

# Time-of-Flight 計測における複数の変調周波数を用いた霧による距離計測歪みの補正

連 孟<sup>1,a)</sup> 田中 賢一郎<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

概要：霧のような悪天候において Time-of-Flight カメラを用いた場合、光の散乱の影響で誤った距離が得られることが知られている。本研究では霧の影響を受けず正しく距離を計測する手法の確立を目的とする。まず、Time-of-Flight カメラの複数の変調周波数を利用することで、シーン中において同一距離とみなせる点のクラスタ推定を行う。さらに、同一クラスタと推定された領域から正しい距離が推定できることを示す。最後に、シミュレーションと実環境実験において本手法の有効性を確認した。

キーワード：Time-of-Flight, 距離計測, 極座標表現

## 1. はじめに

近年、ターゲットに光を照射し、反射光を受光するまでの時間と反射光の強度からターゲットの反射率とそこまでの距離が計測可能な Time-of-Flight カメラ（以下、ToF カメラ）が急速に普及してきている。ToF カメラは反射率と距離が画像として計測できるため、例えば自動運転における物体認識と距離計測を一つのデバイスで行える存在として大きな期待を寄せられている。

しかし、人間にとって視程が十分に確保できる程度の霧であっても、ToF 計測を行うと光の散乱の影響で大きく誤った計測結果が得られることが知られている。そこで、霧中での正確な ToF 計測を行うために鈴木ら [21] はフェーズ表示を用いることで、計測結果から霧の影響を除去する手法を提案した。しかしながら、霧の影響は距離に依存しないと仮定したり、異なる距離に複数の反射率を持つターゲットを利用するなど、適用できる条件に制限があった。

本研究では、距離によって霧の影響が異なることを考慮し、また、同一の距離にあるとみなせるターゲットのみを利用する、より条件を緩和した距離計測手法を提案する。まず、ToF カメラの複数の変調周波数を用いることで、シーン中から同一距離とみなせる点のクラスタ推定を行う手法を提案する。さらに、同一クラスタと推定された領域から反射率が異なる複数の点を用い、霧の影響を受けない正しい距離の推定手法を提案する。また、本手法の有効性をシ

ミュレーションと実環境実験によって確認する。

## 2. 関連研究

コンピュータビジョン分野において、カメラを用いた観測に対して、霧のような散乱体が及ぼす影響を取り除いて正確な見え方を復元する研究は、今日まで多く行われているが、現在でもなお確立された手法がない挑戦的な問題である。従来多く採用されてきた手法として、He らが提案した Dark Channel Prior と呼ばれる手法がある [8], [17]。この手法は、シーン中のある領域の中では、殆どの場合少なくとも RGB チャネルの内一つは非常に低い強度を持っていると仮定できることを利用するものである。また、Berman ら [1] は同じ色が異なる場所に配置されているときに、色空間上で haze-line と呼ばれる直線をなすことに着目し、鮮明な画像を復元すると同時に、霧の影響からターゲットまでの距離を推定する手法を提案している。近年ではディープラーニングを用いて霧の影響を除去する手法 [2] も提案されている。また、ガルバノミラーを用いた特殊なシステムによって撮影を行い、霧の影響を除去する手法 [20] など提案されている。それに対して、我々は ToF カメラを用いた観測に対して霧が及ぼす影響を明らかにし、物理モデルに基づいて距離の推定を行う。

ToF カメラの計測において、霧や相互反射などがあると、複数の経路が混ざって計測される。この現象は「マルチパス問題」と呼ばれ、複数の経路が干渉し新たな波が合成されるため、正しい距離計測が行えない。ToF カメラにおけるマルチパス問題の解決を目指し、2つのピークを持つといった簡易な計測モデルを仮定したもの [4], [5], [6], [11], [15], [21]

<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  
<sup>a)</sup> muraji.takeshi.mr7@is.naist.jp

