

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第5871925号
(P5871925)

(45) 発行日 平成28年3月1日(2016.3.1)

(24) 登録日 平成28年1月22日(2016.1.22)

(51) Int.Cl.

F I

G O 5 D 1/08 (2006.01)

G O 5 D 1/08 Z

B 2 5 J 5/00 (2006.01)

B 2 5 J 5/00 E

B 2 5 J 5/00 A

請求項の数 3 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2013-522670 (P2013-522670)	(73) 特許権者	000005108
(86) (22) 出願日	平成23年7月13日 (2011.7.13)		株式会社日立製作所
(86) 国際出願番号	PCT/JP2011/066010		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(87) 国際公開番号	W02013/001658	(74) 代理人	110000350
(87) 国際公開日	平成25年1月3日 (2013.1.3)		ポレール特許業務法人
審査請求日	平成26年7月4日 (2014.7.4)	(72) 発明者	中村 亮介
(31) 優先権主張番号	PCT/JP2011/064832		日本国茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内
(32) 優先日	平成23年6月28日 (2011.6.28)	(72) 発明者	網野 梓
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		日本国茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内
		(72) 発明者	上田 泰士
			日本国茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 速度計画装置を備えた倒立振子型移動体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

移動体本体に懸架されて床面を走行面とし、進行方向に垂直な同一平面上に備えられた一対の車輪と、この車輪を回転させる駆動機構と、前記移動体本体の重心位置と前記一対の前記車輪の車軸を結ぶ直線と鉛直方向のなす上体の傾斜角速度を計測する姿勢計測センサと、少なくとも前記上体の傾斜角度、前記上体の傾斜角速度、車輪角度及び車輪角速度の時系列データに基づき速度計画を生成する速度計画部と、前記速度計画に基づき前記駆動機構を制御することで前記移動体本体の倒立状態を維持する機構制御部とを備えた倒立振子型移動体であって、

前記移動体を緊急停止する必要がある場合、

前記速度計画部は、前記上体の傾斜角度及び前記上体の傾斜角速度が、前記一対の車輪を前記上体より進行方向に対して逆方向に動かす場合の前記倒立振子型移動体の回転中心を q としたとき、 $q^{(2)} = 1 / 2 k (q^{(3)})^2$ で表される第1の減速曲線及び、 $q^{(2)} = -1 / 2 k (q^{(3)})^2 + C$ で表される第2の減速曲線に沿うよう前記速度計画を生成することを特徴とする倒立振子型移動体。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の倒立振子型移動体において、

前記駆動機構は、前記一対の車輪をそれぞれ回転駆動する2つのモータを備え、

前記移動体の移動中に緊急停止する必要がある際において、前記2つのモータに最大モータトルクを発生させた後に、上体の傾斜角速度及び上体の傾斜角度が前記第1の減速

曲線及び第 2 の減速曲線に沿うよう前記速度計画を生成することを特徴とする倒立振子型移動体。

【請求項 3】

請求項 1 または請求項 2 に記載の倒立振子型移動体において、
前記速度計画部は、上体の傾斜角速度が前記第 1 の減速曲線において $q^{(3)} = 0$ となるよう前記速度計画を生成することを特徴とする倒立振子型移動体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、速度計画装置を備えた倒立振子型移動体に関する。

10

【背景技術】

【0002】

本技術分野に関する従来技術としては、特開 2007-168603 号公報（特許文献 1）がある。

この従来技術では、駆動輪と操作部と障害物検知部と駆動輪を駆動制御する制御部を備えた同軸二輪移動台車があり、この台車の移動中にユーザが台車の停止を指示した場合には操作部が、障害物の存在が検知された場合には障害物検知部が制御部に停止指示信号を出力するようになっている。

【0003】

この制御部は、停止指示信号に基づき、現在の車速に -1 を乗じた値を目標車速に設定すると共に、目標車速に応じた回転数で駆動輪を駆動させるようになっている。このため、車体に対して、進行方向と反対の方向に進むように力が加わることになり、停止時の制動距離が短くなる。また、目標車速は、車体が停止するまで逐次 0 に近づくように変化される。この制御部により車体の姿勢が制御されながら目標車速を変化させることができるため、安定した姿勢での車体の緊急停止が可能となっている。

20

【0004】

また、特開 2007-319991 号公報（特許文献 2）がある。

この従来技術では、左右の車輪及びこの車輪を回転駆動させる走行モータを有する移動機構と、この移動機構に支持された上体と移動機構を制御する制御装置とを備えた移動ロボットが記載されている。

30

【0005】

この制御装置は複数の時系列目標値を生成する走行目標生成部を有しており、この走行目標生成部は、移動ロボットの接地点より上にある移動ロボットの位置及び傾きの線形形である特徴点の時系列値を、前記複数の時系列目標値に対する移動条件を満たすように生成するようになっている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】 特開 2007-168603 号公報

【特許文献 2】 特開 2007-319991 号公報

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

倒立振子型移動体はその底面積が小さいことから、人間が搭乗する移動体として利用するケースや、サービスロボットなど物を運搬するための台車として利用するケースが考えられる。このように、倒立振子型移動体は人間と共存しながらあらゆる環境で活躍することが期待されている。

【0008】

人間の近傍で動作する倒立振子型移動体は曲がり角からの飛び出しや接触、段差乗越え時の衝撃などによる姿勢の乱れに対して速やかに姿勢を回復させ、最短距離で停止して安

50

全を確保することが重要である。

【0009】

しかしながら特許文献1記載の技術では駆動輪の最大トルクが考慮されておらず、倒立振子型移動体が必要しも最大加速度に達しないため、最短距離で止まることは難しい。また、過大な加速度が要求された場合は転倒に至る可能性もある。

