# Time-of-Flight 計測における複数の変調周波数を用いた 2層構造物体の距離推定

石川 武典<sup>1,a)</sup> 北島 大夢1 櫛田 貴 $\mathrm{L}^1$  田中 賢一郎<sup>1</sup> 久保 尋之<sup>1,2</sup> 舩冨 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博1

## 概要

不透明な物体の手前にガラスなどの透明層やフィルムな どの半透明層があるような2層構造物体の距離を Time-of-Flight カメラで計測すると、不透明な物体と手前の層から の反射光が混ざってしまい、正しい距離計測が行えなくな る.本研究では、複数の変調周波数を利用することで、不 透明な物体と手前の層それぞれの正しい距離を推定する手 法を提案する.実環境実験として,不透明な物体の手前に 半透明フィルムが置かれたシーンに対して本手法を適用 し、それぞれの距離を求めることで、本手法の有効性を確 認した.

# 1. はじめに

近年,物体に光を照射して反射光を受光するまでの時間 から、物体までの距離を計測可能な Time-of-Flight (ToF) カメラが普及している. ToF カメラは比較的高いフレーム レートで動作し、テクスチャのない面でも画素ごとに密な 距離計測ができるため、3次元計測を必要とする FA 事業 での活用が期待されている.

しかし、ToF カメラでは正しく距離計測できない物体 も存在し、その代表例として2層構造の物体が挙げられ る [2].2層構造物体とは、不透明な物体の手前に、ガラス などの透明層やフィルムなどの半透明層があるような構造 をもった物体であり、図1のようなプラスチックの容器に 格納された物体やガラス越しの物体など、我々の身の回り に多数存在する. このような2層構造物体を ToF カメラ で計測すると、手前の層からの反射光と奥の不透明な物体 からの反射光が混ざった光が観測され、正しい距離計測が 行えなくなる.

本研究では、複数の異なる変調周波数で計測すると、手 前の層からの反射光と不透明な物体からの反射光の混ざり 方が変化することに着目し、観測された反射光を手前の層 からの成分と不透明な物体の成分に分解することで、それ

```
奈良先端科学技術大学院大学
```

東海大学

ishikawa.takenori.is6@is.naist.jp





半透明な容器 透明な容器 図1 2層構造物体の例

ぞれの正しい距離を推定する. さらに, 手前の層として半 透明なプラスチックフィルムを用いた実環境での実験を通 して、その有効性を確認する.

## 2. 2 層構造物体の ToF 計測モデルと距離推定

本節では, ToF カメラによる距離計測の原理を述べた後, 2層構造物体では正しく距離計測できない原因を明らかに し、その問題は複数の変調周波数を用いることで解決でき ることを示す.

## 2.1 ToF カメラによる計測の原理

本研究では、AMCW(強度変調連続波)方式の ToF カ メラを用いる.図2に示すように,ToFカメラは強度変調 された正弦波を入射波として照射し、物体に当たって返っ てくる反射波を入射波と同一波形の参照波と比較すること で反射波の振幅と位相差を求める.また,計測した振幅と 位相差をそれぞれ長さと角度として表すことで, ToF カメ ラの計測値を複素平面におけるベクトルでフェーザ表示す ることができる [1]. ここで, 距離 d にある計測対象の計 測値  $M \in \mathbb{C}$  と位相差  $\phi(f)$  は

$$\begin{cases} M\left(f\right) = re^{i\phi(f)} \\ \phi(f) = \frac{4\pi f d}{c} \end{cases}$$
(1)

と表される.rは振幅,eはネイピア数,cは光速,iは虚 数単位, f は ToF カメラの変調周波数である. 位相差がわ かれば、物体までの距離が計算できることがわかる.

#### 2.2 2 層構造物体の計測モデル

2層構造物体において、手前にある層を前方物体、奥に ある不透明な物体を後方物体と呼ぶこととする.2層構造 物体を ToF カメラで計測すると,図3に示すように,前方



図 2 AMCW 方式の ToF カメラは、参照波と比べることで反射波の振幅と位相差を計測する. 位相差から物体までの距離を求めることができる. 位相差と振幅をそれぞれ角度と長さとすることで、計測値を複素平面におけるベクトルでフェーザ表示することができる.



図32層構造物体における計測とそのフェーザ表示. ToFカメラで2層構造物体を計測すると,前方物体からの反射光(緑)と後方物体の反射光(青)の両方が足されて観測される.このとき,ToFカメラでは前方物体のフェーザ(緑)と後方物体のフェーザ(青)を合成した観測(赤)が得られるため,距離を正しく計測できない.

