

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286062

研究課題名(和文)フェムト秒光パルスの偏光伝播の3次元動画像記録・観察とその超高速現象観察への応用

研究課題名(英文)Three-dimensional motion picture recording and observation of propagations of polarization components of femtosecond light pulse

研究代表者

粟辻 安浩 (Awatsuji, Yasuhiro)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：80293984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フェムト秒レーザーを用いたホログラフィにより伝播する光を構成する偏光成分が空間を伝播する様子を3次元像動画像として、その偏光も同時記録・再生できる技術を開発した。まず、記録媒体にホログラフィック乾板を用いたシステムを構築し、透過物体中を伝播する光を構成する複数の直線偏光成分の伝播の様子を3次元像として時間的にも空間的にも連続な動画像として同時記録に成功した。次に、この技術においてイメージセンサで記録し、コンピュータにより像再生する技術を開発した。実験システムを構築し、伝播する光を構成する複数の直線偏光成分の伝播の様子を3次元像としてデジタル動画像として同時動画像記録に成功した。

研究成果の概要(英文)：A technique capable of recording and reconstruction of the motion pictures of both three-dimensional (3-D) images and polarization information of light propagation have been investigated. This technique can simultaneously record multiple motion pictures of linearly-polarized light beams composing the light that to be observed. First, an experimental system of the technique was developed. The system uses a holographic plate to record the motion pictures. Both spatially and temporally continuous motion pictures of 3-D images of linearly-polarized light beams composing a femtosecond light pulse propagating in a transparent object were successfully demonstrated by the system. Next, an experimental system of the technique using an image sensor to record hologram and a computer to reconstruct the motion pictures was developed. Digital recording and reconstruction of the motion pictures of 3-D images of linearly-polarized light beams were successfully demonstrated by the system.

研究分野：光応用計測

キーワード：光工学・光量子科学 計測工学 画像工学 超高速科学 光伝播 ホログラフィ 高速度イメージング
偏光

1. 研究開始当初の背景

光は $3 \times 10^8 \text{m/s}$ の速さで真空中を伝播し世界で最も速く進む。そのために光の伝播は直接見ることができないだけでなく、通常の撮像方法でも観察が極めて困難である。近年、フォトニック結晶をはじめとする新たな光デバイスや光学材料の解析・設計・評価のために、光が空間を伝播する時間発展情報を数値計算によって解析する研究が精力的に行われているが、数値結果を実験的に検証した例は無い。光の伝播を観察できる技術は、これらの実験的評価を実現できるだけでなく、超高速の現象を可視化する技術として有用である。これまでに、フェムト秒パルスレーザー光の伝播を可視化する方法として、近接場光プローブを用いてフェムト秒パルス光が微小デバイス中を伝播する様子観察する方法^①、非線形光学効果による偏光面の変化を用いた方法^②、ストリークカメラと走査ミラーを組み合わせて用いる方法^③、空气中を光が伝播する際に生じるレーリー散乱光を単一光子検出器で積算して検出する方法^④、などが報告されている。いずれの方法も、フェムト秒レーザーパルス光が繰返してパルス光を発することを利用して、パルス光の光路長を変化させて、異なるパルスの情報を抜き出して1つのパルスが伝播しているようにコンピュータ合成した画像をマルチフレームとしてパルス光の強度情報のみを、可視化している。これらの方法では、パルス間で特性が異なる場合は真のパルス光を可視化できない上に、時間的空間的連続な動画は得られない。一方、申請研究の基礎になっている技術はホログラフィによる **light-in-flight recording** と呼ばれており、原理的にはシングルショットでの光の伝播の動画記録が可能である^⑤。我々は、これまで不可能であった媒質中での光の伝播の様子を世界で始めて動画として記録・観察に成功した^⑥。また、光が伝播する様子の3次元像さらにその動画記録の観察に成功した^⑦。

これまで基盤としていた技術では、超短パルス光が伝播する超高速現象の観察は人間の裸眼で見られるような超短パルス光の強度情報が伝播する様子のみであった。このような状況で我々は、伝播するフェムト秒パルス光の偏光の変化を動画として記録・観察に成功した^⑧。しかしこれまでの偏光伝播の動画は伝播する光を構成する直線偏光成分の伝播の様子の2次元像の動画のみであった。

