

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-29366

(P2016-29366A)

(43) 公開日 平成28年3月3日 (2016. 3. 3)

(51) Int. Cl.

G 0 1 C 19/62 (2006.01)

F 1

G 0 1 C 19/62

テーマコード (参考)

審査請求 有 請求項の数 15 O L 外国語出願 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2015-112172 (P2015-112172)
 (22) 出願日 平成27年6月2日 (2015. 6. 2)
 (31) 優先権主張番号 14/295, 091
 (32) 優先日 平成26年6月3日 (2014. 6. 3)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 503178185
 ノースロップ グラマン システムズ コ
 ーポレーション
 NORTHROP GRUMMAN SY
 STEMS CORPORATION
 アメリカ合衆国 22042-4511
 バージニア州 フォールズ チャーチ フ
 ェアビュー パーク ドライブ 2980
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100142907
 弁理士 本田 淳

最終頁に続く

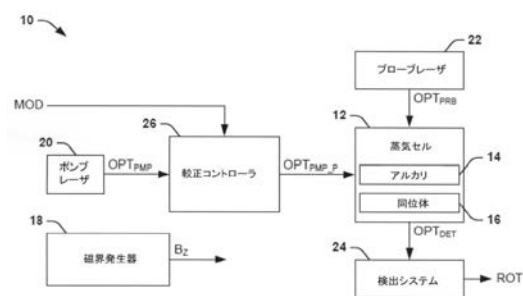
(54) 【発明の名称】 自己較正型核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 バイアス誤差を実質的に軽減した自己較正型核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムを提供する。

【解決手段】 システムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セル 12 と、アルカリ金属をスピン分極させるポンプレーザ 20 と、光プローブビームを生成するプローブレーザ 22 とを含み、光プローブビームをモニタし、アルカリ金属のスピン分極に起因する複数の磁気回転同位体の歳差運動に応じた光プローブビームの変調に基づいて受感軸周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転を計算する検出システム 24 とを含む。更に、回転の計算において磁気回転同位体に関連するバイアス誤差を実質的に軽減するため光ポンプビームの特性を変調する較正コントローラ 26 を含む。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムであって、
アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルと、
前記アルカリ金属をスピン分極させるように構成される光ポンプビームを生成するよう
に構成されたポンプレーザと、

光プローブビームを生成するように構成されたプローブレーザと、

前記光プローブビームをモニタし、前記アルカリ金属のスピン分極に起因する前記複数の
磁気回転同位体の歳差運動に応じた前記光プローブビームの変調に基づいて受感軸周り
の NMR ジャイロスコープシステムの回転を計算するように構成された検出システムと、

前記受感軸周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転の計算において前記磁気回転
同位体に関連するバイアス誤差を実質的に軽減するため前記光ポンプビームの特性を変調
するように構成された較正コントローラと

を備える、システム。

【請求項 2】

前記較正コントローラは、前記受感軸周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転の
計算において前記磁気回転同位体に関連する前記バイアス誤差を実質的に軽減するため前
記光ポンプビームの円偏光を変調するように構成されている、請求項 1 に記載のシステム

【請求項 3】

前記受感軸に実質的に整列する磁界を生成するように構成された磁界発生器を更に備え
、前記磁界は DC 成分及び AC 成分を含む、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 4】

前記較正コントローラは、前記受感軸周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転の
計算において前記磁気回転同位体に関連するバイアス誤差を実質的に軽減するため前記磁
界の DC 成分を変調するように更に構成されている、請求項 3 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記較正コントローラは、前記光ポンプビーム及び前記磁界の DC 成分の変調を時間整
合させるように構成されている、請求項 4 に記載のシステム。

【請求項 6】

前記ポンプレーザは、前記光ポンプビームを第 1 の直線偏光で生成するように構成され
、

前記較正コントローラは、

時間変調信号に基づいて前記第 1 の直線偏光と前記第 1 の直線偏光に対して直交する
第 2 の直線偏光との間で前記光ポンプビームを変調するように構成された偏光コントロー
ラと、

前記第 1 の直線偏光を第 1 の円偏光に変換し、前記第 2 の直線偏光を前記第 1 の円偏
光と逆向きの第 2 の円偏光に変換するように構成された 4 分の 1 波長板と
を備える、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 7】

前記ポンプレーザは、前記第 1 の直線偏光を有する第 1 の光ポンプビームを生成するよ
うに構成された第 1 のポンプレーザであり、

当該システムは、前記第 2 の直線偏光を有する第 2 の光ポンプビームを生成するよう
に構成された第 2 のポンプレーザを更に備え、前記偏光コントローラは、前記時間変調信号
に基づいて前記第 1 及び第 2 の光ポンプビームを共通の光路に沿って前記 4 分の 1 波長板
の入口に交互に提供するように構成されている、請求項 6 に記載のシステム。

【請求項 8】

前記偏光コントローラは、前記ポンプレーザによって生成された前記光ポンプビームを
前記時間変調信号に基づいて前記第 1 の直線偏光と前記第 2 の直線偏光との間で変調する
ため前記ポンプレーザを刺激するように構成されている、請求項 6 に記載のシステム。

【請求項 9】

前記偏光コントローラは、前記光ポンプビームを前記時間変調信号に基づいて前記第 1 の直線偏光と前記第 2 の直線偏光との間で交互に切替える光学部品を備える、請求項 6 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記偏光コントローラは、前記第 1 の円偏光と前記第 2 の円偏光との間で円偏光を変調するため前記 4 分の 1 波長板を前記時間変調信号に基づいて約 90° で交互に回転させるように構成されている、請求項 6 に記載のシステム。

【請求項 11】

核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムを自己校正するための方法であって、
ポンプレーザによって光ポンプビームを生成すること、

アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルを通して前記光ポンプビームを提供することであって、前記光ポンプビームは、前記アルカリ金属をスピン分極させるべく NMR ジャイロスコープシステムの受感軸に沿って提供される、前記光ポンプビームを提供すること、

プローブレザによって光プローブビームを生成すること、

前記光ポンプビームに対し直交する前記蒸気セルを通して前記光プローブビームを提供して、前記蒸気セルを出る検出ビームを提供すること、

前記光ポンプビームの特性を変調して、前記複数の磁気回転同位体に関連する同位体シフト及び 4 重極シフトの少なくとも一方に対応するバイアス誤差を、前記検出ビームによって提供される前記複数の磁気回転同位体の歳差運動の差に基づいて観測可能にすること、

前記受感軸周りの前記 NMR ジャイロスコープシステムの回転の計算から前記バイアス誤差を除去すること

を備える方法。

【請求項 12】

前記光ポンプビームの特性を変調することは、前記光ポンプビームの円偏光方向を変調することを含む、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

前記光ポンプビームを生成することは、第 1 のポンプレーザによって第 1 の直線偏光を有する第 1 の光ポンプビームを生成すること、及び第 2 のポンプレーザによって第 2 の直線偏光を有する第 2 の光ポンプビームを生成することを含み、前記光ポンプビームの円偏光方向を変調することは、時間変調信号に基づいて前記第 1 及び第 2 の光ポンプビームを共通の光路に沿って 4 分の 1 波長板の入口に交互に提供することを含む、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記受感軸に実質的に整列し、DC 成分と AC 成分とを含む磁界を生成すること、

前記磁界の DC 成分を変調して、前記複数の磁気回転同位体に関連する前記同位体シフトに関連するバイアス誤差を観測可能にすること

を更に備える請求項 11 に記載の方法。

【請求項 15】

前記光ポンプビーム及び前記磁界の DC 成分の変調を時間整合させることを更に備える請求項 14 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、概してセンサシステムに関し、特に、自己校正型核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

典型的な核磁気共鳴 (N M R) ジャイロスコープは、核磁気モーメントを有する 1 つ又は 2 つの同位体の測定されるラーモア歳差運動周波数又は位相のシフトに基づいて受感軸の周りの慣性角回転レート又は配向角を検知する原理に基づいて動作する。 N M R ジャイロスコープシステムは、蒸気セル及び回転センサを含むことができ、回転センサは、例えば、光源と光検出器と信号処理回路とを含む。例として、蒸気セルは、ルビジウム又はセシウム等の 1 つ又は複数のアルカリ金属を 1 つ又は複数の磁気回転同位体と共に含有し、この 1 つ又は複数の磁気回転同位体は磁界に応答して歳差運動させられる。信号処理回路は、 1 つ又は複数の磁気回転同位体のラーモア歳差運動周波数及び位相情報を抽出し得る。結果として、受感軸の周りのジャイロスコープ回転レート又は配向角は、抽出されたラーモア歳差運動周波数及び位相情報に基づいて計算され得る。

10

【発明の概要】

【 0 0 0 3 】

一実施形態は、核磁気共鳴 (N M R) ジャイロスコープシステムを含む。システムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルと、アルカリ金属をスピン分極させるように構成される光ポンプビームを生成するように構成されたポンプレーザとを含む。システムはまた、光プローブビームを生成するように構成されたプローブレザと、光プローブビームをモニタし、アルカリ金属のスピン分極に起因する複数の磁気回転同位体の歳差運動に応じた光プローブビームの変調に基づいて受感軸周りの N M R ジャイロスコープシステムの回転を計算するように構成された検出システムとを含む。システムは更に、受感軸周りの N M R ジャイロスコープシステムの回転の計算において磁気回転同位体

