

# 研 究 報 告 書

## 「多数自然光源の瞬間同時ホログラフィックマルチカラーセンシング」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016年10月～2020年3月

研 究 者: 田原 樹

### 1. 研究のねらい

生命科学研究や材料科学研究, ロボットビジョン, 部品や製品の検査など, 基礎科学から産業に至るまで観察, 計測を行なう技術に対する要求や需要は増大する一方である。科学研究においては特に, 3 次元顕微鏡にかかる需要は高く, 3 次元空間に加え波長の情報を高速に取得することが求められる。顕微鏡観察下で 3 次元画像の情報を取得するには走査過程を従来必要としているが, 機械的な走査の速度に時間分解能が律速されることから逃れられない。限界性能を突破するには多様なアプローチの出現が必要不可欠であり, 機械走査の速度に律速されない, 3 次元画像情報を一括取得できる顕微鏡技術が極めて重要である。単一露光で 3 次元画像を取得できる技術としてホログラフィがあるが, 干渉縞の生成のためにレーザ光を用いると, 蛍光等のインコヒーレント光のセンシングができない。

本研究提案では, 蛍光などの自然光, すなわち空間的・時間的にインコヒーレントな光により観察される, 瞬間のマルチカラー 3 次元画像情報を, 高い光利用効率で高速記録・可視化する自然光マルチカラーホログラフィック記録システムの開発を目的とする。目的達成のために, 本研究課題では, インコヒーレントデジタルホログラフィ, 単一露光位相シフト法, ホログラフィック波長多重を駆使するアプローチをとる。これら 3 要素技術の組み合わせをもって, 限られた光量におけるマルチカラーホログラフィック 3 次元画像の取得速度の限界に挑む。そして, 多数の回折波源から発せられる空間的・時間的にインコヒーレントな光のホログラムを単一露光で同時にマルチカラーセンシングできること, カラーフィルタに頼らず単板単色撮像素子によりインコヒーレントな波長多重ホログラムをセンシングできること, そして機械走査が不要な蛍光 3 次元顕微鏡への応用可能性を示すことを目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では, 図 1 に示す構想に基づき研究を進めた。図 1 の通り, 自然光をホログラムとして検出するシステムと, 記録された 1 枚のホログラムに対する信号処理の駆使により, 瞬間のマルチカラー自然光の 3 次元画像を取得するアプローチをとった。本研究課題では大別して, [1]単一露光位相シフト法を用いたインコヒーレントデジタルホログラフィ, [2]ホログラフィック波長多重技術, [3]ホログラフィック波長多重技術の一つである計算コヒーレント多重を用いた波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィの研究を進め, [1] - [3]の統合と共に蛍光 3 次元顕微鏡への応用を目指した。構想の一実施形態として, [1]に基づく光学システムの概略を図 2 に示す。入射したマルチカラー自然光に対し, 偏光と偏光感受性を有する空間光位相変調器や複屈折材料を用いて, 偏光方向が直交し曲率半径の異なる 2 光波を生成する。1/4 波長板と偏光子アレイを用いて位相シフト干渉法に必要な 4 種の自己干渉ホログラムを空間分割

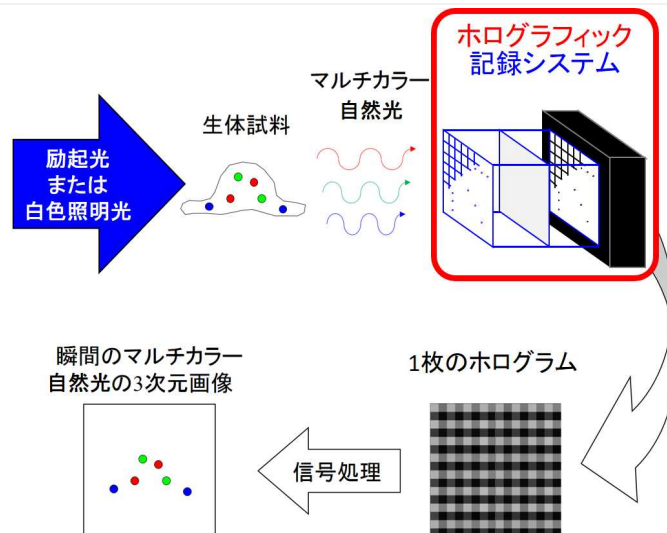


図 1. 本研究提案の構想.

