

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6720183号

(P6720183)

(45) 発行日 令和2年7月8日(2020.7.8)

(24) 登録日 令和2年6月19日(2020.6.19)

(51) Int.Cl.	F I
A 6 1 B 1/00 (2006.01)	A 6 1 B 1/00 5 0 0
G 0 2 F 1/01 (2006.01)	G 0 2 F 1/01 D
A 6 1 B 1/07 (2006.01)	G 0 2 F 1/01 F
A 6 1 B 1/06 (2006.01)	A 6 1 B 1/00 5 1 0
G 0 2 B 23/24 (2006.01)	A 6 1 B 1/07 7 3 0
請求項の数 10 (全 21 頁) 最終頁に続く	

(21) 出願番号	特願2017-533334 (P2017-533334)	(73) 特許権者	506316557
(86) (22) 出願日	平成27年12月17日 (2015.12.17)		サントル ナショナル ドゥ ラ ルシェ
(65) 公表番号	特表2018-502638 (P2018-502638A)		ルシュ シアンティフィック
(43) 公表日	平成30年2月1日 (2018.2.1)		フランス国 7 5 7 9 4 パリ セデック
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/080312		ス 1 6、リュ ミシエル アンジュ
(87) 国際公開番号	W02016/097191		、 3
(87) 国際公開日	平成28年6月23日 (2016.6.23)	(73) 特許権者	512302876
審査請求日	平成30年12月4日 (2018.12.4)		ユニヴェルシテ デクスーマルセイユ
(31) 優先権主張番号	1462809		フランス国、1 3 2 8 4 マルセイユ・セ
(32) 優先日	平成26年12月18日 (2014.12.18)		デックス 0 7、ブルヴァール・シャル
(33) 優先権主張国・地域又は機関	フランス (FR)	(74) 代理人	110000176
			一色国際特許業務法人
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 レンズなし内視鏡イメージング向けの、光パルスの搬送・制御用装置、および内視鏡イメージングシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レンズなし内視鏡イメージング向けの、装置少なくとも1つの第1波長を有する光パルスの搬送・制御用装置であって、

所定のパターンで配置されたN本のシングルモード光ファイバー (F_i) の束 (40) と、

群速度制御用光学装置 (50) とを備え、

前記N本のシングルモード光ファイバー (F_i) の前記束 (40) は、パルス (I_0) よりなる光ビームを近位端で受光し、光ビームを遠位端で発するよう構成されており、

前記N本のシングルモード光ファイバー (F_0) のそれぞれについて、前記ファイバー束 (40) の基準用シングルモード光ファイバー (F_0) 内を伝搬するパルスの伝播時間に対する相対群遅延値 ($\Delta \times_i$) が定められており、

前記群速度制御用光学装置 (50) は、前記光ファイバー束の近位側に設けられており、

前記群速度制御用光学装置 (50) は、

複数であるM個の波長板 (P_j) と、

第1空間光変調器 (51) と、

第2空間光変調器 (52) と、

位相制御装置とを備え、

前記M個の波長板 (P_j) の各波長板は、所定の遅延 (δt_j) を生じさせるように構成されており、

前記第1空間光変調器 (51) は、光源より放出された1又は複数の入射光ビームから、光学パルスを備えた複数であるN本の基本光ビーム (B_i) を形成するように構成されており、

各基本光ビーム (B_i) は、動作中に、前記M個の波長板のうちの波長板 (P_j) を通過して前記光ファイバーの1つに、前記一つの波長板により導入された遅延 (δt_j) と、前記光ファイバー (F_i) の相対群遅延 (Δx_i) との合計 ($\delta t_j + \Delta x_i$) の絶対値が最小となるように入射し、

前記第2空間光変調器 (52) は、前記N本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれ10
の方向を、当該基本光ビーム (B_i) が対応する光ファイバーの入口面に垂直に当該光ファイバー (F_i) を貫通するように変化させるためのものであり、

前記位相制御装置は、前記空間光変調器 (51、52) の一方、又は、他方、又は、その両方をプログラミングする手段を備え、当該プログラミングする手段は、前記ファイバー束 (40) の遠位端で所定の位相関数を適用することができ、又は、前記ファイバー束 (40) のファイバーのそれぞれが生じる位相変化を補正することができ、又は、その両方を行うことができるように構成されていることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項2】

請求項1に記載の光パルスの搬送・制御用装置であって、

前記群速度制御用光学装置 (50) は、中間焦点面 (Σ_1) とともに光学配置を構成する第1レンズ (53) と第2レンズ (54) とを備え、

前記波長板 (P_j) は、前記光学配置の前記中間焦点面 (Σ_1) に設けられており、

前記第1空間光変調器 (51) は、前記第1レンズ (53) の対物焦点面に位置しており、

前記第2空間光変調器 (52) は、前記第2レンズ (54) の像焦点面に位置していることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項3】

請求項1に記載の光パルスの搬送・制御用装置であって、

前記群速度制御用光学装置 (50) は、レンズ (58) を備え、

前記波長板は、前記第1空間光変調器 (51) の上流に位置する平面に設けられており、且つ、パルス (I_0) よりなる入射ビームから、M本の光ビームを形成するように適合されており、

前記M本の光ビームはそれぞれ、所定の群遅延 (δt_j) で特徴づけられるパルスにより構成されており、

前記第1空間光変調器 (51) は、前記レンズ (58) の対物焦点面に配置されて、且つ、前記M本の光ビームを受光するように意図されており、

前記第2空間光変調器 (52) は、前記レンズ (58) の像焦点面に位置していることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項4】

請求項3に記載の光パルスの搬送・制御用装置であって、

前記第1空間光変調器 (51) は、M個のホログラム領域より構成され、

前記ホログラム領域のそれぞれは、所定の群遅延 (δt_j) で特徴づけられるパルスよりなる前記光ビームの1本を受光するように意図されていることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項5】

請求項1～4のいずれか1項に記載の光パルスの搬送・制御用装置であって、

前記N本のシングルモード光ファイバー (F_i) の前記束は、マルチコアファイバーよりなることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項6】

10

20

30

40

50

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の光パルスの搬送・制御用装置であって、
前記 N 本のシングルモード光ファイバーは、不規則な態様に配置されていることを特徴とする光パルスの搬送・制御用装置。

【請求項 7】

内視鏡イメージングシステムであって、

光パルスの光源 (1 0) と、

請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の、前記光源が発した前記パルスの搬送・制御用装置と、

シングルモード光ファイバー束 (4 0) をその遠位端から近位端へ通過するように意図された光の検出用光路 (2 0 、 2 1) と

を備えることを特徴とする内視鏡イメージングシステム。

【請求項 8】

所定のパターンで配置されたシングルモード光ファイバー束 (4 0) を用いた非線形レンズなし内視鏡イメージング方法 (ただし、ヒトを対象とする場合を除く) であって、

各シングルモード光ファイバーのそれぞれについて、前記ファイバー束 (4 0) の基準用シングルモード光ファイバー (F_0) 内を伝搬するパルスの伝播時間に対する相対群遅延値 ($\Delta \times_i$) が定められており、

当該方法は、

光源を用いて、中間焦点面 (Σ_1) を有する光学配置を第 2 レンズ (5 4) とともに形成する第 1 レンズ (5 3) の対物焦点面に配置された第 1 空間光変調器 (5 1) に向けて、少なくとも 1 つの波長を有するパルス (I_0) を備える入射ビームを発する工程と、

前記第 1 空間光変調器 (5 1) を用いて、前記入射光ビームから、複数である N 本の基本光ビーム (B_i) を生成する工程であって、前記 N 本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれは、所定の遅延 (δt_j) を導入するように構成されて前記光学配置の前記中間焦点面 (Σ_1) に配置されている所定の波長板を通過し、前記波長板 (P_j) により導入された前記遅延 (δt_j) と、前記光ファイバー (F_i) の相対群遅延 ($\Delta \times_i$) との合計 ($\delta t_j + \Delta \times_i$) の絶対値が最小となるように前記光ファイバーのうちの一本に入る工程と

、
前記 N 本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれが、対応する光ファイバー (F_i) の入口面に垂直に、当該光ファイバー (F_i) を貫通するよう、各基本光ビーム (B_i) の前記第 2 レンズ (5 4) の像焦点面に配置された第 2 空間光変調器 (5 2) を用いて前記 N 本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれの方向を変化させる工程と、

前記ファイバー束 (4 0) の遠位端で所定の位相関数を適用するために、又は、前記ファイバー束 (4 0) のファイバーのそれぞれが生じる位相変化を補正するために、又は、その両方を行うために、前記第 1 及び第 2 空間光変調器 (5 1 、 5 2) の一方、又は、他方を用いて、前記 N 本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれに、位相の変化を与える工程とを含むことを特徴とする非線形レンズなし内視鏡イメージング方法。

【請求項 9】

所定のパターンで配置されたシングルモード光ファイバー束 (4 0) を用いた非線形レンズなし内視鏡イメージング方法 (ただし、ヒトを対象とする場合を除く) であって、

各シングルモード光ファイバーのそれぞれについて、前記ファイバー束 (4 0) の基準用シングルモード光ファイバー (F_0) 内を伝搬するパルスの伝播時間に対して定められる相対群遅延値 ($\Delta \times_i$) が定められており、

当該方法は、

光源を用いて、少なくとも 1 つの波長を有するパルス (I_0) よりなる入射ビームを発し、複数である M 個の波長板 (P_j) を用いて、前記入射ビームから、複数である M 本の光ビームを生成する工程であって、前記 M 個の波長板のそれぞれは、所定の遅延 (δt_j) を導入し、前記 M 本の光ビームはそれぞれ所定の群遅延 (δt_j) で特徴づけられるパルスより構成される工程と、

