コンピュテーショナルフォトグラフィによる多波長超短時間撮影
― 千億分の一秒の光の世界を可視化するカメラ ―

1.　背景

従来，一般的な RGB カメラを用いた画像処理や物体認識などの研究は盛んに行われてきた．しかしながら，一般的なカメラを用いた画像処理や物体認識では限界がある．一例を挙げると，図 1 のように白い物体のみが並べられたシーンに対して一般的な RGB カメラを用いて撮影した画像から物体認識を行うことは難しい．一方で，物体が照射光に対して示す時間的応答や波長的な応答を用いると，物体の構成材料なども同時に取得することが可能で，それによって得られた高次元情報を用いることで物体識別も容易になると考えられる．このように，コンピュータが現実空間をセンシングするためには，従来の一般的なカメラではなく，高次元な光のセンシングを可能にするカメラが必要であると言える．しかしながら，超短時間の光パルスに対する時間応答が計測可能なストリークカメラは数千万円するデバイスであり，分光情報が取得可能なハイパースペクトルカメラは数百万円程度するデバイスである．さらに，それぞれのカメラを組み合わせて高次元な光のセンシングを行う場合では，撮影だけでも 10 時間以上の時間がかかってしまうため，これもとても現実的な方法ではないと言える．

図 1 従来の RGB カメラで撮影した白い物体が並べられたシーン

2.　目的

そこで，本プロジェクトでは，簡易なデバイスと計算の工夫によって 10 ピコ秒単位（千億分の一秒）で発生する光の時間的な変化の計測を行うデバイスの開発と，そのデバイスを用いた物体の物理現象の可視化を提案する．

3.　開発の内容

本システムは，物体のある一点に対する光の時間的な変化を千億分の一秒単位で計測することが可能である．本システムは図 2 に示すハードウェアで構成されている．本システムは，単一光子計数と呼ばれる方法によって物体に照射した光に対する反射光の時間的な変化をピコ秒単位で計測する．これは光の粒子性に着目した計測方法である．システム

の動作について順を追って説明する．まず，物体に光を照射する．このとき，物体が反射・透過する光は時間的に変化する．これは構造や材質によって変化する．物体が反射または透過した光子を Silicon Photomultiplier（SiPM）と呼ばれる光子の検出が可能な素子を利用して検出する．光源が照射されたタイミングと光子を検出したタイミングをピコ秒単位の時間計測が可能なデジタル回路である Time to Digital Converter(TDC)によって計測する．また，本システムは，光源から光を照射するアクティブセンシングであるために，複数の異なる波長を用意することによって波長方向の計測に拡張することが可能である．本プロジェクトでは，青色 LED と赤色 LED の 2 種類の光源を使用した．

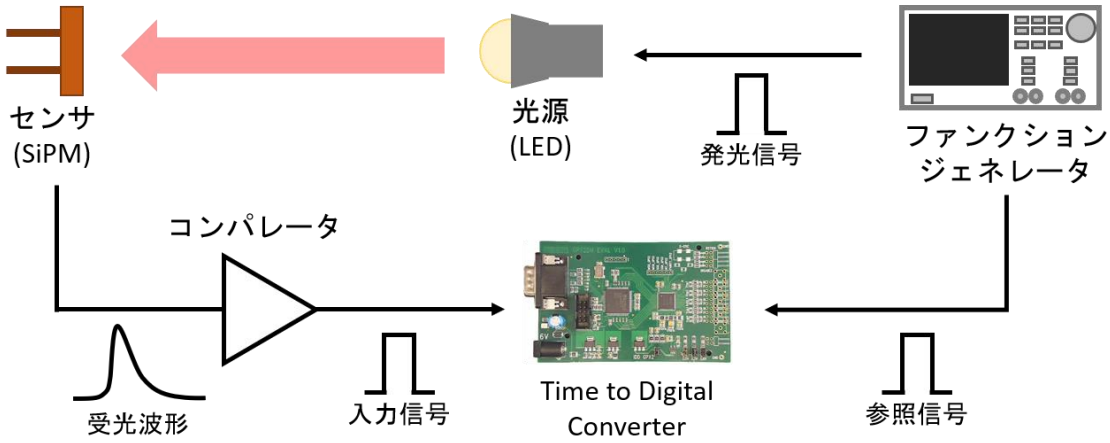

図 2 システムの全体構成

実際に，物体の材質や内部構造の変化に対する光の時間的な応答の変化を計測した．図 3 に計測した材料と時間的な応答の変化を示す．今回は，材料として白もしくは黒とクリア素材の混合率を変化させた材質を複数個用意し，その材料の透過光の時間変化を計測した．材料が透明に近づくにつれて光子の計数が増加している様子が分かる．また，同じ色でも混合率によって立ち上がりや立ち下がりに変化が生じていることが分かる．このように，ピコ秒単位で変化する微かな変化も可視化することが可能である．

