

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 05 月 22 日現在

機関番号：32409

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760235

研究課題名（和文） 多次元内視鏡の開発

研究課題名（英文） Development of multi-dimensional endoscope

研究代表者

若山 俊隆 (WAKAYAMA TOSHITAKA)

埼玉医科大学・保健医療学部・准教授

研究者番号：90438862

研究成果の概要（和文）：

本研究は、内面形状と共にその性状をとらえる新しい内視鏡の開発を行った。分光情報から非接触で光バイオプシ・イメージングを三次元形状計測と同時に行った。また、産業界から要求が強かった同軸計測を達成するために、共焦点法を取り入れ、超精密な内面形状計測を可能にした。また、これらの要素技術として、円錐ミラーや円錐レンズをアクリルにて開発する過程で特異な偏光現象を発見し、今までにない光学素子の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

I have developed a novel endoscope obtained its properties and conditions with inner profile. This study was achieved optical biopsy imaging from spectrum information and three dimensional profile measurement. To overcome uni-axial measurement, it is possible to measure inner profile surface from confocal technique, precisely. I have developed novel optical elements after I discovered unique polarized phenomena by process for fabricating conical mirror and lens as element technologies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：内視鏡，三次元，分光，偏光

1. 研究開始当初の背景

申請者は産業分野で実用できる内面形状計測用のプローブカメラの開発に取り組んでおり、その新しい応用分野として医療分野に注目していた。近年、分光バイオプシ・イメージングの必要性が高まると共に産業分野でパイプや配管の内面形状を超精密にかつ同軸に計測することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は、医療における分光バイオプシ・イメージングを三次元形状計測と同時に行う装置の開発と、共焦点手法によってパイプや配管の内面形状を超精密にかつ同軸に計測する手段の開発を行った。

3. 研究の方法

A. 分光三次元内視鏡の開発

研究開始当初はバイオプシ・イメージングを達成するためにスペクトルリング発生プローブの開発を考えていたが、光学系が複雑になるのに加えて、精度が出にくいことが基礎実験から明らかになった。これにより、スペクトルリング発生プローブの開発は一時中止し、白色リングの発生を行った。

次に得られた白色リングビームを分光イメージングする手段として、ラジアル分光器の開発を申請書に従って開発した。ナノインプリント技術を利用した手法を当初は検討していたが、とても高価になるため、回折格子シートを短冊状にして、これを貼り合わせ

る方式を採用した。ここでは、より鮮明な分光画像を得るために 1500rpm で回転できる中空型高速回転モータを導入した。

また、白色リングビームプローブをより効果的に発生することを目的にキーデバイスとなる円錐ミラーや円錐レンズをアクリルから自作した。この過程で、アクリル製の円錐レンズに特異な偏光分布が発生することが明らかになった。この特異な偏光分布から特殊光学素子の開発も合わせて行った。

B. 同軸-共焦点型の超精密な三次元内視鏡の開発

研究当初はレンズの色収差を導入した同軸の共焦点型三次元内視鏡を開発する予定であったが、A. に示したように光学系が複雑になるのに加えて、見込まれる精度がそれほど高くないことが明らかになった。レンズの色収差に対して、レンズを可変焦点レンズにすることで光学系の複雑さをなくした同軸-共焦点型の超精密な三次元内視鏡の研究開発を行った。

4. 研究成果

図 1 に分光三次元内視鏡の光学系を示す。白色光源として用いた LED を光ファイバに回折光学素子で集光し、コリメートレンズを介して平行光にする。白色の平行光を円錐ミラーに照射すれば、光はディスク状に広がる。測定対象となるサンプルには光のリングによって光セクション面が形成されることになる。この光セクション面をレンズを介して、ラジアル回折格子に結像させる。その結像面をもう一つの結像レンズによって CCD に結像させる。これにより、CCD 上には白色の光セクション面と同時にラジアル回折格子によって分光された分光情報を独立して取得することができる。サンプルの吸収スペクトルによって分光画像は変化することになる。

