

# 研究報告書

## 「人工散乱体と圧縮センシングを融合した超小型撮像系による大規模画像計測」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016年10月～2020年3月

研究者: 中村 友哉

### 1. 研究のねらい

レンズを用いた光学結像を前提とする一般的な撮像系では、撮像情報量の増加に伴い系が大型化する。広視野撮像のためには魚眼レンズ等の大型のレンズ系が必要となり、マルチスペクトル撮像のためには複数のセンサと分光素子で構成される大型の光学系が必要となる。そのため、広角・マルチスペクトルカメラを用いた大規模画像計測を行う場合、撮像系サイズの小小型化に関して cm 規模が物理限界であった。

これに対し近年、mm 規模の超小型撮像系として符号化光学素子を用いた符号化撮像と画像再構成処理の融合に基づく「レンズレス撮像法」が研究されている。しかし、符号光学系-復号処理系からなる撮像系の設計自由度を駆使したコンピュータシミュレーションカメラ設計の研究はこれまで十分なされておらず、小型光学系による広視野・マルチスペクトル・高画質の撮像は未だ実現されていない。

近年、計測対象のスパース性を利用し、少量の計測データから元のデータを再構成する「圧縮センシング」技術が研究されており、イメージング技術にも応用されている。自然画像は基底変換によりスパースに表現できるため、符号化過程が適切であれば、圧縮センシングに基づき単一強度信号から多次元画像を再構成することが可能である。ただし、圧縮センシングを前提として、系の小型さを維持しつつその効果を最大化するような撮像光学系構成法の検討は十分なされていない。

本研究課題では、人工散乱体に代表される符号化光学素子を用いたレンズレス撮像法と圧縮センシングに基づく画像復元を融合した新規撮像系構成を設計し、超小型かつ高画質な超広視野・マルチスペクトルレンズレスカメラのコンセプトを実現する。これにより、大規模画像計測を既存の物理限界を超える撮像系サイズで実現する。この目的を達成するために、符号光学系及び復号処理系の協調に基づく撮像系の設計を検討し、その効果を一般撮像環境下における自然画像を対象とした実機構築に基づく 30dB 程度のイメージングの達成により実証することを目指す。このように圧縮センシングの効果を最大化する新しいカメラデザインを創出することで、人体や瓦礫などの狭小空間の内部の精密な光学解析や、装着感及び存在感の無いセキュリティ及びウェアラブル画像計測等、これまでのカメラでは実現不可能であった新しい映像技術領域を拓くことを目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、小型符号化光学系で多元物体像情報を圧縮センシングするための新規符

号-復号協調型撮像系構成について検討した。具体的には下記の項目に基づき研究を進めた。

**【1】多元像情報の圧縮センシングを前提とした小型符号化撮像系設計：**

初めに、図 1 に示すような、多元像情報の独立符号化・多重化計測及び分離再構成処理の組み合わせによる撮像系を検討した。情報の独立符号化は体積ホログラムを用いて物理実装する手法を設計した(以下、多重法)。また、計測多重像を Total Variation 拘束に基づく IST 法により分離再構成する信号処理を設計した。また、ホログラム符号器の物理実装光学系を構築し、提案手法の実機構築を行った。現実の撮像光学系で二視野の一括イメージングが実現できることを確認した。一方で、複雑な階調を有する自然物体に対して、当該撮像系構成では符号化及び復号方法を十分最適設計したうえでも十分な再構成画質が達成できないことが明らかになった。

撮像系構成を見直し、図 2 のような構造化振幅透過マスクとチャンネル選択的フィルタ配置した撮像素子を組み合わせたレンズレス撮像系を再設計した(以下、疎計測法)。当該手法では、光学的インパルス応答をチャンネル選択的に設計する代わりに、像面での標本化をチャンネル選択的に設計する。多重法では単一多重像から複数チャンネル像を再構成するためにスパース再構成を利用したが、疎計測法では疎な標本化符号化像群から密な複数チャンネル像を再構成するためにスパース再構成を利用する。数値実験の結果、四チャンネルの自然画像の圧縮センシングにおいて 28.0dB の再構成画質を達成し、多重法と比較して 9.5dB の画質改善を確認した。さらに、圧縮センシングの効果を得るには対象距離が既知である点が実用上の課題であったが、距離不変インパルス応答を実装するマスク設計により当該問題を解決した。また、提案構成に基づくレンズレスカメラを実機構築し、提案するイメージング原理が実環境下でも動作することを実証した。

