

SF-STAMP 光学系を用いたマルチスペクトラルイメージング

Multispectral Imaging using Sequentially Timed All-optical Mapping

Photography utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP) system

肥田 遼平 (B4), 鈴木 敬和 (M1), 伊佐文宏 (M2), 植田隆太 (B4)

Ryohei Hida, Takakazu Suzuki, Fumihiro Isa, and Ryuta Ueda

Abstract

We propose a compact single-shot multispectral imaging method using SF-STAMP (Sequentially timed all-optical mapping photography utilizing spectral filtering) system. 20 spectral images in visible range (500 ~ 650 nm) are obtained using a supercontinuum laser pulse (350 ~ 950 nm) generated by induced phase modulation in a rare-gas filled hollow core fiber.

1. はじめに

スペクトラルイメージング技術は、空間的なスペクトル情報を与える手法である。物理現象の観察のみならず、化学、生物学、農学、医学、天文学等、様々な分野においても必要とされており、現在様々な手法が考案されている [1]。一般的に、スペクトラルイメージングの手法は、2 つに大別される。1 つ目は、空間や波長ごとに走査を繰り返し、全体の情報を取得する方法である。これは、機械的走査により撮像スピードや撮像対象が制限される。2 つ目は、機械的な走査を行わずに、空間情報とスペクトル情報を同時に取得するスナップショット計測手法である。その例として、CT (Computed Tomography) imaging spectrometry [2] や、Image mapping spectrometry (IMS) [3] 等が挙げられるが、これらの多くは、コンピュータによる画像構築計算が必要であることや、光路が複雑になり光学素子の調整が困難であることが問題として挙げられる。一方で、このような画像再構築計算や、複雑な光路調整を必要としないシンプルなスナップショット計測の手法として、STAMP [4]におけるペリスコープアレイを利用した Multispectral imaging with a

periscope array in a spectral shaper (MIPASS) [5]や、Spectrum slicer (SS)を利用した手法 [6]なども開発されている。ただし、報告例では同時に計測できる波長は5種類に限られている。

本研究では、単発超高速イメージングを実現する SF-STAMP 光学系 [7]をマルチスペクトラルイメージングへと応用することで、機械的走査や、複雑な計算処理を行わずに、コンパクトかつ直接的に報告例以上の波長での2次元スペクトル画像の撮像を可能とした。

2. 実験装置

2.1 SF-STAMP 光学系

本研究で使用する SF-STAMP 光学系のセットアップ図を Fig. 1 に示す。

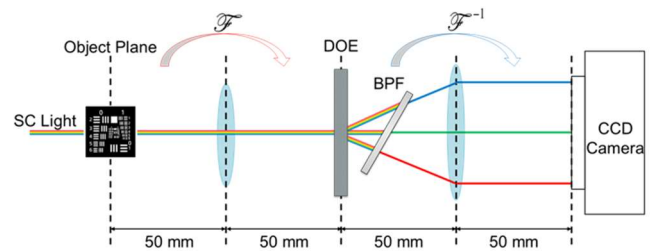


Fig. 1 Schematic of SF-STAMP system

SF-STAMP 光学系は2枚のレンズによる $4f$ フーリエ結像光学と回折光学素子 (DOE : Diffractive Optical Element) と波長選択フィルタ (BPF : Band-Pass Filter) による波長の空間分解を組み合わせたシステムである [7]。入射したビームは、1枚目のレンズ (焦点距離 $f_1 = 50$ mm) によって光学的にフーリエ変換される。その後、フーリエ面に配置された DOE によって複数のアレイビームへと空間

的に複製される。本研究で用いた DOE (HOLOEYE, customized model) では、25 個のビームアレイに複製することができる。次に、DOE から分岐したアレイビームは、BPF によって波長選択される。BPF にはビームの入射角 θ に依存して透過波長 $\lambda(\theta)$ が変化する性質を持っており、その理論式は次のように表される。

