

食品の内部検査技術開発に向けたOCTの適用可能性

岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 本間 稔規

Applicability of Optical Coherence Tomography for Development of Internal Inspection Technology for Food

Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IIJIMA, Toshinori HONMA

抄 録

多くの食品加工工場ではX線異物検査装置や金属検出機などが導入され、オンラインで全数検査が行われている。しかし、人毛やプラスチック片、虫などの異物は検出が困難であり、目視検査で対応しているが、食品内部までは検査することができず、新たな内部検査技術の開発が望まれている。そこで我々は、おもに医療分野において研究、開発が進められ、眼科での診断装置として実用化されているOCTに着目した。OCTは光干渉の原理により計測対象内部の断層画像を取得する技術であるが、医療分野以外への適用事例は少ない。本研究では、基盤技術の獲得及びOCTによる食品異物検査への適用可能性について検討した。TD-OCT及びSD-OCTシステムを構築して検討した結果、SD-OCTシステムにて人毛の計測が可能であり、計測可能深度についてもTD-OCTより深く計測が可能であることから、異物検出にはSD-OCTが有効であると考えられる。

キーワード：OCT, 食品検査, 異物検査, 内部検査

1. はじめに

多くの食品加工工場では食品への異物混入対策としてX線異物検査装置や金属検出機などを導入し、オンラインで全数検査を行っている。しかし、これらの検査装置を用いても人毛や獣毛、プラスチック片、虫などの異物は検出が困難であり、最終的には検査員による目視検査で対応しているのが現状である。また、長時間の目視検査は検査員への負担が大きく、異物混入を見逃してしまうこともある。食品への異物混入は食品回収事案となることが多く、企業のダメージが大きいため、対応可能な検査技術の開発が望まれている。

我々は上記課題への対応が期待できる技術として、光干渉の原理を応用した光コヒーレンストモグラフィ（Optical Coherence Tomography, 以下OCT）に着目した¹⁾²⁾。OCTは光がある程度内部に到達するサンプルに対して断層画像を取得可能な技術であり、主に医療分野において研究・開発、実用化が進められている。OCTは非破壊計測、高空間分解能（数 μm ～数十 μm ）である一方、計測深度が現状の技術では数mmであり、食品内部検査へ適用するには計測深度の向上が不可欠である。

OCTは医療分野以外への適用事例が少ないことから、本研究では基盤技術の獲得及び食品内部の異物検査への適用可

能性について検討した。

2. OCTについて

2.1 OCTの原理

OCTの主要構成部品は低コヒーレンス光源を用いたマイケルソン干渉計である。原理を図1に示す。光源から出射された平行光束はビームスプリッタにより参照光、測定光の2

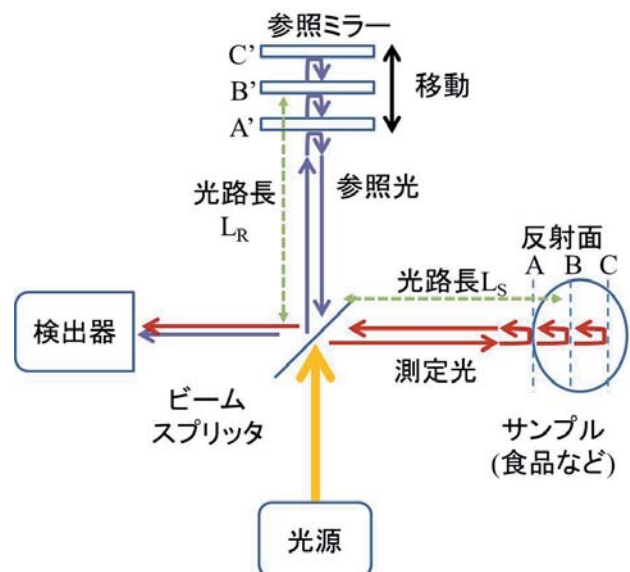


図1 OCT原理図

事業名：経常研究

課題名：OCTにおける計測深度向上に関する研究

つに分割される。参照光は参照ミラーで、測定光はサンプル表面及び内部の屈折率が変化する境界面で反射する。それぞれ反射した光を検出器で受光するが、このとき、参照光の光路長 L_R と測定光の光路長 L_S が一致すると干渉信号が得られる。したがって、参照ミラーを走査することにより、サンプル内部を走査することができ、断層情報（屈折率が変化する境界面の位置）を取得することができる。

