

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19810

研究課題名（和文）ダイナミック光線空間の圧縮撮像

研究課題名（英文）Compressive Acquisition of Dynamic Light Fields

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、撮影対象に動きがあるダイナミックな光線空間を撮像する技術に取り組んだ。これは、数十視点の動画像を同時に取得することを意味するため、データ帯域（単位時間あたりのデータ量）の観点で挑戦的な課題である。本研究では、圧縮センシングの枠組みのもと、情報を圧縮された形で撮像し、計算処理によって元の光線空間を復元するアプローチを取った。圧縮撮像には符号化開口法を採用し、開口パターンと復元アルゴリズムを深層学習の枠組みで同時に最適化した。また、撮影対象の動きに対応する撮像法および学習手法を明らかにした。さらに、本研究の有効性を示すため、実際のハードウェアを用いた実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ダイナミックな光線空間の効率的な撮影技術を提案するものである。この技術は、3次元情報の可視化、デプス推定、物体の光学特性の計測など、光線空間の様々な応用において、今後の活用が期待できる。また、従来の研究においても、光線空間の圧縮撮影が議論されているが、被写体が動かないことを想定したものがほとんどであり、被写体の動きへの対応を可能にした本研究の貢献は重要である。さらに、本研究における深層学習を活用した開口パターンの導出手法は、物理的光学系を学習ベースで最適化する枠組みであるディープオブティクスの先端を切り開く研究例と位置付けられ、関連分野に波及効果を与え得るものである。

研究成果の概要（英文）：We investigated the technology of acquiring dynamic light fields of moving objects. This is a challenging problem in terms of the data rate (the amount of data per second), because we need to obtain videos from dozens of different viewpoints simultaneously. To tackle this problem, we adopted an approach of compressive sampling, where the original data was first observed (imaged) in a compressed manner, and then reconstructed via a computational process. We used a coded aperture method for compressing imaging, and jointly optimized the aperture patterns and reconstruction algorithm under the framework of deep learning. We also clarified the imaging and learning method that can handle scene motions successfully. Moreover, we validated our method through experiments using real imaging hardware.

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：光線空間 圧縮センシング 符号化開口法 深層学習

1. 研究開始当初の背景

光線空間法は、実空間を飛び交う任意の光線を記述することで、3次元視覚情報の完全な記述を可能にする枠組みである。光線空間法には、3次元映像の可視化、被写体のデプス推定、物体認識など、様々な応用がある。光線空間データは、同一の被写体をわずかに異なる視点から撮影した、密な多視点画像によって表される。本研究では、特に、撮影対象の実世界に動きがある光線空間、すわなち、ダイナミックな光線空間の取得を対象とする。

動的な光線空間を得ることは、数十視点の多視点映像を同時に撮影することと等価であり、データ帯域の観点から挑戦的課題である。光線空間を取得する最も直接的な方法は、多数のカメラを用いることである。しかし、この方法は大規模な装置を必要とするため、適用先が限定される。別の方法として、マイクロレンズアレイを備えたライトフィールドカメラの活用が考えられる。この方法では、一台のカメラで一度に光線空間を取得できるものの、単一の撮像面上に多視点画像をインターリーブして撮影するため、各視点の解像度(画素数)が犠牲になる。最後に、これらの限界を打破する方法として、圧縮センシングの枠組みの活用した撮影手法が考えられる。この枠組みにおいては、光線情報に対して撮像系で符号化を施すことで圧縮された形で観測データを得る。それらの観測データから計算によって元の光線情報を復元する。

従来研究においても、光線空間に対する圧縮センシングの活用が図られてきた。しかし、圧縮効率(圧縮率と復元性能のトレードオフ)において必ずしも十分な結果が得られていなかった。また、多くの研究は、被写体が静止していることを前提としており、ダイナミックな光線空間を対象とした研究は希少であった。