2. 研究の目的

フェムト秒レーザーを用いたホログラフィによりフェムト秒パルス光を構成する偏光成分が伝播しながら変化する様子を時間的にも空間的にも連続な3次元像の動画として、しかも各偏光成分を同時記録・再生する技術を開発し、その技術を超高速現象の動画観察に応用することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で、フェムト秒パルス光の偏光伝播の3次元動画記録・観察を行う技術として、光源にフェムト秒パルスレーザーを用いて記録するホログラフィである **light-in-flight recording by holography** に基づく。伝播するフェムト秒パルス光を構成する複数の直線偏光を同時に動画として記録するために、図1に示すように、このホログラフィの参照光の光路中に、偏光板アレイを設定する。また、複数の直線偏光成分の伝播の様子を3次元動画として記録するために、被写体には、異方性物質あるいは、3次元の拡散体を物体光生成に用いる。

得られたホログラムは、ホログラム乾板の上から下に向かって、異なる偏光成分の動画が複数同時に記録される。各偏光成分について、ホログラム乾板を横に動かして観察することで、複数の直線偏光成分の伝播の様子の3次元像が時間的にも空間的にも連続な動画として観察できる。

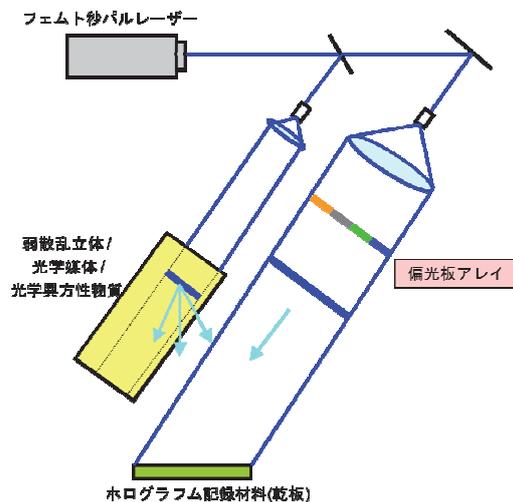


図1 フェムト秒パルス光の異なる偏光成分伝播の3次元の様子の動画同時記録光学系。

4. 研究成果

提案技術の実証実験を行った。実証例として、複屈折の記録を目的として3次元の媒質として方解石を用いた。方解石中では、光の偏光方向によって屈折率が異なるため屈折角も異なり、入射されたパルス光は、偏光方向が直交する二つの偏光に分かれて進む。

実験システムでは、モードロック Ti:Sapphire レーザから出射される中心波長 800nm、時間幅 93fs のパルス光から、第二高調波を発生させた後、このパルス光を二分し、方解石と記録材料に入射させる。方解石には、パルス光を偏光方向 90°で入射させる。方解石に入射されたパルス光は、45°方向の偏光と 135°方向の偏光の、2つの直交するパルス光に分かれて伝播する。物体光パルスと参照光

パルスを干渉させるために、参照光パルスをコリメートした後に、直線偏光を透過させる分布を持つ偏光マスクに入射させた。1枚のホログラムの垂直方向に異なる偏光成分の動画を分割して記録できる。

方解石中を伝播する偏光に対して異なる偏光方向の光の伝播の動画像がそれぞれ得られた。得られた動画の時間は23.6psで、各コマの間隔は5.9psである。得られた45°方向の偏光、135°方向の偏光それぞれの動画像から抜き出した4コマを図2に示す。45°方向の偏光は、(a)から(d)の順に、右から左斜め下方向へと伝播するフェムト秒パルス光の伝播が観察できた。また、135°方向の偏光は、(e)から(h)の順に、右から左へと水平方向に伝播するフェムト秒パルス光が観察できた。このように、方解石中を伝播するフェムト秒パルス光の複屈折の記録に成功し、偏光特性を持つ光学媒質中を伝播する偏光の同時動画像記録を実証できた。