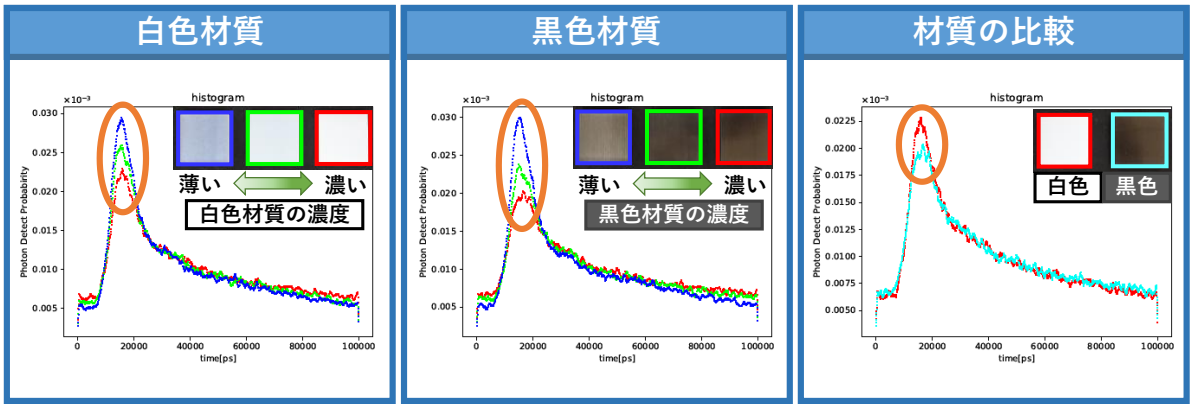

図 3 各物質の照射光に対する時間応答

また，内部構造が異なる物体についても計測を行った．今回は，形状が同一のプラ板と中空のあるプラ板の 2 枚を用意し，透過光の時間変化を計測した．図 4 に計測した材質と計測結果を示す．画像ではどちらが中空でどちらが板であるか区別がつかない．これに対

して，実験結果では，中空板とプラ板で応答波形に大きな差が生じていることが分かる．結果より，時間変化を利用した物体内部の構造を可視化することが可能であると考えられる．

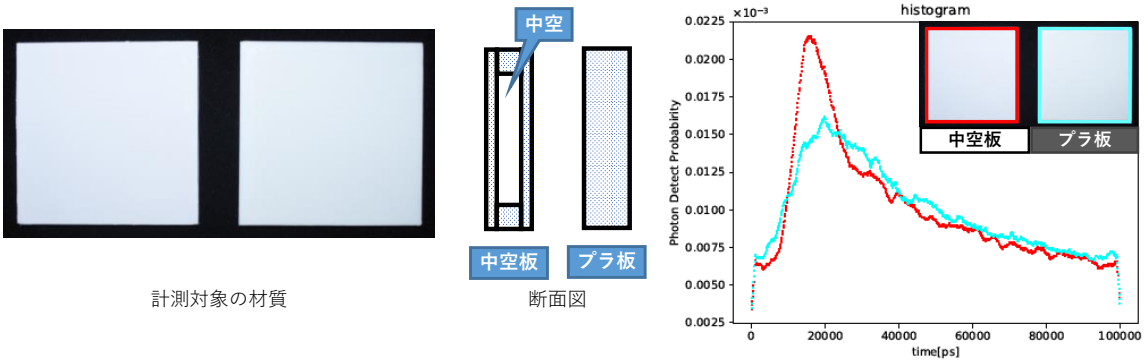

図 4 内部構造が異なる物体の時間的な応答

4. 従来の技術（または機能）との相違

従来，ピコ秒やフェムト秒などの超短時間に発生する光の変化を計測するカメラとしてストリークカメラや分光情報を計測するカメラとしてハイパースペクトルカメラがある（図 5）．これらのカメラはそれぞれの光の性質を高い分解能で計測することが可能であるが，それぞれの装置はとても高価である．ストリークカメラやフェムト秒レーザー光源は数千万円程度であり，ハイパースペクトルカメラも数百万円程度である．また，これらの装置は数十分～十時間程度の計測時間を必要とする．一方で，近年の半導体技術の進歩により Single Photon Avalanche Diode(SPAD)や SiPM などの光子検出が可能である光センサが開発された．しかしながら，ハードウェアの改良のみではいずれ限界が来る．

