

# 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

鈴木 大介<sup>1,a)</sup> 田中 賢一郎<sup>1</sup> 北野 和哉<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** 豪雨や霧などの悪天候下では視界が悪くなり、運転事故の原因になりうる。また、各種センサを利用する自動運転技術の中でも距離計測において大きな問題となっている。距離計測が行える Time-of-Flight カメラで霧中にある物体を計測すると、光が散乱するため見え方が不鮮明になるだけでなく、正しい距離の計測も行えなくなる。本研究では、同じ位置にある物体でも反射率によって異なる距離が得られてしまう現象に着目し、この距離の間違え方の違いを極座標系でモデル化することで、霧の影響を除去する手法を開発した。シミュレーションと実環境実験により、霧の影響を除去し、正しい距離を復元できることを確認した。

**キーワード:** Time-of-Flight カメラ, 鮮明化, 極座標系

## 1. 序論

自動車運転中などに豪雨や霧が発生すると周囲の視界が悪くなり、事故の原因となりうる。この問題は近年注目されている自動運転における周囲の状況理解にも悪影響を与える要因の一つとなっている。

自動運転では周囲の物体までの距離が特に重要であり、主にカメラやレーザを使用した高精度な距離計測への取り組みが盛んである。視差を用いて距離を計測するステレオカメラは古くから研究されており、カメラで撮影した色も組み合わせることで距離や物体認識の精度向上が見込まれている。しかし、カメラは本来距離を計測するための機材でないため、その精度はレーザを用いた計測方法に比べて低い。一方、レーザを利用した距離計測として LIDAR (Light Detection and Ranging) が多く用いられている。LIDAR は物体にレーザを照射し、反射した光を受光するまでの時間から物体までの距離を計測する。照射するレーザも近赤外光など人の目に見えない光を利用できるため、人間の視覚に対する影響を抑えることができる。ステレオカメラに比べて距離計測精度は高いことが利点として挙げられるが、原理的には 1 点の距離を計測する手法であり、周囲を計測するためには走査が必要となる。また LIDAR では、霧などの散乱体がある場合、散乱光が物体

からの反射光に混じることによって、距離計測の精度が低下するという問題点もある。

本研究では、1 点ではなく面で距離を計測することができる Time-of-Flight (ToF) カメラに着目する。ToF カメラは、LIDAR と同じく、カメラから照射した光が物体で反射して戻ってくるまでの時間差を求めることで距離を計測するため、LIDAR と同じく霧などによって距離を誤る問題が生じる。本論文では、霧などで起こる散乱光による距離計測の誤りと測定対象の反射率の関係性を利用することで霧の影響を除去し、正確な距離を推定する手法を提案する。また、シミュレーションと実環境での実験を通してその有効性を確認する。

## 2. 関連研究

霧や霏などの影響を除去し鮮明な画像を復元する手法は、コンピュータビジョン分野において活発に研究されており、いまなお改善の余地が大きい挑戦的な課題である。これまで多く採用されてきたアプローチは、Dark channel prior と呼ばれる、「多くの物体は RGB チャネルのうちどれか一つは反射率がゼロである」という事前知識を利用したものである [6], [13]。当然ながら、白やグレーの対象物体ではこの仮定が成り立たず、アーチファクトが発生する。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、色空間上で直線をなすことに着目した手法を提案している。しかしながら、色が劣化した不鮮明な画像から同じ色のクラスタリングを行うという別の難しい問題を

<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> suzuki.daisuke.rs9@is.naist.jp

含んでいる。また、ディープラーニングを用いて霧の影響を除去する手法 [14] も提案されているが、経験的知識に基づく出力でしかなく正しい距離を出力できる保証はない。そもそも、不鮮明な画像から鮮明な画像を復元することは不良設定問題であり、単一の RGB 画像から正確な距離や鮮明な画像を復元することは困難である。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光の振る舞いに基づいて明らかにし、物理モデルに基づいて正確な距離や鮮明な画像を復元することを目的としている。

ToF カメラの計測において、霧や相互反射など、複数の経路が混ざって計測される現象は「マルチパス問題」と呼ばれる。マルチパスは、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という問題である。ToF カメラにおけるマルチパス問題の解決を目指す研究は活発に行われており、2 回散乱までといった簡易な計測モデルを仮定したもの [2], [3], [4], [8], [12] や、パラメトリックモデルによるもの [7], [10], 干渉を用いるもの [9], 特殊なハードウェアの改造によるもの [11] など多数行われてきた。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。本研究は、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、より実用的な手法である。

### 3. ToF 計測における霧の影響と除去

人間の眼や通常のカメラで霧などの散乱体を通して物体を見ようとすると、光が散乱するため物体の見え方が不鮮明になる。ToF カメラを用いた計測の場合でも同様の影響を受けるため、振幅や位相が誤って測定され、推定される距離に誤差が発生する。本手法は霧中の物体を ToF 計測した際に得られるデータを極座標系で取り扱い、そのデータを使って霧の影響除去を行う。まず初めに、ToF 計測の原理と極座標表現について簡単に解説する。

