

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7335982号
(P7335982)

(45)発行日 令和5年8月30日(2023.8.30)

(24)登録日 令和5年8月22日(2023.8.22)

(51)国際特許分類 F I
G 0 1 S 7/481(2006.01) G 0 1 S 7/481 A
G 0 1 S 17/89 (2020.01) G 0 1 S 17/89

請求項の数 14 (全25頁)

(21)出願番号	特願2021-570781(P2021-570781)	(73)特許権者	521517924 ウルパート インコーポレイテッド アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター プールバ ード 4 4 5 4
(86)(22)出願日	令和2年5月30日(2020.5.30)	(74)代理人	100120891 弁理士 林 一好
(65)公表番号	特表2022-536051(P2022-536051 A)	(74)代理人	100165157 弁理士 芝 哲央
(43)公表日	令和4年8月12日(2022.8.12)	(74)代理人	100205659 弁理士 齋藤 拓也
(86)国際出願番号	PCT/US2020/035454	(74)代理人	100126000 弁理士 岩池 満
(87)国際公開番号	WO2020/251787	(74)代理人	100185269 弁理士 小菅 一弘
(87)国際公開日	令和2年12月17日(2020.12.17)		
審査請求日	令和5年3月29日(2023.3.29)		
(31)優先権主張番号	62/854,571		
(32)優先日	令和1年5月30日(2019.5.30)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 空中地形測深 L i D A R システム及びその方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

対物レンズ、
反射型開口リレー、
走査ウォブルミラー、及び
ダウンコリメート望遠鏡を含む受信機システムと、
複数の検出器であって、前記複数の検出器のそれぞれが固有の単一波長で動作し、前記
複数の検出器の1つがガイガーモードアレイ検出器を含む、複数の検出器、及び
前記ガイガーモードアレイ検出器に結合され、分割ミラー、第1及び第2のイメージャ、
合成ミラー、及びリレーイメージャを含むガイガーモードアパランシェフオトダイオード
(G m A P D) リフォーマッタを含む検出器システムと、

10

第1及び第2の波長の光ビームを放出するためのレーザー、及び
レーザー送信機モジュールを含むレーザー伝送システムと、を含む、空中 L i D A R 測深
システム。

【請求項 2】

地面の点から前記対物レンズによって収集された光のナディア角は、約8度である、請
求項1に記載の空中 L i D A R 測深システム。

【請求項 3】

前記走査ウォブルミラーは、前記受信機システムの光軸に回転可能に配置される、請
求項2に記載の空中 L i D A R 測深システム。

20

【請求項 4】

前記光軸の周りの前記走査ウォブルミラーの回転は、前記対物レンズによって収集された光を処理して、前記光を前記光軸に平行に戻す、請求項 3 に記載の空中 L i D A R 測深システム。

【請求項 5】

前記ダウンコリメート望遠鏡は、光を前記走査ウォブルミラーから前記検出器システムに向けるためのものである、請求項 1 に記載の空中 L i D A R 測深システム。

【請求項 6】

前記検出器システムは、複数のダイクロイックビームスプリッターを含む、請求項 1 に記載の空中 L i D A R 測深システム。

10

【請求項 7】

前記ガイガーモードアレイ検出器は、長方形のアレイを含む、請求項 1 に記載の空中 L i D A R 測深システム。

【請求項 8】

前記レーザーは、約 1 . 1 n s のパルス幅及び約 2 0 k H z のパルス周波数を有するパルスを生成するためのものである、請求項 1 に記載の空中 L i D A R 測深システム。

【請求項 9】

航空機に空中 L i D A R 測深システムを取り付けるステップと、
少なくとも約 1 0 0 0 0 フィートの高度で前記航空機を飛行させるステップと、
受信機システム、検出器システム及びレーザー伝送システムを含む前記空中 L i D A R 測深システムにより地形データと測深データを収集するステップと、を含み、
前記受信機システムは、対物レンズ、反射型開口リレー、走査ウォブルミラー及びダウンコリメート望遠鏡を含み、

20

前記検出器システムは、ガイガーモードアレイ検出器と、前記ガイガーモードアレイ検出器に結合され、分割ミラー、第 1 及び第 2 のイメージャ、合成ミラー、及びリレーイメージャを含むガイガーモードアバランシェフォトダイオード (G m A P D) リフォーマッタを含む、空中測量方法。

【請求項 1 0】

前記検出器システムは、複数の追加検出器をさらに含み、前記複数の追加検出器のそれぞれは、固有の単一波長で動作する、請求項 9 に記載の方法。

30

【請求項 1 1】

前記レーザー伝送システムは、第 1 及び第 2 の波長の光ビームを放出するレーザーと、レーザー送信機モジュールとを含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 1 2】

前記航空機を約 1 6 0 ノットで飛行させるステップを更に含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 1 3】

前記空中 L i D A R 測深システムは、約 8 5 0 メートルのスワ幅を有する、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 1 4】

前記航空機は、無人航空機である、請求項 9 に記載の方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

〔関連出願の相互参照〕

本願は、2019年5月30日に出版された、名称が空中地形測深 L i D A R システム及びその方法である米国仮特許出願第 6 2 / 8 5 4 5 7 1 号の優先権を主張するものである。その全ての開示内容が参照により本明細書に組み込まれる。

【0 0 0 2】

〔連邦政府の支援による研究又は開発に関する陳述〕

50

本発明は、アメリカ陸軍工兵隊によって授与された契約W 9 1 2 7 8 1 7 D 0 0 6 8 の下で政府の支援を受けて行われたものである。政府は、本発明において一定の権利を有する。

【背景技術】

【0003】

空中（航空機搭載型）LiDAR機器（airborne LiDAR instrument）は、パルスレーザーを走査して、地面までの距離の測距測定値を収集する。統合された（integrated）GPS受信機と慣性計測装置から取得した位置及び高度（標高）を組み合わせると、詳細な標高マッピング製品（elevation mapping product）が生成される。LiDARは、空中地形測量に日常的に使用されている成熟した技術である。空中（aerial）LiDAR技術の現在の進歩により、収集率が向上し、マッピング密度が高くなり、動作高度が高くなる。最先端のシステムは、毎秒数百万回の標高測定値を記録し、7000メートルを超える高度で動作する。地形LiDARシステム（topographic LiDAR system）がこれらの仕様を満たすことができるが、測深LiDARシステム（bathymetric LiDAR system）は、海底の記録標高をkHz範囲のはるかに低いレートで測量し、200～500メートル範囲のはるかに低い高度で動作するように設計される。

10

【発明の概要】

【0004】

様々な実施形態は、以下の説明、添付の特許請求の範囲、及び添付の図面に関してよりよく理解されるようになるであろう。

20

【図面の簡単な説明】

【0005】

【図1】1つの非限定的な実施形態に係る空中LiDAR測深（ALB）システムの側面図である。

【0006】

【図2】図1のALBシステムの正面図である。

【0007】

【図3】図1のALBシステムの等角図である。

【0008】

【図4】データ収集のために航空機によって輸送（transport）されている例示的なALBシステムを概略的に示す。

30

【0009】

【図5】本開示に係る例示的な受信機システムの例示的な光学設計を示す。

【図6】本開示に係る例示的な受信機システムの例示的な光学設計を示す。

【図7】本開示に係る例示的な受信機システムの例示的な光学設計を示す。

【0010】

【図8】図5～7の受信機システムの一部の断面等角図を示している。

【0011】

【図9】図1の例示的なALBシステムを通過する例示的な光路を示す。

40

【0012】

【図10】1つの非限定的な実施形態に係る例示的な検出器システムを示す。

【0013】

【図11】明確にするために構成要素が取り外された、図10の検出器システムの等角図を示す。

【0014】

【図12】ガイガーモードアレイ検出器に結合された検出器リフォーマッタを示す。

【0015】

【図13】図12のリフォーマッタの光路を概略的に示す。

【0016】

50

【図14】一実施形態に係るリフォーマッタによる2×2入力画像の長方形の1×4出力画像への変換を示す。

【0017】

【図15】1つの非限定的な実施形態に係る例示的なレーザー伝送システムの側面図を示す。

【0018】

【図16】図15のレーザー伝送システムの上面図を示す。

【0019】

【図17】1つの非限定的な実施形態に係るレーザー送信機モジュールの等角図である。

【0020】

【図18】1つの非限定的な実施形態に係るガルボエンクロージャの断面等角図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、本開示の様々な非限定的な実施形態について説明して、本明細書に開示される高高度でのレーザー地形測深システムの構造、機能、及び使用の原理の全体的な理解を提供する。これらの非限定的な実施形態の1つ以上の例は、添付の図面に示される。当業者は、本明細書に具体的に記載され、添付の図面に示されるシステム及び方法が非限定的な実施形態であることを理解するであろう。1つの非限定的な実施形態に関連して示されるか又は説明された特徴は、他の非限定的な実施形態の特徴と組み合わせでよい。そのような修正及び変形は、本開示の範囲内に含まれることを意図している。

【0022】

本明細書全体を通して「様々な実施形態」、「いくつかの実施形態」、「一実施形態」、「いくつかの例示的な実施形態」、「1つの例示的な実施形態」、又は「実施形態」への参照は、任意の実施形態に関連して説明される特定の特徴、構造、又は特性が少なくとも1つの実施形態に含まれることを意味する。したがって、本明細書全体を通して複数の場所に出現する「様々な実施形態において」、「いくつかの実施形態において」、「一実施形態において」、「いくつかの例示的な実施形態において」、「1つの例示的な実施形態において」、又は「実施形態において」という語句は、必ずしもすべてが同じ実施形態を指すとは限らない。更に、特定の特徴、構造又は特性は、1つ以上の実施形態において任意の適切な方法で組み合わせられてもよい。

【0023】

本開示全体を通して構成要素又はモジュールへの参照は、一般に、論理的に1つの機能又は1セットの関連する機能を果たすようにまとめてグループ化することができる項目を指す。類似の参照番号は、一般に、同じ又は類似の構成要素を指すものであることを意図する。構成要素とモジュールは、ソフトウェア、ハードウェア、又はソフトウェアとハードウェアの組み合わせとして実装することができる。ソフトウェアという用語は、実行可能コードのみならず、データ構造、データストア、ならびに任意の電子形式、ファームウェア、及び埋め込みソフトウェア内のコンピューティング命令も含むために広義で使用される。情報及びデータという用語は、広義で使用され、それだけに限らないが、機械実行可能命令又は機械解釈可能命令、特にテキスト、ビデオデータ、オーディオデータなどのコンテンツ、及び様々なコード又はフラグを含む多種多様な電子情報を含むことができる。情報、データ、及びコンテンツという用語は、文脈上許容される場合に、区別なく使用される場合もある。

