

# 論文内容要旨 (和文)

平成 21 年度入学 博士後期課程

専攻名 生体センシング機能工学専攻

氏 名 Waskito Nugroho



論 文 題 目 空間位相変調参照光を用いた単一露光光波断層画像測定法に関する基礎研究

光波断層画像測定法(optical coherence tomography: OCT)は、低コヒーレンス干渉計を用いた無侵襲性の光学イメージング手法であり、すでに、眼科臨床では実用化され、医療機関で使用されている。数十  $\mu\text{m}$  の高い空間分解能と生体への無侵襲性が大きな特徴である。OCTは、基本的に低コヒーレンス光による深さ分解能と対物レンズの集光特性による二次元空間分解能により三次元空間分解能を有しており、干渉を用いたヘテロダイン検出により高感度な信号光の検出で断層画像測定を可能としている。

OCTには、種々のタイプがあるが、基本的に、二次元干渉光学系と二次元カメラを用いたFF-OCT(full-field OCT)は、シンプルな構成で試料表面に平行な試料内部の断層画像である鉛直断層画像を測定できることが特徴である。従来は、位相シフト法を用いて、複数の干渉画像を測定し、画像処理により断層画像を得ていた。この方法は、試料からの信号光と参照光との位相差を変えて測定した3枚から4枚の干渉画像から画像処理により断層画像を得る方法である。この場合、OCTの取得速度がカメラの取得速度の1/3~1/4に低下する問題が生ずる。これに対して、一度の露光で位相の異なる4つの干渉画像を取得し、画像処理によりOCT画像を得る単一露光光波断層画像測定法(single shot full filed OCT, SS FF OCT)が研究され、報告された。しかし、光学系が複雑で背景ノイズが大きく低感度などと実用化へは、大きな問題があった。これに対して、我々の研究グループは、光学素子の集積化による光学系のコンパクト化や、90度位相の異なる2つの直交位相干渉画像を同時に取得し、二次元ヒルベルト変換の導入によって断層画像を得る方式の提案を行ってきた。しかし、CCDカメラ上に、2つの干渉画像を同時に測定する方式では、2つの画像の空間分離により、直流画像成分を等しくするのは容易でない。よって、減算後直流成分の残差により感度を低下させる問題が生じた。そこで、我々は、コンパクトでシンプルなSS FF OCTシステムの実現に向けて、空間位相変調参照光を用いた単一露光光波断層画像測定法を提案した。これは、位相の180度異なる画素間の減算により、直流残差成分を低減し、感度の向上、光学系のコンパクト化を実現しようとするものである。

本研究での目的は、まず、提案した空間位相変調ミラーアレイ(spatially phase modulated mirror array: SPMA)を用いたSS FF OCTの基礎特性をシミュレーションにより明らかにし、さらに、キーデバイスとなるSPMAの干渉基礎特性を明らかにし、SPMAを用いたSSFFOCTの動作原理に関して、知見を得ることである。

光学系は、基本的に低コヒーレンス光源であるSLD(superluminescent diode)、二次元干渉光学系、CCDカメラ、画像処理を行うPCで構成される。光学系からの光は拡大され、SPMAに照射される。SPMAに光を入射し、その反射光が空間位相変調参照光となる。SPMAは交互に高さの異なる微小ミラーの二次元アレイである。隣り合う微小ミラーの高低差は、光の往復で隣り合う光の位相が180度ずれる高さとなっている。それぞれの微小ミラーは、CCDカメラ上に結像され、微小ミラーのサイズとCCDカメラの画素サイズがともに $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ なので、参照光路は一眼レフカメラの対物レンズを用いて倍率1倍の結像光学系となっている。それぞれの微小ミラーのイメージは、個々の微小ミラーが平坦な四角の形状なので、参照光としての位相が一樣となり、位相分布が均一領域(uniform area: UA)を形成している。一方、信号光路では、対物レンズに一般的な顕微鏡の対物レンズを用いており、高倍率の光学系である。このように、参照光路は低倍率、信号光路は高倍率の光学系となっている。

SPMAを用いた干渉画像はCCDカメラでPCに取り込まれ、画像処理によりOCT画像が抽出される。アルゴリズムにおいては、OCT画像は、XまたはY方向の隣同士の画素間での信号強度の減算で直流成分が除去され、干渉画像成分(cos成分)が抽出され、二次元ヒルベルト変換を用いて空間位相の90度異なる直交干渉画像成分(sin成分)を求め、両成分の二乗和により位相成分を相殺し、信号強度分布、すなわちOCT断層画像を得ることができる。