#### 3.1 ToF 計測の原理と極座標表現

ToF カメラでは光を照射してから物体で反射して返ってくるまでの時間を計測することで、物体までの距離を求める。本研究では振幅変調した正弦波を照射する方式の ToF カメラを仮定する。図 1 のように照射された光は物体表面で反射してカメラに返ってくるまでに微小な時間差が発生するため、反射波は遅れて観測され、照射波の位相がずれたものになる。また物体によって反射率が異なるため、反射波の振幅も照射波に比べて小さくなる。ToF カメラはこれらの位相差と振幅を測定することができる。照射波の周波数を用いることで物体までの距離を算出することができ、振幅値から物体の明るさを求めることができる。

測定した振幅を半径、位相を角度とすることで ToF カメ

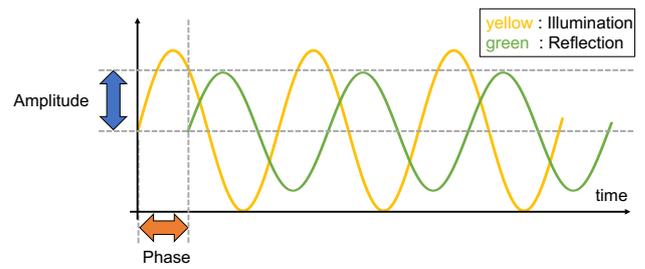


図 1 ToF カメラは、強度変調光を照射し、反射波の距離に応じた位相遅れと、反射率に応じた振幅の減衰を計測することができる。

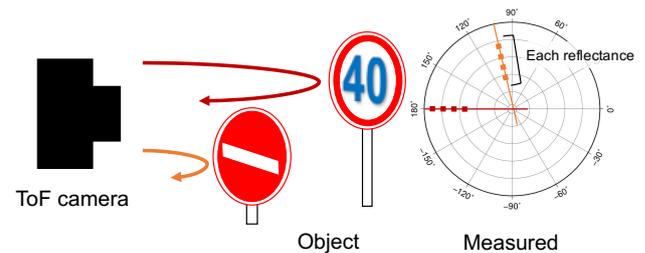


図 2 測定値の極座標表現。計測された位相を角度、振幅を半径として表現する。同じ距離にある物体は、反射率に応じて原点を中心とした直線上に乗る。

ラの測定値を極座標系におけるベクトルとして表現することができる [5]。計測された値  $I \in \mathbb{C}$  は

$$I = ae^{i\phi} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $a$  と  $\phi$  は、計測された振幅と位相、 $e$  はネイピア数、 $i$  は虚数単位である。計測対象までの距離が異なると、計測される位相もそれに合わせて変化し、反射率が異なると振幅値が変化する。道路標識のような、複数の反射率が同じ距離に存在する場合、図 2 のように、観測値は同じ角度に異なる半径の点群として表現され、各距離ごとの計測点を結ぶと、原点を通る直線となる。

#### 3.2 霧による影響

相互反射や散乱が存在するシーンを撮影すると、光源からカメラまで光が辿る軌跡が複数存在するため、ToF 計測が歪んでしまう「マルチパス」と呼ばれる問題が知られている。複数の異なる軌跡はそれぞれ異なる振幅と位相を持ち、それらを合成した波の振幅と位相が ToF カメラの計測値となる [15]。ToF カメラによる計測値  $I_{\text{distort}}$  は、すべての取りうる軌跡の和として

$$I_{\text{distort}} = \int_{p \in \mathcal{P}} a(p)e^{i\phi(p)} dp \quad (2)$$

と表される。ただし、 $a(p)$ ,  $\phi(p)$  はある軌跡  $p$  における振幅と位相、 $\mathcal{P}$  は取りうる軌跡の集合である。

霧中では、光は様々な深度で反射しカメラに到達する。距離  $d$  までに存在する霧の観測値  $F_d$  は、その間に存在す

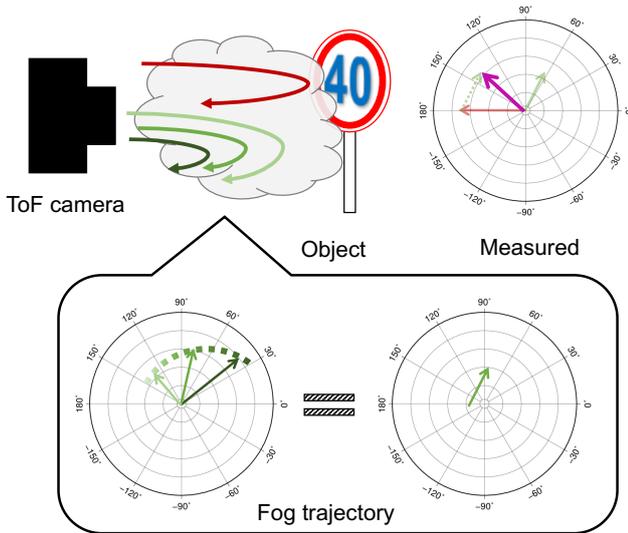


図 3 霧中での測定値と霧の影響

るすべての距離で反射した光の足し合わせであり、

$$F_d = \int_0^d a_{\text{fog}}(x) e^{i\phi_{\text{fog}}(x)} dx \quad (3)$$

と表される。ここで、 $a_{\text{fog}}(x)$  と  $\phi_{\text{fog}}(x)$  は、霧の内部のある距離  $x$  で反射した強度変調光の振幅と位相である。

