

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号： 13201

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2009～2011

課題番号： 21300064

研究課題名（和文）

究極の次世代型分解能を有するセンシング・ソフトウェア基盤技術に関する研究

研究課題名（英文）

Next generation signal processing for embedded sensor system

研究代表者

廣林 茂樹 (HIROBAYASHI SHIGEKI)

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・教授

研究者番号： 40272950

研究成果の概要（和文）：

申請者が開発した Non-Harmonic Analysis (NHA) を用いて、光コヒーレンストモグラフィ (OCT) イメージングに応用を試みた。

従来のフーリエドメイン OCT (FD-OCT) では、窓関数及び窓長に依存する離散フーリエ変換 (DFT) を用いている。DFT を用いて算出される OCT 画像において、軸方向の分解能は波長帯域幅の半値全幅 (FWHM) に反比例する。この波長帯域幅の FWHM は、掃引光源の掃引範囲や CCD ピクセルの数によって制限される。しかし、NHA には DFT のような制約がなく、窓関数や窓長に関わらず高い周波数分解能が実現できる。

この NHA を OCT に応用する利点を実証するため、玉ねぎの皮の OCT イメージングを NHA により行った。その結果、NHA は波長帯域幅を大幅に低減しても、100nm の波長帯域幅の画像解像度と同等の画像解像度を達成できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

A new processing technique called non-harmonic analysis (NHA) is proposed for optical coherence tomography (OCT) imaging.

Conventional Fourier-domain OCT employs the discrete Fourier transform (DFT), which depends on the window function and length. The axial resolution of the OCT image, calculated by using DFT, is inversely proportional to the full width at half maximum (FWHM) of the wavelength range. The FWHM of wavelength range is limited by the sweeping range of the source in swept-source OCT and it is limited by the number of CCD pixels in spectral domain OCT. However, the NHA process does not have such constraints; NHA can resolve high frequencies irrespective of the window function and the frame length of the sampled data.

To demonstrate the benefits of using NHA for OCT, we perform OCT imaging with NHA of an onion skin. The results reveal that NHA can achieve an image resolution equivalent that of a 100-nm sweep range using a significantly reduced wavelength range. They also reveal the potential of using this technique to achieve high-resolution imaging without using a broadband source.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2010 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：情報センシング

### 1. 研究開始当初の背景

本申請研究では、申請者が発明した NHA を用いて、関連技術の開拓を行った。これまでの周波数分析法に比べ、NHA は、10 万～100 億倍以上の精度の向上があるため、特に工学計測機器や医療計測機器などへの応用をはかる目的で、断層撮影技術の中で使われている FFT を NHA に置き換え、センシング技術の向上を試みた。NHA は、OCT (Optical Coherence Tomography) に代表される断層撮影装置の分解能を飛躍的に向上させる可能性がある。医用や工学の分野で用いられている OCT では、近赤外の後方散乱光の干渉を利用することで、電子顕微鏡や実態顕微鏡とは異なり、可視域で透明でなくても生体や試料を採取・破壊することなく、内部構造を可視化できるため、X 線 CT、MRI、超音波、共焦点顕微鏡に続く最先端断層測定器として近年大きな注目を浴びている。

OCT の画像は測定された反射干渉光分布を、窓関数を用いてフーリエ変換して、分光 OCT の断層図を得ている。したがって、空間分解能を向上させるためには、分析窓の中に多くの周期が入ればフーリエ変換後の点像関数は鮮明になる。しかし、分解能が向上するが、実際にはその窓の広さは光源の波長帯域によって制限される。現在の OCT の分解能は 10 $\mu$ m 程度に留まり、がん細胞を可視化するにはもう 1 桁上の分解能が必要であるといわれ、各 OCT の研究グループは分解能向上のため、光源の波長帯域を広げる事に注力しているのが現状である。ゼロパッドやフィルタリングなど今まで色々な取り組みはされているが、原理的なフーリエ変換で制約される点像関数の広がり以下にできるものではなく、どの研究グループも抜本的な解決策には至っていない。そこで、NHA を用いて、この分野の問題を本質的に解決する技術確立し、光源の帯域（窓の広さ）は今のままでの点像関数をより鮮明にすることを検討した。

### 2. 研究の目的

工学計測機器や医療計測機器などへの応用をはかるため、断層撮影技術の中で使われている FFT を NHA に置き換え、センシング技術の向上を試みる。

特に、工学系で広く利用されている FFT (Fast Fourier Transform) に代用すれば、様々なセンシング・ハードウェアの限界を極限まで向上させることができ、センサデバイスの総合的なセンシング能力や、情報集積技術が飛躍的に向上する可能性がある。