20

【 0 0 0 4 】

別の実施形態は、 N M R ジャイロスコープシステムを自己較正するための方法を含む。方法は、ポンプレーザによって光ポンプビームを生成すること、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルを通して光ポンプビームを提供することを含む。光ポンプビームは、 N M R ジャイロスコープシステムの受感軸に沿って提供され、アルカリ金属をスピン分極させ得る。方法はまた、プローブレザによって光プローブビームを生成すること、光ポンプビームに対し直交する蒸気セルを通して光プローブビームを提供して、蒸気セルを出る検出ビームを提供することを含む。方法はまた、光ポンプビームの特性を

30

【 0 0 0 5 】

別の実施形態は、 N M R ジャイロスコープシステムを含む。システムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルと、第 1 の直線偏光を有する光ポンプビームを生成するように構成されたポンプレーザとを含む。システムはまた、較正コントローラを含む。較正コントローラは、時間変調信号に基づいて第 1 の直線偏光と第 1 の直線偏光に対し直交する第 2 の直線偏光との間で光ポンプビームを変調するように構成された偏光コントローラと、第 1 の直線偏光を第 1 の円偏光に変換し、第 2 の直線偏光を第 1 の円偏光と逆向きの第 2 の円偏光に変換するように構成された 4 分の 1 波長板とを含む。変調され円偏光された光ポンプビームは、蒸気セルを通して受感軸に沿って提供され得る。システムはまた、光プローブビームを生成するように構成されたプローブレザと、検出システムとを含む。検出システムは、光プローブビームをモニタし、変調され円偏光された光ポンプビームに基づいて複数の磁気回転同位体の歳差運動に関連するバイアス誤差を観測し、複数の磁気回転同位体の歳差運動に応じた光プローブビームの変調に基づいて観測されるバイアス誤差に基づいて受感軸周りの N M R ジャイロスコープシステムの回転を計算するように構成されている。

40

50

【図面の簡単な説明】

【0006】

【図1】核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープシステムの例を示す図である。

【図2】NMRジャイロスコープシステムの別の例を示す図である。

【図3】タイミング図の例を示す図である。

【図4】3軸ジャイロスコープシステムの例を示す図である。

【図5】NMRジャイロスコープシステムを自己較正するための方法の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0007】

10

本発明は、概してセンサシステムに関し、特に、自己較正型核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープシステムに関する。自己較正型NMRジャイロスコープシステムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を有する蒸気セルを含み得る。磁界源は実質的に均一な磁界を生成することができ、実質的に均一な磁界は、蒸気セルを通して提供され、NMRジャイロスコープシステムの受感軸に整列する。ポンプレーザは、光ポンプビームを生成することができ、光ポンプビームは、蒸気セルを通して提供されて、アルカリ金属をスピン分極させ、したがって、磁界に応答してアルカリ金属及び磁気回転同位体の歳差運動を容易にする。一例として、ポンプレーザは、蒸気セルを通して提供される前に、4分の1波長板によって円偏光される直線偏光ビームとして光ポンプビームを生成するように構成することができる。プローブレーザは、光プローブビームを生成することができ、光プローブビームは、光ポンプビームに対し直交する方向に蒸気セルを通して同様に提供され、検出ビームとして蒸気セルを出る。

20

【0008】

検出システムは、受感軸の周りのNMRジャイロスコープシステムの回転を計算するため検出ビームをモニタするように構成され得る。例えば、検出システムは、磁気回転同位体の歳差運動に起因する光プローブビームのファラデー回転をモニタし、それにより、NMRジャイロスコープシステムの回転が、ファラデー回転の変化に基づいて計算されるように構成され得る。更に、NMRジャイロスコープシステムは、較正コントローラを含むことができ、較正コントローラは、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算において磁気回転同位体に関連するバイアス誤差（例えば、同位体シフト及び/又は4重極シフト）を実質的に軽減するため光ポンプビームの特性を変調するように構成される。例えば、較正コントローラは、光ポンプビームの円偏光の方向を変調するように構成され得る。結果として、バイアス誤差（例えば、同位体シフト及び/又は4重極シフト）の発生源は反転され、それにより観測可能とされる。したがって、検出システムは、バイアス誤差を特定し、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算においてバイアス誤差を実質的に軽減し得る。

30

【0009】

図1は、核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープ10の例を示す。NMRジャイロスコープシステム10は、種々の用途のうちの任意の用途に実装され得る。一例として、NMRジャイロスコープ10は、航空機及び/又は宇宙船のためのナビゲーションシステムに実装され得る。更に、NMRジャイロスコープシステム10は、図4の例でより詳細に実証されるような多軸ジャイロスコープの一部であり得る。

40

【0010】

NMRジャイロスコープ10は、例えば、種々の形状及びサイズのうちの任意の形状及びサイズのガラスケーシングであり得る蒸気セル12を含む。蒸気セル12は、アルカリ金属14及び複数の回転同位体16を含む。一例として、アルカリ金属14は、ルビジウム（Rb）又はセシウム（Cs）蒸気であり、磁気回転同位体16は、³ヘリウム、⁸³クリプトン、¹²⁹キセノン、及び/又は¹³¹キセノン等の種々の希ガス同位体の任意の同位体を含み得る。NMRジャイロスコープ10はまた、蒸気セル12を通して正味の磁界B_zを生成するように構成された磁界源18を含む。例えば、磁界B_zは、AC変調

50

されたDC磁界、したがって、AC成分及びDC成分を含むことができ、AC変調されたDC磁界は、蒸気セル12を通して提供され、NMRジャイロスコープシステム10の受感軸に整列する。一例として、磁界源22は、蒸気セル12を実質的に囲む磁気ソレノイドとして構成され得る。更に、NMRジャイロスコープシステム10は、蒸気セル12を実質的に囲み得る磁気シールド(図示せず)を含み、したがって、地磁界等の、外部磁界からの干渉を実質的に軽減し得る。

【0011】

NMRセンサシステム10はまた、光ポンプビームOPT_{PM P}を生成するように構成されるポンプレーザ20及び光プローブビームOPT_{PR B}を生成するように構成されるプローブレザ22を含む。OPT_{PM P}は、アルカリ金属14に関連するD1又はD2放出ラインに対応するようなアルカリ金属14に関して共鳴オンであり得る波長で生成され得る。光プローブビームOPT_{PR B}は、アルカリ金属14に関して実質的に共鳴オフであり得る波長で生成され得る。OPT_{PM P}は、NMRジャイロスコープシステム10の受感軸に沿うように、蒸気セル12を通して提供される。光プローブビームOPT_{PR B}は、OPT_{PM P}に対して直交であり、検出ビームOPT_{DET}として蒸気セル12を出る方向に、蒸気セル12を通して同様に提供される。

10

【0012】

NMRジャイロスコープシステム10はまた、受感軸の周りのNMRジャイロスコープシステム10の回転を計算するため検出ビームOPT_{DET}をモニタするように構成される検出システム24を含む。例えば、検出システム24は、磁気回転同位体16の測定される歳差運動角に基づいてNMRジャイロスコープシステム10の受感軸の周りの回転角を計算するように構成される機械化プロセッサを含み得る。一例として、検出システム24は、復調される検出信号OPT_{DET}によって示される磁気回転同位体16の測定される歳差運動角に基づいて、蒸気セル12の受感軸の周りの回転角を計算するように構成され得る。例えば、磁気回転同位体16の検出される歳差運動角は、安定した磁界B_zにおける磁気回転同位体16の1つ又は複数の予想される歳差運動角に対応する所定の基準信号と比較され得る。そのため、蒸気セル12の回転は、磁気回転同位体16の測定される歳差運動角と基準信号との差(例えば、位相差又は周波数差)から計算され得る。図1の例では、計算される回転は信号ROTとして示される。

20

【0013】

図1の例では、NMRジャイロスコープシステム10はまた、較正コントローラ26を含み、較正コントローラ26は、バイアス誤差が受感軸周りの回転ROTの計算において実質的に軽減され得るように、NMRジャイロスコープシステム10の自己較正を提供するように構成される。一例として、光ポンプビームOPT_{PM P}は、ポンプレーザ20によって直線偏光で生成され得る。較正コントローラ26は、蒸気セル12を通して提供される円偏光された光ポンプビームOPT_{PM P _ P}を提供するため、光ポンプビームOPT_{PM P}を円偏光させる4分の1波長板を含み得る。そのため、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}の円偏光は、アルカリ金属14内の光子の角運動量に基づいてアルカリ金属14をスピン分極させて、アルカリ金属14の歳差運動を容易にし得る。

30

【0014】

例えば、円偏光された光ポンプビームOPT_{PM P _ P}に応答する磁気回転同位体16とアルカリ金属14との間の相互作用を伴うスピン交換による磁気回転同位体16の光ポンピングは、計算された回転ROT内でバイアス誤差として示され得る測定ドリフトにさらされ得る。測定ドリフトの主要な発生源は、互いに関する磁気回転同位体16の磁気回転比のうちの見かけの比を変化させ得るどんなものをも含む。磁気回転同位体16の磁気回転比は、磁界B_zの単位振幅についての磁気回転同位体16の歳差運動レートの尺度によって特徴付けられ得る。例えば、磁気回転同位体16は、Xeの2つの同位体(例えば、¹³¹Xe及び¹²⁹Xe)を含み得る。一例として、測定ドリフトは、「同位体シフト」を含む。この「同位体シフト」は、磁気回転同位体16のそれぞれがアルカリ金属14と相互作用するような任意の差(例えば、¹³¹Xe同位体の相互作用と¹²⁹Xe同