【0024】

本明細書で論じられる例は、例示にすぎず、本明細書で説明されるシステム及び方法の説明に役立つように提供されるものである。図面に示されるか又は以下で論じられる特徴又は構成要素のいずれも、特に必須であると指定しない限り、これらのシステム又は方法のいずれのいかなる特定の実装にも必須であるとみなすべきではない。読みやすさと明確さのために、特定の構成要素、モジュール、又は方法を、特定の図だけに関連して説明する場合もある。構成要素の組み合わせ又は部分的な組み合わせ (s u b c o m b i n a

10

20

30

40

50

t i o n) が具体的に記載されない場合があっても、それを、いかなる組み合わせも部分的な組み合わせも不可能であることを指示するものであると理解すべきではない。また、記載されるいかなる方法についても、その方法がフローチャートと併せて記載されるかどうかにかかわらず、特に指定されない限り、又は文脈上別の解釈が要求されない限り、方法の実行に際して行われるステップのいかなる明示的又は暗黙的な順序付けも、それらのステップが提示される順序で行われなければならないことを示唆するものではなく、異なる順序で、又は並列に行われてもよいことを理解すべきである。

【 0 0 2 5 】

空中 L i D A R 測深 (A L B) は、沿岸水域の深さを測定するための確立された効果的な技術である。G u e n t h e r による先駆的な研究により、1980年代に最初の A L B システムが開発される。L i D A R 測深の基本原理は、走査型パルス式水透過緑色レーザーからの測定値を記録することである。青緑色の波長が最小の減衰で一般的な沿岸水域を透過するため、海底の検出には緑色レーザーが使用される。水面が検出されると、海底までの距離は、空気と水の両方中の光速の時間差と知識 (k n o w l e d g e) から計算される。水中の光速は空気中の光速より約3分の1遅く (a t h i r d s l o w e r) 、この偏差を補正する必要がある。したがって、測距距離の正確な決定は、レーザー戻りパルスの波形に基づく水面と海底の両方への信頼性の高い検出に依存する。

【 0 0 2 6 】

受信した緑色レーザーパルスの波形は、空気 - 水界面でのレーザーパルスの相互作用、レーザーが水柱 (w a t e r c o l u m n) を通過する際の体積散乱 (v o l u m e s c a t t e r i n g) 、及び海底でのレーザーの反射を含む多くの効果の重ね合わせである。伝送 (送信) 経路と受信経路の両方の空気 - 水界面で、レーザーパルスのエネルギーの一部は、反射され、残りのエネルギーは、フレネルの式によって決定されるように伝送される。理想的に水平な海面の場合、一方向のフレネル反射は、一般的な A L B のオフナディア (o f f - n a d i r) のレーザービームの角の2~3%である。しかしながら、海面は、決して平坦ではなく、風速が低い場合でも、それを粗い表面として扱って水の反射率を算出し、一般に、マイクロファセット双方向反射率分布関数 (B R D F) を使用してモデル化される。B R D F は、拡散成分と、水面の粗さが大きいほど、風速の関数としてモデル化される振幅が大きくなる鏡面ローブ (s p e c u l a r l o b e) との両方を含む。レーザーパルスが水柱を通過すると、体積散乱と吸収によってレーザーエネルギーが減衰する。散乱パルスの一部は、受信経路に沿って反射されて戻る。この後方散乱パルスは、受信した L i D A R 波形の構成要素でもある。レーザー波形の第3の構成要素は、減衰したレーザー光の海底での拡散反射による海底戻りパルスである。減衰によりノイズ閾値を下回る大きさの底部戻りパルス及び/又は後方散乱戻りパルスが発生すると、底部検出は、不可能になる。空気 - 水界面での屈折と多重散乱により、伸張されたパルスが底部から戻る。これらすべての影響が存在する場合、海底の底部を検出して測位することは、困難な信号処理タスクである。

【 0 0 2 7 】

緑色の波形の戻りパルスに加えて、測深システムは、水柱内の緑色レーザーのラマン後方散乱 (R a m a n b a c k s c a t t e r) から生じる赤方の偏移したレーザーの戻りパルスを利用することもできる。ラマン散乱が風速と海面波によって受ける影響がごくわずかであるため、この信号の検出は、水面の決定に役立つ。一部の測深及び地形測深システムは、水を透過しないが、地形測量に加えて信頼性の高い水面の検出を提供する I R レーザーも採用する。

【 0 0 2 8 】

空気 - 水界面でのフレネル反射によって一部のレーザーエネルギーが失われるが、レーザー減衰の優性効果 (d o m i n a n t e f f e c t) は、水柱に沿った光の散乱と吸収である。水中の光の透過率は、指数関数的減衰に従うランベルトベールの法則 (B e e r - L a m b e r t l a w) によって決定され、次のように表される。

【 0 0 2 9 】

10

20

30

40

50

【数 1】

$$E(z) = E_0 e^{(-K_d z)}$$

【0030】

ここで、 $E(z)$ は、深さ z での放射照度であり、 E_0 は、水面での放射照度である。 K_d という用語は、拡散減衰係数であり、海洋光学の分野では、よく研究されている水の見かけの光学特性である。拡散減衰係数は、水の透明度に応じて変化し、水中での放射線の前方透過の指標である。拡散減衰係数は、次のように定義される。

【0031】

【数 2】

$$K_d = -\frac{1}{E_d} \frac{dE_d}{dz}$$

【0032】

ここで、 E_d という用語は、平面沈降流 (down-welling) の放射照度である。 K_d の値は、波長に応じて変化し、沿岸水域に対して、その最小値が 532 nm 付近であり、多くの一般的な周波数二重化 (doubled) 固体状態の Nd:YAG レーザーの波長に対応する。一般的な澄んだ沿岸水域の場合、 $K_d = 0.1 \text{ m}^{-1}$ であるが、濁った沿岸水域の係数は、 $K_d = 0.4 \text{ m}^{-1}$ に近い。

【0033】

レーザー減衰の影響を軽減し、沿岸水域を透過するために、ほとんどの ALB システムは、高パワー緑色レーザーを使用する。一般的な地形システムのレーザーパワーが 100 μJ 程度であるのと比較して、ALB システムのパルスあたりのレーザーパワーは、約 5 mJ である。受信機の開口サイズを大きくして、より多くの光を集めることもできる。しかし、大型望遠鏡ミラーの製造の難しさ、機器のサイズ、及びプラットフォームの制約は、開口サイズの増大を制限する。更に、システムの電子ノイズを最小限に維持し、検出器の感度を向上させることで、LiDAR の透過深さを高めることができる。受信したレーザーパワーと伝送したレーザーパワーとの間の逆二乗の法則 (inverse square law) により、動作高度は、水の透過にかなりの影響を与える。このため、ALB システムは、水面上の 200 ~ 500 メートルの範囲の低い高度 (low altitude) で動作 (operate) する。様々な理由から、高度を更に下げることが困難であり、許容できないほど小さなスワス (swath) をもたらす。地形 LiDAR とは異なり、大きなオフナディア角を有する広い走査角度は、ALB に対して実用的ではない。

【0034】

ALB システムの透過深さ能力は、一般に、 $d_{\text{max}} = n / K_d$ として表される。よく設計された ALB 機器の n の値は、昼間の動作では 2 ~ 4 の範囲にあり、夜間の動作では 3 ~ 5 の範囲にある。例えば、 $d_{\text{max}} = 4 / K_d$ のシステムは、 $K_d = 0.1 \text{ m}^{-1}$ の一般的な沿岸水域を 40 m 透過することができる。なお、十分なレーザー光が海底に到達したとしても、海底のアルベド (albedo) 又は反射率は、ALB システムが波形に基づいて海底を解析する能力にかなりの影響を与える。

【0035】

光の減衰に加えて、水は、屈折を介してレーザービームのオフナディア角を変化させる。屈折の補正は、スネルの法則 (Snell's Law) の簡単な適用であるが、必要な精度のレベルによっては、表面波を注意深くモデル化する必要がある場合がある。LiDAR 測深のもう一つの挑戦は、水面と海底の戻りパルスが合流する非常に浅い水域において、水面と海底とを区別することである。この目的のために、短パルス幅のレーザーは、空間領域で狭いシステム伝達関数を生成する高帯域幅、低ノイズの受信機電子機器と同様に有用である。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 6 】

レーザー、望遠鏡、スキャナー、検出器、及びGPS/IMUは、LiDARマッピングシステムの主な構成要素である。測深及び地形測深システムには、これらの構成要素の大部分に特定の要件がある。測深システムは、一般に、高パワー、周波数二重化 (frequency doubled)、固体状態のNd:YAGレーザーを使用する。地形システムと比較して、これらのレーザーは、はるかに低いパルスレートで動作する。30W以下 (~30W) の高パワーと10kHz以下 (~10kHz) の低パルスレートの組み合わせにより、水の透過に必要な3mJ程度のレーザーパルスエネルギーが得られる。水面と海底の検出を改善し、パルスストレッチの影響を最小限にするために、数ns (a few ns) 以下の短いレーザーパルスを使用する。IRレーザーは、水面検出を支援し、地形測量を提供するために、緑色レーザーと組み合わせて使用されることが多い。周波数二重化レーザー (Frequency doubled lasers) を使用して、整列したIR (1064nm) 及び緑色 (532nm) のビームを放出することができる。

10

【 0 0 3 7 】

ALBシステムの望遠鏡は、大きな開口を使用してより多くの光を集め、これには、大口径のスキャナーが必要である。屈折の影響と入射角の関数としての表面戻りパルスの高い変動性により、ほとんどのALBシステムは、固定された又は狭い範囲のオフナディア角 (一般に、約15~20度) を有するスキャナーを使用する。線形走査パターンは避けられ、円形、半円形、又は楕円形の走査パターンは優先される。ニューテイティングミラー (nutating mirrors)、リズレーブリズム、ウェッジブリズム、フレネルブリズムを使用して、これらのパターンを有するスキャナーを設計することができる。

20

【 0 0 3 8 】

光電子増倍管 (photomultiplier tube (PMT)) は、測深戻りパルスの広いダイナミックレンジを処理するために検出器として選択されることが多い。PMTは、数桁にわたって線形応答を維持することができる。PMTのダイナミックレンジが高いにもかかわらず、高エネルギー戻りパルスによるアフターパルスと検出器の損傷を防ぐように注意を払う必要がある。もう1つの一般的なALB検出器の設計は、複数のチャンネルを使用して視野を空間的にセグメント化するか、ビームスプリッターを介してダイナミックレンジを拡大することである。

