

平成 22年 5月 28日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700375
 研究課題名(和文) ライン検出型高速タイムドメイン光コヒーレンストモグラフィの開発と
 微細血管の画像化
 研究課題名(英文) Development of high-speed time domain optical coherence tomography
 and imaging of blood vessels
 研究代表者
 渡部 裕輝 (Watanabe Yuuki)
 山形大学・大学院理工学研究科・准教授・
 研究者番号：00333328

研究成果の概要(和文)：

プローブ光の走査と反射型回折格子による参照光の空間的な遅延をラインカメラで検出するライン検出型高速タイムドメイン光コヒーレンストモグラフィを開発した。画像処理として、参照光強度分布の除去、ハイパスフィルタ、ヒルベルト変換、対数変換を行う。これらの処理を並列処理が可能なGPUにより、高速に行った。ラインカメラ(500画素、47,000lines/s)を用いて測定したとき、横方向のデータ数500のOCT画像が、94フレーム/秒でリアルタイムに得られた。また検出感度は93dBと生体計測を行うのに十分な感度が得られた。

研究成果の概要(英文)：

We developed a high-speed linear detection time-domain optical coherence tomography (OCT) technique that detected a reflective grating-generated spatial optical delay in the reference arm using a line scan camera during probe-beam scanning. The image processing that involve a reference intensity removal, high pass filtering 1 D Hilbert transform and log scaling were accelerated by the GPU (graphics processing unit) with many stream processors, which realized highly parallel processing. A display rate of 94 frames per second for processed images with 500 lateral A-scans was achieved using an InGaAs line scan camera (512 pixels) operated at 47,000 lines/s. Our OCT system was successfully used to image the human finger *in vivo* with 93-dB sensitivity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：OCT、ラインカメラ、GPU

1. 研究開始当初の背景

光コヒーレンストモグラフィ(optical coherence tomography, OCT)は、1991年、米国MITのFujimotoらのグループによる報告

[Science 254, 1178-1181 (1991)]以来、急速に研究開発が進み、1996年には最初の眼科用OCT装置が発売された。OCTは、超音波エコー装置の“光版”と見なすことができる。生

体において比較的吸収・散乱が少ない近赤外光を照射すると、生体の内部構造に対応した3次元屈折率分布により、深さ方向にいたるところで反射・散乱光が発生する。これを光軸方向に参照光路の走査を行うことにより、深さ数 mm の範囲を数十 μm の精度で深さ方向強度分布として計測し、横方向に入射ビームの走査を繰り返すことによって断層画像が得られる。

近年、光軸方向走査を必要としないフーリエドメイン(FD) OCT は、従来の OCT(Time domain OCT, TD-OCT)に比べ、高速かつ高感度であることから、研究開発が活発になり、国内外の企業においてすでに製品化されている。しかし FD-OCT は、フーリエ変換による虚像や深さの増加につれて生じる SN 比の低下といった課題が残る。

そこで我々のグループでは、タイムドメイン OCT における高速撮像技術として、2次元カメラを用いた縦横並列検出型(ALP, Axial-lateral parallel)タイムドメイン(TD)-OCT について研究を進めている。この方法は、参照側に回折格子を設置し、空間的な光遅延を発生させ、シリンドリカルレンズによる線状プローブ光をサンプルに照射することで、一切の機械的な走査することなく横 - 深さ方向の干渉画像を取得し、連続した 2 枚の画像から計算することで OCT 画像を得る。時間領域(タイムドメイン)で処理されるので、FD-OCT のような虚像や SN 比の低下といった問題はない。我々は、位相シフト法を適応して、*in vivo* ヒト指の OCT 画像取得に成功した。また 3,000fps の超高速 CMOS カメラを用いることで、1,500fps の OCT 画像計測を実現し、さらに横方向の走査を付加することで 1/6 秒での高速 3 次元断層画像計測にも成功した。ALP-OCT システムの線状プローブ光において、シリンドリカルレンズの収差や線照明におけるクロストークの影響などの問題点が残る。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記ような問題を減らすためプローブ光を線照明から点照明へ、検出器を 2 次元カメラから 1 次元ラインカメラにする新たな OCT 計測法、ライン検出型タイムドメイン OCT を提案し、研究開発を行うことである。システムの評価結果から他の OCT 技術との比較検討を行い、本提案手法の有効性を明らかにする。さらに高速 3 次元断層画像計測、微細血管構造イメージングのための位相検出によるドップラー解析についての研究開発を行い、今後の展開について検討する。

3. 研究の方法

(1) OCT システムの構築

図 1 にライン検出 TD-OCT の概略を示す。1.3 μm 帯 SLD 光源から出射した光は、ビームスプリッタで参照側とサンプル側に分割される。参照側には、回折格子をリトロ配置に設置し、空間的な光路差を発生させる。サンプル側ではガルバノミラーでビームを走査する。参照光がレンズにより InGaAs ラインカメラ(512 画素、47kHz)に結像され、サンプル光と干渉することで、深さ情報が獲得できる。