第 1 レンズ (5 8) の対物焦点面内に配置された第 1 空間光変調器 (5 1) を用いて

10

20

30

40

50

、前記M本の光ビームから、複数であるN本の基本光ビーム (B_i) を形成する工程であって、各基本光ビーム (B_i) は、前記基本光ビーム (B_i) を生成する光ビームの遅延 (δt_j) と、前記基本光ビーム (B_i) の相対群遅延 (Δx_i) との合計 ($\delta t_j + \Delta x_i$) の絶対値が最小となるように、前記光ファイバー (F_i) の1つに入射するよう意図されている工程と、

前記N本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれが、対応する光ファイバー (F_i) の入口面に垂直に、当該光ファイバー (F_i) を貫通するように、前記レンズ (58) の像焦点面内に配置された第2空間光変調器 (52) を用いて、前記N本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれの方向を変化させる工程と、

前記ファイバー束 (40) の遠位端で所定の位相関数を適用するために、又は、前記ファイバー束 (40) のファイバーのそれぞれが生じる位相変化を補正するために、又は、その両方を行うために、前記第1及び第2空間光変調器 (51、52) の一方、又は、他方を用いて、前記N本の基本光ビーム (B_i) のそれぞれに、位相の変化を与える工程とを含むことを特徴とする非線形レンズなし内視鏡イメージング方法。

【請求項10】

請求項8又は9に記載の非線形レンズなし内視鏡イメージング方法であって、

少なくとも2つの入射光ビームを発する工程を含み、

前記入射光ビームはそれぞれ、波長が異なるパルスより構成され、

前記第1空間光変調器 (51) は、さらに、所定の波長を有するパルスよりなる前記基本光ビームを、ファイバー束 (40) のファイバーのサブセットに分散させることができることを特徴とする非線形レンズなし内視鏡イメージング方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、所謂「レンズなし」内視鏡イメージング向けの、光パルス搬送・制御用装置に関する。さらに、レンズなし内視鏡イメージングのシステム及び方法にも関しており、特に、非線形イメージングに関する。特に、人間又は動物等の生物内の器官の内視鏡検査に対し適用される。

【背景技術】

【0002】

内視鏡イメージングの開発・発展においては、自由空間用のイメージングシステムと比較して、特別な特徴を有する光学機械ファイバー装置の使用が必要とされる。

【0003】

まず、医療用内視鏡の遠位端 (即ち、試料がある側の、ファイバーの一端) に、光源と、焦点のあるレンズ (optique de focalisation) と、カメラとを備える小型顕微鏡を設計することは、部品が高張るため実現不可能である。そのため、遠位端での内視鏡のサイズを制限しながら、光ファイバーの先端でイメージングを実現可能な解決策が求められている。

【0004】

一方、内視鏡用の非線形イメージングに対する関心の高まりにより、ファイバーシステムとの互換性が必ずしもあるわけではないが、光強度の強い光パルスを使用可能なものが必要とされている。非線形イメージングの技術のなかには、例えば、2光子励起蛍光 (TPEF) などがある。このイメージング技術については、特に、内視鏡での利用に関心が集まっている。なぜなら、光と物質の相互作用が焦点に制限され、従って焦点の外側で生じる背景信号がなく、そのため3次元空間分解能が光学断面を得られるレベルになるからである。TPEFイメージングでは、さらに、生体組織等の散乱媒体へより深く貫通する近赤外波長の励起レーザーを用いることができる。その他の非線形過程も、内視鏡でさらなる情報を得るには有用であるだろう。例として、3光子励起蛍光 (Three-Photon Excited Fluorescence (3PEF))、第2高調波発生 (SHG)、第3高調波発生 (THG)、コヒーレント反ストークス・ラマン散乱 (Coh

10

20

30

40

50

erent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS))、誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering (SRS)) などが挙げられる。

【0005】

内視鏡の遠位端での全体のサイズを制限しつつ光ファイバーの先端でのイメージングを可能にする手法は数多くあり、これらの技術は、多かれ少なかれ非線形イメージングに適合されている。

【0006】

第一の手法 (Rivera ら, 「 Compact and flexible raster scanning multiphoton endoscope capable of imaging unstained tissue », Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 108, 17598 (2011) 等に記載) は、シングルモード光ファイバーの遠位部を圧電くさび等を用いて振動させることを含み、この光ファイバーの先端はマイクロレンズを用いて試料内でイメージングを行う。この光ファイバーにより、光を該試料に照射し、該試料から来る信号を回収することが可能となる。この信号は、反射、蛍光、該試料内での非線形相互作用等により生じるものである。但し、ファイバーの先端に圧電方式のスキャナがあることにより、内視鏡の遠位部の小型化可能な直径 (通常は、3 mm のオーダー) 未満に制限される上に、光軸に沿ってイメージング平面を制御することが難しい。最終的には、この手法は、超短パルス (通常は1ピコ秒未満) を使用する必要がある非線形イメージングに限られることになる。実際、標準的な光ファイバーには前もって補償することが難しい強い分散があり、非線形効果を受けてしまうことになる。これは、ファイバーの先端に伝搬される光パルスの空間的及び時間的なプロファイルに影響を与える。

【0007】

光ファイバー束 (ファイバー30000本まで包含可能) を用いることと、及び、近位端に配置されたスキャナによりファイバーを1本ずつ照射することは、一般的な手法である (例えば、Knittel ら, 「 Endoscope-compatible confocal microscope using a gradient index-lens system », Opt. Commun. 188, 267 (2001) 参照)。遠位部に位置するマイクロレンズにより、これらの光ファイバーは試料内でイメージングを行い、ファイバー束の光ファイバー群を順次スキャンすることにより、共焦点顕微鏡と同じ方法で画像を得ることができる。但し、前述の手法と同様に、全ての光は1本の光ファイバーのコア内を循環するが、ファイバー束の光ファイバー群に固有の非線形効果のため、最大ピーク出力は制限される。そのため、超短パルスを必要とし、従って高ピーク出力を必要とする非線形イメージングを実施することは困難である。

【0008】

第三の手法は、所謂「レンズなし内視鏡法」であり、Cizmar らの「 Exploiting multimode waveguides for pure fibre-based imaging », Nat. Commun. 3, 1027 (2012) 等に記載されている。この手法は、マルチモード光ファイバー即ちMMFの使用に基づいている。MMF光ファイバーは、コヒーレント光源により照射される。MMFファイバーの近位側 (つまり、試料の反対側である光ファイバーの入口) では、空間波面変調器 (「 Spatial Light Modulator (SLM) 」) が該ファイバーの伝搬モードを操作することを可能にし、これらの伝搬モードのコヒーレント加算により、MMFファイバーの先端にどのような強度パターンでも形成することが可能となるようにする。ある実施形態では、共焦点顕微鏡の古典的な配置で得られる画像を得るために、MMFファイバーの先端に焦点を形成することと、試料をスキャンすることを試みている。この技術は、ファイバーの近位部における入口の場を遠位部における出口の場に関連づける (逆向きの関連づけも含む) ファイバーの伝送行列の確定的な性質のために非常に強力である。この技術により、マルチモードファイバーの遠位側でいかなるレンズもなしでイメー

10

20

30

40

50

ジングすることが可能となり、よって全体のサイズを縮小できる。但し、ファイバーの伝送行列は複雑であり、MMF光ファイバーの曲率に強く依存する。このように、MMF光ファイバーによる内視鏡イメージングは、ファイバーのあらゆる動きに対し感受性が非常に高い。さらに、マルチモードの性質のため、近位部で短パルスであっても遠位部では非常に長くなってしまい、非線形イメージングへの応用範囲は限られてしまう。

【0009】

マルチモードファイバーを使用する技術と並行して、「レンズなし」方式の別の技術即ちシングルモード光ファイバー束を使用する技術も開発されている（例えば、Frenchら、米国特許8585587号参照）。この技術によれば、シングルモード光ファイバー束の近位側に配置された空間波面変調器（SLM）により、光源が発した波面を、ファイバー束の遠位端で制御することができる。モードが1つしかないのでシングルモード光ファイバー内でモード分散がなく、また、マルチモードファイバーの場合と比べて、波長全域に亘る波長分散の効果を補償可能である。そのため、シングルモード光ファイバー束を使用することにより、短パルスを伝搬することができる。さらに、光エネルギーが全てのファイバーに分配される可能性があるので、高強度パルスの伝搬が可能となる。これにより、非線形内視鏡イメージングへの道が開かれた。

【0010】

様々な文献に、シングルモード光ファイバー束に基づくレンズなし内視鏡法の変形例、特に、マルチコアファイバー（MCF）に基づくものが開示されてきた。例として、電流測定装置を用いてSLMの入口で様々な波面角度を付与することにより、光ファイバー束の遠位部での焦点の超高速スキャンを実現する方法が挙げられる。（例えば、E. R. Andresenら「Toward endoscopes with no distal optics: video-rate scanning microscopy through a fiber bundle」, Opt. Lett. Vol. 38, No. 5 (2013) 参照）。E. R. Andresenらによる以下の記事「Two-photon lensless endoscope」, Opt. Express 21, 20713 (2013) では、レンズなし内視鏡法における2光子非線形イメージングシステム（TPEF）の実験における実現可能性を、著者らは開示している。

