

研究概要書

研究テーマ

低コヒーレンス干渉計を応用した植物生態環境計測システムの開発

申請者 椎名 達雄

団体名 和歌山大学システム工学部

〒640-8510 和歌山市栄谷 930

(電話) 073-457-8184 (FAX) 073-457-8201

(e-mail) shiina@sys.wakayama-u.ac.jp

研究概要

携帯化に向けた OCT 植物計測システムの構築を行った。特に干渉計光路可動範囲 40mm 強を持つ可変光路拡大機構の安定化、高精度化をはかり、ほぼ設計通りの結果を得た。回転ディスクの駆動には DC モータを利用し、計測対象からの干渉光強度に応じた計測速度の変更を容易にしている。また、光路の可変を担うコーナーリフレクターは特に精度を要する。本システムに特化したものを設計し、使用している。

製作した小型 OCT システムを用いて植物計測を行った。計測対象は植物葉、幹、根、花卉、野菜、果実等であり、計測結果の定量的評価と特徴の抽出、2 次元、3 次元計測によるデータの可視化を試みている。また、水ストレスや日照量ストレス等の植物体内における反応・組織変化、使用波長に対する吸収率・屈折率変化等から導出するための考察を計測結果を含めて試みている。

環境センシング、植物生態環境モニタリング機器として、本 OCT システムを発展させていくには今後統計的、客観的な計測データの収集、解析が不可欠である。農学、生物学、生体生理学的な観点から研究を遂行していく予定である。

研究報告書

研究テーマ

低コヒーレンス干渉計を応用した植物生態環境計測システムの開発

申請者

椎名 達雄

団体名 和歌山大学システム工学部

〒640-8510 和歌山市栄谷 930

(電話) 073-457-8184 (FAX) 073-457-8201

(e-mail) shiina@sys.wakayama-u.ac.jp

1. はじめに

農業、バイオ技術のハイテク化が進む一方で、植物の育成・生態環境モニタリングの必要性が叫ばれている。これは単に生産性の向上、品質の改善のみならず、過剰堆肥や環境汚染の指標としての意義も大きい。植物育成の現場で生態環境を崩すことなく環境パラメータの計測、モニタリングができる機器があれば、水分・堆肥コントロール、内部壞疽等の不可視害、環境変化・汚染、等のセンシングが可能となる。

本研究では以上の背景を踏まえ、OCT システムの農業分野への応用をはかり、光による非破壊環境モニタリング手法の確立を最終目標として研究をスタートさせた。OCT システムは低コヒーレンス干渉断層画像法[Optical Coherence Tomography]で、低コヒーレンス光源を利用した光干渉計を基本とする。干渉計光路長を変化させることで計測物の内部センシングを実現する。主に医療分野で研究開発が盛んな技術である¹⁾⁴⁾。従来よりOCT システムは計測範囲が大きくとれない、計測のダイナミックレンジが小さい等のデメリットがあり、実用化に対しては眼底検査や血流計といった極限られたものだった。本研究では光路長変化に新しく考案した可変光路拡大機構を用い、計測範囲の拡大、システムの簡素化をはかり、併せて光ファイバ光学系、高速ロックインアンプ等を組み合わせることで農業分野への応用を図ってきた⁵⁾⁷⁾。現在は植物育成環境モニタリングのための携帯型 OCT 植物計測システムの構築と環境センシング手法の確立を目指し研究を進めている。

