

FD-OCTを用いた正確な 深さ測定のための光源キャリブレーション

マークス・デュルク

フーリエドメイン光コヒーレンストモグラフィ (FD-OCT) による正確な深さ情報の作成は、光源の適切なキャリブレーションに依存する。非線形サンプリングを考えるにあたり、2種類の異なる一次FD-OCT実装が考えられる。スペクトルドメイン (SD-OCT) と掃引光源 (SS-OCT) だ。

フーリエドメイン光コヒーレンストモグラフィ (FD-OCT) はコヒーレンスゲート技術である。光波数に応じて、固定した群遅延における参照光とともに、試料からの後方散乱光を合成して形成される干渉シグナルを取得する。異なる遅延における試料からの後方反射光または後方散乱光によって、干渉スペクトル内で振動またはフリッジが形成される。遅延が増加すると、干渉スペクトル内で振動数がより高くなる。そして干渉スペクトルを逆フーリエ変換 (FT) すると、深さスキャン情報 (散乱体の大きさと位置) を取得できる (自己相関とスペクトルパワー密度との間にあるウィーナ・ヒルチンの定理が原理となる)。

一次FD-OCT実装には2種類ある。スペクトルドメイン (SD-OCT) と掃引光源 (SS-OCT) だ。この2種類は、使われる光源のタイプと検出器によって区別される。かつてのタイムドメインOCTのように、SD-OCTはスーパーレミネセント発光ダイオード (SLED) といった低コヒーレンス広帯域源を使用するが、検出器アレイを横切る検出アーム内の干渉シグナルスペクトルを分光する分光計に依存する。SS-OCTでは、一つの検出器を用いて、広帯域スペクトル全体で線幅の狭い光源を時間的に掃引して干渉シグナルを取得する。

いずれの実装にも、光周波数 ($\nu=c/\lambda$) または波数空間 (k 空間、 $k=2\pi/\lambda$) において、本質的には非線形サンプリング処理が含まれている。このため、深さと範囲の正確な情報を抽出するときには、逆FTに先立って均一な k 空間の干渉スペクトルサンプルの取得を目的とした、周波数または k 空間のキャリブレーションが必要となる。

スペクトルドメインを考える

SD-OCTシステムでは、広帯域の光源と干渉計 (サンプルアームと参照アームから構成される) で生じる干渉シグナルを計測するために、分光計とラインスキャンカメラ (フォトダイオードアレイ) を用いる。分光計には、ビームアラインメント光学、回折格子、均一に配置された感光ピクセルをもつラインスキャンカメラが一般に組み込まれている。格子は空中で次の式によって入力スペクトルを分光する。

$$m * f * \lambda = \sin \phi - \sin \Theta$$

m は格子の回折次数、 f は空間周波数、 λ は波長、 ϕ は入射角、 Θ は回折角である。格子によって分光された光の回折角が、波数の非線形関数 $k=2\pi/\lambda$ であることがすぐに観察できる。そのため、ラインスキャンカメラが記録したスペクトルは、 k 内に不均一に配置される。

現在の方法では、逆FTを実行する前に、計測されたスペクトルのインターフェログラムを補間することと、波数ドメインにデータをスケール変更することが含まれている。コンピュータとしては集約的になるが、この処理は、ピクセル間の不均衡な波数の配置を効率よく修正し、OCTイメージの分解能を維持する。しかしながら、このスケール変更処理は第2の問題を解決できない。第2の問題とは、検出アレイのピクセルによって統合されたスペクトル幅が帯域幅において不均衡であることだ。これはイメージング深さのOCTシグナルの低下につながる。

掃引光源を考える

SS-OCTでは、波長を掃引した狭帯域レーザは、やがてスペクトル符号化を作成する。スペクトル情報は、一時的な干渉シグナルを記録することで取得できる。この場合の非線形特性は、2つの原因から生じる。

第一は、共鳴またはポリゴンスキャナ内のファブリ・ペローフィルタまたは回折格子に基づくような、掃引レーザにおける波長選択要素には、光周波数ではなく、波長の変化に比例する駆動信号 (電圧など) がある。そのため、SD-OCTの場合に近いが、 $\nu=c/\lambda$ を用いて波長 (λ) を周波数 (ν) に変換す

