

平成 30 年 7 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0012

研究課題名（和文）ライトフィールドビジョン -画像理解のためのコンピューショナルフォトグラフィ-
（国際共同研究強化）研究課題名（英文）Light field vision -Computational photography for image understanding -(Fostering
Joint International Research)

研究代表者

長原 一 (Nagahara, Hajime)

大阪大学・データリティフロンティア機構・教授

研究者番号：80362648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,800,000円

渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：従来のコンピュータビジョン(CV)研究は、2次元画像を入力することを前提として進化してきた。しかしながら、2次元入力には単にカメラというセンサの制約によるもので、これが画像理解において最適なわけではない。本研究では、カメラセンサのシャッターに着目し、露光タイミングを自由に制御出来るプログラマブルセンサを用いた符号化撮影画像を用いたコンピューショナルフォトグラフィ手法の研究を行った。この研究の成果として、フレームレートを16倍に向上できる圧縮ビデオセンシングや物体の形状変化を動画像として計測できる動的フォトメトリックステレオを実現した。

研究成果の概要（英文）：Computer vision has been developed global shutter and 2D degenerated image as an input for understanding 3D scene. However, the image is not always the best input image for any applications. In this project, we focused on the exposure timing of the sensor and we used programmable exposure sensor which can freely change the timing of the neighboring pixels. We utilize this flexibility of the exposure timing to the computational photography applications, and realize two example of the applications; compressive video sensing and dynamic photometric stereo.

研究分野：コンピューショナルフォトグラフィ

キーワード：コンピューショナルフォトグラフィ コンピュータビジョン

1. 研究開始当初の背景

従来のコンピュータビジョン(CV)研究は、2次元画像を入力することを前提として進化してきた。しかしながら、2次元入力は単にカメラというセンサの制約によるもので、これが画像理解において最適なわけではない。基础研究では、このライトフィールドカメラ(LFカメラ)を画像理解に応用する「ライトフィールドビジョン」(LFビジョン)を提案し、新たな研究分野として確立することを目的としている。LFビジョンでは、従来のカメラが撮像する2次元画像の制約を取り払い、シーン中の光線の集合であるライトフィールド(LF)全体から、体系的に現実世界を認識する枠組とする。LFは一般的には $I(s, t, x, y)$ の4次元関数で表され、3次元空間内でのシーンのあらゆる見え方(形状や明るさ・色)を高次元の光線情報として保持している。これに対して、従来のカメラは、 (s, t) で表される光線位置の情報をレンズにより積分するために、その画像は入射角 (x, y) のみの2次元の縮退観測されたものである。図1-aに示す様に、2次元画像から元の3次元世界を理解することは不良設定問題であり、本質的にシーンの理解は困難な問題であった。それに対してLFビジョンでは、本来の高次元LF全体を入力として想定することで、あらゆるビジョンの問題をより安定に求めることができる(図1-b)。提案するLFビジョンの有効性を示す具体的課題として、透明や鏡面物体の検出と認識、形状推定というチャレンジな課題を設定した。現在までの2年半の成果として、や透明物体の識別、物体の領域分割、動物体認識、半透明物体の内部形状推定などを提案し、これまでのCVベースの画像認識が苦手としてきた対象や条件での応用を実現した。

