

超短時間内で発生する複数の光の動きを一度の露光で スローモーション動画として撮影する技術を 世界で初めて開発

京都工芸繊維大学電気電子工学系 粟辻安浩教授，同大学院生 井上智好氏(工芸科学研究科博士後期課程電子システム工学専攻)らの研究グループは，ピコ秒^{*1}といった極めて短い時間間隔で発生する複数の光が伝播する様子を，一度の露光でスローモーション動画として記録する技術の開発に世界で初めて成功しました。3次元画像技術であるホログラフィー^{*2}を応用した超高速イメージング技術に，開発した光学システムと2つの動画を空間的に分割して記録する手法を導入することで1.78 ピコ秒の時間間隔で発生した2つの超短パルス光が伝播する様子の記録・観察に成功しました。

この研究成果は，2022年7月7日に，米国光学会 OPTICA Publishing Groupの「Optics Letters」に掲載されました。

ポイント

- ✓ 1.78 ピコ秒の極めて短い時間間隔で発生する2つの超短光パルス光が伝播する様子をスローモーション動画として記録・観察することに成功した。
- ✓ 3次元画像技術であるホログラフィー^{*2}を応用した光が伝播する様の動画記録・観察技術に，開発した光学システムと2つの動画を光の偏光で分割する手法を導入することで提案技術を達成。
- ✓ 超短パルスレーザーを用いた二光子顕微鏡やレーザー加工では，多数の超短光パルスが対象に極短時間で照射されるため，光の照射ごとに細胞や材料といった対象の状態が高速に変化してしまう。提案技術を用いれば，光照射に応じて変化する光が伝播する様子を観察し，光退色の無い超解像蛍光顕微鏡法の開発や超短パルスレーザーを利用した材料加工のメカニズムの理解といった貢献が期待される。

研究の背景

2018年にノーベル物理学賞を受賞した，極めて短い時間だけ光を照射できる超短パルスレーザー^{*3}は，最先端の情報通信，微細加工，医療など幅広い分野で利用されています。一般的に超短パルスレーザーからは，数十キロヘルツから数十メガヘルツといった周期で多数の超短光パルスが出射されます。そのため，このような超短パルスレーザーを用いた多光子顕微鏡や材料微細加

工では、対象である生細胞や材料に多数の超短光パルスが照射されます。しかし、高エネルギーの超短光パルスが照射されることで、対象の状態が変化し、光パルスが伝播する様子が照射ごとに異なることが予想されます。また、光通信の分野では、ナノ秒またはピコ秒^{*1}の周期で光を変調する超高速光スイッチングデバイスが使用されています。これらのスイッチングデバイスの性能の評価には、ナノ秒またはピコ秒の時間間隔で変調され、伝播する超短光パルスを観測することが望ましいです。したがって、観測あるいは測定対象に短い時間間隔で照射され、伝播する複数の超短光パルスを画像、特に動画像によりスローモーション観察することが様々なレーザー利用技術の基盤となります。

本学電気電子工学系 粟辻安浩教授、大学院生 工芸科学研究科博士後期課程電子システム工学専攻 井上智好氏らの研究グループは、3次元画像技術であるホログラフィーと超短パルスレーザーを組み合わせた、超短光パルスの伝播をスローモーション動画で記録可能な技術に関する研究を行ってきました。

これまで、研究グループでは、当該技術を用いてある1つの超短光パルスが光学部品中や拡散板上を伝播する様子を記録・観察した例は報告してきましたが、この技術を用いてピコ秒やそれ以下の極めて短い時間間隔で複数の超短光パルスが伝播する様子を記録・観察した例は報告されていませんでした。

研究の内容

本研究では、これまで粟辻安浩 教授らが研究を行ってきた超短光パルスが伝播する様子を可視化する技術を応用することで、1.78 ピコ秒の極めて短い時間間隔で発生する2つの超短光パルス光の伝播をスローモーション動画として記録・観察することに成功しました。

これまでに、拡散板や平板構造の光学部品中を伝わるある瞬間の超短光パルスを記録した例は報告されてきました。しかし、ピコ秒やそれ以下の極めて短い時間間隔で伝播する複数の超短光パルスや動く物体は、通常のカメラではそれぞれの動きを分解できず重さなって記録されてしまうため記録・観察することは困難でした。

本研究で提案した技術では、極めて短い時間間隔で2つの超短光パルスを発生させる遅延光学系と呼ばれる光学システム（図1(a))を開発・導入し、さらに2つの動画を空間的に分割して記録する手法（図1(b))を導入することで、極めて短い時間間隔で発生する複数の超短光パルスを記録・観察できます。

