

3次元光断層イメージング法を用いた生体組織などの画像診断 Biomedical Imaging by Three-dimensional Optical Coherence Tomography

陳建培, 秋葉正博

(財)山形県産業技術振興機構 山形市松栄 2-2-1

Kin-Pui Chan, and Masahiro Akiba

Yamagata Promotional Organization for Industrial Technology

E-mail: chan@yat.ymgt-techno.or.jp

Abstract: Optical coherence tomography (OCT) is a noninvasive, micrometer-scale imaging modality based on low-coherence interferometry. This paper presents some of our latest work on the development of real-time OCT using a parallel heterodyne detection technique. Depth-resolved, horizontal cross-sectional images of biological objects have been acquired at the rate of 100-frames/s in a single longitudinal scan, making the rapid reconstruction of three-dimensional images possible.

1. はじめに

近年、生体組織などの散乱媒質の内部構造をミクロンオーダーの空間分解能で非接触測定するイメージング技術として、Optical Coherence Tomography (OCT) が注目されている。光干渉に基づく OCT は、広帯域光源のコヒーレンスの欠如を利用して散乱媒質の内部からの非散乱光成分の残存コヒーレンスを拾うという発想で芽生えた断層画像化法である¹⁾。OCT を用いた最初の *in vitro* (摘出) 生体計測例は 1991 年に米国 MIT グループによって報告された²⁾。以来、OCT の研究はめざましい進展を遂げ、眼科学の臨床診断のみならず、消化器や循環器の内視鏡的断層画像診断にも応用されるようになってきている^{3,4)}。本報告では、我々が研究を進めている OCT 法を用いた 3 次元断層画像計測技術について述べる。

2. 2次元ヘテロダイン検出法を用いた実時間断層画像計測

OCT は広帯域光源の低干渉性を利用して散乱媒質の内部からの後方散乱光を距離分解して検出する点は、短いレーザーパルスを用いた大気観察用コヒーレントライダーと機能的に類似すると言える。現行の OCT 装置はマイケルソン干渉計において参照鏡の位置を光軸方向に走査する (*z*-スキャン) ことで 1 次元の反射強度プロファイルを取得する。その距離(深さ)分解能は光源のコヒーレンス長の約半部に相当する。市販品の近赤外域スーパーluminescentダイオード (SLD) を用いれば、分解能は約 10 μ m である。さらに、入射光ビームをサンプルの横方向に走査することで 2 次元の断層画像を構築している。このような走査方式では計測時間の制約を受ける。一方、サンプルに平行光ビームを照射して、固定した深度からの反射光波をセンサーアレイで検出すれば、実時間で 2 次元の鉛直断面画像を取得することができる。

2 次元検出器アレイを用いた並列ヘテロダイン検出の実験例はコヒーレントライダー⁵⁾やレーザー画像計測⁶⁾ですでに報告されているが、高分解能(多画素数) OCT 計測の場合、並列信号処理の煩瑣さが実用上の難点になっている。そこで、我々は市販品の高分解能 CCD カメラを高い周波数のヘテロダイン測定に活用するために、周波数同期検出法に基づく 2 次元ヘテロダイン検出法を開発し、ビデオレートの OCT 計測に成功した⁷⁾。Figure 1 に OCT 装置の基本構成を示す。マイケルソン干渉計において、合波された信号光波と参照光波がビームスプリッター BS2 で 2 分割された後、それぞれ 2 台の高速デジタル CCD カメラ (DALSA CAD1, 256x256 pixels, 12-bit) によって検出される。CCD の前には液晶タイプ的高速シャッターが配置され、通過する光ビームを 50% のデューティでサンプリングする。そこで、2 台のシャッターの開閉周波数をヘテロダイン検出のビート周波数に設定し、また互いに 90 度の位相差を設ければ、めいめいの CCD から光干渉信号の \sin 成分と \cos 成分に比例した出力が得られる。それらの二乗の和を取ると、信号光の強度が求められる⁷⁾。計測例として、Fig. 2 に植物の葉脈部分の鉛直断層画像を示す。測定では、OCT 装置の参照鏡を *z*-スキャンしながら、深さ間隔 12 μ m ごとに一連の鉛直断層画像を取得した。計測視野は 800 μ m x 800 μ m である。異なる深さでサンプルの構造変化が検出されていることが分かる。

3. 3次元断層観察

鉛直断層画像計測の高速化を実現したことで、サンプル内部の3次元観察が容易となった。その一例として、Fig.2の実験で取得した60枚の鉛直断層画像を用いて再構築した3次元像をFig.3(a)に示し、また、(b)と(c)にそれぞれ横方向と深さ方向に沿った面で切り出した3次元像を示す。これらの結果から、サンプルの内部構造が観察され、葉脈の直径は約70 μm であると測定された。本方法は比較的簡単な構成と高速性が特徴で、眼科観察応用をはじめ、新しいタイプの3次元顕微観測方法に発展していくと期待される。

