

反射率ごとの Time-of-Flight 計測の変化に着目した 霧の影響除去

鈴木 大介^{1,a)} 北野 和哉^{1,b)} 田中 賢一郎¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要

Time-of-Flight カメラで霧中の物体を計測すると、光の散乱によって撮影画像が不鮮明になるだけでなく、正しい距離計測が行えなくなる。本研究では、同じ距離にある物体でも、反射率によって異なる距離として計測してしまう現象に着目し、極座標表現を利用して霧の影響を特定する。模擬環境実験として、半透明フィルムを霧とみなして計測したデータに対し、本手法を適用させて鮮明化と距離の推定を行ったところ、真値に近い結果が得られた。

1. 序論

車の走行中に豪雨や霧が発生すると周囲の視界が不鮮明になり、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である。霧は小さな水滴が大気中に浮遊する現象であるため、浮遊した水滴が光を散乱することで視界を不鮮明にする。

自動運転では事故を回避するために、周囲の物体との距離情報が特に重要とされている。そのため、カメラやレーザなどを使用した高精度な距離計測への取り組みが盛んになっている。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。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。ステレオカメラに比べて計測精度は高いが、原理的には空間中のある 1 点の距離を計測する手法であり、空間全体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、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、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、霧などによって距離計測を誤る問題が生じる。本論文では、霧などで発生する散乱光による距離計測の誤りと計測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、鮮明化と正確な距離を推定する手法を提案する。また、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

霧などの影響を除去し鮮明な画像を復元する手法は、CV 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 [1]。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。本研究では、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、鮮明な画像や正確な距離を復元することを目的としている。

ToF 計測において、霧による散乱や相互反射など、複数の異なる経路を通る光が混ざることによって計測を誤ってしまう現象を“マルチパス問題”という。ToF カメラにおけるマルチパス問題を扱う研究は活発に行われており、簡易な計測モデルを仮定したもの [3] や特殊なハードウェアの改造によるもの [2] 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るが、霧の影響を受けたシーンでは物体の反射率によって距離計測を誤る ToF カメラの特性を利用したユニークなアプローチである。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ことから、従来研究と比較して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

霧を通して物体を見ようとすると、光の散乱によって見え方が不鮮明になるだけでなく、ToF カメラでは距離の計

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} suzuki.daisuke.rs9@is.naist.jp

^{b)} kitano.kazuya.jy9@is.naist.jp

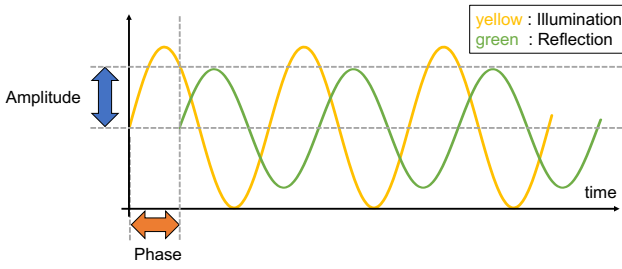


図 1 ToF カメラは、強度変調光を照射し、反射波の距離に応じた位相遅れと、反射率に応じた振幅の減衰を計測することができる。

測も誤ってしまう。本手法は霧中の物体を ToF カメラで計測した際に得られるデータを極座標系で取り扱い、霧の影響除去を行う。まず初めに、ToF カメラによる計測の原理と極座標表現について述べる。

3.1 ToF カメラによる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。ToF カメラから照射された光は物体表面で反射して返ってくるまでに微小な時間差が発生するため、図1のように照射波の位相がずれたものが観測される。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計測することができる。照射波の周波数と位相差から物体までの距離、振幅値から物体からの反射光の強度を求めることができる。

計測した振幅を半径、位相を角度とすることで ToF カメラの計測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。計測値 $I \in \mathbb{C}$ は

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

と表される。ここで、 a と ϕ は、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。反射率が異なる複数の物体が同じ距離に存在する場合、図2のように、計測値は同じ角度で異なる半径の点群として表現され、同じ距離の計測点を結ぶと、原点を通る直線となる。