【0010】

また特許文献2記載の技術では最大トルクを考慮した移動計画を行っているが、姿勢の乱れた状態で加減速中からの計画を行うことができない。したがって、移動中の速度変更が難しく、緊急停止等の姿勢の乱れが予想されるような状況下では活用できない可能性がある。また、最大加速度を維持しない為、最短距離で止まることも難しい。

10

【0011】

本発明の目的は、加減速中や段差を踏み越え中に姿勢が乱れたような状況からも、安全な緊急停止を含む速度変更を可能にする倒立振子型移動体を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明の倒立振子型移動体は、移動体本体に懸架されて床面を走行面とし、進行方向に垂直に備えられた一对の車輪と、この車輪を回転させる駆動機構と、前記移動体本体の重心位置と前記一对の前記車輪の車軸を結ぶ直線と鉛直方向のなす上体の傾斜角速度を計測する姿勢計測センサと、少なくとも前記上体の傾斜角度、前記上体の傾斜角速度、車輪角度及び車輪角速度の時系列データに基づき速度計画を生成する速度計画部と、前記速度計画に基づき前記駆動機構を制御することで前記移動体本体の倒立状態を維持する機構制御部とを備えた倒立振子型移動体であって、前記移動体を緊急停止する必要性が生じた場合、前記速度計画部は、前記上体の傾斜角度及び前記上体の傾斜角速度が、前記一对の車輪を前記上体より進行方向に対して逆方向に動かす場合の前記倒立振子型移動体の回転中心を q としたとき、 $q^{(2)} = 1/2k(q^{(3)})^2$ で表される第1の減速曲線及び、 $q^{(2)} = -1/2k(q^{(3)})^2 + C$ で表される第2の減速曲線に沿うよう前記速度計画を生成することを特徴とする。

20

【0013】

また、本発明の倒立振子型移動体は、前記駆動機構は、前記一对の車輪をそれぞれ回転駆動する2つのモータを備え、前記移動体の移動中に緊急停止する必要性が生じた際において、前記2つのモータに最大モータトルクを発生させた後に、上体の傾斜角速度及び上体の傾斜角度が前記第1の減速曲線及び第2の減速曲線に沿うよう前記速度計画を生成することを特徴とする。

30

【0014】

また、本発明の倒立振子型移動体は、前記速度計画部が、上体の傾斜角速度が前記第1の減速曲線において $q^{(3)} = 0$ となるよう前記速度計画を生成することを特徴とする。

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、加減速中や段差を踏み越え中に姿勢が乱れたような状況からも、安全な緊急停止を含む速度変更を可能にする倒立振子型移動体を提供できる。

40

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本発明が対象とする倒立振子型移動体の概略構成図である。

【図2】本発明が対象とする倒立振子型移動体のシステム構成を表すフロー図である。

【図3】本発明の実施例に係る行動決定部の処理を説明するフロー図である。

【図4】本発明の実施例に係る行動決定部の障害物との接触判定を説明する図である。

【図5】本発明の実施例に係る速度計画部の処理を説明するフロー図である。

【図6】本発明の実施例に係る倒立振子型移動体のモデル化の例を示す図である。

【図7】本発明の実施例に係る速度計画部の緊急停止動作処理を表すフロー図である。

【図8】本発明の実施例に係る速度計画部の緊急停止動作処理を説明する図である。

50

【図 9】本発明の実施例に係る効果のシミュレーション結果を表すグラフ図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明の一実施例を図に沿って説明する。

【実施例 1】

【0019】

本実施例の倒立振子型移動体 1 の機構構成を図 1 を参照しながら説明する。

図 1 (a) は本実施例の倒立振子型移動体 1 の機構構成を説明する側面図であり、図 1 (b) は倒立振子型移動体 1 の正面図である。

【0020】

10

図 1 (a) (b) において、倒立振子型移動体 1 は大きく移動機構 10 と上体 2 により構成される。移動機構 10 は左右 1 対から成る同軸上の車輪 13R、L と機構制御部 11 とモータ 12R、L を備え、車輪 13R、L は其々独立のモータ 12R、L に接続されている。モータ 12R、L は機構制御部 11 に接続され、所定のトルクを発生させるように制御される。車輪 13R、L の回転角度と回転角速度はモータ 12R、L を介して機構制御部 11 によって取得される。

【0021】

上体 2 は移動機構 10 の上部に備えられている。上体 2 は後述する演算を行うための計算機 3 と、周囲の状況を測定するための環境センサ 4 と、車輪 13R、L を除く倒立振子型移動体 1 の重心位置と車軸を結んだ直線と鉛直方向のなす傾斜角度 θ 、傾斜角速度 $d\theta$ を測定するための姿勢センサ 5 を備えている。計算機 3 と移動機構 10 とは情報交換ができる様に接続されている。

20

【0022】

次に図 2 を用いて倒立振子型移動体 1 のシステム構成について述べる。

図 2 は本発明が対象とする倒立振子型移動体のシステム構成を表すフロー図である。

【0023】

図 2 において、計算機 3 は障害物認識部 21、行動決定部 22、経路計画部 23、速度計画部 24、倒立制御部 25 を備えている。計算機 3 は環境センサ 4、姿勢センサ 5、移動機構 10 に接続されている。環境センサ 4 は倒立振子型移動体 1 外部の状況を観測するためのセンサであり、例えば、レーザスキャナを用いることで、平面または立体で周囲の物体までの距離を測定することができる。また、例えば、ステレオカメラを用いることで同様に周囲の物体までの距離を認識することができる。姿勢センサ 5 は例えば、ジャイロセンサを用いることで構成され、これにより上体 2 の傾斜角度 θ や傾斜角速度 $d\theta$ を計測することができる。障害物認識部 21 は環境センサ 4 から得られる周囲の物体までの距離を、姿勢センサ 5 より得られる傾斜角度 θ を用いて $\cos \theta$ を乗じて補正し、障害物の位置と速度と形状を算出する。