図 2 に試作した白色リングビームプローブを示す。光ファイバコリメータの共に先端には円錐ミラーが設置されている。

図 3 はラジアル回折格子とレンズおよび CCD によって構成されたラジアル分光器で取得した光セクション面の分光画像である。中心にある白色の円分布が光セクション面であり、その外側に七色のスペクトルリングが形成されている。これがラジアル分光器によって取得された分光情報である。ここで使用した測定サンプルは周方向に均一な測定サンプルであるため、分光情報に変化はないが、測定サンプルの吸収特性が異なると、この分光情報に欠陥部分が生じる。z 軸ステージやセンサを利用することで、パイプや配管、生体における管の内面の三次元形状と共に分光吸収スペクトルを取得できる。

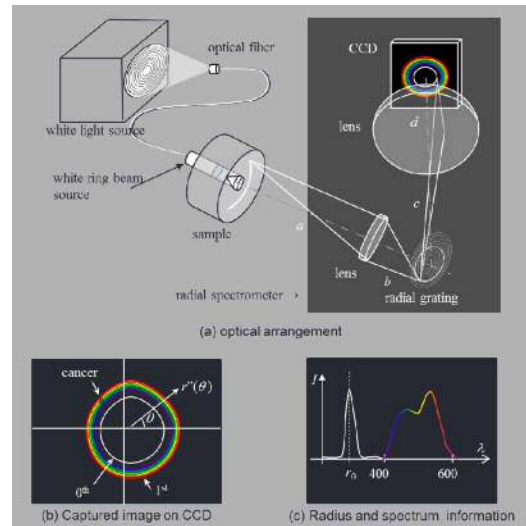


図 1 分光三次元内視鏡の光学系

- (a) 光学系
- (b) CCD に結像された光セクション面と分光情報
- (c) 半径方向に取得した光強度分布
白色に光セクションされたデータは半径を示すのに対し、スペクトルで示された部分はサンプルの持つ分光特性を示すことになる。



図 2 白色リングビームプローブ

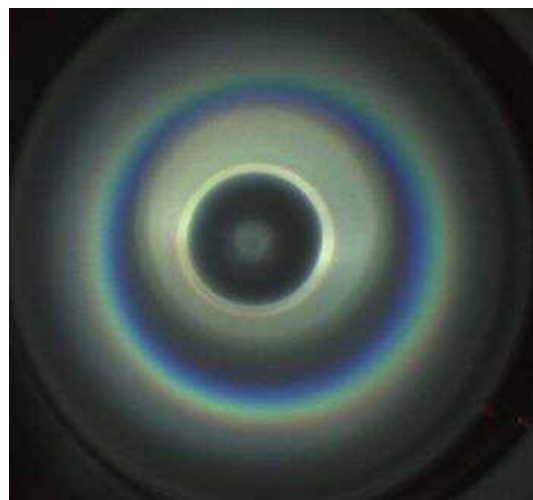


図 3 ラジアル分光器による分光画像



Z方向 25mm



サンプル (直径40mm)

図4 使用したサンプル



図5 取得された分光画像

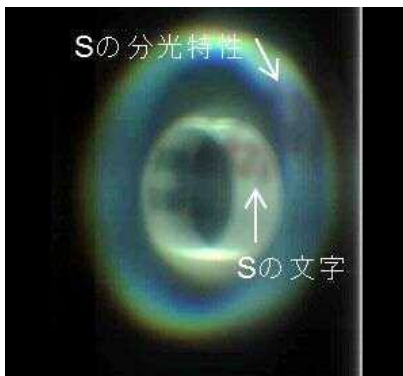


図6 取得された分光画像

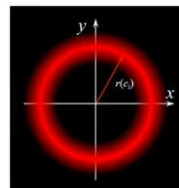
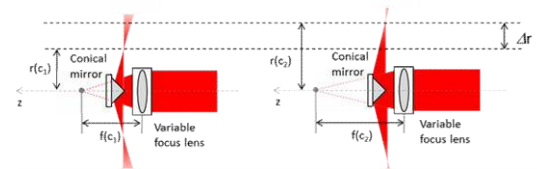
図4にデモンストレーション用に作製したサンプルを示す。色の異なるマジックを用いて“SMU”と描かれた紙を図のように丸めたものである。このサンプルによってマジックインクの成分から吸収スペクトルに変化が生じると予想した。実験ではこのサンプルを一軸ステージに固定しステップ毎に画像を取得した。