物体からの反射光成分と,前方物体を透過して後方物体に 当たって返ってくる反射光成分の2つの成分が足し合わさ れたものが計測される.計測で得られる振幅と位相差をそ れぞれ $r_M$ ,  $\phi_M$  とすると,計測値M(f)は次式のように 表すことができる.

$$M(f) = r_M e^{i\phi_M}$$
(2)  
=  $r_F e^{i\phi_F} + r_B e^{i\phi_B}$ (3)

ここで、 $r_F$ ,  $r_B$  はそれぞれ前方物体と後方物体からの反射光の振幅、 $\phi_F$ ,  $\phi_B$  はそれぞれの位相差を表す.このことから、ToF カメラで計測される位相差は、前方物体のフェーザと後方物体のフェーザを合成したフェーザの位相となるため、誤った距離が計測されてしまうことがわかる.

#### 2.3 複数の変調周波数を用いた距離推定

我々が知りたいのは、前方物体と後方物体のそれぞれの 反射光成分に対応する振幅及び位相差、 $r_F$ ,  $\phi_F$ ,  $r_B$ ,  $\phi_B$ の4つの値である.しかし、一回の計測で得られるのは振 幅 $r_M$ と位相差 $\phi_M$ の2つの値だけであり、このままでは



図4 2つの変調周波数を用いた2層構造物体の計測.2層構造物体 をある周波数 f に対して k 倍の周波数で計測すると,前方物 体からの反射光(緑)と後方物体からの反射光(青)はそれぞ れ,振幅は変わらず位相差は k 倍になる.しかし,ToF カメ ラで得られる観測(赤)は k 倍にはならない.本研究ではこ の関係を利用し,前方物体と後方物体の距離を推定する.

解くことができない.そこで,変調周波数を変えることで 情報量を増やし,4つの未知数を求めることを考える.

まず,2層構造物体ではなく,単一の物体に対して変調 周波数を変化させた場合を考える.同一の点を異なる変調 周波数を用いて計測すると,振幅は不変であるが,位相差 は変調周波数に比例する.ある変調周波数 $f_1$ に対してk倍した変調周波数 $f_2$  (=  $kf_1$ )を用いたとき,それぞれの計 測値 $M(f_1) \ge M(f_2)$ は次のように表せる.

$$\begin{cases} M(f_1) = re^{i\phi} \\ M(f_2) = M(kf_1) = re^{ik\phi} \end{cases}$$
(4)

次に,異なる2つの変調周波数を用いて2層構造物体を 計測した場合を考える.図4に示すように,前方物体か らの反射光成分と後方物体からの反射光成分の位相差は, それぞれ変調周波数に比例する.2つの異なる変調周波数 f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>を用いて計測したとき,それぞれの変調周波数で得 られる反射光は,

$$\begin{cases} M(f_1) = r_{f_1} e^{i\phi_{f_1}} = r_F e^{i\phi_F} + r_B e^{i\phi_B} \\ M(f_2) = r_{f_2} e^{i\phi_{f_2}} = r_F e^{ik\phi_F} + r_B e^{ik\phi_B} \end{cases}$$
(5)

と表される.このとき,前方物体と後方物体それぞれの振幅及び位相差の4つの未知数 $r_F, r_B, \phi_F, \phi_B$ に対し,2つの変調周波数の計測によって振幅及び位相 $r_{f_1}, r_{f_2}, \phi_{f_1}, \phi_{f_2}$ の4つの値が得られるため,前方物体と後方物体のそれぞれの振幅と位相差を求めることができる.つまり,2層構造物体に対して,2種類の異なる変調周波数を用いて計測すれば,前方物体と後方物体それぞれの距離を求めることができる.

ただし、実際には2種類の変調周波数だけでは、推定結 果が不安定になる場合がある.計測に要する時間が増加し ても問題とならない場合には、さらに変調周波数を増やせ ばよい. n種類の変調周波数を用いたとき、基準となる周 波数に対する前方物体の位相差  $\phi_F$  と後方物体の位相差  $\phi_B$ は次式で与えられる.





 $\phi_F, \phi_B, r_F, r_B =$ 

$$\underset{\phi_{F},\phi_{B},r_{F},r_{B}}{\operatorname{argmin}} \sum_{l=1}^{n} \|M(f_{l}) - \left(r_{F}e^{ik_{l}\phi_{F}} + r_{B}e^{ik_{l}\phi_{B}}\right)\|_{2}^{2}$$
(6)

ここで、 $f_l$  は l 番目の変調周波数、 $k_l$  は基準とする変調周 波数  $f_1$  に対する l 番目の変調周波数の比率 ( $k_l = \frac{f_l}{f_1}$ ) で ある.

# 3. 実環境実験

提案手法により前方物体と後方物体の2つの距離を推定 できることを確認するために、実環境での実験を行った.

## 3.1 実験環境

実験環境を図 5(a) に示す. ToF カメラは Melexis 製 EVK75027 を用いた.前方物体として, ToF カメラから 400mm の位置に半透明フィルムを設置した.後方物体と して,白色の石膏板,プラスチック製のりんごの模型,木 製のデッサン用人形を用いた.これらは ToF カメラから約 500mm の位置に設置した.変調周波数は 10,40,100MHz の3種類とし,計測値はノイズの影響を抑えるため 100 フ レームを平均した振幅画像と位相差画像を用いた.