30

【0024】

障害物の算出手法としては例えば以下の方法（例えば、特開 2008-65755 号公報の方法）がある。

【0025】

40

この方法ではまず、ある時刻 t にレーザスキャナから得られた距離値の角度に対する急激な変化点を検出し、連続する点の纏まりごとにデータ列を分割してセグメントとする。これによって、時間 t における各セグメントの重心などの代表位置、形状などの特徴量を得る。次に、時刻 $t + \Delta t$ で同様に計算し、各セグメントの特徴量を得る。ここで、時刻 t で得られたセグメントの特徴量と、時刻 $t + \Delta t$ で得られたセグメントの特徴量を比較し、特徴量の近いセグメント同士は同一の障害物であると認識し、代表位置の変化量から、障害物の速度を算出する。また同一の障害物と認識したデータ列より形状を、得られた形状に内接する円の中心座標を算出する。また、移動速度がほぼ 0 である障害物は静止障害物とみなし、レーザスキャナによる各データ点を幅 0 の障害物とみなす。また上記の処理はセグメントごとに実行されるため、複数の障害物に対しても認識できる。以上の処理

50

を行うことにより障害物認識部 2 1 は単数または複数の障害物の位置と速度と形状を算出する。

【0026】

行動決定部 2 2 は障害物認識部 2 1 から取得する障害物の位置と速度と形状、及び姿勢センサ 5 から取得する傾斜角度 θ 、傾斜角速度 $d\theta$ 、経路計画部 2 3 から取得する経路計画、速度計画部 2 4 から取得する速度計画から倒立振子型移動体 1 の挙動を決定する。

【0027】

以下、行動決定部 2 2 での行動決定処理を図 3、図 4 で説明する。

図 3 は本発明の実施例に係る行動決定部の処理を説明するフロー図である。

図 4 は本発明の実施例に係る行動決定部の障害物との接触判定を説明する図である。

図 3 において、S2 2_1 では行動決定部 2 2 は予め設定されている、またはプログラムにより決定される、または人間によって入力される移動目標を取得する。移動目標は移動先位置 p_r 、移動先旋回方向 ω_r 、最大移動速度 v_r 、最大モータトルク τ_r を含む。

【0028】

S2 2_2 において行動決定部 2 2 は経路計画部 2 3 に移動目標を検討命令と共に送信し、経路計画部 2 3 及び速度計画部 2 4 から経路計画と速度計画を取得する。経路計画部 2 3 と速度計画部 2 4 の内部処理については後述する。

【0029】

S2 2_3 において行動決定部 2 2 は姿勢センサ 5 より傾斜角度 θ 及び傾斜角速度 $d\theta$ を、倒立制御部 2 5 から倒立振子型移動体 1 の現在位置 p を速度計画部 2 4 を介して取得する。

【0030】

S2 2_4 において行動決定部 2 2 は数式 1 を用いて倒立振子型移動体 1 の姿勢が崩れていないかを判断する。

【0031】

【数 1】

数 1

$$|\theta| > \theta_{1u} \cup (d\theta > d\theta_u \cap \theta > \theta_{2u}) \cup (d\theta < -d\theta_u \cap \theta < -\theta_{2u})$$

・・・ (数 1)

【0032】

ただし、 θ_{1u} 、 $d\theta_u$ 、 θ_{2u} は倒立振子型移動体 1 の特性により決定される定数であり、 $\theta_{1u} > 0$ 、 $d\theta_u > 0$ 、 $\theta_{2u} > 0$ である。数式 1 が真である場合、処理を S2 2_1 0 へ進め、それ以外の場合は S2 2_5 へ処理を進める。

【0033】

S2 2_5 において行動決定部 2 2 は障害物認識部 2 1 より障害物の位置 p_o と速度 v_o 、形状を円で近似し半径 r を取得する。

【0034】

S2 2_6 において行動決定部 2 2 は S2 2_5 で取得した障害物の情報と S2 2_2 で取得した経路計画及び速度計画から倒立振子型移動体 1 と障害物が接触するかを判定する。接触を判定するには、例えば、図 4 に示すように倒立振子型移動体 1 の時刻 t における速度を $v(t)$ 、位置を経路計画に沿い、現在時刻から t_0 秒後までの速度の積分関数にする関数 $p(\int v(t) dt)$ とし、障害物と同様に倒立振子型移動体 1 の形状を半径 w の円とすると数式 2 により倒立振子型移動体 1 と障害物との接触を予測する。

【0035】

10

20

30

40

【数 2】

数 2

$$r+w > \left\| p \left(\int_0^{t_0} v(t) dt \right) - (p_0 + v_0 t_0) \right\| \quad \dots \quad (\text{数 } 2)$$

【0036】

数式 2 が偽の場合、倒立振子型移動体 1 と障害物との接触は無いと判定し行動決定部 22 は処理を S22_7 に進める。数式 2 が真の場合、行動決定部 22 は処理を S22_10 に進める。

【0037】

S22_7 において、行動決定部 22 は S22_1 において移動目標を取得した後に移動命令を発行しているかを判定し、移動命令が発行されていない場合は S22_8 において行動決定部 22 は経路計画部 23 と速度計画部 24 に対し S22_2 で発行した移動目標と移動命令を発信し、さらに処理を S22_9 へ進める。移動命令が発信済みの場合、行動決定部 22 は処理を S22_9 に進める。