図5は CCD カメラによって結像された白色の光セクション面と、この光セクション面の分光画像である。白色の光セクション面の分光画像である。白色の光セクション面はサンプルの形状を示している。また、カラーで示されているものが分光情報である。図4に表示した SMU の赤色で書かれた”S”の部分に光セクション面があるため、図5の左下部分の分光スペクトルだけが吸収特性を有していることがわかる。

図6は 50 枚/25mm の間隔で分光画像を取得し、画像解析した結果を示している。少し見にくいですが、白色の光セクション分布から物体の内面形状およびそのテクスチャ画像が確認される。これに対して分光スペクトルの分布では青から緑色の吸収が特に多いため、S の分布が赤色にて表示されていることが理解できる。この結果は視覚的に簡単にイメージしやすくするためにカラーカメラを用いているが、本来はカラーカメラでなく、モノクロカメラを用いてその分光スペクトル情報をセクションすることが望ましいと考えている。

以上の基礎実験結果から本手法をとれば、管の三次元形状と共にその内部の吸収スペクトルを三次元空間上で表示することが可能になる。これにより分光バイオプシ・イメージング可能な三次元内視鏡が提供できる。

次に同軸・共焦点光学系を導入した超高精度内面形状計測法の成果報告を行う。図7に示すように可変焦点レンズと円錐ミラーの組み合わせから焦点位置を自在に変化させることができるリングビームを生成することができる。



フォーカスされたリングビームの半径：

$$r(c_i) = f(c_i) - l_0$$

- c_i : 可変焦点レンズの制御パラメータ
- $f(c_i)$: 可変焦点レンズの焦点距離
- l_0 : 可変焦点レンズと円錐ミラーの距離

図7 可変焦点型リングビーム

図8に同軸・共焦点型の三次元内視鏡の光学系を示す。今回は光源にHe-Ne laserを用いた。レーザー光はコリメータで平行光とされて、ミラーに照射される偏光子によって光強度を制御し、偏光ビームスプリッタによって9時方向に光を導く焦点可変レンズ(VFL)と円錐ミラーによってリングビームの焦点位置を電流値によって制御することができる。サンプルにあたった光強度をCCDカメラによって撮像する。このとき、CCDカメラの搭載された瞳によって測定する分解能をコントロールできる。今回の実験では、He-Ne laserの出力は3mWとし、電流値を0.03~0.33[A]で制御することでリングビームの内径を40~130[mm]の範囲で制御することが可能になった。

図9に基礎実験の結果を示す。測定サンプルには長さ25mmの紙面を円錐ミラーの中心から47mmの位置に9時の方向に設置した。図9に示すように円錐ミラーを介して得られた光強度分布は電流値に対して特徴ある光強度分布が検出された。光強度分布をみると、電流値が0.23[A]のときに光強度が最も強く帰ってきたことがわかる。これはあらかじめ測定していた焦点可変レンズの特性から58mm離れていることがわかる。この結果は、上記に示した円錐ミラーと紙面の距離47mmに加えて円錐ミラーと焦点可変レンズの距離が12mmであったので47mm+12mm=59mmで測定結果と設置した長さは良く一致していると言える。

本測定の現在の分解能を半径方向と径方向の角度を求めたところ、約2.0mmと約1.6°(1.4mm)が算出された。この実験ではカメラレンズの都合から分解能が低くなっているが、カメラレンズの画角を調整することや制御電流の分解能を向上することで計測される分解能は向上すると期待している。理論上は、半径方向で共焦点の形状計測と同等、半径方向の分解能は0.3°となっている。

第三に産業界の要求から内面形状計測用コンパクトプローブカメラの開発を行った。図10に示しように直径3mmの関節鏡に光ファイバ型のリングビームデバイスを取り付けた構造である。光源には高強度な半導体レーザーを用いている。図の下側に示されているように光ファイバを利用しているので、半導体レーザーのもつ光強度分布のムラがなくなっている。しかしながら、本装置は光ファイバを用いているため、死角が生じてしまう。