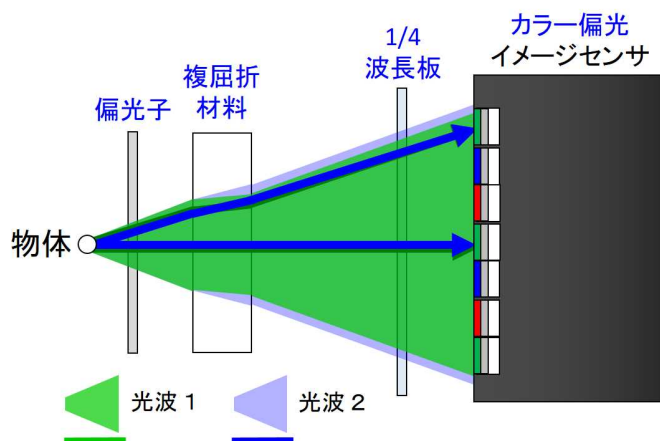


図 2. 単一露光位相シフトインコヒーレントカラーデジタルホログラフィの記録システムの概略.

多重化する。そして、カラーフィルタアレイを時間的コヒーレンスの制御と波長情報の空間分割多重化に用い、最後にイメージセンサで、RGB の各波長域において 4 種、すなわち計 12 種類の空間的にインコヒーレントなマルチカラーの位相シフトホログラムを単一露光で同時記録する。記録されたホログラムに対し位相シフト干渉法や回折積分などの信号処理を施すことにより、RGB の各波長域における 3 次元画像を取得する。[2], [3]を当該システムに統合することにより、カラーフィルタアレイを透明な光学素子のアレイ(以下、偏光光学素子アレイ)に置き換えられるため、アレイ素子の試作や統合システムの設計を通じて光利用効率の向上を目指した。

本課題では主題として蛍光 3 次元動画顕微鏡への応用を目指し、[1] - [3]の技術を研究した。以下に研究成果の概略を示す。

[1] 単一露光位相シフト法を用いたインコヒーレントデジタルホログラフィ

・インコヒーレント光の単一露光ホログラフィック画像センシングシステムの試作, 実証

- ・多数自然光源の瞬間同時ホログラフィックマルチカラー3次元顕微鏡システムの試作, 実証
- ・蛍光3次元顕微鏡への応用可能性の実験的検討
- ・上記マルチカラーセンシングシステムの検出系の改良による, センサへの結像面から21.9  $\mu\text{m}$ の深さにおいて1  $\mu\text{m}$  オーダの構造に対する, 22 fps の記録速度でのマルチカラーホログラフィック3次元画像センシング

## [2] ホログラフィック波長多重技術

- ・レンズレス・波長フィルタレスでホログラフィックマルチカラー画像をセンシングするためのアルゴリズムの提案と実証システムの試作
- ・微弱な光の検出に向けた単一画素でホログラフィックマルチカラー画像をセンシングするシステムの試作と実証

## [3] 計算コヒーレント多重を用いた波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィ

- ・波長フィルタレスで自然光のホログラフィックマルチカラー画像をセンシングするシステムの試作と実証
- ・ハロゲンランプを用いたホログラフィック波長多重マルチカラー3次元顕微鏡システムの開発
- ・レンズレス・波長フィルタレスでホログラフィックマルチカラー画像を単一露光センシング可能なシステムの設計
- ・偏光光学素子アレイの仕様策定