2.2 OCTの方式

OCTは大きく2つの方式に分類される。光検出器からの信号を復調して画像を得るタイムドメインOCT（Time-Domain OCT, 以下TD-OCT）と、フーリエ変換を用いて光軸上の断層情報を得るフーリエドメインOCT（Fourier-Domain OCT, 以下FD-OCT）である。それぞれの方式はさらにいくつかの方式に分類される（図2）。

本研究では、まず最も原理的な計測方式である点計測型OCT（TD-OCT）の構築を行った。また、検出器にマルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス製、PMA-11, C7473-37）を用いることによりスペクトラルドメインOCT（SD-OCT）の構築も行った。SD-OCTは参照ミラーを走査しなくても干渉信号を計測できる、という特長を有する。

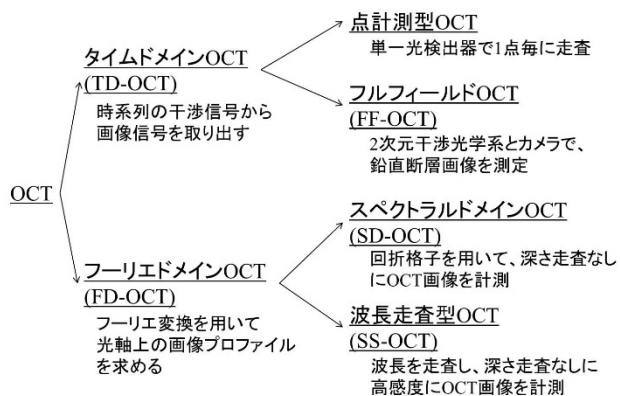


図2 OCTの方式

3. OCTシステムの構築

3.1 構築したシステム

構築したTD-OCTシステムを図3に示す。構成要素を以下に示す。

- ① スーパーluminescentダイオード (SLD) (EXALOS製, EXS210022-02)
- ② 電動ステージ (駿河精機製, ステージ: KY1250C, コントローラ: DS112MS)
- ③ ガルバノミラー (図4) (THORLABS製, GVSM002/M)
- ④ Siフォトダイオード (THORLABS製, FDS100)
- ⑤ A/Dボード (エルモス社製, RAI-16)

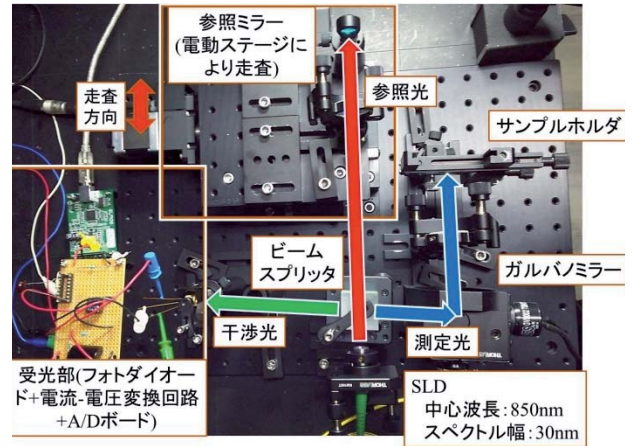


図3 構築したTD-OCTシステム

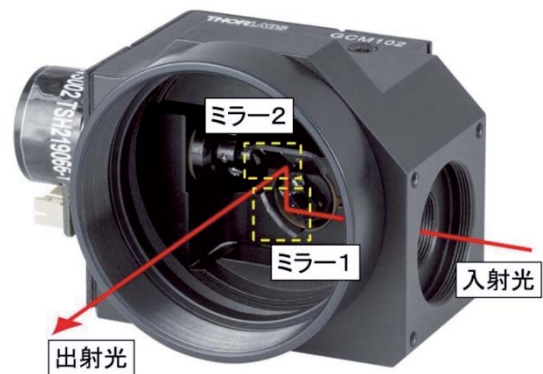


図4 ガルバノミラーによる走査のイメージ

受光部をマルチチャンネル分光器に置き換えると、SD-OCTシステムとなる。SD-OCTの場合、参照ミラーの走査なしに一定範囲の断層情報が取得可能である。その範囲を図5に示す。参照側の参照ミラーまでの光路長が L_R であるとする。このとき、サンプル側において光路長 L_R の位置から Z_{max} の距離まで一括で断層情報が取得できる。 Z_{max} は式(1)により定義される。

$$Z_{max} = \frac{\lambda_c^2}{4\sigma\lambda} \dots\dots\dots(1)$$

式(1)において、 λ_c は光源の中心波長、 $\sigma\lambda$ は分光器の波長分解能である。今回用いた分光器の波長分解能は $\sigma\lambda = 0.739 \text{ nm}$ であるので、 $Z_{max} = 244.4 \mu\text{m}$ となる。