S22_9 において行動決定部 22 は S22_1 で取得した移動目標と S22_3 で取得した現在位置 p を数式 3 を用いて比較する。

【0038】

【数 3】

数 3

$$\epsilon > \|p_r - p\| \quad \dots \quad (\text{数 } 3)$$

【0039】

ただし、 ϵ は予め設定された定数である。数式 3 が真の場合、行動決定部 22 は移動決定処理を終了する。数式 3 が偽の場合、行動決定部 22 は処理を S22_3 へ戻り繰り返す。

【0040】

S22_10 において、行動決定部 22 は経路計画部 23 に緊急停止命令を発行し処理を終了する。

経路計画部 23 は行動決定部 22 より移動目標を取得し、経路を生成する。経路生成方法には速度計画部 24 を介し移動機構 10 より取得した現在位置 p 、移動先位置 p_r を直線で結ぶ。または、移動先位置 p_r と現在位置 p において目標とする旋回方向 ω_r と現在の旋回方向 ω が異なる場合は現在位置 p と移動先位置 p_r を滑らかに接続するベジェ曲線やスプライン曲線を経路としても良い。また、経路計画部は生成した経路情報を経路上にある点の位置座標データ群として、行動決定部 22 と速度計画部 24 に送信するとともに、行動決定部 22 から取得した検討命令や移動命令も速度計画部 24 に送信する。

【0041】

速度計画部 24 は行動決定部 22 より移動目標を、経路計画部 23 より経路計画を、姿勢センサ 5 より上体の傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を、移動機構 10 より倒立制御部 25 を介して車輪速度 $d\phi$ を取得し速度計画を生成する。また生成した速度計画と取得した経路計画を倒立制御部 25 に送信する。

【0042】

以下、速度計画部 24 での速度計画処理を図 5 のフローチャートを用いて述べる。また、図 5 フローチャート中の処理 S24_7 の詳細については図 7 のフローチャートを用いて述べる。

図 5 は本発明の実施例に係る速度計画部の処理を説明するフロー図である。

図 6 は本発明の実施例に係る倒立振子型移動体のモデル化の例を示す図である。

【0043】

10

20

30

40

50

図5のS2 4_1において、速度計画部2 4は行動決定部2 2より移動目標と移動命令または検討命令を取得する。S2 4_2において、速度計画部2 4は経路計画部2 3より経路情報を取得する。S2 4_3において、速度計画部2 4は取得した経路情報から移動距離 l を算出する。移動距離 l の算出は、経路情報を n 点からなる位置座標データ群であるので、数式4に従って算出する。

【0 0 4 4】

【数4】

数4

$$l = \sum_{i=1}^{n-1} \|h_{i+1} - h_i\| \quad \dots \quad (\text{数4})$$

10

【0 0 4 5】

ただし h_i ($i=1 \dots n$)は経路情報個々の点を表す。

【0 0 4 6】

S2 4_4において、速度計画部2 4は姿勢センサ5より上体の傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を、倒立制御部2 5より車輪角速度 $d\phi$ と現在位置を取得する。

【0 0 4 7】

S2 4_5において速度計画部2 4は行動決定部2 2より緊急停止命令を取得しているかを判断する。緊急停止命令を取得していない場合は処理をS2 4_6へ進め、取得している場合は処理をS2 4_7に進める。

20

【0 0 4 8】

S2 4_6において速度計画部2 4は移動目標から抽出する最大移動速度 v_r 、最大モータトルク τ_r 、及び算出した移動距離 l 、姿勢センサから取得した傾斜角度 θ 、傾斜角速度 $d\theta$ をもとに速度計画を生成する。速度計画は倒立振子型移動体1の運動方程式に従って生成され、運動方程式算出のためのモデルを図6に、算出された運動方程式を数式5に示す。

【0 0 4 9】

【数5】

数5

$$\begin{cases} S\ddot{\phi} + T\ddot{\theta} = \tau \\ U\ddot{\phi} + V\ddot{\theta} = \theta \end{cases}$$

$$S = J_0 + (M_0 + M_1)R^2$$

$$T = J_0 + (M_0 + M_1)R^2 + LM_1R$$

$$U = (J_0 + (M_0 + M_1)R^2 + LM_1R)/(gLM_1)$$

$$V = (J_0 + J_1 + M_1L^2 + (M_0 + M_1)R^2 + 2LM_1R)/(gLM_1) \quad \dots \quad (\text{数5})$$

30

40

【0 0 5 0】

車輪1 3の半径を R 、質量を M_0 、慣性モーメントを J_0 、倒立振子型移動体1の車輪以外の部分の質量を M_1 、慣性モーメントを J_1 、重心と車輪1 3の車軸までの距離を L 、重心と車軸を含む直線からの車輪1 3の回転角度を ϕ 、回転角速度を $d\phi$ 、重力加速度を g としている。

【0 0 5 1】

数式5は図6に示したモデルよりラグランジュ方程式を介し、 $\theta=0$ 近傍で線形化している。また、式を簡便にするために定数項部分を S 、 T 、 U 、 V で置き換えた。

【0 0 5 2】

さらに数式5に対して媒介変数 q を用いることにより状態量である、傾斜角度 θ 、傾斜

50

角速度 $d\theta$ 、車輪角度 ϕ 、車輪角速度 $d\phi$ 、モータトルク τ の関係を数式 6 のように得る。

【0053】

【数 6】

数 6

$$\begin{aligned} q &= \varphi + \frac{V}{U} \theta \\ \varphi &= q - Vq^{(2)} \\ d\varphi &= q^{(1)} - Vq^{(3)} \\ \theta &= Uq^{(2)} \\ d\theta &= Uq^{(3)} \\ \tau &= Sq^{(2)} + (TU - SV)q^{(4)} \end{aligned} \quad \dots \quad (\text{数 6})$$

