

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7688045号

(P7688045)

(45)発行日 令和7年6月3日(2025.6.3)

(24)登録日 令和7年5月26日(2025.5.26)

(51)国際特許分類

F I

G 0 5 D 1/43 (2024.01)

G 0 5 D 1/43

G 0 1 S 17/89 (2020.01)

G 0 1 S 17/89

A 0 1 B 69/00 (2006.01)

A 0 1 B 69/00

3 0 3 D

請求項の数 16 (全61頁)

(21)出願番号 特願2022-563679(P2022-563679)
(86)(22)出願日 令和3年11月1日(2021.11.1)
(86)国際出願番号 PCT/JP2021/040300
(87)国際公開番号 WO2022/107588
(87)国際公開日 令和4年5月27日(2022.5.27)
審査請求日 令和5年12月20日(2023.12.20)
(31)優先権主張番号 特願2020-192015(P2020-192015)
(32)優先日 令和2年11月18日(2020.11.18)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)

(73)特許権者 000001052
株式会社クボタ
大阪府大阪市浪速区敷津東一丁目2番4
7号
(74)代理人 100101683
弁理士 奥田 誠司
(74)代理人 100155000
弁理士 喜多 修市
(74)代理人 100139930
弁理士 山下 亮司
(74)代理人 100188813
弁理士 川喜田 徹
(74)代理人 100202197
弁理士 村瀬 成康
(74)代理人 100202142

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 移動体、制御ユニット、データ生成ユニット、移動体の動作を制御する方法、およびデータを生成する方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の樹木列の間を移動する移動体であって、
前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、
前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、
前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する自己位置推定装置と、
推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、
を備え、
前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、前記制御装置は、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行う、
移動体。

【請求項2】

複数の樹木列の間を移動する移動体であって、
前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを

出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、

前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の位置を推定しながら、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録するデータ生成装置と、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、
を備え、

前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、前記制御装置は、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行う、
移動体。

【請求項3】

前記少なくとも2つのLiDARセンサは、

前記樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載された第1のLiDARセンサと、

前記樹木列の幹部の平均高さよりも高い位置に搭載された第2のLiDARセンサと、
を含み、

前記自己位置推定装置は、前記第1のLiDARセンサから出力された点群データおよび前記第2のLiDARセンサから出力された点群データから、地面からの高さが所定の範囲に含まれる点群を抽出し、抽出した点群に基づいて前記幹部を検出する、
請求項1に記載の移動体。

【請求項4】

前記環境地図データは、前記複数の樹木列の周囲に位置する複数の支柱の分布をさらに示し、

前記自己位置推定装置は、前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部および支柱を検出し、検出した前記樹木列の幹部および前記支柱と、前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する、
請求項1に記載の移動体。

【請求項5】

前記データ生成装置は、前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部および支柱を検出し、検出した前記樹木列の幹部および前記支柱の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して前記記憶装置に記録する、
請求項2に記載の移動体。

【請求項6】

前記第1のLiDARセンサは、地上から15cm以上100cm以下の高さに配置されている、
請求項3に記載の移動体。

【請求項7】

前記第1のLiDARセンサは、前記移動体の前方に向けてレーザパルスを出射するように配置され、

前記第2のLiDARセンサは、前記移動体の前方斜め下に向けてレーザパルスを出射するように配置されている、
請求項3または6に記載の移動体。

【請求項8】

前記第1のLiDARセンサおよび前記第2のLiDARセンサの各々は、2次元点群データを出力する2次元LiDARセンサである、
請求項3、6、7のいずれかに記載の移動体。

【請求項9】

前記自己位置推定装置は、前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データから、最新スキャンを含む複数スキャンの入力点群を取得し、前記複

10

20

30

40

50

数スキャンの入力点群と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する、請求項1または4に記載の移動体。

【請求項10】

前記移動体は自律的に移動可能な作業車両であり、

前照灯をさらに備え、

前記第1のLiDARセンサは、前記前照灯よりも低い位置に配置されている、

請求項3、6から8のいずれかに記載の移動体。

【請求項11】

前記制御装置は、前記少なくとも2つのLiDARセンサの少なくとも1つから出力された前記点群データに基づいて、前記移動体の経路上に障害物が存在するか否かを判断し、前記障害物が存在すると判断したとき、前記移動体に、前記障害物に衝突することを回避する動作を実行させる、請求項1または2に記載の移動体。

【請求項12】

前記制御装置は、前記第2のLiDARセンサから出力された前記点群データに基づいて、前記移動体の経路上に障害物が存在するか否かを判断し、前記障害物が存在すると判断したとき、前記移動体に、前記障害物に衝突することを回避する動作を実行させる、請求項3、6から8、10のいずれかに記載の移動体。

【請求項13】

複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御する制御ユニットであって、

前記移動体に取り付けられて使用され、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、

前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、

前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する自己位置推定装置と、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、を備え、

前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、前記制御装置は、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行う、制御ユニット。

【請求項14】

複数の樹木列の間を移動する移動体において使用される制御ユニットであって、

前記移動体に取り付けられて使用され、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、

前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の位置を推定しながら、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録するデータ生成装置と、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、を備え、

前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、前記制御装置は、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行う、制御ユニット。

【請求項15】

複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御する方法であって、

前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを取得することと、

前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサから取得することと、

取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、

検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定することと、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御することと、

前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行うことと、
を含む方法。

【請求項16】

複数の樹木列の間を移動する移動体によって実行される方法であって、

前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサから取得することと、

取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、

検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成することと、

前記局所地図データを記憶装置に記録することと、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御することと、

前記複数の樹木列のうちの隣り合う2つの樹木列の一方について、前記2つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出された場合、検出された前記幹部の分布に基づいて、前記2つの樹木列の前記一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した前記分布に基づいて、前記移動体の操舵制御を行うことと、
を含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、移動体、制御ユニット、データ生成ユニット、移動体の動作を制御する方法、およびデータを生成する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

次世代農業として、ICT (Information and Communication Technology) およびIoT (Internet of Things) を活用したスマート農業の研究開発が進められている。圃場で使用されるトラクタなどの作業車両の自動化および無人化に向けた研究開発も進められている。例えば、精密な測位が可能なGNSS (Global Navigation Satellite System) などの測位システムを利用して自動操舵で走行する作業車両が実用化されてきた。特許文献1から3は、GNSSを利用して行った測位の結果に基づいて自動操舵を行う作業車両の例を開示している。

【0003】

一方、LiDAR (Light Detection and Ranging) などの距離センサを利用して自律的に移動する移動体の開発も進められている。例えば特許文献4は、LiDARを利用して圃場における作物列の間を自動走行する作業車両の例を開示している。

【先行技術文献】

10

20

30

40

50

【特許文献】

【0004】

【文献】国際公開第2017/208306号

【文献】特開2020-104617号公報

【文献】特開2020-12680号公報

【文献】特開2019-154379号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ぶどう園 (vineyard) などの果樹園、または森林などの、樹木が高い密度で分布する環境では、樹木の上部で生い茂る葉が樹冠 (canopy) を形成し、衛星からの電波にとって障害物または多重反射体として働く。このような環境では、GNSSによる正確な測位が困難である。GNSSを利用できない環境においては、位置推定と地図作成とを同時に実行するSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を利用することが考えられる。しかし、SLAMを利用して多数の樹木が存在する環境内を自律的に、あるいは自動操舵で移動する移動体の実用化には様々な課題が存在する。例えば、季節の変化によって樹木の葉部の分布が大きく変化するため、過去に作成された地図を継続して使用することができないといった課題がある。

10

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示の例示的な実施形態による移動体は、複数の樹木列の間を移動する。前記移動体は、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、自己位置推定装置と、制御装置とを備える。前記自己位置推定装置は、前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する。前記制御装置は、推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する。

20

【0007】

本開示の例示的な他の実施形態による移動体は、複数の樹木列の間を移動する。前記移動体は、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、データ生成装置とを備える。前記データ生成装置は、前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の位置を推定しながら、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録する。

30

【0008】

本開示の包括的または具体的な態様は、装置、システム、方法、集積回路、コンピュータプログラム、もしくはコンピュータが読み取り可能な記録媒体、またはこれらの任意の組み合わせによって実現され得る。コンピュータが読み取り可能な記録媒体は、揮発性の記録媒体を含んでいてもよいし、不揮発性の記録媒体を含んでいてもよい。装置は、複数の装置で構成されていてもよい。装置が2つ以上の装置で構成される場合、当該2つ以上の装置は、1つの機器内に配置されてもよいし、分離した2つ以上の機器内に分かれて配置されていてもよい。

40

【発明の効果】

【0009】

本開示のある実施形態によれば、GNSSによる測位が困難な環境においても、移動体の自動操舵あるいは自律移動を実現することができる。樹木列の幹部の分布は、葉部の分

50

布と比較して季節による変化が少ない。幹部に着目して環境地図を作成することにより、比較的長い期間にわたって同一の環境地図を継続して使用することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】時刻 t_1 から時刻 t_2 までの間に平面上を移動する移動体の例を模式的に示す図である。

【図2A】時刻 t_1 における移動体と複数のランドマークとを示す図である。

【図2B】時刻 t_2 における移動体と複数のランドマークとを示す図である。

【図3】移動体座標系 Σ_v とワールド座標系 Σ_w との配置関係を示す図である。

【図4】マッチングの一例を説明するための図である。

10

【図5】マッチングの一例を説明するための図である。

【図6】実施形態1におけるトラクタの外観を示す斜視図である。

【図7】トラクタを側面方向から見た模式図である。

【図8】トラクタおよび作業機の概略的な構成の例を示すブロック図である。

【図9A】LiDARセンサをトラクタの側面方向から見た場合の模式図である。

【図9B】LiDARセンサを鉛直上方から見た場合の模式図である。

【図10】LiDARセンサの概略的な構成の例を示すブロック図である。

【図11】トラクタが走行する環境の一例を模式的に示す図である。

【図12】トラクタの周囲の環境の例を模式的に示す斜視図である。

【図13A】トラクタの走行経路の一例を模式的に示す図である。

20

【図13B】トラクタの走行経路の他の例を模式的に示す図である。

【図14A】LiDARセンサから出射されたレーザビームで樹木および地面が照射される様子を模式的に示す図である。

【図14B】LiDARセンサから出射されたレーザビームで地面が照射される様子を模式的に示す図である。

【図15A】ある時点におけるトラクタと、LiDARセンサから放射されたレーザパルスの反射点の分布の例を模式的に示す図である。

【図15B】図15Aの時点からわずかに時間が経過した時点におけるトラクタと、LiDARセンサから放射されたレーザパルスの反射点の分布の例を模式的に示す図である。

【図16】複数のレイヤのレーザビームの1スキャンによって得られる幹部の点群の例を模式的に示す図である。

30

【図17A】レイヤ L_k のレーザビームのスキャンによって幹部の点群が得られる様子を模式的に示す図である。

【図17B】レイヤ L_{k+1} のレーザビームのスキャンによって幹部の点群が得られる様子を模式的に示す図である。

【図17C】レイヤ L_{k+2} のレーザビームのスキャンによって幹部の点群が得られる様子を模式的に示す図である。

【図18】複数のレイヤのレーザビームによって1スキャンで計測される反射点までの距離と反射点の方位角との関係の例を示すグラフである。

【図19】ある位置におけるトラクタで取得されたスキャンデータから、幹部の表面に位置する反射点を抽出して作成した局所地図の例を示す図である。

40

【図20A】局所地図を、構築済みの環境地図とマッチングさせることにより、移動体の位置を推定するプロセスを模式的に示す平面図である。

【図20B】局所地図を、構築済みの環境地図とマッチングさせることにより、移動体の位置を推定するプロセスを模式的に示す平面図である。

【図21A】トラクタの車両本体の前方下部にLiDARセンサが取り付けられた例を示す図である。

【図21B】トラクタのキャビンの前方上部にLiDARセンサが取り付けられた例を示す図である。

【図22】自己位置推定モジュールの機能構成の例を示す図である。

50

【図 2 3】環境地図データの形式の一例を模式的に示す図である。

【図 2 4】IMUデータとスキャンデータの時間的な関係の一例を示す図である。

【図 2 5】自己位置推定動作を示すフローチャートである。

【図 2 6】スキャンデータのフィルタリング処理を説明するための図である。

【図 2 7】トラクタのポーズが推定された後に実行される制御の例を示すフローチャートである。

【図 2 8 A】走行予定経路 P に沿って走行するトラクタの例を示す図である。

【図 2 8 B】走行予定経路 P から右にシフトした位置にあるトラクタの例を示す図である。

【図 2 8 C】走行予定経路 P から左にシフトした位置にあるトラクタの例を示す図である。

【図 2 8 D】走行予定経路 P に対して傾斜した方向を向いているトラクタの例を示す図である。

10

【図 2 9 A】環境地図に基づいて生成される、樹木列の幹分布を示す 2 次元データの例を示す図である。

【図 2 9 B】幹分布データに基づく走行予定経路の決定方法の一例を説明するための図である。

【図 3 0】経路設定用の幹分布データの他の例を示す図である。

【図 3 1 A】樹木列が曲線的に配置されている環境の一例を模式的に示す図である。

【図 3 1 B】図 3 1 A に示す環境において 1 回のスキャンで観測され得る点群を模式的に示す図である。

【図 3 1 C】隠れた幹部の位置を推定することによって走行経路を決定する動作を説明するための図である。

20

【図 3 1 D】樹木列が曲線的に配置されている場合における幹部の 2 次元分布を示す格子状データの一例を示す図である。

【図 3 2】トラクタの走行環境に障害物および人が存在する状況の例を模式的に示す図である。

【図 3 3 A】トラクタによって検出される樹木列の幹部の配置の例を示す図である。

【図 3 3 B】環境地図データが示す幹分布の例を示す図である。

【図 3 4】実施形態 2 におけるトラクタを側面方向から見た模式図である。

【図 3 5】実施形態 2 におけるトラクタの概略的な構成の例を示すブロック図である。

【図 3 6 A】トラクタが樹木の近くを走行する様子を模式的に示す図である。

30

【図 3 6 B】トラクタが樹木の近くを走行する様子を模式的に示す他の図である。

【図 3 6 C】トラクタが樹木の近くを走行する様子を模式的に示すさらに他の図である。

【図 3 7】実施形態 3 のシステムの構成例を模式的に示す図である。

【図 3 8】実施形態 3 のシステムの構成例を示すブロック図である。

【図 3 9】ドローンの外観の例を示す斜視図である。

【図 4 0】複数のドローンによるデータ収集作業の様子の例を模式的に示す斜視図である。

【図 4 1】ドローンに搭載された L i D A R センサから出射されたレーザビームによって樹木が照射されている様子を模式的に示す図である。

【図 4 2】ドローンから出力される局所地図データの形式の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0 0 1 1】

〔1. 用語の定義〕

本明細書において用いられる主な用語の定義を以下に記載する。

【0 0 1 2】

「移動体」は、移動のための駆動力 (traction) を発生させる車輪、クローラ、二足または多足歩行装置、またはプロペラなどの駆動装置を備える装置である。本開示における「移動体」は、トラクタなどの作業車両、搬送車、モバイルロボット、およびマルチコプタなどの無人航空機 (Unmanned aerial vehicle : UAV、いわゆるドローン) を含む。移動体は、無人・有人の別を問わない。

【0 0 1 3】

50

「作業車両」は、圃場（例えば、果樹園、畑、水田、または牧草地など）、山林、または建設現場などの作業地において特定の作業を行いながら走行することが可能な車両を意味する。作業車両の例は、トラクタ、田植機、コンバイン、乗用管理機、および乗用草刈機などの農業機械に加えて、建設作業車および除雪車などの、農業以外の用途で 사용되는車両も含む。

【0014】

「SLAM」は、移動体の自己位置推定と地図作成とを同時に行う技術の総称である。

【0015】

「自己位置推定」は、地図上における移動体の位置（例えば移動体の重心位置）を推定することである。SLAMによる自己位置推定では、通常、移動体のポーズ（pose）が求められる。

【0016】

「ポーズ」は、物（オブジェクト）の「位置および向き」である。2次元空間におけるポーズは、例えば (x, y, θ) の3個の座標値によって規定される。ここで、 (x, y) は、地球に固定されたワールド座標系であるXY座標系における座標値であり、 θ は基準方向に対する角度である。3次元空間におけるポーズは、例えば $(x, y, z, \theta_R, \theta_P, \theta_Y)$ の6個の座標値によって規定される。ここで (x, y, z) は、ワールド座標系であるXYZ座標系における座標値であり、 $(\theta_R, \theta_P, \theta_Y)$ は、それぞれの基準方向に対するロール、ピッチ、およびヨーの角度である。移動体の姿勢は、 $(\theta_R, \theta_P, \theta_Y)$ によって表される。ロール角 θ_R は、移動体の前後方向の軸の周りの回転量を表す。ピッチ角 θ_P は、移動体の左右方向の軸の周りの回転量を表す。ヨー角 θ_Y は、移動体の上下方向の軸の周りの回転量を表す。姿勢は、オイラー角などの他の角度、またはクォータニオン（四元数）によっても規定され得る。

【0017】

「環境地図データ」は、移動体が移動する環境に存在する物の位置または領域を所定の座標系によって表現したデータである。環境地図データを単に「環境地図」と称することがある。環境地図を規定する座標系の例は、地球に対して固定された地理座標系などのワールド座標系だけでなく、オドメトリ情報に基づくポーズを表示するオドメトリ座標系などを含む。環境地図データは、環境に存在する物について、位置以外の情報（例えば、属性情報その他の情報）を含んでいてもよい。環境地図は、点群地図または格子地図など、さまざまな形式の地図を含む。以下、環境地図を「地図データ」と呼んだり、単に「地図」と呼んだりすることがある。また、環境地図を構築する過程で生成または処理される局所地図または部分地図のデータについても、「地図データ」または単に「地図」と呼ぶことがある。

【0018】

「自動操舵」は、手動によらず、制御装置の働きによって移動体の操舵を行うことである。制御装置の一部または全部が移動体の外部にあってもよい。移動体の外部にある制御装置と移動体との間では、制御信号、コマンド、またはデータなどの通信が行われ得る。自動操舵中において、速度制御など、その他の動作は手動で行われてもよい。

【0019】

「自律移動」は、人が移動の制御に関与することなく、周囲の環境をセンシングしながら、制御装置の働きによって移動体の移動を行うことを意味する。自律移動は、自律走行および自律飛行を含む。制御装置は、移動体の移動に必要な操舵、速度制御、走行の開始および停止、飛行中の上昇・降下・ホバリングなどの動作を制御し得る。自律移動は、障害物の検知および障害物の回避動作を含み得る。

【0020】

「自動走行」は、移動体が備える制御装置による自律走行、および、運行管理システムにおけるコンピュータからの指令に基づく走行を含む。自律走行には、移動体が所定の経路に沿って目的地に向かう移動のみならず、追尾目標に追従する移動も含まれる。また、一時的に作業者の指示に基づいて移動してもよい。

【0021】

「自己位置推定装置」は、LiDAR (Light Detection and Ranging) センサなどの外界センサによって取得されたセンサデータに基づいて環境地図上における自己位置を推定する装置である。

【0022】

「外界センサ」は、移動体の外部の状態をセンシングするセンサである。外界センサの例は、例えば、レーザレンジファインダ（「測域センサ」ともいう）、カメラ（またはイメージセンサ）、LiDARセンサ、ミリ波レーダ、および磁気センサを含む。

【0023】

「内界センサ」は、移動体の状態をセンシングするセンサである。内界センサは、車輪の回転速度を計測するホイールエンコーダ、加速度センサ、および角加速度センサ（例えばジャイロスコープ）を含む。慣性計測装置（IMU）は、加速度センサおよび角加速度センサを備え、移動体の移動量および姿勢を示す信号を出力することができる。内界センサによって取得される移動体のポーズ変化量を示す情報を「オドメトリ情報」と称する。

【0024】

「樹木の幹部」は、木本植物の木質化した茎であり、地上に直立して枝を生ずる主軸部分である。樹木の枝、葉および根は含まない。

【0025】

〔2. SLAMの基本原理〕

次に、本開示の実施形態において用いられるSLAM技術を利用した自己位置推定の基本原理を説明する。ここでは、簡単のため、移動体が2次元空間（すなわち平面）内を移動するものとする。

【0026】

まず、図1を参照する。図1は、時刻 t_1 から時刻 t_2 までの間に平面上を移動する移動体100の例を模式的に示す図である。この例における移動体100は、車輪によって走行する作業車両（例えばトラクタ）である。移動体100は、トラクタ以外の車両、または歩行ロボットもしくはドローンなどの他の種類の移動体であってもよい。図1には、平面上を移動する移動体100の位置および向きが模式的に示されている。移動体100の位置座標は、XY座標系によって示される。XY座標系は、地球に固定されたワールド座標系 Σ_w である。図1には、移動体100に固定された移動体座標系 Σ_v も示されている。この例における移動体座標系 Σ_v は、移動体100の正面が向く方向を u 軸方向、 u 軸を反時計回りに90度回転させた方向を v 軸方向とする uv 座標系である。移動体座標系 Σ_v の原点の位置は、移動体100の移動に伴って変化する。移動体座標系 Σ_v の向きは、移動体100の向きの変化、すなわち回転に伴って変化する。

【0027】

時刻 t_1 における移動体100のポーズ（すなわち位置および向き）を r_1 、時刻 t_2 における移動体100のポーズを r_2 とする。ポーズ r_1 は、例えば、座標 (x_1, y_1) で示される位置と、角度 θ_1 で示される向きとによって規定される。ここでは、移動体100の向きは移動体100の正面が向く方向であると定義する。また、X軸正方向を角度の基準方向とし、反時計回りを角度の正方向とする。ポーズ r_2 は、座標 (x_2, y_2) で示される位置と、角度 θ_2 で示される向きとによって規定される。

【0028】

図1の例において、時刻 t_1 から時刻 t_2 までの間に、移動体100の位置は、角度 θ_1 の方位に Δd_1 だけ移動（並進）し、移動体100の向きは、 $\Delta \phi_1 (= \theta_2 - \theta_1)$ だけ反時計回りに回転している。このように、移動体100の運動は、「並進」と「回転」の合成である。

【0029】

この例において、距離 Δd_1 が十分に短いとき、移動体100の進行方向は移動体座標系 Σ_v の u 軸に平行であると近似できる。このため、以下の式1が成立する。

【数1】

$$\begin{pmatrix} x2 \\ y2 \\ \theta2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta1 & -\sin \theta1 & 0 \\ \sin \theta1 & \cos \theta1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta d1 \\ 0 \\ \Delta \phi1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ \theta1 \end{pmatrix} \quad \cdots (式1)$$