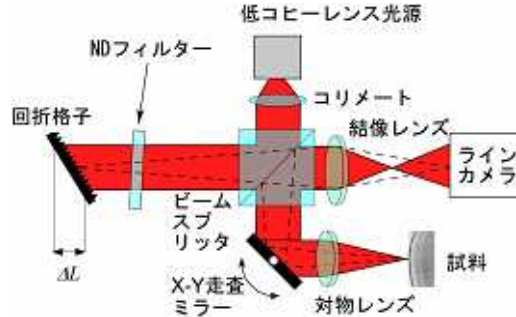


図 1 ライン検出 OCT の概略

ガルバノスキャナを走査することで、2次元データが取得できる。システム構築後分解能や検出感度について評価する

(2) 画像処理の検討

ラインデータの差の絶対値を計算することで、背景光を除去し、OCT 画像をリアルタイムに表示できる。しかし、ノイズが多いため、ハイパスフィルタやヒルベルト変換といった画像処理法について検討する。

(3) 3次元断層画像計測及び流れの可視化

2軸のガルバノスキャナを走査することで、3次元データが取得する。さらに位相検出について検討する。

(4) 皮膚下微細血管構造の3次元イメージング

皮膚下微細血管の画像化を試み、有効性を示す。

4. 研究成果

(1) 図 1 に示すような OCT システムを構築した。ラインカメラで効率よく光を検出するために、カメラの前にシリンドリカルレンズを配置し、線状に光を集光させた。分解能を評価した結果、横方向 20 μm 、深さ方向 17 μm であった。システムの検出感度は、約 93dB であり、生体計測には十分な感度であった。

(2) 画像処理の検討

新たに検討した画像処理法を図 2 に示す。得られた 2 次元データから、横方向へラインデータの平均を計算し、参考光強度分布とし、元のデータからその平均値を引く。次に 2 次元フーリエ変換し、深さ方向へのハイパスフィルタ、横方向へのヒルベルト変換をし、2 次元フーリエ逆変換を求め、その実部と虚部の二乗和を求め、OCT 画像とする。図 3 は、94 フレーム/秒で取得した爪の生え際付近の OCT 画像である。測定範囲は、 $4 \times 2.6 \text{mm}^2$ (横 \times 深さ) である。図 3(a) は、ラインデータの差の絶対値を計算したもので、深さ方向にノイズがあることがわかる。図 3(b) は提案した方法で計算した方法である。ノイズが軽減していることがわかる。しかし、このフィルタリングにより、光軸方向分解能が多少劣化することも確認された。

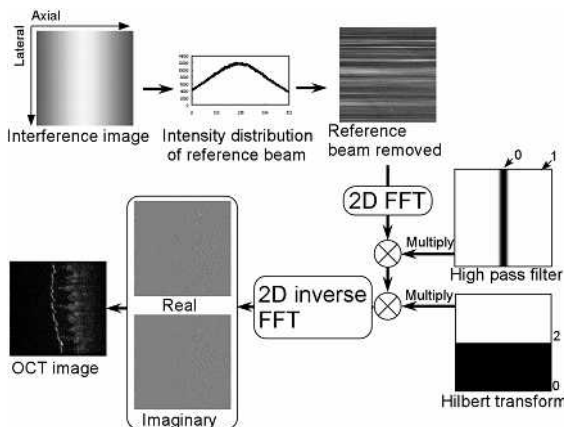
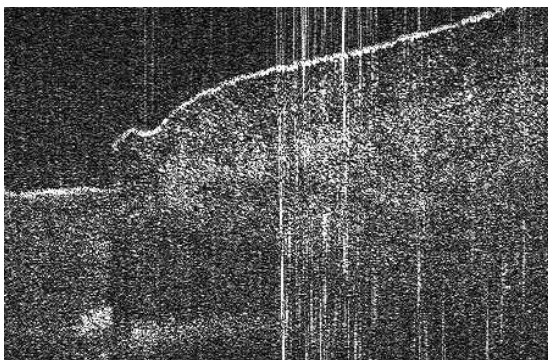
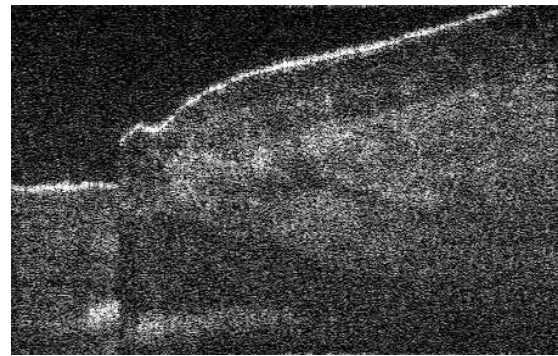


図 2 画像処理のフローチャート



(a) 差の絶対値



(b) 提案手法

図 3 94 フレーム/秒で取得した爪の生え際付近の OCT 画像 測定範囲： $4 \times 2.6 \text{mm}^2$ (横 \times 深さ)

