

# 照明の発光タイミング遅延による シーンのインパルス応答の時間高分解能化

岡本 貴典<sup>1,a)</sup> 田中 賢一郎<sup>2,1</sup> 久保 尋之<sup>1</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** シーンに対して超短時間のインパルス光を照射した際に反射光として観測されるインパルス応答を超短時間露光で撮影した画像は、相互反射や散乱光の解析に利用できるため、近年注目を集めている。しかし、そのような超短時間の現象を直接計測するためには特殊な機材が必要となる。本研究では、安価な Time of Flight (ToF) カメラを用いてシーンのインパルス応答を推定する手法を提案する。主に距離計測のために用いられる ToF カメラでは、数十ナノ秒の時間分解能のインパルス応答を推定できるが、これは数メートルの光伝播に相当するため、時間分解能が不十分である。そこで、照明のケーブル長を変化させることで光源の発光タイミングをナノ秒単位で制御し、様々な発光タイミングで得られた複数の画像を計算処理することによって仮想的に時間分解能を向上させる。実際にケーブル長を変化させる簡単な回路と市販の ToF カメラを組み合わせることで、ナノ秒単位の時間分解能が得られることを確認した。

## 1. はじめに

一般的なカメラでシーンを撮影すると、シーン中の光源を出た光線は、反射や散乱を繰り返すことで強度に変化が生じ、その強度はカメラによって記録される。

光源を出た光線は、シーン中で反射や散乱を繰り返す、その強度がカメラで記録される。一般的なカメラで記録された画像には、様々な光学現象を生じた結果がまとめて記録されている。一方、近年では、シーンに対して超短時間のインパルス光を照射した際に反射光として観測されるインパルス応答が、相互反射や散乱光の解析に利用するために注目を集めている。このインパルス応答を解析することにより、光がシーン中でどのように伝播していくのかを詳細に解析することができる。

従来より、いわゆる「高速度カメラ」が様々な物理現象の解析に役立てられてきた。例えば、1秒間に100万フレーム撮影すれば、1フレームあたり1マイクロ秒に相当するため、爆発や衝突などの瞬時の現象を詳細に解析できる。しかし、1マイクロ秒の間に光は約300mも進んでしまう。すなわち、光の伝播を対象とすると、従来の「高速度カメラ」はあまりにも遅すぎる。例えば、室内で天井の照明機器から出た光が壁を照らし、人間の目に到達するまでの光伝播の様子を計測しようとした場合、ナノ秒単位の「超高速」撮影が必要となる。ちなみに、1ナノ秒の間に光

は約30cmしか進まない。

これまで、そのような計測をしようとすれば特殊な機材が必要であった。Veltenら[1]はナノ秒以下の光伝播の可視化を実現したがフェムトレーザ等の極めて特殊で高価な機材を必要とした。Heideら[2]はToFカメラを用いた比較的安価なデバイスを開発しているが、特殊な制御装置が必要であるという意味では変わりはない。同様の機材を用いた光伝播の可視化は他にも複数の研究者によって開発されている。Kadambiら[3]は光源の発光をFPGAを用いて時間符号化することで、複数光路を持つシーンの光伝播を分離した。O'Tooleら[4]はエビポーラ拘束を利用することで、光伝播の直接反射、鏡面相互反射、大域成分の分解を行った。Petersら[5]は、数時間に及ぶ計測および光伝播の復元を、三角モーメント問題を解くことで、ビデオレートまで高速化した。また、ToFカメラを用いたシーンの解析も、相互反射があるシーンでのロバストな深さ推定[6]、偏光や照度差ステレオを利用した正確な形状復元[7]、[8]、半透明物体の形状復元[9]、散乱媒体中の光伝播の解析及びイメージング[10]、物体の移動速度の推定[11]のように様々に行われている。また、Gkioulekasら[12]は光の干渉現象を利用し、光コヒーレントトモグラフィの原理で、小さいスケールの光伝播の可視化及び様々な物体の光伝播の解析を行った。干渉を利用する方法においても、高価な光学部品やマイクロスケールの正確な位置合わせが必要であり、特殊な計測装置であることに変わりはない。