【0030】

移動体100が車輪の回転数センサおよび／または慣性計測装置（IMU）などの内界センサを備えている場合、その内界センサから、 $\Delta d1$ および $\Delta \phi1$ の推定値、すなわちオドメトリ情報を取得することができる。時刻 $t1$ から時刻 $t2$ までの時間差が例えば10ミリ秒のように短い場合、距離 $\Delta d1$ は十分に短く、式1が成立する。時刻が $t1$ 、 $t2$ 、 $t3$ 、 $\cdots$ と進む過程で、 $\Delta d1$ および $\Delta \phi1$ の推定値を周期的に更新していくことにより、移動体100の位置および向き（すなわちポーズ）の変化を推定することが可能である。言い換えると、初期のポーズ、例えば $(x1, y1, \theta1)$ が既知である場合、その後の移動体100のポーズの推定値をオドメトリ情報に基づいて周期的に更新することができる。しかし、オドメトリ情報に基づくポーズの推定には、誤差が累積するという問題がある。このため、多くの場合、衛星測位システムまたはSLAM技術を利用して、移動体100の位置の正確度の高い推定値を取得することが必要である。

【0031】

次に図2Aから図5を参照して、LiDARなどの外界センサを用いて行われる自己位置推定を説明する。以下、環境地図データが存在する場合と存在しない場合のそれぞれについて、自己位置推定動作の例を説明する。

【0032】

＜環境地図データが存在する場合＞

図2Aおよび図2Bに示される例において、時刻 $t1$ から時刻 $t2$ までの間に移動体100が移動する環境には、位置が固定されたランドマーク $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ が存在する。この例では、ランドマークの位置を示す環境地図データがすでに存在する。このような環境地図データは、例えば、個々のランドマークを特定する識別子（例えばランドマーク番号）と、各識別子に対応付けられたランドマークのワールド座標系 Σ_w における位置座標とを含む。ワールド座標系 Σ_w におけるランドマーク $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ の座標を、それぞれ、 (x_{m1}, y_{m1}) 、 (x_{m2}, y_{m2}) 、 (x_{m3}, y_{m3}) 、 (x_{m4}, y_{m4}) とする。LiDARによって取得される点群データにおける個々の点がランドマークとして機能してもよい。点群データによって構成される環境地図を、点群地図と称する。ランドマークの位置は格子地図上のセルによって表示されていてもよい。

【0033】

図2Aの例において、ポーズ $r1$ における移動体100が取得したランドマーク $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ 、 $m4$ の観測値（または計測値）を、それぞれ、 $z1$ 、 $z2$ 、 $z3$ 、 $z4$ とする。観測値は、例えば、外界センサによって計測される各ランドマークまでの距離および方向のそれぞれを示す値である。観測値は、外界センサによって取得されるデータであるため、本開示において「センサデータ」と称することがある。

【0034】

図2Bに示されるように、移動体100が移動し、ポーズ $r2$ における移動体100が取得したランドマーク $m1$ 、 $m2$ 、 $m3$ の観測値を、それぞれ、 $z5$ 、 $z6$ 、 $z7$ とする。

【0035】

これらの観測値に基づいて、移動体座標系 Σ_v 上のランドマークの位置座標を取得することができる。前述したように、移動体座標系 Σ_v は移動体100に固定された座標系であるため、同一のランドマーク（例えばランドマーク $m1$ ）の移動体座標系 Σ_v における位置座標は、移動体100のポーズの変化に応じて変化していく。

【0036】

観測値に基づいて取得されるランドマークの位置は、外界センサの位置および向きによって定まるセンサ座標系における座標を有する。厳密には、センサ座標系は移動体座標系

Σ_v とは異なり得るが、以下の説明では、センサ座標系と移動体座標系 Σ_v とは同一であるものとする。センサ座標系と移動体座標系 Σ_v との関係は既知であるため、一方の座標系を既知の角度だけ回転させ、かつ、既知の距離だけ並進させることにより、他方の座標系に一致させることができる。

【0037】

環境内を移動する移動体100は、複数のランドマークを観測することにより、移動体座標系 Σ_v における各ランドマークの位置座標を取得する。そして、ワールド座標系 Σ_w における各ランドマークの位置座標が環境地図データに含まれている場合、観測値 $z_1 \sim z_7$ などに基づいてポーズ r_1 、 r_2 を推定することができる。このような推定は、例えば、観測値から求められるランドマークの位置座標と、環境地図データに含まれるランドマークの位置座標とのマッチングを行うことにより可能になる。

【0038】

次に、図3を参照して、移動体座標系 Σ_v 上の座標 (u_1, v_1) をワールド座標系 Σ_w 上の座標 (u_1', v_1') に変換する方法を説明する。図3は、時刻 t_2 における移動体座標系 Σ_v とワールド座標系 Σ_w との配置関係を示している。図3の例では、簡単のため、移動体座標系 Σ_v の原点をセンサ座標系の原点（センサ中心）と一致させ、両座標系が同一であるものとする。移動体座標系 Σ_v 上の座標 (u_1, v_1) は、時刻 t_2 のポーズ r_2 における移動体100からのランドマーク m_1 に対する観測値 z_5 に基づいて算出される。観測値 z_5 が、距離 r_{m1} と u 軸に対する角度 ϕ_{m1} とによって規定されたとすると、 u_1 および v_1 は、 $u_1 = r_{m1} \cos \phi_{m1}$ 、 $v_1 = r_{m1} \sin \phi_{m1}$ によって計算される。移動体座標系 Σ_v 上の座標からワールド座標系 Σ_w 上の座標への変換（座標変換）は、移動体座標系 Σ_v を時計回りに角度 θ_2 だけ回転させること、および、移動体座標系 Σ_v の原点をワールド座標系 Σ_w の原点まで並進させることによって行われる。このとき、以下の式2および式3が成立する。

【数2】

$$\begin{pmatrix} u_1' \\ v_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad \cdots (式2)$$

【数3】

$$\begin{pmatrix} u_1' \\ v_1' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} + T \quad \cdots (式3)$$

【0039】

ここで、 R は、移動体100の向きによって決まる回転行列であり、 T はワールド座標系 Σ_w における移動体100の位置ベクトルである。回転行列 R および位置ベクトル T の中身は、移動体100のポーズから求められる。

【0040】

座標変換によって得られる (u_1', v_1') は、ワールド座標系 Σ_w におけるランドマーク m_1 の座標である (x_{m1}, y_{m1}) に一致すべきである。しかし、移動体100のポーズの推定値が真値からずれていると、 (u_1', v_1') と (x_{m1}, y_{m1}) との間に誤差（距離）が生じる。自己位置推定を行うことは、 (u_1', v_1') と (x_{m1}, y_{m1}) との間の誤差が小さくなるように回転行列 R および位置ベクトル T の中身を決めることである。

【0041】

次に、図4および図5を参照してマッチングの一例をより詳細に説明する。図4は、時刻 t_2 における移動体座標系 Σ_v である uv 座標系上のランドマーク m_1 、 m_2 、 m_3 の座標を模式的に示している。これらの座標は、観測値 z_5 、 z_6 、 z_7 から算出され得る。この例において、観測値 z_5 、 z_6 、 z_7 から算出される座標を、それぞれ、 $(u_5$,

v_5)、 (u_6, v_6) 、 (u_7, v_7) とする。移動体座標系 Σ_V からワールド座標系 Σ_W への座標変換を行うことにより、移動体座標系 Σ_V 上の (u_5, v_5) 、 (u_6, v_6) 、 (u_7, v_7) は、それぞれ、図5に示されるように、ワールド座標系 Σ_W 上の (u'_5, v'_5) 、 (u'_6, v'_6) 、 (u'_7, v'_7) に変換される。図5は、変換された座標 (u'_5, v'_5) 、 (u'_6, v'_6) 、 (u'_7, v'_7) と、対応するランドマークの座標 (x_{m2}, y_{m2}) 、 (x_{m3}, y_{m3}) 、 (x_{m4}, y_{m4}) との間に差異が生じている状態の例を示している。座標変換は、回転行列 R による回転、および位置ベクトル T による並進によって規定される。ワールド座標系 Σ_W 上において、 (u'_5, v'_5) 、 (u'_6, v'_6) 、 (u'_7, v'_7) が、それぞれ、対応するランドマークの座標である (x_{m1}, y_{m1}) 、 (x_{m2}, y_{m2}) 、 (x_{m3}, y_{m3}) 、 (x_{m4}, y_{m4}) に近づくように(すなわちマッチするように)座標変換(R, T)の中身が決定される。

10

【0042】

前述した式2の等式において、未知数は x_2 、 y_2 、 θ_2 である。未知数の個数は3であるため、式2に相当する等式が3個以上あれば、計算によって、 x_2 、 y_2 、 θ_2 を求めることができる。図5に示されるように同一のポーズ r_2 における移動体100から3個以上のランドマークが観測される場合、式2に相当する等式が3個得られるため、連立方程式を解くことにより、ポーズ r_2 (x_2 、 y_2 、 θ_2)の計算値を取得できる。現実の観測には誤差が加わるため、3個を超える多数の式からなる連立方程式を用い、最小二乗法などによる最適化が行われる。

【0043】

このようなマッチングによる最適化を行って自己位置を推定するアルゴリズムの例は、ICPマッチング法およびNDTマッチング法を含む。これらのいずれのマッチング法、または他の方法を用いてもよい。

20

【0044】

なお、観測値と環境地図データから移動体100の位置を推定するとき、必ずしも移動体100の向きを推定する必要はない。例えば図2Aおよび図2Bに示されるように、位置が既知であるランドマークまでの距離が観測値から取得できる場合、三角測量の原理に基づいて、移動体100の位置(正確には測距センサの位置)を算出することが可能である。このような原理に基づいて位置を推定することも、「自己位置推定」に含まれる。

【0045】

<環境地図データが存在しない場合>

環境地図データが存在しない場合、図2Aおよび図2Bに示されるように移動体100が移動中に取得した観測値に基づいて、ランドマーク m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、・・・の座標を決定(すなわち推定)しながら、移動体100のポーズを推定する処理が必要になる。ランドマーク m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、・・・のワールド座標系 Σ_W 上における座標は、環境地図データを構成する。したがって、地図を構築するには、ランドマークとして機能する物体のワールド座標系 Σ_W 上における位置座標を決定する必要がある。

30

【0046】

図2Aおよび図2Bの例では、移動しつつある移動体100がランドマーク m_2 、 m_3 、 m_4 のそれぞれから複数の観測値を取得している。より多くの観測を行うことにより、移動体100のポーズおよびランドマークの座標に含まれる未知数の総数よりも多くの連立方程式を得ることができる。それにより、移動体100のポーズおよびランドマークの座標の推定値を算出することが可能である。

40

【0047】

SLAMによって自己位置推定と環境地図の作成を行うためのアルゴリズムには、多数の種類が存在する。SLAMアルゴリズムの例は、LiDARセンサを利用するアルゴリズムだけではなく、カメラなどの他の外界センサを利用するアルゴリズムも含む。また、自己位置推定にパーティクルフィルタなどのベイズフィルタを利用したり、グラフベース手法によってポーズ推定の精度を高めたりしてもよい。本開示の実施形態では、SLAMアルゴリズムの種類は特に限定されない。

50

【0048】

なお、LiDARセンサには、レーザビームのスキャンによって空間中の物体の距離分布の情報を取得するスキャン型のセンサと、広範囲に拡散する光を利用して空間中の物体の距離分布の情報を取得するフラッシュ型のセンサとがある。スキャン型のLiDARセンサは、フラッシュ型のLiDARセンサよりも高い強度の光を使用するため、より遠方の距離情報を取得することができる。一方、フラッシュ型のLiDARセンサは、構造が簡単であり、低いコストで製造できるため、強い光を必要としない用途に適している。本開示では、主にスキャン型のLiDARセンサが用いられる例を説明するが、用途によってはフラッシュ型のLiDARセンサも使用され得る。

【0049】

スキャン型の典型的なLiDARセンサによって環境内の物体を観測する場合、パルス状のレーザビーム（すなわちレーザパルス）を出射し、周囲の環境に存在する物体によって反射されたレーザパルスがLiDARセンサに帰還するまでの時間を計測することにより、物体の表面に位置する反射点までの距離と方向を知ることができる。反射点までの距離および方向がわかれば、移動体座標系 Σ_V における「反射点」の座標を取得することができる。スキャン型のLiDARセンサは、2次元LiDARセンサと、3次元LiDARセンサとに分類することができる。2次元LiDARセンサによれば、レーザビームが1つの平面内を回転するように環境のスキャンが行われ得る。これに対して、3次元LiDARセンサでは、複数のレーザビームがそれぞれ異なる円錐面に沿って回転するように環境のスキャンが行われ得る。これらのLiDARセンサによって取得される個々の反射点の座標（2次元または3次元の座標値）は、移動体座標系 Σ_V で表される。個々の反射点の座標を移動体座標系 Σ_V からワールド座標系 Σ_W に変換することにより、個々の反射点のワールド座標系 Σ_W 上における座標を得ることができ、その結果、点群地図を構築することができる。移動体座標系 Σ_V からワールド座標系 Σ_W に変換するためには、上記のように、移動体100のポーズの情報が必要である。

【0050】

SLAM技術では、移動体100のポーズの推定と、環境地図の構築とを同時に実行することができる。しかしながら、環境地図を構築するときにSLAM技術以外の技術を利用して移動体100のポーズを推定または測定してもよい。移動体100のポーズは、移動体100の位置を測定する衛星測位システムおよび慣性誘導装置を利用して決定することができるからである。しかしながら、衛星測位システムのような測位システムを利用できない状況では、環境地図を構築するためにSLAM技術を利用して移動体100のポーズを推定することが必要になる。なお、移動体100の位置についてはSLAM技術を利用して推定し、移動体100の向きまたは姿勢については、慣性計測装置などの他のセンサによって推定してもよい。

【0051】

〔3．実施形態〕

以下、本開示の実施形態を説明する。ただし、必要以上に詳細な説明は省略する場合がある。例えば、既によく知られた事項の詳細説明および実質的に同一の構成に対する重複説明を省略する場合がある。これは、以下の説明が不必要に冗長になることを避け、当業者の理解を容易にするためである。なお、発明者は、当業者が本開示を十分に理解するために添付図面および以下の説明を提供するのであって、これらによって特許請求の範囲に記載の主題を限定することを意図するものではない。以下の説明において、同一または類似の機能を有する構成要素については、同じ参照符号を付している。

【0052】

〔3－1．実施形態1〕

本開示の第1の実施形態による移動体を説明する。

【0053】

本実施形態における移動体は、複数の樹木が生い茂り、複数の樹木列が形成されている環境で使用される。移動体は、周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを出力

10

20

30

40

50

する1つ以上のセンサと、記憶装置と、自己位置推定装置と、移動体の移動を制御する制御装置とを備える。記憶装置は、複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する。自己位置推定装置は、移動体が移動している間に1つ以上のセンサから繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部と環境地図データとのマッチングを行うことにより、移動体の位置を推定する。制御装置は、推定された移動体の位置に応じて移動体の移動を制御する。本実施形態における移動体は、環境地図データ、または環境地図データを生成するための局所地図データを生成するデータ生成装置をさらに備えている。データ生成装置は、移動体が移動している間に1つ以上のセンサから繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、自己位置推定を行いながら、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録する。データ生成装置は、繰り返し生成した局所地図データを繋ぎ合わせることで、環境地図データを生成し、記憶装置に記録することもできる。このように、本実施形態における移動体は、複数の樹木列の間を移動しながら環境地図を作成する機能と、作成した環境地図を利用して移動体の位置を推定しながら樹木列間を自律的に移動する機能とを備える。

【0054】

1つ以上のセンサは、例えば2次元または3次元の点群データをセンサデータとして出力する少なくとも1つのLiDARセンサを含み得る。本明細書において「点群データ」は、LiDARセンサによって観測される複数の反射点の分布を示すデータを広く意味する。点群データは、例えば、2次元空間または3次元空間における各反射点の座標値、および／または各反射点の距離および方向を示す情報を含み得る。

【0055】

LiDARセンサは、例えば予め設定された周期で点群データを繰り返し出力する。データ生成装置は、1周期以上の期間中に出力された点群データにおける各点の位置、または各点の移動体からの距離もしくは角度に基づいて、幹部を検出することができる。

【0056】

以下、移動体が、主にぶどう園などの果樹園における作業に用いられるトラクタなどの作業車両であり、センサがスキャン型のLiDARセンサである場合を例に、本実施形態の構成および動作を説明する。

【0057】

<構成>

図6は、本実施形態におけるトラクタ100Aの外観を示す斜視図である。図7は、トラクタ100Aを側面方向から見た模式図である。図7には、トラクタ100Aに連結されて使用される作業機(implement)300も示されている。

【0058】

図6に示すように、本実施形態におけるトラクタ100Aは、LiDARセンサ110と、GNSSユニット120と、1つ以上の障害物センサ130とを備える。図6の例では1つの障害物センサ130が示されているが、障害物センサ130は、トラクタ100Aの複数の箇所に設けられ得る。

【0059】

図7に示すように、トラクタ100Aは、車両本体101と、原動機(エンジン)102と、変速装置(トランスミッション)103とを備える。車両本体101には、車輪(タイヤ)104と、キャビン105とが設けられている。車輪104は、前輪104Fと後輪104Rとを含む。キャビン105の内部に運転席107、操舵装置106、および操作端末200が設けられている。前輪104Fおよび後輪104Rの一方または両方は、タイヤではなくクローラであってもよい。

【0060】

本実施形態におけるLiDARセンサ110は、車両本体101の前面下部に配置されている。LiDARセンサ110は、トラクタ100Aが走行する環境に存在する樹木列

の幹部の平均高さよりも低い位置、例えば、地上から15 cm以上100 cm以下の高さに配置され得る。LiDARセンサ110は、例えば、トラクタ100Aの高さの半分よりも低い位置に配置され得る。トラクタ100Aの高さは、地面からキャビン105の最上部までの高さであり、例えば2メートル以上であり得る。LiDARセンサ110は、トラクタ100Aの高さの1/3よりも低い位置に配置されていてもよい。図7の例では、LiDARセンサ110は、車輪104の上部および前照灯109よりも低い位置に配置されている。LiDARセンサ110をこのような低い位置に配置することによって得られる効果については後述する。

【0061】

LiDARセンサ110は、トラクタ100Aが移動している間、周囲の環境に存在する物体の距離および方向、または2次元もしくは3次元の座標値を示すセンサデータを繰り返し出力する。LiDARセンサ110から出力されたセンサデータは、トラクタ100Aが備えるECU (Electronic Control Unit) などの制御装置によって処理される。制御装置は、前述のSLAMアルゴリズムを利用して、センサデータに基づく環境地図データの生成、および環境地図を用いた自己位置推定などの処理を実行することができる。なお、制御装置は、環境地図データを完成する代わりに、環境地図データを生成するための局所地図データを作成してもよい。その場合、局所地図データを統合して環境地図データを構築する処理は、トラクタ100Aの外部にあるコンピュータ、例えばクラウドサーバで実行されてもよい。

【0062】

図7の例では、車両本体101の後部に障害物センサ130が設けられている。障害物センサ130は、車両本体101の後部以外の部位にも配置され得る。例えば、車両本体101の側部、前部、およびキャビン105のいずれかの箇所に、1つまたは複数の障害物センサ130が設けられ得る。障害物センサ130は、トラクタ100Aの比較的近くに存在する物体を検出する。障害物センサ130は、例えばレーザスキャナまたは超音波ソナーを備え得る。障害物センサ130は、障害物センサ130から所定の距離よりも近くに物体が存在する場合に、障害物が存在することを示す信号を出力する。複数の障害物センサ130がトラクタ100Aの車体の異なる位置に設けられていてもよい。例えば、複数のレーザスキャナと、複数の超音波ソナーとが、車体の異なる位置に配置されていてもよい。そのような多くの障害物センサ130を備えることにより、トラクタ100Aの周囲の障害物の監視における死角を減らすことができる。LiDARセンサ110が障害物センサとして機能してもよい。

【0063】

GNSSユニット120は、キャビン105の上部に設けられている。GNSSユニット120は、GNSS衛星からの信号を受信するアンテナと、処理回路とを備えるGNSS受信機である。GNSSユニット120は、例えばGPS (Global Positioning System)、GLONASS、Galileo、Beidou、または準天頂衛星 (Quasi-Zenith Satellite System: QZSS、例えばみちびき) などのGNSS衛星から送信されるGNSS信号を受信し、当該信号に基づいて測位を行う。本実施形態におけるトラクタ100Aは、主にぶどう園のように、複数の樹木が生い茂り、GNSSを利用しにくい環境で使用されるため、LiDARセンサ110を利用して測位が行われる。しかし、GNSS信号を受信可能な環境ではGNSSユニット120を利用して測位を行ってもよい。LiDARセンサ110による測位とGNSSユニット120による測位とを組み合わせることにより、測位の安定性または精度を向上させることができる。

【0064】

原動機102は、例えばディーゼルエンジンである。ディーゼルエンジンに代えて電動モータが使用されてもよい。変速装置103は、変速によってトラクタ100Aの推進力を切り換えることができる。変速装置103は、トラクタ100Aの前進と後進とを切り換えることもできる。

【0065】

操舵装置１０６は、ステアリングホイールと、ステアリングホイールに接続された操舵軸と、ステアリングホイールによる操舵を補助するパワーステアリング装置とを含む。パワーステアリング装置は、操舵軸を回転させるための補助力を供給する油圧装置または電動モータを含む。前輪１０４Ｆは操舵輪であり、その操舵角を変化させることにより、トラクタ１００Ａの走行方向を変化させることができる。前輪１０４Ｆの操舵角は、ステアリングホイールを操作することによって変化させることができる。自動操舵が行われるときには、トラクタ１００Ａ内に配置された電子制御ユニット（ＥＣＵ）からの制御により、油圧装置または電動モータの力によって操舵角が自動で調整される。

【００６６】

車両本体１０１の後部には、連結装置１０８が設けられている。連結装置１０８は、例えば３点リンク（ヒッチ）装置、ＰＴＯ（Power Take Off）軸、およびユニバーサルジョイントを含む。連結装置１０８によって作業機３００をトラクタ１００Ａに着脱することができる。連結装置１０８は、例えば油圧装置によって３点リンク装置を昇降させ、作業機３００の位置または姿勢を制御することができる。また、ユニバーサルジョイントを介してトラクタ１００Ａから作業機３００に動力を送ることができる。トラクタ１００Ａは、作業機３００を引きながら、作業機３００に所定の作業を実行させることができる。連結装置は、車両本体１０１の前方に設けられていてもよい。その場合、トラクタ１００Ａの前方に作業機を接続することができる。なお、作業機がトラクタ１００Ａの前方に接続された状態でＬｉＤＡＲセンサ１１０が使用される場合、ＬｉＤＡＲセンサ１１０は、レーザビームが作業機によって遮られない位置に配置される。

【００６７】

図７に示す作業機３００は、作物に薬剤を噴霧するスプレイヤであるが、作業機３００はスプレイヤに限定されない。例えば、モア（草刈機）、シーダ（播種機）、スプレッダ（施肥機）、レーキ、ペーラ（集草機）、ハーベスタ（収穫機）、プラウ、ハロー、またはロータリなどの、任意の作業機をトラクタ１００Ａに接続して使用することができる。

【００６８】

以下の説明において、図７に示すｕｖｗ座標系を用いる。ｕｖｗ座標系は、トラクタ１００ＡおよびＬｉＤＡＲセンサ１１０に固定された座標系である。トラクタ１００Ａの進行方向をｕ軸方向、左方向をｖ軸方向、上方向をｗ軸方向とする。図面では、わかりやすさのため、ｕｖｗ座標系の原点がトラクタ１００Ａから離れた位置に存在するように記載されているが、現実には、トラクタ１００Ａに設けられるＬｉＤＡＲセンサ１１０の中心にｕｖｗ座標系の原点が一致している。

【００６９】

図８は、トラクタ１００Ａおよび作業機３００の概略的な構成の例を示すブロック図である。この例におけるトラクタ１００Ａは、ＬｉＤＡＲセンサ１１０、ＧＮＳＳユニット１２０、障害物センサ１３０、操作端末２００に加え、慣性計測装置（ＩＭＵ）１２５、駆動装置１４０、記憶装置１５０、複数の電子制御ユニット（ＥＣＵ）１６０、１７０、１８０、および通信インタフェース（ＩＦ）１９０を備える。作業機３００は、駆動装置３４０と、制御装置３８０と、通信インタフェース３９０とを備える。なお、図８には、本実施形態における自己位置推定動作、自動走行動作、および地図生成動作との関連性が相対的に高い構成要素が示されており、それ以外の構成要素の図示は省略されている。

【００７０】

本実施形態におけるＩＭＵ１２５は、３軸加速度センサおよび３軸ジャイロスコープを備える。ＩＭＵ１２５は、モーションセンサとして機能し、トラクタ１００Ａの加速度、速度、変位、および姿勢などの諸量を示す信号を出力することができる。ＩＭＵ１２５は、例えば１秒間に数十回から数千回程度の頻度で、当該信号を出力する。ＩＭＵ１２５に代えて、３軸加速度センサおよび３軸ジャイロスコープを別々に設けてもよい。

【００７１】

駆動装置１４０は、例えば前述の原動機１０２、変速装置１０３、車輪１０４、操舵装置１０６、および連結装置１０８などの、トラクタ１００Ａの走行および作業機３００の

駆動に必要な各種の装置を含む。原動機 102 は、例えばディーゼル機関などの内燃機関を備える。駆動装置 140 は、内燃機関に代えて、あるいは内燃機関とともに、トラクション用の電動モータを備えていてもよい。

【0072】

記憶装置 150 は、フラッシュメモリまたは磁気ディスクなどの記憶媒体を含み、環境地図データを初めとする ECU 160、170、180 が生成する各種のデータを記憶する。記憶装置 150 は、ECU 160、170、180 に、後述する各種の動作を実行させるコンピュータプログラムも記憶する。そのようなコンピュータプログラムは、記憶媒体（例えば半導体メモリまたは光ディスク等）または電気通信回線（例えばインターネット）を介してトラクタ 100A に提供され得る。そのようなコンピュータプログラムが、商用ソフトウェアとして販売されてもよい。

10

【0073】

ECU 160 は、前述の SLAM 技術に基づく処理を実行する電子回路である。ECU 160 は、自己位置推定モジュール 162 および地図データ生成モジュール 164 を含む。ECU 160 は、前述の自己位置推定装置およびデータ生成装置の一例である。ECU 160 は、トラクタ 100A が走行している間に LiDAR センサ 110 および IMU 125 から繰り返し出力されたデータまたは信号に基づき、トラクタ 100A の位置および向き（すなわちポーズ）の推定を行いながら地図データを生成することができる。ECU 160 はまた、環境地図データが生成された後の自動走行時において、LiDAR センサ 110 から出力されたセンサデータと環境地図データとのマッチングを行うことにより、トラクタ 100A の位置および向きを推定することができる。

20

【0074】

自己位置推定モジュール 162 は、トラクタ 100A の位置および向きの推定、すなわち自己位置推定を行うための演算を実行する。地図データ生成モジュール 164 は、地図データを生成する処理を実行する。地図データ生成モジュール 164 が生成する「地図データ」には、自動走行時のマッチングに使用される環境地図データと、環境地図データを構築するために生成される部分的なデータである局所地図データとが含まれる。地図データ生成モジュール 164 は、繰り返し生成した局所地図データを繋ぎ合わせることで、環境地図データを生成し、記憶装置 150 に記録することができる。自己位置推定モジュール 162 および地図データ生成モジュール 164 は、1つの回路で実現されていてもよいし、複数の回路に分かれていてもよい。

30

【0075】

環境地図データがまだ生成されていない段階において、ECU 160 は、自己位置推定を行いながら、トラクタ 100A の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す局所地図データを繰り返し生成して記憶装置 150 に記録することができる。ECU 160 は、さらに、局所地図データを繋ぎ合わせることで、圃場（例えばぶどう園）の全体、または圃場の一区画についての環境地図データを生成することができる。圃場の区画ごとに環境地図データが生成されてもよい。ECU 160 は、局所地図データを生成する段階では樹木列の幹部を検出せず、最終的な環境地図データを生成する段階で幹部を検出し、幹部を他の物体と区別できる形式で記録してもよい。環境地図データが生成された後の自動走行時において、ECU 160 は、LiDAR センサ 110 から出力されるセンサデータと環境地図データとのマッチングを行うことにより、トラクタ 100A の位置および向きを推定する。なお、ECU 160 は、トラクタ 100A の位置のみをマッチングで決定し、トラクタ 100A の向きは IMU 125 からの信号を利用して決定してもよい。

40

【0076】

ECU 170 は、トラクタ 100A の経路を決定する処理を行う回路である。環境地図データがまだ生成されていない段階において、ECU 170 は、LiDAR センサ 110 および障害物センサ 130 から出力されたデータまたは信号に基づいて、トラクタ 100A が走行すべき経路を決定する。例えば、LiDAR センサ 110 から出力されるセンサ

50

データに基づいて検出される複数の樹木列の間を通り、かつ障害物を避ける経路が目標経路として決定される。環境地図データが生成された後の自動走行時において、ECU170は、環境地図データに基づいて、またはユーザからの指示に基づいて、目標経路（以下、「走行予定経路」とも称する。）を決定する。

【0077】

ECU180は、駆動装置140を制御する回路である。ECU180は、ECU160によって推定されたトラクタ100Aの位置および向きと、ECU170によって決定された走行予定経路とに基づいて、駆動装置140を制御する。ECU180はまた、作業機300の動作を制御する信号を生成し、その信号を通信IF190から作業機300に送信する動作も実行する。

【0078】

ECU160、170、180は、例えばCAN（Controller Area Network）などのピークルバス規格に従って、相互に通信することができる。図8において、ECU160、170、180のそれぞれは、個別のブロックとして示されているが、これらのそれぞれの機能が、複数のECUによって実現されていてもよい。あるいは、ECU160、170、180の機能を統合した1つの車載コンピュータが設けられていてもよい。トラクタ100Aは、ECU160、170、180以外のECUを備えていてもよく、機能に応じて任意の個数のECUが設けられ得る。

【0079】

通信IF190は、作業機300の通信IF390との間で通信を行う回路である。通信IF190は、例えばISO 11783に基づくISOBUSなどの通信制御規格に準拠した信号の送受信を、作業機300の通信IF390との間で実行する。これにより、作業機300に所望の動作を実行させたり、作業機300から情報を取得したりすることができる。通信IF190はまた、有線または無線のネットワークを介して外部のコンピュータと通信することもできる。例えば、作物の生育状況、トラクタ100Aの稼働状況、および作業記録等を管理する営農管理システムにおけるサーバなどのコンピュータと通信することができる。

【0080】

操作端末200は、トラクタ100Aの自動走行または自動操舵に関する操作をユーザが実行するための端末であり、バーチャルターミナル（VT）と称することもある。操作端末200は、タッチスクリーンなどの表示装置、および／または1つ以上のボタンを備え得る。ユーザは、操作端末200を操作することにより、例えば自動走行モードまたは自動操舵モードのオン／オフの切り替え、トラクタ100Aの初期位置の設定、経路の設定、環境地図の記録または編集などの種々の操作を実行することができる。

【0081】

作業機300における駆動装置340は、作業機300が所定の作業を実行するために必要な動作を行う。駆動装置340は、例えばポンプ、油圧装置、または電気モータなどの、作業機300の用途に応じた装置を含む。

【0082】

制御装置380は、駆動装置340の動作を制御する。制御装置380は、通信IF390を介してトラクタ100Aから送信された信号に応答して、駆動装置340に各種の動作を実行させる。

【0083】

次に、図9Aおよび図9Bを参照して、LiDARセンサ110の構成例を説明する。本実施形態におけるLiDARセンサ110は、レーザビームのスキャンによって空間中の物体の距離分布の情報を取得可能なスキャン型のセンサである。図9Aは、LiDARセンサ110をトラクタ100Aの側面方向から見た場合の模式図である。図9Bは、LiDARセンサ110を鉛直上方から見た場合の模式図である。図9Aおよび図9Bにおいて放射状に延びる複数の直線は、LiDARセンサ110から出射されるレーザビームの中心軸（あるいは進行方向）を模式的に表している。各レーザビームは、平行光にコリ

10

20

30

40

50

メートルされているが、数ミリラジアン（例えば $0.1 \sim 0.2$ 度）の拡がり角度を有している。このため、各レーザビームの断面サイズ（スポット径）は、L i D A Rセンサ110からの距離に比例して拡大する。例えば、L i D A Rセンサ110から20メートル先で直径が数センチメートルの光スポットが形成され得る。図では、簡単のため、レーザビームの広がりは無視し、レーザビームの中心軸のみが記載されている。

【0084】

図9Aに示す例におけるL i D A Rセンサ110は、縦方向に配列された複数のレーザ光源から、それぞれ、異なる仰角でレーザビームを出射することができる。仰角は、 uv 面に対する角度によって定義される。この例において、 uv 面は水平面にほぼ平行である。なお、地面（地表）が水平面に対して傾斜している場合は、 uv 面と水平面とが交差する。図9Aには、 N 本のレーザビーム L_1 、 $\dots$ 、 L_N が出射されている様子が示されている。ここで「 N 」は、1以上の整数であり、例えば10以上、高性能な機種では64、あるいは100以上であり得る。複数のレーザビームのうち、下から k 番目のレーザビームの仰角を θ_k とする。図9Aには、一例として、 $N-1$ 番目のレーザビームの仰角 θ_{N-1} が示されている。 uv 面よりも上方に向かうレーザビームの仰角を「正の仰角」とし、 uv 面よりも下方に向かうレーザビームの仰角を「負の仰角」とする。

【0085】

N が1であるL i D A Rセンサを「2次元L i D A R」と称し、 N が2以上であるL i D A Rセンサを「3次元L i D A R」と称する場合がある。 N が2以上の場合、1番目のレーザビームと N 番目のレーザビームとのなす角度を、「垂直視野角」と称する。垂直視野角は、例えば 20° から 60° 程度の範囲内に設定され得る。

【0086】

L i D A Rセンサ110は、図9Bに示すように、レーザビームの出射方向（方位角）を変化させることができる。図9Bには、図9Aに示す複数のレーザビームの出射方向が、 w 軸に平行な回転軸の周りに回転している様子が示されている。レーザビームの出射方向（方位角）の範囲は 360° であってもよいし、 360° よりも小さい角度の範囲（例えば 210° または 270° 等）であってもよい。レーザビームの出射方向の方位角の範囲を「水平視野角」と称する。水平視野角は、例えば 90° から 360° 程度の範囲内に設定され得る。L i D A Rセンサ110は、レーザビームの出射方向を w 軸に平行な回転軸の周りに回転させながら、異なる方位角の方向にパルス状のレーザ光（レーザパルス）を順次出射する。こうして、異なる仰角および異なる方位角に出射されるパルス状のレーザ光により、各反射点までの距離を計測することが可能になる。各反射点は、点群データに含まれる個々の点に相当する。レーザビームの方位角が回転軸の周りに一回転する間に反射点までの距離を測定する動作を1スキャンと称する。1スキャンによって得られるセンサデータは、図9Aに示す特定の仰角に対応付けられたレイヤごとに測定されるデータを含む。従って、レイヤの数が増加するほど、同一環境に対する1スキャンによって得られる点群中の点の個数は増加する。L i D A Rセンサ110は、例えば1秒あたり1回から20回程度の頻度でスキャン動作を繰り返す。1スキャンの動作中に例えば10万パルス以上のレーザ光が異なる方向に出射され得る。

【0087】

図10は、L i D A Rセンサ110の概略的な構成の例を示すブロック図である。図10に示すように、L i D A Rセンサ110は、複数のレーザユニット111と、電気モータ114と、制御回路115と、信号処理回路116と、メモリ117とを備える。各レーザユニット111は、レーザ光源112と、光検出器113とを備える。各レーザユニット111は、レンズおよびミラーなどの光学系を含み得るが、それらの図示は省略されている。モータ114は、例えば、各レーザ光源112から出射されるレーザビームの光路上に配置されたミラーを回転させることにより、各レーザ光源112から出射されるレーザビームの方向を変化させる。

【0088】

レーザ光源112は、レーザダイオードを含み、制御回路115からの指令に応答して

所定の波長のパルス状のレーザビームを出射する。レーザビームの波長は、例えば近赤外線の波長域（およそ700nmから2.5μm）に含まれる波長であり得る。使用される波長は、光検出器113に使用される光電変換素子の材料に依存する。例えばシリコン（Si）を光電変換素子の材料として用いる場合、900nm前後の波長が主に使用され得る。インジウムガリウム砒素（InGaAs）を光電変換素子の材料として用いる場合、例えば1000nm以上1650nm以下の波長が使用され得る。なお、レーザビームの波長は、近赤外線の波長域に限定されない。環境光の影響が問題にならない用途（例えば夜間用等）においては、可視域（およそ400nmから700nm）に含まれる波長を使用してもよい。用途によっては紫外線の波長域を使用することも可能である。本明細書において、紫外線、可視光、および赤外線の波長域に含まれる放射全般を「光」と称する。

10

【0089】

光検出器113は、レーザ光源112から出射され、物体で反射または散乱されたレーザパルスを検出する装置である。光検出器113は、例えばアバランシェフォトダイオード（APD）などの光電変換素子を備える。光検出器113は、受光量に応じた電気信号を出力する。

【0090】

モータ114は、制御回路115からの指令に応答して各レーザ光源112から出射されるレーザビームの光路上に配置されたミラーを回転させる。これにより、レーザビームの出射方向を変化させるスキャン動作が実現される。

【0091】

制御回路115は、レーザ光源112によるレーザパルスの出射、光検出器113による反射パルスの検出、およびモータ114による回転動作を制御する。制御回路115は、例えばマイクロコントローラユニット（MCU）などの、プロセッサを備える回路によって実現され得る。

20

【0092】

信号処理回路116は、光検出器113から出力された信号に基づく演算を行う回路である。信号処理回路116は、例えばToF（Time of Flight）法によって各レーザ光源112から出射されたレーザパルスを反射した物体までの距離を計算する。ToF法には、直接ToF法と間接ToF法とがある。直接ToF法においては、レーザ光源112からレーザパルスが出射されてから光検出器113によって反射光が受光されるまでの時間を直接計測することにより、反射点までの距離を計算する。間接ToF法においては、光検出器113に複数の露光期間が設定され、各露光期間で検出された光量の比に基づいて各反射点までの距離が計算される。直接ToF法および間接ToF法のいずれの方法も用いられ得る。信号処理回路116は、例えば、各反射点までの距離と、その反射点の方向とを示すセンサデータを生成して出力する。信号処理回路116は、さらに、各反射点までの距離と、その反射点の方向とに基づいて、センサ座標系における座標（u，v）または（u，v，w）を計算し、センサデータに含めて出力してもよい。

30

【0093】

制御回路115および信号処理回路116は、図10の例では2つの回路に分かれているが、1つの回路によって実現されていてもよい。

40

【0094】

メモリ117は、制御回路115および信号処理回路116によって生成されるデータを記憶する記憶媒体である。メモリ117は、例えば、各レーザユニット111から出射されるレーザパルスの出射タイミングと、出射方向と、反射光強度と、反射点までの距離と、センサ座標系における座標（u，v）または（u，v，w）とを関連付けたデータを記憶する。そのようなデータが、レーザパルスが出射される度に生成され、メモリ117に記録される。制御回路115は、所定の周期（例えば、所定回数のパルス出射に要する時間、半スキャン周期、または1スキャン周期等）で当該データを出力する。出力されたデータは、トラクタ100Aの記憶装置150に記録される。

【0095】

50

なお、距離計測の方法はToF法に限らず、FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 法などの他の方法を用いてもよい。FMCW法においては、周波数を線形的に変化させた光が出射され、出射光と反射光との干渉で生じるビートの周波数に基づいて距離が計算される。

【0096】

＜動作＞

次に、トラクタ100Aの動作を説明する。

【0097】

図11は、トラクタ100Aが走行する環境の一例を模式的に示す図である。この例では、トラクタ100Aは、ぶどう園における複数の樹木列20の間を走行しながら、作業機300を用いて所定の作業（例えば、草刈り、防除、その他）を行う。ぶどう園では、上空が枝および葉で遮られ、GNSSを用いた自動走行が難しい。また、ぶどう園では、樹木の葉または垣根の外形が季節によって大きく変化する。そのため、従来のSLAM技術によって作成された点群地図を通期で使用することが難しい。

【0098】

そこで、本開示の実施形態では、ぶどう園などの果樹園に適した環境地図を用意し、その環境地図に基づいてトラクタ100Aの自動走行を行う。例えばぶどう園における樹木は、一度植えられると長期間植え替えられることがなく、幹部は葉部に比べて季節変化による外形の変化が少ない。幹部をSLAMのランドマークとすることで、通期で使用可能な環境地図を作成し、年間を通じて環境地図を作成し直すことなく自動走行作業を行うことができる。

【0099】

以下、トラクタ100Aの動作を具体的に説明する。ECU160は、LiDARセンサ110から出力されるセンサデータを利用して、ぶどう園全体またはぶどう園の一区画における樹木列20の幹部の分布を示す環境地図データをまず生成し、記憶装置150に記録する。環境地図データの生成は、自己位置推定モジュール162による自己位置推定と、地図データ生成モジュール164による局所地図データの生成とを繰り返すことによって実行される。地図データ生成モジュール164は、トラクタ100Aが移動している間にLiDARセンサ110から繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、自己位置推定を行いながら、トラクタ100Aの周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す局所地図データを生成して記憶装置150に記録する動作を繰り返す。地図データ生成モジュール164は、トラクタ100Aがぶどう園全体またはぶどう園の一区画を走行する間に生成した局所地図データを繋ぎ合わせることで、環境地図データを生成する。この環境地図データは、環境中の樹木列20の幹部の分布を、他の物体と区別可能な形式で記録したデータである。このように、本実施形態では、樹木列20の幹部がSLAMのランドマークとして使用される。

【0100】

複数の樹木列が配置されたエリアには1つ以上の支柱が設けられることがある。例えば、ぶどう園においては、一般に、垣根仕立てのための複数の支柱が樹木の近傍に設けられる。支柱は、樹木の幹部と同様、季節による外形の変化が少ないため、ランドマークとして適している。そこで、自己位置推定モジュール162は、センサデータに基づいて、トラクタ100Aの周囲の環境における支柱をさらに検出し、地図データ生成モジュール164は、幹部の分布に加えて支柱の分布も示す環境地図データを生成してもよい。

【0101】

環境地図データが生成されると、トラクタ100Aによる自動走行または自律走行が可能になる。ECU160の自己位置推定モジュール162は、トラクタ100Aの走行中、LiDARセンサ110から繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、周囲の環境における樹木列20の幹部を検出し、検出した樹木列20の幹部と環境地図データとのマッチングを行うことにより、トラクタ100Aの位置を推定する。環境地図データに支柱の分布情報が含まれる場合は、自己位置推定モジュール162は、センサデータに基づい

て検出した樹木列の幹部および支柱と、環境地図データとのマッチングを行うことにより、トラクタ100Aの位置を推定してもよい。駆動制御用のECU180は、ECU160によって推定されたトラクタ100Aの位置に応じてトラクタ100Aの移動を制御する制御装置である。例えば、ECU180は、ECU170によって決定された走行予定経路から逸脱している場合に、トラクタ100Aのステアリングを調整することにより、走行予定経路に近付ける制御を行う。このような操舵制御は、トラクタ100Aの位置だけでなく向きに基づいて行われてもよい。

【0102】

樹木列20の幹部の分布を示す環境地図は、任意の時期に生成することができる。例えば、冬などの樹木の葉部が少ない季節に環境地図を生成することができる。その場合、夏などの樹木の葉部が多い季節に環境地図を生成する場合と比較して、幹部の分布をより正確に反映した環境地図を生成し易い。冬に環境地図が生成される場合、冬だけでなくそれ以外の季節においても、ECU160は、その環境地図に基づいて自己位置推定を行ってもよい。その場合、ECU160は、冬の間生成された環境地図データと、LiDARセンサ110から出力されたセンサデータから幹部以外の部分を除去したデータとのマッチングを行うことにより、自己位置推定を行う。

【0103】

ECU160は、トラクタ100Aの走行中に繰り返し取得されたセンサデータに基づいて検出した樹木列の幹部の分布を示すデータを生成し、当該データを用いて環境地図データを更新してもよい。例えば、ECU160は、新たに取得されたセンサデータから検出された幹部の情報を前回生成した環境地図データに加えることによって環境地図データを更新してもよい。あるいは、検出した樹木列の幹部の分布を示すデータを、環境地図データを更新する外部の装置に送信してもよい。その場合、ECU160は、推定されたトラクタ100Aの位置を示す情報を当該幹部の分布を示すデータ（例えば局所地図データ）に含めて出力する。外部の装置は、取得したデータを用いて環境地図データを更新し、更新後の環境地図データをトラクタ100Aに送信することができる。そのような動作により、樹木の生長などに起因して、環境地図を作成した時点から走行環境が変化した場合であっても、その変化を反映した環境地図を新たに作り直すことができる。

【0104】

図12は、トラクタ100Aの周囲の環境の例を模式的に示す斜視図である。トラクタ100Aは、ぶどう園内の隣り合う2つの樹木列の間を走行する。トラクタ100Aは、走行しながら、LiDARセンサ110を用いて周囲の環境をレーザビームでスキャンする。これにより、環境内に存在する物体の距離分布を示すデータを取得する。距離分布を示すデータは、2次元または3次元の点群データに変換され、記録される。トラクタ100Aは、ぶどう園内を走行しながら繰り返し取得した点群データを統合することにより、ぶどう園全体、またはぶどう園の一区画における樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成する。点群データの統合は、異なるタイミングで取得された複数の反射点の座標を、地球に固定されたワールド座標系における座標に変換し、繋ぎ合わせる処理を含む。本実施形態では、トラクタ100AのECU160が環境地図データを生成するが、トラクタ100Aの外部に設けられたコンピュータが環境地図データを生成してもよい。

【0105】

図13Aは、環境地図生成時、および自動走行時のトラクタ100Aの走行経路の一例を模式的に示す図である。トラクタ100Aは、例えば図13Aに矢印で示す経路30に沿ってぶどう園内の複数の樹木列20の間を走行する。図では、経路30に含まれる線分が直線状に記載されているが、トラクタ100Aが実際に走行する経路は、蛇行部分を含んでいてもよい。ここで、複数の樹木列20を、端から順に第1の樹木列20A、第2の樹木列20B、第3の樹木列20C、第4の樹木列20D、・・・と順序付けする。図13Aの例では、トラクタ100Aは、第1の樹木列20Aと第2の樹木列20Bとの間をまず走行し、その走行が完了すると、旋回して第2の樹木列20Bと第3の樹木列20Cとの間を逆向きに走行する。第2の樹木列20Bと第3の樹木列20Cとの間の走行が完

10

20

30

40

50

了すると、さらに旋回して第3の樹木列20Cと第4の樹木列20Dとの間を走行する。以後、同様の動作を繰り返すことにより、最後の2つの樹木列の間の経路30の終端まで走行する。なお、隣り合う樹木列の間の距離が短い場合は、図13Bに示すように、1列おきに走行してもよい。この場合、最後の2つの樹木列の間の走行が完了した後、まだ走行していない樹木列間を1列おきに走行する動作が実行され得る。このような走行は、トラクタ100AがLiDARセンサ110を利用して自己位置推定を行いながら、自動で行う。なお、GNSSユニット120がGNSS信号を受信できるタイミングにおいては、GNSS信号に基づいて測位を行ってもよい。例えば、図13Aおよび図13Bに示す経路30において方向転換するタイミングでは、GNSS信号を遮る葉が存在しないことから、GNSS信号に基づく測位が可能である。

10

【0106】

<センサデータ取得の例>

次に、図14Aから図17Cを参照して、トラクタ100Aによるセンサデータの取得の例を説明する。センサデータは、環境地図が既に構築済みの場合は、環境地図とのマッチングを行うことによってトラクタ100Aの位置を推定するために利用される。一方、環境地図が構築されていない場合、あるいは環境地図の少なくとも一部を更新する場合には、センサデータに基づいて環境地図の構築または更新が行われる。環境地図の構築および更新は、トラクタ100Aの移動中に行われる必要はなく、トラクタ100Aが移動中に取得したセンサデータをトラクタ100Aの内部または外部のコンピュータによって処理することで実行され得る。

20

【0107】

図14Aは、トラクタ100AのLiDARセンサ110から出射されたレーザビームで樹木21および地面が照射される様子を模式的に示す図である。図14Bは、LiDARセンサ110から出射されたレーザビームで地面が照射される様子を模式的に示す図である。これらの図において、LiDARセンサ110から負の仰角の方向に出射されたレーザビームは太い破線で表され、LiDARセンサ110から正の仰角の方向に出射されたレーザビームは細い破線で表されている。LiDARセンサ110から異なる仰角で出射される複数のレーザビームのうち、負の仰角の方向に出射されたレーザビームは、樹木21に当たらない場合、地面で反射され得る。一方、正の仰角の方向に出射されたレーザビームは、樹木21に当たらない場合、反射点を形成せず、樹木21に当たった場合の反射点は、葉や枝の表面に位置することが多い。前述したように、葉や枝の表面に位置する反射点は、環境地図データとのマッチングに適さない。このため、本実施形態では、幹部での反射を利用して自己位置推定および環境地図の構築を行う。具体的には、LiDARセンサ110から異なる仰角で出射される複数のレーザビームのうち、仰角が所定の範囲に含まれるレーザ光源から出射されたレーザパルスの反射点に基づいて幹部を検出してもよい。また、反射点の高さが幹部の平均的な高さよりも低い反射点に基づいて幹部を検出してもよい。これらの場合、幹部の検出後に、地面に位置する反射点をセンサデータの点群から選択的にカットしてもよい。

30

【0108】

図15Aおよび図15Bは、トラクタ100AのLiDARセンサ110による1スキャン動作で取得されるセンサデータの点群の例を模式的に示す平面図である。図15Aは、ある時点におけるトラクタ100Aと、LiDARセンサ110から放射されたレーザパルスの反射点の分布の例を模式的に示している。この例では、地面は平坦な面であると仮定している。地面で反射されたレーザビームは、地面で円弧上に反射点を形成する。このような地面上の反射点は、仰角が負の方向に出射されたレーザビームによって形成される。図15Aにおいて、半径が異なる7本の円弧（7つのレイヤに相当）上に反射点が並んでいる。それぞれのレイヤは、異なる負の仰角で出射されたレーザビームが方位角方向に回転するスキャンによって形成される。このスキャンが行われているとき、水平方向または正の仰角の方向にレーザビームによるスキャンが行われていてもよい。なお、同一レイヤ上に並ぶ反射点は、同一のレーザ光源から同一の仰角で出射されたレーザビームが回

40

50

転しながら物体表面にパルス状に入射して形成される。図15Bは、図15Aの時点からわずかに時間が経過した時点におけるトラクタ100Aと、LiDARセンサ110から放射されたレーザパルスの反射点の分布の例を模式的に示している。

【0109】

LiDARセンサ110から放射されたレーザパルスの一部は、樹木の幹部22の表面で反射される。地面、樹木の幹部22、または他の物体で反射されたレーザパルスの一部は、反射点が測距可能距離（例えば50m、100m、または200m等）を超える遠方に位置する場合を除き、LiDARセンサ110によって検出され、反射点までの距離が計測される。LiDARセンサ110は、例えば、反射点ごとに、反射点までの距離と、反射点の方向と、反射光強度と、反射点を形成したレーザビームを出射したレーザ光源の識別番号とを関連付けたセンサデータを生成して出力する。このセンサデータには、計測時刻の情報も含まれ得る。計測時刻の情報は、例えば反射点ごと、または一定の時間内に計測された反射点のまとめごとにより記録され得る。ECU160の自己位置推定モジュール162は、LiDARセンサ110から出力されたセンサデータを点群データに変換する。点群データは、LiDARセンサ110に固定されたセンサ座標系で表現された各反射点の3次元座標（ u ， v ， w ）の情報を含むデータである。なお、LiDARセンサ110が各反射点の距離および方向のデータを点群データに変換した上で出力する場合には、自己位置推定モジュール162による点群データへの変換は省略される。

【0110】

環境地図の構築時において、トラクタ100Aが走行している間、地図データ生成モジュール164は、点群データから、幹部22を他の部分と区別可能な形式で記録した局所地図データを生成する。トラクタ100Aの走行中、地図データ生成モジュール164は、それまでに生成した局所地図データに、新たに取得したセンサデータに基づく局所地図データを追加して更新する動作を繰り返す。これにより、最終的な環境地図データを生成することができる。なお、地図データ生成モジュール164は、トラクタ100Aの走行中には局所地図データを生成して記録する動作のみを行い、最終的な環境地図データの生成は、走行完了後に行ってもよい。その場合、最終的な環境地図データは、外部のコンピュータが生成してもよい。

【0111】

本実施形態では、LiDARセンサ110がトラクタ100Aの車体の前部に取り付けられている。したがって、図15Aおよび図15Bに示すように、レーザパルスは、トラクタ100Aの前方に向けて放射される。トラクタ100Aの後部にもLiDARセンサ110が取り付けられていてもよい。その場合には、トラクタ100Aの前方と後方の両方の点群データを一度に取得できるため、より点群密度の高い地図データを生成することができる。また、環境地図が生成された後の自動走行におけるマッチングによる自己位置推定の精度を向上させることができる。さらに、個々の幹部22の表面における広い範囲から点群データが得られるため、その点群データから幹部22の太さを高い精度で計測することもできる。このように、ECU160は、センサデータに基づいて、検出された樹木列の各幹部の太さを計測し、各幹部の太さを記憶媒体に記録する記録装置としても機能する。記憶媒体は、記憶装置150内の記憶媒体でもよいし、他の記憶媒体でもよい。幹部の太さは、各ランドマークの属性情報のひとつとして環境地図データに加えられてもよいし、他のベクタ形式の地図データに記録されてもよい。

【0112】

図16は、複数のレイヤ（ L_1 、 $\dots$ 、 L_{k+3} ）のレーザビームの1スキャンによって得られる幹部22の点群の例を模式的に示す図である。図17Aから図17Cは、それぞれ、図16に示す複数のレイヤのうちの3つのレイヤ（ L_k 、 L_{k+1} 、 L_{k+2} ）のレーザビームのスキャンによって幹部22の点群が得られる様子を模式的に示す図である。この図に示すように、スキャン毎に、計測可能な範囲に存在する幹部22の分布を示す点群データを得ることができる。より詳細には、1スキャンによって個々の反射点までの距離を計測するとき、それぞれのレイヤにおいて、距離が相対的に長い反射点が連続する領

域と、距離が相対的に短い反射点が局所的に表れる領域とが含まれ得る。

【0113】

図18は、複数のレイヤ (L_k 、 L_{k+1} 、 L_{k+2} 、 $\dots$) のレーザビームによって1スキャンで計測される反射点までの距離と反射点の方位角との関係の例を示すグラフである。図18に示される方位角の範囲は狭く、この範囲では2本の幹部からの反射が示されている。この例において、各レイヤの主たる反射点は地面に位置している。個々のレイヤに属する反射点のうち、相対的に距離が短い反射点は、幹部の表面に対応する曲線上に並んでいる。2つの幹部のうち、距離が相対的に短い位置にある幹部は、レイヤ L_k 、 L_{k+1} 、 L_{k+2} 、 $\dots$ のレーザビームで照射される。これに対し、距離が相対的に長い位置にある幹部は、より少ないレイヤ L_{k+1} 、 L_{k+2} 、 $\dots$ のレーザビームで照射される。このため、3次元空間中の幹部の表面における点群を水平面に平行な平面に投影した場合、距離が相対的に短い位置にある幹部の点群の密度が相対的に高い。図18に示される計測結果に基づいて、幹部を検出することができる。実際には地面には起伏が存在したり、雑草が存在したりするため、距離の計測値は図示されるほど単純ではない。

10

【0114】

トラクタ100Aが移動しながら上記のスキャンを繰り返すことにより、トラクタ100Aの周囲に位置する各幹部から密度の高い点群のデータを取得することが可能である。したがって、移動するトラクタ100Aが取得する大量のセンサデータを利用することにより、幹部の分布を示す精度の高い環境地図の構築に必要な高密度の点群データを取得することができる。

20

【0115】

なお、反射点までの距離ではなく、反射光の強度と反射点の方位角との関係から幹部を検出することもできる。同一レイヤのレーザビームによる反射光の強度は、反射点までの距離が短いほど大きくなるからである。

【0116】

上述したように、幹部の分布を示す環境地図と比較されるべきセンサデータ（以下、「スキャンデータ」とも称する。）には、幹部の表面に位置する反射点以外の多数の反射点が含まれ得る。このため、取得されたスキャンデータから、幹部の表面に位置する可能性が高い反射点を選択することが有効である。また、スキャンデータは、1スキャンによって得られた反射点だけではなく、連続的に取得された複数のスキャンによって得られた反射点を統合して密度の高い点群データを生成してもよい。

30

【0117】

なお、図17Aから図17Cでは省略されているが、例えば正の仰角で出射されるレーザビームは、幹部以外の葉部や枝部を照射して多数の反射点を形成し得る。本実施形態におけるECU160は、スキャンデータに基づいて生成した点群データから、幹部22の特徴を有する一部の点を抽出することにより、幹部22の分布を示すデータを生成する。

【0118】

図19は、ある位置におけるトラクタ100Aで取得されたスキャンデータから、幹部の表面に位置する反射点を抽出して作成した局所地図の例を示している。この例では、幹部の2次元分布を示す2次元の局所地図が作成されている。このような局所地図では、その位置におけるトラクタ100Aの周囲に位置する幹部の座標が、トラクタ100Aに固定されたuv座標系で表現され得る。

40

【0119】

図20Aおよび図20Bは、図19の局所地図を、構築済みの環境地図とマッチングさせることにより、トラクタ100Aの位置を推定するプロセスを模式的に示す平面図である。局所地図における各座標はセンサ座標系で表現され、環境地図における各座標はワールド座標系で表現されている。マッチングは、センサ座標系からワールド座標系への座標変換を最適化することである。そのような座標変換の最適化により、ワールド座標系におけるセンサの位置座標および向きが決定される。図20Aおよび図20Bにおいて、環境地図における幹部は黒塗りで表現されている。図20Aは、マッチングの途中の状態を示

50

している。この状態では、局所地図上にある幹部と環境地図上にある対応する幹部との間には位置ずれ（誤差）が存在する。図20Bは、マッチングが完了した状態を示している。この状態では、局所地図上にある幹部と環境地図上にある対応する幹部との間の位置ずれ（誤差）は最小化されている。

【0120】

このように幹部を抽出したスキャンデータと幹部の分布を示す環境地図を利用することにより、精度の高い位置推定が実現する。なお、上記の例では、2次元の環境地図に基づくマッチングが行われるが、3次元の環境地図に基づいてマッチングを行ってもよい。

【0121】

<LiDARセンサの配置の例>

次に、図21Aおよび図21Bを参照して、LiDARセンサ110の配置の例を説明する。

【0122】

図21Aは、本実施形態のように、トラクタ100Aの車両本体の前方下部にLiDARセンサ110が取り付けられた例を示している。図21Bは、トラクタ100Aのキャビンの前方上部にLiDARセンサ110が取り付けられた例を示している。これらの図において、太い破線は樹木21の幹部に照射されるレーザビームを示しており、細い破線は樹木の葉部またはその上空に向けて出射されるレーザビームを示している。

【0123】

図21Aの例において、LiDARセンサ110は、樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載されている。樹木列の幹部の平均高さは、トラクタ100Aの走行予定経路に存在する複数の樹木列に含まれる樹木の幹部の高さの平均値である。樹木の幹部の高さは、地面から、その樹木において最も低い枝を生ずる部分までの距離である。LiDARセンサ110は、例えば地上から10cm以上150cm以下、ある例では15cm以上100cm以下の高さに配置され得る。このような低い位置にLiDARセンサ110を配置することにより、葉や枝によって遮られることなく、より多くのレーザビームで幹部を照射することができる。このため、センサデータから幹部の位置を高い精度で決定することが可能になる。

【0124】

一方、図21Bの例では、LiDARセンサ110が高い位置（例えば地上から約2mの位置）に配置されていることから、レーザビームの多くは、幹部ではなく葉部を照射する。このため、幹部の点群データを取得する用途においては、図21Bのような配置は適さない。しかし、このような配置は、樹木列の葉部の分布情報を効率的に取得できるため、葉部の分布情報を積極的に取得する用途においては有効である。例えば、樹木の生育状況を管理したり、樹木の葉部を避ける経路を決定したりする目的のために図21Bのような配置が採用されてもよい。なお、図21Bのような配置においても、LiDARセンサ110を下向きに取り付けることにより、より多くのレーザビームで幹部を照射することができる。このため、幹部の分布データを取得する用途においても図21Bに示すような配置が採用される場合もある。LiDARセンサ110は、車体の前方下部およびキャビンの前方上部に限らず、他の位置に配置されていてもよい。例えば、LiDARセンサ110は、キャビンの高さよりも低い位置に配置され得る。

【0125】

なお、本実施形態では1つのLiDARセンサ110が使用されるが、トラクタ100Aは複数のLiDARセンサを備えていてもよい。複数のLiDARセンサから出力されるセンサデータを組み合わせることにより、さらに効率的に幹部の分布データを取得することができる。複数のLiDARセンサは、例えばトラクタ100Aの左右に設けられていてもよいし、前部および後部に設けられていてもよい。複数のLiDARセンサを備えた移動体の実施形態の詳細については後述する。

【0126】

ECU160における自己位置推定モジュール162は、LiDARセンサ110にお

10

20

30

40

50

ける複数のレーザ光源のうち、仰角が所定の範囲に含まれるレーザ光源から出射されたレーザパルスの反射点に基づいて幹部を検出してもよい。例えば、負の仰角の方向に出射されるレーザパルスの反射点のみに基づいて幹部を検出してもよい。幹検出に利用されるレーザパルスの仰角の範囲をユーザが設定できるようにしてもよい。例えば、ユーザが操作端末200を操作することによって幹検出に利用されるレーザパルスの仰角の範囲を設定できるようにしてもよい。LiDARセンサ110から出射されるレーザパルスのうち、幹部を照射する可能性の高い特定の仰角の範囲に出射されるレーザパルスのみを利用することにより、幹部をより効率的に検出することができる。また、地面に起伏があり、センサ座標系におけるuv面が水平面から大きく傾斜するときは、センサ座標系の傾斜角に応じて、幹部で反射されたレーザパルスを適切に選択するように、レーザビームの仰角範囲を適応的に選択して反射点を抽出してもよい。LiDARセンサ110の傾斜角は、IMU125からの信号を利用して求めることができる。

10

【0127】

＜環境地図構築後の自動走行動作の例＞

次に、環境地図が作成された後の自動走行動作の例を説明する。

【0128】

図22は、ECU160における自己位置推定モジュール162の機能構成の例を示す図である。自己位置推定モジュール162は、記憶装置150に格納されたコンピュータプログラム（ソフトウェア）を実行することにより、LiDARセンサ110から出力されたスキャンデータと地図データとのマッチングを行い、トラクタ100Aの位置および向きを推定する。

20

【0129】

自己位置推定モジュール162は、スキャンデータ取得162a、地図データ取得162b、IMUデータ取得162c、スキャンデータフィルタリング162d、マッチング162e、および車両位置・向き決定162fの各処理を実行する。以下、これらの処理の詳細を説明する。

【0130】

（スキャンデータ取得162a）

自己位置推定モジュール162は、LiDARセンサ110から出力されたスキャンデータを取得する。LiDARセンサ110は、例えば毎秒1回から20回程度の頻度で、スキャンデータを出力する。このスキャンデータは、センサ座標系で表現された複数の点の座標と、タイムスタンプの情報を含み得る。なお、スキャンデータが各点までの距離および方向の情報を含み、座標情報を含まない場合は、自己位置推定モジュール162が距離および方向の情報から座標情報への変換を行う。

30

【0131】

（地図データ取得162b）

自己位置推定モジュール162は、記憶装置150に格納された環境地図データを取得する。環境地図データは、トラクタ100Aが走行する環境内に含まれる樹木列の幹部の分布を示す。環境地図データは、例えば以下の（1）～（3）のいずれかの形式のデータを含む。

40

（1）幹部と幹部以外の物体とが識別可能な形式で記録されたデータ

例えば、幹部であると判断された点に数値「1」が付与され、幹部以外の物体であると判断された点に数値「0」が付与されたデータが該当する。個々の幹部を識別するための幹IDが環境地図データに含まれていてもよい。

（2）幹部に相対的に大きい重みが付与され、幹部以外の物体に相対的に小さい重みが付与されたデータ

例えば、幹部の表面上の点であると推定される確率が高い点ほど大きい数値が付与されるデータが該当する。

（3）検出された幹部の分布の情報を含み、幹部以外の物体の一部または全部の分布の情報を含まないデータ

50

【0132】

例えば、環境地図を表す点群から、幹部の表面であると判断された点のみを残して他の点を削除したデータが該当する。幹部ではないと判断された点の全てが削除されるのではなく、一部の点が残されていてもよい。例えば、ぶどう園では一般に、垣根仕立てのための支柱が幹部の周囲に設けられるため、そのような支柱を表す点の情報が環境地図に含まれていてもよい。

【0133】

点群中のある点が幹部または支柱に該当するか否かは、例えば、その点およびその点の周囲の複数の点の分布が、幹部または支柱の表面形状を反映した分布（例えば下に凸の円弧状の分布等）であるか否かに基づいて判断され得る。あるいは、各回のスキャンで取得された曲線的に分布する点群のデータから、近傍の点に比べてLiDARセンサ110からの距離が局所的に近い点の集まりを抽出し、それらの点を幹部または支柱を表す点であると判断してもよい。各回のスキャンで取得された曲線的に分布する点群のデータを、LiDARセンサ110からの距離に応じて複数のクラスに分類し、クラスごとに幹部または支柱に該当するか否かを判断してもよい。また、距離だけでなく反射強度の情報にも基づいて点群を分類してもよい。樹木の幹とその周囲の他の部分とでは、反射強度が明確に異なるため、反射強度の類似性と位置の類似性に基づいて点群を分類することが有効である。例えば、反射強度が所定の範囲内にあり、かつ位置が近接する複数の点を幹部の表面を表す点の候補としてもよい。LiDARセンサ110から複数の異なる波長のレーザビームを出射し、波長ごとの反射強度の比に基づいて点群を分類し、幹部を検出してもよい。

【0134】

幹部の検出には、機械学習が利用されてもよい。深層学習などのニューラルネットワークに基づく機械学習アルゴリズムを利用することにより、点群データから樹木の幹の表面に該当する点を高い精度で検出することができる。機械学習アルゴリズムが用いられる場合、点群データから幹部を検出するための学習済みモデルの作成（すなわち学習）が事前に行われる。

【0135】

樹木の幹部に限らず、それ以外の物体を認識してもよい。例えばパターン認識または機械学習によって点群データから地面、雑草、および樹木の葉部等を認識してそれらの点を除去することにより、樹木の幹部に該当する点を主に含む点群データを生成してもよい。幹部の検出に先立って、地面からの高さが所定の範囲（例えば、0.5mから1.5m等）に含まれる点群のみを抽出する処理を行ってもよい。そのような特定の座標範囲に含まれる点群のみを幹部検出の対象とすることにより、検出に要する時間を短縮することができる。地面からの高さは、各点のZ座標から地面のZ座標を減じることによって計算される。地面のZ座標は、例えば、数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）を参照して決定され得る。地面のZ座標は、地面を示す点群から決定されてもよい。

【0136】

図23は、環境地図データの形式の一例を模式的に示す図である。この例における環境地図データは、点の個数の情報と、点ごとのID、分類、幹ID、X座標、Y座標、Z座標、および反射強度の情報とを含む。点の個数をnとすると、点ID、分類、幹ID、X座標、Y座標、Z座標、および反射強度のデータの組がn組分記録される。分類は、その点は何を表すかを示し、例えば樹木の幹、垣根の支柱、地面、雑草、樹木の葉などを示す識別子を含む。分類は、樹木の幹であるか否かを示す2値の数値、または、樹木の幹である確率を示す数値であってもよい。幹IDは、その点が幹を表す場合に、その幹を識別するための番号である。幹IDは環境地図データに含まれていなくてもよい。また、幹IDに加えて、他の物体（例えば、葉、枝、地面、雑草等）の識別子が含まれていてもよい。X座標、Y座標、およびZ座標は、ワールド座標系におけるその点の座標である。反射強度は、その点からの反射光強度を表す。反射強度の情報は環境地図データに含まれていなくてもよい。環境地図データは、図23に示す情報以外にも、データ形式を示すヘッダな

どの情報を含み得る。トラクタ100Aが走行するぶどう園が広い場合には、ぶどう園の区画ごと（例えば、100m×100mの区画ごと）に環境地図データが生成され得る。その場合には、環境地図データは、区画を識別するためのID情報も含み得る。なお、環境地図データは、各点の3次元座標を記録する代わりに、2次元座標を記録してもよい。例えば、水平面に平行な特定の高さの平面上の点群の座標を含むデータが環境地図データとして生成されてもよい。その場合、スキャンデータと環境地図データとのマッチングは、その2次元座標に関して行われる。

【0137】

（IMUデータ取得162c）

自己位置推定モジュール162は、IMU125から出力されたIMUデータを取得する。IMUデータは、トラクタ100Aの加速度、速度、変位、姿勢、計測時刻（タイムスタンプ）などの情報を含み得る。IMUデータは、例えば毎秒数十回から数千回程度の頻度で出力される。この出力周期は、一般に、LiDARセンサ110によるスキャンデータの出力周期よりも短い。

10

【0138】

図24は、IMUデータとスキャンデータの時間的な関係の一例を示す図である。この例では、IMUデータは1ミリ秒（ms）の周期で出力され、スキャンデータは10msの周期で出力される。1スキャンに要する時間が例えば100msであるとする、図24の例では、10分の1スキャンごとにスキャンデータが出力される。スキャンデータには、計測された各点の距離および方向、または座標と、計測時刻（タイムスタンプ）の情報が含まれる。

20

【0139】

自己位置推定モジュール162は、取得したスキャンデータのタイムスタンプを参照して、対応する時間中に生成されたIMUデータを取得する。

【0140】

（スキャンデータフィルタリング162d）

自己位置推定モジュール162は、取得したスキャンデータをフィルタリングし、マッチングに用いる点の個数を削減する。さらに、マッチングに不要な部分を除去する。例えば、地面、雑草、樹木の葉部、および障害物などの、樹木の幹部または垣根の支柱に該当しないと判断される点を除去することができる。

30

【0141】

（マッチング162e）

自己位置推定モジュール162は、フィルタされたスキャンデータと地図データとのマッチングを行う。マッチングは、例えばNDT（Normal Distribution Transform）またはICP（Iterative Closest Point）などの任意のマッチングアルゴリズムを用いて実行され得る。マッチングにより、LiDARセンサ110の位置および向きが決定される。

【0142】

（車両位置・向き決定162f）

自己位置推定モジュール162は、マッチングの結果に基づき、トラクタ100Aの位置および向きを決定し、その位置および向きを示すデータを出力する。当該データは、駆動制御用のECU180に送られ、駆動装置140の制御に利用される。

40

【0143】

次に、図25を参照しながら、本実施形態における自己位置推定動作をより詳細に説明する。

【0144】

図25は、自己位置推定モジュール162による自己位置推定動作を示すフローチャートである。自己位置推定モジュール162は、図25に示すステップS101からS109の動作を実行することにより、トラクタ100Aの位置および向き、すなわちポーズを推定する。以下、各ステップの動作を説明する。図25に示す動作は、例えばユーザによ

50

る操作端末200を用いた操作によって開始され得る。

【0145】

(ステップS101)

自己位置推定モジュール162は、記憶装置150から環境地図データを読み込む。走行対象のぶどう園の区画ごとに異なる環境地図データが記録されている場合は、現在の地点に対応する環境地図データを読み込む。現在の地点に対応する環境地図データは、例えばユーザが操作端末200を操作することによって指定され得る。あるいは、その地点でGNSS信号を受信できる場合には、GNSSユニット120が受信したGNSS信号に基づいて現在の地点を特定し、対応する環境地図データを選択して読み込んでもよい。この例のように、トラクタ100Aの位置に対応する一部の環境地図データのみを読み込むことにより、処理を高速化することができる。なお、本ステップにおいて全ての環境地図データを一括して読み込んでもよい。

10

【0146】

(ステップS102)

自己位置推定モジュール162は、位置推定の開始地点を設定する。位置推定の開始地点は、その時点でのトラクタ100Aの現在位置であり、例えばユーザが操作端末200に表示された地図から特定の地点を指定することによって設定され得る。あるいは、その地点でGNSS信号を受信できる場合には、GNSSユニット120が受信したGNSS信号に基づいて開始地点を設定してもよい。

【0147】

20

(ステップS103)

開始位置が設定されると、LiDARセンサ110の動作が開始される。自己位置推定モジュール162は、LiDARセンサ110から出力されたスキャンデータを読み込む。LiDARセンサ110は、所定の周期(例えば5ミリ秒以上1秒以下)でスキャンデータを出力する。スキャンデータには、レイヤごとに、例えば数度から360度の範囲内の点群データが含まれる。自己位置推定モジュール162は、例えばLiDARセンサ110からスキャンデータが出力される度に、そのスキャンデータを読み込む。あるいは、自己位置推定モジュール162は、スキャンデータが所定回数分出力される度に、それらのスキャンデータをまとめて読み込んでもよい。

【0148】

30

(ステップS104)

自己位置推定モジュール162は、スキャンデータに含まれるタイムスタンプを参照して、そのスキャンデータに対応するIMUデータを読み込む。

【0149】

(ステップS105)

自己位置推定モジュール162は、読み込んだIMUデータに基づき、マッチングの初期位置を設定する。マッチングの初期位置は、IMUデータが示す現時点でのトラクタ100Aの推定位置である。この初期位置からマッチングを開始することにより、収束までの時間を短くすることができる。IMUデータを用いる代わりに、例えば、過去2スキャン分の位置および向きの推定値の差分に基づいて、線形補間によってマッチングの初期値を決定してもよい。

40

【0150】

(ステップS106)

自己位置推定モジュール162は、取得したスキャンデータをフィルタリングし、マッチングに用いる点の個数を削減する。さらに、前述の方法により、幹部を検出して、幹部以外の不要な部分の少なくとも一部を点群から除去する。

【0151】

ここで、図26を参照して、スキャンデータのフィルタリングの動作の例を説明する。図26は、スキャンデータに含まれる点群の一部を模式的に示している。図26において、白丸が点群に含まれる点である。自己位置推定モジュール162は、センサ座標系にお

50

ける3次元空間を、一定の大きさの複数のボクセルに分割する。そして、個々のボクセルに複数の点が含まれる場合、それらの点を、重心に位置する1つの点に置き換える。図26において、置き換えられた重心の点が黒丸で表現されている。このようなダウンサンプリングを行うことにより、スキャンデータの点の個数を削減して、マッチングを高速化することができる。本実施形態では、このようなダウンサンプリングが行われた後、幹部の検出が行われるが、ダウンサンプリングの前に幹部の検出を行ってもよい。点群のデータサイズが問題にならない場合には、ダウンサンプリング処理を省略してもよい。

【0152】

(ステップS107)

自己位置推定モジュール162は、フィルタリングされたスキャンデータと、環境地図データとのマッチングを行い、LiDARセンサ110のポーズを推定する。具体的には、NDT法またはICP法などの方法で、センサ座標系からワールド座標系への座標変換を決定することにより、LiDARセンサ110のポーズを決定する。

【0153】

(ステップS108)

自己位置推定モジュール162は、LiDARセンサ110のポーズに基づき、トラクタ100Aのポーズを計算し、結果を出力する。トラクタ100Aのポーズは、ワールド座標系で表現されたトラクタ100Aの代表点(原点)の座標(x, y, z)および姿勢(θ_R , θ_P , θ_Y)のデータであり得る。なお、環境地図およびスキャンデータが2次元空間(平面)における点群を表し、その2次元空間においてマッチングが行われる場合には、出力されるポーズデータは、2次元座標(x, y)および向き(θ)の値を含み得る。位置のみをマッチングで推定し、姿勢についてはIMUデータが示す姿勢の情報をそのまま利用してもよい。トラクタ100Aの座標系がセンサ座標系と一致している場合は、ステップS108は省略され得る。

【0154】

(ステップS109)

自己位置推定モジュール162は、動作終了の指令が出されているか否かを判断する。動作終了の指令は、例えばユーザが操作端末200を用いて自動走行モードの停止を指示したり、トラクタ100Aが目的地に到達したりした場合に出される。動作終了の指令が出されていない場合、ステップS103に戻り、次のスキャンデータについて同様の動作を実行する。動作終了の指令が出されている場合、処理を終了する。

【0155】

次に、駆動制御用のECU180の動作の例を説明する。

【0156】

図27は、トラクタ100Aのポーズが推定された後に実行されるECU180の動作の例を示すフローチャートである。図25に示すステップS108においてトラクタ100Aのポーズが出力されると、ECU180は、そのポーズのデータを取得する(ステップS121)。次に、ECU180は、当該ポーズデータが示すトラクタ100Aの位置と、ECU170によって予め決定された走行予定経路との偏差を算出する(ステップS122)。走行予定経路は、例えばユーザが操作端末200を操作することによって設定され得る。偏差は、その時点におけるトラクタ100Aの推定された位置と、走行予定経路との距離を表す。ECU180は、算出した位置の偏差が予め設定された閾値を超えるか否かを判断する(ステップS123)。偏差が閾値を超える場合、ECU180は、偏差が小さくなるように、駆動装置140の駆動値(例えば操舵角)を変更する。操舵角に加えて速度を変更してもよい。ステップS123において偏差が閾値を超えない場合、ステップS124は省略される。続くステップS125において、ECU180は、動作終了の指令を受けたか否かを判断する。動作終了の指令は、前述のように、例えばユーザが操作端末200を用いて自動走行モードの停止を指示したり、トラクタ100Aが目的地に到達したりした場合に出される。動作終了の指令が出されていない場合、ステップS121に戻り、次のスキャンデータに基づいて推定されたトラクタ100Aのポーズに基づ

10

20

30

40

50

いて、同様の動作を実行する。動作終了の指令が出されている場合、処理を終了する。

【0157】

図27の例では、ECU180は、推定された位置と走行予定経路との偏差のみに基づいて駆動装置140を制御するが、方位の偏差もさらに考慮して制御してもよい。例えば、ECU180は、取得したポーズデータが示すトラクタ100Aの推定された向きと、走行予定経路の方向との角度差である方位偏差が、予め設定された閾値を超える場合に、その偏差に応じて駆動装置140の駆動値（例えば操舵角）を変更してもよい。

【0158】

以下、図28Aから図28Dを参照しながら、ECU180による操舵制御の例を説明する。

【0159】

図28Aは、走行予定経路Pに沿って走行するトラクタ100Aの例を示す図である。図28Bは、走行予定経路Pから右にシフトした位置にあるトラクタ100Aの例を示す図である。図28Cは、走行予定経路Pから左にシフトした位置にあるトラクタ100Aの例を示す図である。図28Dは、走行予定経路Pに対して傾斜した方向を向いているトラクタ100Aの例を示す図である。

【0160】

図28Aに示すように、トラクタ100Aの位置および向きが走行予定経路Pから外れていない場合には、ECU180は、トラクタ100Aの操舵角および速度を変更せずに維持する。

【0161】

図28Bに示すように、トラクタ100Aの位置が走行予定経路Pから右側にシフトしている場合には、ECU180は、トラクタ100Aの走行方向が左寄りになるように、駆動装置140に含まれるステアリングモータの回転角を変更して操舵角を変更する。このとき、操舵角に加えて速度も併せて変更してもよい。操舵角の変化量は、例えば位置偏差 Δx の大きさに応じて調整され得る。

【0162】

図28Cに示すように、トラクタ100Aの位置が走行予定経路Pから左側にシフトしている場合には、ECU180は、トラクタ100Aの走行方向が右寄りになるように、ステアリングモータの回転角を変更して操舵角を変更する。この場合も、操舵角に加えて速度も併せて変更してもよい。操舵角の変化量は、例えば位置偏差 Δx の大きさに応じて調整され得る。

【0163】

図28Dに示すように、トラクタ100Aの位置は走行予定経路Pから大きく外れていないが、向きが走行予定経路Pの方向とは異なる場合は、ECU180は、方位偏差 $\Delta \theta$ が小さくなるように操舵角を変更する。この場合も、操舵角に加えて速度も併せて変更してもよい。操舵角の変化量は、例えば位置偏差 Δx および方位偏差 $\Delta \theta$ の大きさに応じて調整され得る。例えば、位置偏差 Δx の絶対値が小さいほど方位偏差 $\Delta \theta$ に応じた操舵角の変化量を大きくしてもよい。位置偏差 Δx の絶対値が大きい場合には、走行予定経路Pに戻るために操舵角を大きく変化させることになるため、必然的に方位偏差 $\Delta \theta$ の絶対値が大きくなる。逆に、位置偏差 Δx の絶対値が小さい場合には、方位偏差 $\Delta \theta$ をゼロに近づけることが必要であるため、操舵角の変化量を決定する際の方位偏差 $\Delta \theta$ の重みを相対的に大きくすることが妥当である。

【0164】

トラクタ100Aの操舵制御および速度制御には、PID制御またはMPC制御（モデル予測制御）などの制御技術が適用され得る。これらの制御技術を適用することにより、トラクタ100Aを走行予定経路Pに近付ける制御を滑らかにすることができる。

【0165】

なお、走行中に1つ以上の障害物センサ130によって障害物が検出された場合には、ECU180は、障害物を回避するように駆動装置140を制御する。障害物を回避でき

10

20

30

40

50

ない場合には、E C U 1 8 0 は、トラクタ 1 0 0 A を停止させる。なお、E C U 1 8 0 は、障害物が検出された場合に、障害物を回避できるか否かに関わらず、トラクタ 1 0 0 A を停止させてもよい。

【 0 1 6 6 】

＜走行予定経路の決定方法の例＞

続いて、E C U 1 7 0 によるトラクタ 1 0 0 A の走行予定経路の決定方法の例を説明する。

【 0 1 6 7 】

環境地図が作成された後、E C U 1 7 0 は、トラクタ 1 0 0 A の走行予定経路を決定する。走行予定経路は、E C U 1 7 0 が環境地図に基づいて自動で決定してもよいし、ユーザが操作端末 2 0 0 を操作して設定してもよい。

【 0 1 6 8 】

図 2 9 A は、環境地図に基づいて生成される、樹木列の幹分布を示す 2 次元データの例を示す図である。E C U 1 6 0 における地図データ生成モジュール 1 6 4 は、マッチング用の環境地図とは別に、図 2 9 A に示すような、幹部 2 2 の分布を大まかに示す 2 次元データを生成してもよい。この 2 次元データは、個々の樹木の幹部 2 2 が一定の大きさの円で表現されている。このような幹分布を示す 2 次元データを「幹分布データ」と称することがある。幹分布データは、例えば個々の幹の中心の位置座標 (x , y) の情報を含む。幹分布データは、位置座標に加えて、個々の幹の識別番号 (幹 I D) および幹の太さなどの情報を含んでもよい。そのような情報を含めることにより、幹の生育状況を管理することもできる。樹木の幹または葉などの生育状況は、例えば営農管理システム内のコンピュータによって管理され得る。この例のように、樹木の生育状況は、環境地図とは異なるデータで管理され得る。ユーザが操作端末 2 0 0 などのヒューマンマシンインタフェース (H M I) を用いて、樹間距離または幹部の位置座標などの、複数の樹木列の配置関係を示す情報を入力できるようにしてもよい。入力された情報は、記憶装置 1 5 0 または他の記憶媒体に記録される。

【 0 1 6 9 】

図 2 9 B は、幹分布データに基づく走行予定経路 3 0 の決定方法の一例を説明するための図である。この例における E C U 1 7 0 は、各樹木列の幹部 2 2 を繋いだ曲線を決定し、隣り合う 2 つの樹木列の中央部を通る曲線または折れ線を走行予定経路 3 0 として決定する。隣り合う 2 つの樹木の中央部をトラクタ 1 0 0 A の中心が必ず位置する必要はなく、走行予定経路 3 0 は、隣り合う 2 つの樹木間の中央部からシフトしていてもよい。駆動制御用の E C U 1 8 0 は、決定された走行予定経路 3 0 を基準に、トラクタ 1 0 0 A の操舵制御を行う。

【 0 1 7 0 】

図 3 0 は、経路設定用の幹分布データの他の例を示す図である。この例では、トラクタ 1 0 0 A の走行環境が複数のセルに分割されて管理される。各セルは、例えば幹部 2 2 の直径の平均値に近い辺の長さをもつ正方形であり得る。セルは、以下の (1) ～ (4) の 4 種類に分類される。

(1) 幹部 2 2 が含まれるセル

(2) 幹部 2 2 が含まれるセルに隣接するセル

(3) 隣り合う 2 つの樹木列の間に位置し、(1) および (2) に該当しないセル

(4) それ以外のセル

【 0 1 7 1 】

図 3 0 において、(1) ～ (4) のセルが、異なる濃さで表現されている。幹部 2 2 が含まれるセルに隣接するセル (2) の範囲は、L i D A R センサ 1 1 0 によって取得された樹木列の葉部を示す点群データに基づいて決定されてもよい。その場合、E C U 1 6 0 の地図データ生成モジュール 1 6 4 は、マッチング用の環境地図データとは別に、樹木列の幹部および葉部のそれぞれの 2 次元分布を示す格子状データを生成する。この例における E C U 1 7 0 は、図 3 0 に示すような格子状データに基づいてトラクタ 1 0 0 A の経路

を決定する。例えば、E C U 1 7 0 は、隣り合う 2 つの樹木列の間に位置する上記 (3) のセルを走行可能領域として設定する。E C U 1 8 0 は、走行可能領域の中央部付近を通るようにトラクタ 1 0 0 A の走行を制御する。

【 0 1 7 2 】

＜地図データ生成時の操舵制御＞

前述のように、本実施形態におけるトラクタ 1 0 0 A は、自動走行によって環境地図を作成するとき、自己位置推定と操舵制御とを行いながら、樹木列の幹部の分布を示す局所地図データを収集する。このとき、E C U 1 6 0 は、トラクタ 1 0 0 A が移動している間に L i D A R センサ 1 1 0 から繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、トラクタ 1 0 0 A の周囲の環境における樹木列の葉部をさらに検出し、検出した樹木列の葉部の分布を示すデータをさらに生成してもよい。その場合、E C U 1 8 0 は、検出された樹木列の幹部および葉部のそれぞれの分布に基づいて、トラクタ 1 0 0 A の操舵制御を行うことができる。E C U 1 8 0 は、例えば、検出された樹木列のうちの隣り合う 2 つの樹木列の間を通り、かつ樹木列の葉部との接触が低減される経路に沿ってトラクタ 1 0 0 A を移動させるようにトラクタ 1 0 0 A の操舵制御を行う。

【 0 1 7 3 】

この動作において、E C U 1 7 0 は、L i D A R センサ 1 1 0 からのセンサデータに基づいて検出された樹木列の幹部の分布から、隣り合う 2 つの樹木列の幹部の間を通る経路を決定する。例えば、隣り合う 2 つの樹木列の幹部の対の位置の中央部を通る経路を決定する。E C U 1 8 0 は、決定された経路に沿ってトラクタ 1 0 0 A を移動させるように、トラクタ 1 0 0 A の操舵制御を行う。これにより、局所地図データを収集しながら、自動走行を行うことができる。

【 0 1 7 4 】

トラクタ 1 0 0 A が走行する環境において、樹木列は必ずしも直線的に配置されているとは限らない。樹木列が曲線的に配置される場合もある。そのような場合、地図データを収集しながら自動走行するときに、左右の片側にしか樹木列が検出されない場合がある。そのような場合には、左右の樹木列の対を特定できないため、上記の方法では自動走行を継続することが難しい。

【 0 1 7 5 】

そこで、樹木列が曲線的に配置されている場合には、以下の制御が行われ得る。樹木列が曲線的に配置される場合、隣り合う 2 つの樹木列の一方について、2 つの樹木列の他方よりも少ない数の幹部が検出される。そのような場合には、E C U 1 7 0 は、検出された幹部の分布に基づいて、当該 2 つの樹木列の一方における隠れた幹部の分布を推定し、推定した分布に基づいて、トラクタ 1 0 0 A の経路を決定する。E C U 1 8 0 は、決定された経路に沿ってトラクタ 1 0 0 A が走行するようにトラクタ 1 0 0 A の操舵制御を行う。

【 0 1 7 6 】

図 3 1 A は、樹木列が曲線的に配置されている環境の一例を模式的に示す図である。図中の円柱は樹木の幹部を表し、太い破線は樹木列の概略的な配列を表し、点線は L i D A R センサ 1 1 0 から出射される複数のレイヤのレーザビームによるスキャンを模式的に表している。図 3 1 B は、図 3 1 A に示す環境において 1 回のスキャンで観測され得る点群を模式的に示す図である。この例においては、隣り合う 2 つの樹木列のうち、右側の樹木列については 3 本の幹部 2 2 R 1、2 2 R 2、2 2 R 3 が検出され、左側の樹木列については 1 本の幹部 2 2 L 1 のみが検出されている。左側の樹木列については、前方の樹木の幹部 2 2 L 1 によってレーザビームが遮られ、後方の樹木の幹部を検出することができない。

【 0 1 7 7 】

このような場合、E C U 1 7 0 は、相対的に多くの樹木が検出される右側の樹木列の配列から左側の隠れた樹木の幹部の位置を推定し、推定した幹部の位置に基づいて走行経路を決定する。例えば、スキャンデータに基づいて位置が特定される前方の隣り合う 2 つの幹部 2 2 R 1 および 2 2 L 1 の相対的な位置関係を、後方の隣り合う 2 つの幹部にも適用

することにより、隠れた幹部の位置を推定する。

【0178】

図31Cは、隠れた幹部の位置を推定することによって走行経路を決定する動作を説明するための図である。この例では、スキャンデータに基づいて取得された樹木列の幹部の2次元分布を示す幹分布データに基づいて、隠れた幹部の位置が推定される。図31Cには、スキャンデータに基づいて検出された樹木の幹部の位置が実線の円で示され、まだ検出されていない樹木の幹部の位置が破線の円で示されている。この例において、ECU170は、まず幹部22R1の位置から幹部22L1の位置までのベクトルV1を決定する。次に、後方の幹部22R2の位置を起点として、その位置からベクトルV1の分だけ変位した位置を、隠れた幹部の推定位置として決定する。図31Cにおいて、推定された隠れた幹部の位置が×印で示されている。ECU170は、例えば、当該位置と幹部22R2の位置との中点C1を通る経路を、トラクタ100Aの走行経路として決定する。

10

【0179】

このような方法で決定された経路に沿ってトラクタ100Aが走行すると、やがて幹部22L1によって隠れていた後方の幹部22L2がスキャンデータから検出される。さらに後方の幹部22L3はまだ検出されていないとする。幹部22L2の位置が推定位置(×印)とは異なる場合、ECU170は、幹部22L2と対を成す右側の幹部(図31Cの例では幹部22R3)を特定し、その幹部22R3から幹部22L2までのベクトルV2を決定する。次に、さらに後方の幹部22R4の位置を起点として、その位置からベクトルV2の分だけ変位した位置を、隠れた幹部22L3の位置として決定する。以上のような動作を繰り返すことにより、隠れた幹部の位置を推定して適切な経路を設定し、その経路に沿って自動操舵を行うことができる。

20

【0180】

図31Dは、樹木列が曲線的に配置されている場合における幹部の2次元分布を示す格子状データの一例を示す図である。ECU160は、環境地図を構築するためのデータを収集する過程で、図31Dに示すような格子状データを生成してもよい。その場合、ECU170は、このような格子状データに基づいて経路設定を行ってもよい。この例において、隠れた幹部の位置は、セルの大きさの単位で推定され得る。

【0181】

以上のような動作により、環境地図を作成しながら、比較的なめらかな操舵制御を行うことができる。

30

【0182】

<障害物回避動作>

次に、本実施形態における障害物回避動作を説明する。

【0183】

図32は、トラクタ100Aの走行環境に障害物40および人50が存在する状況の例を模式的に示す図である。トラクタ100Aは、1つ以上の障害物センサ130を備えている。走行中、障害物センサ130によって障害物40(例えばカゴ)、または人50を検出した場合、ECU180は、障害物40または人50を回避するように操舵制御を行う。回避しても障害物40、人50、枝部、または幹部22等との衝突を避けられない場合には、ECU180は、トラクタ100Aを停止させる。なお、ECU180は、障害物が検出された場合に、障害物を回避できる場合であってもトラクタ100Aを停止させてもよい。障害物センサ130によらず、LiDARセンサ110によって同様の検出を行ってもよい。

40

【0184】

図32に示す例では、人50が樹木の幹部22の近くに存在する。樹木の葉部も含めてマッチングが行われる場合には、葉部に人50またはその他の障害物が隠れてしまい、葉部か他の物体かの判別が難しいことがある。特に、人50が幹部22の近くの葉の中に立っている場合、判別が難しい。本実施形態では、幹部22の分布を示す環境地図を用いてマッチングが行われるので、幹部と他の物体との判別を容易にすることができる。スキャ

50

ンデータと環境地図とのマッチングによって検出された幹部以外の物体を、人または障害物として容易に検出することができる。このように、L i D A Rセンサ110を障害物センサとして利用することもできる。トラクタ100Aが複数のL i D A Rセンサ110を、トラクタ100Aの異なる箇所に備えている場合、障害物センサ130を省略してもよい。

【0185】

＜固有の幹間隔の組み合わせに基づく自己位置推定＞

以上の実施形態では、樹木の幹部の間隔がおおよそ一定であるものとしているが、現実には、樹木の幹部の間隔は場所によって異なり得る。そこで、E C U160は、自己位置推定を行うとき、センサデータから、固有の幹間隔の組み合わせを有する複数の樹木の幹部を検出し、当該固有の幹間隔の組み合わせを有する複数の樹木の幹部と、環境地図データから抽出した当該固有の幹間隔の組み合わせを有する複数の樹木の幹部とのマッチングにより、移動体の位置を推定してもよい。以下、図33Aおよび図33Bを参照して、この動作を説明する。

【0186】

図33Aは、トラクタ100Aによって検出される樹木列の幹部22の配置の例を示す図である。図33Bは、環境地図データが示す幹分布の例を示す図である。この例において、点線枠で囲まれた3つの幹部は、1.2mと1.5mという固有の幹間隔の組み合わせを有する。このような場合、E C U160は、自己位置推定を行うとき、取得したスキャンデータから検出された幹部22のそれぞれの間隔を計算し、固有の幹間隔の組み合わせを有する部分を決定する。そして、図33Bに示す環境地図から、決定した幹間隔の組み合わせを有する部分を検索して特定する。E C U160は、その固有の幹間隔を有する部分同士のマッチングにより、トラクタ100Aの現在の位置および向きを推定することができる。このような動作により、樹木列が固有の幹間隔の組み合わせを有する部分を含む場合に、マッチングの高速化および位置推定の精度の向上を図ることができる。樹木列における幹間隔の組み合わせを示す情報が予め記憶媒体に記録されていてもよい。そのような情報は、例えばE C U160が環境地図データに基づいて自動で記録してもよいし、ユーザが操作端末200を操作することによって記録してもよい。

【0187】

本実施形態において、トラクタ100Aが生成した環境地図データは、同一の環境内を走行する他のトラクタまたはトラクタ以外の移動体に提供することもできる。例えば広い果樹園において、複数の移動体によって作業を行う場合、環境地図を一台の移動体またはコンピュータが作成すれば十分であり、環境地図を複数の移動体で共有することが効率的である。1つの環境内の環境地図を構築するための局所地図を、複数のトラクタまたはその他の移動体によって分担して生成してもよい。その場合、複数の移動体によって生成された局所地図をまとめて1つの環境地図を生成するコンピュータがシステム内に設けられる。当該コンピュータは、生成した環境地図を、複数の移動体に、有線もしくは無線のネットワーク、または記憶媒体を介して配信してもよい。

【0188】

同一の環境内を複数の移動体が移動しながら作業するシステムにおいては、移動体ごとにセンサ座標系と移動体座標系との位置関係が異なり得る。同一の機種であっても、センサの取り付け位置の誤差に起因して、センサ座標系から移動体座標系への変換に誤差が生じ得る。そのような誤差の影響を低減するために、各移動体は、通常の運行を開始する前に、試運転によってセンサ座標系から移動体座標系への座標変換のためのパラメータを決定するキャリブレーションを実行する。

【0189】

本実施形態の技術は、ぶどう園などの果樹園を走行するトラクタに限らず、森林などの、複数の樹木列が存在する環境で使用される任意の移動体（例えば、移動ロボット、ドローン等）に適用することができる。この点については、以降の実施形態でも同様である。

【0190】

〔 3 - 2 . 実施形態 2 〕

次に、本開示の第 2 の実施形態による移動体を説明する。

〔 0 1 9 1 〕

本実施形態における移動体は、少なくとも 2 つの L i D A R センサを備え、それらの L i D A R センサから出力されるセンサデータに基づいて、自己位置推定および地図データの生成を行う。少なくとも 2 つの L i D A R センサの各々は、移動体の周囲の環境における物体の分布を示す 2 次元または 3 次元の点群データ、または距離分布データを出力する。移動体は、実施形態 1 と同様、複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、自己位置推定装置と、自己位置推定装置によって推定された移動体の位置に応じて移動体の移動を制御する制御装置とを備える。自己位置推定装置は、移動体が移動している間に少なくとも 2 つのセンサから繰り返し出力される点群データに基づいて、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部と環境地図データとのマッチングを行うことにより、移動体の位置を推定する。移動体はさらに、環境地図データ、または環境地図データを構築するための局所地図データを生成するデータ生成装置も備える。データ生成装置は、移動体が移動している間に少なくとも 2 つのセンサから繰り返し出力される点群データに基づいて、自己位置推定を行いながら、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録する。データ生成装置は、移動体が移動している間に繰り返し生成した局所地図データを統合することにより、ワールド座標系における環境地図データを生成して記憶装置に記録することもできる。

〔 0 1 9 2 〕

以下、移動体がぶどう園などの果樹園内を走行するトラクタである場合を例に、本実施形態の構成および動作を説明する。以下の説明において、実施形態 1 とは異なる点を中心に説明し、重複する事項についての説明は省略する。

〔 0 1 9 3 〕

図 3 4 は、本実施形態におけるトラクタ 1 0 0 B を側面方向から見た模式図である。このトラクタ 1 0 0 B は、車体前方下部に第 1 の L i D A R センサ 1 1 0 A を備え、キャビンの上部前方に第 2 の L i D A R センサ 1 1 0 B を備えている。それ以外の点は、図 7 に示す構成と同様である。図 3 4 には、図 7 に示されている連結装置 1 0 8 、および作業機 3 0 0 が示されていないが、本実施形態においてもこれらは使用され得る。

〔 0 1 9 4 〕

本実施形態における第 1 の L i D A R センサ 1 1 0 A および第 2 の L i D A R センサ 1 1 0 B の各々は、2 次元 L i D A R センサである。言い換えれば、L i D A R センサ 1 1 0 A 、 1 1 0 B の各々は、図 9 A に示す例において、 $N = 1$ の場合、すなわち 1 つの仰角の方向にのみレーザビームを出射する L i D A R センサ 1 1 0 と同等である。L i D A R センサ 1 1 0 A 、 1 1 0 B の各々は、各反射点までの距離と方向とを示すデータ、または、2 次元の点群データを出力する。2 次元の点群データは、L i D A R センサ 1 1 0 A 、 1 1 0 B のそれぞれのセンサ座標系で表現された複数の反射点の 2 次元座標の情報を含む。2 つの 2 次元 L i D A R を用いることにより、3 次元 L i D A R を用いる場合よりもコストを低減させることができる。

〔 0 1 9 5 〕

第 1 の L i D A R センサ 1 1 0 A は、トラクタ 1 0 0 B が走行する環境における樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載されている。第 2 の L i D A R センサ 1 1 0 B は、当該樹木列の幹部の平均高さよりも高い位置に搭載されている。第 1 の L i D A R センサ 1 1 0 A は、例えば地上から 1 0 c m 以上 1 5 0 c m 以下、ある例では 1 5 c m 以上 1 0 0 c m 以下の高さに配置され得る。第 2 の L i D A R センサ 1 1 0 B は、例えば地上から 1 5 0 c m よりも高い位置（例えば地上から約 2 m ）に配置され得る。

〔 0 1 9 6 〕

第 1 の L i D A R センサ 1 1 0 A は、実施形態 1 における L i D A R センサ 1 1 0 と同様、トラクタ 1 0 0 B の前方に向けてレーザパルスを出射するように配置される。図 3 4

の例における第1のLiDARセンサ110Aは、地面にほぼ平行にレーザパルスを出射する。トラクタ100Bが平坦な地面に位置しているとき、第1のLiDARセンサ110Aから出射されるレーザパルスの出射方向と地面とのなす角度は、例えば±20度の範囲内、ある例では±10度の範囲内に設定され得る。

【0197】

一方、第2のLiDARセンサ110Bは、トラクタ100Bの前方斜め下に向けてレーザパルスを出射するように配置される。図34の例における第2のLiDARセンサ110Bは、地面から約25度傾いた方向にレーザパルスを出射する。トラクタ100Bが平坦な地面に位置しているとき、第2のLiDARセンサ110Bから出射されるレーザパルスの出射方向と地面とのなす角度は、例えば10度以上45度以下の範囲に設定され得る。

10

【0198】

図35は、本実施形態におけるトラクタ100Bの概略的な構成の例を示すブロック図である。図35に示す構成例では、トラクタ100Bが2つのLiDARセンサ110A、110Bを備えている点で、図8に示す構成とは異なる。

【0199】

ECU160は、上記の自己位置推定装置およびデータ生成装置として機能する。ECU160は、2つのLiDARセンサ110A、110Bから繰り返し出力される点群データから、最新スキャンを含む複数スキャンの入力点群を取得し、複数スキャンの入力点群と環境地図データとのマッチングを行う。これにより、走行中のトラクタ100Bの位置および向きを推定することができる。なお、ECU160は、マッチングによってトラクタ100Bの位置のみを推定し、向きについてはIMU125から出力された信号に基づいて決定してもよい。

20

【0200】

環境地図を構築する過程において、ECU160は、トラクタ100Bが移動している間に2つのLiDARセンサ110A、110Bから繰り返し出力されるスキャンデータに基づいて、自己位置推定を行いながら、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置150に記録する。この動作が行われている間、ECU170は、スキャンデータに基づいて検出された樹木列の幹部の間を通る目標経路を設定する。ECU180は、設定された目標経路に従って駆動装置140を制御することにより、トラクタ100Bを目標経路に沿って走行させる。ECU170は、障害物センサ130から出力される信号、またはLiDARセンサ110A、110Bの一方または両方から出力されるスキャンデータに基づいて障害物を検出し、障害物との接触を回避するように目標経路を設定してもよい。ECU160は、繰り返し生成した局所地図データを繋ぎ合わせることで、環境地図データを生成して記憶装置150に記録する。なお、樹木列の幹部の検出は、局所地図データを生成する段階ではなく、環境地図データを生成する段階で行ってもよい。また、局所地図データに基づいて環境地図データを生成する処理は、外部のコンピュータが実行してもよい。

30

【0201】

環境地図が構築された後の自動走行または自動操舵の動作中、ECU160は、LiDARセンサ110A、110Bから繰り返し出力されるスキャンデータに基づいて樹木列の幹部を検出し、検出した幹部と環境地図データが示す幹部とのマッチングを行うことにより、自己位置推定を行う。ECU180は、ECU170によって予め決定された走行予定経路に沿ってトラクタ100Bを走行させる。この場合も、ECU170は、トラクタ100Bの走行中に障害物センサ130から出力される信号、またはLiDARセンサ110A、110Bの一方または両方から出力されるスキャンデータに基づいて障害物を検出し、障害物との接触を回避するように走行予定経路を変更してもよい。

40

【0202】

図36Aから図36Cは、トラクタ100Bが樹木21の近くを走行する様子を模式的

50

に示す図である。図36A、図36B、図36Cの順に、トラクタ100Bが樹木21に近付いている。これらの図において、破線は、LiDARセンサ110A、110Bから出射されるレーザビームを表している。図示されるように、トラクタ100Bと樹木21との距離に応じて、第2のLiDARセンサ110Bから出射されるレーザビームによって照射される樹木21の幹部22の照射点の位置が、高さ方向に変化する。一方、第1のLiDARセンサ110Aから出射されるレーザビームによって照射される樹木21の幹部22の照射点の位置の変化は相対的に小さい。これらのレーザビームの複数回のスキャンによって取得される点群データを組み合わせることにより、3次元LiDARを用いた場合と同様に、幹部22の表面における反射点の3次元分布を示す点群データを取得することができる。

10

【0203】

本実施形態におけるECU160は、LiDARセンサ110A、110Bのそれぞれから出力された所定のスキャン回数分（例えば3回分または5回分等）のスキャンデータを蓄積し、蓄積されたスキャンデータと、環境地図データとのマッチングを行うことにより、自己位置推定を行ってもよい。このようにすることで、実質的に3次元LiDARを用いた場合と同様の高い精度の自己位置推定が可能になる。

【0204】

地図データを取得するためにトラクタ100Bが走行している間、ECU170は、LiDARセンサ110A、110Bの一方または両方から出力された数スキャン分のスキャンデータに基づいて、トラクタ100Bの局所的な目標経路を決定する。例えば、LiDARセンサ110A、110Bの一方または両方から出力された数スキャン分のスキャンデータが示す点群の配置から、隣り合う2つの樹木間の中心位置を決定し、その中心位置を通るようにトラクタ100Bの局所的な目標経路を決定することができる。このような経路設定により、トラクタ100Bは、左右の樹木列との距離が概ね等しい状態を保ちながら自律的に走行することができる。

20

【0205】

幹部の検出は、第1のLiDARセンサ110Aから出力されるスキャンデータのみに基づいて行われてもよい。相対的に低い位置にある第1のLiDARセンサ110Aから出力されるスキャンデータは、幹部の表面を表す点群の情報を多く含むことが多い。このため、第1のLiDARセンサ110Aからのスキャンデータのみを用いた場合でも幹部の分布情報を取得することができる。

30

【0206】

本実施形態における第2のLiDARセンサ110Bは、相対的に高い位置に配置されているため、樹木列の葉部の検出に適している。そこで、ECU160は、第2のLiDARセンサ110Bによって取得された点群データに基づいて、樹木列の葉部の分布を示すデータを生成し、記憶装置150または他の記憶媒体に記録してもよい。そのようなデータは、樹木の生育状況の管理（例えば、キャノピーマネジメント）のために使用され得る。

【0207】

トラクタ100Bの走行中に、第2のLiDARセンサ110Bによって取得された点群データに基づいて、樹木列の葉部などの、比較的高い位置に存在する障害物を検出し、回避または停止する動作を行ってもよい。トラクタ100Bの前方上部に障害物センサ130が設けられていない場合、第2のLiDARセンサ110Bが設けられていなければ、樹木列間の経路の上方にはみだした樹木の葉または蔓を検出して避けることが難しい。第2のLiDARセンサ110Bを設けることにより、それらの葉または蔓を検出することが容易になる。

40

【0208】

本実施形態によれば、2つの2次元LiDARを用いることにより、低いコストで実施形態1と同様の動作を実現することができる。なお、2つに限らず、3つ以上の2次元LiDARを異なる位置に設けてもよい。また、1つ以上の2次元LiDARと1つ以上の

50

3次元LiDARとを組み合わせ使用してもよい。このように、本実施形態の構成には多様な変形が可能である。なお、実施形態1について説明した種々の技術は、本実施形態においてもそのまま適用できる。

【0209】

〔3-3. 実施形態3〕

次に、本開示の第3の実施形態を説明する。

【0210】

本実施形態は、1台または複数台の移動体（例えばドローン）を用いて、環境地図データを構築するための局所地図データを収集し、収集された局所地図データに基づいて環境地図データを生成するシステムに関する。

【0211】

図37は、本実施形態のシステムの構成例を模式的に示す図である。本システムは、1台以上のドローン400と、1台以上のトラクタ100Cと、サーバコンピュータ500（以下、「サーバ500」と称する。）とを備える。これらの構成要素は、有線または無線のネットワーク60を介して、互いに通信可能に接続されている。図37には、2台のドローン400および3台のトラクタ100Cが示されているが、ドローン400およびトラクタ100Cのそれぞれの台数は任意である。各ドローン400は、各トラクタ100Cが走行する環境内を飛行しながら環境地図データを構築するための局所地図データを生成し、サーバ500に送信する。サーバ500は、1台以上のドローン400から受信した局所地図データに基づいて、統一されたワールド座標系で表現された環境地図データを生成し、各トラクタ100Cに配信する。各トラクタ100Cは、配信された環境地図データに基づいて果樹園内を自律的に走行する。

【0212】

図38は、本システムの構成例を示すブロック図である。この例におけるトラクタ100Cは、図8に示す実施形態1のトラクタ100Aと同様の構成要素を備える。ただし、本実施形態におけるECU160は、地図データ生成モジュール164を備えていない。通信IF190は、ネットワーク60を介してサーバ500と通信を行う。記憶装置150は、サーバ500から配信された環境地図データを記憶する。なお、図38では、トラクタ100Cに連結されて使用される作業機の図示は省略されている。通信IF190は、実施形態1と同様、トラクタ100Cに接続された作業機との通信を行ってもよい。

【0213】

ドローン400は、データ生成ユニット450と、駆動装置440と、制御装置480と、通信IF490とを備える。駆動装置440は、例えば駆動用の電気モータ、および複数のプロペラなどの、ドローン400の飛行に必要な種々の装置を含む。制御装置480は、データ生成ユニット450および駆動装置440の動作を制御する。通信IF490は、ネットワーク60を介してサーバ500と通信するための回路である。データ生成ユニット450は、LiDARセンサ410と、データ生成装置460とを備える。LiDARセンサ410は、実施形態1におけるLiDARセンサ110と同様の機能を備える。データ生成装置460は、実施形態1におけるECU160と同様の機能を備える。すなわち、データ生成装置460は、自己位置推定と地図生成とを同時に行う機能を備える。ただし、データ生成装置460は、最終的な環境地図データの生成を行わない。データ生成装置460は、プロセッサとメモリ等の記憶媒体とを備える。データ生成装置460は、ドローン400の飛行中にLiDARセンサ410から繰り返し出力されたスキャンデータに基づいて、複数の樹木列の幹部の分布を示す局所地図データを繰り返し生成して記憶媒体に蓄積する。蓄積された局所地図データは、例えばユーザによる操作により、通信IF490からサーバ500に送信される。

【0214】

サーバ500は、例えばクラウドサーバまたはエッジサーバなどの、トラクタ100Cおよびドローン400から離れた場所に設置されたコンピュータであり得る。サーバ500は、記憶装置550と、処理装置560と、通信IF590とを備える。通信IF590

10

20

30

40

50

0は、ネットワーク60を介してトラクタ100Cおよびドローン400と通信するための回路である。処理装置560は、複数のドローン400から取得した局所地図データを、座標系を統一して統合することにより、環境地図データを生成し、記憶装置550に記録する。処理装置560は、生成した環境地図データを、通信IF590から複数のトラクタ100Cに配信する。処理装置560は、環境地図データをトラクタ100C以外の移動体に配信してもよい。例えば、ドローン400が、地図データの収集だけでなく、播種、施肥、または防除などの作業も実行する場合には、ドローン400に環境地図データが配信されてもよい。その場合、ドローン400は、LiDARセンサ410から出力されたスキャンデータと、環境地図データとのマッチングによって自己位置推定を行いながら自律的に飛行し、所定の作業を実行することができる。

10

【0215】

図39は、ドローン400の外観の例を示す斜視図である。このドローン400は、本体の前面にデータ生成ユニット450を備える。データ生成ユニット450は、LiDARセンサ410を備えており、飛行しながらレーザビームで周囲の環境をスキャンすることができる。

【0216】

図40は、複数のドローン400によるデータ収集作業の様子を模式的に示す斜視図である。図40には、複数の樹木列20の間を飛行する2台のドローン400が例示されている。これらのドローン400は、樹木列20の間を低空飛行で自律的に移動しながら、樹木列20の幹部をレーザビームでスキャンすることにより、幹部の分布を示す局所地図データを生成する動作を繰り返す。局所地図データの生成方法は、実施形態1における方法と同様である。

20

【0217】

図41は、ドローン400に搭載されたLiDARセンサ410から出射されたレーザビームによって樹木21が照射されている様子を模式的に示す図である。本実施形態におけるドローン400は、LiDARセンサ410が、樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置を保つ高度で飛行するようにプログラミングされている。LiDARセンサ410が、例えば地上から15cm以上100cm以下の高さに位置するように、ドローン400の高度が制御される。データ生成装置460は、このような低い高度に位置するLiDARセンサ410から繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、自己位置推定を行いながら、ドローン400の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す局所地図データを生成して記憶媒体に記録する。データ生成装置460は、LiDARセンサ410から繰り返し出力されるセンサデータから複数スキャンの入力点群を取得し、最新スキャンを含む少なくとも1つのスキャンの入力点群と、前回以前に生成された局所地図データとのマッチングを行うことにより、自己位置推定を行う。

30

【0218】

図42は、各ドローン400から出力される局所地図データの形式の一例を示す図である。この例における局所地図データは、ドローン400の識別番号である移動体IDと、ワールド座標系におけるドローン400の位置(x , y , z)および姿勢(θ_R , θ_P , θ_Y)と、反射点ごとに記録される情報とを含む。反射点ごとに記録される情報は、図23に示す情報と同様であるが、各反射点の座標は、ドローン400のLiDARセンサ410に固定されたセンサ座標系における座標(u , v , w)である。このような局所地図データが、各ドローン400からサーバ500に送信され得る。なお、分類および幹IDなどの、その点が幹であるか否かに関する情報は、局所地図データに含まれていなくてもよい。サーバ500における処理装置560が、複数のドローン400から局所地図データを取得した後、点群の分布の特徴に基づいて幹部に該当する点群を検出してもよい。

40

【0219】

以上の構成により、例えば広い果樹園においても、環境地図を構築するためのデータを効率的に収集することができる。

【0220】

50

なお、本実施形態では、ドローン400だけでなく、トラクタ100Cなどの他の移動体も、環境地図データを構築するための局所地図データを取得する動作を行ってもよい。また、局所地図データを生成する移動体は、必ずしも自律的に移動可能な移動体でなくてもよい。例えば、樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載された1つ以上のLiDARセンサを備えたトラクタまたはドローンなどの移動体を、ユーザが運転または操縦することによって局所地図データを生成してもよい。

【0221】

サーバ500を設けることなく、ドローン400またはトラクタ100Cなどの移動体が最終的な環境地図データを生成し、他の移動体に環境地図データを提供してもよい。その場合には、移動体間の通信によって環境地図データが直接的に送受信され得る。

【0222】

〔3-4. 他の実施形態〕

以上の実施形態において、各トラクタは、無人トラクタであってもよい。その場合には、キャビン、運転席、ステアリングホイール、操作端末などの、有人運転にのみ必要な構成要素は、トラクタに設けられていなくてもよい。無人トラクタは、自律走行、またはトラクタのユーザによる遠隔操作によって、前述の各実施形態における動作と同様の動作を実行してもよい。

【0223】

以上の実施形態において、移動体が備える1つ以上のセンサは、レーザビームのスキャンによって2次元または3次元の点群データまたは距離分布データをセンサデータとして出力するLiDARセンサである。しかし、センサはそのようなLiDARセンサに限定されない。例えば、フラッシュ型のLiDARセンサ、またはイメージセンサなどの他の種類のセンサを利用してもよい。そのような他の種類のセンサを、スキャン型のLiDARセンサと組み合わせて利用してもよい。

【0224】

以上の実施形態における自己位置推定および自律移動（もしくは自動操舵）、または地図データ生成に必要な処理を実行する装置を、それらの機能を有しない移動体に後から取り付けることもできる。例えば、複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御する制御ユニットを、当該移動体に取り付けて使用することができる。そのような制御ユニットは、移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを出力する1つ以上のセンサと、複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、自己位置推定装置と、自己位置推定装置によって推定された移動体の位置に応じて移動体の移動を制御する制御装置とを備える。自己位置推定装置は、移動体が移動している間に1つ以上のセンサから繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部と環境地図データとのマッチングを行うことにより、移動体の位置を推定する。また、地図データを生成するデータ生成ユニットを、複数の樹木列の間を移動する移動体に取り付けて使用することもできる。そのようなデータ生成ユニットは、移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを出力する1つ以上のセンサと、データ生成装置とを備える。データ生成装置は、移動体が移動している間に1つ以上のセンサから繰り返し出力されるセンサデータに基づいて、自己位置推定を行いながら、移動体の周囲の環境における樹木列の幹部を検出し、検出した樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録する。

【0225】

以上のように、本開示は、以下の項目に記載の移動体、制御ユニット、データ生成ユニット、方法、およびコンピュータプログラムを含む。

【0226】

〔項目1〕

複数の樹木列の間を移動する移動体であって、

前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを

10

20

30

40

50

出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、

前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、

前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する自己位置推定装置と、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、
を備える移動体。

【0227】

〔項目2〕

複数の樹木列の間を移動する移動体であって、

前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサと、

前記移動体が移動している間に前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の位置を推定しながら、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録するデータ生成装置と、

を備える移動体。

【0228】

〔項目3〕

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置をさらに備える、項目2に記載の移動体。

【0229】

〔項目4〕

前記少なくとも2つのLiDARセンサは、

前記樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載された第1のLiDARセンサと、
前記樹木列の幹部の平均高さよりも高い位置に搭載された第2のLiDARセンサと、
を含む、項目1から3のいずれかに記載の移動体。

【0230】

〔項目5〕

前記第1のLiDARセンサは、地上から15cm以上100cm以下の高さに配置されている、項目4に記載の移動体。

【0231】

〔項目6〕

前記第1のLiDARセンサは、前記移動体の前方に向けてレーザパルスを出射するように配置され、

前記第2のLiDARセンサは、前記移動体の前方斜め下に向けてレーザパルスを出射するように配置されている、

項目4または5に記載の移動体。

【0232】

〔項目7〕

前記第1のLiDARセンサおよび前記第2のLiDARセンサの各々は、2次元点群データを出力する2次元LiDARセンサである、項目1から6のいずれかに記載の移動体。

【0233】

〔項目8〕

前記自己位置推定装置は、前記少なくとも2つのLiDARセンサから繰り返し出力される前記点群データから、最新スキャンを含む複数スキャンの入力点群を取得し、前記複数スキャンの入力点群と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動

10

20

30

40

50

体の位置を推定する、項目 1 から 7 のいずれかに記載の移動体。

【0234】

〔項目 9〕

前記制御装置は、前記少なくとも 2 つの L i D A R センサの少なくとも 1 つから出力された前記点群データに基づいて、前記移動体の経路上に障害物が存在するか否かを判断し、前記障害物が存在すると判断したとき、前記移動体に、前記障害物に衝突することを回避する動作を実行させる、項目 1 または 3 に記載の移動体。

【0235】

〔項目 10〕

前記少なくとも 2 つの L i D A R センサは、
前記樹木列の幹部の平均高さよりも低い位置に搭載された第 1 の L i D A R センサと、
前記樹木列の幹部の平均高さよりも高い位置に搭載された第 2 の L i D A R センサと、
を含み、

前記制御装置は、前記第 2 の L i D A R センサから出力された前記点群データに基づいて、前記移動体の経路上に障害物が存在するか否かを判断し、前記障害物が存在すると判断したとき、前記移動体に、前記障害物に衝突することを回避する動作を実行させる、項目 1 または 3 に記載の移動体。

【0236】

〔項目 11〕

複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御する制御ユニットであって、
前記移動体に取り付けられて使用され、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す 2 次元または 3 次元の点群データを出力する少なくとも 2 つの L i D A R センサと、
前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを記憶する記憶装置と、
前記移動体が移動している間に前記少なくとも 2 つのセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定する自己位置推定装置と、
推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御する制御装置と、
を備える制御ユニット。

【0237】

〔項目 12〕

複数の樹木列の間を移動する移動体において使用されるデータ生成ユニットであって、
前記移動体に取り付けられて使用され、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示す 2 次元または 3 次元の点群データを出力する少なくとも 2 つの L i D A R センサと、
前記移動体が移動している間に前記少なくとも 2 つのセンサから繰り返し出力される前記点群データに基づいて、前記移動体の位置を推定しながら、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出し、検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成して記憶装置に記録するデータ生成装置と、
を備えるデータ生成ユニット。

【0238】

〔項目 13〕

複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御する方法であって、
前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを取得することと、
前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2 次元または 3 次元の点群データを出力する少なくとも 2 つの L i D A R センサから取得することと、
取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、
検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定することと、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御することと、を含む方法。

【0239】

〔項目14〕

複数の樹木列の間を移動する移動体によって実行される方法であって、

前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサから取得することと、

取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、

検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成することと、

前記局所地図データを記憶装置に記録することと、を含む方法。

【0240】

〔項目15〕

複数の樹木列の間を移動する移動体の動作を制御するコンピュータによって実行されるコンピュータプログラムであって、

前記コンピュータに、

前記複数の樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを取得することと、

前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサから取得することと、

取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、

検出した前記樹木列の幹部と前記環境地図データとのマッチングを行うことにより、前記移動体の位置を推定することと、

推定された前記移動体の位置に応じて前記移動体の移動を制御することと、を実行させるコンピュータプログラム。

【0241】

〔項目16〕

複数の樹木列の間を移動する移動体におけるコンピュータによって実行されるコンピュータプログラムであって、

前記コンピュータに、

前記移動体が移動している間に、前記移動体の周囲の環境における物体の分布を示すセンサデータを、前記移動体に搭載された、2次元または3次元の点群データを出力する少なくとも2つのLiDARセンサから取得することと、

取得した前記センサデータに基づいて、前記移動体の周囲の環境における前記樹木列の幹部を検出することと、

検出した前記樹木列の幹部の分布を示す環境地図データを生成するための局所地図データを生成することと、

前記局所地図データを記憶装置に記録することと、を実行させるコンピュータプログラム。

【0242】

〔項目17〕

各々が項目3に記載の移動体である1台以上の移動体によって生成された前記局所地図データを取得することと、

取得した前記局所地図データを統合することにより、前記環境地図データを生成することと、

前記環境地図データを記憶装置に記録することと、

10

20

30

40

50

を含む方法。

【0243】

〔項目18〕

前記環境地図データを、前記1台以上の移動体、または他の移動体に配信することをさらに含む、項目17に記載の方法。

【産業上の利用可能性】

【0244】

本開示の技術は、例えばぶどう園などの果樹園のように、複数の樹木列が存在する環境を移動するトラクタ、ドローン、歩行ロボットなどの移動体に適用することができる。

【符号の説明】

【0245】

- 20 樹木列
- 22 樹木の幹部
- 30 走行経路
- 40 障害物
- 50 人
- 60 ネットワーク
- 100 移動体
- 100A、100B トラクタ
- 101 車両本体
- 102 原動機（エンジン）
- 103 変速装置（トランスミッション）
- 104 車輪
- 105 キャビン
- 106 操舵装置
- 107 運転席
- 108 連結装置
- 110、110A、110B LiDARセンサ
- 111 レーザユニット
- 112 レーザ光源
- 113 光検出器
- 114 モータ
- 115 制御回路
- 116 信号処理回路
- 117 メモリ
- 120 GNSSユニット
- 125 慣性計測装置（IMU）
- 130 障害物センサ
- 140 駆動装置
- 150 記憶装置
- 160 電子制御ユニット（SLAM）
- 162 自己位置推定モジュール
- 164 地図データ生成モジュール
- 170 電子制御ユニット（経路決定）
- 180 電子制御ユニット（駆動制御）
- 190 通信インターフェース（IF）
- 200 操作端末
- 300 作業機（インプルメント）
- 340 駆動装置
- 380 制御装置

10

20

30

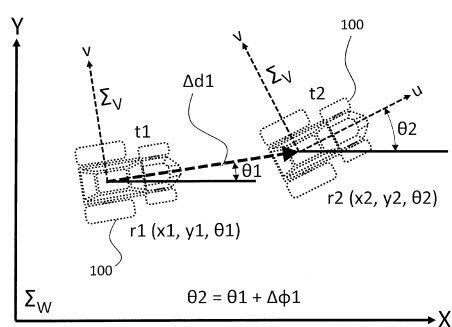
40

50

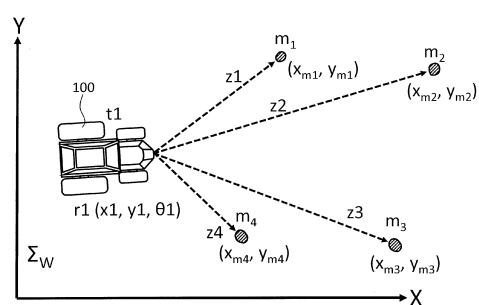
390	通信インタフェース（ＩＦ）
400	ドローン
410	ＬｉＤＡＲセンサ
440	駆動装置
450	データ生成ユニット
460	データ生成装置
480	制御装置
490	通信ＩＦ
500	サーバ
550	記憶装置
560	処理装置
590	通信ＩＦ

【図面】

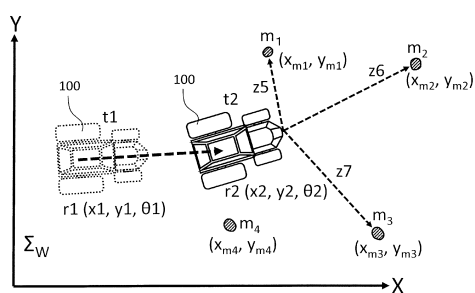
【図 1】



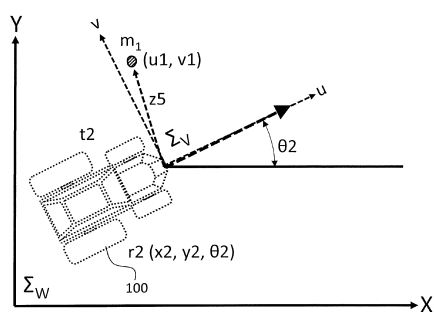
【図 2 A】



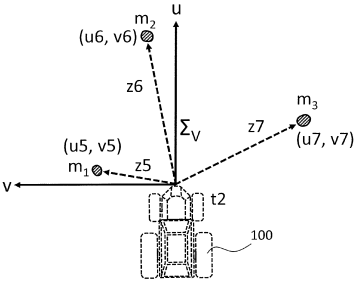
【図 2 B】



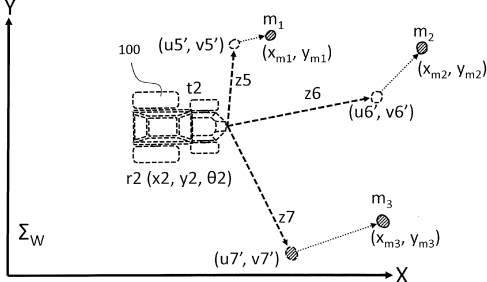
【図 3】



【図 4】

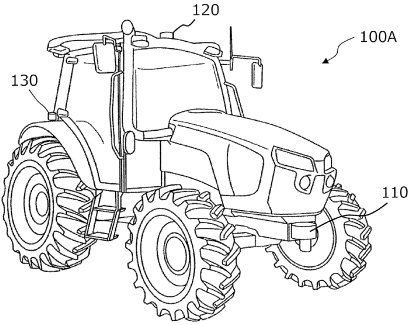


【図 5】

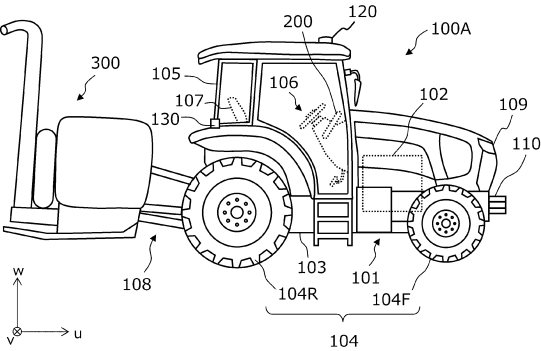


10

【図 6】



【図 7】



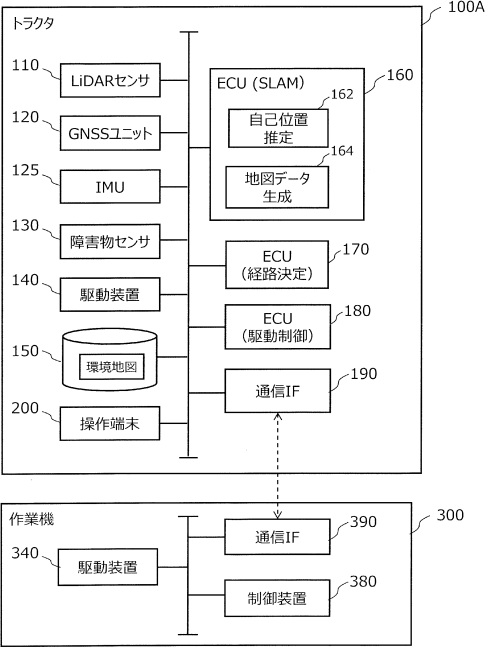
20

30

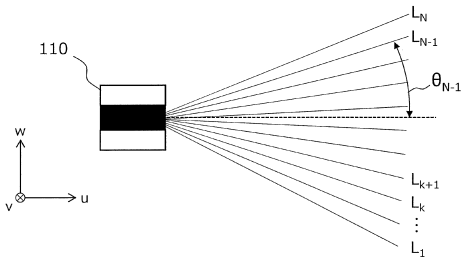
40

50

【図 8】



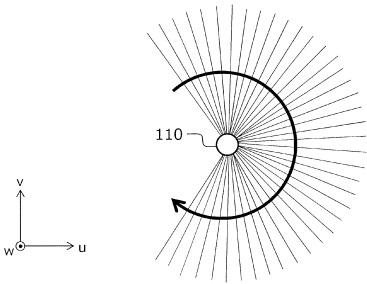
【図 9 A】



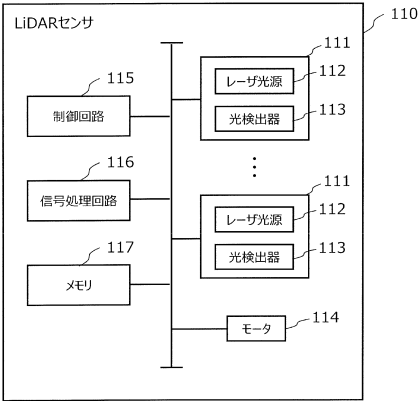
10

20

【図 9 B】



【図 10】

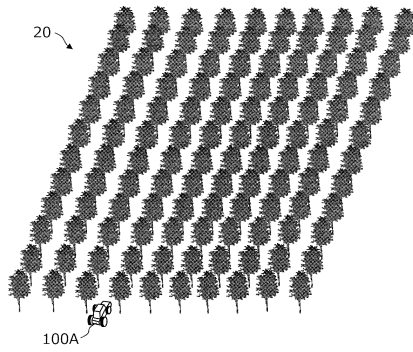


30

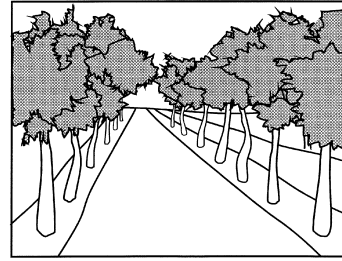
40

50

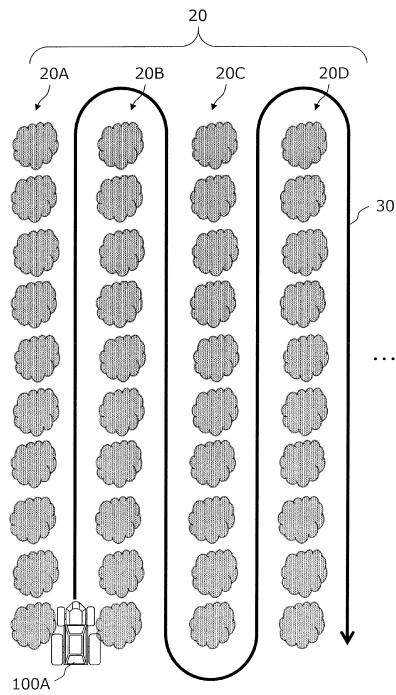
【図 1 1】



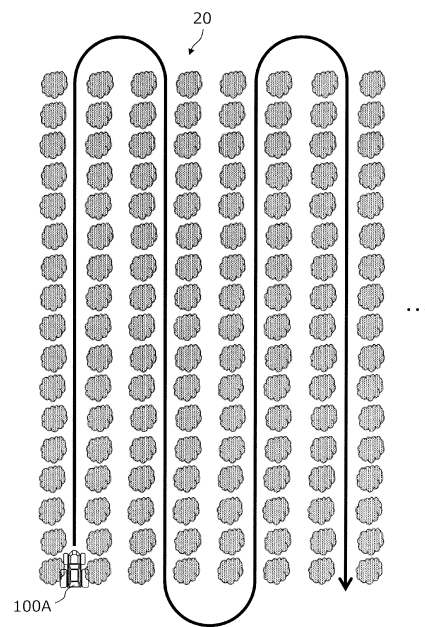
【図 12】



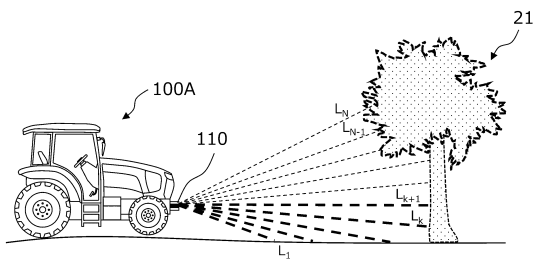
【図 13 A】



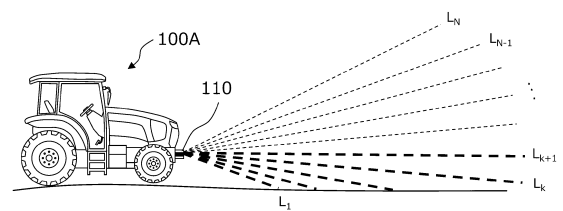
【図 13 B】



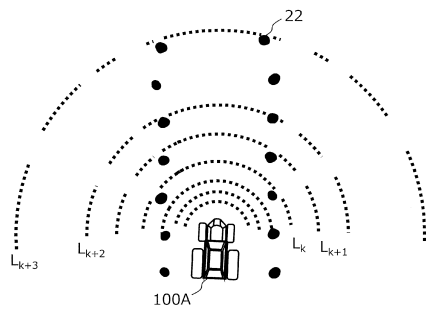
【図 14 A】



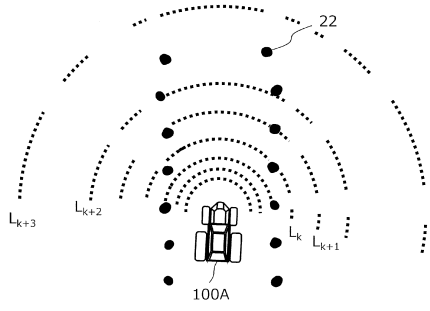
【図 14 B】



【図 1 5 A】

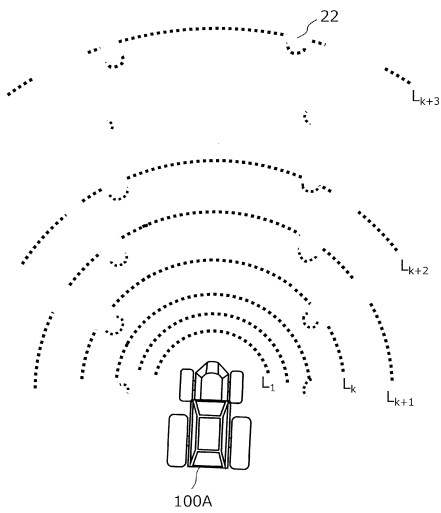


【図 1 5 B】

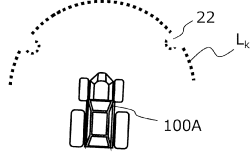


10

【図 1 6】

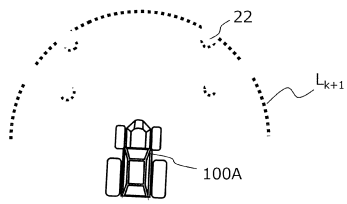


【図 1 7 A】

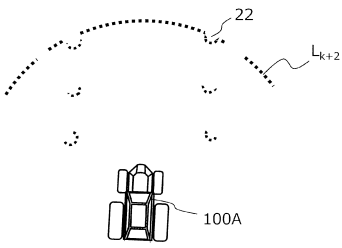


20

【図 1 7 B】



【図 1 7 C】

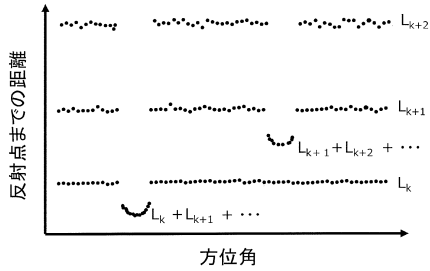


30

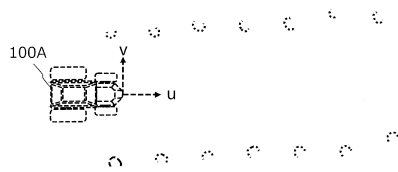
40

50

【図 18】

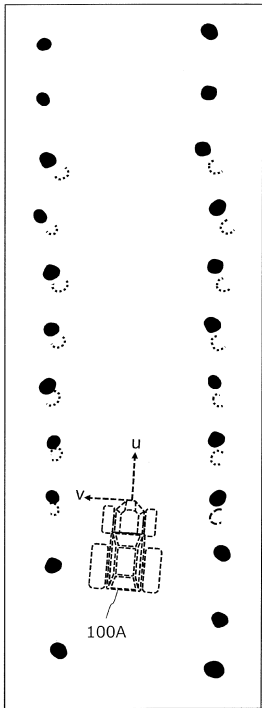


【図 19】

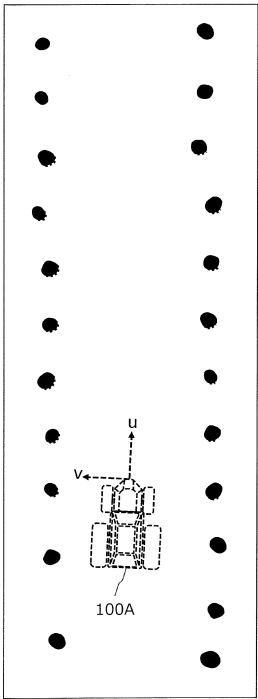


10

【図 20 A】



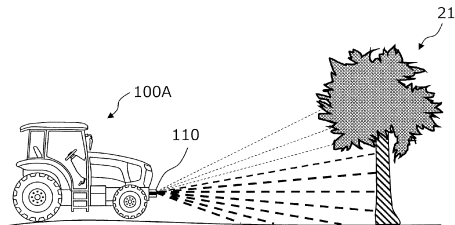
【図 20 B】



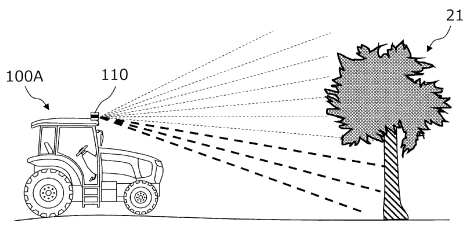
20

30

【図 21 A】



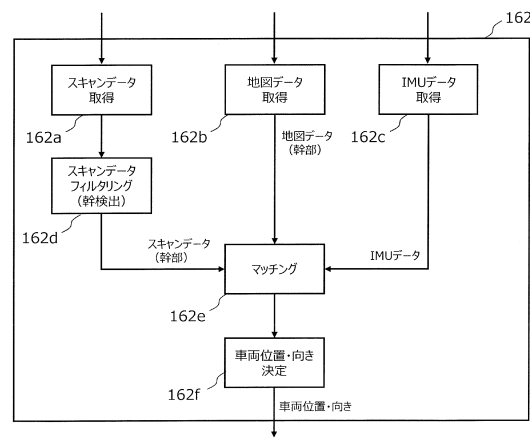
【図 21 B】



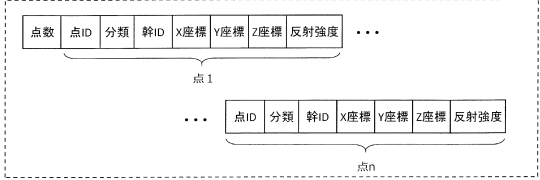
40

50

【図 2 2】

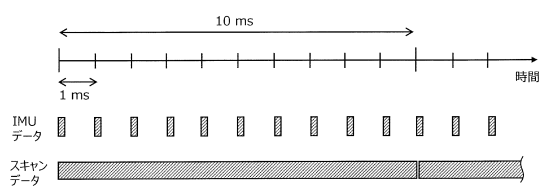


【図 2 3】

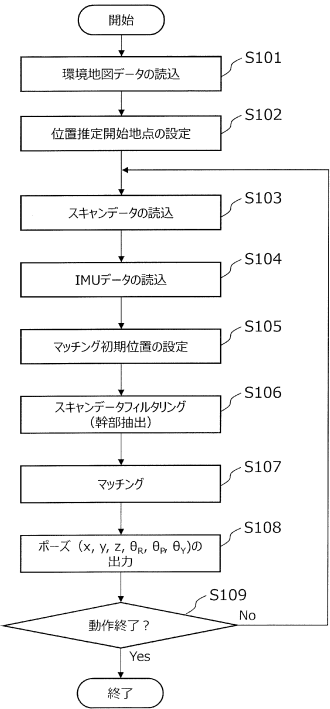


10

【図 2 4】



【図 2 5】



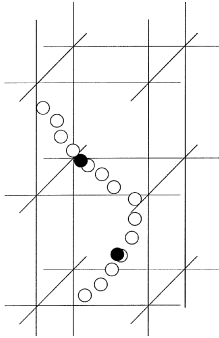
20

30

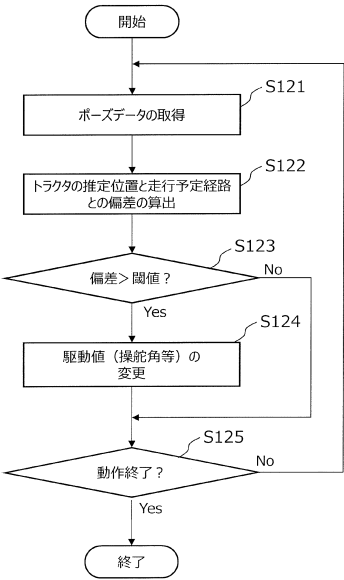
40

50

【図 2 6】

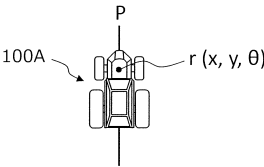


【図 2 7】

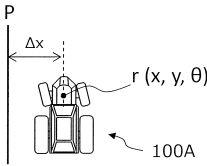


10

【図 2 8 A】

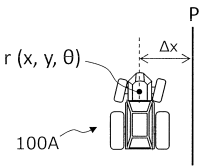


【図 2 8 B】

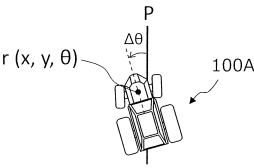


20

【図 2 8 C】



【図 2 8 D】

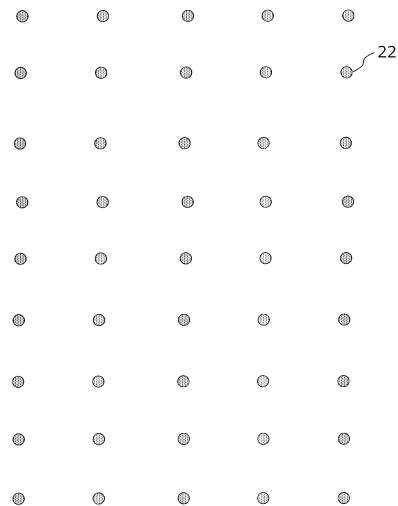


30

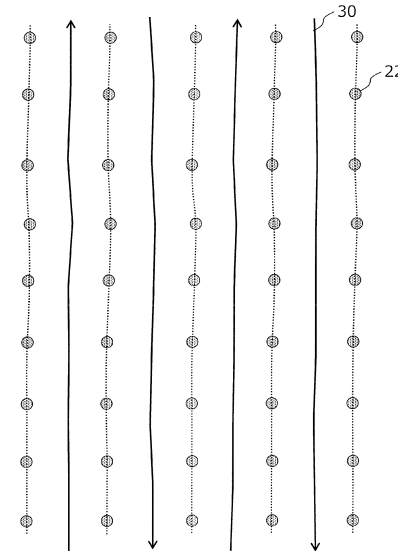
40

50

【図 29 A】

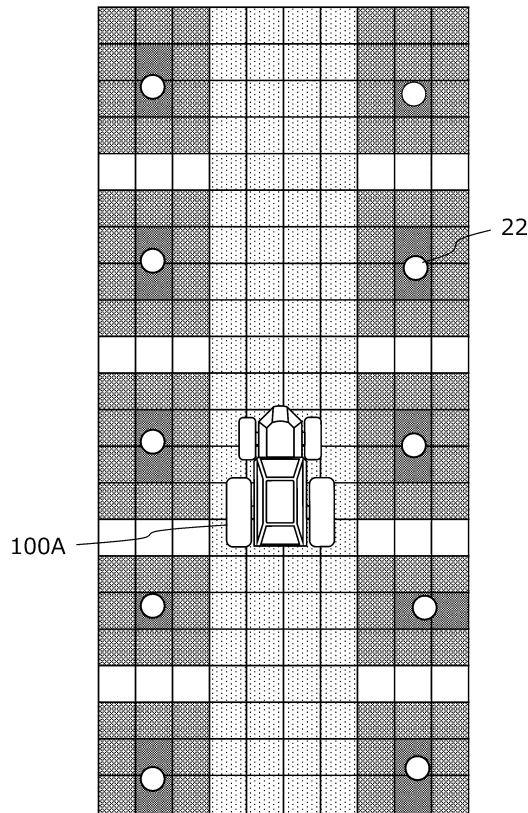


【図 29 B】

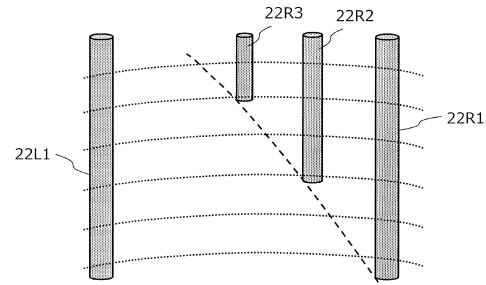


10

【図 30】



【図 31 A】



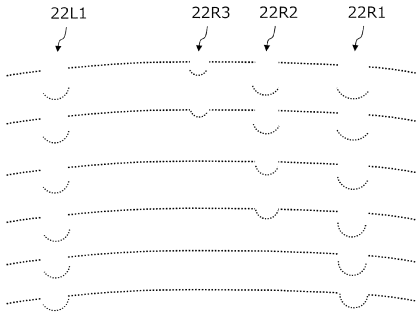
20

30

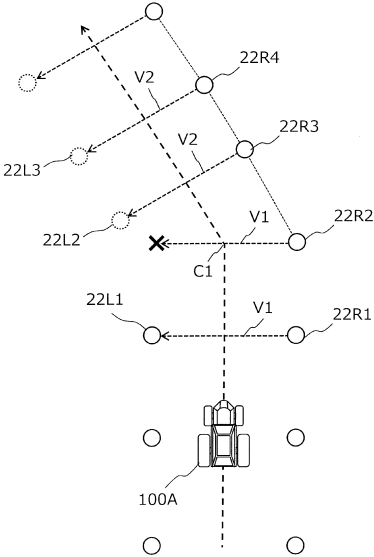
40

50

【図 3 1 B】

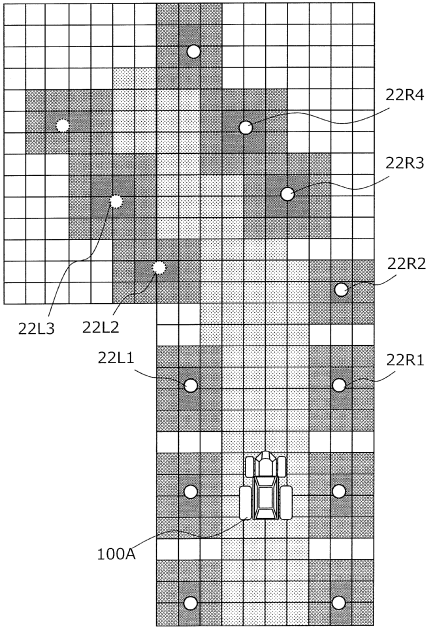


【図 3 1 C】

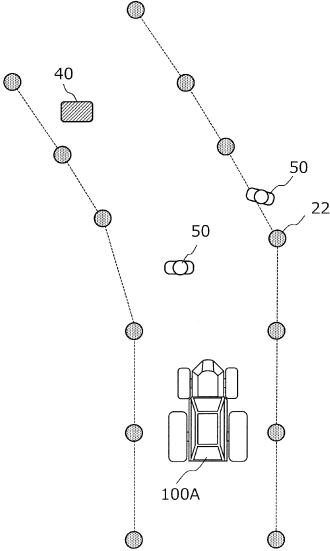


10

【図 3 1 D】



【図 3 2】



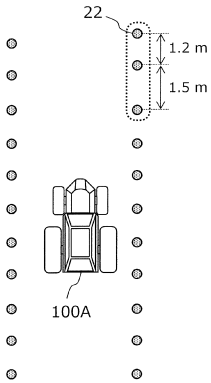
20

30

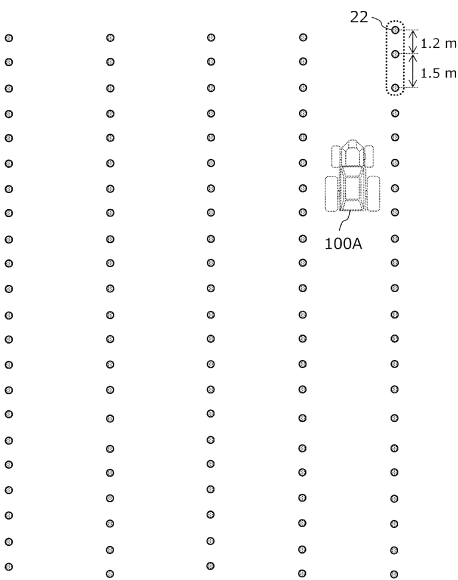
40

50

【図 3 3 A】

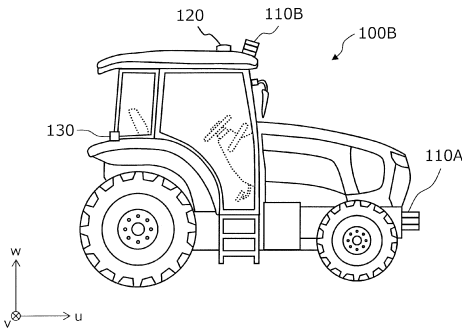


【図 3 3 B】

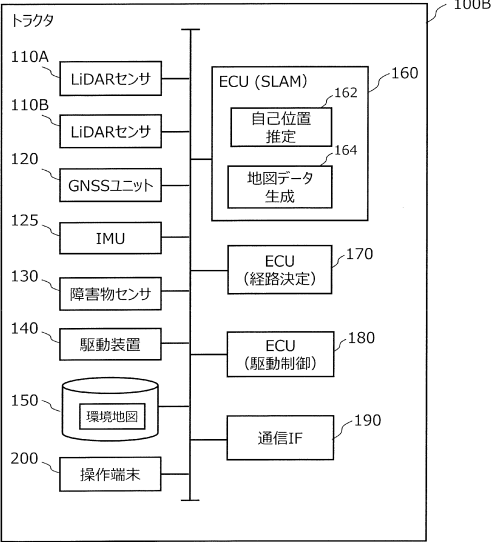


10

【図 3 4】



【図 3 5】



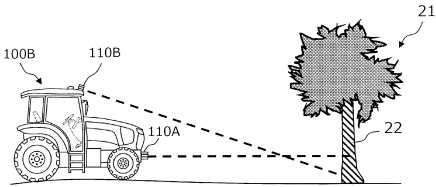
20

30

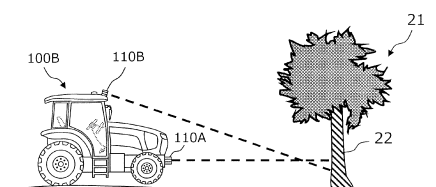
40

50

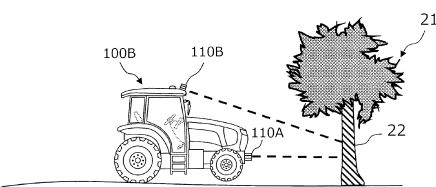
【図 3 6 A】



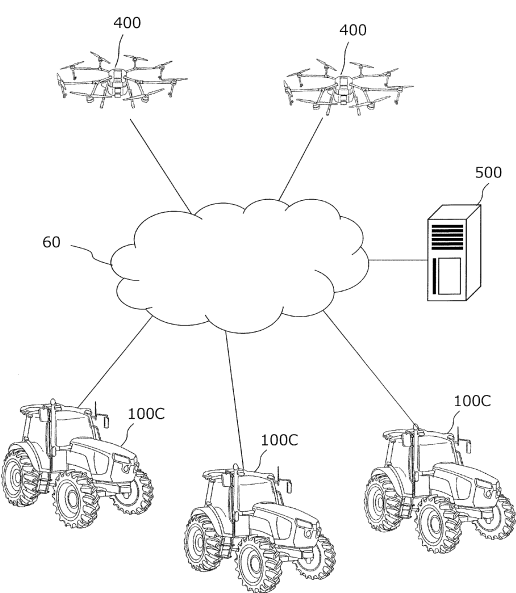
【図 3 6 B】



【図 3 6 C】



【図 3 7】



10

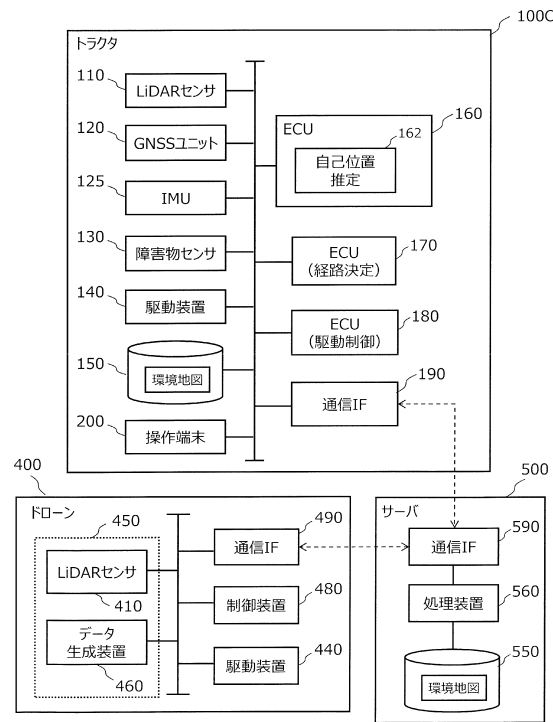
20

30

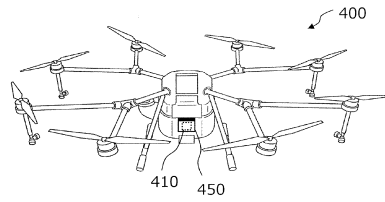
40

50

【図 3 8】



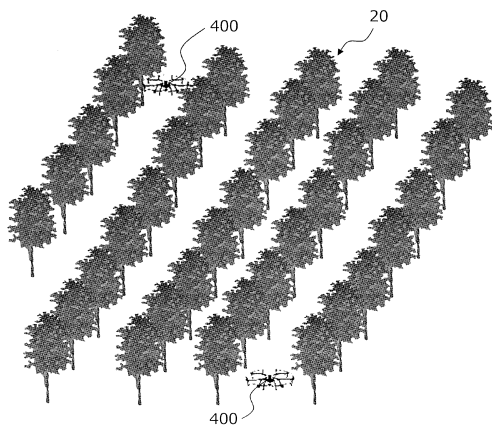
【図 3 9】



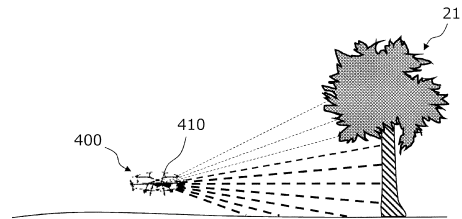
10

20

【図 4 0】



【図 4 1】

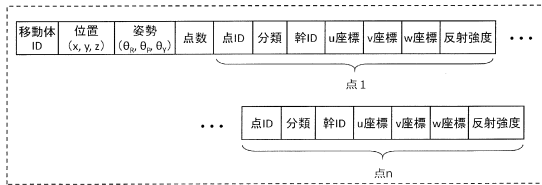


30

40

50

【図 4 2】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 弁理士 北 倫子
- (72)発明者 湯浅 純一
大阪府堺市堺区石津北町6 4 番地 株式会社クボタ堺製造所内
- (72)発明者 宮下 隼輔
大阪府堺市堺区石津北町6 4 番地 株式会社クボタ堺製造所内
- (72)発明者 玉井 拓也
大阪府堺市堺区石津北町6 4 番地 株式会社クボタ堺製造所内
- (72)発明者 江戸 俊介
大阪府堺市堺区石津北町6 4 番地 株式会社クボタ堺製造所内
- (72)発明者 倉田 諒
大阪府堺市堺区石津北町6 4 番地 株式会社クボタ堺製造所内
- 審査官 田中 成彦
- (56)参考文献 特開2014-122019 (JP, A)
特表2015-535400 (JP, A)
特開2010-096752 (JP, A)
特表2020-511639 (JP, A)
米国特許第09315192 (US, B1)
特表2018-513365 (JP, A)
特開2018-059742 (JP, A)
特開2008-134743 (JP, A)
国際公開第2019/044498 (WO, A1)
国際公開第2013/150630 (WO, A1)
米国特許出願公開第2019/0176841 (US, A1)
米国特許出願公開第2017/0023678 (US, A1)
米国特許出願公開第2019/0317219 (US, A1)
米国特許出願公開第2013/0080057 (US, A1)
米国特許第06728608 (US, B1)
独国特許出願公開第102016214472 (DE, A1)
中国特許出願公開第109782771 (CN, A)
韓国登録特許第10-2116031 (KR, B1)
特開2019-152924 (JP, A)
特開平04-176786 (JP, A)
特表2018-505426 (JP, A)
特開2016-206876 (JP, A)
特開2016-189172 (JP, A)
特開2016-066206 (JP, A)
特開2009-213400 (JP, A)
特開昭61-187706 (JP, A)
米国特許出願公開第2018/0165544 (US, A1)
中国特許出願公開第109471434 (CN, A)
韓国登録特許第10-2077219 (KR, B1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G05D 1/00 - 1/87
G01S 17/89
A01B 69/00