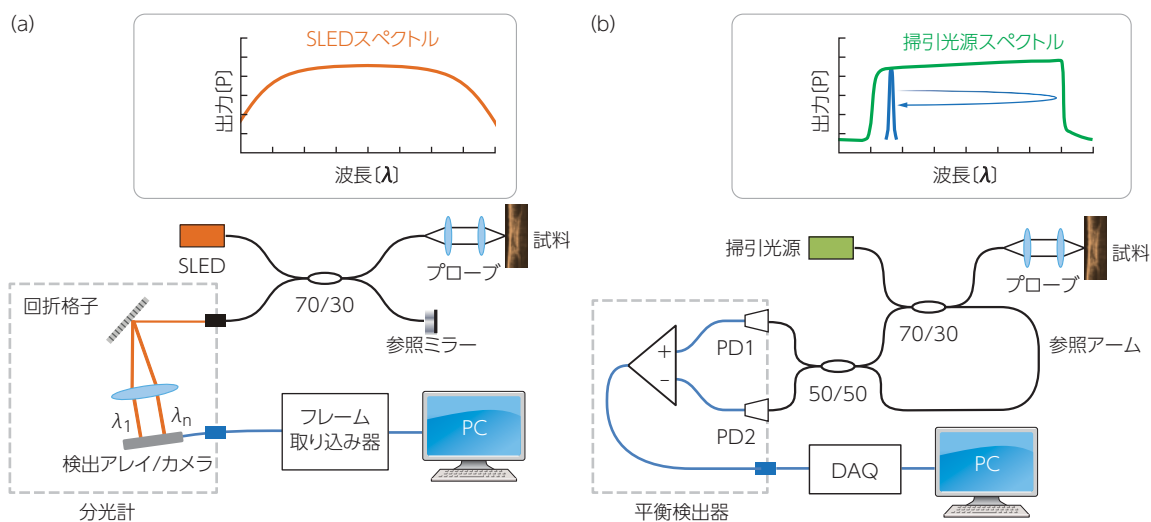


図1 SD-OCT (a)とSS-OCT (b)システム。いずれも反射性マイケルソン干渉計である。

る補正が必要となる。

第二に、これら光学フィルタのスキャン機序は、圧電、静電、微小電気機械システム (MEMS) アクチュエータ、もしくはガルバノメータから構成されているのが一般的であり、経時的にスキャンの線形性や不変性において異なる制限、さらに異なる動作条件がある。特に掃引する周波数が高いと、スキャン信号は、より顕著な非線形な掃引動作を生み出す正弦波パターンに制限されがちである。

この非線形スペクトル掃引を解決するためには、 k 空間をキャリブレーションする2つの技術が通常考えられる。ダイレクトな k クロックサンプリングと、線形の経時的サンプリングである。これらはSD-OCTで使われるソフトウェアの再キャリブレーションに続いて実行される。

ベースライン性能の計測と関連する重要なパラメータには、掃引レーザの線幅またはコヒーレンス長、サンプリング間隔、検出帯域幅、ノイズ等価バンド幅がある。

線幅、掃引範囲、パワーという基本的なレーザ源のパラメータのうち、瞬間の線幅 ($\delta\lambda$) またはコヒーレンス長

(l_c) は、レーザ動作とそれによるイメージング性能を理解する上で最重要項目である。さらに、実際のSS-OCTイメージングの実装では、イメージング深さは2つのパラメータに本質的に影響される。

- ① 光源において有限な波長の線幅 ($\delta\lambda$) または周波数の $\delta\nu$ ($\delta\lambda = -c/\nu^2 \delta\nu$)。これらはイメージング深さで感度の低下につながる。
- ② スペクトルのサンプリング間隔 (dk)。これは観察できるイメージング範囲を制限する。

ガウス型スペクトルの線形を仮定すると、コヒーレンス長は以下の関係に従ってレーザの動的線幅と関連する。

$$l_c = \frac{2\ln 2}{\pi} \times \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda} \times \frac{2\ln 2}{\pi} \times \frac{-c}{\delta\nu}$$

