

修士論文

Time-of-Flight カメラを利用した
半透明物体の散乱特性に基づく材質判別の検討

井上 裕太

2019 年 3 月 13 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

井上 裕太

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
清川 清 教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)

Time-of-Flight カメラを利用した 半透明物体の散乱特性に基づく材質判別の検討*

井上 裕太

内容梗概

コンピュータビジョン分野において、物体の材質判別は重要な要素である。現在、機械学習による物体認識に広く取り組まれているが、その計測対象は明確な形状やテクスチャを有している。それらを判別しようとしたとき、RGB カメラでも十分な手がかりとなる情報を得ることが可能である。しかし、真っ白なタオルのような形状が変化してテクスチャもない物体は従来手法で判別できない。そこで、材質判別に基づく物体認識が今後必要になると考えられる。本研究は、既存の計測装置である Time-of-Flight(ToF) カメラを利用し、本来 ToF 計測のノイズとなる半透明物体の計測歪みとして現れる材質固有の散乱特性をもとに材質判別を行う方法を三種類提案する。一つ目は、半透明物体の表面下散乱光のみを ToF で計測することによる材質判別であり、従来法における材質ごとの計測歪みが微小であり精度に影響する問題の改善を試みた。そこで、物体表面上に影を発生させる手法を提案した。表面下散乱のみを抽出した距離を利用することで、その分布曲線の変化に材質特性が現れることを確認した。二つ目は、ToF カメラで計測される振幅と位相画像を組み合わせた材質判別であり、振幅画像と位相画像から合成した陰影画像の差として現れる半透明物体の影響をもとに材質の手がかりを観測することを提案した。シミュレーションでは振幅画像と陰影画像の差がより半透明になるほど増加することを確認した。しかし、実実験においては、二種類の画像に差が発生する一方、ToF カメラの距離計測におけるノイズの影響の強さからその差の解析は難しいと考えられる。三つ目は、ToF カメラの振幅画像と通

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, 2019 年 3 月 13 日.

常のカメラの陰影画像の違いに着目する材質判別であり，連続波方式の ToF カメラにおける光線の観測方法の違いから材質ごとの差を観測する手法を提案した．シミュレーション及び実実験にて，材質に応じた光強度分布の差を確認した．

キーワード

Time-of-Flight カメラ, 材質判別, 散乱特性, 半透明物体

Acquisition of Scattering Properties of Translucent Objects Using Time-of-Flight Cameras Toward Material Estimation*

Yuta Inoue

Abstract

Material estimation of objects is an important element in the field of computer vision. Currently, object recognition by machine learning is widely dealt with, but the recognition is limited to a definite shape or texture. Objects with no texture due to shape change like a white towel cannot be recognized by conventional methods. Therefore, object recognition based on material estimation is considered to be necessary for the future.

Using a distance measurement device called a Time-of-Flight (ToF) camera, a distortion occurs in measuring a translucent object. In this research, we discuss three methods to acquire material properties based on the distortion. The first one is attempts to measure only the subsurface scattering light of a translucent object with a ToF camera. We propose a method to analyze the shadow area on the object surface. We confirmed that there are some signals even in the shadow region for a translucent object and they reflect material properties. The second attempts to utilize the inconsistencies in the amplitude and the phase images measured by a ToF camera. We propose to acquire material properties based on the scattering effect in translucent objects observed as a difference between the shading image synthesized from the phase image and the amplitude image.

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 13, 2019.

In the simulation, the difference between the two images was confirmed. In real experiments, a difference occurred between the two images, but it was difficult to analyze the synthesized shading image from noisy ToF camera measurement. The third focuses on the inconsistencies between the amplitude image of a ToF camera and the shading image of an ordinary camera. We propose a method to observe the difference of the scattering effect in each material using a ToF camera and an ordinary camera. In the simulation and the real experiments, the difference of the light intensity distribution corresponding to the material was confirmed.

Keywords:

Time-of-Flight camera, Material estimation, Scattering property, Translucent object

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	3
2.1 機械学習による材質判別	3
2.2 ToF カメラを用いた材質判別	3
3. ToF 計測	5
3.1 ToF の計測原理	5
3.2 計測歪みの原理	5
3.3 計測歪みのモデル化	6
3.4 計測歪みのシミュレータ	9
3.4.1 パラメータの定義	9
3.4.2 ToF 計測再現の関数の構成	10
4. 影を利用した散乱光抽出による材質判別	13
4.1 提案手法	13
4.1.1 計測歪みの発生要因	13
4.1.2 散乱光のみの合成波形による計測歪みのある位相分布	14
4.2 計測方法	15
4.3 シミュレーション	16
4.3.1 シミュレーション条件	16
4.3.2 シミュレーション結果	17
4.4 実実験	20
4.4.1 同一の材質における厚みの違い判別の検証	21
4.4.2 計測周波数に依存したプロファイル曲線の変化の検証	22
4.4.3 散乱がわずかに発生する半透明物体の検証	22
4.5 考察	23

5. ToF の振幅画像と位相画像から合成した陰影画像の不一致の比較による 材質判別	24
5.1 提案手法	24
5.1.1 ToF カメラによる振幅と位相差の観測	24
5.1.2 陰影画像による比較	25
5.2 位相画像に基づく陰影の合成	25
5.2.1 不透明物体における陰影画像	26
5.2.2 半透明物体における陰影画像	27
5.3 シミュレーション	28
5.3.1 シミュレーション条件	28
5.3.2 シミュレーション結果	29
5.4 実実験	36
5.5 考察	41
6. ToF カメラの振幅画像と通常カメラの陰影画像の不一致の比較による材 質判別	42
6.1 提案手法	42
6.1.1 ToF カメラと通常カメラの観測光強度の計測方法の違い	42
6.1.2 観測光強度の計測値の差	42
6.2 シミュレーション	43
6.2.1 シミュレーション条件	43
6.2.2 シミュレーション結果	45
6.3 実験環境	50
6.4 実実験	50
6.5 考察	55
7. おわりに	56
謝辞	58
参考文献	59

目 次

1	ToF 計測の設定と ToF 計測の振幅と位相差	5
2	ToF 計測における表面下散乱の影響	6
3	散乱光の広がり の定義	11
4	シミュレータの基本出力	11
5	シミュレータによる再現画像	12
6	通常の ToF 計測波形と散乱光のみの ToF 計測波形	14
7	直接反射光の影響を除いた ToF 計測波形	15
8	物体上に影のある ToF 計測	16
9	影を利用した散乱光抽出のシミュレーションのための追加入力要素	17
10	影を利用した散乱光抽出のシミュレーション結果	19
11	散乱光抽出した ToF 計測環境	20
12	異なる厚みの物体を対象とした散乱光抽出による ToF 計測	21
13	異なる計測周波数を用いた散乱光抽出による ToF 計測	22
14	異なる材質を対象とした散乱光抽出による ToF 計測	23
15	陰影画像として利用する ToF カメラの振幅画像	25
16	物体形状に基づく陰影画像の合成	27
17	陰影画像の比較に用いるシミュレーションシーン	29
18	不透明物体における陰影作成プログラム検証	30
19	表 6 の設定 1 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	32
20	表 6 の設定 2 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	33
21	表 6 の設定 3 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	34
22	表 6 の設定 4 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	35
23	陰影画像を利用する手法の計測対象	36
24	陰影画像を利用する手法の実験環境	36
25	木製の球の振幅画像と合成した陰影画像および光強度プロファイル	37
26	発泡スチロールの振幅画像と合成した陰影画像および光強度プロ ファイル	38

27	ポリプロピレンの振幅画像と合成した陰影画像および光強度プロファイル	39
28	ポリエチレンの振幅画像と合成した陰影画像および光強度プロファイル	40
29	観測光強度の計測値の違い	42
30	観測光強度の比較に用いるシミュレーションシーン	44
31	不透明物体における振幅画像と陰影画像の取得シミュレーション	45
32	表 8 の設定 1 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	46
33	表 8 の設定 2 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	47
34	表 8 の設定 3 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	48
35	表 8 の設定 4 の特性を持つ半透明物体シミュレーション	49
36	通常のカメラと ToF カメラの同軸計測系	50
37	木製の球の振幅画像と陰影画像および光強度プロファイル	51
38	発泡スチロールの振幅画像と陰影画像および光強度プロファイル	52
39	ポリプロピレンの振幅画像と陰影画像および光強度プロファイル	53
40	ポリエチレンの振幅画像と陰影画像および光強度プロファイル	54

表 目 次

1	計測対象クラス (Object class)	9
2	計測光線波形クラス (Wave class)	10
3	影を利用した散乱光抽出シミュレーションの固定パラメータ	17
4	影を利用した散乱光抽出シミュレーションの変更パラメータ	17
5	陰影画像比較法シミュレーションの固定パラメータ	29
6	陰影画像比較法シミュレーションの変更パラメータ	29
7	振幅画像と陰影画像の比較法シミュレーションの 固定パラメータ	44
8	振幅画像と陰影画像比較法シミュレーションの 変更パラメータ	44

1. はじめに

物体認識技術はコンピュータビジョン分野で重要な要素である。コンピュータに対して人間に近い物体の知覚を行わせるための技術であり、最も一般的な方法では、RGB カメラによるセンシングとコンピュータによる画像処理を組み合わせた物体認識を行うことでコンピュータへのシーン認識を実現させた。近年では、AI 技術の発展やビッグデータの活用により人間の検知や物体検出の精度向上 [7] が実現された。それらの応用として、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 [9] が広く行われている。

そこで、物体認識の今後の課題は、テクスチャに依存しない物体の認識であると考えられる。現在の計測対象の情報を利用した認識では、計測装置ごとに異なる目的に特化した認識方法が実現されており、自動運転で人間に注目した検出や倉庫内の決まった商品の認識では十分な性能を得られている。これらの方式は計測対象の事前学習により高精度な判別を実現しているため、計測対象が人間のみであったり、登録された商品であったりと判別する対象物に制限がある。しかし、テクスチャに依存しない認識は、より身近な生活空間のセンシングに必要不可欠である。例を挙げると、布のような形状の変化する物体は RGB 画像の情報では判別に不十分であり、身近な生活用品は企業競争から機能に伴い見た目も目まぐるしく変化すると考えられる。特に、人間は物体を単純な形状や色で判断するだけでなく、光に照らされることで起こる反射や散乱から未知の物体の理解が可能である。そのなかで、コンピュータビジョンにおける認識技術の向上のために光の詳細な応答情報が手掛かりになると考えられる。

物体認識の精度向上の手がかりとして材質判別があげられ、田中らは光距離計測装置である Time-of-Flight カメラを活用して物体の材質分類 [12] を実現した。従来の材質判別方法は大掛かりな装置や専門的な知識を必要とするため、材質判別は非常にコストのかかる問題であった。そこで、他の光学的な計測装置より安価な ToF カメラを利用した手法が検討された。ToF カメラは本来、光の反射を利用して距離を調べる装置である。計測対象が半透明のときに距離を間違える欠点があるが、材質固有の散乱光に起因すると特定し、材質の分類に利用した手法である。ただし、この実験では材質分類の精度を向上させるため、複数回の計測を行って

おり，一つの対象の計測に対して手間がかかる問題点がある．

本研究の目的は，ToF カメラを用いた半透明物体の材質判別の簡単化である．半透明物体に光を照射すると，物体に入射した光が表面下散乱を起こして物体表面に広がって現れる．通常の ToF カメラのシステムでは，反射光に対して散乱光が非常に小さいので観測方法に工夫が必要となる．そこで，本研究では安価な ToF カメラを利用した 3 種の材質固有の散乱現象の観測方法を検討する．一つ目は，ToF カメラを用いた，材質固有の特性を特に反映している散乱光の抽出計測を検討した．本来は反射光と散乱光の和が計測されるが，散乱光のみの観測を可能にすることで，計測値に材質固有の影響が表れやすくなる．同時に，ToF カメラの計測値が画像形式であるので，散乱光の広がりをエッジとして観測が可能になる手法を検討した．二つ目は，ToF カメラで計測されるシーンの観測光強度から生成される振幅画像に着目し，位相画像と振幅画像の比較による材質情報の観測を試みた．形状情報と観測光による法線情報の不一致が散乱現象により生じることを利用し，ToF カメラの一度の撮影で材質固有の不一致量を評価することを提案した．三つ目は，ToF カメラと通常のカメラの観測方法の違いを利用した材質固有の散乱現象の影響を観測する手法を検討した．通常のカメラが光の強度をそのまま受光することに対し，ToF カメラの連続波を利用した計測では光の強度計測の方法が異なる．この強度の定義の違いから観測光強度分布に差が生じることによって，材質固有の影響が観測可能になる手法を検討した．

2. 関連研究

2.1 機械学習による材質判別

材質判別の方法として機械学習を用いた手法が広く利用されている．一般的な RGB カメラによる画像を入力データとし，機械学習によるマッチングにより材質を判別する．代表的なものでは，小型のネットワークを高速処理することで高い精度を得ることが可能な R-CNN [9]，多くのカテゴリ分けされたオブジェクトをリアルタイム判別する YOLO 検出法 [8]，入力画像サイズに対するロバスト性の高い SDD 法 [6] があげられる．これらの機械学習による手法は高速で高い精度で判別を行う一方で，入力画像と判別対象が近い状態である必要があり，同じ物体でも見え方が大きく変わると判別できないといった制限がある．そのため，学習のために用意された入力画像とシーンの状況が異なるほど認識精度が低下する．

2.2 ToF カメラを用いた材質判別

従来行われてきた 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を目的とする．例を挙げると，照度差ステレオ法を基にした光源とセンサの位置の影響の補正 [4, 13] や，複数回撮影による半透明物体における距離計測歪みの補正 [10] が行われた．これらの補正は ToF の計測原理で計測される値が，光源とセンサが同軸上の同じ距離にある計測対象における直接反射光のみを観測した値という前提に近づけるために検討された．また，複数の光路を通過した光が合成されることによって観測されるべき位相とは異なった値が計測される．一般的に相互反射と呼ばれる問題は ToF 計測においては誤差の大きな原因であったが，Fuchs ら [2] や Godbaz ら [3] により複数物体が存在するシーンについて相互反射の影響を除くことを可能にした．一方で物体内部の散乱による距離の歪みを解消することは大きな課題となっている．

ここで，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 [11] により検証され，ToF の計測値は計測対象の物体情報の影響を受けた値が観測されることが確認された．また，北野ら [5] は ToF カメラを改良した時間応答の超解

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．しかし，この方法では ToF カメラが距離計算に用いる生データを解析する必要がある，アプリケーションとして用いることが難しい．田中ら [12] は ToF カメラによる距離の計測値をそのまま用いた材質判別法を提案した．これは既存の装置をそのまま利用が容易な手法であったが，距離情報に現れる微少な距離計測歪みを見分けるので，似た特性を持つ物体では判別精度が低下する問題を解消する必要がある．田中らは複数の計測条件による計測値を相互補償させることで材質判別の精度を向上させたため，一つの物体に対して複数回の計測を行う必要性があり，出射光の計測周波数と計測物体までの距離をそれぞれ複数の条件で組み合わせている．

3. ToF 計測

3.1 ToF の計測原理

本研究で使用する ToF カメラは間接 ToF 方式に含まれる振幅変調連続波 (AMWC) 方式の装置を利用する。ToF 計測は、光源から照射した光が物体に到達し反射してセンサに戻るまでの光の飛行時間を計測することでカメラと物体の距離を計測する。照射した基準となる光を参照光とし、反射光はこれに対して強度の減衰と時間遅れが発生している。ToF によって観測される値は以下の図 1 に示す。

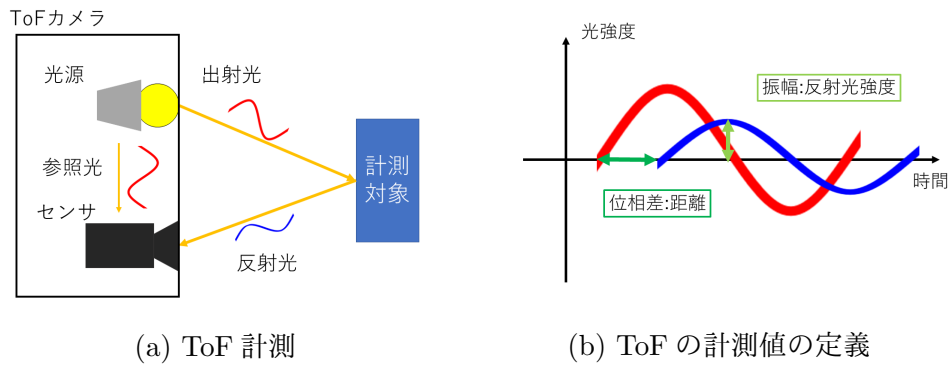


図 1 連続波方式の ToF カメラは、参照光波形と反射光波形の位相差と反射光波形の振幅の減衰率を計測し、位相差から距離を求める。

そのため、ToF カメラは二次元配列のイメージセンサを用いるため画像形式であり、光源から照射した参照光とセンサで受光した反射光の時間遅れを位相画像、反射光波形の振幅をそのまま振幅画像として計測する。この位相画像による時間遅れ τ および光速 c より、物体までの距離 d を、

$$d = \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

と計算することで距離計測を実現している。

3.2 計測歪みの原理

本来の ToF カメラによる計測は、計測対象の直接反射光が観測されることで正確な距離計測が実現される。しかし、物体の配置により生じる相互反射のような

光路の変化や物体のもつ反射や散乱特性は適切な距離計測の妨げになっている．このうち物体もつ散乱特性により生じる計測の間違いを計測歪みと定義する．これは，計測対象を不透明物体として想定した計測値からの散乱特性の影響により位相と振幅両方の計測値に変化を及ぼすことである．この計測歪みは材質固有であることから材質判別に利用できると考えられる．ここより，ToF カメラにより計測される散乱光含む光を観測光と呼ぶ．

半透明物体では光が物体表面で反射だけでなく，物体内部を通過する現象が発生する．特に光が物体表面で物体内部に入り込み散乱する現象を表面下散乱といい，ToF 計測ではこの影響が直接反射光に付加された状態で観測される．



図 2 光源からの光が物体表面で反射だけでなく，物体内部で表面下散乱を起こして再び表面に現れる光が観測されることにより遅れた光が戻ってくる

3.3 計測歪みのモデル化

計測歪みを材質判別に利用するために，計測歪みのモデル化を行う．ある物体に入射した光線が物体内部で散乱によって広がり，入射点とその周辺から再び表面上に現れる．ここで，ToF カメラでイメージセンサの一つのピクセルに該当する一つの計測点に現れる観測波形を考える．光源から出力された参照光の波形を，

$$L = A \sin(2\pi ft - \phi) + A \quad (2)$$

と定義する．ここで， A は振幅， f は計測周波数， ϕ は初期位相 である．

次に散乱により生じる波形を定義する．まず，半透明物体では元の光線が反射，散乱，透過することにより分散し，元の振幅より小さい値を持つ．ここで扱うのは散乱光のみであり，振幅強度の分布は光線の入射してからの物体内部での滞在