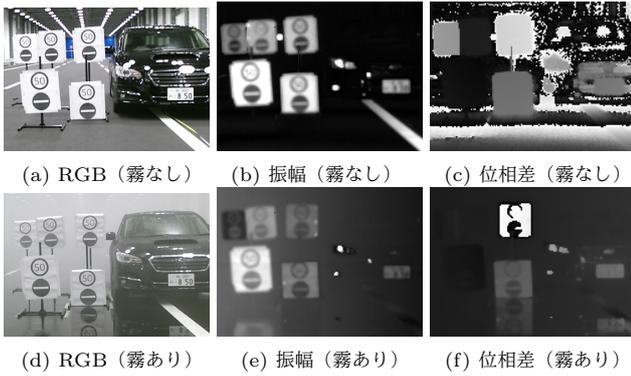


図 1 霧の有無による ToF カメラの計測結果の違い。上段が霧がないシーン、下段が霧があるシーン。左が RGB 画像，中央が振幅画像，右が位相差画像。霧によって計測結果が大きく異なることが分かる。

や，パラメトリックモデルによるもの [9], [13]，干渉を用いるもの [12]，発光タイミングを遅延させる回路を利用するもの [14] など，これまでも活発に研究されている。本研究もマルチパス問題を解決する研究であり，これらと同じカテゴリである。また，Single Photon Avalanche Diode (SPAD) を用いて高時間分解能な観測を行い，霧の影響を近似モデルにあてはめて除去する手法 [18] も提案されている。我々の手法は，時間的な情報だけでなく空間的な情報も併用するというユニークなアプローチであり，また，ハードウェアの改造を必要とせず，市販の ToF カメラをそのまま用いることができるため，従来研究と比較してより実用的である。

### 3. 霧中での ToF 計測

霧中において ToF 計測を行うと，光の散乱によって大きく誤った計測値が得られる。その様子を図 1 に示す。霧の有無によって大きく異なった結果が得られることが確認できる。シーン中には 5 つのターゲットを設置し，それぞれは同一距離にある 2 つの道路標識を模している。霧がないシーンでは図 1(c) のように各ターゲットが均一な値となり，同一距離にあると正しく計測できている。一方，霧があるシーンでは図 1(f) のように同一距離にあるターゲット内でも反射率によって異なる値となり，図 1(c) と全く異なる，誤った計測結果が得られてしまうことが分かる。本稿では，このような霧による光の散乱によって計測値を誤る現象を，霧による「距離計測歪み」と呼ぶ。本研究では，同一距離にあるターゲットでも霧による計測歪みが反射率によって異なることに着目し，距離の推定を行う。また，振幅と位相差が受ける霧による散乱の影響を同時に扱うために極座標表現を用いる。まず，霧中で ToF 計測した場合にどのように結果が歪むかを説明する。

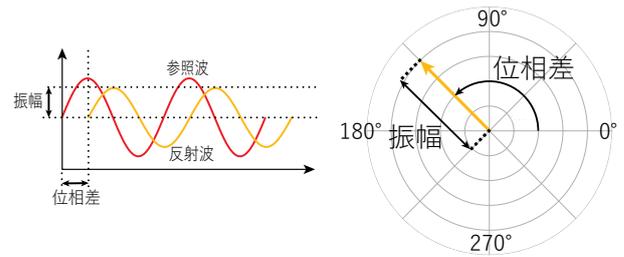


図 2 AMCW 方式の ToF カメラは，参照波と反射波の振幅の減衰率と位相差からターゲットの反射率と距離を求める。計測された振幅を長さに，位相差を角度として表すことで，極座標上に 2 つの異なる次元のものを同時に表す事ができる。

#### 3.1 霧中での距離計測

##### 極座標表現

本研究では，AMCW(振幅変調連続波)方式の ToF カメラを用いる。これは，振幅変調された正弦波を入射波としてターゲットに照射し，反射してカメラに届いた反射波を入射波と同一波形の参照波と比較することで，図 2 に示すようにターゲットの反射率とターゲットまでの距離を求めるものである。また，計測した振幅と位相差をそれぞれ極座標上の長さとして表すことで，ToF カメラの計測値をフェーザ表示することができる [7]。ここで，距離  $d$  にあるターゲットの計測値  $I \in \mathbb{C}$  は

$$\begin{cases} I(f_b) &= r e^{i\phi} \\ \phi &= \frac{4\pi f_b d}{c} \end{cases} \quad (1)$$