実証実験として本研究では、1.78 ピコ秒の時間間隔を与えた拡散板上を伝播する2つの超短光パルスを記録しました（図2(a)および(b))。実証実験を行う上で、光が伝播する様子を分かりやすくするために、拡散板には解像力テストチャートのパターンを貼り付けて使用しました（図2(c))。その結果、それぞれの超短光パルスが伝播する様子を重畳することなく、スローモーション動画として観察することに成功しました。

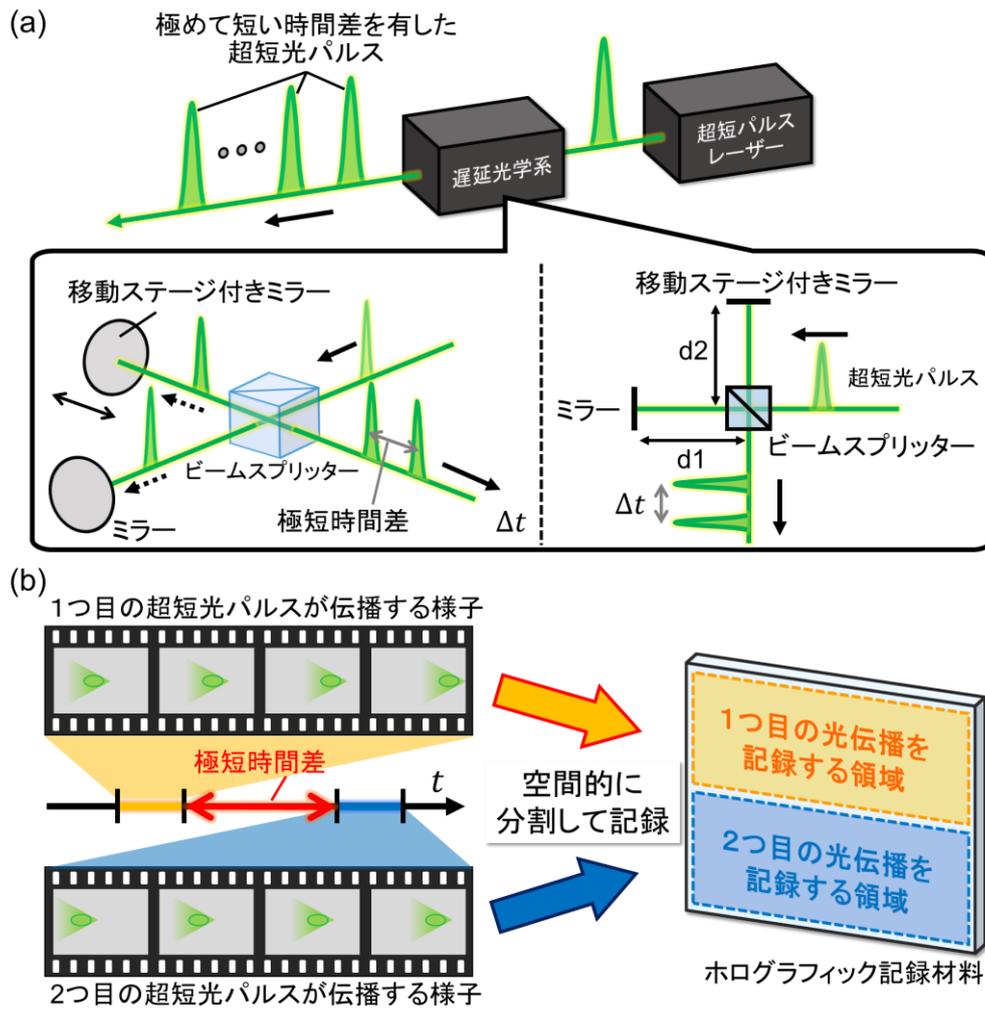


図 1. 提案技術の概略図.

- (a) 極めて短い時間間隔で 2 つの超短光パルスを発生させる遅延光学系.
 (b) 2 つの動画を空間的に分割して記録する手法.