による時間遅れ τ に依存して減衰する。また、その材質固有のパラメータ ρ の影響も考慮し次のように減衰した振幅を $E(\tau, \rho)$ と定義する。そして、その振幅を持つ散乱光の波形は式 (2) より次の式で表される。

$$L' = E(\tau, \rho)A \sin(2\pi f(t - \tau) - \phi) + E(\tau, \rho)A \quad (3)$$

波形の振幅が減衰の影響を受けており、時間遅れ τ が発生している。この式により定義される散乱光の和が観測され、別の形状の合成波形として観測される。

ここで、正弦波の合成を考えるため、まず二つの正弦波について考える。また、計算の簡単化のために振幅を E_n にまとめ、初期位相のずれがない $\phi = 0$ 、直流成分は最終的な ToF の計測値に影響を与えないため、直流成分を示す正弦波の振幅と同じ定数項を省略した。よって、光線 L_n は次のように定義される。

$$L_n = E_n \sin(2\pi f(t - \tau_n)) \quad (4)$$

ここで、波形の振幅と時間遅れではそれぞれ、 $E_n \leq E_{n+1}$ 、 $\tau_n \leq \tau_{n+1}$ が必ず成り立つとする。式 (4) において $n = 1, 2$ の光線を合成した波形は、

$$L_1 + L_2 = X_{1,2} \sin \left(2\pi f \left\{ t - \left\langle -\frac{1}{2\pi f} \sin^{-1} \frac{\sum_{n=1}^2 E_n \sin 2\pi f \tau_n}{X_{1,2}} \right\rangle \right\} \right) \quad (5)$$

と一つの正弦波に合成された。ここで $\langle \rangle$ の内部が時間遅れ項、減衰項 $X_{1,2}$ は次の式で表される。

$$X_{1,2}^2 = E_1^2 + 2E_1 E_2 \cos 2\pi f(\tau_1 - \tau_2) + E_2^2 \quad (6)$$

ここで、単なる振幅の足し合わせを考える。

$$(E_1 + E_2)^2 = E_1^2 + 2E_1 E_2 + E_2^2 \quad (7)$$

式 (6) と式 (7) より次の関係式を考える。

$$1 \geq \cos 2\pi f(\tau_1 - \tau_2) \quad (8)$$

ここで、ToF 計測にて距離のラッピングが発生する一周期の距離 $\frac{c}{2f}$ は一般的に約 1m 以上であり、実際に表面下散乱が広がる範囲は数 cm である。その一周期

の時間 $T = \frac{1}{f}$ は物体内部の散乱の時間遅れと比較して、次の条件を満たす時間遅れが微少な光のみ観測される。

$$T \gg \tau_n \quad (9)$$

よって、式 (8) と式 (9) より、唯一等しくなる場合は $\tau_1 = \tau_2$ である。そして、 $\tau_1 - \tau_2$ の値の増加につれ右辺の $\cos$ は 1 から減少することになり、式 (5) は散乱による時間遅れの影響で光強度が減衰することを示す。よって、次の式が成立する。

$$E_1 + E_2 \geq X_{1,2} \quad (10)$$

また、式 (9) より、 $\sin 2\pi f\tau$ において $2\pi f\tau \ll 1$ が成立するため、 $\sin 2\pi f\tau \approx 2\pi f\tau$ の単調増加として扱うことができる。よって、時間遅れ項で次の関係が成り立つので、散乱の影響の増加に伴い時間遅れ項が増加することが示される。

$$\frac{\sum_{n=1}^N E_n(2\pi f\tau_n)}{X_{1,N}} \leq \frac{\sum_{n=1}^{N+1} E_n(2\pi f\tau_n)}{X_{1,N+1}} \quad (11)$$

式 (11) の関係が成り立つので、この式における n の増加は、観測される散乱光の光路の増加であり、散乱光の広がる範囲の増加に伴い時間遅れも増加することが示された。

以上の方法でモデル化した散乱光の合成は次の式で表される。

$$\sum_{n=1}^N L_n = X_{1,N} \sin(2\pi ft - (-\sin^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N E_n \sin 2\pi f\tau_n}{X_{1,N}})) \quad (12)$$

ここで減衰項は、

$$\begin{aligned} X_{1,N}^2 &= X_{1,N-1}^2 + 2X_{1,N-1}E_N \cos 2\pi f(\alpha_{1,N-1} - \tau_N) + E_N^2 \\ \alpha_{1,N-1} &= -\sin^{-1} \frac{\sum_{n=1}^{N-1} E_n \sin 2\pi f\tau_n}{X_{1,N-1} + E_{N-1}} \end{aligned} \quad (13)$$

として計算することができ、時間遅れ項は、

$$\tau_{sum} = -\frac{1}{2\pi f} \sin^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N E_n \sin 2\pi f\tau_n}{X_{1,N}} \quad (14)$$

として考えることができる。

3.4 計測歪みのシミュレータ

現在普及している ToF カメラは計測時のノイズの影響が大きく，計測対象の表面形状を精確に計測することが難しい．しかし，本研究では散乱光による微少な影響の解析を行うため，実環境実験のデータを扱う前にノイズを考慮しないシミュレータを用いて提案手法の有効性を検証する．再現するシーンは相互反射の発生しない ToF カメラが計測対象のみを観測する単純なシーンを想定する．また，計測対象のパラメータは散乱特性を再現するため，散乱光の広がりや光強度の減衰特性を設定した．ToF カメラのパラメータでは参照光の波形を設定した．

3.4.1 パラメータの定義

散乱光の影響を検証するためにシミュレータを作成し，利用した．使用言語は python であり，計測対象と計測光波形の設定をそれぞれ Object クラスと Wave クラスで行う．計測対象は大きさと位置，そして散乱特性に関する要素を表 1 のように設定可能である．ただし，散乱による光の強度減衰特性については数式なども設定可能にするため関数化している．観測光波形は式 (3) における減衰項以外の正弦波要素を構成しており，ピクセル数分用意したリストに散乱により増加する新たな波を追加していくことで散乱現象を再現する．

表 1 計測対象クラス (Object class)

パラメータ名	定義
X,Y	ToF カメラのカメラパラメータを再現した画像の x,y 方向のマップ
Z	計測対象を含む Depth マップ
mask	Depth マップ内の計測対象領域の定義
scatterlimit	散乱光の広がりの設定．物体表面の四方，物体の奥方向に定義
decay	減衰項の式 (関数として設定)

表 2 計測光線波形クラス (Wave class)

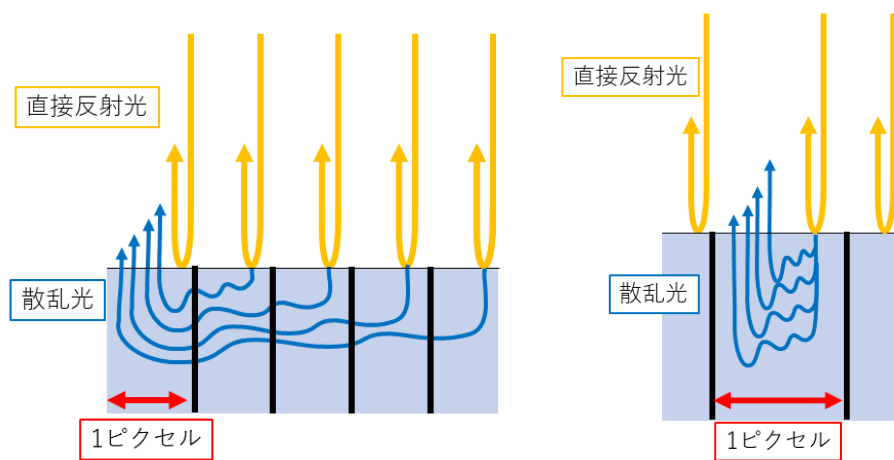
パラメータ名	定義
A	参照波形の振幅
f	計測周波数
td	時間遅れ
p	初期位相

以上のパラメータを設定することで、複数の散乱光波形が生成可能である。ただし、Object クラスの X,Y および Wave クラスの初期位相は初期設定値を利用するため、今回の実験では変更して使用することはなかった。この結果を計算することで、通常のカメラで観測される陰影画像、ToF カメラで観測される振幅画像、位相画像の再現が可能である。

3.4.2 ToF 計測再現の関数の構成

今回実装したシミュレータの流れは、(1) 光源から計測物体までの光線波形の時間遅れ、(2) 物体表面から奥行方向の散乱による光線波形の減衰と時間遅れ、(3) 物体表面の四方への散乱による光線波形の減衰と時間遅れ、(4) 計測物体からセンサまでの光線波形の時間遅れ、以上のフローで散乱現象を含む ToF 計測を再現する。ここで、図 3 に示す散乱現象を (2), (3) に分割して実装した理由は、物体表面上の上下左右方向ではスケールが Object の持つパラメータから計算可能であるが、奥行方向に関するスケールは計算することができない。そのため、異なる計算方法を利用するので個別の関数を構成している。

また、実計測との大きな差は通常 CG による再現と同様に物体のエッジを確実に観測することである。実際のイメージセンシングでは縁にぼやけたデータが入っているが、そのような現象を再現できていない。特に、球を対象とした ToF 計測では物体領域周辺で全反射が発生し、本来計測物体が存在しない距離の値が観測されることがあり、それも再現できていない。

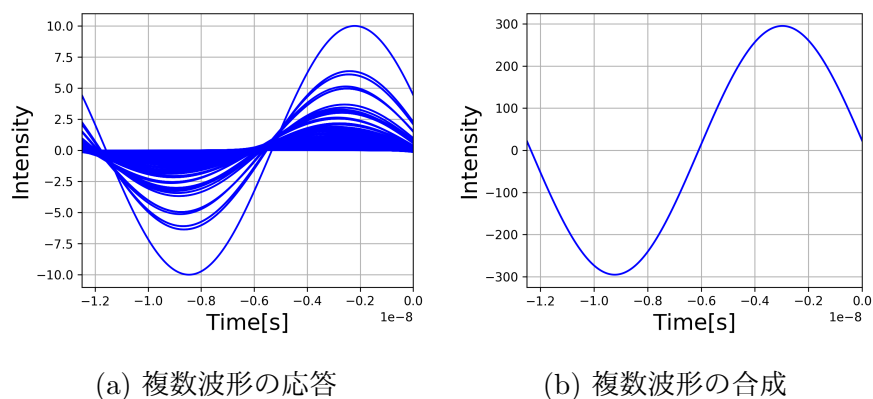


(a) 物体表面四方向の散乱

(b) 物体内部への奥方向の散乱

図 3 物体表面上では，Object クラスの X, Y と光速 c から時間遅れを計算，物体内部方向は x, y 方向と同じ桁で設定

このシミュレーションフローで生成される図 4(a) の波形群と (b) の合成波形から ToF 計測における観測値を再現する．この波形群は散乱により一つのピクセルに複数波形が観測されることを表し，合成波形は ToF カメラで観測される光の波形を表している．よって，ToF カメラによる観測値は合成波形の振幅が反射光強度，合成波形の時間遅れが位相差に該当する．



(a) 複数波形の応答

(b) 複数波形の合成

図 4 ある一つのピクセルにおける複数の散乱光を再現し，それらが合成された波形が本来の ToF 計測にて観測される値である．

シミュレータの出力結果の例を図 5 に示す。ここで、ToF カメラの計測値とは別に、図 4 の波形群のそれぞれの振幅値の和を計算することで、通常のカメラで観測される反射光強度が同時に再現可能である。

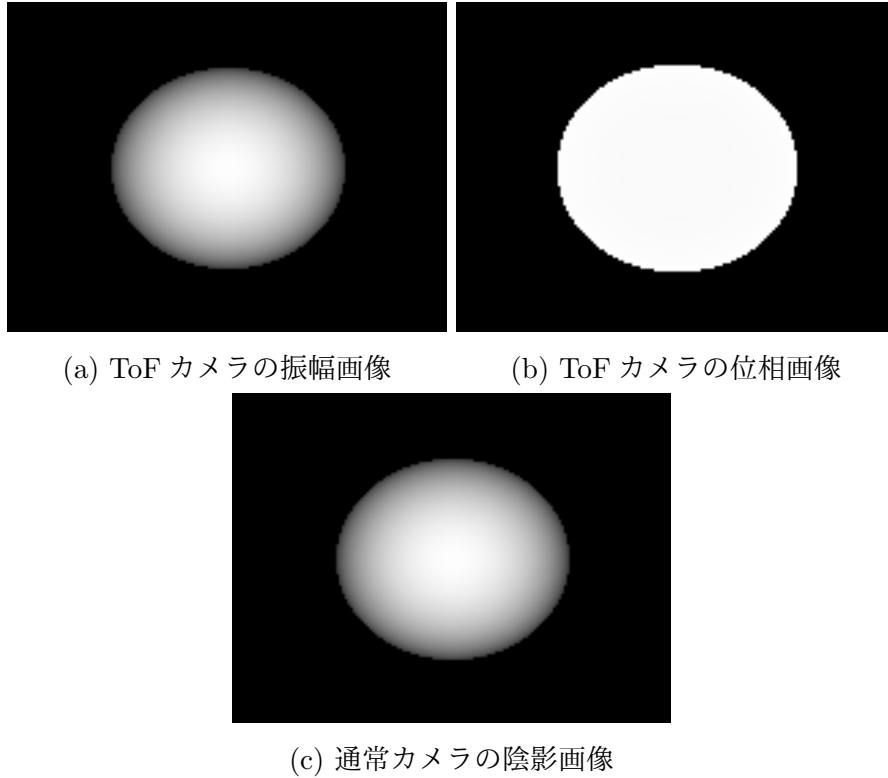


図 5 図 4 の合成した波形を計算することでそれぞれの値を計算することが可能である。物体の端領域では再現精度が劣化している。

今後本研究で使用するシミュレーション実験は、このシミュレータを利用する。

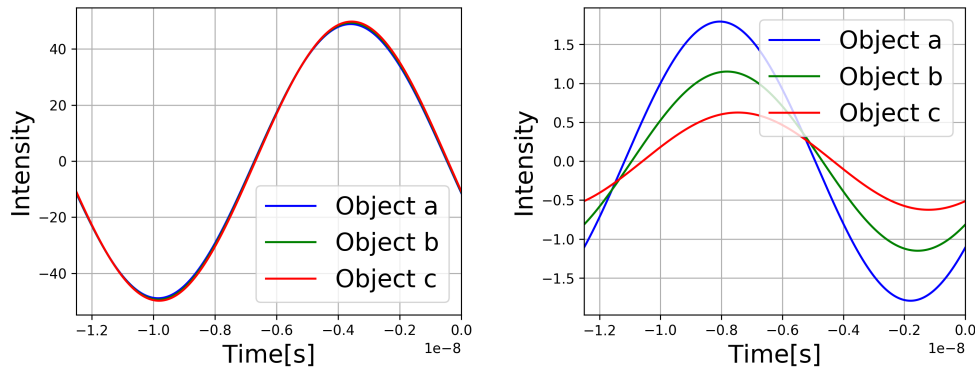
4. 影を利用した散乱光抽出による材質判別

4.1 提案手法

4.1.1 計測歪みの発生要因

田中ら [12] の手法では，計測歪みを含む位相差から計算した距離を用いて材質分類を行うため，この計測値は直接反射光と複数の散乱光が合成された波形に基づいている．ここで重要となる要素は時間遅れの影響であり，時間遅れに基づき正しい計測対象の位置からの歪み量が決定される．しかし，計測歪みは非常に小さい値の変化であるため，従来法では複数の計測条件による相互補償により精度を確保している．

本研究では，材質固有の散乱特性を反映した計測歪みの計測改善を検討した．位相画像のもととなる時間遅れは式 (14) にて計算され，ここでは A' が直接反射光の振幅と考える．一般的な半透明物体における直接反射光の振幅と散乱光の振幅は $A' > \sum_{n=1}^N E_n$ となり，光線波形が合成されたとき，時間遅れは直接反射光の影響が支配的である．ここで三種類の異なる半透明物体を想定した ToF 計測を図 6 に示す．(a) の示す直接反射光を含める ToF 計測波形は直接反射光の影響が大きくそれぞれの波形の差は小さい．(b) の示す散乱光のみの合成波形は振幅が大きく異なっている．また，散乱光の合成波形の位相は微少の差ではあるもののそれぞれの散乱特性に応じた時間遅れを示している．このように散乱光合成波形は非常に小さい値であり，直接反射光と合成したときに影響がほぼ見られなくなる．そのため，一般的な ToF 計測では半透明物体の歪んだ距離も真値として扱われ，微少な距離歪みの評価がなされることはほとんどなかった．しかし，散乱光は計測歪みの原因であり，散乱光のみの合成波形の時間遅れを確認すると，通常の ToF 計測の合成波形よりも散乱光のみの合成波形の時間遅れの分布が広がることが想定される．これによって，散乱光のみの合成波形により示される計測歪みによる時間遅れ分布が拡大すると考えられる．これを利用して材質判別の精度向上を試みる．



(a) 通常の ToF 計測の波形

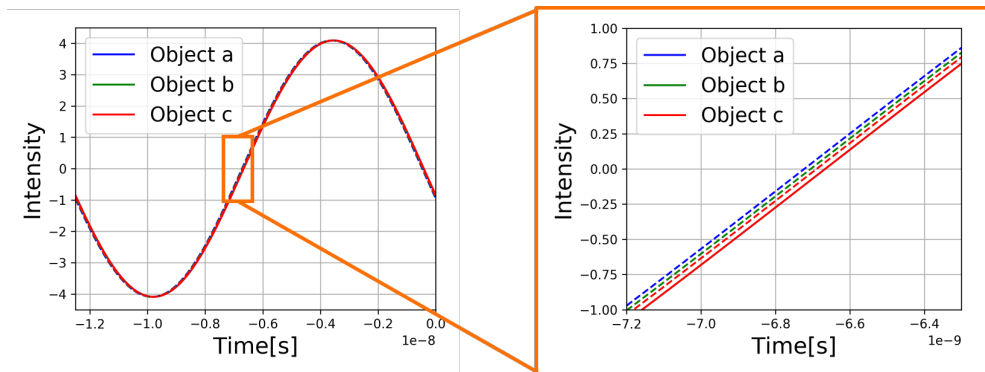
(b) 散乱光のみの ToF 計測の波形

図 6 三種の異なる散乱特性をもつ物体における計測値を示す．左グラフに示す波形は計測歪みを含む通常の ToF 計測波形，右図に示す波形は散乱光のみに注目した ToF 計測波形である．通常の ToF カメラの時間遅れ分布よりも，直接反射光が除かれたことにより散乱光のみの合成波形分布が拡大すると想定される．