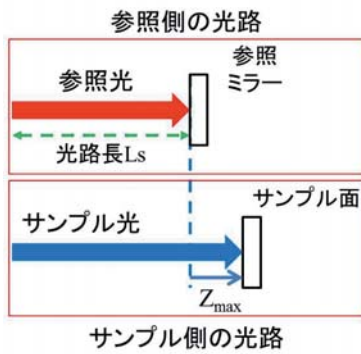


図5 SD-OCTにおける測定範囲Zmax

3.2 取得するデータとその解析方法

構築したシステム（図3）において、サンプル側にミラーを設置し、ガルバノミラーを走査せずに1点のみ測定したデータを例に、各方式により取得されるデータとその解析方法について説明する。

3.2.1 TD-OCTの場合

電動ステージにより参照ミラーを走査すると、図6(a)のデータが得られる。このデータに対し、フーリエ変換を行うと、図6(b)のデータが得られ、干渉が生じているデータと生じていないデータとで差異がみられる。干渉が生じているデータ

のみに表れている部分が断層情報であるため、バンドパスフィルタを適用し、断層情報のみを抽出し、逆フーリエ変換を行うことにより、ノイズが除去された断層情報を抽出することができる（図6(c)）。

3.2.2 SD-OCTの場合

SD-OCTにより得られる干渉光を図7(a)に示す。このデータに対し、波長を周波数に変換したのち、逆フーリエ変換を行うと、図7(b)のデータが得られる。ここで、中心に大きく表れているピークは光源の自己相関関数であり、光源情報以外の部分が断層情報となる。図7(c)は断層情報を拡大した図であり、ここではこのピークが抽出された断層情報となる。

3.3 取得データの例

構築したシステムにおいて、サンプルホルダにテストターゲット（THORLABS製）を設置し、そのパターン及びアルファベットを計測した例を図8に示す。このテストターゲットは主に分解能（解像度）を測定するために使われるものであるが、今回は計測データの一例として使用した。テストターゲットの厚みや明暗パターンなどの3次元情報が取得できていることを確認した。