特に本研究助成においては小型・携帯化に向けた OCT 植物計測システムの構築を遂行し、併せて植物 OCT 計測の結果と考察を行った。以下にその詳細を述べる。

2. 携帯型 OCT 植物計測システム

本研究で製作した OCT 植物計測システムは図 1 に示す構成をもち、光ファイバ型マイケルソン干渉計を基本とし、光源には波長 830nm の SLD[Super Luminescent Diode]を使用している。波長 830nm は水による光の吸収を避け、なおかつ植物組織の内部にまで光を透過させるために選択している。コヒーレンス長は $40\mu\text{m}$ でこれが計測システムの分解能となる。干渉計光路長の変化には本研究で考案した可変光路拡大機構を使用している。参照光学系は計測光学系でのリフレクターによる光路長変化ならびに干渉縞として現れるドップラー周波数の動きに追従した信号を得るためのもので、高速ロックインアンプの参照信号としている。Disk 直径 120mm (CD の大きさ) で計測範囲 40mm 強、計測速度は 15scan/s である。計測対象からの干渉光強度は光路長変化の速度に依存する。従って、透過光量の多い比較的透明な対象には高速な計測が可能であり、逆に干渉の崩れやすい散乱性の強い対象には低速での計測が有利である。本研究では Disk の回転に DC モータを利用し、回転数の変化に対応させている。PZT 素子による光路長の変化を利用した従来の OCT にはない計測範囲、柔軟性を併せ持つことを可能とした。

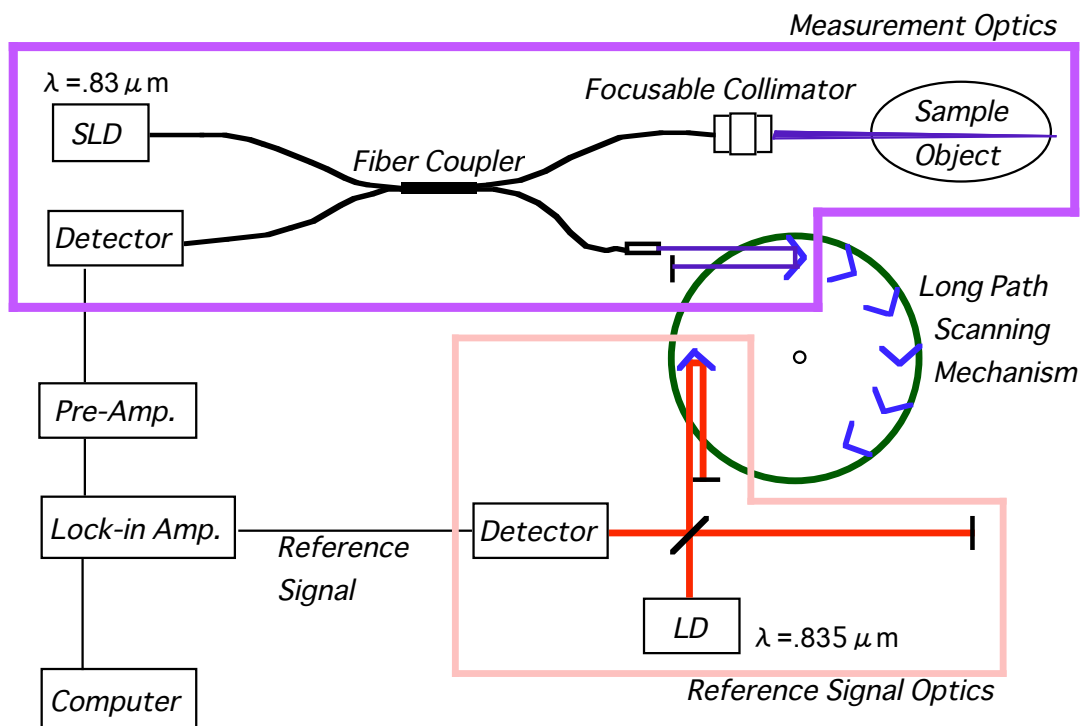


図 1. 小型・携帯化を目指した OCT 植物計測システム

本研究で考案した干渉光光路の可変機構はコーナーリフレクターとそれらを円運動させる回転系とで構成される。その動作アルゴリズムを図2に示す。回転ディスクの円周上に並べられたコーナーリフレクターに干渉計参照光を入射させる。入射光はリフレクターおよびミラーで反射され、入射時と同一光路を戻す。リフレクターがディスクの回転に伴って移動しても光は常に入射時と同一の光路を往復する。ディスクの回転に伴う光路変化長は式(1)で表される。

