

明 細 書

発明の名称：

移動体制御装置、移動体、移動体制御方法及びプログラム

技術分野

[0001] 本開示は、移動体制御装置、移動体、移動体制御方法及びプログラムに関する。

本願は、2019年2月20日に日本に出願された特願2019-028642号について優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 特許文献1には、軌道系交通システムにおいて、きめ細やかな操舵制御を可能とする自動操舵機構が開示されている。具体的には、特許文献1に記載のコントローラは、出発前に、出発地点から目的地点までの軌道条件、走行条件および車両条件から、軌道の変化点ごとに前後輪のパターン操舵角を表にしたパターン操舵角テーブルを作成し、出発点からの距離から当該パターン操舵角に基づいて舵角指令を算出している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2009-023509号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 従来技術においては、一定速での走行を前提とし、運動学（幾何学的関係）を用いた操舵角のみをフィードフォワード操舵角として演算しているものがある。この場合、予め記憶した移動経路の地図情報に基づいて操舵角指令を算出し、各輪の操舵角を制御するので、走行経路の変化点においても予め舵取りされるから、安定した舵取り乃至走行を行うことができる。しかしながら、このような算出方法では、例えば、移動体が加減速する場合など、動力学が必要な操舵には未対応のため、フィードフォワード操舵角の精度に誤

差が生じることが想定される。

- [0005] 本開示の目的は、動力学を考慮した、より精度の高いフィードフォワード操舵角の演算が可能な移動体制御装置、移動体、移動体制御方法及びプログラム提供することにある。

課題を解決するための手段

- [0006] 本開示の一態様によれば、移動体制御装置は、予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する移動体制御装置であって、台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得する情報取得部と、前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するフィードフォワード操舵角演算部と、を備え、前記フィードフォワード操舵角演算部は、前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分との和によって前記操舵角を演算する。
- [0007] 本開示の一態様によれば、移動体制御装置は、前記軌道情報は、更に、前記軌道の位置ごとのバンク角を含み、前記フィードフォワード操舵角演算部は、更に、前記バンク角に応じて前記移動体の左右方向に作用する力を用いて前記動力学成分を算出する。
- [0008] 本開示の一態様によれば、移動体制御装置は、現時点における前記軌道に対する前記移動体のずれ量を取得して、当該ずれ量が小さくなるような操舵角を演算するフィードバック操舵角演算部をさらに備える。
- [0009] 本開示の一態様によれば、前記フィードフォワード操舵角演算部は、後台車の位置における前記軌道の接線である第1接線に対し、前台車の位置における前記軌道の接線である第2接線がなす角度と、前記第1接線に直交する方向における前記後台車と前記前台車との間の距離とに基づいて、前記運動学成分を算出する。

- [0010] 本開示の一態様によれば、移動体は、上述の移動体制御装置を備える。
- [0011] 本開示の一態様によれば、移動体制御方法は、予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する方法であって、台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得するステップと、前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するステップと、を有し、前記操舵角を演算するステップは、前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分との和によって前記操舵角を演算するステップを有する。
- [0012] 本開示の一態様によれば、プログラムは、予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する移動体制御装置のコンピュータに、台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得するステップと、前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するステップと、を実行させる。前記操舵角を演算するステップは、前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分との和によって前記操舵角を演算するステップを有する。

発明の効果

- [0013] 上述の開示の各態様によれば、動力学を考慮した、より精度の高いフィードフォワード操舵角の演算が可能となる。

図面の簡単な説明

- [0014] [図1]第1の実施形態に係る移動体の全体構成を示す図である。

[図2]第1の実施形態に係る移動体の機能構成を示す第1の図である。

[図3]第1の実施形態に係る移動体の機能構成を示す第2の図である。

[図4]第1の実施形態に係る移動体の機能構成を示す第3の図である。

[図5]第1の実施形態に係るコントローラの処理フローを示す図である。

[図6]第1の実施形態に係るコントローラの処理を詳細に説明するための図である。

[図7]第2の実施形態に係るコントローラの処理を詳細に説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0015] <第1の実施形態>

以下、第1の実施形態に係る移動体制御装置、及び、これを備える移動体について、図1～図6を参照しながら説明する。

[0016] (移動体の全体構成)

図1は、第1の実施形態に係る移動体の全体構成を示す図である。

[0017] 移動体1は、軌道系交通システムに用いられる移動体(車両)であって、予め定められた軌道W1上を自動で走行する。軌道W1は、移動体1の現在位置から目的地までの移動経路Wに沿って予め規定されている。

[0018] 図1に示すように、移動体1は、移動体筐体1Aと、前側の左右輪である前台車TF_l、TF_rと、後側の左右輪である後台車TR_l、TR_rとを備える。移動体1は、前台車TF_l、TF_r、及び、後台車TR_l、TR_rを個別に操舵可能とされている。

[0019] 移動体筐体1Aは、コントローラ10(移動体制御装置)と、アクチュエータ11F、11Rと、操舵角センサ12F、12Rと、速度検知装置13と、位置検知装置14と、変位センサ15F、15Rとを有している。

