

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)公開番号

特開2022-19749  
(P2022-19749A)

(43)公開日 令和4年1月27日(2022.1.27)

(51)国際特許分類

G 0 1 B 11/24 (2006.01)

F I

G 0 1 B 11/24

D

審査請求 有 請求項の数 15 O L 外国語出願 (全30頁)

(21)出願番号	特願2021-179745(P2021-179745)	(71)出願人	510253996 インテュイティブ サージカル オペレーションズ, インコーポレイテッド アメリカ合衆国 9 4 0 8 6 カリフォルニア州 サニーヴェイル キーファー・ロード 1 0 2 0
(22)出願日	令和3年11月2日(2021.11.2)	(74)代理人	100107766 弁理士 伊東 忠重
(62)分割の表示	特願2018-558421(P2018-558421)の分割	(74)代理人	100070150 弁理士 伊東 忠彦
原出願日	平成29年4月26日(2017.4.26)	(74)代理人	100135079 弁理士 宮崎 修
(31)優先権主張番号	62/334,649	(72)発明者	フロガット, マーク アメリカ合衆国 9 4 0 8 6 カリフォルニア州, サニーヴェイル, キーファー・ロ
(32)優先日	平成28年5月11日(2016.5.11)		最終頁に続く
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		

(54)【発明の名称】 安全性のためのマルチコア光ファイバ内の冗長コア

(57)【要約】

【課題】形状感知モデルから独立しており且つ形状感知モデルにおいて説明されない誤差を検出することができる技術的解決策を提供する。

【解決手段】光ファイバが一次コアと補助コアとのセットを含むファイバ内に構成される多数の光コアを含む。干渉測定システムが多数の一次コアからの測定値を使用して補助コアからの応答を予測する。予測される補助コア応答を実際の補助コア応答と比較して、それらが所定の量よりも多い量だけ異なるか否かを決定し、所定の量よりも多い量だけ異なる場合、多数の一次コアからの測定値は信頼できないと見做される。

【選択図】図4

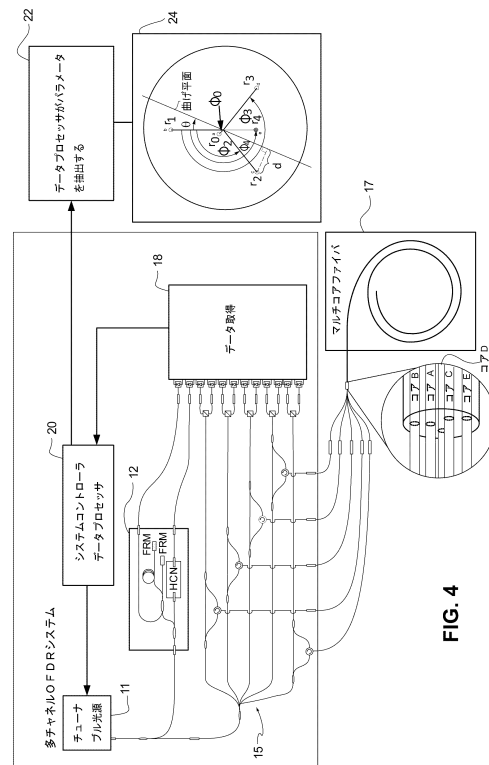


FIG. 4

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

光ファイバを測定する光干渉測定システムであって、  
 前記光ファイバは、前記光ファイバ内の複数の一次コアと、前記光ファイバ内の補助コア  
 とを含み、  
 当該光干渉測定システムは、  
 前記複数の一次コア及び前記補助コアの各々と関連付けられる測定値干渉パターンデータ  
 を検出するように構成される干渉検出回路構成と、  
 データ処理回路構成と、を含み、  
 前記データ処理回路構成は、  
 前記複数の一次コアについての前記検出される測定値干渉パターンデータに基づいて前記  
 光ファイバの形状を決定し、  
 前記複数の一次コア及び前記補助コアについての前記検出される測定値干渉パターンデー  
 タに基づいて前記補助コアの予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの測定値ベース  
 の位相又はひずみ値との間の差を決定し、  
 前記差に基づいて前記光ファイバの前記決定される形状の信頼性を決定し、且つ  
 前記信頼性に応答して予防的行為を引き起こす、  
 ように構成される、  
 光干渉測定システム。

10

## 【請求項 2】

前記データ処理回路構成は、  
 所定の閾値を超える前記信頼性に応答して前記予防的行為を引き起こすことによって、  
 前記予防的行為を取るよう構成される、  
 請求項 1 に記載の光干渉測定システム。

20

## 【請求項 3】

前記データ処理回路構成は、前記光ファイバの前記形状を決定する際に、前記複数の一次  
 コアの数と等しいパラメータを決定するように構成される、請求項 1 又は 2 に記載の光干  
 渉測定システム。

## 【請求項 4】

前記複数の一次コアは、中心コアと、3つの周辺コアとを含み、前記パラメータは、前記  
 光ファイバのピッチ曲げ、ヨー曲げ、捻れ、及び共通モードひずみを含む、請求項 3 に記  
 載の光干渉測定システム。

30

## 【請求項 5】

前記複数の一次コアは、5つのコアを含み、前記パラメータは、前記光ファイバの温度を  
 更に含む、請求項 4 に記載の光干渉測定システム。

## 【請求項 6】

前記データ処理回路構成は、  
 前記複数の一次コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて前記複数の一次  
 コアにおけるひずみを決定すること、  
 前記光ファイバの物理モデル及び前記複数の一次コアにおける前記決定されるひずみに基  
 づいて前記補助コアにおける予測されるひずみを計算すること、  
 前記補助コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて前記補助コアにおける  
 測定値ベースのひずみを決定すること、及び  
 前記補助コアにおける前記予測されるひずみ及び前記測定値ベースのひずみを用いて前記  
 差を計算することによって、  
 前記補助コアの前記予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの前記測定値ベースの位  
 相又はひずみ値との間の前記差を決定する  
 ように構成される、  
 請求項 1 ~ 5 のうちのいずれか 1 項に記載の光干渉測定システム。

40

## 【請求項 7】

50

前記データ処理回路構成は、

前記複数の一次コア及び前記補助コアについて決定される基準干渉パターンデータと比較されるような前記複数の一次コア及び前記補助コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて光位相信号を追跡すること、

前記複数の一次コアについての前記光位相信号の導関数を計算すること、

前記複数の一次コアについての前記光位相信号の前記計算される導関数に基づいて前記補助コアについての予測される光位相導関数を決定すること、

前記補助コアについての予測される光位相を得るために前記補助コアについての前記予測される光位相導関数を積分すること、及び

前記補助コアについての前記予測される光位相を前記補助コアについての前記追跡される光位相信号と比較することによって、

前記補助コアの前記予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの前記測定値ベースの位相又はひずみ値との間の前記差を決定する、

ように構成される、

請求項 1 ~ 5 のうちのいずれか 1 項に記載の光干渉測定システム。

【請求項 8】

光ファイバを測定する方法であって、

前記光ファイバは、前記光ファイバ内の複数の一次コアと、前記光ファイバ内に構成される補助コアとを含み、

当該方法は、

前記複数の一次コア及び前記補助コアの各々と関連付けられる測定値干渉パターンデータを検出することと、

前記光ファイバの形状を決定するために前記複数の一次コアについての前記検出される測定値干渉パターンデータを処理することと、

前記複数の一次コア及び前記補助コアについての前記検出される測定値干渉パターンデータに基づいて前記補助コアの予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの測定値ベースの位相又はひずみ値との間の差を決定することと、

前記光ファイバの前記決定される形状の信頼性を決定することと、

前記信頼性に応答して予防的行為を引き起こすことと、を含む、

方法。

【請求項 9】

前記予防的行為を引き起こすことは、所定の閾値を超える前記信頼性に応答して前記予防的行為を引き起こすことを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記複数の一次コアは、4つのコアを含み、前記光ファイバの前記形状を決定することは、前記光ファイバのピッチ曲げ、ヨー曲げ、捻れ、及び共通モードひずみを決定することを含む、請求項 8 又は 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記複数の一次コアは、5つのコアを含み、前記光ファイバの前記形状を決定することは、前記光ファイバの温度を決定することを更に含む、請求項 8 ~ 10 のうちのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 12】

前記補助コアの前記予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの前記測定値ベースの位相又はひずみ値との間の前記差を決定することは、

前記複数の一次コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて前記複数の一次コアにおけるひずみを決定することと、

前記光ファイバの物理モデル及び前記複数の一次コアにおける前記決定されるひずみに基づいて前記補助コアにおける予測されるひずみを計算することと、

前記補助コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて前記補助コアにおける測定値ベースのひずみを決定することと、

10

20

30

40

50

前記補助コアにおける前記予測されるひずみ及び前記測定値ベースのひずみを用いて前記差を計算することと、を含む、

請求項 8 ~ 11 のうちのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 13】

前記補助コアの前記予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの前記測定値ベースの位相又はひずみ値との間の前記差を決定することは、

前記複数の一次コア及び前記補助コアについて決定される基準干渉パターンデータと比較されるような前記複数の一次コア及び前記補助コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて光位相信号を追跡することと、

前記複数の一次コアについての前記光位相信号の導関数を計算することと、

10

前記複数の一次コアについての前記光位相信号の前記計算される導関数に基づいて前記補助コアについての予測される光位相導関数を決定することと、

前記補助コアについての予測される光位相を得るために前記補助コアについての前記予測される光位相導関数を積分することと、

前記補助コアについての前記予測される光位相を前記補助コアについての前記追跡される光位相信号と比較することとを含む、

請求項 8 ~ 12 のうちのいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 14】

前記予防的行為は、前記光ファイバの測定値と関連付けられるシステムの動作を停止することを含む、請求項 8 ~ 13 のうちのいずれか 1 項に記載の方法。

20

【請求項 15】

プログラム命令を格納するコンピュータ可読媒体であって、

前記プログラム命令は、コンピュータプロセッサによって実行されるときに、前記コンピュータプロセッサに、光ファイバ内に構成される複数の一次コア及び補助コアについて検出される測定値干渉パターンデータを処理するための動作を実行させ、該動作は、

前記複数の一次コアについての前記測定値干渉パターンデータに基づいて前記光ファイバの形状を決定することと、

前記複数の一次コア及び前記補助コアについての前記検出される測定値干渉パターンデータに基づいて前記補助コアの予測される位相又はひずみ値と前記補助コアの測定値ベースの位相又はひずみ値との間の差を決定することと、

30

前記差に基づいて前記光ファイバの前記決定される形状の信頼性を決定することと、

前記信頼性に応答して予防的行為を引き起こすことと、を含む、

コンピュータ可読媒体。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

(関連出願の参照)

この出願は、2016年5月11日に提出された「REDUNDANT CORE IN MULTI CORE OPTICAL FIBER FOR SAFETY」という名称の米国仮特許出願第62/334,649号の優先権及び利益を主張し、その全文を本明細書中に参照として援用する

40

。紡糸マルチコアファイバ(spun multicore fiber)が、光ファイバの形状を決定するために使用されている。4つのコアを有するマルチコアファイバを使用して、ファイバの変形を2つの曲げ角度(ピッチ及びヨー)、1つの捻れ角度、及びファイバの伸びに分離することができる。これらの4つの測定値は、4つの自由度を構成する。これらの4つの測定値(ピッチ、ヨー、捻れ、及び伸び)は、比較的小さな力でファイバに起こり得る変形の全てを表す。