本研究では、市販されている安価な ToF カメラを用いて

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

<sup>2</sup> 大阪大学

<sup>a)</sup> okamoto.takanori.oo3@is.naist.jp

シーンのインパルス応答を推定する手法を提案する。距離計測のために用いられる ToF カメラでは、数十ナノ秒の露光時間の画像を撮影できるが、これは数メートルの光伝播に相当するため、時間分解能が不十分である。そこで、照明のケーブル長を変化させることで光源の発光タイミングをナノ秒単位で制御し、様々な発光タイミングで得られた複数の画像を計算処理することによって時間分解能を向上させる方法を提案する。

## 2. ToF カメラを用いたインパルス応答の推定

本章では、距離計測に用いられる ToF カメラを用いて、シーンのインパルス応答を推定する方法について述べる。

### 2.1 ToF カメラの動作原理

ToF カメラは、光源から発せられた光が物体表面で反射してカメラに到達するまでの時間を計測することで、物体までの距離を測定するデバイスである。物体までの距離  $d$  は、照射した光が物体表面で反射し、センサに到達するまでの時間遅れ  $\tau$  を用いて

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

で求められる。ただし、 $c$  は光速である。このとき、距離を 1mm の分解能で測るためには、約 3.3 ピコ秒 (300GHz) の計測が必要であり、超高周波デバイスが必要となるため、画像を構成する多数の画素で時間遅れを直接計測することは難しい。

そのため、現在実用化されている ToF カメラは、間接 ToF 方式と呼ばれる手法が採用されている。間接 ToF 方式では、数十ナノ秒の撮影を連続して複数行うことで、計算により間接的に時間遅れを計測する。本稿では、間接 ToF 方式の中でも、数十ナノ秒幅の矩形パルス光を照射する間接 ToF 方式を仮定して議論を進める。

反射光の時間遅れは、矩形パルス光の発光時間  $T$  のもとの、露光タイミングを連続させて撮影した 2 枚の画像  $I_1, I_2$  から得ることができる。図 1 に示すように、 $I_1$  は照明の発光開始と同時に露光を開始し、露光時間  $T$  で撮影した画像であり、 $I_2$  は露光開始タイミングを  $T$  ずらして撮影した画像である。このとき、反射光の時間遅れ  $\tau$  は、

