

# 博士學位論文要旨等の公表

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条に基づき、当該博士の学位の授与に係る論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

氏名 施 潤

学位の種類 博士（理工学）

報告番号 甲第29号

学位授与の要件 学位規程第4条第2項該当

学位授与年月日 令和6年3月20日

学位論文題目

空間光位相変調器に基づく光ビームの位相と振幅の  
制御に関する研究

論文審査委員 主査 教授 吉本 直人

委員 教授 唐澤 直樹

委員 教授 張 公儉

# 学 位 論 文 要 旨

理工学研究科 理工学専攻

学籍番号 : D 2210010

氏 名 : 施 潤

## 空間光位相変調器に基づく光ビームの位相と振幅の制御に関する研究

近年、空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) の発展は光子学の様々な応用を大きく促進した。空間光変調器は、画像などの2次元または3次元の光学情報を動的に処理できる装置である。本論文では、空間光変調器の光ビーム制御に関する問題について3つの側面から検討する。SLMに適したシミュレーション方法、渦巻きビームの生成及び自由曲面回折マスクの設計を含む。

フーリエ変換に基づく手法はヘルムホルツ方程式を満たす波場を提供し、これが最も適した回折計算手法である。このため、4つの異なる回折シミュレーション手法を詳細に検討し、最終的に具体的な実現手順を示した。この方法はSLMの回折場出力を効果的にシミュレーションでできることが明らかになった。使用したアルゴリズムは、SLMなどのデジタル光学素子の回折メカニズムと非常に一致している。そのため、SLM上で実現された計算機合成ホログラムを完全にリアルに再現できる。この手法の主な特徴は、回折場の振幅情報だけでなく、位相情報も正確に抽出できることである。ABCD行列と回折シミュレーションを組み合わせ、画像の拡大と縮小を制御できるシミュレーション方法を提供した。この方法は、SLMベースのズームシステムの実現にも適用できる。

LG(Laguerre-Gaussian)ビームとHyG(Hypergeometric)ビームを例に、計算機合成ホログラム(CGH)法を用いて渦巻きビームの生成を実現した。位相ホログラム、二値ホログラム、ハイブリッド型計算ホログラム、正弦ホログラムなど4つのホログラムの特徴を分別的に検討した。位相ホログラムには回折の0次と1次しか存在せず、二値ホログラムはデューティ比によって異なる欠陥現象が現れる。ハイブリッド型計算ホログラムの各回折次数が存在し、正弦ホログラムには0段階と正負1段階しか存在しない。LGビーム生成には最適なカットオフ半径があり、空間帯域幅が非常に広いHyGビームに対して、大きなカットオフ半径を採用した回折結果が理想に近いことが確認された。SLM回折スペクトルの実験値はシミュレーション値とよく一致しており、提供されたシミュレーション手法が有効で信頼性があることを示している。

自由曲面位相回折光学素子の設計は困難な任務であり、通常、複雑な微分方程式または大量の反復計算を使用する必要がある。この問題を解決するための新しい方法を提案した。この方法では、コスト関数の急速な収束を保証するために、全体比較最適化(OCO)を導入した。二次分配問題(QAP)は、自由曲面位相回折光学素子を設計する数学的枠組みとして用いられる。具体的には、幾何光学における光線マッピング計算問題はQAPに簡略化される。この問題を解決するために、コスト関数が「負ではない」方向に急速に進むことを保証するOCOメソッドを適用し、最適化の反復ごとの急速な収束を促進する。このように、提案手法はコスト関数の繰り返し評価に関連する計算負荷を軽減し、設計プロセスにおける収束を加速させる。我々はOCO法を用いてホログラムマスクを構築し、シミュレーションを行い、提案した方法が複雑な照明パターンを迅速に実現する上での潜在力を示した。ハンガリーのアルゴリズムは先人がよくこのような自由曲面設計を解決する方法である。また、既知のQAP解法の中で、シミュレーションアニール(SA)法とOCO法が最も近いことがわかった。ハンガリーのアルゴリズム、OCO法、シミュレーションアニール法を用いて均一照明パターンに対応する位相マップを計算することにより、全面的な比較分析を行った。その結果は図1に示し、この設計モデルは複雑な照明タスクを処理する際に良好な性能を有することが分かった。本文で得られた結論は純位相ホログラフィの実現と自由曲面照明設計の解決案に広めることができる。

