

スペクトル・エンコーディングを用いたラインフィールド 共焦点デュアル光コム顕微鏡

長谷 栄治^{1,2}, 宮本 周治^{1,2}, 市川 竜嗣¹, 南川 丈夫^{1,2}, 山本 裕紹^{2,3}, 安井 武史^{1,2}

¹徳島大学大学院 社会産業理工学研究部/先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

²JST, ERATO美濃島知の光シンセサイザプロジェクト (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

³宇都宮大学 オプティクス教育研究センター (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

Line-Field Confocal Dual-Optical-Comb Microscopy based on Spectral Encoding

Eiji HASE,^{1,2} Shuji MIYAMOTO,^{1,2} Ryuji ICHIKAWA,¹ Takeo MINAMIKAWA,^{1,2}

Hirotsugu YAMAMOTO,^{2,3} and Takeshi YASUI^{1,2}

¹Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences/Graduate School of Advanced Technology and Science, Tokushima University, 2-1 Minami-Josanjima, Tokushima, Tokushima 770-8506

²JST, ERATO, MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer Project, 2-1 Minami-Josanjima, Tokushima, Tokushima 770-8506

³Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585

(Received February 14, 2017)

An optical frequency comb (OFC) has attracted attention in optical frequency metrology because the mode-resolved OFC spectrum can be used as a precise frequency ruler due to both broadband spectrum and narrow linewidth characteristics. However, other than optical frequency metrology, the application fields of OFC remain undeveloped. Another interesting aspect of OFC is an optical carrier with a huge number of discrete frequency channels because OFC is composed of a series of frequency spikes that are regularly separated by a repetition frequency in the broad spectral range. In this paper, we encode the line-image of a sample on the mode-resolved OFC spectrum by 1D spectral encoding. The resulting line-image-encoded OFC spectrum is acquired by a dual-comb spectrometer after passing through a confocal pinhole. Finally, the line image is decoded from the mode-resolved amplitude spectrum. The proposed method enables us to establish both confocality and line-field imaging under a scan-less condition.

Key Words: Confocal laser microscopy, Optical comb, Dual comb spectroscopy, Spectral encoding

1. はじめに

共焦点レーザー顕微鏡 (Confocal Laser Microscope: CLM)¹⁾は、共焦点効果による深さ分解能と迷光除去能力を持ち、3次元イメージングを可能にすることから、非接触表面形状測定やバイオイメージングの分野で広く用いられている。通常のCLMでは、光源ピンホール/サンプル焦点/検出ピンホールが共役であるために、点計測である。そのため、イメージ取得には、焦点スポットを2次元的に機械的走査する必要がある。しかし、これらの機械的な走査機構は、高速計測の障害になるだけでなく、振動などの環境外乱に対する脆弱性に繋がる。このような現状から、機械的走査機構を不要とすることで、高速かつ外乱にロバストなCLMが強く望まれている。

CLMにおける機械的走査を省略する有力な手法として、空間/波長変換(スペクトル・エンコーディング)が

ある。これは、空間情報を広帯域スペクトルに重畳し、スペクトル波形から空間情報を抽出する技術である。これまでに、1次元波長分散素子を用いた1次元スペクトル・エンコーディング²⁾や、2次元波長分散素子を用いた2次元スペクトル・エンコーディング³⁾が報告されている。我々は、スペクトル・エンコーディングを行う広帯域スペクトル光として、光コム⁴⁾に着目した。光コムは、多数の安定な光周波数モード列が繰り返し周波数(f_{rep})間隔で規則的に櫛(コム)の歯状で並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を有する。さらに、 f_{rep} とキャリア・エンベロープ・オフセット周波数 f_{ceo} をレーザー制御でマイクロ波周波数標準に位相同期すれば、光コムを構成する光周波数モード列(絶対周波数 $\nu_n = f_{ceo} + n f_{rep}$)を、周波数標準にトレーサブルな「光周波数の物差し」として、光周波数標準や光周波数計測の分野で利用可能である。最近、デュアル光コム分光法⁵⁾で取得されたモード

分解光コムスペクトルにおける「周波数精緻性」や「極めて広い周波数ダイナミックレンジ」を利用したガス分光⁶⁾や距離計測⁷⁾が報告された。

ここで、光コムを「光周波数の物差し」としてではなく、「圧倒的多数の離散チャンネルを有する光キャリア」として利用すれば、新しい応用展開が拓ける。すなわち、波長/空間変換(スペクトル・エンコーディング)によってイメージ画素情報を光コムにスペクトル重畳させた後に、モード分解光コムスペクトルから読み出せば、イメージ画素とコム・モードを一対一対応させることが可能になり、機械的の走査を省略してイメージを取得することができる。更に、イメージ情報がスペクトル重畳された光コムを、共焦点ピンホールに通すことにより共焦点性も付与でき、フルフィールドイメージングと共焦点イメージングを両立できる。

