

ToF カメラの距離計測歪みを手掛かりとした 半透明物体の分類

岩口 優也^{1,a)} 田中 賢一郎^{2,1} 青砥 隆仁¹ 久保 尋之¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要：近年、物体に光を照射してその反射光を受光するまでの時間差を計測することで、物体までの距離を計測可能な ToF カメラが、注目を集めている。ToF カメラを用いて半透明物体までの距離を計測した場合、表面下散乱成分は直接反射成分と比べて時間的に遅れてカメラに到達するため、距離計測の結果に歪みが生じる。本研究では、この歪みが物体までの距離に依存することと材質に固有の情報であることに着目し、半透明物体の分類手法を提案する。実験では、様々な半透明物体を計測し、計測歪みが距離や材質に応じて変化すること、および半透明物体の分類が可能であることを確認した。

1. はじめに

コンピュータビジョン分野では、物体の材質を推定する研究が活発に行われており、ロボットの物体認識・シーン理解やゴミの分別によるリサイクルコストの削減、食品の品質検査などへの応用が期待されている。しかしながら、非破壊かつ非接触による材質推定は非常に難しい問題である。例えば、プラスチックの皿と陶器の皿のように、同じ形状、同じ色を持つ物体の識別は、画像のみから推定することは難しく、反射などの光学特性に代表される物理特性の違いを利用する必要がある。

一方、物体に光を照射し、反射光を受光するまでの時間を計測することで物体までの距離を計測可能な Time-of-Flight (ToF) カメラが近年急速に普及している。ToF カメラは、サブナノ秒 (1 ナノ秒間に光は 30cm 進む) の現象を計測することで、カメラから物体までの距離を計測することができるデバイスであるが、同時にサブナノ秒単位の時間軸情報を計測できる新たなデバイスとしても注目を集めている。例えば、特殊な改造を施した ToF カメラを用いれば、半透明物体の時間的な反射特性を計測することができるため半透明物体の光学的な解析に用いることができる。

ToF カメラで半透明物体の距離を計測した場合、光が物体内部で散乱するため、計測結果に歪みが生じ、実際の距離よりも長く計測されてしまうことが多い (図 1)。この計測結果を補正するための研究も行われているが、この計測歪みをシーンの光学的情報として活用することも可能で

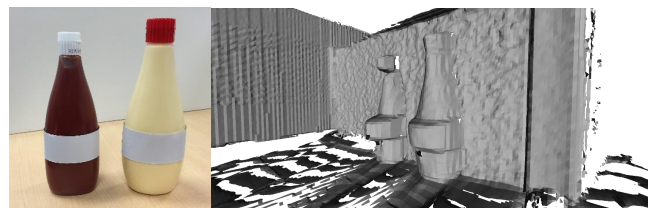


図 1 ToF カメラで半透明物体を撮影した結果。マヨネーズとケチャップのボトルには、不透明なラベルが貼り付けてある。ラベル部分は正しく距離が計測できているが、半透明なボトル部分は、計測距離が奥行き方向に歪んでいる。

あると考えられる。我々は、ToF カメラの計測歪みが、半透明物体の材質によって変化すること、また、対象物体とカメラとの距離にも依存して歪み量が変化することに着目し、この情報を半透明物体の材質分類に応用する。

本論文では、半透明物体を ToF カメラで撮影した時の計測距離が、物体の位置に応じて真値から歪むこと、また、歪みの量は材質に固有であることを明らかにし、半透明物体の材質分類に適用可能であることを示す。実験では、実際に半透明物体を計測した時の歪み量を計測し、その情報から物体の材質分類を行い、手法の有効性を確認した。

2. 関連研究

非破壊かつ非接触による物体の材質推定は、コンピュータビジョン分野で活発に取り組まれてきており、いまだなお、挑戦的なテーマである。これまで取り組まれてきた手法は、大きく分けると、色やテクスチャなどの物体の見えに基づく手法 [2], [22], [32], [33], [39], BRDF やスペクトルなどの物体の光学特性に基づく手法 [23], [24], [31], [44]

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 大阪大学

^{a)} iwaguchi.yuya.it2@is.naist.jp

などがある。また、物体の弾性に基づく手法 [3] や、水の浸透具合と加熱・冷却過程に基づく手法 [30] など、その他の物理特性に基づく手法もある。

一般に、見えに基づく手法は、外乱光や撮影時の環境等の影響を受け、計算コストも高くなりがちである。それに対して我々の手法は、光を照射したときの時間的な応答に基づくため、外乱光や撮影時の環境に対して頑健である。また、BRDF 等の計測は、カメラや光源を動かしたり、特殊な光学系を用いる必要がある。その他の物理特性に基づく場合も、計測するための機器は一般に特殊である。我々の手法は、市販されている ToF カメラをそのまま使用するため、特殊な計測環境を必要とせず、計算コストを低く抑えることができる。