## (2) 詳細

本課題では主題として蛍光3次元動画像顕微鏡への応用を目指し, 「2.研究成果(1)概要」の[1] - [3]の技術を研究した。以下に示す3研究テーマとの対応を含め, 研究成果を述べる。

### 【蛍光3次元動画像顕微鏡システムの開発に関する研究】

当該研究テーマに対しては, 「2.研究成果(1)概要」記載の[1]と[3]に基づく成果が該当する。まず, 系の耐振動性や顕微鏡との融合可能性を勘案し, フレネルインコヒーレント自己相関ホログラフィ(FINCH)システムと並列位相シフト干渉法に基づく, 単一光路・単一露光インコヒーレントデジタルホログラフィシステムを試作した。そして, 透過型および反射型の光学系配置において被写体の単一露光3次元画像センシング能力を示し, 技術の実証に成功した(論文1)。システム設計および技術の実証に対して, 国際共著 Review 論文1稿(著作物(Review 論文1))を含め各種対外的な評価(受賞, ハイライト 1, 2)を受けた。その後, 電子機器の性能向上, 高機能化に伴い, 当該システムに適合するイメージセンサが世の中に登場したことに伴い, 当該イメージセンサの貸与を受け, 図2に示す光学システムの顕微鏡応用システムを図3の通りに構築した。図3に示す通り, 市販の倒立型光学顕微鏡により時間的, 空間的にインコヒーレントな物体の拡大像を生成し, 偏光子と LCoS-SLM からなる FINCH システムによりインコヒーレント光の自己干渉ホログラムを生成し, そして 1/4 波長板とカラー偏光イメージセンサからなる単一露光位相シフト干渉システムにより単一露光で計 12 種類のインコヒーレントホログラムを同時取得した。図4に示す通りハロゲンランプを用いた白色照明光, または蛍光染色された生体



図 3. 試作した多数自然光源の瞬間同時ホログラフィックマルチカラー3次元顕微鏡システム.

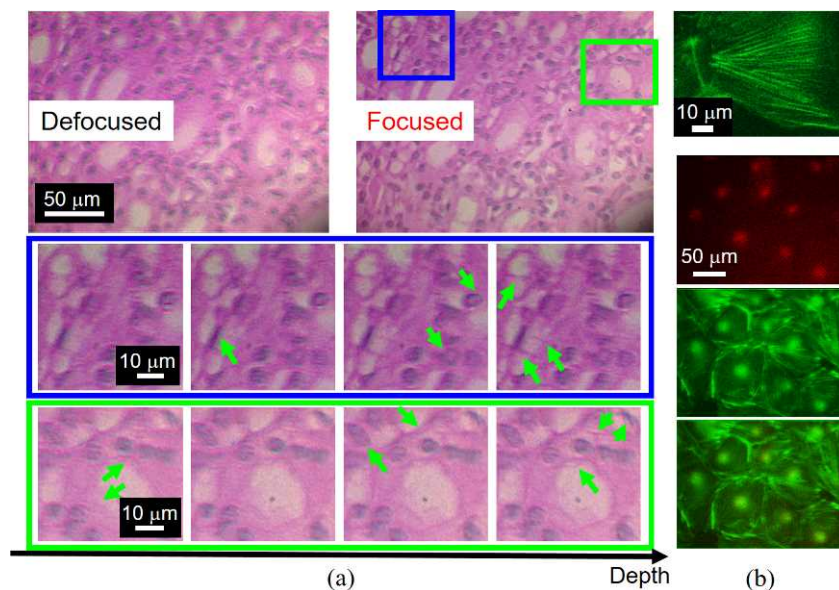


図 4. 実験結果。(a)ハロゲンランプを光源に用いた結果, (b)蛍光イメージング結果。(a)内矢印は合焦部, 全体の深さ差は 6  $\mu\text{m}$ , 試料は HE 染色されたマウス腎臓細胞。(b)試料は PtK2 細胞, アクチンが赤色蛍光, 微小管が緑色蛍光染色, 画像はコントラスト強調後。