【0002】

ファイバ光学ベースの形状感知では、本明細書に参照として援用する米国特許第8,773,650号に記載のように、マルチチャネル分布ひずみ感知システムを使用して、マル

50

チコア光学形状感知ファイバ内の幾つかのコアの各々のコアについてのひずみの変化を検出する。複数の分散されたひずみ測定値は、本明細書に参照として援用する米国特許第 8, 531, 655号に記載されているように、曲率、捻れ、及び軸方向のひずみを含む物理的測定値のセットを生成するために、方程式のシステムを通じて組み合わせられる。これらの物理的測定値を使用して、光ファイバの分布形状及び位置を決定することができる。

#### 【0003】

形状感知ファイバのための幾つかの用途は、形状感知出力の精度(accuracy)及び信頼度(reliability)に関して高度の信頼性(confidence)又は安全性(safety)を必要とする。例示的な用途は、精密製造環境、外科環境、又は他の環境で使用されるロボットアームである。

10

#### 【0004】

形状感知ファイバ用途の他の問題は、形状感知モデル又はモデル推定に含まれない予見されない又は予測できない誤差(エラー)である。例示的な誤差は、光学的及び/又は電子的感知及び処理回路の動作における誤差、接続ファイバにおける誤差、不正確な較正ファイルをロードして形状感知システムを較正することのような人為的誤差、及び形状感知モデルに含まれないファイバが受ける力によって引き起こされる誤差を含む。既述のそのようなパラメータの1つは、ファイバピンチ(fiber pinch)である。形状感知モデルが温度に起因する変化を説明しないならば、他のパラメータは温度である。更なる懸念は、未だ知られていない或いは特定可能でない他のパラメータである。よって、形状感知モデルから独立しており且つ形状感知モデルにおいて説明されない誤差を検出することができる

20

#### 【発明の概要】

#### 【0005】

この出願中の技術は、追加的な測定値を予測するために、N自由度及びN測定値を有するモデルを使用する。換言すれば、N+1測定を行うためにN自由度モデルが使用され、ファイバ内の余分な又は冗長なコアを使用して行われる余分な測定はモデルに対する確認として使用される。例えば、ファイバの各セグメントがピッチ、ヨー、ロール、張力、及び温度の空間又は時間変化を受けることができる、6つの光コア(第6のコアは補助又は冗長コア)を有する光学形状感知ファイバの5自由度モデルを用いるならば、5つのひずみが測定し且つ使用して、モデル内の5つのパラメータ(ピッチ、ヨーなど)のそれぞれを特異に決定する。次に、決定される5つのパラメータを使用して、モデルが正確で信頼できるならば、第6のコア内のひずみが何でなければならぬかを予測し、予測するひずみを第6のコア内の測定されたひずみと比較して誤差を決定する。有利には、本技術は、その誤差を検出し且つ未知の起源の誤差を検出するために、モデル内の如何なる特定の誤差の事前知識を必要としない。より多くの補助又は冗長信号(5自由度モデルのために6つのコアの代わりに7つのコア)を追加することは、形状感知測定の信用(confidence)及び信頼(trust)を更に向上させる。

30

#### 【0006】

例示的な実施形態では、光ファイバを測定する干渉測定システム(interferometric measurement system)が提供され、光ファイバは、光ファイバ内に構成される複数の一次コアと、光ファイバ内に構成される補助コアとを含む。干渉検出回路構成(interferometric detection circuitry)が、複数の一次コア及び補助コアの各々と関連付けられる測定値干渉パターンデータ(measurement interferometric pattern data)を検出するように構成される。これは光ファイバが感知位置に配置されるときに行われてよい。データ処理回路構成(data processing circuitry)が、複数の一次コアについての検出される測定値干渉パターンデータに基づいて補償パラメータを決定し、使用される補助コアについての予測されるパラメータ値を補助コアについての測定値ベースのパラメータ値と比較して比較を生成し、比較に基づいて決定される補償パラメータの不信頼性(unreliability)を決定し、且つ不信頼性に応答して信号を生成する、ように構成される。補償パラメータは、複数の一次コアの較正構成(calibration configuration)と複

40

50

数の一次コアの実際の構成(actual configuration)との間の変動を補償する。

【0007】

信号は、(a)検出回路構成又はデータ処理回路構成の動作における誤差、(b)光ファイバ接続における誤差、(c)較正構成における誤差、又は(d)補償パラメータがデータ処理回路構成によって決定されない光ファイバによって受ける力によって引き起こされる誤差のうち1以上を含む、誤差を表すことがある。例えば、不信頼性は、光ファイバの締付け(pinching)によって引き起こされることがあり、温度の空間又は時間変化によって引き起こされることがあり、光ファイバから測定される信号を変更する何らかの他の現象によって引き起こされることがあり、或いはそれらの組み合わせによって引き起こされることがある。

10

【0008】

1つの例示的な実施形態において、データ処理回路構成は、光ファイバについて引き続き得られる測定値干渉パターンデータに補償パラメータを適用するように構成される。

【0009】

例示的な用途において、予測されるパラメータ値は、補助コアについての予測される位相であり、測定値ベースのパラメータ値は、補助コアについての測定値ベースの位相値である。データ処理回路構成は、以下の動作、即ち、一次コアの各々において測定される位相の導関数を計算して複数の位相導関数を取得すること、変換行列によって複数の位相導関数を乗じて予測される補助コアの位相導関数を取得すること、及び予測される補助コアの位相導関数を積分して補助コアについての予測される位相を取得することによって、補助コアについての予測される位相を決定するように構成される。

20

【0010】

他の例示的な用途において、データ処理回路構成は、検出される測定値干渉パターンデータに基づいて、光ファイバ上の捩れひずみ、曲げひずみ、及び軸方向ひずみに対応する、ファイバについてのひずみ値を決定し、且つ光ファイバ上の捩れひずみ、曲げひずみ、及び軸方向ひずみに対応する、ファイバについての決定されるひずみ値に基づいて、光ファイバの形状を決定するように、構成される。

【0011】

他の例示的な用途において、データ処理回路構成は、検出される測定値干渉パターンデータに基づいて、光ファイバ上の温度ひずみ、捩れひずみ、曲げひずみ、及び軸方向ひずみに対応する、光ファイバについてのひずみ値を決定し、且つ光ファイバ上の温度ひずみ、捩れひずみ、曲げひずみ、及び軸方向ひずみに対応する、光ファイバについての決定されるひずみ値に基づいて、光ファイバの形状を決定するように、構成される。本明細書において、温度ひずみは、較正後に又は基準基線読取りが取られた後に起こる温度の空間変化又は時間変化によって引き起こされるような、温度によって引き起こされるひずみを示すために使用される。

30

【0012】

例示的な実施において、データ処理回路構成は、不信頼性が所定の閾値を超えるとときに信号を生成するように構成される。

【0013】

他の例示的な実施において、信号は、不信頼性を表す。

40

【0014】

他の例示的な実施形態は、光ファイバを測定する干渉測定方法を含み、光ファイバは、光ファイバ内に構成される複数の一次コアと、光ファイバ内に構成される補助コアとを含む。干渉測定方法は、

干渉検出回路構成を使用して、光ファイバが感知位置にあるときに、複数の一次コア及び補助コアの各々と関連付けられる測定値干渉パターンデータを検出すること、

データ処理回路構成を使用して、複数の一次コアについての検出される測定値干渉パターンデータに基づいて、複数の一次コアの較正構成と複数の一次コアの実際の構成との間の変動を補償する補償パラメータを決定すること、

50

補助コアについての予測されるパラメータ値を補助コアについての測定値ベースのパラメータ値と比較して比較を生成すること、  
比較に基づいて補償パラメータの信頼性を決定すること、及び  
信頼性に応答して表示する信号を生成することを含む。

【0015】

他の例示的な実施形態は、

中心コアと、各々が中心コアから半径距離にある4つ又はそれよりも多くの周辺コアとを含む、5つ又はそれよりも多くのコアを備える、光ファイバを含む。5つのコアのうちの1つ又はそれよりも多くのコアは、他のコアの温度応答と異なる温度応答をもたらす。4つ又はそれよりも多くの周辺コアのうちの1つ又はそれよりも多くの周辺コアは、他の4つ又はそれよりも多くの周辺コアと関連付けられる中心コアからの第2の半径距離とは異なる、中心コアからの第1の半径距離にある。第1の半径距離と第2の半径距離との間の差は、5つ又はそれよりも多くのコアの全てと関連付けられる平均半径距離の少なくとも10%にある。

10

【0016】

ある例示的な実施において、5つ又はそれよりも多くのコアは、光ファイバの長さに沿って螺旋状に撚り合わされる(helicallly-twisted)。

【0017】

他の例示的な実施において、異なる温度応答をもたらす1つ又はそれよりも多くのコアは、他のコアとは異なるドーピング(doping)又は材料を有する。

20

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】ジョイント内のファイバピンチの例を例示する回転可能なジョイントを備えるロボットアームを示している。

【0019】

【図2】5つのコアを備える第1の撚り合わされたマルチコアファイバの例示的な実施形態を示している。

【0020】

【図3】5つのコアの螺旋状に撚り合わされた光ファイバについてのコア配置及びひずみへの応答を定量化するために使用することができる数学的パラメータを例示している。

30

【0021】

【図4】5つのコアのファイバを使用する形状感知システムの推定及びモデルから独立して誤差を特定する光周波数領域反射測定法(OFD R)ベースの形状感知システムの第1の例示的な実施形態の概略図を示している。

【0022】

【図5】第1の例示的な実施形態において光学形状感知ファイバを較正することについてのフローチャート図である。

【0023】

【図6】第1の例示的な実施形態において形状感知システムにおける誤差を検出することについてのフローチャート図である。

40

【0024】

【図7】ホウ素-ゲルマニウムで共ドーブされたコア及びゲルマニウムのみでドーブされたコアについての屈折率対温度のグラフを示している。

【0025】

【図8】6つのコアを備える第2の撚り合わされたマルチコアファイバの例示的な実施形態を示している。

【0026】

【図9】6つのコアのファイバを使用する形状感知システムの推定及びモデルから独立して誤差を特定し且つ温度を補償するOFD Rベースの形状感知システムの第2の例示的な実施形態の概略図を示している。

50

【 0 0 2 7 】

【 図 1 0 】 第 2 の 例 示 的 な 実 施 形 態 において 光 学 形 状 感 知 フ ァ イ バ を 較 正 す る こ と に つ い て の フ ロー チャート 図 である。

【 0 0 2 8 】

【 図 1 1 】 第 2 の 例 示 的 な 実 施 形 態 において 形 状 感 知 シ ス テ ム にお ける 誤 差 を 検 出 す る こ と に つ い て の フ ロー チャート 図 である。