(3) 3 次元断層画像計測及び流れの可視化

これまでのライン検出 TD-OCT は、バルク光学素子を用いて freespace に構築したもので、利便性が悪く、システム全体が大きなものとなった。ビーム径が大きく、1 軸のガルバノスキャナしか利用できなかった。そこでシステムの小型化のため、光ファイバによるライン検出 TD-OCT の開発を行い、3 次元計測を検討した。また安価で並列処理が可能な GPU (Graphics Processing Unit) により OCT 画像のリアルタイム表示を検討した。

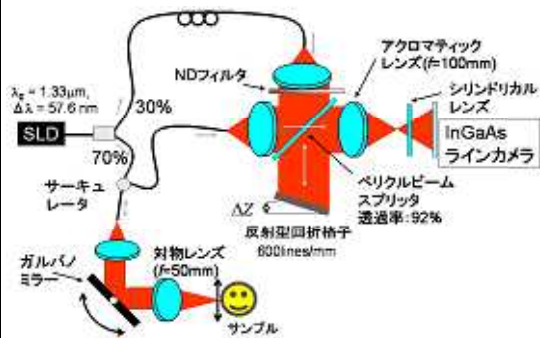


図 3 光ファイバを用いたライン検出 OCT の概略

図 3 に光ファイバを用いたライン検出 TD-OCT の概略を示す。ファイバ出力光源である $1.3 \mu\text{m}$ 帯 SLD から出射した光は、光カップラーで参照側 (30%) とサンプル側 (70%) に分割される。サンプル側ではガルバノミラーでビームを走査し、サンプルから反射された光は、サーキュレータにより、干渉計へ入射する。干渉計は、透過率の高いペリクルビームスプリッタで構成され、サンプル光は透過のみを使用することでロスを少なくしている。参照側には、回折格子をリトロ配置に設置し、空間的な光路差を発生させる。参照光がレンズにより InGaAs ラインカメラ

(512画素、47kHz)に結像され、サンプル光と干渉することで、深さ情報が獲得できる。システムの検出感度は、約92dBで、これまでと同等であった。図4は2軸のガルバノミラー走査を行い、5秒間で取得した3次元OCT画像である。

得られた干渉画像からOCT画像を得るには、2次元フーリエ面でのフィルタリングが必要である。測定したデータをGPUへ転送し、2D-FFT、フィルタリング、2D-IFFTの計算を行い、その結果をGPUからホストコンピュータへ転送する。開発にはNvidia社から提供されているGPU向けのC言語の統合開発環境CUDAを利用した。計算時間はフレーム間隔に比べ、十分短く、OCT画像をリアルタイムに表示できた。またこのGPUによる演算技術は、他のOCT技術(フーリエドメインOCT)でも十分利用できることも確認した。

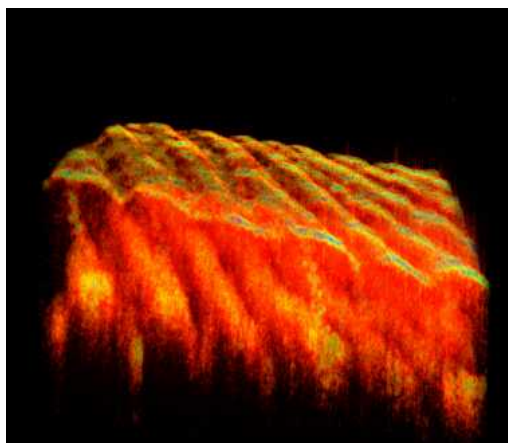


図4 皮膚の3D OCT画像

(4) 皮膚下微細血管構造の3次元イメージング
システム感度が低いため、測定出来なかった。今後の課題とする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

1. Yuuki Watanabe and Toshiki Itagaki, "Real-time display on Fourier domain optical coherence tomography system using a graphics processing unit," Journal of Biomedical Optics, Vol. 14, **Issue 6** 060506-060508 (2009) 査読有
2. Yuuki Watanabe, Fumitoshi Sajima, Toshiki Itagaki, Kei Watanabe and Yuuki Shuto, "High speed linear detection time domain

optical coherence tomography with reflective grating-generated spatial reference delay," Applied Optics, Vol. 48, Issue 18, pp. 3401-3406 (2009) 査読有

〔学会発表〕(計4件)

- [1] 渡部 裕輝, 今野 俊介, 高橋 義行 "FD-OCTのためのGPUによるリアルタイム処理技術の開発" 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009 25pP12 (2009年11月25日)
- [2] 佐島 史敏, 渡部 裕輝, "光ファイバを用いたライン検出高速タイムドメインOCT," 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009 24aB1 (2009年11月24日)
- [3] 渡部 裕輝, 板垣 敏生, "波数分光器とGPUを用いたリアルタイムSD-OCTの開発", 第70回応用物理学会学術講演会 8a-ZM-1 (2009年9月8日)
- [4] 渡部 裕輝, 佐島 史敏, 板垣 敏生, 渡辺 径, 首藤 裕樹 "ライン検出高速タイムドメインOCTの基礎検討", 第56回応用物理学関係連合講演会 1a-ZW-10 (2009年4月1日)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡部 裕輝 (Watanabe Yuuki)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00333328