【 0 0 3 9 】

ALBシステムに使用される高パワーレーザーは、かなりの冷却を必要とする。大型望遠鏡とスキャナーに加えて、熱管理に対する必要性は、サイズ、重量、パワー (SWaP) を制約することができる。低パワーでフットプリントの小さいシステムを設計することは、LiDAR測深システムの今後の課題の1つである。

30

【 0 0 4 0 】

高高度の測深には課題がある。現在、実用化され、かつ市販品として入手可能なALBシステムは、200m~500mの範囲の低高度で動作する。これは、1500m~3500m以上の範囲で日常的に動作する地形LiDARシステムの高度をはるかに下回る。ALBシステムの動作高度を3000mに上げると、新しいアプローチを必要とするいくつかの課題がある。主な難点は、逆二乗の法則と大気の減衰によるレーザーパワーの損失である。

40

【 0 0 4 1 】

【 数 3 】

$$P_r \cong P_t C_L \frac{\rho}{h^2} T(h; \lambda)$$

【 0 0 4 2 】

LiDAR方程式から、ここで、 P_r は、受信した光パワーであり、 P_t は、伝送した光パワーであり、 C_L は、センサーの物理的特性のみに依存するLiDAR定数であり、受信した光パワーは、

50

【数 4】

$$\frac{1}{h^2}$$

により低下し、ここで、 h は、高度である。この逆二乗の減衰は、高度が高くなるにつれて望遠鏡の開口によって限定される立体角 (solid angle) の減少に由来する。受信した光パワーは、レーザー波長に依存する双方向大気透過率減衰係数 (two-way atmospheric transmission attenuation factor) T によって更に減衰される。可視波長では、 T は、主に大気中のレイリー散乱によるものである。緑色レーザーを必要とする測深システムは、レイリー散乱のスペクトル依存性のために、IRベースの地形システムよりも大きな減衰の欠点がある。

10

【0043】

既存のALB設計を500mから3000mに動作させるようにスケールングするには、

【数 5】

$$\frac{1}{h^2}$$

からのエネルギーの損失を考慮して、レーザーパワーを36倍増加させる必要がある (require 1 a 36 x increase)。晴れた日の532nmでのレーザーパワーの大気減衰は、高度3kmで約0.85であるが、500mで約0.97である。逆二乗の減衰と組み合わせると、既存の設計をスケールングするには、レーザーパワーを40倍増加させる必要がある。500mでのALBシステムに使用される高パワーレーザー (10W以上) を考えると、40倍の増加は、実現可能な解決策ではない。

20

【0044】

もう1つの課題は、高度が高くなるにつれて点密度を維持する必要があることである。500mから3000mに移動するには、点密度を維持するために測定レートを6倍増加させる必要がある。これは、レーザーのパルスレートを上げること、レーザーの数を増加させること、及び/又はアレイ型検出器を使用して受信機チャンネルの数を増加させることによって達成することができる。受信機チャンネルあたりのパルスエネルギーを維持するために、合計レーザーパワーを6倍に増加させる必要がある。これには、従来の検出器とレーザー技術を使用して高高度で深さ方向の透過と点密度を維持するために、数kWのレーザーパワーが必要になる。

30

【0045】

高高度システムを設計する場合、地理的位置 (geo-location) の精度を維持することはもう1つの難点である。高度が高くなるにつれて、角度指向誤差 (angular pointing error) とバイアスが拡大する。地形LiDARシステムの場合、後処理中にソフトウェアでバイアスを較正し、角度指向誤差を減らすことができる。既存の商用ソフトウェアパッケージは、地形LiDAR用に設計されているため、利用することができない。バイアスを較正し、測深点群 (bathymetric point clouds) の指向精度 (pointing accuracy) を向上させるための新しい方法が必要である。

40

【0046】

レーザーパワーには実際的な制限があるため、高高度ALBシステムは、特別な検出器技術に依存する必要がある。更に、スキャナーの設計と後処理は、高高度の測深の解決策を開発する重要な基準である。

【0047】

弱い光信号を検出できるため、光電子増倍管 (PMT) とアバランシェフォトダイオード (avalanche photodiodes (APD)) の両方は、LiDARシステムに一般的に使用される検出器である。一般に、これらの装置は、アナログモードで動作し、受信したレーザーパルスの波形を測定するために使用される。高いダイナミック

50

レンジが必要なALBの場合、PMTは、最適な検出器である。一方で、ほとんどの地形システムは、APDを採用する。

【0048】

PMTは、単一光子(photon)までの非常に弱い信号を検出するために使用できるが、高電圧の外部電源が必要である。APDは、絶縁破壊(breakdown)電圧を超えるバイアスで動作する場合、いわゆるガイガー(Geiger)モードでは、単一光子を検出することもでき、単一光子アバランシェダイオード(SPAD)又はガイガーマードAPD(G-APD)と呼ばれる。SPAD検出器とPMT検出器はいずれも、高高度の測深LiDARなどの光子不足環境での信号検出に適する。

【0049】

SPAD検出器の欠点の1つは、回復時間が長いことである。光子の検出に続いて、新しい光子を検出する準備ができる前に、チャンネルをクエンチ(quench)する必要がある。受動的にクエンチした検出器の回復時間は、最大1ミリ秒であるが、能動的にクエンチした検出器の回復時間は、約50ナノ秒である。PMTは、非常に高速であり、回復時間が2ナノ秒未満である。水透過ALBシステムの場合、回復時間は、検出器を選択する重要な仕様である。水柱からの後方散乱光子の到着率と検出器の回復時間によっては、水柱での後方散乱は、底部検出(bottom detection)を妨げる可能性がある。

【0050】

SPAD検出器は、2次元のモノリシックアレイに配置でき、SPAD検出器の32×32又は32×128アレイを含むチップは、市販品として入手可能である。アレイ型PMT検出器は、マイクロチャンネルプレート(MCP)を使用して設計することもできる。これらのMCP-PMT検出器は、浜松ホトニクスによって10×10チャンネルアレイで提供される。これらの検出器は、532nmで優れた量子効率を備えた単一光子の検出に加えて、空間分解能を提供する。アレイ型検出器は、点密度の向上と後処理による地理的位置の改善の両方の点で、高高度ALBに利点を提供する。アレイ内の各ピクセルが同じ位置、姿勢、及びタイミング誤差を共有するという事実を利用して、地理的位置の精度を向上させるアルゴリズムを開発することができる。

【0051】

単一光子感受性検出器を使用すると、既存のレーザー技術で水透過動作と高高度動作の両方を実現することができる。受信した光子の数は、次の式で与えられる。

【0052】

【数6】

$$N_r = \frac{E_t C \cdot T(h; \lambda) A_r \rho_e}{\xi(\lambda) h^2 \pi}$$

【0053】

ここで、 E_t は、レーザーパルスあたりのエネルギーであり、 C は、LiDARシステムの効率であり、 $T(h; \lambda)$ は、直線距離(slant range) h と波長 λ での双方向大気減衰であり、 $\xi(\lambda)$ は、光子あたりのエネルギーであり、 A_r は、開口受信機面積(aperture receiver area)であり、 ρ_e は、水柱による双方向の減衰後の海底の有効アルベド(albedo)である。波長532nmで、 $\xi(\lambda) = 3.734 \times 10^{-19}$ Jである。公称値 $C = 0.1$ 、 $T = 0.85$ 、 $A_r = 0.015 \text{ m}^2$ 、直線距離 $h = 3100 \text{ m}$ を使用すると、光子計数(photon count)は、 $N_r = E_t \cdot 1.13 \times 10^8 \rho_e$ である。海底の有効アルベドは、水深 z 、海底底部の実際アルベド ρ_b 、拡散減衰係数 K_d 、及び水面でのフレネル反射 F_r に依存し、次の式で表される。

【0054】

【数7】

10

20

30

40

50

$$\rho_e = \rho_b e^{(-2K_d z)} (1 - F_r).$$

【 0 0 5 5 】

反射率 $\rho_b = 0.4$ の砂底、 $K_d = 0.1 \text{ m}^{-1}$ の澄んだ沿岸水域、 $F_r = 0.03$ のフレネル反射の場合、 $z = 20 \text{ m}$ の深さから平均して単一光子を受信するために、エネルギー

$$E_t \approx 1 \mu\text{J}$$

10

を有するレーザーパルスが必要である。高い検出確率を得るために複数の光子が必要であるが、ポアソン統計学的には、3つ程度の光子があれば十分である。水の透明度、底部反射率の値、及びLiDARシステムの効率の範囲での海底検出について、高高度ALBシステムの設計に対して、パルスあたり及びチャンネルあたりのエネルギーは、 $10 \mu\text{J}$ 程度で十分である。ALBシステムは、一般に、 $10 \sim 30 \text{ kHz}$ のレートで測深測定を行う。高高度での動作に必要な測定レートの増加を考慮すると、総レーザーパワーは、 10 W 未満である。

【 0 0 5 6 】

ALBシステムのもう1つの重要な設計基準は、レーザービームの一定のオフナディア角を維持することである。一定のオフナディア走査角を達成するための多くの効果的な方法があり、該方法は、ナディア指向レーザービームに回転ウェッジ、フレネルプリズムを通させたり、複数の走査ミラーを利用したりすることを含む。最適なオフナディア角が決定されると、プリズムの設計を選択することができる。回転プリズム又は直交正弦波走査ミラーから生成される円形走査パターンも、アレイ型検出器に適する。アレイ型検出器と併用すると、連続したマッピングを相対的に低い走査速度で維持することができる。更に、オブジェクトは、円形走査パターンを使用して異なる角度から少なくとも2回走査され、これにより、オブジェクトの検出と識別などの特定の応用に役立つ。前述のように、円形パターンは、校正と地理的位置の改善にも利用される。CZMILなどのALBシステムと、ALIRT及びBuckeye-IIなどの高高度地形LiDARシステムは、いずれも円形走査パターンを使用する。

20

【 0 0 5 7 】

単一光子検出器と波形検出器の主な違いの1つは、データの処理である。単一光子がノイズから区別できないため、これらの検出器からのデータは、大量の処理を必要とする。処理は、常に非ローカルであり、データを最適に利用するために点群で行うのが最適である。単一光子検出器からのデータは、太陽放射輝度(solar radiance)などの非レーザー照明源からのノイズを含む。これらの装置の感度が高いため、データは、クロストーク、アフターパルス、ガウスノイズなどの大量のシステムノイズも含む。前縁又はピークを決定するために分析できる波形を生成する線形モード検出器とは異なり、単一光子は、点の近傍を分析せずに、受信したレーザーパルス内に正確に配置されることができない。ただし、適切なデータ構造とパターン認識アルゴリズムを選択することで、これらのノイズ源を効果的に除去及び/又は低減することができる。