で表される。ここで， $r$  と  $\phi$  は，計測値である振幅と位相差であり， $f_b$  は ToF カメラの変調周波数， $e$  は自然対数の底， $i$  は虚数単位， $c$  は光速である。

##### 霧による影響と計測歪み

霧中など，光の散乱が発生するシーンにおいて ToF 計測を行うと，ターゲットに直接当たって返ってきた反射光と散乱物体による散乱光を足し合わせた波の振幅と位相差が ToF カメラの計測値となることが知られている [19]。そのため，距離  $d$  にあるターゲットを計測すると，ターゲットから直接返ってきた反射成分  $V \in \mathbb{C}$  とすべての奥行に存在する霧による散乱成分  $F \in \mathbb{C}$  とが足し合わされた計測値となるため，計測値  $I$  は

$$\begin{cases} I(f_b) &= V + F = r e^{i\phi} + s_b e^{i\varphi_b} \\ s_b e^{i\varphi_b} &= \int_0^d s(x) e^{i\varphi(x)} dx \end{cases} \quad (2)$$

と表される。ここで， $s(x)$  と  $\varphi(x) = \frac{4\pi f_b x}{c}$  は，霧の内部においてとある距離  $x$  で反射して ToF カメラが受光した成分の振幅と位相差であり， $s_b, \varphi_b$  は，変調周波数  $f_b$  におけるすべての霧の反射成分が合成された一つの波における振幅と位相差である。このように，霧による光の散乱によって本来の計測値から振幅も位相差も歪んでしまう。これは，図 3 に示すような極座標上での霧がないシーンでの

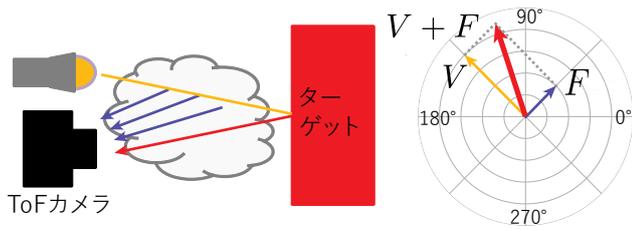


図 3 霧による散乱光  $F$  によって振幅, 位相差共に霧がないシーンでの計測値である  $V$  と異なる値  $V + F$  が得られる.

計測値であるフェーザ  $V$  と霧による散乱光のフェーザ  $F$  の足し合わせである  $V + F$  に相当する.

### 複数の変調周波数を用いた場合

一般に, AMCW 方式の ToF カメラでは, 位相差から距離に復元する際に複数の変調周波数を用いる. これは, 位相差は 0 から  $2\pi$  の計測値しか得られないため, 一つの変調周波数のみを用いると計測値に  $2\pi$  ごとの不定性が残るためである. 複数の変調周波数を用いて同一の点を計測すると, 振幅は不変であり, 位相差は変調周波数に比例する. つまり, 散乱物体を通さないときのある変調周波数での計測値  $V(f)$  は, 変調周波数  $f$  と基準とする変調周波数  $f_b$  との比率  $\hat{f} = f/f_b$  を用いて

$$V(f) = re^{i\hat{f}\phi} \quad (3)$$

と表せる. 図 4(a) に, 2 倍の変調周波数を用いた場合の計測値のフェーザを示す.

一方で, 霧があるときの計測値  $I(f)$  は

$$\begin{cases} I(f) = V(f) + F(f) \\ F(f) = s_f e^{i\varphi_f} = \int_0^d s(x) e^{i\hat{f}\varphi(x)} dx \end{cases} \quad (4)$$

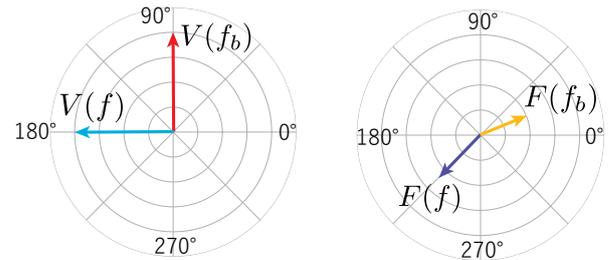
となる. ここで, 霧による影響は,  $s_f \neq s_b$  かつ  $\varphi_f \neq \hat{f}\varphi_b$  である. 図 4(b) に, 2 倍の変調周波数を用いた場合の霧のフェーザを, 図 4(c) に, 2 倍の変調周波数を用いた場合の計測値のフェーザを示す. このように, 霧による距離計測歪み量が変調周波数によって異なる. そのため, 霧中での ToF 計測のために, 霧の影響があっても変化しない手掛かりが必要となる.