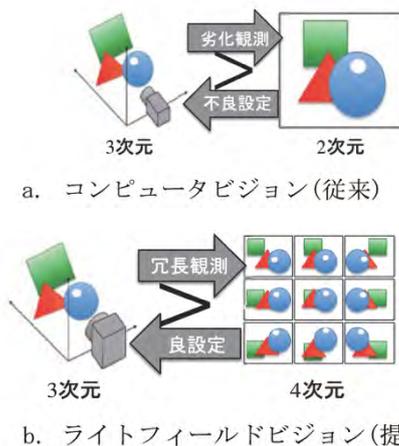


図1: 従来のコンピュータビジョンとライトフィールドビジョンの比較

2. 研究の目的

これまでのコンピュータビジョンは、3次元シーンを2次元の縮退画像として計測し、そこから3次元世界を推定する不良設定問題

を解くことを目的としてきた。本研究では、2次元射影による情報縮退の問題をさらに時間軸に拡張して考えた。

一般的なカメラに用いられるセンサは、グローバルシャッターと呼ばれる電子シャッターを持つ。グローバルシャッターでは、センサのすべての画素が同期して露光開始や終了を行うことで、ある瞬間の映像を一枚の静止画として記録し、これを高速に繰り返すことで、静止画の連続として動画を撮影する。また、近年のCMOSイメージセンサでは、特に静止画用のセンサとしてローリングシャッターを採用するセンサが一般的になっている。ローリングシャッターは、画像の行読み出しタイミングと露光が同期しているシャッター方式で、行毎に順次露光される。そのため、画像の上部と下部で露光タイミングが異なることから、動画撮影において像が歪むという欠点を持つが、回路が簡略化できセンサ内のフォトダイオードの面積を最大限にとれることから感度が高いという利点がある。これらグローバルシャッターやローリングシャッターを備えた通常センサは、いずれもナイキストサンプリングに基づく均等サンプリングを前提としているため、すべての画素は均等な間隔でサンプリングされ、時間的にも均等な時間間隔でサンプリングされることを前提に設計されている。つまり従来のイメージセンサでは、これらの設計上の想定から外れる露光パターンやタイミングでの画像取得は事実上不可能であった。

一方で、圧縮センシングによる動画撮影やTime-of-Flight(TOF)型デプスカメラなどの高機能画像センシングが注目され、これらを対象とした特殊なCMOSイメージセンサが提案されている。例えば露光制御を画素毎に自由に設定できるものや、マルチタップやマルチバケットと呼ばれる複数電荷蓄積を可能とするセンサなどが提案され、一部は市販されている。本研究では、これら時間プログラマブルセンサを用いたコンピュータショナルフォトグラフィ応用について研究した。

3. 研究の方法

イメージセンサからのデータ掃き出し速度は、画像の空間解像度とフレームレートの積として表され、この掃き出し速度の制限から一般的なカメラでは、フレームレートが高くなると空間解像度が犠牲になり、空間解像度を優先するとフレームレートが犠牲になる。この動画撮影における空間解像度と時間解像度のトレードオフはイメージセンサの普遍的問題である。これに対し、圧縮ビデオセンシングと呼ばれるランダムな時空間のサンプリングとスパース復元を用いることで、このトレードオフを解消しようとする手法が近年盛んに研究されている。これら手法は高解像度で高フレームレートな動画撮影と生成を実現しているものの、ランダムサンプリングを実現するイメージセンサは商

用的には現状存在しない。そのため、従来の圧縮ビデオセンシング研究ではシミュレーション実験もしくは光学変調素子と通常のイメージセンサを組み合わせ、各ピクセルの露光タイミングを独立に光学変調素子により制御する疑似実装によりその有効性を検証していた。我々は現実的なプロセスにより自由度の高い露光タイミングを設定できる CMOS イメージセンサの提案し、このセンサを用いた疑似ランダム露光を実現する手法を提案した。試作センサ (図 2) では、図 3 の模式図に示す様に画素の露光開始信号を 8 列毎に、露光終了信号を 8 行毎に共有して持つ。これにより 8×8 画素ブロック中の隣接画素毎に異なる露光タイミングやパターンを設定できる。図 3 に示す様に露光制御信号は、行や列で共有しているため、画像の縦横方向で時間的依存性があるが、この露光タイミングの時空間的なランダム性を高める操作方法についても提案した。