2. 研究の目的

本研究では、ダイナミックな光線空間を対象とする効率的な圧縮撮像の実現を目的とした。光線空間データは膨大であるが、冗長な構造を内在する。例えば、撮影済みの光線空間データに標準的な映像符号器を適用すれば、データ容量は容易に1%以下に圧縮できる。したがって、光線空間データにおいて圧縮センシングの活用は極めて妥当な選択肢である。本研究では、被写体に動きがあるケースを想定しつつ、撮像の時点でデータ帯域を数%程度に圧縮しつつ撮影し、その圧縮撮影されたデータから高品質な光線空間を得られるような技術の実現を目指した。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、本研究では、コンピュータショナルカメラと深層学習を融合したアプローチを取った。まず、光線空間を符号化しつつ撮影するための撮像として、カメラの開口面に任意の透過度パターンを施すことができる、符号化開口カメラを用いた。圧縮撮影されたデータから元の光線空間を復元する計算処理においては、従来の数理論最適化に基づく反復解法に加えて、深層学習に基づく学習ベースのアルゴリズムを採用した。学習ベース手法では、大量の訓練データを活用し、復元アルゴリズムのみならず、撮像系の符号化パターンも同時に最適化した。さらに、時系列方向の符号パターンや学習データを適切に設計することで、被写体の動きへの対応を試みた。

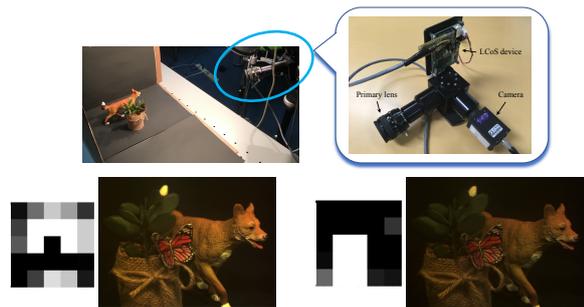


図1: 符号化開口カメラと撮影画像

4. 研究成果

(1) 光線空間の高効率な圧縮撮像方式の開発

まず、対象シーンに動きがない静的な光線空間を対象として、圧縮撮影方式を開発した。

光線を適切に符号化しつつ撮影するため、符号化開口を備えたカメラを用いた。このカメラの光路上には液晶素子が備えられており、この素子の透過率を電氣的に制御することで、開口(絞り)の透過率パターンを変更しつつ撮影することができる。この機構を通して撮影された画像をもとに、計算機によって元の光線空間を復元する。カメラの外観と撮影例を図1に示す。この例

では、開口面は 5×5 のマトリクスで表現されており、セル（視点）ごとに透過度を設定して画像を撮影できる。

本研究では、深層学習の枠組みに基づき、撮影プロセスと復元アルゴリズムを同時に最適化するアプローチを取った。図2に示すように、多数の画像からなる光線空間をいったん圧縮撮像して復元する処理を、自己符号化器（オートエンコーダ）と考え、撮像を符号化器（エンコーダ）に、復元を復号器（デコーダ）に対応させた。符号化器は一層の畳み込みレイヤとして実装し、開口面の透過率パターンをそのレイヤの重みパラメータに対応させた。復号器は深層畳み込みネットワークとして実装した。この自己符号化器を、大量の光線空間データで学習することで、透過率パターンと復元アルゴリズムを同時かつ協調的に最適化した。実機実験を行う際には、符号化はカメラのハードウェア上での物理的な撮像として実行されるため、撮影された画像を取り込み、復号器側の処理のみを計算機上で実行した。

実験では、提案方式を用いることで、わずか2~4回程度の撮影画像から、 5×5 視点または 8×8 視点からなる光線空間を高精度に復元できることが明らかになった。2回の撮影、 8×8 視点の場合、圧縮率は概ね3%である。提案手法の復元品質は、従来の圧縮センシング理論に基づく圧縮撮像方式（スパース辞書や基底表現を用いた数理最適化による解法）を大きく上回った。さらに、提案手法の有効性は、実際のカメラのハードウェアを用いた実験によっても示された。