【0011】

図1Aは、従来技術に記載されているレンズなし内視鏡イメージングシステム100を概略的に示している。このイメージングシステム100は、特に非線形イメージングにおいて利用され、非線形イメージングに適用される場合は、通常は、パルス I_0 よりなる入射ビームを発するための発光源10を備える。さらに、このシステム100は、レンズ21と検出器20とを有する検出用光路を備える。検出用光路は、分離板22により照射用光路から分離されている。前記イメージングシステム100は、パルス I_0 を搬送・制御する装置も備え、この装置は離れた分析対象物101を照射することができる。また、この搬送・制御用装置は、シングルモード光ファイバー束40と、空間波面変調器（「SLM」）30を備える。シングルモード光ファイバー束40の入口面41と出口面42は、図1Aに拡大して示されている。空間波面変調器30は、前記ファイバー束40の近位端に配置されており、光源10が発したビームの波面を制御することができる。ファイバー束40の光ファイバー F_i に入射するよう意図された基本ビーム B_i それぞれに対して、空間光変調器は、位相関数 ϕ_0 の入射波面上で、所定の位相の変化 $\phi_1(i)$ を付与することができる。この位相関数 $\phi_1(i)$ は、例えば、光ファイバー束内を伝搬した後、波が放物線状の位相 $\phi_2(i)$ で出ていくようになっている。この放物線状の位相により、物理的なレンズが存在しなくても、ビームを遠位側で分析対象物101上に結像することが可能となる。つまり、「レンズなし内視鏡」が実現できる。さらに、空間光変調器は、各光ファイバー F_i がもたらすずれを補償することができる。

【0012】

但し、本出願人は、非線形イメージングモード、例えば、超短パルス（通常は、パルス幅が1ピコ秒未満のパルス）をシングルモード光ファイバー束に入射した場合において、

10

20

30

40

50

異なる光ファイバー内を伝播するこれらのパルスの群遅延により、試料上で光強度の損失を生じる可能性があることを示した。前述のファイバー束の遠位端における、パルスよりなる基本光ビーム B_i を表す電磁場 $E^{(i)}(t)$ は、以下の形式で表される。

$$E^{(i)}(t) = \varepsilon(t - \Delta x(i))e^{i\phi(i)}$$

【0013】

ここでは、 $\varepsilon(t) = E^{(0)}(t)$ は、基準となるファイバー F_0 内を伝搬する基本光ビーム B_0 を表す電磁場である。 $\phi(i)$ は、位相に関する項である。 $\Delta x(i)$ は、基準ファイバー F_0 内での基本光ビーム B_0 の伝播時間に対して定義される相対群遅延である。

【0014】

入射ビームを搬送・制御する装置のみが記載されている図1Bに示すように、基本光ビーム B_i を構成するパルスの群速度 $X_1(i)$ は、空間光変調器30からの出口において、且つ、ファイバー束40の各光ファイバー F_i への入射時において、一定である。言い換えると、相対群遅延は、ゼロ、又は、ほぼゼロである。一方、ファイバー束からの遠位出口では、関数 $X_2(i)$ で表される異なる基本光ビームにおいて群速度が異なり、相対群遅延 $\Delta x(i)$ がゼロではなくなることが観察される。これらの群遅延は、各シングルモード光ファイバー F_i によりもたらされるが、これは、ファイバーの製造過程において避けられない固有の不均一性から生じ、また、ファイバーの変形、移動、又は、その両方による応力で生じる不均一性からも生じる。この結果、ファイバー束40からの遠位出口では、分析対象物101上に結像したパルスが時間的に広がってしまい、これによりピークの光強度の減少が生じ、その結果、非線形過程により発生した信号が減少する。

【0015】

本発明は、ファイバー束のシングルモード光ファイバーにおける、パルスの群速度遅延を制御可能な、所謂「レンズなし」内視鏡イメージングシステムでの光パルスの搬送・制御用装置及び方法を提案する。本明細書に記載の装置及び方法は、ファイバー束の遠位端でのパルスのパルス幅の制御を可能にし、よって、超短パルス（通常は1ピコ秒未満）の伝送を必要とする非線形イメージングでの利用を実現する。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

第1の態様によれば、1又は複数の実施形態は、レンズなし内視鏡イメージング向けの、少なくとも1つの波長を有する光パルスの搬送・制御用装置に関する。前記装置は、所定のパターンで配置されたN本のシングルモード光ファイバーの束を備える。また、前記装置は、パルスよりなる光ビームを近位端で受光することと、光ビームを遠位端で発することとを意図している。各シングルモード光ファイバーは、前記ファイバー束の基準用シングルモード光ファイバー内を伝搬するパルスの伝播時間に対して定められる相対群遅延値で特徴づけられる。

【0017】

光パルスの搬送・制御用装置は、さらに、群速度制御用光学装置を備える。または、より正確には、前記光ファイバー束の近位端に配置された群遅延制御用光学装置を備える。前記光学装置は、所定数M個の波長板と、第1空間光変調器と、第2空間光変調器とを備える。

前記所定数M個の波長板の各波長板は、所定の遅延を生じることができる。

前記第1空間光変調器は、1又は複数の入射光ビームからN本の基本光ビームを形成するためのものである。各基本光ビーム (B_i) は、動作中に、前記M個の波長板のうちの波長板 (P_i) を通過して前記光ファイバーの1つに、前記一つの波長板により導入された遅延 (δt_j) と、前記光ファイバー (F_i) の相対群遅延 (Δx_i) との合計 ($\delta t_j + \Delta x_i$) の絶対値が最小となるように入射する。

前記第2空間光変調器は、前記N本の基本光ビームそれぞれの方向を、当該基本光ビームが対応するファイバーの入口面に垂直に当該光ファイバーを貫通するように変化させる

10

20

30

40

50

ためのものである。

【0018】

N本のシングルモード光ファイバーの束は、シングルモード光ファイバーの集まりから構成することができ、通常は、規則的な態様が不規則な態様かを問わずファイバー束の形式に集められた数万～10万本のファイバーにより構成される。又は、シングルモードコアの組を有するマルチコアファイバーから構成してもよく、規則的な態様が不規則な態様いずれかに配置された少なくとも100本のシングルモードコアであることが好ましい。

【0019】

シングルモード光ファイバーの集まりを束にしたもの、又は、マルチコアファイバーのいずれであっても、本発明の目的は、カップリング(coupling)が可能な限り最小であるシングルモード光ファイバー束とすることであり、-20dB/m未満であれば有利である。

【0020】

前記M個の波長板は、好ましくは、ある平面内に分散して配置されている。また、前記ある数M個の波長板の個数は、1個～数10個の間の数にすることができ、2個～20個の範囲にあることが好ましい。但し、いかなる場合においても、前記ファイバー束の前記ある数N本のシングルモード光ファイバーよりもかなり少なくなければならない。

【0021】

このように、本明細書による搬送・制御用装置は、使用しているファイバー束によらず、且つ、ファイバー束が移動又は変形している場合であっても、ファイバー内のパルスの群遅延よりなる一群の値における標準偏差を最小化することができる。これは、前記ファイバー束の各ファイバーを通過するように意図された各基本光ビームを形成し、かつ、基本光ビームがそれぞれ適切な波長板を通過するようにそれぞれの変位を制御するように、各空間光変調器に簡易なプログラミングを施すことで可能となる。

【0022】

さらに、本明細書による前記搬送・制御用装置では、前記空間光変調器の一方、又は、他方、又は、その両方をプログラミングすることにより、前記基本光ビームそれぞれに位相の変化を与えることが可能となる。これにより、前記ファイバー束の遠位端で所定の位相関数を適用することができ、又は、前記ファイバー束の前記ファイバーのそれぞれが生じる位相変化を補正することができ、又は、その両方を行うことができる。

【0023】

さらに、本明細書に従う前記搬送・制御用装置では、波長が異なるパルスよりなるビームを搬送し制御することが可能となる。これは、パルスよりなる基本光ビームを、異なる波長で、前記ファイバー束の異なるファイバーのサブセットに確実に分散させるように、前記第1空間光変調器をプログラミングすることにより実現される。

【0024】

前記空間光変調器は、膜又は変形可能なセグメントミラー(反射により動作する)、又は、反射又は透過により動作する液晶マトリクス、これらのいずれかを備えてもよい。

【0025】

このように、前記群速度制御用光学装置は、反射又は透過のいずれか又はその両方により動作する構成要素を備えてもよい。但し、空間光変調器の技術では、反射を利用する配置のほうが選択肢が多い点で優位性はある。

【0026】

1又は複数の実施形態によれば、前記群速度制御用光学装置は、中間焦点面とともに光学配置を構成する第1レンズ及び第2レンズを備える。前記波長板は、前記光学配置の前記中間焦点面に設けられる。前記第1空間光変調器は、前記第1レンズの対物焦点面に位置している。前記第2空間光変調器は、前記第2レンズの像焦点面に位置している。

【0027】

1又は複数の実施形態によれば、前記群速度制御用光学装置は、レンズを備える。前記波長板は、前記第1空間光変調器の上流に位置する平面に設けられ、且つ、パルスよりな

10

20

30

40

50

る入射ビームからM本の光ビームを形成するように適合されている。前記M本の光ビームはそれぞれ、所定の群遅延で特徴づけられるパルスにより構成されている。前記第1空間光変調器は、前記レンズの対物焦点面に配置されており、且つ、前記M本の光ビームを受光するように意図されている。前記第2空間光変調器は、前記レンズの像焦点面に位置している。

【0028】

例えば、前記第1空間光変調器は、M個の領域より構成され、これらの領域上には、コンピュータで生成された複数のホログラムが形成される。前記複数のホログラムはそれぞれ、所定の群遅延で特徴づけられるパルスよりなる前記光ビームの1本を受光するように意図されている。

10

【0029】

第2の態様によれば、1又は複数の実施形態は内視鏡イメージングシステムに関し、この内視鏡イメージングシステムは、光パルスの光源と、前記第1の態様による前記光源が発した前記パルスを搬送し制御する装置と、前記シングルモード光ファイバー束をその遠位端から近位端へ通過するよう意図された光の検出用光路とを備える。