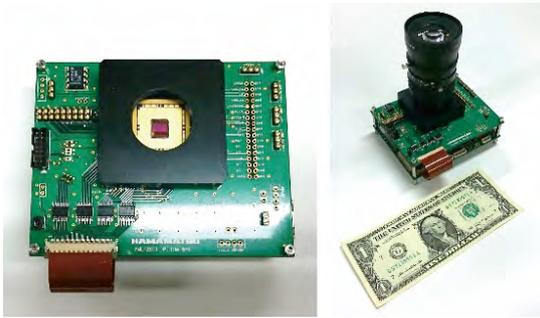


図 2: 疑似ランダム露光 CMOS イメージセンサ試作機

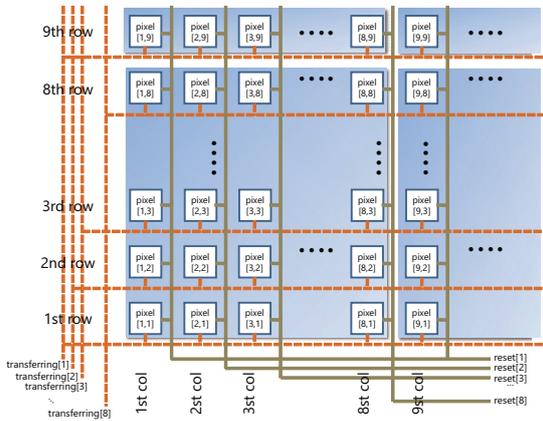


図 3: 試作センサの構造模式図

画像から 3 次元情報を計測する手法は、ステレオ法や TOF など様々な手法が提案されている。中でも 1 つのイメージセンサと複数の光源を用いて 3 次元形状を計測する照度差ステレオ法 [5] は、光源の切り替えによる物体の陰影を用いることで、被写体の詳細な表面形状を法線マップとして求めることができる。しかし、照度差ステレオ法は入力として異なる光源で照らされた複数枚の画像が必要であるため、対象物体の移動や形状変化するような動的シーンには従来、用いるこ

とができなかった。本研究でマルチタップ CMOS イメージセンサを用いることで、動的シーンでも法線ベクトルを推定できる照度差ステレオ法について提案した。

マルチタップ CMOS イメージセンサは図 4 に示したとおり 1 ピクセルあたり 4 つのゲート (G1~G3, GD) と 3 つの電荷蓄積部であるフローティングディフュージョン (FD1~FD3) を備えており、各ゲートの On/Off を切り替えることで電荷を蓄積する FD を切り替えることができる。そのためマルチタップ CMOS イメージセンサは図 5 下段に示したように、イメージセンサの露光を時分割し短い露光を何度も繰り返して撮影することが可能である。各 FD から読み出される画像はその繰り返し露光で FD に蓄積された電荷の和であり、撮影される 3 枚の画像の時間差は露光 1 つに相当し、全体の露光時間に対してこれが十分に小さいと見なせる。図 6 に試作した動的照度差ステレオカメラの外観を示した。試作機では、3 つの光源をイメージセンサのゲート信号と同期させることで、FD 毎に異なる光源方向の画像が撮影できる。単一の露光時間を μs レベルに設定すると 3 つの FD から読み出される 3 枚の画像の時間差は、光源を切り替えるには十分遅く、物体の動きに対してはほぼ無視できることになる。つまり、マルチタップイメージセンサを用いることで、照度差ステレオ法が要求する光源方向の異なる複数枚の画像をほぼ同時に撮影できる。この試作カメラで撮影された動画像に従来の照度差ステレオ法を適用することで動的シーンであっても法線ベクトルの推定を可能にした。

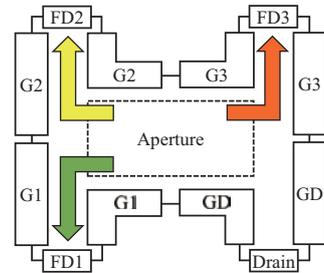


図 4: マルチタップセンサ (3tap) の画素構造

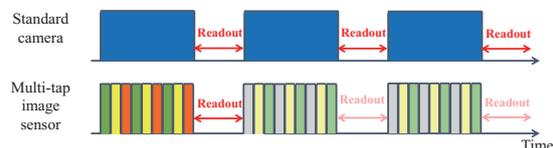


図 5: 通常カメラとマルチタップの露光パターン

4. 研究成果

図 2 の試作センサに提案した疑似ランダム露光手法を用いて動的シーンを撮影することにより、1 フレーム中に 16 回の時間露光パターンを切り替えて得られるランダム露光による符号化画像の取得を可能とした。この符号化画像は、一枚の画像に 16 サブフレームの時間情報が多重化された形で得られることになる。撮影された符号化画像から

OMP(Orthogonal Matching Pursuit)を用いたスパース最適化手法により、事前に学習により求めた基底辞書を用いて高解像度で高フレームレートの動画を再構成できる。図7に実際に撮影した符号化画像とそれより再構成により得られた16サブフレームのうち3フレームを例として示した。提案手法により、低時間解像度で撮像し、撮像後の復元処理により高フレームレートなシーンの動き情報が復元できていることが確認できた。

