

平成 31 年 4 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05314

研究課題名（和文）光線情報の計算的変換による3次元視覚処理技術体系の構築

研究課題名（英文）A Framework of 3-D Visual Information Processing Based on Computational Transformation of Light Ray Data

研究代表者

高橋 桂太 (Takahashi, Keita)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30447437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000 円

研究成果の概要（和文）：3次元視覚情報の撮像，処理，および表示に関わる近年の技術的・学術的背景を俯瞰してみると，光線を単位としたLight Field表現とその計算的変換が共通要素として重要であることがわかる．本研究では，3次元視覚情報に関わる技術を個別に発展させるだけでなく，光線情報の計算的変換を基盤として，多様なデータ形式間での相互変換を可能にし，3次元視覚情報の取得，処理，および表示を統一的に包含する技術体系の構築に取り組んだ．

研究成果の学術的意義や社会的意義

光線を単位とする3次元表現は，単なる二眼式の立体視をはるかに超えるリアリティを追求するものであり，将来的な応用が期待される．このような光線情報を計算的に変換する技術は，3次元情報の撮像，処理，および表示の各段階におけるデータ形式の違いを吸収し，これらを相互に接続するのに不可欠なものである．本研究における，個別の技術の発展にとどまらず，撮像，処理，および表示の全体を包含する取り組みは，学術的また社会的に意義のあるものである．

研究成果の概要（英文）：We considered the recent technical and academic advances in the acquisition, processing, and display of 3-D visual information, and noticed the importance of the light field representation, which uses light-rays as the fundamental elements, and computational transformation of the light-ray information. The achievement of this research includes not only individual developments of the related technologies, but also a technical framework of computational transformation for light-ray information, which involves acquisition, processing and display of 3-D visual information, where mutual transformations between different data formats are made possible.

研究分野：コンピュータショナルフォトグラフィ

キーワード：ライトフィールド 3次元ディスプレイ コンピュータショナルカメラ 映像処理

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人による映像知覚は、視細胞による光線のセンシングに基づく。したがって、空間を飛び交う光線を十分な密度で記述すれば、3次元視覚情報を完全に表現することが可能である。このような光線を単位とした視覚情報表現は、光線空間法やLight Fieldと呼ばれる。この表現法は概念としては20年余り前から知られているが、近年になって科学技術としての具現化が急速に進んでいる。本研究のテーマである「光線情報の計算的変換」に関連付けつつ、研究開始当初の状況を以下に述べる。

(a) 自由視点映像生成：多数の視点から被写体を撮影した多眼画像を入力として、新たな視点（仮想視点）から見た映像を合成する技術である。従来技術の多くは、画像間での対応点探索に依存していた。しかし、高い視点密度で多眼画像が取得できる条件においては、Light Fieldの信号的性質が強まるため、この技術は光線情報の計算的変換処理としても解釈される。

(b) Light Field カメラ：3次元映像を取得する最も直接的な方法である多視点撮影に加えて、近年では、単一のカメラでLight Field データを取得する方式が注目されている。マイクロレンズアレイをカメラの内部に挿入することで、昆虫の複眼で見たような映像を撮影する方式は、Lytro等の製品として実用化されている。カメラの開口（絞り）に符号化されたパターンを用いる符号化開口法も、Light Fieldの取得に有効である。単一カメラによる撮影方式では、カメラの撮像面に記録される信号は、もはや一般的な意味での「画像」ではなく、計算処理による変換を経て3次元映像となる。

(c) Light Field ディスプレイ：Light Field ディスプレイとは、単に立体的に見えるだけでなく、観察方向に応じて見え方が変化するような3次元ディスプレイを指す。特殊な眼鏡を用いずに見え方の変化を実現するためには、平面的なディスプレイとは異なる光学的機構が必要である。そのための機構として、従来方式であるパララクスバリア方式やレンチキュラ方式（インテグラル方式）に加えて、画素単位で透過率を制御できるデバイスを重ねるレイヤ積層方式がある。これらのディスプレイに実写3次元映像を出力するためには、ディスプレイに応じた形式へのLight Field データの計算的変換処理が必要になる。