### 3. 研究の方法

(1) 干渉縞信号の解析シミュレーション  
実際の OCT の干渉縞信号の解析に先立ち、OCT への NHA の応用可能性を確認するため、擬似的に生成した干渉縞信号を用いて数値シミュレーションを行った。

シミュレーションの模式図を以下の図 1 に示す。このシミュレーションでは 1.000mm を基準として、そこからの変位  $\Delta L$ mm の深さに存在する薄膜からの後方散乱光に起因する干渉縞信号を生成し、DFT と NHA の 2 手法で解析する。 $\Delta L$  は 1.001mm と 1.002mm の 2 種類である。また光源の波長帯域幅を低減した場合の、両手法の解析精度を比較するために、このシミュレーションは波長帯域幅 100nm と 12.5nm のそれぞれの場合について行った。

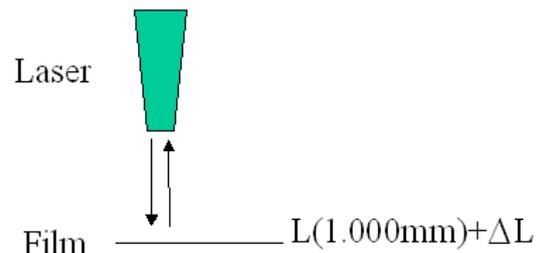


図 1 解析シミュレーション模式図

### (2) OCT 信号の解析

実際に OCT で玉ねぎの皮をスキャンして得られた波長帯域幅 100nm、25nm、12.5nm の干渉縞信号を利用して DFT、NHA の両手法で解析実験を行った。

実験に使用した OCT 装置の構成を以下の図 2 に示す。本研究で利用した波長掃引光源の中心波長は 1300nm、波長帯域幅は 100nm で、このとき窓長は 2048 である。この OCT 装置から得られた干渉縞信号を A/D 変換し、PC 上で DFT と NHA の両手法によって解析し、それぞれ断層像を得た。得られた断層像を比較することで、OCT における DFT を NHA で置き換えられることを検証する。

また、波長帯域幅 25nm、12.5nm の干渉縞信号は、図 3 に示すように 100nm の干渉縞信号の窓長を 1/4 と 1/8 に制限することで取得された。波長帯域幅 25nm の時の窓長は 512、12.5nm の時の窓長は 256 である。得られた 3 つの干渉縞信号を両手法で解析し断層像を描画し、OCT の波長帯域幅による断層像への影響を比較した。

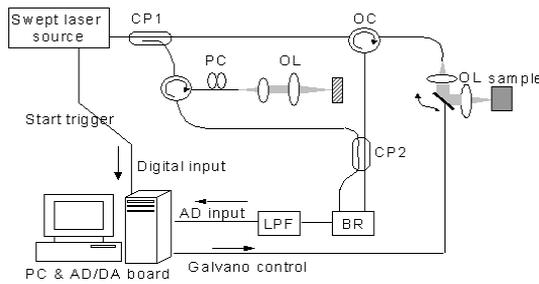


図2 OCT装置の構成

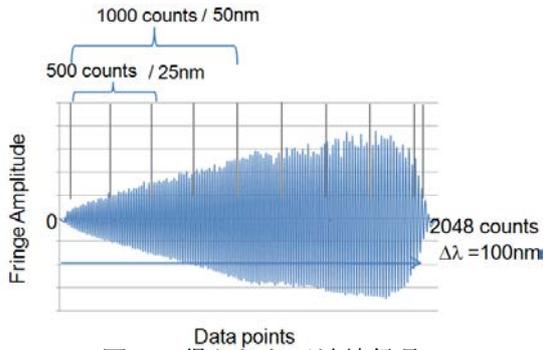


図3 得られた干渉縞信号

#### 4. 研究成果

干渉縞信号の解析シミュレーションの結果、NHAによる解析は、従来手法に比べて8桁から9桁の精度向上が達成できる事が検証できた。

OCTの信号解析にNHAを応用することで従来手法であるDFTを代替できる事が確認できた。またそうした場合、光源の波長帯域幅を大幅に低減しても、100nmの波長帯域幅の時と同等の画像解像度を達成できる事が確認できた。