試料から発せられたカラー蛍光の単一露光センシングを実証し, 研究課題名の世界初の実証を学会にて発表した(受賞 4)。当時点で白色光, 蛍光いずれにおいても系の倍率を 20 としても



光量を原因として 1.67 fps のフレームレートであったため、光学系の再設計を行なった。LCoS-SLM から、焦点距離に偏光依存性を有するレンズに変え、図 3 のビームスプリッタを取

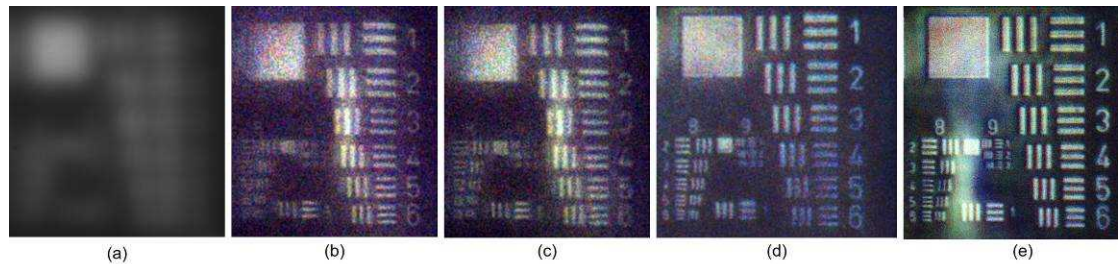


図 5. 光学システム改良後のマルチカラーホログラムの単一露光記録実験結果。(a)22 fps の記録速度で得られたホログラム群の 1 枚。USAF1951 テストターゲットの Group 7, 8, 9 のホログラムを示す。(b) (a)から再生され Group 7 に合焦,(c) Group 8 に合焦。(b)は(a)に示すセンサへの結像面から 21.9  $\mu\text{m}$  の深さに計算機で合焦させたときの結果。(d) 10 fps の記録速度で得られた再生像, (e) 2 fps の記録速度で得られた再生像。

り外し、一直線の単一光路に変更し光学素子と電子機器の再選定を行なった。照明光の光量を変えずに系の倍率を 37 と倍近くにしたが、図 5 に示す通り、センサへの結像面から 21.9  $\mu\text{m}$  の深さにある 1  $\mu\text{m}$  オーダの構造に対して、最高 22 fps で白色光のマルチカラーホログラム動画センシングを達成した。改良前のシステムでは白色光と蛍光のセンシングにおいて等しいフレームレートであったため、改良後のシステムに対しても同じ性能を発揮できると考えられる。改良後のシステムの内容において国際会議発表へ向けて予稿を投稿し、その後、同国際会議にて招待講演の依頼を受けた(国際会議 3)。また原著論文への投稿に向けて準備している。

#### 【計算コヒーレント多重に基づく波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィ】

当該研究テーマに対しては、「2.研究成果(1)概要」記載の[2]と[3]に基づく成果が該当する。本研究テーマは、蛍光 3 次元動画顕微鏡システムの開発において、ホログラフィック波長多重を駆使してカラーフィルタアレイを取り外し、波長多重センシングすることにより、光利用効率を高めることを狙い設定した。まずホログラフィック波長多重センシング技術の一つである計算コヒーレント多重方式(論文 2 等)を、「2.研究成果(1)概要」記載の[1]のシステムと親和性を有するものとして採用した。本方式では、波長毎に異なる位相変調量を離散的に与えることで、少ない測定回数で複数波長のホログラフィック 3 次元画像を得ることができる。研究として、記録回数を既存の方式に比べ 1/70 に低減し且つ位相変調量を減らせるアルゴリズムを提案し(論文 2)、位相変調に機械駆動部を必要とせずレンズレス・波長フィルタレスでの波長多重 3 次元画像センシングを実証した(論文 3)。以上より、液晶などの位相変調素子と計算コヒーレント多重に基づく信号処理のみで、単板単色撮像素子によりセンシングされた波長多重ホログラムからマルチカラー 3 次元画像を取得できることを確認した。以上の研究内容に対しては一部報道された(報道 1)。また、インコヒーレントデジタルホログラフィの内容と併せて Review 論文 1 稿(著作物(Review 論文 2))を執筆した。レーザによる原理検証後、空間的にインコヒーレントで、