## 3.2 提案手法

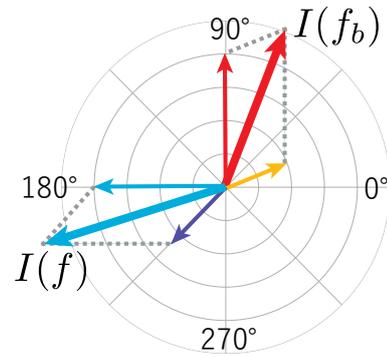
本稿では, ToF 計測から霧の影響を除去する手法を提案する. まず, 霧の影響を受けている ToF 計測から, シーン中での距離が同一であり, 同一の霧の影響を受けていると推定される領域ごとにピクセルをクラスタリングする. その後, 各クラスタにおいて, 霧の影響を除去し, そのクラスタの距離を推定する. 以下では, その詳細について述べる.

### 3.2.1 同一距離の点の推定

本研究では, 図 5(a) に示すような同一距離にある点  $A, B$  における, ある変調周波数での計測値  $I_A(f)$  と  $I_B(f)$  の



(a) ターゲットからの反射光 (b) 霧による散乱光



(c) 計測値 (反射光+散乱光)

図 4 (a) 霧がないシーンで変調周波数を 2 倍にしたときの  $V$ . (b) 変調周波数を 2 倍にしたときの  $F$ . (c) 霧があるシーンで変調周波数を 2 倍にしたときの  $I$ . 霧からの散乱光は無数の散乱光の足し合わせであるため, 変調周波数を変えた時の計測される値は, 振幅は一定ではなく, 位相差は変調周波数に比例しない. そのため, 霧中での計測において従来の距離計測手法を用いることができない.

差分

$$\delta(f) = \|I_A(f) - I_B(f)\|_2 \quad (5)$$

に着目した. 霧の影響がない場合, 式 (5) は

$$\begin{aligned} \delta(f) &= \|V_A(f) - V_B(f)\|_2 \\ &= |r_A - r_B| \end{aligned} \quad (6)$$

と表される. ここで,  $V_A(f)$  と  $V_B(f)$  は変調周波数  $f$  で計測したときの点  $A, B$  に直接届いて ToF カメラで受光した光である. 図 5(b) のように計測値の回転移動として表示されることから変調周波数によらず計測値の差分  $\delta(f)$  は一定であることが分かる.

次に, 同一距離にある点  $A, B$  に影響する霧の濃度が同一であると仮定すると, 同一の霧の影響を受けているため, 式 (6) は

$$\begin{aligned} \delta(f) &= \|(V_A(f) + F(f)) - (V_B(f) + F(f))\|_2 \\ &= \|V_A(f) - V_B(f)\|_2 = |r_A - r_B| \end{aligned} \quad (7)$$

と表される. ここで,  $F(f)$  は変調周波数  $f$  で計測したときの, 霧によって散乱されて ToF カメラで受光した光の総和である. 図 5(c) に示すように, 霧による距離計測歪みは計測値の平行移動として表されるため, 霧の影響を受け

ても同一距離にある点の計測値の差分  $\delta(f)$  は一定である。つまり、複数の変調周波数を用いて計測したとき、2点間の計測値の差分が不変である場合、その2点は同一距離であるとみなせる。

一方、点  $A$  と距離の異なる点  $C$  に着目すると、霧がない場合の計測値の差分は

$$\begin{aligned}\delta(f) &= \|V_A(f) - V_C(f)\|_2 \\ &= \left\| r_A e^{i f \phi_A} - r_C e^{i f \phi_C} \right\|_2 \\ &= \sqrt{r_A^2 + r_C^2 - 2r_A r_C \cos \hat{f}(\phi_A - \phi_C)}\end{aligned}\quad (8)$$