【 発 明 を 実 施 す る た め の 形 態 】

【 0 0 2 9 】

以下 の 記 述 は、 限 定 の 目 的 の た め で な く 説 明 の 目 的 の た め の 特 定 の 実 施 形 態 の よ う な、 特 定 の 詳 細 を 示 す。 し か し な が ら、 当 業 者 は、 こ れ ら の 特 定 の 詳 細 は 別 と し て、 他 の 実 施 形 態 が 利 用 さ れ て よ い こ と を 理 解 す る で あ ろ う。 幾 つ か の 場 合 にお いて、 周 知 の 方 法、 イ ン ター フ ェ ース、 回 路、 及 び デ バ イ ス の 詳 細 な 記 述 は、 不 要 な 詳 細 で 記 述 を 曖 昧 に し な い よ う 省 略 さ れ る。 個 々 の ブ ロ ッ ク は、 様 々 な ノ ード に 対 応 す る 図 に 示 さ れ て い る。 当 業 者 は、 そ れ ら の ブ ロ ッ ク の 機 能 が、 ハ ー ド ウ ェ ア 回 路 を 使 用 し て、 適 切 に プ ロ グ ラ ム さ れ た デ ジ タ ル マ イ ク ロ プ ロ セ ッ サ 又 は 汎 用 コ ン ピ ュ ー タ と 共 に ソ フ ト ウ ェ ア プ ロ グ ラ ム 及 び デ ー タ を 使 用 し て、 並 び に / 或 い は 特 定 用 途 向 け 集 積 回 路 ( A S I C ) を 使 用 し て、 並 び に / 或 い は 1 以 上 ( 1 つ 又 は そ れ よ り も 多 く ) の デ ジ タ ル 信 号 プ ロ セ ッ サ ( D S P ) を 使 用 し て、 実 施 さ れ る 場 合 が あ る こ と を 理 解 す る で あ ろ う。 ソ フ ト ウ ェ ア プ ロ グ ラ ム 命 令 及 び デ ー タ は、 非 一 時 的 な コ ン ピ ュ ー タ 可 読 記 憶 媒 体 に 格 納 さ れ て よ く、 命 令 が コ ン ピ ュ ー タ 又 は 他 の 適 切 な プ ロ セ ッ サ 制 御 装 置 に よ っ て 実 行 さ れ る と き に、 コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ は、 そ れ ら の 命 令 と 関 連 付 け ら れ る 機 能 を 実 行 す る。

【 0 0 3 0 】

よ っ て、 例 え ば、 当 業 者 は、 本 明 細 書 にお ける 図 面 が 例 示 的 な 回 路 又 は 他 の 機 能 ユ ニ ッ ト の 概 念 図 を 表 し 得 る こ と を 理 解 す る で あ ろ う。 同 様 に、 任 意 の フ ロー チャート、 状 態 遷 移 図、 擬 似 コ ー ド、 及 び 同 等 物 が、 コ ン ピ ュ ー タ 可 読 媒 体 中 に 実 質 的 に 表 現 さ れ る こ と が あ り、 よ っ て、 コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ が 明 示 的 に 示 さ れ て い よ う が い ま い が、 そ の よ う な コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ に よ っ て 実 行 さ れ る こ と が あ る、 様 々 な プ ロ セ ス を 表 す こ と が 理 解 さ れ る で あ ろ う。

【 0 0 3 1 】

様 々 な 例 示 さ れ る 要 素 の 機 能 は、 コ ン ピ ュ ー タ 可 読 媒 体 に 格 納 さ れ る コ ー ド 化 さ れ た 命 令 の 形 態 にお いて ソ フ ト ウ ェ ア を 実 行 し 得 る ハ ー ド ウ ェ ア 及 び / 又 は 回 路 ハ ー ド ウ ェ ア の よ う な ハ ー ド ウ ェ ア の 使 用 を 通 じ て 提 供 さ れ て よ い。 よ っ て、 そ の よ う な 機 能 及 び 例 示 の 機 能 ブ ロ ッ ク は、 ハ ー ド ウ ェ ア 実 装 さ れ る 及 び / 又 は コ ン ピ ュ ー タ 実 装 さ れ る、 よ っ て、 機 械 実 装 さ れ る も の と し て 理 解 さ れ る べ き で あ る。

【 0 0 3 2 】

ハ ー ド ウ ェ ア 実 装 に 関 し て、 機 能 ブ ロ ッ ク は、 デ ジ タ ル 信 号 プ ロ セ ッ サ ( D S P ) ハ ー ド ウ ェ ア、 縮 小 命 令 セ ッ ト プ ロ セ ッ サ ( reduced instruction set processor )、 ( 複 数 の ) 特 定 用 途 向 け 集 積 回 路 ( A S I C ) 及 び / 又 は ( 複 数 の ) フ ィ ー ル ド プ ロ グ ラ ム ブ ル ゲ ー ト ア レ イ ( F P G A ) を 非 限 定 的 に 含 む ハ ー ド ウ ェ ア ( 例 え ば、 デ ジ タ ル 又 は ア ナ ログ ) 回 路 構 成、 並 び に ( 必 要 な 場 合 に は ) そ の よ う な 機 能 を 実 行 し 得 る 状 態 機 械 を 含 ん で よ く 或 い は 包 含 し て よ い。

【 0 0 3 3 】

コ ン ピ ュ ー タ 実 装 に 関 し て、 コ ン ピ ュ ー タ は、 一 般 的 に、 1 以 上 の プ ロ セ ッ サ 又 は 1 以 上 の コ ン ト ロ ー ラ を 含 む と 理 解 さ れ、 コ ン ピ ュ ー タ、 プ ロ セ ッ サ、 及 び コ ン ト ロ ー ラ と い う 用 語 は、 互 換 的 に 利 用 さ れ る こ と が あ る。 コ ン ピ ュ ー タ、 プ ロ セ ッ サ、 又 は コ ン ト ロ ー ラ に よ っ て 提 供 さ れ る と き、 機 能 は、 単 一 の 専 用 コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ 又 は コ ン ト ロ ー ラ に よ っ て 提 供 さ れ て よ く、 単 一 の 共 有 コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ 又 は コ ン ト ロ ー ラ に よ っ て 提 供 さ れ て よ く、 或 い は 複 数 の 個 別 の コ ン ピ ュ ー タ 又 は プ ロ セ ッ サ 又 は コ ン ト ロ ー ラ に よ っ て 提 供 さ れ て よ く、 そ れ ら の 一 部 は 共 有 さ れ て よ く 或 い は 分 散 さ れ て よ い。 そ の 上、 「 プ ロ セ ッ サ 」 又 は 「 コ ン ト ロ ー ラ 」 と い う 用 語 は、 上 で 列 挙 し た 例 示 的 な ハ ー ド

ウェアのような、そのような機能を遂行し得る及び/又はソフトウェアを実行し得る他のハードウェアも指す。

【0034】

例示的な紡糸(spun)又は螺旋状に撚り合わされた(helicallly-twisted)マルチコアファイバは、限定の目的のためでなく例示の目的のために以下に記載される。記載する原理は、複数の一次コアと1以上の二次(例えば、冗長又は補助)コアが光ファイバの長さに沿って異なる相対的な位置を有する、マルチコアファイバにも適用される。

【0035】

紡糸ファイバの外側コアは螺旋状に巻かれるので、ファイバに加えられる捩れの結果として、外側コアもひずみ(strain)を受ける。外側コアは、螺旋巻き方向に対する捩れの向きに応答して伸長させられ或いは圧縮される。換言すれば、外側コアが時計回りに螺旋状に巻かれた状態でファイバの軸を見下ると、時計回り方向に加えられる捩れは、外側コアが圧縮させるようになる。反対に、反時計回りに加えられる捩れは、外側コアを伸長させる(張力を受けさせる)。しかしながら、中心コアは中立軸に沿って配置されるので、中心コアは捩れの結果としてのひずみを受けない。よって、4コアファイバは、4コアファイバに加えることができる3つの異なる種類のひずみ、即ち、軸方向に加えられるひずみ、曲げ誘発ひずみ、及び捩れ(twist)又は捻れ(torsion)の結果としてのひずみの各々の個別の決定を可能にする十分な自由度を有する。4つのコアから測定される信号は、ファイバの物理的状态を記述する4つの線形に独立したパラメータを抽出するために使用される。それらの4つのパラメータは、共通モードひずみ(common mode strain)、ピッチ曲げ(pitch bending)、ヨー曲げ(yaw bending)、及び捩れ(twist)を含み、それらはファイバに課し得る比較的低い力の変化を表す。

【0036】

ファイバの締付け(pinching)は、ファイバの他の独立した修正である。締付けを介して有意な寸法変化を誘発することは、上記の低い力と比べて比較的大きな力を必要とする。

【0037】

図1は、マルチコア形状感知ファイバ1を有するロボットアーム1を示している。ロボットアーム2は、ジョイント3(関節)を含み、ジョイント3は、ロボットアームの隣接する部材がジョイント3の周りで互いに対して回転することを可能にする。ロボットアームの部材が動くと、拡大図4に示すように、ファイバ1がジョイント3内で締め付けられる(pinched)ことがある状況があることがある。ファイバのその締付けは、形状感知決定に誤差(エラー)を導入する。換言すれば、締付けは、共通モードひずみ、ピッチ曲げ、ヨー曲げ、及び捩れを含む、4自由度モデルにおいて考慮されない追加的な力である。

【0038】

図2は、5つのコアa乃至eを備える撚り合わされたマルチコアファイバである感知ファイバ1を示している。コアaは、中立軸上又はその近くにあり、コアb乃至eは、特定の半径距離だけ中立軸から意図的にオフセットされている(ずらされている)。図3に関連して説明するように、全てのオフセットコアについての半径方向距離は、全て同じではない。

【0039】

図3は、5つのコアの螺旋状に撚り合わされた(twisted)光ファイバについてのコア配置及びひずみに対する応答を定量化するために使用し得る数学的パラメータを例示している。周辺コアb~dは、マルチコアファイバの中心から同じ半径にあり、周辺コアeは、周辺コアb~dの半径とは異なる半径にあることに留意のこと。この例において、補助コアeの半径は、コアb~dの半径よりも小さいが、コアeの半径は、コアb~dの半径よりも大きくてよい。コアb~dについての半径距離とコアeについての半径距離との間の差は、極僅かな(insubstantial)差よりも大きい。例えば、コアb~eの全てについての平均半径距離で割った差は、0.10以上である。別の言い方をすれば、その差は、コアb~eの全てについての平均半径距離の10%である。補助コアeは、好ましくは、コアa~dとの結合を減少させるような方法においてファイバ内に配置される。幾つかの実施形

10

20

30

40

50

態において、平均半径距離は、平均半径距離である。

【 0 0 4 0 】

代替的な例示的な実施形態において、補助的な冗長コア e は、他の周辺コアと同じ半径に配置される。データの信頼性を確認するために補助的な冗長コアを依然として使用することがあるが、この構成(configuration)は、中心コア上の誤差を検出するのに余り効果的でない。

【 0 0 4 1 】

図 3 も、5 つのコアの螺旋状に撚り合わされた光ファイバについてのコア配置及びひずみに対する応答を定量化するために使用し得る数学的パラメータを示している。垂直軸が外側コア b のうちの 1 つを通過するように、垂直軸がマルチコアファイバの中心を通過して配置されている。垂直軸によって二等分される外側コア b を「基準コア」(“reference core”)と呼ぶ。幾つかのパラメータは、このコア b に関して表され、この文書の残部分に関して、指数  $n = 1$  で特定されるコアは、一例として、基準コアとしての機能を果たすことに留意のこと。2 つのパラメータは、コアの位置、即ち、ファイバ中心からの径方向距離  $r$ 、及び基準コアと交差する確立された垂直軸から測定される任意の角度を記述する。ファイバが曲げられると、所与のコアにおける曲げ誘起ひずみの量は、コアが曲げ平面から分離される垂直距離  $d$  に正比例する。これは、外側コア c の指数  $n = 2$  についての右側の図面に例示されている。曲げ平面が角度  $\theta$  によって記述されるならば、ファイバ内のコアの螺旋状の巻き付け(helical wrapping)の性質を決定されることがある。ファイバの長さに沿う距離に従って、 $\omega$  は螺旋ファイバの回転周波数(spin frequency)によって定められる。