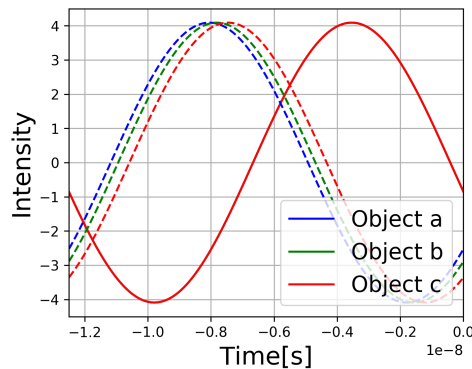
4.1.2 散乱光のみの合成波形による計測歪みのある位相分布

本来の ToF 計測では，直接反射光が計測されるべき値であり，散乱光は間違っただけの情報を与えるノイズとなる．一方，私たちの目的は計測歪みから材質判別の手がかりを得ることである．そのため，散乱光は材質固有の影響をより示すので，注目すべきは散乱光であると考えた．そこで，直接反射光を除いた計測を検討する．

ここで示す図 7 は時間遅れにより注目しやすくするため同一の振幅値を持つ波形として正規化した．図 7(a) では，ある同じ位置に置かれた実線に表す直接反射光と破線に表す三種類の異なる半透明物体の計測歪みの計測波形を示す．三種類の物体の歪んだ位相差にはそれぞれに差はあるが，その差は非常に小さい．従来法ではこの違いを見分けている．一方で，図 7(b) では，破線にて散乱光のみを抽出した ToF 計測を示す．計測歪みによる分布差は従来使用していた通常の ToF 計測とは異なり，位相のばらつきが大きくなる．これにより材質判別の精度を向上し，複数回行っている計測回数を減らすことが可能になると考えられる．



(a) 通常の ToF 計測の時間遅れ



(b) 散乱光のみの ToF 計測の時間遅れ

図 7 三種の異なる散乱特性をもつ物体計測の実線に示す直接反射光のみが観測された理想的な波形から、計測歪みの影響を受けたときの波形を破線で示した。(a) の直接反射光の影響を含む光の波形分布よりも (b) 散乱光のみの光の波形分布の間隔が広い。ただし、この波形は振幅を正規化している。

4.2 計測方法

実現が容易な散乱光を抽出する計測方法を検討する ToF カメラは装置に光源とセンサを含んでおり、光源の照射範囲とセンサの観測視野には差がある。ここで、光が直接当たらない影領域では、影のある物体表面の光の当たる領域から到達する表面下散乱光のみが観測できることを利用する。ToF カメラの計測において計測対象の表面に影を発生させるため、光源と計測対象の間に遮蔽物を設置する。

これにより図 8(a) のように表面下散乱光のみを計測できる領域を作成できる．
これをもとに，実際に散乱光を抽出する計測系を検討し，ToF カメラの照射範囲
と観測視野の差を利用して図 8(b) の計測環境で実験を行った．

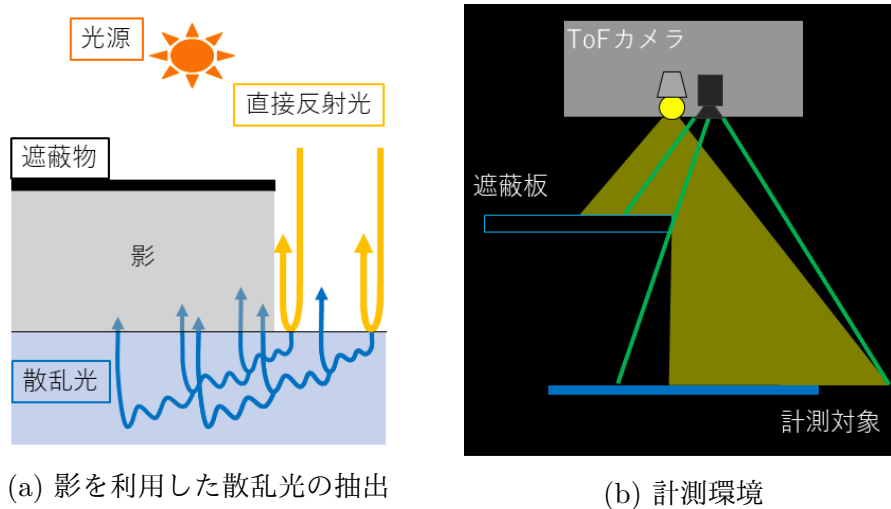


図 8 物体表面上に影領域と通常の直接反射光のある領域が発生するように計測
対処を配置し，境界周辺の観測値を判別に使用する．

4.3 シミュレーション

4.3.1 シミュレーション条件

シミュレータに図 9(a) の影マスク画像を与えることで，物体に直接光が入射し
ない領域を考慮したシミュレーションを行った．想定する計測対象は図 9(b) の画
像と Depth マップを使用した．このときの計測条件と材質特性に用いたパラメー
タは表 3 および，表 4 とする．



(a) 影マスク



(b) 半透明な板の depth マップ

図 9 二値の値を持つ影マスクにより画像の上半分に光が当たらない設定を再現，計測対象の形状は平らな板を設定する．

表 3 影を利用した散乱光抽出シミュレーションの固定パラメータ

クラス	パラメータ	設定値
Object	Depth マップ	図 9(b)
	マスク画像	図 9(b) の物体領域
Wave	振幅	10
	周波数	80 MHz

表 4 影を利用した散乱光抽出シミュレーションの変更パラメータ

クラス	パラメータ	設定 1	設定 2	設定 3	設定 4
Object	散乱回数	5	5	10	10
	減衰項	$e^{-2 \times 10^{11}}$	$e^{-10^{12}}$	$e^{-2 \times 10^{11}}$	$e^{-10^{12}}$

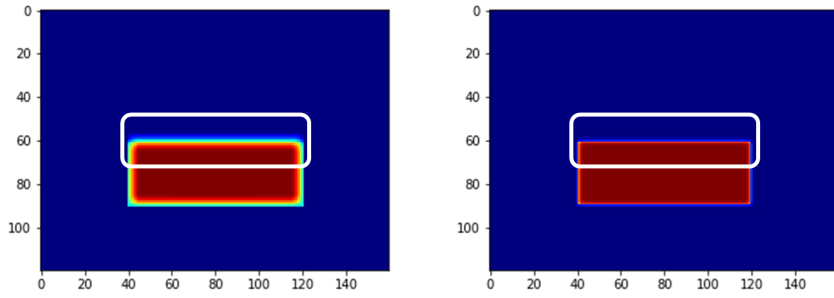
4.3.2 シミュレーション結果

シミュレーションから得られた位相画像を Depth マップに変換して考察する．そのときの疑似カラーで示す振幅画像を図 10(a) から (d) に，境界周辺の距離プロファイルを図 10(e) に示す．白枠で示す振幅画像中央における物体上端における傾きが，今回の計測目的である散乱光のみを抽出した応答に該当する．ここで，

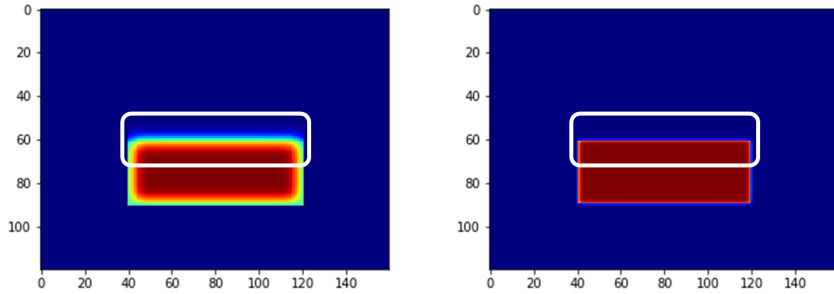
振幅画像における物体左右と下の端に発生している傾きは、表面下散乱現象により周辺の物体表面から回り込む散乱光が少ないため位相が歪むという別の要因による現象である。そのため今回の実験では検討の対象外である。

表面下散乱により生じた存在しない物体の傾斜を示す領域は、赤色で示される板から青色で示される背景の中間になる。表 3 の散乱回数より、(a) と (b) よりも (c) と (d) が散乱光が広がりやすい想定である。また、表 4 の減衰項の設定より、(a) と (c) よりも (b) と (d) が散乱による強度減衰が大きい想定である。これらをふまえて図 10(e) のプロファイル进行考察する。まず、影領域の境界付近で振幅画像がグラデーションしている領域が広いことから、減衰項に従った強度分布になっていることが確認可能である。これによる影響はプロファイルで示されるように、光の強度減衰が少ない物体ほど正しい距離に近い値が観測される。また、散乱回数に応じて散乱光により間違った距離を示す範囲が広がることをプロファイルから読み取ることができる。

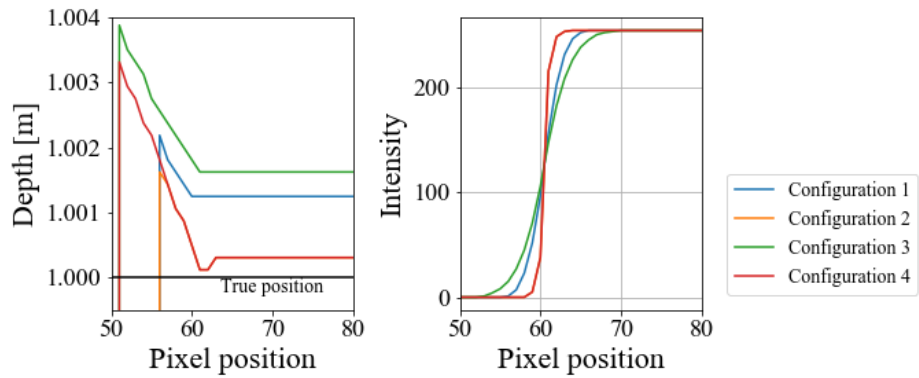
以上の考察をもとにプロファイルの意味を再検討すると、式 (14) の時間遅れ項の変化は減衰による影響が強いと考えられる。減衰量が大きいため散乱光の強度が小さい場合は距離歪みの傾きが大きくなる。一方、減衰量が小さいため散乱光の強度が大きい場合は距離歪みの傾きが小さくなる。この距離歪みの広がる範囲はその材質の散乱の広がりやすさに依存している。このことから、距離プロファイルを作成したときの距離歪みにより示される分布曲線も材質の特性を示すことが考えられる。



(a) 表 4 設定 1 疑似カラー振幅画像 (b) 表 4 設定 2 疑似カラー振幅画像



(c) 表 4 設定 3 疑似カラー振幅画像 (d) 表 4 設定 4 疑似カラー振幅画像



(e) 境界周辺のプロファイル

図 10 (a) (d) の画像上半分の影領域でも境界付近では光の応答が観測されている．(e) 左グラフの距離のプロファイルから平板上に存在しない傾斜が存在することが分かる．(e) 右グラフは振幅画像のプロファイルである．

4.4 実実験

材質固有の距離歪みの鮮明化により，従来手法による材質判別の精度向上を試みる．ここで，複数の計測周波数を使用するため，分解能がバラバラになり，また，正しい位相も一律の値ではない．そこで，真値がすべての計測周波数で同じになる距離を位相から計算して評価する．

今回使用する ToF カメラは Microsoft 社製の Kinectv2 とし，計測環境は図 11 に示す．平板を計測するとき ToF カメラの撮影平面と平行に物体を置くと鏡面反射を起こしやすくなる．そこで，計測対象を計測平面に対して少し傾けた設定をしている．これに伴い，遮蔽板の設置の簡単化も含めて ToF カメラを 90 度回転させた状態で設置した．

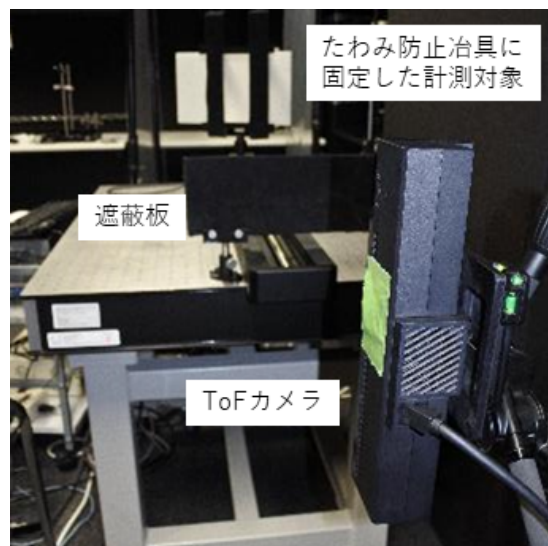


図 11 ToF と計測対象の中間に遮蔽板を設置することで，物体表面上に影が発生する計測環境を構築した．

4.4.1 同一の材質における厚みの違い判別の検証

本研究では物体の材質判別が目的であるが、手法の有効性を確かめるためには、より散乱光の影響が似通った物体を用いた検証を行うことが望ましい。そこで、まず、従来法で分類間違いを起こしやすい同じ材質で厚みが異なる板について検証する。計測対象に 1mm, 2mm, 3mm の厚みの異なるアクリル板を使用し、計測周波数 80MHz で計測した。計測対象と結果は図 12 に示す。

計測された位相から求めた距離と振幅のプロファイルより、グラフの右側が直接反射光のある領域で左側が影領域の観測値であり、緑線で示される反射光強度のグラフからも確認可能である。また、影境界の付近では、光が直接当たらない領域にも散乱現象による表面下散乱光が到達するため値が観測されている。以上のことから散乱光を抽出した影領域の計測値では、各物体ごとの歪み量分布の間隔が広がり、それぞれの特性の差が顕著化したと考えられる。

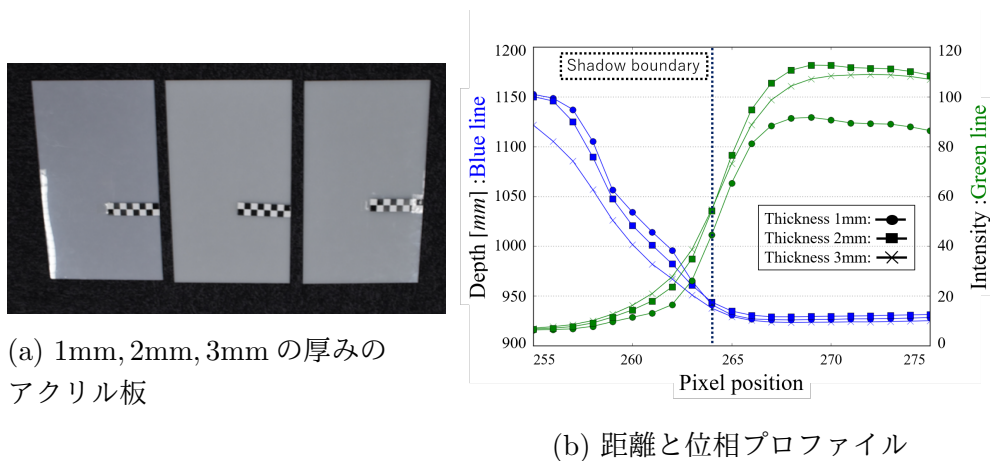


図 12 横方向の 264 番目のピクセル付近が影の境界と考えられる。グラフ右側の直接反射光を含む領域よりも、グラフ左側の散乱光のみの領域の各材質の距離プロファイル曲線の間隔が広がっている。

4.4.2 計測周波数に依存したプロファイル曲線の変化の検証

同様に厚みの異なるアクリル板を対象に 16MHz, 80MHz, 120MHz の複数の計測周波数で計測した。従来法で距離の計測歪みの量が周波数ごとに異なる値を示していたので、今回もそれぞれ異なる傾向が観測できることを想定した。

結果は図 13 に示すように、先ほどと同様に直接反射光を含む領域では一直線上にあった歪んだ距離が、影の領域ではそれぞれ異なる分布を示すことが確認された。そのため、曲線が描くエッジも材質特性を反映しているようにみられ、材質判別の手がかりとして利用できることが考えられる。

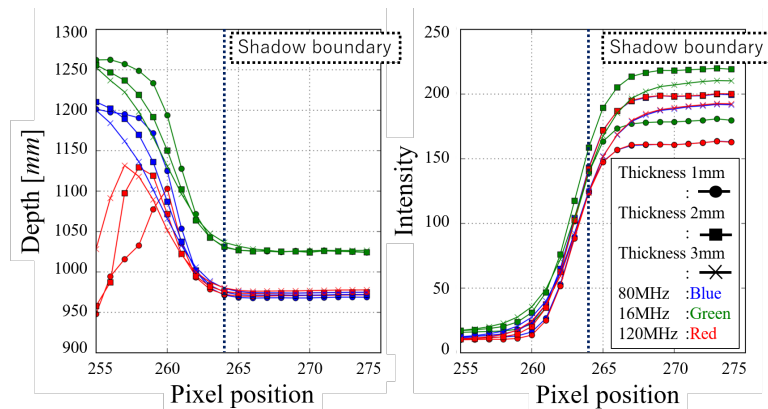


図 13 異なる周波数を用いて計測した距離と位相のプロファイルである。横方向の 264 番目のピクセル付近が影の境界と考えられる。グラフ右側の直接反射光を含む領域よりも、グラフ左側の散乱光のみの領域の各材質の距離プロファイル曲線が様々な挙動をしている。

4.4.3 散乱がわずかに発生する半透明物体の検証

計測対象に木、カーペット、コルクといった散乱が発生しにくい材質を使用した場合でも、散乱光抽出計測が可能であるか検証する。計測対象と結果は図 14 に示す。人の目を見たときにこれらの物体を透けているように見ることはできないが、光学的には半透明な物体である。

これらの材質特性の違いは、従来手法でもそれぞれの差が微少ながら確認可能

であった。これらに対し提案手法を適用すると、コルクとカーペットはほとんど同じ距離を示していたが、影の境界からより離れた 262 番目のピクセルから差が拡大した。これにより、散乱光の広がる範囲の違いによる材質判別を検証した。

