

氏名（本籍）	米田 成 (大阪府)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第111号
学位授与日付	令和4年3月25日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	ホログラフィック空間光変調技術に基づく多次元光情報のイメージング・センシング・光記録に関する研究
学位論文審査委員	(主査) 教授 野村 孝徳 (副査) 教授 久保 雅弘 教授 松本 正行

## 論文内容の要旨

本研究では、多次元光情報のイメージング・センシング・光記録の各分野における課題を解決するために、回折・干渉現象に基づいた光波を空間的に変調する技術（ホログラフィック空間光変調技術）を応用し、各課題の解決を試みた。イメージングに関しては、三次元空間情報の記録・再生が可能なホログラフィと、単一画素検出器を用いてイメージングができるシングルピクセルイメージング (SPI: Single-Pixel Imaging) の融合技術に着目した。センシングに関しては、強度輸送方程式 (TIE: Transport of Intensity Equation) に基づく定量位相計測 (QPI: Quantitative Phase Imaging) に着目した。光記録に関しては、計算機合成ホログラムに基づくホログラフィックメモリ (CGH-HDS: Computer-Generated-Hologram-based Holographic Data Storage) に着目した。

以下にそれぞれの手法の課題とその解決方法についての概要を示す。

### 1 ホログラフィに基づいた SPI の課題とその解決方法

ホログラフィに基づいた SPI は、光学系が大型であり複雑という課題があった。また、物体光の情報を取得するために位相シフト法を適用する必要があるため、測定数が多いという課題があった。まず、インコヒーレントホログラムが取得できるオプティカルスキャニングホログラフィ (OSH: Optical Scanning Holography) に着目し、その光学系に関する課題の解決法としてモーションレス OSH (MOSH: Motionless OSH) を提案した。また、測定数の課題に対する解決方法として、画素ごとに位相シフト量が異なるホログラムを取得できる並列位相シフト法を応用する方法を提案した。また、MOSH において、蛍光、偏光の多次元光情報をイメージングする内容を提案し、散乱体背後のイメージングが可能であることを示した。さらに、物体による位相遅延量が取得できるシングルピクセルデジタルホログラフィ (SPDH: Single-Pixel Digital Holography) において、光学系が簡易であり位相シフト法が不要な方法を提案した。図 1 に得られた結果を示す。

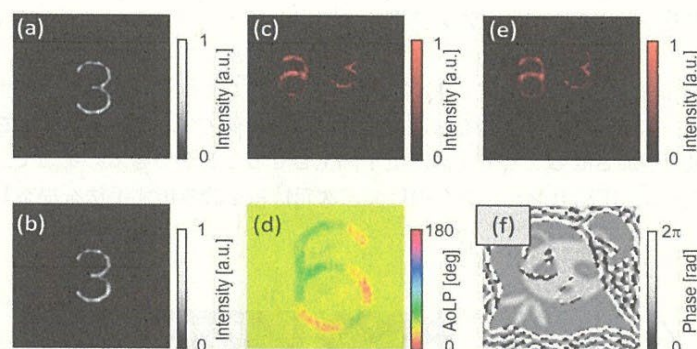


図 1 (a) MOSH, (b) 並列位相シフト法を応用した MOSH, (c) 蛍光イメージング, (d) 偏光イメージング, (e) 散乱体背後のイメージング, (f) SPDH における定量位相イメージングにおいて得られた結果。

### 2 TIE に基づく QPI の課題とその解決方法

TIE に基づく QPI では、複数のデフォーカス像を用いて物体による位相遅延量を取得する。この複数のデフォーカス像を取得する際に撮像素子あるいは物体を光軸方向に正確に走査する必要がある。また、走査速度よりも速く動く対象の計測は不可能である。そこで本研究では、振幅変調型の CGH を光学系に導入し、複数のデフォーカス像を同時に取得し、単一露光により物体による位相遅延量が取得できる単一露光高次強度輸送 QPI (SHOT-QPI: Single-shot Higher-Order Transport-of Intensity QPI) を提案した。SHOT-QPI では、計測対象からの光波を分割して複数のデフォーカス像を同時に取得することと、振幅変調型の CGH を用いることが理由で光利用効率が低いという

課題があった。この光利用効率の課題は位相変調型の CGH を用いることで解決できるが、デフォーカス像に歪が生じるという課題があった。そこで本研究では、デフォーカス像に生じる歪みが原因となり位相計測精度が低下するという問題を解決するために深層学習を用いた SHOT-QPI (Deep-SHOT: Deep-learning-based SHOT-QPI) を提案した。図 2 に得られた結果を示す。