3.2 霧による影響

相互反射や散乱が発生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、距離計測を誤ってしまう“マルチパス”と呼ばれる問題が知られている。光が辿る経路によってそれぞれで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 [4]。

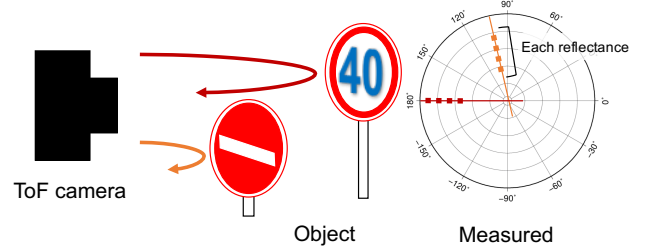


図 2 計測値の極座標表現。計測された位相を角度、振幅を半径として表現する。同じ距離にある物体は、反射率に応じて原点を中心とした直線上に乗る。

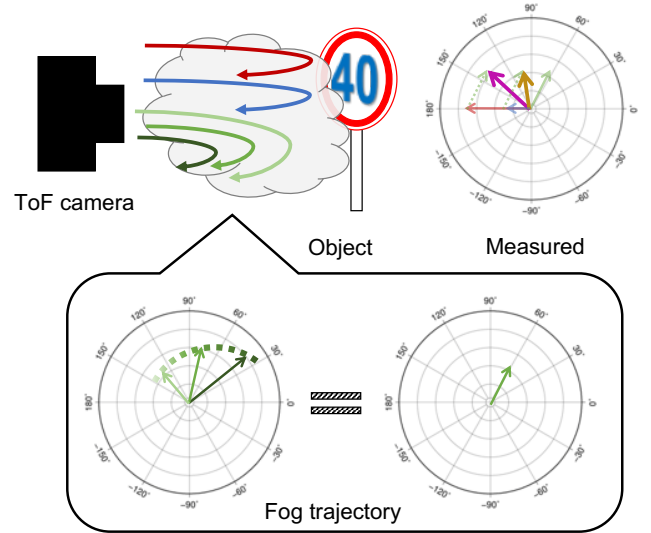


図 3 霧中での計測値と霧の影響

霧中では、光が様々な距離にある粒子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、

$$F_d = \int_0^d a_{\text{fog}}(x) e^{i\phi_{\text{fog}}(x)} dx \quad (2)$$

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 で反射した光の振幅と位相である。

同じシーンで距離 d に計測対象の物体が存在するとすると、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となるため、計測値 I は

$$I = a_{\text{obj}} e^{i\phi_{\text{obj}}} + F_d \quad (3)$$

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。この計測値 I 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距離として計測されてしまう。

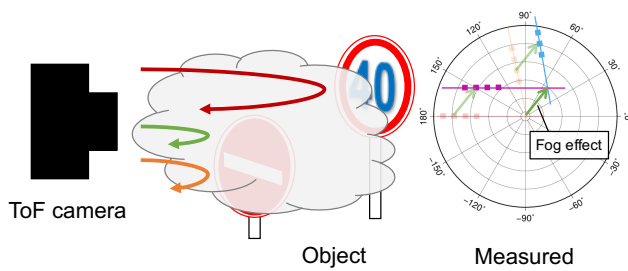


図 4 複数の反射率を利用した霧の影響特定

3.3 霧の影響除去

極座標系において幾何的に解釈すると、計測値は物体から反射する光と霧で反射する光のベクトルの和として表現されるため、計測値を $-F_d$ 方向に移動させることで、正しい値を求めることができる。本手法では、同一距離にある異なる反射率の領域を利用することで霧の影響 F_d を特定し、その影響の除去を試みる。

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計測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結果となることから、各距離の直線の交点は原点となる。霧が発生すると、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_d だけ平行移動して計測される。

このことから、霧中で同一距離にある複数の反射率を持つ物体を複数計測し、各距離で計測した値を通る直線を算出し、とそれらの交点を求めると、霧の影響 F_d を推定することができる。少なくとも異なる2つの距離で、複数の反射率領域の計測値を用いることで推定を行うことができる。推定に利用する計測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_d を用い、歪んだ計測値を $-F_d$ 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。