となり、変調周波数  $f$  に応じて変化することが分かる。ただし、 $r_X, \phi_X$  は、それぞれ、点  $X$  における振幅と位相差である。

さらに、両点は距離に応じて異なる霧の影響  $F_A(f)$  と  $F_C(f)$  を受ける。  $d_A < d_C$  の場合、2点の計測値の差分は

$$\begin{aligned}\delta(f) &= \|(V_A(f) + F_A(f)) - (V_C(f) + F_C(f))\|_2 \\ &= \left\| V_A(f) - V_C(f) - \int_{d_A}^{d_C} s(x) e^{i f \varphi(x)} dx \right\|_2\end{aligned}\quad (9)$$

と表され、 $\delta(f)$  は変調周波数に応じて変化することが分かる。

以上のことから、複数の変調周波数における計測値の差分の変化に着目することで、任意の2点が同一距離に存在するかどうかを判定できる。本研究では複数の変調周波数において計測した差分  $\delta$  の標準偏差を用いてこれを判定する。ここでは単純に、

$$\sigma_{A,B} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\delta(f_k) - \bar{\delta})^2}\quad (10)$$

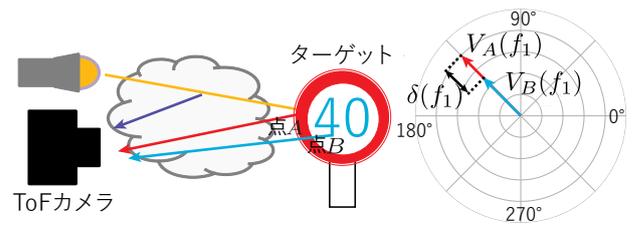
が予め定めておいた閾値  $t$  以下になる点を同一距離であるとみなし、クラスタリングする。

### 背景の除去

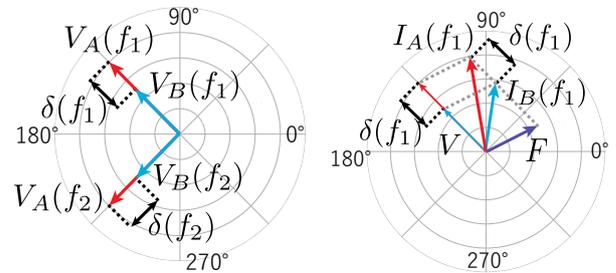
実際には、ToF カメラがとりうる変調周波数の範囲や計測精度の問題から、計測点が無限遠や計測可能距離を超えている場合に同一距離の判定ができない場合がある。図6に、2点  $A, B$  の距離を変えたときの標準偏差  $\sigma_{A,B}$  の変移の例を示す。2点の距離が同一の場合に標準偏差が0になっていること、および、点  $B$  が遠くなるほど  $\sigma_{A,B}$  も小さくなることを確認できる。計測点が遠方に存在する場合、計測値において霧からの散乱光  $F_\infty(f)$  が支配的となり、 $V = 0$  とみなせる。

このとき、式(6)は

$$\begin{aligned}\delta(f) &= \|I_A(f) - I_\infty(f)\|_2 \\ &= \|V_A(f) + F(f) - F_\infty(f)\|_2 \\ &= r_A + \epsilon(f)\end{aligned}\quad (11)$$

