

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学

光周波数コムとバンドルファイバによる2次元分光法を用いた任意形状の高精度な瞬時3次元計測を実現

【ポイント】

- * 光周波数コムを用いた瞬時3次元計測手法とバンドルファイバによる2次元分光法を組み合わせることで、任意の3次元情報を高精度かつ瞬時に取得することに成功した
- * 奥行方向に約3メートルの構造を持つ物体に対してサブマイクロメートルオーダーの高精度瞬時計測を実現
- * 6桁の広いダイナミックレンジ（精度/範囲）計測と高効率化に成功

【概要】

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻の美濃島薫教授、加藤峰士特任助教らの研究グループは、光周波数コム^[1]を用いた瞬時3次元計測手法に対して、シングルモードファイバとマルチモードファイバで構成したバンドルファイバ^[2]による2次元分光法を新たに採用することで、任意の3次元形状を瞬時、かつ高精度に計測できることを実証しました。実験では約3メートルの構造をサブマイクロメートル（0.1 μm 単位、マイクロは100万分の1）の不確かさで計測することに成功し、従来手法では困難であった6桁もの広いダイナミックレンジ計測に成功しています。

研究グループはこれまで、時間とともに光周波数が変化するチャープパルス^[3]を光源とした光周波数コムによる3次元計測手法を提案し、サブマイクロメートルの不確かさを持つ3次元計測を実現していました。しかし、検出系の制限により、超短パルスには一度に保存されていた3次元情報のうち2次元情報しか瞬時に検出できないといった課題がありました。

今回、超短パルスの分光情報を取得する光学系に、新たに端面配列の異なるバンドルファイバを導入することで、2次元平面上の異なる空間点の奥行き情報を同時検出することに成功し、さらにファイバの本数を増やすことでより多くの多点計測が可能になりました。また、これまでも広ダイナミックレンジ計測を確認していましたが、同様の性能を今回の瞬時3次元計測においても達成できることを示しました。奥行きに長さがある高アスペクト比物体を計測した結果、約3メートル離れた平面構造に対して、同時にサブマイクロオーダーの高精度な瞬時3次元計測を実現しました。また、マルチモードファイバの導入により、高効率化も示しました。これにより、被測定物の高速3次元形状計測や単発現象のイメージングなどへの応用が期待されます。

研究成果はアメリカ光学会（OPTICA）発行の論文誌「Optics Express」に掲載されました。

【背景】

光を用いた3次元形状計測は、非接触で非破壊、かつ高速、高精度に測定できることから、さまざまな分野において注目されています。しかしながら、複数の計測点を精密に同時測定することはそれまで困難でした。美濃島教授、加藤特任助教らの研究グループは、光周波数コムを用いて瞬時計測が可能なワンショット3次元形状計測手法の開発を進めてきました。光周波数コムとは、周波数軸上において縦モードが等間隔に並んだ櫛状のスペクトルを持つ超短パルス^[4]光源のことです。その高い制御性とコヒーレント性^[5]に加えて、きわめて正確な間隔の超短パルス列を生かすことで、高い精度と広い測定可能範囲を両立した計測が可能になります。

研究グループはこれまでに、モード同期 Er (エルビウム) ファイバレーザを光源としたワンショット3次元計測手法を開発しています。光ファイバでチャープさせたチャープパルス測定対象に向けて照射すると、その奥行き形状に応じてパルスに時間遅延が生じます。この時間情報は色情報に瞬時に変換され、この色情報を平面の各空間点で読み出すことで3次元情報を得ることができます。本手法では参照光と干渉させて得られるスペクトル干渉を用いて色情報を検出します。1次元の回折格子で波長分解すると、測定対象物の形状に応じたスペクトル干渉縞が検出され、これを解析することによって高精度な瞬時3次元形状計測が可能になります。さらに、超精密で等間隔のパルス列を利用してパルス間干渉を行うことで、1パルスにおける測定可能範囲を超えた広ダイナミックレンジの計測が実現でき、すでにメートルオーダーの測定範囲を達成しています。しかし、回折格子で波長分解する手法では、2本の空間軸のうち1本が波長軸として使用されてしまうため、超短パルスに含まれる3次元情報を一度に検出できないといった問題点がありました。

そこで本研究では、チャープパルスに加えて、新たに入射側が円形配列で出射側が線状配列となるような、端面配列の異なるバンドルファイバを用いることで、平面上の異なる点における奥行き情報の同時検出を行い、さらにファイバの本数を増やすことで多点化を行いました。これに加えて、パルス間干渉による測定可能範囲の拡大も目指しました。

【手法】

実験系を下図に示します。光源にはモード同期 Er ファイバレーザと Er 添加ファイバ増幅器によって得られる光周波数コムを用います。パルス幅は65フェムト秒 (fs)、パルス列の繰り返し周波数は51メガヘルツ (MHz、メガは100万) です。出射された超短パルス列をビームスプリッタによって2つに分け、片方の光路には3.8mのシングルモードファイバを挿入してパルス幅5.7ピコ秒 (ps) のチャープパルスとし、ビーム径を拡大させるビームエキスパンダを使ってビーム径を6mmに調整して測定対象に照射しました。