この方式を開発した当時、光線空間の圧縮撮影に深層学習を用いた研究例はほとんどなかった。また、提案方式における、撮像系のパラメータ（開口面の透過率）を復元アルゴリズムと同時かつ協調的に最適化する枠組みは斬新なものであり、光学系を深層学習によって最適化する枠組みである「ディープオプティクス」の先端を切り開く研究例となった。

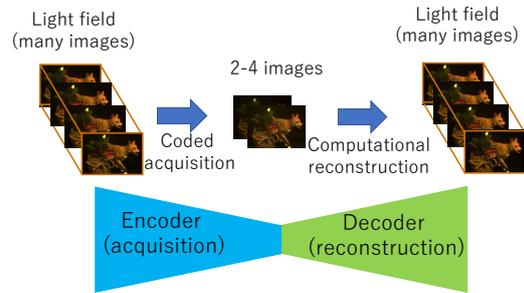


図2: 自己符号化器としてのモデル化

(2) ダイナミックな光線空間への拡張

上記の枠組みを、対象シーンに動きがあるダイナミックな光線空間へと拡張した。静的な対象を撮影する場合、開口面の透過率パターンを変更しつつ数枚の画像を撮影し、それらから計算機による復元を行うことで、高品質な光線空間を得ることができた。しかし、対象が動的、すなわち、時間軸に沿ってシーンが変化する場合、問題が複雑となる。なぜなら、各時刻において撮影できる画像は1枚だけであり、かつ、時刻をまたぐ撮影画像の間には、符号化パターンの違い（視差）に起因する変化と、被写体の動きに起因する変化の両方が生じるからである。

本研究ではこれらの課題を2つの技術の組み合わせで克服した。まず、アルゴリズム（撮影処理と復元処理の両方を含む）の最適化に用いる訓練サンプルとして、動きを含む光線空間データセットを用意した。このデータセットは、既存の静的な光線空間データに仮想的な動きを与えることで生成した。ごく短時間の動きであることを考慮し、動きのパターンは、さまざまな方向への等速直線運動に限定した。次に、開口面の透過率を、時系列に沿って2パターン（パターンAとパターンB）を交互に繰り返すように設計し、連続する3時刻の撮影画像（A-B-A）を復元アルゴリズムへの入力とした。

その概要を図3に示す。この設計の狙いは、被写体の動きに起因する変化と、符号化パターン（視差）に起因する変化を、復元アルゴリズムが容易に区別できるようにすることである。

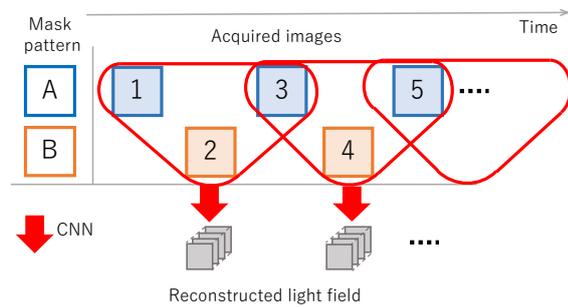


図3: A-B-A型のアルゴリズム

シミュレーションおよびカメラの実機を用いた実験を通して、上記の技術の有効性を確認した。シミュレーションでは、提案手法の構成要素を取り除いたシナリオを合わせて実装し、動きを含む光線空間データセットを訓練サンプルとして用いることの効果と、2パターン-3時刻から復元することの効果とを定量的に示した。提案手法では、カメラの半分のフレームレートで動的な光線空間を得られる。撮影画像と復元画像の枚数比を考えると、 5×5 視点の場合には8%、 5×5 視点

の場合は約 3 %の圧縮率が達成されたことになる。実機を用いた実験では、図4に示すように、被写体を電動ターンテーブルに載せて動かすことで動きのあるシーンを撮影し、撮影画像から 5×5 視点の動的視線空間を復元した。訓練サンプルに含まれる動きは人工的に生成された単純な等速直線運動に限定されていたものの、提案手法によって被写体の多様な動きを自然に復元することができた。詳細は、研究代表者のウェブサイト動画にて確認されたい。

