

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21878

研究課題名（和文）光干渉断層像の高速取得を実現する波長可変性の実証

研究課題名（英文）Wavelength sweeping for quick acquisition of an optical coherence tomography image

研究代表者

千葉 明人（Chiba, Akito）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30435789

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：周波数走査光干渉断層計は黄斑疾患や緑内障をはじめとする網膜疾患の診断ツールとして不可欠となっているが、断層画像取得における高速化・高精細化は未だに強く望まれている。本研究ではこの実現の鍵となる光源の波長掃引レート（単位時間当たりの掃引回数）増大に向けて、光源の波長選択のしかたに立脚した独自手法を提案しその検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、眼科における検査のなかでも特に重要となる眼底検査に於いて広く利用される光干渉断層計に関するものである。従来の装置の動作速度は、装置に含まれる光源の構成要素の性能に起因する限界が存在していたのに対し、本研究課題で提案する手法は原理的にその制約を受けないものとなる。得られる知見は断層像取得の所要時間の短縮に繋がることが期待できる点に加え、その結果として取得画像の高精細化に伴う測定データ数の増大に対処できる点からも有用と考えられる。

研究成果の概要（英文）：Swept-Source optical coherence tomography is widely adopted as a diagnostic tool for retinal diseases such as macular diseases and glaucoma. On the other hand, it is still desired to achieve further fast acquisition of high-definition tomographic image. The key to achieve this goal would be to increase the wavelength sweep rate (number of sweeps per unit time) of a light source. In this study we propose and investigate an original unique method that is focus on extraction of the lightwave in wavelength axis.

研究分野：光工学

キーワード：光干渉断層像

1. 研究開始当初の背景

周波数走査光干渉断層計(SS-OCT)は黄斑疾患や緑内障をはじめとする網膜疾患の診断ツールとして不可欠となっているが、断層画像取得における高速化・高精細化は未だに強く望まれている。画像の高精細化に伴い画像取得時間も増大し、両者はトレードオフの関係にある。そのためこの点に関する技術的課題として、単位時間あたりの計測回数が増大、すなわち光軸方向の掃引レート(A-Scan rate)増大が挙げられる。一方本申請当時、市販のSS-OCTシステムのA-Scan rateは約50 kHz/scan程度に留まっており、論文で報告されている最速値も約1 MHz/scan程度で頭打ちとなっていた。A-Scan rateは光源の波長掃引レート(単位時間あたりの掃引回数)で律速され、光フィルタの透過波長を物理的に制御する圧電素子の駆動周波数の上限に起因する。材料の組成やデバイスの構造に依存する値となるため、素子の駆動周波数そのものの上限を増大させる事は技術的難易度が極めて高い課題であると考えられる。

2. 研究の目的

本申請では波長掃引レートの増大に向けて、素子の駆動周波数の増大とは別の視点に基づくアプローチを提案した。光フィルタの光透過特性や波長可変特性を適切に具現化する設計に基づいて、波長軸上における光波の操作を適切に実現するというものである。提案するアプローチは素子の特性改善に頼らないものとなるため、素子の仕様による律速から脱却した波長掃引レートが実現されA-Scan rateの飛躍的増大に繋がる可能性を秘めている。光源の波長選択のしかたに立脚する独自の着想が高速波長掃引を実現する鍵と位置づけ、その検討を重ねた。

3. 研究の方法

波長可変光フィルタの応答速度を律速する主な要因は、単一の透過波長域が利用されそれが素子の変位に直接対応していることである(図1(a))。一方本申請では「複数の波長成分を同時に時々刻々変化させる操作に着目し、その光波の一部を別の光フィルタで抽出して波長が高速で変化する光波を生成する波長選択手法を提案した(図1(b))。この波長操作を具現化する物理的構成は、互いに自由スペクトル領域(FSR)が若干異なる「透過波長域が可変の光フィルタA」と「透過波長域が固定の光フィルタB」との従属接続になる。この構成に於いて光フィルタAの透過波長を全て同時に掃引させると光フィルタA・B両者の透過域が一致した波長の光波のみ透過するため、透過光波長シフトに要する圧電素子の変位を抑えることが可能となる。また各光フィルタの透過スペクトルの周期性により、圧電素子の駆動周波数を超える波長掃引も得られる。出力光波は時間軸で離散的(パルス列)となるが、通常はパルス列が利用されるためその機構が簡略化されるメリットも指摘できる。