$$\tau = \frac{I_1}{I_1 + I_2} T \quad (2)$$

のように計算できる。従って、式 (1) により物体までの距離を計測できる<sup>\*1</sup>。

### 2.2 インパルス応答による反射光の歪み

前節では、照射光と反射光は理想的な矩形波であると仮定した距離計測の原理を説明した。しかし、実際には、照

<sup>\*1</sup> 実際には環境光の影響を取り除く等の目的のためにさらに多くの画像を撮影しているが、本稿では説明を割愛する。

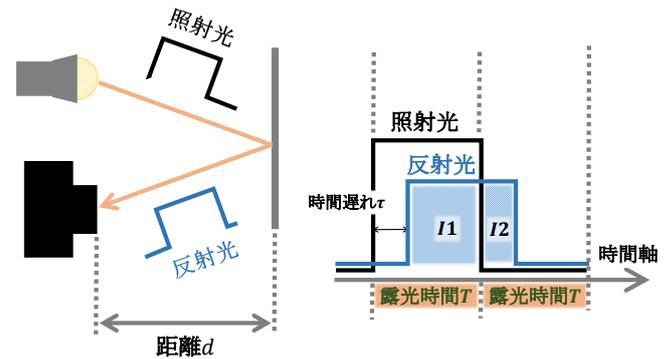


図 1: ToF カメラ動作原理

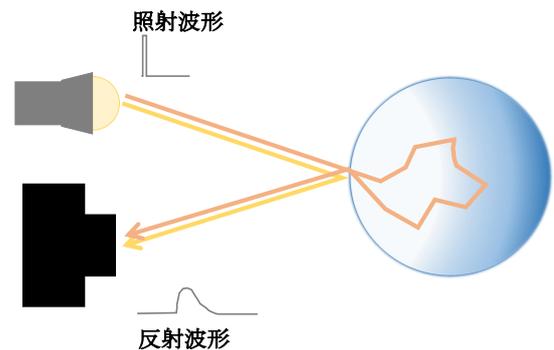


図 2: 散乱を生じるシーンと予想されるインパルス応答

射光と反射光の波形は異なり、シーンの幾何学的・光学的特性に応じて歪んだ反射光が計測される。照射光がシーン中で一度だけ反射して ToF カメラに到達する場合、インパルス応答  $r(t)$  はデルタ関数となり、結果的に照射光と反射光は同じ波形になる。しかし、図 2 に示すような表面下散乱を含むシーンでは、光が物体内部で散乱を繰り返すため、インパルス応答は時間軸方向に広がりを持つと考えられる。また、図 3 に示すような相互反射等により複数の光路を含むシーンでは、インパルス応答  $r(t)$  が複数のピークを持つと予想される。従って、照射光と反射光の波形は必ずしも一致するものではなく、シーンの幾何学的・光学的特性に応じて反射光は歪んだ波形となる。

ToF カメラに到達する反射波形は、照射波形  $l(t)$  とシーンのインパルス応答  $r(t)$  の畳み込みである。さらに、ToF カメラの観測  $i$  は、反射波形の一部を露光関数で時間積分したものであるため、

$$i = \int g(t) \int l(t-s)r(s)dsdt \quad (3)$$

と表される。ただし、 $g(t)$  は ToF カメラの露光関数であり、ある時刻  $t$  における露光感度を表す。本稿では、露光しない時間区間は 0、露光する時間区間は 1 となる 2 値の関数と仮定しているが、一般には連続値である。なお、本研究における ToF カメラの観測は画素ごとに独立しているが、表記の簡単化のためカメラの画素  $p$  は省略する。

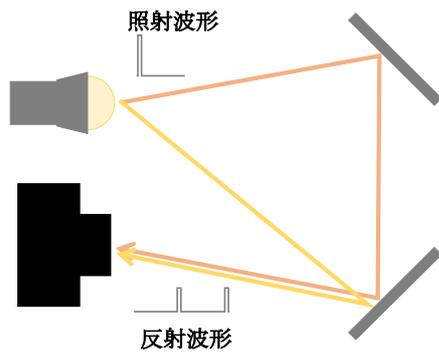


図 3: 相互反射を生じるシーンと予想されるインパルス応答

### 2.3 ToF カメラを用いたインパルス応答の推定

前節で述べたように、反射波形はシーンの幾何学的・光学的特性、つまりインパルス応答に応じて歪む。逆に言えば、インパルス応答は、シーンを解析するための重要な手がかりとなりうる。そこで我々は、ToF カメラを用いてインパルス応答を推定することを目的とする。

仮に、ToF カメラの発光と露光を自由に制御することができれば、原理的にはシーンのインパルス応答を計測することが可能である。発光と露光の時間を短くし、露光タイミングを細かく変化させて撮影することで、露光タイミングのサンプリング間隔と等しい分解能のインパルス応答が得られる。発光パルス幅、および露光時間を極限まで短くしたとき、発光パルス  $l(t)$  および露光  $g(t)$  はデルタ関数  $\delta(t)$  とみなせる。そのため、少しずつ露光タイミングをずらして撮影すると、インパルス応答を直接計測することになる。

$$i(t) = \int \delta(t-u) \int \delta(u-s)r(s)dsdu \quad (4)$$

$$= r(t) \quad (5)$$

しかし、この観測は発光パルス幅および露光時間を極限まで短くしなければ実現できず、超高周波デバイスが必要となる直接 ToF 方式の計測を実現することと等価であるため、容易ではない。そこで本研究では、市販されている間接 ToF 方式のデバイスによって同等の計測を実現することを考える。

一般的な間接 ToF 方式のデバイスでは、数ナノ秒～数十ナノ秒での露光タイミング、また露光時間の制御が限界であり、露光  $g(t)$  はデルタ関数とはみなせない。また照射波形  $l(t)$  は数十ナノ秒の矩形パルス光が仮定され、これもデルタ関数とはみなせない。発光デバイスの限界から、現実にはきれいな矩形波形となるわけでもない。このような間接 ToF 方式のカメラを用いた場合、時間方向にボケたシーンのインパルス応答をカメラの露光時間の分解能で計測することになる。