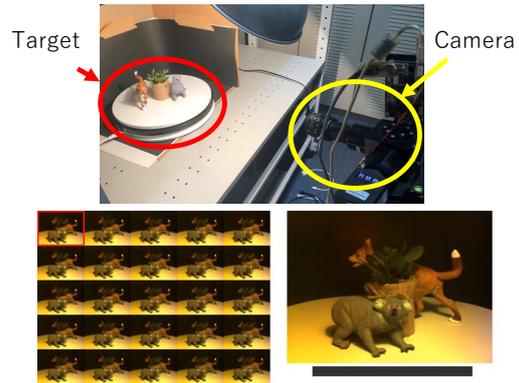


図4: 動的視線空間取得の実機実験

(3) 視線空間の圧縮撮像のさらなる発展

上記の(2)で述べた方式では、動的視線空間の復元レートが、カメラのフレームレートの半分にとどまる。この課題を克服するため、A-B-A型(偶数フレーム)に加えてB-A-B型(奇数フレーム)の復元アルゴリズムを実装した。この方式では、偶数フレームと奇数フレームの視線空間に一貫がないため、視覚的に歪みが目立つ結果となった。別のアプローチとして、A-B-A型のみを用い、カメラのフレームレートを2倍とするシナリオも試した。このシナリオでは、露光時間の短縮に伴い雑音の

影響が大きくなるため、全体的な品質が下がる傾向がある。その一方で、動きの速い場面においては、時間軸のサンプリング周期が増すため、隣接する時刻間での見かけの動きが小さくなり、これが視線空間の復元品質にポジティブに作用することがわかった。

我々のカメラ実機の開口部は反射型液晶素子を用いて実装されており、任意の濃度のパターンを設定できる。しかし、反射型液晶素子には、高価であること、光の減衰率が高いことなどの問題もある。これらの解決策として、物理的に穴を開けたパターンを開口面で回転させる方式を考えた。この方式では、透過率はON/OFFの2値に限定され、かつ同一パターンの回転による符号のみが可能であるため、開口のパターンが制約される。我々は、シミュレーション実験により、この制約のあるケースにおいても、任意のパターンと遜色のない品質で動的視線空間が撮像できることを明らかにした。