40

50

位体の相互作用との相対的な差)に基づき得る。別の例として、測定ドリフトは、「4重極シフト」を含む。この「4重極シフト」は、磁気回転同位体16の一方(例えば、 ^{13}Xe 同位体)と蒸気セル12の壁とが相互作用している間等、電界勾配との核4重極相互作用に基づき得る。同位体シフト及び/又は4重極シフトの影響は、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステム10回転ROTの計算においてかなりの量のバイアス誤差に寄与し得る。

【0015】

同位体シフト及び/又は4重極シフトによってもたらされるバイアス誤差を実質的に軽減するため、較正コントローラ26は、時間変調信号MODに基づいて光ポンプビームOPT_{PM P}の特性を変調するように構成され得る。例えば、較正コントローラ26は、光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光の方向を、「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間で変調させるように構成され得る。第1の例として、較正コントローラ26は、光ポンプビームOPT_{PM P}の生成を第1の直線偏光から第1の直線偏光に対し直交する第2の直線偏光に偏光するため、ポンプレーザ20の刺激を変調するように構成され得る。そのため、第1の直線偏光は4分の1波長板によって第1の円偏光に変換され、第2の直線偏光は、4分の1波長板によって、第1の円偏光と逆向きの第2の円偏光に変換され得る。第2の例として、較正コントローラ26は、時間変調信号MODに基づいて光ポンプビームOPT_{PM P}を第1の直線偏光と第2の直線偏光との間で交互に切換え得る更なる光学部品を含み得る。第3の例として、較正コントローラ26は、光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光を第1の円偏光と第2の円偏光との間で変調するため、時間変調信号MODに基づいて4分の1波長板を約90°で交互に回転させるように構成され得る。

【0016】

「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間での光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光の変調に応答して、磁気回転同位体16の分極が同様に変調され得る。したがって、磁気回転同位体16の分極は、変調スキームに基づいて周期的に反転され得る。結果として、同位体シフト及び/又は4重極シフトの影響は、同様に、(例えば、ファラデー回転によって提供される)検出ビームOPT_{DET}の特性のスケールファクタに無関係に周期的に反転され得る。そのため、同位体シフト及び/又は4重極シフトに起因するバイアス誤差は、検出システム24によって検出ビームOPT_{DET}において観測可能にされる。したがって、検出システム24は、同位体シフト及び/又は4重極シフトに起因する観測可能なバイアス誤差を、NMRジャイロスコープシステム10の回転ROTの計算から除去するように構成され得る。

【0017】

「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間での光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光を変調させることに加えて、NMRジャイロスコープシステム10は、バイアス誤差を軽減する種々の他の方法のうちの任意の方法を実装するように構成され得る。例えば、較正コントローラ26は、ゼロを中心に対称的にする等によって、磁界B_ZのDC成分を同様に変調するように構成され得る。したがって、受感軸のベクトル方向は、同様に、(例えば、ファラデー回転によって提供される)検出ビームOPT_{DET}の特性のスケールファクタを周期的に反転させるように変調され得る。一例として、磁界B_ZのDC成分の変調は、参照によりその全体が本明細書に組込まれる米国特許第7,728,587号に記載されるのと同じ方法で実装され得る。そのため、同位体シフトに起因するバイアス誤差は、より正確に観測され、NMRジャイロスコープシステム10の回転ROTの計算から除去され得る。磁界B_ZのDC成分の変調は互いに時間整合される方法等で光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光方向の変調と共に実装され得る。したがって、受感軸の周りのNMRジャイロスコープシステム10の回転ROTの計算は、光ポンプビームOPT_{PM P}の円偏光方向だけを変調することに比べて、より正確な方法で提供され得る。

【0018】

図2は、NMRジャイロスコープシステム50の別の例を示す。NMRジャイロスコープシステム50は、図1の例のNMRジャイロスコープシステム10等のNMRジャイロ

10

20

30

40

50

スコープシステムの一部であり得る。NMRジャイロスコープシステム50は、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}の円偏光が「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間で変調され得る方法の別の例に対応し得る。

【0019】

NMRジャイロスコープシステム50は、第1のポンプレーザ52及び第2のポンプレーザ54を含む。第1及び第2のポンプレーザ52及び54は、垂直キャビティ面発光レーザ(VCSEL)等の種々の異なるタイプのレーザのうちの任意のレーザとして構成され得る。第1のポンプレーザ52は第1の線形偏光を有する第1の光ポンプビームOPT_{PM P 1}を生成するように構成され、第2のポンプレーザ54は、第1の線形偏光に対して直交する第2の線形偏光を有する第2の光ポンプビームOPT_{PM P 2}を生成するよう

10

【0020】

NMRジャイロスコープシステム50はまた、第1の光ポンプビームOPT_{PM P 1}及び第2の光ポンプビームOPT_{PM P 2}のそれぞれを受信する較正コントローラ56を含む。較正コントローラ56は、4分の1波長板58及び偏光コントローラ60を含む。偏光コントローラ60は、時間変調信号MODに基づいて、第1及び第2の光ポンプビームOPT_{PM P 1}及びOPT_{PM P 2}を、共通の光路に沿って4分の1波長板58の入口に交互に提供するように構成される。例えば、偏光コントローラ60は、光学部品を含むこ

20

【0021】

図3は、タイミング図100の一例を示す。タイミング図100は、時間の関数として σ として図3の例で示される光ポンプビームOPT_{PM P _ P}の円偏光に対応し得る。タイミング図100が、図1及び2の例の光ポンプビームOPT_{PM P _ P}に対応し得るため、図3の例の以下の説明において図1及び2の例が参照される。

30

【0022】

時刻 T_0 にて、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}は、円偏光の「右回り」方向に対応し得る σ_+ として示される円偏光を有する。一例として、円偏光 σ_+ は、第1の線形偏光が4分の1波長板58に提供されることに起因し得る。そのため、時刻 T_0 にて、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}は、蒸気セル12内のアルカリ金属14のスピン分極、したがって、磁界 B_z に基づく第1の共鳴周波数でのアルカリ金属14の歳差運動、磁気回転同位体16の分極、及びアルカリ金属14の自己磁化からのわずかの寄与を提供し、したがって、関連するスピン交換プロセスに基づく磁気回転同位体16の歳差運動をもたらす。

【0023】

時刻 T_1 にて、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}の円偏光は、円偏光 σ_+ から、円偏光無しに対応する偏光 σ_0 とは反対の円偏光 σ_- に切り換わる。したがって、円偏光 σ_- は、円偏光の「左回り」方向に対応し得る。一例として、円偏光 σ_- は、変調信号MODに基づいて第1の光ポンプビームOPT_{PM P 1}から第2の光ポンプビームOPT_{PM P 2}に切り換える偏光コントローラ60が4分の1波長板58に対する光路内に提供されることなどに基づいて、第2の線形偏光が4分の1波長板58に提供されることに起因し得る。そのため、時刻 T_1 にて、光ポンプビームOPT_{PM P _ P}は、蒸気セル12内のアルカリ金属14の反対方向のスピン分極、したがって、磁界 B_z に基づく第2の共鳴周波数でのアルカリ金属14の歳差運動、磁気回転同位体16の反対の分極、及びアルカリ金属14の自己磁化からのわずかの反対の寄与を提供する。

40

【0024】

50

更に、時刻 T_1 にて、磁気回転同位体 16 の共鳴周波数は、時刻 T_0 における磁気回転同位体 16 の共鳴周波数に対してシフトされる。結果として、磁気回転同位体 16 に関連する同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトの効果は、(例えば、ファラデー回転によって提供される) 検出ビーム OPT_{DET} の特性のスケールファクタに無関係に反転される。そのため、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因するバイアス誤差は、検出システム 24 によって検出ビーム OPT_{DET} において観測可能にされる。したがって、検出システム 24 は、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因する観測可能なバイアス誤差が、時刻 T_0 を基準にした時刻 T_1 における検出ビーム OPT_{DET} の特性に基づいて除去されるように NMR ジャイロスコープシステム 10 の回転 ROT を計算し得る。時刻 T_2 にて、光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、円偏光 σ_+ に戻るように切り換え、その後の時刻 T_3 にて、光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、円偏光 σ_- に戻るように切り換える。時刻 T_0 と T_1 との間、時刻 T_1 と T_2 との間、及び時刻 T_2 と T_3 との間の時間間隔はほぼ同じであり得る。したがって、時間変調信号 MOD は、実質的に同じ期間で光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光方向を変調するために提供され得る。

【0025】

図 4 は、本発明の一態様による 3 軸ジャイロスコープシステム 100 の例を示す。一例として、3 軸ジャイロスコープシステム 100 は、航空機及び / 又は宇宙船等の種々のナビゲーション制御システムの任意のナビゲーション制御システム、又は、ヨー、ピッチ、及びロール回転運動情報をモニタするデバイスに実装され得る。