**【2】符号化撮像系の広視野化：**

研究過程で、透過マスクを用いたレンズレス撮像系が圧縮センシングの適用可能条件を良好に満たすことが分かったため、撮像素子の画素が疎らでも撮像が実装可能である点が明らかになった。このことを利用し、撮像素子の画素を疎らにすることでレンズレス光学系の視野を 180° 以上に拡大する手法を考案し、模擬実験系にて原理を実証した。必要となる撮像素子の物理実装は途中段階であるが、素子の実装を前提として提案するイメージング原理自体が実環境下で動作することが確認できた。

**【1】小型光学系と多元撮像の同時実現と【2】小型光学系による広視野撮像はイメージングの数理モデルが同じであり、単一撮像系として同時実装可能であるため、当初の目的であった超小型光学系、マルチスペクトル(多元)イメージング、超広視野イメージングの同時実現を可能とする撮像系構成を実現し得る構成法について、一手法の設計と原理実証を完了したと結論づけられる。**

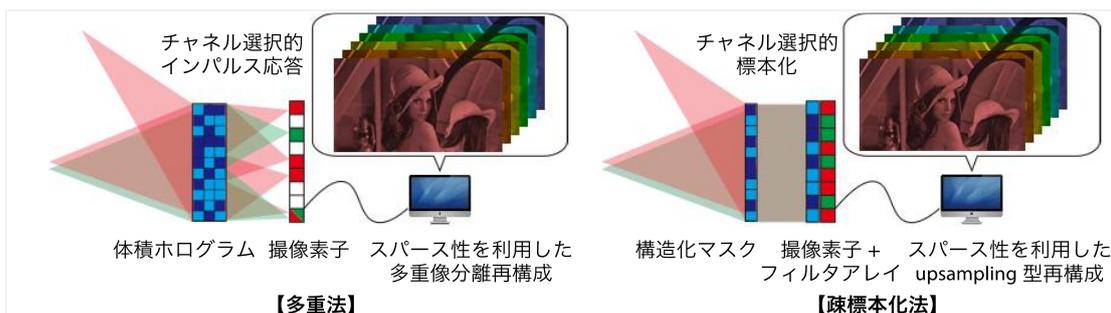


図 1. 本研究で設計した多元像情報圧縮センシングのための小型符号化撮像系概念図

## (2) 詳細

本研究における研究項目ごとの具体的な成果を下記に述べる。

### 【1】多元像情報の圧縮センシングを前提とした小型符号化撮像系設計

#### 【1-1】 多重法

マルチスペクトルイメージング等の多元撮像を、圧縮センシングを利用して小型光学系で実現するのが本研究の目的の一つである。多重法では、角度・波長選択的な光学的インパルス応答(以下、PSF)を実現する体積ホログラムをチャンネル選択的物理符号器として撮像素子前方に配置し、これにより独立符号化された多元符号化像をモノクロ撮像素子で多重化計測する(特許 1)。単一多重化計測符号化像を入力とした複数チャンネル物体像の再構成は不良設定な線形逆問題であるため、圧縮センシングの枠組みに基づきスパース性を最大化するエネルギー最小化問題を解くことで画像再構成を実装する。

数値実験に基づき当該目的に適した PSF 構造を探索した結果、二重点像型 PSF が自然画像に対して良い再構成画質を与えることが明らかになった。二重点像の位置関係をチャンネルごとに独立に設計することで多元像情報の独立符号化を実装できる。Total Variation をスパース拘束に用いた誤差最小化問題を反復アルゴリズムである TwIST 法で解いた結果、数値実験で生成した多重像が分離再構成できることが確認された。ただし、Shepp-Logan Phantom 等のスパース性の高い画像に対しては例えば五多重で 25.9dB 等比較的良好な画質が得られるが、複雑な階調を有する自然物体に対しては十分な階調情報を復元できず、例えば四多重で 18.5dB の低画質の再構成結果が出力された。