ToF カメラのこのような性質を利用して、近年 ToF カメラを用いた新たなイメージング技術が台頭している。ToF カメラは、サブナノ秒の高速な現象を計測できるため、シーン中を光が時間的にどのように伝播していくかを可視化できる [7], [12], [16], [21], [27], [28], [40]。また、計測の時間差を用いて、BRDF のスライス計測 [26]、壁の向こう側をイメージング [16], [17], [19], [41]、直接・大域成分を分離 [7], [10], [27], [42]、物体の速度を計測 [11], [35]、超解像 [43]、特定の深さにある物体のみをイメージング [37] するなど、様々な手法が提案されている。また、ToF カメラを用いて、透明・半透明物体の形状を計測したり [34], [38]、相互反射や散乱等が起きる複雑なシーンでも正確な距離を測る [1], [4], [5], [6], [9], [13], [14], [15], [18], [20], [25], [29] など、半透明物体が含まれるシーンの画像解析も行われている。それに対して、我々は ToF カメラで半透明物体を撮影した時に生じる計測歪みが材質に依存することを利用し、物体の材質の推定に利用する。Su ら [36] は、物体の時間的インパルス応答の違いによって、様々な周波数間で ToF カメラの計測が変化することを利用し、材質が識別可能であることを示した。我々は、単一周波数でも物体とカメラの距離が変化すれば、計測が物体の時間的インパルス応答にのみ依存して特有の歪みが生じることを利用し、これが物体の材質を分類可能であることを示す。

3. 提案手法

我々の研究目的は、半透明物体を ToF カメラで計測する際に、物体とカメラの距離に依存して材質特有の歪みが生じることを利用し、その材質を分類することである。本章では、まず、ToF カメラの原理について説明し、半透明物体を計測すると計測結果が歪む原因を明らかにし、さらに、距離計測の歪みが物体の距離に依存することを理論的に明らかにする。その後、この計測歪みを利用した半透明物体の材質分類法を提案する。

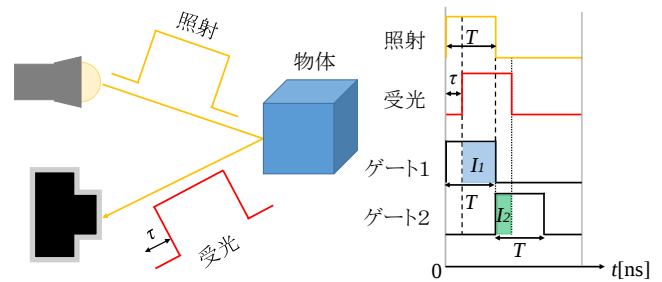


図2 矩形波パルス方式の間接 ToF 方式カメラの原理。矩形パルス光を照射し、時間差のある2つのゲートで露光する。それぞれの画素値 I_1, I_2 は、図中の色付きの面積に相当しており、それらの比から時間差 τ が計算できる。

3.1 ToF カメラの動作原理

ToF カメラは、物体に光を照射して、その反射光を受光するまでの時間を計測することで、距離を計測できる。照射した時刻と受光した時刻の時間差を求める方法は、直接 ToF 方式と間接 ToF 方式に分けられる。直接 ToF 方式では、反射光の観測をフォトダイオードやなどの応答の高速な素子を使った回路を用いることにより光の飛行時間を求める必要があり、このような回路は高価になりがちであることが問題である。一方、一般的に用いられる安価な間接 ToF 方式では、図2に示すように、反射光の観測に応じて電荷を溜めこむことができるゲートを2つ以上持ち、矩形パルス光を照射したときの反射光のエネルギーを2つの画素値に分けて観測できる。これらの観測 I_1, I_2 に対する面積比から、時間差 τ を間接的に計測することができる。

$$\tau = \frac{I_2}{I_1 + I_2} T \quad (1)$$

ここで、 T は矩形波の照射時間である。計測された光の飛行時間に、光の速度 c をかけることによって、次式のように、距離 d を計測することができる。

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

本稿では、矩形波型間接 ToF 方式のカメラを仮定し、以後の議論を進める。

3.2 表面下散乱の影響による計測距離の歪み

ToF カメラを用いて半透明物体を計測すると、計測される距離が歪む場合がある。例えば、図1は、半透明な性質を持つマヨネーズとケチャップが入った容器に不透明なラベルを貼って計測した例であり、ラベルを貼りつけている箇所と貼り付けていない箇所で、計測した距離が一致しておらず、半透明物体の表面上では推定した距離が歪んでいることが確認できる。これは、不透明なラベル部分では距離が正しく計測できているのに対して、半透明な部分では表面下に滲入して散乱する光が存在し、結果的に平均的な光路長が長くなるために、ToF カメラから見れば物体が本