【0026】

3 軸ジャイロスコープシステム 100 は、X 軸ジャイロスコープシステム 152 と、Y 軸ジャイロスコープシステム 154 と、Z 軸ジャイロスコープシステム 156 とを含む。図 4 の例では、X 軸ジャイロスコープシステム 152 は X 軸の周りに受感軸を有し、Y 軸ジャイロスコープシステム 154 は Y 軸の周りに受感軸を有し、Z 軸ジャイロスコープシステム 156 は Z 軸の周りに受感軸を有し得る。それぞれの NMR 蒸気セル 158、160、及び 162 の回転軸は、デカルト座標系 164 によって図 4 の例に示される。一例として、X 軸、Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、図 1 の例の NMR ジャイロスコープシステム 10 と実質的に同様に構成され得る。そのため、X 軸、Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、それぞれの光ポンプビーム OPT_{PMPP} に応答してそれぞれの蒸気セル 158、160、及び 162 のそれぞれを通して提供されるそれぞれの検出ビーム OPT_{DET} に基づいてそれぞれの X、Y、及び Z 軸のそれぞれの周りのそれぞれの回転角 ROT_X 、 ROT_Y 及び、 ROT_Z を決定するように構成され得る。それぞれの光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、(例えば、円偏光方向に関して) それぞれ変調されて、アルカリ金属を分極させ、それにより、それぞれのアルカリ金属及びアルカリ金属内の磁気回転同位体の歳差運動を容易にする。一例として、それぞれの蒸気セル 158、160、及び 162 のそれぞれを通したそれぞれの光ポンプビーム OPT_{PMPP} の変調は、共通の時間変調信号 MOD に基づく等によって実質的に時間整合され得る。

【0027】

図 4 の例では、X 軸、Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、それぞれの回転角 ROT_X 、 ROT_Y 、及び ROT_Z を含む信号をモーションセンサ 166 に出力するものとして示される。そのため、モーションセンサ 166 は、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスの 3 軸回転運動全体を決定するように構成され得る。従って、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスのヨー、ピッチ、及びロールが決定され得る。従って、モーションセンサ 166 は、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスの 3 軸回転運動を表示する、出力する、かつ / 又は報告するように構成され得る。

【0028】

上述した構造的特徴及び機能的特徴を考慮すると、本発明の種々の態様による方法は、

10

20

30

40

50

図 5 を参照してよりよく認識される。説明の簡略化のため、図 5 の方法は順番に実行されるものとして示され説明されているが、幾つかの態様が、本発明に従って、本明細書に示され説明される順序と異なる順序で、及び / 又は、他の態様と同時に起こるため、本発明が示す順序に制限されないことが理解され認識される。更に、示される特徴の全てが、本発明の一態様による方法を実装するために必要とされない場合がある。

【 0 0 2 9 】

図 5 は、NMR ジャイロスコープシステム（例えば、NMR ジャイロスコープシステム 10）を較正するための方法 200 の例を示す。202 にて、光ポンプビーム（例えば、光ポンプビーム OPT_{PM}）は、ポンプレーザ（例えば、ポンプレーザ 20）によって生成される。204 にて、光ポンプビームは、アルカリ金属（例えば、アルカリ金属 14）及び複数の磁気回転同位体（例えば、磁気回転同位体 16）を備える蒸気セル（例えば、蒸気セル 12）を通して提供される。光ポンプビームは、NMR ジャイロスコープシステムの受感軸に沿って提供されて、アルカリ金属をスピン分極させ得る。206 にて、光プローブビーム（例えば、光プローブビーム OPT_{PRB}）は、プローブレーザ（例えば、プローブレーザ 22）によって生成される。208 にて、光プローブビームは、光ポンプビームに対して直交する蒸気セルを通して提供されて、蒸気セルを出る検出ビーム（例えば、検出ビーム OPT_{DET}）を提供する。210 にて、光ポンプビーム特性（例えば、円偏光方向）が変調されて、複数の磁気回転同位体に関連する同位体シフト及び 4 重極シフトの少なくとも一方に対応するバイアス誤差を、検出ビームによって提供される複数の磁気回転同位体の歳差運動の差に基づいて観測可能にする。212 にて、バイアス誤差は、受感軸の周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転（例えば、回転 ROT）の計算から除去される。

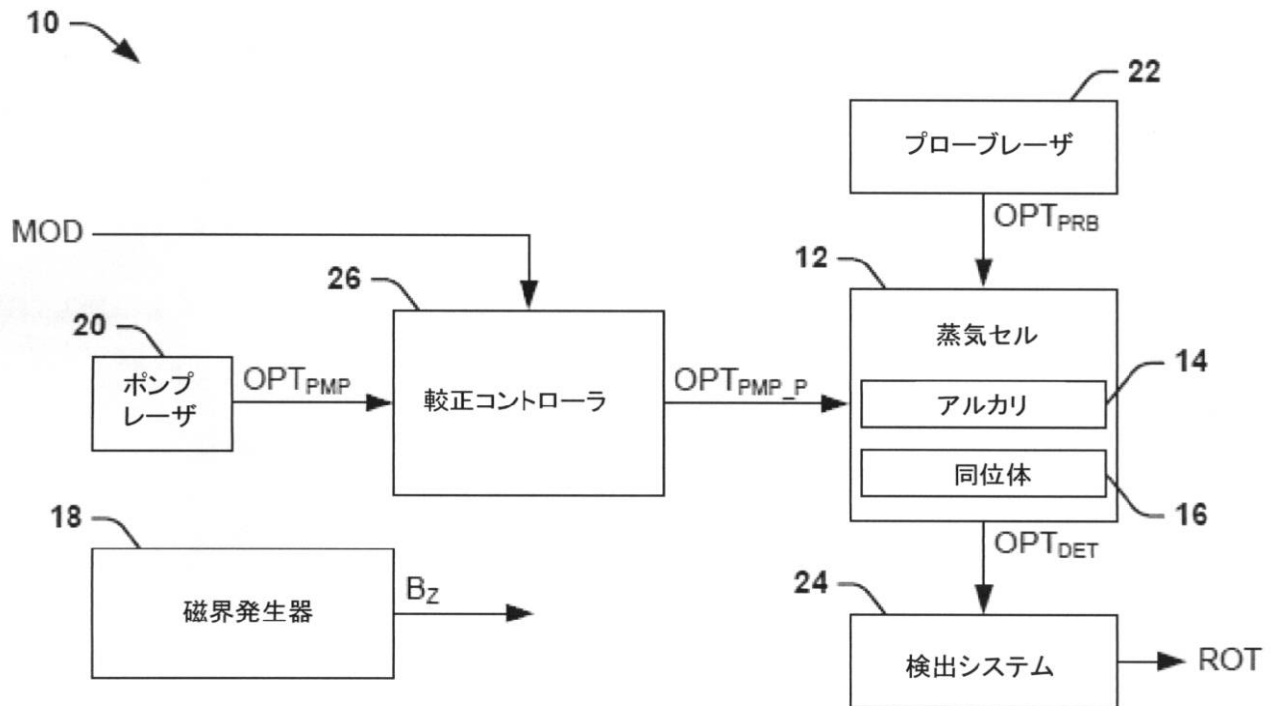
10

20

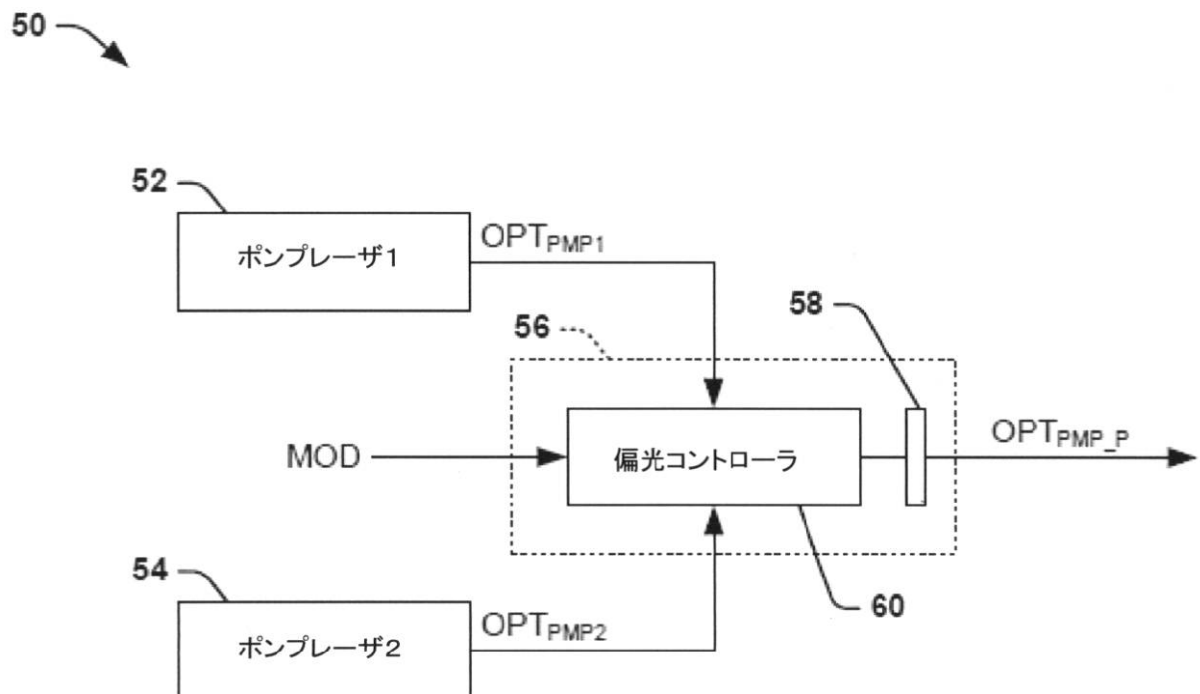
【 0 0 3 0 】

以上の説明は本発明の例である。本発明を説明するために構成要素又は方法の考えられる全ての組合せを述べることは可能ではないが、本発明の多くの更なる組合せ及び置換が可能であることを当業者は認識し得る。従って、本発明は、添付の特許請求の範囲の思想及び範囲に入る全てのこうした代替、修正、及び変形を包含することが意図される。