λ_0 は中心波長である。ここではコヒーレンス長を、コヒーレンス関数の半値半幅 (HWHM) と定義している。波長を掃引したレーザにとって、瞬間の線幅は掃引スペクトルによって変わる傾向にある。これは、波長が空洞パラメータや動態に依存するためだ。急速掃引したレーザの瞬間の線幅を特性化するのは難しく、連続した掃引間の時

間と波長の関係を正確にマッピングすることが必要であるため、2種類の間接アプローチが一般的である。一つ目の方法は、マイケルソン干渉計 (IM) またはマッハ・ツェンダ干渉計 (MZI) でキャリブレーションした光路長さ (OPD) を関数として、干渉フリンジの大きさを計測してコヒーレンス長を推定することである (図1)。この処理はタイムドメイン (波長ドメイン) の低下カーブのセットを作成する。波長を関数とするコヒーレンス長は、干渉フリンジの大きさが最大値 (OPD=0となる値) の半分に落ちる OPD として定義される。OCT イメージングは後方散乱に基づくため、OPD はイメージング範囲 dk の2倍に一致する。

図2では、2つの OPD におけるフリンジの大きさと掃引時間 (波長) を描いた。最小参照 OPD は通常 0.1 ~ 0.2 mm である。これは、ちょうどゼロ経路長さでフリンジパターンが実質的に消失するためだ。フリンジの大きさの50%は、OPD がコヒーレンス長に向かって増加することで得られる。非線形な掃引であるため、波長軸を適切にキャリブレーションしなければならないことに注意する。

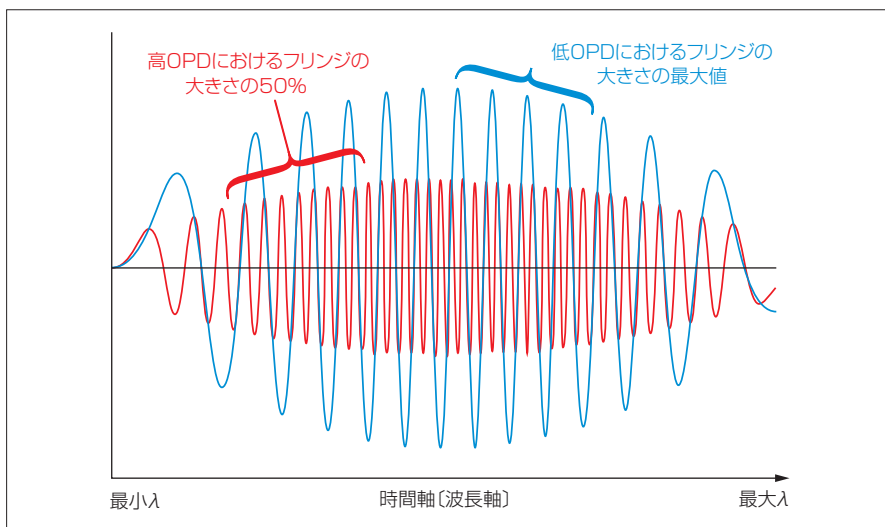


図2 タイムドメインのアプローチを用いたコヒーレンス長の計測。2つのOPDにおけるフリンジの大きさと掃引時間(波長)を描いたカーブ。

このタイムドメイン(波長ドメイン)のアプローチによって、全ての掃引スペクトルに沿ってコヒーレンス長の変化量を特性化できる。図3では、40kHzのAスキャン(ファイバ出力における平均光学掃引パワーは20mW、最大パワーは~40mW)で両方向から掃引した1300nm光源の波長に応じた、コヒーレンス長のサンプルプロットを示した。レーザは、10~12mmまでの瞬間コヒーレンスで、アップ掃引(波長の短いほうから長いほうへ掃引)の場合とダウン掃引(波長の長いほうから短いほうへ掃引)の場合と、高い掃引対称性を示す。レーザの空洞ダイナミクスとアラインメントは、掃引方向によって異なるコヒーレンスの特性化を引き起こす可能性があり、光源を両方向から掃引したときの大きさ(およびノイズ)の低下を均衡するため、正確な技術努力が必要になるかもしれないことに留意する。

