

1. 担当 PM

稲見 昌彦（東京大学 先端科学技術研究センター 教授）

2. クリエータ氏名

蛭子 綾花（筑波大学 大学院人間総合科学学術院 人間総合科学研究群
情報学学位プログラム）

3. 委託金支払額

2,650,500 円

4. テーマ名

微細加工技術による Web カメラの ToF カメラ化

5. 関連 Web サイト

なし

6. テーマ概要

距離計測手法の一つである Time-of-Flight (ToF) は、(1) 小型化が可能、(2) CPU 負荷が小さい、(3) 比較的長距離計測が可能、(4) 画素単位で独立して距離計算が可能、といった特徴を持つため、近年、研究開発が盛んに行われている。ToF の原理は、照射光が被写体に反射して戻ってくるまでの時間を測定し、距離を計測するというものである。しかし、既存の ToF カメラは時間を計測するための回路を必要とするため、受光面積的な観点から高解像度化することが困難であり、また S/N 比的な観点から距離計測精度の向上を行うことが困難であるという問題が存在する。

そこで本プロジェクトでは、これら既存の ToF カメラにおける構造的な問題を解決するために、電気偏光光学素子を用いた「時間偏光相関イメージング」の開発に挑んだ。時間偏光相関イメージングは、光源およびカメラ前面に設置された電気偏光光学素子によって偏光状態を時々刻々と変化させ、距離によって生じた偏光状態の変化を偏光相関として計測する。これにより、距離を推定するための情報は実空間上で計算された状態で素子に入るため、既存の ToF カメラのように距離計測のための回路を必要とせず、ToF カメラにおける多画素

化とノイズ低減というブレイクスルーをもたらすことが可能である。本プロジェクトでは、時間偏光相関イメージングシステムに必要な、電気偏光光学素子を微細加工技術によって構築した。

7. 採択理由

光の偏光状態を高速に変調可能なフィルタを安価なカメラに装着することで、ToF (Time of Flight) を計測することを目指した提案である。現在主流となしつつある SPAD (Single Photon Avalanche Diode) を用いたシステムなど競合技術に対する優位性には懸念があるものの、提案者は技術への深い理解とプロジェクトへの熱意が高く、魅力的なシステムとして発展することを期待し採択した。

8. 開発目標

本プロジェクトの目的は、ToF カメラの高解像度化において受光部の犠牲を必要としない新しい ToF 計算の仕組みの開発である。高速に偏光板を回転させることで、一般的なカメラで距離を明るさとして取得可能にするアプローチで ToF カメラの高解像度化を阻む問題を解決する。そのために、本プロジェクト期間では、電氣的に偏光変調可能なカメラフィルタ「電気偏光光学素子」の製作と評価を通した原理検証を行った。

9. 進捗概要

本プロジェクト開始時では、光源およびカメラ前面に電気偏光光学素子をそれぞれ配置し、照射光の偏光状態およびカメラで受光可能な偏光状態を時間変化させ、時間偏光相関演算を行うことを予定していた。しかし、物体表面での反射の際に偏光状態が保存されない場合があるのではないかと、複数の電気偏光光学素子の同期をいかにして取るかといった懸念点や課題があった。そのため、光源は偏光変調ではなく従来の ToF カメラと同じ強度変調を行い、電気偏光光学素子はカメラ前面にのみ配置して照射光と反射光のずれ(位相差)を計測する仕組みへと変更した。

従来の ToF カメラでは、位相差を計測するために、複数の電荷蓄積部に電荷を振り分け、それぞれの電荷蓄積部に溜まった明るさの比から位相差を計算している。一方で、本プロジェクトにおける ToF 計測システムでは、カメラの前面に配置された複数の光学素子により、空間上で光学的に位相差の計算を実行する(図 1)。まず、強度変調された照射光は対象物体表面で反射し、透過軸が縦方向の偏光板を通過することで縦偏光になる。この縦偏光を電気偏光光学素子と 1/4 波長板によって回転させる。カメラの前には透過軸が横方向である偏光板が配置されているため、電気偏光光学素子と 1/4 波長板による偏光の回転量に応じてカメラで受光される明るさが変化する。電気偏光光学素子の偏光状