[0020] コントローラ10は、移動体1の走行制御全体を司る。コントローラ10の機能の詳細については後述する。

アクチュエータ11Fは、前台車TF_l、TF_rの操舵機構である。アクチュエータ11Rは、後台車TR_l、TR_rの操舵機構である。アクチュエ

ータ 11 F、11 R は、コントローラ 10 から出力される操舵角指令に従って動作する。

操舵角センサ 12 F、12 R は、アクチュエータ 11 F、11 R がなす操舵角を検出するセンサである。

速度検知装置 13 は、いわゆる速度センサであって、移動体 1 の走行速度を検知する。位置検知装置 14 は、例えば、GNSS (Global Navigation Satellite System) によって提供される測位情報から移動体 1 の現在位置を検知する。

変位センサ 15 F、15 R は、それぞれ、移動体筐体 1 A の前側及び後側に設置され、設置位置における軌道 W1 からのずれ量（変位）を検知するセンサである。

[0021] (移動体の機能構成)

図 2～図 4 は、それぞれ、第 1 の実施形態に係る移動体の機能構成を示す図である。図 2 に示すように、コントローラ 10 は、CPU 100 と、接続インタフェース 101 と、メモリ 102 と、ストレージ 103 とを備えている。

[0022] CPU 100 は、予め用意されたプログラムに従って動作するプロセッサである。CPU 100 が実行する処理については後述する。

接続インタフェース 101 は、上述した各種アクチュエータ、センサ類との接続インタフェースである。

メモリ 102 は、いわゆる主記憶装置であって、CPU 100 がプログラムに従って動作するための命令、データ等が展開される。

ストレージ 103 は、いわゆる補助記憶装置であって、例えば、HDD (Hard Disk Drive)、SSD (Solid State Drive) 等である。本実施形態においては、このストレージ 103 には、予め、移動体固有情報及び軌道情報が記録されている。

[0023] 「移動体固有情報」とは、移動体 1 に関する固有の情報であって、当該移動体 1 の普遍的な値を示す情報である。具体的には、移動体固有情報には、

移動体 1 の重さ（車体質量）が含まれる。また、移動体固有情報には、移動体筐体 1 A の重心と、前台車 T F l、T F r との位置関係、及び、移動体筐体 1 A の重心と、後台車 T R l、T R r との位置関係を示す情報（以下、「台車位置」とも表記する。）が含まれる。

[0024] 「軌道情報」とは、軌道 W 1 のスタートからゴールまでを所定の単位距離で分節してなる軌道 W 1 上の位置ごとに紐づく情報群である。具体的には、図 3 に示すように、軌道情報は、軌道 W 1 上の各位置（ c_0 、 c_1 、 $\dots$ ）における曲率（ s_0 、 s_1 、 $\dots$ ）、曲率変化率（ s_{x0} 、 s_{x1} 、 $\dots$ ）、及び、バンク角（ ϕ_0 、 ϕ_1 、 $\dots$ ）を示している。なお、曲率変化率とは、軌道 W 1 における単位距離当たりの曲率（ s_0 、 s_1 、 $\dots$ ）の変化率である。他の実施形態に係るコントローラ 10 は、軌道上の位置（ c_0 、 c_1 、 $\dots$ ）と、曲率（ s_0 、 s_1 、 $\dots$ ）との関係から曲率変化率を演算して取得する態様であってもよい。

[0025] 図 4 を参照しながら、CPU 100 が有する機能について詳しく説明する。

CPU 100 は、予め用意されたプログラムに従って動作することで、以下の、情報取得部 1000、フィードフォワード操舵角演算部 1001、フィードバック操舵角演算部 1002、及び、操舵角指令出力部 1003 としての機能を発揮する。

[0026] 情報取得部 1000 は、軌道 W 1 を走行する移動体 1 に関する各種情報を逐次取得する。具体的には、情報取得部 1000 は、ストレージ 103 を参照して、移動体固有情報及び軌道情報を取得する。また、情報取得部 1000 は、速度検知装置 13 を介して移動体 1 の走行速度（以下、「移動体速度」とも表記する。）を取得する。また、情報取得部 1000 は、位置検知装置 14 を介して移動体 1 の現在位置（以下、「移動体位置」とも表記する。）を取得する。

また、情報取得部 1000 は、変位センサ 15 F、15 R を介して、各々の設置位置における現時点の軌道 W 1 からのずれ量（変位）を取得する。ま

た、情報取得部１０００は、操舵角センサ１２Ｆ、１２Ｒを介して、アクチュエータ１１Ｆ、１１Ｒそれぞれにおける現時点の操舵角を取得する。

[0027] フィードフォワード操舵角演算部１００１は、情報取得部１０００が取得した各種情報（移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、軌道情報）を用いて、フィードフォワードで、アクチュエータ１１Ｆ、１１Ｒそれぞれに指令すべき操舵角を演算する。

[0028] 図４に示すように、フィードフォワード操舵角演算部１００１は、更に、運動学成分演算部１００１ａと、動力学成分演算部１００１ｂとしての機能を有する。

運動学成分演算部１００１ａは、移動体固有情報に示される「台車位置」と、「移動体位置」における軌道Ｗ１の「曲率」との幾何学的関係に基づいて、指令すべき操舵角の運動学成分を算出する。

動力学成分演算部１００１ｂは、移動体固有情報に示される「台車位置」、「車体質量」、「移動体速度」、及び、「移動体位置」における軌道Ｗ１の「曲率」を含む運動方程式に基づいて、指令すべき操舵角の動力学成分を算出する。