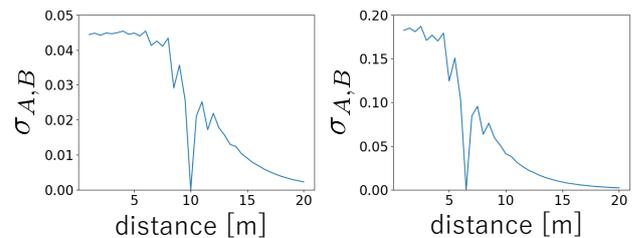


(a) 同一距離の2点間の差分  $\delta(f)$



(b) 異なる変調周波数における  $\delta(f)$  (c) 霧中における  $\delta(f)$

図5 同一距離の2点間の差分  $\delta(f)$  は異なる変調周波数で計測を行う場合においても、霧中で計測を行う場合においても不変である。



(a) 点  $A$ : 10m と点  $B$ : 1-20m (b) 点  $A$ : 6.5m と点  $B$ : 1-20m

図6 点  $A$  の距離を固定し、点  $B$  の距離を変えたときの標準偏差  $\sigma(A, B)$  の変移。点  $A$  と点  $B$  が同一距離にある場合  $\sigma(A, B)$  は0になるが、それ以外の距離では高い値となるため、2点が同一距離に存在するかどうかを判定できる。また、点  $B$  が遠くなると  $\sigma(A, B)$  が0に近付き、同一距離と誤認する可能性がある。

となる。ただし、 $\epsilon(f)$  は、距離  $d$  から無限大までに存在する霧の影響であり、実際のToF計測では微小となる。そのため、変調周波数を変更して計測した場合においても標準偏差が小さくなり、計測ノイズによる影響との分離が難しく、十分遠方にある点も同一距離の点の候補に含まれてしまう。

そこで本研究では、まず同一距離の判定を行い、その際に異なる距離であると判定された2点を用いて、遠方にある点か否かの判定を行う。明らかに距離の異なる2点それぞれに対して同一距離と判定されるような点は、上述のように、ターゲットまでの距離が計測可能範囲を超えており、霧からの散乱光のみを観測していると考えられる。このような点を背景とみなし、距離の推定に用いないこととした。

### 3.2.2 距離の推定

3.2.1節にて推定した同一距離の領域の中から異なる反射率の点に着目して距離の推定を行う。霧中における変調周



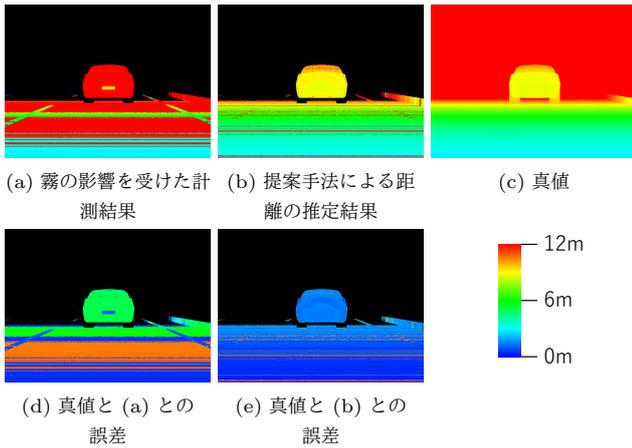


図 9 (a) 霧の影響を受けた計測結果と (b) 提案手法による距離の推定結果. (c) は真値. (d) と (e) はそれぞれの手法による距離推定結果の真値との誤差. 背景とみなした点は黒色で表示し, 距離推定には用いなかった.

での計測値を用いた.

計測値をそのまま用いて距離の計測を行った図 9(a) では, シーン全体で大きな距離計測歪みが起きていることが分かる. 一方, 提案手法を用いた図 9(b) では, 道路の一部で横筋状に大きく推定を間違えている箇所が見受けられるが, ほとんどの部分において正しい距離を推定できていることが分かる. 距離を誤った部分では, 距離の第 1 候補として誤った距離が挙げられ, 第 2 候補以下に正しい距離が存在していることが確認されている. この問題は, 使用する変調周波数の選択や数を増やすことにより, 改善が期待できる.

## 5. 人工的な霧を用いた実験

日本自動車研究所 (JARI: Japan Automobile Research Institute) 内にある特異環境試験場において人工的な霧を発生させ, 実験を行った. 人工的な霧の濃度は視程によって数段階に設定することが可能であり, 今回の実験では視程 80m に設定して実験を行った. ただし, 霧の濃度が場所によって偏っていたことが目視により確認されていた.

### 5.1 実験環境

本実験では Microsoft 社製の ToF カメラ (Kinect v2) を用いて, 反射率が異なる標識を模したコピー用紙を 50cm 四方のアクリル板に貼り付けたものと, 乗用車 1 台を図 1 に示すように配置し実験を行った. また, 同一距離の推定及び, 距離の推定に用いた変調周波数は共に 16, 80, 120MHz の 3 種類である.