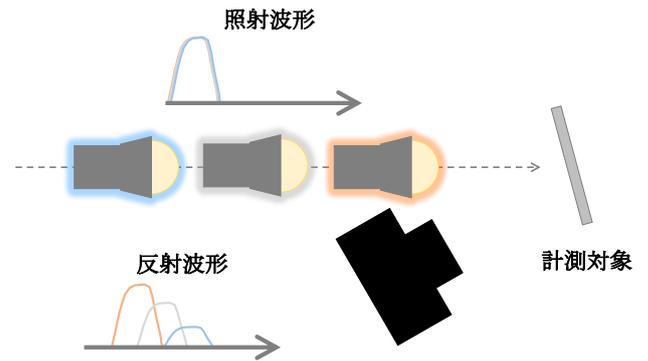


図 4: 光源移動による発光タイミング遅延

間接 ToF 方式のカメラで上述と同様に露光タイミングをずらし複数回撮影を行う場合、 $j$  回目の露光設定における観測  $i_j$  は

$$i_j = \int g_j(t) \int l(t-s)r(s)dsdt \quad (6)$$

と表される。ただし、 $g_j(t)$  は、 $j$  回目の露光設定における露光関数である。ここで撮影される画像列は、照射波形が畳み込まれたインパルス応答の低時間分解能な計測に相当する。

### 2.4 照明の微小な発光タイミング遅延

前節で述べたように、高時間分解能でのインパルス応答の推定のためには、露光時間や発光幅をより短く制御する必要があるが、市販されている一般的な間接 ToF 方式のデバイスでは、数ナノ秒～数十ナノ秒での制御が限界である。そのため、我々は、発光パルスは固定したまま、光源の発光タイミングを設定された露光時間よりも細かく遅延させながら観測を行い、得られた複数の低時間分解能の観測から計算により高時間分解能を持つインパルス応答を推定する。

発光タイミングを遅延させる簡単な方法として、(a) 光源を移動する方法と、(b) 撮像センサと光源の間に遅延回路を挿入する方法の、二通りが考えられる。前者の (a) は、図 4 のように、光源位置を光軸上で前後させることで、光源からカメラまでの光の総飛行距離を変化させる方法である。光路長を変化させることができるため、撮像センサに到達するまでの時間を光源の位置によって制御することができる。この方法は簡便に実施できるが、距離に応じた光量の変化や照明の持つ配光特性による明るさの変化が生じてしまうという問題があり、正確なアライメントと光源のキャリブレーションが必要である。

一方、後者の (b) は、発光のタイミングを制御している同期信号を遅延させる方法である。ToF カメラの光源は、撮像センサ側で生成された同期信号が光源に到達した時に発光する。電気の伝わる速度は光の速度と同等であるため、撮像センサと光源間を繋ぐケーブル長を変化させる事

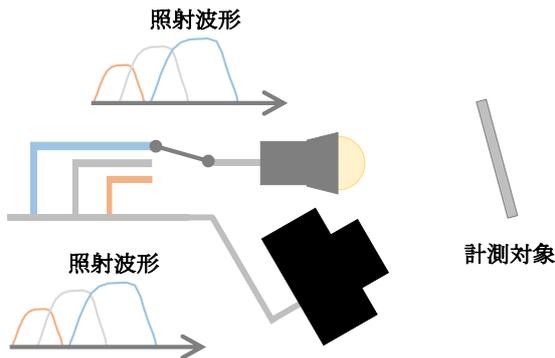


図 5: ケーブル長設定による発光タイミング遅延

で、撮像センサ側から送られる電気信号が光源に到達するまでの時間を遅延させることができる。この方法では図5のように長さの異なる複数のケーブルをスイッチにより選択する事で、発光タイミングを容易に変更することができる。このような単純な回路では、遅延タイミングを高精度に制御することは難しいだけでなく、同期信号の波形にも影響を与えることになり、照射波形の変化を招く。しかし、この照射波形の変化はフォトダイオードセンサとオシロスコープを用いて容易に確認でき、計算処理によりその影響を補正することができる。そのため、本研究では遅延回路の挿入により照明の発光タイミングの制御を行う。