時間的に低コヒーレンスな光源である RGB の LED 光源を用い、一般照明光に対する適性を実験的に調べた。FINCHに基づく波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィシステムを試作し、原理検証のために抵抗器を被写体として市販のイメージセンサを用いて、図6に示すような波長多重インコヒーレントホログラムを7枚取得した。取得されたホログラム群から図6の再生



図6. 波長多重インコヒーレントホログラムセンシング実験結果. 被写体は 6 mm × 3 mm の抵抗器. 赤矩形は合焦部. 光源は中心波長 455 nm, 530 nm, 625 nm の LED.

像を取得できたことから、時間的に低コヒーレンスな光波のホログラムも取得可能であることを明らかにした(論文4)。以上の研究結果より、ハロゲンランプや太陽光、広波長域の蛍光体などの空間的・時間的にインコヒーレントな光源に用いても、マルチバンドパスフィルタを通せば光量損失を抑えながら時間的なコヒーレンスを制御できるため、自然光の波長多重ホログラムを市販の sCMOS カメラでも検出可能と判断した。そして原理検証の実験として、ハロゲンランプを具備する倒立型光学顕微鏡を用い、計算コヒーレント多重に基づく白色光ホログラフィック波長多重マルチカラー3次元顕微鏡システムを試作した。結果として、図7に示す通り、FINCHの特徴として見られる、検出系の工夫により実現される超解像センシング能力と、リフォーカシング処理の上でマルチカラー画像センシング能力を示すことができた。また、フーリエ分光法を用いるインコヒーレントホログラフィでは従来 RGB の情報取得に 500 枚回以上のホログラム記録を必要としたが、計算コヒーレント多重では7回の露光で済むため、記録回数を1/70以下に減らすことができ、逐次記録の方法においても高速化の可能性を示せた(論文5)。当該技術単体では、瞬間のセンシングこそ難しいが、市販の光学機器、電子機器のみで構成でき、多数自然光源の同時ホログラフィックマルチカラーセンシングが可能であることから、位相変調素子の高速化により今後動画像センシングが可能であるとの見通しを得た。

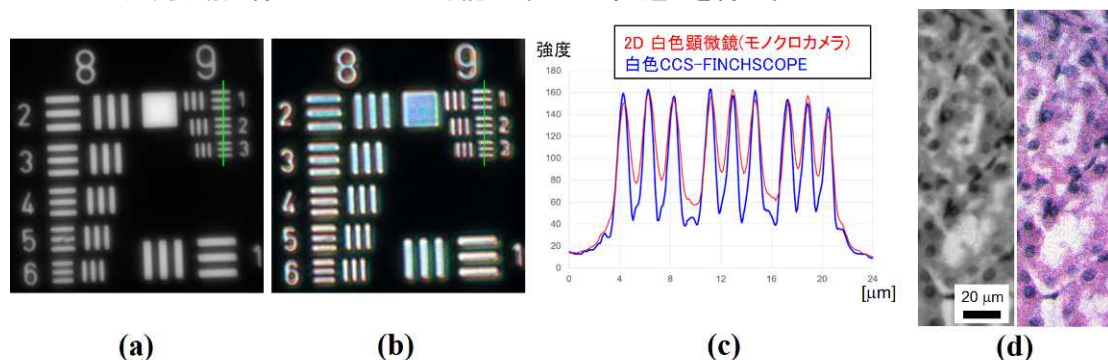


図7. 構築した計算コヒーレント多重(CCS)に基づく、白色光 FINCH 顕微鏡システムによる実験結果。(a)同じモノクロセンサと白色顕微鏡を用い記録した画像、(b)

