

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 白畑 卓磨

本論文は、「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」と題し7章よりなる。医用分野では近年、光による断層イメージング技術である光干渉断層撮影 (Optical Coherence Tomography: OCT)が注目されている。特に波長掃引光源(Swept Source:SS)を用いる SS-OCT は高速・高分解能な断層撮影が可能である。SS-OCT では、掃引波長帯域が広いほど深さ方向の分解能が向上し、瞬時スペクトル線幅が狭いほどイメージング深度が拡大し、掃引速度が速いほど撮影が高速になる。本論文では、分散チューニング波長掃引レーザを用いた SS-OCT システムを、最近の光ファイバ通信に用いられているデジタルコヒーレント信号処理を応用して性能向上を目指した研究成果をまとめたものである。

第1章は序論であり、OCT および光ファイバ通信技術の現状がまとめられており、本研究の目的と論文の構成を明らかにしている。

第2章では OCT の歴史、種類、それぞれの原理および性能についてまとめられており、SS-OCT に用いられる波長掃引光源の実現例が紹介されている。

第3章では分散チューニング波長掃引レーザの原理、利点と課題について述べられている。分散チューニングは高調波能動モード同期を用いたレーザであり、共振器の波長分散値を大きくすることで変調周波数の操作による発振波長の制御が可能となる。フィルタに制限されない高速・広帯域波長掃引、構成の簡便さ、掃引の線形性と自由度が利点であることが主張されている。ただし、課題点として高速掃引時における瞬時スペクトル幅の増大が挙げられている。

第4章ではデジタルコヒーレント信号処理を分散チューニング波長掃引 OCT に応用することを提案し、波長掃引非線形性が補償できるとともに折返しのないフルレンジ測定が可能になることを実証している。デジタルコヒーレント信号処理は最近の大容量光ファイバ通信に用いられている技術であり、光90°ハイブリットにより位相を90°ずらした干渉信号を作ることにより、元の光電界の持つ振幅・位相情報を電気のデジタル信号として取り出すことができる。これを SS-OCT に応用することで、補助干渉計から得られる波長掃引の位相情報の取得が容易になることが示されており、デジタル信号処理によりフルレンジ測定とリスケーリング法による波長掃引の非線形性補償を行っている。実験を行い、フルレンジ測定により測定可能深度が2倍となり、また非線形性

補償により軸方向分解能が約 $85\mu\text{m}$ に改善され、かつそれにもなつてコヒーレンス長が 1.4mm から 3.6mm に向上することを実証している。さらに、実際に OCT 画像を取得し、提案した手法により折り返し信号の除去と分解能・測定深度の改善を示している。

第 5 章では、提案したディジタルコヒーレント信号処理による分散チューニングレーザの性能分析と構成最適化を行った結果がまとめられている。分散チューニングの増幅媒質である半導体光増幅器(SOA)は強い自己位相変調効果を有しており、分散の符号および波長掃引の方向により分散チューニングレーザの性能が大きく異なる。これまではその正確な評価が難しかったが、提案したディジタルコヒーレント信号処理により瞬時スペクトル幅の正しい評価が可能であることを見出し、改めて詳しく分散チューニングレーザの性能分析を行っている。これにより、異常分散時の瞬時スペクトル幅の狭窄化に関するシミュレーションと実験との乖離が是正されるとともに、正常分散時には自己位相変調と波長掃引とのバランスにより異常分散時よりも高速掃引が可能であるという新たな知見を得ている。

第 6 章では、圧縮センシングにより分散チューニング波長掃引 OCT の画像再構成を行った結果がまとめられている。圧縮センシングは非常に少ないサンプリング数から信号を再構成するディジタル信号処理技術であるが、サンプリングのスパース性と同時にインコヒーレント性も必要となる。後者の理由によりこれまでは SS-OCT に圧縮センシングを応用した報告はなかったが、本研究では分散チューニングレーザが任意の波形で周波数掃引が可能であることを利用してランダムサンプリングを実現し、初めて圧縮センシングを用いた SS-OCT システムを実現している。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凹凸波形により分散チューニングレーザを掃引し、等時間間隔サンプリングすることにより不等波数間隔サンプリングデータを取得することにより、25% のデータ量で SS-OCT 画像を再構成することに成功している。

第 7 章は結論であり、本研究の成果をまとめるとともに、今後の課題を展望している。

以上のように本論文は、ディジタルコヒーレント信号処理を分散チューニング波長掃引 OCT に応用することを提案し、波長掃引非線形性が補償できるとともに折返しのないフルレンジ測定が可能になることを実証したのみならず、分散チューニングレーザの性能分析にも適用可能で構成最適化への新たな知見も得るとともに、凹凸波形により分散チューニングレーザを掃引することで SS-OCT に圧縮センシングが適用できることを初めて示しており、電子工学、特に光エレクトロニクスの発展に貢献するところ大である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。