【 0 0 4 2 】

コアひずみ応答が再結合される(recombined)とき、これらのパラメータがファイバのひずみプロファイルの成分にどのように影響を与えるかを理解することは有用である。図 3 に示すパラメータに基づいて数学的モデルが確立される。これらのパラメータを測定することができるので、それらを使用してマルチコア光ファイバのひずみプロファイルのより正確な再結合(recombination)を提供することができる。これらのパラメータは特定のマルチコア光ファイバについて一度だけ測定される必要があるに過ぎず、同じマルチコア光ファイバの幾つかの又は全部の OFDR 後続測定のために使用されてよいことは注目値に値する。

【 0 0 4 3 】

先に説明したように、マルチコアファイバに加えられるひずみは、以下の 3 つの種類又はカテゴリ、即ち、曲げ誘起ひずみ (B)、トルクの結果としてのひずみ (R)、及び軸方向に加えられるひずみ (A) に入る。ファイバ内のコアのひずみ応答は、マルチコアファイバ内のその位置に基づいて、これらの全体的に加えられるひずみの成分を保有する。ファイバに沿う距離でのコアのひずみ応答  $\varepsilon_n$  を以下の方程式 (1) によって表すことができる。

【 数 1 】

$$\varepsilon_n = B_n(z) + R_n(z) + A_n(z) \quad (1)$$

ここで、 $n$  は、ファイバ内のコアを指定し、 $z$  は、ファイバ長に沿う指数(index)を表し、 $B$  は、ファイバの曲げに起因してコアが受けるひずみであり、 $R$  は、ファイバに加えられる捩れ又は捻れによってコア内に誘起されるひずみであり、 $A$  は、コアが受ける軸方向のひずみを表している。図 3 において確立されるモデルパラメータを使用してコアの位置に関して方程式 (1) 中の式を書き換えることによって、コア配置の変動についての補償を達成することができる。ファイバの曲げの結果としてコアが感知する曲げひずみ  $B$  を、以下の方程式 (2) において、(図 3 に示す) 曲げ平面に対するコアの接線方向距離  $d$  及び曲げの曲率に比例するように示すことができる。

【数 2】

$$B_n(z) = \alpha K(z) d_n(z) \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  は、定数であり、 $K$  は、ファイバの曲率であり、 $d$  は、曲げ平面からのコアの接線方向距離を表している。図 3 のモデルから、コアの位置に関して、接線方向距離  $d$  を以下のように表すことができる。

【数 3】

$$d_n(z) = r_n [\sin(\phi_n) \cos(\theta(z)) - \cos(\phi_n) \sin(\theta(z))] \quad (3)$$

10

ここで、 $r$  は、ファイバの軸からの径方向距離であり、 $\theta$  は、垂直軸から測定される角度を表し、 $\phi$  は、曲げ平面と水平軸との間の角度の測定値である。方程式 (2) 及び (3) を組み合わせると、以下が得られる。

【数 4】

$$B_n(z) = \alpha K(z) r_n [\sin(\phi_n) \cos(\theta(z)) - \cos(\phi_n) \sin(\theta(z))] \quad (4)$$

曲率項を分配し、2つの別個の成分として表現することによって、この式を単純化することができる。

20

【数 5】

$$B_n(z) = \alpha r_n [K_x(z) \sin(\phi_n) - K_y(z) \cos(\phi_n)] \quad (5)$$

ここで、 $K_x$  は、水平軸（ピッチ）についての曲率であり、 $K_y$  は、垂直軸（ヨー）についての曲率である。

【0044】

ファイバに加えらるる適度なレベルの捩れ（例えば、100度/メートル）について、一次項を使用してトルクによって誘発されるひずみをモデル化することができる。その場合、捩れひずみは、コア位置に関して以下のように表される。

30

【数 6】

$$R_n(z) = \beta r_n^2 \Phi(z) \quad (6)$$

ここで、 $\beta$  は、定数であり、 $\Phi$  は、長さの単位当たりの、ファイバが撓り合わされた（ロール）量である。第 1 の次数 (first order) まで、コアが受ける軸方向ひずみ  $A$  はファイバ内の全てのコアに共通であり、コアの位置に依存せず以下に式に到達すると仮定することもできる。

【数 7】

$$A_n(z) = \gamma E(z) \quad (7)$$

40

ここで、 $\gamma$  は、定数であり、 $E$  は、軸方向ひずみを表している。コア位置に関して式 (1) を書き換えると、以下の式が得られる。

【数 8】

$$\varepsilon_n(z) = \alpha r_n K_x(z) \sin(\phi_n) - \alpha r_n K_y(z) \cos(\phi_n) + \beta r_n^2 \Phi(z) + \gamma E(z) \quad (8)$$

50

## 【 0 0 4 5 】

この例示的なファイバの実施形態における4つのコアから測定されるひずみ信号を考慮すると、行列関係を以下のように構築することができる。

## 【数 9】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0(z) \\ \varepsilon_1(z) \\ \varepsilon_2(z) \\ \varepsilon_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha r_0 \sin(\phi_0) & -\alpha r_0 \cos(\phi_0) & \beta r_0^2 & \gamma \\ \alpha r_1 \sin(\phi_1) & -\alpha r_1 \cos(\phi_1) & \beta r_1^2 & \gamma \\ \alpha r_2 \sin(\phi_2) & -\alpha r_2 \cos(\phi_2) & \beta r_2^2 & \gamma \\ \alpha r_3 \sin(\phi_3) & -\alpha r_3 \cos(\phi_3) & \beta r_3^2 & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x(z) \\ K_y(z) \\ \Phi(z) \\ E(z) \end{bmatrix} \quad (9)$$

10

## 【 0 0 4 6 】

方程式(9)中のこの式は、繊維構造変動に従った形状ファイバ内の各々の独立したコアの個々のひずみ信号の再結合を可能にし、これらの信号をマルチコアファイバ構造全体に加えられるひずみに分類することを可能にする。方程式(9)から任意の数の線形結合(linear combinations)を導き出して、コアのひずみ応答をひずみプロファイルの成分に関連付ける式を創り出すことができる。

## 【 0 0 4 7 】

4つのパラメータ、即ち、水平軸(ピッチ)についての曲率 $K_x$ 、垂直軸(ヨー)についての曲率 $K_y$ 、捻れ(ロール)の量、及び軸方向ひずみ $E$ のみがファイバ内に存在する有意な変形であり、4つのコアにおける位相変形が正確に測定されるならば、追加的な又は補助的な又は冗長な(第5の)コアの位相がこの4つのコア測定値から計算されて、ファイバ内の補助的な又は冗長な(第5の)コアについての位相測定値と比較されてよい。補助的な(第5の)コアにおいて測定される位相が、補助的な(第5の)コアについての他の4つのコアによって予測される位相と異なるならば、対処すべき2つの可能性、即ち、5つのコアのうち少なくとも1つのコアの位相変形測定値が不正確であり、何らかの誤差があることを意味すること、又は列挙される4つのパラメータ以外のファイバの物理的変形が存在し、光学的形状感知モデル又はその基礎となる仮定が不完全であることを意味することがある。いずれの場合においても、電流測定値には欠陥があると想定され、計算される形状は信頼できず、潜在的な危険であると見做されることがある。

20

30

## 【 0 0 4 8 】

変数によって表されるファイバ内の補助的な又は冗長な(第5の)コアを含む以下の方程式を考慮する。

## 【数 10】

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ \Delta \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

40

## 【 0 0 4 9 】

行列 $M$ を構築して、物理的パラメータを計算し、第5コアにおいて測定されるひずみについてモデル化されるひずみからどれくらい外れるかを計算する。

## 【 0 0 5 0 】

方程式(9)は、4つだけより多いコアを含むように拡張させられてよい。方程式(11)は、5つのコアの例を示している。

## 【数 11】

50

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha r_0 \sin(\phi_0) & -\alpha r_0 \cos(\phi_0) & \beta r_0^2 & \gamma_0 \\ \alpha r_1 \sin(\phi_1) & -\alpha r_1 \cos(\phi_1) & \beta r_1^2 & \gamma_1 \\ \alpha r_2 \sin(\phi_2) & -\alpha r_2 \cos(\phi_2) & \beta r_2^2 & \gamma_2 \\ \alpha r_3 \sin(\phi_3) & -\alpha r_3 \cos(\phi_3) & \beta r_3^2 & \gamma_3 \\ \alpha r_4 \sin(\phi_4) & -\alpha r_4 \cos(\phi_4) & \beta r_4^2 & \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (11)$$

【 0 0 5 1 】

10

変数を名称変更して、表記法(notation)を整理する(clean up)。

【 数 1 2 】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \\ BY_4 & BX_4 & R_4 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (11A)$$

20

方程式 ( 1 1 及び 1 1 A ) 中の行列は、正方行列でない故に可逆でない。方程式 1 1 A は 2 つの方程式に分けられる。

【 数 1 3 】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (12A)$$

30

【 数 1 4 】

$$\varepsilon_4 = \begin{bmatrix} BY_4 & BW_4 & R_4 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (12B)$$

方程式 1 2 A は、方程式 9 の複製(reproduction)である。

40

【 0 0 5 2 】

結果は、可逆であり且つ行列 H と呼ぶ、方程式 ( 1 1 A ) 中の正方行列である。

【 数 1 5 】

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

50

【 0 0 5 3 】

以下の置換は、方程式 1 3 の結果を方程式 1 2 B に代入することによって行われる。

【 数 1 6 】

$$\varepsilon_4 = \begin{bmatrix} BY_4 & BW_4 & R_4 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

10

方程式 1 4 は、我々の物理モデル及び他の 4 つのコアにおいて測定されるひずみに基づいて、第 5 のコアにおいて予測されるひずみを計算する明確な方法を提供する。上記方程式は、以下を定義することによって、

【 数 1 7 】

$$\begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_4 & BW_4 & R_4 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (15)$$

20

並びに、以下を書くことによって、

【 数 1 8 】

$$\varepsilon_{4pred} = a\varepsilon_0 + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 \quad (16)$$

代数式に変形されて(reduced)よい。

【 0 0 5 4 】

30

誤差は、モデルに基づいて予想されるひずみ  $\varepsilon_{4pred}$  と、第 5 のコア内のひずみの実際の測定値  $\varepsilon_{4meas}$  との間の差である。

【 数 1 9 】

$$\Delta = \varepsilon_{4pred} - \varepsilon_{4meas} = a\varepsilon_0 + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 - \varepsilon_{4meas} \quad (17)$$

【 0 0 5 5 】

我々が以下を更に定め、

【 数 2 0 】

40

$$\begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{30} & h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (18)$$

$h_{nm}$  が方程式 1 3 中の上記行列 H のエントリ(記入事項)(entries)であるならば、行列実装(matrix implementation)が、第 5 のコア内のひずみがモデルによって予測されるひずみとどのように異なるかについての物理的パラメータ及び測定値 の計算のために