## 3.2 変調周波数のキャリブレーション

本研究で用いた ToF カメラは変調周波数を指定して計 測できるが,指定した変調周波数と実際に動作する変調周 波数が異なるため,キャリブレーションにより変調周波 数を推定した.それぞれの変調周波数について,石膏板を ToF カメラから 300mm から 550mm の間を 50mm 間隔で 動かし位相差を計測した.式(1)より,距離と位相差の関 係から最小二乗法を用いて周波数を推定した.これによ り,10MHz,40MHz,100MHzを指定した時の実際に動作 している変調周波数は10.9MHz,43.0MHz,90.7MHz で あった.

# 3.3 ルックアップテーブルを用いた距離推定

本実験では、計算処理の高速化のために、あらかじめルッ クアップテーブルを作成し、最近傍探索により前方物体と 後方物体の距離を推定する.ルックアップテーブルは、各 周波数ごとに前方物体と後方物体のそれぞれの位相差と振 幅の4変数 $\phi_F, \phi_B, r_F, r_B$ と、ToFカメラで計測される位 相差と振幅 $\phi_{f_l}, r_{f_l}$ の関係を示している.4変数の範囲を 表1に示す.

表 1 推定に用いた変数の範囲

	前方物体 F	後方物体 B
振幅 r	0–計測値の最大値, 1 間隔	
位相 $\phi$	0.160 - 0.206 rad	0.206-0.275 rad
(距離 d, 1mm 間隔)	(350-450 mm)	$(450-600 \mathrm{mm})$

#### 3.4 実験結果

図 5 にそれぞれの 2 層構造物体を計測した結果を示す. (a) は計測シーンの外観である.(b) は前方物体が配置されているときの変調周波数 43.0MHz での計測結果であり,前方物体と後方物体の反射光が混ざったことで距離を誤り,後方物体の形状は視認できない.(c)(d) はそれぞれ提案手法で推定した前方物体と後方物体までの距離を示している.(e) は比較のために前方物体を取り除いて後方物体



のみを変調周波数 43.0MHz で計測した結果であり,これ を後方物体までの距離の真値と定める.提案手法による距 離推定結果はノイズが多く輪郭も不鮮明であるが,後方物 体の輪郭が見え,(b)と比較して大幅に改善できているこ とがわかる.

次に (e) に示す 1 ライン (白線) について, 距離を数値 的に比較した結果を図6に示す.すべての2層構造物体に ついて,単一の周波数での距離計測結果はおよそ 470mm から 500mm となっており,前方物体と後方物体の中間の 距離になっていることがわかる.石膏板では、後方物体の 距離は真値に近いものとなっているが、前方物体の距離は ノイズが多いだけでなく、真値よりやや手前に推定されて いる. りんごの模型では, 前方物体の距離は石膏板と同様 の傾向があり,真値より手前に推定されている.後方物体 の距離は実際より奥に推定されているが、りんごの模型の 凸形状が推定できていることがわかる. デッサン用人形で は,他の物体と異なり,前方物体の距離は正しく推定でき ているが、後方物体の距離に関しては人形の形状が推定で きていない.これは、人形の部品が細くて反射光強度が弱 いため、ルックアップテーブルに近い値が見つからなかっ たことが原因と考えられる.

# 4. まとめ

本研究では、ToFカメラでは正しく距離を計測できない 2層構造物体に対して、複数の変調周波数を用いることで、 前方物体と後方物体の距離をそれぞれ推定する手法を提案 した.実環境実験により,前方物体と後方物体の距離を推 定できることは確認でき,概ね真値に近い結果が得られた. 一方,後方物体については,石膏板のような理想的な反射 を生じる素材では正しく距離が求められたが,材質によっ ては全体的な奥行きの傾向が改善されるにとどまり,細部 の凹凸まで正しく推定できるとまでは言えない結果が得ら れた.

現在市販されている ToF カメラでは,計測結果のノイズ が大きく,距離推定が不安定となる場合があった.また, 実際に設定できる周波数に限界があり,図1に示したよう な前方物体と後方物体の距離が近い場合には対応できない 可能性がある.今後の ToF カメラの性能向上に期待する とともに,推定に用いる目的関数の改善にも取り組む予定 である.

謝辞 本研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, 科 研費 JP18H03265, JP18K19822, JP19H04138 の支援を受 けた.

#### 参考文献

- Gupta, M., Nayar, S., Hulling, M. and Martin, J.: Phasor Imaging: A Generalization of Correlation-Based Time-of-Flight Imaging, *Proc. ACM SIGGRAPH*, Vol. 34, No. 5 (2015).
- [2] Kadambi, A., Whyte, R., Bhandari, A., Streeter, L., Barsi, C., Dorrington, A. and Raskar, R.: Coded time of flight cameras: sparse deconvolution to address multipath interference and recover time profiles, *ACM Transactions* on Graphics (ToG), Vol. 32, No. 6, p. 167 (2013).