[0029] フィードバック操舵角演算部１００２は、変位センサ１５Ｆ、１５Ｒ、及び、操舵角センサ１２Ｆ、１２Ｒを介して、現時点におけるずれ量と操舵角とを取得し、操舵角のフィードバック制御を行う。具体的には、フィードバック操舵角演算部１００２は、現時点における軌道Ｗ１に対する移動体１のずれ量を取得し、次の時刻に適用すべき操舵角として当該ずれ量が小さくなるような操舵角を演算する。

[0030] 操舵角指令出力部１００３は、フィードフォワード操舵角演算部１００１によって演算されたフィードフォワード操舵角と、フィードバック操舵角演算部１００２によって演算されたフィードバック操舵角との合計を示す操舵角指令を、アクチュエータ１１Ｆ、１１Ｒに向けて出力する。

[0031] （移動体制御装置の処理フロー）

図５は、第１の実施形態に係るコントローラの処理フローを示す図である

。

図6は、第1の実施形態に係るコントローラの処理の詳細な説明に用いる図である。以下、図5、図6を参照しながら、コントローラが実行する各処理について詳しく説明する。

[0032] まず、CPU100の情報取得部1000は、ストレージ103及び速度検知装置13、位置検知装置14を通じて各種情報を取得する（ステップS01）。具体的には、情報取得部1000は、「移動体位置」、「移動体速度」、移動体固有情報に含まれる「台車位置」、「車体質量」、及び、軌道情報（図3）を取得する。

[0033] 次に、CPU100のフィードフォワード操舵角演算部1001は、ステップS01に基づいて導出されるフィードフォワード操舵角を演算する（ステップS02）。このステップS02において、運動学成分演算部1001aは、フィードフォワード操舵角の運動学成分を演算し（ステップS02a）、動力学成分演算部1001bは、フィードフォワード操舵角の動力学成分を演算する（ステップS02b）。

[0034] ステップS02a及びステップS02bの処理の内容について、図6を参照しながら詳しく説明する。

[0035] 図6は、移動体1が、軌道W1の一部をなす半径Rの円軌道上を走行している場合における、移動体1と軌道W1との幾何学的関係を示している。図6は、移動体1の前後方向を±X方向で表し、移動体1の左右方向（走行面において前後方向に直交する方向）を±Y方向で表し、移動体1の上下方向（走行面に直交する方向）を±Z方向で表している。

[0036] 以下の説明において、移動体1の前側左右に設置された2つの前台車TF_l、TF_rは、各々の左右方向における中心（即ち、車両中心軸E上）に設置された単一の仮想的な前台車TF_iに置き換えて説明する。また、以下の説明において、移動体1の後側左右に設置された2つの後台車TR_l、TR_rを、各々の左右方向における中心位置（即ち、車両中心軸E上）に設置された単一の仮想的な後台車TR_iに置き換えて説明する。

[0037] なお、図6に示す前台車距離 l_f は、移動体筐体1Aの重心Cから前台車TF_iまでの距離である。また、図6に示す後台車距離 l_r は、移動体筐体1Aの重心Cから後台車TF_rまでの距離である。また、図6に示す台車間距離 L は、前台車TF_iから後台車TF_rまでの距離であって、本実施形態においては、前台車距離 l_f と後台車距離 l_r との合計に一致する($L = l_f + l_r$)。前台車距離 l_f 及び後台車距離 l_r は、移動体固有情報として予めストレージ103に記録されている。

[0038] また、半径 R の円軌道上を走行する移動体1の旋回半径 r は、円軌道の原点Oから移動体筐体1Aの重心Cまでの距離である。なお、旋回半径 r は、円軌道の半径 R と、前台車距離 l_f 又は後台車距離 l_r との幾何学的関係から算出可能なパラメータである。更に、円軌道の半径 R は、当該円軌道の曲率 s に基づいて算出可能である($R = 1/s$)。

[0039] 一般に、台車の操舵角を“ δ ”とし、台車の取り付け位置における速度ベクトルが車両中心軸Eに対してなす角度を“ δ_k ”としたとき、操舵角 δ 、角度 δ_k と、台車が発生する横力 f (±Y方向に作用する力)との関係は、式(1)で表される。

[0040] [数1]

$$f = 2K(\delta - \delta_k) \quad \dots (1)$$

[0041] 式(1)を変形すると、台車に指令すべき操舵角は、式(2)で表現できる。

[0042] [数2]

$$\delta = \delta_k + \frac{f}{2K} \quad \dots (2)$$

[0043] 式(1)、(2)の“ K ”は、すべり角($\delta - \delta_k$)に応じて一つの車輪が発生させる横力 f の比例係数 K (コーナリングパワー)である。本実施形態において、前台車、後台車は、それぞれ左右2つずつあるので式(1)、(2)では“ $2K$ ”としている。なお、この比例係数 K は、移動体固有情報に含まれる情報の一つであって、予めストレージ103に記録されている既

知の情報である。

[0044] 前台車TF_iについての操舵角 δ を“ δ_f ”とし、後台車TR_iについての操舵角 δ を“ δ_r ”として式(2)に従えば、操舵角 δ_f 、 δ_r は、式(3)で表される。