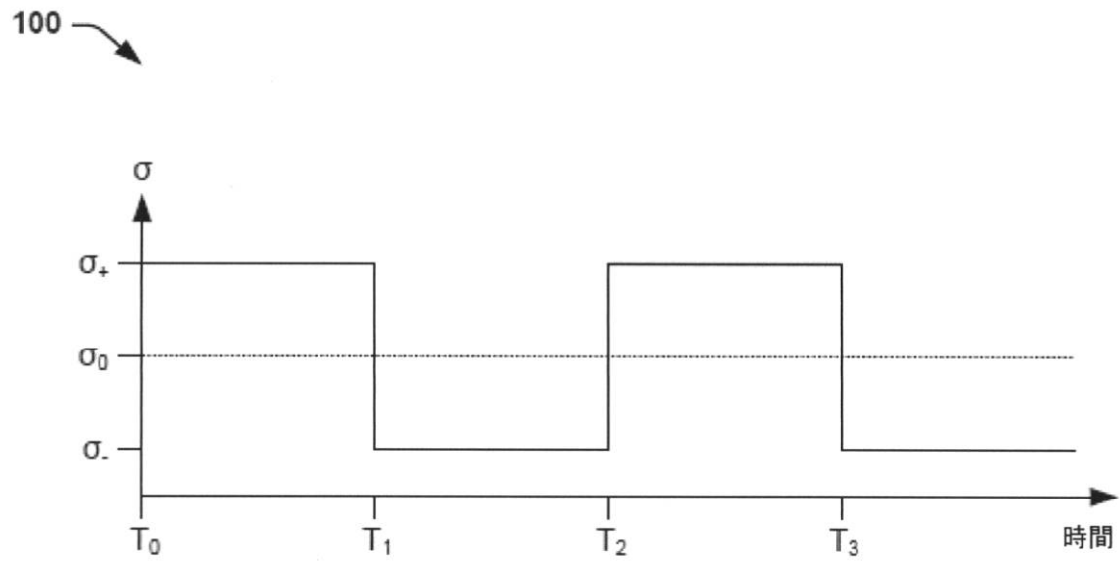
【図 1】



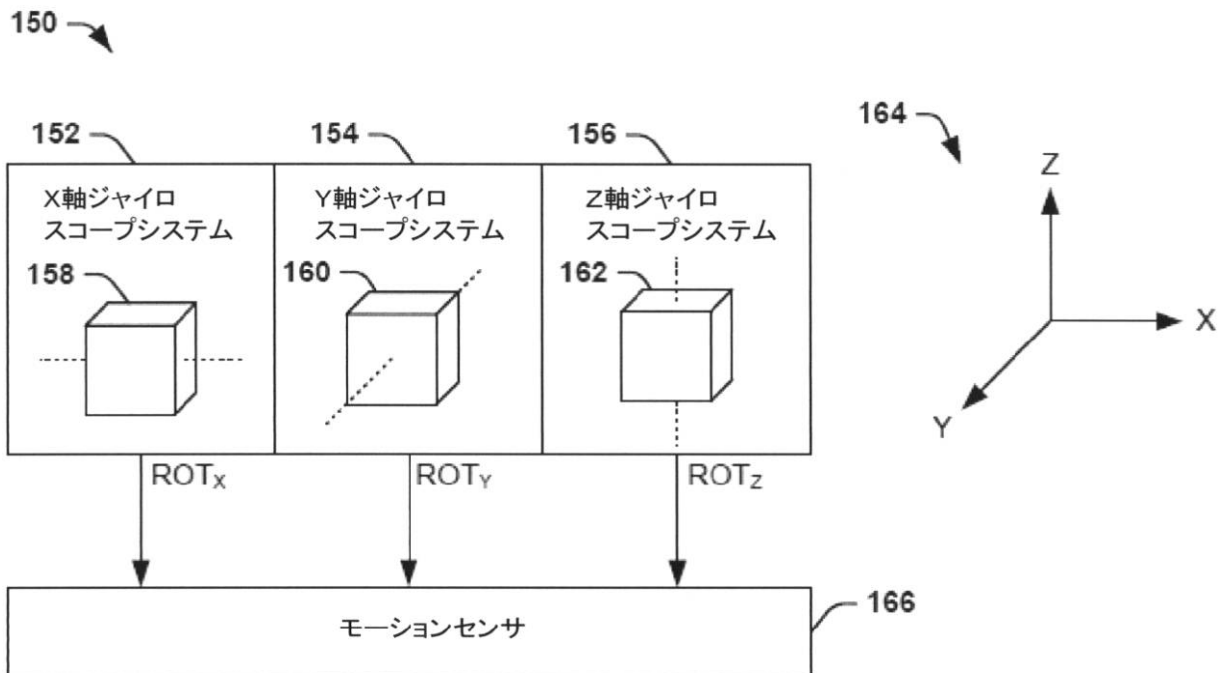
【図 2】



【図 3】

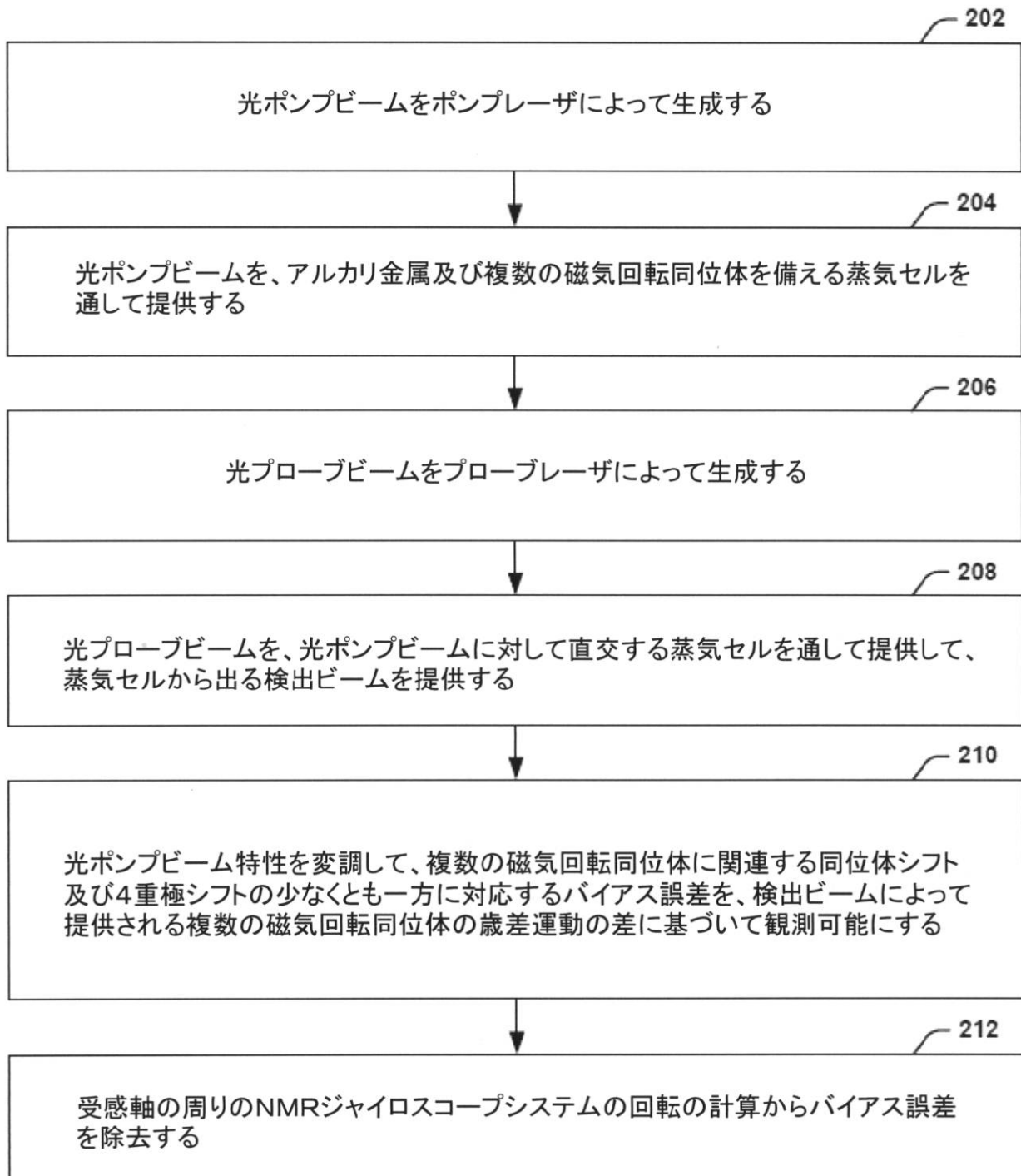


【図 4】



【図 5】

200



【手続補正書】

【提出日】平成27年7月8日(2015.7.8)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、概してセンサシステムに関し、特に、自己較正型核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