図11に本装置を用いて測定した自動車のピストンピン孔の結果を示す。ピストンピン孔の直径は約20mmとなっている。孔の形はほぼ円形であるが、油用の溝が掘られている。本計測装置を使って評価すれば、溝の深さが0.7mmであることが簡単に測定できる。

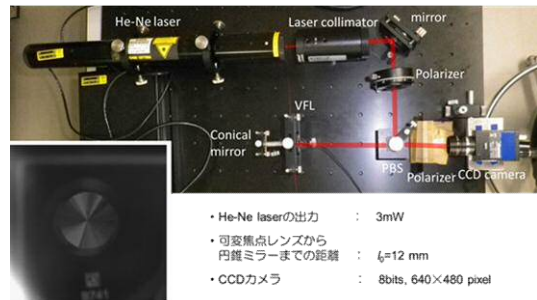


図8 基礎実験光学系

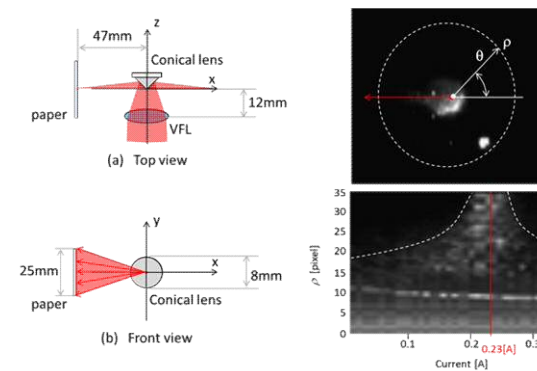


図9 基礎実験の結果

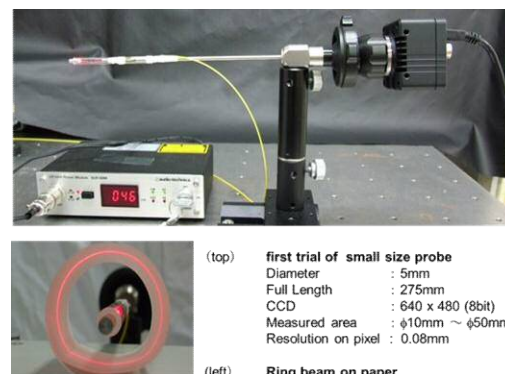


図10 コンパクト三次元内視鏡

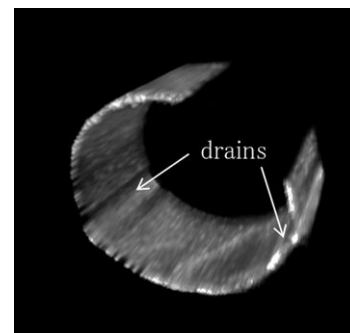


図11 ピストンピン孔の評価

最後に、本研究でキーとなる円錐ミラーや円錐ミラーをアクリルで自作過程で円錐面に特異な偏光分布が形成されることを見出した。この分布はアクリルによるフレネル反射が円錐面上で起こることで軸対称の偏光分布を形成する。これは、つまり、アクロマティック軸対称波長板の開発につながると考えられた。この基礎的な思考から本研究ではアクロマティック軸対称波長板も合わせて研究開発を進めた。

図 12 にアクロマティック軸対称波長板の構造を示す。これはフレネルロム波長板を光軸方向に回転させたすり鉢構造になっている。入射偏光が直線偏光であれば、出射するビームは角度 θ に対して変化する。これはフレネル反射に基づいているので得られる p-s 偏光の位相差は波長に依存性しない。