【0030】

1又は複数の実施形態によれば、光パルスの光源は、1ピコ秒未満のパルス幅で発するレーザー光源であり、100フェムト秒から1ピコ秒の範囲のパルス幅であれば優位性を有する。

【0031】

20

第3の態様によれば、1又は複数の実施形態は、所定のパターンで配置されたシングルモード光ファイバー束を用いた、非線形レンズなし内視鏡イメージング方法に関する。前記シングルモード光ファイバーはそれぞれ、前記ファイバー束の基準用シングルモード光ファイバー内を伝搬するパルスの伝播時間に対して定められる相対群遅延で特徴づけられている。

前記非線形レンズなし内視鏡イメージング方法は、

中間焦点面を有する光学配置を第2レンズとともに形成する第1レンズの対物焦点面に配置された第1空間光変調器により、所定の波長を有するパルスよりなる少なくとも1つの入射ビームを発する工程と、

前記第1空間光変調器において、前記入射光ビームから、前記光ファイバーの1つに入射するように意図されたN本の基本光ビームを形成する工程であって、各基本光ビームは、所定の遅延(δt_j)を導入するよう構成されて前記光学配置の前記中間焦点面(Σ_1)に配置されている所定の波長板を通過し、前記波長板(P_j)により導入された前記遅延(δt_j)と、前記光ファイバー(F_i)の相対群遅延(Δx_i)との合計($\delta t_j + \Delta x_i$)の絶対値が最小となるように前記光ファイバーのうちの一本に入る工程と、

30

前記N本の基本光ビームのそれぞれが、対応する光ファイバーの入口面に垂直に、当該光ファイバーを貫通するように、前記第2レンズの像焦点面に配置された第2空間光変調器を用いて、当該基本光ビームの方向を変化させる工程とを含む。

【0032】

第4の態様によれば、1又は複数の実施形態は、所定のパターンで配置されたシングルモード光ファイバー束を用いた、非線形レンズなし内視鏡イメージング方法に関する。前記シングルモード光ファイバーはそれぞれ、前記ファイバー束の基準用シングルモード光ファイバー内を伝搬するパルスの伝播時間に対して定められる相対群遅延で特徴づけられている。前記非線形レンズなし内視鏡イメージング方法は、

40

所定の波長を有するパルスよりなる少なくとも1つの入射ビームを発し、波長板を用いて、前記入射ビームから、ある数M本の光ビームを形成する工程であって、前記M本の光ビームはそれぞれ、所定の群遅延で特徴づけられるパルスより構成される工程と、

第1レンズの対物焦点面内に配置された第1空間光変調器を用いて、前記M本の光ビームから、N本の基本光ビームを形成する工程であって、各基本光ビームは、当該基本光ビームを構成する光ビームの遅延と、前記基本光ビームを受光するように意図された当該光

50

ファイバーの相対群遅延との合計の絶対値が最小となるように、前記光ファイバー（ F_i ）の1つに入射するよう意図されている工程と、

前記N本の基本光ビームのそれぞれが、対応する光ファイバーの入口面に垂直に、当該光ファイバーを貫通するように、レンズの像焦点面内に配置された第2空間光変調器を用いて、当該基本光ビームの方向を変化させる工程とを含む。

【0033】

好ましくは、前記ファイバー束の前記シングルモード光ファイバーの前記相対群遅延は、入射光ビームを構成するパルスの波長で特徴付けられる。

【0034】

1又は複数の実施形態によれば、前記空間光変調器の一方、又は、他方、又は、その両方により、前記基本光ビームのそれぞれに位相の変化を与えることが可能となる。これにより、前記ファイバー束の遠位端で所定の位相関数を適用することができ、又は、前記ファイバー束のファイバーのそれぞれが生じる位相変化を補正することができ、又は、その両方を行うことができる。

【0035】

1又は複数の実施形態によれば、特に、波長が異なるパルスが相互作用する非線形イメージングにおいて利用する場合では、前記方法は、異なる波長のパルスよりなる入射光ビームを発する工程を含む。このような例示的な実施例において、前記第1空間光変調器は、さらに、基本光ビームを、前記ファイバー束のファイバーの特定の異なるサブセットに分散させることができる。ファイバーの前記サブセットはそれぞれ、所定の波長のパルスよりなる光ビームを受光するよう意図されている。

【0036】

本明細書に記載する非線形内視鏡イメージング方法は、あらゆる種類の非線形イメージングに応用することができ、特に、2光子蛍光及び自家蛍光の発生、 n 光子蛍光及び自家蛍光の発生、第2高調波発生、第3高調波発生、 n 次高調波発生、和周波発生、差周波発生、コヒーレントラマン信号の発生、過渡吸収信号の発生、屈折率過渡変動に応用することができる。

添付図面を参照して、例示のみのために示され限定されない次の説明を読むことにより、本発明がさらに十分に理解され、他の利点及び実施形態が明らかになる。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1A】シングルモードファイバー束を使用した、所謂「レンズなし」内視鏡の概略図である（既出）。

【図1B】超短パルスの場合の、ファイバーにおける群遅延の問題を説明する図である（既出）。

【図2A】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【図2B】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【図3A】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージング方法の実施における、マルチコア光ファイバーの一例とその特徴を示す図である。

【図3B】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージング方法の実施における、マルチコア光ファイバーの一例とその特徴を示す図である。

【図3C】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージング方法の実施における、マルチコア光ファイバーの一例とその特徴を示す図である。

【図3D】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージング方法の実施における、マルチコア光ファイバーの一例とその特徴を示す図である。

【図4】本明細書に従うレンズなし内視鏡イメージング方法を実施するための波長板の一例を示す図である。

【図5】図5Aは、図3Aに示すマルチコアファイバーにおける群遅延分散を説明する図

10

20

30

40

50

であり、本明細書に従う内視鏡イメージング方法を実施する前のものである。図 5 B は、図 3 A に示すマルチコアファイバーにおける群遅延分散を説明する図であり、本明細書に従う内視鏡イメージング方法を実施した後のものである。

【図 6】本明細書に従う内視鏡イメージング方法を用いた場合と用いない場合における、図 3 A に示すマルチコアファイバーの出口において、焦点の空間的な現れ方を比較した主たる実験結果である。

【図 7】本明細書の別の例に従う「レンズなし」内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【図 8 A】本明細書の別の例に従う「レンズなし」内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

10

【図 8 B】本明細書の別の例に従う「レンズなし」内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【図 9】シングルモードファイバーの束における群遅延を遠位測定する方法を示す。

【図 10】シングルモードファイバーの束における群遅延を近位測定する方法を示す。

【発明を実施するための形態】

【0038】

これらの図においては、同一の要素には同一の参照符号を付すものとする。

【0039】

図 2 A 及び図 2 B は、本明細書に従う「レンズなし」内視鏡イメージングシステム 200 の概略と、その実施における原理とを示す。

20

【0040】

このシステム 200 は、通常は、照射用光路と検出用光路とを備える。照射用光路は、超短光パルス I_0 を発する光源 10 を含む。この超短光パルス I_0 は、通常は 1 ピコ秒未満であり、例えば 100 フェムト秒から 1 ピコ秒の間の長さを有する。また、検出用光路は、シングルモード光ファイバー束 40 の遠位端から近位端へ通過するように意図された光を検出するよう適合されている。検出された光は、例えば、励起後の試料内での非線形過程で生じた光である。検出用光路は、レンズ 21 と検出器 20 とを備え、分離板 22 により照射用光路から分離されている。この分離板 22 には、検出波長（例えば、2 光子蛍光）が照射波長と異なる非線形イメージング用途の場合は、ダイクロイックプレート等が用いられる。

30

【0041】

システム 200 は、光パルスの搬送・制御用装置も備える。本明細書によれば、光パルス搬送・制御用装置は、群速度を制御する光学装置 50 又は群遅延制御（Group Delay Control (GDC)）装置のいずれかと、N 本のシングルモード光ファイバー F_i の束 40 とを備える。さらに、好ましくは、光パルス搬送・制御用装置は、テレスコープ式の光学システム 60 を備えこの光学システム 60 は、群速度制御用光学装置 50 から来たビームの寸法を、前記ファイバー束 40 の入口面 41 に合わせることができ。図 2 A の例では、検出用光路は、光源 10 と群遅延制御装置 50 との間に存在する。なお、検出用光路は、群遅延制御装置 50 とファイバー束 40 との間に存在してもよく、例えば、群遅延制御装置 50 とテレスコープ 60 との間に存在してもよい。

40

【0042】

ファイバー束 40 のうちの N 本のシングルモード光ファイバー F_i は、所定のパターンに配置される。図 2 A 及び図 2 B に示す例では、これらのシングルモード光ファイバー F_i は規則的な態様に配置されており、各ファイバー F_i は、例えば、マルチコアファイバー（Multi Core Fiber (MCF)）のコアを構成する。光ファイバー束 40 は、近位側即ち入射光束を受けることを意図した側に位置する入口面 41 と、遠位側即ち分析対象物 101 を照射するために出射される光ビームを発することを意図した側に位置する出口面 42 とを有する。

【0043】

ファイバー束の各光ファイバー F_i は相対的な群遅延 Δx_i で特徴づけられ、この群遅

50

延 Δx_i は、ある光パルスよりなる基本光ビーム B_i が当該ファイバー F_i を通過するのにかかる時間と、同じ光パルスよりなる基本光ビームが、ファイバー束内のファイバーから任意に選んだ基準ファイバー F_0 を通過するのにかかる時間との差により定義される。相対群遅延 Δx_i は、複数の光ファイバー F_i 内を伝搬する光パルスの相対遅延を表す。相対群遅延の特徴は、既知の特徴付け方法により実現可能であり、そのさらなる詳細は以下に記載する。

