

氏名	かほう 夏 鵬
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学位記番号	博 甲 第 7 4 4 号
学位授与の日付	平成 27 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	デジタルホログラフィを用いた分光推定イメージング
審査委員	(主査)教授 栗辻安浩 教授 裏 升吾 教授 村田 滋

### 論文内容の要旨

デジタルホログラフィは物体の 3 次元像を干渉縞として撮像素子で記録し、計算機で再生できる技術である。一方、分光画像技術は物体の分光反射率あるいは分光透過率分布を画像として記録・解析することで、物体を構成する物質やその状態の計測・分析に有力な技術である。デジタルホログラフィでは一般に、単波長あるいは有限数の波長のレーザ光を用いるために、3 次元物体に対して連続スペクトルに対する分光反射率分布の取得が困難である。本論文では、分光推定技術をデジタルホログラフィに導入し、動く物体の 3 次元空間情報と分光画像情報を同時取得可能な技術として分光推定デジタルホログラフィを提案し、提案技術に基づくシステムの設計、試作、評価について述べている。また、動く物体の 3 次元動画画像計測技術である並列位相シフトデジタルホログラフィの性能を向上できる計測範囲拡大アルゴリズム及び残留 0 次回折光除去アルゴリズムの提案とその有効性の実証について述べている。

第 3 章では、分光推定技術をデジタルホログラフィに導入し、動く物体の 3 次元空間情報と分光情報を同時取得可能な分光推定デジタルホログラフィの原理を述べている。また、デジタルホログラフィにおいて、分光推定を融合させる際の分光推定の処理流れ、推定用の行列の変化について詳述している。

第 4 章から第 6 章では、分光推定技術を 3 種のデジタルホログラフィシステム(位相シフト分光推定デジタルホログラフィシステム、off-axis デジタルホログラフィによるシングルショット分光推定デジタルホログラフィシステム、並列位相シフト分光推定デジタルホログラフィシステム)に応用し、各システムの設計、試作、実験的評価について述べている。

第 4 章では、赤、緑、青 の 3 原色に対応する 3 波長(633nm, 532nm, 473nm)のレーザを利用し、広範囲、高精度で撮影可能な位相シフト分光推定デジタルホログラフィシステムの試作について述べている。分光反射率が既知である Macbeth Color Checker 24 色 小型サイズを被測定物体として用いて、提案技術の実証実験を行っている。推定した物体の分光反射率分布は真値に近いことを実証し、本システムの有効性を示している。更に、仮定した振幅と位相をもつ物体に対して、提案技術の計算機シミュレーションを行い、分光反射率推定誤差の要因を分析している。計算機シミュレーション結果と実験結果を比較することで、用いた波長数が少ないことが、推定誤差の主要な原因であることを明らかにしている。

第 5 章では、複数波長を用いて記録するデジタルホログラフィの記録時間を短縮するために、角度多重記録が可能である off-axis デジタルホログラフィによるシングルショット分光推定デジタルホログラフィシステムを考案し、その技術に基づくシステムの試作について述べている。シングルショットで複数波長のホログラムを記録する光学系、および本技術の像再生手法について述べている。食品の一例としてレモンを被検物体として設定した実験を行っている。分光測色

計を用い、24個のレモンの反射率を事前に測定してサンプル集合として用意し、分光反射率が未知の被検物体に対して試作システムにより推定した分光反射率分布は、分光測色計による結果と良く一致し、提案システムの有効性を示している。

第6章では、高速に動く物体を記録できる並列位相シフト分光推定デジタルホログラフィシステムについて述べている。並列位相シフトカラーデジタルホログラフィにカラーフィルタアレイと偏光カメラを用いて構成する並列位相シフト分光推定デジタルホログラフィシステムを示している。また、提案技術におけるホログラムの記録と像再生アルゴリズムを述べている。さらに、原理実験を行い、位相シフト分光推定デジタルホログラフィの実験結果と比較し、本システムの性能を評価している。

第7章では並列位相シフトデジタルホログラフィの性能を向上できる計測範囲拡大アルゴリズム及び残留0次回折光除去アルゴリズムについて述べている。並列位相シフトデジタルホログラフィの像再生アルゴリズムでは再生像の計測範囲が狭くなり、画質が劣化する原因を解析して特定している。提案アルゴリズムでは、並列位相シフトデジタルホログラフィの像再生処理に必要な、各位相シフトしたホログラム中の欠落画素に対して3種類の補間を用い、それぞれの像を再生する。各再生像に対して、空間周波数領域において異なる区域ごとに最も有効的な補間方法を採用・合成することによって画像の端における誤差を低減できる。さらに、偏光カメラを用いて構成する並列位相シフトデジタルホログラフィシステムにおいて0次回折光成分を完全には除去できないという問題に着目し、その成分を計算により除去するアルゴリズムを述べている。本アルゴリズムでは、像再生に必要な2枚のホログラム画像と参照光強度分布画像を複数の範囲に分割し、各範囲に対して適切な補正值を与えることにより、残留0次回折光成分を除去できる。本アルゴリズムを実証し、その有効性を示している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、動く物体の3次元空間情報と分光画像情報を同時に取得可能な分光推定デジタルホログラフィを提案し、3種類の分光推定デジタルホログラフィシステムの設計、試作、評価、ならびに、並列位相シフトデジタルホログラフィにおいて計測範囲拡大アルゴリズムの提案と実証、0次回折光が残留する問題の要因解明、解決法考案と実証についてまとめたものである。また、定量的評価により分光推定デジタルホログラフィの推定誤差要因解明と誤差低減方法ならびに、性能の向上方法をまとめている。

これらの成果は、動く物体の3次元空間情報と分光画像情報の同時取得、動画像計測において他技術にない性能を有することを示し、多くの物理量を同時取得可能であることを示しており、工業製品の検査、食品検査、医療分析、病理解析などに非常に有用であると認められる。

当該論文は、レフェリー制度の確立した以下の5編の学術論文を基礎としており、申請者が全ての論文の筆頭著者である。

1. P. Xia, T. Tahara, M. Fujii, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Removing the residual zeroth-order diffraction wave in polarization-based parallel phase-shifting digital holography system," *Appl. Phys. Express* **4**, pp.072501-1-3 (2011).
2. P. Xia, Y. Shimozato, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Image reconstruction algorithm for recovering high-frequency information in parallel phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **52**, pp.A210-A215 (2013).
3. P. Xia, Y. Ito, Y. Shimozato, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Digital holography using spectral estimation technique," *IEEE/OSA J. Display Technol.* **10**, pp.235-242 (2014).
4. P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holography using spectral estimation technique," *Appl. Opt.* **53**, pp.G123-G129 (2014).
5. P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, O. Matoba, "Single-shot digital holography using spectral estimation technique," *Appl. Spectrosc.* **68**, pp.1296-1301 (2014).

また、関連参考論文として、レフェリー制度の確立した学術論文に以下の3編を筆頭著者として発表している。

1. P. Xia, Y. Shimozato, Y. Ito, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Improvement of color reproduction in color digital holography by using spectral estimation technique,"

- Appl. Opt.* **50**, pp.H177-H182 (2011).
2. P. Xia, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Performance comparison of bilinear interpolation, bicubic interpolation, and B-spline interpolation in parallel phase-shifting digital holography," *Opt. Rev.* **20**, pp.193-197 (2013).
  3. P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "One million fps digital holography," *Electron. Lett.* **50**, pp.1693-1695 (2014).

以上から、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらには工学的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。