2. 研究の目的

3次元視覚情報の取得（Light Field カメラなど）、処理（自由視点映像生成など）、および表示（Light Field Display）に関わる技術の学術的背景を俯瞰してみると、光線を単位としたLight Field 表現、およびその計算的変換が共通要素として重要であることがわかる。本研究では、これらの技術を個別に発展させるだけでなく、光線情報の計算的変換を基盤として、多様なデータ形式間での相互変換を可能とし、3次元視覚情報の取得、処理、表示を統一的に包含する技術体系を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的に沿って、具体的に以下の3つの課題に取り組んだ。

(a) 光線情報の計算的変換による3次元撮影方式：限られた画素数・撮影時間で、効率的に高品質なLight Field を取得するため、符号化開口カメラを用いた撮影に取り組んだ。近年の圧縮センシング技術を基盤に、効率的に圧縮された形式でLight Field データを取得し、計算的変換によって非圧縮のLight Field データを得る手法の開発・実装に取り組んだ。撮影装置（コンピュータショナルカメラ）のプロトタイプを用いて、実機による検証も行った。その他の撮像方式についても並行して検討した。

(b) 光線情報の計算的変換による3次元表示方式：限られた画素数で、奥行きのある被写体を高品質に再現できる効率的な3次元表示方式を追究した。具体的には、半透明のレイヤを積層する方式のLight Field ディスプレイを主にターゲットとし、Light Field データを表示に適した形式へと計算的に変換する際の条件について詳細に検討した。表示装置（コンピュータショナルディスプレイ）のプロトタイプの実装も行った。

(c) 光線情報の計算的変換による3次元視覚情報処理の統一的体系：(a)(b)を俯瞰する立場から、Light Fieldの信号的性質、分析手法、効率的表現法、および計算的変換について考察しまとめを行った。また、自由視点映像生成技術を活用しつつ、3次元撮影装置で取得された様々な形式のLight Field データを計算的に変換して3次元表示装置に出力するような統合システムを実装し、有効性を検討した。

4. 研究成果

(1) 3次元撮像技術

本研究では、3次元撮像の手段として、多数のカメラを並べる多眼カメラ方式、レンズアレイ型のカメラを用いるLight Field カメラによる方法、開口面の透過率をプログラマブルに符号化するCoded Aperture Cameraによる方法、および、通常のカメラにより焦点面を変えながら撮影するフォーカスタック方式を検討した[雑誌論文8, 9]。ここでは、特に注力して取り

組んだ符号化開口 (Coded Aperture) カメラによる方式を中心に報告する。

符号化開口カメラでは、液晶のような透過率を制御できるデバイスをカメラの開口面 (絞り) の位置に挿入することで、カメラに入射する光を符号化した上で撮像する。この符号化の効果により、Light Field を少数の画像に圧縮して撮影し、この少数の撮影画像から数十の視点からなる Light Field を復元する。こうすることで、撮影の効率化・省時間化を達成することが、この撮影方式の目的である。この目的を達成するためには、符号パターンと復元アルゴリズムの両者を適切に設計する必要がある。

我々は、まず、圧縮センシングのフレームワークのもとで、復元アルゴリズムの最適化に取り組んだ。ここでは、Light Field はランダムに符号化されて撮影されるものと仮定した。復元においては、従来研究では、スパース辞書に基づく信号再構成が有効であるとされていた。我々は、Light Field に対しては、辞書よりも 4 次元の離散コサイン変換 (4-D DCT) の係数のスパース性がよく当てはまると考え、重み付け 4-D DCT 基底に基づく新たなアルゴリズムを開発した [雑誌論文 7, 10]。実験の結果、我々のアルゴリズムは、辞書ベースの従来手法を上回る性能を達成できることを確かめた。

