

論文の内容の要旨

論文題目 デジタルコヒーレント信号処理による分散チューニング
波長掃引OCTの性能向上に関する研究

氏 名 白畑 卓磨

本研究において分散チューニングは波長掃引レーザを光源として用いるOCTの性能向上をデジタルコヒーレント信号処理によって行った。OCTは赤外線を用いた断層イメージング技術であり、非破壊・非接触・非侵襲の断層撮影が可能であることが特徴である。またX線CT等と比べると、浅い領域を高い分解能で見ることにより、リアルタイム撮影が可能であることも利点である。このような特徴を活かし、眼科や歯科で利用が始まっているほか、内視鏡や血管カテーテルと組み合わせた技術も研究されている。

OCTには様々な撮影原理があり最初に考案されたものはTime-domain OCT(TD-OCT)と呼ばれている。この手法では低コヒーレント光源をマイケルソン型の干渉計に入射し、その干渉光から画像情報を取得している。それぞれの光路にはサンプルと参照用のミラーが置かれている。光源の可干渉性が低いと光路差がほぼゼロでないと強い干渉が発生しない。したがって参照用のミラーをサンプルの深さ方向に動かしていき、強い干渉が発生した点には反射面が存在するということである。これにより深さ方向の反射面情報を取得することができるが、ミラーを機械的に動かすために速度が制限されるという欠点がある。そこで考案されたのが周波数ドメインで干渉信号を取得する、Spectral-domain OCT(SD-OCT)とSwept-source OCT(SS-OCT)である。SD-OCTではTD-OCT同様に広帯域光源を用いるが、ミラーを時間的に動かすのではなく回折格子とCCDカメラを用いて周波数領域で干渉信号を取得している。これをフーリエ変換することでTD-OCT同様の断層画像を得ることができる。一方SS-OCTではレーザ光源を使用し、

発振周波数を掃引することで周波数領域の干渉信号を取得している。CCDカメラのような特殊なディテクタを用いる必要がないことが特徴である。これらの周波数ドメインのOCTはTD-OCTに比べて撮影速度や感度が優れているため、現在のOCT研究の主流となっている。

SS-OCTの性能は光源に大きく依存する。具体的には広帯域に波長掃引を行うほど深さ方向の分解能が向上し、高速に掃引を行うほど画像撮影速度が向上し、掃引時のレーザの瞬時線幅が細いほどイメージング深度が向上する。これらの要件を満たすレーザとして、波長可変ファイバレーザが多くの場合に用いられる。これは光ファイバを用いて共振器を構成する光ファイバレーザに、何らかの波長選択フィルタを挿入し、その選択波長を掃引することで発振波長を掃引するものである。現在までにファブリ・ペロー型のフィルタやポリゴンミラー型のフィルタなど様々なタイプのフィルタが用いられ、近年ではMEMSを用いた波長可変レーザも開発されている。しかしいずれの構成においても機械的な動きによって波長選択を行っているため、フィルタによって速度や帯域が制限され、線形な掃引をすることも難しいという問題点がある。

本研究では、分散チューニングという手法を用いた波長掃引レーザについて研究を行っている。分散チューニングでは機械的なフィルタを用いず、電氣的に発振波長を制御することが可能である。その原理は以下のようなものである。レーザの共振器長で決まる発振モードの間隔は自由スペクトル間隔(free spectral range: FSR)と呼ばれているが、FSRは共振器の屈折率に依存する。したがって共振器中の波長分散の値が大きい場合には、屈折率が光の波長に依存するため、FSRも波長に依存する。このFSRの整数倍の周波数で光に変調をかけると高調波能動モード同期が発生し、光がパルス発振するが、FSRが波長に依存するため、変調周波数を変えると発振波長も変化する。これが分散チューニングにおける波長可変の原理である。フィルタによる帯域や速度の制限が存在しないため、高速・広帯域な波長掃引が可能である。

著者が所属する研究室ではこれまで最大250kHzの波長掃引時において、SS-OCT画像の取得に成功している。しかしOCT画像のイメージング深度が1mmに満たないという問題を抱えている。これは波長掃引時のレーザのスペクトル幅が広がっていることが原因である。この原因を探るために分散チューニングの波長掃引のシミュレーションが考案され、高い異常分散の使用、高い変調周波数でのモード同期等によってスペクトル幅が改善されることが示された。しかしこれらの条件を満たそうとすると、波長可変帯域が狭まってしまうというトレードオフが存在する。この問題を解決するために、正弦波変調ではなくパルス変調によってモード同期を行うという手法が考案された。パルス変調は高周波成分を多く含むため、波長可変帯域を保ったまま実効的に高い変調周波数でモード同期をすることが可能である。実際にパルス変調を用いてレーザの瞬時スペクトル幅が改善されたという結果が過去に示されている。