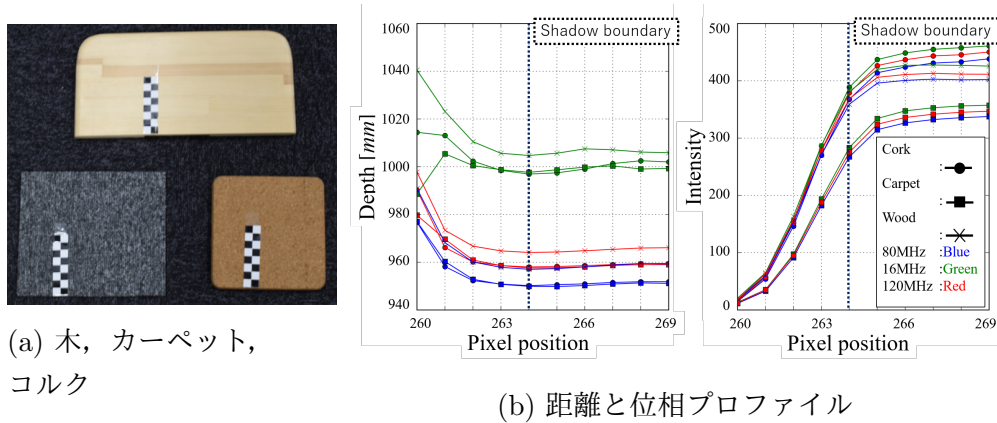


図 14 距離計測歪みがコルクとカーペットで近い値をとっていたが、影を用いたとき、その境界から遠ざかった点ほど差が明確化した。

4.5 考察

ToF 計測における位相画像から求めた距離をそのまま利用した距離の計測歪みに基づく材質判別方法は、散乱光のみを抽出することで更なる精度の向上が可能になると考えられる。当初想定していたとおり、位相の間違い量のばらつきが広がることから材質特性の差が顕著になり、厚みの違いも明瞭になった。それに加えてプロファイルの曲線を見ることで、一つの計測値で同じ値を示した場合でも、複数の影の境界の距離における位相情報を組み合わせることで異なる材質と見分けることが可能になると考えられる。これにより、材質判別の精度向上のための計測と、計測回数の低減が可能になる。

しかし、この手法は、田中ら [12] の手法を踏襲するため、計測歪みの影響を受けた複数の計測値の相互補償にて材質判別を行うことを想定している。影を用いることで、従来法よりも材質の散乱特性を強調して計測可能になり、計測回数を低減可能になると考えられる。しかし、提案手法においても複数の計測周波数は必要であり、更なる計測の簡単化のためには、計測条件の再検討が必要である。

5. ToF の振幅画像と位相画像から合成した陰影画像の 不一致の比較による材質判別

5.1 提案手法

5.1.1 ToF カメラによる振幅と位相差の観測

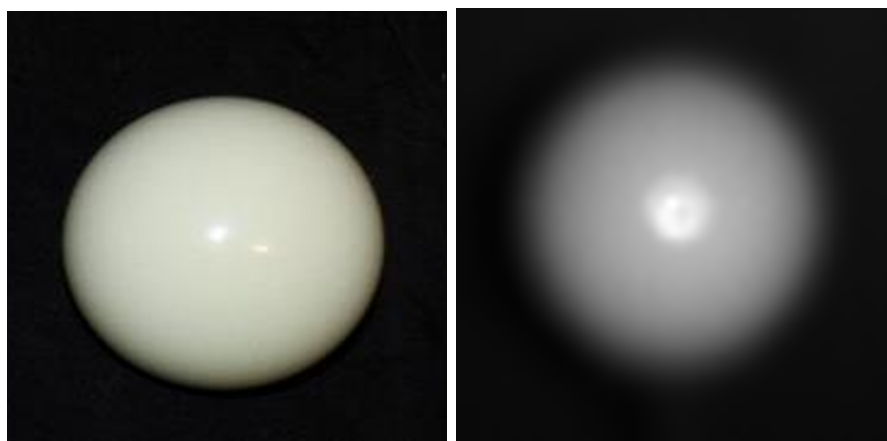
ToF カメラは距離計測を主な目的とした計測装置であるが、その計測の特性から、位相のほかに振幅が同時に観測される。これは観測光の強度を表しており、一般的に使用されることは少ない。この二つの計測値を利用する研究は、Changpeng ら [13] や Kim ら [4] が挙げられ、位相から求めた距離と観測光強度から求められる法線の組み合わせから、ノイズの多い ToF の距離画像の平滑化を実現した。しかし、これらの研究では見た目の滑らかさを重視するため正しい距離を求めているわけではない。そのため、数値的な解析はほとんどせず、材質固有の計測歪みも無視している。距離の解析を利用した研究では、距離計測の精度向上を図った Fuchs ら [2] は相互反射による位相の変化に光の強度である振幅が含まれることを示している。このように観測光強度による振幅も散乱光により変化していることが考えられ、本研究でモデル化した散乱光の合成波形の式 (12) でも、振幅も散乱の影響により減衰を受けた AMWC 方式の合成波形固有の応答を示している。

これにより、位相画像と同様に、振幅画像も透過や散乱の影響により本来観測されるべき直接反射光のみの値から変化していることが考えられる。そこで、私たちは振幅と位相画像の二つの情報を比較することによる材質判別を試みる。一般的には位相画像を距離画像に変換して扱い、機械学習により観測光強度による法線から距離画像を復元する手法 [1] や、距離画像から法線を計算により復元する手法がある。これらの手法は不透明な物体を前提としており、観測強度画像と比較したときに一致した値を持つ。今回は実装が比較的容易な位相画像から陰影画像を合成する手法を選択する。これにより、半透明物体に対して、不透明物体に利用していた復元方法を適応することで情報の不一致が発生し、その比較を行うことで材質固有の特性の判別が可能になると考えられる。

5.1.2 陰影画像による比較

本研究では、陰影画像を用いた振幅と位相画像の比較方法を検証する。ここで、実際の形状からの計測歪みの影響による間違いの量を評価に利用しない理由は、真値を設定するためには別の計測が必要となり、実用化を見据えて用意が簡単なToFカメラで判別を完結させるためである。

陰影画像は物体に対して光源からの光による陰影を与えることで立体的な物体を画像として表現したものである。これは物体の形状情報が分かればよいので、位相画像から求めた距離画像を利用すれば容易に作成可能である。一方で、ToFカメラによる振幅画像は近赤外の変調周波数光のため、暗室であれば十分にToFカメラ本体の光源のみの設定で計測が可能である。この条件で不透明物体を計測したとき、カメラと光源位置がほぼ同一の位置における陰影画像を得ることができる。そこで、本研究では陰影画像による二種類の観測値の比較を行う。



(a) ポリエスチレン球

(b) ToF カメラによる振幅画像

図 15 陰影画像により計算される画像と同様に物体の法線方向に依存して観測光強度が変化しており、陰影画像に近い結果を示している。

5.2 位相画像に基づく陰影の合成

振幅画像はそのまま陰影画像として扱うことができる一方で、位相画像では光源位置情報などを考慮した計算を行うことで陰影画像を合成する必要がある。

5.2.1 不透明物体における陰影画像

ここで、今回利用した画像の合成手順を示す．はじめに、観測された位相画像から距離画像を求めて、その x, y 方向に微分することで表面の形状を復元する．ここで、 x, y 方向にそれぞれ形状のベクトルを計算可能であり、そのベクトルの外積を各ピクセルで求めることで法線ベクトル $\vec{N}$ を計算する．

$$\begin{aligned}\vec{N} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial X_{map}}{\partial x} & 0 & \frac{\partial D_{map}}{\partial x} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial Y_{map}}{\partial y} & \frac{\partial D_{map}}{\partial y} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} X'_{map} & 0 & Dx_{map} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & Y'_{map} & Dy_{map} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -Y'_{map}Dx_{map} & -X'_{map}Dy_{map} & X'_{map}Y'_{map} \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (15)$$

また、光源位置 Cam_{map} と物体位置 T_{map} の関係は既知であるので、光源方向ベクトル $\vec{S}$ を設定することが可能である．

$$\vec{S} = T_{map} - Cam_{map} \quad (16)$$

この二つを用いることで陰影画像における推定観測光強度 I_{lem} は次のように求められる．

$$\begin{aligned}I_{lem} &= \vec{S} \cdot \vec{N} \\ &= |\vec{S}| |\vec{N}| \cos \theta\end{aligned}\quad (17)$$

このように物体表面と光源方向のコサイン則に従った反射光強度分布が不透明物体上で観測される．そして、この推定観測光強度 I_{lem} は同時に計測した振幅画像をそれぞれ正規化したとき、等しい値を得ることが可能である．

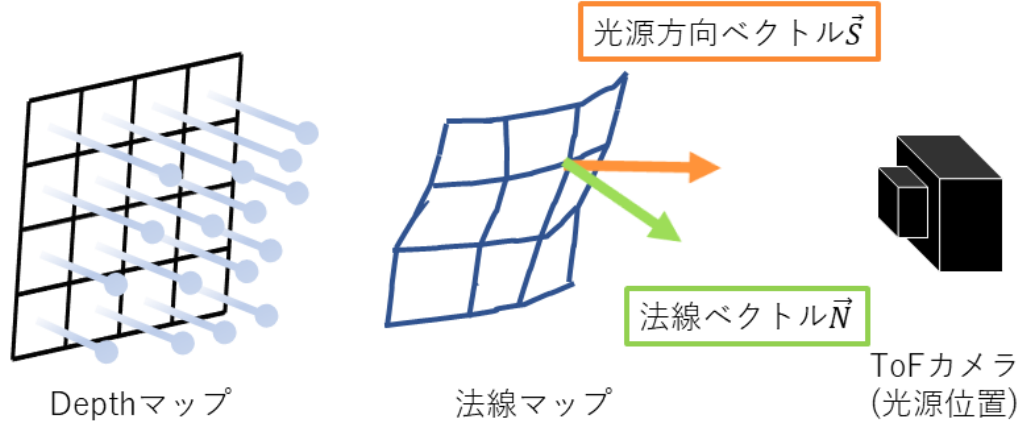


図 16 Depth マップから復元した形状に基づく法線ベクトル，光源ベクトルにより陰影画像を合成する

5.2.2 半透明物体における陰影画像

ここで，半透明物体に対して陰影画像の推定を行うことを検討する．計測歪みの影響分の距離で構成される d_{map} を持つ ToF 計測による形状データはによる法線方向は次のように求められる．

$$\begin{aligned}
 \vec{N}' &= \begin{pmatrix} \frac{\partial X_{map}}{\partial x} & 0 & \frac{\partial(D_{map}+d_{map})}{\partial x} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial Y_{map}}{\partial y} & \frac{\partial(D_{map}+d_{map})}{\partial y} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} X'_{map} & 0 & Dx_{map} + dx_{map} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & Y'_{map} & Dy_{map} + dy_{map} \end{pmatrix} \quad (18) \\
 &= \begin{pmatrix} -Y'_{map}(Dx_{map} + dx_{map}) & -X'_{map}(Dy_{map} + dy_{map}) & X'_{map}Y'_{map} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

ここで，式 (15) と式 (18) を比較すると次の関係が得られる．

$$\begin{aligned}
 \vec{N}' &= \begin{pmatrix} -Y'_{map}Dx_{map} & -X'_{map}Dy_{map} & X'_{map}Y'_{map} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -Y'_{map}dx_{map} & -X'_{map}dy_{map} & 0 \end{pmatrix} \\
 &= \vec{N} + \vec{n} \quad (19)
 \end{aligned}$$

そして、式 (16) による光源方向を設定することで、次のような推定観測光強度 I_{trans} を求める．

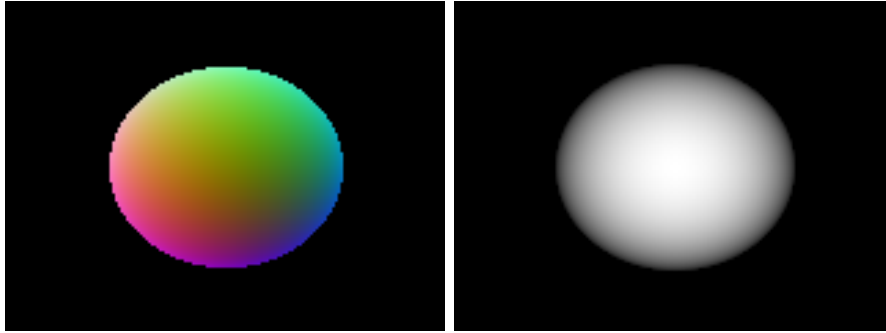
$$\begin{aligned}
 I_{trans} &= \vec{S} \cdot (\vec{N} + \vec{n}) \\
 &= \vec{S} \cdot \vec{N} + \vec{S} \cdot \vec{n} \\
 &= |\vec{S}| |\vec{N}| \cos \theta + |\vec{S}| |\vec{n}| \cos \theta'
 \end{aligned} \tag{20}$$

式 (20) において計測歪みの影響に伴って $\vec{n}$ の値が増加する．特に、式 (19) にてよって $\vec{n}$ のカメラ方向の値が 0 であることから、法線はカメラ方向から、x,y 軸方向に傾いた変化をすることで、推定観測光強度 I_{trans} は本来の値から大きく減少する．一方で、観測される観測光強度も式 (13) により表される値が観測され、散乱の影響が大きくなるほど、 $X_{1,N}$ は小さくなる．しかし、これは全体が微少な減衰を受けるものであり、得られる観測光強度分布はほとんど変わらない．そこで、この散乱特性の影響を受けて異なる変化をする二種の観測光強度分布を使用する．これを正規化した画像形式に変形して比較したとき、材質の散乱特性に応じた差が生じると考えられる．

5.3 シミュレーション

5.3.1 シミュレーション条件

シミュレータにより計算された depth マップと仮想の光源位置情報を合成することで、陰影画像を比較する手法の検証を行う．シミュレーションの計測対象は半球を想定し、設定するパラメータは表 5 および表 6 を利用する．



(a) 法線マップ

(b) 通常のカメラ画像

図 17 シミュレーションシーンに使用した半球を示す

表 5 陰影画像比較法シミュレーションの固定パラメータ

クラス	パラメータ	設定値
Object	Depth マップ	図 17
	マスク画像	図 17 の物体領域
	散乱回数	10
Wave	振幅	10
	周波数	80 MHz

表 6 陰影画像比較法シミュレーションの変更パラメータ

クラス	パラメータ	設定 1	設定 2	設定 3	設定 4
Object	減衰項	$e^{-5 \times 10^{11}}$	$e^{-2 \times 10^{11}}$	$e^{-10^{11}}$	$e^{-5^{10}}$

5.3.2 シミュレーション結果

はじめに ToF 方式にて距離を算出する場合に分解能に制限があるため、合成した陰影にノイズが発生している。これは、形状を確認するための問題にはならず実際の ToF カメラでも発生する事象のため、本検討ではノイズの完全な解消をしていない。

まず、不透明物体における振幅画像と位相画像から合成した陰影画像を比較し、一致することを検証する。結果は図 18 となり、観測光強度プロファイルはほと

んど一致している．このことから，不透明物体では振幅画像と位相画像に示される球の情報が一致することを確認した．

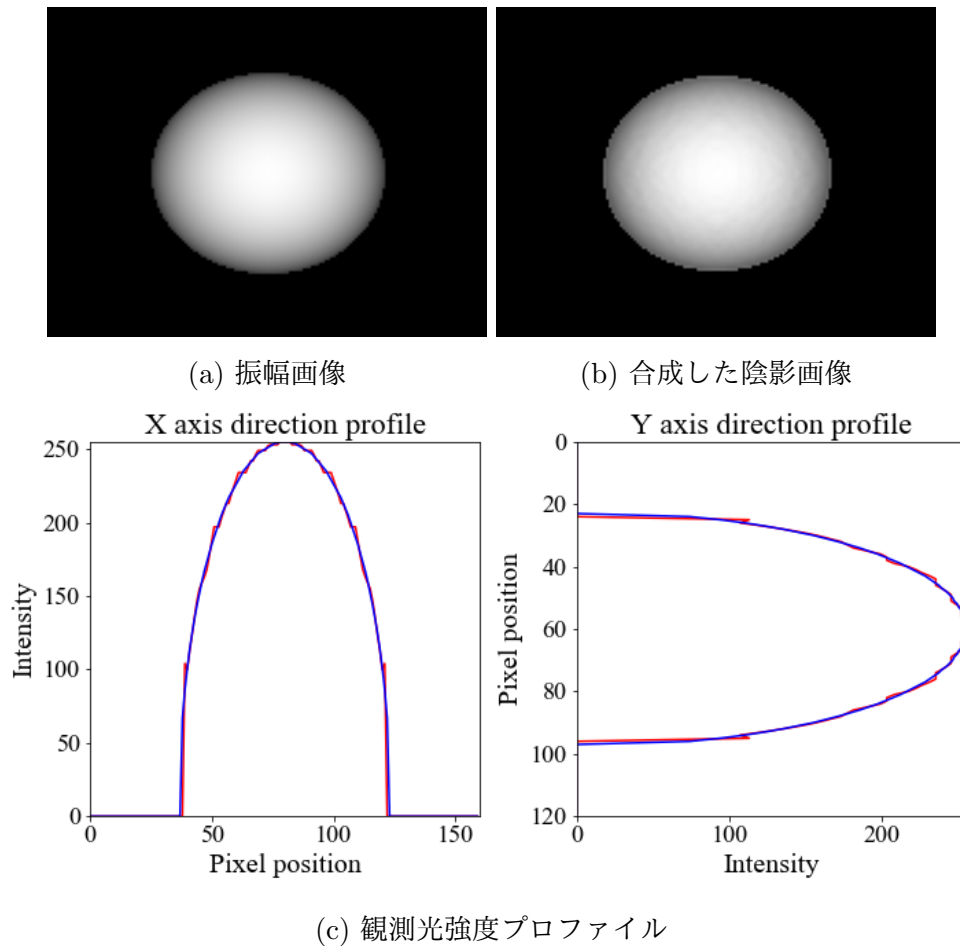
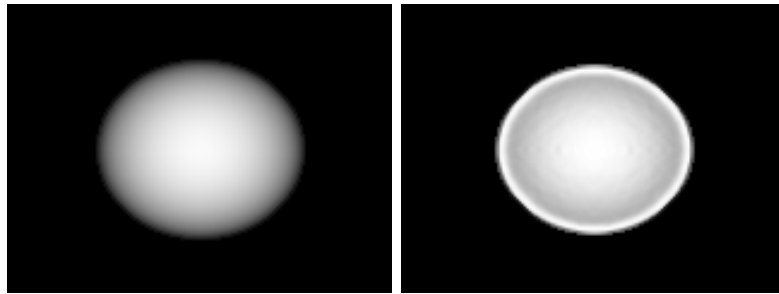