【0054】

ただし $q(i)$ [$i = 1, 2, 3$] は q の i 階微分を表す。数式 6 より不動点 q を設計することで全ての状態量を設計できる。倒立振子型移動体 1 は速度を変更する際に、その力学的特性から一旦、車輪 13 を上体 2 より進みたい方向に対して逆方向に動かす必要がある。この時の倒立振子型移動体 1 全体の回転中心が q である。 q の設計方法として、移動開始と移動終了時の傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を 0 と見なせる場合は特許文献 2 記載の技術が利用できる。この時 $q(4)$ は 0、 k 、 $-k$ ($k > 0$) のいずれかの値をとり、移動開始時 (時刻 t_s) と移動終了時 (時刻 t_e) に状態が安定していることを条件に、 $q(i)(t_s) = q(i)(t_e) = 0$ [$i = 1, 2, 3$] を導き、さらに移動距離 l 、最大移動速度 v_r 、最大モータトルク τ_r を用いて $q(4)$ を設定し、 $q(4)$ を積分し数式 6 の関係で変換することで全ての状態量を設計している。傾斜角度 θ 、傾斜角速度 $d\theta$ 、車輪角度 ϕ 、車輪角速度 $d\phi$ の時系列に沿ったデータ列を速度計画として生成する。

【0055】

S24_8 において、速度計画部 24 は行動決定部 22 より取得した命令が検討命令ならば処理を S24_9 へ、移動命令ならば処理を S24_10 へ進める。

S24_9 において、速度計画部 24 は行動決定部 22 へ生成した速度計画を送信し終了する。

S24_10 において、速度計画部 24 は行動決定部 22 と倒立制御部 25 へ生成した速度計画を送信し終了する。

【0056】

S24_7 において、速度計画部 24 は現状の状態量を開始地点とする緊急停止動作を実行し終了する。この場合では移動開始時 (時刻 t_s) と移動終了時 (時刻 t_e) の状態が安定ではないため特許文献 2 の方法は使えない。

【0057】

そこで図 7 に示すフローチャートと図 8 を用いて停止計画を作成する。

図 7 は本発明の実施例に係る速度計画部の緊急停止動作処理を表すフロー図である。

図 8 は本発明の実施例に係る速度計画部の緊急停止動作処理を説明する図である。

【0058】

図 8 は横軸に $q^{(2)}$ 、縦軸に $q^{(3)}$ をとったものであり、これらは倒立振子型移動体 1 の加速度と加速度変化率の関係を表す。

【0059】

図7、図8において、本実施例では車輪速度 $d\phi$ が正の場合から0に減速するまでを扱うが、符号を適切にすることにより車輪速度 $d\phi$ が負の場合からも0まで加速することができる。

【0060】

S24_7_1において、速度計画部24は k を定数とした数式7で表される減速曲線100と数式8であらわされる減速曲線101を算出する。

【0061】

【数7】

数7

$$q^{(2)} = \frac{1}{2k} (q^{(3)})^2 \quad \dots \quad (\text{数7})$$

【0062】

【数8】

数8

$$q^{(2)} = -\frac{1}{2k} (q^{(3)})^2 + C \quad \dots \quad (\text{数8})$$

【0063】

数式7及び8において $k(>0)$ は時不変で共通であり、 $q^{(4)}$ の絶対値と等しく、例えば、最大モータトルク τ_r と最大移動速度 v_r と車輪13の半径から求められる $d\phi$ と数式6の関係をを用いることで算出する。 $q^{(4)}$ はトルクが計画で直接指定されていない場合は k 、 $-k(k>0)$ のいずれかの値とする。また、数式6より k つまり $q^{(4)}$ の絶対値が決定されているならば最大モータトルク τ_r は最大上体傾斜角度 θ の一次関数の関係である。これを利用して、要求するモータトルクの絶対値が最大となる、 θ の絶対値が最大となる $q^{(3)}=0$ の場合について前述の一次関数を解くことで C が算出できる。本減速曲線に沿った計画に追従することで、倒立振子型移動体1は任意の姿勢から、最大モータトルクでモータ12を駆動した後でも、最大の減速を行い停止することができる。

【0064】

S24_7_2において、速度計画部24は、姿勢センサ5より傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を取得し、数式6の関係をを用いてそれぞれ $q^{(2)}$ と $q^{(3)}$ に変換し、図8における減速曲線100の右にあるか左にあるかを判定する。右の場合は処理をS24_7_3に進め、減速曲線100の近傍にある場合はS24_7_4に処理を進め、十分に左にある場合はS24_7_5に進める。

【0065】

S24_7_3において、速度計画部24は倒立制御部25にモータトルク τ がモータ最大トルク τ_r となるように指示を送り、S24_7_2へ処理を戻す。S24_7_3の間は図8に示すように倒立振子型移動体1の状態は左下方向に動く。

【0066】

S24_7_4において、速度計画部24は、姿勢センサ5と機構制御部11より倒立制御部25を介して車輪角速度 $d\phi$ 、傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を取得し、数式6の関係をを用いてこれら状態量を変換し、 $q^{(i)}$ [$i=1, 2, 3$]を生成する。得られた $q^{(i)}$ に対して $q^{(4)}=k$ とし数式6の関係をと $q^{(4)}$ を積分することで減速曲線100に沿った速度計画を生成し、傾斜角速度 $d\theta = q^{(3)}=0$ となる部分までを倒立制御部25に送信する。傾斜角速度 $d\theta = q^{(3)}=0$ となった場合は処理をS24_7_7に進める。S24_7_4の間は図8に示すように倒立振子型移動体1の状態は減速曲線100に沿って動く。

