

## 符号化シャッタによる圧縮センシングに基づく 高速三次元計測技術

### [1] 組織

代表者：宮崎 大介

(大阪市立大学大学院工学研究科)

対応者：香川 景一郎

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

森口 幸志郎 (大阪市立大学大学院工学研究科)

望月 風太 (静岡大学工学研究科)

### [2] 研究経過

対象物体の3次元的位置や形状の情報を得る技術は、工業生産、医用計測、生体計測、マシンビジョン等、様々な分野で利用されている。光飛行時間(time of flight: TOF)法は、変調光を想定対象に照射し、反射して計測器に入射するまでの時間により距離を測定する手法である。この方法は投影光学系と撮像光学系をインラインにすることができるので、影を生じることがなく、視差画像方式のように対象のテクスチャが計測精度に影響することがない。近年は、光検出セルの2次元アレイ化により、ビデオフレームレートでの距離画像を取得することが可能となっているが、それ以上の高速化はセンサからのスループットの制限のために困難であった。本プロジェクトでは、MHz程度の周波数で距離画像を取得するために、アパーチャ単位でのシャッタ変調が可能なマルチアパーチャ撮像システムを用い、圧縮センシングに基づいて、TOFによる距離画像計測技術の時間分解能を大幅に拡張することが目的である。

本プロジェクトは、本年度が初年度であった。これまで、静岡大学電子工学研究所では、高速な電荷転送が可能なCMOSイメージセンサを用いたTOFカメラが開発され、ビデオフレームレートで数センチの分解能を持つ距離画像計測が行われた。また、高速撮像に関する開発として、マルチアパーチャ撮像システムにおいて、CMOSイメージセンサのローリングシャッターに基づく受光の時間的コード化を利用してフレームレート以上の時間分解能を得ることができた。そこで、本プロジェクトでは、これまでの成果を踏まえながら、マルチアパーチャ撮像システムに対して、高速な電荷転送が可能なCMOSイメージセンサを導入することにより、TOFに基づく距離画像計測を高速化する研究を展開した。

以下、研究活動状況の概要を記す。2013年8月8日に、静岡大学電子工学研究所において全体的な研究計画等について打ち合わせを行った。センサの設計は、静岡大学電子工学研究所においてプロジェクト開始以前に終了しており、以後はセンサや周辺装置の作製を行った。12月にはセンサ等の作製が完了し、2013年12月3日には、静岡大学電子工学研究所において、イメージセンサの利用方法に関する打ち合わせを行った。その後、大阪市立大学において、イメージセンサの動作確認や変調光源の準備を行った。2014年2月4日には米国サンフランシスコにおいて、光技術、画像技術に関する国際会議であるPhotronics WestやElectronic Imagingで発表される関連研究の調査を行うとともに、進捗状況の報告や課題の検討、今後の方針などについて打ち合わせを行った。光の飛行時間を測定するための予備実験として、半導体レーザによる変調光を計測システムに入射し、その位相変化を計測する実験を行った。イメージセンサの開発に関して、国際会議、国内会議にて成果を報告した。

### [3] 成果

#### (3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

まず第1に、ブロックごとに異なる電子シャッタの開閉パターンを与えることができる新しい高速撮像素子を提案し、試作して動作検証を行った。イメージセンサは、5×3の画素ブロックに分かれており、各ブロックは64×54画素で構成される。各画素は1つの受光器に対して二つの電荷蓄積部を持ち、光検出によって発生した電荷を両者に振り分けることで高速なシャッタパターンの時間的変調を可能にしている。シャッタパターンは各ブロックに異なる128ビットのバイナリ信号で定義することができる。このイメージセンサに対して縦3個、横3個の2次元配列のレンズアレイを適用することで、3×3マルチアパーチャ撮像システムを構築した。アパーチャごとに異なるシャッタパターンを与えて撮像が行えることを確認した。

第2に、作製したマルチアパーチャ撮像システムに対して正弦波変調光を入射し、その変調光の位相変化を測定できることを確認した。

波長 658 nm のレーザダイオードを周波数 1 MHz の正弦波状の電流で変調して光源として利用した。レーザ光を再帰性反射シートに照射し、反射光をマルチアパーチャ撮像システムに入射させて測定を行った。シャッタパターンとして、周波数 1 MHz、デューティ比 1/4 の周期的なオンオフパターンにおいて、位相をアパーチャごとに位相が 4 分の 1 周期ずつずれた 4 通りのパターンを作成し、4 つのアパーチャにそれぞれ割り当てた。