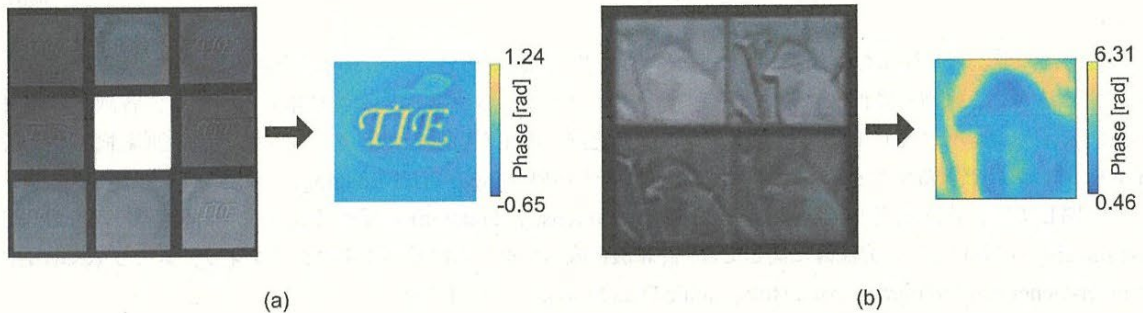


図 2 (a)SHOT-QPI により取得された複数のデフォーカス像および位相計測結果, (b)Deep-SHOT により取得された複数のデフォーカス像および位相計測結果。

### 3 CGH-HDS の課題とその解決方法

CGH-HDS は二光束干渉計を用いる従来の HDS に比べて光学系が小型であり簡易であるという特長がある。しかし、従来の HDS と比較して記録密度が低いという課題があった。また、多値変調ができる振幅変調型の空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) が必要であり、この SLM のリフレッシュレートにデータ転送速度が制限されてしまうという課題があった。まず CGH-HDS における記録密度の課題を解決するために複素振幅情報を活用する手法を提案した。複素振幅情報は直接撮像素子により取得することができないため、TIE に基づく QPI を応用する手法を提案した。TIE に基づく QPI を応用する手法では、CGH-HDS における撮像素子の位置をデフォーカス位置に設置するのみで実現できる。しかし、TIE に基づく QPI を応用する手法では、再生できる情報量が干渉計測法を応用する方法に比べて低いという課題があった。そこで、共通光路型オフアクシスデジタルホログラフィを応用する手法を提案した。共通光路型オフアクシスデジタルホログラフィを応用する手法では、単一光路により記録再生が可能という CGH-HDS の利点を有したまま、TIE に基づく QPI を応用する手法に比べて情報量が多い複素振幅情報を取得することができる。さらに、データ転送速度の課題を解決するために、二値 CGH を用いる手法を提案した。また、HDS ではページデータの情報量を増加させることで記録密度を向上させることができる。そこで三次元空間情報をページデータとして CGH に符号化し、圧縮センシングを用いて三次元情報を読み出す手法を提案した。図 3 に得られた結果を示す。

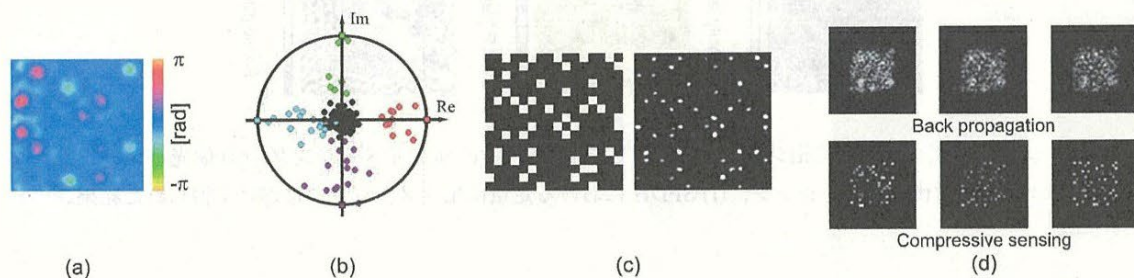


図 3 (a) TIE に基づく QPI を応用した CGH-HDS, (b) 共通光路型オフアクシスデジタルホログラフィを応用した CGH-HDS, (c) 二値 CGH に基づく CGH-HDS, (d) CGH および圧縮センシングに基づく HDS において得られた結果。

本論文において提案した手法は、多次元光情報のイメージング・センシング・光記録の各分野における課題を解決し、当該分野の発展に寄与するものであると期待される。

## 論文審査の結果の要旨

論文内容を審査し、博士論文として必要な条件を満たしていると認められた。計算光学センシングとイメージングおよび光記録に光波の複素振幅分布を生成するホログラフィック空間光変調技術を応用した新規な技術を提案している。具体的には、微弱光下で有効なシングルピクセルイメージングの新しい手法であるモーションレスオプティカルスキヤニングホログラフィ、生体細胞等の透明な試料の計測に有効な強度輸送定量位相計測を単一露光で実現する手法、ホログラフィックメモリの記録容量の向上を実現する手法を提案している。いずれもコンピュータシミュレーション、光学実験によりアイデアの有用性が実証されている。機械学習の定量位相計測への導入や圧縮センシングのホログラフィックメモリへの導入など、最先端の技術を積極的に取り入れたアプローチも興味深い。以上のことから、これらの研究は、光学技術を用いたイメージング、センシング、光記録の各分野のさらなる発展に大きく寄与するものであり、学位論文に値するものと認められた。

## 最終試験の結果の要旨

公聴会・最終試験を2022年2月15日に北1号館A104およびオンラインで実施した。論文の内容および関連する事項に関する試問をおこなった結果、質疑応答が適切であり、最終試験に合格と判断した。

論文審査および最終試験の結果を総合的に検討し、博士学位授与に値すると判断した。