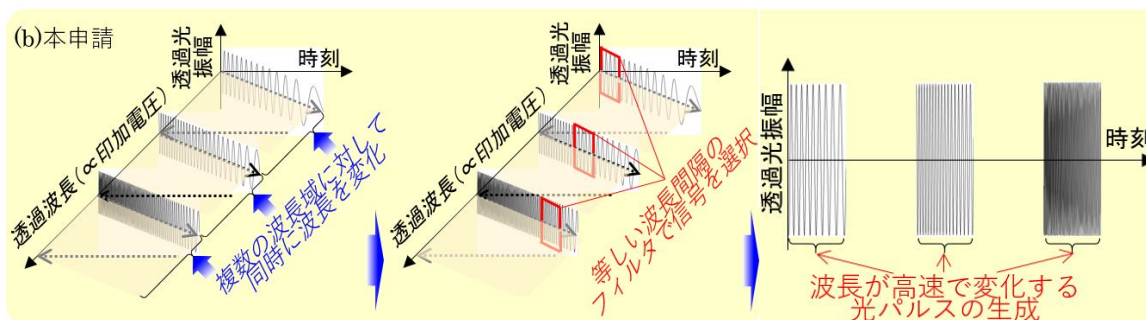
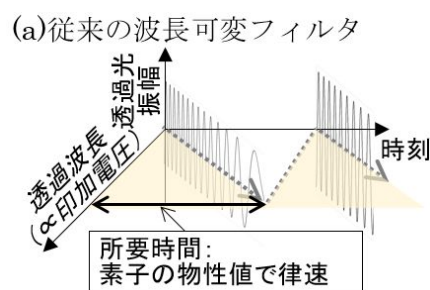


図1 波長掃引に関する(a)従来のスキームおよび(b)本申請で掲げるアプローチ。

4. 研究成果

(1) 利得媒質の検討

光源の構成要素としてセットで利用する事となる利得媒質の検討を進めた。具体的には中心波長や帯域・小信号利得・出力光強度などについて、関連する先行文献などをもとに所要値の検討を行い該当する媒質の選定および調達を進めた。その際、媒質を駆動する周辺装置についての検討や機種選定も進めた。

(2) 波長選択素子の検討

素子の波長範囲に関する仕様については、発光体（利得媒質）の 3dB 波長域を極力カバーできるものを探索し、その 7 割程度の波長範囲が上限とみられたためそれらに焦点を絞り、既存の製品を主な対象として検討を進め、該当品の選定を行った。素子そのものの FSR はその数%程度とし、提案する構成の実効的な FSR が上述の波長範囲を超えるよう諸量の設計を行った。

図 2 に、縦続接続させる 2 台の光フィルタの FSR 比 ($\Delta f_{FSR2} / \Delta f_{FSR1}$) と、縦続接続により得られる透過波長特性の実効 FSR Δf_{FSR} (Δf_{FSR1} で規格化) との関係を示す。FSR 比の設定にあたって $\Delta f_{FSR2} < \Delta f_{FSR1}$ を仮定したため横軸の範囲は 0~1 としているが、各フィルタと Δf_{FSR1} , Δf_{FSR2} との対応は任意性があるため一般性は失われない。例えば Δf_{FSR2} が Δf_{FSR1} に対して 0.9 倍、0.95 倍、0.98 倍のものを互いに縦続接続させると、 Δf_{FSR1} に対してそれぞれ 9 倍、19 倍、49 倍の Δf_{FSR} が実効的に得られる。 $\Delta f_{FSR1} = 267\text{GHz}$ (:中心波長 1060nm に対して $\pm 0.5\text{ nm}$ (計 1nm) のセパレーション) の場合、それぞれ 9nm, 19nm, 49nm の Δf_{FSR} に相当する。その設計に基づく、素子に入力する信号の掃引に伴い光パルス列が得られ、またその波長は上述の波長範囲でチャープする。素子単体の透過波長シフト量がその FSR に等しい場合、光パルス列の繰り返し周波数は素子を駆動する信号周波数の 60 倍程度という試算結果を得た。また素子の透過波長シフトを素子単体の FSR の整数倍とすると、得られる光パルスそのものおよび波長チャープの繰り返し周波数が整数倍される動作が期待できる。検討過程では、光波の波長軸に対する透過域や掃引範囲など所望とみられる条件に対して実在品が抱えるギャップも多少みられたため、両者を考慮した仕様の見直しも逐次進めた。これらの検討結果を踏まえて、該当する素子の準備を進めた。また対照実験の実施を想定して、従来手法を具現化する際の構成要素となる波長選択素子の調達も模索したが、当初の計画では想定外の事態に見舞われた：パンデミックに伴うメーカの製造活動や物流の停滞が長期にわたって継続した影響に加え、メーカの再編に伴う当該製品の販売終了なども重なった。国内企業が製造する同等製品の探索も行ったものの該当品が見つからず、所望の製品の手配が困難な状態となった。しかしながら所望の仕様を有する当該製品は今後提供が再開される見込みもあり、長期的な視点での対応の余地も残されている状況とも考えられる。