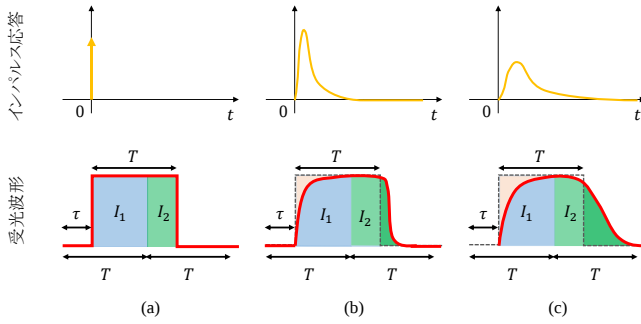


図 3 物体のインパルス応答に応じて、計測距離には歪みが生じる。(a) 不透明物体の場合、インパルス応答は反射率のかかったデルタ関数であるため、受光面に到達する波形は矩形を保っている。そのため、式 (1) によって求まる飛行時間は正しく求まる。(b) 半透明物体の場合、インパルス応答は時間軸方向に広がってしまう。そのため、受光波形は、矩形波にインパルス応答が畳み込まれ、山なりに広がった波形となる。この時、 I_1 の面積は減少し、 I_2 の面積は増加するため、計測される飛行時間はより長くなってしまふ。(c) より散乱の強い半透明物体の場合、インパルス応答はさらに時間軸方向に広がる。受光波形も、それに応じてさらに広がるため、計測される飛行時間の歪みはさらに大きくなる。

来 の位置よりも遠くにあると推定されたからである。光が物体内部にどれだけ滲入し、散乱するのかは、その物体を構成する材質の散乱特性によって決まるため、この計測距離の歪み量は、材質に依存すると考えられる。

半透明物体における反射光は、表面下散乱の影響により様々な光路長の光が足しあわされたものである。この影響は、図 3 のように超短時間のインパルス光を照射した時のインパルス応答として表現することができる。上段に、理想的な不透明物体と、2 種類の半透明物体のインパルス応答の例を模式的に示している。半透明物体のインパルス応答は、時間軸方向に広がっており、その広がり方は材質によって異なる。ToF カメラの計測は、照射した矩形波がそのままの波形で受光面に戻ってくることが仮定されている。しかしながら、半透明物体を計測した時の受光面に戻ってくる波形は、図 3(b) に示すように、インパルス応答に畳み込まれて山なりのなめらかな波形になってしまう。また、受光波形は時間軸に尾を引いたように遅れて到達するため、2 つのゲートにより時間積分された観測 I_1 と I_2 は理想の場合に比べて I_1 は減少し I_2 は増加する。そのため、式 (1) により計測される飛行時間は、実際の距離に対応した時間よりも長くなるという歪みを生じる。さらに、図 3(c) に示すように、より強い散乱光が生じる場合には、受光波形はより大きく乱されるため、計測される飛行時間はさらに歪む。この歪みは、インパルス応答が同じであれば常に一定となるため、材質固有の情報を含んでいると言え、歪みを解析することで、半透明物体の材質分類が可能になると考えられる。

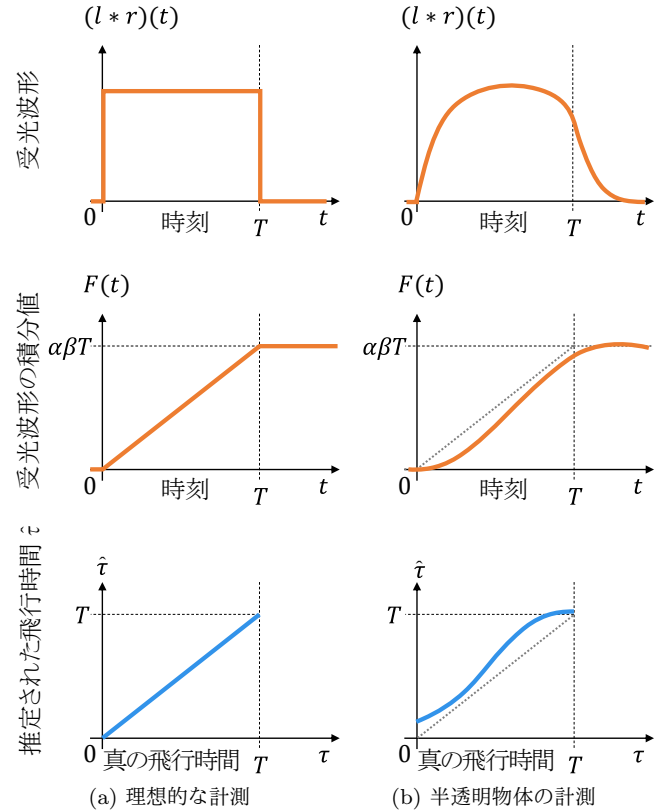


図 4 距離に依存した計測歪みの例。(a) 理想の場合、カメラに到達する波形は矩形波を保っているため、計測される距離は、真値と同一となる。(b) カメラに到達する反射波は、一般に矩形波を保っておらず山なりとなる（上段）。そのため、その積分関数は非線形となり（中段）、結果として推定される距離は、真値に対して非線形となる（下段）。破線で表される真値 τ と、推定される値 $\hat{\tau}$ の差分は、 τ に対して、変化していることが分かる。

3.3 ToF 計測歪みの定式化と歪み量の距離依存性

インパルス応答 $r(t)$ を持つ物体を、カメラから物体までの光の飛行時間 τ に相当する位置に配置して計測したときの、ToF カメラに到達する波形は、照射波形 $l(t)$ とシーンのインパルス応答 $r(t - \tau)$ の畳み込みであり、

$$i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} l(t-s)r(s-\tau)ds = (l * r)(t - \tau) \quad (3)$$