態変化のタイミングをずらしながら複数回撮影し、得られた明るさの比から位相差および距離を計算することができる。

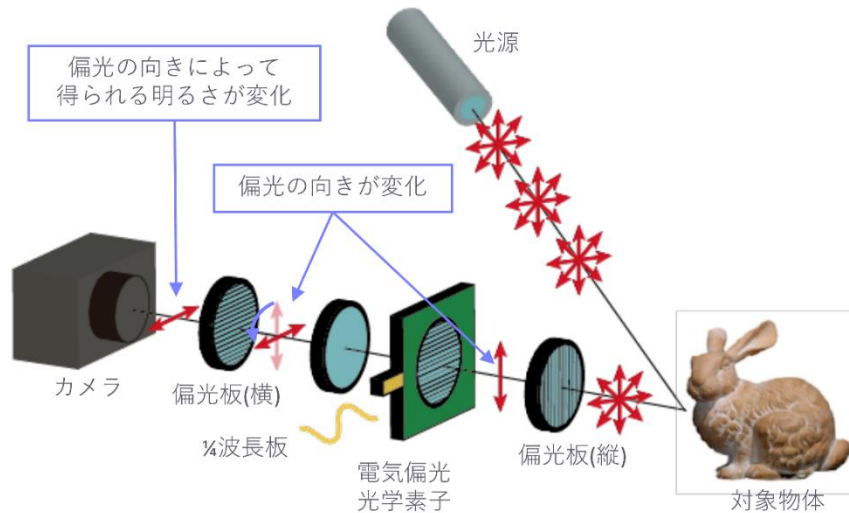


図 1 : ToF 計測システムのイメージ図

電氣的に偏光変調可能なカメラフィルタ「電気偏光光学素子」とは、加えられた電圧に応じて偏光状態を変化させることが可能な光学素子である。この機能を実現するために電圧を与えると歪が生じる現象（逆圧電効果）を利用する。逆圧電効果による歪が結晶の厚みや複屈折性を変化させることで光の位相および偏光状態を変化させることができる。微細加工機器を用いて作製した電気偏光光学素子を図 2 に示す。圧電特性を持つ結晶であるニオブ酸リチウムのウエハの両面に透明な導電膜（ITO）を生成し、ウエハの厚み方向に電圧をかけることができるように、ウエハの一部に電極を作製した。基板上的コネクタを介して、素子固有の共振周波数の電気信号を入力することで、電気偏光光学素子による偏光変調が可能となる。

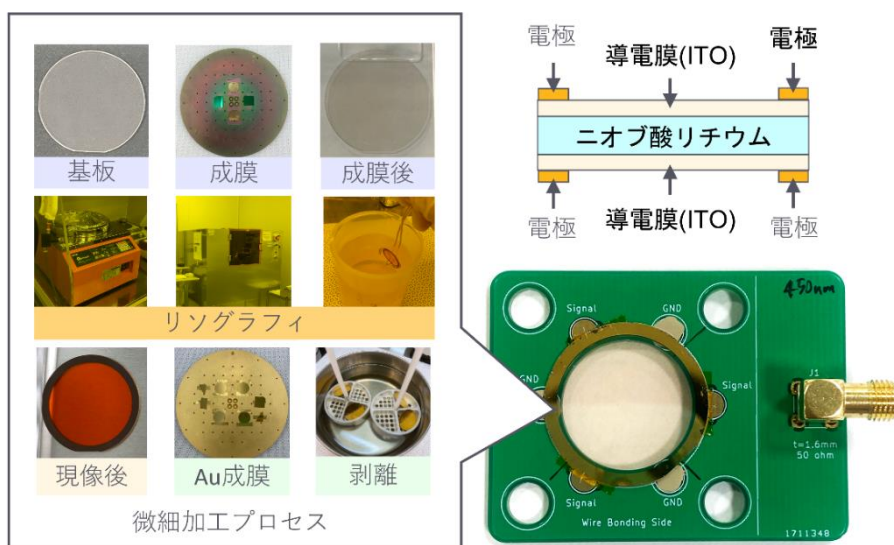


図 2 : 製作した電気偏光光学素子

作製した電気偏光光学素子によって距離計測が可能かどうか 1 画素のカメラ (APD) を用いた評価を行った (図 3)。この評価では、レーザー光源も素子の偏光変調と同じ周波数 (共振周波数) で強度変調を行い、電気偏光光学素子の駆動信号との位相差を変化させたときに APD で観測される輝度の変化を調べる。ToF の原理上、位相差から距離を算出することができるため、位相差を変化させることは距離を変化させることに相当する。図 4 は、位相を 2 度刻みで変化させたときの輝度変化をプロットしたものであり、輝度から位相差 (距離) を計算可能であることを示すことができた。