図 18 不透明物体の振幅画像と位相画像から合成した陰影，および各軸中央の観測光強度プロファイルを示す．

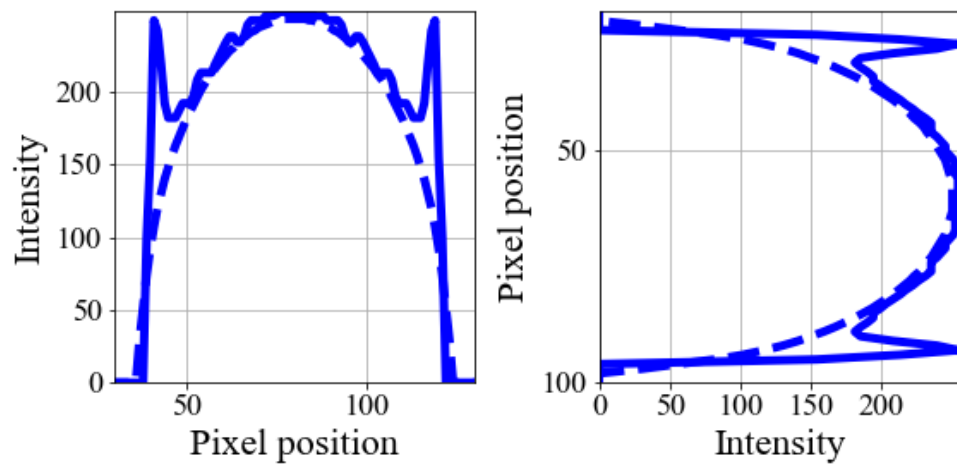
次に半透明物体における陰影画像を比較する．表 6 における設定 1 を図 19，設定 2 を図 20，設定 3 を図 21，設定 4 を図 22 に示す．より散乱による光の強度が減衰にくい物体は設定 1，最も不透明に近い物体は設定 4 である．

はじめに、最も光の強度が減衰しにくい散乱特性の設定1を検証する。図 19(a)では球側面がぼやけているように見えるが、図 19(b)では側面が白くなり、本来の球とは異なる応答をしている。しかし、物体領域の縁では計測の再現の精度が低いため、今回は具体的な考察を避ける。ここで、図 19(c)を確認すると、観測光強度分布の曲線のずれが小さく、球正面ではほとんど同じ分布を示している。本来時間遅れの増加による形状変化の影響は z 軸方向に大きい値を持つ法線方向が x, y 軸方向にずれ、側面ではもとの法線方向が x, y 軸方向に大きい値を持つ法線方向のためずれ量が小さい。そのため、相対的に球側面の観測光強度が増加したことになり、結果として合成した陰影が変化することが考えられる。一方で、振幅画像では全体の値が減衰する変化のため、二つの計測値に差が生じる。それにより、振幅画像と合成した陰影画像にて法線に応じた観測光強度の分布の差が変化していることが分かる。



(a) 振幅画像

(b) 陰影画像



(c) 光強度プロファイル

図 19 表 6 の設定 1 の ToF 計測による振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

次に，設定 2 の散乱特性について検証する．図 20(a) と図 20(b) では設定 1 と同じような傾向が現れているが，図 20(c) を評価すると観測される減衰の量が設定 1 よりも増加した．同時に，合成した陰影画像のプロファイルにおける側面の曲線の変化が減少している．これにより，二つのプロファイル曲線の関係が変化したと考えられる．

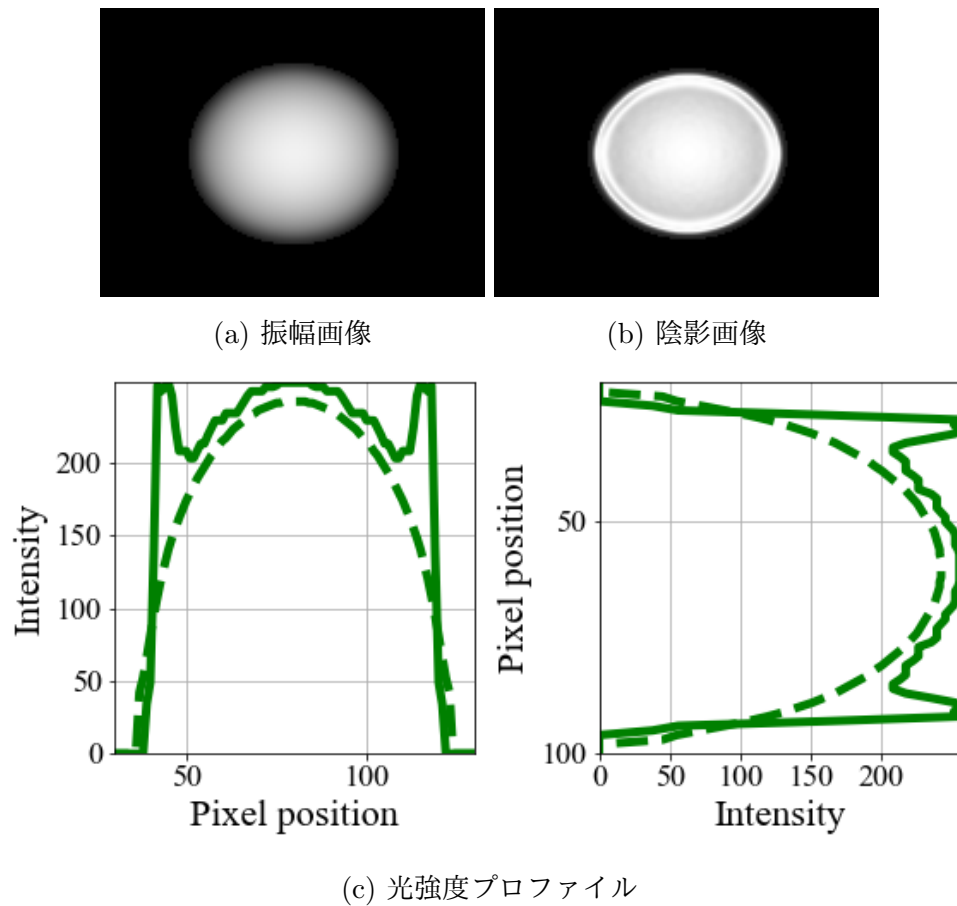


図 20 表 6 の設定 2 の ToF 計測による振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである．

次に，設定 3 の散乱特性について検証する．図 21(a) と図 21(b) では設定 1 および設定 2 と同じような傾向が現れている．ここで，図 21(c) を評価すると観測される振幅画像の減衰がさらに増加し，合成した陰影画像でも変化が表れている．これにより，合成した陰影画像と振幅画像は散乱光の広がり方に依存して変化することが確認できた，

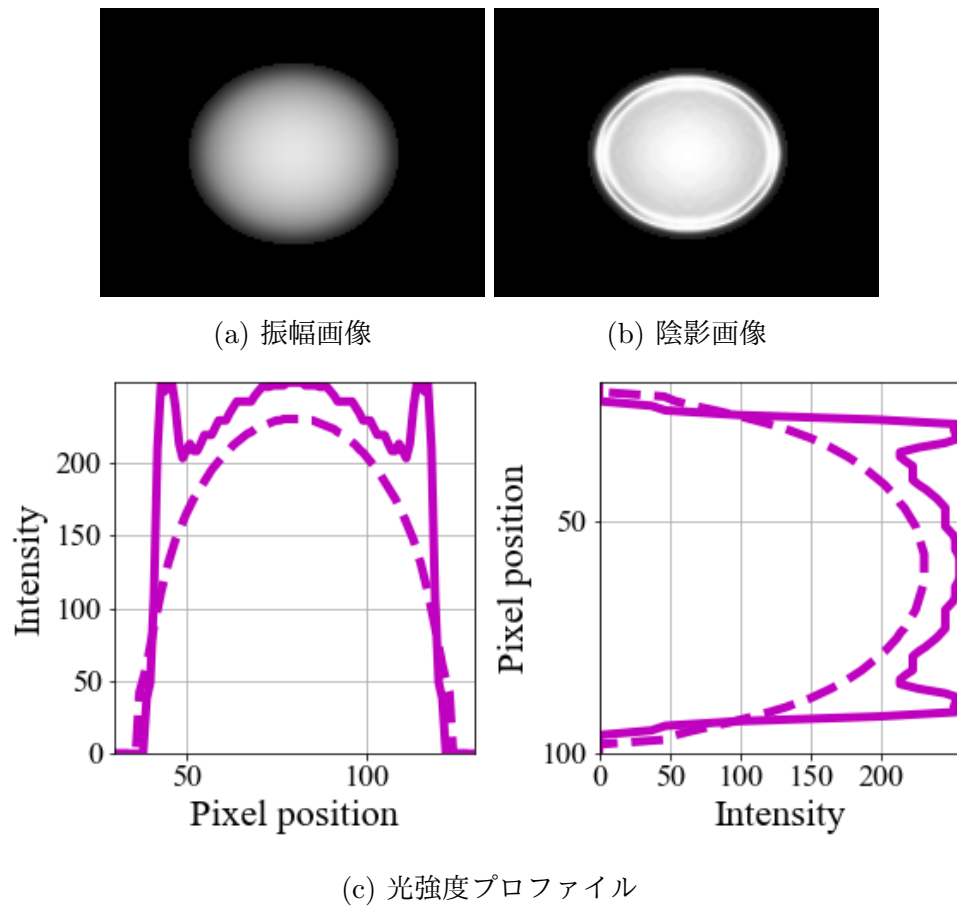


図 21 表 6 の設定 3 の ToF 計測による振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらと比較したプロファイルである．

最後に、設定 4 の散乱特性を検証する。図 22(a) では、振幅が減衰する影響が先ほどと同様に観測できる一方で、図 22(b) では、球の周囲の観測光強度が急激に減少し、これまでとも異なる合成した陰影画像を示している。ここで、図 22(c) を評価すると、振幅画像では先ほどからさらに減衰した観測光強度分布に変化している。しかし、合成した陰影画像では変化したことによる分布の変化がこれまでとは異なった曲線を示している。このことから、二つのプロファイルの差を考えるとこれまでの設定とは異なる値を持つ考えられる。

以上のことから ToF 計測における振幅画像と位相画像から合成した陰影画像を比較する手法で、散乱特性に応じた違いを見ることが可能である。

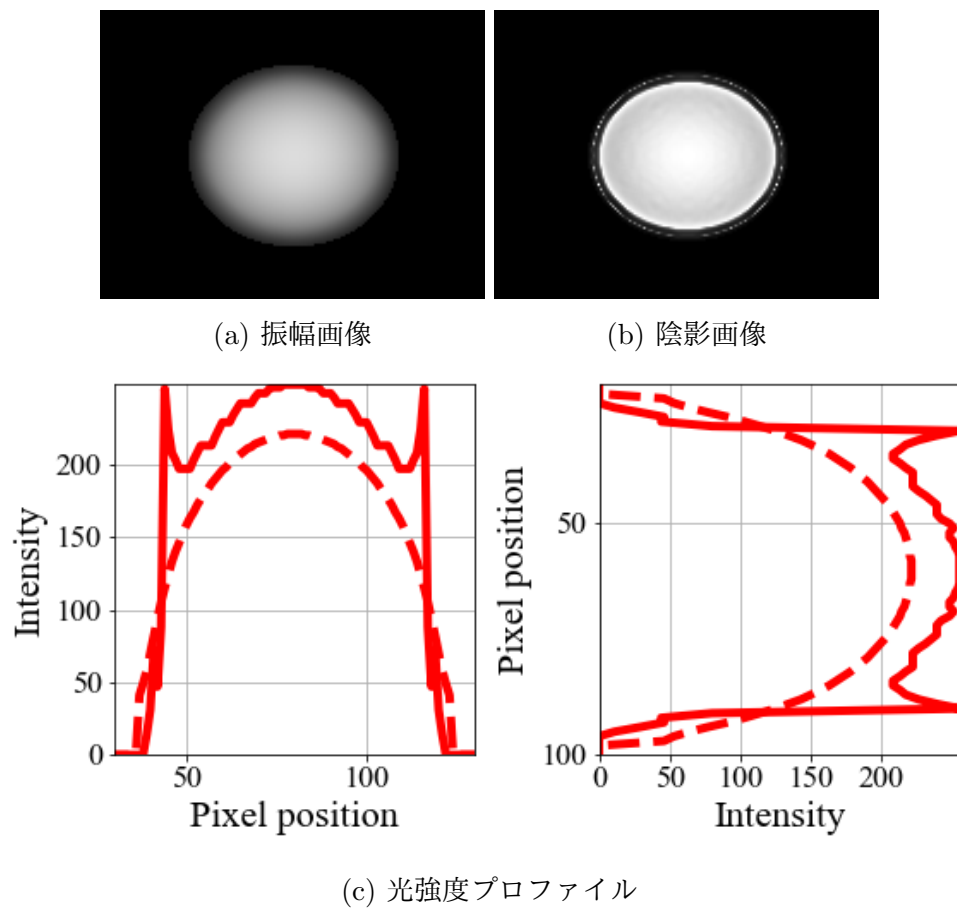


図 22 表 6 の設定 4 の ToF 計測による振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

5.4 実実験

振幅画像と位相画像から合成される陰影画像は不透明物体では一致するが，半透明物体に適応したとき画像が不一致になることを利用した判別を検証する．計測装置には Texas Instrument 社製の OPT-8241-CDK-EVM の ToF カメラを使用した．計測対象は図 23 の木，発泡スチロール，ポリプロピレン，ポリエチレンの直径 5cm の球を使用する．実験環境は図 24 に示す．計測対象の正面に ToF カメラを置くという単純な計測系を構成した．ここで，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，倍率を増加させて利用した．これにより本来の物体よりも拡大され，物体に対する xy 方向の分解能が向上する．

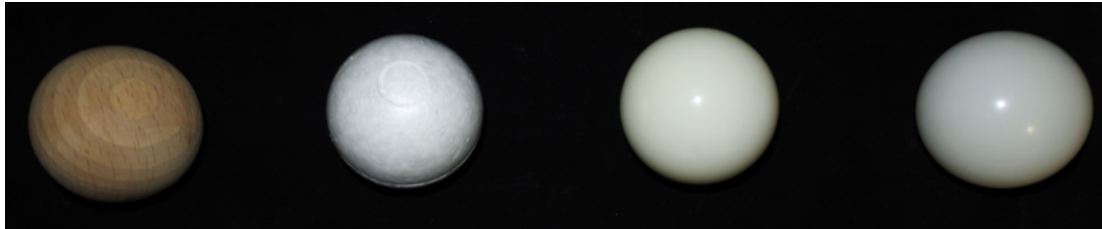


図 23 すべての直径 5cm の球であり，左から木，発泡スチロール，ポリプロピレン，ポリエチレンである．

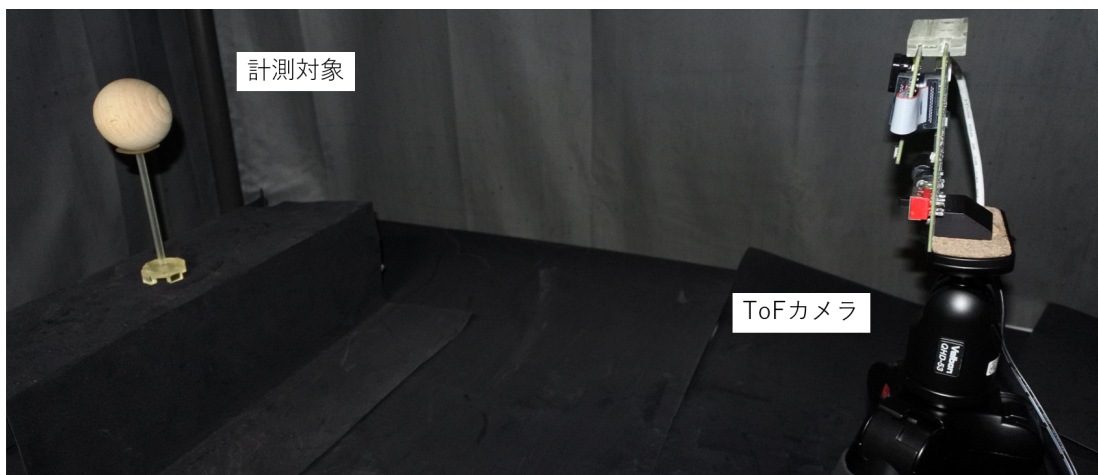


図 24 ToF カメラの正面に計測対象を配置した単純な実験環境を利用した．

はじめに、木製の球の計測結果を図 25 に示す。図 25(a) の振幅画像では、ToF カメラによる計測ノイズのため縦方向にノイズが多く存在する。また、球の左側に特に暗い領域が存在する。これはレンズを変更して拡大した撮影を行ったために発生すると考えられ、今後検討や改善が必要である。図 25(b) の合成した陰影画像にもノイズの影響がみられる。この二つの球の中央を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 25(c) に示している。左グラフのプロファイル曲線では破線で示される振幅画像では比較的滑らかな強度分布を示している。一方で、実線で示される合成した陰影画像ではどちらのグラフでもノイズの影響もあり凹凸が激しい。しかし、陰影画像プロファイルの概形は振幅画像プロファイルとほとんど同じであり、不透明物体のシミュレーションに比較的近い結果である。

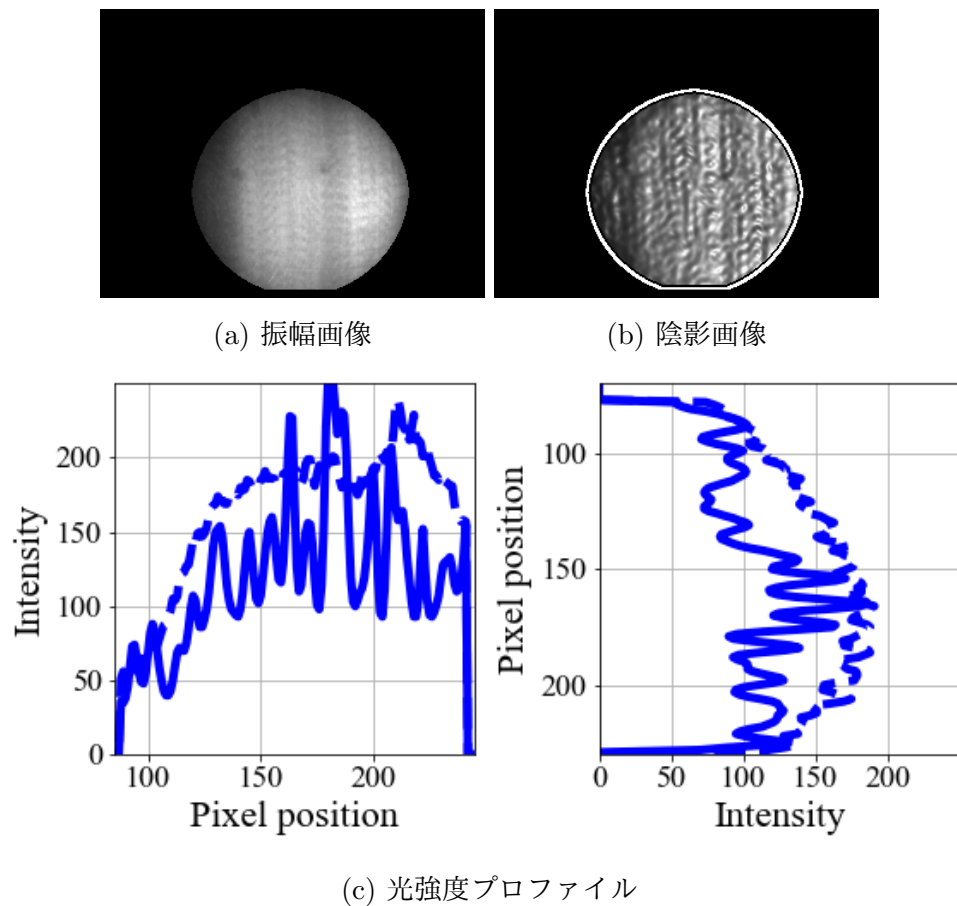


図 25 木製の球を ToF 計測した振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

次に、発泡スチロール製の球の計測結果を図 25 に示す。図 25(a) の振幅画像では、木製球の時と同様に、ToF カメラによる計測ノイズのため縦方向にノイズが多くし、球の左側に特に暗い領域が存在する。また、発泡スチロールの粒の間に見られる線が強調され、黒い物体として観測されている。その結果、図 25(b) の合成した陰影画像に網目状のノイズが発生している。この二つの球の中央を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 25(c) に示している。破線で示される振幅画像が滑らかな強度分布であることは、これまでと同様である。一方で、合成した陰影画像ではこれまで以上に大きいノイズにより、凹凸が激しくなり、分布の概形が球の形状と異なっている。

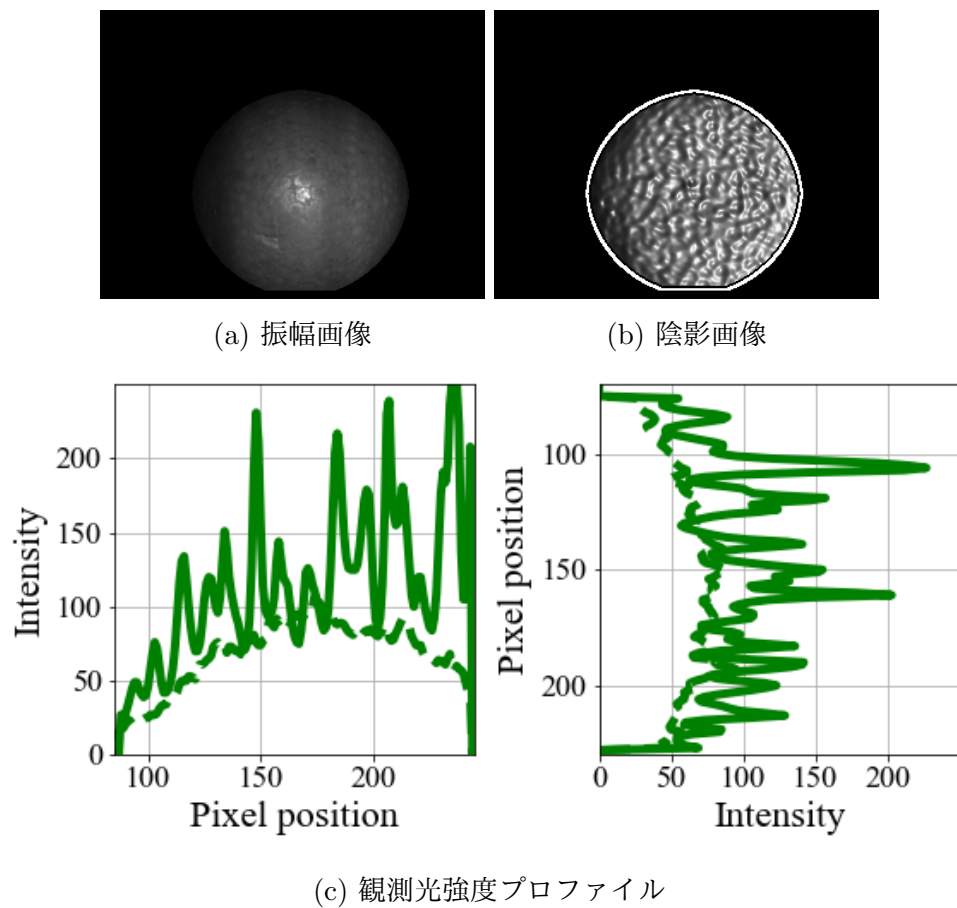


図 26 発泡スチロール製の球を ToF 計測した振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

次に、ポリプロピレン製の球の計測結果を図 27 に示す．図 27(a) の振幅画像では、球の中央に画像が白飛びした領域が存在する．この領域では距離も不正確になるため、図 27(b) の合成した陰影画像にもノイズの影響がみられる．この二つの球のサチレーションを避けて中央付近を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 27(c) に示している．破線で示される振幅画像では値が大きく減少しているものの、木製の球と同様に滑らかな強度分布を示している．一方で、合成した陰影画像ではノイズの影響を少なからず受けており、球の側面と正面の値にほとんど差のない平坦な分布を示している．

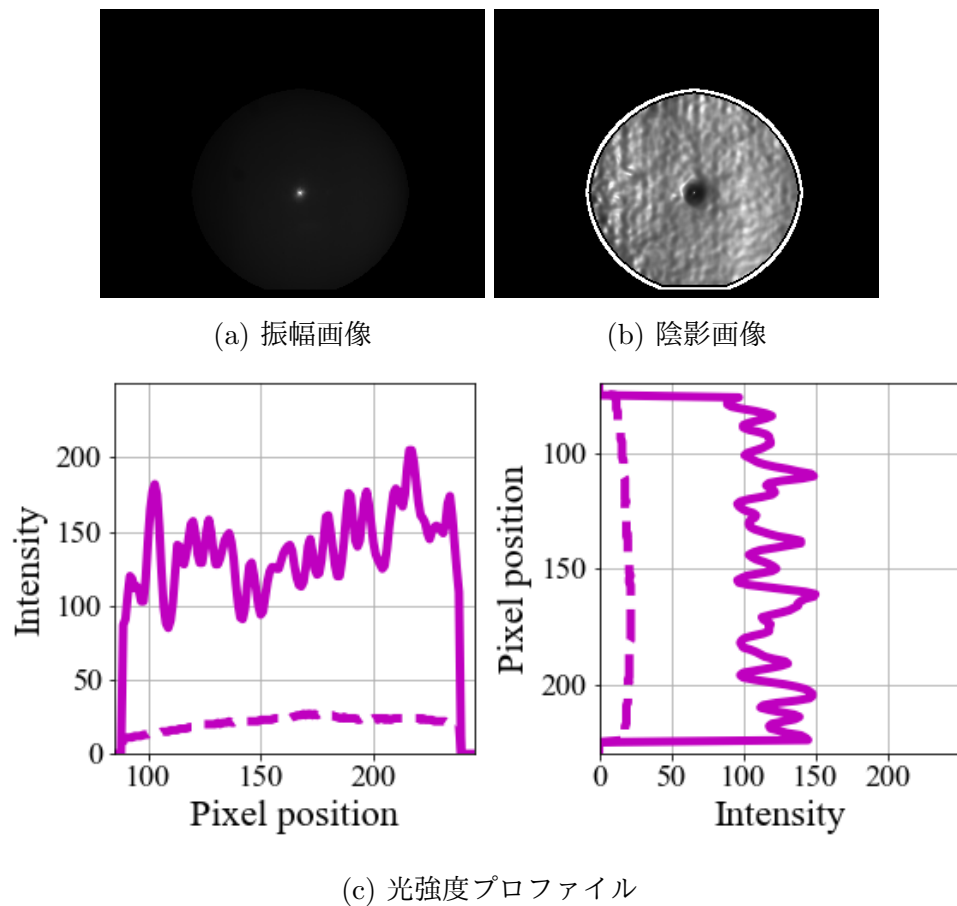


図 27 ポリプロピレン製の球を ToF 計測した振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらと比較したプロファイルである．

次に、ポリエチレン製の球の計測結果を図 28 に示す。ポリプロピレンと同様に図 28(a) の振幅画像では、球の中央に画像が白飛びした領域が存在する。この領域では距離も不正確になるため、図 28(b) の合成した陰影画像にもノイズの影響がみられる。そのうえ、求められた形状はほぼ平面である。この二つの球のサチレーションを避けて中央付近を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 28(c) に示している。破線で示される振幅画像ではポリプロピレンと同様に非常に減衰しているが、滑らかな強度分布を示している。一方で、合成した陰影画像では (b) を見てもわかるように球側面と球正面の差が小さくなり、平坦な観測光強度分布を示している。

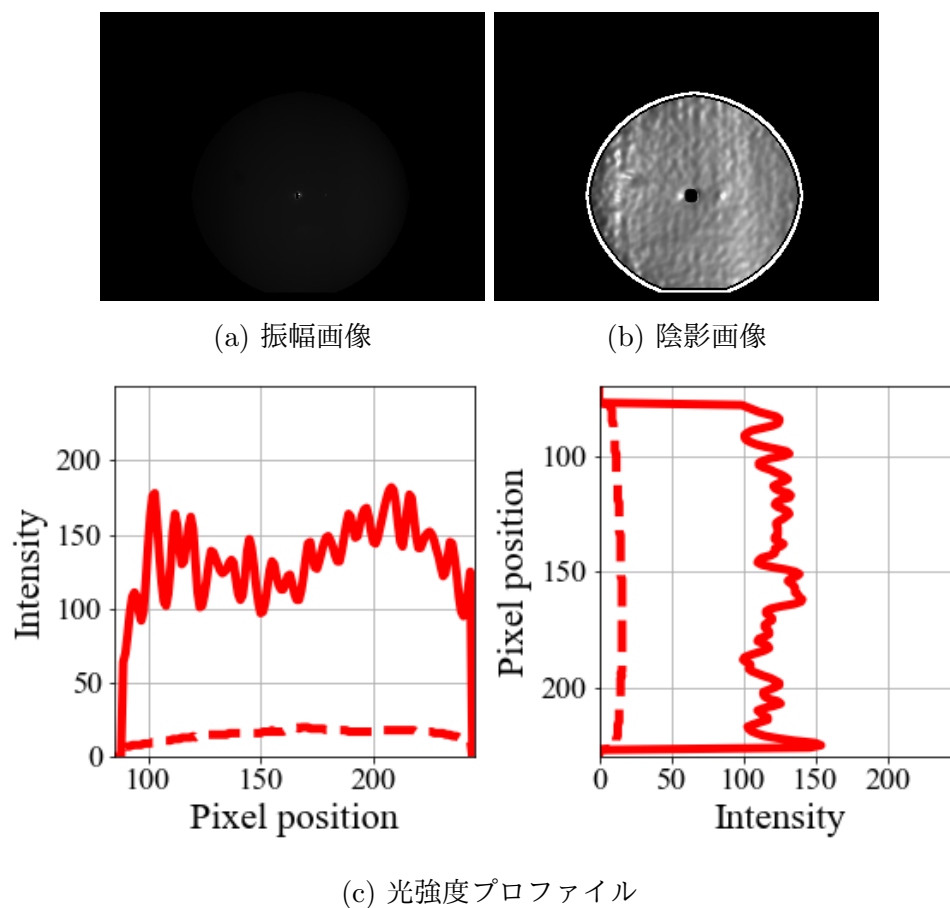


図 28 ポリエチレン製の球を ToF 計測した振幅画像と位相画像から合成した陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

5.5 考察

振幅画像と合成した陰影画像の分布の違いが材質固有であることを確認した。しかし、光源位置の影響が計測値に現れており、光強度プロファイルのうち、画像横方向の x 軸方向は ToF カメラの光源とセンサ位置関係から光源強度が一様に与えられていないと考えられる。そのため、評価に使用するのは画像縦方向の y 軸方向のプロファイルを利用すべきである。

シミュレーションから振幅画像の計測値が散乱光の広がりが大きくなるほど減衰することを確認し、合成した陰影画像の法線方向がカメラ方向から外れるほど不安定な値が観測される傾向を確認することができた。振幅画像の計測については実実験においても同様の傾向を確認することができた。しかし、合成した陰影画像の計測は ToF カメラで位相画像におけるノイズの影響が強いので、現在普及している ToF カメラでの実用は難しい。また、発泡スチロールの網模様がテクスチャとして鮮明化された。これらの問題を解消してより滑らかな計測値を用いて評価を行うことが望ましいと考える。

6. ToF カメラの振幅画像と通常カメラの陰影画像の不一致の比較による材質判別

6.1 提案手法

6.1.1 ToF カメラと通常カメラの観測光強度の計測方法の違い

通常のカメラと ToF カメラの観測光強度の計測方法は異なっており、半透明物体を対象として計測を行った際、連続波方式の ToF カメラでは強度が減少して観測される。例として、図 29(a) のような同じ周波数の位相が π ずれた振幅の異なる波が一つのピクセルに観測されたことを考える。通常のカメラでは、図 29(b) で表される露光時間に含まれるそれぞれの波の和を観測光強度とした計測画像を得ることができる。一方 ToF 計測では、図 29(c) で表される振動している波の部分が解析される。その結果、観測光の波同士が合成された波の最大値は、観測光の振幅の最大値よりも低くなることが考えられる。これにより、ToF カメラの計測は通常カメラよりも減衰した領域が発生することで違いが生じる。この二つの計測値の差を材質判別に利用することを試みる。

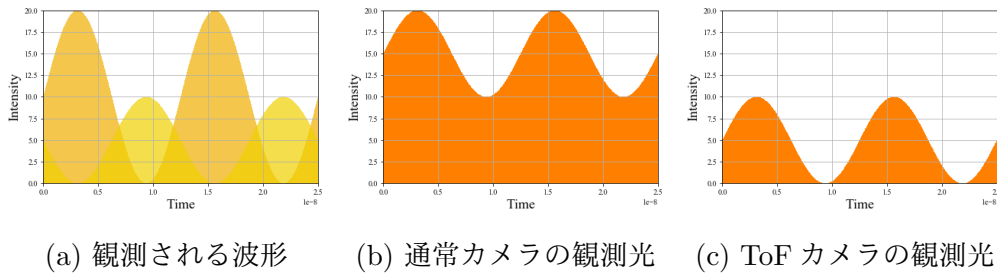


図 29 通常のカメラは光の強度そのものの和を観測光強度として計測するが、ToF カメラは観測した波形から波を取り出し、その振幅から観測光強度を計測する。

6.1.2 観測光強度の計測値の差

通常カメラで観測される観測光強度 I_{cam} は次の式で表される。

$$I_{cam} = \sum_{n=1}^N E_n \quad (21)$$

これは、カメラの露光時間内に観測された光線の強度が足しあわされていることを表している。一方で、ToF カメラで計測される観測光強度は減衰した振幅 $X_{1,N}$ になり、式 (21) と式 (10) から次の関係式が成り立つ。

$$I_{cam}^2 > X_{1,N}^2 \quad (22)$$

この式 (22) と式 (8) より、 $n \rightarrow \infty$ における比較の最大の差を生じる要因を次の式で表される時間遅れによると考える。

$$1 > \cos 2\pi f(\alpha_{1,N-1} - \tau_N) \quad (23)$$

この α は式 (13) と式 (14) から以下の値になる。

$$\alpha_{1,N-1} = 2\pi f\tau_{sum} \quad (24)$$

ここで、 α は計測歪みに応じて大きくなる。それを踏まえて、 α と τ_n の差が大きくなるほど式 (23) における $\cos$ の内部の値が 0 よりから離れ、結果として左辺と右辺の差も大きくなる。よって、散乱光の広がりが大きくなるほど観測光強度の減衰量が大きくなり、通常のカメラによる観測光強度との差も大きくなる。また、表面形状によって散乱現象が発生する前の時間遅れが決まるので、散乱光の時間遅れが物体形状へ依存することも大きく期待できる。このときの時間遅れを利用した材質特性の観測を試みる。

6.2 シミュレーション

6.2.1 シミュレーション条件

複数の散乱特性の物体を対象として、ToF カメラの振幅画像と通常のカメラの陰影画像を再現したシミュレーションを行った。ここで、このシミュレーションにおいて、ToF カメラの観測光強度の減衰が非常に小さく判別できないという問題が発生した。この問題の正しい解決は散乱光の量を増やすことであるが、この処理を実際に行うには非常に負荷が大きくなり、本研究の目的とはずれた作業をする必要がある。そこで、内部散乱による減衰処理に対して時間遅れを 1000 倍

して与えることで，光線の波形間のずれを増加させて減衰も増加させた．そのため，この実験で使用することはないが，距離は想定したシミュレーションと大きくかけ離れた値になっている．シミュレーションの計測対象は半球を想定し，設定するパラメータは表 7 および表 8 を利用する．

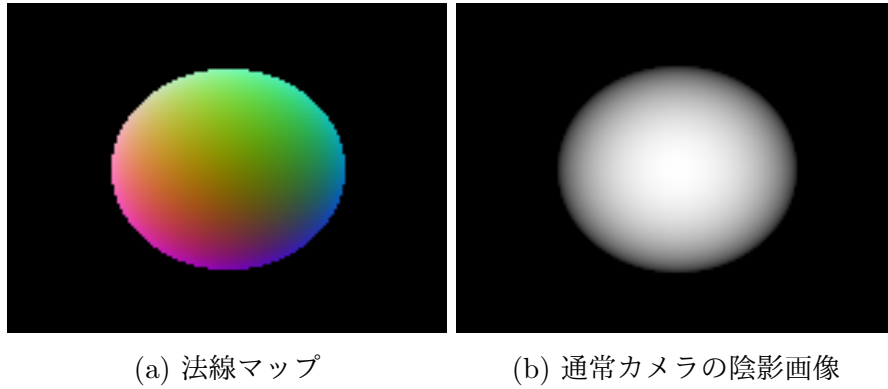


図 30 シミュレーションシーンに使用した半球

表 7 振幅画像と陰影画像の比較法シミュレーションの
固定パラメータ

クラス	パラメータ	設定値
Object	Depth マップ	図 30
	マスク画像	図 30 の物体領域
	散乱回数	10
	散乱による遅延時間	$\tau \times 1000$
Wave	振幅	10
	周波数	80 MHz

表 8 振幅画像と陰影画像比較法シミュレーションの
変更パラメータ

クラス	パラメータ	設定 1	設定 2	設定 3	設定 4
Object	減衰項	$e^{-5 \times 10^{10}}$	$e^{-10^{11}}$	$e^{-2 \times 10^{11}}$	$e^{-5 \times 10^{11}}$

6.2.2 シミュレーション結果

はじめに，不透明物体の結果を図 31 に示す．シェーディングを用いた手法と同様に二つの画像に差はなく，プロファイルを見ても同じ観測光強度を示している．これをもとに，散乱特性によって観測光強度に差が生じる不一致が，材質の散乱特性と関連付けられると考えられる．