図 5 従来の計測手法

そこで，本システムは，フェムト秒レーザー光源やストリークカメラ，ハイパースペクトルカメラなどの高価な装置を用いることなく，LED 光源や SiPM などの一般的に入手可能で安価なデバイスと計算処理を組み合わせることで高次元な光のセンシングを簡易なデバイスで計測することが可能である．従来の技術は，ハードウェアの改良によって高い分解能の計

測を行う方法もしくは，画像処理によって識別精度を向上させる方法のどちらかであった．本システムは，コンピュテーショナルフォトグラフィと呼ばれるハードウェアとソフトウェアの協調設計による方法を用いることで簡易なデバイスで高次元な光のセンシングを実現する．この協調設計が従来の技術との相違点である．

5.　期待される効果

物体が示す光の応答は，同じ材質でも表面形状や内部構造，密度や温度などの物理的な要因によって変化する．高次元な光のセンシングによってこれらの物理的性質を捉えることが可能であると考えられる．しかし，現状では，ストリークカメラやハイパースペクトルカメラなどの高価なカメラを複数台用いることで高次元な光のセンシングが可能であるが，位置や光学系の調整，計測時間などを考えると現実的ではない．そこで，本システムでは，安価で簡易なデバイスとソフトウェアを組み合わせることによって高次元な光のセンシングを実現する．最終的には，光計測のみで物体や人体の内部構造の可視化や，食品工場での異物検出，霧などの影響を取り除くことで自動運転を支援する用途，果物や野菜の糖度分布を平面的に可視化する用途など様々な分野に対して応用できる可能性がある．具体的な応用例を図 6 に示す．

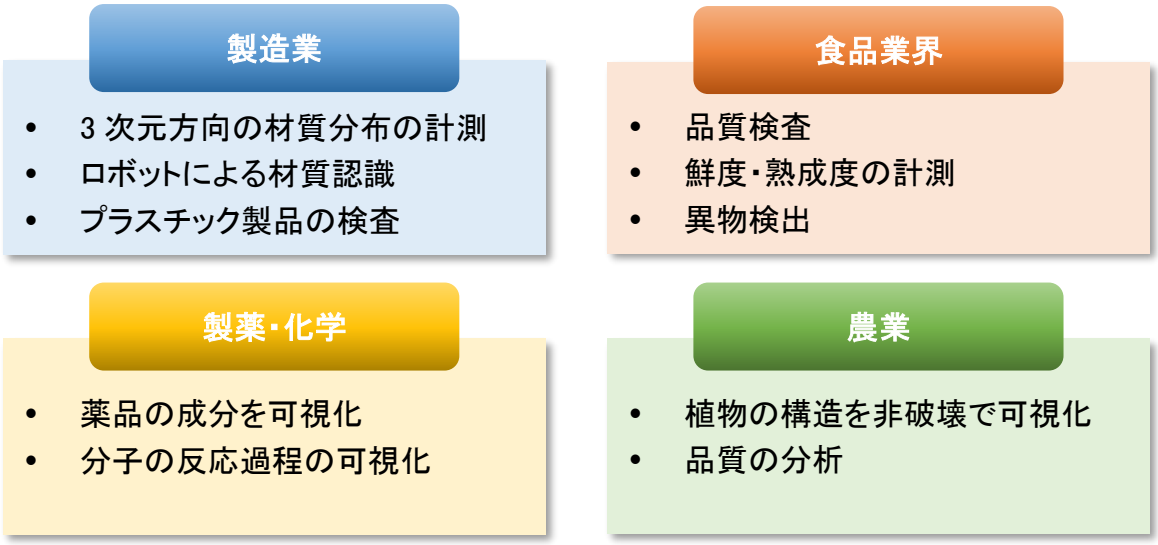

図 6 具体的な応用先

6.　普及（または活用）の見通し

現時点では，ある一点に対する光の時間的な応答と波長的な応答を計測するに留まっているために材料の分類程度の応用例しかない．ただ，将来的にデバイスが改良され，サブピコ秒単位の時間応答の計測や可視光から近赤外までの広い波長の計測が可能になった場合，大きなシーンに対して物理的な性質を計測する用途のみならず，バイオイメージングや分子分光などのミクロな物体に対しても応用可能であると考えている．今後も開発を続けていくことで，最終的には人体内部の可視化を目指す．

7.　クリエータ名（所属）

北野　和哉（奈良先端科学技術大学院大学　情報科学研究科）