【0044】

本明細書による装置、図2Bに一般的な態様を示す群速度制御用光学装置(50)は、シングルモード光ファイバー束40の近位端に設けられており、また、異なる基本光ビーム B_i 同士の間の相対距離が光ファイバー束の遠位端において減少するように設計されている。このように、本明細書による群速度制御用光学装置50は、ファイバー束40のシングルモード光ファイバー F_i 内に入射するよう意図された基本光ビーム B_i のそれぞれの領域において、装置群遅延を生じるように適合されている。この群遅延は、ファイバー F_i を特徴付ける群遅延 Δx_i を、ファイバー束40の出口における異なる基本光ビーム同士の相対群遅延がほとんどゼロとなり、前記ファイバー束内を伝搬するように意図されたパルスのパルス幅の少なくとも2分の1未満であるように、少なくとも部分的に補償する。図2Bに示すように、遠位端における群速度 $X_2(i)$ の略均一な分散は、ファイバー束の近位端における群速度 $X_1(i)$ の制御によって生じる。

【0045】

図2Aは、本明細書による群速度制御GDC用光学装置の第1の例示的な実施形態を示す。

【0046】

本例の群速度制御用光学装置50は、焦点距離 f_1 の第1レンズ53と、焦点距離 f_2 の第2レンズ54とを備える。このレンズ53とレンズ54は、何らかの適宜な光学システムによって規定され、例えば、レンズ又はミラー又はその両方を使用する。これらの第1レンズ53と第2レンズ54は、中間焦点面(Σ_1)が第1レンズ53の像焦点面と第2レンズ54の対物焦点面とに一致する光学配置を構成するように配置される。

【0047】

群速度制御用光学装置50は、さらに、波長板 P_j を所定数 M だけ備え、好ましくは2個~20個の波長板が、ある平面内に空間的に分散して配置される。この平面は、図2Aの例では、中間焦点面(Σ_1)である。各波長板は、所定の遅延 δt_j を生じることができるよう設計されている。

【0048】

速度制御装置GDCは第1空間光変調器51も備えている。この第1空間光変調器51は、ファイバー束40のN本の各光ファイバー F_i 内に入射するよう意図されたN本の基本光ビーム B_i を、光源10が発したパルス I_0 よりなる入射ビームから構成するように適合されている。図2Aの例では、前記第1空間光変調器51は、第1レンズ53の対物焦点面に位置している。また、前記第1空間光変調器51は、基本光ビーム B_i それぞれが適宜な波長板 P_j を通過するように各基本光ビーム B_i の方向を変化させるよう設計される。前述の適宜な波長板 P_j は、遅延 δt_j を付与するものであり、この遅延 δt_j は、波長板 P_j が生じる遅延 δt_j と、前記基本光ビーム B_i を受光するよう意図された光ファイバー F_i の相対群遅延 Δx_i の合計が、光ファイバー F_i によらずほとんどゼロであるか、又は、パルスのパルス幅の少なくとも2分の1未満であるようになっている。実際は、波長板の個数 M は、ファイバー束40のシングルモード光ファイバー(例えば、マルチコアファイバー)の個数 N よりもかなり小さく、多くの基本光ビーム B_i は等しい遅延を付与されることになる。そして、値($\delta t_j + \Delta x_i$)全てのヒストグラムの分散が最小化するようにしている。ここでは、 δt_j は、群遅延 Δx_i で特徴づけられるファイバー F_i を通過することを意図されている基本光ビーム B_i に付与される遅延を指す。以下にその一例を示す。

【0049】

本明細書による速度制御装置 50 は第 2 空間光変調器 52 も備えており、この第 2 空間光変調器 52 は、基本光ビーム B_i のそれぞれが、対応する光ファイバー F_i 内にその入口面に垂直に貫通するように、 N 本の基本光ビーム B_i のそれぞれの方角を変化させるよう適合されている。図 2 A の例では、第 2 空間光変調器 52 は、第 2 レンズ 54 の像焦点面に位置しており、第 1 空間光変調器 51 で基本光ビーム B_i それぞれにもたらされた偏向を補償可能となっている。

【0050】

図 2 A の簡略化した図においては、3 本の基本光ビーム B_1 、 B_2 、 B_3 が示されている。これらのビームは、第 1 空間光変調器 51 において入射ビームから構成され、この入射ビームは、光源 10 が発したパルス I_0 から構成される。ファイバー束 40 の光ファイバーのうち、群遅延 Δx_1 と群遅延 Δx_2 でそれぞれ特徴づけられる光ファイバー F_1 及び F_2 (不図示) に入射するように意図されたビーム B_1 及び B_2 は、第 1 空間光変調器 51 により、その方向を変えられ、遅延 δt_1 の波長板 P_1 を通過するように第 1 レンズ 53 によって結像される。一方、ファイバー束 40 の光ファイバーのうち、群遅延 Δx_3 で特徴づけられるファイバー F_3 (不図示) に入射するように意図されたビーム B_3 は、第 1 空間光変調器 51 により、その方向を変えられ、遅延 δt_2 で特徴づけられる波長板を通過して移動するように第 1 レンズ 53 によって結像される。そして、これらの基本光ビーム B_1 、 B_2 、 B_3 は、第 2 レンズ 54 により、第 2 空間光変調器 52 へ送られる。この第 2 空間光変調器 52 は偏向を付与し、この第 2 空間光変調器 52 が付与する偏向は、第 1 空間光変調器 51 により付与された偏向を、基本光ビームそれぞれがファイバー束 40 の入口面 41 に垂直な光軸に沿って出射するように補償する。ビーム B_1 、 B_2 、 B_3 は、それぞれ遅延 δt_1 、 δt_1 、 δt_2 を有する光パルスより構成され、シングルモード光ファイバー F_1 、 F_2 、 F_3 を通過した後は、群速度の相対的な差がゼロとなり、又は減少する。

【0051】

図 2 A の例では、第 2 空間光変調器 52 の出口においては、基本光ビーム B_i は、焦点面 Σ_2 上に結像されている。テレスコープ式の光学システム 60 により、確実に 1 未満の倍率とすることが可能となり、焦点面 Σ_2 に形成される焦点は全て、ファイバー束 40 の入口面 41 の領域でファイバー F_i が形成するパターンに合わせられる。

【0052】

別の態様では、第 2 空間光変調器 52 の出口において基本光ビーム B_i を焦点面 Σ_2 に結像することは、各基本光ビーム B_i に放物線状の位相を付与する空間光変調器 52 により実現される。あるいは、速度制御装置 50 は、第 2 空間光変調器 52 の出口に、各基本光ビームを確実に結像させるマイクロレンズのアレイ等の光学素子 (不図示) を備えてもよい。

【0053】

このように、図 2 A 及び図 2 B に記載された速度制御装置 50 は、簡易な態様で、ファイバー束 40 の各シングルモード光ファイバー F_i での群速度を制御することを可能にする。

【0054】

言うまでもなく、この速度制御装置 (即ち GDC) は、位相遅延を補償するのにも使用してよい。この位相遅延は、前に述べたようにファイバー束の各ファイバーを特徴付けるものである。また、この速度制御装置は、求める位相がファイバー束 40 の遠位端で形成されるのを可能にする位相関数 (例えば、焦点を形成するための放物線関数等) を、各基本光ビームに適用するのにも使用してよい。

【0055】

図 2 A の例では、第 1 空間光変調器 51 及び第 2 空間光変調器 52 のうちのいずれか 1 つ又はその両方により、これらの関数を実現できる。

【0056】

図 2 A の例では、第 1 空間光変調器及び第 2 空間光変調器のうちのいずれか 1 つ又はそ

の両方が、反射により動作する膜又は変形可能なセグメントミラー、又は、反射又は透過により動作可能な液晶マトリクス、いずれかによる変調器により構成されてもよい。

【0057】

図3乃至図6は、図2Aに記載のイメージングシステムにより得られた主たる実験結果であり、本明細書による方法の有効性を示している。

【0058】

この例では、光源は、150fsのパルスで波長1.035μmで発するフェムト秒レーザーである。パルス搬送・制御用装置は、マルチコアファイバーで構成されるシングルモード光ファイバー束を備える。

【0059】

ここで使用するマルチコアファイバー40は、図3Aに記載されている。マルチコアファイバー40は、規則的な態様で配置された169本のシングルモードコア F_i のセットを備えており、図3Bに示すように、中央のファイバー F_0 から参照番号を付している。前述したように、このシングルモードコア F_i のそれぞれが、その近位端で基本光ビーム B_i を受光するようになっており、この基本光ビーム B_i は遠位端において当該コアを出口へ通過する。中央のコア F_0 は、各シングルモードコア F_i を特徴づける群遅延 Δx_i を決定する際の基準となるシングルモードファイバーとなる。この例では、前記マルチコアファイバーは、遠位端から近位端への光信号を回収するように適合された内部マルチモードシース44も備える。図3Aに示す例では、コア間の距離は11.8μmであり、各シングルモードコアにおけるあるモードの直径は3.6μm、対応する広がり角は0.12ラジアンである。内部マルチモードシース44の直径は、250μmである。あるシングルモードコア F_i とそれに最も近い隣接シングルモードコアとの間のカップリング(coupling)の測定値は、-25dBより小さく、マルチコアファイバーに半径12.5cmの曲率が適用された場合と同じである。

【0060】

マルチコアファイバー40の各シングルモードコアの相対群遅延を特徴付けることは、図9及び図10を用いて示す方法等の既知の方法を利用して実現される。図3Cでは、マルチコアファイバーの屈折率 n のコアについて測定された相対群遅延 Δx_i を示している。群遅延は、ある光パルスがファイバー F_i を通過するのにかかる時間と、同じ光パルスが基準ファイバー F_0 を通過するのにかかる時間との差として定義される。図3Dは群遅延値全てのヒストグラムを示す。