ケーブル長設定により照射波形が変化するため、遅延の設定に応じて観測が変化する。 $k$  番目のケーブル長設定における観測  $i_{j,k}$  は、

$$i_{j,k} = \int g_j(t) \int l_k(t-s)r(s)dsdt \quad (7)$$

と表される。ただし、 $l_k(t)$  は、ケーブル長設定  $k$  における、照明の微小な発光遅延を含む照射波形である。

式 (7) は離散化すると、次のように記述できる。

$$i_{j,k} = \mathbf{g}_j^T \mathbf{L}_k \mathbf{r} \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{g}_j$  は露光設定  $j$  における露光を表すベクトル、 $\mathbf{L}_k$  は  $k$  番目の照射波形の畳み込みを表す行列、 $\mathbf{r}$  は離散化されたインパルス応答である。

## 2.5 インパルス応答の高分解能化

ケーブル長を変更することで発光タイミングを細かく遅延させることができる一方で、計測できる数はケーブルの本数に限られてしまう。そこで、図6に示すように、ToFカメラの露光設定の変更と組み合わせる様々な発光タイミングで観測する。露光設定を  $n$  通りと、ケーブル長設定を  $m$  通りを組み合わせるとすべての観測  $\mathbf{i}$  は次のように線形に表現される。

$$\mathbf{i} = \mathbf{GLr} \quad (9)$$

ただし、

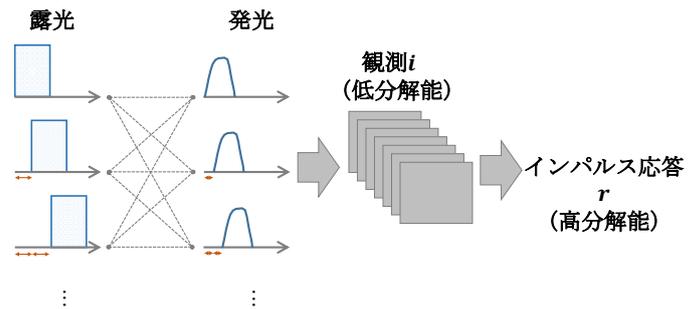


図 6: 露光と発光タイミング制御による高分解能化の流れ

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_{1,1} & i_{1,2} & \cdots & i_{1,m} & i_{2,1} & i_{2,2} & \cdots & i_{n,m} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1^T & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{g}_1^T & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{g}_1^T \\ \mathbf{g}_2^T & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{g}_2^T & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{g}_n^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1^T & \mathbf{L}_2^T & \cdots & \mathbf{L}_m^T \end{bmatrix}^T$$

露光設定は既知であり、照射波形は計測可能であるため、行列  $\mathbf{GL}$  は既知の行列となる。そのため、十分な観測数があれば、インパルス応答  $\mathbf{r}$  は最小二乗法の枠組みで

$$\mathbf{r} = (\mathbf{GL})^+ \mathbf{i} \quad (11)$$

のように線形に求めることができる。ただし、 $(\mathbf{GL})^+$  は疑似逆行列である。

実際には、センサシフト方式の超解像問題 [13] と同様に、行列  $\mathbf{GL}$  は性質がよくないため、式 (11) に示す計算は不安定である。しかしながら、インパルス応答が負の値を持たないという性質を利用することで、よりロバストな推定が期待される。インパルス応答の推定は、次のような非負拘束付き最小二乗法問題に変換できる。

$$\underset{\mathbf{r}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{i} - \mathbf{GLr}\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{r} \geq 0 \quad (12)$$