典型的な核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープは、核磁気モーメントを有する1つ又は2つの同位体の測定されるラーモア歳差運動周波数又は位相のシフトに基づいて受感軸の周りの慣性角回転レート又は配向角を検知する原理に基づいて動作する。NMRジャイロスコープシステムは、蒸気セル及び回転センサを含むことができ、回転センサは、例えば、光源と光検出器と信号処理回路とを含む。例として、蒸気セルは、ルビジウム又はセシウム等の1つ又は複数のアルカリ金属を1つ又は複数の磁気回転同位体と共に含有し、この1つ又は複数の磁気回転同位体は磁界に応答して歳差運動させられる。信号処理回路は、1つ又は複数の磁気回転同位体のラーモア歳差運動周波数及び位相情報を抽出し得る。結果として、受感軸の周りのジャイロスコープ回転レート又は配向角は、抽出されたラーモア歳差運動周波数及び位相情報に基づいて計算され得る。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】米国特許第4825260号明細書

【特許文献2】米国特許第6097532号明細書

【特許文献3】米国特許第7728587号明細書

【特許文献4】米国特許第8212556号明細書

【特許文献5】米国特許出願公開第2013/0095327号明細書

【特許文献6】米国特許出願公開第2013/0213135号明細書

【発明の概要】

【0004】

一実施形態は、核磁気共鳴（NMR）ジャイロスコープシステムを含む。システムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルと、アルカリ金属をスピン分極させるように構成される光ポンプビームを生成するように構成されたポンプレーザとを含む。システムはまた、光プローブビームを生成するように構成されたプローブレザと、光プローブビームをモニタし、アルカリ金属のスピン分極に起因する複数の磁気回転同位体の歳差運動に応じた光プローブビームの変調に基づいて受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転を計算するように構成された検出システムとを含む。システムは更に、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算において磁気回転同位体に関連するバイアス誤差を実質的に軽減するため光ポンプビームの特性を変調する較正コントローラを含む。

【0005】

別の実施形態は、NMRジャイロスコープシステムを自己較正するための方法を含む。方法は、ポンプレーザによって光ポンプビームを生成すること、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルを通して光ポンプビームを提供することを含む。光ポンプビームは、NMRジャイロスコープシステムの受感軸に沿って提供され、アルカリ金属をスピン分極させ得る。方法はまた、プローブレザによって光プローブビームを生成すること、光ポンプビームに対し直交する蒸気セルを通して光プローブビームを提供して、蒸気セルを出る検出ビームを提供することを含む。方法はまた、光ポンプビームの特性を変調して、複数の磁気回転同位体に関連する同位体シフト及び4重極（quadrupole）シフトの少なくとも一方に対応するバイアス誤差を、検出ビームによって提供される複数の磁気回転同位体の歳差運動の差に基づいて観測可能にすることを含む。方法は更に、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算からバイアス誤差を除去することを含む。

【 0 0 0 6 】

別の実施形態は、NMRジャイロスコープシステムを含む。システムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を備える蒸気セルと、第1の直線偏光を有する光ポンプビームを生成するように構成されたポンプレーザとを含む。システムはまた、較正コントローラを含む。較正コントローラは、時間変調信号に基づいて第1の直線偏光と第1の直線偏光に対し直交する第2の直線偏光との間で光ポンプビームを変調するように構成された偏光コントローラと、第1の直線偏光を第1の円偏光に変換し、第2の直線偏光を第1の円偏光と逆向きの第2の円偏光に変換するように構成された4分の1波長板とを含む。変調され円偏光された光ポンプビームは、蒸気セルを通して受感軸に沿って提供され得る。システムはまた、光プローブビームを生成するように構成されたプローブレザと、検出システムとを含む。検出システムは、光プローブビームをモニタし、変調され円偏光された光ポンプビームに基づいて複数の磁気回転同位体の歳差運動に関連するバイアス誤差を観測し、複数の磁気回転同位体の歳差運動に応じた光プローブビームの変調に基づいて観測されるバイアス誤差に基づいて受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転を計算するように構成されている。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 0 7 】

【 図 1 】 核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムの例を示す図である。

【 図 2 】 NMRジャイロスコープシステムの別の例を示す図である。

【 図 3 】 タイミング図の例を示す図である。

【 図 4 】 3軸ジャイロスコープシステムの例を示す図である。

【 図 5 】 NMRジャイロスコープシステムを自己較正するための方法の例を示す図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 0 8 】

本発明は、概してセンサシステムに関し、特に、自己較正型核磁気共鳴 (NMR) ジャイロスコープシステムに関する。自己較正型NMRジャイロスコープシステムは、アルカリ金属及び複数の磁気回転同位体を有する蒸気セルを含み得る。磁界源は実質的に均一な磁界を生成することができ、実質的に均一な磁界は、蒸気セルを通して提供され、NMRジャイロスコープシステムの受感軸に整列する。ポンプレーザは、光ポンプビームを生成することができ、光ポンプビームは、蒸気セルを通して提供されて、アルカリ金属をスピン分極させ、したがって、磁界に応答してアルカリ金属及び磁気回転同位体の歳差運動を容易にする。一例として、ポンプレーザは、蒸気セルを通して提供される前に、4分の1波長板によって円偏光される直線偏光ビームとして光ポンプビームを生成するように構成することができる。プローブレザは、光プローブビームを生成することができ、光プローブビームは、光ポンプビームに対し直交する方向に蒸気セルを通して同様に提供され、検出ビームとして蒸気セルを出る。

【 0 0 0 9 】

検出システムは、受感軸の周りのNMRジャイロスコープシステムの回転を計算するため検出ビームをモニタするように構成され得る。例えば、検出システムは、磁気回転同位体の歳差運動に起因する光プローブビームのファラデー回転をモニタし、それにより、NMRジャイロスコープシステムの回転が、ファラデー回転の変化に基づいて計算されるように構成され得る。更に、NMRジャイロスコープシステムは、較正コントローラを含むことができ、較正コントローラは、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算において磁気回転同位体に関連するバイアス誤差 (例えば、同位体シフト及び/又は4重極シフト) を実質的に軽減するため光ポンプビームの特性を変調するように構成される。例えば、較正コントローラは、光ポンプビームの円偏光の方向を変調するように構成され得る。結果として、バイアス誤差 (例えば、同位体シフト及び/又は4重極シフト) の発生源は反転され、それにより観測可能とされる。したがって、検出システムは、バイアス誤差を特定し、受感軸周りのNMRジャイロスコープシステムの回転の計算において

バイアス誤差を実質的に軽減し得る。

【 0 0 1 0 】

図 1 は、核磁気共鳴 (N M R) ジャイロスコープ 1 0 の例を示す。 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 は、種々の用途のうちの任意の用途に実装され得る。一例として、 N M R ジャイロスコープ 1 0 は、航空機及び / 又は宇宙船のためのナビゲーションシステムに実装され得る。更に、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 は、図 4 の例でより詳細に実証されるような多軸ジャイロスコープの一部であり得る。

【 0 0 1 1 】

N M R ジャイロスコープ 1 0 は、例えば、種々の形状及びサイズのうちの任意の形状及びサイズのガラスケーシングであり得る蒸気セル 1 2 を含む。蒸気セル 1 2 は、アルカリ金属 1 4 及び複数の回転同位体 1 6 を含む。一例として、アルカリ金属 1 4 は、ルビジウム (R b) 又はセシウム (C s) 蒸気であり、磁気回転同位体 1 6 は、³ヘリウム、⁸³クリプトン、¹²⁹キセノン、及び / 又は¹³¹キセノン等の種々の希ガス同位体の任意の同位体を含み得る。 N M R ジャイロスコープ 1 0 はまた、蒸気セル 1 2 を通して正味の磁界 B_z を生成するように構成された磁界源 1 8 を含む。例えば、磁界 B_z は、 A C 変調された D C 磁界、したがって、 A C 成分及び D C 成分を含むことができ、 A C 変調された D C 磁界は、蒸気セル 1 2 を通して提供され、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 の受感軸に整列する。一例として、磁界源 2 2 は、蒸気セル 1 2 を実質的に囲む磁気ソレノイドとして構成され得る。更に、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 は、蒸気セル 1 2 を実質的に囲み得る磁気シールド (図示せず) を含み、したがって、地磁界等の、外部磁界からの干渉を実質的に軽減し得る。

【 0 0 1 2 】

N M R センサシステム 1 0 はまた、光ポンプビーム O P T_{P M P} を生成するように構成されるポンプレーザ 2 0 及び光プローブビーム O P T_{P R B} を生成するように構成されるプローブレザ 2 2 を含む。 O P T_{P M P} は、アルカリ金属 1 4 に関連する D 1 又は D 2 放出ラインに対応するようなアルカリ金属 1 4 に関して共鳴オンであり得る波長で生成され得る。光プローブビーム O P T_{P R B} は、アルカリ金属 1 4 に関して実質的に共鳴オフであり得る波長で生成され得る。 O P T_{P M P} は、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 の受感軸に沿うように、蒸気セル 1 2 を通して提供される。光プローブビーム O P T_{P R B} は、 O P T_{P M P} に対して直交であり、検出ビーム O P T_{D E T} として蒸気セル 1 2 を出る方向に、蒸気セル 1 2 を通して同様に提供される。