[0045] [数3]

$$\left. \begin{aligned} \delta_f &= \delta_{fk} + \frac{f_f}{2K} = \delta_{fk} + \delta_{fd} \\ \delta_r &= \delta_{rk} + \frac{f_r}{2K} = \delta_{rk} + \delta_{rd} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

[0046] 式(3)における“ δ_{fk} ”は、前台車TF_iの取り付け位置における速度ベクトルが車両中心軸Eに対してなす角度である。また、式(3)における“ δ_{rk} ”は、後台車TR_iの取り付け位置における速度ベクトルが車両中心軸Eに対してなす角度である(図6参照)。

また、式(3)における“ f_f ”は、前台車TF_iがその取り付け位置に発生させる横力であり、式(3)における“ f_r ”は、後台車TR_iがその取り付け位置に発生させる横力である。式(3)に示すように、“ $f_f/2K$ ”を“ δ_{fd} ”とおき、“ $f_r/2K$ ”を“ δ_{rd} ”とおくと、前台車TF_i、後台車TR_iのそれぞれに与えるべき操舵角 δ_f 、 δ_r は、力に依存しない成分(幾何学的関係から定まる成分)である運動学成分 δ_{fk} 、 δ_{rk} と、力に依存する成分である動力学成分 δ_{fd} 、 δ_{rd} とに分けることができる。

[0047] (運動学成分の算出手順)

運動学成分演算部1001aによる運動学成分 δ_{fk} 、 δ_{rk} の算出手順(ステップS02a)について説明する。

[0048] 運動学成分 δ_{fk} 、 δ_{rk} は、移動体1が存在する位置における軌道W1の曲率 $s (= 1/R)$ を用いて式(4)で表すことができる。

[0049]

[数4]

$$\left. \begin{aligned} \delta_{fk} &= \sin^{-1} \frac{L}{2} s \\ \delta_{rk} &= -\sin^{-1} \frac{L}{2} s \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

[0050] そこで、運動学成分演算部1001aは、ステップS02aにおいて、軌道情報(図3)を参照し、位置検知装置14を介して取得した「移動体位置」(現在位置)に対応する曲率sを特定する。そして、運動学成分演算部1001aは、特定した曲率sと、既知の台車間距離Lとを式(4)に代入して運動学成分 δ_{fk} 、 δ_{rk} を演算する。

[0051] (動力学成分の算出手順)

動力学成分演算部1001bによる動力学成分 δ_{fd} 、 δ_{rd} の算出手順(ステップS02b)について説明する。

[0052] 移動体1が図6に示す軌道W1に沿って移動するとき、移動体筐体1Aの左右方向(±Y方向)についての並進の運動方程式(式(5))と、重心C周りの回転の運動方程式(式(6))が成り立つ。なお、文章中においては、“ θ_{des} ”に1つのドットが付された記号を“ $\theta_{des}(\cdot)$ ”と表記し、“ θ_{des} ”に2つのドットが付された記号を“ $\theta_{des}(\cdot\cdot)$ ”と表記する。

[0053] [数5]

$$mr\ddot{\theta}_{des} = f_f + f_r \dots (5)$$

[0054] [数6]

$$I\ddot{\theta}_{des} = l_f f_f - l_r f_r \dots (6)$$

[0055] 式(5)における“ $\theta_{des}(\cdot)$ ”は、移動体1のヨー角速度である。式(5)左辺の“ $mr\ddot{\theta}_{des}(\cdot)$ ”は、車体質量mの移動体筐体1Aが旋回半径rで旋回する際に、重心Cから原点Oに向かって発生する向心力である。即ち、式(5)に示すように、移動体筐体1Aに発生する向心力“ $mr\ddot{\theta}_{des}(\cdot)$ ”は、前台車TFiが発生させる横力 f_f と、後台車TR

i が発生させる横力 f_r との合計と釣り合う。

[0056] 式 (6) における “ $\theta_{des}(\cdot\cdot)$ ” は、移動体 1 のヨー角加速度である。また、式 (6) における “ l ” は、移動体筐体 1 A の慣性モーメントであり、車体質量 m 、旋回半径 r より算出可能である ($l = m r^2$)。式 (6) 左辺の “ $l \theta_{des}(\cdot\cdot)$ ” は、移動体筐体 1 A に作用するトルクである。即ち、式 (6) に示すように、移動体筐体 1 A を回転させるトルク “ $l \theta_{des}(\cdot\cdot)$ ” は、前台車 TFi がその取り付け位置に作用させる横力 f_f に基づくトルク ($l f \cdot f_f$) と、後台車 TRi がその取り付け位置に作用させる横力 f_r に基づくトルク ($-l r \cdot f_r$) との合計と一致する。

[0057] 更に、ヨー角速度 $\theta_{des}(\cdot)$ 、及び、ヨー角加速度 $\theta_{des}(\cdot\cdot)$ は、それぞれ、式 (7)、式 (8) で表される。

