

招待講演

## 光の遅延を利用した大域照明を含むシーンの理解

Understanding Scenes with Global Illumination Based on Light Delay

向川 康博 (奈良先端大)

Yasuhiro Mukaigawa (NAIST)

### 1. はじめに

光源から出た光が物体で反射し、センサで観測される時、物体までの距離に応じて僅かな時間差が生じる。これは Time-of-Flight (ToF) と呼ばれ、主に距離計測に利用されている。しかし、表面下散乱、体積散乱、相互反射などの大域照明でも光線の経路が長くなれば遅延は発生するため、この遅延時間が貴重な情報源として利用できる。本稿では、光の遅延を利用して、材質推定や散乱光除去、反射率推定など、大域照明を含むシーンを理解する技術を紹介する。

### 2. マルチパスによる光の遅延

ToF カメラを用いることで、物体までの距離を計測することができるが、形状や素材によっては大きな計測誤差が生じる場合がある。図 1 は液体・固体石鹸を計測した際の距離計測ゆがみの例であり、石鹸の部分では本来の距離よりも遠くに推定されていることがわかる。



図 1 ToF 計測による距離計測ゆがみの例

このゆがみの原因の一つがマルチパスである。図 2 に示すように、ToF 計測では、光は物体表面上で一度だけ反射することを想定している。しかし、実際には石鹸のような半透明物体で生じる表面下散乱などの大域照明が生じると、時間的な遅延を含んだ光が観測されてしまい、距離計測に誤差が生じてしまう。逆に考えれば、この光の遅延にはシーンの大域照明に関する情報が含まれていることになる。

本稿では、光の遅延を利用した大域照明の解析手法を紹介する。紙面が限られているため、詳しいアルゴリズムの説明は割愛し、その仕組みを簡潔に述べる。詳細は参考文献を参照されたい。

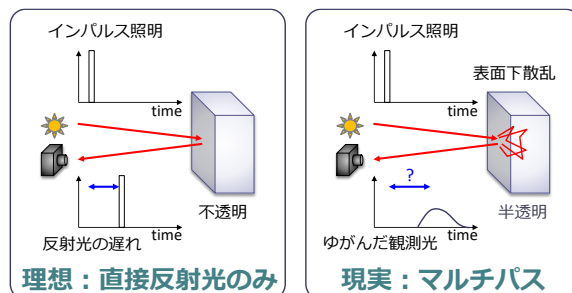


図 2 ToF 計測におけるマルチパスの影響

### 3. 材質推定 1)

表面下散乱が生じると、それだけ光路長が長くなるため光が遅延し、距離計測に誤差が生じる。光の遅延は材質ごとに依存するため、あらかじめ材質と誤差の関係を「ゆがみ辞書」として登録しておけば、距離計測の誤差に基づいて材質推定をすることができる。図 3 は、表面下散乱の違いに基づく材質推定の例であり、肉眼でも識別が難しい白色物体について、陶器、布、ポリプロピレン、ポリスチレンの 4 種類に分類できている。

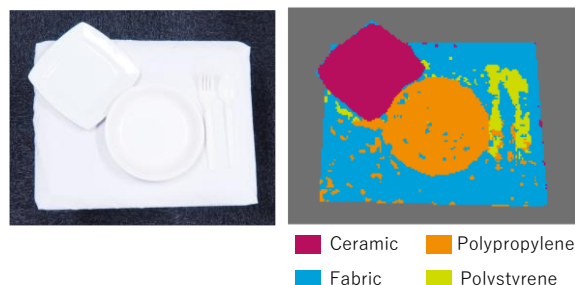


図 3 表面下散乱の違いに基づく材質推定

また、材質が推定できれば、ゆがみの程度も推定できるため、図 4 のようにゆがみを補正し、正しい距離を推定することも可能となる。

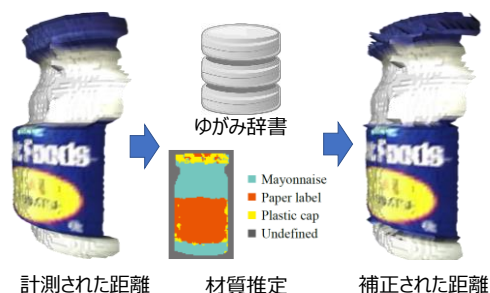


図 4 材質推定に基づく距離の補正

## 招待講演

## 4. 画像の鮮明化 2)

霧や濁った水中では、光が粒子などと衝突を繰り返すことによる体積散乱が生じるため、様々な光路をたどってセンサにたどり着く。そのため、強度画像は不鮮明となり、距離計測にも大きな誤差が生じる。