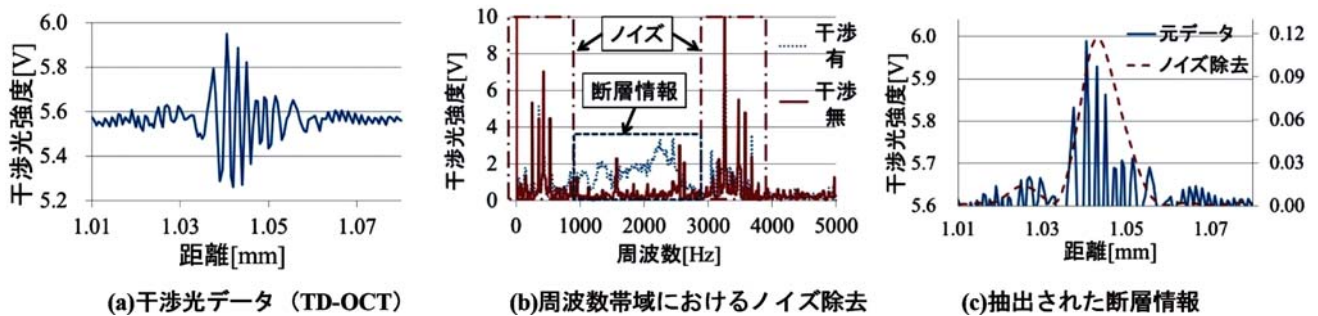


図6 TD-OCTにより得られるデータとその解析

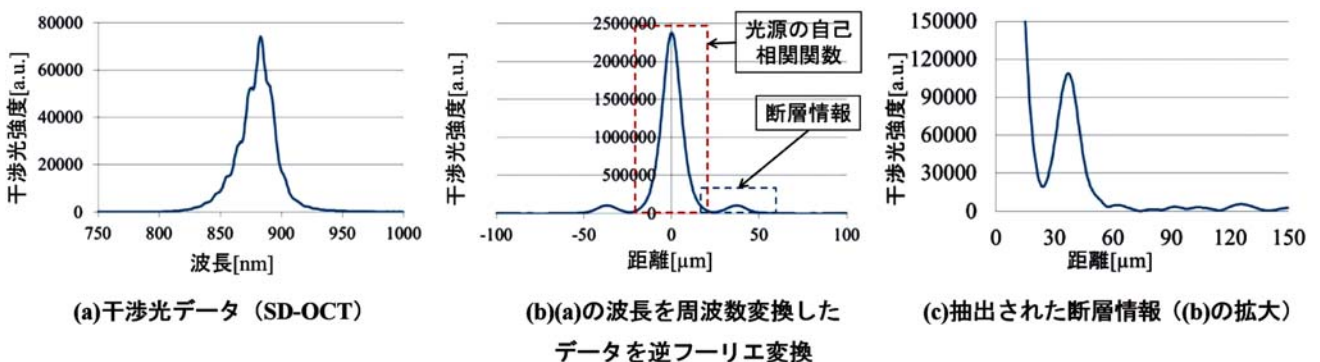


図7 SD-OCTにより得られるデータとその解析

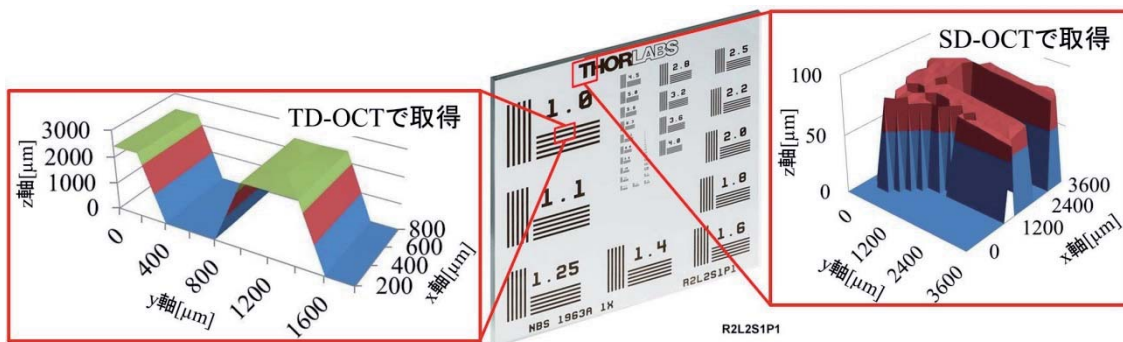


図8 取得した3次元データの例

3.4 構築したシステムの分解能

構築したシステムにおいて、光軸及び光軸以外の空間分解能の検証を行った。

3.4.1 光軸方向

光軸方向の空間分解能の理論値は式(2)により定義される。

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 λ_c は光源の中心波長、 $\Delta \lambda$ は光源のスペクトル幅である。つまり、光軸方向の分解能は光源の仕様により決定される。実測値の分解能は図6(c)や図7(c)の強度ピークに対してガウスフィッティングを行い、その半値全幅 (FWHM)

として求めた。TD-OCT及びSD-OCTの各方式において理論値と実測値を比較した結果を図9に示す。図9より、両方式においてほぼ理論値通りの分解能が得られていることが確認できる。TD-OCTとSD-OCTにおいて理論値が異なっているのは、SLDを駆動する際の電流値が異なり、それに伴い、光源の中心波長及び半値幅が若干変化するためである。

3.4.2 光軸方向以外 (水平・垂直方向)

光軸方向以外の分解能は平行光束を集光した径により決定される。実測値は図10に示すテストターゲットのラインパターンを測定し、ラインを判別できる限界値から推定する。光軸方向の分解能検証と同様に、測定した強度ピークに対してガ