##### (1) 干渉縞信号の解析シミュレーション

干渉縞信号の解析シミュレーションの結果を以下の表1と表2に示す。表1は光源波長帯域幅100nmの場合、表2は同じく12.5nmの場合の結果である。

表1 波長帯域幅100nmの時の解析精度

$L + \Delta L$ (mm)	Error of DFT ( $\mu\text{m}$ )	Error of NHA ( $\mu\text{m}$ )
1.001	$1001 \pm 1$	$1001 \pm 1 \times 10^{-8}$
1.002	$1002 \pm 2$	$1002 \pm 1 \times 10^{-8}$

表2 波長帯域幅12.5nmの時の解析精度

$L + \Delta L$ (mm)	Error of DFT ( $\mu\text{m}$ )	Error of NHA ( $\mu\text{m}$ )
1.001	$1001 \pm 1$	$1001 \pm 5 \times 10^{-9}$
1.002	$1002 \pm 1.1$	$1002 \pm 3 \times 10^{-8}$

表1および表2より、帯域幅に関わらず従来法であるDFTでは $1\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ 程度の誤差が生じているのに対して、NHAでは誤差は $10^{-9}$

$\mu\text{m}$ から $10^{-8}\mu\text{m}$ 単位の誤差しか生じていないことが確認できる。

また、波長帯域幅が制限されると、DFTでは誤差が拡大するのに対して、NHAでは帯域幅が制限されているにもかかわらず、 $10^{-8}\mu\text{m}$ 単位という極めて低い誤差レベルを維持している。

この結果はOCT信号の解析においてNHAを利用することで、DFTに比べて高い画像解像度を得られ、さらに光源の波長帯域幅を低減しても高い解像度を維持できることを示している。

##### (2) OCT信号の解析

実際にOCTを用いて玉ねぎの皮をスキャンして得られた干渉縞信号を、DFTとNHAの両手法によって解析して得られた断層像を以下の図4から図5に示す。図4から図5はそれぞれ波長帯域幅 $\Delta\lambda$ が100nm、12.5nmの時の断層像である。また各図中の(a)と(b)はそれぞれ、DFTによる断層像の全体図と、その一部の拡大画像であり、おなじく(c)および(d)はNHAによる断層像の全体図と、拡大画像である。

図4は100nmの波長帯域幅で得られた断層像である。図4より、NHAを使用することで、実用的な画像分解能が得られる事が確認できる。このとき、DFT及びNHAの軸方向分解能はおおよそ $7.57\mu\text{m}$ であった。

図5は波長帯域幅12.5nm(窓長256)で得られた断層像であり、このときのDFTの分解能はおおよそ $56.6\mu\text{m}$ であった。

また図4と図5を比較すると、従来法であるDFTによる断層像は、波長帯域幅が制限されると断層像の解像度も大きく劣化しているのに対して、NHAによる断層像では、波長帯域幅を制限しても解像度はあまり劣化せず、高い解像度を維持できていることが確認できる。

この結果は、DFTは窓長によって分解能が大きく影響されるため、窓長が制限されると分解能も低下するが、NHAでは分解能に対する窓長の影響が非常に小さいため、窓長を低減しても変わらず高い解像度を維持できていることがわかる。

#### 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)

①X. Cao, T. Uchida, S. Hirobayashi, C. Chong, A. Morosawa, K. Totsuka, and T. Suzuki, Non-Harmonic Analysis Applied to Optical Coherence Tomography Imaging, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 51, 2012, 022503

②T. Uchida, S. Hirobayashi, T. Misawa, T. Yoshizawa, X. Cao, C. Chong, A. Morosawa, K. Totsuka, and T. Suzuki, Non-uniform non-harmonic analysis method development and verification of applicability to swept source optical coherence tomography, 査読有, Nonlinear Theory and Its Applications, 4, 2013, 172-182

〔学会発表〕(計 1件)

①T. Uchida, X. Cao, S. Hirobayashi, T. Misawa, T. Yoshizawa, C. Chong, A. Morosawa, T. Suzuki, The simulation for accuracy validation of OCT based Non-Harmonic Analysis, 2011 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics(BMEI), 査読有, 2011年10月16日, Shanghai(中国)