次に、距離  $d$  に計測対象の物体が存在するとする。ToF による計測は、物体からの反射光と霧の影響の足し合わせであるため、観測  $I$  は

$$I = a_{\text{object}} e^{i\phi_{\text{object}}} + F_d \quad (4)$$

と表される。これは、図 3 に示すように、極座標系でのベクトルの足し合わせとして解釈することが可能である。この測定値は物体で反射する光に霧の影響が加わっているため、本来とは異なる振幅と位相になってしまう。また、反射率が異なる物体の計測に対しても同じ霧のベクトル  $F_d$  が足されるため、同一距離にあるにもかかわらず、反射率によって異なる位相が計測されてしまう。これが計測結果が歪む原因である。

### 3.3 極座標系の原点移動モデル

図 5 に示すように、距離の異なる物体を撮影した時の霧中での観測値  $I_1, I_2$  は

$$I_1 = a_{\text{object}1} e^{i\phi_{\text{object}1}} + F_{d_1} = V_{d_1} + F_{d_1} \quad (5)$$

$$I_2 = a_{\text{object}2} e^{i\phi_{\text{object}2}} + F_{d_2} = V_{d_2} + F_{d_2} \quad (6)$$

と表される。ここで、 $V_d$  は距離  $d$  における物体のベクトルである。霧はそれぞれの物体の距離まで存在するため、距離の異なる物体の観測値  $I$  にはそれぞれ異なる霧の影響  $F_d$  を受けている。

本研究では詳細な霧の反射モデルに基づいてはいないが、もっとも簡単な単一散乱モデルを仮定した場合、霧の

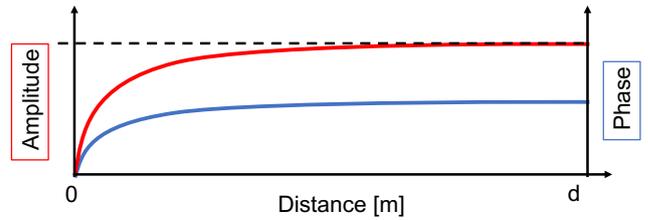


図 4 各距離  $d$  における霧からの観測値  $F_d$  の応答。赤線が振幅、青線が位相。

反射強度  $a_{\text{fog}}$  は図 4 のように距離に対して劇的に減少する。そのため、物体までの距離  $d$  が一定以上ならば、霧の観測値  $F$  はほぼ一定とみなすことができる。ここで霧の観測値  $F_{d_1}$  と  $F_{d_2}$  に注目し、 $d_1$  と  $d_2$  がこの条件を満たしているとする、 $F_{d_1} \approx F_{d_2}$  となり、 $F_{d_1} = F_{d_2} = F$  としたとき、式 (5) と式 (6) より

$$I_1 = V_{d_1} + F \quad (7)$$

$$I_2 = V_{d_2} + F \quad (8)$$

となる。これは観測  $I_1, I_2$  は、物体の観測値  $V_{d_1}, V_{d_2}$  が極座標系で  $F$  だけ平行移動したものであることを表している。つまり、霧が発生していなかった計測値が全体的に平行移動しており、複素数平面の原点が移動しているときとみなすことができる。我々は、これを「極座標系の原点移動モデル」と呼ぶ。

### 3.4 霧の影響除去

極座標系の原点移動モデルに基づくと、霧の影響  $F$  を求め、歪んだ計測値を  $-F$  だけ平行移動させることで、霧の影響を除去した物体の観測値を得ることができる。霧の影響  $F$  の求め方には複数の方法が考えられる。一つは、シーン中の反射率が 0 の領域を利用する方法であり、もう一つは、同一距離にある異なる反射率の領域を利用する方法である。以下にそれぞれの詳細を述べる。

反射率が 0 の領域を利用する方法：

シーン中には様々な反射率の物体が混在するが、反射率が 0、すなわち黒色物体がどこかには映っていると仮定できれば、霧の影響  $F$  は簡単に特定することができる。反射率が 0 の部分は光を照射しても反射しないため本来は観測値  $V$  は 0 になる。しかし、霧を通すことで霧の観測値  $F$  が追加されるため、反射率 0 の部分の観測値  $I$  を霧の観測値  $F$  とすることができる。この値を利用することで霧の影響除去を行うことができる。

しかしながら、反射率 0 の物体が必ず画像中に存在するとは限らず、存在していたとしても、撮影画像のどの領域に存在するのかが判定することは難しい。そのため、本研究の実験ではこのアプローチは採用しない。