【0061】

図2Aに示すように、マルチコアファイバー40のN本のシングルモードコアに入射するように意図されたN本の基本光ビームを、速度制御装置50によりM個のグループに分割することができる。そして、M個の遅延値が、これらM個のグループに、M個の波長板 P_j を用いて付与される。

【0062】

M個の波長板 P_j は、例えば、厚さが等しいM-1個のガラス板を用いて形成されている。屈折率 n_j を有する前記板は j 個の孔を備えており、それぞれの孔は基本光ビーム群を通過させることができる。M個の遅延 Δt_j をこの基本光ビーム群に付与することが可能な、M個の領域を備える遅延板を構成するために、前述のM-1個の板は重ねられている。また、前述の孔は、レーザー除去等により形成することができる。

【0063】

図4は、厚さが略等しい2つの板56, 57を用いて3枚の波長板 P_1, P_2, P_3 を実現させる様子を示している。板56は2つの孔を有し、板57は孔を1つのみ有する。これらの板は、前述の3個の波長板を定義する3個の領域を構成するように設けられており、これらの領域はそれぞれ、 $0 \times \delta t_g, 1 \times \delta t_g, 2 \times \delta t_g$ である遅延を付与する。ここで、 δt_g は、板を通過するパルスにより生じた遅延である。

【0064】

波長板は、その他既知の手段を用いて形成してもよい。例えば、直径が等しく長さが異

10

20

30

40

50

なるM個のガラス棒を用いることもできる。これらの棒はそれぞれ、基本光ビーム群を通過させることができる。また、これらの棒は、例えば、対向して配置されており、M個の遅延 δt_j を基本光ビームに付与することができる。棒の長さは、研磨等によって調整してもよい。波長板は、M個の領域に分割されたガラス板から構成されてもよい。微細加工により、これらの領域それぞれを凹ませ、厚さの異なるM個の領域を形成させる。また、微細エッチングについては、ドライエッチング（反応性イオンエッチング）やウェットエッチング（HF）でもよく、又は、集束したイオンビームを用いてもよい。

【0065】

前述の空間光変調器については、波長板は透過又は反射のいずれでも動作可能である。

【0066】

図3から図6の例に戻ると、このように、N本の基本光ビーム B_i のそれぞれが、当該基本光ビーム B_i が通過するよう意図されたファイバー F_i の相対群遅延 Δx_i の値に応じて、3つの波長板 P_1 、 P_2 、 P_3 のうち1つを通過する。MはNよりもかなり小さい数なので、多くの基本光ビーム B_i が中間焦点面 Σ_1 において等しい遅延を付与されることになる。

【0067】

図5A及び図5Bでは、群速度制御装置がない場合（図5A）と、群速度制御装置がある場合（図5B）における相対群遅延の値全てをヒストグラムで示している。一方のヒストグラムから他方のヒストグラムへ、分散の明らかな減少が見られるが、これは、3つの異なる遅延値を生じる3つの板によるものである。

【0068】

図6は、群速度の制御方法を用いた場合（左）と本願方法を用いない場合（右）における、マルチコアファイバーからの出口での焦点の空間的な現れ方を示している。下部の図は焦点の画像であり、上部の図は強度の空間的な分散である。再度述べるが、これらの主たる実験結果は、本明細書による方法によって実現された強度のゲインを示している。

【0069】

図7は、本明細書の別の例によるレンズなし内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【0070】

この例は、図2Aと同じであるが、シングルモード光ファイバーがファイバー束40内に不規則に配置されている場合を示している。これにより、本明細書によるパルス搬送・制御用装置及び方法が、不規則な態様に配置されたファイバーのファイバー束に適用されているのが分かる。

【0071】

図8Aは、本明細書の別の例によるレンズなし内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。

【0072】

図8Aでは、 $M \ll N$ であることを利用して、まず第一に、平行入射ビームのM個の部分ビーム同士の間の差分遅延を実現している。図8Aでは、平行入射ビームは、 δt_1 又は δt_2 いずれかの遅延を有する、 $M = 2$ 個の部分ビームに分割される。前述のように、この遅延は、好ましくは、微細構造板により実現される。光ファイバー束のN本のファイバーにおいて、基本光ビーム部分に選択した遅延（ここでは δt_1 又は δt_2 ）を割り当てることが問題となる。この例では、好ましいことに、第1空間光変調器51は、液晶マトリクスを備えている。例えば、ホログラムの付加的特定を利用する。

この性質、第1空間光変調器51のM個の領域において、遅延 δt_i に対応する入射ビームを異なる複数の方向に散乱することが可能な一セットのホログラムを生成するというものである。これらの異なる方向は、第2空間光変調器52の平面内における焦点として出現し、この第2空間光変調器52は、基本光ビームそれぞれが光ファイバーの入口面に垂直に貫通するように方向を変化させる。第1空間光変調器51のM個の各領域に形成されるホログラムは、コンピュータが生成するホログラム、例えば「CGH」等である。この

10

20

30

40

50

ようなホログラムについては、例えば、Liesenerら、「Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms」、Opt. Commun.、185、77(2000)に記載されている。

【0073】

図8Bは、図8Aと類似のレンズなし内視鏡イメージングシステムの一例を示す図である。これは、2つの波長を有するパルスを利用する用途（非線形2ビームイメージング等）で用いられる。

【0074】

この例によれば、ファイバー束40の各ファイバーは、基本光ビームを所定の波長で搬送するよう意図されている。さらに、このファイバーの相対群遅延は、好ましくは、この波長で特徴付けられる。この例では、第1空間光変調器51は、さらに、所定の波長のパルスよりなる基本光ビームを、ファイバー束40のファイバーの特定のサブセットに分散させることができる。

【0075】

図8Bに記載する例では、第1波長 λ_1 を有するビーム（一重の矢印で示す）は、例えば、それぞれが遅延 δt_1 及び δt_2 で特徴付けられる2つの波長板 P_1 及び P_2 を通過する。また、第2波長 λ_2 を有するビーム（二重の矢印で示す）は、それぞれが遅延 δt_3 及び δt_4 で特徴付けられる2つの波長板 P_3 及び P_4 を通過する。図8Aの例と同様に、第1空間光変調器51は、N本の基本光ビームを形成することを可能にする。所定の波長を有する基本光ビームはそれぞれ、当該基本光ビームが通過する波長板が生じる遅延で特徴付けられており、ファイバー束の事前に定めた光ファイバー内に入射するよう意図されている。例えば、ファイバー束の $N/2$ 本のファイバーが第1波長 λ_1 を有する基本光ビームを受光し、ファイバー束の残りの $N/2$ 本のファイバーが第2波長 λ_2 を有する基本光ビームを受光する。図8Bに示す例では、6本の基本光ビームが示されており、うち3本は波長 λ_1 を有し、残り3本は波長 λ_2 を有する。例えば、これら2つのファイバー群は、波長 λ_1 及び波長 λ_2 を搬送する各ファイバーがファイバー束の近位面でインターレースされるように選択されている。図8Bに記載する例では、基本光ビームが第2空間光変調器の下流で交互に波長 λ_1 と波長 λ_2 になることにより、前記インターレースが実現される。

【0076】

図9及び図10は、本明細書による光パルスの搬送・制御用装置において、ファイバー束40で相対群遅延を特徴づける方法の例（マルチコアファイバーに特徴づける場合等）をいくつか示している。これらの方法は、スペクトル干渉法に関する既知の技術に基づくものである（例えば、Lepetitら、「Linear techniques of phase measurement by femtosecond spectral interferometry for applications in spectroscopy」、J. Opt. Soc. Am. B、12(12)、2467(1995)参照）。図9は、群遅延を遠位測定するのに適切な方法を示している。図10は、群遅延を近位測定するのに適切な方法を示しており、この場合は、ファイバー束の遠位端へのアクセスは不要である。

【0077】

図9に示すように、群遅延を特徴づける方法では、ファイバー分光器90と空間光変調器91を使用する。基準ファイバー F_0 内を伝搬するパルスの伝播時間に対して定められるファイバー F_i の相対群遅延 Δx_i については、その測定方法は、以下の工程を含む。光ファイバー F_i と F_0 に入射するように意図された基本光ビーム B_i と B_0 のみが、形成される。これらのビームはそれぞれ、光ファイバー F_i と F_0 を通過する。ファイバー束40の遠位端から出射する際に、ビーム B_i と B_0 は、発散して空間的に重なる。ほぼ全域が重なっている平面内で、光ファイバー92が各ビームの一部を回収する。この光ファイバー92は、回収した光を中継し、スペクトル分析器90へ送る。このスペクトルは

正弦波変調（曲線 9 4）より構成され、この正弦波変調の周期は $(\Delta x_i)^{-1}$ に等しい。つまり、望ましい値は Δx_i であることが分かる。実際は、ビーム B_i 又は B_0 から生じたものではない背景信号を全て除去するために、スペクトルは位相シフト干渉法の原理を用いて計測され、位相シフト干渉法の技術に従って空間光変調器 9 1 を用いてビーム B_i の位相が (B_0 に対して) スキャンされる（例えば、Bruning ら、「Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses」, Appl. Opt. 13 (11), 2693 (1976), equations (3-6) 参照）。