図8に落下するボールを図6の試作機にyとり撮影した画像を示す。図8(a)-(c)は通常のカメラ撮影した画像で、イメージセンサの露光に対してシーンの変化が高速であるため物体がずれて撮影されている。そのため、異なる対応点により復元されることから図8(d)示すように法線が間違っ推定された。それに対して、本稿で提案するシステムで撮影した画像(図8(e)-(g))ではずれなく撮影することができており、図8(h)に示したとおり被写体の法線ベクトルが正しく推定できていることが確認できた。

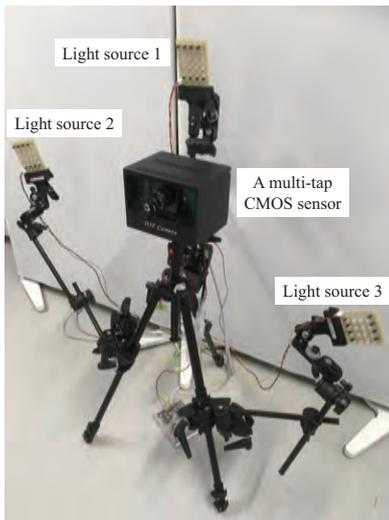


図6: 動的照度差ステレオカメラ試作機

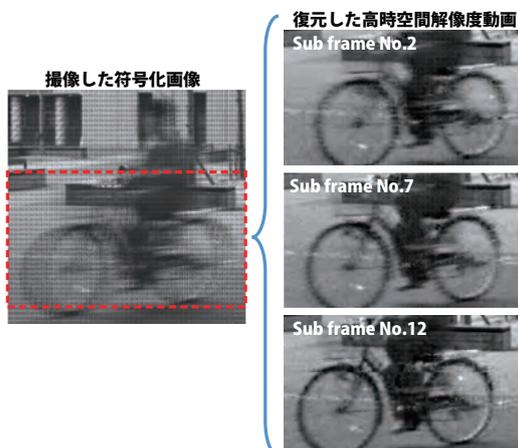


図7: 撮影画像と復元フレーム例

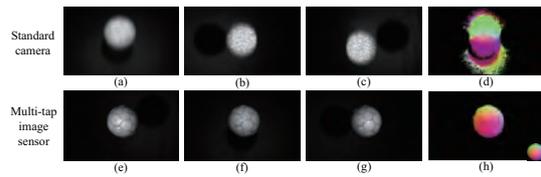


図8: 通常カメラと提案システムによる計測と復元結果の比較

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. Takuya Yoda, Hajime Nagahara, Rin-ichiro Taniguchi, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi and Shoji Kawahito, “The Dynamic Photometric Stereo Method Using a Multi-Tap CMOS Image Sensor”, MDPI Sensors, Vol. 18, No. 3, Mar., 2018.

[学会発表] (計23件)

1. Trung Thanh Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, “Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination”, International Workshop on Robust Computer Vision, Nara, Japan, Jan., 2018.
2. Takuya Yoda, Hajime Nagahara, Rin-ichiro Taniguchi, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, “Dynamic Photometric Stereo Method using Multi-tap CMOS Image Sensor”, The 13th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics, Beijing, China, Oct., 2017.
3. Hajime Nagahara, “Diverse Cameras for AR/MR Applications”, Workshop on Highly Diverse Cameras and Displays for Mixed and Augmented Reality, Nantes, France, Oct., 2017.
4. Trung Thanh Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, “Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination”, British Machine Vision Conference, London, UK, Sep., 2017.
5. Takuya Yoda, Hajime Nagahara, Rin-ichiro Taniguchi, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, “Dynamic Photometric Stereo Method using Multi-tap CMOS Image Sensor”,