同一距離にある異なる反射率の領域を利用する方法：

同じ距離に異なる反射率の物体が存在する場合、それら

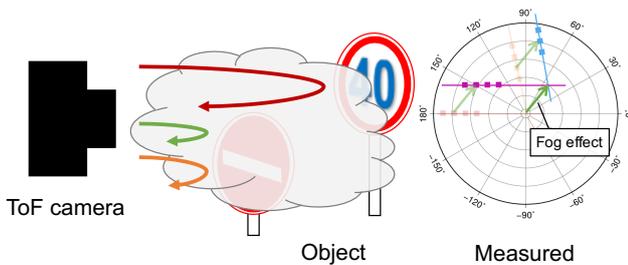


図 5 複数の反射率を利用した霧の影響特定

を複数用いることで霧の影響  $F$  を推定可能である。看板や道路上の白線とアスファルトなど、異なる反射率の物体が同一距離に存在することは多い。この仮定は反射率 0 の物体の存在を仮定するよりもはるかに現実的である。

霧が存在しない時、同じ距離にある異なる反射率を持つ物体を測定した際に得られる値は図 2 のように原点を通る直線上に並ぶ。物体までの距離を変更しても同じ現象となることから、各距離ごとの直線の交点は原点となる。極座標系の原点移動モデルでは、計測値はもとより、この直線の交点についても等しく霧の影響  $F$  だけ平行移動している。

これらのことから、霧中で異なる距離にある複数の反射率を持つ物体を測定し、各距離で測定した値を通る直線とそれらの交点を求める。その交点が、霧の影響  $F$  によって平行移動した原点であるため、霧の影響  $F$  を推定することができる。直線の交点は少なくとも 2 セットの距離において異なる反射率の異なる 2 点、合計 4 点の計測値を用いることで推定することができる。また、推定に利用する測定点の数を増やしていくと、ノイズに頑健な推定が可能であると考えられる。

推定した霧の影響  $F$  を用い、歪んだ計測値を  $-F$  だけ平行移動させることで、霧の影響を除去した物体の観測値を得ることができる。霧の影響  $F$  は、3.3 節の条件を満たしている箇所において共通しているため、一度  $F$  を推定すれば、すべての画素において霧の影響を除去した計測値を復元することができる。

#### 4. シミュレーションによる検証

提案手法の有効性を確認するために、シミュレーションによる検証を行った。

##### 4.1 実験環境

霧中にある物体に対して ToF 計測を行った際に得られる値をシミュレートするソフトを作成した。シミュレーションに必要なパラメータとして、照射する強度変調光の周波数、カメラから物体までの距離、対象物体の反射率、霧の散乱係数、霧の消滅係数を設定した。これらの値を与えることによって、ToF カメラが計測する振幅値と位相値、位相値から算出された物体までの距離を出力する。

シミュレーションでは、霧の単一散乱モデルに基づきレンダリングを行った。また、ToF カメラの光源は点光源モデルを採用した。距離  $x$  で反射する光の観測強度  $a_{\text{fog}}(x)$  は、

$$a_{\text{fog}}(x) = \frac{I_0}{x^2} \beta e^{-2\sigma x} \quad (9)$$

と表される。ここで、 $I_0$  は光源の放射強度、 $\beta$  は霧の散乱係数、 $\sigma$  は霧の消滅係数である。観測される霧の計測はすべての距離における反射光の積分値であるため、

$$F_d = \int_0^d a_{\text{fog}}(x) e^{4\pi i \omega x / c} dx \quad (10)$$

と表される。ここで、 $\omega$  は ToF の強度変調の周波数、 $d$  は物体までの距離、 $i$  は虚数単位、 $c$  は光の速度である。最後に、計測値  $I$  は物体の反射光と霧の影響の足し合わせであるため、

$$I = F_d + \frac{I_0}{d^2} e^{-2\sigma d} r \quad (11)$$

と表される。ここで、 $r$  は物体の反射率である。

今回の検証では、照射する光の周波数を 20MHz、霧の散乱係数を  $1.28 \text{ mm}^{-1}$ 、消滅係数を  $1.31 \text{ mm}^{-1}$  と設定し、カメラから 2.0m と 3.0m の位置に反射率が 0.2 と 0.7 の物体を設置し、計 4 つの物体に対して計測を行う環境を想定した。

##### 4.2 シミュレーション結果

測定対象のパラメータとシミュレーションによって得られた各物体の計測値と、そこから霧の影響を取り除いた結果を極座標表現したものを図 6 に示す。

図 6 から、計測値を霧の影響である  $F$  の逆方向に平行移動することで推定値となる。各距離における計測値を通る直線は原点を通らず、霧の影響を受けていること、推定値を通る直線は原点付近を通る直線となり、霧の影響が除去できていることがわかる。

測定対象のパラメータとシミュレーションによって得られた各物体の距離計測値と、そこから霧の影響を取り除いた結果を表 1 に示す。

表 1 より、ToF カメラが計測した距離は物体の位置と異なるものとなった。また、同じ位置にあるはずの物体も反射率ごとに異なる距離として計測されていることがわかる。また、この計測値に対して本手法を適用することによって、真値とほぼ同等の距離が推定されていることが確認できた。計測値と霧の影響除去を行った値を極座標表現したものを図 6 に示す。

表 1 でシミュレーションにおける距離の推定値と真値にわずかな誤差が発生している。この誤差の原因として 3.3 節にあるように、実際には距離によって霧の影響が異なるのに対し、本手法では場所によらず霧の影響が同一である