【0078】

10

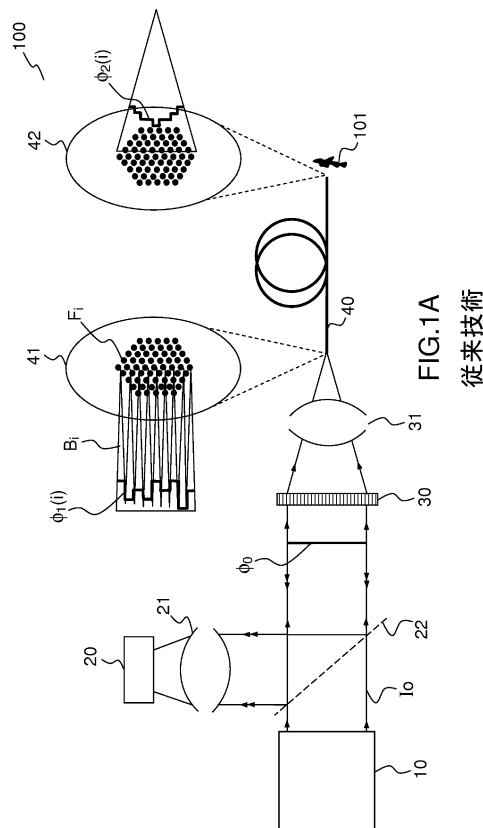
図 10 に示すように、ファイバー束 40 の遠位部にアクセスせずに Δx_i を測定することも可能となる。実際に、ファイバー束と大気との境界面における屈折率の差により、基本光ビーム B_0 と B_i の約 3 % はファイバー束の遠位面で反射される。ファイバー束 40 の近位端から出射する反射ビーム B'_0 及び B'_i は、分離板 9 6（半反射板や偏光スプリッタキューブ等）により、光ファイバー 9 2 へ送ることができる。測定については、前に述べたように行われる。この場合、パルスがファイバー束内を循環するので、測定値は $(2 \Delta x_i)^{-1}$ となる。

【0079】

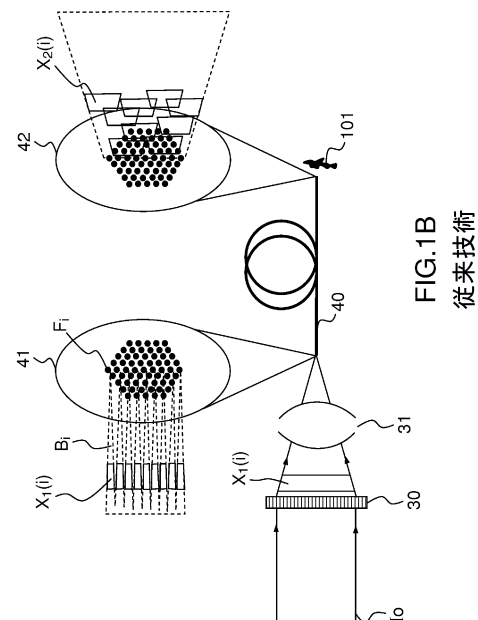
例示的な実施形態の詳細を幾つか記載したが、所謂「レンズなし」内視鏡イメージングにおける光パルス搬送・制御用装置、レンズなし内視鏡イメージングシステム及び方法は、それとはさらに異なる態様、その改変及び改良を含む。このことは当業者にとって自明な形で明らかとなるものであり、これらの異なる態様、改変、改良が以下の請求項により定義される発明の範囲に含まれるものであることが理解される。