$$l_v = 2[2l_1 + l_2(1 - \sin 2\theta) - 2s]$$

$$l_1 = r \sin \theta \frac{r(1 - \cos \theta)}{\tan(\frac{\theta}{4} + \theta)} \quad l_2 = \frac{\sqrt{2}s}{\cos(\frac{\theta}{4} + \theta)} + \frac{r(1 - \cos \theta)}{\cos(2\theta)} \quad (1)$$

ここで、 l_v の変化は擬似的な直線運動を行う。

今、Disk半径 $r=60\text{mm}$ 、参照光入射位置 $a=3\text{mm}$ 、入射光波長 $\lambda_0=830\text{nm}$ とした場合の解析結果を図3に示す。図3(a)はDisk回転角に対する光路変化長 l_v の変化を示す。実際の回転角の適用範囲はコーナーリフレクターが参照光入射位置を横切る間となり、リフレクター鏡面長を 7mm としたときに、 ± 30 度の範囲、つまり光路変化長 40mm となる。光路長変化の直線性はよく、 $\pm 10^\circ$ の回転角範囲で 1.54% 以内におさまっている。光路変化長の線形変化からのずれは回転角が大きいほど顕著になる。リフレクターから戻った

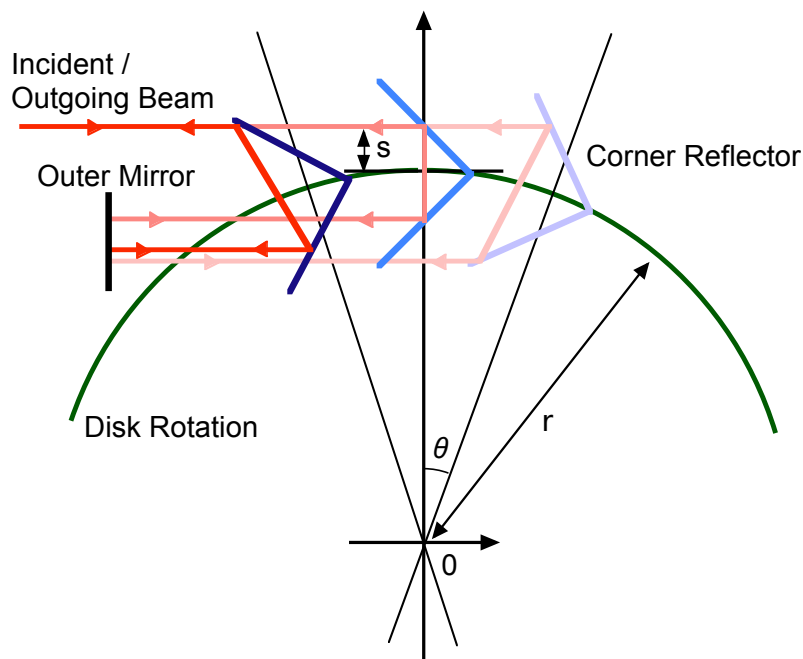


図2 可変光路拡大機構の動作原理