【0067】

S24_7_5において、速度計画部24はモータトルク τ が0となるように倒立制御部25に指示を送り、倒立振子型移動体1を転倒させ移動を終了させる。

【0068】

S24_7_6において、速度計画部24は、S24_7_4と同様に減速曲線100に従って減速し、減速曲線100と減速曲線101の交点で $q^{(4)}=-k$ として減速曲線101に沿ってさらに減速を続ける計画において、 $q^{(2)}=q^{(3)}=0$ となった場合において車輪角速度 $d\phi$ が0となるかを判定する。判定結果が偽の場合は判定結果が真となるまで目標傾斜角度、目標傾斜角速度を維持することで減速を続け、ループ処理を行う。判定結果が真の場合はS24_7_7に処理を進め判定結果が真となった減速計画を倒立制御部25へ送信し終了する。

【0069】

倒立制御部25は速度計画部24から送られた計画またはトルク指令と移動機構10から取得した車輪13R、Lの回転角度 ϕ_R 、Lと回転角速度 $d\phi_R$ 、Lに基づいてモータ12R、Lを制御するための指示を機構制御部11に送信する。計画として受信している場合は計画の時系列に従い、現在時刻に対応する目標値を使用する。また、倒立振子型移動体1の現在位置 $p(t_0)$ を算出する。現在時刻 t_0 における位置の算出方法は数式9による。

【0070】

【数9】

数9

$$\begin{aligned} p(t_0) &= \left(\int_0^{t_0} v(t) \cos \omega(t) dt, \int_0^{t_0} v(t) \sin \omega(t) dt \right) \\ v(t) &= (d\phi_R(t) + d\phi_L(t)) / 2 \\ \omega(t) &= \int_0^{t_0} d\omega(t) dt \\ d\omega(t) &= R(d\phi_L(t) - d\phi_R(t)) / f \end{aligned} \quad \dots \quad \text{(数9)}$$

【0071】

t は時刻を表し車輪角度 ϕ_R 、Lと回転角速度 $d\phi_R$ 、Lは t の関数で記述される。また f は車輪13Rと13Lの間隔である。

速度計画部24から計画が状態量为目标として取得された場合は数式10に従った並進用モータトルク τ_s を算出する。

【0072】

【数10】

数10

$$\tau_s = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta - \theta_r \\ \phi - \phi_r \\ d\theta - d\theta_r \\ d\phi - d\phi_r \end{bmatrix} \quad \dots \quad \text{(数10)}$$

【0073】

ただし、 $K_{(i)}$ [$i=1, 2, 3, 4$]はスカラー量であり、ヒューリスティックに、またLQRや H_∞ 制御論により設計できる。また θ_r 、 $d\theta_r$ 、 ϕ 、 $d\phi$ はそれぞれ上体角度目標値、上体角速度目標値、車輪角度目標値、車輪角速度目標値である。また ϕ は車輪回転角度 ϕ_R 、Lの平均、 $d\phi$ は車輪回転角速度 $d\phi_R$ 、Lの平均である。緊急停止動作時のように車輪回転角度 ϕ_r が指定されない場合は車輪回転角度に関する部分は無視する。速度計画部24より最大トルク指示、または転倒指示を受け取った場合は取得したモータトルク目標値をそのまま機構制御部11に送信する。

経路計画に追従するための旋回モータトルク τ_c の算出法について述べる。経路計画は前述のように経路上の点群データであり $h[i]$ で表記する($i=1, 2, \dots, n$)。倒立制御部25

10

20

30

40

50

は現在位置に最も近い経路計画上の点 $h[j]$ と点 $h[j]$ までの距離 H を算出する。次に経路計画上の点 $h[j]$ の前後の点 $h[j+1]$ 、 $h[j-1]$ を用いて点 $h[j]$ での目標旋回方向 ω_r とその旋回半径 η を算出する。次に現在の目標移動速度 v_r を旋回半径 η で除算し目標旋回角速度 $d\omega_r$ を得る。以上を用いて数式 11 に従い旋回用モータトルク τ_c を算出する。

【0074】

【数11】

数11

$$\tau_c = [K_5 \quad K_6 \quad K_7] \begin{bmatrix} \omega_r - \omega \\ d\omega_r - d\omega \\ H \end{bmatrix} \quad \dots (数11) \quad 10$$

【0075】

ただし、 $K_{(i)}$ [$i=5, 6, 7$] はスカラー量であり、ヒューリスティックに、または前述のような各種制御理論により設計できる。倒立制御部 25 は機構制御部 11 に対してモータ 12L に出力させるためのトルクとして τ_s と τ_c の和を、モータ 12R に出力させるためのトルクとして τ_s と τ_c の差を送信する。

移動機構 10 が停止命令を受信した場合は、機構制御部 11 はモータ 12R、L がトルクを出力しないように制御する。また車輪 13R、L の角度と角速度をモータ 12R、L を介して計測し、倒立制御部 25 に送信する。 20

【0076】

以上のように構成された倒立振子型移動体 1 は姿勢が乱れた状態からでも最大加速度＝最大モータトルクで停止することができる。また、途中で加速度が 0 にならない為に目標値に上体の傾斜角度と上体の傾斜角速度が 0 になる場面が計画終了の点以外に存在しない。本実施例で構成された倒立振子型移動体 1 の緊急停止動作実施時のシミュレーションによる挙動を図 9 に示す。

【0077】

図 9 は本発明の実施例に係る効果のシミュレーション結果を表すグラフ図である。

図 9 において、倒立振子型移動体 1 が加速中に本実施例の緊急計画を行った際の例を実線で、従来例として、緊急停止計画を単に車輪角速度 $d\phi$ と傾斜角度 θ と傾斜角速度 $d\theta$ を 0 としたものを破線で表している。従来手法では急激な目標値変化に対応できず、転倒に至っているが、本実施例の手法では速度変更成功し、停止に成功している。 30