アナログ体積ホログラムの物理実装光学系を構築し、記録材料の選定、評価、実験条件最適化を行い、符号器の物理実装を行った(論文 3)。実験の条件制約を緩和して高い光利用効率を得るために、単一のホログラムに複数の PSF を多重記録するのではなく、単一の PSF を記録したホログラムを複数枚記録して積層することで等価な符号器を実装した。符号器と補助レンズを用いて撮像実験系を構築し、二つの視野(チャンネル)の多重化一括撮像を実施した結果、図 2 のように二視野の物体情報を、アーティファクトは残存するものの高い視認性で再構成することができた(その他の成果 5)。

ホログラム符号器はその設計自由度の高さから、多元像情報独立変調でなく撮像対象の深さを点像の水平位置に線形変換(以下、光  $z$ - $x$  変換)する素子としても機能させることができる。本研究はホログラム符号器を多元像情報独立変調にのみ利用する計画であった

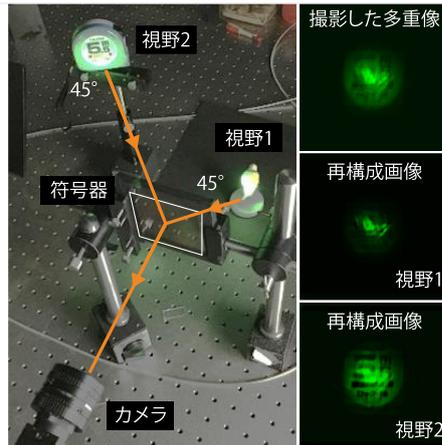


図 2. ホログラム符号器の物理実装に基づく二視野独立符号化・多重化撮像手法の光学実験結果

が、さきがけ光極限領域の小澤祐市氏（東北大）との共同研究によりホログラフィック光  $z-x$  変換がレーザー走査型 3D 顕微鏡の高速化に役立つことが分かり、光学実験に基づく原理実証を実施した。当初の計画外の成果であるが、符号化に基づく三次元光計測という一種の情報計測のために高自由度光学素子としてのホログラムが物理符号器として有効である一つの応用事例を実証できた（論文 2、特許 2）。

#### 【1-2】疎標本化法

多重法による圧縮センシング型イメージングの原理が実証できたが、一方で自然物体の多元圧縮センシングにおいては、符号系及び復号系を最適設計したうえでも原理上十分な画質が達成できないことが明らかになった。そのため、撮像系を瞳面の構造化振幅透過マスクと像面のフィルタアレイの積層による構成に修正した。疎標本化法では、構造化振幅透過マスクにより一括符号化された多元像情報を、フィルタアレイを配置した像面によりチャンネルごとに分離して標本化する。ここで、各チャンネルの取得符号化像はスパースである。スパースな符号化像群を入力とした密な多元物体像群の再構成は不良設定な線形逆問題であるため、スパース性を利用した画像復元アルゴリズムにより画像再構成を実装する。

数値実験に基づく検討の結果、符号化光学系設計における知見として、当該光学系においては①マスク構造は自己相関が低く周波数応答に優れる構造が良い点、②スパース標本化パターンはあまり再構成画質に影響せず実装のコスト等を優先して設計して良い点が明らかになった。また、復号処理系は多重法と同様に Total Variation をスパース拘束に用いた TwIST 法で画像再構成可能であることを確認した。疎標本化法では複雑な階調を有する自然物体の四チャンネル一括計測において、28.0dB の画質の再構成を達成できた。つまり、図 3 のように、多重法と比較して 9.50dB 画質が改善された小型多元イメージングの実現が実証された。また、マスク構造を放射型に設計することで、PSF の距離依存性が大幅に緩和でき、任意距離の物体に対して圧縮センシングの効果を達成できることを実証した。