### 5.2 実験結果

画像の各点から図 10 に示した赤点と同一距離と判定された点を図 11 に赤色で示す. 各点と同一距離とみなせる, ナンバープレートや模擬標識上が, それぞれで赤く表示さ

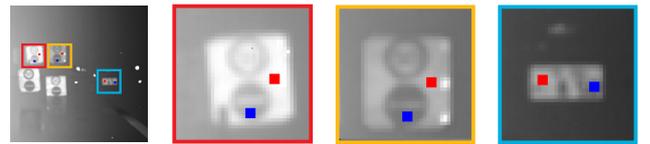


図 10 (a) 計測対象としたターゲット, (b) と (c) と (d) はターゲットの拡大図. 同一距離の推定には赤に示したピクセルを用いた. また, 距離推定には同一距離にあり反射率の異なる赤に示したピクセルと青に示したピクセルの 2 つを用いた.

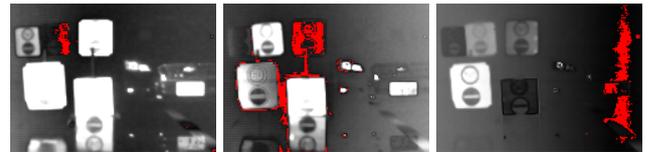


図 11 それぞれのターゲットにおける同一距離の推定結果. 図 10 に示した赤点と同一距離と推定された領域を赤色に示す.

れていることが分かる. 一方, 別の距離にある点でも赤く表示されてしまっていることや, ターゲット全体が赤くなっていないことが確認できる. この理由としては二つ考えられる. 一つめとして, 今回の実験では霧の濃度が場所により偏っており, 本研究の「同一距離にあるターゲットに影響する霧の濃度は同一である」という仮定が完全には満たされなかったことが考えられる. 二つめとして, 計測に用いた Kinect v2 は用いることが可能な変調周波数が 3 種類しかないため, 異なる距離の点を排除するのに不十分であった可能性がある.

次に, 図 10 で示したターゲットそれぞれの赤点と青点から距離の推定を行った. その結果を表 1 に示す. 計測値をそのまま用いて距離の推定を行うと大きく間違えることが分かる. また, 提案手法を用いることによって, 全てのターゲットにおいて十分に距離の推定ができていることを確認した.

ターゲット	計測値 (赤)	計測値 (青)	推定値	真値
A	3.952 m	0.202 m	7.699 m	7.771 m
B	3.213 m	4.463 m	7.232 m	7.236 m
C	7.172 m	2.780 m	6.474 m	6.655 m

## 6. おわりに

本研究では, ToF 計測において霧の影響を受けない正しい距離の推定手法を提案した. まず, 複数の変調周波数における計測値から, 同一距離にあるとみなせる領域を推定した. 次に, この領域内の異なる反射率の点の計測値を用いることで霧の影響を除去し, 正しい距離を推定した. この提案手法を検証するため, シミュレーションと実環境で実験を行い, 有効性を示した.

本手法の制限として、同一距離で単一の反射率のターゲットしか観測されない場合、正確な距離の推定が行えないという問題がある。しかし、車載カメラとしての応用を想定した場合、観測範囲には道路とその上の白線が観測されると想定されるため、同一距離に異なる反射率のものが散在する仮定が成り立ち、実質的には問題が起こらないと予想している。また、例えばクラスタ推定の際の標準偏差の閾値など、本手法ではいくつかのパラメータをシーンによって適切に設定する必要があり、これにより精度が左右される。