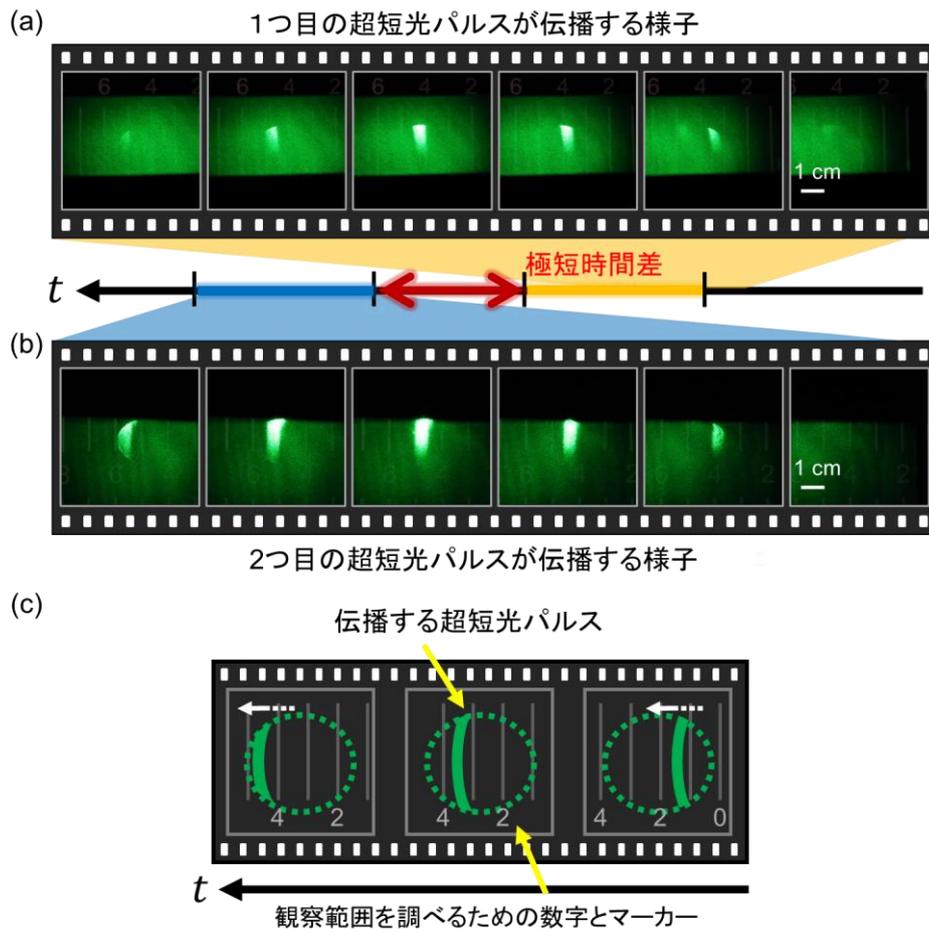


図2 1.78 ピコ秒の時間間隔で伝播する2つの超短光パルスを動画像で記録・観察した結果
 (a)1つ目の光伝播を記録した結果. 右から左に弧状の超短光パルスが伝播している.
 (b)2つ目の光伝播を記録した結果. 右から左に弧状の超短光パルスが伝播している.
 (c) 実験結果の概略図. 観察範囲を調べるために配置したマーカーの上を超短光パルスが伝播している.

今後の展開

今後の課題としては、細胞の観察や材料加工に適用するには、観察範囲が広すぎることで、微弱光の検出が困難であることが挙げられます。これは、顕微鏡光学系など拡大観察が可能なシステムを導入していないことや記録時に余分な光が発生していることが主な原因です。また、細胞の観察や材料加工で照射される超短光パルスの数はより多数であるため、今後は記録できる超短光パルスの数を増加させる新たな光学系の開発も行う予定です。

用語解説

1. ナノ秒, ピコ秒

1 ナノ秒は 10 億分の 1 秒, 1 ピコ秒は 1 兆分の 1 秒です。

2. ホログラフィー

光の干渉と回折を利用して、物体からやってくる光のすべての情報を記録・再生できる3次元画像技術です。私たちが物体を見るときに認識している、物体を透過または物体で反射した光を物体光と呼びます。物体光と基準となる光（参照光）を干渉させ、干渉した光の明るさ分布を高解像写真乾板に干渉縞画像として記録します。干渉縞画像を記録した高解像度写真乾板がホログラムです。記録に用いた参照光と同じ光をホログラムに照射すると物体光が再生され、奥行き情報を含む物体の3次元像を観察できます。

3. 超短パルスレーザー

発光時間の極めて短い光を放つレーザーです。10兆分の1から100兆分の1秒程度以下の時間だけ光を放つことができるフェムト秒パルスレーザーなどがあり、超高速現象の計測用光源や材料の微細加工に用いられます。フェムトは1000兆分の1を表す接頭辞です。

謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会(JSPS) 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A) 20H05887, 特別研究員奨励費 20J23542 の支援を受けて行なったものです。

論文情報

- ・論文タイトル : Ultrafast double motion-pictures recording technique for propagating light pulses with an ultrashort time difference
- ・著者 : Tomoyoshi Inoue, Koki Nagao, Kenzo Nishio, and Yasuhiro Awatsuji
- ・掲載誌 : Optics Letters
- ・DOI : 10.1364/OL.458194
- ・アブストラクト URL : <https://doi.org/10.1364/OL.458194>