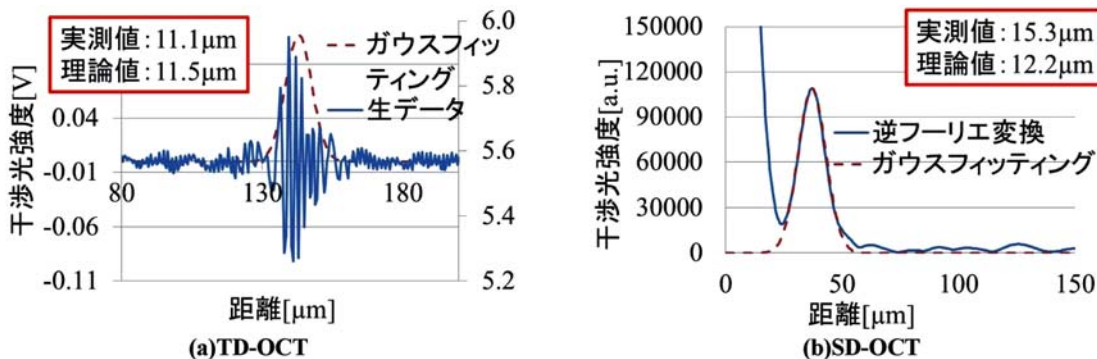


図9 光軸方向の分解能

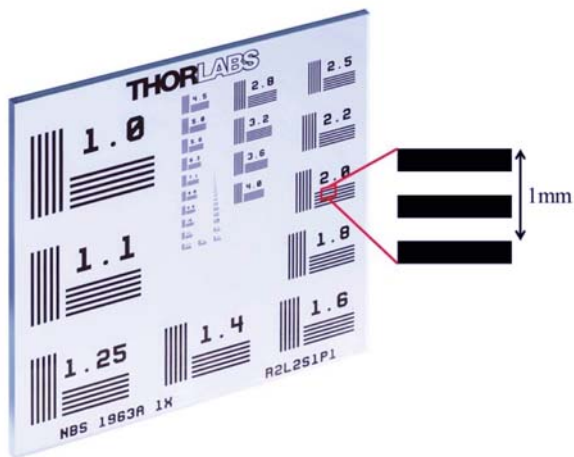


図10 テストターゲットとそのパターンのサイズ

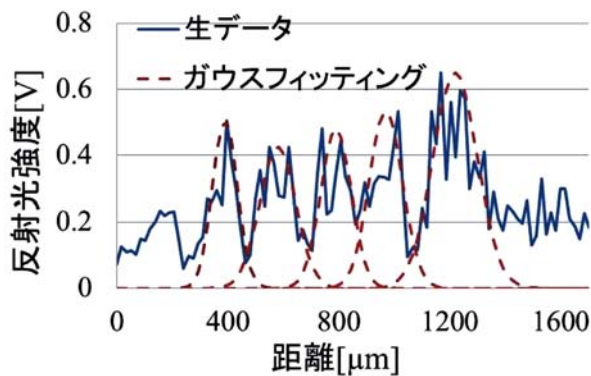


図11 テストターゲット、パターン5.0の測定結果

ウスフィッティングを行い、その半値全幅（FWHM）がピーク間隔より小さい数値の場合、ライン判別可能とした。テストターゲットに記載のある数値は、単位長さあたりのラインパターンの本数 [サイクル/mm] を表している。たとえば、2.0のラインパターンは明・暗の1サイクルが1mmの間隔に2周期含まれていることとなる。

測定の結果、5.0のラインパターンまで測定することができた（図11）。したがって、分解能としては約200 μm である。

4. 食品の異物検査への適用可能性

4.1 人毛検出の検証

異物検査への適用可能性の検証では、異物として人毛の測定を行った。TD-OCT及びSD-OCTの両方式にて測定を試みたが、TD-OCTでは人毛からの反射光を検出することができなかった。原因としては、反射光強度以上のノイズが生じており、ノイズに反射光が埋もれてしまったことが考えられる。一方でSD-OCTでは反射光を取得できたものの、表面のみの位置情報しか取得できなかった。OCTにより人毛の断面構造を識別可能であるとの研究例³⁾もあるが、識別するためには今回構築したシステムの2倍以上の分解能が必要であり（該当論文の分解能は6.2 μm ）、また、異物検査の目的には人毛の有無が判別できればよいと、現状のシステムで十分であると考えられる。

測定したデータを図12に示す。測定に用いた人毛は直径が約60 μm だが、取得したデータは直径が約200 μm となった。これは、平行光束がある程度人毛に照射されていれば反射光が得られているが、分解能が200 μm のため、実際のサイズよりも太く測定されたと考える。また、反射光強度のばらつきは光学系の調整が十分でないため生じたものと考えられる。