本稿では、1次元スペクトル・エンコーディングに基づいたラインフィールド共焦点デュアル光コム顕微鏡⁸⁾について紹介する。

2. 実験方法

2.1 測定原理

1次元スペクトル・エンコーディングの原理をFig. 1に示す。光コムは光源側ピンホールを通過した後、1次元波長分散素子によって、個々の光コム・モードが異なる角度で空間分散され、光学フーリエ面上で1次元レインボー・スペクトログラムが形成される。これを対物レンズで集光することにより、サンプル上にライン状の1次元焦点スポット・アレイが照射される。これにより、1次元イメージ画素が光コム・モードにスペクトル重畳される。サンプルから反射された個々の光コム・モードは、同一光路を逆伝搬することにより、再び空間的に重畳される。その後、検出器側ピンホールを通過させることにより共焦点性を付与し、デュアル光コム分光法によって、モード分解光コムスペクトルを取得する。

2.2 実験装置

Fig. 2に実験装置を示す。ここで、光軸方向をZ軸、それに垂直な面内をXY面とする。計測用の光コム光源(OFC1)には、フェムト秒モード同期Erファイバ光コム(Menlo Systems, FC1500-250, 中心波長1550 nm, $f_{\text{ceo1}} = 20$ MHz, $f_{\text{rep1}} = 250,001,484$ Hz)を用いた。回折格子(1200本/mm)を1次元波長分散素子として用いることにより、

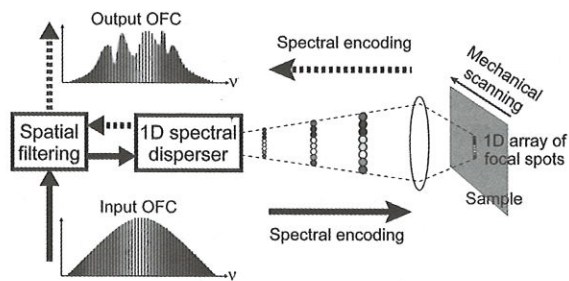


Fig. 1 Principle of operation.

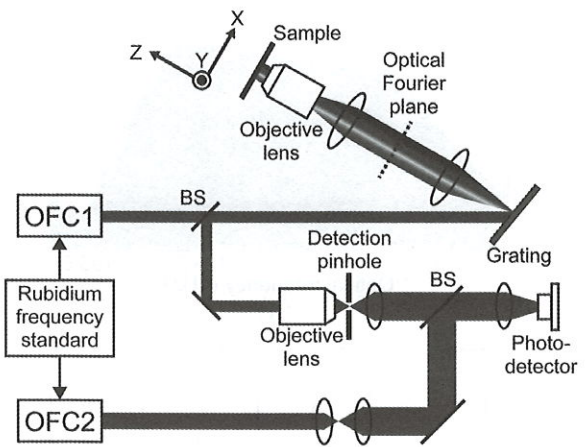


Fig. 2 Experimental setup.

OFC1の各コム・モードが、1次元空間にスペクトル展開される。光学フーリエ面に生成された1次元スペクトログラムは、リレーレンズと対物レンズ(Edmund Optics, #33-437, ドライ, NA=0.25, WD=16.3 mm)を経て、サンプル上のX軸に沿った1次元焦点スポット・アレイとして照射される。サンプルから反射されたOFC1光は、同一光路を逆伝搬して再び空間的に重畳された後、検出器側のピンホールを通過する。デュアル光コム分光のため、コム間隔がわずかに異なる別のフェムト秒モード同期Erファイバ光コム(Menlo Systems, FC1500-250, OFC2, 中心波長1550 nm, $f_{\text{ceo2}} = 20$ MHz, $f_{\text{rep2}} = f_{\text{rep1}} - \Delta f_{\text{rep}} = 250,001,484$ Hz, $\Delta f_{\text{rep}} = f_{\text{rep1}} - f_{\text{rep2}} = 2,666$ Hz)を局部発振光(ローカル光コム)として用いる。OFC1光とOFC2光を空間的に重ね合わせ、両者の干渉によって生成されるインターフェログラムをバランス光検出器(Newport, 1617-AC-FC, 波長900-1700 nm, 帯域800 MHz)と高速デジタル化(Aval Data, APX-500/ADM-214EX, サンプリング周波数250 MHz, 分解能14ビット)で取り込む。インターフェログラムをフーリエ変換することにより、モード分解光コム振幅スペクトルを取得し、それより1次元イメージ情報を得る。2次元イメージを取得する場合は、サンプルをY軸方向に移動させる。