式 (12) は凸最適化問題であるため、多項式時間で最適解を得ることができる。

## 3. 実験

### 3.1 遅延回路の作成と照射波形の計測

発光タイミングを遅らせるための遅延回路は、図7に示す通り作成した。長さの異なるケーブルをロータリースイッチに接続することで、ToFカメラと光源との間の総

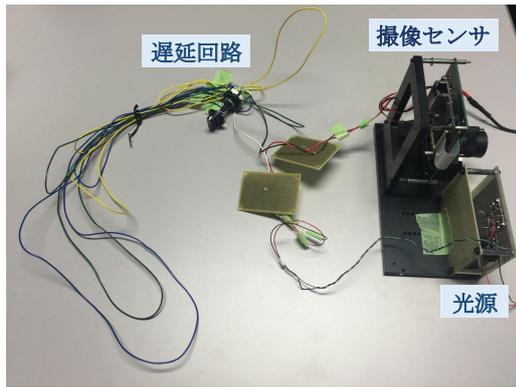


図 7: ToF カメラと遅延回路の組合せ

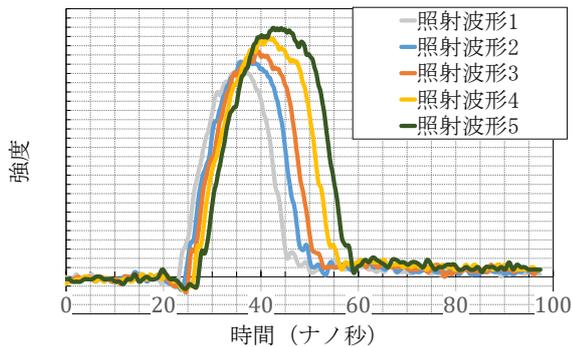


図 8: オシロスコープにより計測した照射波形

ケーブル長を変更できる。それぞれのケーブル長は、約 1 ナノ秒ごと遅延されるように、約 30mm ずつ長くなるように調節した。我々が実験に用いる ToF カメラ（浜松ホトニクス製 S11963-01CR）は、最小の露光遅延設定が 5 ナノ秒であるため、5 本の異なるケーブルを使用した。

実際に、ロータリースイッチを切り替えることで、光源の照射パルスが遅延される様子をオシロスコープ（Pico Technology 製 Picoscope 6404D）を用いて確認した。オシロスコープは、一つ目のプローブでカメラ側での同期信号を計測し、二つ目のプローブでフォトダイオード（Si PIN フォトダイオード S5973-01）を用いて光源の照射波形を計測した。図 8 に、計測した照射波形を示す。約 1 ナノ秒ごとに発光が遅れていく様子が確認できる。また回路の電気的特性により、ケーブル長が長くなるほど発光幅も広がっており、2.3 章で述べたように波形が矩形でないことも確認された。この広がりも含めて計測データから行列  $\mathbf{L}$  を作成する。また 1 ナノ秒単位の発光タイミング遅延により観測を行うので、用いる照射波形は図 8 の各波形の対して、1 ナノ秒でダウンサンプリングしたものを用いた。また  $m=5$ ,  $n=15$  とし、 $\mathbf{g}_j^T$ ,  $\mathbf{L}_k$ ,  $\mathbf{r}$  をそれぞれ  $1 \times 80$ ,  $80 \times 20$ ,  $20 \times 1$  の行列として表現した。