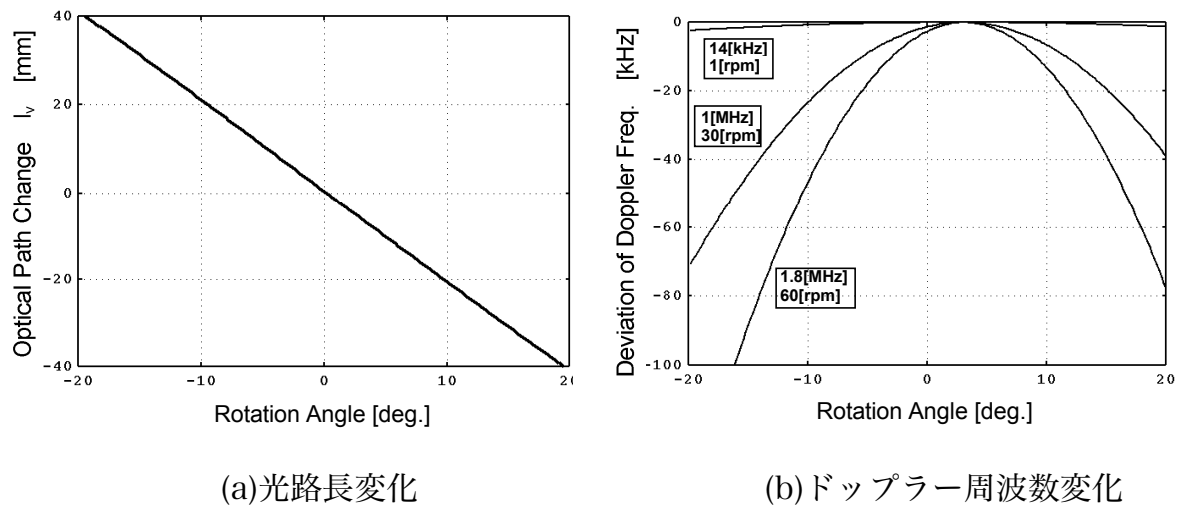


図3 Disk 回転角に対する光路長変化及びドップラー周波数変化

参照光は計測光路からの光と干渉する。その干渉光出力は Disk の回転速度に依存したドップラー周波数上に現れる。従って、参照光光路の線形変化からのずれは干渉光出力のドップラー周波数のずれとなって現れる。先の解析例での干渉光出力ドップラー周波数の回転角度依存性を図 3(b)に示す。同図では Disk 回転数を 10、30、および 60rpm の場合で示している。それぞれの回転数において中心周波数に対する周波数偏差は 1.54% ($\pm 10^\circ$) となる。干渉光の周波数安定性が良いため、ロックインアンプの利用が可能となる。

最初に設計した可変光路拡大機構は回転ディスクとモータシャフトとの整合やコーナーリフレクター自体の精度にばらつきを持つものだった。本研究助成によりそれらの改善をはかった。回転ディスクとモータシャフトを分離し、ディスクはベアリングシャフトに固定、モータシャフトはフレキシブルカップリングによって接続することとした。また、コーナーリフレクターは本システムに特化した設計を行い、許容誤差 1 分以内の精度を満たすものを使用している。計測範囲 40mm を満たした状態で直径 120mm の回転ディスク上に最大 15 個のコーナーリフレクターが並べられる。試作機では 4 個のコーナーリフレクターをディスク上に並べ、植物計測を行った。図 4 は本研究助成で製作した可変光路拡大機構である。