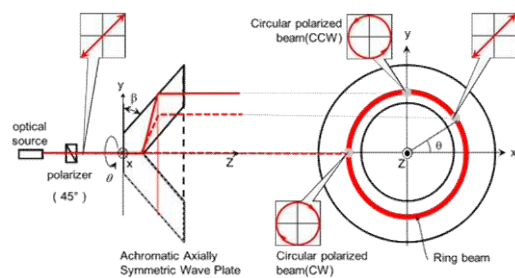


図 12 アクロマティック軸対称波長板

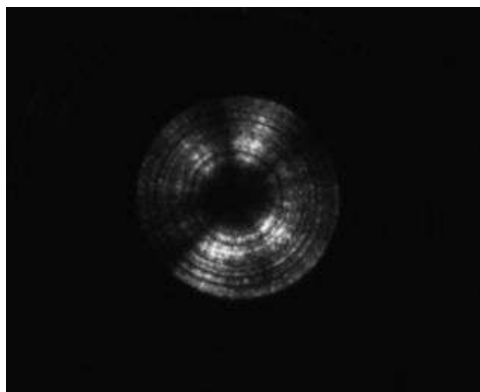


図 13 アクロマティック軸対称波長板

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 4 件)

1. T.Wakayama, K. Komaki, Y. Otani, T.Yoshizawa, "Achromatic Axially Symmetric Wave Plates," Opt. Express, 20, 29260-29265, 2012. 査読有
2. T.Wakayama, K.Machi, T.Yoshizawa, "Small size probe for inner profile measurement of pipes using optical fiber ring beam device," Proc. SPIE, 85630L, 85630L~1-85630L-7, 2012. 査読有

3. T.Wakayama, Y.Otani, T.Yoshizawa, "An interferometric observation of topological effect by novel axially symmetrical wave plate," Proc.SPIE, 849306, 849306~1-849306-8, 2012. 査読有

4. T.Yoshizawa, T.Wakayama, Y.Kamakura, "Development of a probe for inner profile measurement and flaw detection," Proc.SPIE, 81330D, 81330D-1~81330D-6, 2011. 査読有

[学会発表] (計 8 件)

1. 若山俊隆, 吉澤徹, "同軸内面形状計測," 精密工学会春季大会, 2013年3月13日 (東京工業大学, 東京)
2. 若山俊隆, 間地築, 吉澤徹, "光ファイバを導入した内面形状計測用細径プローブ," 光計測シンポジウム, 2012年11月16日 (機械振興会館, 東京)
3. T.Wakayama, K.Machi, T.Yoshizawa, "Small size probe for inner profile measurement of pipes using optical fiber ring beam device," in Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications II of SPIE international conference 2012/11/5 (SanDiego, USA).
4. T.Wakayama, Y.Otani, T.Yoshizawa, "An interferometric observation of topological effect by novel axially symmetrical wave plate," in Interferometry XVI of SPIE international conference 2012/8/12 (SanDiego, USA).
5. 若山俊隆, 大谷幸利, 吉澤徹, "アクロマティック軸対称波長板の開発," 応用物理学会春季大会, 2012年3月17日 (早稲田大学, 東京)
6. 若山俊隆, 吉澤徹, "内面計測用小型三次元プローブの開発(第5報) — 光ファイバ・リングビームプローブの導入 —," 精密工学会春季大会, 2012年3月14日 (首都大学東京, 東京)
7. 齊藤菜都美, 若山俊隆, 吉澤徹, "分光三次元内視鏡に関する研究," 精密工学会春季大会, 2012年3月14日 (首都大学東京, 東京)
8. T.Yoshizawa, T.Wakayama, Y.Kamakura "Development of a probe for inner profile measurement and flaw detection," in Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications of SPIE international conference, 2011/8/29(SanDiego, USA).

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

名称：軸対称偏光変換素子

発明者：若山俊隆，大谷幸利，吉澤徹

権利者：埼玉医科大学，宇都宮大学

種類：特願およびPCT/JP2013

番号：特願2012-025150，PCT/JP2013/52834

出願年月日：24年2月8日，25年2月8日

国内外の別：国内および国外

名称：形状計測装置

発明者：若山俊隆

権利者：埼玉医科大学

種類：特願

番号：特願2013-026271

出願年月日：25年2月14日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若山俊隆 (WAKAYAMA TOSHITAKA)

埼玉医科大学・保健医療学部・准教授

研究者番号：90438862