### 3.2 シミュレーション実験

まず始めに、遅延回路の挿入により時間高分解能化を行

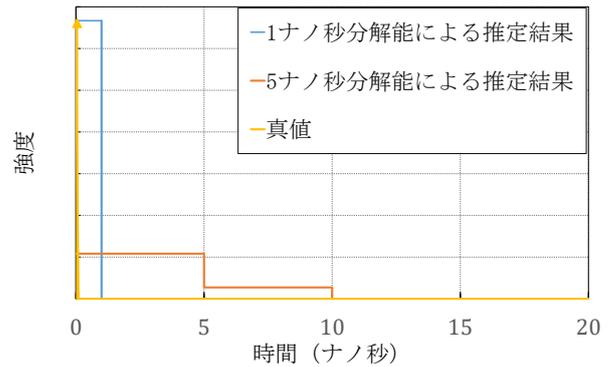


図 9: デルタ関数を仮定した場合のインパルス応答に対する推定結果

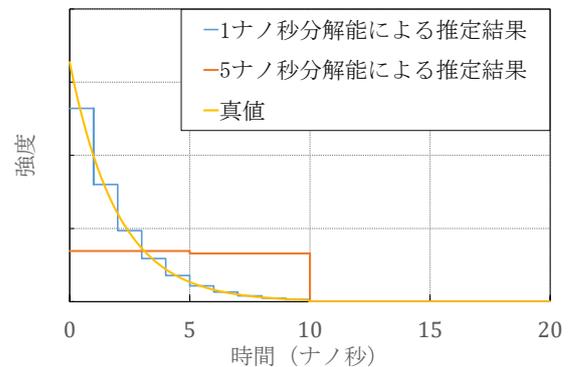


図 10: 時間的に広がるインパルス応答に対する推定結果

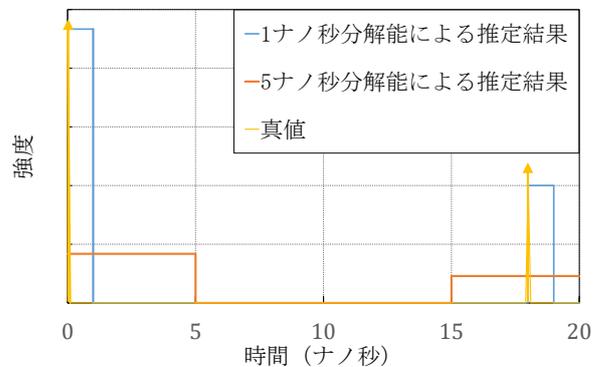


図 11: 複数のピークを持つインパルス応答に対する推定結果

う原理を検証するために、シミュレーション実験を行った。シミュレーションでは、3.1 章で実際に計測した照射波形を用いて、所与のインパルス応答に対し、観測を計算によって求めた。式 (12) によりインパルス応答を推定し、真値と比較を行った。また、比較のため、遅延回路を用いずに、ToF カメラの露光設定だけで得られるデータを用いた低時間分解能な推定結果とも比較した。

まず、シーンのインパルス応答がデルタ関数である場合について確認を行った。図 9 に入力となるインパルス応答、および推定結果を示す。遅延回路を用いない場合、カ

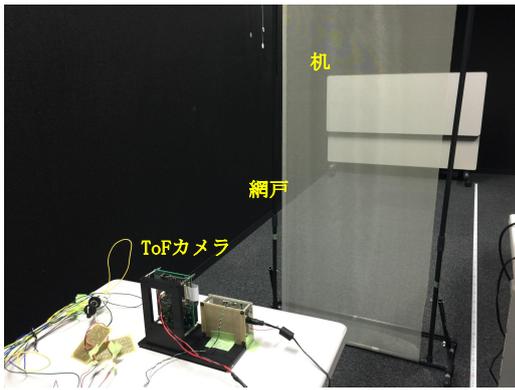


図 12: 実験環境

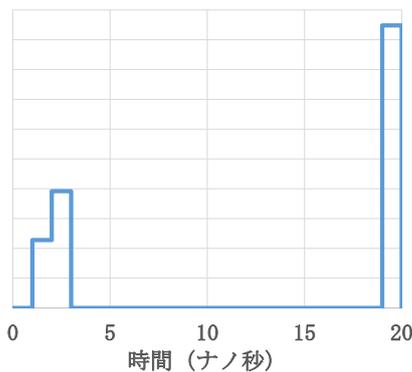


図 13: 複数の奥行きがあるシーンでのインパルス応答の推定

カメラの時間分解能は 5 ナノ秒であるため、5 ナノ秒の分解能でしか推定できないのに対して、遅延回路を用いると、1 ナノ秒の分解能で推定されている。次に、散乱媒体のように、インパルス応答が時間的に広がるシーンについて確認を行った。図 10 に結果を示す。この場合も同様に、遅延回路を用いたほうが、細かく推定されていることが分かる。最後に、相互反射や半透明な層構造を持つシーンのように、インパルス応答に複数のピークが立つシーンに対する実験を行った。図 11 に結果を示す。このシーンに対しても同様に遅延回路の有効性が確認された。