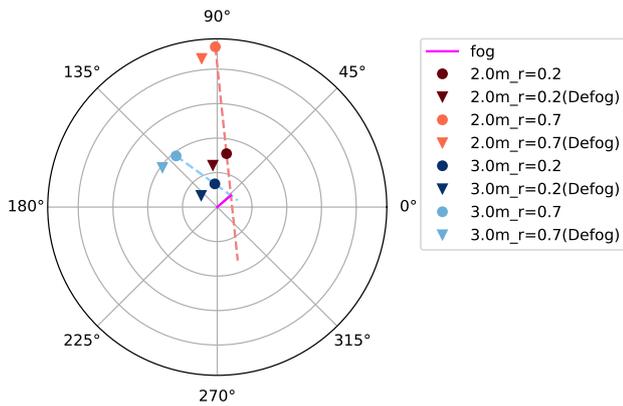


図 6 シミュレーション結果の極座標表現

表 1 シミュレーションで得られた各物体ごとの距離

真値 [m]	反射率	計測値 [m]	推定値 [m]
2.0	0.2	1.67	1.99
	0.7	1.89	1.99
3.0	0.2	1.98	3.00
	0.7	2.69	3.00

と近似していることが考えられる。しかし、ごく微小な誤差であるため、概ね正しい距離が推定できたといえる。

## 5. 模擬環境実験

次に実際に ToF カメラを用いた実環境での検証を行った。まずは、農業用フィルムを霧とみだてて、簡易的な実験を行った。この農業用フィルムは半透明で薄く白濁しているため、フィルムを通すことで霧がかかった場合に似た画像を撮影することができる。

実験には、Texas Instruments 社製の ToF カメラ (OPT8241-CDK-EVM) を使用した。この ToF カメラは照射波形の周波数を任意に設定することができ、本研究では 50MHz に設定し撮影を行った。測定対象は複数の反射率が必要になるため、黒から白までの 8 段階のグラデーションパターンをコピー用紙に印刷したものと光吸収シートを用意し、カメラから 2m と 2.4m の位置に設置した。農業用フィルムは、図 8 に示すように 2 枚のフィルムをカメラから 0.6m と 1.2m の位置に設置した場合、1 枚のフィルムをカメラから 0.6m に設置した場合、フィルムを設置しなかった場合の 3 条件で測定を行った。

### 5.1 実験結果

測定した振幅値と位相値を画像化した結果を図 9, 10, 11 に示す。振幅画像においてグラデーションパターンが現れており、各色の部分で反射率が異なることがわかる。位相画像についてはフィルムがない状態において、各距離の対象物体の位相は反射率に関係なく同一のものとなっている。しかし、フィルムを追加することで位相画像中でもグラデーションパターンが確認されるようになり、同一距離

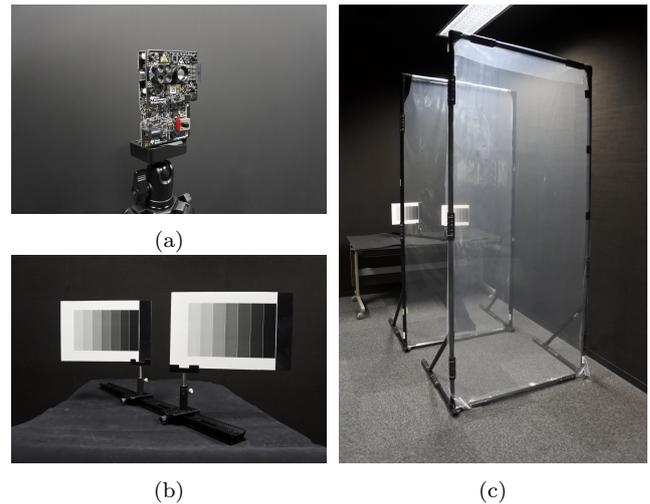


図 7 測定環境。(a) ToF カメラ (Texas Instruments 社製 OPT8241-CDK-EVM)。(b) 測定対象。(c) フィルム 2 枚時の測定風景

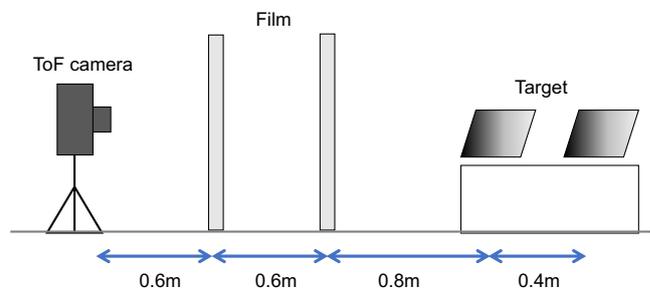


図 8 実験環境

でも反射率によって位相が異なることを確認できる。

対象物体上のほとんどで上記の現象が確認されたが、対象物体右端の黒い部分のみフィルムがない状態でも位相が異なっていることが確認できる。これは反射率が低すぎたため、反射光が極端に小さくなってしまい、正確な測定ができなかったためと考えられる。