[0058] [数7]

$$\dot{\theta}_{des} = sv \quad \dots (7)$$

[0059] [数8]

$$\ddot{\theta}_{des} = \dot{s}v + s\dot{v} = s_x v^2 + sa \quad \dots (8)$$

[0060] 式 (7) における “ v ” は、移動体速度（走行速度）である。動力学成分演算部 1001b は、ステップ S02b において、軌道情報（図 3）を参照し、位置検知装置 14 を介して取得した移動体位置（現在位置）に対応する曲率 s を特定する。そして、動力学成分演算部 1001b は、速度検知装置 13 を介して取得した移動体速度 v と、軌道情報から特定した曲率 s とを式 (7) に代入することで、ヨー角速度 $\theta_{des}(\cdot)$ を算出する。

[0061] 式 (8) における “ s_x ” は、曲率変化率である。また、式 (8) における “ a ” は、移動体加速度（走行方向の加速度）である。移動体加速度 a は、速度検知装置 13 を介して取得した移動体速度 v を時間微分することで算出可能である。

式 (8) における “ s_x ” は、曲率変化率である。動力学成分演算部 10

01bは、ステップS02bにおいて、軌道情報（図3）を参照し、位置検知装置14を介して取得した「移動体位置」（現在位置）に対応する曲率s及び曲率変化率sxを特定する。そして、動力学成分演算部1001bは、速度検知装置13を介して取得（算出）した移動体速度v（移動体加速度a）と、軌道情報から特定した曲率s、曲率変化率sxとを式（8）に代入することで、ヨー角加速度 $\theta_{des}(\dots)$ を算出する。

[0062] 式（5）及び式（6）で示した運動方程式を、前台車TFiの横力ff、及び、後台車TRiの横力frそれぞれについて解くと、式（9）となる。

[0063] [数9]

$$\left. \begin{aligned} f_f &= \frac{I\ddot{\theta}_{des} + l_r m v \dot{\theta}_{des}}{L} \\ f_r &= \frac{-I\ddot{\theta}_{des} + l_f m v \dot{\theta}_{des}}{L} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

[0064] ただし、式（9）では、“lf+lr”を“L”とおいている。

[0065] 次に、軌道W1のバンク角φを考慮して、前台車TFi及び後台車TRiのそれぞれが、実際に発生すべき力ffTire、frTireを求める。前台車TFi及び後台車TRiのそれぞれが実際に発生すべき力ffTire、frTireは、横力ff、frから、軌道W1のバンク角φによって発生する力ffBank、frBankを差し引くことで求められる。具体的には、前台車TFi及び後台車TRiのそれぞれが実際に発生すべき力ffTire、frTireは、式（10）のように表される。

[0066] [数10]

$$\left. \begin{aligned} f_{fTire} &= f_f - f_{fBank} = \frac{I\ddot{\theta}_{des} + l_r m v \dot{\theta}_{des} - l_r m g \sin \phi_f}{L} \\ f_{rTire} &= f_r - f_{rBank} = \frac{-I\ddot{\theta}_{des} + l_f m v \dot{\theta}_{des} - l_f m g \sin \phi_r}{L} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

[0067] 式（10）において、前台車TFiの取り付け位置における軌道W1のバンク角を“φf”とし、後台車TRiの取り付け位置における軌道W1のバンク角を“φr”としている。軌道W1のバンク角φによって発生する力f

f_{Bank} 、 f_{rBank} は、移動体筐体1Aに作用する重力（車体質量 m と重力加速度 g との積）に応じて発生する左右方向の力である。

[0068] 滑り角（ $\delta - \delta_k$ ）に、コーナリングパワー“2K”を乗じたものが、前台車TFi及び後台車TRiのそれぞれが発生すべき力 f_{fTire} 、 f_{rTire} である。したがって、前台車TFiに与えるべき操舵角の動力学成分 δ_{fd} 、及び、後台車TRiに与えるべき操舵角の動力学成分 δ_{rd} は、それぞれ、式（11）で表される。

[0069] [数11]

$$\left. \begin{aligned} \delta_{fd} &= \frac{I\ddot{\theta}_{des} + l_f m(v\dot{\theta}_{des} - g \sin \phi_f)}{2KL} \\ \delta_{rd} &= \frac{-I\ddot{\theta}_{des} + l_r m(v\dot{\theta}_{des} - g \sin \phi_r)}{2KL} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

[0070] 動力学成分演算部1001bは、ステップS02bにおいて、更に、式（11）に、移動体1のヨー角速度 $\dot{\theta}_{des}(\cdot)$ （式（7））、及び、ヨー角加速度 $\ddot{\theta}_{des}(\cdot)$ （式（8））を代入することで、動力学成分 δ_{fd} 、 δ_{rd} を演算する。このとき、動力学成分演算部1001bは、軌道情報（図3）を参照し、位置検知装置14を介して取得した「移動体位置」（現在位置）に対応する前台車TFiのバンク角 ϕ_f 及び後台車TRiのバンク角 ϕ_r を特定する。

[0071] 以上のようにして、フィードフォワード操舵角演算部1001は、式（4）に基づいて操舵角 δ_f 、 δ_r の運動学成分 δ_{fk} 、 δ_{rk} を算出し、式（11）に基づいて動力学成分 δ_{fd} 、 δ_{rd} を算出する。

[0072] 図5に戻り、次に、フィードバック操舵角演算部1002は、変位センサ15F、15Rを介して取得した変位と、操舵角センサ12F、12Rを介して取得した現時点の操舵角を取得して、フィードバック操舵角を演算する（ステップS03）。本実施形態に係るフィードバック操舵角演算部1002が実行するフィードバック制御は、既知の技術で実現可能であるため、詳細な説明を省略する。