3. 実験結果

1951 USAFテストターゲット(ネガタイプ)を対物レンズの焦点位置($Z = 0 \mu\text{m}$)に配置した時のモード分解光コム振幅スペクトルを計測した。Fig. 3(a)に、テストターゲットのパターンが無い部位(ミラーと等価)に1次元焦点スポット・アレイを照射した場合のモード分解光コム振幅スペクトルを示す。スペクトル内部がベタに塗りつぶされているが、一部を拡大すると、光コムの特徴的な櫛の歯状スペクトルが確認できる(Fig. 3(b))。このコム・モードの一本一本が、1次元イメージ画素情報に対応していることになる。このスペクトル形状は、OFC1固有のものである。一方、Fig. 3(c)に、テストターゲットのパターンがある部位におけるモード分解光コム振幅スペクトルを示す。ここでは、スペクトル形状の影響を

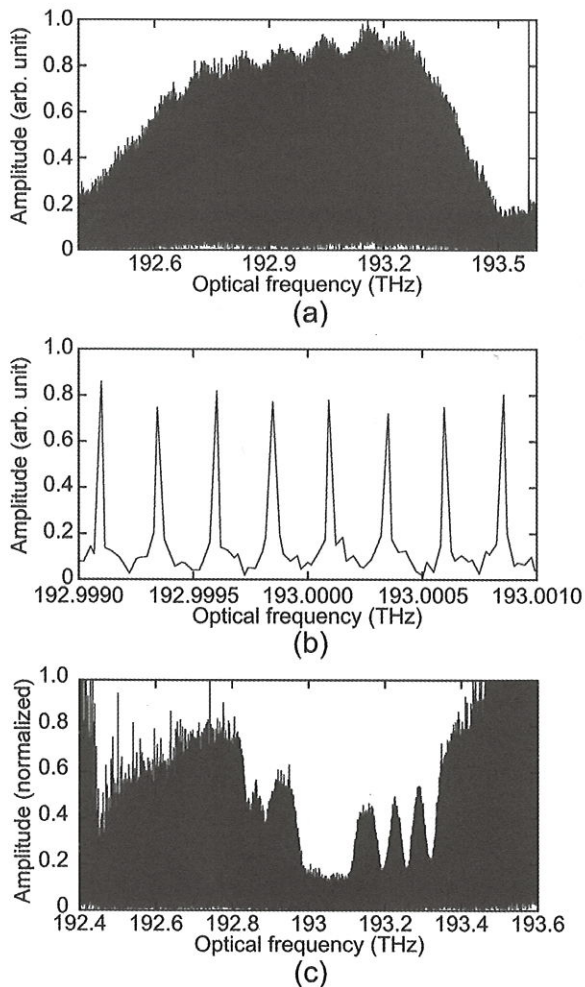


Fig. 3 (a) Mode-resolved OFC amplitude spectrum and (b) its magnified spectrum in the no-pattern area. (c) Mode-resolved OFC amplitude spectrum in the pattern area.

除去するため、テストターゲットのパターンが無い部位（ミラーと等価）のスペクトル (Fig. 3(a)) で規格化した。スペクトル凹凸が、サンプル・パターンの反射率を反映して変化する様子が確認できる。この規格化スペクトル形状が、X軸方向のラインイメージを反映することになる。

次に、モード分解光コム振幅スペクトルからX軸ラインイメージを読み出しながら、サンプルをY軸方向に1 μm 刻みで150ステップ移動させることにより、2次元イメージを取得した結果が、Fig. 4(a)である(イメージサイズ = $456 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ 、ピクセルサイズ = $5,000$ ピクセル \times 150 ピクセル)。ここで、X軸は波長軸、Y軸は機械走査軸に対応する。テストチャートのイメージが確認できる。イメージにおいて、横方向に現れている縞模様は、以下のように考えることができる。デュアル光コム分光光源にタイミングジッターがあると、取得したインターフェログラムの強度が、時間的に揺らぐことになる。インターフェログラムをフーリエ変換して取得した振幅スペクトルが水平のラインイメージに対応するので、縦方向にサンプルを走査して2次元イメージを取得すると、タイミングジッターの影響により横方向に縞模