CCS-FINCHSCOPE により得られたカラー再生像, (c) (a),(b)内緑線のプロット, (d) 白色光の波長多重ホログラムの一枚とカラー再生像。(c)より, USAF1951テストターゲットの Group9 のもつ高空間周波数成分が, CCS-FINCHSCOPE により減衰せずに解像されている。(d)のカラー再生像は, ホワイトバランスをとり, コントラストを強調した後の結果。対物レンズは NA0.95, 倍率 40.

#### 【偏光光学素子アレイ素子の仕様策定・試作に関する研究】

当該研究テーマに対しては, 「2.研究成果(1)概要」記載の[3]に基づく成果が該当する。本研究テーマは, 【蛍光 3 次元動画像顕微鏡システムの開発に関する研究】と【計算コヒーレント多重に基づく波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィ】を統合し, 吸収ではなく位相の波長依存性をもって波長センシングすることを目的としたものである。その結果として光利用効率を高めることを狙い設定した。当該光学素子アレイでは, アレイの1セルのサイズが微小であるため, 撮像素子に合わせられることが望ましい。一方で, 広視野・高分解能な像転送光学系を採用すれば, セルと撮像素子の画素を調整により合わせることが可能である。そこで本課題では, センサとアレイ素子を合わせる場合と, アレイ素子と像転送光学系を用いる場合の両方の光学系を設計し, アレイ素子並びに像転送光学系の仕様を策定した。現在までにアレイ素子付イメージセンサと偏光光学素子アレイ, 像転送光学系の試作は完了し, アレイ素子を含めた自然光のホログラフィックマルチカラー3 次元顕微鏡システムを構築する段階である。アレイ素子とその得られる機能に対して対外的に評価された(報道 2)。

#### 【微弱な光のホログラフィック検出に関する研究】

本さがけ内での共同研究として, 量子光学が専門のさがけ領域の岡本 亮 氏と, 量子光学と情報光学の考えを導入した研究を進めた。(1)単一画素検出器で少ない情報量から多次元ホログラフィック画像の情報を取得することを目指した研究と, (2)微弱な干渉光の検出における不確かさを導出する研究を進めた。後者は, 岡本氏が位相シフト干渉法に対し量子ゆらぎの考えを導入して, 理論を立てて研究を進めたものであり, 研究者は量子光学に基づく計算機シミュレーションをもって数値的に検証し, 良い一致が示されることを確認した。本共同研究により, 微弱な光の検出における測定結果の信頼性に対する指標を生み出すことができ, 微弱光多次元ホログラフィックセンシングの基礎研究を推進することができた。計算機シミュレーション結果の内容をまとめ, 国際会議発表へ向けて予稿を共著にて投稿した。また, さがけ領域の石井 あゆみ 氏と, 高感度, 多機能センシングについて議論し, 光学設計のみでは達成しえない情報量の取得可能性を見出すことができている。

### 3. 今後の展開

「2. 研究成果 (2)詳細」に記載の通り, 試作した光学システムでは現在, センサへの結像面から 21.9  $\mu\text{m}$  の深さにおいて 1  $\mu\text{m}$  オーダの構造を 22 fps の記録速度で白色光のマルチカラーホログラフィックセンシングを実現している。しかしながら, 「2. 研究成果 (2)詳細」に記載の統合システムの導入などにより, 時間分解能の向上において性能向上の余地がある。空間分解能においても, 試作システムではカラー偏光イメージセンサの画素密度に左右され, 12 種のホログラムの画素密度が空間分割多重により減少するため, 改善の余地がある。倍率を上