[0073] 次に、操舵角指令出力部1003は、フィードフォワード操舵角演算部1

001によって算出されたフィードフォワード操舵角(δf 、 δd)と、フィードバック操舵角演算部1002によって算出されたフィードバック操舵角とを統合し、新たな操舵角指令として、アクチュエータ11F、11Rに向けて出力する(ステップS04)。

[0074] (作用、効果)

以上に説明した通り、第1の実施形態に係るコントローラ10(移動体制御装置)は、移動体固有情報(台車位置 l_f 、 l_r 、車体質量 m 、コーナリングパワー K)、移動体位置、移動体速度、及び、軌道情報(図3)を用いて、前台車TF i 、後台車TR i それぞれに与えるべき操舵角 δf 、 δr を演算するフィードフォワード操舵角演算部1001を具備することを特徴とする。そして、このフィードフォワード操舵角演算部1001は、台車位置 l_f 、 l_r と、移動体位置(現在位置)における軌道W1の曲率 s との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、台車位置、車体質量 m 、移動体速度 v 、及び、移動体位置(現在位置)における軌道の曲率 s 及び曲率変化率 s_x を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分との和によって操舵角 δf 、 δd を演算する。

[0075] 本実施形態に係るコントローラ10は、上記のような特徴を有することで、以下のような効果を奏する。即ち、運動学成分(幾何学的関係に基づく操舵角)だけでなく、移動体1に作用する力に応じた成分である動力学成分を考慮して操舵角を算出することができる。これにより、移動体1が加減速した場合や、軌道W1にバンク角が存在する場合も、加速度やバンク角に応じた適切な操舵角を算出することができる。また、通常の軌道は、直線軌道(曲率 $s=0$)の軌道と、曲率 $s=s_0$ ($s_0>0$)の円軌道との境界には、曲率 s を0から s_0 に緩やかに変化させるための緩和曲線が設けられる。本実施形態に係るコントローラ10によれば、この緩和曲線の特性(即ち、軌道情報曲率変化率 s_x)も動的に考慮される。

[0076] <第2の実施形態>

次に、第2の実施形態に係る移動体制御装置、及び、これを備える移動体

について、図 7 を参照しながら説明する。なお、第 2 の実施形態に係る移動体 1 の機能構成等については第 1 の実施形態と同様であるため図示を省略する。

[0077] (運動学成分の算出手順)

図 7 は、第 2 の実施形態に係るコントローラ 10 の機能構成を説明するための図である。

第 1 の実施形態に係る運動学成分演算部 1001a は、式 (4) に基づいて操舵角の運動学成分 δf_k 、 δr_k を算出するものとして説明した。しかし、式 (4) は、曲率 s が一定の円軌道 (近似曲線) を走行することを前提としているため、実際の軌道 $W1$ における曲率 s の変化点前後では誤差が生じ得る。そこで、第 2 の実施形態に係る運動学成分演算部 1001a は、以下に説明する手順で運動学成分 δf_k 、 δr_k を算出する。

[0078] 図 7 に示すように、移動体筐体 1A の後台車 TR_i の取り付け位置を、 x y 座標の原点 O とする。 x y 座標の x 軸は、原点 O における軌道 $W1$ の接線に一致する。また、 x y 座標の y 軸は、 x 軸 (原点 O における軌道 $W1$ の接線) に直交する。

また、移動体筐体 1A の前台車 TF_i の取り付け位置を示す点 P は、 x 軸の正の位置に存在するものとする。

[0079] 軌道 $W1$ 上の任意の位置を原点 O からの距離 c で表すものとする、軌道 $W1$ の軌道形状は、式 (12) のように定義される。

[0080] [数12]

$$\left. \begin{array}{l} y = y(c) \\ x = x(c) \end{array} \right\} \dots (12)$$

[0081] また、軌道 $W1$ 上の任意の位置 (x 、 y) における接線が原点 O における接線 (x 軸) に対してなす角度を “ θ ” とすると、式 (13) が成り立つ。

[0082] [数13]

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} \dots (13)$$

[0083] 更に、この角度 θ を用いて、曲率変化率 s_x を式 (14) で表すことができる。

[0084] [数14]

$$\frac{d\theta}{dc} = s_x(c) \quad \dots (14)$$

[0085] 式 (14) によれば、軌道情報に事前に記録されている曲率変化率 s_x を原点 O からの距離 c で積分することで、その軌道 $W1$ 上の任意の位置における角度 θ を算出することができる。

[0086] ここで、後台車 TR_i から前台車 TF_i までの範囲では、軌道 $W1$ と x 軸が接近しているので、“ $dx = dc$ ” と近似できる。そうすると、式 (13) に基づいて式 (15) が成り立つ。

[0087] [数15]

$$\frac{dy}{dc} \cong \tan \theta \quad \dots (15)$$

[0088] 式 (15) によれば、式 (15) の右辺 “ $\tan \theta$ ” を原点 O からの距離 c で積分することで、その軌道 $W1$ 上の任意の位置における y 座標値を算出することができる。つまり、式 (14) 及び式 (15) を用いることで、軌道情報 (図3) の曲率変化率 s_x から、軌道 $W1$ 上の任意の位置における y 座標の値を算出することができる。