- International Conference on Pattern Recognition, Cancun, Mexico, Dec., 2016.
6. Toshiaki Sonoda, Hajime Nagahara, Kenta Endo, Yukinobu Sugiyama, Rin-ichiro Taniguchi, "High-Speed Imaging using CMOS Image Sensor with Quasi Pixel-Wise Exposure", The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, Tokyo, Japan, Nov., 2016.
 7. Toshiaki Sonoda, Hajime Nagahara, Kenta Endo, Yukinobu Sugiyama, and Rin-ichiro Taniguchi, "High-Speed Imaging Using CMOS Image Sensor with Quasi Pixel-Wise Exposure", The 3rd International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems, Tokyo, Japan, Nov., 2016.
 8. Takuya Yoda, Hajime Nagahara, Rin-ichiro Taniguchi, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, "Dynamic Photometric Stereo Method using Multi-tap CMOS Image Sensor", The 3rd International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems, Tokyo, Japan, Nov., 2016.
 9. Hajime Nagahara, "Computational 3D imaging", Display week, San Francisco, CA, USA, May, 2016.
 10. 長原 一, "プログラマブルセンサによるコンピューテーショナルフォトグラフィ", 情報センシング研究会, 東京, Nov., 2017.
 11. Thanh Trung Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination", 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM209, No. 20, 札幌, Nov., 2017.
 12. 吉田 道隆, 長原 一, 鳥居 秋彦, 奥富正敏, 谷口 倫一郎, "Deep Learningによる圧縮ビデオセンシングの再構成", 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM208, No. 19, 東京, Sep., 2017.
 13. 長原 一, "コンピューテーショナルフォトグラフィ-センシングとプロセッシングの融合-", 日本光学会情報ホトニクス研究会秋合宿, 福岡, Sep., 2017.
 14. 依田拓也. 長原一, 谷口倫一郎, 香川景一郎, 安富啓太, 川人祥二, "マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたダイナミック照度差ステレオ法", 日本光学会年次学術講演会, Vol. OPJ2017, No. 2aDS1, 東京, Oct., 2017.
 15. 吉田 道隆, 長原 一, 鳥居 秋彦, 奥富正敏, 谷口 倫一郎, "Deep Learningによる圧縮ビデオセンシングの再構成", 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM208, No. 19, 東京 Sep., 2017.
 16. 依田 拓也, 長原 一, 谷口 倫一郎, 香川 景一郎, 安富 啓太, 川人 祥二, "マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたダイナミック照度差ステレオ法", 画像の認識理解シンポジウム, 広島, Aug., 2017.
 17. 吉田 道隆, 長原 一, 鳥居 秋彦, 奥富正敏, 谷口 倫一郎, "圧縮センシング動画のデコーディング手法の検討", 画像の認識理解シンポジウム, No. PS2-14, 広島, Aug., 2017.
 18. 長原 一, "コンピューテーショナルフォトグラフィ-符号化撮像、ライトフィールド、圧縮センシングなどの新しい画像センシングとその応用-", 画像センシングシンポジウム, 横浜, June, 2017.
 19. 園田 聡葵, 長原 一, 遠藤 健太, 杉山行信, 谷口 倫一郎, "擬似ピクセルコーディング露光 CMOS イメージセンサによるハイスピード撮像", 画像の認識理解シンポジウム, No. DS-09, 浜松, Aug., 2016.
 20. Yichao Xu, Hajime Nagahara, Atsushi Shimada, Rin-ichiro Taniguchi, "TransCut: Transparent Object Segmentation from a Light-Field Image", 画像の認識理解シンポジウム, No. IS1-07, 浜松, Aug., 2016.
 21. 依田 拓也, 長原 一, 谷口 倫一郎, 香川 景一郎, 安富 啓太, 川人 祥二, "マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたダイナミック照度差ステレオ法", 画像の認識理解シンポジウム, No. PS3-19, 浜松, Aug., 2016.
 22. 依田 拓也, 長原 一, 谷口 倫一郎, 香川 景一郎, 安富 啓太, 川人 祥二, "マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたダイナミック照度差ステレオ法", 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM202, No. 13, pp. 1-7, 大阪, May, 2016.

〔図書〕（計 0 件）
なし。

〔産業財産権〕
なし。

〔その他〕
ホームページ等
[http://limu.ait.kyushu-u.ac.jp/project/
project003.html](http://limu.ait.kyushu-u.ac.jp/project/project003.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長原 一 (NAGAHARA Hajime)
大阪大学・データビリティフロンティア機
構・教授
研究者番号： 80362648

(2) 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕
Shree K. Nayar
コロンビア大学・コンピュータサイエンス学
科・教授

〔その他の研究協力者〕
香川 景一郎 (KAGAWA Keiichiro)
静岡大学・電子工学研究所・准教授