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_{eff}}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 λ_0 は BPF の中心透過波長、 n_{eff} は有効屈折率を表している。この性質を利用して、BPF を図のように傾けることにより波長選択が可能となる。また本研究では、より広帯域に波長を選択するために、Fig. 2 に示すように BPF を 2 枚用いた。1 つ目の BPF (Semrock, LL02-561) は、中心波長 561.4 nm、バンド幅 2.1 nm (FWHM) であり、2 つ目の BPF (Semrock, LL01-671) は、中心波長 671.0 nm、バンド幅 2.6 nm (FWHM) の性質をもつ。また本研究では、図に示すように BPF の境目となる 5 個のビームに関しては使用せず、残りの 20 個のビームを用いて実験を行った。

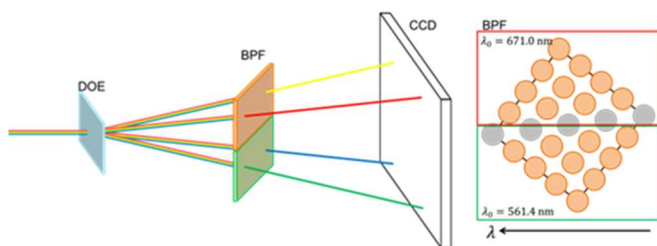


Fig. 2 Schematic of BPFs layout

次に、波長選択されたアレイビームは 2 枚目のレンズ (焦点距離 $f_2 = 50$ mm) によって光学的に逆フーリエ変換され、結像面上に配置した CCD カメラによって撮像される。本研究で使用した CCD カメラ (BITLAN, BU-55LN) のピクセル数は 4872×3248 pixels (各ピクセルサイズ $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$) であり、受光面のサイズは、 $36.1 \text{ mm} \times 24.0 \text{ mm}$ であ

るので、1 つのスペクトラル画像は 229000 pixels で計測され、結果的に本システムの空間分解能は $37 \mu\text{m}$ になる。

2.2 セットアップ全体図

本研究では、光源として 2 種類を用意した。1 つ目は白色ランプ光源 (OLYMPUS, U-HGLGPS) であり、2 つ目は、モードロック Ti:Sapphire レーザ (Coherent, Mira) をチャープパルス増幅器 (CPA : Chirped pulse amplifier) により増幅したフェムト秒レーザーパルスである。まず、白色ランプによるセットアップ図を Fig. 3 に示す。

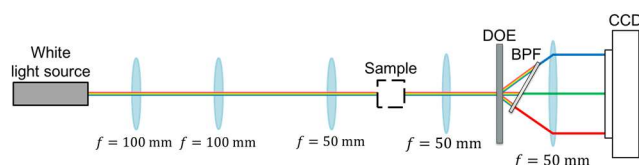


Fig. 3 Schematic of multispectral imaging using a white lamp source

白色ランプ光源から出射された光は、 $f = 100$ mm のレンズによってコリメートされ、エキスパンダー ($f = 100$ mm, $f = 50$ mm の 2 枚のレンズ) によってビーム径を調整後、SF-STAMP 光学系によって CCD 面上にイメージが結像される。また、DOE において回折光を得るためには、ビームの空間コヒーレンス性が必要である。白色ランプ光源では空間コヒーレンス性が低いため、本実験ではピンホールを挿入することで点光源とみなし、空間コヒーレンス性を向上させた。