さらにその反射光に対して、もう片方の光路を通過してきたチャープパルスと干渉させて干渉光として形状情報を凍結し、190本のシングルモードファイバと55本のマルチモードファイバからなるバンドルファイバの円形配列端面で受光しました。線状配列端面から出射した光を回折格子によって波長分解した後、スペクトル干渉像をIR (赤外線) カメラで取得しました。

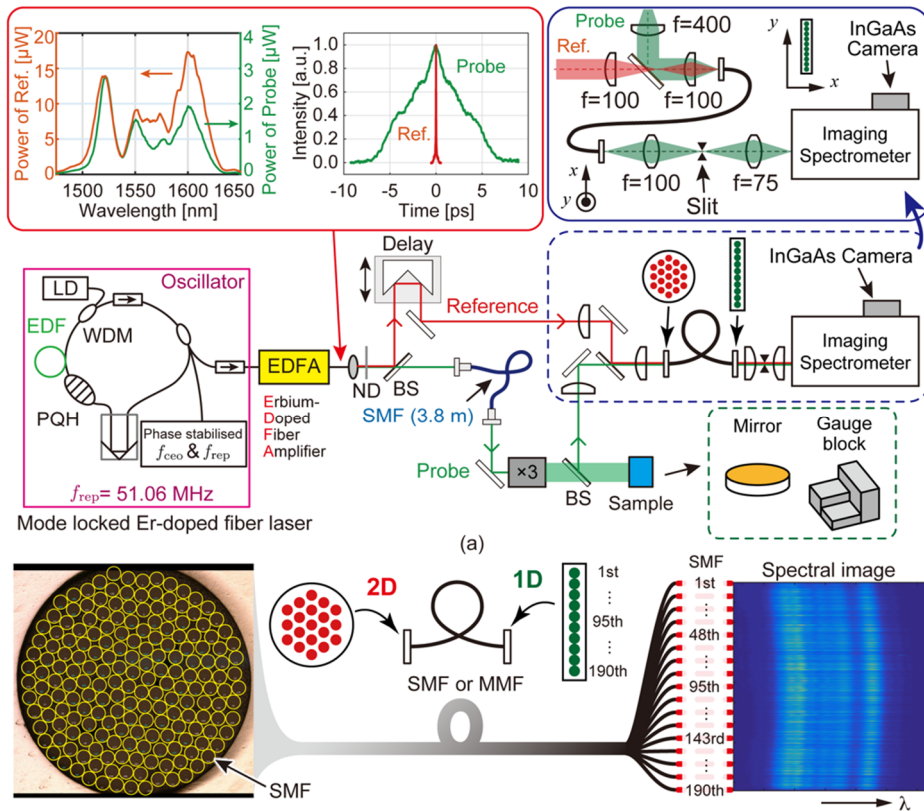


図1 実験配置図とバンドルファイバの構成図

【成果】

はじめに、3枚のブロックゲージ(A、B、C)からなるサブミリメートルオーダーの鏡面物体を測定しました。その結果、Cを基準にして領域ごとの段差を求めたところ、段差A-Cは $981.7 \pm 0.3 \mu\text{m}$ (設計値 $980 \mu\text{m}$ 、87点)、B-Cは $478.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ($480 \mu\text{m}$ 、55点)、Cは $0 \pm 0.4 \mu\text{m}$ ($0 \mu\text{m}$ 、48点)で190点の高精度な測定に成功し、設計値に対してサブマイクロメートルの精度で一致していることが分かりました。

続いて、広ダイナミックレンジ計測を実証するため、3m離れたミラーと2枚のブロックゲージで構成した高アスペクト比物体を用意し、これらの3次元的な構造を計測しました。その結果、ミラー面から約3m離れた位置にある2枚のブロックゲージの位置と段差(設計値 $980 \mu\text{m}$)の計測に成功しました。さらに、計測不確かさは $2 \mu\text{m}$ であり、測定範囲3mに対してダイナミックレンジ6桁の計測を達成しました。

また、光ファイバのコア径が大きいマルチモードファイバで構成されたバンドルファイバでの瞬時3次元計測も行いました。マルチモードファイバでは多数の横モードに起因するスペックルノイズが計測において問題となりますが、これを除去する方法を開発することにより、シングルモードファイバを用いた時よりも299倍の効率で計測できることを確認しました。今後、粗面などの幅広い対象の計測において重要になります。形状計測の結果においても、3枚のブロックゲージをサブマイクロメートルで測定することに成功しています。