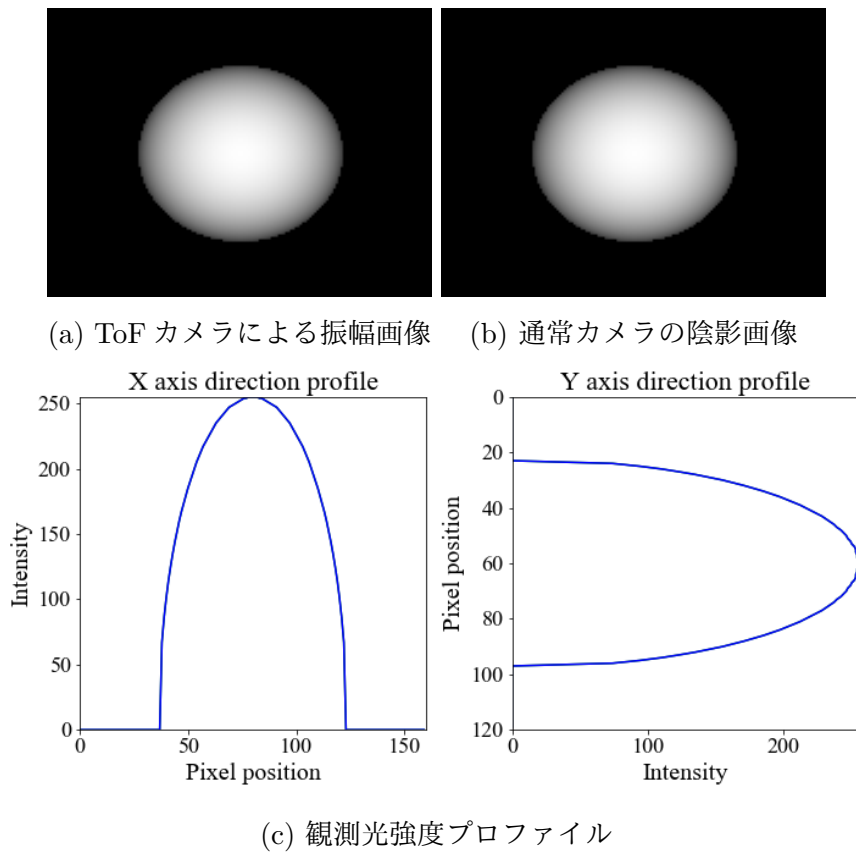


図 31 不透明物体は直接反射光のみしかないので，二つの計測方法による観測光強度の差がなく，同じ値を持つ．

次に半透明物体における振幅画像と陰影画像を比較する．表 8 における設定 1 を図 32，設定 2 を図 33，設定 3 を図 34，設定 4 を図 35 に示す．より散乱による光の強度が減衰しにくい物体は設定 1，最も不透明に近い物体は設定 4 である．

はじめに，最も光の強度が減衰しにくい散乱特性の設定1を検証する．図 32(a) の ToF カメラの振幅画像と図 32(b) の通常カメラの陰影画像ではさほど大きな違いを見ることはできない．そこで，図 32(c) より観測光強度分布を確認すると，振幅画像の球の正面部において強度の減衰が確認された．これは，想定していた波形の合成による振幅の減衰が振幅画像にて観測することができたことを表している．

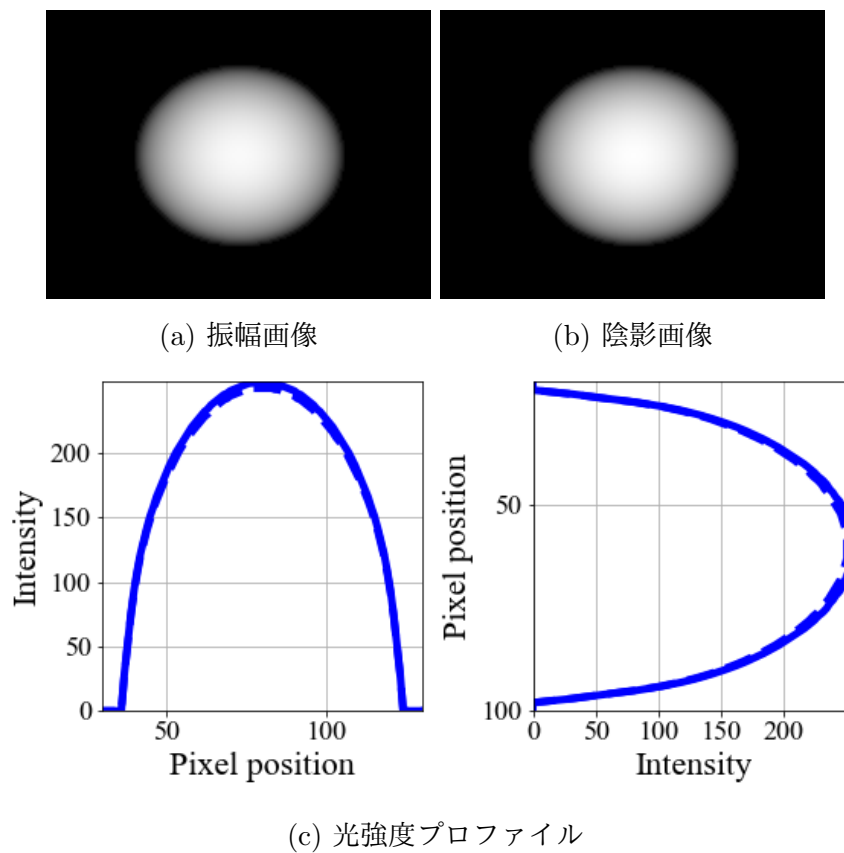


図 32 表 8 の設定 1 の ToF カメラの振幅画像，通常カメラの陰影画像と観測光強度のプロファイルである．

次に，設定 1 よりも少し光の強度減衰が大きくなる設定 2 の散乱特性について検証する．再現した画像単体では変化がほとんど感じられないが，図 33(a) の ToF カメラの振幅画像と図 33(b) の通常カメラの陰影画像を比較すると振幅画像が暗くなったようにみられる．そこで，図 33(c) より観測光強度分布を確認すると，振幅画像の球の正面部において強度の減衰が設定 1 より増加したことが確認された．また，球側面部の強度分布にもわずかながら変化が生じ，曲線が滑らかではなくなっている．

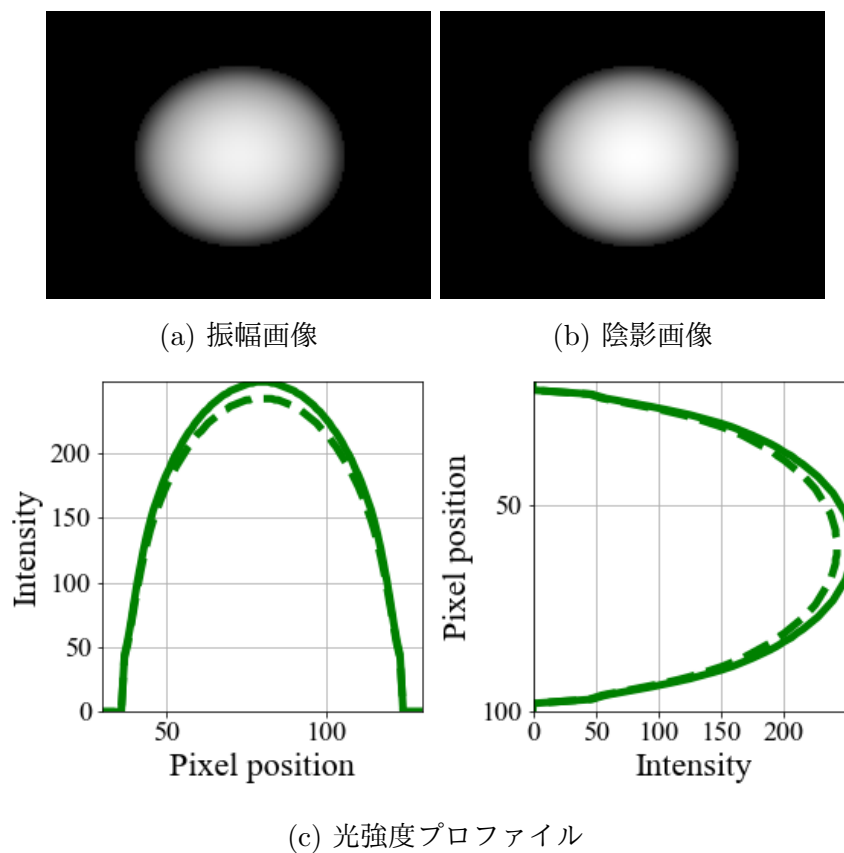


図 33 表 8 の設定 2 の ToF カメラの振幅画像，通常カメラの陰影画像と観測光強度のプロファイルである．

次に、さらに散乱光の影響による振幅減衰が大きいと想定される設定3の散乱特性について検証する。設定2と同様に再現した画像単体では変化がほとんど感じられないが、図34(a)のToFカメラの振幅画像と図34(b)の通常カメラの陰影画像を比較すると振幅画像が暗くなったようにみられる。そこで、図34(c)より観測光強度分布を確認すると、振幅画像において強度の減衰が増加したことが確認された。また、球側面部の強度分布の変化もより明確に表れるようになっている。しかし、先ほどと同様に強度分布が滑らかではなくなる部分があり、現象が発生している位置が同じである。そのため、今後シミュレーションをより詳細に行う場合は、法線方向に依存する現象か、物体領域の定義による計算の誤差かを検証する必要がある。

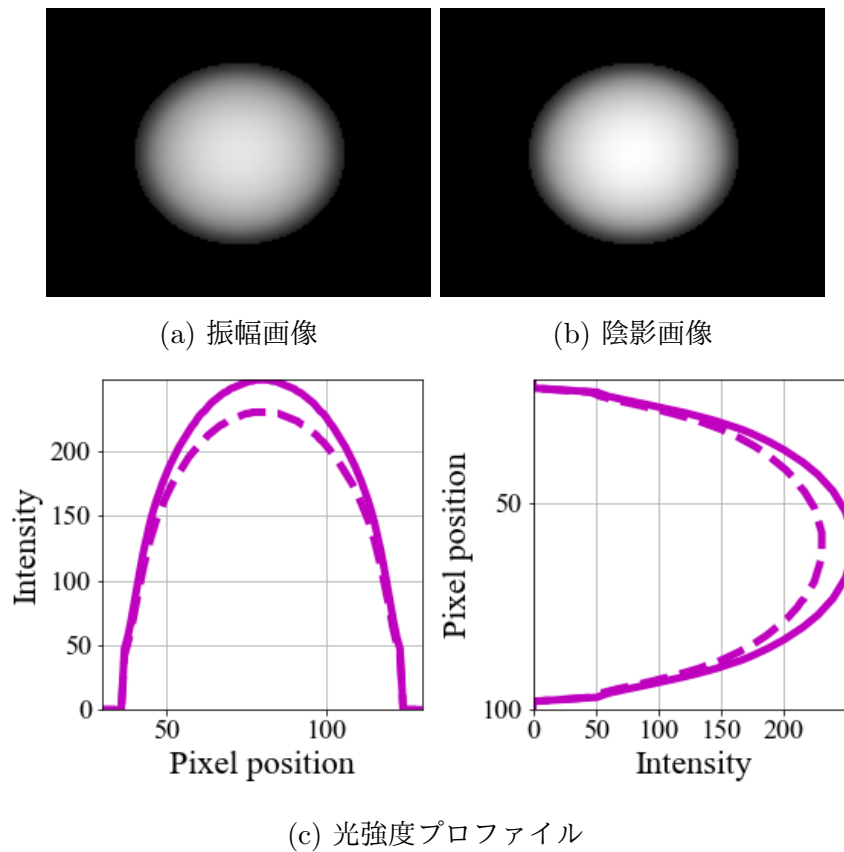


図34 表8の設定3のToFカメラの振幅画像，通常カメラの陰影画像と観測光強度のプロファイルである。

最後に、設定4の散乱特性を検証する。この設定は最も散乱の発生しやすい材質を想定している。図 35(a) の振幅画像と図 35(b) の陰影画像は外観も大きく異なっており、振幅画像がより暗くなっている。また、図 35(c) の観測光強度プロファイルを確認すると振幅の減少が最も大きく表れている。

以上のことから、散乱が発生しやすくなるほど、振幅画像と陰影画像に生じる差が大きくなることを確認した。ToF 計測における振幅画像と通常カメラの陰影画像を比較する手法で、散乱特性に応じた違いを見ることが可能である。

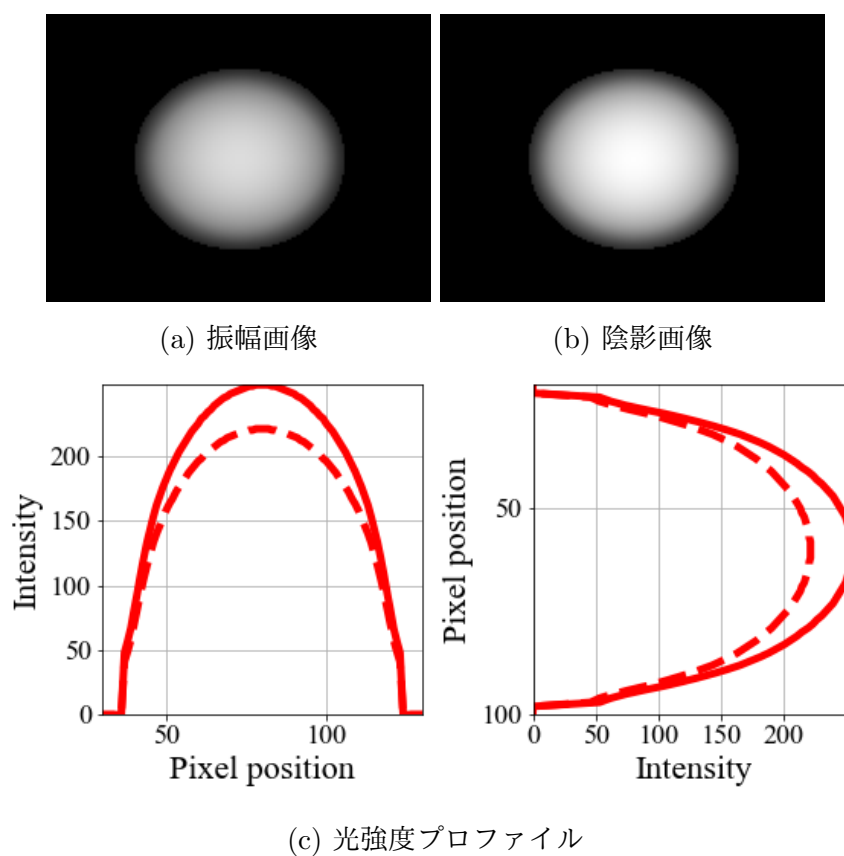


図 35 表 8 の設定 4 の ToF カメラの振幅画像、通常カメラの陰影画像と観測光強度のプロファイルである。

6.3 実験環境

今回の実験では二種類のカメラで同軸の計測を行う必要があるので、ビームスプリッタを用いた図 36 の計測系を構築した。使用している赤外線透過フィルタは、ToF カメラの起動状態表示用 LED の点滅を防ぐために使用した。

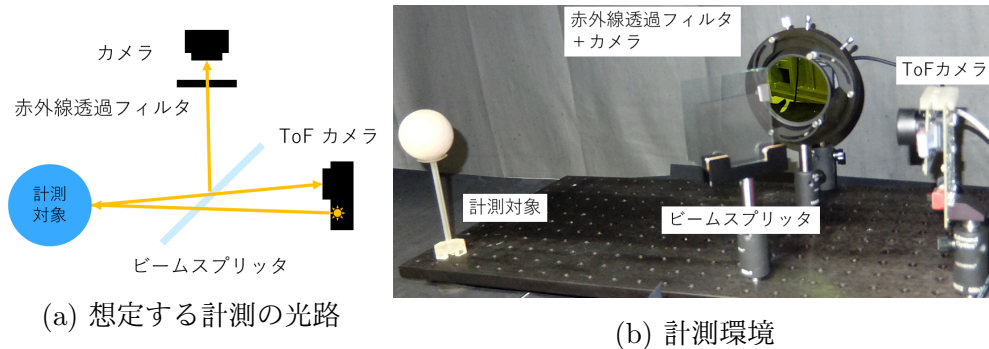


図 36 ToF 計測系の応答をビームスプリッタで分割し、赤外カメラで観測した。

また、カメラ間でのピクセル単位の位置合わせや解像度の調整を行う必要があり、左右反転処理、解像度調整のためのアフィン変換を適応している。

6.4 実実験

通常カメラと ToF カメラの観測光強度の計測方法の違いを利用した判別を検証する。計測装置には Texas Instrument 社製の OPT-8241-CDK-EVM の ToF カメラ、通常のカメラは FLIR 社製の Grasshopper3 2.8 MP Mono 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、倍率を増加させて利用した。計測対象は先ほどと同様に図 23 の木、ポリプロピレン、ポリエチレン、発泡スチロールの直径 5cm の球を使用する。

はじめに，木製の球の計測結果を図 37 に示す．図 37(a) の振幅画像と図 37(b) の陰影画像ではほぼ等しい結果に見られる．二枚の画像の球の中央を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 37(c) に示している．破線で示される陰影画像の光強度分布の曲線は滑らかであり，前節の提案手法よりも比較のしやすいデータを観測できていると考える．また，不透明な物体であるため二つの観測光強度が重なっていることも想定した通りの結果である．