30

40

【 0 0 5 8 】

点群処理アルゴリズムを適用して、水面を検出し、水柱からの後方散乱をフィルタリングし、海底の戻りパルスを検出することもできる。一般に各レーザーパルスについて独立して実行される波形処理とは異なり、点群アルゴリズムは、複数の隣接するレーザーパルスからの測定値を統合する。緑色レーザーシステムのみに基づく水面検出とスパース(少ない。sparse)戻りパルスによる底部検出などの問題には、この方法が有利である。

【 0 0 5 9 】

要約すると、単一光子検出器、アレイ型検出器、円形走査システム、及び点群処理アルゴリズムを含む高標高地形LiDARシステムの最近の進歩を利用することにより、本開

50

示に係るALBシステムは、既存のシステムよりもはるかに高高度で動作することができる。これらの地形測深LiDARシステムの例示的な実施形態は、より高い点密度でより効果的なカバレッジを行うことができ、単一の経路で地形と測深の両方を生成することができる。

【0060】

以下の参考文献のそれぞれは、参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。(1) 航空LiDAR測深における精度課題への対応 (Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry)、Guenther, Gary C. 2000. EARSeL - SIG - ワークショップ LiDARの議事録、Dresden / FRG、(2) Mobley C., et al. Ocean Optics Web Book. Ocean Optics Web Book. <http://www.oceanopticsbook.info/>、(3) 昼間の動作中の光子計数SLRと高度計に対する受信機のデッドタイムの影響. J., Degnan J. 2014. レーザー測距に関する第16回国際ワークショップの議事録、(4) 光子計数用の2次元SPAD画像カメラ、Guerrieri F, Tisa S. Tosi A., Zappa F. 5, s.l.: IEEE, 2010, IEEE Photonics Journal, Vol. 2.

10

【0061】

以下、図1~18を参照して本開示に係る高高度地形測深LiDARシステムの例示的な光学設計の詳細を説明する。当業者は、本明細書に具体的に記載され、添付の図面に示されるシステム及びその方法が非限定的な実施形態であることを理解するであろう。

20

【0062】

図1~3を参照すると、本開示に係る例示的な高高度ALBシステム1000が示される。図1は、ALBシステム1000の側面図であり、図2は、ALBシステム1000の正面図であり、図3は、ALBシステム1000の等角図である。ALBシステム1000は、航空機に取り付けてられて、例えば、約10000フィートの高度から地形及び測深データを収集することができる。いくつかの実施形態において、ALBシステム1000は、Reims-Cessna F406 Caravan II航空機に取り付けられて、約160ノットで飛行するが、この開示は、これに限定されない。他の実施形態において、例えば、無人航空機(UAV)又は他の適切な航空機を使用することができる。図4は、航空機1002によって輸送されている図1~3のALBシステム1000を概略的に示す。航空機1002は、例えば、約10000フィートの高度(A)で飛行することができ、例えば、約160ノットの速度(V)で走行することができる。データ収集コーン1008によって概略的に示されるように、ALBシステム1000は、地形面1004と水中面(underwater surface)1006の両方をマッピングするために使用することができる。

30

【0063】

本開示に係るALBシステム1000は、水の透明度に応じて、約0から約30メートルの範囲の水深透過量(water depth penetration)を有することができる。約0から約10メートルの水深透過量が、約1メートルの空間分解能(spatial resolution)を有し、約10から約30メートルの水深透過量が、約2.5メートルの空間分解能を有する。様々な実施形態において、地形分解能は、約0.5メートルである。高所で飛行する場合、ALBシステム1000は、約850メートルのスワ幅を有することができる。ALBシステム1000は、以下でより詳細に説明される様々なサブシステム又は構成要素を含むことができる。例えば、ALBシステム1000は、受信機システム100、検出器システム110、及びレーザー伝送システム200を含むことができる。一般に、レーザー伝送システム200は、2つの異なる波長(レーザーパルス202によって概略的に示される)でレーザーパルスを送信して、受信機システム100の視野と整列している地面の領域を照射することができる。

40

【0064】

50

図5～7に示されるように、本開示の実施形態に係るALBシステム1000の受信機システム100の例示的な光学設計を示す。更に、図8は、図5～7に示される受信機システム100の一部の断面等角図を示す。まず、図5を参照すると、光学設計は、一般に、対物レンズ(objective)102、反射型開口リレー(RAR)104、ダウンコリメート望遠鏡108、及び検出器システム110を含むことができ、これらのそれぞれは、以下でより詳細に説明される。受信機システムは、走査ウォブル(wobble)ミラー106を含むことができる走査サブシステムを含むこともできる。

【0065】

対物レンズ102は、例えば、約10000フィート離れ、光軸から8度の角度にある地面の点から戻り光152を収集して集束するように設計することができる。図示のように、8度のオフナディア角は、受信機システム100内に回転している走査ウォブルミラー106を用いて円を描き、掃引(sweep)することができる。RAR104は、スパイダーウィンドウ132の下流に配置することができる。RAR104の目的は、2つであり得る。RAR104の第1の目的は、対物レンズの開口の画像を走査ウォブルミラー106に生成することである。RAR104の第2の目的は、対物レンズ102によって発生するいくつかの光学収差(optical aberration)を補正することである。RAR104からの光は、走査ウォブルミラー106に向けることができる。走査ウォブルミラー106は、受信機システム100の光軸に配置され、8度で歳差運動(precess)している光を収集し、かつ該光を光学システムの軸に平行に戻すために使用される。走査ウォブルミラー106から出る光は、ほとんどコリメート(collimate)される。以下でより詳細に説明されるように、ビームがコリメートされて軸に向け直された後、ビーム直径は、ダウンコリメート望遠鏡で減らすことができる。折り返しミラーを利用して望遠鏡の本体からのビームを反射することができる。ダウンコリメート望遠鏡(DCT)108から出るビームは、検出器システム110に入るにつれてほとんどコリメートされる。検出器システム110は、例えば、5つの検出器からなるアレイを有することができる。各検出器は、単一波長で動作することができる。波長は、ダイクロイックビームスプリッター(dichroic beamsplitter)を使用して分離される。個々の検出器に送られるエネルギーは、中間(neutral)ビームスプリッターによって制御される。検出器110に関する追加の説明は、図10～11を参照して以下に見出すことができる。

【0066】

図6に示されるように、システム内の対物レンズ102は、例えば、3つのガラス要素122、124及び126で構成することができる。3つの要素122、124及び126は、色補正を提供することができる。システム内の収差を、下流の光学構成要素を利用して収差を補正できるレベルに制御することができる。対物レンズ102の前部要素122は、非球面になるように設計された1つの表面を有することができる。残りの要素124及び126は、球面であってよい。前部要素122の非球面は、システム内の球面収差の量(amount of spherical aberration)を制御するために使用することができる。対物レンズを通してうまく制御されていない収差は、コマ収差(coma)と非点収差(astigmatism)であってよい。様々な実施形態において、収集された光ビームの直径は、300mmであってよく、対物レンズのみの焦点距離は、965mmであってよい。対物レンズのfストップは、例えば、 $f/3.2$ であってよい。システムの各部分の収差を最小限にすることで、構成要素間のより緩和したアライメント許容差を可能にすることができる。RAR104の2つのミラー134と136は、両方とも非球面であってよい。対物レンズ102からのビーム経路は、システムの全長を短縮するのに役立つ平坦な折り返しミラー128で折り返すことができる。折り返しミラー128は、様々な実施形態に係る対物レンズ102の一部であると見なすことができる。

【0067】

図7に示すように、折り返しミラー128の後、光は、一般に厚い窓であるスパイダー

10

20

30

40

50

ウィンドウ 132 を通過する。いくつかの実施形態において、例えば、スパイダーウィンドウ 132 の厚さは、約 30 mm である。スパイダーウィンドウ 132 の後には RAR104 がある。RAR104 は、例えば、一次（主）ミラー 134 及び二次（副）ミラー 136 の 2 つの曲面ミラーを含むことができる。対物レンズ 102 からの光は、一次ミラー 134 と二次ミラー 136 との間に集束することができる。対物レンズ 102 の開口が走査ウォブルミラー 106 に画像化されることを可能にするために、光が焦点を通過することが要求され得る。センサーから地面への画像のマッピングを簡略化するために、対物レンズ 102 の開口を走査ウォブルミラー 106 に画像化することが要求され得る。

【0068】

更に、図 7 を参照すると、走査ウォブルミラー 106 は、モーター 107 によってシステムの光軸の周りに回転する円環面 (toroidal surface) を有することができる。軸受 109 は、走査ウォブルミラー 106 及びそのアセンブリの光軸周りの回転を容易にすることができる。走査ウォブルミラー 106 の傾斜角は、例えば、システムの光軸に対して 16.654 度であってよい。走査ウォブルミラー 106 での入力ビームと出力ビームとの間の夾角 (included angle) は、対物レンズ開口の画像の倍率が低下するため、システムの入力での 8 度の角度とは異なる。走査ウォブルミラー 106 は、例えば、1 つの軸に非球面項 (aspheric term) を有する円環面であってよい。1 つの軸のみに非球面項を可能にすることにより、部品内に回転対称軸が存在する。回転対称軸を有することで、表面の製造がより簡単になる。走査ウォブルミラー 106 から出る光ビームは、システムの光軸に平行であり、かつほとんどがコリメートされる。

【0069】

DCT108 (図 8) は、正の二重レンズ (doublet) 140、スパイダーウィンドウ 132 に取り付けられた折り返しミラー 142、及び空気によって離隔した負の三重レンズ (negative air-spaced triple) 144 を有することができる。第 1 の正の二重レンズ 140 は、走査ウォブルミラー 106 の後にビームを集束し始める。光を検出器システム 110 に送るシステム内の折り返しミラー 142 のサイズを小さくするために、集束が必要である。折り返しミラー 142 は、円形に (in a circle) 走査されるにつれて光ビームによって形成される環の中心に適合する (fit) のに十分に小さい必要がある。折り返しミラー 142 は、スパイダーウィンドウ 132 に取り付けることができる。望遠鏡の機械式スパイダーの代わりにウィンドウを使用して、システムが走査するにつれてスパイダーが信号を遮ることを防止する。DCT108 に入るビームは、直径 82.5 mm であってよく、DCT108 から出るときに 20 mm であってよい。折り返しミラー 142 は、検出器アセンブリが入射ビームを遮断しないように、ビームをメインシステムの本体から離れるように向けることを可能にすることができる。

