

|             |   |
|-------------|---|
| 氏 名         | たはら たつき<br><b>田原 樹</b>                                |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 ( 工 学 )   |
| 学 位 記 番 号   | 博 甲 第 6 6 4 号   |
| 学位授与の日付     | 平成 25 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 | <b>並列デジタルホログラフィにおける計測範囲の広域化と顕微鏡応用および多次元イメージングへの拡張</b> |
| 審 査 委 員     | (主査)准教授 栗辻安浩<br>教授 裏 升吾<br>教授 村田 滋<br>教授 中森伸行         |

## 論文内容の要旨

物体の 3 次元情報の取得のために種々の 3 次元計測技術が考案される中、ホログラフィは非常に深い深度で動的現象の高速・高精度 3 次元動画画像記録可能という特徴を有する。本論文では、複数種類のホログラムを空間分割多重記録する並列デジタルホログラフィにおいて、面内方向及び深さ方向の計測範囲の広域化及び計測精度向上、3 次元動画画像顕微鏡応用、偏光分布、複数波長の同時記録への拡張について述べている。

第 2 章では、並列デジタルホログラフィにおける空間分割多重数による影響の理論的および実験的評価について述べている。撮影可能範囲である視野と視差記録範囲である視域の物理モデルを構築し、記録可能な空間情報量を示す指標である空間周波数帯域を評価している。数値計算により分割多重数を 4 から 2 へ減らすことで視野、視域共に 1.4 倍以上広域化可能であると示している。原理確認実験により、位相シフト法に必要なホログラムを空間分割多重記録する並列デジタルホログラフィにおいて、分割多重数を 4 から 2 へ減らすことでより高い SN 比で広範囲の 3 次元像が再生可能であると述べている。また、分割多重数を 4 から 2 とすることで空間周波数帯域を半径で 1.4 倍広げられると述べている。代表的な方式の 1 つである off-axis デジタルホログラフィに比べ、分割多重数 4,2 の並列デジタルホログラフィが帯域を半径でそれぞれ 1.56 倍、2.21 倍広げられると定量的に示している。

第 3 章から第 6 章では、分割多重数 2 の並列デジタルホログラフィのシステム考案、装置試作に加え、不要な像成分の除去や従来の像再生処理手続の性能評価、広範囲の像を再生可能な処理手続の提案など、装置構成だけでなくアルゴリズムの考案・改良による装置の高精度化、計測範囲広域化について述べている。

第 3 章では、偏光を利用する分割多重数 2 のシステムを考案・設計し、システムに必要な、ホログラムを 2 分割多重記録する微小偏光子アレイ付き撮像素子を試作した後に装置を試作、そして方式の実証に成功している。一方で、所望の像以外の光成分が若干残留するという課題を実験により示している。

第 4 章では、第 3 章で示した不要な光成分の残留の一端には試作した微小偏光子アレイの消光比が 10:1 程度と低いことにありと述べている。消光比が有限である場合に得られるホログラムの物理モデルを構築したところ、低い消光比によってホログラムの記録誤差が生じることを明らかにした。その問題解決のために、記録誤差を補償するアルゴリズムを構築し、その有効性を計算機シミュレーションにより定量的に示した。そして、実験結果より不要光を除去できることを実証した。

第 5 章では、第 3 章で示した不要な光成分が残留するもう一つの原因は、並列デジタルホログラフイー一般に起こり得るものであると述べている。また、不要な像成分を残留させないためのアルゴリズムを考案し、不要な像成分が完全に除去されることを実験により示している。

第 6 章では、並列デジタルホログラフイーにおいて報告されてきた像再生処理手続の像再生特性と新たな像再生手続の提案について述べている。従来の像再生処理手続では、方式で記録可能な空間周波数帯域に対し帯域の一部の情報が劣化して像再生されることを実験的に明らかにしている。そして、記録可能な帯域全体の情報を劣化させずに像再生可能なアルゴリズムを提案し、その有効性を定量的に示している。

第 7 章では、深さ方向の計測範囲の広域化および精度向上を達成可能な並列デジタルホログラフイーの提案について述べている。単一波長で照射角度の異なる複数の物体照明光と偏光を利用し、位相接続法に必要なホログラムを空間分割多重記録する方式を提案している。計算機シミュレーションにより 10 $\mu$ m オーダ、mm オーダの深さの物体への適用可能性を示している。また、光学システムを構築し、技術の実証及び 9000 倍以上の高さ範囲広域化を示している。

第 8 章では、並列デジタルホログラフイーの顕微鏡応用について述べている。3 章で構築した並列デジタルホログラフイーシステムと顕微鏡システムを融合させることで、微視的領域の単一露光 3 次元画像記録、定量位相画像同時記録を実証している。また、高速 3 次元動画画像ホログラフィック顕微鏡システムを構築することで、空間分解能 5.7 $\mu$ m、時間分解能 6.67 $\mu$ s で深さ 6mm にわたり水中を泳動する生体の 3 次元動画画像記録に成功している。

第 9 章では、並列デジタルホログラフイーに基づく偏光分布、複数波長の同時記録方法について述べている。3 次元構造、定量位相分布、偏光分布、複数波長を単一露光で同時記録する方式を提案し、要素技術である 3 次元構造と偏光分布の単一露光同時記録、単一単色撮像素子を用いた 3 次元構造と複数波長の単一露光同時記録の実証にそれぞれ成功している。また、要素技術の顕微鏡応用可能性もそれぞれ実験的に示している。計算機シミュレーションにより本章で提案している方式の有効性を定量的に示し、光学システム構築時の指針を示している。