参考文献

1. 丹野直弘, 市村勉, 佐伯昭雄: 光波反射像測定装置, 日本特許第 2010042 号 (出願 1990 年); 千葉慎二, 丹野直弘: 後方散乱光ヘテロダイントモグラフィ, 第 14 回レーザーセンシングシンポジウム, 講演番号 C3 (1991)
2. D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, J. G. Fujimoto: Optical coherence tomography, *Science*, **24**, 1178 (1991)
3. M. Brezinski, J. Fujimoto: Imaging the cardiovascular system with optical coherence tomography, *Optics & Photonics News* **13**, No.4: 34-35 (2002)
4. 陳建培: 臨床応用へ向けた光コヒーレンストモグラフィによる顕微診断, *OPTRONICS*, No 247, 179 (2002)
5. 陳建培: 小型コヒーレントライダーの開発に関する最近の研究, *レーザー研究*, **21**, 369 (1993)
6. K. P. Chan, K. Satori, H. Inaba: Laser imaging through scattering media by enhanced heterodyne detection and speckle averaging using 2D detector array, *Electron. Lett.*, **34**, 1101 (1988)
7. M. Akiba, K. P. Chan, N. Tanno: Full-field optical coherence tomography by two-dimensional heterodyne detection with a pair of CCD cameras, *Opt. Lett.*, **28**, 816 (2003)

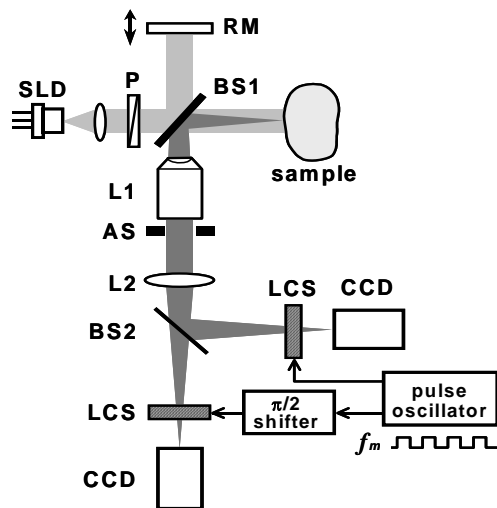


Fig.1 Schematic diagram of a wide-field OCT system with a pair of CCD cameras for 2D heterodyne detection. SLD, superluminescent diode; P, polarizer, BS, beam splitter; RM, reference mirror; L, lens; AS, aperture stop; LCS, liquid-crystal shutter.

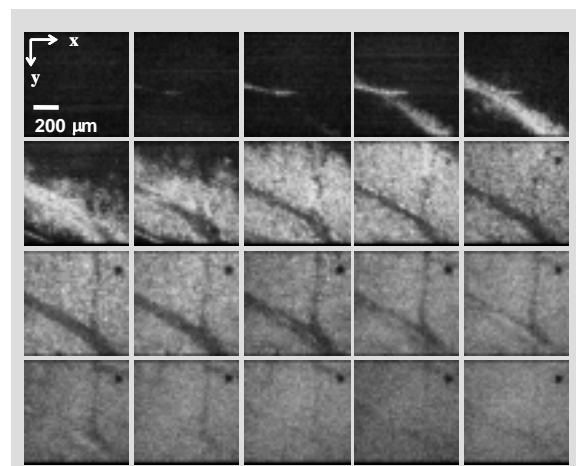


Fig.2 Horizontal cross-sectional images of a plant leaf acquired in a single longitudinal scan, with a depth interval of 12 μm . Total measurement time: 0.6 s.

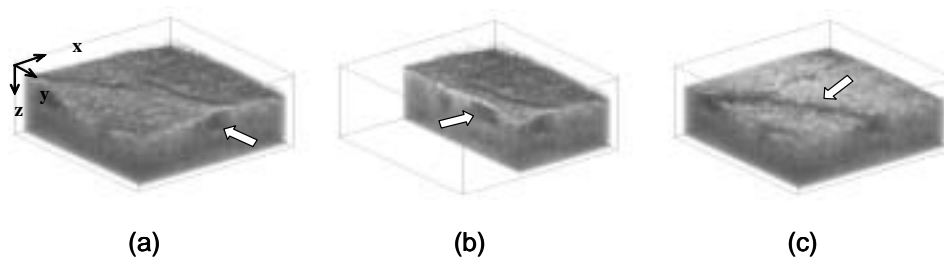


Fig.3 3D OCT of a plant leaf. Each image is reconstructed from 60 horizontal cross-sectional images. (a) Full-size image. (b) and (c) Different cutting planes showing the inside of the sample. The arrows indicate a duct inside the leaf, with a diameter of about 70 μm .