20

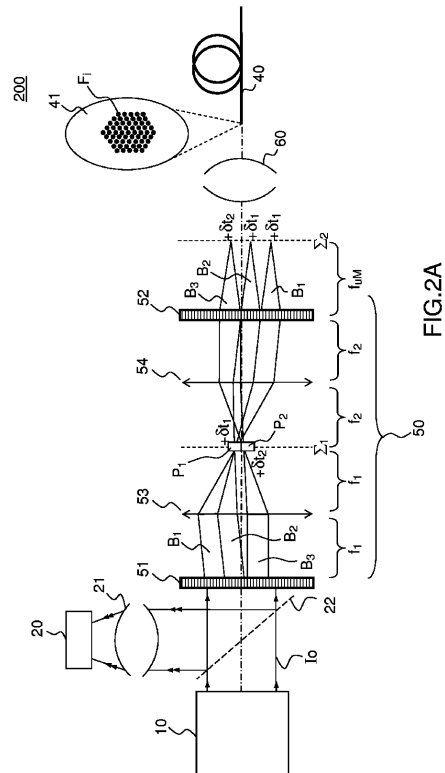
【図 1 A】



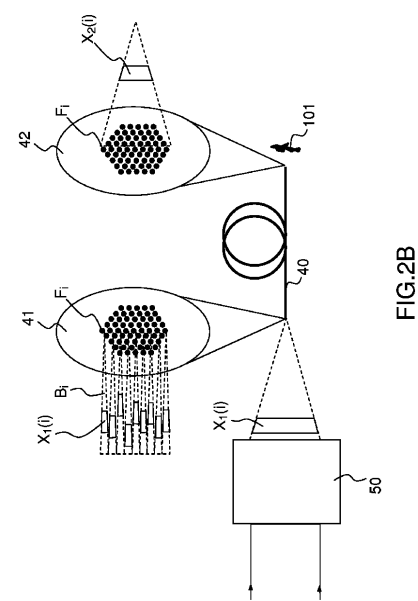
【図 1 B】



【図 2 A】



【図 2 B】



【図 3 A】

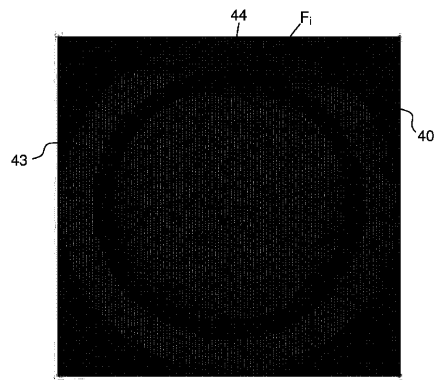


FIG.3A

【図 3 C】

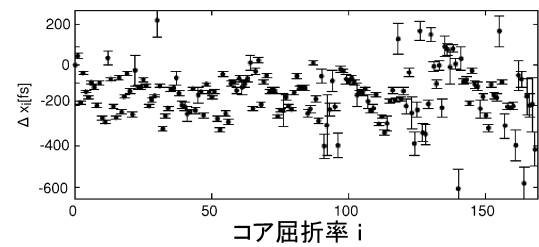


FIG.3C

【図 3 D】

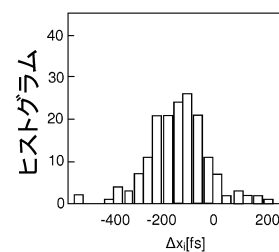


FIG.3D

【図 3 B】

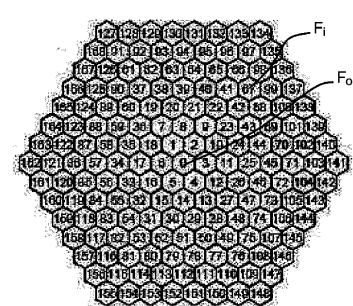


FIG.3B

【図 4】

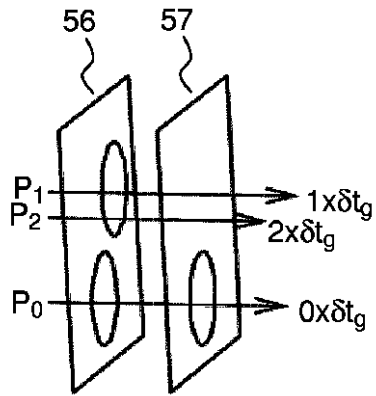


FIG.4

【図 6】

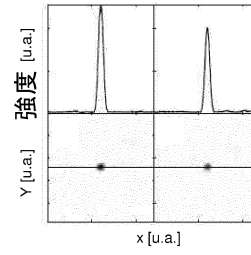


FIG.6

【図 5】

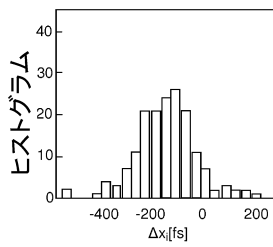


FIG.5A

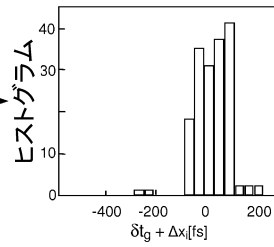


FIG.5B

【図 7】

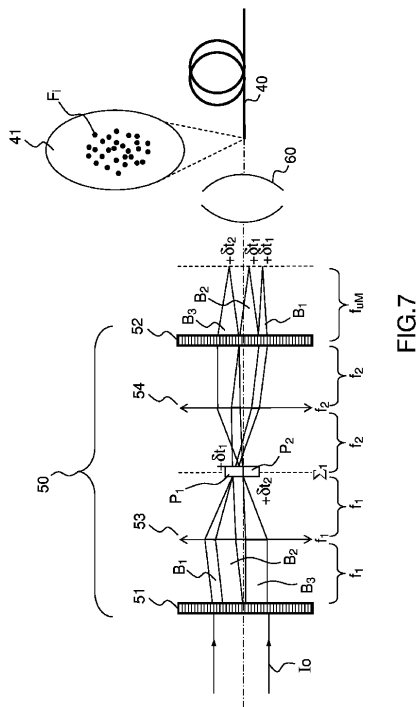


FIG.7

【図 8 A】

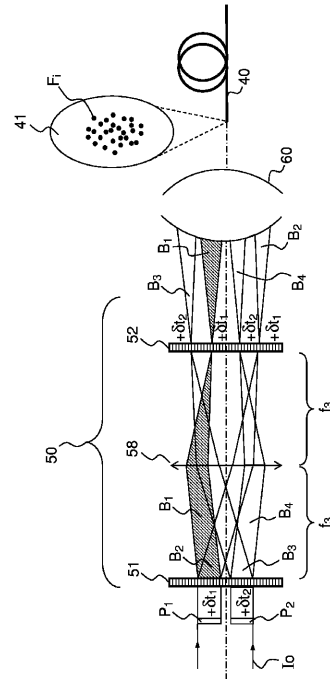


FIG.8A

【図8B】

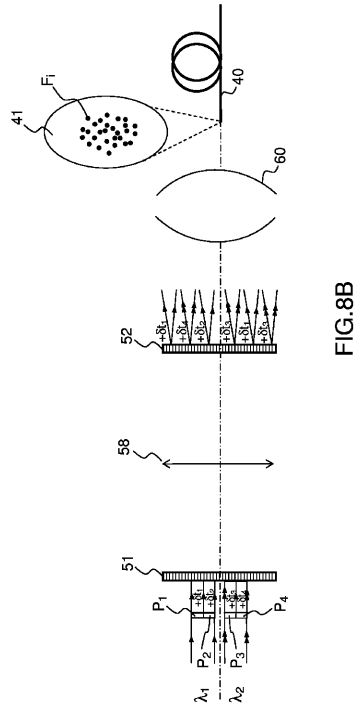


FIG. 8B

【図9】

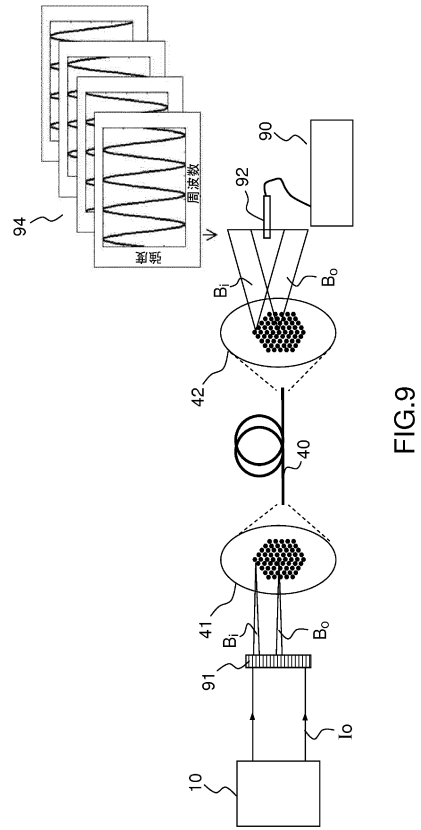


FIG. 9

【図10】

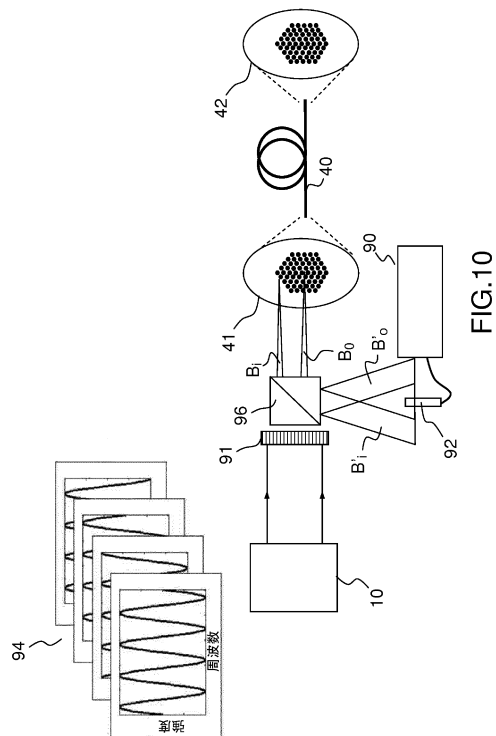


FIG. 10

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
 A 6 1 B 1/06 6 1 0
 A 6 1 B 1/00 7 3 0
 G 0 2 B 23/24 B

(72)発明者 アンドレセン, エスベン
 フランス 1 3 0 0 5 マルセイユ リュー ド ブリュイ 1 6

(72)発明者 リニョー, エルヴェ
 フランス 1 3 1 9 0 アロッシュ モンテ ノートル ダム デュ シャトー 1

審査官 北島 拓馬

(56)参考文献 特表 2 0 1 1 - 5 2 7 2 1 8 (J P , A)
 特表 2 0 0 3 - 5 1 7 6 3 8 (J P , A)
 特表 2 0 0 8 - 5 1 7 2 9 1 (J P , A)
 特開 2 0 0 2 - 0 2 3 2 1 1 (J P , A)
 特開 2 0 0 2 - 0 5 1 0 1 0 (J P , A)
 米国特許第 0 7 1 4 6 0 6 9 (U S , B 1)
 特開 2 0 1 2 - 0 1 8 2 2 5 (J P , A)
 特開 2 0 0 5 - 0 2 5 1 0 3 (J P , A)
 特開 2 0 1 3 - 2 0 1 7 5 5 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

A 6 1 B 1 / 0 0 - 1 / 3 2
 G 0 1 J 3 / 0 0 - 4 / 0 4
 G 0 1 J 7 / 0 0 - 9 / 0 4
 G 0 1 M 1 1 / 0 0 - 1 1 / 0 8
 G 0 2 B 6 / 0 0 - 6 / 5 4
 G 0 2 B 2 3 / 2 4 - 2 3 / 2 6
 G 0 2 F 1 / 0 0 - 1 / 1 2 5
 G 0 2 F 1 / 2 1 - 7 / 0 0
 H 0 4 B 1 0 / 0 0 - 1 0 / 9 0
 H 0 4 J 1 4 / 0 0 - 1 4 / 0 8

专利名称(译)	用于无透镜内窥镜成像的光脉冲载体和控制装置以及内窥镜成像系统		
公开(公告)号	JP6720183B2	公开(公告)日	2020-07-08
申请号	JP2017533334	申请日	2015-12-17
[标]申请(专利权)人(译)	法国国家科学研究中心		
申请(专利权)人(译)	中心法国国家Shiantifiku Üniversite电右芬氟拉明 - 马赛		
当前申请(专利权)人(译)	中心法国国家科学青 Üniversite电右芬氟拉明 - 马赛		
[标]发明人	アンドレセンエスベン リニョーエルヴェ		
发明人	アンドレセン,エスベン リニョー,エルヴェ		
IPC分类号	A61B1/00 G02F1/01 A61B1/07 A61B1/06 G02B23/24		
CPC分类号	G02B6/06 G02B6/065 G02B21/0004 G02B23/26 G02B6/02042 G02B23/2469 H01S3/0057		
FI分类号	A61B1/00.500 G02F1/01.D G02F1/01.F A61B1/00.510 A61B1/07.730 A61B1/06.610 A61B1/00.730 G02B23/24.B		
优先权	2014062809 2014-12-18 FR		
其他公开文献	JP2018502638A		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)	(19) 日本国特許庁 (JP)	(12) 特 許 公 報 (B2)	(11) 特許番号 特許第6720183号 (P6720183)
根据一个方面,本发明涉及一种用于传输和控制用于无透镜内窥镜成像的光脉冲的装置,该装置包括:以给定图案布置的N束单模光纤(Fi)束,每条单模光纤的特征在于:相对于在光纤束(40)的参考单模光纤(F 0)中传播的脉冲的跳闸时间定义的相对群延迟值(Ax);一种用于控制组速度的光学装置(50),包括给定数目的M个半波片(P j),其特征在于给定的延迟(8 t j);第一空间光调制器(51),其适合于从入射光束形成N个基本光束(B i),每个基本光束要进入所述光纤之一,每个基本光束要入射到一个光纤中。 给定半波片,以使由所述半波片引入的延迟与旨在接收所述基本光束的光纤的相对群延迟之和的绝对值最小;第二空间光调制器(52),其适于使N个基本光束中的每一个偏斜,使得每个基本光束垂直于光纤的入射面穿透到相应的光纤中。	(45) 発行日 令和2年7月8日 (2020. 7. 8)	(24) 登録日 令和2年6月19日 (2020. 6. 19)	
	(51) Int. Cl. F 1 A 6 1 B 1/00 (2006. 01) A 6 1 B 1/00 5 0 0 G 0 2 F 1/01 (2006. 01) G 0 2 F 1/01 D A 6 1 B 1/07 (2006. 01) G 0 2 F 1/01 F A 6 1 B 1/06 (2006. 01) A 6 1 B 1/00 5 1 0 G 0 2 B 23/24 (2006. 01) A 6 1 B 1/07 7 3 0 請求項の数 10 (全 21 頁) 最終頁に続く		
	(21) 出願番号 特願2017-533334 (P2017-533334) (22) 出願日 平成27年12月17日 (2015. 12. 17) (23) 公表番号 特表2018-502638 (P2018-502638A) (24) 公表日 平成30年2月1日 (2018. 2. 1) (56) 国際出願番号 PCT/EP2015/080312 (57) 国際公開番号 WO2016/097191 (58) 国際公開日 平成28年6月23日 (2016. 6. 23) (59) 審査請求日 平成30年12月4日 (2018. 12. 4) (31) 優先権主張番号 1462809 (32) 優先日 平成26年12月18日 (2014. 12. 18) (33) 優先権主張国・地域又は機関 フランス (FR)		
	(73) 特許権者 506316557 サントル ナショナル ドゥ ラ ルシェ ルシュ シアンティフィック フランス国 7 5 7 9 4 パリ セデック ス 1 6、リュ ミシエル アンジュ 、 3 (73) 特許権者 512302876 ユニヴェルシテ デクスーマルセイユ フランス国、1 3 2 8 4 マルセイユ・セ デックス、0 7、ブルヴァール・シャル ル・リヴァン 5 8 (74) 代理人 110000176 一色国際特許事務所		
	(54) 【発明の名称】 レンズなし内視鏡イメージング向けの、光パルスの搬送・制御用装置、および内視鏡イメージングシステム		

最終頁に続く