本研究で用いた白色ランプのスペクトルを Fig. 4 に示す。

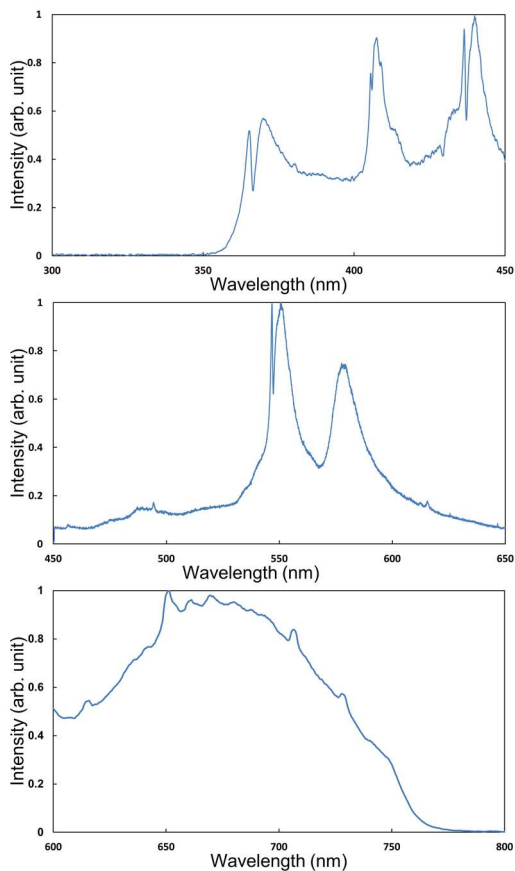


Fig. 4 Spectra of white lamp source

次に、Ti:Sapphire レーザ光源によるセットアップ図を Fig. 5 に示す。

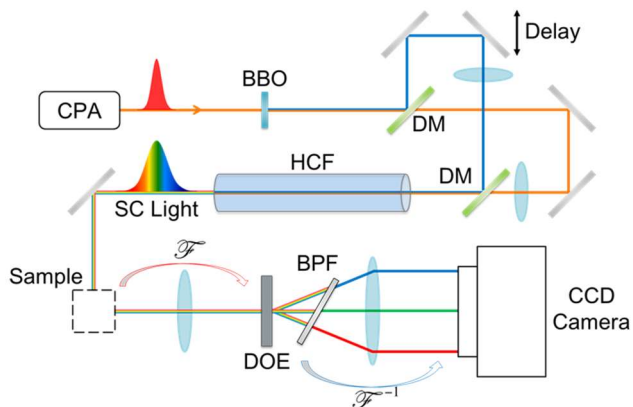


Fig. 5 Schematic of multispectral imaging using a Ti:Sapphire laser pulse

まず、CPA により増幅された Ti:Sapphire レーザパルス (平均出力 1.1 W, 繰り返し周波数 1 kHz,

パルス幅(FWHM)50 fs) を、厚さ 2 mm の BBO 結晶へ入射させ、第二高調波発生を行なった。その後、基本波 (800 nm) と二倍波 (400 nm) を時間的空間的に重ね合わせ、希ガス封入中空ファイバ (HCF : Hollow core fiber) へ入射させることで、誘起位相変調 (IPM : Induced phase modulation) による可視域から近赤外領域に渡る広帯域パルスが発生させた。発生した広帯域パルスのスペクトルを Fig. 6 に示す。

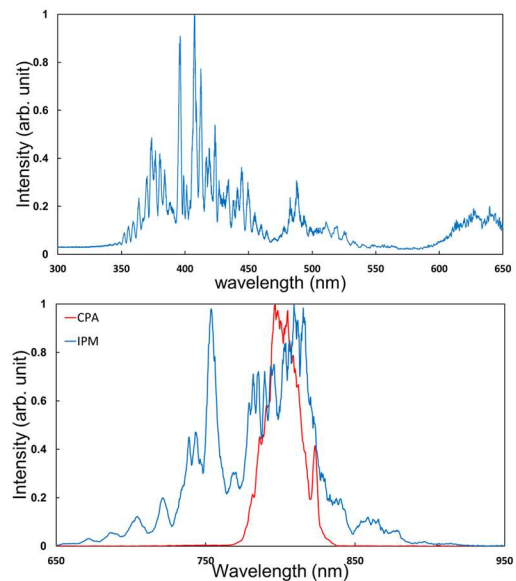


Fig. 6 Spectra of SC pulse

Fig. 6 より、IPM によって波長 350 nm ~ 950 nm にわたる広帯域パルスが発生していることが分かる。この広帯域パルスを用いてマルチスペクトラルイメージングを行なった。