4. 模擬環境実験

半透明フィルムを霧とみなして、ToF カメラを使った簡易的な実験を行った。この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光が散乱し、霧がかかったような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。計測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。半透明フィルムは、図6に示すように設置し、フィルムなしとフィルム2枚時の計測値について解析を行った。

4.1 実験結果

計測した振幅値と位相値を画像化した結果を図7, 8に

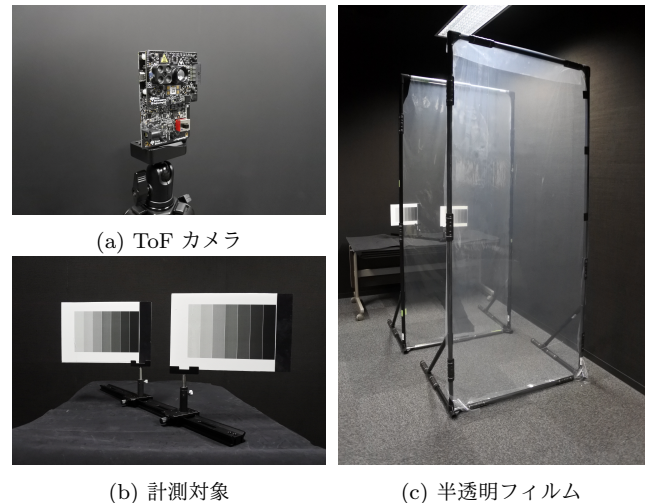


図 5 使用機材. (a) ToF カメラ (Texas Instruments 社製 OPT8241-CDK-EVM). (b) 計測対象. (c) フィルム2枚時の測定風景

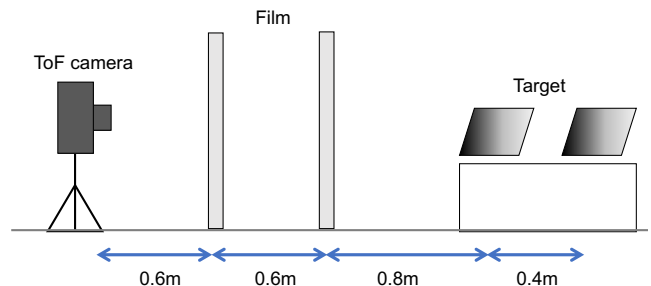


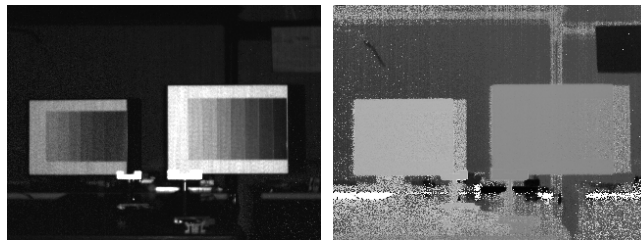
図 6 実験環境

示す。

各条件における計測結果の振幅画像は、対象物体上にグラデーションパターンが現れており、各領域で反射率が異なっていることがわかる。フィルムの影響によって、輝度値に変化があると考えられたが、フィルムの有無による振幅値の変化は画像からでは確認することができない。位相画像についてはフィルムがない状態において、各距離の対象物体は反射率に関係なく同一の値となっている。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、同一距離でも反射率によって位相が異なっていることが確認できる。

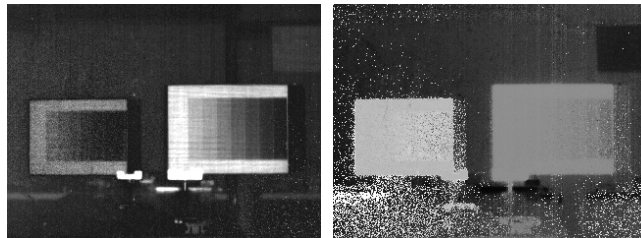
反射率によって位相が変化したデータに対して、提案手法を適用し、フィルムの影響除去を行った。フィルムの影響を除去した振幅値、位相値の画像を図9、除去前と除去後の値の極座標表現を図10、振幅値と位相値を明るさと距離に変換し、フィルムなしにおける計測値を真値とした数値比較を表1に示す。