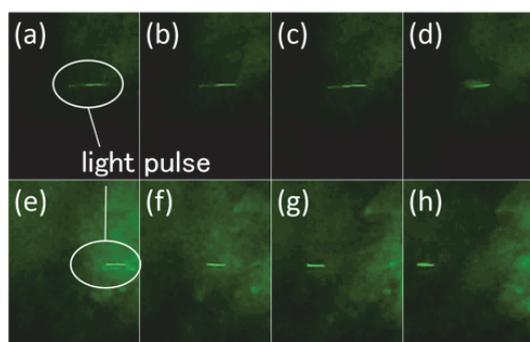


図2 フェムト秒パルス光の異なる偏光成分が方解石中を伝播する様子の3次元動画像同時記録・再生実験結果。(a)-(d) 45°直線偏光成分伝播の動画像から抜き出した4コマ。(e)-(h) 135°直線偏光成分伝播の動画像から抜き出した4コマ。

次に、伝播するフェムト秒パルス光の旋光性を記録対象とした。旋光の様子は、偏光面が回転していく様子の動画像を記録・再生することで観察できる。旋光性を示す物体としてマルトースを設定した。マルトース中を伝播することでパルス光の偏光方向は変わる。これをある一つの偏光成分のみで観察するとき、伝播と共に偏光方向が変化することにより、参照光と干渉し合う偏光成分の強度が変化するため、パルス光の明暗が変化して見える。そのため、ある時間での各偏光成分におけるパルス光の明暗から、その時間での偏光方向がわかる。したがって、各偏光成分におけるパルス光の明暗の変化により、直線偏光が回転していく様子を観察できる。

モードロックTi:Sapphireレーザから出射されるフェムト秒パルス光の第二高調波を発生させた後、そのパルス光を二分し、マルトースと記録材料に入射させる。一方のパルス光をコリメートした後に、偏光子アレイに入射させた。パルス光は偏光アレイを透過する

ことで、垂直方向に異なる偏光成分の分布を持つ。マルトースにパルス光を偏光方向90°で入射した。マルトースの旋光性によりパルス光の偏光方向は90°→45°→0°→135°→90°の順に変化する。ホログラムの45°偏光成分が記録された部分から再生すると、入射直後は明るく、マルトース中を伝播する間に徐々に暗くなるパルス光の再生像が観察できる。ホログラムの135°偏光成分が記録された部分から再生すると、入射直後は暗く、マルトース中を伝播する間に徐々に明るくなるパルス光の再生像が観察できる。

図3に実験で得られた再生像を示す。明るく丸い点はフェムト秒パルス光である。得られた動画の時間は63.6psで、各コマの間隔は15.9psである。パルス光はそれぞれ(a)→(b)→(c)→(d)、(e)→(f)→(g)→(h)の順に右から左へ伝播している。ホログラムの45°偏光成分が記録された部分からは、図3(a)-(d)に示すように、伝播するにしたがって明から暗、その後、暗から明へ変化するパルス光の伝播が観察できた。ホログラムの135°偏光成分が記録された部分からは、図3(e)-(h)に示すように、伝播するにしたがって暗から明、その後、明から暗へ変化するパルス光の伝播が観察された。このように、マルトースの偏光特性である旋光の記録にも成功した。

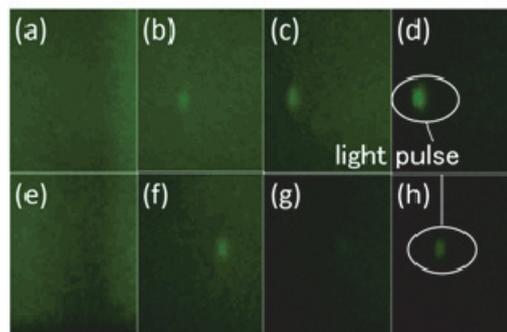


図3 フェムト秒パルス光の異なる偏光成分がマルトース中を伝播する様子の3次元動画像同時記録・再生実験結果。(a)-(d) 45°直線偏光成分伝播の動画像から抜き出した4コマ。(e)-(h) 135°直線偏光成分伝播の動画像から抜き出した4コマ。各コマの時間間隔は15.9ps。

このように、フェムト秒パルス光が方解石やマルトース中を伝播する際に、そのパルス光を構成する直線偏光の伝播の様子を3次元動画像として同時記録と再生を実験的に示すことができた。したがって、フェムト秒パルス光の偏光伝播の3次元動画像記録・観察とその超高速現象観察への応用に成功した。