3. 実験結果・考察

まず、DOE と BPF によって選択される波長のスペクトルを、SC 光を用いて計測した。その結果を Fig. 7 に示す。

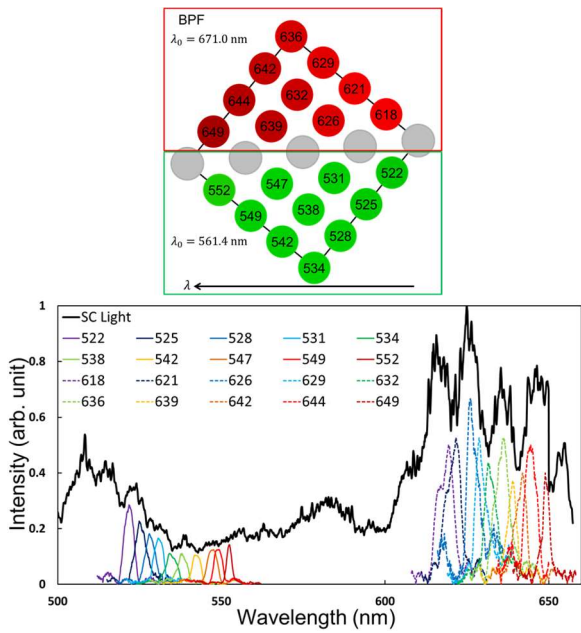


Fig. 7 Spectral property of an SC pulse and spectral bands of 20 different wavelength images

Fig. 7 から、DOE から分岐したビームが入射角に依存して異なる 20 波長を選択できていることが分かる。その波長帯域は 520 ~ 650 nm に及ぶ。次に、USAF テストターゲットの透過イメージングを行なった。その結果を Fig. 8 に示す。

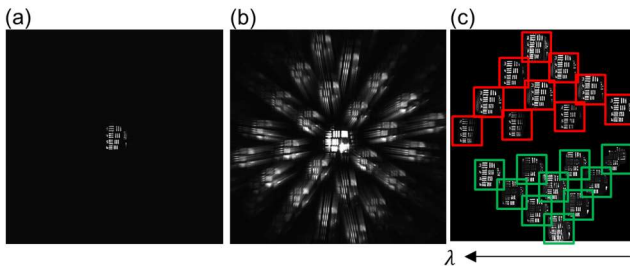


Fig. 8 Result of USAF targets imaging (a) No DOE and BPF (b) With only DOE (c) With DOE and two BPFs

Fig. 8 (c)において、短波長側($\lambda_0 = 561.4$ nmの BPF 側)の強度が弱いため、画像処理により加工しており、BPF の境界となる中央の 5 個のビームは消している。入射したイメージは、DOE を通ることで、(b)のように 25 個のビームに分岐するが、DOE の回折広がり角には波長依存性があるため、0 次光

以外は像が伸びて見えるのが分かる。そこに BPF を用いると波長選択されるため、(c)のように像がはっきりと結像するようになる。次に、撮像対象を変えてマルチスペクトルイメージングを行なった。用いた撮像対象を Fig. 9 に示す。

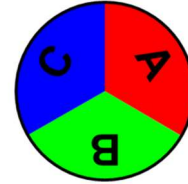


Fig. 9 Multispectral imaging target

この撮像対象(直径 20 mm)を OHP シートへカラー印刷し、マルチスペクトルイメージングを行なった。このときの対象の透過スペクトルとイメージングの検出波長との関係を Fig. 10 に示す。