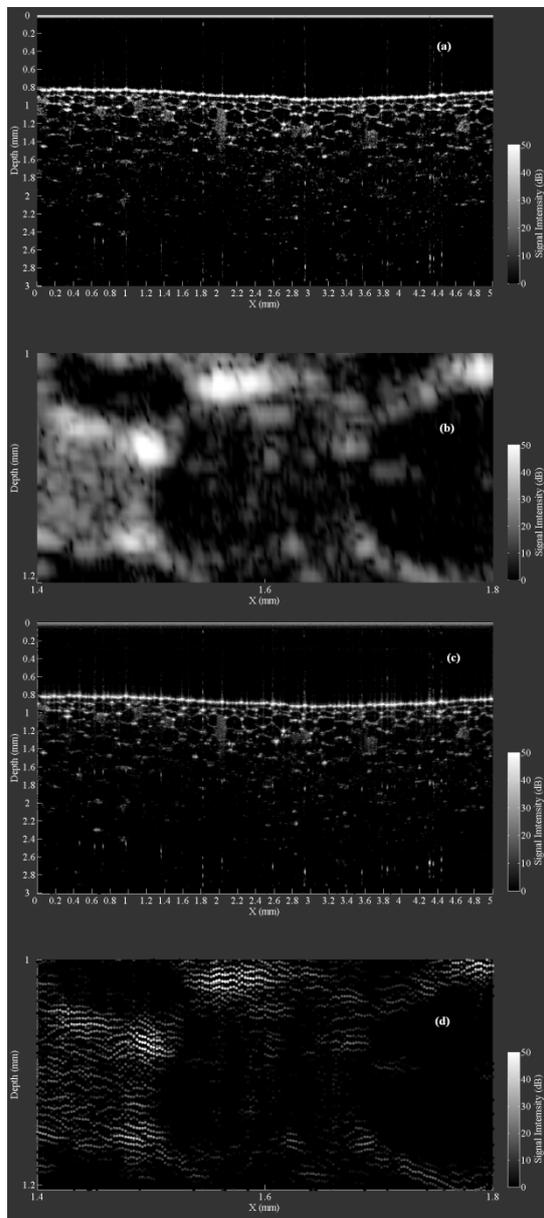


図4 玉ねぎの皮の断層像 ( $\Delta\lambda=100\text{nm}$ )

○出願状況 (計 1件)

名称: 光断層画表示システム

発明者: 廣林茂樹, 両澤淳, 鄭昌鎬

権利者: 富山大学、サンテック株式会社

種類: 特許

番号: 2009-069632

出願年月日: 平成21年3月23日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

廣林 茂樹 (HIROBAYASHI SHIGEKI)

富山大学大学院理工学研究部 (工学)・教授

研究者番号: 40272950

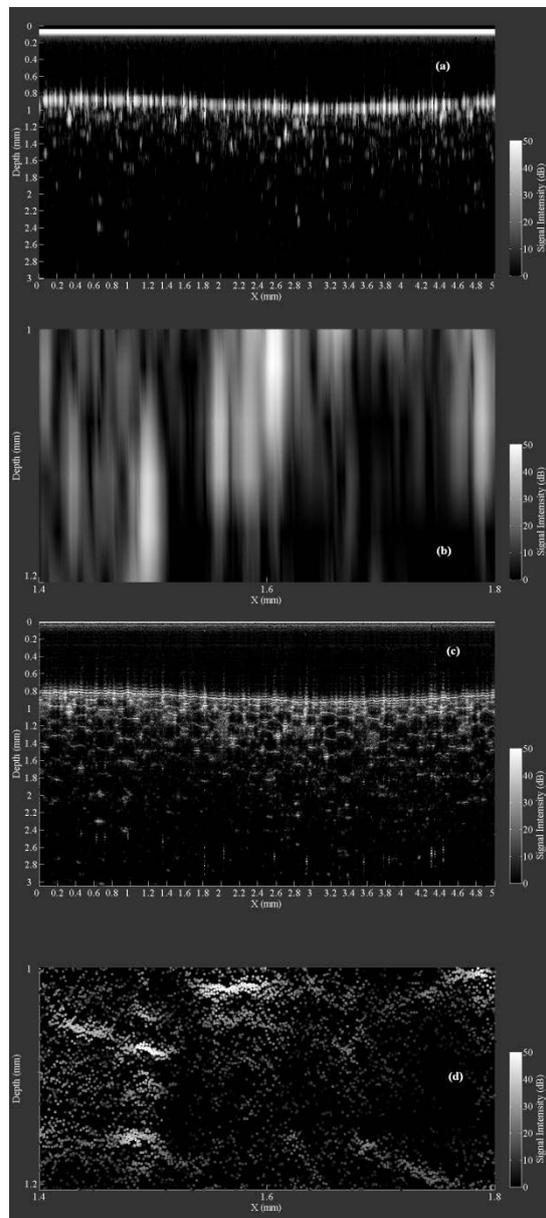


図5 玉ねぎの皮の断層像 ( $\Delta\lambda=12.5\text{nm}$ )