50

構築される。

【数 2 1】

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} & 0 \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} & 0 \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} & 0 \\ h_{30} & h_{31} & h_{32} & h_{33} & 0 \\ a & b & c & d & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

10

ここで、我々が元々探している行列 M は、以下によって与えられ、

【数 2 2】

$$M = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} & 0 \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} & 0 \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} & 0 \\ h_{30} & h_{31} & h_{32} & h_{33} & 0 \\ a & b & c & d & -1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

20

ここで、 $h_{nm}$  は、方程式 1 3 中の上記行列 H のエントリである。H 行列は、一連の歪みを等数の物理的パラメータに関連付けるのに対し、M 行列は、計算される誤差パラメータを含む。

【0 0 5 6】

実用的な例示的な実施形態では、ひずみ (E) 及び誤差 ( ) を独立して見出すために、他の 3 つのパラメータ ( 捩れ ( )、曲げ - x (  $K_x$  )、及び曲げ - y (  $K_y$  ) ) を決定し、これらの効果の全てについてファイバを較正する。

【0 0 5 7】

較正 ( キャリブレーション ) は、全ての 5 つのコアについてコア幾何学的形状 ( 半径及び角度 ) を決定することによって開始する ( 図 3 を参照 )。異なる張力でコア内のひずみを測定することによって、方程式 ( 1 1 ) についてのパラメータの値を決定する。これらのデータセットから、5 つのコアについての OFDR 測定値からファイバのピッチ (  $K_x$  )、ヨー (  $K_y$  )、捩れ ( )、ひずみ ( E )、及び誤差 ( ) を計算するために、方程式 ( 1 1 ) 中の行列を決定する。

30

【数 2 3】

$$\begin{bmatrix} pitch \\ yaw \\ twist \\ strain \\ error \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ \Delta \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = (21)$$

40

【0 0 5 8】

4 つの低力刺激 ( low-force stimuli ) ( ここでは温度は考慮されていない ) を方程式 ( 1 1 ) において定義される 5 つのコア内のひずみ 0 ~ 4 に関連付ける行列に留意して、ファイバを平面内の連続的な曲げ内に配置する。ファイバがひとたびこの構成に配置されると、マルチチャネル OFDR システムは、マルチコア光ファイバ内の各コアの分散ひずみ応答を測定する。結果として得られるひずみ応答信号は、典型的には、外側コアが曲げを通じて進むときに、外側コアの螺旋状巻き付けの回転周波数と一致する周波数で圧縮

50

と伸長との間で交番する。この往復動(oscillation)の大きさも、ファイバの長さに沿って徐々に変化するはずである。何故ならば、この大きさは、上述のループの曲げ半径に比例するからである。次に、これらのひずみ応答は、理想的なファイバ構造からの変化を定量化するパラメータの抽出のために、1以上のデータプロセッサに提供される。

【0059】

コア場所を決定するために、振幅及び位相の両方を備える複素数値の信号(complex-valued signal)が、OFDRシステムによって提供される実数値のひずみ応答(real-valued strain response)から決定される。フーリエ変換は、フィルタが螺旋状の巻き付けの回転周波数で測定される散乱信号に適用されることを可能にする。このフィルタリングされる信号の逆フーリエ変換は、複素数値のスピン信号を生成する。この複素回転信号(complex spin signal)の振幅は、ファイバの中立の中心軸からのコアの径方向分離距離に比例する。複素回転信号の位相応答は、ファイバの幾何学的形状内のコアの角度位置に基づく。コアの複素回転信号を基準コアの回転信号と比較することは、基準コアに対するそのコアの位置を決定する。よって、コアの回転信号と基準コア回転信号との間の複素商(complex quotient)の独立変数(引数)(argument)を抽出することによって基準コアを二等分する垂直軸に対して全ての角度位置を見出すことができる。振幅を抽出することは、基準コアに対するコアの径方向分離の比測定値をもたらす。

10

【0060】

これから、以下の行列が占められ(populated)、そこでは、曲げ応答の大きさは、依然として未知である。何故ならば、螺旋の平面内構成(X及びY)におけるファイバの曲げ振幅は依然として未知だからである。

20

【数24】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha Y_0 & -\alpha X_0 & 0 & 0 \\ \alpha Y_1 & -\alpha X_1 & 0 & 0 \\ \alpha Y_2 & -\alpha X_2 & 0 & 0 \\ \alpha Y_3 & -\alpha X_3 & 0 & 0 \\ \alpha Y_4 & -\alpha X_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (22)$$

30

その形状を変えることなく、ファイバに捩れを加える。これから、捩れのみに対する各コア応答(R)が決定されてよい。

【数25】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha Y_0 & -\alpha X_0 & R_0 & 0 \\ \alpha Y_1 & -\alpha X_1 & R_1 & 0 \\ \alpha Y_2 & -\alpha X_2 & R_2 & 0 \\ \alpha Y_3 & -\alpha X_3 & R_3 & 0 \\ \alpha Y_4 & -\alpha X_3 & R_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (23)$$

40

ファイバを既知の曲げに置くことは、曲げ係数(B)についての既知の振幅をもたらす。

【数26】

50

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & 0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & 0 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & 0 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & 0 \\ BY_4 & -BX_3 & R_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (24)$$

ファイバを直線張力 ( G ) 内に置くことは、張力 ( G ) に対する各コアの応答の決定を可能にする。 10

【数 2 7】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 \\ BY_4 & -BX_3 & R_4 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \end{bmatrix} \quad (25)$$

20

この行列を使用することによって、我々は上述のような行列 M を見出すことができる。

【 0 0 6 1】

図 4 は、5 つのコアのファイバを使用する形状感知システムのモデル及び推定から独立して誤差を特定する光周波数領域反射測定法 ( O F D R ) ベースの形状感知システムの第 1 の例示的な実施形態の概略図を示している。

【 0 0 6 2】

O F D R ベースの分散型ひずみ感知システムは、光源 1 1 と、撚り合わされた呼掛器 1 5 (interferometric interrogator) と、レーザモニタネットワーク 1 2 と、マルチコア形状感知ファイバである光感知ファイバ 1 7 と、取得電子機器 1 8 (acquisition electronics) と、データプロセッサ 2 0 とを含む。単一のチャンネルが単一のファイバコアに対応する。O F D R 測定の間、チューナブル光源 1 1 (同調可能な光源) (tunable light source) が、ある範囲の光周波数を通じて掃引される。この光は光カプラを用いて分割され、個別の干渉計 (interferometers) に経路制御される (routed)。レーザモニタネットワーク 1 2 が、測定スキャンを通じて絶対波長基準を提供するシアン化水素 ( H C N ) 気体電池 (gas cell) を含む。レーザモニタネットワーク 1 2 内の干渉計を使用して、光源が周波数範囲を通じてスキャンされるときと同調速度 (tuning rate) の変動を測定する。 30

【 0 0 6 3】

撚り合わされた呼掛器 1 5 は、マルチコア形状感知ファイバである感知ファイバ 1 7 の長さ内のそれぞれの個別のコアに接続されている。光は、ファイバ 1 7 内の 5 つのコア導波路 A , B , C F , D , E に対応する、概ね 1 5 で参照される 5 つの撚り合わされた呼掛器の測定アームを通じて感知ファイバ 1 7 に入る。次に、感知ファイバ 1 7 内の各コアからの散乱光が、対応する撚り合わされた呼掛器 1 5 の基準アームに沿って進む光と干渉させられる。コアという用語を使用するが、本技術は紡糸ファイバにおいて使用することができる他の種類の導波路にも当て嵌まる。マルチコアファイバ内の導波路との干渉型呼掛器の各ペアリングを取得チャンネル (acquisition channel) と呼ぶ。チューナブル光源 1 1 が掃引されるとき、各チャンネルは同時に測定され、各チャンネルから結果として得られる干渉パターンは、追加的な撚り合わされた呼掛器 1 5 のために適合されるデータ取得電子 40 50

機器 18 に経路制御される。各チャネルは、独立して同一に処理される。

【0064】

一連の光検出器（例えば、フォトダイオード）が、感知ファイバからの各コアからの干渉パターン、気体電池、及びレーザモニタネットワークからの光信号を、電気信号に変換する。データ取得電子機器 18 内の 1 以上のデータプロセッサは、レーザモニタネットワーク 12 からの情報を使用して、パターンが光周波数内で一定の増分を有するよう感知ファイバ 16 の検出される干渉パターンをサンプリングし直す(resample)。このステップは、フーリエ変換操作の数学的必要条件である。ひとたびサンプリングし直されると、システムコントローラデータプロセッサ 20 によってフーリエ変換を行い、時間領域において光散乱信号が生成する。時間領域において、光散乱事象の振幅は、ファイバの長さに沿う遅延に対して描かれている。その光が所与の時間の増分内に進む距離を使用して、この遅延を感知ファイバに沿う長さの測定値に変換することができる。換言すると、光散乱信号は、各散乱事象をファイバに沿う距離の関数として示す。サンプリング期間(sampling period)は、空間分解能(spatial resolution)と呼ばれ、チューナブル光源 11 が測定中に掃引される周波数範囲に反比例する。

【0065】

ファイバがひずまされると(strained)、ファイバの物理的長さが変化するのに応じて、局所的な光散乱がシフトする。これらのひずみ(distortions)は、非常に繰り返し可能である。故に、ファイバについて検出される光散乱の OFDR 測定値を、非ひずみ状態におけるファイバの基準パターンとして機能するメモリに保持することができる。次に、システムコントローラデータプロセッサ 20 によって、ファイバがひずみの下にあるときに引き続き測定される散乱信号をこの基準パターンと比較して、感知ファイバの長さに沿う局所的な散乱の遅延におけるシフトの測定値を得てよい。遅延におけるこのシフトは、基準散乱パターンと比較するとき、連続的に徐々に変化する光位相信号として現れる。この光位相信号の導関数は、感知コアの物理的な長さの変化に正比例する。物理的な長さにおける変化をひずみに対して調整する(増減させる)(スケールリングする)ことにより、感知ファイバに沿うひずみの連続的な測定値を生成してよい。

【0066】

システムコントローラデータプロセッサ 20 に連結されるデータプロセッサ 22 は、実際の光コア構成と最適な光コア構成との間の変動を説明するよう OFDR 測定値を較正し或いは他の方法で補償するために使用されるファイバ 17 内のコア a, b, c, d, e の実際の物理的構成に関するパラメータ 24 を抽出する。まず、最適なマルチコアファイバ構成からの変形を記述する上記で詳細に記載した数学的モデルが確立され、「最適な」(optimal)という用語は、既知の構成及び未知の構成を含む。次に、マルチコアファイバ内の光コアの物理的特性の変動を補償するパラメータが定められる。

【0067】

図 5 は、5 つのコアの光学形状感知ファイバを較正するためのフローチャート図である。初めに、マルチコアファイバを直線の非ひずみ構成に配置し、上述のように OFDR 測定を行い(ステップ S1)、結果として得られる基準状態パラメータを格納する(ステップ S2)。次に、マルチコアファイバを、平坦な平面、螺旋形状(例えば、ネジ)などのような、既知の構成に構成する。非限定的な例では、マルチコアファイバを平坦な平面内に構成して(ステップ S3)、ファイバ内のコア間の相対的な幾何学的形状を計算する(ステップ S4)。この構成に捩れを加え(ステップ S5)、捩れ応答を決定する(ステップ S6)。次に、ファイバを既知の曲げ位置に構成し(ステップ S7)、コア幾何学的形状の振幅値をもたらす曲げ利得(bend gain)を計算する(ステップ S8)。ファイバを張力の下に置き(ステップ S9)、各コアについての張力応答を計算する(ステップ S10)。その場合には、曲げ、ひずみ及び捩れに対する 5 つのコアの応答を記述する、上記方程式(25)内で行列を埋めるために必要とされる値が利用可能であり(ステップ S11)、方程式(15)~(20)に記載するステップを使用して、行列を計算することができる。次に、誤差項を使用して、ピンチのようなその形状感知ファイバを使用する形状