同一距離にある異なる反射率の箇所で位相の変化を確認できた図 10, 11 に対し、提案手法を適用することでフィルムの影響除去を行った。フィルムがない状態での計測値と提案手法の結果を極座標表現したものを図 12 に示す。フィルムがある状態における計測値は位置直線上に並んでいるが原点を通っておらず、フィルムの影響を受けていることがわかる。各距離における計測点を通る直線の交点からフィルムの影響を求め、その影響を除去した推定値は原点を通る直線上に並んでいるように見え、フィルムのない状態の計測値とほぼ同じような位相値であるようにみえる。各条件における計測値と推定値の位相から算出した距離と、フィルムなしにおける計測値を真値として比較した結果を表 2, 3 に示す。

表 2, 3 から、対象物体までの距離と真値としたフィルムなしにおける距離には多少誤差はあるものの、ほぼ同じ値を計測することができている。しかし、フィルムが存

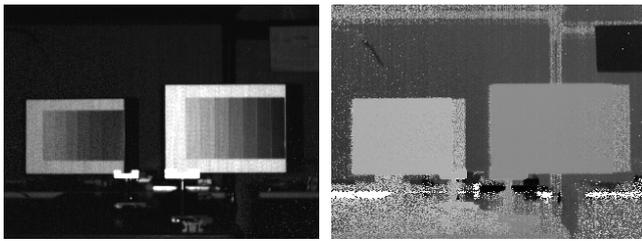


図 9 フィルムなしにおける (a) 振幅画像, (b) 位相画像

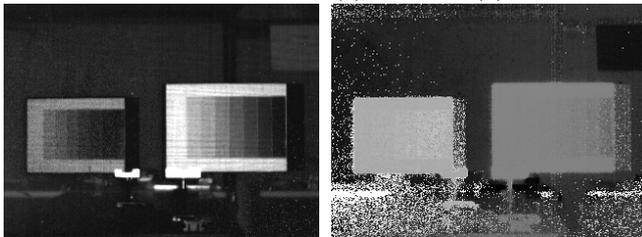


図 10 フィルム 1 枚における (a) 振幅画像, (b) 位相画像

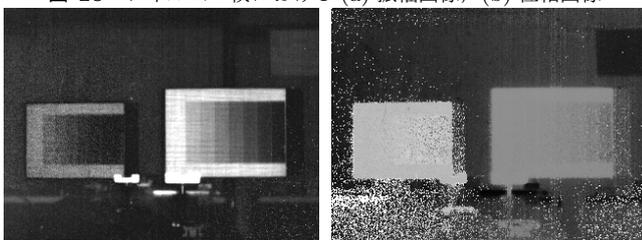


図 11 フィルム 2 枚における (a) 振幅画像, (b) 位相画像

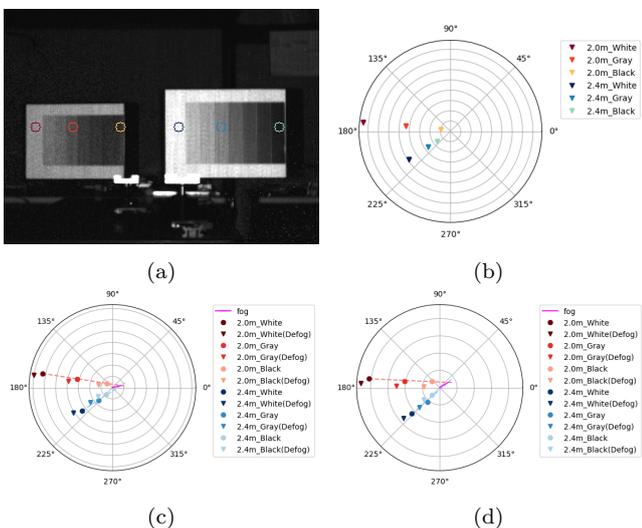


図 12 (a) 推定に用いたデータ点, (b) フィルムなし, (c) フィルム 1 枚, (d) フィルム 2 枚における計測値と推定値の極座標表現

在すると反射率ごとに計測値は変化してしまう。本手法によって推定した距離は真値と比較すると、各反射率、距離ごとに近い値になっており、フィルムの影響を除去することができている事が示された。

図 12 において、フィルムがある状態での計測点が一直線上に並んでいない。これは反射率による計測値のゆらぎ

表 2 フィルム 1 枚時の計測値と本手法による推定値。真値はフィルムがない状態での計測値。

対象物体	計測値 [m]	推定値 [m]	真値 [m]	
近く	white	2.00	2.03	2.05
	gray	1.99	2.03	2.05
	black	1.78	2.02	2.02
遠く	white	2.41	2.37	2.39
	gray	2.46	2.38	2.40
	black	2.51	2.37	2.41

表 3 フィルム 2 枚時の計測値と推定値

対象物体	計測値 [m]	推定値 [m]	真値 [m]	
近く	white	2.04	2.08	2.05
	gray	2.01	2.09	2.05
	black	1.77	2.07	2.02
遠く	white	2.46	2.44	2.39
	gray	2.52	2.47	2.40
	black	2.46	2.42	2.41

やノイズの影響が原因と考えられる。そのため、実環境における計測では反射率を数種類用意してノイズの影響を小さくするとともに、暗すぎる物体を測定しないなどの対策が必要になる。今回の解析では最小二乗法による直線近似を行ったが、真値に近い値を推定できたため、大きな問題はないと考えられる。