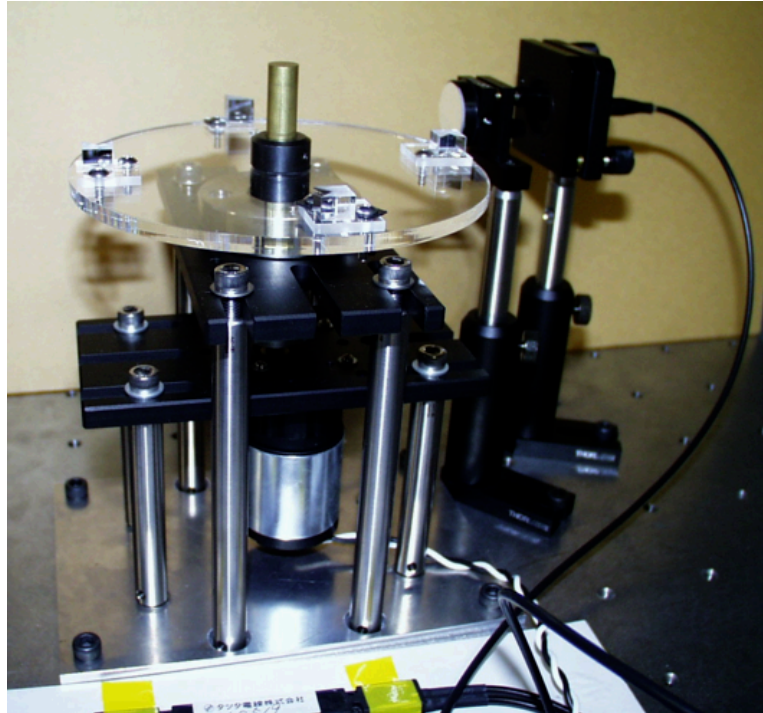


図4 製作した可変光路拡大機構

3. OCT システムによる植物計測

製作した OCT 植物計測システムを使い、植物組織の計測を進めている。計測対象は植物の葉、茎、根、花卉、野菜、果実等の表層および内部組織である。計測結果の定量的な評価とともに植物種類・組織に依存した特徴の抽出を行う。また、水分ストレスや日照量ストレス、堆肥ストレス、害虫等外的因子に対する植物体内の反応、組織変化、使用波長に対する吸収率・屈折率変化等からの 2 次情報の導出を試みている。

以下に現在得られている OCT 計測データ例を紹介する。

・ 植物葉 (カボック)

図5に示す計測例はスライドガラス上にカボックの葉をのせて計測した結果である。スライドガラスは基準面を表す目的で使用している。葉内部組織からの干渉光が見てとれる。氷層には2つの干渉光が重なる形で現れている。使用した SLD 光源のコヒーレンス長が $40\mu\text{m}$ であることから本システムの計測分解能を示すものである。スライドガラスの厚みは $150\mu\text{m}$ 、カボック葉は屈折率を 1.33 とした場合 $500\mu\text{m}$ の厚みである。

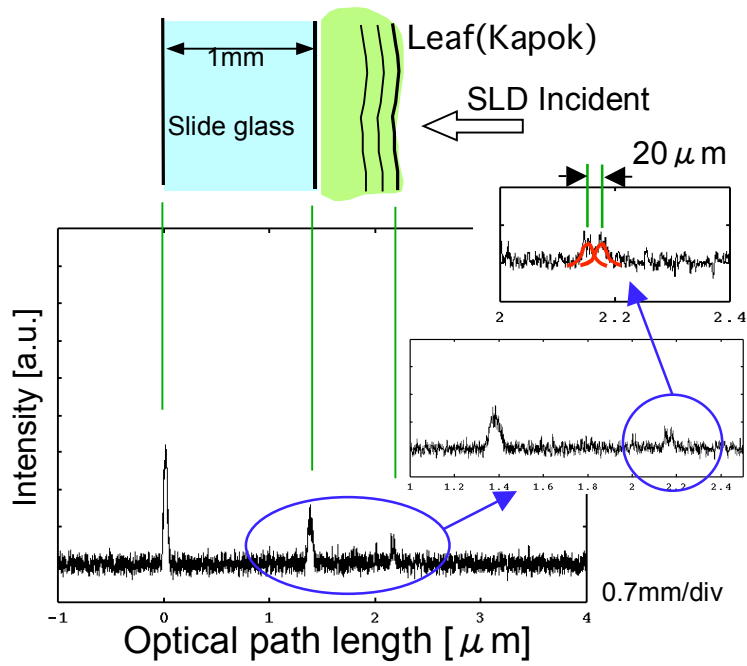
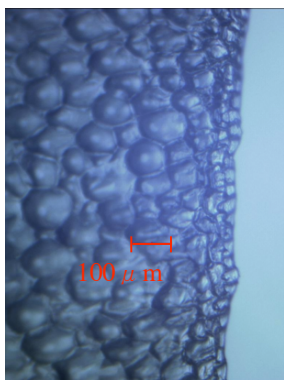