感知用途における 1 以上の誤差、電子機器内の誤差などを検出する。

【0068】

図 6 は、第 1 の例示的な実施形態に従った 4 つの一次コアと 1 つの補助コアとを有する較正された形状感知ファイバを使用して形状感知システムにおける誤差を検出するためにシステムコントローラによって実行されるフローチャート図である。最初に、較正された形状感知ファイバを形状感知のために所望に配置し、5 つのコア（4 つの一次コア及び 1 つの二次コア（補助コア又は冗長コアとも呼ぶ））の各々について OFDR 散乱測定値を取得する（ステップ S 20）。データプロセッサ 22 は、このファイバについての各々の対応するコアの較正された基準散乱パターンと比較すると、これらの散乱測定値から決定される各コアについて光位相信号を追跡する（ステップ S 21）。光位相信号の各々は、感知ファイバ内のそのそれぞれのコアの長さに沿う局所散乱体の遅延におけるシフトの測定値である。この光位相信号の導関数を、そのそれぞれのコアの物理的長さの変化に正比例する 4 つの一次コアの各々について計算する（ステップ S 22）。4 つの位相導関数の各々を方程式（20）からの変換行列 M で乗じて、加えられる曲げ、ひずみ、及び擦れを決定し、次に、5 番目を記述するパラメータを使用して、補助コアの予測される位相導関数（ステップ S 23）及び補助コアの測定される位相導関数を生成する。

10

【0069】

補助コアの予測される測定値と補助コアの実際の測定値との間の差が、所定の量（1 つの非限定的な例の量は 0.5 ラジアンであってよい）よりも多い量だけ異なるならば、OFDR 形状感知測定値は信頼できないと印される、且つ / 或いは、以下の行為、即ち、ディスプレイのために故障信号を生成すること、形状感知ファイバと関連付けられるシステム又は機械の動作を停止すること、アラームを生成すること、及び / 又は他の予防的若しくは保護的行為を行うことのうちの 1 以上が取られるか或いは開始される（ステップ S 26）。

20

【0070】

（第 2 の例示的な実施形態）

温度はコアの見かけの長さを変化させることもでき、システムにおける第 5 の「自由度」を表す。多くの形状感知システムは、ファイバの長さに沿う温度変化とファイバの長さに沿う軸方向ひずみ変化とを区別しない。

【0071】

温度及びひずみに対する形状感知光ファイバの応答の差によって課される誤差を緩和し或いは補償する形状感知システムを次に記載する。換言すれば、第 2 の例示的な実施形態における形状感知モデルは、形状感知計算における温度の影響に明示的に対処し且つ形状感知計算における温度の影響を補償する。対照的に、第 1 の例示的な実施形態はそうでなく、それは第 1 の実施形態における形状感知決定に対するあらゆる温度効果が、上述の誤差計算の部分として検出されることを意味する。

30

【0072】

しかしながら、この第 2 の例示的な実施形態では、第 5 のコアが、撚り合わされたマルチコア光ファイバ内の他の 4 つの一次コアと異なる温度依存 (temperature dependence) を有する 5 つの一次コアのうちの一つとして組み込まれている。加えて、第 6 の補助コアが追加されている。以下の記述の大部分は、これらの 5 つ及び 6 つのコアの例の脈絡にあるが、第 1 及び第 2 の実施形態において記載した原理は、異なる数のコアを備える撚り合わされたマルチコアファイバに当て嵌まるのが理解されるべきである。温度感知又は補助コアは、好ましくは、コア間の結合を低減する或いは最小限に抑えるような方法でファイバ内に配置される。

40

【0073】

1 つの例示的な実施形態において、第 5 の一次コアは、他の 4 つの一次コアの屈折率とは異なる屈折率を有することによって、異なる熱依存 (thermal dependence) を有する。その異なる屈折率を達成する例示的な方法は、異なる材料で構成された及び / 又は異なってドーブされた第 5 の一次コアを含む。例えば、他の 4 つの一次コアと異なる（ファイ

50

バの中心により近い又はファイバの中心から遠い)半径に第5の一次コアを配置すること、第5の一次コアに異なる(他のコアよりも大きい又は小さい)幾何学的形状を提供することなどのような、異なる温度依存を達成する他の方法が可能である。

【0074】

一次コアのうちの4つは、ゲルマニウムでドーブされ、第5の一次コアは、ホウ素及びゲルマニウムで共ドーブされて(co-doped)よい。ホウ素ドーピング(doping)は、偏光維持光ファイバに熱応力を誘発し、その結果、ホウ素を含むコアの熱応答は、典型的なゲルマニウムドーブされたファイバと比べて異なる熱依存を有する。他のドーパントを使用して、マルチコアファイバにおける典型的にドーブされたファイバと比べて異なる熱依存を生成してよいが、例示的な実施形態において、ホウ素はゲルマニウムとの共ドーパント(co-dopant)としても使用される。何故ならば、その共ドーピング(co-doping)は、典型的なゲルマニウムドーブされたファイバと比べて、より感光性の誘導コアも形成するからである。更に、ホウ素は、更なる実用上の利点を提供する、光ファイバのための比較的一般的なドーパントである。

10

【0075】

図7は、ホウ素 - ゼラニウム共ドーブされたコア(boron-geranium co-doped core)及びゼラニウムドーブされたコア(geranium doped core)についての屈折率対温度のグラフを示している。温度が上昇すると、ホウ素 - ゲルマニウム共ドーブされたコア(boron-germanium co-doped core)の屈折率は、典型的なゲルマニウムドーブされたコア(germanium-doped core)の屈折率とは異なる(より高い)速度で増加する。第5の一次コアは、温度変化に対して異なって反応し、従って、温度を補償するために使用される追加的な線形独立した情報源(linearly-independent source of information)を提供する。

20

【0076】

マルチコア光ファイバの構造の変動に起因するファイバの位置及び/又は形状、より一般的にはひずみの決定において、誤差及び/又は不確実性が生じる。変動の第1のカテゴリは、コア配置である。この変動は、所与のコアの径方向分離及び角度位置の両方を設計された又は所望の理想値と異なるようにさせ或いは単に未知であるようにさせる。変動を定量化することができるようにマルチコアファイバの断面に対するコアの位置を記述する数学的モデルが生成される。

30

【0077】

ガラスは比較的硬い材料であるので、ファイバがひずまされると、マルチコアファイバの断面の幾何学的形状は保存されると推測することができる。これが想定することは、ファイバがひずまされると、所与の断面内のコアの相対的な位置が一定なままであるということである。これが意味することは、ファイバをひずませることができ、理想的な構成からのコア配置の変動を正確に決定するためにファイバを依然として使用することができることである。6つのコア(a~f)を備えるファイバについてのコア配置の変動を説明するコア位置モデルが図8に描かれている。補助コア又は冗長コアは、図8中にfと印され、周辺コアb~eについての半径距離と周辺コアfについての半径距離との間の差は、極僅かな差よりも大きい。例えば、周辺コアb~fの全てについての平均半径距離(average radius distance)で除した差は、0.10以上である。別の言い方をすれば、その差は、全ての周辺コアb~fについての平均半径距離の10%である。図3におけるように、補助又は冗長コアfは、代替的に、周辺コアb~eよりも実質的に長い半径を有してよく、再び、径方向距離の差は、全てのコアb~fについての平均半径距離の10%である。幾つかの実施形態において、平均半径距離(average radius distance)は、平均半径距離(mean radius distance)として計算される。

40

【0078】

代替的な例示的な実施形態において、補助的な冗長コアfは、他の周辺コアと同じ半径に配置される。補助的な冗長コアはデータの信頼性を確認するために依然として使用されてよいが、この構成は中心コアでの誤差を検出するのに余り効果的でない。

50

【 0 0 7 9 】

第 1 の実施形態において既に上記で提示した式と一致して、温度が独立変数であることが可能にされるならば、第 6 のコアを追加することは、我々の開始方程式を、以下から

【数 2 8】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_4 & R_4 & G_4 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \end{bmatrix} \quad (26)$$

10

以下に変更する。

【数 2 9】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & BX_4 & R_4 & G_4 & T_4 \\ BY_5 & BX_5 & R_5 & G_5 & T_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \end{bmatrix} \quad (27)$$

20

最後の行を引くと、ファイバの物理的状態（曲げ、捻れ、ひずみ、及び温度）によって予測されるような、第 6 のコア内のひずみ  $\varepsilon_5$  について  $\text{pred}$  の式が生成される。

【数 3 0】

$$\varepsilon_5 = \begin{bmatrix} BY_5 & BX_5 & R_5 & G_5 & T_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \end{bmatrix} \quad (28)$$

30

他の 5 つのコアからこれらの物理的パラメータの全てを決定することができる。

【数 3 1】

$$\begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_4 & R_4 & G_4 & T_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \end{bmatrix} \quad (29)$$

40

置換を使用して以下を得る。

【数 3 2】

50

$$\varepsilon_{5pred} = [BY_5 \quad BX_5 \quad R_5 \quad G_5 \quad T_5] \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_3 & R_4 & G_4 & T_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} \quad (30)$$

それは第 6 のコア内のひずみの予測される値についての閉形式解である。これを以下の行 10  
操作に変形して、

【数 3 3】

$$[a \quad b \quad c \quad d \quad e] = [BY_5 \quad BX_5 \quad R_5 \quad G_5 \quad T_5] \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_3 & R_4 & G_4 & T_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (31)$$

20

第 6 のコアで予測されるひずみの代数式を生成することができる。

【数 3 4】

$$\varepsilon_{5pred} = a\varepsilon_0 + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 + e\varepsilon_4 \quad (32)$$

予測されるひずみから測定されるひずみ  $\varepsilon_{5meas}$  を減算すると、以下の誤差項 がも  
たらされる。

【数 3 5】

$$\varepsilon_{5pred} - \varepsilon_{5meas} = \varepsilon_{error} = \Delta = a\varepsilon_0 + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 + e\varepsilon_4 - \varepsilon_{5meas} \quad (33)$$

30

物理的パラメータの逆行列が計算され、エントリの行列として表される。

【数 3 6】

$$\begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_3 & R_4 & G_4 & T_4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} & h_{04} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{30} & h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{40} & h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} = H \quad (34)$$

40

全ての物理的パラメータ並びに測定されたひずみがどれほど良くモデルに一致するかにつ  
いての測定値である新しいパラメータ の計算のために、以下の簡潔な表現が構築される

【数 3 7】

50

$$M \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} & h_{04} & 0 \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & 0 \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & 0 \\ h_{30} & h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & 0 \\ h_{40} & h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & 0 \\ a & b & c & d & e & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \\ \Delta \end{bmatrix} \quad (35)$$