## 6. 人工的な霧を用いた実験

人工的に降雨や霧を発生することができる日本自動車研究所 (JARI : Japan Automobile Research Institute) の特異環境試験場において、実際の霧に近い環境での計測実験を行った。

### 6.1 実験環境

本実験でも 5 章と同じ Texas Instruments 社製の ToF カメラ (OPT8241-CDK-EVM) を使用し、反射率の異なる色をコピー用紙を 50cm 四方のビニル板に貼り付けて、図 13 のように設置した。

発生させることができる人工霧は視程で濃度を設定することができ、今回の解析では晴れ、視程 80m, 60m の条件における 6.0m と 7.0m の物体を対象とし、50MHz のデータを使用した。

### 6.2 実験結果

測定した振幅値と位相値を画像化した結果を 図 14, 15, 16 に示す。5.1 節と同様に、霧が発生することで同じ距離にある物体でも反射率ごとに位相が異なっていることを確認できる。車のナンバープレートでも位相の変化が確認されたが、道路標識では位相の変化は視認できなかった。これは、計測が白飛びしていることと、標識の近赤外での反射率の差が小さい可能性が考えられる。

同一距離にあり、反射率の異なる箇所でも位相が確認でき

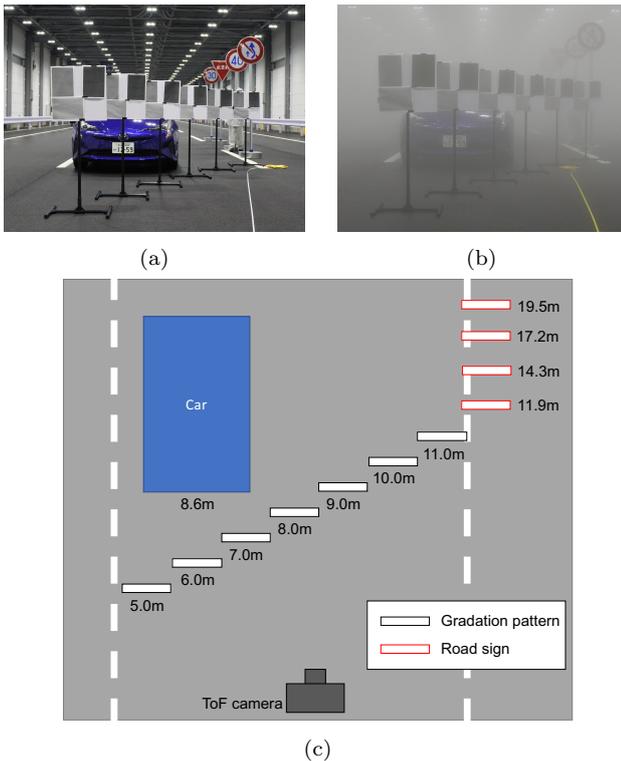


図 13 測定対象と実験風景. (a) 晴れ時と (b) 視程 60m 時の測定対象. (c) カメラと各対象物体までの位置関係.

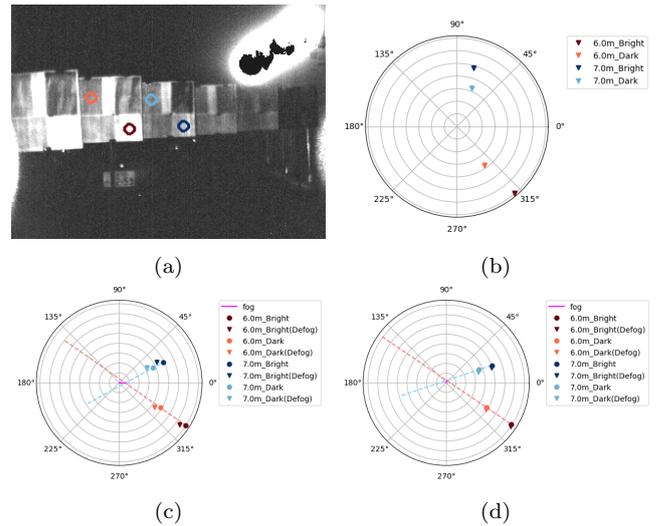


図 17 (a) 推定に用いたデータ点. (b) 霧なし, (c) 視程 80m, (d) 視程 60m

表 4 視程 80m 時の計測値と本手法による推定値. 真値は霧がない状態での計測値.