<引用文献>

- ① M. L. M. Balistreri, H. Gersen, J. P. Korterik, L. Kuipers, and N. F. van Hulst, "Tracking femtosecond laser pulses in space and time," *Science* **294**, pp.1080-1082

- (2001)
- ② M. Fujimoto, S. Aoshima, M. Hosoda, and Y. Tsuchiya, "Femtosecond time-resolved optical polarigraphy: imaging of the propagation dynamics of intense light in a medium," *Opt. Lett.* **24**, pp.850-852 (1999).
 - ③ 13) A. Velten, D. Wu, A. Jarabo, B. Masia, C. Barsi, C. Joshi, E. Lawson, M. Bawendi, D. Gutierrez, and R. Raskar. "Femto-photography: capturing and visualizing the propagation of light," *ACM Trans. Graph.* **32**, 44 (2013).
 - ④ G. Garipey, N. Krstajić, R. Henderson, C. Li, R. R. Thomson, G. S. Buller, B. Heshmat, R. Raskar, J. Leach and D. Faccio, "Single-photon sensitive light-in-flight imaging," *Nat. Commun.* **6**, 6021 (2015).
 - ⑤ N. Abramson, "Light-in-flight recording: by holography," *Opt. Lett.* **3**, pp.121-123 (1978).
 - ⑥ T. Kubota and Y. Awatsuji, "Observation of light propagation by holography with a picosecond pulsed laser," *Opt. Lett.* **27**, pp.815-817 (2002).
 - ⑦ 30) T. Kubota, K. Komai, M. Yamagiwa, and Y. Awatsuji, "Moving picture recording and observation of three-dimensional image of femtosecond light pulse propagation," *Opt. Express* **15**, pp.14348-14354 (2007).
 - ⑧ T. Okuda, Y. Awatsuji, T. Kakue, T. Tahara, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Method for simultaneous recording of motion picture of multiple polarized components of light pulse propagation," *Technical Digest of The Second Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2012)*, C007, Tokushima, Nov. 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① Y. Awatsuji, "Ultrafast 3D imaging by holography," *Proc. SPIE* **10328**, 103280H (6 pages) (2017). 査読有
DOI: 10.1117/12.2269568
- ② 栗辻安浩, 久保田敏弘, "レーザーホログラフィーが可能にする超高速イメージングー光の伝播の2次元ならびに3次元動画記録と観察ー," *O plus E* **39**, pp.280-286 (2017). 査読無
<http://www.adcom-media.co.jp/bn/2017/02/24/25111/>
- ③ Y. Awatsuji, P. Xia, Y. Wang, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holography and its application to high-speed 3D imaging of dynamic object," *Proc. SPIE* **9720**, 972007 (7 pages) (2016). 査読無
DOI: 10.1117/12.2213029
- ④ P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O.

Matoba, "One million fps digital holography," *Electron. Lett.* **50**, pp.1693-1695 (2014). 査読有
DOI: 10.1049/el.2014.3351

〔学会発表〕 (計 20 件)

- ① 松中敦志, 栗辻安浩, "光伝播の4方向偏光成分の拡大動画同時記録," 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第15回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.35-36, 大阪大学, 吹田市, 2017年3月9日.
- ② 栗辻安浩, "レーザーホログラフィーが可能にする新しいイメージング技術," 日本顕微鏡学会 様々なイメージング技術研究部会 第4回研究会, ホテル紫雲閣, 東松山市, 2016年11月20日.
- ③ Y. Awatsuji, "High-speed and ultrafast 3D imaging by holography," *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP31)*, pp.102-107, Hotel Hankyu Expo Park, Suita, Nov. 7, 2016.
- ④ I. Takamoto, D. Yamanaka, Y. Tsuda, and Y. Awatsuji, "Motion pictures recording of Stokes parameters of a propagating ultrashort light pulse," *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP31)*, pp.140-145, Suita, Nov. 2016.
- ⑤ D. Yamanaka, Y. Tsuda, I. Takamoto, P. Xia, Y. Awatsuji, and K. Nishio, "Evaluation of the reconstructed images recorded with a single pulse and repetitive pulses in digital light-in-flight recording by holography," *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP31)*, pp.146-150, Hotel Hankyu Expo Park, Suita, Nov. 7, 2016.
- ⑥ 津田佑介, 栗辻安浩, 西尾謙三, "Light-in-flight ホログラフィーを用いた光パルス伝播の偏光成分ごとの拡大像の同時動画記録," *Optics and Photonics Japan 2016 講演予稿集*, 2pE3, 筑波大学 東京キャンパス文京校舎, 東京都文京区, 2016年11月2日.
- ⑦ 津田佑介, 栗辻安浩, 西尾謙三, "デジタル light-in-flight ホログラフィーを用いた光パルス伝播の偏光成分ごとの拡大像同時動画記録," *Optics and Photonics Japan 2016 講演予稿集*, 1pP30, 筑波大学 東京キャンパス文京校舎, 東京都文京区, 2016年11月1日.
- ⑧ 栗辻安浩, "時間極限イメージング," 第74回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, p.10000001-270, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2016年9月15日.
- ⑨ 高本逸貴, 栗辻安浩, "伝播する超短光パルスのストークス・パラメータの動画記録," 日本光学会 情報フォトンクス研究