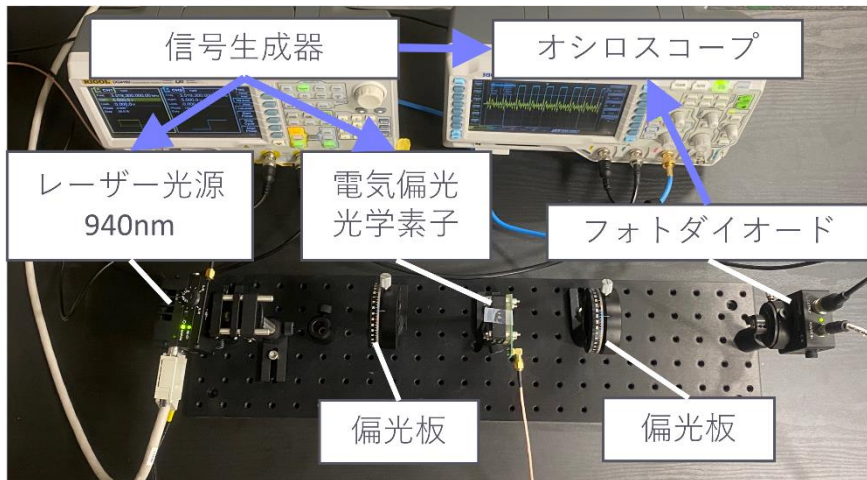


図 3 : 1 画素のカメラによる距離計測精度評価の実験系

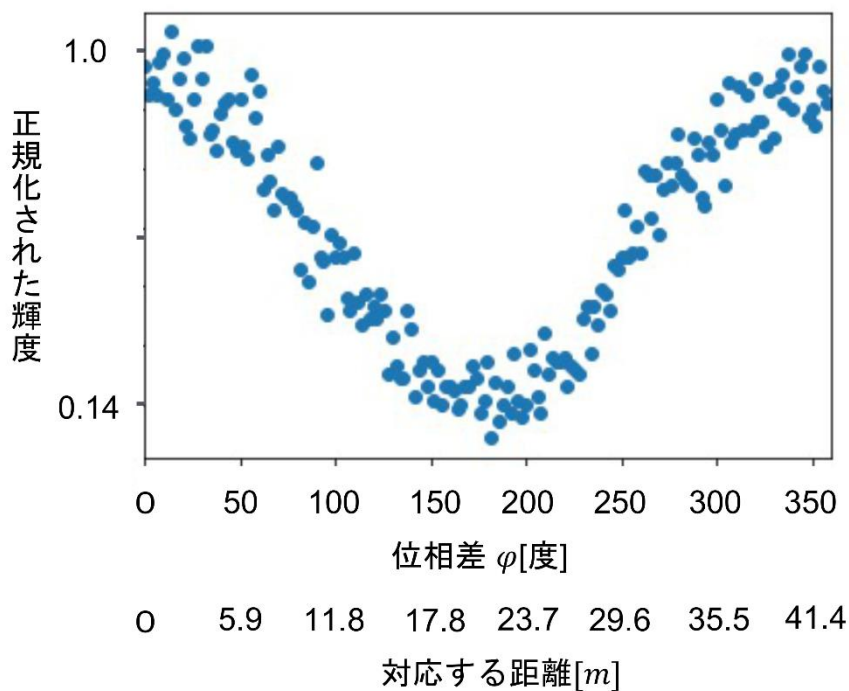


図 4 : 位相を 2 度刻みで変化させたときの輝度変化

10. プロジェクト評価

従来の ToF カメラでは、位相差の計算を撮像素子の回路上で実行していたが、本プロジェクトが提案する方式では位相差の計算を光学的に実行することが可能である。そのため、ToF カメラの撮像素子上に位相差計算を行う回路が不要となるため、将来的には受光部を犠牲とせず高解像度化が可能となると考えられる。ただし現時点では、1画素のカメラによる距離計測システムであるが、多画素化に向けてシステムを改良していくことで、高い解像度を持つ 4K や 8K の一般的なカメラのレンズと撮像素子の間に電気偏光光学素子を挟むだけで、4K や 8K の高解像度な ToF カメラを実現することが可能となるだろう。ToF カメラの解像度が向上することで、距離画像を入力とした画像認識アプリケーションにおいて認識精度が高まる効果が期待できる。

クリエイターの蛭子氏は過去に未踏 IT 人材発掘・育成事業および未踏アドバンス事業に採択経験のある、百戦錬磨のクリエイターである。しかしながら今回のプロジェクトの目指すゴールは遠く、思うように実験が進まない時期もあった。そのような不安をおくびにも出さない強さを持っていたが、度重なる無理がたたり停滞したこともあった。しかし最終的には無事成果を発表するに至るタフさを見せた。今回のプロジェクトで得たレジリエンスをぜひ将来につなげてほしいと願っている。

11. 今後の課題

電気偏光光学素子と一般的なカメラの撮像素子を用いた ToF カメラの多画素化の実現へ向けて開発を行っていく予定である。そのために、安定して発光する光源の開発や、電気偏光光学素子の偏光状態変化の面内不均一性に対する補正アルゴリズムの開発を行う。多画素化の実現後は、展示会や学会での論文発表を通じて、ユーザへのアプローチを行うことで本プロジェクトの認知を向上させる予定である。