【0070】

図 9 を参照すると、受信機システム 100 を通過する例示的な光路が概略的に示される。図示のように、レーザー伝送システム 200 のレーザー 146 は、ビーム調整光学部品を含む送信機モジュール 148 を通って送られる光ビームを、生成する。レーザー光は、パッフル (図 1 に示される) を通って送られて、光出力 150 によって示されるように、最終的に下向きに向けられる。レーザー伝送システム 200 に関する追加の詳細は、図 15 ~ 18 を参照して以下に見出すことができる。図 9 に示されるように、戻り光 152 は、最初に対物レンズ 102 によって受信され、図 5 ~ 7 を参照して以上で詳細に説明されるように、折り返しミラー 128 に向けられ、最終的に走査ウォブルミラー 106 に向けられる。戻り光 152 は、以下でより詳細に説明されるように、最終的に検出器システム 110 によって受信される。検出器システム 110 は、一般に、戻り光 152 内の様々なチャネルを検出することができ、ラマンチャネル 154 A (647 nm)、深緑色 154 B (532 nm)、浅緑色 154 C (532 nm)、IR/topo 154 D (1064 nm)、及び IR 安全性 154 E (1064 nm) を含むことができる。

【 0 0 7 1 】

図 1 0 ~ 1 1 を参照すると、例示的な実施形態に係る検出器システム 1 1 0 が示され、図 1 1 は、明確にするために構成要素が取り外された、検出器システム 1 1 0 の等角図を示す。いくつかの実施形態において、検出器システム 1 1 0 は、5 つの個別の検出器を有することができる。光が検出器システムに到達すると、個々の波長は、分離され、様々な機能を有する検出器に送られる。図示の例示的な実施形態において、分割される第 1 の波長は、ラマン放射を捕捉することを目的とした 6 4 7 n m の帯域である。この波長帯域を分割するためのダイクロイックビームスプリッター 1 5 8 は、2 2 . 5 度の入射角を有することができる。入射角が小さいほど、コーティング設計が偏光に敏感にならないようにすることが容易になる。ラマン光を最初に分割して、そのビーム経路で使用される要素の数を減らすことにより、そのビーム経路における伝送損失を減らすことができる。例示的な実施形態において、ラマン検出器 1 6 4 の前方に、帯域通過フィルタ 1 6 0 及び集束レンズ 1 6 2 が存在する。図示の実施形態において、集束レンズ 1 6 2 は、システムのサイズを縮小するための望遠レンズである。

10

【 0 0 7 2 】

図示の例示的な実施形態において、分割される第 2 の波長は、ロングパスダイクロイックビームスプリッター 1 6 6 による 5 3 2 n m 帯域である。5 3 2 n m の光は、部分反射ビームスプリッター 1 6 8 によって 2 つのチャンネルに分割されて、2 つの検出器によって収集される。図示のように、浅緑色検出器 1 7 0 は、収集効率を改善するために、4 つの検出器の上にレンズアレイを備えた象限検出器であってよい。更に、図示の実施形態において、単一の検出器であってよい深緑色検出器 1 7 2 が存在する。両方の検出器は、検出器の前方に帯域通過フィルタと集束レンズを有することができる。

20

【 0 0 7 3 】

最終波長は、1 0 6 4 n m である。この波長は、2 つの経路があり、部分反射ビームスプリッター 1 7 4 によって分割される。第 1 の経路は、I R 安全性検出器である。I R 安全性経路は、単一の検出器 1 7 6 の前方に帯域通過フィルタ及び望遠レンズを有することができる。第 2 の経路は、3 2 × 1 2 8 ピクセルのガイガーモードアバランシェフォトダイオード (G m A P D) 1 7 8 に到達することができる。この経路には、6 4 × 6 4 ピクセルの画像アレイをカバーする画像を生成する集束レンズ 1 8 0 を設けることができる。次に、初期画像を、G m A P D リフォーマットシステム (ここではリフォーマッタ (r e f o r m a t t e r) 1 8 2 と呼ばれる) によって 3 2 × 1 2 8 ピクセルのガイガーモードアレイにリフォーマットすることができる。

30

【 0 0 7 4 】

図 1 2 ~ 1 3 を参照すると、リフォーマッタ 1 8 2 が示され、図 1 2 は、ガイガーモードアレイ検出器 1 7 8 に結合されたリフォーマッタ 1 8 2 の等角図を示し、図 1 3 は、リフォーマッタ 1 8 2 の光路を概略的に示す。図示のように、リフォーマッタ 1 8 2 は、一般に、G m A P D 1 7 8 の前方に取り付けられる小さなシステムであってよい。リフォーマッタ 1 8 2 の目的は、3 . 2 m m の正方形の画像 (又は他の正方形の画像) を取り込んで、該画像を 1 . 6 m m × 6 . 4 m m のアレイ (又は他の長方形のアレイ) に画像化することである。画像化は、画像平面の左半分 (1 . 6 m m × 3 . 2 m m) をガイガーモードアレイ検出器の G m A P D アレイの上部に画像化し、画像平面の右半分 (1 . 6 m m × 3 . 2 m m) をガイガーモードアレイ検出器 1 7 8 の G m A P D アレイの下半分に画像化することにより画像のピクセル解像度を維持することを目的とする。画像のリフォーマットは、以下に説明し、図 1 3 に概略的に示すように、一連のミラーを使用して発生する。

40

【 0 0 7 5 】

いくつかの実施において、G m A P D アレイは、幅 3 2 ピクセル、高さ 1 2 8 ピクセルの長方形アレイであってよい。ピクセルは、5 0 平方ミクロンであってよく、3 . 5 度以下の角度許容度を有する。円錐角は、円錐の半角と見なすことができる。4 0 9 6 ピクセルアレイの寸法は、1 . 6 m m × 6 4 m m である。G m A P D は、例えば、ガイガーモードの画像化装置であってよく、ガイガーモードの装置であり、G m A P D ピクセルは、単

50

一光子イベントに敏感である。

【0076】

本開示に係る受信機システム100(図5)は、円形画像を生成することができる。GmAPDに入るビームの円錐角は、内接する 32×32 ピクセルの領域に画像化される場合、7度以下になる。ピクセル受光角のオーバーフィル(overfill)は、システムの全開口がカメラに画像化される場合、GmAPDの75%の光損失を引き起こすと予想される。画像を 64×64 ピクセルの領域に拡大する場合、ビームの円錐角は、3.5度以下になる。この場合、中心の 32×64 ピクセルでは、受光角のオーバーフィルによる光損失は見られない。しかしながら、この画像は、システムの望ましい視野の半分のみをカバーする。画像でカバーされるピクセルの数を増加させると、 32×32 ピクセルの1つに落下する(land on)画像が、4倍のピクセル数に広がり、これにより、各ピクセルの強度が4分の1に減少する。これらの2つの影響は、打ち消すように見える。しかしながら、実際に発生するのは、システムの感度が4倍に増加することである。 64×64 ピクセル構成では4096個の単一光子イベントを捕捉できることとは対照的に、 32×32 ピクセル構成では最大1024個の単一光子イベントを記録できるため、感度の向上が達成される。 64×64 ピクセル構成を採用することの欠点は、アレイが 32×128 ピクセルであることである。利用可能なピクセル数が4096であるが、該ピクセルは、正方形構成ではなく長方形構成である。

10

【0077】

DCT108(図5)とGmAPD178のレンズシステムは、オブジェクト平面の0.5平方メートルに対応する領域内にある地面の点からのエンスクエアド(ensquared)エネルギーの90%を超えることによって性能が定義される画像を生成するように、設計することができる。 32×32 ピクセルの画像は、一辺が100ミクロンの 4×4 ピクセルのアレイに対応する。 64×64 ピクセルの画像は、 8×8 ピクセルのアレイに対応する。システムの光学性能は、システムの全開口を使用しながら、 1.8 mrad の視野(FOV)の90%以上でこの要件を満たすことができる。いくつかの実施形態において、GmAPDカメラで取られた画像の解像度を0.25mに改善することが望ましい可能性がある。システムの収集開口の直径を全開口直径の60%に減らすことで、解像度を向上させることができる。システムの瞳孔の画像化(imaging of the system pupil)がある位置に、システムの調整可能な開口を配置することは重要である。全ての視野角からのコリメートされた光が重ならない位置にシステムストップ(system stop)を配置すると、照明がFOV全体で不均一になり、視野の縁で望ましい改善された解像度が作成されない。

20

30

【0078】

一般に、本開示に係るリフォーマッタ182は、 2×2 の正方形の画像の半分である 1×2 の長方形を、 1×4 長方形アレイの半分に画像化し、正方形の画像の残りの半分の 1×4 長方形アレイの後半に画像化する画像化装置である。有利には、画像化は、画像平面からセンサーアレイへの正方形ピクセルの見かけのアスペクト比を歪めることなく、かつ画像からアレイへの円錐角を変えることなく、実行することができる。本開示に係るリフォーマッタ182を使用することにより、見かけの 64×64 ピクセルの画像を、センサーの利用可能な 32×128 ピクセルの領域に画像化することができる。したがって、本明細書に記載のリフォーマッタ182は、本開示のシステムが全開口で動作することを可能にし、円錐角が3.5度以下の $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ の画像を生成することができる。この正方形の画像は、 $1.6 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$ のアレイに画像化することができる。リフォーマッタ182内には、システムストップをシステムの画像の中心に配置できる平面があり得る。システム開口が画像化される平面は、可変アイリス(iris)を有することができる。このアイリスの目的は、上記のように、GmAPD 178への光の低減を可能にし、システムの解像度の向上を可能にすることである。

40

【0079】

図13を参照すると、リフォーマッタ182の例示的な光路が説明される。上記のよう

50

に、リフォーマッタ182は、スプリッタミラー114でDCT108(図7)から受信された正方形の 2×2 入力画像を取り、かつ入力画像と同じ面積を有する長方形の 1×4 出力画像113に変換することができる(例示的な変換が図14に概略的に示される)。

【0080】

理解されるように、ほとんどの光学システムは、円形画像を生成する。円形画像は、センサー198内に内接するか、又はセンサー198の周りに外接することができる。 1×4 の長方形センサー198の場合、センサーによって完全に捕捉されるように内接される円形画像に対して、センサー198の未使用領域は、約95%である。 1×4 の長方形センサー198の場合、センサーが画像によって完全にカバーされるように外接する円形画像に対して、画像の未使用領域は、約70%である。 2×2 の正方形センサー198の場合、センサーによって完全に捕捉されるように内接される円形画像に対して、センサー198の未使用領域は、約21%である。 2×2 の正方形センサー198の場合、センサー198が画像によって完全にカバーされるように外接する円形画像に対して、画像の未使用領域は、約36%である。リフォーマッタ182を使用することにより、センサー198に内接する画像について、センサーが実質的に 2×2 対 1×4 である場合に、利用されるピクセルの数の16倍の改善が実現される。

【0081】

リフォーマッタ182の入力画像は、任意の画像生成レンズシステムによって作成することができる。好ましい実施形態において、入力画像を形成している光円錐(cone of light)は、システム(テレセントリック)の光軸に平行である。入力画像は、分割ミラー114で形成することができる。分割ミラー114は、画像の半分が一方に反射され、画像の半分が反対方向に反射されるように、屋根のような形状をとることができるミラーである。いくつかの実施形態において、屋根の「ピーク」は、画像が分割されるときに失われる画像領域の量を減らすために、鋭くすることができる。1つの例示的な実施形態において、分割ミラーのピーク角は、約70度である。画像の2つの半分は、画像が分割された軸に垂直な軸において互いにオフセットされた一対の合成ミラー186に一対のイメージャ184によって再画像化することができる。いくつかの実施形態において、イメージャ184は、全反射性であり、好ましくは、1:1の倍率で動作する。イメージャ184の倍率が1:1である場合、オフナートリプレット設計を利用することができる。図13に示されるように、オフナートリプレットは、単一の大きな凹面鏡190及び小さな凸面鏡192からなる。鏡190及び192の両方を同じ軸に配置することができる。鏡190及び192の軸は、分割ミラー114によって方向付けられる画像の軸に平行であり、該画像の軸からオフセットすることができる。鏡の軸のオフセットは、画像が分割された軸に垂直な軸上の画像の高さの半分にほぼ等しくなる。大きな凹面鏡190は、入口画像から凹面鏡の頂点までの距離にほぼ等しい曲率半径を有することができる。小さな凸面鏡192は、大きな凹面鏡190の曲率半径の半分にほぼ等しい半径を有することができる。大きな凹面鏡190と小さな凸面鏡192との間の頂点間隔も、大きな凹面鏡190の曲率半径の半分にほぼ等しい。画像分割プリズムからの発散光は、各イメージャ184の大きな凹面鏡190から小さな凸面鏡192に反射される。次に、光は、小さな凸面鏡192から大きな凹面鏡190に反射されて戻る。大きな凹面鏡190からの第2の反射は、分割入力画像からミラー軸に関して対称的にオフセットされた分割入力画像の中間画像188を作成する。 2×2 入力画像は、分割ミラー114によって2つの 1×2 画像に分割することができる。合成ミラー186で2つのイメージャ184によって生成される2つの 1×2 中間画像188は、組み合わせて 1×4 画像を作成することができる。合成ミラー186はそれぞれ、2つの画像が共通の光軸に実質的に平行になるように向けられる角度だけ反対方向に角度が付けられる。リレーイメージャ194は、光軸に沿って配置することができ、組み合わせた 1×4 中間画像を 1×4 センサー198に画像化する。図示の例示的な実施形態において、リレーイメージャ194は、第2のレンズと第3のレンズとの間に調整可能な開口196を備えた一対の対称レンズである。調整可能な開口196の目的は、システムの効果的なFストップを制御することである。Fスト

10

20

30

40

50

ップを制御することにより、システムが収集する光の量を制御することができる。効果的なFストップは、システムの解像度を制御するためにも使用することができる。入力画像が収差を生成する光学システムによって生成される場合、これらの収差は、開口196を使用して、瞳孔の外側部分を通過するより多くの収差を有する光を遮断することによって改善できるのが一般的である。

【0082】

図15~18を参照すると、様々な非限定的な実施形態に係るレーザー伝送システム200が示される。レーザー伝送システム200は、例えば、レーザー146、レーザー送信機モジュール148、及び一对のガルバノメータ駆動ミラーを収容するガルボエンクロージャ(galvo enclosure)204を含むことができる。図15は、レーザー伝送システム200の側面図であり、図16は、レーザー伝送システム200の上面図であり、図17は、明確にするために部分が取り外された、様々な実施形態に係るレーザー送信機モジュール148の等角図であり、図18は、明確にするために部分が取り外された、様々な実施形態に係るガルボエンクロージャ204の断面等角図である。

10

【0083】

上記のように、本開示に係るレーザー伝送システム200の目的は、レーザーパルス202(図1~3)を伝送して、受信機システム100によって見られる領域と整列している地面の領域を照射することである。レーザー伝送システム200のレーザー146は、2つの異なる波長の光を放出することができる。レーザー送信機モジュール148は、レーザー146の2つの出力ビームを、各色に対する所定の発散角を有する2色のビームに組み合わせる前に調整することができる。

20

【0084】

様々な実施形態において、レーザー146によって放出される光の2つの波長は、532nm及び1064nmであってよい。例えば、レーザーパルスのパルス幅は、約1.1nsであってよく、パルス周波数は、約20kHzであってよい。ビームは、レーザー146の2つの別個の射出窓(exiting windows)から放出することができる。射出窓でのビームは、直径が約3.3mm~約5mmのトップハット空間的プロファイル(フラットトップビームと呼ばれることもある)を有することができる。2つの射出窓は、横方向に分離することができる。レーザー伝送システム200の光学部品の目的は、地面にレーザーの射出窓の組み合わせ画像を生成することにより、地面に各色に対する所定の直径のトップハット画像を生成することである。トップハット空間的プロファイルは、望ましい内接円内で最大のエネルギーを可能にするとともに、円全体にわたる最高の均一性を維持する。

30

【0085】

射出窓から出た後、2つのビーム250及び252は、それらの調整レッグ(leg)に向けられる。調整光学部品はそれぞれ、ビームの軸に沿ってレンズを移動し、地面のビームのビーム画像サイズの直径を個別に設定する単一の可動ステージを有することができる。例えば、532nmのレッグでは、ビーム250は、固定レンズ206を通過し、2つのミラー208及び210から反射することができ、該2つのミラーは、ビームを、発散(divergence)制御固定レンズ212と、地面のスポットサイズを制御するために使用されるステージにある可動レンズ214とに向けられるために使用される。1064nmのレッグでは、ビーム252は、固定レンズ216を通過し、2つのミラー218及び220から反射することができ、該2つのミラーは、ビームを、発散制御固定レンズ222と、地面のスポットサイズを制御するために使用されるステージにある可動レンズ224とに向けられるために使用される。ズームの光学部品は、射出窓から地面までの画像化を維持するとともに画像の直径を調整するように、設計することができる。各チャンネルは、目の安全のために、及び動作中に可視光が出ることなくシステムを動作させるために使用される、反転可能なシャッター226及び228を有することができる。532nmズームレッグの端部には、ビームコンバイナ光学部品232と共に、ミラー230を設けることができる。ミラー230は、532nmビームを1064nmビームと整列すること

40

50

で、ビームが同心であり、同じ方向を向き、それによりスポットが地面で十分に同心であることを保証する。ビームコンバイナ光学部品 2 3 2 の後方に、2つのステアリングミラー 2 3 4 及び 2 3 6 のセットが存在し得ることにより、組み合わせたビームを、2つのレンズを有する最終ビームエキスパンダーと整列し、2つのレンズのうちの第 1 のレンズが伝送モジュール 2 3 8 の出力上にある。

【 0 0 8 6 】

図 1 8 を参照すると、最終エキスパンダー 2 4 0 の第 2 の光学部品は、一对のガルバノメータ制御ミラー 2 4 2 及び 2 4 4 の前方の最後の光学部品である。ガルバノメータ制御ミラーは、受信機システム 1 0 0 によって見られる地面の領域を照射するために、受信スキャナーと組み合わせてビームを走査するように組み合わせたビームを向けるために、使用される。

10

【 0 0 8 7 】

実施形態及び例の前述の説明は、例示及び説明の目的のために提示されている。網羅的であることは意図されておらず、又は開示された実施形態に限定されない。上記の教示に照らして、多くの修正が可能である。それらの修正のいくつかは議論されており、他のものは当業者によって理解されるであろう。実施形態は、企図される特定の用途に適した様々な実施形態の原理を最もよく説明するために選択され、説明されたものである。当然のことながら、その範囲は、本明細書に記載の例に限定されるものではなく、当業者によって任意の数の用途及び同等の装置に使用することができる。よって、本発明の範囲は、本明細書に添付された特許請求の範囲によって定義されることが意図されている。

20

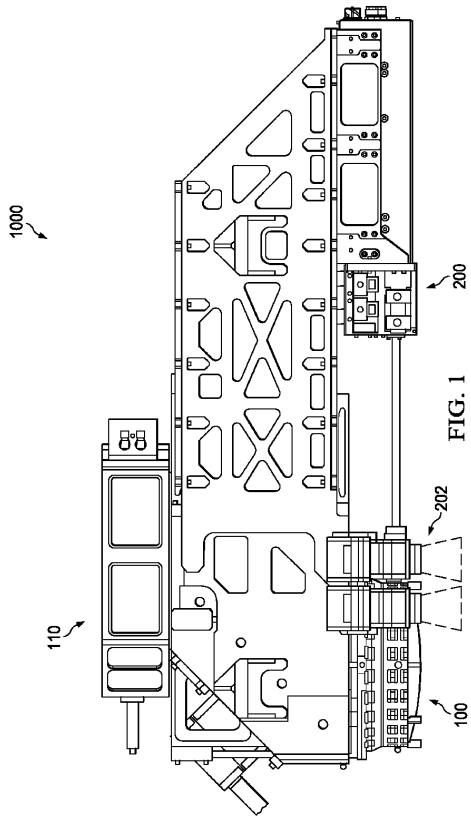
30

40

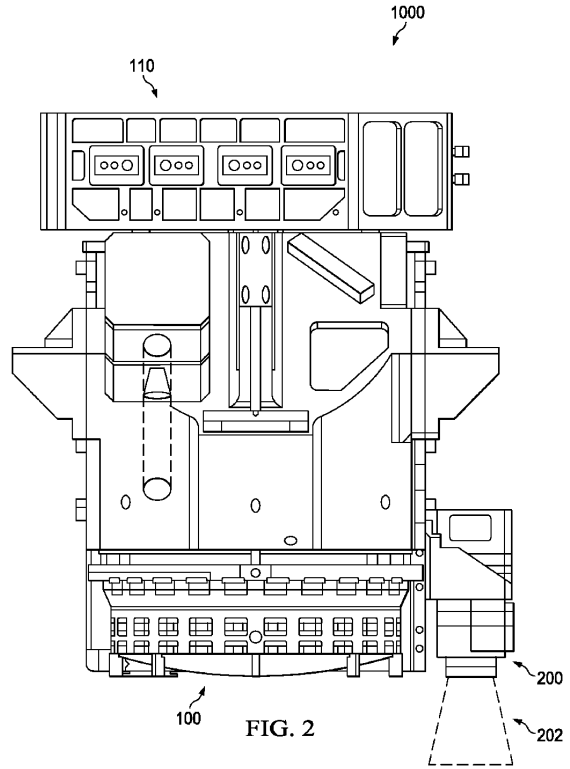
50

【図面】

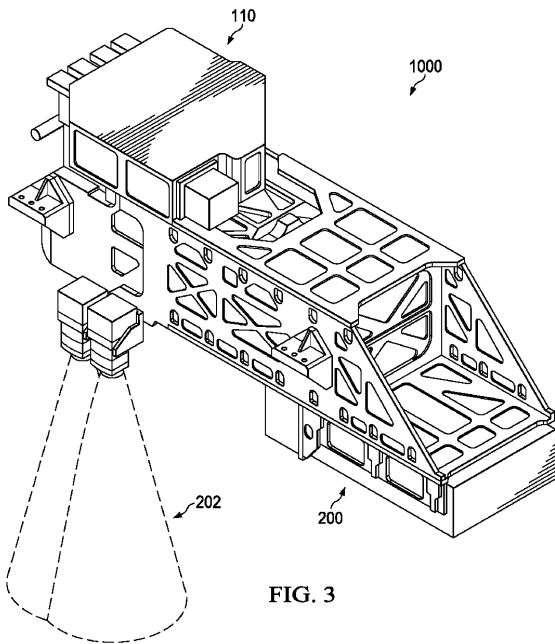
【図 1】



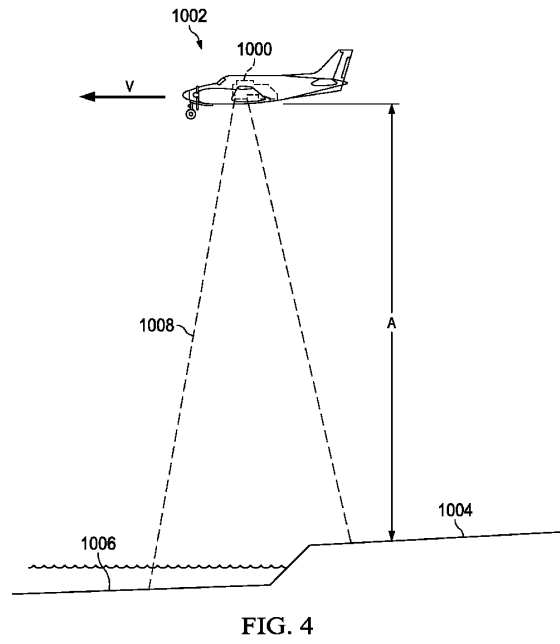
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

20

30

40

50

【 図 5 】

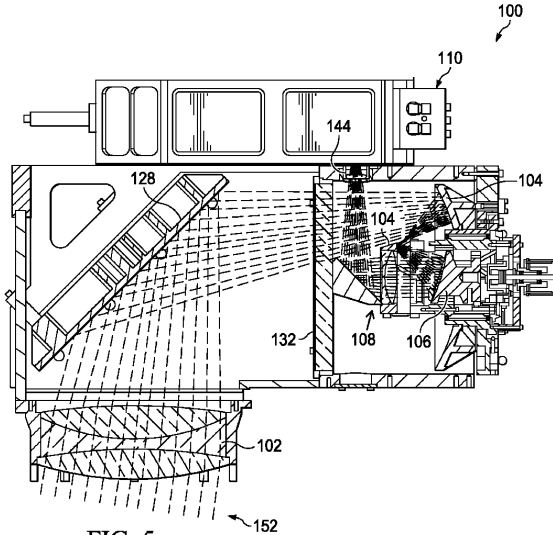


FIG. 5

【 図 6 】

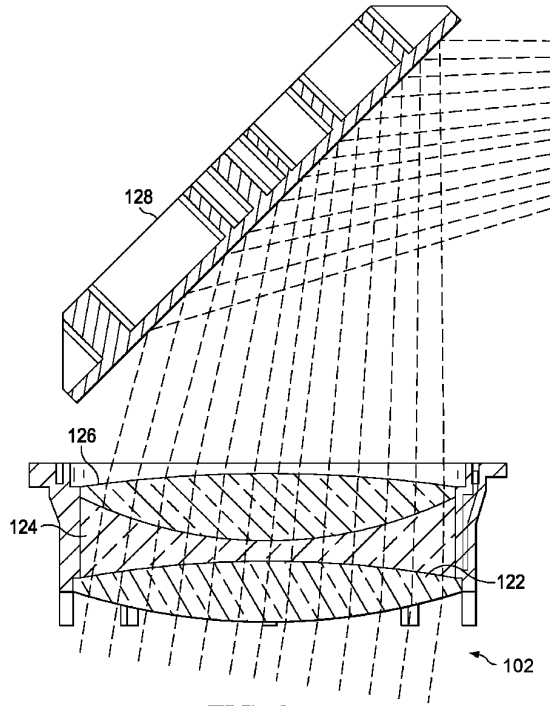


FIG. 6

【 図 7 】

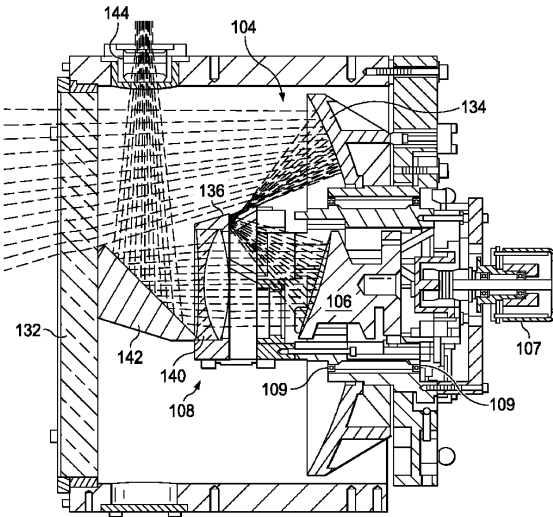


FIG. 7

【 図 8 】

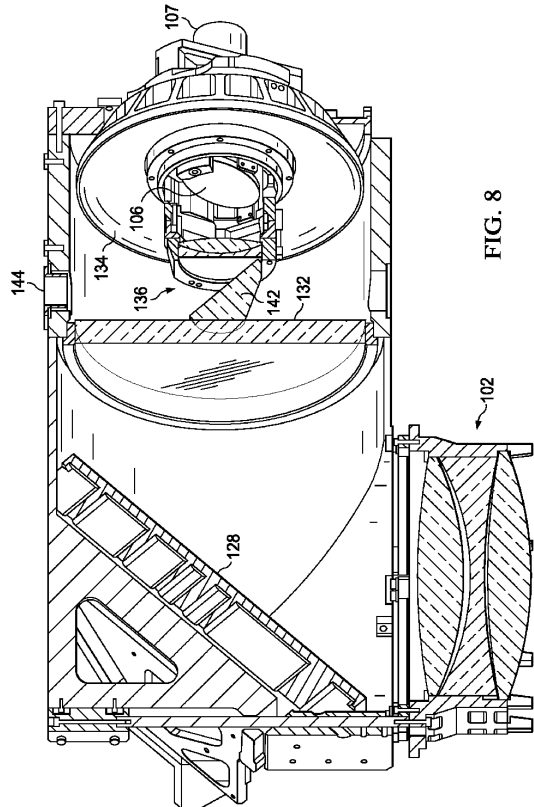


FIG. 8

10

20

30

40

50

【 図 9 】

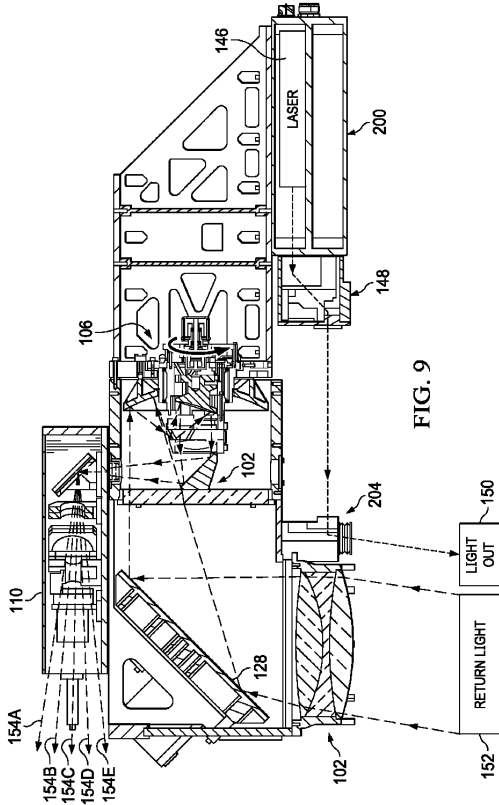


FIG. 9

【 図 1 0 】

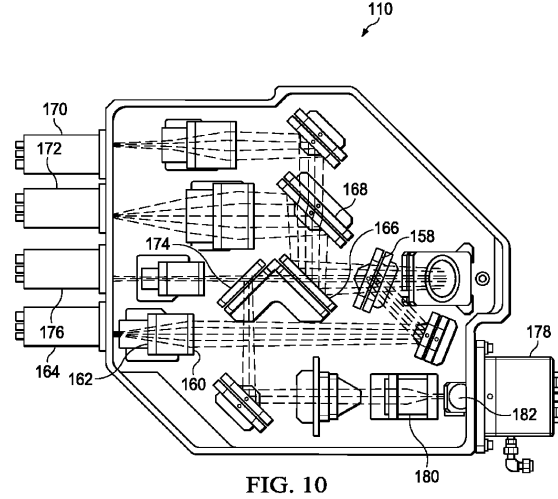


FIG. 10

【 図 1 1 】

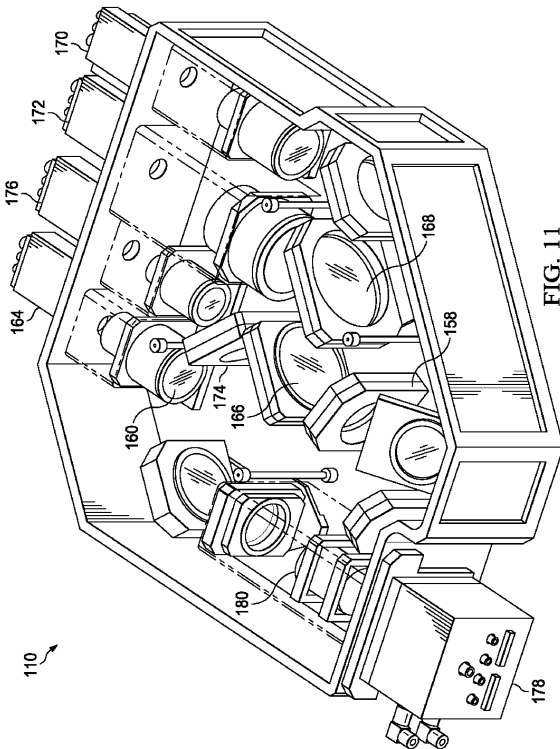


FIG. 11

【 図 1 2 】

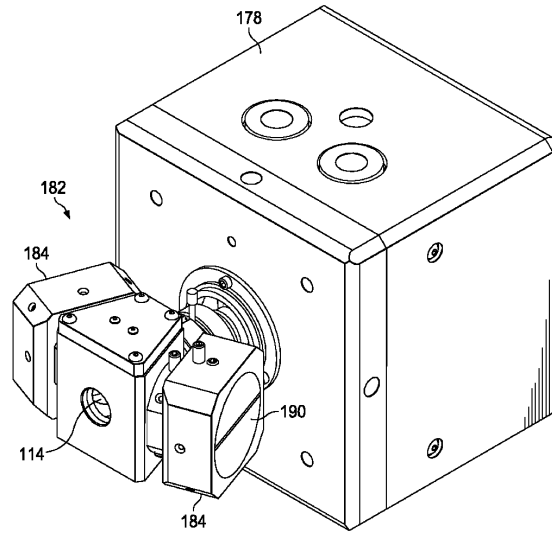


FIG. 12

10

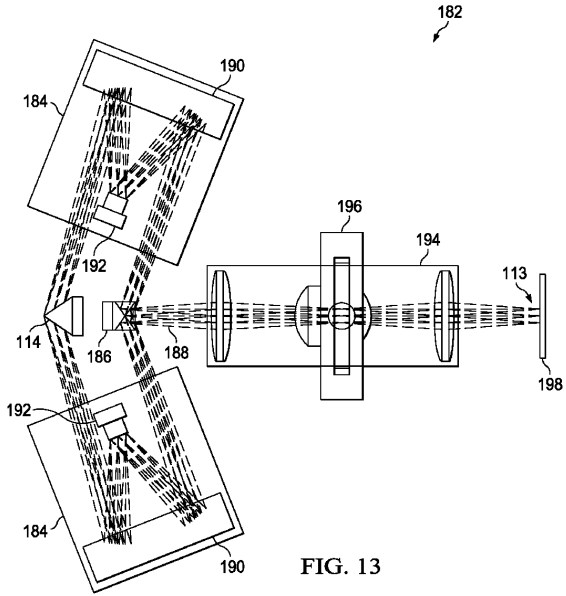
20

30

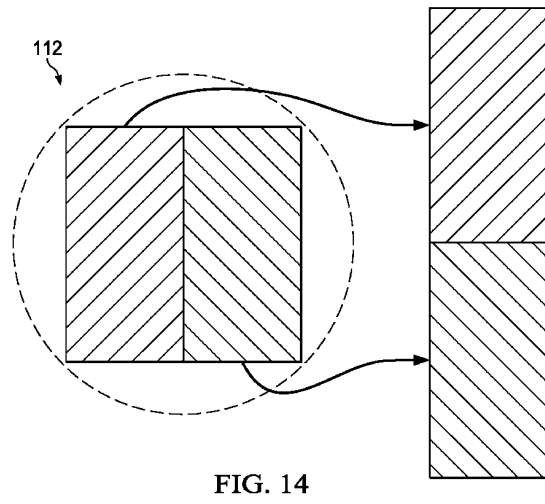
40

50

【 1 3 】

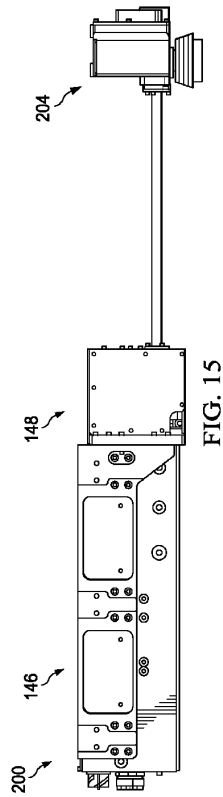


【 1 4 】

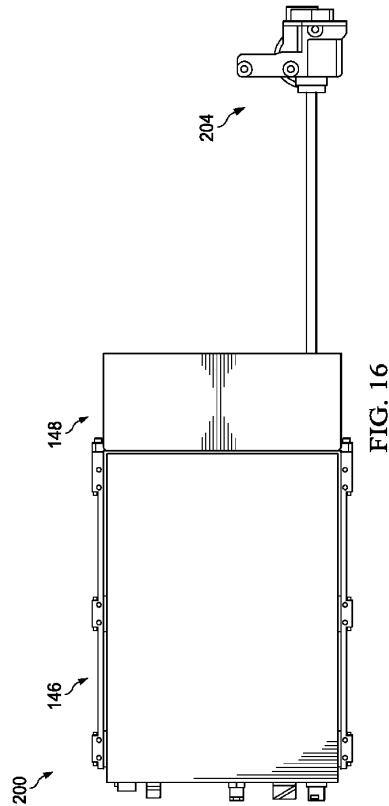


10

【 1 5 】



【 1 6 】



20

30

40

50

【 17 】

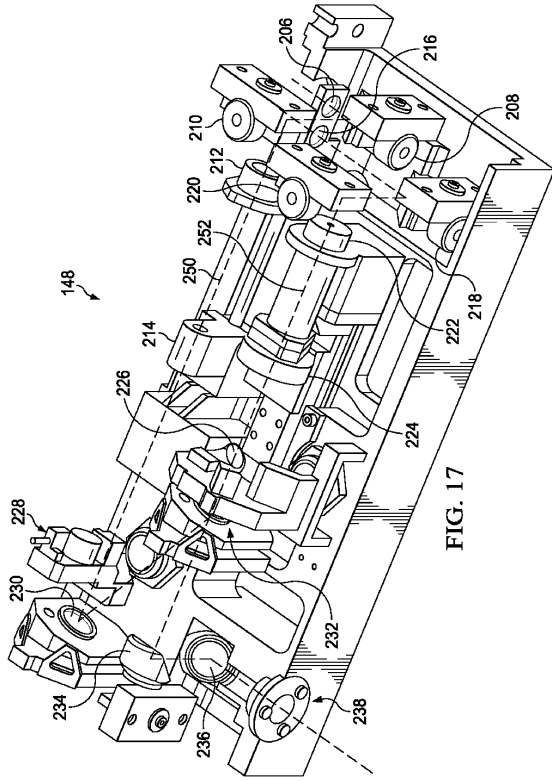


FIG. 17

【 18 】

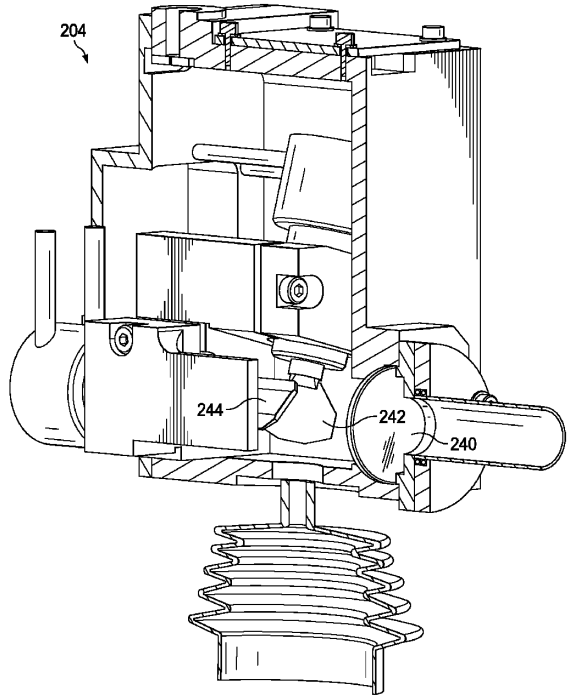


FIG. 18

10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (72)発明者 ホッパー ネイサン リー
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 セッピ ジョセフ アール .
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 フォークナー ザ セカンド ロドニー ロス
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 スミッツ ザ セカンド マーク ダグラス
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 バク ジュンヨン
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 ミルマン マーク ステファン
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 カフーン エリック ジョセフ
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 コットン クリストファー ティー .
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 4 7 2 ハニーオイ フォールズ オールド ブルック トレイ
ル 2 1
- (72)発明者 グルックマン ジョシュア
アメリカ合衆国 メリーランド州 2 1 0 4 5 コロンビア イーグルビーク ロー 5 5 3 6
- (72)発明者 ハルターマン アレクサンダー チェフ
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 2 1 2 1 - 1 9 6 4 サンディエゴ タウン センター ドラ
イブ 9 6 8 9
- (72)発明者 トウエル グラディ
アメリカ合衆国 ジョージア州 3 0 6 5 0 マディソン ノース メイン ストリート 6 5 1
- (72)発明者 スターク アンドリュウ ウォレス
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 ゲルハルト ジョン ヘンリー
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- (72)発明者 リリークropp ウィリアム ジェフリー
アメリカ合衆国 オハイオ州 4 5 4 3 0 デイトン アイデア センター ブールバード 4 4 5 4
ウールパート インコーポレイテッド内
- 審査官 東 治企
- (56)参考文献 米国特許第 0 7 2 4 8 3 4 2 (U S , B 1)
特表昭 5 7 - 5 0 1 4 4 7 (J P , A)
米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 1 4 6 3 0 3 (U S , A 1)
William Clifton et al. , “ Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system ” , Pr
oceedings of SPIE , 2015年05月19日 , Vol.9465 , pp.946506-1 to 946506-8 , DOI: 10.11
17/12.2193827
Thomas Bahr et al. , "Airborne Geiger-Mode LiDAR for Large-Scale, High-Resolution Wide-A
rea Mapping ” , Journal for Geographic Information Science GI_Forum , 2016年 , Vol. 4 , N

(58)調査した分野 o. 1 , pp.85-93 , DOI: 10.1553/giscience2016_01_s85
(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 S 7 / 4 8 - 7 / 5 1

G 0 1 S 1 7 / 0 0 - 1 7 / 9 5

G 0 1 C 3 / 0 0 - 3 / 3 2

J S T P l u s / J M E D P l u s / J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I I)