10

## 【 0 0 8 0 】

第2の実施形態についての実際的な例では、ひずみ（E）及び温度（T）を独立して見出すために、他の3つのパラメータ（捻れ（ $\Phi$ ）、曲げ-x（ $K_x$ ）及び曲げ-y（ $K_y$ ））が決定され、ファイバは、これらの効果の全てについて較正される。

## 【 0 0 8 1 】

較正は、全ての5つのコア（図8を参照）についてのコア形状（半径及び角度）を決定し、次に、管状炉（tube furnace）又は他の適切な温度制御環境の内側にファイバを吊り下げることによって、開始する。異なる温度及び異なるひずみでコア内のひずみを測定することによって、方程式（27）のためのパラメータ  $G_n$  及び  $T_n$  についての値が決定される。6つのコアの光感知ファイバは、張力下のファイバで取得された追加的なデータのセットと、ファイバが加熱されたデータのもう1つのセットで較正される。5つのコアについてのOFDR測定値からファイバのピッチ（ $K_x$ ）、ヨー（ $K_y$ ）、捻れ（ $\Phi$ ）、ひずみ（E）、及び温度（T）を計算するために、これらのデータセットから方程式（29）内の行列が決定される。

20

## 【 数 3 8 】

$$\begin{bmatrix} \text{pitch} \\ \text{yaw} \\ \text{twist} \\ \text{strain} \\ \text{temperature} \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \\ \Delta \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} \quad (36)$$

30

## 【 0 0 8 2 】

較正手順及び方程式は、温度についての追加的な較正を伴って、第1の実施形態で使用されたものと同様である。ファイバの温度を上昇させることは、各コアの温度応答（T）の決定を可能にする。

40

## 【 数 3 9 】

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BY_0 & -BX_0 & R_0 & G_0 & T_0 \\ BY_1 & -BX_1 & R_1 & G_1 & T_1 \\ BY_2 & -BX_2 & R_2 & G_2 & T_2 \\ BY_3 & -BX_3 & R_3 & G_3 & T_3 \\ BY_4 & -BX_4 & R_4 & G_4 & T_4 \\ BY_5 & -BX_5 & R_5 & G_5 & T_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ \Phi \\ E \\ T \end{bmatrix} \quad (37)$$

50

## 【 0 0 8 3 】

これはピッチ、ヨー、捻れ、張力、及び温度の集合線形効果に対する個々のコア応答に関連する行列を完成させる。この行列を使用して前述のような物理的パラメータの全て及び誤差項を計算する。

## 【 0 0 8 4 】

図 9、温度を補償し、6つのコアのファイバを使用する形状感知システムの推定及びモデルから独立した誤差を特定する、OFDRベースの形状感知システムの第2の例示的な実施形態の概略図を示している。図 9 は、ファイバ 17 内に6つのコア ( a ~ f ) を収容する処理及び光学系の追加を伴って、図 4 に類似する。

## 【 0 0 8 5 】

撚り合わされた呼掛器 15 は、感知ファイバ 17 の長さ内のそれぞれの個々のコアに接続されている。光はファイバ 17 内の6つのコア導波路 a , b , c , d , e , f に対応する、概ね 15 で参照される5つの撚り合わされた呼掛器の測定アームを通じて、感知ファイバ 17 に入る。次に、感知ファイバ 17 の各コアからの散乱光が、対応する撚り合わされた呼掛器 15 の基準アームに沿って進む光と干渉させられる。チューナブル光源 11 が掃引されると、各チャンネルは同時に測定され、各チャンネルから結果的に得られる干渉パターンは、追加的な撚り合わされた呼掛器 15 のために適合されたデータ取得電子機器 18 に経路制御される。各チャンネルは、上述の OFDR 手順を使用して、それだけでなく温度感知及び誤差検出コアも処理して、独立して同一に処理される。

## 【 0 0 8 6 】

図 10 は、6つのコアの光学形状感知ファイバを較正するためのフローチャート図である。ステップ S 1 ~ S 11 は、図 5 と同じである。加えて、ファイバは、温度制御された環境内の高温にファイバを曝し ( ステップ S 12 ) 、各コアについて温度応答を計算する ( ステップ S 13 ) 。次に、上述の方程式 ( 37 ) 内で行列を埋めるために必要とされる値が利用可能であり ( ステップ S 11 ) 、その行列 M を計算し ( 方程式 ( 31 ) ~ ( 35 ) ) 且つ使用して、その形状感知ファイバを使用する形状感知用途における温度を補償することができ、あらゆる誤差を検出することができる。

## 【 0 0 8 7 】

図 11 は、第2の例示的な実施形態の形状感知システムにおいて誤差を検出するためのフローチャート図である。最初に、較正された形状感知ファイバを形状感知のために所望に配置し、6つのコアの各々についての OFDR 散乱測定値を取得する ( ステップ S 30 ) 。データプロセッサ 22 は、このファイバについての対応する各々の対応するコアのための較正された基準散乱パターンと比較して、これらの散乱測定値から決定される各コアについての光位相信号を追跡する ( ステップ S 31 ) 。光位相信号の各々は、感知ファイバ内のそのそれぞれのコアの長さに沿う局所散乱体の遅延におけるシフトの測定値である。この光位相信号の導関数を5つの一次コアの各々について計算し、それはそのそれぞれのコアの物理的長さの変化に正比例する ( ステップ S 32 ) 。6つの位相導関数の各々を行列 M によって乗じて、加えられる曲げ、捻れ、ひずみ、及び誤差項を計算する。この誤差項が特定の大きさを超えるならば、OFDR 形状感知測定値は信頼できないと印され、且つ / 或いは、以下の行為、即ち、ディスプレイのために故障信号を生成すること、形状感知ファイバと関連付けられるシステム又は機械の動作を停止すること、アラームを生成すること、及び / 又は何らかの他の予防的或いは保護的な行為を取ることのうちの1以上の行為が取られるか或いは開始される。 ( ステップ S 36 ) 。

## 【 0 0 8 8 】

温度感知が第2の実施形態において追加されたのと同じように新しい感知パラメータが追加されるならば、余剰コアが冗長性のためにある。1よりも多くの冗長コアの追加は、上述のアプローチを使用して容易に適応され、形状感知測定の信頼性及び完全性の更なる保証をもたらす。

## 【 0 0 8 9 】

所与の項目が「幾つかの実施形態」、「様々な実施形態」、「特定の実施形態」、「特定

10

20

30

40

50

の例示的な実施形態」、「幾つかの例示的な実施形態」、又は「例示的な実施形態」内に存在することが本明細書中に記載されているときにはいつでも、或いは任意の他の類似の言語が使用されるときにはいつでも、所与の項目は少なくとも1つの実施形態に存在するが、必ずしも全ての実施形態に存在しないことが理解されるべきである。前述と一致して、ある行為(action)が行われて「よい」、行われることが「できる」、或いは行われ「得る」こと、ある構成、要素、若しくはコンポーネントが所与の文脈に含められて「よい」、含められることが「できる」、或いは含められ「得る」若しくは所与の文脈に適用可能であること、又は所与の項目が所与の属性を保有して「よい」、保有することが「できる」、或いは保有し「得る」ことが本明細書中に記載されているときにはいつでも、又は「よい」、「できる」若しくは「得る」という用語を含む任意の類似の成句が使用されるときにはいつでも、所与の王位、構成、要素、コンポーネント、属性などは、少なくとも1つの実施形態に存在するが、必ずしも全ての実施形態様に存在しないことが理解されるべきである。本明細書中で使用する用語及び成句並びにそれらの変形は、他のことが明示的に述べられていない限り、限定的というよりもむしろ開放端として解釈されるべきである。前述のことの例として、「及び/又は」は、関連する列挙された項目のうち1以上の項目のありとあらゆる組み合わせを含む(例えば、a及び/又はbは、a、b、又はa及びbを意味する)。単数形の表現は、「少なくとも1つ」、「1以上」、又は同等のことを意味するものと理解されるべきである。「例」という用語は、議論の下にある主題の例を提供するために使用されており、その排他的又は限定的なリストを提供するために使用されていない。「含む」(“comprise”)及び「含む」(“include”)という用語(並びにそれらの他の活用形及び他の変形)は、関連する列挙された項目の存在を特定するが、1以上の他の項目の存在又は追加を排除しない。ある項目が「任意的」なものとして記載されているならば、そのような記述は、他の項目も任意的でないことを示すように理解されない。

10

#### 【0090】

本明細書で使用するときに、「非一時的なコンピュータ可読記憶媒体」は、レジスタ、キャッシュメモリ、ROM、(D-RAM、S-RAM、又は他のRAMのような)半導体メモリデバイス、フラッシュメモリのような磁気媒体、ハードディスク、光磁気媒体、CD-ROM、DVD、ブルーレイディスク、又は非一時的な電子データ格納のための他の種類のデバイスを含む。「非一時的なコンピュータ可読記憶媒体」という用語は、一時的な伝搬する電磁信号を含まない。

30

#### 【0091】

様々な実施形態を詳細に示し且つ記載したが、請求項は特定の実施形態又は例に限定されない。本技術は、当業者に明らかになることがある他の実施形態を完全に包含する。上記記述のいずれも、任意の特定の要素、ステップ、範囲、又は機能が、請求項の範囲内に含まれなければならないよう本質的であることを暗示するものとして理解されるべきでない。特許される主題の範囲は、請求項によってだけ定められる。法的保護の範囲は、請求項中に引用される用語及びそれらの均等物によって定められる。当業者に知られている上述の好ましい実施形態の要素に対する全ての構造的及び機能的な均等物は、本明細書中に参照として明示的に援用され、本請求項によって包含されることが意図される。その上、あるデバイス又は方法が本請求項によって包含されるために、そのデバイス又は方法は、記載する技術によって解決されるべきありとあらゆる問題に対処する必要はない。如何なる請求項も、「(～のための)手段」又は「(～のための)ステップ」という用語使用されない限り、35 USC § 112の第6項を呼び出すことを意図しない。更に、この明細書中の如何なる実施形態、構成、コンポーネント、又はステップも、その実施形態、構成、コンポーネント、又はステップが請求項中に列挙されているか否かに拘わらず、公衆に捧げられることを意図しない。