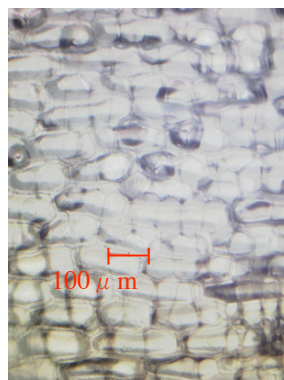
図5 植物葉の計測例 (カポック)

・野菜 (たまねぎ)

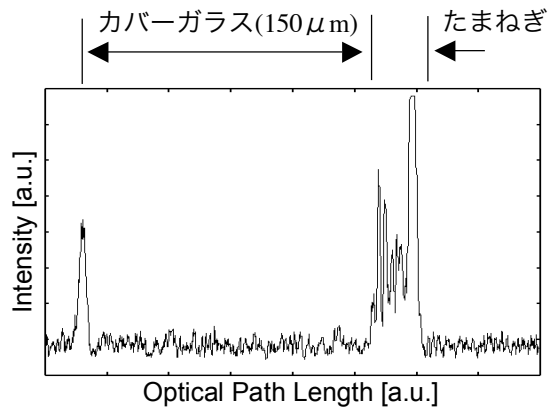
たまねぎの細胞は $100\mu\text{m}$ 程の組織からなる。配列は必ずしも規則的ではない。SLD光は長焦点フォーカシングレンズで計測対象に照射される。スポット径は $90\mu\text{m}$ 程である。従って、たまねぎからの干渉光は各々の細胞から生じ、しかも、各細胞面が曲面であるために干渉波形はきれいに分離せず、たまねぎ組織全体から強い干渉光が得られている。



(a)たまねぎ断面



(b)たまねぎ表面



(c)OCT 計測結果

図7 OCT 計測データ たまねぎ

・ 野菜 (セロリの幹)

セロリの細胞もたまねぎと同様 $100\mu\text{m}$ 程度の組織であるが干渉光波形はたまねぎのそれと異なっている。顕微鏡画像を見ると細胞組織が規則正しく配列している様が見てとれる。これら細胞の各層からの反射が比較的是っきりとした干渉光を生じさせていると考えられる。なお、セロリの計測では表面の緑色をした表皮が SLD 光の透過を大きく減衰させるため、表層組織を切断して計測している。OCT 計測データの S/N が悪いのはそのためである。