これまで当研究室においては分散チューニング波長掃引光源の性能向上によって

SS-OCTの性能向上を行ってきた。本研究ではデジタル信号処理を応用することによってSS-OCTの性能向上を行った。デジタル信号処理を使用すると光源の性能に依らずにSS-OCTの性能を改善できるため、トレードオフが存在して一定以上に性能を上げることが難しかった分散チューニング掃引光源の問題点を解決可能である。また近年のCPUの大幅な発展によって従来は計算コストが高く、処理に時間がかかってしまい実用的ではなかった計算も短い時間で行うことができる。本研究では光通信で用いられるようになったデジタルコヒーレント受信機による波長掃引の非線形性の補償とFull-range測定と、近年注目されている信号処理技術である圧縮センシングをSS-OCTシステムに応用することで、SS-OCTの性能向上を行った。

デジタルコヒーレント受信機を使用することで複素信号処理が可能となり補助干渉計から得られる波長掃引情報の位相情報の取得が容易になる。フルレンジ測定とリスケリング法による波長掃引の非線形性の補償をデジタル信号処理によって行った。フルレンジ測定によってSS-OCTの実効的な測定可能深度は2倍になる。またリスケリング法による補償によって、43nmの掃引帯域を持つ光源を使用したときの軸方向分解能が位置によらず約85 μ mに改善され、分解能向上にともなってPSFの6dB落ちるまでの距離が1.4mmから3.6mmに向上し、測定可能深度も改善された。分散チューニング波長掃引レーザは原理的に波長掃引を線形に行うことが可能ではあるが、実際には高次分散と増幅率の波長依存性によって波長掃引に非線形が含まれており、非線形性の補償が分散チューニング波長掃引光源を用いたSS-OCTにおいても有効であることが明らかになった。

また分散チューニングの性能分析と構成最適化を行った。分散チューニングの増幅媒質である半導体光増幅器(semiconductor optical amplifier: SOA)は非常に強い自己位相変調効果をもっており使用する分散媒質が異常分散であるか正常分散であるか、上り掃引を用いるか下り掃引を用いるかで大きく性能が異なる。波長非線形性の補償をできるようになり波長線幅の正しい評価が可能になったため、改めて構成を変えたときの分散チューニングレーザの性能を確かめた。異常分散を使用時波長線幅が狭くなることは知られていたが、実験値とシミュレーションの値が大きく異なるという問題があったが、波長掃引の非線形性の補償により波長線幅を正しく評価できるようになりシミュレーションの値に大きく近づくことになった。また正常分散を使用時はSOAの自己位相変調による長波長シフトが効果的に作用するため、掃引速度の補償が起き、異常分散使用時よりも高速掃引が可能であることが明らかになった。

圧縮センシングのSS-OCTへの応用も行った。圧縮センシングとは少ないサンプリング数から元のデータを信号処理によって再構成する技術である。SS-OCTにおいては受信器に要求するサンプリングレートを減らせるという利点がある。圧縮センシングにおいては信号のスパース性とランダムサンプリングが必要となる。SS-

OCT においてはランダムサンプリングの効率的な取得が非常に難しいが本研究では光源として分散チューニングレーザを使用することによってランダムサンプリングを実現した。分散チューニングレーザは任意の波形で周波数掃引が可能であるため、時間上等間隔にサンプリングをしたときに波数空間上では不等間隔なサンプリングが可能となり、圧縮センシングに適している。本研究では波数空間上でランダム間引きサンプリングになるような掃引波形を使用して等間隔サンプリングによる波数空間不等間隔サンプリングデータを取得した。本研究においては 25% のデータ量で養生テープの SS-OCT 画像を再構成することに成功した。

本研究においては分散チューニングレーザを用いた SS-OCT の性能改善のためにデジタル信号処理の応用を行った。デジタルコヒーレント受信機を使用することによってフルレンジ測定と波長掃引の非線形性の補償を行い、光源の性能を向上させることなく、SS-OCT の性能向上に成功した。また波長掃引の非線形性の補償を行った状態で分散チューニングレーザの性能評価をすることによって SOA の自己位相変調の作用を明らかにして、正常分散使用時の高速な掃引が可能であることが示された。そして圧縮センシングを応用することによって、少ないデータ数から、元の OCT 画像を再構成することに成功した。これらの研究成果は、分散チューニングレーザの OCT 光源としてのポテンシャルを示すものである。