## 論文審査の結果の要旨

ホログラフイーは非常に深い深度で動的現象の高速・高精度 3 次元動画画像記録可能という特徴を有する。本論文は、複数種類のホログラムを空間分割多重記録する並列デジタルホログラフイーにおいて、面内方向及び深さ方向の計測範囲の広域化、3 次元動画画像顕微鏡応用、偏光分布、複数波長の同時記録への拡張についてまとめたものである。定量的評価により並列デジタルホロ

グラフィの性能を明らかにした後、装置の試作と実証、誤差要因解明と解決法考案、深さ方向の高精度・広範囲計測法の考案と実証、顕微鏡システムの構築と微小生体の高速・深度 3 次元動画記録、偏光分布、複数波長の同時記録方法の考案と要素技術の実証を行っている。

これらの成果は、並列デジタルホログラフィが高速 3 次元動的現象の深度・高分解動画イメージング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、高速動的現象の観察、物質同定、物理量可視化・解析において非常に有用であると認められる。

本論文は、レフェリー制度の確立した以下の 13 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. Tatsuki Tahara, Yuki Shimozaoto, Peng Xia, Yasunori Ito, Takashi Kakue, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Removal of residual images in parallel phase-shifting digital holography," *Optical Review* **20** pp.7-12 (2013).
2. Tatsuki Tahara, Akifumi Maeda, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Parallel phase-shifting dual-illumination phase unwrapping," *Optical Review* **19**, pp.366-370 (2012).
3. Tatsuki Tahara, Akifumi Maeda, Yasuhiro Awatsuji, Takashi Kakue, Peng Xia, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Single-shot dual-illumination phase unwrapping using a single wavelength," *Optics Letters* **37**, pp.4002-4004 (2012).
4. Tatsuki Tahara, Yuki Shimozaoto, Peng Xia, Yasunori Ito, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Osamu Matoba, and Toshihiro Kubota, "Algorithm for reconstructing wide space-bandwidth information in parallel two-step phase-shifting digital holography," *Optics Express* **20**, pp.19806-19814 (2012).
5. Tatsuki Tahara, Ryosuke Yonesaka, Seiji Yamamoto, Takashi Kakue, Peng Xia, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "High-speed three-dimensional microscope for dynamically moving biological objects based on parallel phase-shifting digital holographic microscopy," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **18**, pp.1387-1393 (2012).
6. Tatsuki Tahara, Yuki Shimozaoto, Takashi Kakue, Motofumi Fujii, Peng Xia, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Comparative evaluation of the image-reconstruction algorithms of single-shot phase-shifting digital holography," *Journal of Electronic Imaging* **21**, pp.013021-1-10 (2012).
7. Tatsuki Tahara, Yasuhiro Awatsuji, Yuki Shimozaoto, Takashi Kakue, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Single-shot polarization-imaging digital holography based on simultaneous phase-shifting interferometry," *Optics Letters* **36**, pp.3254-3256 (2011).
8. Tatsuki Tahara, Kenichi Ito, Takashi Kakue, Motofumi Fujii, Yuki Shimozaoto, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Compensation algorithm for the phase-shift error of polarization-based parallel two-step phase-shifting digital holography," *Applied Optics* **50**, pp.B31-B37 (2011).
9. Tatsuki Tahara, Takashi Kakue, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and

- Osamu Matoba, "Parallel phase-shifting color digital holographic microscopy," *3D Research* **1**, pp.04(2010)05-1-6 (2010).
10. Tatsuki Tahara, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Comparative analysis and quantitative evaluation of the field of view and viewing zone of single-shot phase-shifting digital holography using space-division multiplexing," *Optical Review* **17**, pp.519-524 (2010).
  11. Tatsuki Tahara, Kenichi Ito, Takashi Kakue, Motofumi Fujii, Yuki Shimoizato, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Parallel phase-shifting digital holographic microscopy," *Biomedical Optics Express* **1**, pp.610-616 (2010).
  12. Tatsuki Tahara, Kenichi Ito, Motofumi Fujii, Takashi Kakue, Yuki Shimoizato, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Experimental demonstration of parallel two-step phase-shifting digital holography," *Optics Express* **18**, pp.18975-18980 (2010).
  13. Tatsuki Tahara, Yasuhiro Awatsuji, Atsushi Kaneko, Takamasa Koyama, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, and Osamu Matoba, "Parallel two-step phase-shifting digital holography using polarization," *Optical Review* **17**, pp.108-113 (2010).

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 2 編を筆頭著者として発表している。

1. Tatsuki Tahara, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Osamu Matoba, and Toshihiro Kubota, "Space-bandwidth capacity-enhanced digital holography," *Applied Physics Express* **6** (2013). pp. 022502-1-3.
2. Tatsuki Tahara, Yuki Shimoizato, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Osamu Matoba, and Toshihiro Kubota, "Spatial-carrier phase-shifting digital holography utilizing spatial frequency analysis for the correction of the phase-shift error," *Optics Letters* **37**, pp.148-150 (2012).

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。