分光フィルタアレイを配置した撮像素子と設計/実装した符号化放射型振幅透過マスクを積層し、十六バンドのマルチスペクトルレンズレスイメージング系を構築した。これを用いた撮像実験により、実環境下での原理の動作を実証した。現在、本成果をまとめ、特許出願及



図 3. 多重法と疎標本化法の多元自然画像一括取得における再構成画質比較

び論文投稿準備中である。

## 【2】符号化撮像系の広視野化

【1】の研究成果として、レンズレス符号化撮像系が圧縮センシングに有効であり、スパース計測からの元情報再構成を実現し得る点が明らかになった。つまり、当該イメージングモデルにおいては、撮像素子内の画素が疎らであっても密な場合と等価な撮像を実装可能である。その結果、複数の撮像素子の画素を疎らにしつつ向かい合わせることで、撮像素子を受光面としても符号化振幅マスクとしても機能させることが可能となり、レンズレス光学系のサイズを増加させることなく撮像の多方向化及び超広視野を実現することが可能となる。この撮像素子の疎ら化に基づく超広視野レンズレス撮像について、図 4 のように模擬光学系を用いた原理実証実験を実施し、実環境下での有効性を確認した(論文 1)。現在、撮像素子の専門家との共同研究に基づき、当該素子の物理実装を進めている。このレンズレス撮像系の広視野化は前述の多元化とイメージングモデルが同じであり単一撮像系上で同時実現できるため、本研究で目的としていた超小型・多元(マルチスペクトル)・広視野を全て満足する圧縮センシング型カメラデザインの一実現例を創出できたといえ、かつその原理を実証できたといえる。

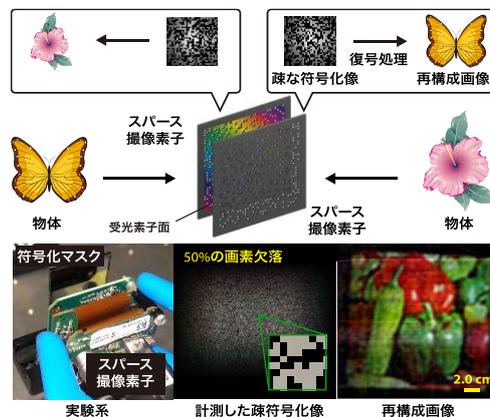


図 4. 撮像素子の画素の疎ら化によるレンズレス撮像系の広角化概念図、及び模擬光学系を用いた原理実証結果

### 3. 今後の展開

本研究では、小型光学系によるマルチスペクトル・広視野イメージングを実現するカメラデザインの提案と原理の実証を行った。当該技術の実用化のためには、原理的限界に迫るカメラの超小型実装、及びそれに基づくプロトタイプングがまず重要なステップである。項目【2】の撮像素子に関する研究開発と並行して、当該プロトタイプングを進める。また、本成果含むコンピューショナルカメラ一般において、実機環境下においてはキャリブレーション誤差や計測輝度値飽和による画質劣化の影響を受けやすい点が実用上の大きな課題である。本領域内あるいは外の信号処理研究者の成果を引き続きフォローし、今後も画質改善に引き続き取り組む。

本技術は超小型光学系でありながら情報量の多い画像計測が可能である点が強みである。今後は、本研究成果を軸に、例えば移動通信端末や医療機器、検査装置やロボット等より具体的なアプリケーションへの実用化を志向した小型・高情報量カメラ開発を目指す。産学連携を通じて研究成果である新しいカメラ原理の社会実装への道筋をさらに模索する予定である。また、本研究活動を通じて、圧縮センシングを前提とした小型符号化撮像法がIoTカメラにおけるプライバシー保護や省エネルギーの観点からも技術的ニーズがあることが分かったため、新しい応用の観点としてそれらの課題解決に対しても本技術の有効性を模索する。

### 4. 自己評価

小型・マルチスペクトル・広視野を同時に達成する圧縮センシング融合型コンピューショナルカメラの実現に関して、新規なカメラデザインを着想し、光学実験に基づく原理の実証及び数値実験に基づく定量評価を示すことができた。研究開始時の方法では自然画像に対して十分な性能が得られないことが明らかになったが、別の方法によって同目的を30dBに近い画質で達成できることが明らかになり、結果として研究計画で設定した目的は原理構築、実証の観点からは概ね達成することができたと考えている。