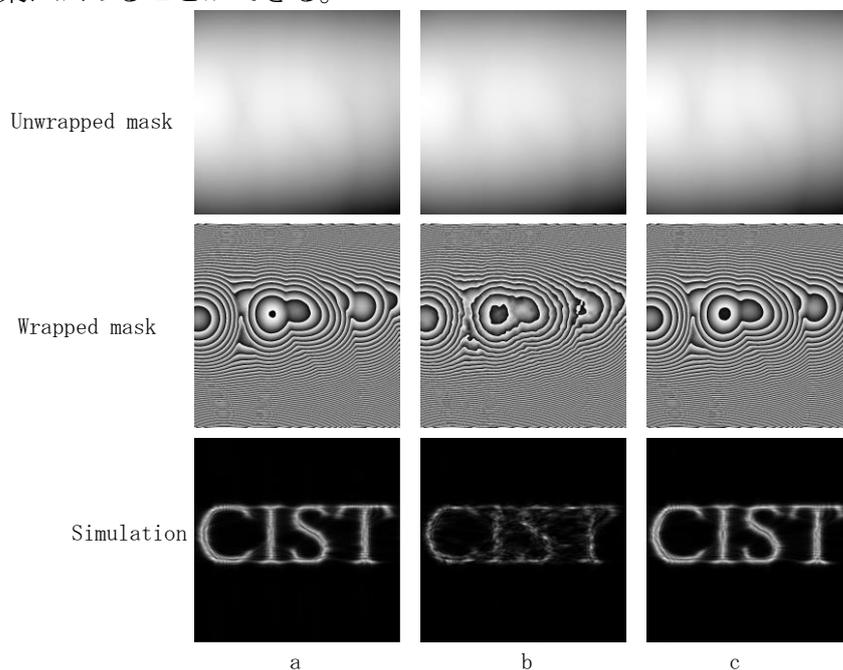


図1. 異なるアルゴリズムで位相マスクとそれらのシミュレーションを計算し。(a)ハンガリーアルゴリズム、(b)SAアルゴリズム、(c)OCOアルゴリズム

## 論文審査の結果の要旨

本論文の取り扱う分野は、近年注目を集めている「デジタル光情報処理」分野のデジタルホログラフィ技術に関するものである。その中で光空間変調器は、光ビームの強度・位相・偏波などを自在に変化させることによって、リアルタイムにデジタルホログラフィを実現する上で重要なデバイスとなる。しかしながら、これまで光空間変調器を設計するためのシミュレーション技術やその検証としての評価方法については十分に検討が行われてこなかった。また、構造の複雑さや光空間変調器の大型化を考慮したシミュレーション時間の効率化の検討についてもほとんど行われてこなかった。

そこで、本論文では、これらの課題に対して、3つの観点から研究を行い、成果を挙げた。

1つ目は、光空間変調器におけるビームの回折をシミュレーションする効果的な手法を、4つの異なる方法を比較検討することで明らかにした。

2つ目は、前述したシミュレーション手法の妥当性を検証するための手段として、位相情報を含めた正確で安定した測定方法を提案し、実証したことである。

3つ目は、より複雑な構造の光空間変調器を設計するために、自由な曲面を有する光空間変調器の設計手法を提案するとともに、アルゴリズムを工夫することによって大幅に計算リソースの削減を実証したことである。

以上のように、いずれも学術的、実用的に価値あるものである。

上記学位論文の内容をもとに、40分間のプレゼンテーションを行った後、質疑応答を行った。プレゼンテーションは、上記3つの観点を中心に簡潔に要点がまとめられていた。質疑応答では以下のような内容の議論を行った。

- ・この技術の適用領域
- ・この技術の拡張性（どの程度大きな光空間変調器まで対応可能なのか）
- ・この技術の汎用性（どの程度の非対称な物体に対して適応可能なのか）
- ・シミュレーションに関する具体的な手法と精度について
- ・その他のアルゴリズムとの比較について

いずれの項目に対しても、しつかりとした技術的見識から一般的な回答に加え、自らの意見を述べていた。

以上、申請者は、技術的な見識や関連技術に対する視野の広さ、また社会課題に対する技術の位置付けの理解などいずれにおいても高いレベルに達しており、理工学の学位取得に相応しい人物であると考えます。

論文の査読とその内容についてのプレゼンテーションならびにその技術的内容に関する質疑応答を行った後、「理工学」学位に資する幅広い見識を見るため、主査・副査の委員にて口頭試問を行った。「その結果、合格」の結論を得た。以下に、その理由について示す。

口頭試問において、質疑応答にあった内容を以下に示す。

- ・シミュレーション手法の制限要因について

- ・ 3Dホログラフィを実用化する上での課題について
- ・ この技術を用いた新たな応用領域について
- ・ 今後の検討課題について

いずれの項目に対しても、しっかりとした技術的見識から、いずれも的確に回答するとともに、今後発展していく関連技術の動向について自らの考えを述べていた。

以上、申請者は自らの技術的成果のみならず、その技術の適用範囲・技術的限界、オルタナティブな技術への洞察・理解、技術の導入が社会に与える効果などを論理的かつ平易に説明できる能力を有しており、理工学の学位取得に相応しい人物であると考える。