[0089] 図7によれば、原点 O に位置する後台車 TR_i の操舵角の運動学成分 δ_{rk} は、車体中心軸 E を基準として角度 ($-\psi$) で表される。したがって、運動学成分 δ_{rk} は、式 (16) のようにして求められる。

[0090] [数16]

$$\begin{aligned} \delta_{rk} &= -\psi \\ &= -\tan^{-1} \left(\frac{y(L)}{L} \right) \\ &= -\tan^{-1} \left(\frac{y_f}{L} \right) \quad \dots (16) \end{aligned}$$

[0091] 式 (16) における “ y_f ” は、点 P (前台車 TF_i の取り付け位置) の y 座標値であって、式 (15) より “ $\tan \theta$ ” を原点 O からの距離 c (=

台車間距離 L)で積分することにより得ることができる。

[0092] また、図7によれば、点Pに位置する前台車TF i の操舵角の運動学成分 δf_k は、車体中心軸Eを基準として角度 $(\theta_f - \psi)$ で表される。ここで、“ θ_f ”は、点Pにおける角度 θ であって、式(14)より曲率変化率 s_x を原点Oからの距離 c (=台車間距離 L)で積分することにより得ることができる。したがって、前台車TF i の運動学成分 δf_k は、式(17)で求められる。

[0093] [数17]

$$\begin{aligned}\delta_{fk} &= \theta_f - \psi \\ &= \theta_f - \tan^{-1}\left(\frac{y_f}{L}\right) \quad \dots (17)\end{aligned}$$

[0094] (作用、効果)

以上の通り、第2の実施形態に係るコントローラ10(運動学成分演算部1001a)は、後台車TR i の位置(原点O)における軌道W1の接線(x 軸(第1接線))に対し前台車TF i の位置(点P)における軌道W1の接線(第2接線)がなす角度 θ_f と、 x 軸に直交する方向(y 軸方向)における後台車TR i と前台車TF i との間の距離 y_f とに基づいて、運動学成分を算出する。

このようにすることで、軌道情報に記録された曲率変化率 s_x に基づいて、後台車の位置に対応する軌道W1の接線、及び、前台車の位置に対応する軌道W1の接線の方法が計算されるので、円軌道の近似曲線を用いずに操舵角の運動学成分が算出される。したがって、軌道W1における曲率 s の変化点前後で生じる誤差を低減できる。

[0095] <第2の実施形態の変形例>

第2の実施形態の変形例に係る移動体制御装置、及び、これを備える移動体について説明する。

[0096] 変形例に係るコントローラ10は、積分区間を分割して考える区分解析積分により、計算量を落として解くことを特徴とする。以下、詳細に説明する。

[0097] 台車間距離 L の範囲でみれば角度 θ （図7）は微小である。したがって、式（18）のように近似することができる。

[0098] [数18]

$$\frac{dy}{dc} \cong \tan \theta \quad \dots (18)$$

[0099] 式（18）によれば、第2の実施形態で説明した微分方程式（式（14）、式（15））は、式（19）のように表される。

[0100] [数19]

$$\left. \begin{array}{l} y(0) = 0 \\ \theta(0) = 0 \\ \frac{dy}{dc} = \theta \\ \frac{d\theta}{dc} = s_x(c) \end{array} \right\} \quad \dots (19)$$

[0101] つまり、曲率変化率 s_x を1回積分したものが“ θ ”であり、2回積分したものが“ y ”となる。

[0102] ところで、軌道 $W1$ を構成する形状要素は、「直線」、「曲線」（円軌道）、「緩和曲線」のいずれかであるから、各形状要素の形状区間 i における曲率は、以下の一次式（式（20））で表すことができる。

[0103] [数20]

$$s_i(c_i) = a_i c_i + b_i \quad \dots (20)$$

[0104] 式（20）において、“ c_i ”は各形状要素の区間入口からの相対距離であり、“ a_i ”、“ b_i ”は、形状要素に応じて定まる定数である。例えば、形状区間 i の形状要素が「直線」である場合、“ $a_i = 0$ ”、“ $b_i = 0$ ”である。また、形状区間 i の形状要素が「曲線」である場合、“ $a_i = 0$ ”、“ $b_i = b_{i1}$ ”（ b_{i1} ＝「曲線」の曲率に応じた定数）である。また、形状区間 i の形状要素が「緩和曲線」である場合、“ $a_i = a_{i1}$ ”（ a_{i1} ＝「緩和曲線」の曲率変化率に応じた定数）、“ $b_i = b_{i1}$ ”（ b_{i1} ＝「緩和曲線」の区間入口の曲率 s に応じた定数）である。

[0105] 後台車から前台車までの間に N 個の形状区間 i があるとする、1番目の

出口の“y”、“θ”は式(21)となる。

[0106] [数21]

$$\left. \begin{aligned} \theta(L_1) &= \int_0^{L_1} (a_1 c + b_1) dc = \left[\frac{a_1}{2} c^2 + b_1 c \right]_0^{L_1} = \frac{a_1}{2} L_1^2 + b_1 L_1 \\ y(L_1) &= \int_0^{L_1} y(c) dc = \left[\frac{a_1}{6} c^3 + \frac{b_1}{2} c^2 + \theta_1 * c \right]_0^{L_1} = \frac{a_1}{6} L_1^3 + \frac{b_1}{2} L_1^2 + \theta_1 * L_1 \end{aligned} \right\} \dots (21)$$