げると 1 画素あたりが検出する光量が減少するため、光量が限定された条件では時間、空間情報量のトレードオフが避けられない。「2. 研究成果 (2) 詳細」に記載の統合システムでは、光量の制限を緩和し更にアレイ素子による空間的な分割数を減らし、時間、空間情報量をより多く得る潜在能力を有する。今後、統合システムを実現し、ビデオレートを超えた記録速度で、 $1\mu\text{m}$  以下の構造を 3 次元画像としてセンシングする、マルチカラーインコヒーレントホログラフィック顕微鏡として、多様な現象の 3 次元動態観察に挑みたい。一方で、ストロボ撮影など光量を多くとることができる条件を設定できれば、現在の光学システムでも高い時間分解能をもって 3 次元画像記録できる。これは例えば工業用顕微鏡への応用を考えると、LED などのストロボ照明を用いて、1 枚の記録されたホログラムから RGB の全焦点画像を再構成し、RGB の 3 次元画像観察を行うことができる。このことから、光量を一つの指標として、応用展開を考えることが想定される。

本研究課題では、顕微鏡を照明光学系と検出光学系に分けたとき、検出光学系の研究開発を行なったものと位置付けられる。照明系を工夫した超解像顕微鏡との親和性を考えるとき、FINCH に基づく検出系の PSF 改善と、計算コヒーレント多重に基づくマルチカラー同時ホログラムセンシングは、照明系にメリットを与えられ、親和性も高いと考えられる。検出系を工夫し時間分解能を向上させるアプローチに加えて、照明光学系の工夫に取り組む波動光学や生命科学の研究者との連携を通じて、時間、空間、波長、光量などの情報量に対する光学的な設計を見直し、それぞれのトレードオフの限界突破を目指しつつ、求められて要求に応えられる顕微鏡としての成長に繋げたい。

さがけ領域 岡本 亮 氏との共同研究により始まった、単一画素・微弱光多次元ホログラフィックセンシングの研究においては、単一画素センサの広い時間周波数帯域と広ダイナミックレンジの自由度をもって、限られた情報量から如何により多くの情報を得るかに焦点をあてつつ進めたい。ダイナミックレンジ方向に位相や波長の情報をエンコードしセンシング回数を低減することはホログラフィック多重センシングの強みであるが、更なる検出時間の低減に向けて情報科学の積極的な活用にも取り組みたい。また、顕微鏡など光量が制限された条件下における、ホログラムセンシングの限界性能を解き明かすべく、基礎科学研究課題として量子光学の考えを活用して技術の評価や数値的検証を今後も氏と共同で進め、広がりを持たせたい。

#### 4. 自己評価

時間的、空間的にインコヒーレントな光をマルチカラーのホログラムとして単一露光センシングする研究課題を提案した。技術の実証と共に、白色照明光学顕微鏡においてセンサへの結像面から  $21.9\mu\text{m}$  の深さにある  $1\mu\text{m}$  オーダの構造に対して、最高 22 fps でマルチカラーホログラム動画画像センシングを達成した。このことから、描いた構想を概ね達成できたと結論付けられる。白色光、蛍光の単一露光ホログラフィック顕微鏡画像センシングを実証できたことは、顕微鏡観察下においてあらゆる光のホログラフィック動画画像センシングを実現可能であることを示すものであり、コヒーレント光、インコヒーレント光、線形/非線形光を問わずに活用できるホログラフィック顕微鏡法の創出を達成したと自己評価する。一方で、蛍光 3 次元動画画像顕微鏡システムへの応用において、現時点の光学システムで上記のフレームレートを得るには蛍光検出のために強い励起光を照明せねばならず、励起光を弱めながら高倍率で微弱な光を



