

氏 名	かくえ たかし <b>角江 崇</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 6 3 2 号
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 26 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>ホログラフィによる高速度 3 次元動画イメージングとその高機能化</b>
審 査 委 員	(主査)教授 裏 升吾 教授 村田 滋 教授 中森伸行 准教授 栗辻安浩

## 論文内容の要旨

物体の 3 次元情報の取得は、物体の表面形状や位置情報の計測に有用であるが、従来技術では光源や検出装置の走査を必要とし、そのため記録速度の向上に限界があった。本論文では、ホログラフィの一種である並列位相シフトディジタルホログラフィ（並列 PSDH）に基づいて、ミリ秒やマイクロ秒領域の高速現象の高速度 3 次元動画イメージングを可能にする装置の設計、試作、および評価についてまとめている。また、試作装置の超高時間分解能化、多波長化、高画質化の実現可能性について実験的に検討している。

第 2 章では、並列 PSDH を実現する上での課題、実証装置の設計、試作、実証実験について述べている。まず、2 本のゴム紐が振動する様子を記録し、高速度 3 次元動画イメージングを実証している。試作装置で得られる再生像の分解能が、物体の動きが速くなるほど低下することを実験的に示し、試作装置の偏光カメラのシャッタ速度を高速にすることで鮮明な再生像が得られることを実証した。さらに、圧縮ガスの噴射で生じる空気密度変化を記録し、高速度位相イメージングを実証している。また、試作装置の性能を評価し、時間分解能約 4 $\mu$ s、面内空間分解能約 50 $\mu$ m が得られることを示している。

第 3 章、第 4 章では、試作装置の超高時間分解能化について記述している。並列 PSDH の時間分解能はカメラのシャッタ速度で制限されるが、ここではピコ秒やフェムト秒領域の超高速現象の記録のための基礎検討について述べている。

第 3 章では、試作装置の光源にパルス時間幅 96fs の光パルスを発するレーザを用い、光パルスの時間幅に相当する時間分解能が得られることを実験的に示している。フェムト秒光パルスの使用に際して新たに考案した方法に基づいて、試作装置の光学系を改良し、鮮明な再生像が得られることを示している。

第 4 章では、光パルス伝播の様子を時間的・空間的に連続な動画像で記録・観察可能な light-in-flight (LIF) ホログラフィの導入について述べている。予備検討として、フェムト秒光パルスを用いるディジタル LIF ホログラフィの計算機シミュレーションについて示し、実験により

パルス時間幅 96fs の光パルスが 576fs の間伝播する様子の動画像を取得している。さらに、デジタル LIF ホログラフィの再生像の時間分解能と空間分解能の関係について考察している。

第 5 章では、多波長を用いる並列 PSDH の原理確認実験について述べている。まず、赤、緑、青の三原色を記録光源に用いる並列 2 段階位相シフトカラーデジタルホログラフィを提案、計算機シミュレーションしている。また、可視光と近赤外光の 2 波長を用いる並列 PSDH により、動く物体の表面形状と内部構造を同時に取得可能な 3 次元動画イメージング手法を提案、計算機シミュレーションしている。いずれも実験により原理確認している。

第 6 章では、試作装置で得られる再生像の高画質化について述べている。4 方向の偏光方向の光を画素ごとに独立に検出可能な偏光検出機能を備えた撮像素子を用いてホログラムを記録する場合に、従来よりも高画質な再生像が得られるアルゴリズムを提案し、その有効性を計算機シミュレーション及び実証実験により示している。振幅分布の平均平方二乗誤差の 25% 減少を確認している。

## 論文審査の結果の要旨

ミリ秒からマイクロ秒領域の高速現象の 3 次元動画イメージングは従来技術では実現が困難であった。本論文は、ホログラフィの一種である並列位相シフトデジタルホログラフィ（並列 PSDH）に基づいたイメージング装置の設計、試作、評価についてまとめたものである。例としてゴム紐振動を用いて、高速度 3 次元動画イメージングを実証している。また、装置の高機能化のために、光パルスを用いた超高時間分解能の実現、多波長記録、高画質化のためのアルゴリズムについても検討している。

これらの成果は、試作装置が、燃料噴霧や衝撃波などの粒子・流体計測、工場の生産ラインにおける高速製品検査、高速飛翔体の位置計測などへ応用可能であることを示しており、高速物体、高速現象の評価・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 5 編の学術論文を基礎としている（印刷中含む）。

1. T. Kakue, K. Tosa, J. Yuasa, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, “Digital light-in-flight recording by holography by use of a femtosecond pulsed laser,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **18**, 479 (2012).
2. T. Kakue, R. Yonesaka, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography,” *Optics Letters* **36**, 4131 (2011).
3. T. Kakue, K. Ito, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Parallel phase-shifting digital holography capable of simultaneously capturing visible and invisible three-dimensional information,” *IEEE/OSA Journal of Display Technology* **6**, 472 (2010).
4. T. Kakue, Y. Moritani, K. Ito, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Image quality improvement of parallel four-step phase-shifting digital holography by using the algorithm of parallel two-step phase-shifting digital holography,” *Optics Express* **18**, 9555 (2010).

5. T. Kakue, T. Tahara, K. Ito, Y. Shimoato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Parallel phase-shifting color digital holography using two phase shifts,” *Applied Optics* **48**, H244 (2009).

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 編を発表している。

1. T. Kakue, M. Aihara, T. Takimoto, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, “Moving picture recording and observation of visible femtosecond light pulse propagation,” *Japanese Journal of Applied Physics* **50** 050205-1 (2011).
2. T. Kakue, M. Kuwamura, Y. Shimoato, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Optical-path-length-shifting color digital holography,” *Optical Review* **18**, 180 (2011).
3. T. Kakue, M. Makino, M. Aihara, A. Kuzuhara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, “Light-in-flight recording by holographic microscope and its numerical verification,” *Japanese Journal of Applied Physics* **48**, 09LD01-1 (2009).

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。