図9をみると、振幅画像については真値となるフィルムなしやフィルム2枚時の画像とほぼ違いはない。位相画像については、フィルム2枚時の計測において対象物体上で反射率ごとに異なる値となっていた領域が、フィルムの影響除去を行うことで一様な値になっており、真値となる



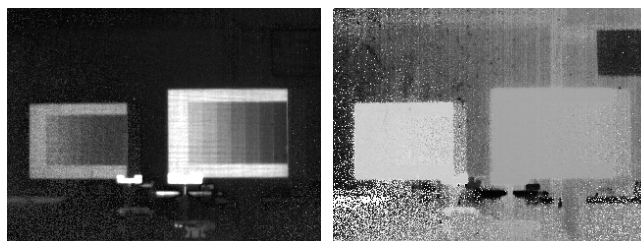
(a) 振幅画像 (b) 位相画像

図 7 フィルムなしにおける計測結果



(a) 振幅画像 (b) 位相画像

図 8 フィルム 2 枚における計測結果



(a) 振幅画像 (b) 位相画像

図 9 フィルムの影響除去結果

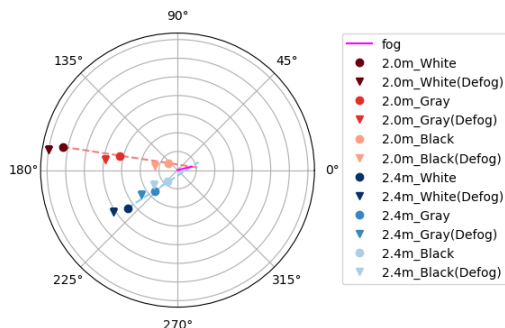


図 10 フィルム 2 枚時の計測値と除去結果の極座標表現

表 1 フィルム 2 枚時における真値と推定値の比較

設置位置	対象色	明るさ誤差 [%]		距離誤差 [m]	
		計測値	推定値	計測値	推定値
2.0m	White	51.4	46.0	-0.01	0.03
	Gray	52.8	42.5	-0.04	0.04
	Black	39.3	2.3	-0.25	0.05
2.4m	White	55.3	43.8	0.07	0.03
	Gray	58.7	37.9	0.12	0.07
	Black	63.7	29.3	0.05	0.01

フィルムなしにおける画像とほぼ同じものになっていることがわかる。

また、図 10 における極座標表現は丸が計測値、三角が除去結果を示している。実験結果より、反射率によらず正確

な距離推定がされていることから、フィルムの影響を除去した距離推定が可能であると考えられる。

表 1 の明るさの比較は、真値であるフィルムなし時の計測値に対する各値の誤差割合を示しており、値が小さいほど真値に近いものとなっている。フィルムの影響除去を行っていない計測値よりも、フィルムの影響除去を行った推定値の方が誤差が小さいことから、真値に近い値を求めることができていることがわかる。特に、反射率の低い領域ほど真値に近い値を推定することができている。同じく距離誤差は、真値との距離比較を行っており、真値よりも近い値の場合は負の値となっている。距離についても、ほとんどの領域において誤差が小さくなっており、正確な距離が推定されていることがわかる。

5. 結論

本研究では、ToF カメラによる計測における霧の影響除去手法を提案した。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、模擬環境実験による検証で有効性を示した。

本手法の制限として、同じ距離にある異なる反射率を持った物体であるという事前知識が必要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、どの計測点と同じ距離であるかわからないため、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。

謝辞本研究の一部は、JST CREST JP17942373, 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] He, K., Sun, J. and Tang, X.: Single Image Haze Removal using Dark Channel Prior, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 33, No. 12, pp. 2341–2353 (2011).
- [2] 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 (CVA)*, Vol. 9, No. 15 (2017).
- [3] 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, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 73–81 (2015).
- [4] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Funatomi, T., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Material Classification using Frequency- and Depth-dependent Time-of-Flight Distortion, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017).