一方で、提案手法の実応用を想定した実機開発及びデモンストレーション開発までは現時点で完了しておらず、研究計画から遅れている。ただし、研究発表を足がかりに企業との連携は着実に進んでおり、その中でカメラの応用方法が当初の構想外の形態も含めて具体化しつつある。今後は、当初の応用構想に囚われず、社会のニーズも意識した応用研究を進めていきたい。

研究実施体制として、研究者本人の他に技術支援員1名とリサーチアシスタント計2名で研究を実施した。本研究は実機構築に基づく光学実験を多く含むため、例えば符号化光学素子の実装実験や撮像系実機構築、内部パラメータ計測や較正には多くの工数が必要となったが、この点を分担することで効率的に検討を進めることができた。研究費を用いて、このための人件費の他に、必要な計算環境、光学部品、素子及び材料などを調達することができた。

研究成果について論文発表だけでなく特許出願を実施しており、それに基づく産学連携の打ち合わせやコンサルティング等の活動を既に進めている。現時点で技術が製品になって世に出たわけではないが、現在の活動を継続して進めることで、数年後に技術が社会に製品化等の形で波及するものと思われる。

領域の戦略目標「材料研究をはじめとする最先端研究における計測技術と高度情報処理の融合」に対して、本研究プロジェクトは圧縮センシングの効果を最大化する小型高情報量イメージングシステム原理の検討について取り組んだものである。①撮像系のサイズと情報量

のトレードオフを解決する新規イメージング手法を自ら考案して実証した点、②圧縮センシングの効果を最大化する光学システムの設計という観点で失敗例を含め新しい技術的知見を提供した点で本研究は戦略目標に貢献したと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

1. Tomoya Nakamura, Keiichiro Kagawa, Shiho Torashima, and Masahiro Yamaguchi, "Super Field-of-View Lensless Camera by Coded Image Sensors," Sensors, Vol 19, No. 6, 1329 (2019).
2. Tomoya Nakamura, Shunsuke Igarashi, Yuichi Kozawa, and Masahiro Yamaguchi, "Non-diffracting linear-shift point-spread function by focus-multiplexed computer-generated hologram," Optics Letters, Vol. 43, No. 24, pp. 5949-5952 (2018).
3. Tomoya Nakamura, Shinji Kimura, Kazuhiko Takahashi, Yuji Aburakawa, Shunsuke Takahashi, Shunsuke Igarashi, Shiho Torashima, and Masahiro Yamaguchi, "Off-axis virtual-image display and camera by holographic mirror and blur compensation," Optics Express, Vol. 26, No. 19, pp. 24864-24880 (2018).

### (2)特許出願

研究期間累積件数:4件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発明者:中村友哉, 山口雅浩  
発明の名称: 撮像システム、及び撮像方法  
出願人:東京工業大学  
出願日:2017/5/10  
出願番号: 特願 2017-093613

2.

発明者:中村友哉, 五十嵐俊亮, 小澤祐市  
発明の名称: ホログラム光学素子、ホログラム光学素子の製造方法、及び光学装置  
出願人:東京工業大学、東北大学  
出願日:2017/12/26  
出願番号: 特願 2017-250153

### (3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. IWISS2018 ITE Open Poster Session Award 1st place (2018)
2. Tomoya Nakamura, Keiichiro Kagawa, Shiho Torashima, and Masahiro Yamaguchi, "Lensless imaging by coded image sensors," 4th International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS2018), 16 (2018).
3. Tomoya Nakamura, Keiichiro Kagawa, Shiho Torashima, and Masahiro Yamaguchi, "Super Field-of-View Lensless Camera by Coded Image Sensors," IEEE International Conference on

Computational Photography (ICCP) (2019).

4. IDW'17 Best Paper Award (2018)

5. 中村友哉, 山岸壮太, 虎島史歩, 山口雅浩, “vHOE 符号器を用いた複数視野像の圧縮センシング,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 19a-P2-2 (2018).