【実施例 2】

【0078】

実施例 1 では、前進移動中に速度を 0 とする緊急停止を示したが、後進移動中に速度を 0 とする場合、または任意の速度に現状の速度から変更する場合にも用いることができる。また、実施例 1 の例えば、S24_7_2 や S24_7_6 では取得した現在の情報をもとに処理を進めたが、計画開始時点での状況をもとにシミュレートを行い、タイミングを決定し、全ての計画を予め生成しても良い。

【実施例 3】

【0079】

実施例 1 では、経路計画部 23 において経路を生成していたが、行動決定部 22 と同様に予め設定されている経路や、外部より直接経路情報を取得しても良い。また、経路計画を速度計画部 24 に送信するに際し、経路計画情報を座標のデータで送信せず、時刻をパラメータとした関数や時刻と座標を組みとするデータ群で送信しても良い。

【実施例 4】

【0080】

実施例 1 の緊急停止動作生成では最大加速度で停止するとしたが、変更後速度が変更前である現在の速度との差が小さい場合においては最大加速度を用いず、適当に小さな加速度を用いても良い。また、減速曲線に姿勢を動かす S24_7_3 においても最大トルクを 40

用いなくとも良い。

【実施例 5】

【0081】

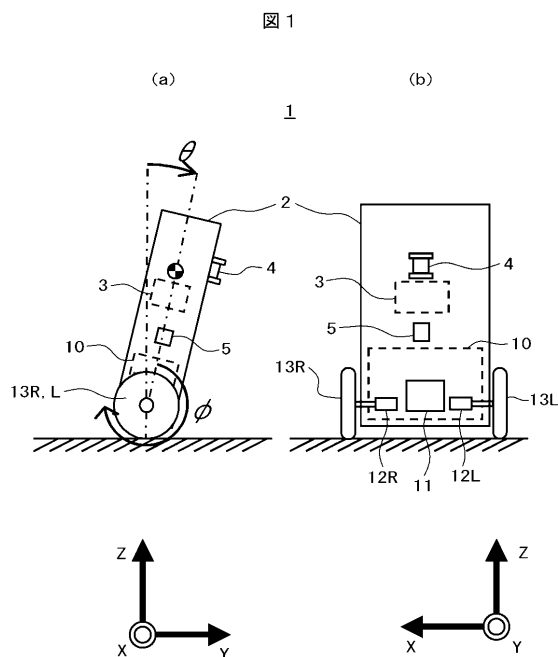
実施例 1 では姿勢センサから上体の傾斜角度を取得するとしたが、姿勢センサは傾斜角速度のみを測定し、計算機が傾斜角速度を取得後に積分することで傾斜角度を得ても良い。

【符号の説明】

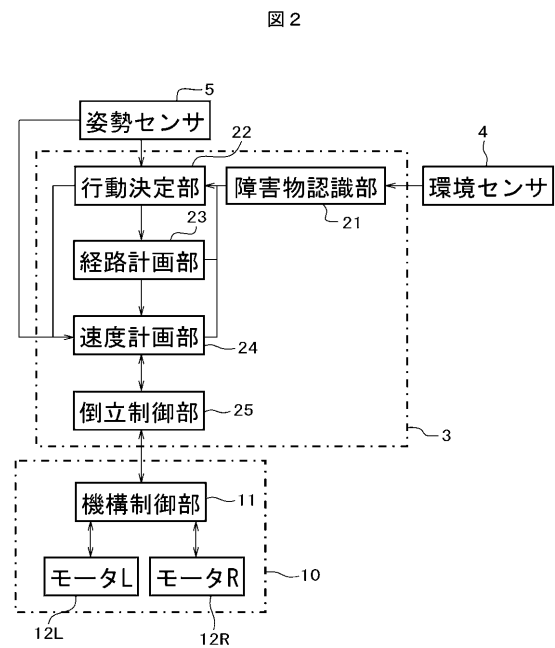
【0082】

1・・・倒立振子型移動体、2・・・上体、3・・・計算機、4・・・環境センサ、5・・・姿勢センサ、10・・・移動機構、11・・・機構制御部、12・・・モータ、13・・・車輪。