平均コヒーレンス

もう一つの方法として、掃引光源の平均コヒーレンスを得ることは、しばしば便利で有用だ。掃引における位相変動の原因にもなるためである。平均コヒーレンス長は、増分イメージング

範囲($d_R = \text{OPD}/2$)またはOPD位置における逆FTを経た「 k 空間で再マッピングされた」干渉スペクトルからの点広がり関数(PSF、例えばシステムのインパルス応答)の計算に由来する。イメージング範囲またはOPDに応じたピークPSFの大きさの減衰は、掃引を通じた光源の平均コヒーレンス特性の尺度と見なされる。この「空間ドメイン方法」には、距離分解能と k 空間のサンプリングステップの正確性に関する情報が得られるという利点がある。フリンジが50%に低下するときと定義された平均コヒーレンス長は、次のOPDと一致する。光学PSF(PSF_o)が50%低下したとき(例えば、3dBの減衰を $10 - \log_{10}(\text{PSF}_o)$ として定義したもの)のOPDと、電気的PSF(PSF_e)が6dB落ちたとき(光検出処理による $20 - \log_{10}(\text{PSF}_e)$ として定義したもの)のOPDとである。便宜上よく使われる関係を、図3に参考として掲載する。

コヒーレンス長とイメージング深さ

コヒーレンス長は光源の性能パラメータであり、イメージング深さはSS-OCTイメージングシステムの性能パラメータであると理解することは、多くの

場合重要である。ほとんどのシステムベンダーは、掃引光源の最小コヒーレンス長(大きさの低下)を明確にしているが、OCTシステムのイメージング性能は、線形化アルゴリズムを含めた光源と全システムのSNRの低下の挙動によって決まる。SNR(イメージング深さ)が6dB落ちることは、光源の大きさが6dB落ちることと同じであると一般的には思われているが、多くの場合そうではない。イメージング深さと、それによって必要とされるコヒーレンス長またはSNRの低下は、一般にアプリケーションに影響される。例えば、網膜のOCTイメージングには3~4mmのイメージング深さが必要となるが、前房のイメージングには7~8mmのイメージング深さが必要となる。後者は内視鏡的なOCTアプリケーションに似ており、そのアプリケーションではよく5~10mmのイメージング深さが要求される。

この議論の中心となることは、SNRと距離イメージング分解能を最大化させるときである。そのときには、逆FTをAスキャンに落とし込む前に、デジタルに抽出されたSS-OCTスペクトルのインターフェログラムは、周波数または k ドメインにおける dk によって均一

エッジウェーブ社製
コンパクト高出力
極短パルスレーザー

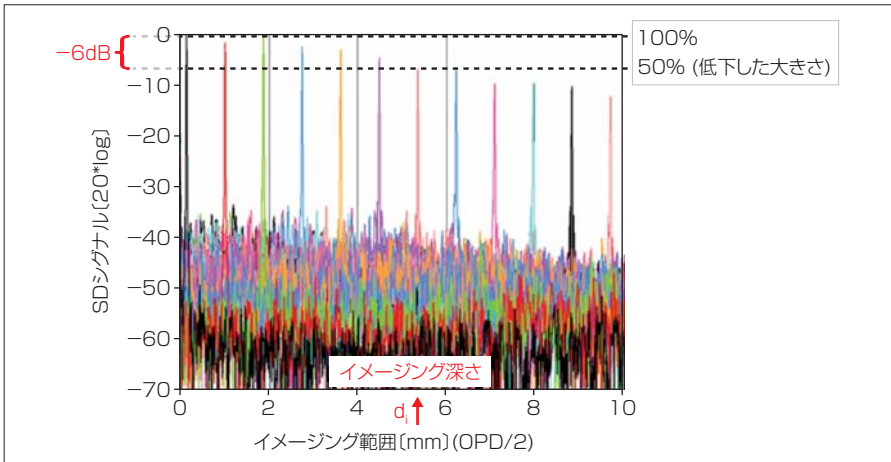


図3 40kHzレートのアスキャンで両方向から掃引した、1300nm光源におけるイメージング範囲 (dR = OPD/2)に応じた、空間ドメインのPSFe低下。

に配置されなければならない。このスペクトルサンプリング間隔 (dk) によって、最大サンプリング深さ z_{max} が決定する。そこでは次のナイキスト基準が与えられる。

$$z_{max} = \frac{\pi}{2 \delta k} = \frac{1}{4} \times \frac{\lambda^2}{\delta \lambda}$$