と表すことが出来る。ただし、 $*$ は畳み込みオペレータである。ToF カメラによる計測は、この到達波形の一部を時間積分したものであるため、積分区間を矩形関数 $g_k(t)$ (ただし $k = 1, 2$) とすると、計測輝度 I_k は、

$$I_k = \int_{-\infty}^{\infty} g_k(t)i(t)dt = \int_{T_k}^{T_k+T} (l * r)(t - \tau)dt \quad (4)$$

と表される。ただし、 T_k は k 番目の矩形関数の開始時刻であり、 $T_1 = 0$ かつ $T_2 = T$ である。

ここで、矩形波を用いた間接 ToF 方式における飛行時間の式 (1) を適用すると、推定される飛行時間 $\hat{\tau}$ は、

$$\hat{\tau} = \frac{I_2}{I_1 + I_2} T \quad (5)$$

$$= \frac{F(2T - \tau) - F(T - \tau)}{F(2T - \tau) - F(-\tau)} T \quad (6)$$

のように表される．ただし， $F(t)$ は受光波形 $(l * r)(t)$ の積分関数であり，

$$F(t) = \int (l * r)(t) dt \quad (7)$$

と表せる．ただし，積分定数 $C = 0$ である．また， τ は正とみなせること，および， $t < 0$ において受光波形の積分値 $F(t) = 0$ になるとみなせることを用いれば，

$$\hat{\tau} = \left(1 - \frac{F(T - \tau)}{F(2T - \tau)} \right) T \quad (8)$$

と簡略化することができる．

理想的な場合，照射波形 $l(t)$ は，幅 T の矩形関数であり，シーンのインパルス応答は，反射率 β のかかったデルタ関数 $r(t) = \beta \delta(t)$ である．このとき，カメラの応答係数（感度）を α とすると，図 4（中段左）に示すように，

$$F(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \alpha \beta t & (0 \leq t \leq T) \\ \alpha \beta T & (T < t) \end{cases} \quad (9)$$

となるため，式 8 は $0 \leq \tau \leq T$ において線形に増加し，かつ $\hat{\tau} = \tau$ と導けるため，正しい計測が行える．

しかし，表面下散乱が強く発生する半透明物体では， $r(t)$ は尾を引いたようなインパルス応答となる．そのため，図 4(b) に示すように，反射波の波形（照射波とインパルス応答の畳み込み） $(l * r)(t)$ は山なりとなり，その積分関数 $F(t)$ は一般に非線形な関数となる．そのため，式 (8) によって推定される飛行時間 $\hat{\tau}$ も， τ に対して，非線形に増加する．これは，計測される飛行時間が誤差を含むこと，かつ，その誤差が物体とカメラとの距離（すなわち τ ）に依存して変化することを表している．

実際には，光源からの照射波形 $l(t)$ は，正確な矩形波ではない [8] もの，基本的にはデバイスに固有であり，常に同じ波形であるとみなせるため，対象物体を入れ替えたときの観測の歪みの差は，物体のインパルス応答の形だけに依存している．物体のインパルス応答は，物体の表面下散乱の程度に強く依存しており，材質によって大きく異なる．そのため，ToF カメラで計測した，観測距離を変えたときの距離歪みの変化は，計測対象の材質を分類する手掛かりとして利用できる．

3.4 材質の分類

さまざまな材質の物体について， n 段階の奥行きに配置し，それぞれの位置で計測される距離と，真値の距離との差 v_j ($j = 1, 2, \dots, n$) を並べた n 次元の計測ベクトルを

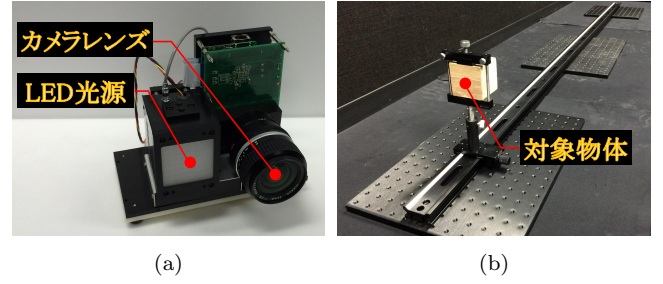


図 5 実験環境．(a) ToF カメラ（浜松ホトニクス製 S11963-01CR デモキット）．光源からは幅が約 40ns の矩形波が照射される．(b) 距離の真値が計測できる光学レール上に対象物体を配置する．対象物体は，2.8m から 4.0m までの範囲を動かして計測する．

$\mathbf{v}$ とする．この計測ベクトルは材質特有の計測歪みを表す特徴ベクトルとみなすことができる．そのため，この特徴ベクトルをそのまま用いるだけでも，材質の分類が可能である．この分類のためには様々な機械学習の手法を適用可能であるが，本研究では最近傍法による分類を行う．