【図 1】

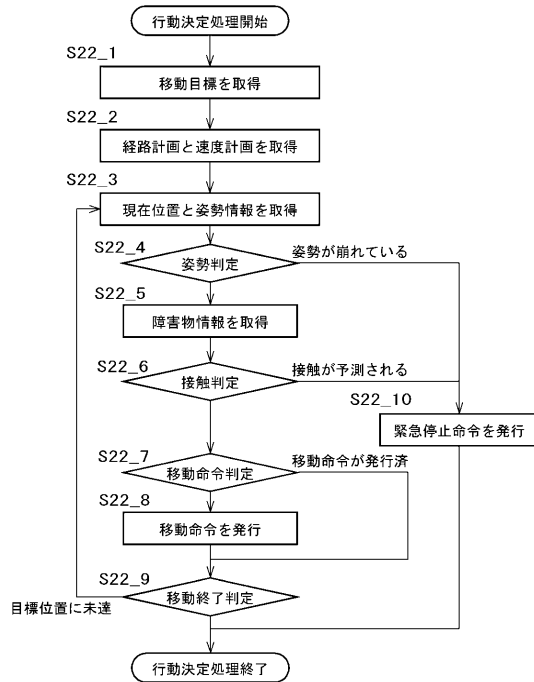


【図 2】



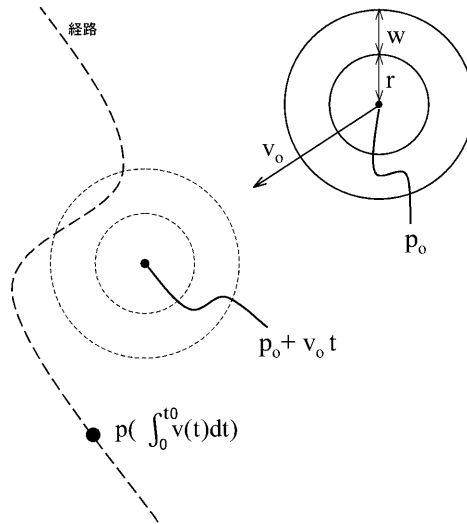
【図 3】

図 3



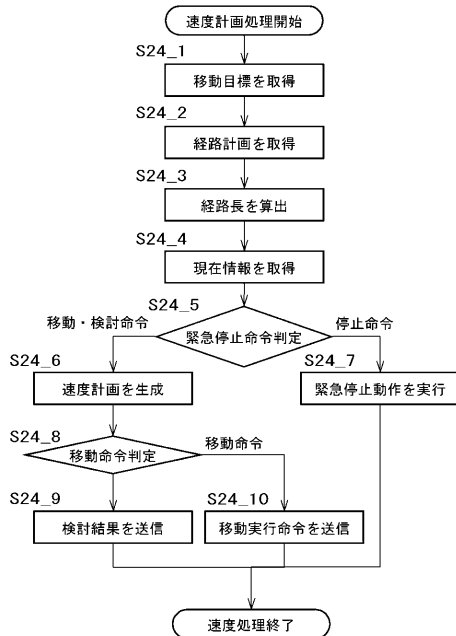
【図 4】

図 4



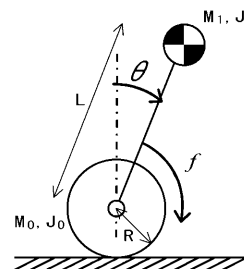
【図 5】

図 5



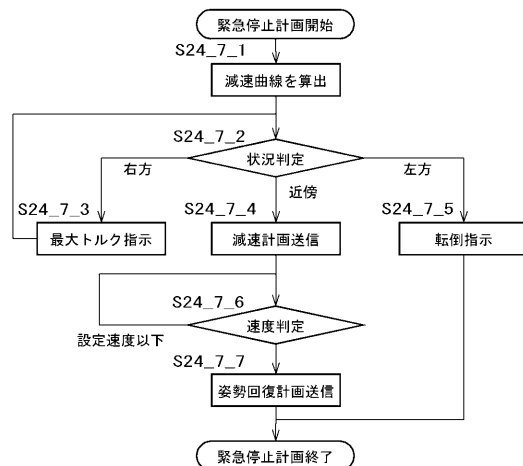
【図 6】

図 6

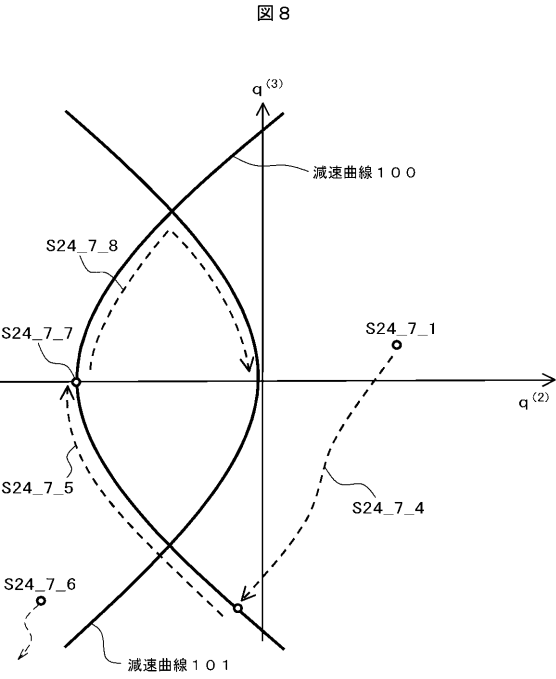


【図 7】

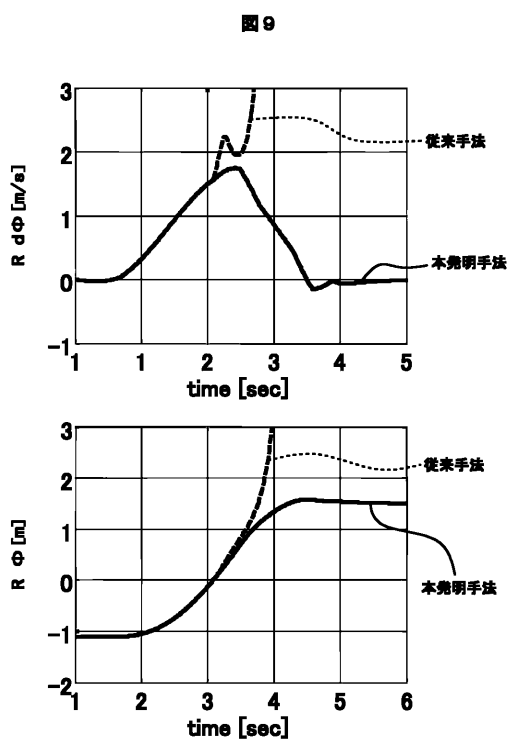
図 7



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

審査官 川東 孝至

- (56)参考文献 特開2010-047095 (JP, A)
特開2000-052985 (JP, A)
特開平05-181537 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|---------|-----------|
| G 0 5 D | 1 / 0 8 |
| B 2 5 J | 5 / 0 0 |
| B 6 2 K | 3 / 0 0 |
| B 6 2 K | 1 7 / 0 0 |