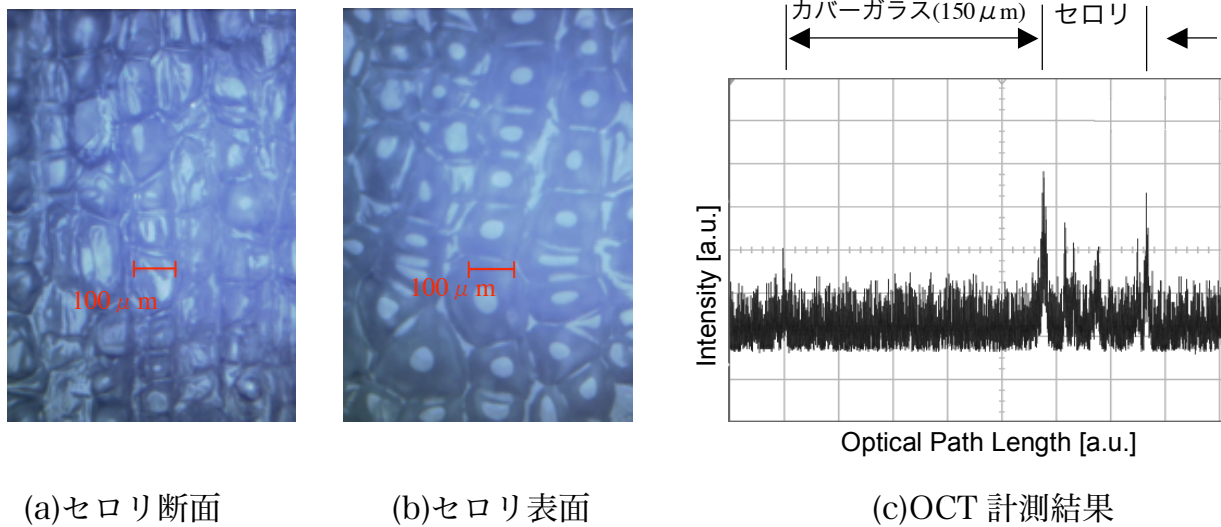


図7 OCT 計測データ セロリの幹

OCT 計測データの解析や 2 次情報の導出には統計的なデータ処理が不可欠である。植物種類、各組織から得られる OCT 計測データの統計的解析を把握することが当面の課題である。農学的、生物学的な観点に立った解析を試みていく。

4. まとめ

小型・携帯型を目指した OCT 植物計測システム製作し、それを用いた植物計測を行った。製作した OCT システムは干渉計光路可動範囲 40mm 強を持つ可変光路拡大機構をもち、特に本研究助成により動作の安定化、高精度化をはかり、ほぼ設計通りの結果を得た。計測対象は植物葉、幹、根、花卉、野菜、果実等であり、現在計測結果の定量的評価と特徴の抽出、2 次元、3 次元計測によるデータの可視化を試みている。水ストレスや日照量ストレス等の植物体内における反応・組織変化、使用波長に対する吸収率・屈折率変化等

から導出するための考察を計測結果を含めて試みている。

環境センシング、植物生態環境モニタリング機器として、本 OCT システムを発展させていくには今後統計的、客観的な計測データの収集、解析が不可欠である。農学、生物学、生体生理学的な観点から研究を遂行していく予定である。

参考文献

1. Adrian Gh. Podoleanu, John A. Rogers, and David A. Jackson, "OCT En-face Images from the Retina with Adjustable Depth Resolution in Real Time", IEEE J. Quant. Electron., Vol. 5, No. 4, pp.1176-1184, 1999
2. Zhongping Chen, Yonghua Zhao Shyam M. Srinivas, J. Stuart Nelson Neal Prakash, and Ron D. Frostig, "Optical Doppler Tomography", IEEE J. Quant. Electron., Vol. 5, No. 4, pp.1134-1142, 1999
3. Attila Major, S. Kimel, Steven Mee, Thomas E. Milner, Derek J. Smithies, Shyam M. Srinivas, Zhongping Chen and J. Stuart Nelson, "Microvascular Photodynamic Effects Determined In Vivo Using Optical Doppler Tomography", IEEE J. Quant. Electron., Vol. 5, No. 4, pp.1168-1175, 1999
4. Joseph A. Izatt Manish D. Kulkarni Hsing-Wen Wang, Kenji Kobayashi, and Michael V. Sivak, Jr, "Optical Coherence Tomography and Microscopy in Gastrointestinal Tissues", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 2, No. 4, pp.1017-1028, 1996
5. Tatsuo Shiina, Yohei Moritani, Daisuke Kishiwaki, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "Long Path Scanning Mechanism for Optical Coherence Tomography", 2002 Photonics ASIA, Proceeding of SPIE Advanced Sensor Systems and Applications, No. 4920, pp.132-139, 2002
6. Yohei Moritani, Tatsuo Shiina, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "Portable Optical Coherence Tomography with Long Depth and High Speed Scanning", PIERS 2001, p.630, 2001
7. 森谷 洋平、椎名 達雄、伊藤 昌文、岡村 康行、「長深度低コヒーレンス干渉計のための可変光路拡大機構」、信学技報, Vol.100, No.426, OCS2000-77, pp.83-88, 2000