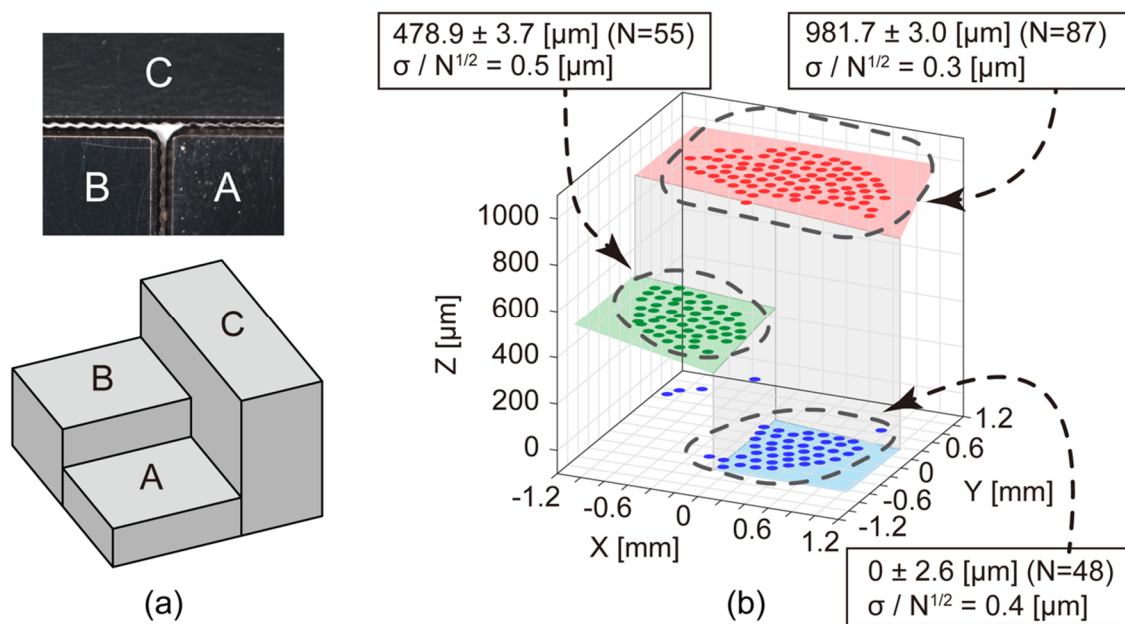


図2 (a)測定した3枚のブロックゲージ
(b)シングルモードファイバで構成したバンドルファイバを用いて3次元計測した結果

【今後の期待】

これまでにチャープパルスを光源に用いた、光周波数コムによる瞬時3次元計測手法を提案していましたが、今回、シングルモードファイバとマルチモードファイバで構成したバンドルファイバによる2次元分光法を導入することで、瞬時に取得された1枚の画像から高精度な3次元画像を取得できることを確認しました。これにより、約3m離れた物体に対してサブマイクロメートルオーダーの高精度計測を実現し、既存手法では実現が難しかった6桁もの広いダイナミックレンジ計測と、粗面等に適用できる高効率測定が可能になりました。

従来、3次元形状の瞬時計測は広範囲かつ高精度計測の両立が難しかったことから、測定は静止対象物に制限されてきました。本成果により、非常に小さな物体から大きい物体までの被測定物の高速3次元形状計測、特にものづくりにおけるメートル規模の対象物や、長辺と短辺の比が大きい形状物の精密計測、さらにはレーザーによる加工や物質改変における単発現象や衝撃波発生のような瞬間イメージングなど多様な応用が広がると期待されます。

(論文情報)

雑誌名：「Optics Express」 Vol. 29, Issue 26, pp. 43778–43792 (2021)

論文タイトル：One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle

著者：Takashi Kato, Megumi Uchida, Yurina Tanaka, Kaoru Minoshima

DOI 番号：10.1364/OE.447187

(過去のプレスリリース)

[1] 光コムを用いた新しい高速3次元イメージング法の実証に成功

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170616-2/index.html>

(本研究の原理実証に成功した内容について)

(外部資金情報)

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト

エクト（JPMJER1304）の助成を受けて行いました。

（用語説明）

[1]光周波数コム：周波数軸上において縦モードが等間隔に並んだ櫛状（コム）のスペクトルを持つ超短パルス光源のこと。高い制御性とコヒーレント性に加え、きわめて正確な間隔の超短パルス列を生かすことで、様々な物理量の高精度かつ広ダイナミックレンジ計測が可能になる

[2]バンドルファイバ：細い光ファイバを束ねてその両端に端末や光部品を取り付けたもの。本研究では、端面を研磨したファイバを束ね、片方を2次元的に円形に配列し、もう片方を1次元的に線状に並べた構成になっている

[3]チャープパルス：時間とともに光周波数が増えるパルスのこと。この変化の仕方はファイバ長で容易に調整できる

[4]超短パルス：非常に短いパルスのこと、特に数ピコ秒以下のパルスのことを超短パルスと呼ぶ。それらが高いコヒーレンスを保って等間隔に時間的に連なると周波数上では光周波数コムとなり、時間上では超短パルス列となる

[5]コヒーレント性：波と波が重なり合う時、打ち消し合ったり、強め合ったりする性質がある。この性質をコヒーレント性があるといい、干渉のしやすさをコヒーレンスという

【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻
教授 美濃島薫

Tel : 042-443-5463

E-mail : minolab-webmaster-ml@uec.ac.jp

URL : <http://www.femto-comb.es.uec.ac.jp/index.html>

<報道に関すること>

電気通信大学 総務企画課 広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp