

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2019-537012
(P2019-537012A)

(43) 公表日 令和1年12月19日(2019.12.19)

(51) Int.Cl.

G01S 7/497 (2006.01)
G01S 17/08 (2006.01)

F 1

G01S 7/497
G01S 17/08

テーマコード(参考)

5 J 0 8 4

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 40 頁)

(21) 出願番号 特願2019-527155 (P2019-527155)
 (86) (22) 出願日 平成29年11月21日 (2017.11.21)
 (85) 翻訳文提出日 令和1年7月13日 (2019.7.13)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2017/062703
 (87) 國際公開番号 WO2018/160240
 (87) 國際公開日 平成30年9月7日 (2018.9.7)
 (31) 優先権主張番号 62/428,109
 (32) 優先日 平成28年11月30日 (2016.11.30)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(71) 出願人 519174791
ブラックモア センサーズ アンド アナリティクス インク.
アメリカ合衆国 59718 モンタナ州
ボーズマン エンタープライズ・ブル
バード 136
(74) 代理人 100082072
弁理士 清原 義博
(72) 発明者 クラウチ, ステファン シー.
アメリカ合衆国 59715 モンタナ州
ボーズマン イースト・アルダーソン・
ストリート 127 アパートメント エ
ー

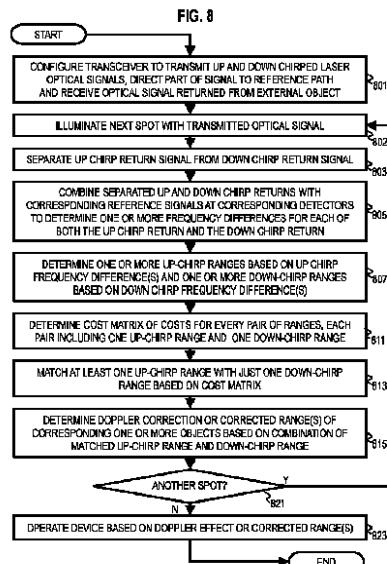
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ドップラー検出および光チャーブ距離検出のドップラー補正のための方法およびシステム

(57) 【要約】

チャーブ光学距離検出のドップラー修正のための技術は、戻り光学信号と、周波数を経時的に増加させるアップチャーブを有する第1のチャーブ送信光学信号との間の対応する周波数差に基づいて、距離の第1のセットを得ることを含む。距離の第2のセットは、戻り光学信号とダウンチャーブを有する第2のチャーブ送信光学信号との間の対応する周波数差に基づいて得られる。コスト関数についての値のマトリックスが決定され、距離の各対1つの値は、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む。一致する第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける対応する1つの距離の対は、マトリックスに基づいて決定される。距離に対するドップラー効果は、一致する距離の対を組み合わせることに基づいて決定される。デバイスはドップラー効果に基づいて操作される。

【選択図】図8



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

プロセッサ上で実施される方法であって、該方法は：

第1のチャーブ送信光学信号と比較された戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第1のセットを得る工程であって、第1のチャーブ送信光学信号は、周波数を経時的に増加させるアップチャーブを含む、工程と；

第2のチャーブ送信光学信号と比較された戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第2のセットを得る工程であって、第2のチャーブ送信光学信号は、周波数を経時的に減少させるダウンチャーブを含む、工程と；

コスト関数についての値のマトリックスを決定する工程であって、コスト関数についての1つの値は距離の各対に対するものであり、距離の各対は第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む、工程と；

値のマトリックスに基づいて、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける対応する1つの距離を含む、一致した距離の対を決定する工程と；一致した距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定する工程と；

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程と、
を含む方法。

【請求項 2】

コスト関数は、第1のセットにおける距離と第2のセットにおける距離との間の差に基づく、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程は、第1のチャーブ送信光学信号および第2のチャーブ送信光学信号によって照射される、複数のスポットにおける任意の物体のドップラー修正位置を示す画像をディスプレイ装置上に提示することをさらに含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 4】

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程は、第1のチャーブ送信光学信号および第2のチャーブ送信光学信号によって照射される、複数のスポットにおけるドップラー修正位置の点群に基づいて、少なくとも1つの物体を識別するデータをデバイスに伝達することをさらに含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 5】

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程は、第1のチャーブ送信光学信号および第2のチャーブ送信光学信号によって照射される、複数のスポットにおけるドップラー効果の大きさを示す画像をディスプレイ装置上に提示することをさらに含み、それによって、移動する物体は静止物体ならびに存在しない物体と区別される、請求項1に記載の方法。

【請求項 6】

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程は、物体との衝突を回避するために車両を移動させることをさらに含み、ここで、車両と物体との間の閉成速度は、第1のチャーブ送信光学信号および第2のチャーブ送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー効果の大きさに基づいて決定される、請求項1に記載の方法。

【請求項 7】

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを操作する工程は、第1のチャーブ送信光学信号および第2のチャーブ送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー修正位置の点群に基づいて、車両または物体を識別することをさらに含む、請求項5に記載の方法。

【請求項 8】

命令の1つ以上のシーケンスを伝達するコンピュータ可読媒体であって、

ここで、1つ以上のプロセッサによる命令の1つ以上のシーケンスの実行は：

10

20

30

40

50

第1のチャープ送信光学信号と比較した戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第1のセットを得る工程であって、第1のチャープ送信光学信号は周波数を経時的に増加させるアップチャープを含む、工程と；

第2のチャープ送信光学信号と比較された戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第2のセットを得る工程であって、第2のチャープ送信光学信号は周波数を経時的に減少させるダウンチャープを含む、工程と；

コスト関数についての値のマトリックスを決定する工程であって、コスト関数についての1つの値は距離の各対に対するものであり、距離の各対は第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む、工程と；

値のマトリックスに基づいて、第1のセットの1つの距離および第2のセットの対応する1つの距離を含む一致する距離の対を決定する工程と；

一致する距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定する工程と；

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを作動させる工程と、
を1つ以上のプロセッサに実施させる、コンピュータ可読媒体。

【請求項9】

装置であって、該装置は：

少なくとも1つのプロセッサと；

命令の1つ以上のシーケンスを含む少なくとも1つのメモリを含み、

少なくとも1つのメモリおよび命令の1つ以上のシーケンスは、少なくとも、

第1のチャープ送信光学信号と比較した戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第1のセットを得る工程であって、第1のチャープ送信光学信号は周波数を経時的に増加させるアップチャープを含む、工程と；

第2のチャープ送信光学信号と比較された戻り光学信号における対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第2のセットを得る工程であって、第2のチャープ送信光学信号は周波数を経時的に減少させるダウンチャープを含む、工程と；

コスト関数についての値のマトリックスを決定する工程であって、コスト関数についての1つの値は距離の各対に対するものであり、距離の各対は第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む、工程と；

値のマトリックスに基づいて、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける対応する1つの距離を含む一致する距離の対を決定する工程と；

一致する距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定する工程と；

距離に対するドップラー効果に基づいてデバイスを作動させる工程と、

を少なくとも1つのプロセッサを用いて装置に実行されるように構成される、装置。

【請求項10】

装置であって、該装置は：

第1の光周波数帯域のアップチャープおよび第1の光周波数帯域に重複しない第2の光周波数帯域のダウンチャープを含む光学の第1の信号を提供するように構成されるレーザー源と；

第1の信号を受け取り、かつ光送信信号および光参照信号を生成するように構成される第1のスプリッタと；

送信信号を装置の外側に向けるように、かつ送信信号によって照射される物体から後方散乱される任意の戻り信号を受け取るように構成される光カプラと；

送信信号または戻り信号を、参照信号に対して既知の周波数シフトに変えるように構成される周波数シフタと；

既知の周波数シフトが適用された後、参照信号および戻り信号を受け取るように配置される光学検出器と；

プロセッサと、を含み、

該プロセッサは、光学検出器から電気信号を受け取る工程と；

10

20

30

40

50

電気信号の第1の周波数帯域における0以上のビート周波数の第1のセットを決定すること、および電気信号の第2の重複しない周波数帯域における0以上のビート周波数の第2のセットを決定することによって、送信信号によって照射される任意の物体の動きによるドップラー効果の決定をサポートする工程であって、

ここで、第1の周波数帯域および第2の重複しない周波数帯域は、既知の周波数シフトに基づいて決定される、工程と、

を行なうように構成される、装置。

【請求項11】

レーザー源が：

f_0 のキャリア周波数を有する光線を提供するように構成されるレーザーと；

f_a と f_b との間に延びる周波数帯域において第1のチャープを生成するように構成された無線周波数波形発生器であって、ここで、 $f_b - f_a = 0$ である、無線周波数波形発生器と；

第1のチャープに基づいて第1の信号を生産するように構成された変調器であって、

第1の光周波数帯域はキャリア周波数の第1の側波帯にあり、および第2の光周波数帯域は第1の側波帯に重複しない第2の側波帯にある、変調器と、
をさらに含む、請求項10に記載の装置。

【請求項12】

システムであって、該システムは：

請求項10に記載の装置と；

少なくとも1つのプロセッサと；

命令の1つ以上のシーケンスを含む少なくとも1つのメモリと、を含み、
少なくとも1つのメモリおよび命令の1つ以上のシーケンスは、少なくとも、

0以上のビート周波数の第1のセットにおける対応するビート周波数に基づいて1以上の距離の第1のセットを決定する工程と；

0以上のビート周波数の第2のセットにおける対応するビート周波数に基づいて、1以上の距離の第2のセットを決定する工程と；

コスト関数についての値のマトリックスを決定する工程であって、コスト関数についての1つの値は距離の各対に対するものであり、距離の各対は第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む、工程と；

値のマトリックスに基づいて、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける対応する1つの距離を含む一致する距離の対を決定する工程と；

一致する距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定する工程と；

ドップラー効果に基づいてデバイスを動作させること、
を少なくとも1つのプロセッサを用いてシステムに実施するように構成される、システム。

【請求項13】

装置であって、該装置は：

第1の光周波数帯域のアップチャープおよび第1の光周波数帯域に重複しない第2の光周波数帯域のダウンチャープを含む、光学の第1の信号を提供するように構成されるレーザー源と；

第1の信号を受け取り、かつ光送信信号および光参照信号を生成するように構成される第1のスプリッタと；

送信信号を装置の外側に向けるように、かつ送信信号によって照射される物体から後方散乱される任意の戻り信号を受け取るように構成される光カプラと；

参照信号の2つのコピーおよび戻り信号の2つのコピーを生成するように構成された第2のスプリッタと；

第1の光周波数帯域を通過させ、かつ第2の光周波数帯域を遮断するように構成された第1の光学フィルターと；

10

20

30

40

50

第2の光周波数帯域を通過させ、かつ第1の光周波数帯域を遮断するように構成された第2の光学フィルターと；

第1の光学フィルターを通過した後、参照信号の1つのコピーおよび戻り信号の1つのコピーを受け取るように配置される第1の光学検出器と；

第2の光学フィルターを通過した後、参照信号の異なるコピーおよび戻り信号の異なるコピーを受け取るように配置される第2の光学検出器と；

プロセッサと、を含み、

該プロセッサは、第1の光学検出器から第1の電気信号を受け取り、第2の光学検出器から第2の電気信号を受け取る工程と；

第1の電気信号における0以上のビート周波数の第1のセットを決定すること、および第2の電気信号における0以上のビート周波数の第2のセットを決定することによって、送信信号によって照射される任意の物体の動きによるドップラー効果の決定をサポートする工程と、

を行うように構成される、装置。

【請求項14】

レーザー源が、

f_0 のキャリア周波数を有する光線を提供するように構成されるレーザーと；

f_a と f_b との間に延びる周波数帯域において第1のチャープを生成するように構成された無線周波数波形発生器であって、ここで、 $f_b - f_a = 0$ である、無線周波数波形発生器と；

第1のチャープに基づいて第1の信号を生産するように構成された変調器であって、ここで、第1の光周波数帯域はキャリア周波数の第1の側波帯にあり、および第2の光周波数帯域は第1の側波帯に重複しない第2の側波帯にある、変調器と、
をさらに含む、請求項13に記載の装置。

【請求項15】

システムであって、該システムは：

請求項13に記載の装置と；

少なくとも1つのプロセッサと；

命令の1つ以上のシーケンスを含む少なくとも1つのメモリと、を含み、
少なくとも1つのメモリおよび命令の1つ以上のシーケンスは、少なくとも、0以上のビート周波数の第1のセットにおける対応するビート周波数に基づいて、1以上の距離の第1のセットを決定する工程と；

0以上のビート周波数の第2のセットにおける対応するビート周波数に基づいて、1以上の距離の第2のセットを決定する工程と；

コスト関数についての値のマトリックスを決定する工程であって、コスト関数についての1つの値は距離の各対に対するものであり、距離の各対は第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む、工程と；

値のマトリックスに基づいて、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける対応する1つの距離を含む、一致する距離の対を決定する工程と；

一致する距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定する工程と；

ドップラー効果に基づいてデバイスを動作させる工程と、
を少なくとも1つのプロセッサを用いてシステム実施せるように構成される、システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

<関連出願の相互参照>

本出願は、2016年11月30日に出願された仮出願62/428,109の利益を主張し、35 U.S.C. § 119(e)に従って、その全体の内容が、あたかも完全

10

20

30

40

50

に本明細書に記載されるかのように、参照によって本明細書に組込まれる。

【0002】

<政府利益の陳述>

本発明は、陸軍省によって与えられた契約W9132V-14-C-0002の下で、政府支援を受けてなされた。政府は本発明において一定の権利を有している。

【背景技術】

【0003】

ニーモニックでしばしばLIDAR、または光検出と測距、と呼ばれる距離の光学的検出は、高度測量から画像化、衝突防止まで、様々な用途に使用される。LIDARは、電波検出と測距(RADAR)などの従来のマイクロウェーブ測距システムよりも小さなビームサイズを用いた、より細かい目盛範囲分解能を提供する。距離の光学的検出は、ターゲットまでの光パルスの往復移動時間に基づく直接測距(direct ranging)、および伝送されたチャーブ光学信号とターゲットから散乱された戻り信号との間の周波数差に基づくチャーブ検出を含むいくつかの異なる技術を用いて達成することができる。

10

【0004】

許容できる距離精度および検出感度を達成するために、直接長距離LIDARシステムは低いパルス繰返し率および非常に高いパルスピークパワーを有する短いパルスレーザを使用する。高いパルスパワーは、光学コンポーネントの急速分解に結びつく可能性がある。チャーブLIDARシステムは、比較的低いピーク光学パワーを有する長い光パルスを使用する。この構成では、距離精度は、パルス持続時間ではなくチャーブ帯域幅に依拠し、したがって、優れた距離精度が依然として得られ得る。

20

【0005】

光搬送波を変調するために、広帯域の無線周波数(RF)電気信号を使用して有用な光チャーブ帯域幅が達成された。チャーブLIDARの最近の進歩は、光学検出器で戻り信号と組み合わせられる参照信号と同じ変調された光搬送波の使用を含み、結果としてもたらされる電気信号において、参照光学信号と戻り光学信号の間の周波数の差に比例する比較的低いビート周波数を生成する。検出器の周波数差のこの種のビート周波数検出は、ヘテロダイン検出と呼ばれる。それは、入手しやすく安価なRFコンポーネントの使用の利点など、当技術分野において知られるいくつかの利点を有する。米国特許第7,742,152に記載される最近の研究は、参照光学信号として、送信された光学信号から分割される光学信号を使用する、新しくより単純な光学コンポーネントの配置を示す。この配置は、その特許においてホモダイン検波と呼ばれる。

30

【発明の概要】

【0006】

本発明者は、光チャーブを用いて検出された距離に対する物体の動きが、ドップラー周波数シフトによりそのような用途に顕著に影響する状況および用途を認識した。ドップラー効果を検出するための、およびそのような光チャーブ距離測定におけるドップラー効果を補正するための技術が提供される。

40

【0007】

第1のセットの実施形態では、プロセッサ上で実施された方法は、第1のチャーブ送信光学信号と比較された戻り光学信号の対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第1のセットを得ることを含む。第1のチャーブ送信光学信号は、その周波数を経時的に増加させるアップチャーブを含む。方法は、第2のチャーブ送信光学信号と比較された戻り光学信号の対応する周波数差に基づいて、1以上の距離の第2のセットを得ることをさらに含む。第2のチャーブ送信光学信号は、その周波数を経時的に減少させるダウンチャーブを有する。方法は、コスト関数についての値のマトリックスを決定することをさらに含み、コスト関数についての1つの値は各対の距離に対するものであり、各対の距離は、第1のセットにおける1つの距離および第2のセットにおける1つの距離を含む。さらに、方法は、第1のセットにおける1つの距離および対応する第2のセットにおける1つの距離

50

を含む一致する距離の対を決定することを含み、ここで、その対応は値のマトリックスに基づく。さらに、方法は、一致する距離の対を組み合わせることに基づいて、距離に対するドップラー効果を決定することを含む。さらに、方法は、ドップラー効果に基づいてデバイスを操作することを含む。

【0008】

第2のセットの実施形態では、装置は、第1の光周波数帯域のアップチャーブと、第1の光周波数帯域に重複しない第2の光周波数帯域の同時ダウンチャーブとからなる第1の光学信号を提供するように構成されるレーザー源を含む。装置は、第1の信号を受け取るように、かつ送信信号および参照信号を生成するように構成される第1のスプリッタを含む。装置は、送信信号を装置の外側に向けるように、かつ送信信号によって照射される任意の物体から後方散乱された任意の戻り信号を受け取るように構成される光カプラをさらに含む。装置は、送信信号または戻り信号を、参照信号に対して既知の周波数シフトに変えるように構成された周波数シフタさらに含む。さらに、装置は、既知の周波数シフトが適用された後に、参照信号および戻り信号を受け取るように配置される光学検出器を含む。加えて、装置は、光学検出器から電気信号を受け取る工程を行なうように構成されたプロセッサをさらに含む。プロセッサは、電気信号の第1の周波数帯域における0以上のビート周波数の第1のセット、および電気信号の第2の重複しない周波数帯における0以上のビート周波数の第2のセットを決定することによって、送信信号によって照射される任意の物体の動きによるドップラー効果の決定をサポートするようにさらに構成される。第1の周波数帯域および第2の重複しない周波数帯域は、既知の周波数シフトに基づいて決定される。

10

20

30

40

【0009】

第2のセットのいくつかの実施形態では、レーザー源は、レーザー、無線周波数波形発生器、および変調器からなる。レーザーは、 f_0 のキャリア周波数を有する光線を提供するように構成される。無線周波数波形発生器は、 f_a と f_b との間に延びる無線周波数帯において第1のチャーブを生成するように構成され、ここで $f_b > f_a > 0$ である。変調器は、第1のチャーブに基づいて、第1の光周波数帯域がキャリア周波数の第1の側波帯にあり、第2の光周波数帯域が第1の側波帯に重複しない第2の側波帯にある第1の光学信号を生産するように構成される。

【0010】

第3のセットの実施形態では、装置は、第1の光周波数帯域のアップチャーブ、および第1の光周波数帯域に重複しない第2の光周波数帯域の同時ダウンチャーブからなる第1の光学信号を提供するように構成されるレーザー源を含む。装置は、第1の信号を受け取るように、かつ送信信号および参照信号を生成するように構成される第1のスプリッタを含む。装置は、送信信号を装置の外側に向けるように、かつ送信信号によって照射される任意の物体から後方散乱された任意の戻り信号を受け取るように構成される光カプラをさらに含む。さらに、装置は、参照信号の2つのコピーおよび戻り信号の2つのコピーを生成するように構成される第2のスプリッタを含む。さらに、装置は2つの光学フィルターを含む。第1の光学フィルターは、第1の光周波数帯域を通過させ、第2の光周波数帯域を遮断するように構成される。第2の光学フィルターは、第2の光周波数帯域を通過させ、第1の光側波帯を遮断するように構成される。装置は、2つの光学検出器をさらに含む。第1の光学検出器は、第1の光学フィルターを通過した後に、参照信号の1つのコピーおよび戻り信号の1つのコピーを受け取るように配置される。第2の光学検出器は、第2の光学フィルターを通過した後に、参照信号の異なるコピーおよび戻り信号の異なるコピーを受け取るように配置される。加えて、装置は、第1の光学検出器から第1の電気信号を、および第2の光学検出器から第2の電気信号を受け取るステップを行なうように構成されるプロセッサをさらに含む。プロセッサは、第1の電気信号の0以上のビート周波数の第1のセットを決定すること、および第2の電気信号の0以上のビート周波数の第2のセットを決定することによって、送信信号によって照射される任意の物体の動きによるドップラー効果の決定をサポートするようにさらに構成される。

50

【0011】

他の実施形態では、システムまたは装置あるいはコンピュータ可読媒体は、上記方法の1つ以上の工程を行なうように構成される。

【0012】

さらに他の様様、特徴、および利点は、本発明を実行するために企図される最良の形態を含む、多くの特定の実施形態および実施を単に例証することにより、以下の詳細な記載から容易に明白である。さらに、他の実施形態は他のおよび様々な特徴と利点も例証することができ、本発明の精神と範囲から逸脱することなく、その詳細のいくつかを様々な明らかな点で修正することができる。それに応じて、図面と説明は本質的に例示的なものと見なされるべきであって、限定的として見なされるべきではない。

10

【図面の簡単な説明】

【0013】

同様の参照符号が類似した要素を指す添付図面の図において、例によって、および限定することなく、実施形態が例証される：

【図1A】一実施形態にかかる、距離の例示的光チャーブ測定を例証するグラフのセットである。

【図1B】一実施形態にかかる、距離を示す、チャーブ除去 (d e - c h i r p i n g) から生じるビート周波数の例示的測定を例証するグラフである。

【図2A】様々な実施形態にかかる、高分解能 LIDAR システムの例示的コンポーネントを例証するブロック図である。

20

【図2B】様々な実施形態にかかる、高分解能 LIDAR システムの例示的コンポーネントを例証するブロック図である。

【図3A】一実施形態にかかる、ヘテロダインチャーブ LIDAR システムの例示的コンポーネントを例証するブロック図である。

【図3B】一実施形態にかかる、ホモダインチャーブ LIDAR システムの例示的コンポーネントを例証するブロック図である。

【図4A】一実施形態にかかる、アップチャーブ LIDAR システムからのビート周波数ピークに基づく、ターゲットが動いている場合のいくつかのターゲットまでの距離を示す例示的グラフを例証するブロック図である。

【図4B】一実施形態にかかる、ダウンチャーブ LIDAR システムからのビート周波数ピークに基づく、ターゲットが動いている場合のいくつかのターゲットまでの距離を示す例示的グラフを例証するブロック図である。

30

【図5A】一実施形態にかかる、LIDAR システムのための例示的な連続的なアップチャーブおよびダウンチャーブ送信光学信号を例証するグラフである。

【図5B】一実施形態にかかる、LIDAR システムのための例示的な同時アップチャーブおよびダウンチャーブ送信光学信号を例証するグラフである。

【図5C】一実施形態にかかる、LIDAR システムのための同時アップチャーブおよびダウンチャーブ送信光学信号を生成するために、変調器によって生成された例示的一次側波帯を例証するグラフである。

【図5D】他の実施形態にかかる、光搬送波に対する LIDAR システムのための例示的な同時アップチャーブおよびダウンチャーブ送信光学信号ならびに参照信号 (LO) を例証するグラフである。

40

【図5E】他の実施形態にかかる、光搬送波に対する LIDAR システムのための例示的なシフトされた同時アップチャーブおよびダウンチャーブ送信光学信号ならびに参照信号 (LO) を例証するグラフである。

【図6】一実施形態にかかる、同時アップチャーブおよびダウンチャーブ LIDAR システムのための例示的コンポーネントを例証するブロック図である。

【図7A】一実施形態にかかる、例示的な対のアップチャーブおよびダウンチャーブの距離を例証するブロック図である。

【図7B】一実施形態にかかる、図7Aに示される例示的な対のアップチャーブおよびダ

50

ウンチャーブの距離に対する例示的なコストマトリックスを例証するブロック図である。

【図8】一実施形態にかかる、距離に対するドップラー効果を補正するために、アップチャーブおよびダウンチャーブのLIDARシステムを使用するための例示的な方法を例証するフローチャートである。

【図9A】一実施形態にかかる、ドップラー修正距離および非修正距離に対する改善に基づくディスプレイ装置上の出力例を例示する画像である。

【図9B】一実施形態にかかる、ドップラー修正距離および非修正距離に対する改善に基づくディスプレイ装置上の出力例を例示する画像である。

【図9C】一実施形態にかかる、ドップラー修正距離および非修正距離に対する改善に基づくディスプレイ装置上の出力例を例示する画像である。

【図10A】一実施形態にかかる、LIDARシステムに接近するターゲットについて、ドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の出力例を例証する3つの画像のセットである。

【図10B】一実施形態にかかる、LIDARシステムから後退するターゲットについて、ドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の出力例を例示する3つの画像のセットである。

【図11】一実施形態にかかる、高分解能でドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の出力例を例証する画像である。

【図12】本発明の実施形態が実施され得るコンピュータシステムを例証するブロック図である。

【図13】本発明の実施形態が実施され得るチップセットを例証する。

【発明を実施するための形態】

【0014】

光チャーブ距離検出のドップラー補正のための方法および装置ならびにシステムおよびコンピュータ可読媒体が記載されている。以下の説明では、説明の目的で、本発明の完全な理解を提供するために多数の具体的な詳細が記載されている。しかしながら、本発明がこれらの具体的な詳細なしで実施されてもよいことは当業者に明らかであろう。他の例では、本発明を必要に不明瞭にすることを避けるために、周知の構造および装置がブロック図の形態で示されている。

【0015】

広い範囲を示す数値範囲およびパラメーターは近似値であるものの、特定の非限定的な例に示される数値は、可能な限り正確に報告される。しかしながら、いずれの数値も、本稿執筆時点で各試験測定値に見られる標準偏差から必然的に生じる特定の誤差を本質的に含む。さらにまた、文脈から他に明らかでない限り、本明細書に提示される数値は、最下位桁によって与えられる暗黙の精度を有する。したがって、値1.1は、1.05から1.15までの値を意味する。「約(a b o u t)」という用語は、所与の値を中心としたより広い範囲を示すために使用され、文脈から明らかな場合を除いて、「約1.1」のように最下位桁付近のより広い範囲を意味する場合は、1.0から1.2の範囲を意味する。最下位桁が不明確である場合、「約」という用語は、2倍の増減幅を意味し、例えば、「約X」は、0.5Xから2Xの範囲内の値を意味し、例えば、約100は、50から200の範囲内の値を意味する。さらに、本明細書に開示されている全ての範囲は、その中に包含されるありとあらゆる部分的範囲を包含するものと理解されるべきである。例えば、「10未満」の範囲は、最小値ゼロ以上最大値10以下のありとあらゆる部分的範囲、すなわち、例えば1から4などのゼロ以上の最小値および10以下の最大値を有するありとあらゆる部分的範囲を含むことができる。

【0016】

本発明のいくつかの実施形態は、線形周波数変調光信号に関連して以下に説明されるが、チャーブは、線形である必要はなく、任意の時間的に変化する変化率に応じて周波数を変化させることができる。実施形態は、線形ステッピングまたは回転光学部品などの任意

10

20

30

40

50

の既知の走査手段を使用してあるいは送信機および検出器のアレイまたは一対の検出器によってその後に走査されることができる、単一の光ビームおよび単一の検出器または一対の検出器への戻りに関して説明される。

【0017】

1. チャープ検出の概要

図1Aは、実施形態にかかる、例示的な距離の光チャープ測定値を示す一組のグラフ(110、120、130、140)である。横軸(112)は、4つのグラフ全てについて同じであり、ミリ秒(m s、 $1 \text{ m s} = 10^{-3}$ 秒)のオーダーで任意の単位の時間を示している。グラフ(110)は、送信光信号として使用される光ビームのパワーを示している。グラフ(110)の縦軸(114)は、送信信号のパワーを任意の単位で示している。トレース(116)は、パワーが時間0から始まる限られたパルス持続時間の間オフであることを示している。グラフ(120)は、送信信号の周波数を示している。縦軸(124)は、任意の単位で送信される周波数を示している。トレース(126)は、パルスの持続時間にわたってパルスの周波数が f_1 から f_2 まで増加し、したがって帯域幅 $B = f_2 - f_1$ を有することを示している。周波数変化率は、 $(f_2 - f_1) / \tau$ である。

10

【0018】

戻り信号は、グラフ(120)と同様に、時間を示す横軸(112)と周波数を示す縦軸(124)とを有するグラフ(130)に示される。グラフ(120)のチャープ(126)もまた、グラフ(130)上に破線としてプロットされている。第1の戻り信号は、まさに強度が減少し(図示せず)且つ t だけ遅延された送信参照信号であるトレース(136a)によって与えられる。Rをターゲットまでの距離として $2R$ の距離をカバーした後に戻り信号が外部物体から受信されると、遅延時間 t で開始する戻り信号は、cを媒体中の光速(秒速約 3×10^8 メートル、m/s)として $2R/c$ によって与えられる。この間、周波数は、 f_R と呼ばれ且つ周波数変化率に遅延時間を乗算して与えられる距離に応じた量だけ変化する。これは、式1aによって与えられる。

20

【0019】

【数1】

$$R = f_R c \tau / 2B \quad (1b)$$

30

f_R の値は、チャープ除去と呼ばれる時間領域混合動作における送信信号(126)と戻り信号(136a)との間の周波数差によって測定される。したがって、距離Rは、式1bによって与えられる。

【0020】

【数2】

$$R = f_R c \tau / 2B \quad (1b)$$

もちろん、パルスが完全に送信された後に戻り信号が到着した場合、すなわち、 $2R/c$ がよりも大きい場合、式1aおよび1bは、有効ではない。この場合、参照信号は、戻り信号が参照信号と確実に重複するように、既知の量または固定量だけ遅延される。参照信号の固定のまたは既知の遅延時間は、式1bから計算された距離に追加される追加の距離を与えるために光速cによって乗算される。媒体内の光速の不確実性のために絶対距離がずれことがあるが、これは、ほぼ一定の誤差であり、周波数差に基づく相対距離は、依然として非常に正確である。

40

【0021】

状況によっては、送信光ビームによって照射されたスポットは、半透明物体の前面および背面、または物体のLIDARからの距離が異なるより近い部分とより遠い部分、または照射されたスポット内の2つの別々の物体など、異なる距離で2つ以上の異なる散乱体

50

に遭遇する。そのような状況では、グラフ(130)上にトレース(136b)によって示される第2の強度の低下した異なる遅延信号もまた受信される。これは、式1bを使用して異なる距離を与える f_R の異なる測定値を有する。状況によっては、複数の戻り信号が受信される。

【0022】

グラフ(140)は、第1の戻り信号(136a)と参照チャーブ(126)との間の周波数差 f_R を示している。横軸(112)は、図1Aの他の全ての整列グラフと同様に時間を示し、縦軸(134)は、はるかに拡大したスケールでの周波数差を示している。トレース(146)は、送信チャーブの間に測定された一定周波数 f_R を示し、これは式1bによって与えられるような特定の距離を示す。第2の戻り信号(136b)は、存在する場合、チャーブ除去中に異なるより大きな値の f_R (図示せず)を生じさせ、その結果、式1bを使用してより広い距離を生み出す。

10

【0023】

チャーブ除去の一般的な方法は、参照光信号および戻り光信号の両方を同じ光検出器に向けることである。検出器の電気出力は、検出器上に収束する2つの信号の周波数の差に等しいか、あるいはそれに依存するビート周波数によって支配される。この電気出力信号のフーリエ変換は、ビート周波数にピークを生み出す。このビート周波数は、テラヘルツ(THz、 $1\text{ THz} = 10^{12}$ ヘルツ)の光周波数距離ではなく、メガヘルツ(MHz、 $1\text{ MHz} = 10^6$ ヘルツ=毎秒 10^6 サイクル)の無線周波数(RF)距離内にある。そのような信号は、マイクロプロセッサ上で実行される高速フーリエ変換(FFT)アルゴリズムまたは特別に構築されたFFTもしくは他のデジタル信号処理(DSP)集積回路などの一般的で安価なRFコンポーネントによって容易に処理される。他の実施形態では、戻り信号は、(局部発振器としてのチャーブに対して)局部発振器として作用する連続波(CW)トーンと混合される。これは、それ自体がチャーブ(または波形が送信されたものであればなんでも)である検出信号をもたらす。この場合、検出信号は、Kachellmyer 1990年に記載されているように、デジタル領域で整合フィルタリングを受けることになる。不利な点は、デジタイザの帯域幅要件が一般に高いことである。コピーレント検出のプラス面は、他の点では保持される。

20

【0024】

図1Bは、実施形態にかかる、距離を示す、チャーブ除去から生じるビート周波数の例示的な測定値を示すグラフである。横軸(152)は、メガヘルツの周波数を示し、縦軸は、送信パワー密度 I_T に対する戻り信号パワー密度 I_R をデシベル(dB、dB単位のパワー= $20\log(I_R/I_T)$)で示している。トレース(156)は、FFT回路によって生成されるような光検出器によって出力された電気信号のフーリエ変換であり、Adanyら、2009年によって公表されたデータに基づいている。ピークの水平方向位置は f_R を与え、式1bを使用して距離を推定するために使用される。さらに、ピークの他の特性が使用されて戻り信号を記述することができる。例えば、ピークでのパワー値は、トレース(156)の最大値、またはより一般的には、ピーク値(図1Bの約-31dB)とピークの肩部のノイズフロア(図1Bの約-50dB)との差157(図1Bの約19dB)によって特徴付けられ、ピークの幅は、半値全幅(FWHM)における周波数幅(158)(図1Bの約0.08MHz)によって特徴付けられる。複数の識別可能な反射がある場合、おそらく複数の異なるパワーレベルおよび幅を有する光検出器の電気出力のFFTにおける複数のピークが存在する。トレース内のピークを自動的に識別し、それらのピークを位置、高さおよび幅によって特徴付けるために任意の方法を使用することができる。例えば、いくつかの実施形態では、マサチューセッツ州ナティックのMATHWORKSTMのMATLABTMから入手可能なMATLAB-信号処理ツールボックスによるFFTWまたはピーク検出が使用される。カリフォルニア州サンタクララのNVIDIASTMから入手可能なCUDAにおけるFFTWおよびCUDASTMにおけるカスタムピーク検出に依存するカスタム実装を使用することもできる。カスタム実装は、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)上でプログラムされてきた。一般的に

30

40

50

使用されているアルゴリズムは、距離プロファイルを閾値にして、いくつかの関数についてのピークの重心アルゴリズム、ピークフィッティングアルゴリズム（3点ガウシアンフィット）、または非線形フィット（ガウシアンなど）を実行してより正確にピークの位置を判定することである。

【0025】

検出された物体（ソース）が速度 v_s で移動しており且つ LIDAR システム（観測者）が両者を結ぶベクトル上で速度 v_o で移動している場合、戻り信号は、ドップラーシフトされることができ、検出されたビート周波数 f_R もまたシフトされ、検出距離内で誤差をもたらす可能性がある。多くの状況において、検出されている物体の形状は、複数の反射の相対位置に基づいて識別される。したがって、物体の形状は、誤っていることがある、物体を識別する能力が損なわれることがある。

10

【0026】

観測された反射の周波数 f' は、ドップラー効果による反射の正しい周波数 f とは異なり、式 2 a によって近似される。

【0027】

【数 3】

$$f' = \frac{(c + v_o)}{(c + v_s)} f \quad (2a)$$

ここで、 c は、媒体中の光速である。観測者およびソースが両者間のベクトル上で同じ方向に同じ速度で移動している場合、2つの周波数は同じであることに留意されたい。2つの周波数の差 $f = f' - f$ は、距離測定の誤差を構成するドップラーシフト D であり、式 2 b によって与えられる。

20

【0028】

【数 4】

$$D = \left[\frac{(c + v_o)}{(c + v_s)} - 1 \right] f \quad (2b)$$

誤差の大きさは、信号の周波数 f とともに増加することに留意されたい。また、静止 LIDAR システム ($v_o = 0$) の場合、1秒間に 10 メートル移動するターゲット ($v_o = 10$) の場合、および周波数約 500 THz の可視光の場合、誤差の大きさは、図 1 B において約 22 MHz である f_R の大きさの 75 % である 16 MHz のオーダーになり、75 % の f_R の誤差、したがって 75 % の距離の誤差をもたらすことにも留意されたい。様々な実施形態では、ドップラーシフト誤差が検出され、本明細書で説明されるように距離を補正するために使用される。

30

【0029】

2. チャープ検出ハードウェアの概要

チャープ検出手法が実装される方法を示すために、いくつかの一般的且つ具体的なハードウェア手法が説明される。図 2 A および図 2 B は、様々な実施形態にかかる、高解像度 LIDAR システムの例示的な構成要素を示すブロック図である。図 2 A において、レーザー源 (212) は、RF 波形発生器 (215) からの入力に基づいて変調器 (214) において周波数変調された搬送波 (201) を放射して、帯域幅 B および持続時間 T を有するパルスを生成する。いくつかの実施形態では、RF 波形発生器 (215) は、処理システム (250) からのコマンドによってソフトウェア制御される。スプリッタ (216) は、変調された光波形を、ビーム (203) のエネルギーの大部分を有する送信信号 (205) と、それにもかかわらずターゲット (図示せず) から散乱した戻り光 (291) との良好なヘテロダインまたはホモダイン干渉を生じるのに十分であるはるかに少量のエネルギーを有する参照信号 (207) とに分割する。いくつかの実施形態では、走査光学系 (218) を使用してその経路内の任意の物体をプロファイルするために、送信ビームが複数の角度にわたって走査される。

40

50

【0030】

参照ビームは、散乱光とともに検出器アレイ（230）に到達するのに十分に参照経路（220）内で遅延される。いくつかの実施形態では、スプリッタ（216）は、変調器（214）の上流にあり、参照ビーム（207）は、変調されていない。いくつかの実施形態では、参照信号は、新たなレーザ（図示せず）を使用して独立に生成され、参照経路（220）内の別個の変調器（図示せず）および発生器（215）からのRF波形を使用して別々に変調される。いくつかの実施形態では、図2Bを参照して以下に説明されるように、異なる変調器が使用される。しかしながら、コヒーレンスを保証するために、送信信号および参照信号の両方について1つのレーザー源（212）のみが使用される。様々な実施形態では、より柔軟でないアプローチからより柔軟なアプローチまで、1) 経路長がよく一致するように検出器アレイにおいて送信ビームの一部を反射し返すようにシーン内にミラーを置くことによって、2) 経路長を厳密に一致させるためにファイバ遅延を使用し、図2Aに示唆されるように、特定の距離について観測されるかもしくは予想される位相差を補償するための経路長調整を伴ってもしくは伴わずに、参照ビームを検出器アレイ付近の光学素子によって広げることによって、もしくは3) 周波数シフト装置（音響光学変調器）または局部発振器波形変調の時間遅延を使用して、経路長の不一致を補償するための別個の変調を生成することによって、またはいくつかの組み合わせによって、参照が散乱もしくは反射されたフィールドとともに到達する。いくつかの実施形態では、反射が遅延なしに参照信号と十分に重複するのに十分なほど、ターゲットが近くパルス持続時間が長い。いくつかの実施形態では、参照信号（207b）は、1つ以上の光ミキサ（232）において戻り信号（291）と光学的に混合される。

10

20

30

【0031】

様々な実施形態では、ターゲットの複数の部分は、各走査ビームについてそれぞれの戻り光（291）信号を検出器アレイ（230）に散乱し返し、複数のビームおよび複数の反射によって照射されたターゲットの複数の部分それぞれの複数の距離に基づく点群を生成する。検出器アレイは、ターゲットからの戻りビーム（291）に対してほぼ垂直な平面内に配置された単一のまたは平衡対の光検出器、あるいはそのような光学検出器の1Dまたは2Dアレイである。界面パターンの位相または振幅、あるいはいくつかの組み合わせは、パルス持続時間の間に複数回、各検出器について取得システム（240）によって記録される。パルス持続時間あたりの時間サンプル数は、ダウンレンジの広がりに影響する。この数は、大抵の場合、パルス繰り返し率と利用可能なカメラのフレームレートに基づいて選択される実際的な考慮事項である。フレームレートは、「デジタイザ周波数」と呼ばれることが多いサンプリング帯域幅である。基本的に、Yレンジの幅の分解能ビンを有するパルス中にX個の検出器アレイフレームが収集される場合、X*Yレンジの広がりが観測されることができる。取得されたデータは、図8を参照して以下に説明されるコンピュータシステム、または図9を参照して以下に説明されるチップセットなどの処理システム（250）に利用可能にされる。いくつかの実施形態では、取得されたデータは、ターゲットのそれぞれの複数の部分の複数の距離に基づく点群である。

30

【0032】

ドップラー補償モジュール（270）は、ドップラーシフトの大きさおよびそれに基づいて補正された距離を判定する。いくつかの実施形態では、ドップラー補償モジュール（270）は、RF波形発生器（215）を制御する。

40

【0033】

図2Bは、LO信号を生成する参照経路にソフトウェア制御遅延を導入することを可能にする代替のハードウェア構成を示している。レーザー源（212）、スプリッタ（216）、送信信号（205）、走査光学系（218）、光ミキサ（232）、検出器アレイ（230）、取得システム（240）および処理システム（250）は、図2Aを参照して上述したとおりである。図2Bでは、発生器（215）からのRF波形を光搬送波に印加するために、送信経路に（214a）および参照経路に（214b）の2つの別々の光変調器がある。スプリッタ（216）は、レーザー源（212）と変調器（214a）お

50

よび(214b)との間で移動され、変調器(214a)に当たる光信号(283)と、修正された参照経路(282)において変調器(214b)に当たる低振幅参照経路信号(287a)とを生成する。この実施形態では、光201は、変調が生じる前に送信(TX)経路ビーム(283)と参照/局部発振器(LO)経路ビーム(287a)とに分割され、各経路において別々の変調器が使用される。二重変調器アプローチにより、どちらの経路もオフセット開始周波数および/またはオフセット開始時間でチャーブによってプログラムされることができる。システム(280)がチャーブドップラー補償のために距離遅延効果を獲得することを可能にするために、これを使用することができる。各レンジゲートで使用される遅延をシフトすることによって、システムは、他のシステム制限(検出器およびデジタイザの帯域幅、測定時間など)にもかかわらず、高分解能で明確に測定することができる。したがって、いくつかの実施形態では、修正ドップラー補償モジュール(278)は、RF波形発生器(215)を制御して、後述するドップラー補償モジュールによって生成された各ドップラーシフトに適切な遅延時間を課す。そして、ソフトウェア制御遅延参照信号(287b)は、上述したように戻り信号(291)と混合される。他の実施形態では、LO参照経路(282)のソフトウェア制御遅延は、適応走査アプローチがダウンレンジ次元においても適応的であることを可能にする。

【0034】

例えば、いくつかの実施形態では、使用されるレーザーは、レーザーを駆動する電流に適用される変調を用いて能動的に線形化された。変調を提供する電気光学変調器を用いて実験も行われた。システムは、様々な実施形態について以下により詳細に説明されるように、所望のダウンレンジ分解能に適した帯域幅Bおよび持続時間のチャーブを生成するように構成される。例えば、いくつかの例示された実施形態では、約90GHzのBおよび約200ミリ秒(ms、1ms = 10⁻³秒)のの値は、行われた実験における比較的低い検出器アレイフレームレートの距離内で機能するように選択された。これらの選択は、約30cmのかなり広い距離のウインドウを観測するためになされ、これは物体の形状を決定し且つその物体を識別する際にしばしば重要である。この技術は、10MHzから5THzのチャーブ帯域幅で機能する。しかしながら、3Dイメージング用途では、典型的な距離は、約300MHzから約20GHzのチャーブ帯域幅、約250ナノ秒(ns、ns = 10⁻⁹秒)から約1ミリ秒(ms、1ms = 10⁻³秒)のチャーブ持続時間、約0メートルから約20kmのターゲットまでの距離、約3ミリメートル(mm、1mm = 10⁻³メートル)から約1メートル(m)のターゲットのスポットサイズ、約7.5mmから約0.5mのターゲットの深度分解能である。距離ウインドウは、これらの条件下で数キロメートルまで広げることができ、ドップラー分解能もまた、(チャーブの持続時間に応じて)非常に高くなり得ることに留意されたい。プロセス、機器、およびデータ構造は、説明のために特定の構成における一体ブロックとして図2に描かれているが、他の実施形態では、1つ以上のプロセスもしくはデータ構造、またはその一部は、1つ以上のデータベース内の同じもしくは異なるホストに異なる方法で配置されるか、または省略され、あるいは1つ以上の異なるプロセスもしくはデータ構造は、同じもしくは異なるホストに含まれる。例えば、スプリッタ(216)および参照経路(220)は、ゼロ個以上の光カプラを含む。

【0035】

図3Aは、実施形態にかかる、ヘテロダインチャーブLIDARシステム(300a)の例示的な構成要素を示すブロック図である。米国特許第7,742,152号明細書に記載されているものから変更されたこのシステム(300a)は、電子式チャーブ除去を使用する。物体(390)は、システム(300a)の動作を説明するために描かれているが、物体(390)は、システム(300a)の一部ではない。システム(300a)は、レーザー(301)、変調器(310)、走査型光カプラ(320)としての望遠鏡、平衡型光検出器(330)、処理回路(340)、帯域幅Bおよび持続時間のFMチャーブを生成する波形発生器(350)、パワースプリッタ(351)、チャーブ除去ミキサ(360)、および音響光学変調器(370)を含む。このシステムでは、光源レー

10

20

30

40

50

ザ (301) の出射ビームは、ビームスプリッタ (302) によって 2 つの部分に分割され、一方の部分は、パワースプリッタ (351) および演算増幅器 (352a) からの FM チャープに基づいて変調器 (310) によって変調され、望遠鏡に供給されるビーム (305) を生成する。

【0036】

ビームの他の部分であるビーム (307a) は、コヒーレント検出用の局部発振器 (LO) を生成するために使用される。音響スピーカは、音響光学変調器 (AOM) (370) を駆動し、ヘテロダイン検出のための中間周波数 (IF) として機能する、ビーム (307b) における光周波数を f_m だけシフトさせる周波数 f_m を有する音響信号を生成する。光カプラ (322) は、ビーム (307b) を平衡型光検出器 (330) の 1 つに向ける。

10

【0037】

戻り光信号 (391) もまた、光カプラ (322) によって平衡型光検出器の他の部分に向けられる。平衡型フォトダイオード (330) は、直接検出成分を排除する。出力電気信号は、演算増幅器 (344a) において増幅され、IF 信号は、バンドパスフィルタ (341) によって選択され、ベースバンド波形を回復するショットキーダイオード (342) によって検出される。得られた電気信号は、ローパスフィルタ (343) および演算増幅器 (344b) を介して導かれる。

【0038】

チャープ除去ミキサは、この検出信号をパワースプリッタ (351) および演算増幅器 (352b) によって出力された元のチャープ波形と比較して、RF 参照波形と検出波形との間の周波数差に依存するビート周波数を有する電気信号を生成する。他の演算増幅器 (344c) および FFT プロセス (345) は、ビート周波数を見つけるために使用される。プロセッサ (346) は、データ分析を行うようにプログラムされている。(300a) のようなコヒーレント検出システムは、パルス移動時間の直接検出と比較して受信機の信号対雑音比 (SNR) を著しく改善するが、システムの複雑さを大幅に増大するという犠牲を払っている。演算増幅器 (344a) およびチャープ除去ミキサ (360) からプロセッサ (346) までの電気部品は、信号処理部品 (340) を構成する。

20

【0039】

図示の実施形態によれば、光カプラ (320) から放射された光ビームは、1 つ以上の物体の照射部分 (392) を照射する有限のビームサイズで 1 つ以上の物体 (390) に当たる。照射された部分からの後方散乱光は、望遠鏡を通って戻り、光カプラ (322) によって平衡型光検出器 (330) の 1 つのフォトダイオードなどの光検出器上に導かれる。1 つ以上の物体は、照射部分の異なる部分からの反射によって異なり得る物体速度成分 (394) によってシステム (300a) に対して移動している。この動きに基づいて、システム (300a) によって検出された信号の周波数は、距離のみに基づいた周波数とは異なる。プロセッサ (346) は、後述するように、ドップラー効果を検出し、そしてドップラー効果について結果として生じる距離を補正するためのドップラー補償モジュール (380) を含む。

30

【0040】

図 3B は、実施形態にかかる、ホモダインチャープ LIDAR システム (300b) の例示的な構成要素を示すブロック図である。米国特許第 7,742,152 号明細書に記載されているものから変更されたこのシステム (300b) は、フォトニックチャープ除去を使用し、RF 成分を単純化する。物体 (390) は、システム (300b) の動作を説明するために描かれているが、物体 (390) は、システム (300b) の一部ではない。システム (300b) は、波形発生器 (350)、レーザー (301)、変調器 (310)、変調器 (310) の下流にあるスプリッタ (302)、走査光カプラ (320) として使用される望遠鏡、平衡型光検出器 (330)、および処理回路 (360) を含む。

40

【0041】

50

このシステムでは、光信号と局部発振器 L O の両方が同じ波形発生器 (3 5 0) によって駆動され、演算増幅器 (3 5 2) において増幅される。変調器 (3 1 0) によって出射されたビームは、ビームスプリッタ (3 0 2) によってビーム部分 (3 0 5) とビーム部分 (3 0 7 c) とに分割される。例えば 9 0 % 以上の大部分のビームエネルギーを有するビーム部分 (3 0 5) は、上述したように、速度成分 (3 9 4) によって移動している物体 (3 9 0) の照射部分 (3 9 2) を照射するために光カプラ (3 2 0) を透過する。ビーム部分 (3 0 7 c) は、遅延 (3 0 8) において所望の量だけ遅延されて参照信号 (3 0 7 d) を生成する。いくつかの実施形態では、遅延はなく、遅延 (3 0 8) は省略される。望遠鏡または他の光カプラ (3 2 0) からの参照信号 (3 0 7 d) および戻り信号 (3 0 9) は、光カプラ (3 2 2) によって光検出器 (3 3 0) に向けられる。以下により詳細に説明されるいくつかの実施形態では、周波数シフタ (3 1 8) は、カプラ (3 2 0) を介して送信される前に送信信号 (3 0 5) の光路に追加される。後述する他の実施形態では、周波数シフタ (3 1 8) は、カプラ (3 2 0) を通過した後に戻り信号 (3 0 9) の光路内に配置される。

10

【 0 0 4 2 】

チャーブ除去プロセスは、平衡型フォトダイオード (3 3 0) 内で達成され、したがって、チャーブ除去混合および関連する R F 処理の必要性を排除する。 L O によって搬送される元のチャーブ光波形は、示されるようにフォトダイオードにおいてその遅延されたバージョンで拍動することから、ターゲット距離は、演算増幅器 (3 4 4) によって出力される光電流信号の F F T 成分 (3 4 5) における周波数分析によって直接得ることができる。プロセッサ (3 6 2) は、データ分析を行うようにプログラムされている。プロセッサ (3 6 2) は、後述するように、ドップラー効果を検出し、そしてドップラー効果について結果として生じる距離を補正するためのドップラー補償モジュール (3 8 0) を含む。演算増幅器 (3 4 4) からプロセッサ (3 6 2) までの電気部品は、信号処理部品 (3 6 0) を構成する。ショットノイズがコヒーレント検出の支配的なノイズであることを考慮すると、ビート周波数における S N R は、直接検出の S N R およびシステム (3 0 0 a) の S N R と比較して減少する。

20

【 0 0 4 3 】

3. ドップラー効果検出の概要

図 4 A は、実施形態にかかる、物体が移動しているときのアップチャーブ L I D A R システムからいくつかの物体までのビート周波数ピークに基づく距離を示す例示的なグラフ (4 1 0) を示すプロック図である。横軸 (4 1 2) は、ビート周波数に基づく任意の単位で距離を示し、縦軸 (4 1 4) は、相対単位でピークパワーを示している。チャーブは、アップチャーブ (後で周波数が高くなる) であることから、周波数の増加は、移動時間の増加、したがって距離の増加に変換される。ビート周波数は、ピークの相対パワーを示す高さを有するビート周波数に関連する距離に位置する矢印としてプロットされる。3 つの観測されたピーク (4 1 4 a 、 4 1 4 b 、および 4 1 4 c) は、各距離において実線の矢印によって示されている。誤差による最後のピーク (4 1 4 c) は、以下でさらに詳細に説明される。

30

【 0 0 4 4 】

第 1 の観測されたピーク (4 1 4 a) は、ブルーシフトと呼ばれる、より高い周波数へのシフトを導入するのに十分な速度で L I D A R システムに向かって移動する第 1 の散乱体に起因する。ブルーシフトの距離効果 (4 1 5) が示されている。図 1 A のグラフ (1 2 0) に示すように、チャーブは、アップチャーブであるため、周波数の増加は、増加した距離に関連し、実際の位置 (4 1 3 a) は、推論された距離の左側にある。物体は、実際には、ドップラー効果がなければ距離 (4 1 3 a) にあるであろう距離にある。しかしながら、ブルーシフト距離効果 (4 1 5) も実際の距離 (4 1 3 a) も、 L I D A R システムデータ処理コンポーネントにとっては知られていない。

40

【 0 0 4 5 】

対照的に、第 2 の観測ピーク (4 1 4 b) は、レッドシフトと呼ばれる、より低い周波

50

数へのシフトを導入するのに十分な速度で LIDAR システムから遠ざかる第 2 の散乱体に起因する。レッドシフトの距離効果 (416) が示されている。チャープは、アップチャープであるため、周波数の減少は、減少した距離に関連し、実際の位置 (413b) は、推論された距離の右側にある。物体は、実際には、ドップラー効果がなければ距離 (413b) にあるであろう距離にある。しかしながら、レッドシフト距離効果 (416) も実際の距離 (413b) も、LIDAR システムデータ処理コンポーネントにとっては知られていない。

【0046】

距離に対するドップラー効果の大きさを判定するための 1 つのアプローチは、アップチャープを用いて一度、そして再びダウンチャープを用いて距離を判定することであり、ここで送信光信号は、時間とともに周波数が減少する。ダウンチャープ送信信号により、後の到着信号は、より高い周波数ではなくより低い周波数を有し、それぞれのレッドシフト、またはブルーシフトは、アップチャープ送信信号の場合とは逆の効果を距離に与える。2 つの反対の影響を受ける距離は、例えば平均化によって組み合わせることができ、ドップラー効果を低減または排除した距離を判定することができる。2 つの距離間の差は、ドップラー効果の大きさを示すことができる（例えば、距離効果は、2 つの距離内の差の半分であると判定されることがある）。

10

【0047】

図 4B は、実施形態にかかる、物体が移動しているときのダウンチャープ LIDAR システムからいくつかの物体までのビート周波数ピークに基づく距離を示す例示的なグラフ (420) を示すブロック図である。横軸 (412) および縦軸 (414) は、上述したとおりである。チャープは、ダウンチャープ（後で周波数が低くなる）であることから、周波数の減少は、移動時間の増加、したがって距離の増加に変換される。2 つの観測されたピーク (424a および 424b) のみが、各距離において実線の矢印によって示されている。

20

【0048】

上述したように、第 1 の観測されたピーク (414a) は、ブルーシフトと呼ばれる、より高い周波数へのシフトを導入するのに十分な速度で LIDAR システムに向かって移動する第 1 の散乱体に起因する。ブルーシフトの距離効果 (425) は、アップチャープの場合とは異なり、距離効果は、反対方向に行く。チャープは、ダウンチャープであるため、周波数の増加は、減少した距離に関連し、グラフ (410) と同じ距離である実際の位置 (413a) は、推論された距離の右側にある。また上述したように、第 2 の観測ピーク (424b) は、レッドシフトと呼ばれる、より低い周波数へのシフトを導入するのに十分な速度で LIDAR システムから遠ざかる第 2 の散乱体に起因する。レッドシフトの距離効果 (426) は、より長い距離に向かっている。物体は、実際には、推論された距離よりも左側の距離 (413b) にある。

30

【0049】

上述したように、2 つの反対の影響を受ける距離は、例えば平均化によって組み合わせることができ、ドップラー効果を低減または排除した距離を判定することができる。理解できるように、平均などの距離 (414a) と (424a) の組み合わせは、実際の距離 (413a) に非常に近い値を与えるであろう。同様に、平均などの距離 (414b) と (424b) の組み合わせは、実際の距離 (413b) に非常に近い値を与えるであろう。物体 A についての距離効果 (415) の大きさ（物体 A についての距離効果 (425) の大きさに等しい）は、2 つの距離の差の半分、例えば、 $1/2 * ((414a) \text{ の距離} - (425a) \text{ の距離})$ であると判定されることがある。同様に、物体 B についての距離効果 (416) の大きさ（物体 B についての距離効果 (426) の大きさに等しい）は、2 つの距離の差の半分、例えば、 $1/2 * ((424b) \text{ の距離} - (414b) \text{ の距離})$ であると判定されることがある。いくつかの実施形態では、アップチャープ / ダウンチャープの反射は、検出されたアップチャープ / ダウンチャープピークに対する距離の広がりを組み込むように組み合わされる。基本的に、アップチャープ / ダウンチャープの反

40

50

射において検出されたピークの分布は、ドップラー推定値の分散を減少させるために努力して組み合わせられる（多くの異なる統計的選択肢）。

【0050】

この補正は、アップチャーブの反射のピークをダウンチャーブの反射の対応するピークと対にできるかどうかに依存する。状況によっては、これは明らかである。しかしながら、本発明者らは、ピーク（414c）などの偽ピークのために、どのピークを対にするか、例えば図4Aの3つのピークのうちのどれを図4Bの2つのピークのそれぞれと対にするかを自動的に判定する方法は必ずしも明らかではないことに留意した。さらに、視野内のクラッタまたは他のノイズ要因による偽ピークの数、および移動物体および移動LIDARシステムに関する距離の変化は、アップチャーブおよびダウンチャーブ送信パルスが時間的に分離されているときにピークのペアリングが困難になることを意味する。

10

【0051】

図5Aは、実施形態にかかる、LIDARシステムについての例示的なシリアル（シーケンシャルとも呼ばれる）アップおよびダウンチャーブ送信光信号を示すグラフである。横軸（512）は、時間を任意の単位で示し、縦軸（514）は、光送信信号または参照信号の周波数を任意の単位で示している。持続時間（515a）の第1のパルスは、アップチャーブであり、持続時間（515b）の第2のパルスは、ダウンチャーブである。アップチャーブおよびダウンチャーブから得られた距離の対は、距離およびドップラー効果のより良い推定値を判定するために組み合わせることができる。図2、図3Aまたは図3BにおけるLIDARシステムのいずれも、そのようなシーケンシャルなアップおよびダウンチャーブで動作することができる。それぞれが特定の用途で関心のある距離値にわたる限り、帯域幅またはパルス持続時間、あるいはその両方が、アップチャーブパルスおよびダウンチャーブパルスの両方について同じであるという要件はない。

20

【0052】

上記示したように、シーケンシャルな距離測定値がうまくペアリングされて平均化されることができる場合、ターゲットの距離およびドップラーは、シーケンシャルな測定値の距離を平均化することによって正しく推論されることができる。しかしながら、シーケンシャルなアップ/ダウンアプローチは、測定間でドップラーシフトが変化するとき、または平行移動ビーム（例えば、LIDARスキャナ）が測定される物体の変化または同じ物体に対する実際の距離の変化、またはいくつかの組み合わせをもたらす可能性がある新しい位置に移動するときに誤差をもたらす。以下により詳細に説明されるように、コスト関数は、アップおよびダウンチャーブからの距離の望ましいペアリングを判定するためにその後に使用されるコスト行列を生成するために使用される。

30

【0053】

いくつかの実施形態では、LIDARシステムは、アップチャーブおよびダウンチャーブを同時に生成するように変更される。このアプローチは、とりわけ、物体の速度差、または実際に距離を変更する物体に対するLIDAR位置の変更、またはビーム内の一時的な散乱体、あるいはいくつかの組み合わせによってもたらされる変動性を排除する。そして、このアプローチは、アップチャーブおよびダウンチャーブにおいて測定されたドップラーシフトおよび距離が実際に同一であり且つ最も有用に組み合わせることができることを保証する。ドップラースキームは、正しい補償の高い確率のために、周波数空間において非対称にシフトされた戻り対の並列捕捉を保証する。

40

【0054】

図5Bは、実施形態にかかる、LIDARシステムについての例示的な同時アップおよびダウンチャーブ送信光信号を示すグラフである。横軸は、任意の単位で時間を示し、必ずしも図5Aの場合と同じ軸の距離ではない。例えば、いくつかの実施形態では、軸（524）の全時間距離は、軸（512）の全時間距離の半分である。縦軸（522）は、光送信信号または参照信号の周波数を任意の単位で示している。持続時間（252a）のパルスの間、いつでも2つの光周波数を含む光ビームが生成される。一方の周波数は、例えば f_1 から f_2 に増加し、他方の周波数は、同時に f_4 から f_3 に減少する。2つの周波

50

数帯域、例えば f_1 から f_2 までの帯域 1、および f_3 から f_4 までの帯域 2 は、送信信号および戻り信号の両方がハイパスフィルタもしくはローパスフィルタ、またはいくつかの組み合わせによって光学的に分離され、通過周波数 f_p で開始する帯域を通過することができるよう重複しない。例えば、 $f_1 < f_2 < f_p < f_3 < f_4$ である。図示の実施形態では、より高い周波数は、ダウンチャープを提供し、より低い周波数は、アップチャープを提供するが、他の実施形態では、より高い周波数は、アップチャープを生成し、より低い周波数は、ダウンチャープを生成する。

【0055】

いくつかの実施形態では、2つの異なるレーザー源が使用されて各ビームに2つの異なる光周波数を毎回生成する。しかしながら、いくつかの実施形態では、単一の光搬送波が单一のRFチャープによって変調され、同時にアップおよびダウンチャープとして機能する対称側波帯を生成する。これらの実施形態のいくつかでは、一般に、搬送波周波数に多くのエネルギーを残さず、代わりにほとんど全てのエネルギーが側波帯に入る両側波帯マッハツエンダ変調器が使用される。

10

【0056】

図5Cは、実施形態にかかる、LIDARシステムについての同時アップおよびダウンチャープ送信光信号を生成するために変調器によって生成される例示的な一次側波帯を示すグラフである。横軸(532)は、信号の周波数を示し、縦軸(534)は、信号のパワーを示している。光搬送波 f_0 が周波数 f のRF信号によって変調されるとき、2つの光側波帯がRF周波数の各倍数に対して生成される。一次側波帯は、矢印(536a)および(536b)によって示される、光搬送波周波数 f_0 の上下のRF周波数 f にある。二次側波帯は、光搬送波 f_0 などの上下2fに生じる。各高次側波帯は、前の低次側波帯と比較してパワーが低減されている。

20

【0057】

f_b から $f_a < f_b$ まで変化するRFダウンチャープを使用して光チャープを生成するとき、帯域幅 $B = (f_b - f_a)$ である。上側波帯は、周波数(536a)上の左向き矢印によって示されるように、 $f_0 + f_a + B = f_0 + f_b$ から $f_0 + f_a$ まで変化し、帯域(538a)内の信号を生成する。下側波帯は、周波数(536b)上の右向き矢印によって示されるように、同時に $f_0 - f_a - B = f_0 - f_b$ から $f_0 - f_a$ まで変化し、帯域(538b)内の信号を生成する。他の実施形態では、RFダウンチャープは、光搬送波を変調するために使用され、周波数(536a)および(536b)は、それぞれ反対方向に、例えば帯域(538a)内で左から右および帯域(538b)内で右から左へと帯域(538a)および(538b)を通って移動する。アップチャープおよびダウンチャープからの反射は、異なる実施形態では異なる方法を使用して区別される。いくつかの好みの実施形態では、以下に説明するように、上側および下側波帯の対称性を取り除くために周波数シフトを加えることによって分離が行われる。側波帯が光学的にフィルタリングされるのに十分に広く分離される他の実施形態では、それぞれからの信号は分割される。参照および戻りのそれぞれからの1つの信号は、 f_{p1} で始まるローパスフィルタを通過して、搬送波 f_0 および高帯域(538a)をフィルタリングして低周波数帯域(538b)を得る。同様に、参照および戻りのそれぞれからの1つの信号は、 f_{ph} で始まるハイパスフィルタを通過して、搬送波 f_0 および低帯域(538b)をフィルタリングして高周波数帯域(538a)を得る。2つの帯域は、上述したように処理されてアップチャープ距離およびダウンチャープ距離を生成する。アップチャープおよびダウンチャープからの距離を対にした後、ドップラー効果および補正距離が判定される。

30

【0058】

側波帯対称の結果として、同じ次数の側波帯が使用される場合、2つの光チャープの帯域幅は同じになる。他の実施形態では、他の側波帯が使用され、例えば、2つの二次側波帯が使用されるか、または一次側波帯と重複しない二次側波帯が使用されるか、またはいくつかの他の組み合わせが使用される。

40

【0059】

50

図 3 B はまた、実施形態にかかる同時アップおよびダウンチャーブ L I D A R システムについての例示的な構成要素を示している。この実施形態では、周波数シフタ (318) が送信ビーム (305) の光路に追加される。他の実施形態では、周波数シフタは、代わりに戻りビーム (309) の光路または参照光路に追加される。一般に、周波数シフト素子は、素子 (AOM) は、関連するいくらかの損失があり、受信側または光増幅器の後段の損失部品を置くのに不利であるため、局部発振器 (LO、参照経路とも呼ばれる) 側または (光増幅器の前の) 送信側に追加される。光シフタ (318) の目的は、光検出器によって出力された電気信号の分析において、例えば FFT コンポーネント (345) によってピックアップされることができるアップチャーブおよびダウンチャーブのビート周波数が異なる周波数帯域で発生するように、参照信号の周波数に対して送信信号 (または戻り信号) の周波数を既知の量 f_s だけシフトすることである。例えば、図 4 A および図 4 B のブルーシフトを引き起こす距離効果 (415 および 425) がそれぞれ f_B である場合、アップチャーブのビート周波数は、オフセット分だけ増加し、 $f_B + f_s$ において生じ、ダウンチャーブのビート周波数は、オフセット分だけ減少し、 $f_B - f_s$ となる。したがって、アップチャーブは、ダウンチャーブよりも高い周波数帯域にあり、それによってそれらを分離する。 f_s がいかなる予想されるドップラー効果よりも大きい場合、アップチャーブおよびダウンチャーブに関連する距離内に不明瞭さはない。そして、測定されたビートは、既知の f_s の正しく符号化された値によって補正されて、適切なアップチャーブおよびダウンチャーブの距離を得ることができる。いくつかの実施形態では、平衡型検出器から出てくる RF 信号は、FFT を介して分離されている帯域によって直接デジタル化される。いくつかの実施形態では、平衡型検出器から出てくる RF 信号は、直接デジタル化ができる (アップチャーブまたはダウンチャーブの一方に対応する) 低帯域とベースバンドに電子的にダウンミックスされてからデジタル化ができる (反対側のチャーブに対応する) 高帯域とを分離するために、アナログ RF 電子機器によって前処理される。両方の実施形態は、検出された信号の帯域を利用可能なデジタイザリソースに一致させる経路を提供する。

【0060】

送信 (TX) および局部発振器 (LO) のチャーブ波形を選択するとき、システムの周波数シフトされた帯域が利用可能なデジタイザ帯域幅を最大限に利用することを保証することが有利である。一般に、これは、アップチャーブまたはダウンチャーブのいずれかをシフトして、ゼロに近いレンジ周波数ビートを有することによって達成される。

【0061】

例えば、他の実施形態では、送信 (TX) 信号および参照 (LO) 信号は、搬送波周波数上の 2 つの異なる変調器上の上側波帯および下側波帯を使用して独立に生成される。図 5 D は、他の実施形態にかかる、光搬送波に対する L I D A R システムについての例示的な同時アップおよびダウンチャーブ送信光信号および参照信号 (LO) を示すグラフである。横軸は、相対単位の時間であり、縦軸は、 $f_0 = 0$ としてプロットされた光搬送波 f_0 に対する周波数である。参照信号 (LO) は、側波帯対称性のために、オフセット周波数 f_0 だけ送信信号 (TX) からオフセットされ、上記例とは異なり、ダウンチャーブと比較してアップチャーブ上で反対側にある。図示の実施形態では、LO 信号周波数は、アップチャーブについての同時 TX 信号周波数よりも低く、LO 信号周波数は、ダウンチャーブについての同時 TX 信号周波数よりも高い。したがって、TX アップチャーブ波形は、帯域幅 B にわたって f から $f + B$ までチャーブし、LO アップチャーブ波形は、 $f - f_0$ から $f - f_0 + B$ にチャーブする。ダウンチャーブは、0 としてプロットされた光搬送波周波数を中心に反射される。

【0062】

この場合、アップチャーブビート周波数をゼロに近付けるためには、アップチャーブが送信と整列するようにシフト周波数 $f_s = f_0$ を選択することは理にかなっている。ダウンチャーブは、 $2 * f_0$ によって分離される。図 5 E は、他の実施形態にかかる、光搬送波に対する L I D A R システムについての例示的なシフトされた同時アップおよびダウ

10

20

30

40

50

ンチャーブ送信光信号および参照信号（L O）を示すグラフである。横軸は、相対単位の時間であり、縦軸は、 $f_0 = 0$ としてプロットされた光搬送波 f_0 に対する周波数である。全体的に、これは、0から $2 * f_0$ までの f_R についてのアップチャーブビート周波数帯域と、 $2 * f_0$ からシステムカットオフ周波数（おそらくデジタイザ制限）までの f_R についての重複しないダウンチャーブビート周波数帯域を生じさせる。ダウンチャーブビート周波数が大きすぎる場合、大きなビート周波数帯域についてのダウンミックス段は、ベースバンドでデジタル化することができるよう大きなビート周波数帯域を $2 * f_0$ だけミックスダウンする。

【0063】

当該技術分野で知られている任意の周波数シフタ（318）を使用することができる。例えば、いくつかの実施形態では、音響光学変調器（AOM）が使用され、他の実施形態では、セラジンベースの位相シフトが位相変調器とともに使用される。

【0064】

図6は、他の実施形態にかかる、同時アップおよびダウンチャーブLIDARシステム（600）についての例示的な構成要素を示すブロック図である。物体（390）は、システム（600）の動作を説明するために描かれているが、物体（390）は、システム（600）の一部ではない。システム（600）は、以下により詳細に説明されるよう、第2の検出器を追加し、同時第2のチャーブ参照信号および戻り信号のための処理を追加することによって、図3Bのシステム（300b）から変更される。いくつかの実施形態では、システム（600）は、第2の同時チャーブ信号を生成するために第2のレーザー（601）、第2の波形発生器（650）、演算増幅器（652）および変調器（610）も追加することによって図3Bのシステム（300b）から変更される。しかしながら、複数の側波帯を有する单一の変調器が使用されて同時アップおよびダウンチャーブを生成するいくつかの実施形態では、第2のレーザーおよび構成要素は省略される。

【0065】

例えば、いくつかの実施形態では、レーザ（601）は、周波数 f_0 において光搬送波を生成し、波形発生器（650）は、変調器（610）を駆動して図5Cに示される光搬送波周波数 f_0 ならびに光側波帯（538aおよび538b）を生成するように、演算増幅器（652）によって増強されたパワーによって $f_a < f_b$ の場合に f_b から f_a までのRFダウンチャーブを生成する。これは、図5Bに示される同時アップおよびダウンチャーブを提供し、ここで、 $f_1 = (f_0 - f_b)$ 、 $f_2 = (f_0 - f_a)$ 、 $f_3 = (f_0 + f_a)$ 、および $f_4 = (f_0 + f_b)$ であり、アップおよびダウンチャーブは、対称的である。これらの実施形態では、レーザー（301）、波形発生器（350）、演算増幅器（352）および変調器（310）は省略される。

【0066】

いずれのタイプの実施形態においても、ビームスプリッタ（602）に入射する光信号は、同時アップチャーブおよびダウンチャーブを含む。このビームは、同一の波形であるが異なるパワーの2つのビームに分割され、大部分のパワー、例えば90%以上がビーム（605）として走査光カプラ（320）を通過して物体（390）に当たる。残りのパワーは、ビーム（607a）として遅延（308）に進み、参照信号（607b）を生成するために任意の所望の遅延もしくは位相または他の特性を追加する。いくつかの実施形態では、遅延（308）は省略され、参照信号（607b）は、信号（607a）と同一である。

【0067】

光カプラ（624）は、参照信号を2つの参照ビームに分割し、走査光カプラ（320）を介して物体（390）から受信した戻り信号を2つの戻り信号に分割するように構成される。ビームは、等しいか等しくないパワービームに分割されることがある。1つの参照信号および1つの戻り信号は、ローパスフィルタ（626）を通過して光搬送波および高周波帯域を除去する。低域通過された参照信号および戻り信号は、光検出器（330）上に向けられ、演算増幅器（344）で増幅され且つFFTコンポーネント（345）

10

20

30

40

50

で変換され且つデータ分析モジュール(662)に供給されるビート電気信号を生成する。他の参照信号および他の戻り信号は、ハイパスフィルタ(628)を通過して光搬送波および低周波数帯域を除去する。高域通過された参照信号および戻り信号は、光検出器(630)上に向けられ、演算増幅器(644a)で増幅され且つFFTコンポーネント(645)で変換され且つデータ分析モジュール(662)に供給されるビート電気信号を生成する。ドップラー補償モジュール(680)は、システム(600)のアップチャーブパスおよびダウンチャーブパス内の距離の対を一致させるか、ドップラー効果を判定するか、または対応するドップラー効果、またはその両方に基づいて距離を補正する。いくつかの実施形態では、モジュール(680)はまた、ドップラー効果またはドップラー補正距離、またはいくつかの組み合わせに基づいて装置を動作させる。例えば、表示装置(1214)は、物体までの距離もしくは物体の速度またはいくつかの組み合わせの画像または点群を生成するように操作される。構成要素(344、345、644、645、662および680)は、データ処理システム(660)を構成する。多くの実施形態では、側波帯におけるアップチャーブおよびダウンチャーブの分離は、1GHz未満であり、既存の光学フィルターを使用してきれいに分離されるのに十分大きくはない。そのような実施形態では、上述した図3Bのシステムが図6のシステムの代わりに使用される。

【0068】

上述したように、第3の観測されたピーク(414c)は、自然の設定で実際のシステムにおいて発生する可能性があるシステム誤差による例示的な無関係のピークであり、いかなる実際の関心のある物体までの距離とは関連付けられていない。これは、ドップラー効果もしくは補正距離またはその両方を判定するときに、どのアップチャーブ距離とダウンチャーブ距離とを対にするかを判定する際に問題を引き起こす可能性がある。すなわち、FMチャーブ波形(FMCW)システムが所与のサイトラインに沿って全ての散乱体からの反射を分解するときに複雑さが生じる。このシナリオでは、任意のドップラー処理アルゴリズムは、アップチャーブおよびダウンチャーブの距離プロファイルの複数の反射が補償のために正しく対にされるという要件を効果的に処理しなければならない。単一の距離反射の場合、「アップ」の1つのピークおよび「ダウン」の1つのピークは分離され、正しく対にされる。交絡する状況は、「アップ」および「ダウン」側において複数の散乱体からの複数のピークが存在するときに生じる。どのピークが所望の補償効果を得るために対にされるべきかが判定される必要があり、好ましくは、例えばプロセッサまたは集積回路上で自動的に進むように実施することができる方法を使用して判定される。

【0069】

ここでは、ドップラー効果およびドップラー補正距離を計算するためにアップチャーブ距離およびダウンチャーブ距離を自動的に対にするためのアプローチが説明される。このアプローチは、高い確率で正しいアップ/ダウン反射ペアリングを達成するために二部グラフマッチング定式化を使用する。図7Aは、実施形態にかかる、例示的なアップチャーブ距離およびダウンチャーブ距離の対を示すブロック図である。各対は、1つのアップチャーブ距離および1つのダウンチャーブ距離を含む。この図は、例えば、それぞれ図4Bおよび図4Aに示されるように、2つのダウンチャーブ距離、および3つのアップチャーブ距離が、ダウンチャーブ距離(424aおよび424b)、ならびにアップチャーブ距離(414a、414bおよび414c)として存在すると仮定する。2つのダウンチャーブ距離を3つのアップチャーブ距離と対にすることには6つの可能性があり、ダウンチャーブ距離1および2を3つのアップチャーブ距離1、2および3のそれぞれと結ぶ線によって表される。

【0070】

各可能性のある対について、コストが決定される。コストは、対における2つの距離間の相違の尺度である。任意の方法が相違を評価するために使用されてもよい。例えば、いくつかの実施形態では、各対に対するコストは、2つの距離について検出された距離の差である。いくつかの実施形態では、コストは、2つの距離に関連する検出されたピーク高さの差である。いくつかの実施形態では、コストは、2つの距離に関連するピーク幅の差

10

20

30

40

50

である。いくつかの実施形態では、コストは、とりわけ、距離差、ピーク高さ差、およびピーク幅差などの2つ以上の別々の相違のスカラー値関数である。いくつかの実施形態では、コストは、とりわけ、距離差、ピーク高さ差、およびピーク幅差から選択された2つ以上の要素を有するベクトル関数である。コストは記号 $C_{n,m}$ によって表され、ここで、 m がダウンチャープ距離のための指標を示し、 n がアップチャープ距離のための指標を示す。図7Bは、一実施形態にかかる、図7Aに示される例示的な対のアップチャープおよびダウンチャープの距離に対応する要素を有する、例示的コストマトリックスを例証するブロック図である。図7では、指標が逆にされて最初にダウンチャープ距離の指標を示す ($C_{m,n}$)。

【0071】

10

アップチャープ距離プロファイルからの距離反射 R_{i_up} のセット (S_{up}) および、ダウンチャープ距離プロファイルからの距離反射 R_{j_down} のセット (S_{down}) は、式1bならびに光検出器の電気出力のFFTスペクトルの標準閾値化およびピークあてはめ法を介して選択された周波数のピーク（例えば、ピークの高さおよび幅に基づくピーク）を使用して決定される。

【0072】

【数5】

$$S_{up} = [R_{1up}, R_{2up}, \dots, R_{Nup}] \quad (3a)$$

および、

【0073】

20

【数6】

$$S_{down} = [R_{1down}, R_{2down}, \dots, R_{Mdown}] \quad (3b)$$

N 「アップ」ピークおよび M 「ダウン」ピークが含まれる。その後、距離プロファイルの2つのセットは、コストマトリックス C を定義するために使用され、ここで、各マトリックス要素は、対 $C_{n,m} = F(R_{n_up}, R_{m_down})$ と相関している。静的シーンの優れたコスト関数（シーンに対して移動しない撮像装置）は単に、その組み合わせに対するドップラー効果の大きさである。 $F(R_{n_up}, R_{m_down}) = |R_{n_up} - R_{m_down}| / 2$ 、ここで、 $| \cdot |$ は絶対値演算である。一般的なアプローチは、コスト関数の柔軟な定義を可能にする。例えば、コストは、ピークのセットの強度、非補償距離、撮像空間における撮像装置動きなどの外部情報（モバイル走査のための）、またはこれらの組み合わせなどの他のパラメーターを含むことができる。

【0074】

30

一旦コストマトリックス C が定義されると、アプローチは二部グラフマッチング手順を進める。この手順はしばしば組み合わせを制限して、所定のアップチャープ距離が单一のダウンチャープ距離のみと対になることができるようになり、またその逆も同様である。一致する対を接続する線は交差しないなどの、他の制約が課され得る。いくつかの実施形態では、マッチング処理は貪欲なまで進み、それによって、アルゴリズムはさらなるペアリングが存在しなくなるまで、セットから最低のコストペアリング、最小値 ($c_{m,n}$) を常に選ぶ。あるいは、ハンガリーの二部グラフマッチングアルゴリズム（例えば、Munkres、1957年を参照）は、すべての対にわたって平均されたペアリングの最適な「最低のコスト」セットを生成するために使用することができる。他の実施形態では、他のグラフマッチング法が使用される。観察された現実世界シナリオを用いて、貪欲なアプローチは、意図した目的に対してより速くかつ十分であることがわかった。この方法は、反対側の最大の1つのピークと対になるために、両側のピークを制限するために選択された。これは、片側にあるピークが反対側にある2つと対になることが、非物理的または困惑させるシナリオを暗示するため、ペアリング手順の最も「物理的な」解釈である。他の組み合わせ手順が確かに存在する（それは、実験的な実施形態で見られたが、同様に実施されなかった）。例えば、「距離規則 (range ordered)」アプローチは、

40

50

アップおよびダウンの反射を距離に従って分類し、順次にそれらを対にした（最も近いものから最も遠いものへ）。両側の余分なピークは、片側が「ピークがなくなった」時に廃棄された。これは、わずかなドップラーシフトを伴う接近するピークの一般的なシナリオでは失敗した。同様に、「振幅規則（a m p l i t u d e o r d e r e d）」は、振幅に従ってピークを分類し、振幅が大きい順でそれらを対にした。この方法は、コヒーレント検波におけるスペックル効果が検出したピークの振幅に大きな相違を引き起こすため、うまくいかなかった。これは、多くの不正確なペアリングに結びついた。コストマトリックスアプローチは、オプションを検討し、オプションのセットにわたって全体的に最小限にする最も一般的な方法であるように見える。図7 Aでは、実線によって表わされた2つの低コストの対が決定された。したがって、1つのアップチャーブ距離（3）は、2つのダウンチャーブ距離のどちらとも対にはならない。

10

【0075】

図8は、実施形態に従って、距離に対するドップラー効果を補正するために、アップチャーブおよびダウンチャーブのLIDARシステムを使用する例示的方法を例証するフローチャートである。工程は、例示目的のために特定の順序で一体工程として図8に表されるが、他の実施形態では、1つ以上の工程またはその一部は、異なる順序で、時間的に重複して、連続してまたは平行して実施されるか、省略されるか、1つ以上の追加の工程が加えられるか、あるいは方法はいくつかの方法の組み合わせで変更される。

20

【0076】

工程（801）で、トランシーバー（例えば、LIDARシステム）は、アップチャーブおよびダウンチャーブの光学信号を送信するように構成される。アップチャーブおよびダウンチャーブ信号の各々の一部（例えば、1%～10%）も、参照光学経路に向けられる。トランシーバーも送信信号によって照射される任意の外部物体から後方散乱された光学信号を受け取るように構成される。他の実施形態では、アップチャーブおよびダウンチャーブ信号は同時に送信される。いくつかの実施形態では、工程（801）は、例えば、図3A、図3B、図6、または同等物に例証されるように、1つ以上の下記の工程の機能を提供するために、ハードウェアの他の光学コンポーネントを構成することを含む。送信信号は、ビームである必要がないことに留意されたい。分岐信号は、確かに多くの様々な距離およびドップラー値を单一の距離プロファイル内で見るが；照射されるスポット内では交差距離分解能（cross range resolution）を提供しない。しかし、物体を識別するために有用な交差距離分解能を提供するために、点走査によるポイントを伴う固有の希薄性を提供する細いビームを使用することが効果的である。

30

【0077】

いくつかの実施形態では、アップチャーブ光学信号はダウンチャーブと対称であり、すなわち、それらは同じ帯域幅（B）および同じ持続時間 u を有する。しかし、距離は、関心のあるリターンにまたがる任意の帯域幅および持続時間について決定することができる。したがって、いくつかの実施形態では、アップチャーブ光学信号およびダウンチャーブ光学信号は、それぞれ異なる帯域幅 B_u および B_d を有し、それぞれ異なる持続時間 u および d 、またはいくつかの組み合わせを有する。いくつかの実施形態では、図5Cに示されるように、例えば、正および負の一次側波帶ではなく、光搬送波の1つの一次側波帶および1つの二次側波帶を使用して、Bおよび u についてわずかに異なる値を生成することが便利である。これは、ドップラー処理において説明されなければならないが、実施することができる。後述される例示的な実施形態では、チャーブは、全く同じ帯域幅およびタイミングで、同じモジュレータから出る。これは、ドップラーおよびシステムが観察する距離が完全に重複することを保証する。異なるBおよび u は、レーザー周波数を直接調整しているシステムの場合に使用される（VS外部電子変調の使用）。その場合、図6に示されるように、2つのレーザーまたは連続するアプローチは、アップチャーブおよびダウンチャーブを生成するのに有用である。これは、2つのレーザーまたは連続するチャーブのための異なるBおよび u に門戸を開く。

40

【0078】

50

工程(802)では、物体または物体の一部が存在するか、または存在しないかもしれないシーンにおけるスポットに送信信号が向けられる。

【0079】

工程(803)では、反射されたアップチャーブ戻り信号がダウンチャーブ戻り信号と分離される。例えば、アップチャーブおよびダウンチャーブが異なる光周波数帯域にあり、戻り信号を2つのコピーに分割し、各々が異なる光学フィルターを介して通過することを含む反射経路によって分離が達成される。1つのフィルター(例えば光学フィルター(626))は、アップチャーブの周波数を通過させるが、ダウンチャーブの周波数を遮断し；他のフィルター(例えば、光学フィルター(628))は、ダウンチャーブ周波数を通過させるが、アップチャーブの周波数を遮断する。アップチャーブおよびダウンチャーブが順次に送信される場合、光学フィルターを通過させるのではなく、異なる時間枠で信号を処理することによって分離がもたらされ、および両方のチャーブは同じ周波数帯域を使用することができる。

10

【0080】

工程(805)では、分割されたアップチャーブ反射は、アップチャーブ戻り信号の0以上の周波数差(または、結果としてもたらされるビート周波数)を決定するために、第1の検出器でアップチャーブ参照信号と組み合わせられる。例えば、検出器からの電気信号は、ハードウェアのFFTモジュールまたはプログラマブルプロセッサ上のソフトウェアによって操作される。アップチャーブ信号およびダウンチャーブ信号が同時に送信される場合、例えば、図3Bのような参照信号に対する送信信号または戻り信号の周波数シフト、あるいは図6のような光学フィルターなどの上記の1つ以上的方法およびシステムを使用して、戻り信号のアップチャーブとダウンチャーブ部分が分割される。

20

【0081】

工程(807)では、1以上のアップチャーブ距離、 $R_{1\text{up}} \dots R_{N\text{up}}$ は、1以上のチャーブ周波数差(ビート周波数)に基づいて、例えば、式1bまたはプロセッサ(662)の同等物を使用して決定される。加えて、1以上のダウンチャーブ距離、 $R_{1\text{down}} \dots R_{M\text{down}}$ は、1以上のダウンチャーブ周波数差(ビート周波数)に基づいて、例えば、式1bまたはプロセッサ(662)の同等物を使用して決定される。アップチャーブビート周波数を有しないか、ダウンチャーブビート周波数を有しないリターンが、工程(807)の間に廃棄される。工程(807)の結果として、シーンのいくつかのスポットを照らす各送信信号について、式3aおよび3bで表されるように、 S_{up} および S_{down} のセットが生成される。

30

【0082】

工程(811)では、距離の差、ピーク高さ差、ピーク幅差、または任意の他のビート周波数ピーク特性の差などの上記識別された相違の測定のいずれか、またはいくつかのスカラーあるいはベクトルの組み合わせを用いて、コストマトリックスの要素に対する値が決定される。いくつかの実施形態では、距離の各対についてのコストは、例えば、距離の差に所定の最も高い重量(例えば、約60%)を、ピーク高さの差に適度な重量(例えば、約30%)を、およびピーク幅の差に低重量(例えば、約10%)を与えるなど、いくつかのこれらの測定の機能に重みを加えたスカラーである。いくつかの実施形態では、バイアス項がコストマトリックスの各要素に加えられ、それは、撮像システムの動きおよびそれが指し得る方向を説明する。これは、撮像システムが静止物体を標的としているがそれ自体が動いている場合、0でない符号付きのドップラー値が予期され得るモバイル画像化の実施形態において効果的である。他の実施形態では、物体が動いているか、あるいは物体および画像が両方とも動いており、ならびに相対運動および物体の追跡に基づいてバイアス項を加えることは効果的である。修正の要素は、半径方向と呼ばれる撮像システムとターゲットとを接続する線上の速度の要素のみに依拠する。したがって、いくつかの実施形態では、バイアスは、センサの動きに対するビーム指向の方向に依拠する。撮像システムそれ自体が、相対速度を推測するために使用され得ることに留意されたい。コストマトリックスは、2つのセット、つまり1つのアップチャーブ距離および1つのダウンチャ

40

50

ープ、における距離の対に対するコストを含む。

【0083】

工程(813)では、コストマトリックスに基づいて、例えば、二部グラフマッチングアルゴリズムを使用して、少なくとも1つのアップチャーブ距離は少なくとも1つのダウンチャーブ距離に一致する。貪欲な組み合わせは、実施がより簡単で、動作がより速く、ドップラー修正目的のために良好な自動組み合わせを行うのに十分であるという利点を提供することがわかった。例えば、以下に記載される図9Bおよび図9Cに示されるように、このアプローチは、アップ側およびダウン側における最も明るいピークの連続したペアリング、または常に距離において最も接近しているピークのペアリング、および外向きに進むなどの素朴なアプローチを用いるよりも優れたドップラー補正を有する像を生成した。

10

【0084】

工程(815)では、現在照射されるスポットについての少なくとも1つの一致する対は、対における距離を差別化することによって、スポットで照射される少なくとも1つの物体または物体の一部についてのスポットにおいてドップラー効果を決定するために使用される。いくつかの実施形態では、ドップラー修正距離は、例えば、平均化することによって、対における2つの距離を組み合わせることに基づいて決定される。いくつかの実施形態では、アップチャーブ距離またはダウンチャーブ距離の1つがより信頼できると考えられる場合、加重平均が使用される。1つの距離は、例えば、それがより広い帯域幅またはより長い持続時間に依拠するため、より信頼できると考えられ得る。いくつかの実施形態では、信頼度の尺度は距離に重みを加えるために使用され、より信頼できる距離により多く重みを加える。いくつかの一致した距離が現在照射されるスポットに利用可能である場合、すべての一致する対は、複数の距離またはスポットに対する複数のドップラー効果を見つけるために使用される。

20

【0085】

工程(821)では、例えば、関心のあるシーンで新規スポットを見るために走査光力プラ(320)を走査することによって、関心のあるシーンで照射する他のスポットがあるかどうかが判断される。他のスポットがある場合、制御は工程(802)に戻り、次のスポットを照らして任意の反射を処理する工程に続く。そして、他のスポットがない場合、結果が使用される前に照らすスポットはそれ以上なく、制御は工程(823)に渡される。

30

【0086】

工程(823)では、デバイスは、ドップラー効果または修正距離に基づいて操作される。いくつかの実施形態では、これは、送信光学信号によって照射される複数のスポットにおける、任意の物体のドップラー修正位置を示す画像をディスプレイ装置上で提示することを含む。いくつかの実施形態では、これは、送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー修正位置の点群に基づいて少なくとも1つの物体を識別するデータをデバイスに伝達する。いくつかの実施形態では、これは、送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー効果の大きさを示す画像をディスプレイ装置上で提示することを含み、これによって、移動する物体は静止物体および存在しない物体と区別される。いくつかの実施形態では、これは、物体との衝突を回避するために車両を移動させることを含み、ここで、車両と物体の閉成速度は、送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー効果の大きさに基づいて決定される。いくつかの実施形態では、これは、送信光学信号によって照射される複数のスポットにおけるドップラー修正位置の点群に基づいて、衝突針路上で車両を識別するか、または物体を識別することを含む。ドップラーに基づく点群データのフィルタリングは、そよ風の中で動き得る植物を識別して削除する効果を有する。その後、ハードターゲット、人工ターゲット、または高密度ターゲットは、フィルター処理によってさらに明確になる。これは、防御および監視のシナリオにおいて効果的である。車両シナリオ・ドップラーは、セグメントターゲット(つまり、道路表面VS移動車両)に使用することができる。

40

50

【0087】

4. 例示的な実施形態

これらの例示的な実施形態では、LIDARシステムは、同時アップチャーブおよびダウンチャーブ送信信号を成するために、先に例証されたコンポーネントを使用した。このシステムは、モンタナ州ボーズマンのBLACKMORE SENSORS AND ANALYTICS, INC.™ からHRS-3Dとして市販で入手可能である。これらの例示的な実施形態では、貪欲な組み合わせが使用された。第1の組み合わせは、最低コストとの組み合わせである。その後、その対は取り除かれ、次の最低コストとの対が使用される。

【0088】

図9A～9Cは、一実施形態にかかる、ドップラー修正距離および非修正距離に対する改善に基づいて、ディスプレイ装置上の出力例を例証する画像である。図9Aの画像は、広視野(FOV)の3次元(3D)FMチャーブ波形(FMCW)LIDARシステムを使用して集められた。このシーンは、 $B = 2$ ギガヘルツ(GHz, 1GHz = 10^9 Hz)の光帯域幅波形で画像化された。画像の黒画素はリターンを表わさず、白画素は無視できるドップラー効果を有する安定したリターンを表す(アップチャーブ距離およびダウンチャーブ距離は同じである)。グレーエリアは、2進法のフィルターにおけるドップラーの規模を使用する無視できないドップラー効果を有する画素を表わす。灰色画素は、植物の動きに対する感度を示す。画像は、植物とハードターゲットとを明白に区別する。後処理は、ハードターゲット表面上の望まれない強度斑点を除去した。例示的実施形態では、閾値は経験的に選ばれた。他の実施形態では、結果の長所のいくつかの尺度によっていくつかの閾値が選択される。さらに、最良の結果をもたらす閾値が選択される。

10

20

【0089】

図9Bの画像は、図9Aと同じ構成を用いて集められたが、検出後処理においてドップラー補正を行なわなかった。図9Cの画像は、同じLIDARシステムを用いて集められ、図8の方法を使用してドップラー修正を行なっていた。以上のように、木の葉の動きによって引き起こされたブレは、図9Cにおいて大幅に減少され、より多くの個々の枝および葉を識別することを可能にする。

【0090】

他の試験が、10Hzのフレーム率でフレーム1つあたり10,000のデータポイント群を生成する、速いフレーム率と狭い視界の撮像装置で実行された。試験人は、センサの視界内を行ったり来たりした。人の各画像は、数百の3次元撮像フレームの時系列から切り取られる(同じ3次元方向視野から切り取られる)。

30

【0091】

図10Aは、一実施形態にかかる、LIDARシステムに接近するターゲットについてのドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の出力例を例証する3つの画像のセットである。各ドットは、人が動いている場合の物体上のスポットまでの距離に基づく、3次元空間の透視図を示す。ドットは、LIDARシステムに対して動きがない光から3.5メートル毎秒(m/s)の閉成速度の黒まで延びるグレースケールを用いてプロットされる。白画素は反射を示さない。3つの異なる画像は重ねられる。画像(1012)は、ほとんど静止している表面上のほとんど静止している人を明確に示す。画像(1013)は、いくつかの動いている部分と、いくつかのほとんど静止している部分とを有する人を明確に示す。歩行の足取りで予期されるように、本体および前脚はほとんど静止しているように見える一方、後脚および前腕の両方ともは明らかにLIDARシステムに向かってより早く動いている。画像(1014)は、速く動く人を明確に示す。体の本体および前脚の速度は、後脚の速度より早く、ランニングの足取りと一致する。相対的運動は、例証されるグレースケールよりもカラースケールにおいてさらに明白である。さらに、様々な速度部分はそれらの正確な相対位置から離れていない。

40

【0092】

図10Bは、一実施形態にかかる、LIDARシステムから後退するターゲットについて

50

てのドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の出力例を例証する3つの画像のセットである。各ドットは、人が動いている場合の物体上のスポットまでの距離に基づく、3次元空間の透視図における位置を示す。ドットは、LIDARシステムに対して動きがない光から、3.5m/sの開離速度の黒へと延びるグレースケールを用いてプロットされる。白画素はリターンを示さない。3つの異なる画像は重ねられる。画像(1022)は、約-2m/sの適度な速度で離れて動く人を明確に示す。画像(1023)は、約-3m/sより大きな速度で離れて動く人を明確に示し、植物の脚はいくぶん遅く、ランニングの足取りと一致する。画像(1024)は、約-2m/sの減少した速度で離れて動く人を明確に示し、植物の脚および本体は持ち上げられた脚よりいくぶん遅く、走った後に立ち止まるのと一致する。相対的運動は、例証されるグレースケールよりもカラースケールにおいてより明白である。上記のように、人の様々な速度部分は、正確な相対位置から離れていない。

10

【0093】

したがって、システムは、修正距離を用いてすべての画素を人の形に正確に配置するだけでなく、ドップラー効果に基づいて人の姿の動きも確認する。

【0094】

他の実施形態では、システムは揺れる植物を修正するために使用される。平行にされたレーザー光線は、頭上の木を介して走査される。ドップラー値の存在を伴う複数の反射を有する可能性は、特に微風または風が存在する場合、非常に高い。そのような植物は、所定の視線に沿った距離において、緊密に分割された高密度な散乱体を提供する。風それが自身が、植物においてドップラーシフトを引き起こし、したがって、植物の画像化をさらに困難にすることもある。図11は、一実施形態にかかる、ドップラー修正距離に基づくディスプレイ装置上の高分解能での出力例を例証する画像である。この画像は、記載される技術を用いて、輪郭が非常に明確な画像を得ることができることを実証する。これは、そのようなシナリオにおいて、技術が非常にリアルな画像を提供することに効果的であるという強力な証拠を提供する。

20

【0095】

5. 計算上ハードウェア概要

図12は、本発明の実施形態が実施され得るコンピュータシステム(1200)を例証するブロック図である。コンピュータシステム(1200)は、コンピュータシステム(1200)の他の内部および外部のコンポーネント間に情報を渡すバス(1210)などの通信機構を含む。情報は、典型的には電圧であるが、他の実施形態では、磁気、電磁気、現象、圧力、化学物質、分子の原子と量子の相互作用などの現象を含む、測定可能な現象の物理的な信号として表される。例えば、北向きのおよび南向きの磁界、または0および非0電気電圧は、2進数字(ビット)の2つの状態(0, 1)を表している。他の現象は、より高次の進数の桁を表すことができる。測定前の複数の同時の量子的状態の重ね合わせは量子ビット(量子ビット)を表す。1つ以上の進数字列は、数を表すかあるいは文字をコードするために使用されるデジタルデータを構成する。いくつかの実施形態において、アナログデータと呼ばれる情報は、特定の範囲内の測定可能な値の近い連続体によって表される。コンピュータシステム(1200)またはその一部は、本明細書に記載される1つ以上的方法の1工程以上行うための手段を構成する。

30

【0096】

2進数字列は、数を表すかあるいは文字をコードするために使用されるデジタルデータを構成する。バス(1210)は、情報はバス(1210)に接続されたデバイス間で迅速に転送されるように、多くの情報平行導体を含む。情報を処理するための1つ以上のプロセッサ(1202)がバス(1210)と接続される。プロセッサ(1202)は、情報の一連の操作を行う。一連の操作は、情報をバス(1210)から持ち出し、情報をバス(1210)上に置くことを含む。一連の操作は、さらに典型的には2単位以上の情報を比較し、情報の単位の位置を変え、足し算または掛け算によるなどして2単位以上の情報を組み合わせることを含む。プロセッサ(1202)によって実行される一連の動作は

40

50

、コンピュータ命令を構成する。

【0097】

コンピュータシステム(1200)はさらに、バス(1210)に接続されるメモリ(1204)を含む。ランダムアクセスメモリ(RAM)あるいは他の動的記憶装置などのメモリ(1204)は、コンピュータ命令を含む情報を保存する。ダイナミックメモリは、内部に保存される情報がコンピュータシステム(1200)によって変更されることを可能にする。RAMにより、メモリアドレスと呼ばれる位置に保存された情報の単位を、近隣のアドレスの情報とは無関係に保存して検索することができる。メモリ(1204)は、コンピュータ命令の実行の間に一時的な値を保存するために、プロセッサ(1202)によっても使用される。コンピュータシステム(1200)は、読み取り専用メモリ(ROM)(1206)、または命令を含む静的情報を保存するためにバス(1210)に接続される他の静的記憶装置を含み、それは、コンピュータシステム(1200)によって変更されない。さらに、コンピュータシステム(1200)が電源を切られるか、他の方法で電力を失った時でも永続する、命令を含む情報を保存するための磁気ディスクまたは光ディスクなどの不揮発性の(永続的)記憶装置(1208)もバス(1210)に接続される。

10

【0098】

命令を含む情報は、人間のユーザーによって操作された英数字キーを含むキーボードなどの外部入力装置(1212)あるいはセンサから、プロセッサにより使用されるためにバス(1210)に提供される。センサはその付近の状態を検出し、その検出を、コンピュータシステム(1200)で情報を表すために使用される信号と適合する信号へと転換する。主として人間と相互に作用するために使用されるバス(1210)につながれた他の外部装置は、画像を提示するための陰極線管(CRT)あるいは液晶ディスプレイ(LCD)などのディスプレイ装置(1214)、および、ディスプレイ(1214)上に提示された小さなカーソル画像の位置を制御し、ディスプレイ(1214)に提示されたグラフィック要素に関連したコマンドを発するための、マウスあるいはトラックボールあるいはカーソル方向キーなどのポインティングデバイス(1216)を含む。

20

【0099】

例証された実施形態では、特定用途向け集積回路(I.C.)(1220)などの特殊目的ハードウェアは、バス(1210)につながれる。特殊目的ハードウェアは、特殊な目的のためにプロセッサ(1202)では十分に速く行われない操作を行なうように構成される。特定用途向けのI.C.の例としては、ディスプレイ(1214)向けの画像を生成するためのグラフィックアクセラレータカード、ネットワークを介して送信されたメッセージを暗号化して解読するための暗号処理ボード、音声認識、および、ハードウェアにより効率的に実行されるいくつかの複雑な動作のシーケンスを繰り返し行う、ロボットアームや医療スキャニング装置などの特別な外部装置に対するインターフェースが挙げられる。

30

【0100】

コンピュータシステム(1200)は、バス(1210)につながれた通信インターフェース(1270)の1つ以上の例をさらに含む。通信インターフェース(1270)は、プリンター、スキャナー、および外部ディスクなどのそれ自身のプロセッサで作動する様々な外部装置との双方向通信結合を提供する。一般に、この結合は、プロセッサを備えた様々な外部装置が接続されるローカルネットワーク(1280)に接続されるネットワーククリング(1278)とのものである。例えば、通信インターフェース(1270)は、パラレルポートあるいはシリアルポート、またはパソコン上のユニバーサル・シリアル・バス(USB)であってもよい。いくつかの実施形態において、通信インターフェース(1270)は、サービス総合デジタル網(ISDN)カード、あるいはデジタル加入者線(DSL)カード、あるいは、電話回線の対応するタイプに対する情報通信接続を提供する電話モジュールである。いくつかの実施形態において、通信インターフェース(1270)は、バス(1210)上の信号を同軸ケーブルを介した通信接続の信号に、あるいは光ファイバーケーブルを介した通信接続のための光信号に変換するケーブルモジュールである。

40

50

別の例として、通信インターフェース(1270)は、イーサネット(登録商標)などの適合するLANへのデータ通信接続を提供するための、ローカル・エリア・ネットワーク(LAN)カードであってもよい。無線リンクが実装されることもある。電波、光波、および赤外線波を含む音波と電磁波などの搬送波は、ワイヤーまたはケーブルを介さずに空間を移動する。信号は、搬送波の振幅、周波数、相、偏光、あるいは他の物理的特性の人為的な変動を含む。無線リンクについては、通信インターフェース(1270)は、デジタルデータなどの情報の流れを運ぶ赤外線信号と光信号を含む、電気信号、音響信号、あるいは電磁信号を送受信する。

【0101】

コンピュータ可読媒体という用語は、プロセッサ(1202)に実行命令を含む情報を提供することに参加するあらゆる媒体を指すように本明細書では使用される。こうした媒体は、限定されないが、不揮発性の媒体、揮発性の媒体、および伝達媒体を含む多くの形態をとってもよい。不揮発性の媒体は、例えば、記憶装置(1208)などの光学ディスクまたは磁気ディスクを含む。揮発性の媒体は例えば、ダイナミックメモリ(1204)を含んでいる。伝達媒体は、例えば、同軸ケーブル、銅線、光ファイバーケーブル、電波、光波、および赤外線波を含む音波と電磁波などの、ワイヤーまたはケーブルを介さずに空間を移動する波を含む。コンピュータ可読記憶媒体という用語は、伝達媒体を除いて、プロセッサ(1202)に情報を提供することに参加するあらゆる媒体を指すように本明細書で使用される。

【0102】

コンピュータ可読媒体の一般的な形態としては、例えば、フロッピーディスク、フレキシブルディスク、ハードディスク、磁気テープ、またはあらゆる他の磁気媒体、コンパクトディスクROM(CD-ROM)、デジタルビデオディスク(DVD)またはあらゆる他の光学媒体、パンチカード、紙テープ、またはホールのパターンを備えたあらゆる他の物理的な媒体、RAM、プログラマブルROM(PROM)、消去可能なPROM(EPROM)、FLASH-E PROM、またはあらゆる他のメモリーチップあるいはカートリッジ、搬送波、またはコンピュータが読み取ることができるあらゆる他の媒体が挙げられる。非一時的なコンピュータ可読記憶媒体という用語は、搬送波と他の信号を除いて、プロセッサ(1202)に情報を提供することに参加するあらゆる媒体を指すように本明細書で使用される。

【0103】

1つ以上の有形媒体内にエンコードされたロジックは、ASIC(1220)などのコンピュータ可読記憶媒体および特殊な用途のハードウェア上のプロセッサ命令の1つまたはその両方を含む。

【0104】

ネットワークリンク(1278)は典型的には、情報を使用または処理する他の装置に、1つ以上のネットワークを介する情報通信を提供する。例えば、ネットワークリンク(1278)は、ローカルネットワーク(1280)を介してホストコンピュータ(1282)へ、あるいはインターネットサービスプロバイダー(ISP)によって操作された装置(1284)へ、接続を提供することがある。同様に、ISP機器(1284)は、現在一般的にインターネット(1290)と呼ばれるネットワークのパブリックワールドワイドパケット交換通信ネットワークを通じて、データ通信サービスを提供する。インターネットに接続されたサーバー(1292)と呼ばれるコンピュータは、インターネットを介して受け取った情報に応じてサービスを提供する。例えば、サーバー(1292)は、ディスプレイ(1214)で提示するための映像データを表す情報を提供する。

【0105】

本発明は、本明細書に記載される技術を実施するためのコンピュータシステム(1200)の使用に関する。本発明の1つの実施形態によれば、こうした技術は、メモリ(1204)に含まれている1つ以上の命令の1つ以上のシーケンスを実行するプロセッサ(1202)に応じて、コンピュータシステム(1200)によって行われる。ソフトウェア

10

20

30

40

50

およびプログラムコードとも呼ばれるこうした命令は、記憶装置（1208）などの別のコンピュータ可読媒体からメモリ（1204）に読み込まれることもある。メモリ（1204）に含まれる命令のシーケンスを実行することで、プロセッサ（1202）は本明細書に記載される方法の工程を行う。代替的な実施形態では、特定用途向け集積回路（1220）などのハードウェアは、本発明を実行するためにソフトウェアの代わりに、あるいはソフトウェアと組み合わせて使用されてもよい。したがって、本発明の実施形態はハードウェアとソフトウェアのいかなる特定の組み合わせにも制限されない。

【0106】

通信インターフェース（1270）でネットワークリンク（1278）および他のネットワークを介して送信された信号は、コンピュータシステム（1200）への、またはコンピュータシステム（1200）からの情報を伝達する。コンピュータシステム（1200）は、とりわけ、ネットワーク（1280、1290）を介して、ネットワークリンク（1278）と通信インターフェース（1270）を介して、プログラムコードを含む情報を送受信することができる。インターネット（1290）を使用する一例において、サーバー（1292）は、インターネット（1290）、ISP装置（1290）、ローカルネットワーク（1280）、および通信インターフェース（1270）を介してコンピューター（1200）から送信されたメッセージによって要求される、特定用途のためのプログラムコードを送信する。受け取られたコードは、プロセッサ（1202）によって受け取られて実行されることもあれば、後に実行するために記憶装置（1208）あるいは他の不揮発性記憶装置に保存されることもあれば、その両方であることもある。このように、コンピュータシステム（1200）は、搬送波上の信号の形態のアプリケーションプログラムコードを得ることもある。

10

20

30

30

【0107】

コンピュータ可読な媒体の様々な形態は、実行用プロセッサ（1202）への、命令またはデータまたはその両方の1つ以上のシーケンスの伝達に関与することもある。例えば、命令およびデータは、ホスト（1282）などのリモートコンピュータの磁気ディスクに最初に運ばれことがある。リモートコンピュータはそのダイナミックメモリに命令およびデータをロードし、モデムを使用する電話回線で命令およびデータを送る。コンピュータシステム（1200）固有のモデムは、電話線上で命令およびデータを受信し、命令およびデータを、ネットワークリンク（1278）として機能する赤外線搬送波上の信号に変換するために赤外線送信機を使用する。通信インターフェース（1270）として役立つ赤外線検出器は、赤外線信号で運ばれた命令およびデータを受け取り、命令とデータを表す情報をバス（1210）に乗せる。バス（1210）はメモリ（1204）に情報を伝え、プロセッサ（1202）は、命令とともに送信されたデータの一部を用いて、該メモリからの命令を検索して実行する。メモリ（1204）で受け取られた命令およびデータは、プロセッサ（1202）によって実行される前後いずれかに、記憶装置（1208）上に随意に保存されてもよい。

【0108】

図13は、本発明の実施形態が実施され得るチップセット（1300）を例証する。チップセット（1300）は、本明細書に記載される方法の1以上の工程を行うようにプログラムされ、例えば、1つ以上の物理的な包装（例えば、チップ）に組み入れられた図12に関して記載されたプロセッサおよびメモリのコンポーネントを含む。例として、物理的な包装は、物理的強度、サイズの保存、および／または電気的な相互作用の限定などの1つ以上の特徴を提供するために、構造的なアセンブリ（例えば、幅木）上での1つ以上の材料、コンポーネント、および／またはワイヤーの配置を含む。ある実施形態では、チップセットをシングルチップ中に実装することができると企図される。チップセット（1300）またはその一部は、本明細書に記載される方法の1以上の工程を行うための手段を構成する。

40

【0109】

1つの実施形態において、チップセット（1300）は、チップセット（1300）の

50

コンポーネント中の情報を伝達するためのバス(1300)などの通信メカニズムを含む。プロセッサ(1303)は、命令を実行し、例えば、メモリ(1305)に保存された情報を処理するために、バス(1301)に対して接続性を有する。プロセッサ(1303)は1つ以上の処理コアを含むことがあり、各コアは独立して行うように構成されている。マルチコアプロセッサは、単一の物理的な包装内でのマルチプロセッシングを可能にする。マルチコアプロセッサの例としては、2、4、8、またはそれ以上の数の処理コアを含んでいる。代替的に、あるいは追加的に、プロセッサ(1303)は、命令の独立した実行、パイプライン処理、およびマルチスレッディングを可能にするために、バス(1301)によって縦一列に並んで構成された1つ以上のマイクロプロセッサを含むことがある。1つ以上のデジタルシグナルプロセッサ(DSP)(1307)あるいは1つ以上の特定用途向け集積回路(ASIC)(1309)などの特定の処理機能およびタスクを行うために、プロセッサ(1303)には1つ以上の専用コンポーネントが伴うことがある。DSP(1307)は、典型的には、プロセッサ(1303)とは無関係にリアルタイムで現実世界の信号(例えば、音)を処理するように構成される。同様に、ASIC(1309)は、汎用プロセッサでは容易に行われない専門的な機能を行うように構成可能である。本明細書に記載される創造性のある機能を行うことを支援する他の専門的なコンポーネントは、1つ以上のフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)(図示せず)、1つ以上の制御装置(図示せず)、あるいは1つ以上の他の特殊目的コンピュータチップを含む。

10

20

30

40

50

【0110】

プロセッサ(1303)および付随するコンポーネントは、バス(1301)によってメモリ(1305)に対する接続性を有する。メモリ(1305)は、実行時に本明細書に記載される方法の1以上の工程を行う実行可能な命令を保存するために、ダイナミックメモリ(例えば、RAM、磁気ディスク、書き込み可能な光ディスクなど)および静态メモリ(例えば、ROM、CD-ROMなど)の両方を含む。メモリ(1305)はさらに、本明細書に記載される方法の1以上の工程の実行に関連付けられる、あるいは該実行により生成されるデータを保存する。

【0111】

6. 変更、拡張、および修正

前述の明細書では、本発明はその特定の実施形態に関して記載されている。しかしながら、本発明のより広い精神と範囲から逸脱することなく、様々な修飾や変更を行うことが可能であるということは明らかである。このため、明細書および図面は限定的な意味ではなく、例証的な意味としてみなされるものである。本明細書および請求項にわたって、文脈から別段の必要性がない限り、「含む(comprise)」との用語とその変化形態、「含む(comprises)」および「含むこと(comprising)」などは、記載された項目、要素、または工程、あるいは項目、要素、または工程のグループを包含することを暗に意味するが、他の項目、要素、または工程、あるいは項目、要素、または工程のグループを除外することを暗に意味するものではないことが理解されよう。さらに、不定冠詞「a」または「an」は、不定冠詞によって修飾される項目、要素、または工程の1つ以上を示すように意味する。本明細書で使用する場合、文脈から明らかでない限り、他の値の係数2(2倍または2分の1)内である場合、値は「約」他の値である。例の範囲が与えられる場合、文脈から明らかでない限り、任意の含まれる範囲は、様々な実施形態においても意図されている。したがって、0から10の範囲は、いくつかの実施形態において1から4の範囲を含む。

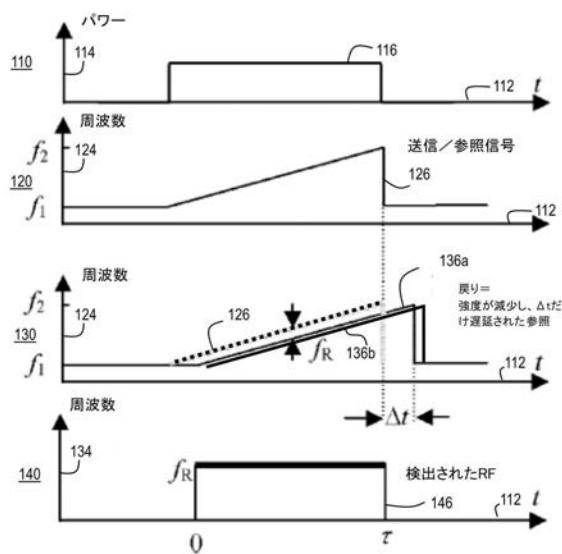
【0112】

7. 参考文献

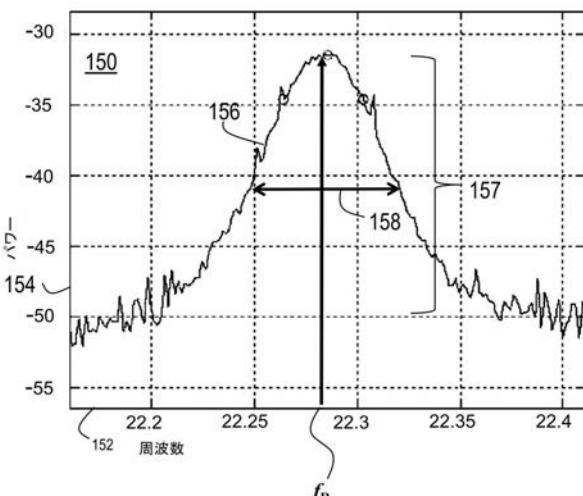
- Adany, P., C. Allen, and R. Hui, "Chirped Lidar Using Simplified Homodyne Detection," Jour. Lightwave Tech., v. 27 (16), 15 August, 2009.

- Hui, R., C. Allen, and P. Adany, "Coherent detection scheme for FM Chirped laser RADAR," US patent 7,742,152, 22 June 2010.
- Kachelmyer, A.L., "Range-Doppler Imaging with a Laser Radar," The Lincoln Laboratory Journal, v.3.(1), 1990.
- Munkres, J., "Algorithms for the Assignment and Transportation Problems," Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, v 5 (1), pp 32-38, Mar. 1957. 10

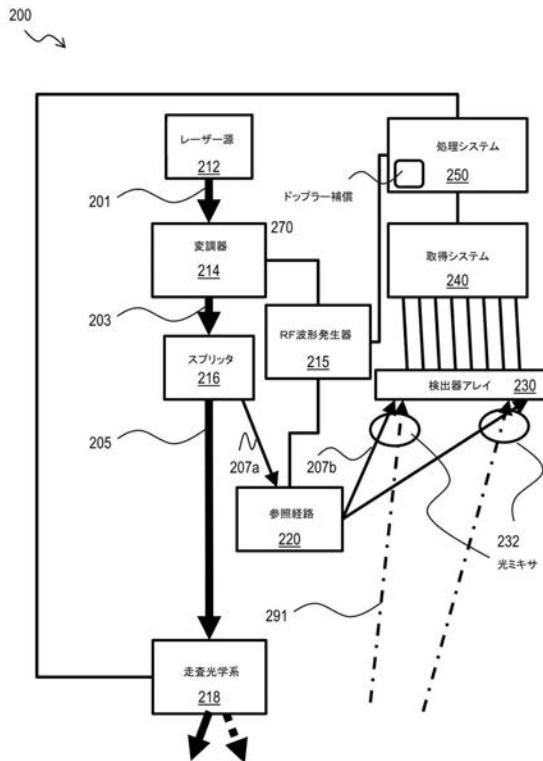
【図1A】



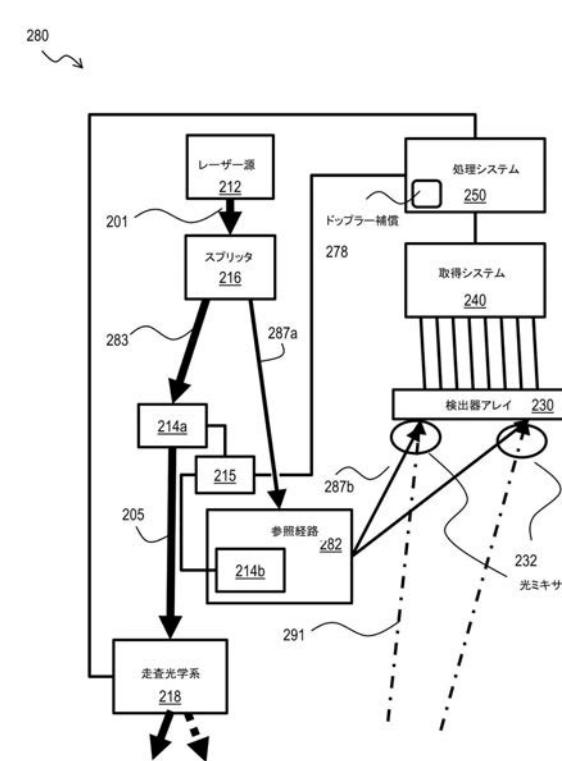
【図1B】



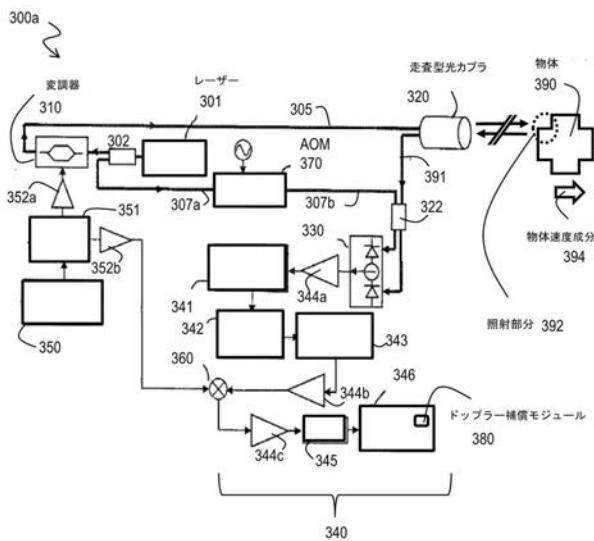
【 図 2 A 】



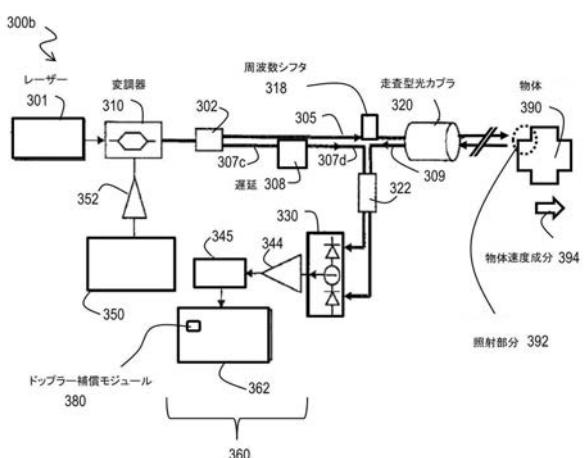
【 図 2 B 】



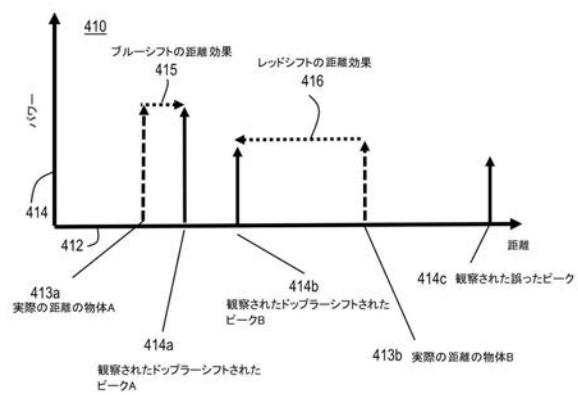
【 図 3 A 】



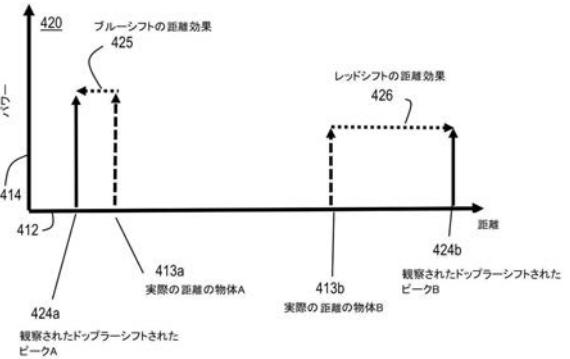
【 図 3 B 】



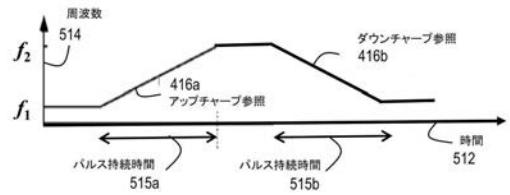
【図 4 A】



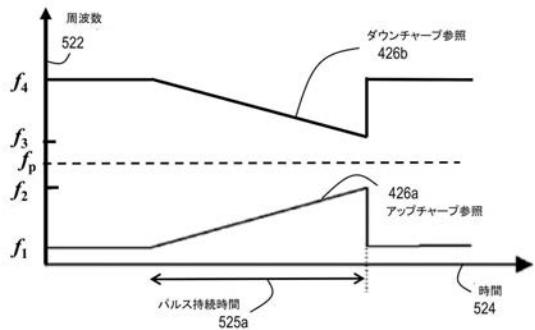
【図 4 B】



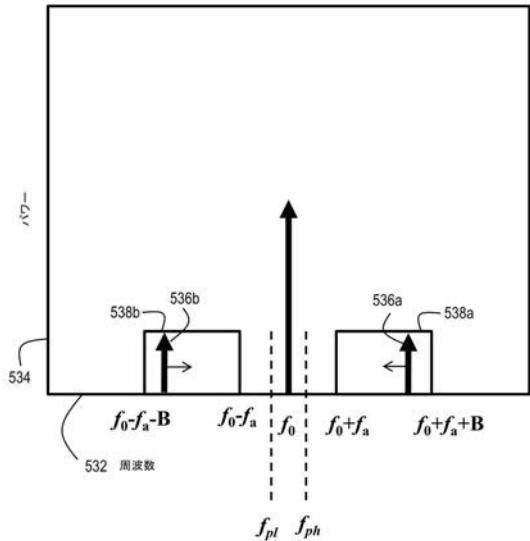
【図 5 A】



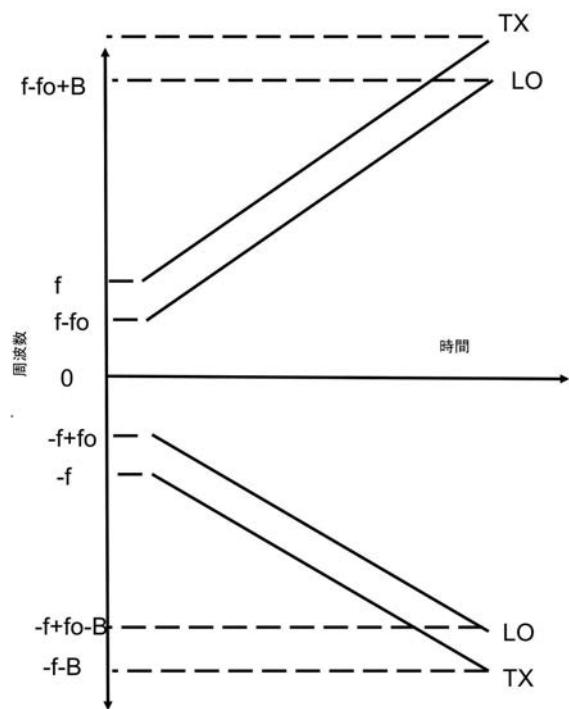
【図 5 B】



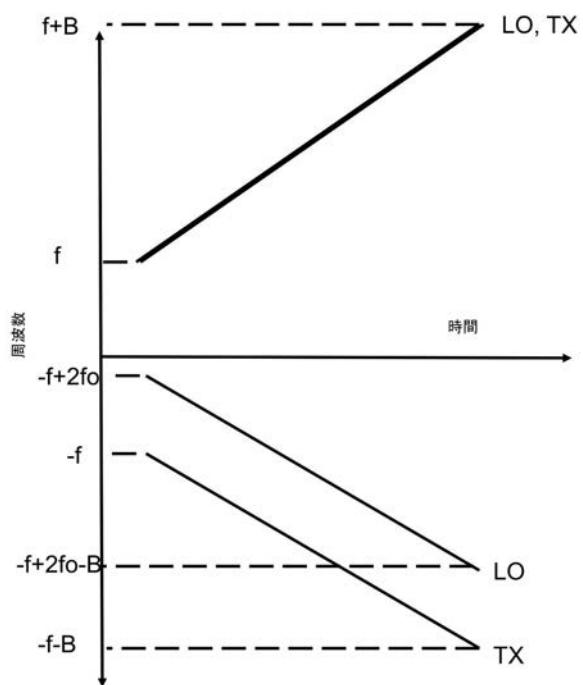
【図 5 C】



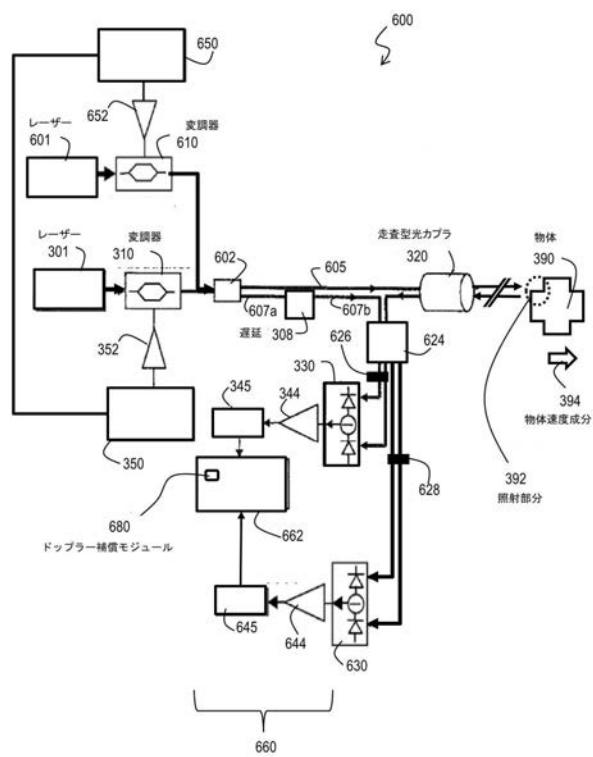
【図 5 D】



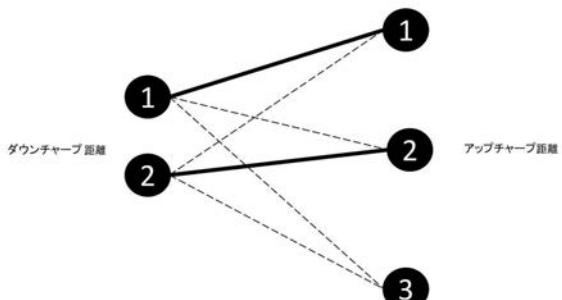
【図 5 E】



【図 6】



【図 7 A】

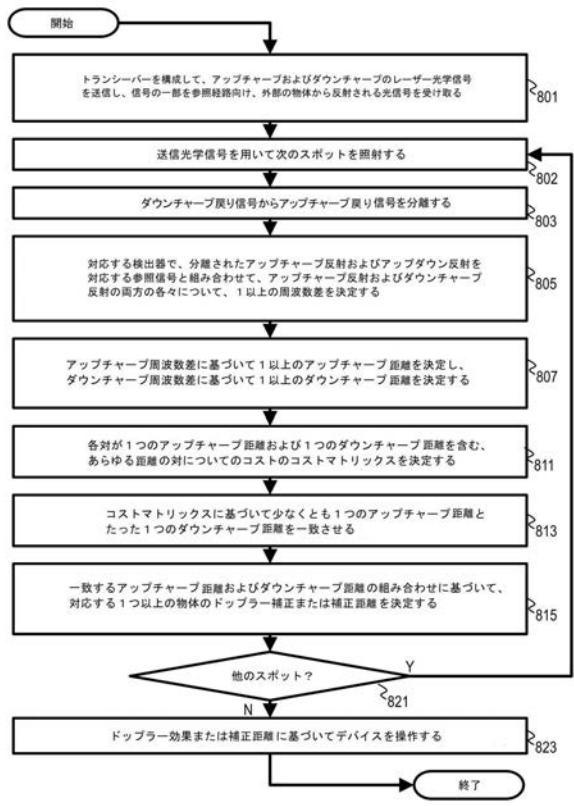


【図 7 B】

コストマトリックス

$$\begin{array}{ccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} \\
 = & C_{21} & C_{22} & C_{23}
 \end{array}$$

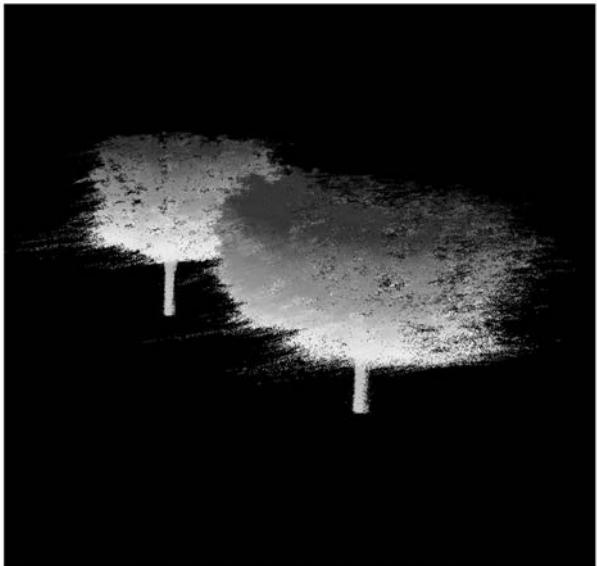
【図 8】



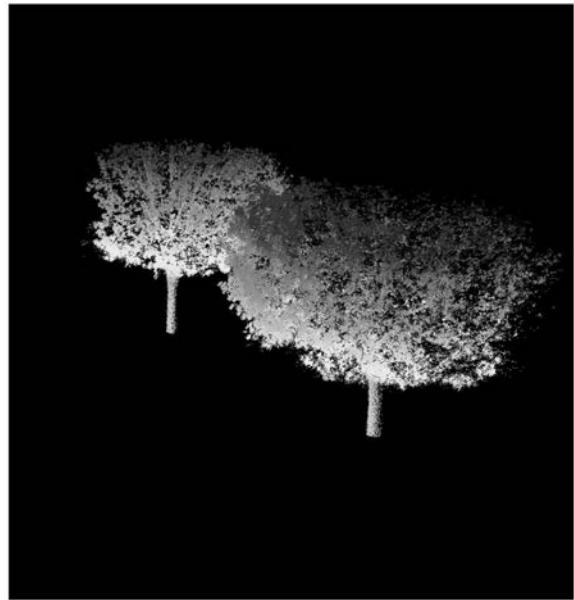
【図 9 A】



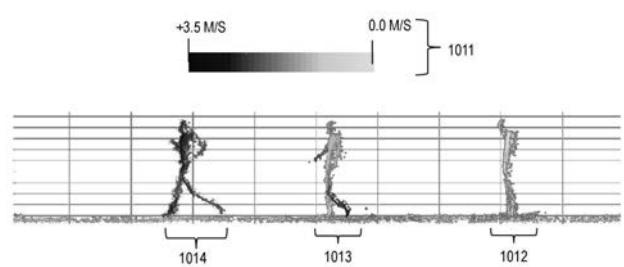
【図 9 B】



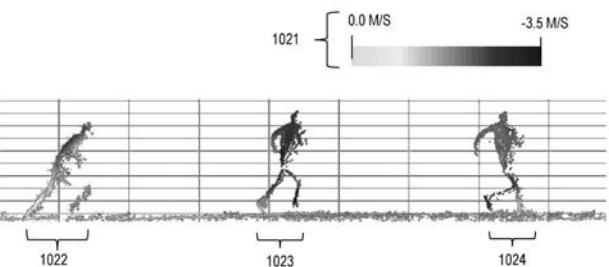
【図 9 C】



【図 10 A】



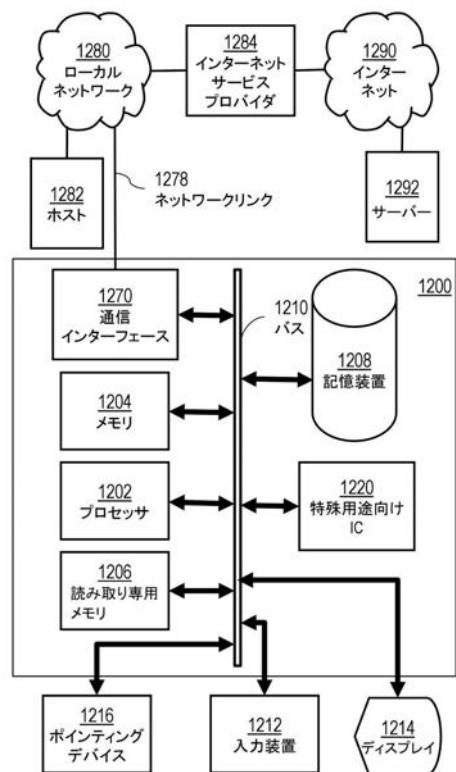
【図 10 B】



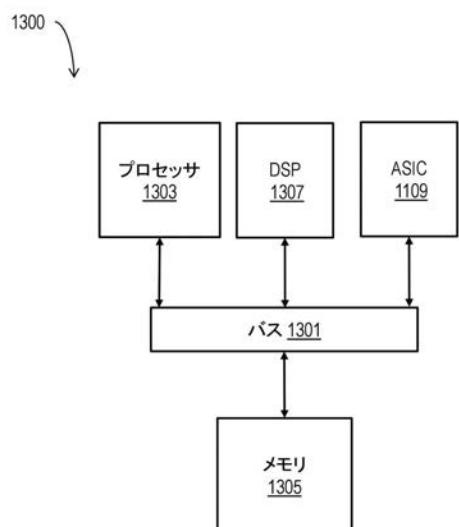
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US 17/62703
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(8) - G01C 3/08 (2018.01) CPC - G01C 3/08; G01S 17/32; H05K 999/99		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) See Search History Document		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched See Search History Document		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) See Search History Document		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2015/0323660 A1 (AUTOLIV ASP INC.) 12 November 2015 (12.11.2015), entire document, especially para. [0011], [0012], [0040], [0042], [0044], [0061], [0072]	1-9
Y	US 2016/0091599 A1 (JENKINS) 31 March 2016 (31.03.2016), entire document, especially para. [0037]	1-9, 12
Y	US 2011/0205523 A1 (Rezk et al.) 25 August 2011 (25.08.2011), entire document, especially para. [0029], [0030], [0038], [0039], [0041]	10, 12
A		11, 13-15
Y	US 2002/0071109 A1 (Allen et al.) 13 June 2002 (13.06.2002), entire document, especially para. [0027], [0054], [0058]	10, 12
A		11, 13-15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 30 July 2018	Date of mailing of the international search report 27 AUG 2018	
Name and mailing address of the ISA/US Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450 Facsimile No. 571-273-8300	Authorized officer: Lee W. Young <small>PCT Helpdesk: 571-272-4300 PCT OSP: 571-272-7774</small>	

フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,R0,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IR,IS,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT

(72)発明者 レイベル, ランディ アール.

アメリカ合衆国 59718 モンタナ州 ボーズマン ウエスト・ブロードウォーター 357
0

(72)発明者 カリー, ジェームズ

アメリカ合衆国 59715 モンタナ州 ボーズマン サウス・ブラック・アベニュー 610

(72)発明者 バーグ, トレントン

アメリカ合衆国 59741 モンタナ州 マンハッタン ペーサー・ランディング・トレイル
325

F ターム(参考) 5J084 AA05 AB01 AB07 AC02 AD04 AD05 BA03 BA36 BA38 BA45
BA48 BA51 BB14 BB20 BB30 CA08 CA10 CA25 CA26 CA31
CA32 CA33 CA42 CA48 CA49 CA70 EA04 EA11