

氏名	井上 智好 いのうえ ともよし
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第 1082 号
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 24 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 電子システム工学専攻
学位論文題目	光伝播の複数動画像をワンショット記録可能な超高速動画イメージング技術
審査委員	(主査)教授 粟辻 安浩 教授 裏 升吾 教授 村田 滋

論文内容の要旨

伝播する光を画像、特に動画像で記録、観察することは、光学顕微鏡による生体深部イメージングを妨げる光散乱やレーザ加工および治療のメカニズム解明に有用である。しかしながら、光が持つ強度情報以外の物理量の記録や極短い時間間隔で発生する複数の光伝播を記録することが困難であった。本論文では、光パルスの伝播を動画像として一度の露光で記録できる light-in-flight ホログラフィに基づいて、光伝播とその偏光情報や極短時間で発生する光伝播を複数動画像として記録する、光伝播の複数動画像をワンショット記録可能な超高速動画イメージング技術についてまとめている。また、提案技術を用いて、光伝播の拡大動画像記録時に動画像の記録時間が不足する課題も解決可能であることを示した。さらに、ホログラムを撮像素子で記録をする場合に光パルスが撮像素子を照明する領域に着目し、再生像の計算に用いるホログラムのサイズと再生像の関係を定式化し、実験的に評価している。

第 2 章では、light-in-flight ホログラフィにおける光伝播の複数動画像を多重記録する方式として、角度多重で記録する方法を提案し、その可能性を実証した。参照光パルスの入射角度の大きさを調整し、異なる空間的なサイズを持つ物体光パルスを記録できることを示し、得られる動画像の特性や技術の特徴を評価した。一方、角度多重記録方式では多重記録できる動画数が参照光パルスの数に依存し、4 つ以上の動画像を多重記録することが困難であった。よって、光伝播の複数動画像記録には適していないと結論付け、空間分割多重記録方式を light-in-flight ホログラフィに導入することとした。

第 3 章では、空間分割多重記録方式を導入した light-in-flight ホログラフィを用いて、光伝播の様子と光伝播を構成する複数の直線偏光成分の様子をワンショット記録する技術を創出した。光伝播を構成する複数の直線偏光成分を記録するため、偏光子フィルタアレイを作製して参照光パルスに直線偏光の空間的な分布を与えた。この参照光パルスを用いてホログラムを鉛直方向に分割し、場所ごとに物体光パルスの異なる直線偏光成分を記録した。実証実験では、既知の直線偏

光分布を与えた超短パルス光と方解石中を伝播する超短光パルスの動画像記録に成功し、提案法の有効性を示した。

第4章では、極短時間差で発生する複数の光伝播をワンショット記録できる技術を創出した。偏光フィルタアレイを用いた空間分割多重記録方式を導入し、異なる光伝播を記録材料の鉛直方向に分割して記録した。遅延光学系を用いて複数の超短パルス光の間に極短時間差を与えて複数の光伝播を発生させ、これらの光伝播をワンショットで動画像記録する実証実験を行った。その結果、第一および第二の光伝播は重複が無い状態で記録され、再生像面で観察に成功した。さらに、極短時間間隔で伝播する複数の超短光パルスを撮像素子によりデジタル記録する技術を創出した。偏光フィルタアレイではフィルムで生じる回折の効果や撮像素子のサイズに合わせたアレイの作成が困難であったため、偏光イメージングカメラを用いた空間分割多重記録方式を提案した。最後に、ホログラムをデジタル記録し、光伝播の複数動画像記録が可能であることを示した。

第5章では、light-in-flightホログラフィで光伝播を拡大動画像記録する技術を創出した。はじめに、拡大光学系の導入に伴って物体光パルスが記録材料を照明する速度が変化することに着目し、光伝播の拡大記録に用いる光学系を検討した。光線追跡法に基づく計算機シミュレーションにより、拡大記録時の像を求め、光学系の条件を明らかにした。さらに、像を記録できる範囲や動画像の記録可能時間を十分に確保するには、物体光パルスと参照光パルスの入射角度や拡大率を調節する必要があることを示した。最後に、拡大観察時の動画記録可能時間を延長する方法を導入し、拡大観察時の動画像記録時間を二倍に延長することに成功した。