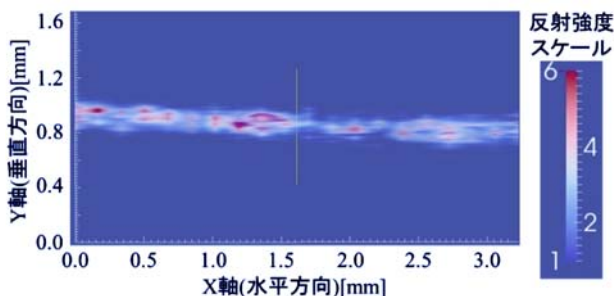


図12 SD-OCTにより取得した人毛データ

4.2 計測可能深度の検証

食品検査へOCTを適用する場合、測定対象物ごとに光の吸収・散乱特性が異なるため、あらかじめ計測深度を知ることが難しい。そこで、計測可能深度をある程度推定できるように、光の透過率に対する計測可能深度のデータ蓄積を行った。

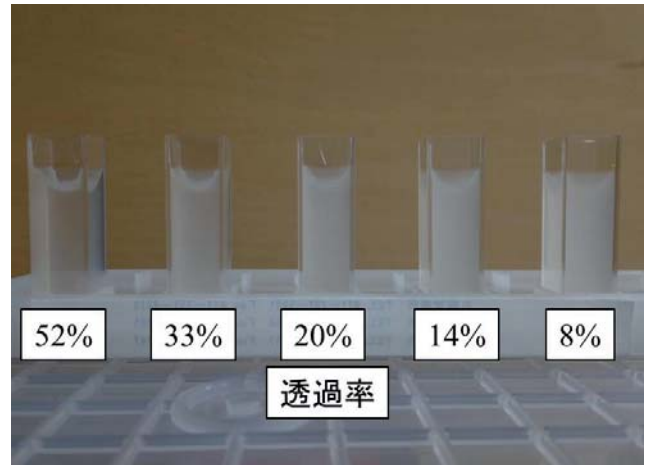


図13 透過率をかえたサンプル（一例）

計測深度を現状の数mmから10mm程度まで拡大することを目標とし、サンプルを入れるセルのサイズを幅10mm、奥行10mm、高さ45mmとした。サンプルとして水に溶解したゼラチンに牛乳を散乱媒質として濃度を調整して添加し、透過率を変えたものを用いた（図13）。セルの断面を走査し、セル前面及び後面からの反射光を取得することにより、その透過率に対しては10mmまで測定可能とした。実験の結果、TD-OCTでは透過率20%のサンプルまで測定可能であった。また、SD-OCTでは透過率2.6%のサンプルまで測定可能であった。

本試験は牛乳の濃度を変えることにより散乱係数を変化させているが、食品では吸収係数も様々な値をとりうることから、光学定数（吸収係数、散乱係数）に対する計測可能深度のデータ蓄積を引き続き進める必要がある。

5. まとめ

OCTによる食品内部検査技術の開発を目的として、TD-OCT、SD-OCT実験システムの構築及び食品検査への適用可能性について検討を行った。構築したTD-OCT及びSD-OCTの2方式によるシステムの性能評価を行い、3次元情報を取得できることを確認した。食品検査への適用可能性については、SD-OCTにて人毛の計測が可能であり、また深度検証もTD-OCTよりも透過率が低いサンプルまで計測可能であったことから、SD-OCTが有効であると考えられる。

しかしながら、SD-OCTでは参照ミラーの走査なしで得られる断層情報の範囲が狭いため、参照ミラーの走査を行う、改良型SD-OCTシステムを構築して、計測深度の拡大を目指す。また、食品などの実サンプルを対象として、断層情報が取得可能な深度について実験を行い、検討を進めていく。

引用文献

- 1) Brett E.Bouma, Guillermo J.Tearney: Handbook of Optical Coherence Tomography, informa, pp.756, (2001)
- 2) 佐藤学・丹野直弘：光コヒーレンストモグラフィの基礎, 光学, Vol.32 No.4, pp.268-274, (2003)
- 3) M.V.R.Velasco, A.R.Baby, F.D.Sarruf, T.M.Kaneko, R.E.Samad, N.D.V.Junior and A.Z.Freitas: Prospective ultramorphological characterization of human hair by optical coherence tomography, Skin Research and Technology, Vol.15, pp.440-443, (2009)