検出できるように、光学システムを改良する必要がある。光学システムの改良には、”計算コヒーレント多重を用いた波長多重インコヒーレントデジタルホログラフィ”で挙げた研究成果を最大限に活用し、統合された光学システムをもって性能向上を目指すことが一つの有効な策として挙げられる。そのため、とった研究アプローチは妥当であったと評価する。また、同さがけ領域の岡本 亮 氏と共同研究を進め、微弱な光の検出における測定結果の信頼性に対する指標を生み出すことができ、石井 あゆみ 氏と高感度、多機能センシングについて議論に基づき、光学設計のみでは達成しえない情報量の取得可能性を見出すことができ、微弱光多次元ホログラフィックセンシングの基礎研究を推進することができた。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Tatsuki Tahara, Takeya Kanno, Yasuhiko Arai, and Takeaki Ozawa, “Single-shot phase-shifting incoherent digital holography,” J. Opt. (IOP Publishing), **19**, 065705–1–8 (2017).
2. Tatsuki Tahara, Reo Otani, Kaito Omae, Takuya Gothoda, Yasuhiko Arai, and Yasuhiro Takaki, “Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts,” Opt. Express, **25**, 11157–11172 (2017).
3. Tatsuki Tahara and Yutaka Endo, “Multiwavelength-selective phase-shifting digital holography without mechanical scanning,” Appl. Opt. **58**, G218–G225 (2019).
4. Takayuki Hara, Tatsuki Tahara, Yasuyuki Ichihashi, Ryutaro Oi, and Tomoyoshi Ito, “Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography,” Opt. Express (in press)
5. Tatsuki Tahara, Tomoyoshi Ito, Yasuyuki Ichihashi, and Ryutaro Oi, “Multiwavelength three-dimensional microscopy with spatially incoherent light based on computational coherent superposition,” Opt. Lett. (accepted)

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 3 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1. 田原 樹, 大谷礼雄, 「ホログラム記録装置」, 特願 2018-116985 号(出願日 2018 年 6 月 20 日), 特開 2019-219523 号(公開日 2019 年 12 月 26 日), 出願人 学校法人関西大学, シグマ光機株式会社(共願)。

### (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)

#### ・主要な学会発表

#### 【国際会議(招待講演)】

1. T. Tahara, R. Otani, Y. Arai, Y. Takaki, “Multidimensional imaging with phase-shifting interferometry,” The 7th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2017) (Daegu Gyungpook Design Center, Daegu, Korea) (2017/12/21)
2. T. Tahara, T. Ito, R. Okamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, and R. Oi, “Approaches for simultaneous holographic multicolor motion-picture-microscopy sensing of multiple natural

light sources,” OSA Imaging and Applied Optics Congress: Digital holography and 3-D imaging 2020 (DH2020) (Hyatt Regency Vancouver, Vancouver, British Columbia Canada) (2020/6/22-26(予定)).

【国内発表(会議, 研究会, シンポジウム)(招待講演)】

1. 田原 樹, “計算コヒーレント多重に基づく多種光源のホログラフィックマルチカラーセンシング,” 2019 年度千葉大学シンポジウム(GPシンポジウム) (千葉大学西千葉キャンパス) (2019/12/26).

・著作物

【Review 論文(査読付)】

1. J.-P. Liu, T. Tahara, Y. Hayasaki, and T.-C. Poon, “Incoherent Digital Holography: A Review,” Appl. Sci. **8**, 1–18 (2018).
2. T. Tahara, X. Quan, R. Otani, Y. Takaki, and O. Matoba, “Digital holography and its multidimensional imaging applications: a review,” Microscopy (Oxford Academic), **67**, 55–67 (2018).

・報道

1. 2016 年 11 月 20 日(TBS テレビ), 2016 年 11 月 27 日(BS-TBS), TBS テレビ, TV 番組: 未来の起源「カメラ 1 台で立体映像」
2. 2018 年 2 月 21 日, 日経産業新聞 先端技術欄「3 次元カラー撮影 瞬時に」