今後の展望として、パラメータをシーンごとに自動で決める仕組みを検討していく。また、実環境実験でのシーン全体でもクラスタ推定及び距離の推定を行い、提案手法の有効性を検証する。今回の実験では霧が安定しなかったためシーン全体を推定することは困難であった。そこで、霧が安定しないシーンにおいても用いることが可能になるように手法の改良を行っていく。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST JPMJCR1764、科研費 JP18H03265、ならびに株式会社小糸製作所の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Berman, D., Treibitz, T. and Avidan, S.: Non-Local Image Dehazing, *Proc. CVPR* (2016).
- [2] Cai, B., Xu, X., Jia, K., Qing, C. and Tao, D.: DehazeNet: An End-to-End System for Single Image Haze Removal, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 25, No. 11, pp. 5187–5198 (2016).
- [3] Chen, C.: Attenuation of Electromagnetic Radiation by Haze, Fog, Clouds, and Rain, *US Air Force Project Rand* (1975).
- [4] Dorrington, A. A., Godbaz, J. P., Cree, M. J., Payne, A. D. and Streeter, L. V.: Separating True Range Measurements from Multi-Path and Scattering Interference in Commercial Range Cameras, *SPIE 7864, Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement* (2011).
- [5] Fuchs, S.: Multipath Interference Compensation in Time-of-Flight Camera Images, *International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, pp. 3583–3586 (2010).
- [6] Godbaz, J. P., Cree, M. J. and Dorrington, A. A.: Closed-Form Inverses for the Mixed Pixel/Multipath Interference Problem in AMCW Lidar, *SPIE 8296, Computational Imaging X* (2012).
- [7] Gupta, M., Nayar, S. K., Hullin, M. B. and Martin, J.: Phasor Imaging: a Generalization of Correlation-Based Time-of-Flight Imaging, *ACM ToG*, Vol. 34, No. 5 (2015).
- [8] He, K., Sun, J. and Tang, X.: Single Image Haze Removal using Dark Channel Prior, *IEEE TPAMI*, Vol. 33, No. 12, pp. 2341–2353 (2011).
- [9] Heide, F., Xiao, L., Kolb, A., Hullin, M. B. and Heidrich, W.: Imaging in Scattering Media using Correlation Image Sensors and Sparse Convolutional Coding., *Optics express*, Vol. 22, No. 21, pp. 26338–50 (2014).
- [10] Henyey, L. and Greenstein, J.: Diffuse radiation in the Galaxy, *Astrophysical Journal*, Vol. 93, pp. 70–83 (online), DOI: 10.1086/144246 (1941).
- [11] Jimenez, D., Pizarro, D., Mazo, M. and Palazuelos, S.: Modelling and Correction of Multipath Interference in Time of Flight Cameras, *Proc. CVPR*, IEEE, pp. 893–900 (2012).
- [12] Kadambi, A., Schiel, J. and Raskar, R.: Macroscopic Interferometry: Rethinking Depth Estimation with Frequency-Domain Time-Of-Flight, *Proc. CVPR*, pp. 893–902 (2016).
- [13] Kirmani, A., Benedetti, A. and Chou, P. A.: Spumic: Simultaneous Phase Unwrapping and Multipath Interference Cancellation in Time-of-Flight Cameras using Spectral Methods, *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, IEEE, pp. 1–6 (2013).
- [14] 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, *IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications*, Vol. 9, No. 15 (2017).
- [15] Naik, N., Kadambi, A., Rhemann, C., Izadi, S., Raskar, R. and Bing Kang, S.: A Light Transport Model for Mitigating Multipath Interference in Time-of-Flight Sensors, *Proc. CVPR*, pp. 73–81 (2015).
- [16] Narasimhan, S. and Nayar, S.: Shedding Light on the Weather, *Proc. CVPR* (2003).
- [17] Nishino, K., Kratz, L. and Lombardi, S.: Bayesian Defogging, *IJCV*, Vol. 98, No. 3, pp. 263–278 (2012).
- [18] Satat, G., Tancik, M. and Raskar, R.: Towards photography through realistic fog, *Computational Photography (ICCP), 2018 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1–10 (2018).
- [19] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Funatomi, T., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Material Classification from Time-of-Flight Distortions, *IEEE TPAMI* (2018).
- [20] Wang, J., Bartels, J., Whittaker, W., Sankaranarayanan, A. C. and Narasimhan, S. G.: Programmable Triangulation Light Curtains, *The European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 19–34 (2018).
- [21] 鈴木大介, 田中賢一郎, 北野和哉, 船富卓哉, 向川康博: 極座標系の原点移動モデルを用いた ToF 計測における霧の影響除去, *情報研報 CVIM* 210 (2018).