対象物体		計測値 [m]	推定値 [m]	真値 [m]
左から 2 番目	Bright	5.72	5.71	5.59
	Dark	5.74	5.71	5.54
左から 3 番目	Bright	6.21	6.24	6.62
	Dark	6.20	6.24	6.57

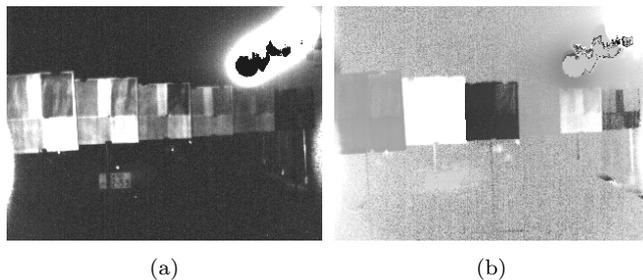


図 14 霧なしにおける (a) 振幅画像, (b) 位相画像

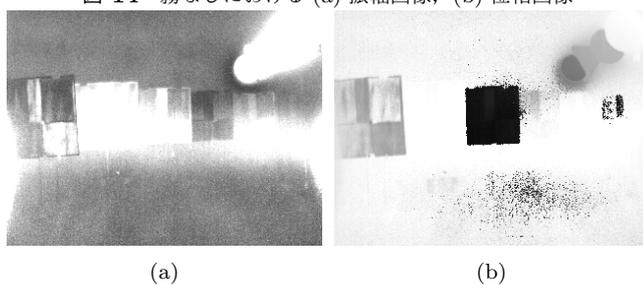


図 15 視程 80m における (a) 振幅画像, (b) 位相画像

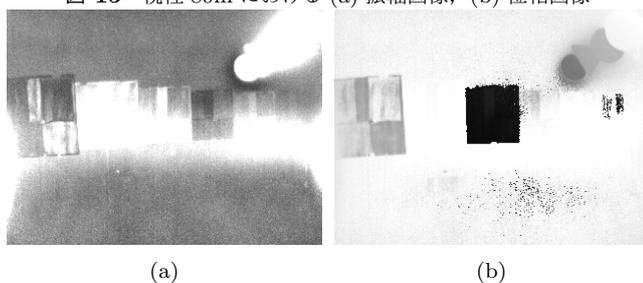


図 16 視程 60m における (a) 振幅画像, (b) 位相画像

表 5 視程 60m 時の計測値と推定値

対象物体		計測値 [m]	推定値 [m]	真値 [m]
左から 2 番目	Bright	5.73	5.71	5.59
	Dark	5.74	5.71	5.54
左から 3 番目	Bright	6.18	6.16	6.62
	Dark	6.18	6.16	6.57

た 図 15, 16 のビニル板に対し, 提案手法を適用することで霧の影響除去を行った. 各条件における計測値と測定値を極座標表現したものを 図 17 に示す. 晴れ時の計測値と霧発生時の計測値, 霧の影響を除去した推定値は大きく異なった値となっていることがわかる. これらの計測値と推定値の位相値から算出した距離を表 4, 5 に示す. 表 4, 5 から, 霧発生時の計測値は真値に対して異なったものになっており, 霧の影響を除去した推定値ではほとんどの場合で真値に近づいた値になっていることが示されている.

霧の影響を除去した値は計測値に比べて真値に近い値を推定できていたが, 5.1 節に比べて, 精度が低くなっている. これは, 解析対象における反射率ごとの位相の違いがあまり出ていないことが原因だと考えられる. 図 15, 16 より, 霧発生時における計測値が各距離ごとに原点付近を通る直線上に並んでおり, 霧の影響が非常に小さいことが考えられる.

## 7. 結論

本研究では, ToF 計測における霧の影響除去手法を提案

した。霧中における ToF 計測は、マルチパスによって正しい距離計測が行えなくなる。本手法では、霧の影響によって反射率ごとに計測値が変化する点に着目することで、その影響を特定した。シミュレーションと実環境実験による検証で特定した影響を取り除き、その有効性を示した。

本手法の制限として、選択する計測値が同じ距離にあることが既知であることがあげられる。今回の実験では、散乱体がない鮮明な画像から同じ距離にある異なる反射率の計測点を複数個選択した。しかし、霧中などの不鮮明なデータの場合、どの計測点が同じ距離であるかがわからないため、影響除去を行うことができない。物体までの距離や反射率が既知である必要はないため、解析の難易度は低い解決策の検討が必要であると考えている。

今後は上記にある問題点を解決するために、道路上の白線や標識などを利用するデータの解析を行う。また、照射波の周波数に注目した解析方法を考えている。本研究で使った ToF カメラは照射波の周波数を変更することができるため、周波数ごとにおける応答を利用することで、精度の向上などが見込めると考えている。また、本稿では距離計測誤りのみに着目した検討だったが、減少してしまった輝度値の復元についても今後の展望としている。

謝辞 本研究の一部は、科研費 JP17H06865、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] 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).
- [3] Fuchs, S.: Multipath Interference Compensation in Time-of-Flight Camera Images, *International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, pp. 3583–3586 (2010).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Kadambi, A., Schiel, J. and Raskar, R.: Macroscopic Interferometry: Rethinking Depth Estimation with Frequency-Domain Time-Of-Flight, *Proc. CVPR*, pp. 893–902 (2016).
- [10] 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).
- [11] 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, *IPSS Transaction on Computer Vision and Applications*, Vol. 9, No. 15 (2017).
- [12] 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).
- [13] Nishino, K., Kratz, L. and Lombardi, S.: Bayesian De-fogging, *IJCV*, Vol. 98, No. 3, pp. 263–278 (2012).
- [14] Rahadiani, L., Sakaue, F. and Sato, J.: Depth Estimation for Hazy Images using Deep Learning, *Proc. ACPR* (2017).
- [15] 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. CVPR* (2017).