本研究では分類する対象として， m 種類の材質を用意する．各材質に対して p_m 個ずつ計測した特徴ベクトルを学習データセット $\mathbf{v}_l^p$ ($l = 1, 2, \dots, m$ かつ $p = 1, 2, \dots, p_m$) とする．最近傍法は， m 種類の材質を計測した特徴ベクトル $\mathbf{v}_l^p$ のうち，最も近い点となる材質を，推定された材質として出力する分類法である．計測データを $\mathbf{v}^o$ とすると，分類される材質番号 $\hat{l}$ は，

$$\hat{l} = \underset{l}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{v}_l^p - \mathbf{v}^o\|_2^2 \quad (10)$$

で与えられる．最近傍法は，特徴ベクトルの値をそのまま使用するため，特徴ベクトルのノイズや分散に弱い欠点があるが，特徴ベクトルの有用性を直接評価することができる．

4. 実験

提案手法の有効性を示すために，実際に様々な半透明物体について距離計測を行い，材質ごとに計測距離に歪みが生じることを確かめる．さらに，得られた距離計測の歪みを材質ごとに比較することで，材質の分類を行う．

本実験では，図 5 (a) に示すような，浜松ホトニクス製の ToF カメラ（S11963-01CR デモキット）を用いて実験を行った．光源の波長は 870nm であり，発光パルス幅は約 40ns である．それに合わせて，それぞれのゲートの開放時間も 40ns と設定している．対象物体は，再現性を保証するために，図 5 (b) のように，距離の真値が既知の光学レール上に配置して計測を行った．また，対象物体は，カメラからの距離が 2.8m から 4.0m まで 0.3m 間隔で 5 段階の奥行きに配置し，ToF カメラでそれぞれの距離を計測した．

計測対象物体として，図 6（上）に示す通り，木，石膏，

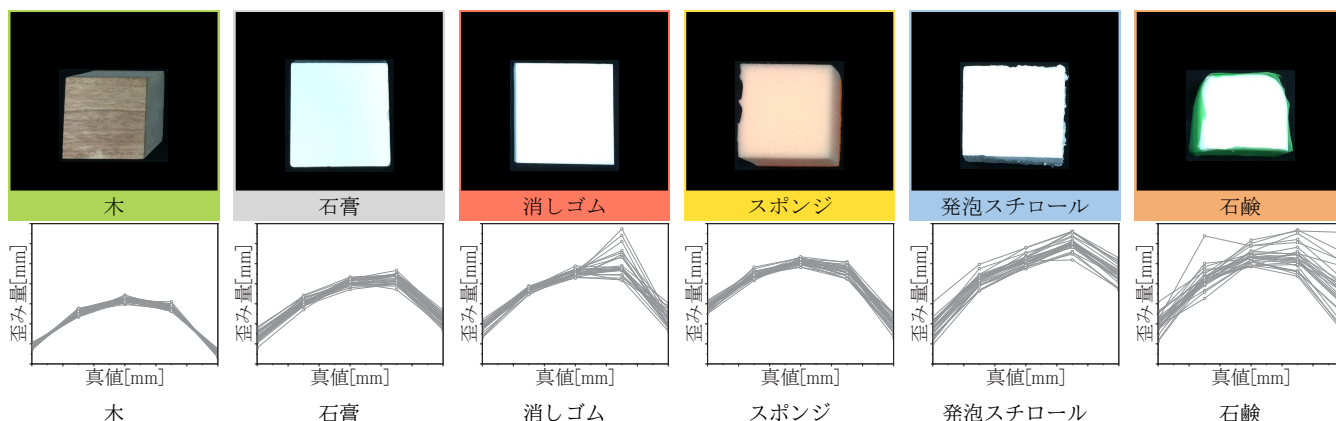


図 6 計測した対象物体と、物体の距離を変えたときの ToF カメラの計測歪み。(上段)形状はほぼ同一であり、テクスチャも少ない。画像から材質を推定するのは容易ではない。(下段)距離計測の歪み。表面下散乱が強いほど、より歪んだ計測となっていることがわかる。図中の真値は距離 2.8m~4.0m の範囲を取り、縦軸に歪み量を -40mm~100mm の範囲で表示している。

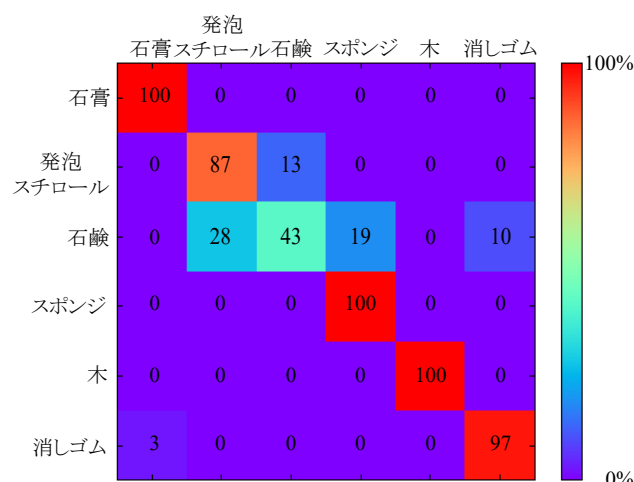


図 7 混同行列。青が 0% で赤が 100%。対角線上に赤くなるほど、高精度に分類できていることを表す。石鹸は誤分類が見受けられるが、全体としては材質の分類に成功している。