また、研究協力者の長原一教授 (九州大, 大阪大) より、符号化開口カメラの実機の提供を受け、実機を用いた撮影実験にも取り組んだ。この段階では、計算機シミュレーションによる理想化されたシナリオではなく、実機に即したアルゴリズムを開発する必要が生じた。当初は、Light Field がランダムに符号化にされることを想定していたが、符号化開口カメラが符号化できるのは開口面だけであるため自由度が低い。また、実験の結果、開口面のみをランダムに符号化した場合、Light Field の復元品質が不十分であることがわかってきた。

実機に即したアルゴリズムについて考察を重ねた結果、Light Field を主成分分析 (PCA) して得られる基底を元に、符号化パターンを設計する手法を編み出した [雑誌論文 1]。この手法では、撮影時の符号化パターンと撮影画像からの Light Field の復元手法が同時に導かれる。この手法により、3 枚程度の撮影画像から、25 視点の Light Field を高品質に復元することが可能であり、従来の辞書ベースの手法を上回る性能を達成できた。また、PCA だけではなく、非負値行列因子分解 (NMF) や DCT を基底表現として用いることも可能である。NMF を用いた場合は、撮影時の雑音に対してより頑健な復元を行うことができた。また、計算速度の観点でも、提案手法は、辞書ベースの信号再構成に比べてはるかに高速であった。

その後の展開として、符号化パターンと復元アルゴリズムの最適設計に深層学習を活用する方法にも挑戦し、動的な Light Field への適用も視野に入れつつ現在も検討を継続している。

(2) 3 次元表示技術

Light Field に基づく 3 次元表示技術として、本研究では、インテグラル立体方式とレイヤ積層型方式に取り組んだ。インテグラル方式では、一枚のディスプレイパネルの上に、複数の視点の映像情報をインタリーブして多重化表示する。したがって、視点の数と一視点あたりの空間解像度がトレードオフの関係になり、高密度・高解像度の Light Field の表示の点では限界が見えている。一方、レイヤ積層型方式は、効率よく情報を圧縮して表現することが可能であるため、高密度・高解像度の Light Field の表示に適している。そのため、本研究では、レイヤ積層型に特に注力して取り組んだ。

このディスプレイは、液晶のような透過率を制御できるデバイスを、バックライトの前に積層した構造である。積層されたレイヤの間には隙間があるため、ディスプレイを見込む角度によって、画素同士の重なり合い方が異なる。したがって、視点 (視線方向) に応じた映像を提示することが可能である。所望の 3 次元コンテンツを表示する際には、まず、それぞれの視点から見えるべき画像 (Light Field) を入力として与える。そして、ディスプレイが様々な方向に再生する映像が、入力として与えた映像となるべく同等になるように、それぞれのレイヤの透過率を逐次的に最適化していく。この最適化は、非負値テンソル因子分解 (NTF) として定式化される。しかし、4 次元の Light Field に対して NTF を安直な実装するのは非効率であったため、本研究では、最適化を画像処理の組み合わせに分解し、C++および CUDA で実装した。

また、レイヤ積層型ディスプレイに供給する Light Field データの条件について、詳細な検討を行った [雑誌論文 6]。具体的には、入力として与える Light Field において、隣り合う視点間での視差が大きくなる (ディスプレイからの飛び出し量が大きくなる) と、表示画像に生じるボケやエイリアシングが回避できないことを、サンプリング理論と実験の両面から明らかにした。さらに、飛び出し量が同等であっても、ディスプレイに対して与える光線の方向密度が不足すると、表示画像にエイリアシングが発生することを明らかにした。

さらに、ディスプレイのプロトタイプ機の実装を行った [雑誌論文 5]。このプロトタイプ機は、透明な液晶を 3 層積層した構造であり、これらの液晶は、一台の PC から制御が可能である。バックライトは、市販のものでは輝度が不足したため、LED を用いて自作した。このプロトタイプを学会等 (MIRU2016, IDW2018) で展示し、多くの来訪者の興味を引くことができた。

積層型レイヤディスプレイの欠点の一つは、前述したように飛び出し量が大きな部分で映像にボケが生じることである。この部分での画質を改善するため、表示する映像の解像度よりも高精細なデバイスをレイヤとして用いることを検討した [雑誌論文 3]。しかし、単にレイヤの解像度を大きく (高精細に) すると、情報量も比例して増大してしまう。そこで、レイヤの画素の階調表現を同時に削減し、情報量を抑制する方法を取ることにした。

(3) 統一的体系化に基づく撮像・表示統合システム

本研究では、Light Field データの信号的性質、分析手法、効率的表现、および計算的変換について考察した。関連する成果としては、EPI 分析に基づく高精度な視差（奥行き）推定手法などがある[雑誌論文 4]。また、多様なデータ形式の間で Light Field の計算的変換が可能であることを示すため、撮像から表示までを統合するシステムを実装し、有効性を確かめた。

本研究では、まず、多眼カメラおよびライトフィールドカメラを撮像デバイスとして用い、Light Field データの計算的変換を経て、レイヤ積層型ディスプレイに被写体を 3 次元表示する一連の流れを実現した[雑誌論文 5]。いずれの入力においても、我々の開発したプロトタイプ機において、良好な 3 次元映像の表示が可能であることを確認した。

まず、多眼カメラの一つである ProFUSION25 を用いた場合について述べる。このカメラでは、 5×5 の視点が 12 mm の間隔で並行に配列されている。このデバイスで撮影された映像をそのまま用いると、視点間の視差が大きすぎて、良好な映像表示ができないことが明らかになった。そこで、自由視点映像生成の技術を用いて、より密な視点間隔の Light Field を計算的に生成することにした。この高密度化されたデータに対して NTF による計算的変換を適用し、レイヤ積層型ディスプレイで用いるレイヤの透過率パターンを計算した。

次に、ライトフィールドカメラの一つである Lytro Illum を用いた場合について述べる。このカメラで取得される Light Field では、視点の間隔は十分に高密度であるため、取得データに対してそのまま NTF による計算的変換を適用した。しかしながら、視点間隔が密でありすぎるため、被写体の配置を工夫（カメラに十分に近づけて配置するなど）し、視点間での視差を十分に大きくする必要があったことがわかった。このような工夫により、ディスプレイでの表示において良好な飛び出し量を得ることができた。我々は、別のタイプのライトフィールドカメラである Raytrix にも同様のアプローチを試み、良好な結果を得た。

ここまでで述べたような Light Field の直接撮像は、特殊なデバイスを必要とするため、必ずしも一般性が高いアプローチとは言えない。また、多眼カメラのシステムでは、高密度化の過程で撮影された Light Field の視点数をいったん増やすが、レイヤの透過率パターンへと変換する段階では、3 枚の透過率パターンへと情報が再度圧縮される。いずれ圧縮されるにも関わらず、いったん Light Field を撮影するのは非効率に思われる。

そこで、我々は、通常のカメラでフォーカスを変えながら撮影されたフォーカスタックを入力として用い、レイヤ積層型ディスプレイで 3 次元表示を行う新たな手法を考案した[雑誌論文 2]。この手法の入力となるフォーカスタックは、3 枚の画像で構成され、これらの画像はそれぞれ 3 層のレイヤに対応する奥行きに合焦されている。この手法では、3 枚（撮影）から 3 枚（表示）への計算的変換が行われるため、情報量の観点から合理的である。また、 5×5 視点からなる Light Field の表示において、この手法の表示性能は、Light Field を直接入力した場合と比較して遜色がないことを、定量的および視覚的に確かめた。この結果は、たった 3 枚の画像からなるフォーカスタックが、Light Field とほぼ等価な情報を内包していることを示唆しており、その背後にある理論的な枠組み（Dimensionality Gap に関する理論など）との関連も興味深い。

これらに加えて、単一のカメラで撮影された画像とデプスマップ（デプスの取得にはプロジェクトを併用したアクティブ照明法を用いた）を用いて、3 次元表示を行うことにも成功した。さらに、(a) で述べた符号化開口カメラを撮像デバイスとして用いた 3 次元表示にも挑戦した。現在、符号化開口カメラの撮影画像から直接的にレイヤ透過率パターンへと変換する新たな手法に継続して取り組んでいる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

[1] Yusuke Yagi, [Keita Takahashi](#), Toshiaki Fujii, Toshiki Sonoda, Hajime Nagahara: "Designing Coded Aperture Camera Based on PCA and NMF for Light Field Acquisition", IEICE Transactions on Information and Systems [査読あり], Vol. E101-D, No. 9, pp. 2190–2200, DOI: 10.1587/transinf.2017PCP0007 (2018)

[2] [Keita Takahashi](#), Yuto Kobayashi, Toshiaki Fujii: "From Focal Stack to Tensor Light-Field Display", IEEE Transactions on Image Processing [査読あり], Vol. 27, No. 9, pp. 4571–4584, DOI: 10.1109/TIP.2018.2839263 (2018)

[3] Yuto Kobayashi, [Keita Takahashi](#), Toshiaki Fujii, "Using high-resolution binary layers and a low-resolution multibit backlight for a layered light-field display," Optical Engineering [査読あり], Vol. 57, No. 6, 061607, DOI: 10.1117/1.OE.57.6.061607 (2018)

[4] Takahiro Suzuki, [Keita Takahashi](#), Toshiaki Fujii: "Sheared EPI Analysis for Disparity Estimation from Light Fields," IEICE Transactions on Information and Systems [査読あり], Vol. E100-D, No. 9, pp. 1984–1993, DOI: 10.1587/transinf.2016PCP0004 (2017)

[5] Yuto Kobayashi, Shu Kondo, [Keita Takahashi](#), Toshiaki Fujii: "A 3-D Display Pipeline: Capture, Factorize, and Display the Light Field of a Real 3-D Scene", ITE Transactions

on Media Technology and Applications [査読あり], Vol. 5, No. 3, pp. 88–95, DOI: 10.3169/mta.5.88 (2017)

[6] Toyohiro Saito, Yuto Kobayashi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Displaying Real-World Light-Fields with Stacked Multiplicative Layers: Requirement and Data Conversion for Input Multi-view Images," IEEE/OSA Journal of Display Technology [査読あり], Volume 12, Issue 11, pp. 1290–1300, DOI: 10.1109/JDT.2016.2594804 (2016)

[7] Yusuke Miyagi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Weighted 4D-DCT Basis for Compressively Sampled Light Fields," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences [査読あり], Vol. E99-A, no. 9, pp. 1655–1664, DOI: 10.1587/transfun.E99.A.1655 (2016)

[8] 山田 隼輔, 高橋 桂太, 藤井 俊彰: "可動型多眼カメラによる自由視点映像生成", 電子情報通信学会和文論文誌 D [査読あり], Vol. J99-D, No. 9, pp. 888–891, DOI: 10.14923/transinfj.2016IEL0003 (2016)

[9] 内田 雄基, 大橋 一輝, 高橋 桂太, 藤井 俊彰: "画素配列を考慮した Light Field Camera 画像の高解像度化", 電子情報通信学会和文論文誌 D [査読あり], Vol. J99-D, No. 9, pp. 823–835, DOI: 10.14923/transinfj.2016IEP0001 (2016)

[10] 宮城 雄介, 高橋 桂太, 要 強, パナヒプル テヘラニ メヒルダド, 藤井 俊彰: "符号化開口により圧縮センシングした光線空間データの重み付き L1 ノルム最小化による復元手法の検討", 電子情報通信学会和文論文誌 D [査読あり], Vol. J98-D, No. 9, pp. 1218–1221, DOI: 10.14923/transinfj.2015IEL0010 (2015)

[学会発表] (計 80 件)

※ 主要な発表のみを以下に列挙

[1] Keita Maruyama, Hiromichi Kojima, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Implementation of Table-Top Light Field Display with Stacked Layers", International Display Workshop (2018)

[2] Tomohiro Hidaka, Keita Maruyama, Takuma Fujiwara, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "A Flexible Pipeline from a Single-View Camera to a Stacked-Layer Light-Field Display", International Display Workshop (2018)

[3] Wenzhe Ouyang, Shu Fujita, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "A Pipeline from Raytrix to Tensor Display", 2018 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2018) (2018)

[4] Gou Houben, Shu Fujita, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Fast and Robust Disparity Estimation for Noisy Light Fields", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2018) (2018)

[5] Kohei Isechi, Yuto Kobayashi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Light Field Compression for Compressive 3D Display", The 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (2018)

[6] Sho Mikawa, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Simulating a Stacked-Layer Light-Field Display Using Orthographic/perspective View Models", International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2018) (2018).

[7] Yuto Kobayashi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Using Higher Resolution and Lower Bit-Depth Panels for Stacked-Layer Light-Field Display", the 24th International Display Workshops (2017)

[8] Tomoki Oooka, Keita Takahashi, Kazuhiro Hara, Miwa Katayama, Masahiro Kawakita, Toshiaki Fujii: "A Flexible Pipeline from a Multi-View Camera to an Integral 3D Display", the 24th International Display Workshops (2017)

[9] Keita Takahashi, Shu Fujita, Toshiaki Fujii: "Good Group Sparsity Prior for Light Field Interpolation", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (2017)

[10] Yusuke Yagi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii, Toshiki Sonoda, Hajime Nagahara: "PCA-Coded Aperture for Light Field Photography", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (2017)

[11] Shu Fujita, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Improved Shearlet Regularization for High-Quality Light Field Interpolation", 2017 International Workshop on Smart Info-media System in Asia (SISA 2017), IPSJ-AVM Special Session (2017)

[12] Yuto Kobayashi, Keita Takahashi, Toshiaki, Fujii: "From Focal Stacks to Tensor Display: A Method for Light Field Visualization Without Multi-View Images," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), (2017)

[13] Takahiro Suzuki, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: "Disparity Estimation from Light Fields Using Sheared EPI Analysis", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), (2016).

[14] Keita Takahashi, Yuto Kobayashi, Toshiaki Fujii: "Displaying Real World Light Fields using Stacked LCDs," The 23rd International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2016 (2016).

[15] Yuki Uchida, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii: Super-resolution Image Synthesis from a Light Field Camera Using the Hexagonal Pixel Arrangement and Sparsity of Edges", International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (2016)

[16] Yusuke Miyagi, Keita Takahashi, Mehrdad Panahpour Tehrani, Toshiaki Fujii, "Reconstruction of Compressively Sampled Light Fields Using a Weighted 4D-DCT Basis", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (2015).

[17] Keita Takahashi, Toyohiro Saito, Mehrdad Panahpour Tehrani, Toshiaki Fujii, "Rank Analysis of a Light Field for Dual-Layer 3D Displays", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (2015).

[18] Kazuki Ohashi, Keita Takahashi, Mehrdad Panahpour Tehrani, Toshiaki Fujii, "Super-Resolution Image Synthesis Using the Physical Pixel Arrangement of a Light Field Camera", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (2015).

[その他]

[1] Light Field Display Project:

<http://www.fujii.nuee.nagoya-u.ac.jp/~takahasi/Research/LFDisplay/index.html>

[2] Computational Camera Project:

<http://www.fujii.nuee.nagoya-u.ac.jp/~takahasi/Research/CompCam/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：藤井 俊彰

ローマ字氏名：Toshiaki Fujii

研究協力者氏名：長原 一

ローマ字氏名：Hajime Nagahara

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。