得られた画像の例を図 1 に示す。この画像とは別に、もう片方の電荷蓄積部からの出力画像も得ることができる。これは、相補的なシャッタパターンで撮像された画像であるので、同じ位置における相補的な画素値の和を求めて、測定値の正規化を行った。異なるシャッタパターンが適用された 4 つのアパーチャで取得される画像は、変調光周期の 4 分の 1 ずつずれたタイミングで取得されている。これらの 4 つの画像の対応する画素値を  $I_1, I_2, I_3, I_4$  とすると、変調光の位相  $\phi$  は次式で得られる。

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} \right) \quad (1)$$



図 1 マルチアパーチャ撮像システムによる変調レーザビームの取得例。それぞれのアパーチャにレーザビームによるスポットが 1 点ずつ形成されている。

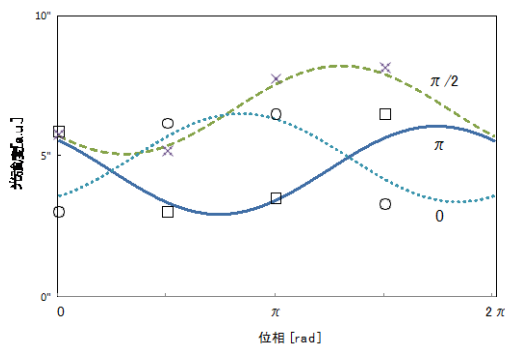


図 2 変調光の初期位相を 0 [rad],  $\pi/2$  [rad],  $\pi$  [rad] としたときの光強度の規格化された測定値  $\circ, \square, \times$  と正弦波のフィッティング結果。 $\pi/2$  [rad] はシャッタパターンと変調光位相の関係によりバイアスが大きくなっている。

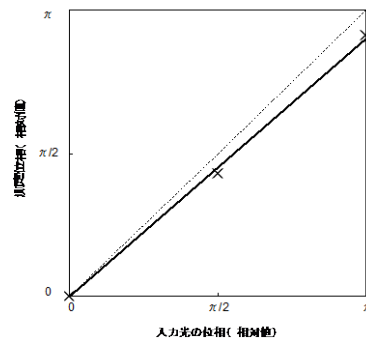


図 3 変調光の初期位相を 0 [rad],  $\pi/2$  [rad],  $\pi$  [rad] としたときの相対的な位相の測定値。直線は測定値の回帰直線。点線は位相計測の理想値。

図 2 に、変調光の初期位相を 0 [rad],  $\pi/2$  [rad],  $\pi$  [rad] としたときの測定値と正弦波のフィッティング結果を示す。また、それぞれの位相の測定値を図 3 に示す。これらの結果より、マルチアパーチャ撮像システムにより、高速変調光の位相測定が可能であることを示した。距離計測においては、測定対象から反射される光の飛行時間に応じて変化する位相を測定することにより距離画像が取得できる。今後、測定精度等の評価を行う予定である。

### (3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトにより、高速 3 次元計測技術の実現に必要な技術要素の初期的な原理確認実証を行うことができた。本プロジェクトで提案されたマルチアパーチャ撮像システムによる計測手法は、従来にない高いフレームレートでの連続的な距離画像の取得を可能にするもので、これまで計測が困難であった高速現象に 3 次元計測を適用でき、様々な分野への発展が期待できる。

また、マルチアパーチャ撮像システムを用いた高速画像取得に関しては、距離画像計測に限らず、様々な応用を考えることができ、研究対象が大きく広がる可能性がある。本プロジェクトでの提案技術は、そのような新しい高速イメージセンサの重要な応用例の一つとなる。

本プロジェクトの成果は、提案手法の実行が原理的に可能であるかを確認する予備実験的なものであったため、イメージセンサが持つ能力を十分に発揮する結果を得るためには、イメージセンサの応答速度の改良、光源の周波数の向上、シャッタパターン検討などに関して研究を継続する必要がある。

### [4] 成果資料 (以下 1 0.5 ポイント)

- (1) F. Mochizuki *et al.*, 13<sup>th</sup> Int'l Conf. on QiR, pp. 927-930 (Jun. 2013).
- (2) 望月風太他, 平成 25 年度 電気関係学会東海支部連合大会, II-3 (浜松, Sep. 2013).

## 出張報告

氏 名：宮崎大介

所 属：大阪市立大学

期 間：2013年8月8日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：研究打ち合わせ

主たる対応者：香川景一郎