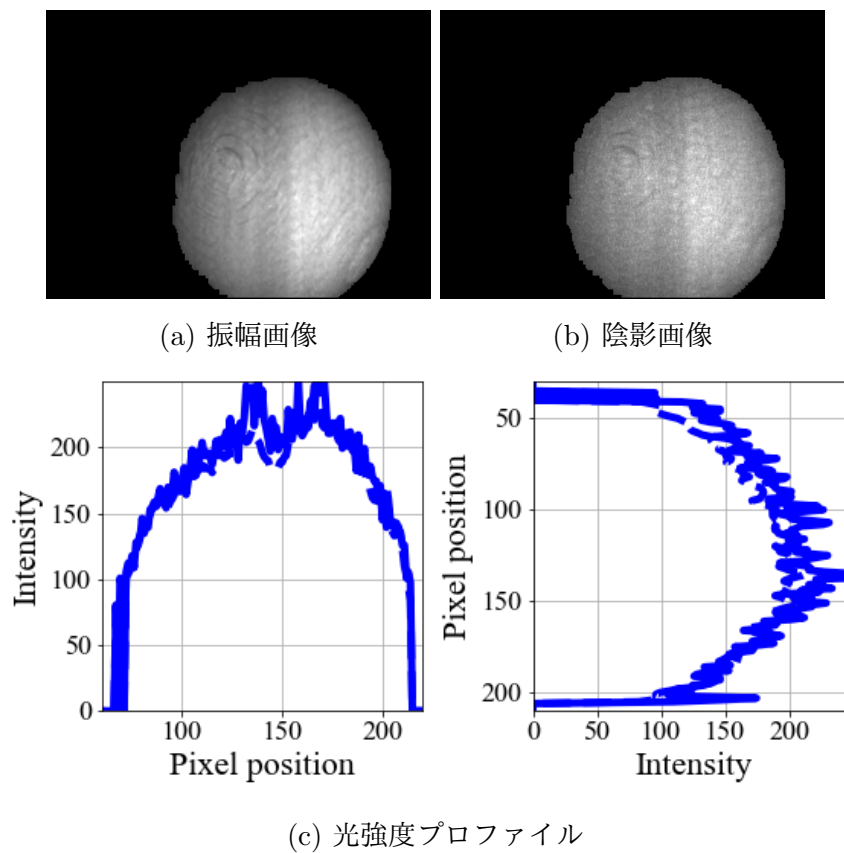


図 37 木製の球を ToF 計測した振幅画像と通常カメラの陰影画像とそれらを比較したプロファイルである．

次に、発泡スチロール製の球の計測結果を図 38 に示す。図 38(a) の振幅画像と図 38(b) の陰影画像ではほぼ等しい結果に見られる。二枚の画像の球の中央を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 38(c) に示している。振幅画像と陰影画像の強度が一様に減衰しており、強度は木製球よりも比較的小さくなっている。ただし、強度分布は同一であり、比較的不透明である材質を反映していると考えられる。しかし、本研究では考慮していなかった拡散反射の影響が大きく出ていると考えられるので、材質の応答を詳細に評価するために再度検討が必要である。

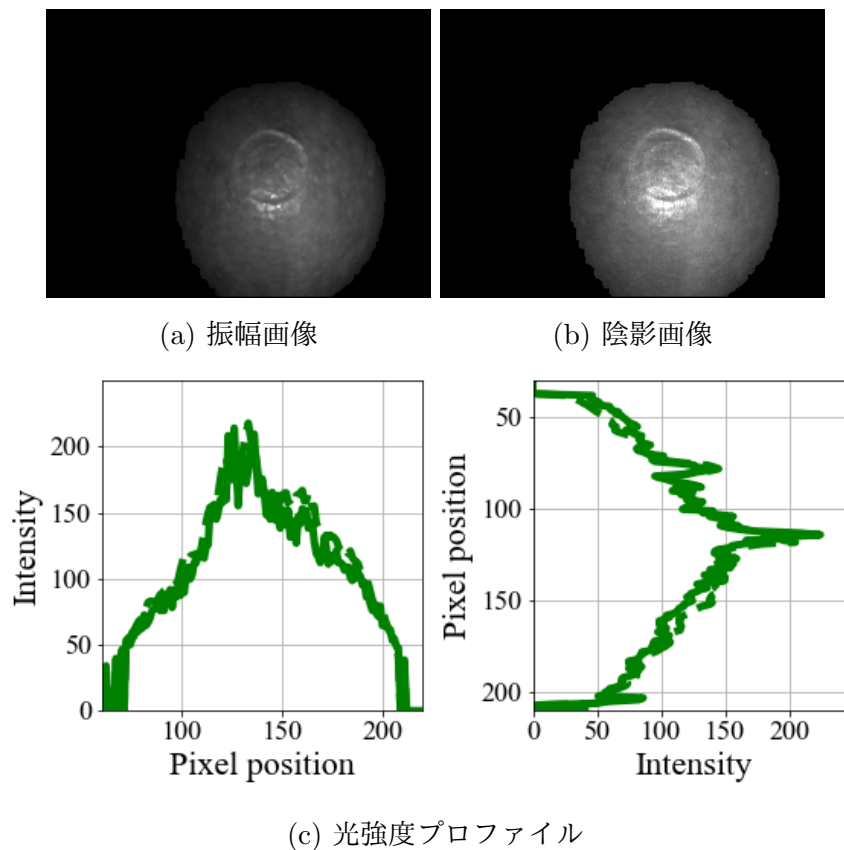


図 38 発泡スチロール製の球を ToF 計測した振幅画像と通常カメラの陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

次に，ポリプロピレン製の球の計測結果を図 39 に示す．図 39(a) の振幅画像と図 39(b) の陰影画像は一見して同じ結果であり，両方の画像で同じ点に白飛びした領域が存在する．二枚の画像の球のサチレーションを起こしていない中央周辺を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 39(c) に示している．散乱の発生しやすいポリプロピレンでは，振幅画像と陰影画像の観測光強度がともに大きく減衰した，さらに，振幅画像における観測光強度がより大きく減衰したことにより，二つのプロファイルの分布に差が生じた．

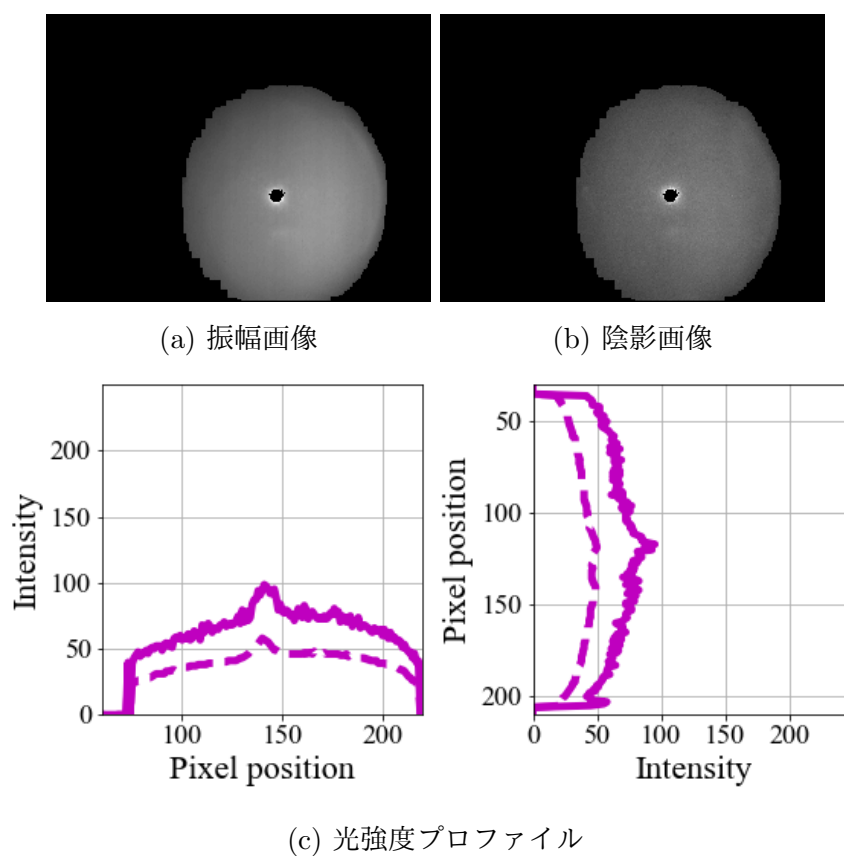


図 39 ポリプロピレン製の球を ToF 計測した振幅画像と通常カメラの陰影画像とそれらを比較したプロファイルである．

最後に、ポリエチレン製の球の計測結果を図 40 に示す。図 40(a) の振幅画像と図 40(b) の陰影画像は一見して同じ結果であり、両方の画像で同じ点に白飛びした領域が存在する。二枚の画像の球のサチレーションを起こしていない中央周辺を通る x, y それぞれの方向の光強度プロファイルを図 40(c) に示している。ポリプロピレンと同様に、散乱の発生しやすいポリエチレンでは、振幅画像と陰影画像の観測光強度がともに大きく減衰した、さらに、振幅画像における観測光強度がより大きく減衰したことにより、二つのプロファイルの分布に差が生じ、この差はポリプロピレンとは異なっている。

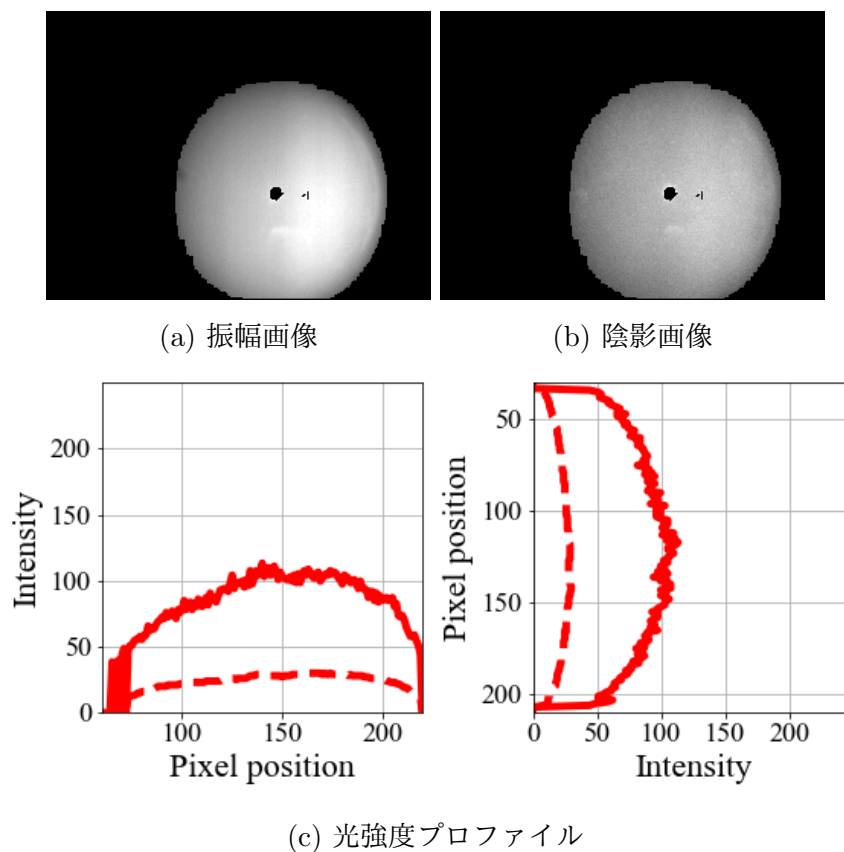


図 40 ポリエチレン製の球を ToF 計測した振幅画像と通常カメラの陰影画像とそれらを比較したプロファイルである。

6.5 考察

振幅画像と陰影画像による観測光強度のプロファイルに示される差は材質固有であることを確認した。しかし、サチレーション領域の扱いなどを詳細に検討する必要がある。また、前節ほどではないが、ToF カメラの光源とセンサ位置関係から光源強度が一様に与えられていないことによる影響がみられる。そのため、プロファイルの光強度分布の反転が起こっていると考えられる。そこで、光源からの照射光が一様になる配置に修正を行うべきである。

このように、数値をプロファイルを評価した場合、材質固有の差がはっきり表れているため材質判別に十分利用できると考えられる。ただし、この結果には光源とセンサの位置関係の影響も含まれており、実用化するためにはその影響が低減される計測環境を構築する必要がある。しかし、ToF カメラが光源位置の影響を受けやすく、通常のカメラが受けにくいという違いを利用することも考えられる。

7. おわりに

本稿では材質判別に向けて，ToF カメラを用いた材質固有の散乱現象の観測手法として，影を用いた散乱光抽出による計測値を利用した材質判別，ToF カメラによる振幅画像と位相画像を合成した陰影画像として比較する材質判別，ToF カメラの振幅画像と通常カメラの陰影画像を用いた観測方法の違いを利用した材質判別を提案した．

影を用いた散乱光抽出による計測値を利用した材質判別では，従来法で利用していた計測歪みを含む距離の観測値ではなく，散乱光のみが観測可能な影領域を物体表面上に発生させることで，材質固有の散乱特性の影響をより詳細に観測できることを確認した．また，物体表面上の x, y 方向に現れる散乱による歪んだ位相の分布も材質固有の特性に依存して変化することを確認した．一方，物体表面に分布する散乱光を観測するため，表面形状は平面である必要がある．また，影を物体表面に発生させるため遮蔽版を用いていることもあり，計測系のセッティングが計測対象を観測する条件に大きく影響する．また，半透明物体表面上の影はそれぞれの物体で境界があいまいになるので，個別に設定する必要がある．動的な状態の物体には不向きである．解決策としては，計測対象を設置するときの表面の位置を合わせによる画像における影領域の境界を固定した計測があげられる．

ToF カメラによる振幅画像と位相画像を合成した陰影画像として比較する材質判別では，シミュレーションにて ToF カメラにおける二種類の計測値をもとに材質判別の手がかりを得られることを確認した．実実験においても振幅画像と位相画像から得られる光強度に差が発生するが，ToF カメラのノイズの影響が大きく利用することが難しい．解決方法としては，計測対象を表面にテクスチャのない物体に制限し，計測時間を長くすることでノイズを低減することや，法線方向の計算を現在使用しているもっとも単純な方法から変更することが考えられる．

ToF カメラの振幅画像と通常カメラの陰影画像を用いた観測方法の違いを利用した材質判別では，シミュレーションにて散乱特性に応じた観測値の差が生じることを確認した．実実験においても二つの計測方法で差が発生し，一部の物体では理想の応答を得ることができた．しかし，ToF カメラの計測では，光源位置とセンサ位置の関係が強く影響することも確認できた．今後の課題は物体とカメラ

の配置における必要条件の選定や、現在の配置では同軸にあるものは二種のカメラのセンサだけなので、光源も同軸にした配置の構築が考えられる。

本研究では、三種の材質判別手法を提案し、シミュレーションと実実験でその理論の有用性を確認した。特に、厚みの違うアクリル板やポリプロピレンとポリエスチレンの判別のような、色や形状で物体が判断できない場合にも材質の差を見分けることが可能になり、テクスチャに依存しない物体を認識する技術として有効な手段であることを示した。これにより、本研究の提案手法とテクスチャを考慮した手法との組み合わせによる更なる物体認識技術の向上が期待できる。

今後の展望としては、物体の法線方向に依存した観測値の変化を計測する計測系の改善が考えられる。現在の実験結果は対象を球としており、計測した値は点対象の分布を示すことが想定される。シミュレーション結果でも点対象の応答は確認されたが、実環境実験でそのような結果が得られなかった。これは ToF カメラの計測で光源位置とセンサ位置のずれが考慮できていないことによると考えられる。一般的な ToF カメラで計測されるシーン中では、大きな物体が複数存在するシーンを対象としており、光源位置は影響しないと考えることができる。一方で、本研究のような一つの物体を詳細に計測する時には、光源位置が計測値に大きく影響する。そこで、現在同軸上には ToF カメラと通常のカメラが配置されているので、光源も同軸になるような配置に変更した計測を行う必要があると考えられる。また、本研究では ToF カメラに付属する光源をそのまま利用したが、レンズの変更や物体の配置における適切な照射光を与えられていなかったと考えられる。そこで、今後の計測の精度を向上させるために光源の改善の検討が必要である。これにより、法線方向に依存した観測値が計測された場合、物体の計測値の変化から材質判別が可能なアプリケーションが開発可能になる。適応可能なシーンはリサイクルのためのゴミの材質分別や品質管理のための材質計測に利用できると考えられる。また、物体とカメラの距離が一定でなければならない制限がある。そこで、ToF 光源の計測周波数の変更などによって、距離の影響による計測値の変化に対する材質判別のロバスト性の向上を検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり，懇切なご指導ご鞭撻を賜りました光メディアインタフェース研究室向川康弘教授に心より感謝いたします。また，本研究の遂行にあたり，中間発表や修士論文発表会の場で貴重なご意見を賜りましたサイバネティクス・リアリティ研究室清川清教授に厚く御礼申し上げます。また，本研究の遂行にあたり，細やかなご指導ご助言をいただいた光メディアインタフェース研究室舩富卓哉准教授に心より感謝いたします。また，本研究を行うにあたり，多大なるご助言をいただいた光メディアインタフェース研究室田中賢一郎助教に心から感謝いたします。また，本研究を行うにあたり，貴重なご助言をいただいた光メディアインタフェース研究室久保尋之助教に心から感謝いたします。

また，研究室生活を様々な面で支えていただいた光メディアインタフェース研究室秘書登淑恵さんに厚く御礼申し上げます。また，修士論文執筆にあたり，多くのご指導ご助言をいただいた光メディアインタフェース研究室岩口堯史さんに心から感謝いたします。最後に研究活動だけでなく日常生活でもお世話になりました光メディアインタフェース研究室内の学生の皆様方に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] David Eigen and Rob Fergus. Predicting Depth, Surface Normals and Semantic Labels with a Common Multi-Scale Convolutional Architecture. In *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 2650–2658. IEEE, 2015.
- [2] Stefan Fuchs. Multipath Interference Compensation in Time-ofFlight Camera Images. In *Proc. IAPR International Conference on Pattern Recognition*, page 3583–3586. IEEE, 2010.
- [3] John P. Godbaz, Michael J. Cree, and Adrian A. Dorrington. Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar. In *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pages 91–116. Springer, 2012.
- [4] Sun Kwon Kim, Byongmin Kang, Jingu Heo, Seung-Won Jung, and Ouk Choi. Photometric stereo-based single time-of-flight camera. *Optics Letters*, 39(1):166–169, 2014.
- [5] Kazuya Kitano, Takanori Okamoto, Kenichiro Tanaka, Takahito Aoto, Hiroyuki Kubo, Takuya Funatomi, and Yasuhiro Mukaigawa. Recovering temporal PSF using ToF camera with delayed light emission. *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, 9(1):15, 2017.
- [6] Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, and Alexander C. Berg. SSD: Single Shot Multi-Box Detector. In *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 21–37. Springer, 2016.
- [7] David G. Lowe. In *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 20–27. IEEE.

- [8] Joseph Redmon and Ali Farhadi. YOLO9000: Better,Faster,Stronger. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 7263–7271. IEEE, 2017.
- [9] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 39(6):1137–1149, 2017.
- [10] Hyunjung Shim and Seungkyu Lee. Recovering translucent object using a single time-of-flight depth camera. In *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pages 841–854. IEEE, 2015.
- [11] Shuochen Su, Felix Heide, Robin Swanson, Jonathan Klein, Clara Callenberg, Matthias Hullin, and Wolfgang Heidrich. Material Classification using Raw Time-of-Flight Measurements. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 3503–3511. IEEE, 2016.
- [12] Kenichiro Tanaka, Yasuhiro Mukaigawa, Takuya Funatomi, Hiroyuki Kubo, Yasuyuki Matsushita, and Yasushi Yagi. Material Classification using Frequency- and Depth-Dependent Time-of-Flight Distortion. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 79–88. IEEE, 2017.
- [13] Changpeng Ti, Ruigang Yang, James Davis, and Zhigeng Pan. Simultaneous Time-of-Flight Sensing and Photometric Stereo with a Single ToF Sensor. In *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 4334–4342. IEEE, 2015.