40

【図面】

【図 1】

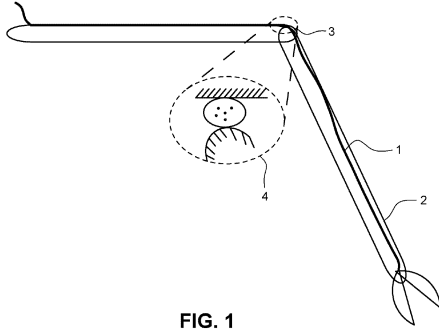


FIG. 1

【図 2】

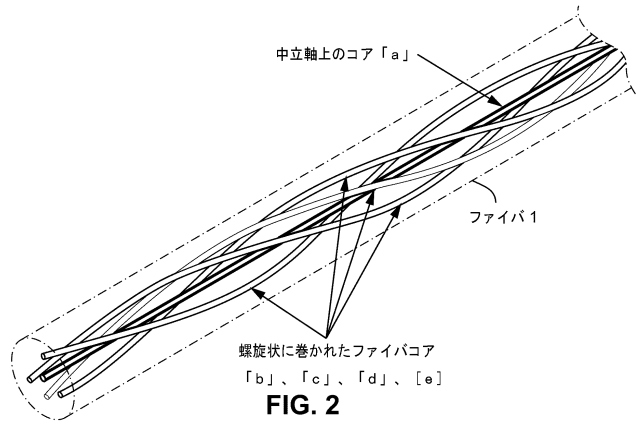


FIG. 2

10

【図 3】

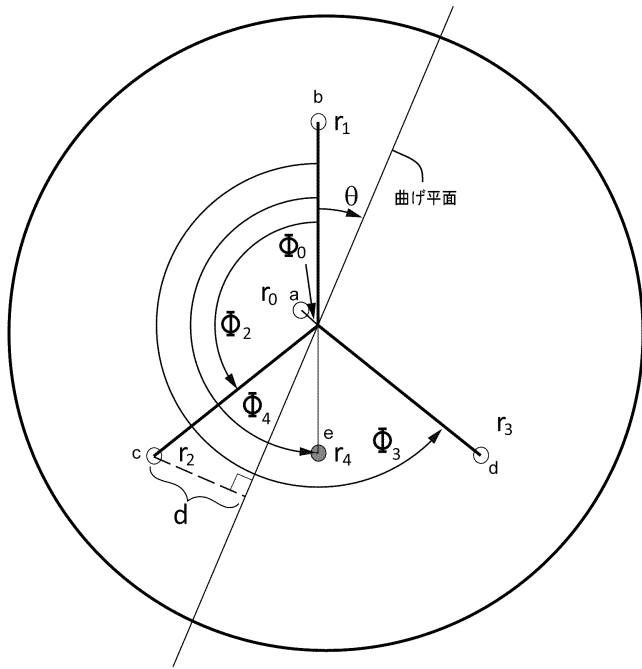


FIG. 3

【図 4】

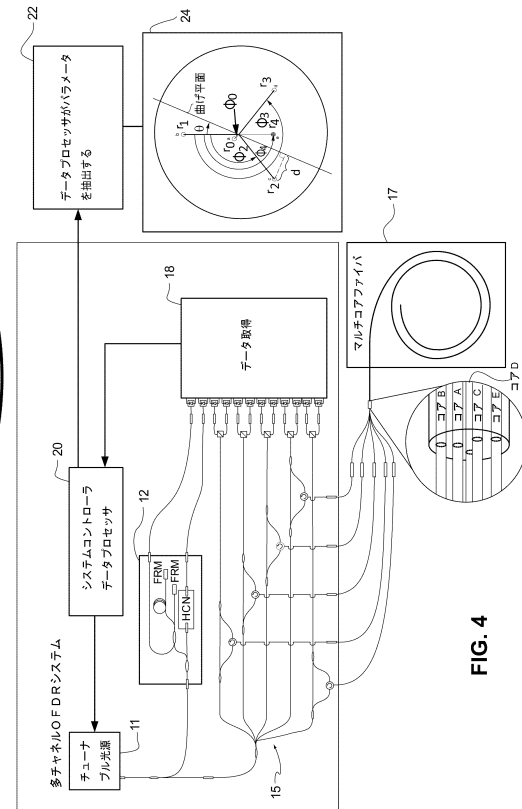


FIG. 4

20

30

40

50

【 図 5 】

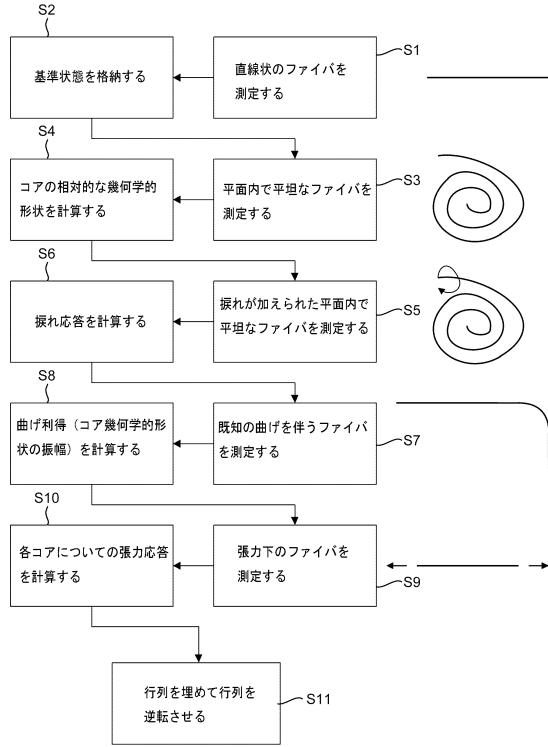


FIG. 5

【 図 6 】

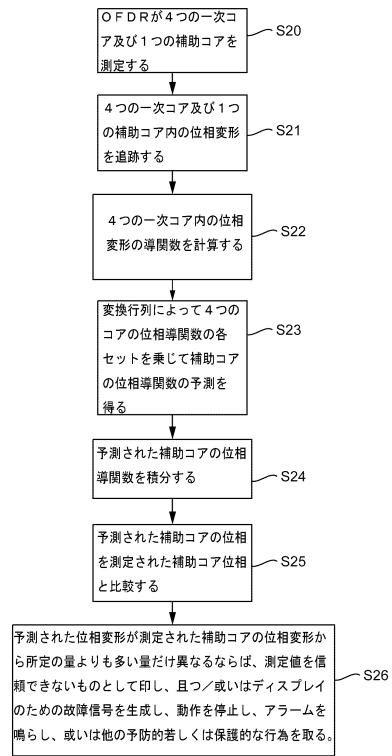


FIG. 6

10

20

【 図 7 】

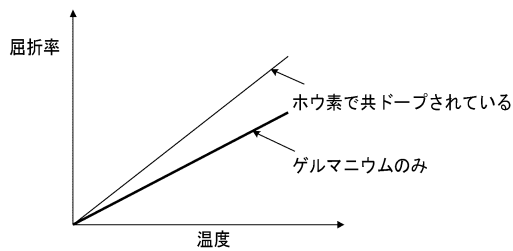


FIG. 7

【 図 8 】

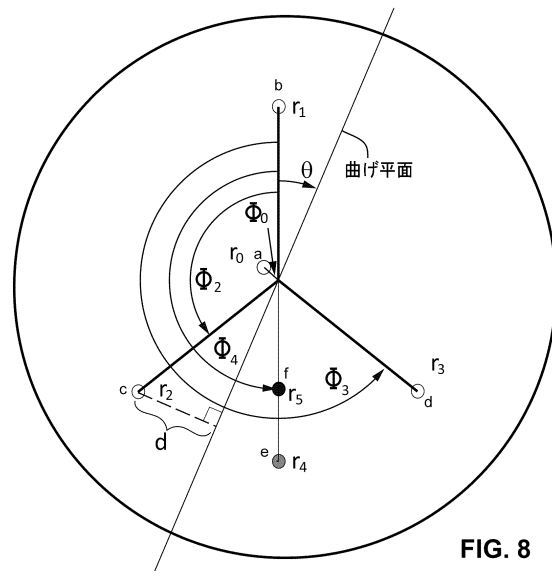


FIG. 8

30

40

50

【 図 9 】

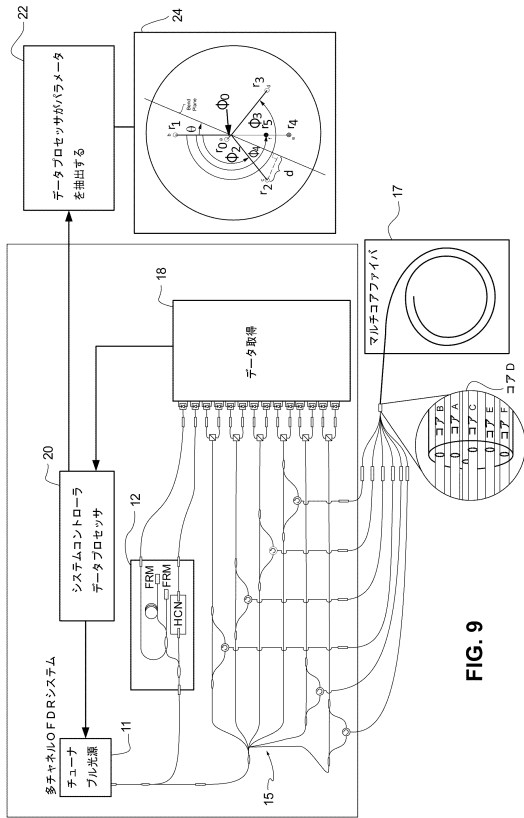


FIG. 9

【 図 10 】

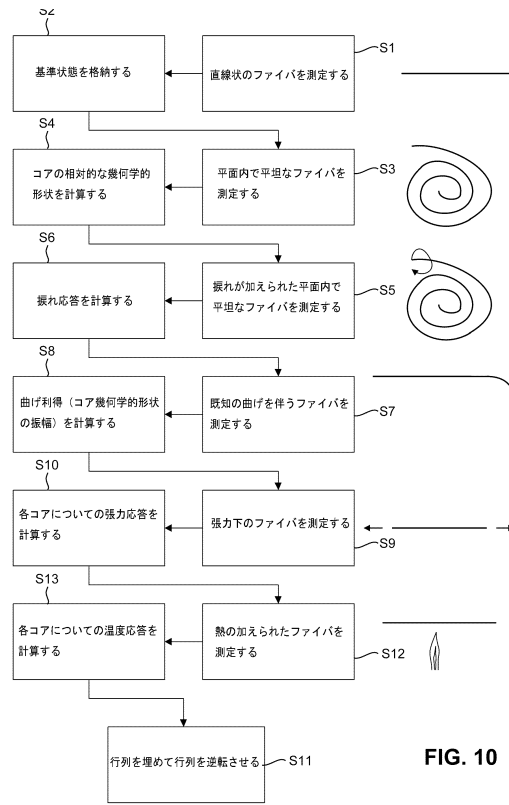


FIG. 10

【 図 11 】

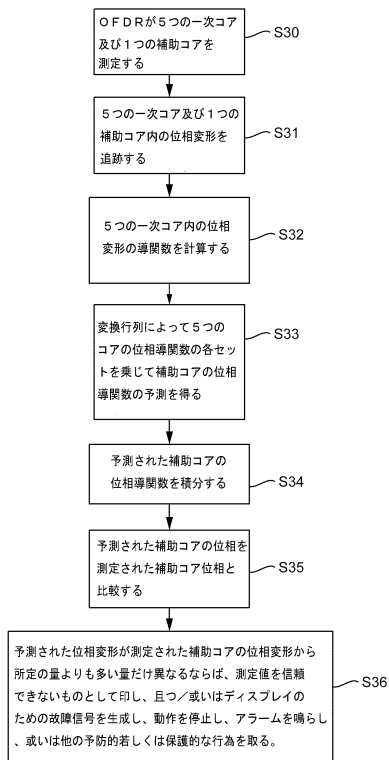


FIG. 11

2022019749000052.pdf

10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- ード 1020
- (72)発明者 ギッフォード, ダウン  
アメリカ合衆国 94086 カリフォルニア州, サニーヴェイル, キファー・ロード 1020
- (72)発明者 ラクロワ, ジェフリー, ティー.  
アメリカ合衆国 94086 カリフォルニア州, サニーヴェイル, キファー・ロード 1020
- (72)発明者 ロイ, パトリック  
アメリカ合衆国 94086 カリフォルニア州, サニーヴェイル, キファー・ロード 1020
- (72)発明者 サン, アレクサンダー, ケイ.  
アメリカ合衆国 94086 カリフォルニア州, サニーヴェイル, キファー・ロード 1020