### 3.3 実環境実験

次に、実際に ToF カメラを用いて、図 12 のように網戸と机をシーン中に配置して撮影を行った。このシーンでは、網戸からの反射光が到達してから、18 ナノ秒後に机からの反射光が到達するよう 3 m の間隔を開けて、網戸と机を配置した。実際に、遅延回路のケーブル長とカメラの露光設定を変えながら撮影した画像から、インパルス応答の推定を行った結果を図 13 に示す。推定されたインパルス応答には二つのインパルスに近いピークがあり、高時間分解能なインパルス応答が推定されていることが分かる。また、二つのピークの幅は約 18 ナノ秒離れており、これは距離に換算すると約 6 m で、網戸から反射しセンサに到達

する光路と机から反射しセンサに戻る経路の差分に等しいため、インパルス応答が正確に推定されていることが分かる。網戸の反射よりも、後ろの白い机の反射光のほうが強いことも、ピークの高さから観察できる。

## 4. まとめ

本研究では、市販の ToF カメラと簡単な遅延回路を組み合わせることで、シーンのインパルス応答を高時間分解能で推定する手法を提案した。推定したインパルス応答は、シーンの幾何学的・光学的特性の解析に利用することが期待される。シミュレーションと実環境による実験を行い、提案手法の有効性を確認した。しかし 1 ナノ秒の時間分解能ではまだまだ時間分解能が足りず、現状では適用できるシーンが限定される。インパルス応答を利用したシーンの解析例として、材質推定等があげられるが、これらに適用するためには、さらなる高時間分解能化が必要である。そのためにはさらに細かい単位での発光タイミング制御が必要であるが、実験に用いた遅延回路ではナノ秒以下の単位で発光タイミングがわずかに変化するため、遅延回路による信号伝送の精度向上が必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] A. Velten, D. Wu, A. Jarabo, B. Masia, C. Barsi, C. Joshi, E. Lawson, M. Bawendi, D. Gutierrez, and R. Raskar, "Femto-photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light," Proc. SIGGRAPH, 2013.
- [2] F. Heide, M. B. Hullin, J. Gregson, and W. Heidrich, "Low-budget Transient Imaging using Photonic Mixer Devices" Proc. SIGGRAPH, 2013.
- [3] A. Kadambi, R. Whyte, A. Bhandari, L. Streeter, C. Barsi, A. Dorrington, and R. Raskar, "Coded Time of Flight Cameras: Sparse Deconvolution to Address Multipath Interference and Recover Time Profiles," ACM Transaction of Graphics (ToG), 2013.
- [4] M. O'Toole, F. Heide, L. Xiao, M. B. Hullin, W. Heidrich, and K. N. Kutulakos, "Temporal Frequency Probing for 5D Transient Analysis of Global Light Transport," ACM Transaction of Graphics (ToG), 2014.
- [5] C. Peters, J. Klein, M. B. Hullin, and R. Klein, "Solving Trigonometric Moment Problems for Fast Transient Imaging," Proc. SIGGRAPH Asia, 2015.
- [6] D. Freedman, E. Krupka, Y. Smolin, I. Leichter, and M. Schmidt, "SRA: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors," Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.
- [7] C. Ti, R. Yang, J. Davis, Z. Pan, "Simultaneous Time-of-Flight Sensing and Photometric Stereo With a Single ToF Sensor," Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015.
- [8] A. Kadambi, V. Taamazyan, B. Shi, and R. Raskar, "Polarized 3D: High-Quality Depth Sensing with Polarization Cues," Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015.
- [9] H. Shim and S. Lee, "Recovering Translucent Objects using a Single Time-of-Flight Depth Camera," IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, 2015.

- [10] F. Heide, L. Xiao, A. Kolb, M. B. Hullin, and W. Heidrich, "Imaging in scattering media using correlation image sensors and sparse convolutional coding," *Optics express*, Vol.22, Issue 21, pp. 26338–26350, 2014.
- [11] F. Heide, W. Heidrich, M. Hullin, and G. Wetzstein, "Doppler Time-of-Flight Imaging," *ACM Transaction on Graphics (ToG)*, 2015.
- [12] I. Gkioulekas, A. Levin, F. Durand, and T. Zickler, "Micron-scale Light Transport Decomposition Using Interferometry," *ACM Transaction of Graphics (ToG)*, 2015.
- [13] S. Park, M. Park, and M. Kang, "Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol.20, no.3, pp. 21-36, 2003