このOCTシステムの基礎特性を検討し、次の結果を得た。

- 1) 基礎特性は、まず、OCT信号強度と空間周波数、背景雑音、位相シフト量との関係を数値計算で検討した。低い空間周波数領域では、OCT信号強度は減算効果で2倍大きくなるが、空間周波数が高くなるとOCT信号はナイキスト周波数の半分の空間周波数で0.636倍の大きさに減少する。OCT信号はまた、画像の方向性に依存する。隣接する画素間の非干渉信号成分の差異は、背景ノイズを増大させ、システムの感度を低下させる。参照光において、微小ミラー間の位相差は $180^\circ$ であり、それから変位するとOCTの信号強度は低下することが定量的にわかった。
- 2) 実際のSPMAの基礎干渉特性は、汎用の波長840nmのSLDを用いて検討された。SPMAの微小ミラーは、 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ の大きさで、全体の領域は、 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ である。参照光路の倍率は、3倍、2倍、1倍で、対する信号光路の倍率は、18.1倍、12.2倍、5.2倍である。CCD全面に対する干渉領域の割合は、0.68、0.32、0.13で、干渉のvisibilityと計算値に対する割合は、それぞれ、0.38 (54%)、0.19 (28%)、0.062 (8.2%)となるのがわかった。

以上より、SPMAを用いたSSFFOCTの動作原理に関して、有効な知見を得ることができた。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成24年 2月 17日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 佐藤 学

副査 石井 修

副査 湯浅 哲也



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

専攻名 生体センシング機能工学専攻

氏名 Waskito Nugroho

2. 論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記する。)

Basic study on single shot full field optical coherence tomography

using spatially phase-modulated reference light

(空間位相変調参照光を用いた単一露光光波断層画像測定法に関する基礎研究)

3. 審査年月日

論文審査 平成24年 1月25日 ~ 平成24年 2月 6日

論文公聴会 平成24年 2月 6日

場所 工学部9号館9-809号室

最終試験 平成24年 2月 6日

4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 「合格」

(2) 最終試験 「合格」

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

## 別紙

専攻名	生体センシング機能工学専攻	氏名	Waskito Nugroho
学位論文の審査結果の要旨			
<p>本論文は、二次元的に周期位相変調された参照光を用いる単一露光光波断層画像測定法(single shot full field optical coherence tomography, SS FF OCT)に関して行った基礎的研究について述べており、全6章で構成されている。以下、各章について述べる。</p> <p>第1章：研究の背景として、各種断層画像化法の比較、現状の問題点を述べ、OCTの原理や位置付けについて述べている。</p> <p>第2章：OCTの中でも、SS FF OCTについて、その基本原理及び特徴や経緯について述べ、提案されてきた各種方式の長所・短所について比較検討し、本研究で考慮すべき背景ノイズや時間分解能の課題を明確にした。</p> <p>第3章：本研究で提案したSS FF OCTに関して、基本構成及び動作原理を示し、単一露光計測の課題に対して期待される効果を述べた。特に、画像処理については、直交位相成分の画像情報を得るためのアルゴリズムについて記述して、処理内容を具体的に明確に述べている。さらに、基本構成において、一般的な光学部品を用いた場合での横方向分解能や焦点深度などの基本仕様を示した。</p> <p>第4章：本SS FF OCTの場合のOCT信号強度と空間周波数、背景雑音、位相シフト量との関係を数値計算により明らかにした。低い空間周波数領域では、OCT信号強度は減算効果で2倍大きくなるが、空間周波数が高くなるとOCT信号はナイキスト周波数の半分の空間周波数で0.636倍の大きさに減少する。OCT信号はまた、画像の面内方向に依存する。隣接する画素間の非干渉信号成分の差異は、背景ノイズを増大させ、システムの感度を低下させることを定量的に示した。参照光において、微小ミラー間の位相差は180°であり、それから変位するとOCTの信号強度は低下する関係も定量的に明らかにした。</p> <p>第5章：実際のSPMA(Spatially phase-modulated mirror array)の微小ミラーは、10<math>\mu</math>m x10<math>\mu</math>mの大きさで、全体の領域は、5 mm x 5 mmである。光源に波長830nmのSLDを用いて、参照光路の倍率は、3倍、2倍、1倍で、対する信号光路の倍率は、18.1倍、12.2倍、5.2倍である。CCD全面に対する干渉領域の割合は、0.68% 0.32% 0.13%、干渉のvisibilityと計算値に対する割合は、それぞれ、0.38 (54%), 0.19 (28%), 0.062 (8.2%)となるのがわかった。</p> <p>第6章：全体の総括と考察及び今後の展望について論じている。</p> <p>本論文は、提案した空間位相変調参照光を用いた単一露光光波断層画像測定法に関して、動作原理確認の点から、まず数値計算によって、空間分解能などに関する結果を得ており、さらに、キーデバイスとなるSPMAを用いて実際の測定を行い、その空間位相変調動作を確認した結果がまとめられている。各章から得られた知見は学術的に非常に有意義であると判断した。尚、本研究の成果に関して、欧文誌で2件が掲載済、国内学会では5件が報告されている。</p> <p>以上より、本論文が学位論文として十分であると認め、合格と判定した。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>学位論文公聴会における質疑応答、及び個別面接試問を通して、関連する知識、理解力、洞察力、問題解決能力など博士(工学)として必要とされる広範囲の能力、ならびに語学力を検査した結果、十分な能力を備えていると認められ、合格と判定した。</p>			