- グループ 第14回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.1-2, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2016年3月9日.
- ⑩ Y. Awatsuji, P. Xia, Y. Wang, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holography and its application to high-speed 3D imaging of dynamic object," SPIE Photonics West BIOS 2016 Technical Summaries, 9720-6, The Moscone Center, San Francisco, U.S.A., Feb. 13, 2016. (invited)
- ⑪ 粟辻安浩, "ホログラフィが可能にする高速度ならびに超高速3次元動画像記録," 第20回関西大学先端科学技術シンポジウム講演集, pp.138-141, 関西大学, 吹田市, 2016年1月22日.
- ⑫ 粟辻安浩, 王ヨウキン, 夏 鵬, 西尾謙三, 的場 修, "並列位相シフトデジタルホログラフィシステムとその高速度記録応用," 2015年度第4回ホログラフィック・ディスプレイ研究会 HODIC Circular 35, No.4, pp.8-14, キャンパスプラザ京都, 京都市, 2015年12月8日.
- ⑬ Y. Awatsuji, "Recent progress in light-in-flight recording by holography using a femtosecond pulsed laser," International Workshop on Holography and Related Technologies 2015 (IWH2015) Digest, Th1-1, Okinawa Convention Center, Ginowan, Dec. 2, 2015.
- ⑭ Y. Awatsuji, P. Xia, and O. Matoba, "One-mega frame-per-second phase-shifting digital holography," Proceedings of 13th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2015), pp.721-726, Cambridge, U. K. , July 23, 2015.
- ⑮ 粟辻安浩, "デジタルホログラフィによる3次元動画像計測とその流れの可視化計測応用," 公益社団法人 精密工学会 関西支部 2015年度関西地方学術講演会 特別講演, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2015年6月23日.
- ⑯ 山中大輝, 粟辻安浩, "シングルショットデジタル light-in-flight ホログラフィの検討," 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第13回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.25-26, 大阪市立大学, 大阪市, 2015年3月9日.
- ⑰ 津田佑介, 粟辻安浩, "Light-in-flight ホログラフィを用いた光パルス伝播の4方向偏光成分の同時動画像記録の検討," 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第13回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.23-24, 大阪市立大学, 大阪市, 2015年3月9日.
- ⑱ 角江 崇, 粟辻安浩, "デジタルホログラフーによる光伝播の動画像記録," Optics and Photonics Japan 2014 講演予稿集, 6pDS6, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月6日.
- ⑲ 舟橋旦矩, 奥田達也, 伊藤誠也, 粟辻安浩, 裏 升吾, 西尾謙三, "フェムト秒光パルスの複数偏成分同時動画像記録," Optics and Photonics Japan 2014 講演予稿集, 5aDS10, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月5日.
- ⑳ 舟橋旦矩, 伊藤誠也, 粟辻安浩, 裏 升吾, 西尾謙三, "ストークスパラメーター伝播の動画像記録," Optics and Photonics Japan 2014 講演予稿集, 7aE8 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月7日.

[その他]

ホームページ

<http://www.cis.kit.ac.jp/~awatsuji/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

粟辻安浩 (AWATSUJI Yasuhiro)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号:

(2)研究分担者

無

(3)連携研究者

裏 升吾 (URA Shogo)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号: 10193955