

単一光子検出器を用いた時間フィルタリングイメージング

渡辺 亮^{††} 生坂 優太[‡] 櫛田 貴弘[‡] 田中 賢一郎[‡] 船富 卓哉[‡] 向川 康博[‡]

[†] 大阪府立大学 [‡] 奈良先端科学技術大学院大学

1. はじめに

自動運転や工場の作業ロボットなどでは、カメラで得られた視覚情報を元にシーンを理解するコンピュータビジョンの技術が必要となる。しかし、半透明な容器の中に物体があるような二層に重なったシーンでは、手前の物体と奥の物体からの光が混ざってしまうため、通常のカメラではシーンを正しく理解できない [1]。この違いを観測するためには、光の経路（光路）を分解する必要がある。

そこで本研究では、単一光子検出器である Single Photon Avalanche Diode (SPAD) と Time to Digital Converter (TDC) を組み合わせた測定系を用いて時間的に光路の分解を行う。この測定系は非常に高い時間分解能で測定できるため、Time-of-Flight 方式による距離計測だけでなく、透過光や反射光特性からの材質推定などの光路の時間軸情報に着目した研究に活用されている [2]。

本測定系を用いれば、奥の物体から反射してきた光だけを時間的に分離し、撮影することが可能である。実際に、文字の書いたボードの前方に半透明なフィルムを配置して測定系で計測し、時間軸全体を積算した輝度値と、計測された情報から積算範囲を限定した輝度値とをそれぞれ画像化し、本手法が奥の物体を鮮明に可視化できることを確認した。

2. SPAD 及び測定系について

測定系の概要図を図 1 に示す。SPAD は、微弱光を高速に捉えることができるセンサであり、物体にレーザを照射し反射してきた光子を検出するとパルス信号を出力する。レーザを照射した時間とこのパルス信号の時間差を TDC を用いて測定することで、光の飛行時間が測定できる。SPAD は 1 回の照射に対して 1 個の光子しか検出できないが、繰り返し計測することで 1 ピクセルにおける光学現象の時間的応答をヒストグラムとして得ることができる。またガルバノミラーを用いて空間的に走査し、2 次元の画像を取得する。

3. 時間フィルタリングイメージング

二層に重なったシーンを計測すると、時間応答のヒストグラムには前方物体と後方物体の大きな 2 つのピーク

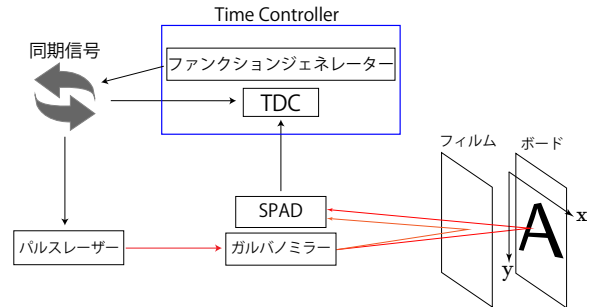


図 1: 測定系概要図

が現れる。このピークの位置をそれぞれ t_1 , t_2 とする。あるピクセル (x, y) を指定した際、ヒストグラムの階級 t での度数を $F(x, y, t)$ とすると、ピクセル (x, y) の輝度値は次式のように表せる。

$$I_{\text{all}}(x, y) = \int_0^{\infty} F(x, y, t) dt \quad (1)$$

このとき、後方物体からの反射である t_2 の周辺 $\pm \Delta t$ だけを積算すれば、後方物体のみの輝度値を抽出できる。

$$I_{\text{filtered}}(x, y) = \int_{t_2 - \Delta t}^{t_2 + \Delta t} F(x, y, t) dt \quad (2)$$

このように、SPAD で得ることのできる光の時間的応答に対してフィルタリングを行う。本手法では、2 つ目のピーク範囲内で極値をとる時間を t_2 とし、時間的なフィルタリングを行った。

4. 実験と結果

4.1 実験方法

物体が層状に重なっているシーンを作製し計測を行った。実験の計測シーンを図 2 に示す。SPAD と Time controller はそれぞれ ID Quantique 社製 ID100 と ID900 を用いた。Time controller はファンクションジェネレータと TDC を内蔵しており、ファンクションジェネレータから同期信号を送ることでパルスレーザ光源と TDC の同期を行った。パルスレーザ光源には珠電子社製の LDB-160C-639F を使用した。また、ガルバノミラーは Thorlabs 社製の GVS202 を用いた。観測対象物体は図 2 左の文字の描かれたボードである。ボードの前方に散乱の強いフィルムを設置した。フィルムとガルバノミラーとの距離は 400 mm とし、ボードとフィルムの距離は 100 mm, 150 mm, 200 mm の 3 通りに変えた。計測は 51×51 の解像度で 1 ピクセルごとに 0.1 秒間露光した。

Time filtered imaging using single photon avalanche diode

^{††} Ryo Watanabe, [‡] Yuta Ikusaka, [‡] Takahiro Kushida, [‡] Kenichiro Tanaka, [‡] Takuya Funatomi, [‡] Yasuhiro Mukaigawa

