

信地旋回を用いた横移動による倒立 2 輪ビークルの全方向移動の提案
 Proposal of Omnidirectional Movement for the Inverted Two-wheeled Vehicle
 by Lateral Movement Method Based on Pivot Turn

電気電子情報通信工学専攻 村越 司昂
 Kazutaka MURAKOSHI

1. 緒言

1.1 背景

現在、日本では少子高齢化が問題になっている。総務省の国勢調査によると2016年10月1日の時点で、総人口に占める65歳以上人口の割合（高齢化率）は27.3%となっており、約4人に1人が65歳以上の高齢者である。2025年で高齢化率は30%を超え、2065年には高齢化率は38.4%に達し、約2.6人に1人が65歳以上となることが予測されており、高齢化率は上昇傾向にあると考えられている [1]。

少子高齢が進むことで高齢者の買い物が難しい人の割合も増加しており、高齢者の買い物弱者問題として新しい社会問題となっている。また、この問題以外にも労働人口の減少により各産業の労働供給が労働需要を下回り、数百万人もの人手不足が予想されている [2]。これらの問題を解決するために倒立 2 輪ビークルなどの小型で扱いやすい移動ロボットの利用が期待されている。

1.2 研究目的

従来の倒立 2 輪ビークルは、3 輪や 4 輪などのビークルロボットに対し、その場旋回が可能であることや、傾斜のある路面においても車体部分を水平に保つことができるなどの利点を有する。しかし、接地点が2つの車輪のみであるため、静的に不安定であるという問題が存在する。また、倒立 2 輪ビークルはその場旋回することで全方向に移動が可能である。しかし、車体の横幅より狭い幅を持つ通路(以下、狭路)ではその場旋回が困難であり、車軸方向には移動できない制約が存在するため、全方向に移動ができない。このような狭路では、ビークルは切り返しを行いながら横方向へ移動する必要がある。従来研究では 4 輪などのドリフト走行が主流であるが、倒立 2 輪ビークルは上述のように不安定なためドリフト走行ができない。

本研究では、倒立 2 輪ビークルでその場旋回が困難である狭路条件でも全方向に移動できる横移動手法を提案する。提案手法はクローラ式移動機構で使用されている信地旋回を用いることで、倒立 2 輪ビークルはドリフト走行をせずに簡単に横方向に移動が可能となり、従来走行が困難であった狭路や曲がり角に対しても有効であることを示す。

2. 倒立 2 輪ビークル

2.1 倒立 2 輪ビークルの概要

倒立 2 輪ビークルの全体図を Fig.2.1 に示す。車体の素材は比較的軽量である金属のアルミフレームを用いる。車体の奥行・幅・高さは 170 mm×380 mm×775 mm であり、重量は 10.8kg となっている。また、制御に必要な車体の情報を

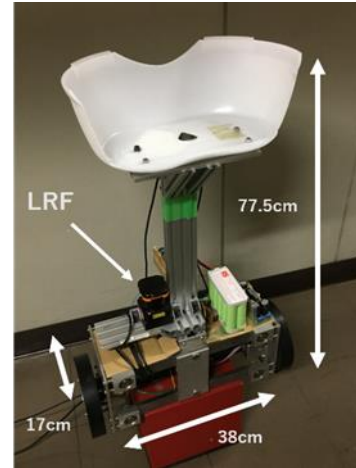


Fig.2.1 倒立 2 輪ビークル

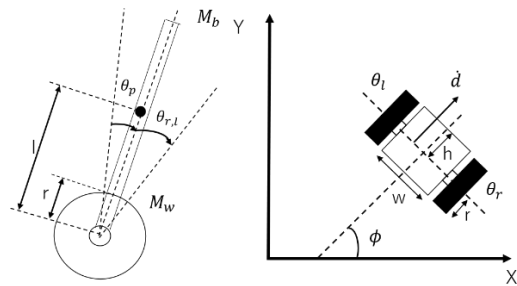


Fig.2.2 倒立 2 輪ビークルのモデル

各センサから取得する。具体的にジャイロセンサによって車体の角速度を取得、DC モータのエンコーダから車輪の回転角度情報を取得する。各情報を取得後モータ駆動のための電圧指令値を求める。マイコンでその電圧値から PWM 信号を生成しモータドライバ回路を介してモータを駆動させる。

2.2 モデリング

倒立 2 輪ビークルのモデルを Fig.2.2 に示す。倒立 2 輪ビークルの車体の傾き θ_p は鉛直方向から時計回りを正とする。車輪の回転角度 $\theta_{r,i}$ はモータに取り付けられたエンコーダによって得られる車体からの角度から算出し、車体の傾きと同様に、時計回りを正とする [3]。

ラグランジュ方程式に基づき、倒立 2 輪ビークルの車輪空間での運動方程式は以下で表される [4]。

$$J(q)\ddot{q} = \tau^{ref} - \tau^{ext} - h(q, \dot{q}) - g(q) \quad (2.1)$$

$$q = [\theta_p \ \theta_r \ \theta_l]^T \quad (2.2)$$

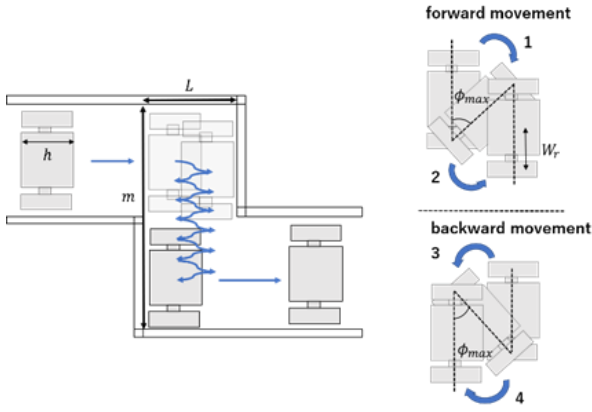


Fig.3.1 信地旋回を用いた横移動

ここで、 \mathbf{q} , $\boldsymbol{\tau}$, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$, $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 及び $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ はそれぞれ車輪空間角度ベクトル、トルクベクトル、慣性行列、コリオリ項、重力ベクトルを表す。また、添え字 res, ref, ext はそれぞれ応答値、参照値、外力項を表す。

