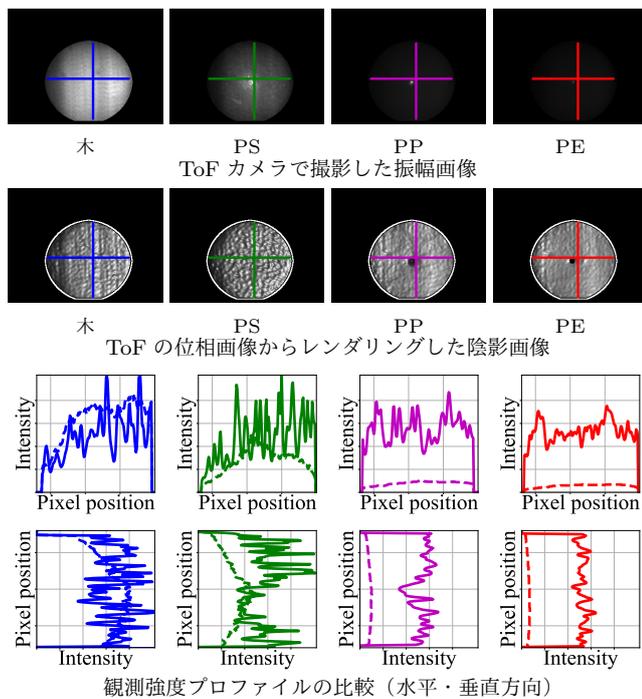


図 9: ToF カメラによる観測光強度の実計測と観測光強度プロファイル, 破線は振幅画像の観測光強度, 実線はレンダリングした陰影画像の観測光強度.

対象物体は, 図 7 に示すような, 拡散反射の強い木材, 発泡スチロール (PS), 半透明感の強いポリプロピレン (PP) とポリエチレン (PE) の 4 種類の材質の球を用意した. 図 8 に, 通常カメラで撮影した陰影画像と ToF カメラで撮影した振幅画像のそれぞれについて, 画素値をプロットした結果を示す. 拡散反射の強い木や発泡スチロールでは, 両者の明るさの比はほとんど同じであることが確認できる. 一方で, 半透明な材質では明らかに ToF カメラで撮影した振幅が通常カメラでの陰影に比べて減衰していることが確認できる.

次に, ToF カメラで計測した値だけを用いて振幅と位相の不整合を確認した. 図 9 に結果を示す. 不透明に近い木や PS は 2 つのプロファイルが近いのに対して, PP や PE のような極端に半透明な物体では振幅が大きく減衰していることが確認できる. しかしながら, 計測される深度の分解能が対象物体のサイズに対して低く, 位相画像に含まれるノイズが多いため, 形状を微分してからレンダリングする過程においてノイズが増幅され, スムーズな陰影は得られていない. そのため, 細かな材質の違いは区別しづらいものと考えられる.

## 6. まとめ

本稿では, ToF カメラによって撮影される振幅が, 撮影対象物体の材質によって減衰することを確認した. 実際に, 通常カメラで撮影した陰影画像と比較することで, 物体が半透明なほど, 振幅が減衰していることを確認した. また, 位相画像から疑似的に陰影画像をレンダリングしたも

のと, 振幅画像が整合しないことも確認した.

今後の研究方針として, 材質によって異なる振幅の減衰率から, ワンショットで物体の材質を推定できるようなフレームワークを確立することを目指す. また, 振幅の減衰率に加えて RGB 値も含めた合計 4 チャンネル画像を入力とした材質推定手法の確立を目指す.

謝辞 この研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, 科研費 JP18H03265, 株式会社東芝の助成を受けた.

## 参考文献

- [1] Fuchs, S.: Multipath Interference Compensation in Time-of-Flight Camera Images., *Proc. IAPR International Conference on Pattern Recognition*, pp. 3583–3586 (2010).
- [2] Godbaz, J. P., Cree, M. J. and Dorrington, A. A.: Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar., *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp. 91–116 (2012).
- [3] Kim, S. K., Kang, B., Heo, J., Jung, S.-W. and Choi, O.: Photometric stereo-based single time-of-flight camera, *Optics Letters*, Vol. 39, No. 1, pp. 166–169 (2014).
- [4] Kitano, K., Okamoto, T., Tanaka, K., Aoto, T., Kubo, H., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: Recovering temporal PSF using ToF camera with delayed light emission, *IPSSJ Trans. on Computer Vision and Applications*, Vol. 9, No. 1, p. 15 (2017).
- [5] Lowe, D. G.: Object recognition from local scale-invariant features, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 20–27 (1999).
- [6] Ren, S., He, K., Girshick, R. and Sun, J.: Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 39, No. 6, pp. 1137–1149 (2017).
- [7] Shim, H. and Lee, S.: Recovering Translucent Object using a Single Time-of-Flight Depth Camera, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 841–854 (2015).
- [8] Su, S., Heide, F., Swanson, R., Klein, J., Callenberg, C., Hullin, M. and Heidrich, W.: Material Classification using Raw Time-of-Flight Measurements, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3503–3511 (2016).
- [9] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Funatomi, T., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Material Classification using Frequency- and Depth-Dependent Time-of-Flight Distortion, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 79–88 (2017).
- [10] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Funatomi, T., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Material Classification from Time-of-Flight Distortions, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)* (2018).
- [11] Ti, C., Yang, R., Davis, J. and Pan, Z.: Simultaneous Time-of-Flight Sensing and Photometric Stereo with a Single ToF Sensor, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4334–4342 (2015).