[0107] 後の区間も同様に計算して加算すれば良いから、全体の計算結果は以下の漸化式(式(22))で表される。

[0108] [数22]

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \theta_{i-1} + \frac{a_i}{2} L_i^2 + b_i L_i \\ y_i &= y_{i-1} + \frac{a_i}{6} L_i^3 + \frac{b_i}{2} L_i^2 + \theta_i * L_i \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

[0109] ただし、“i”は1～Nであり、 $y_0 = 0$ 、 $\theta_0 = 0$ である。

[0110] 上記変形例に係るコントローラ10によれば、各形状要素の形状区間iごとの計算でよくなるため、計算精度を維持しつつ、計算量を低減することができる。これにより、例えば、オンラインで精度の高い操舵角の計算ができる。

[0111] 上述の第1～第2の実施形態において、上述したコントローラ10の各種処理の過程は、プログラムの形式でコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記憶されており、このプログラムをコンピュータが読み出して実行することによって上記各種処理が行われる。また、コンピュータ読み取り可能な記録媒体とは、磁気ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、DVD-ROM、半導体メモリ等をいう。また、このコンピュータプログラムを通信回線によってコンピュータに配信し、この配信を受けたコンピュータが当該プログラムを実行するようにしてもよい。

[0112] 上記プログラムは、上述した機能の一部を実現するためのものであってもよい。更に、上述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるもの、いわゆる差分ファイル(差分プログラム)であってもよい。

[0113] 以上のとおり、本開示に係るいくつかの実施形態を説明したが、これら全ての実施形態は、例として提示したものであり、開示の範囲を限定することを意図していない。これらの実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、開示の要旨を逸脱しない範囲で種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これらの実施形態及びその変形は、開示の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された開示とその均等の範囲に含まれる。

産業上の利用可能性

[0114] 上述の開示の各態様によれば、動力学を考慮した、より精度の高いフィードフォワード操舵角の演算が可能となる。

符号の説明

- [0115] 1 移動体
- 10 コントローラ（移動体制御装置）
 - 100 CPU
 - 1000 情報取得部
 - 1001 フィードフォワード操舵角演算部
 - 1001a 運動学成分演算部
 - 1001b 動力学成分演算部
 - 1002 フィードバック操舵角演算部
 - 1003 操舵角指令出力部
 - 101 接続インタフェース
 - 102 メモリ
 - 103 ストレージ
 - 11F、11R アクチュエータ
 - 12F、12R 操舵角センサ
 - 13 速度検知装置
 - 14 位置検知装置
 - 15F、15R 変位センサ

請求の範囲

- [請求項1] 予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する移動体制御装置であって、
- 台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得する情報取得部と、
- 前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するフィードフォワード操舵角演算部と、
- を備え、
- 前記フィードフォワード操舵角演算部は、
- 前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、
- 前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分と
- の和によって前記操舵角を演算する
- 移動体制御装置。
- [請求項2] 前記軌道情報は、更に、前記軌道の位置ごとのバンク角を含み、
- 前記フィードフォワード操舵角演算部は、更に、前記バンク角に応じて前記移動体の左右方向に作用する力を用いて前記動力学成分を算出する
- 請求項 1 に記載の移動体制御装置。
- [請求項3] 現時点における前記軌道に対する前記移動体のずれ量を取得して、当該ずれ量が小さくなるような操舵角を演算するフィードバック操舵角演算部をさらに備える
- 請求項 1 または請求項 2 に記載の移動体制御装置。
- [請求項4] 前記フィードフォワード操舵角演算部は、

後台車の位置における前記軌道の接線である第1接線に対し、前台車の位置における前記軌道の接線である第2接線がなす角度と、前記第1接線に直交する方向における前記後台車と前記前台車との間の距離とに基づいて、前記運動学成分を算出する

請求項1から請求項3のいずれか一項に記載の移動体制御装置。

[請求項5] 請求項1から請求項4のいずれか一項に記載の移動体制御装置を備える

移動体。

[請求項6] 予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する方法であって、

台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得するステップと、

前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するステップと、

を有し、

前記操舵角を演算するステップは、

前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、

前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分と

の和によって前記操舵角を演算するステップを有する

移動体制御方法。

[請求項7] 予め定められた軌道に沿って走行する移動体を制御する移動体制御装置のコンピュータに、

台車位置及び車体質量を含む移動体固有情報、移動体位置、移動体速度、及び、前記軌道の位置ごとの曲率を含む軌道情報を取得するス

テップと、

前記移動体固有情報、前記移動体位置、前記移動体速度、及び、前記軌道情報を用いて操舵角を演算するステップと、

を実行させ、

前記操舵角を演算するステップは、

前記台車位置と、前記移動体位置における前記軌道の曲率との幾何学的関係に基づいて算出される運動学成分と、

前記台車位置、前記車体質量、前記移動体速度、及び、前記移動体位置における前記軌道の曲率及び曲率変化率を含む運動方程式に基づいて算出される動力学成分と

の和によって前記操舵角を演算するステップを有する

プログラム。