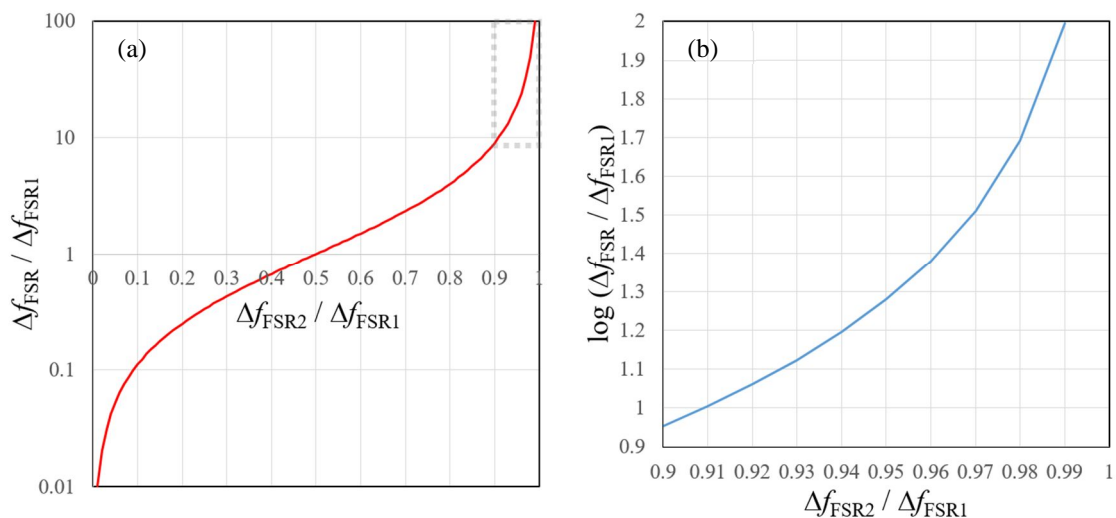


図 2 縦続接続構成の実効的 FSR Δf_{FSR} (Δf_{FSR1} で規格化) とフィネスが十分高い 2 台の光フィルタの FSR 比 ($\Delta f_{FSR2} / \Delta f_{FSR1}$) との関係。(b) は(a)の点線内部の拡大図(縦軸は対数)。

(3) 信号源の検討

波長選択素子を駆動する信号源に関する検討も進めた。素子の非線形応答の影響を補償して線形動作を確保する点も念頭に置き、素子の周波数帯域にも注意してそれらをかばうことができるものを選定した。素子が要する駆動電圧を得るために信号源出力の増幅も必要となるため、その準備も模索したが、素子の非線形性補償も含め駆動に適する仕様の装置の準備が難航した。この点も当初の計画では想定外であり、所望の動作の実現にあたっての壁となり提案手法のパフォーマンスの実証が滞る元となった。しかしながら本研究課題で提案する手法が潜在的に有するとみられる優位性が失われたとまでは言い難く、今後も引き続き検討を継続すべきものと考えられる。本研究課題の研究期間は 2023 年度が最終年度となるもの、提案手法の原理実証に向けた検討を継続し有用性など新たな知見の探求に繋がりたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Sakamoto, A. Chiba	4. 巻 39(6)
2. 論文標題 Multiple-Frequency-Spaced and -Offset Flat Optical Comb Generation Using Multiple-Parallel Phase Modulator: Theory and Design	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1644-1654
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAB.455652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 A.Chiba and Y. Akamatsu	4. 巻 9 (3)
2. 論文標題 Wavelength-Tunable Optical Two-Tone Signals Generated Using Single Mach-Zehnder Optical Modulator in Single Polarization-Mode Sagnac Interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photonics (MDPI)	6. 最初と最後の頁 194-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics9030194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 千葉 明人	4. 巻 80
2. 論文標題 光の変調と検波を利用する高周波信号の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 HiKaLo技術情報誌	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A. Chiba and Y. Sunaga	4. 巻 46
2. 論文標題 Complex amplitude estimation of monochromatic radio-frequency signal using frequency down conversion via direct detection of interfered optical phase-modulation signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2646-2649
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.426425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 A. Chiba, Y. Sunaga
2. 発表標題 RF signal estimation utilizing low-frequency beat signal due to harmonics of phase-modulation lightwave
3. 学会等名 Proc. 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Chiba
2. 発表標題 RF Parameter Estimation Using Lightwave Modulation
3. 学会等名 ICCCAS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Chiba
2. 発表標題 RF parameter estimation assisted by phase modulation and detection of lightwave
3. 学会等名 ICCCAS2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Webpage of Akito Chiba https://chiba.ei.st.gunma-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	坂本 高秀 (Sakamoto Takahide) (70392727)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究 分 担 者	呂 国偉 (Lu Guo-Wei) (30599709)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授 (21602)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関