消しゴム、スポンジ、発泡スチロール、石鹸の 6 種類の材質を計測した。これらの物体は、いずれも表面下散乱の程度が異なるため、インパルス応答に違いがあると予想される。まず、材質の違いによる計測歪みの変化を詳細に検証した。計測距離の真値に対する歪みを図 6 (下) に示す。各材質に対して表面上の 25 点をサンプリングし、それぞれに対する計測ベクトル v を求めた。これらが示すように木は表面下散乱が少ないため、もっとも歪みが小さく、分散も小さいが、石鹸や消しゴムなどの表面下散乱の影響が強く発生する半透明物体では、計測歪みが大きくなっていることが確認できる。また、石鹸やスポンジなどの表面の形状の影響を受けやすい物体では、距離を変えると対応する画素が変わるため、計測歪みの分散が大きくなっている。全体として、距離計測の歪みの大きさは、表面下散乱の強さに関連があることが見て取れる。このことから、計測される距離の歪みが材質の情報を含んでいることが確認

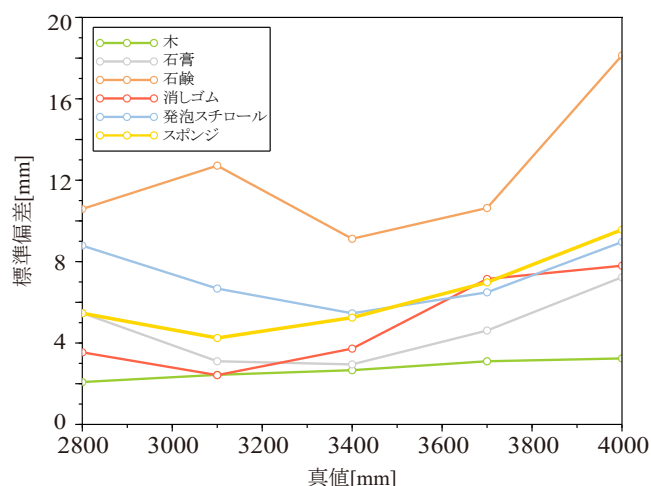


図 8 各距離での計測歪みの標準偏差。形状が波打った平面となっている石鹸は、距離を変えると、画素によっては鏡面反射の影響がランダムに発生するため、計測歪みのばらつきが大きい。木など、テクスチャが十分細かく、鏡面反射の影響を受けにくい物体では、計測歪みのばらつきは小さい。

できる。

次に、図 6 に示すデータを用いて、最近傍分類器を用いて、材質分類を行った。それぞれの材質に対して、学習用に 15 点、サンプル用に 10 点をランダムに選択し、10,000 回繰り返して評価する交差検定を行い、分類精度を確認した。交差検定による混同行列を図 7 に示す。木材や石膏のように、特徴ベクトルの分散が小さく、他の材質との距離が大きい材質に対しては、高精度な分類が行えていることが確認できる。一方、石鹸については、計測歪みのデータの分散が大きいため、他の材質に誤って識別されるケースが見受けられた。全体としての識別率は 87.9% であり、ある程度の識別性能があることが示された。

石鹸は形状が波打った平面となっているため、ピクセル内で鏡面反射を起こす法線を含むことがあり、距離を変え

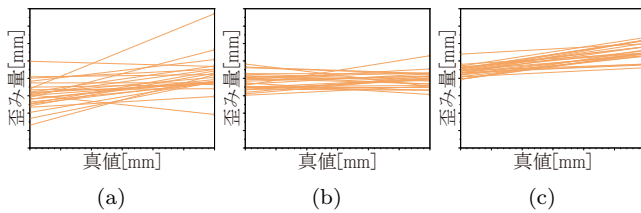


図9 石鹼を傾けて撮影し、鏡面反射の影響を抑えた時の計測データの比較。物体を距離2.8m, 3.1mの2点で計測した。(a) 図6で示した実験結果であり、物体を傾けずに撮影した時の結果。鏡面反射の影響を強く受けており、計測のばらつきが大きい。(b) 物体を少し傾けて撮影した時の結果。(c) 物体を大きく傾けて撮影した時の結果。物体を傾けて撮影するほど、ばらつきが少なくなることがわかる。グラフの縦軸は歪み量 $-10\text{mm} \sim 70\text{mm}$ の範囲を図示した。

ることによって、ピクセルによって鏡面反射の影響がランダムに発生する。その場合、鏡面反射の影響によってインパルス応答の形状が微妙に異なるため、受光波形が変化する。これにより、推定される飛行時間 $\hat{\tau}$ が変化するため、計測歪みの量がピクセルごとにばらつく。図8に、それぞれの物体の距離の計測歪みがどれ程ばらついているかを示した。石鹼は鏡面反射の影響を強く受けるため、計測歪みのばらつきが大きく、木などの、テクスチャが十分細かく、鏡面反射を起こしにくい物体では、計測歪みのばらつきは小さいことが確認できる。

鏡面反射の影響は、物体を傾けるなどして、鏡面反射の影響が入らないようにすると、取り除くことができる。同じ石鹼を傾きを変えながら撮影したデータを図9に示す。この実験では、奥行き方向は2.8mと3.1mの2箇所のみを使用している。鏡面反射がある場合は分散が大きいが、物体を傾けると、鏡面反射の影響が抑えられるため、ばらつきが少なくなっていることが確認できる。他にも、円偏光板等を使用することでも鏡面反射の影響を簡単に抑えることができるため、材質分類の精度向上に有効であると考えられる。

5. まとめ

本稿では、ToFカメラで計測した距離が、物体表面の時間的インパルス応答に応じて歪むことを利用し、半透明物体の材質分類を行う手法を提案した。まず、計測距離が材質に応じて歪むこと、また、歪み量は対象物体の距離にも依存することを示した。実験では、距離計測の歪みが材質に依存することを検証し、材質分類に適用可能であることを示した。今後は、さらに多くの半透明物体を計測し、データベースを構築するとともに、より高度な機械学習の手法を取り入れ、高精度な材質分類を行う。さらに、Kinect V2に代表される、正弦波型の波形を波形を照射するToFカメラへの適用可能性の検討、また、半透明物体の物理パラメータの推定や、インパルス応答の推定などに展開していくことも重要なテーマであると考えられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP15H05918（新学術領域研究「多元質感知」）の助成を受けた。

参考文献

- [1] Bhandari, A., Feigin, M., Izadi, S., Rhemann, C., Schmidt, M. and Raskar, R.: Resolving Multipath Interference in Kinect: an Inverse Problem Approach, *IEEE SENSORS*, IEEE, pp. 614–617 (2014).
- [2] Caputo, B., Hayman, E. and Mallikarjuna, P.: Class-Specific Material Categorisation, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, IEEE, pp. 1597–1604 (2005).
- [3] Davis, A., Bouman, K. L., Chen, J. G., Rubinstein, M., Durand, F. and Freeman, W. T.: Visual Vibrometry: Estimating Material Properties from Small Motion in Video, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 5335–5343 (2015).
- [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, *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, International Society for Optics and Photonics, p. 786404 (2011).
- [5] Freedman, D., Krupka, E., Smolin, Y., Leichter, I. and Schmidt, M.: Sra: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors, *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 1–15 (2014).
- [6] Fuchs, S.: Multipath Interference Compensation in Time-of-Flight Camera Images, *International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, pp. 3583–3586 (2010).
- [7] Gkioulekas, I., Levin, A., Durand, F. and Zickler, T.: Micron-Scale Light Transport Decomposition using Interferometry, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 34, No. 4, pp. 37:1–37:14 (2015).
- [8] Godbaz, J. P., Dorrington, A. and Cree, M. J.: Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar, *TOF Range-Imaging Cameras*, pp. 91–116 (2013).
- [9] Godbaz, J. P., Cree, M. J. and Dorrington, A. A.: Closed-Form Inverses for the Mixed Pixel/Multipath Interference Problem in AMCW Lidar, *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, International Society for Optics and Photonics, pp. 829618–829618–15 (2012).
- [10] Gupta, M., Nayar, S. K., Hullin, M. B. and Martin, J.: Phasor Imaging: a Generalization of Correlation-Based Time-of-Flight Imaging, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 34, No. 5 (2015).
- [11] Heide, F., Heidrich, W., Hullin, M. and Wetzstein, G.: Doppler Time-of-Flight Imaging, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 34, No. 4, pp. 36:1–36:11 (2015).
- [12] Heide, F., Hullin, M. B., Gregson, J. and Heidrich, W.: Low-Budget Transient Imaging using Photonic Mixer Devices, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 32, No. 4, p. 1 (2013).
- [13] 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).
- [14] Jimenez, D., Pizarro, D., Mazo, M. and Palazuelos, S.: Modelling and Correction of Multipath Interference in Time of Flight Cameras, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 893–900 (2012).

- [15] Kadambi, A., Schiel, J. and Raskar, R.: Macroscopic Interferometry: Rethinking Depth Estimation with Frequency-Domain Time-Of-Flight, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 893–902 (2016).
- [16] Kadambi, A., Whyte, R., Bhandari, A., Streeter, L., Barsi, C., Dorrington, A. and Raskar, R.: Coded Time of Flight Cameras: Sparse Deconvolution to Address Multipath Interference and Recover Time Profiles, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 32, No. 6, pp. 1–10 (2013).
- [17] Kadambi, A., Zhao, H., Shi, B. and Raskar, R.: Occluded Imaging with Time-of-Flight Sensors, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 35, No. 2, pp. 1–12 (2016).
- [18] 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).
- [19] Kirmani, A., Hutchison, T., Davis, J. and Raskar, R.: Looking Around the Corner using Ultrafast Transient Imaging, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol. 95, No. 1, pp. 13–28 (2011).
- [20] Lee, S. and Shim, H.: Skewed Stereo Time-of-Flight Camera for Translucent Object Imaging, *Image and Vision Computing*, Vol. 43, No. C, pp. 27–38 (2015).
- [21] Lin, J., Liu, Y., Hullin, M. B. and Dai, Q.: Fourier Analysis on Transient Imaging with a Multifrequency Time-of-Flight Camera, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 3230–3237 (2014).
- [22] Liu, C., Sharan, L., Adelson, E. H. and Rosenholtz, R.: Exploring Features in a Bayesian Framework for Material Recognition, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 239–246 (2010).
- [23] Liu, C. and Gu, J.: Discriminative Illumination: Per-Pixel Classification of Raw Materials Based on Optimal Projections of Spectral Brdf., *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 36, No. 1, pp. 86–98 (2014).
- [24] Mannan, M. A., Das, D., Kobayashi, Y. and Kuno, Y.: Object Material Classification by Surface Reflection Analysis with a Time-of-Flight Range Sensor, *Advances in Visual Computing*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 439–448 (2010).
- [25] 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. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 73–81 (2015).
- [26] Naik, N., Zhao, S., Velten, A., Raskar, R. and Bala, K.: Single View Reflectance Capture using Multiplexed Scattering and Time-of-Flight Imaging, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 30, No. 6, p. 1 (2011).
- [27] O’Toole, M., Heide, F., Xiao, L., Hullin, M. B., Heidrich, W. and Kutulakos, K. N.: Temporal Frequency Probing for 5D Transient Analysis of Global Light Transport, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 33, No. 4, pp. 1–11 (2014).
- [28] Peters, C., Klein, J., Hullin, M. B. and Klein, R.: Solving Trigonometric Moment Problems for Fast Transient Imaging, *Proc. SIGGRAPH Asia*, Vol. 34, No. 6, pp. 1–11 (2015).
- [29] Qiao, H., Lin, J., Liu, Y., Hullin, M. B. and Dai, Q.: Resolving Transient Time Profile in ToF Imaging Via Log-Sum Sparse Regularization., *Optics letters*, Vol. 40, No. 6, pp. 918–21 (2015).
- [30] Saponaro, P., Sorensen, S., Kolagunda, A. and Kambhamettu, C.: Material Classification with Thermal Imagery, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4649–4656 (2015).
- [31] Sato, M., Yoshida, S., Olwal, A., Shi, B., Hiyama, A., Tanikawa, T., Hirose, M. and Raskar, R.: Spectrans: Versatile Material Classification for Interaction with Textureless, Specular and Transparent Surfaces, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, ACM Press, pp. 2191–2200 (2015).
- [32] Schwartz, G. and Nishino, K.: Visual Material Traits: Recognizing Per-Pixel Material Context, *Proceedings of Color and Photometry in Computer Vision (Workshop held in conjunction with ICCV)*, pp. 883–890 (2013).
- [33] Schwartz, G. and Nishino, K.: Automatically Discovering Local Visual Material Attributes, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3565–3573 (2015).
- [34] Shim, H. and Lee, S.: Recovering Translucent Object using a Single Time-of-Flight Depth Camera, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 1–1 (2015).
- [35] Shrestha, S., Heide, F., Heidrich, W. and Wetzstein, G.: Computational Imaging with Multi-Camera Time-of-Flight Systems, *Proc. SIGGRAPH* (2016).
- [36] Su, S., Heide, F., Swanson, R., Klein, J., Callenberg, C., Hullin, M. and Heidrich, W.: Material Classification using Raw Time-of-Flight Measurements, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3503–3511 (2016).
- [37] Tadano, R., Kumar Pediredla, A. and Veeraraghavan, A.: Depth Selective Camera: a Direct, On-Chip, Programmable Technique for Depth Selectivity in Photography, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 3595–3603 (2015).
- [38] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Recovering Transparent Shape from Time-of-Flight Distortion, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4387–4395 (2016).
- [39] Varma, M. and Zisserman, A.: A Statistical Approach to Material Classification using Image Patch Exemplars, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 31, No. 11, pp. 2032–2047 (2009).
- [40] Velten, A., Raskar, R., Wu, D., Jarabo, A., Masia, B., Barsi, C., Joshi, C., Lawson, E., Bawendi, M. and Gutierrez, D.: Femto-Photography, *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 32, No. 4, p. 1 (2013).
- [41] Velten, A., Willwacher, T., Gupta, O., Veeraraghavan, A., Bawendi, M. G. and Raskar, R.: Recovering Three-Dimensional Shape Around a Corner using Ultrafast Time-of-Flight Imaging., *Nature communications*, Vol. 3, p. 745 (2012).
- [42] Wu, D., O’Toole, M., Velten, A., Agrawal, A. and Raskar, R.: Decomposing Global Light Transport using Time of Flight Imaging, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2012).
- [43] Xiao, L., Heide, F., O’Toole, M., Kolb, A., Hullin, M. B., Kutulakos, K. and Heidrich, W.: Defocus Deblurring

and Superresolution for Time-of-Flight Depth Cameras, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2376–2384 (2015).

- [44] Zhang, H., Dana, K. and Nishino, K.: Reflectance Hashing for Material Recognition, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3071–3080 (2015).