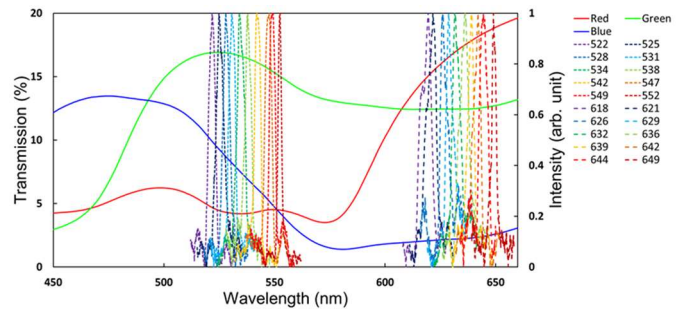


Fig. 10 Target spectra and spectra selected by two BPFs

これにより、色の識別を行なった。まず、白色ランプによる実験結果を Fig. 11 に示す。

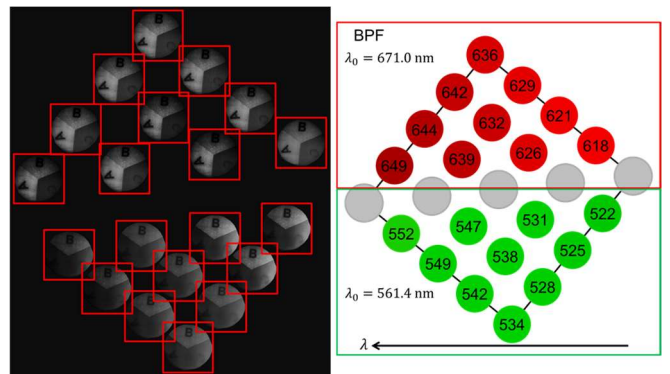


Fig. 11 Result of multispectral imaging with white lamp source

ここで、先ほど述べたように BPF の境界となる 5 個のビームに関しては、画像処理により削除している。Fig. 11 より、長波長側($\lambda_0 = 671.0$ nmの BPF 側)では赤色である A の領域が強く結像し、短波長側($\lambda_0 = 561.4$ nmの BPF 側)では緑色である B の領域が強く結像していることが見て取れることから、確かにマルチスペクトルイメージングできていることが分かる。次に、IPM による広帯域パルスを用いた実験結果を Fig. 12 に示す。

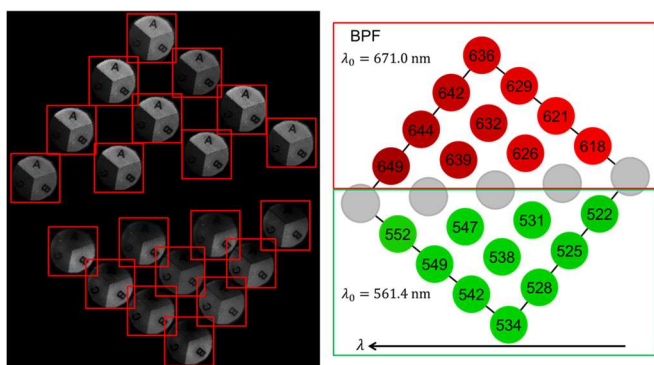


Fig. 12 Result of multispectral imaging with SC pulse

Fig. 12 より、広帯域パルスを用いた場合でも、白色ランプと同様の結果を得る事ができた。今回の実験では 30 ms, 30 パルスを積分したイメージであるが、単一パルス計測によって高速イメージングにも応用可能であると考えられる。

次に、撮像対象を Fig. 13 に示すビーズへと変えてマルチスペクトルイメージングを行なった。ここで、ビーズの直径は 1.5 mm である。



Fig. 13 Multispectral imaging target (Beads)

また、このビーズの散乱光スペクトルを Fig. 14 に示す。

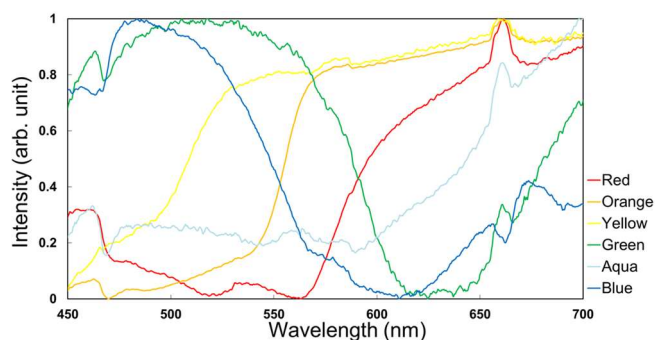


Fig. 14 Beads spectra

Fig. 14 より、ビーズの色の違いによって、散乱光スペクトルの違いが分かる。これによりビーズのマルチスペクトルイメージングを行なったが、この実験はうまくいかなかった。その原因として主に2つのことが考えられる。1つ目にビーズを観測する際には、散乱光を用いたが、散乱することによって光の波数ベクトルが乱れ、DOE による回折光を利用したビームの複製がうまく機能しなかったこと、2つ目に、今回の広帯域光では強度が弱く、散乱光の観測には十分ではなかったことである。ピンホール等によって波数ベクトルを揃えることもできるが、同時に高い空間周波数成分がフィルタリングされるため、イメージングとしては向いていない。別の手法による広帯域光の発生も検討していく必要があると考える。