第6章では、デジタルlight-in-flightホログラフィの記録過程において、記録条件から参照光パルスが撮像素子を照明する範囲を定式化し、像再生に用いるサブホログラムの大きさの指標とした。次に、参照光パルスの照明範囲を考慮した大きさのサブホログラムで得られる像を評価した。その結果、照明範囲に相当する撮像素子上の画素数のサブホログラムから像を再生すると、スリットによる回折効果や計算に用いるホログラムが像再生に不十分な大きさとなるため情報量が低下し、正確な光伝播の像を得られないことがわかった。照明範囲が複数含まれるサイズのサブホログラムから像を再生すると、再生像の解像度のみが変化することを見出した。

論文審査の結果の要旨

伝播する光を画像、特に動画像で記録、観察することは、光学顕微鏡による生体深部イメージングを妨げる光散乱やレーザ加工および治療のメカニズム解明に有用である。しかしながら、光が持つ強度情報以外の物理量の記録や極短い時間間隔で発生する複数の光伝播を記録することが困難であった。本論文では、光パルスの伝播を動画像として一度の露光で記録できるlight-in-flightホログラフィに基づいて、光伝播とその偏光情報や極短時間で発生する光伝播を複数動画像として記録する、光伝播の複数動画像をワンショット記録可能な超高速動画イメージング技術について

てまとめている。また、提案技術を用いて、光伝播の拡大動画像記録時に動画像の記録時間が不足する課題も解決可能であることを示した。さらに、ホログラムを撮像素子で記録する場合に光パルスが撮像素子を照明する領域に着目し、再生像の計算に用いるホログラムのサイズと再生像の関係を定式化し、実験的に評価している。

これらの成果は提案技術が、偏光の超高速制御を行う材料・デバイスの動作メカニズムの解明や極短時間差を有した超短パルスによるレーザ加工のメカニズム解明などへの応用可能性を示唆しており、光伝播および光伝播が関連する超高速現象の解析・評価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7編の学術論文を基礎としている。

- [1] T. Inoue, T. Kakue, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Multiple motion picture recording in light-in-flight recording by holography with an angular multiplexing technique,” *Journal of the Optical Society of America A* **40**, pp. 370-377 (2023).
- [2] T. Inoue, K. Nagao, A. Matsunaka, T. Kokubu, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Motion-picture recording of light pulses with ultrashort time difference by polarization camera,” *IEEE Photonics Technology Letters* **34**, pp. 931-934 (2022).
- [3] T. Inoue, K. Nagao, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Ultrafast double motion-picture recording technique for propagating light pulses with an ultrashort time difference,” *Optics Letters* **47**, pp. 3407-3410 (2022).
- [4] T. Inoue, M. Sasaki, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Numerical analysis of reconstructed image of light-in-flight recording by holography with a magnifying optical system,” *Applied Physics B* **128**, Article number 53 (2022).
- [5] T. Inoue, T. Aoyama, Y. Sawashima, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Motion picture of magnified light pulse propagation with extending recordable time of digital light-in-flight holography,” *Applied Optics* **61**, pp. B206-B214 (2022).
- [6] T. Inoue, M. Sasaki, K. Nishio, T. Kubota, and Y. Awatsuji, “Influence of the lateral size of a hologram on the reconstructed image in digital light-in-flight recording by holography,” *Applied Optics* **60**, pp. B59-B63 (2021).
- [7] T. Inoue, A. Matsunaka, A. Funahashi, T. Okuda, K. Nishio, and Y. Awatsuji, “Spatiotemporal observations of light propagation in multiple polarization states,” *Optics Letters* **44**, pp. 2069-2072 (2019).

以上から、本論文の内容は十分な新規性と独創性、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。