[†] Osaka Prefecture University, [‡] NAIST

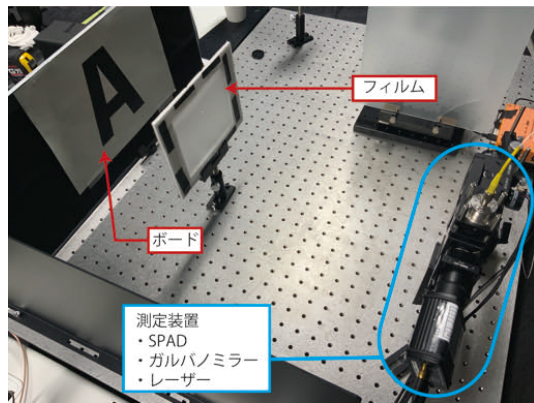


図 2: シーンの様子

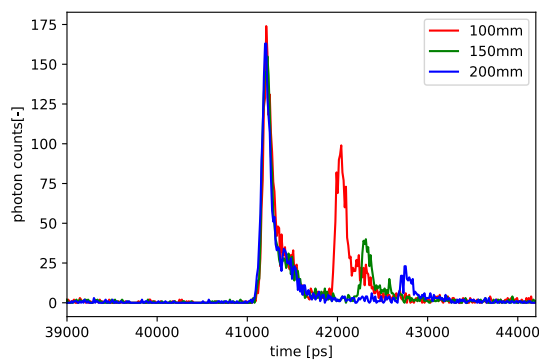


図 3: 測定されたデータ

4.2 結果

図 3 に計測範囲の中心点にて計測された光の時間的応答のヒストグラムを示す。横軸が光源から照射された光が SPAD に到達するまでの光の飛行時間、縦軸が露光時間中に計測された光子の数である。図 3 より、2 つのピークが確認できることから、層状のシーンにおいて、それぞれの物体の光の飛行時間における分解が可能であることがわかる。フィルムとボード間の距離を変えたときのイメージングの結果を図 4 に示す。シーンを通常のカメラで撮影した場合が図 4 上段である。式 (1) を用いて時間軸の全範囲で積算処理を行い、光子量をもとに画像化した結果が図 4 中段である。また $\Delta t = 100$ ps とし、式 (2) を用いて画像化した結果が図 4 下段である。得られた時間的応答を全範囲で積算処理を行うと、フィルムの影響により後方物体の情報が潰れてしまうことがわかる。一方、時間軸の積算範囲を限定することで「A」という文字を抽出できていることがわかる。以上の結果から、時間軸のフィルタリングイメージングによって二層の物体の奥の物体を鮮明に可視化できることが示された。

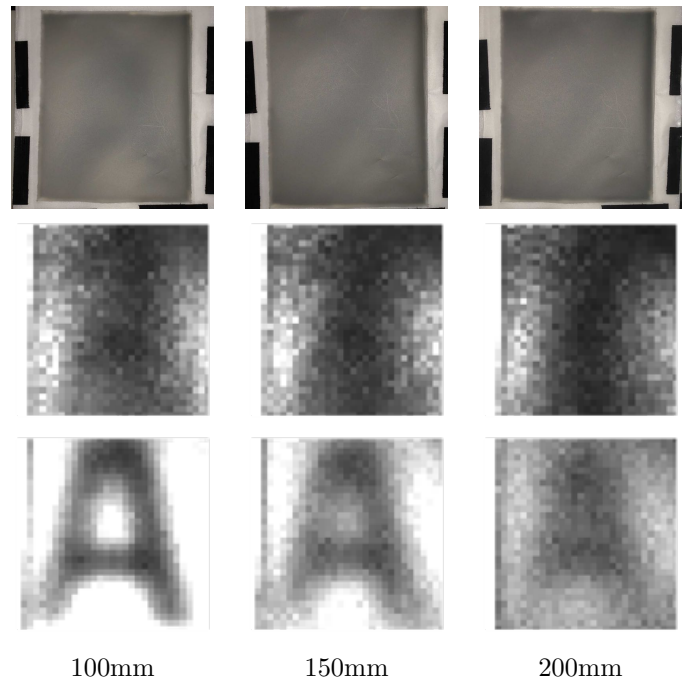


図 4: フィルムとボード間の距離を変えたときの積算画像。上段は通常のカメラで撮影、中段は全範囲の可視化、下段はボード範囲の可視化。

5. まとめ

本稿では、SPAD と TDC を組み合わせた測定系の持つ高い時間分解能を用いて層状に物体を配置したシーンの光路を分解し、奥の物体のみの輝度値を抽出することで、鮮明に可視化する手法を提案した。実験では、計測で得られたヒストグラムから、前方に設置した半透明のフィルムで反射する光路と奥の物体で反射する光路を時間軸に分解できることを示した。そして、時間軸の積算範囲を限定することで、画像化したい対象のみの輝度値を復元できることを示した。今後は、手前の物体の材質を変えた場合の性能や、この手法の手前の物体と奥の物体の距離における性能限界を調べる重要なテーマと考えられる。

参考文献

- [1] 石川武典, 北島大夢, 櫛田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, “Time-of-Flight 計測における複数の変調周波数を用いた 2 層構造物体の距離推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2020), IS2-2-13, Aug. 2020.
- [2] 北島大夢, 北野和哉, 櫛田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, “単一光子検出器を用いた光の高時間分解能計測による材質の分類”, 情報処理 CVIM 219-10, Nov. 2019.