$d\lambda$ は波長のサンプリング間隔である。例えば、波長を $\lambda=1310\text{nm}$ 、 $d\lambda=0.1\text{nm}$ とすると、片面のイメージング深さ $z_{max}=4.3\text{mm}$ となる。 $d\lambda$ は通常 $\delta\lambda$ よりも広く、 $d\lambda=\delta\lambda$ で $z_{max}=di$ となると、PSFeの低下距離は -6dB となることに注意する。しかしながら、より深いイメージング範囲を得るための線幅よりも、より高い分解能で抽出できるのは確実である。

最後に

固有の「複素共役曖昧性」のアーチファクトには留意する。FD-OCTでは、実数値であるスペクトル干渉シグナルのFTはエルミート対称性である。その結果、サンプルリフレクターは正の変位であるが、参照リフレクターは負

の変位を伴う。複素干渉シグナルを修正して、複素共役曖昧性を除去することによって、イメージング深さを効率よく2倍にできる。

k 空間のリアルタイムなキャリブレーションとイメージングを促進するためには、パワフルな計算サポートが欠かせない。有用なアプローチの一つに、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) または画像処理装置 (GPU) を盛り込んだデータ収集 (DAQ) システムを組み込むことが挙げられる。こうすることで、前処理、そしてある程度の後処理がDAQカード上で実行できる。処理データは、十分に高速なインターフェイスバス上 (PCI、PCIe、イーサネット、カメラリンクなど) を経て、OCTデータ (Bスキャンや3D容量スキャンなど) の最終的な処理やリアルタイム表示に必要なホストPCに送られる。しかし、次のことに注意すべきである。OCTデータのリアルタイム表示は、通常の中央演算処理装置 (CPU) やGPUでは困難である。そのため、このオプションには十分にパワフルなホストPCが要求される。

著者紹介

マークス・デュルクはスイス、エグザロス社の最高技術責任者。URL: www.exalos.com

LFWJ

フェムト秒レーザー

波長 [nm]	1030	515	343
ビーム品質 M^2	<1.3		1.5
最大平均出力 [W]	200	100	30
最大繰り返し周波数 [MHz]	20		
最大パルスエネルギー [uJ]	100	50	15
パルス幅典型値 [fs]	600		
レーザーヘッド寸法 [mm]	650 x 330 x 156		
レーザーヘッド重量 [kg]	50		

ピコ秒レーザー

波長 [nm]	1064	532	355	266
ビーム品質 M^2	<1.3		1.5	2
最大平均出力 [W]	400	200	90	20
最大繰り返し周波数 [MHz]	20			
最大パルスエネルギー [uJ]	1000	600	300	200
パルス幅典型値 [fs]	<15			
レーザーヘッド寸法 [mm]	650 x 330 x 156			
レーザーヘッド重量 [kg]	50			

ナノ秒レーザー

波長 [nm]	1064	532	355	266
ビーム品質 M^2	<1.3		1.6	2
最大平均出力 [W]	400	200	70	20
最大繰り返し周波数 [MHz]	150		15	
最大パルスエネルギー [uJ]	60	30	15	4
パルス幅典型値 [fs]	<10			
レーザーヘッド寸法 [mm]	650 x 178 x 157			
レーザーヘッド重量 [kg]	34			

出力、周波数等、ユーザーのご要求にあわせたカスタム仕様で提案をさせていただきます。弊社営業部までお問い合わせください。

日本輸入総代理店



http://www.beams-inc.jp/

ビーム株式会社

TEL : 042-797-4141 FAX : 042-797-4441

東京都町田市小山ヶ丘 2-2-5

まちだテクノパークセンタービル 6F

E-mail : sales@beams-inc.jp (営業部)