【 0 0 1 3 】

N M R ジャイロスコープシステム 1 0 はまた、受感軸の周りの N M R ジャイロスコープシステム 1 0 の回転を計算するため検出ビーム O P T_{D E T} をモニタするように構成される検出システム 2 4 を含む。例えば、検出システム 2 4 は、磁気回転同位体 1 6 の測定される歳差運動角に基づいて N M R ジャイロスコープシステム 1 0 の受感軸の周りの回転角を計算するように構成される機械化プロセッサを含み得る。一例として、検出システム 2 4 は、復調される検出信号 O P T_{D E T} によって示される磁気回転同位体 1 6 の測定される歳差運動角に基づいて、蒸気セル 1 2 の受感軸の周りの回転角を計算するように構成され得る。例えば、磁気回転同位体 1 6 の検出される歳差運動角は、安定した磁界 B_z における磁気回転同位体 1 6 の 1 つ又は複数の予想される歳差運動角に対応する所定の基準信号と比較され得る。そのため、蒸気セル 1 2 の回転は、磁気回転同位体 1 6 の測定される歳差運動角と基準信号との差 (例えば、位相差又は周波数差) から計算され得る。図 1 の例では、計算される回転は信号 R O T として示される。

【 0 0 1 4 】

図 1 の例では、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 はまた、較正コントローラ 2 6 を含み、較正コントローラ 2 6 は、バイアス誤差が受感軸周りの回転 R O T の計算において実質的に軽減され得るように、 N M R ジャイロスコープシステム 1 0 の自己較正を提供するように構成される。一例として、光ポンプビーム O P T_{P M P} は、ポンプレーザ 2 0 によって直線偏光で生成され得る。較正コントローラ 2 6 は、蒸気セル 1 2 を通して提供さ

れる円偏光された光ポンプビーム OPT_{PMPP} を提供するため、光ポンプビーム OPT_{PMPP} を円偏光させる 4 分の 1 波長板を含み得る。そのため、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光は、アルカリ金属 14 内の光子の角運動量に基づいてアルカリ金属 14 をスピン分極させて、アルカリ金属 14 の歳差運動を容易にし得る。

【0015】

例えば、円偏光された光ポンプビーム OPT_{PMPP} に応答する磁気回転同位体 16 とアルカリ金属 14 との間の相互作用を伴うスピン交換による磁気回転同位体 16 の光ポンピングは、計算された回転 ROT 内でバイアス誤差として示され得る測定ドリフトにさらされ得る。測定ドリフトの主要な発生源は、互いに関する磁気回転同位体 16 の磁気回転比のうちの見かけの比を変化させ得るどんなものをも含む。磁気回転同位体 16 の磁気回転比は、磁界 B_z の単位振幅についての磁気回転同位体 16 の歳差運動レートの尺度によって特徴付けられ得る。例えば、磁気回転同位体 16 は、Xe の 2 つの同位体（例えば、 ^{131}Xe 及び ^{129}Xe ）を含み得る。一例として、測定ドリフトは、「同位体シフト」を含む。この「同位体シフト」は、磁気回転同位体 16 のそれぞれがアルカリ金属 14 と相互作用するような任意の差（例えば、 ^{131}Xe 同位体の相互作用と ^{129}Xe 同位体の相互作用との相対的な差）に基づき得る。別の例として、測定ドリフトは、「4 重極シフト」を含む。この「4 重極シフト」は、磁気回転同位体 16 の一方（例えば、 ^{131}Xe 同位体）と蒸気セル 12 の壁とが相互作用している間等、電界勾配との核 4 重極相互作用に基づき得る。同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトの影響は、受感軸周りの NMR ジャイロスコープシステム 10 回転 ROT の計算においてかなりの量のバイアス誤差に寄与し得る。

【0016】

同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトによってもたらされるバイアス誤差を実質的に軽減するため、較正コントローラ 26 は、時間変調信号 MOD に基づいて光ポンプビーム OPT_{PMPP} の特性を変調するように構成され得る。例えば、較正コントローラ 26 は、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光の方向を、「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間で変調させるように構成され得る。第 1 の例として、較正コントローラ 26 は、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の生成を第 1 の直線偏光から第 1 の直線偏光に対し直交する第 2 の直線偏光に偏光するため、ポンプレーザ 20 の刺激を変調するように構成され得る。そのため、第 1 の直線偏光は 4 分の 1 波長板によって第 1 の円偏光に変換され、第 2 の直線偏光は、4 分の 1 波長板によって、第 1 の円偏光と逆向きの第 2 の円偏光に変換され得る。第 2 の例として、較正コントローラ 26 は、時間変調信号 MOD に基づいて光ポンプビーム OPT_{PMPP} を第 1 の直線偏光と第 2 の直線偏光との間で交互に切換え得る更なる光学部品を含み得る。第 3 の例として、較正コントローラ 26 は、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光を第 1 の円偏光と第 2 の円偏光との間で変調するため、時間変調信号 MOD に基づいて 4 分の 1 波長板を約 90° で交互に回転させるように構成され得る。

【0017】

「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間での光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光の変調に応答して、磁気回転同位体 16 の分極が同様に変調され得る。したがって、磁気回転同位体 16 の分極は、変調スキームに基づいて周期的に反転され得る。結果として、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトの影響は、同様に、（例えば、ファラデー回転によって提供される）検出ビーム OPT_{DET} の特性のスケールファクタに無関係に周期的に反転され得る。そのため、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因するバイアス誤差は、検出システム 24 によって検出ビーム OPT_{DET} において観測可能にされる。したがって、検出システム 24 は、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因する観測可能なバイアス誤差を、NMR ジャイロスコープシステム 10 の回転 ROT の計算から除去するように構成され得る。

【0018】

「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間での光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光を変調させることに加えて、NMR ジャイロスコープシステム 10 は、バイアス誤差

を軽減する種々の他の方法のうちの任意の方法を実装するように構成され得る。例えば、較正コントローラ 26 は、ゼロを中心に対称的にする等によって、磁界 B_z の DC 成分を同様に変調するように構成され得る。したがって、受感軸のベクトル方向は、同様に、（例えば、ファラデー回転によって提供される）検出ビーム OPT_{DET} の特性のスケールファクタを周期的に反転させるように変調され得る。一例として、磁界 B_z の DC 成分の変調は、参照によりその全体が本明細書に組込まれる米国特許第 7,728,587 号に記載されるのと同じ方法で実装され得る。そのため、同位体シフトに起因するバイアス誤差は、より正確に観測され、NMR ジャイロスコープシステム 10 の回転 ROT の計算から除去され得る。磁界 B_z の DC 成分の変調は互いに時間整合される方法等で光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光方向の変調と共に実装され得る。したがって、受感軸の周りの NMR ジャイロスコープシステム 10 の回転 ROT の計算は、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光方向だけを変調することに比べて、より正確な方法で提供され得る。
【0019】

図 2 は、NMR ジャイロスコープシステム 50 の別の例を示す。NMR ジャイロスコープシステム 50 は、図 1 の例の NMR ジャイロスコープシステム 10 等の NMR ジャイロスコープシステムの一部であり得る。NMR ジャイロスコープシステム 50 は、光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光が「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間で変調され得る方法の別の例に対応し得る。
【0020】

NMR ジャイロスコープシステム 50 は、第 1 のポンプレーザ 52 及び第 2 のポンプレーザ 54 を含む。第 1 及び第 2 のポンプレーザ 52 及び 54 は、垂直キャビティ面発光レーザ (VCSEL) 等の種々の異なるタイプのレーザのうちの任意のレーザとして構成され得る。第 1 のポンプレーザ 52 は第 1 の線形偏光を有する第 1 の光ポンプビーム OPT_{PMPP1} を生成するように構成され、第 2 のポンプレーザ 54 は、第 1 の線形偏光に対して直交する第 2 の線形偏光を有する第 2 の光ポンプビーム OPT_{PMPP2} を生成するように構成され得る。一例として、第 1 及び第 2 のポンプレーザ 52 及び 54 は、第 1 及び第 2 の光ポンプビーム OPT_{PMPP1} 及び OPT_{PMPP2} を、それぞれの第 1 及び第 2 の線形偏光を有するものとして提供するように配向されるそれぞれの線形偏光子を含み得る。
【0021】

NMR ジャイロスコープシステム 50 はまた、第 1 の光ポンプビーム OPT_{PMPP1} 及び第 2 の光ポンプビーム OPT_{PMPP2} のそれぞれを受信する較正コントローラ 56 を含む。較正コントローラ 56 は、4 分の 1 波長板 58 及び偏光コントローラ 60 を含む。偏光コントローラ 60 は、時間変調信号 MOD に基づいて、第 1 及び第 2 の光ポンプビーム OPT_{PMPP1} 及び OPT_{PMPP2} を、共通の光路に沿って 4 分の 1 波長板 58 の入口に交互に提供するように構成される。例えば、偏光コントローラ 60 は、光学部品を含むことができ、光学部品は、時間変調信号 MOD に基づいて第 1 の光ポンプビーム OPT_{PMPP1} と第 2 の光ポンプビーム OPT_{PMPP2} とを切換えて、4 分の 1 波長板 58 の入口において第 1 の線形偏光と第 2 の線形偏光との間でそれぞれ交互に繰返す。結果として、4 分の 1 波長板 58 から提供される円偏光された光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、「右回り」円偏光と「左回り」円偏光との間で変調され得る。
【0022】