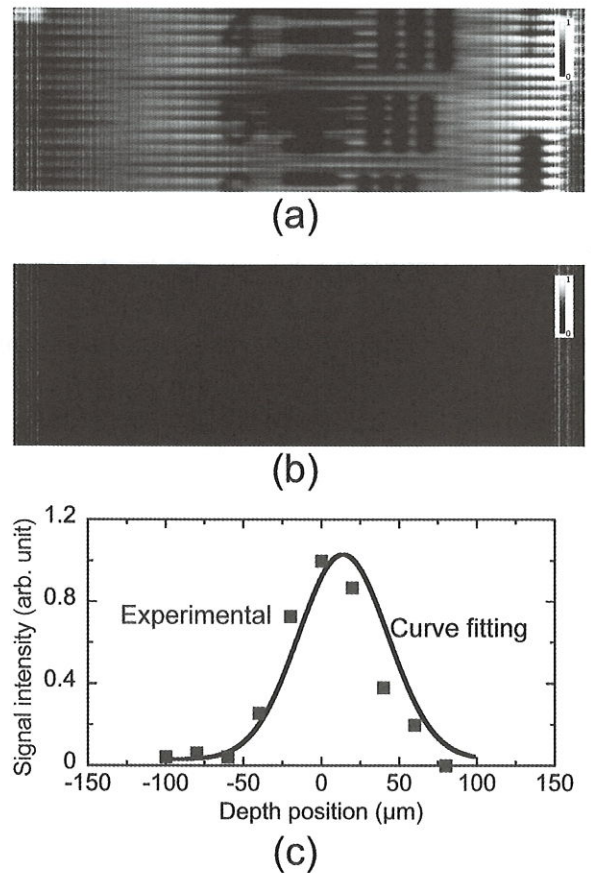


Fig. 4 2D image of test chart (a) at the focus ($Z = 0 \mu\text{m}$) and (b) at out of focus ($Z = +120 \mu\text{m}$). (c) Depth profile of the signal.

様が現れる。面内の空間分解能は、対物レンズの回折限界で制限されており、横方向が $5 \mu\text{m}$ (理論値 $3.2 \mu\text{m}$)、縦方向が $11 \mu\text{m}$ (理論値 $3.8 \mu\text{m}$)であった。理論値との相違は、光学アライメントが不十分なためであると思われる。

一方、サンプル位置を焦点位置から $+120 \mu\text{m}$ だけずらした時($Z = +120 \mu\text{m}$)の2次元イメージがFig. 4(b)である。Fig. 4(a)で確認されたテストパターンイメージは全く観測されなかった。Fig. 4(c)のプロットは、サンプル位置を深さ方向に走査していった時の信号強度の変化を示している。ガウス関数でカーブフィッティングを行ったところ、深さ分解能は $50 \mu\text{m}$ となり、理論値($43.6 \mu\text{m}$)と良く一致した。

4. まとめ

本稿では、ラインフィールド共焦点デュアル光コム顕微鏡を紹介した。ラインイメージ画素を光コムへスペクトル重畳した後に、デュアル光コム分光法でモード分解光コム振幅スペクトルを読み出すことにより、ラインイメージがデコードできることを確認した。光コムの光周波数モード数は 10^5 以上に達し、2次元イメージの絵画素数程度はカバーできるので、回折格子の代わりに2次元波長分散素子³⁾を用いると、フルフィールド共焦点イメージングも可能になる⁹⁾。

謝 辞

本研究は、JST、ERATO美濃島知的シンセサイザ(IOUS)プロジェクト及び日本学術振興会・科研費・基盤研究(A)15H02025によって助成された。

参考文献

- 1) C. J. Sheppard and D. M. Shotton: *Confocal laser scanning microscopy* (BIOS Scientific Publishers, Oxford, 1997).
- 2) G. J. Tearney, R. H. Webb, and B. E. Bouma: *Opt. Lett.* **23** (1998) 1152.
- 3) K. K. Tsia, K. Goda, D. Capewell, and B. Jalali: *Opt. Lett.* **34** (2009) 2099.
- 4) Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: *Nature* **416** (2002) 233.
- 5) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann: *Optica* **3** (2016) 414.
- 6) E. Baumann, F. R. Giorgetta, W. C. Swann, A. M. Zolot, I. Coddington, and N. R. Newbury: *Physical Review A* **84** (2011) 062513.
- 7) I. Coddington, W. Swann, L. Nenadovic, and N. Newbury: *Nat. Photonics* **3** (2009) 351.
- 8) T. Yasui, E. Hase, S. Miyamoto, Y.-D. Hsieh, T. Minamikawa, and H. Yamamoto: *Proc. SPIE* **9720** (2016) 972006.
- 9) E. Hase, T. Minamikawa, S. Miyamoto, H. Yamamoto, and T. Yasui: *Proc. SPIE* **10076** (2017) 100760X.