これらに加えて、イメージセンサ上でのカラー処理(Bayerパターンのデモザイキング)が必要な場合において、カラー処理を復元アルゴリズムの深層ネットワークと融合する手法を開発し、復元される視線空間の品質向上を実現した。さらに、静的な視線空間において、視線空間のデータごとの復元品質の違いを、撮影画像を用いて予測・分析する手法を考案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Inagaki Yasutaka, Kobayashi Yuto, Takahashi Keita, Fujii Toshiaki, Nagahara Hajime	4. 巻 11211
2. 論文標題 Learning to Capture Light Fields Through a Coded Aperture Camera	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Springer Lecture Notes in Computer Science (Proc. European Conference on Computer Vision)	6. 最初と最後の頁 431 ~ 448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-01234-2_26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Kohei, Inagaki Yasutaka, Takahashi Keita, Fujii Toshiaki, Nagahara Hajime	4. 巻 9
2. 論文標題 CFA Handling and Quality Analysis for Compressive Light Field Camera	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 25 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.9.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Kohei, Takahashi Keita, Fujii Toshiaki, Nagahara Hajime	4. 巻 12364
2. 論文標題 Acquiring Dynamic Light Fields Through Coded Aperture Camera	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Springer Lecture Notes in Computer Science (Proc. European Conference on Computer Vision)	6. 最初と最後の頁 368 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58529-7_22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kohei Sakai, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii	4. 巻 E104-D
2. 論文標題 Binary and Rotational Coded-Aperture Imaging for Dynamic Light Fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高橋桂太	4. 巻 49
2. 論文標題 光線空間の撮像・表示技術における深層学習の活用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 179 ~ 185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maruyama Keita, Inagaki Yasutaka, Takahashi Keita, Fujii Toshiaki, Nagahara Hajime	4. 巻 -
2. 論文標題 A 3-D Display Pipeline from Coded-Aperture Camera to Tensor Light-Field Display Through CNN	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IEEE International Conference on Image Processing	6. 最初と最後の頁 1064 ~ 1068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICIP.2019.8803741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 坂井 康平, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 符号化開口カメラを用いた光線空間撮影の高フレームレート化
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立石 航平, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 符号化開口と焦点変更による光線空間の取得
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井 康平, 高橋 桂太, 藤井 俊彰
2. 発表標題 回轉型符号化開口法による動的視線空間の撮影
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立石 航平, 坂井 康平, 高橋 桂太, 藤井 俊彰
2. 発表標題 符号化露光法を用いた視線空間の取得
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井 康平
2. 発表標題 符号化開口カメラによる動的な視線空間の取得に向けて
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 桂太
2. 発表標題 視線空間の撮像・表示技術における深層学習の活用
3. 学会等名 日本光学会 第5回 AI Optics研究グループ オンライン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasutaka Inagaki, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii
2. 発表標題 Light Field Acquisition from Focal Stack via a Deep CNN
3. 学会等名 International Display Workshop (IDW19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Inagaki, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii, Hajime Nagahara
2. 発表標題 Learning-Based Framework for Capturing Light Fields through a Coded Aperture Camera
3. 学会等名 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣 安隆
2. 発表標題 深層学習を用いた符号化開口カメラによる光線空間の圧縮取得
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム (FIT) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Inagaki, Yuto Kobayashi, Keita Takahashi, Toshiaki Fujii, Hajime Nagahara
2. 発表標題 Learning to Capture Light Fields through a Coded Aperture Camera
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井 康平, 稲垣 安隆, 高橋桂太, 藤井 俊彰, 長原一
2. 発表標題 2値マスクを用いた符号化開口カメラによる動的な光線空間の取得
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井 康平, 稲垣 安隆, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 符号化開口カメラによる動的な光線空間の取得にむけて
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井 康平, 稲垣 安隆, 高橋 桂太, 藤井 俊彰
2. 発表標題 符号化開口カメラを用いた動的な光線空間の取得手法における被写体の動き量と復元品質
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 桂太, 藤井 俊彰
2. 発表標題 圧縮表現に基づく光線空間の撮影と表示
3. 学会等名 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Takahashi
2. 発表標題 Computational Acquisition and Display Technologies for Light Fields
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia, Information Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣 安隆, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 符号化開口カメラを用いた視差推定手法の深層学習による最適化
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸山 敬太, 稲垣 安隆, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 深層学習を用いた符号化開口カメラからレイヤ型ディスプレイへの3次元表示
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣 安隆, 小林優斗, 高橋 桂太, 藤井 俊彰, 長原 一
2. 発表標題 深層学習を用いた符号化開口カメラによる光線空間の取得
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 桂太
2. 発表標題 光線空間の符号化撮影 ~ 基底表現から深層学習へ ~
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Computational Camera Project http://www.fujii.nuee.nagoya-u.ac.jp/~takahasi/Research/CompCam/index.html</p> <p>高橋 桂太: "深層学習に基づく光線空間の圧縮センシング", 日本光学会第47回冬期講習会 光学デバイス×コンピュータショナル技術で拓く先端イメージング/センシング (2021.1)</p> <p>高橋 桂太 "光線空間の撮像・表示技術におけるAIの活用", AIOptics研究グループ講習会, 田町CIC/東京都 (2019.3)</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長原 一 (Nagahara Hajime) (80362648)	大阪大学・データビリティフロンティア機構・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------