図 3 は、タイミング図 100 の一例を示す。タイミング図 100 は、時間の関数として σ として図 3 の例で示される光ポンプビーム OPT_{PMPP} の円偏光に対応し得る。タイミング図 100 が、図 1 及び 2 の例の光ポンプビーム OPT_{PMPP} に対応し得るため、図 3 の例の以下の説明において図 1 及び 2 の例が参照される。
【0023】

時刻 T_0 にて、光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、円偏光の「右回り」方向に対応し得る σ_+ として示される円偏光を有する。一例として、円偏光 σ_+ は、第 1 の線形偏光が 4 分の 1 波長板 58 に提供されることに起因し得る。そのため、時刻 T_0 にて、光ポンプビーム OPT_{PMPP} は、蒸気セル 12 内のアルカリ金属 14 のスピン分極、したがっ

て、磁界 B_z に基づく第 1 の共鳴周波数でのアルカリ金属 14 の歳差運動、磁気回転同位体 16 の分極、及びアルカリ金属 14 の自己磁化からのわずかの寄与を提供し、したがって、関連するスピン交換プロセスに基づく磁気回転同位体 16 の歳差運動をもたらす。

【0024】

時刻 T_1 にて、光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ の円偏光は、円偏光 σ_+ から、円偏光無しに対応する偏光 σ_0 とは反対の円偏光 σ_- に切り換わる。したがって、円偏光 σ_- は、円偏光の「左回り」方向に対応し得る。一例として、円偏光 σ_- は、変調信号 MOD に基づいて第 1 の光ポンプビーム $OPT_{PM P_1}$ から第 2 の光ポンプビーム $OPT_{PM P_2}$ に切り換える偏光コントローラ 60 が 4 分の 1 波長板 58 に対する光路内に提供されることなどに基づいて、第 2 の線形偏光が 4 分の 1 波長板 58 に提供されることに起因し得る。そのため、時刻 T_1 にて、光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ は、蒸気セル 12 内のアルカリ金属 14 の反対方向のスピン分極、したがって、磁界 B_z に基づく第 2 の共鳴周波数でのアルカリ金属 14 の歳差運動、磁気回転同位体 16 の反対の分極、及びアルカリ金属 14 の自己磁化からのわずかの反対の寄与を提供する。

【0025】

更に、時刻 T_1 にて、磁気回転同位体 16 の共鳴周波数は、時刻 T_0 における磁気回転同位体 16 の共鳴周波数に対してシフトされる。結果として、磁気回転同位体 16 に関連する同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトの効果は、(例えば、ファラデー回転によって提供される) 検出ビーム OPT_{DET} の特性のスケールファクタに無関係に反転される。そのため、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因するバイアス誤差は、検出システム 24 によって検出ビーム OPT_{DET} において観測可能にされる。したがって、検出システム 24 は、同位体シフト及び / 又は 4 重極シフトに起因する観測可能なバイアス誤差が、時刻 T_0 を基準にした時刻 T_1 における検出ビーム OPT_{DET} の特性に基づいて除去されるように NMR ジャイロスコープシステム 10 の回転 ROT を計算し得る。時刻 T_2 にて、光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ は、円偏光 σ_+ に戻るように切り換り、その後の時刻 T_3 にて、光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ は、円偏光 σ_- に戻るように切り換る。時刻 T_0 と T_1 との間、時刻 T_1 と T_2 との間、及び時刻 T_2 と T_3 との間の時間間隔はほぼ同じであり得る。したがって、時間変調信号 MOD は、実質的に同じ期間で光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ の円偏光方向を変調するために提供され得る。

【0026】

図 4 は、本発明の一態様による 3 軸ジャイロスコープシステム 100 の例を示す。一例として、3 軸ジャイロスコープシステム 100 は、航空機及び / 又は宇宙船等の種々のナビゲーション制御システムの任意のナビゲーション制御システム、又は、ヨー、ピッチ、及びロール回転運動情報をモニタするデバイスに実装され得る。

【0027】

3 軸ジャイロスコープシステム 100 は、X 軸ジャイロスコープシステム 152 と、Y 軸ジャイロスコープシステム 154 と、Z 軸ジャイロスコープシステム 156 とを含む。図 4 の例では、X 軸ジャイロスコープシステム 152 は X 軸の周りに受感軸を有し、Y 軸ジャイロスコープシステム 154 は Y 軸の周りに受感軸を有し、Z 軸ジャイロスコープシステム 156 は Z 軸の周りに受感軸を有し得る。それぞれの NMR 蒸気セル 158、160、及び 162 の回転軸は、デカルト座標系 164 によって図 4 の例に示される。一例として、X 軸、Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、図 1 の例の NMR ジャイロスコープシステム 10 と実質的に同様に構成され得る。そのため、X 軸、Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、それぞれの光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ に応答してそれぞれの蒸気セル 158、160、及び 162 のそれぞれを通して提供されるそれぞれの検出ビーム OPT_{DET} に基づいてそれぞれの X、Y、及び Z 軸のそれぞれの周りのそれぞれの回転角 ROT_X 、 ROT_Y 及び、 ROT_Z を決定するように構成され得る。それぞれの光ポンプビーム $OPT_{PM P_P}$ は、(例えば、円偏光方向に関して) それぞれ変調されて、アルカリ金属を分極させ、それにより、それぞれのアルカリ金属及びアルカリ金属内の磁気

回転同位体の歳差運動を容易にする。一例として、それぞれの蒸気セル 158、160、及び 162 のそれぞれを通したそれぞれの光ポンプビーム $OPT_{PM P}$ の変調は、共通の時間変調信号 MOD に基づく等によって実質的に時間整合され得る。

【0028】

図 4 の例では、 X 軸、 Y 軸、及び Z 軸ジャイロスコープシステム 152、154、及び 156 のそれぞれは、それぞれの回転角 ROT_X 、 ROT_Y 、及び ROT_Z を含む信号をモーションセンサ 166 に出力するものとして示される。そのため、モーションセンサ 166 は、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスの 3 軸回転運動全体を決定するように構成され得る。従って、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスのヨー、ピッチ、及びロールが決定され得る。従って、モーションセンサ 166 は、3 軸ジャイロスコープシステム 150 を含む関連する乗り物又はデバイスの 3 軸回転運動を表示する、出力する、かつ / 又は報告するように構成され得る。

【0029】

上述した構造的特徴及び機能的特徴を考慮すると、本発明の種々の態様による方法は、図 5 を参照してよりよく認識される。説明の簡略化のため、図 5 の方法は順番に実行されるものとして示され説明されているが、幾つかの態様が、本発明に従って、本明細書に示され説明される順序と異なる順序で、及び / 又は、他の態様と同時に起こるため、本発明が示す順序に制限されないことが理解され認識される。更に、示される特徴の全てが、本発明の一態様による方法を実装するために必要とされない場合がある。

【0030】

図 5 は、NMR ジャイロスコープシステム（例えば、NMR ジャイロスコープシステム 10）を較正するための方法 200 の例を示す。202 にて、光ポンプビーム（例えば、光ポンプビーム $OPT_{PM P}$ ）は、ポンプレーザ（例えば、ポンプレーザ 20）によって生成される。204 にて、光ポンプビームは、アルカリ金属（例えば、アルカリ金属 14）及び複数の磁気回転同位体（例えば、磁気回転同位体 16）を備える蒸気セル（例えば、蒸気セル 12）を通して提供される。光ポンプビームは、NMR ジャイロスコープシステムの受感軸に沿って提供されて、アルカリ金属をスピン分極させ得る。206 にて、光プローブビーム（例えば、光プローブビーム $OPT_{PR B}$ ）は、プローブレーザ（例えば、プローブレーザ 22）によって生成される。208 にて、光プローブビームは、光ポンプビームに対して直交する蒸気セルを通して提供されて、蒸気セルを出る検出ビーム（例えば、検出ビーム OPT_{DET} ）を提供する。210 にて、光ポンプビーム特性（例えば、円偏光方向）が変調されて、複数の磁気回転同位体に関連する同位体シフト及び 4 重極シフトの少なくとも一方に対応するバイアス誤差を、検出ビームによって提供される複数の磁気回転同位体の歳差運動の差に基づいて観測可能にする。212 にて、バイアス誤差は、受感軸の周りの NMR ジャイロスコープシステムの回転（例えば、回転 ROT ）の計算から除去される。

【0031】

以上の説明は本発明の例である。本発明を説明するために構成要素又は方法の考えられる全ての組合せを述べることは可能ではないが、本発明の多くの更なる組合せ及び置換が可能であることを当業者は認識し得る。従って、本発明は、添付の特許請求の範囲の思想及び範囲に入る全てのこうした代替、修正、及び変形を包含することが意図される。

フロントページの続き

(72)発明者 マイケル ディ・プラトヴィッツ

アメリカ合衆国 9 1 3 0 4 カリフォルニア州 カノーガ パーク オーウェンズマス アベニ
ュー 9 0 0 1

(72)発明者 マイケル エス・ラーセン

アメリカ合衆国 9 1 3 6 7 カリフォルニア州 ウッドランド ヒルズ バーバンク ブルバー
ド 2 1 2 4 0

【外国語明細書】
2016029366000001.pdf