最後に、考察として、白色ランプ光源と広帯域パルスを用いる場合との比較を行なう。上記したように、本実験で用いた DOE には、光の空間コヒーレンス性が必要である。レーザー光はコヒーレンス性が良いが、白色ランプはコヒーレンス性が低いため、ピンホールを用いて波数ベクトルを揃える必要がある。また、広帯域パルスはパルスであるため、単一パルス計測による高速イメージングへの応用が可能であるが、白色ランプ光源は連続光であるので、高速イメージングへは向いていないことが考えられる。

4. 今後の展望

今後の展望として、撮像帯域を広げる案を挙げる。Fig. 6 に示すように、IPM によって 350 nm ~ 950 nm にわたる広帯域の発生に成功しているため、BPF による波長選択を変えれば原理的に可能である。今回の実験では 2 枚の BPF を配置したが、Fig. 13 に示すように、BPF アレイを作成することでより広帯域に波長選択することが可能になると考える。

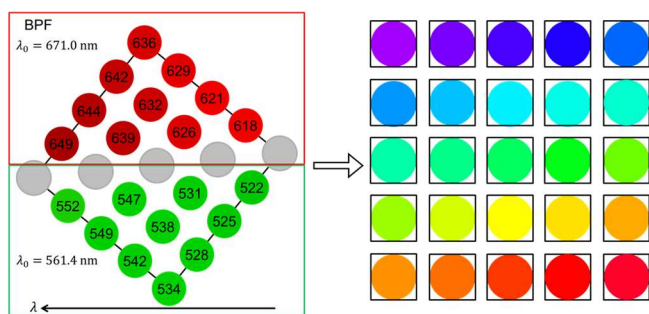


Fig. 13 Design of BPF array

5. 結論

本研究では、超広帯域光源 (350 nm ~ 950 nm) を利用して SF-STAMP 光学系をマルチスペクトラルイメージングへと応用した。それは、機械的走査や複雑な計算処理を必要としないスナップショット計測であり、コンパクトかつ直接的な 2 次元スペクトル画像の一括イメージングを可能とする。また、可視域 (520 nm ~ 650 nm) でのデモンストレーションを行ない、観測結果から対象物の色の識別を行なうことに成功した。今後の展望としては、BPF アレイによって 25 波長を選択可能であり、それは、可視域のみならず、紫外、赤外にも応用可能であると考えられる。また、広帯域パルスでの単一ショット計測を行なうことで、高速撮像にも応用可能である。

References

[1] L. Gao and L. V. Wang, "A review of snapshot multidimensional optical imaging: Measuring

photon tags in parallel," *Phys. Rep.* **616**, 1 (2016).

[2] M. Descour and E. Dereniak, "Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results," *Appl. Opt.* **34**, 4817 (1995).

[3] L. Gao, R. T. Kester, and T. S. Tkaczyk, "Compact Image Slicing Spectrometer (ISS) for hyperspectral fluorescence microscopy," *Opt. Express* **17**, 12293 (2009).

[4] K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirose, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)," *Nat. Photonics* **8**, 695 (2014).

[5] K. Hashimoto, H. Mizuno, K. Nakagawa, R. Horisaki, A. Iwasaki, F. Kannari, I. Sakuma, and K. Goda, "High-speed multispectral videography with a periscope array in a spectral shaper," *Opt. Lett.* **39**, 6942 (2014).

[6] M. Tamamitsu, Y. Kitagawa, K. Nakagawa, R. Horisaki, Y. Oishi, S. Morita, Y. Yamagata, K. Motohara, and K. Goda, "Spectrum slicer for snapshot spectral imaging," *Opt. Eng.* **54**(12), 123115 (2015).

[7] T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirose, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering," *Opt. Express* **23**, 30512 (2015).