図5は街中を模したシーンを対象として、ToFカメラによって強度画像と距離画像を計測した例である。霧が発生していない場合の見え方を真値とする。ここで、人工的な霧を生じさせたところ、強度画像は霧からの散乱光の影響で不鮮明となり、距離も全体的に短く推定されている。このような場合にも、体積散乱をモデル化し、ToFカメラによる計測結果を当てはめることで、霧の影響を除去することが可能となる。これにより、強度画像を鮮明化し、さらに正しい距離を推定することも可能となる。

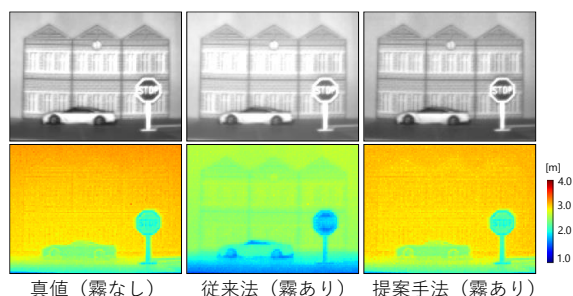


図5 霧中でのToF計測

## 5. 距離と反射率の同時推定 3)

対象物体の表面上で反射した光が、再び他の面を照らすことによって生じる相互反射は、凹面などで強く観測される。相互反射によっても光路長が長くなり、光が遅延するために、距離計測の誤差が生じる。

図6は単一光子検出器 (SPAD: Single Photon Avalanche Diode) を用いた高時間分解画像計測システムである。このSPADは単一素子であるため、2軸のガルバノスキャナと組み合わせることで2次元画像を計測する。13ピコ秒で計測できるTDC (Time to Digital Converter)を用いることで、光が4mm進む様子を捉えることができる。

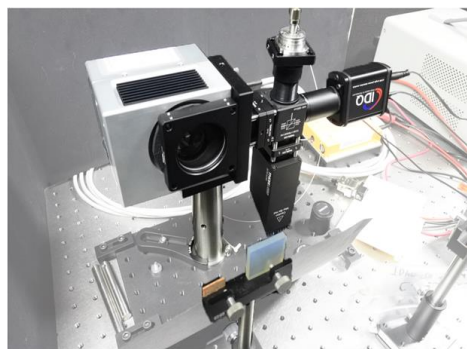


図6 高時間分解画像計測システム

このシステムを用いることで、直接的な反射光に比べて相互反射光は遅れて観測される。この観測を解析するために、主にCG分野で相互反射をモデル化するために用いられてきたラジオシティを時間方向に拡張し、図7に示す時間分解ラジオシティでモデル化した。これにより、距離と反射率の間に矛盾が生じないように両者を同時に推定することが可能となる。また、図8のように強い相互反射が生じるような凹形状であっても、正しい距離を推定することが可能となる。

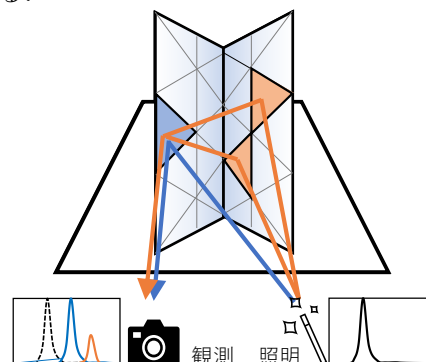


図7 時間分解ラジオシティによるモデル化

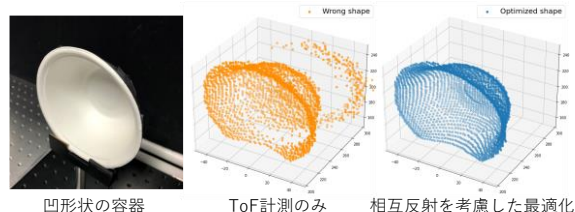


図8 相互反射を考慮した形状推定

## 6. まとめ

本稿では光の遅延を利用した大域照明の解析の事例を簡単に紹介した。コンピュータビジョン分野では、大域照明は解析が容易でない現象として扱われているが、時間的な遅れという情報を利用できれば様々な解析が可能であることから、さらなる研究の発展が期待できる。

## 参考文献

- 1) K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Material Classification from Time-of-Flight Distortions", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.41, No.12, pp.2906-2918, Sep. 2018.
- 2) D. Kijima, T. Kushida, H. Kitajima, K. Tanaka, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, "Time-of-flight Imaging in Fog Using Multiple Time-gated Exposures", OSA Optics Express, Vol. 29, Issue 5, pp. 6453-6467, Feb. 2021.
- 3) 生坂優太, 榎田貴弘, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博, "時間分解ラジオシティを用いた反射率と形状の整合性評価", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2021), S1-5, July 2021.