3. 提案手法

3.1 信地旋回

信地旋回を用いて横移動を行うことを提案する。信地旋回は、車輪式移動機構やクローラ式移動機構において、左右どちらかの車輪の動きを止め、他方の駆動輪を回転することによって得られる旋回手法である [5]。つまり、車体の中心から車輪の中心を半径として描く旋回運動である。

3.2 信地旋回を用いた横移動手法

提案手法としてこの信地旋回を使用して横移動を行うことを検討する。Fig.3.1のように倒立2輪ビークルが壁に挟まれた通路内において、車体より幅が短い狭路であると想定する。倒立2輪ビークルは以下の手順により横移動を行うことを提案する。上記の動作を繰り返すことにより倒立2輪ビークルは横方向に走行が可能となる。そのため、横方向に移動するには、少なくとも信地旋回を4回用いる必要がある [6]。

倒立2輪ビークルがFig.3.1のように横移動を行うとすると、信地旋回を用いた横移動の軌道は位置座標 $[X \ Y]$ を用いて、

$$X_1 = X_{R1} + w_r \sin \phi^{cmd} \quad (3.1)$$

$$Y_1 = Y_{R1} + w_r \cos \phi^{cmd} \quad (3.2)$$

$$X_2 = X_{L2} - w_r \sin \phi^{cmd} \quad (3.3)$$

$$Y_2 = Y_{L1} - w_r \cos \phi^{cmd} \quad (3.4)$$

$$X_3 = X_{R3} - w_r \sin \phi^{cmd} \quad (3.5)$$

$$Y_3 = Y_{R3} + w_r \cos \phi^{cmd} \quad (3.6)$$

$$X_4 = X_{L4} + w_r \sin \phi^{cmd} \quad (3.7)$$

$$Y_4 = Y_{L4} - w_r \cos \phi^{cmd} \quad (3.8)$$

と表される。ただし、 $\phi_i^{cmd} = \phi_{max}$, $\phi_j^{cmd} = 0$ ($i =$ 奇数, $j =$ 偶数)である。ここで、 $X_{R,L}, Y_{R,L}, w_r$ はそれぞれ信地旋回時の左右の車輪の中心座標、信地旋回の半径である。

また、信地旋回の最大旋回角度は(3.1)式より次のように表される。

$$\phi_{max} = \arcsin \left[\frac{(L - h) - X_{R1}}{2w_r} \right] \quad (3.9)$$

信地旋回はこの最大旋回角度 ϕ_{max} まで車体を旋回させる。

つまり、信地旋回の最大旋回角度は走行する通路の幅、車体の幅に依存する。

3.3 躍度最小による各軌道の評価

提案手法の信地旋回を用いた横移動軌道の評価を行う。評価を行う変数として、倒立2輪ビークルがFig.3.1のように横移動を行うとして、ビークルはX軸方向へ切り返しを行い、Y軸方向へ移動する。そのため、ビークルの位置軌道 $Y(t)$ を評価する。

位置軌道 $Y(t)$ を評価するために躍度最小モデルを使用する。本研究では、生体の運動機能研究において、到達運動など人間の基本運動の随意運動を表現するモデルとして手先躍度最小規範が提案されており、このモデルを使用する [7]。位置軌道 $Y(t)$ に対して、次式で表す評価関数 c_j を最小にする。

$$C_j = \int_0^{t_f} \left(\frac{d^3 Y(t)}{dt^3} \right)^2 dt \quad (3.10)$$

ただし、 t_f は終点に至るまでの時刻である。位置軌道の評価に躍度最小モデルを用いることで、躍度を抑えている軌道かどうかの評価を行える。つまり、加加速度を抑えているかの判断ができ、よりスムーズに横方向へ移動しているかの評価が可能である。また、式(3.10)より躍度最小モデルに基づいた軌道は次式で表せる。

$$Y(c) = Y_0 + (Y_f - Y_0)(6c^5 - 15c^4 + 10c^3) \quad (3.11)$$

ただし、 Y_0, Y_f は始点、終点、 $c = \frac{t}{t_f}$ である。式(3.11)で生成さ

れた軌道を躍度最小軌道と呼ぶ。躍度最小軌道を基準に信地旋回を用いた提案手法である軌道と2点間の最短移動経路である三角波軌道の3つを比較を行う。各軌道の比較をFig.3.2に、各軌道ごとの評価関数 c_j で導出した結果をFig.3.3に示す。

Fig.3.2より提案手法の信地旋回は最短軌道経路である三角波と比べ、移動距離は長く、曲線が主軸の軌道となっている。

Fig.3.3より評価関数 c_j に基づいて各軌道の評価すると提案手法の軌道は、躍度最小軌道と比べ約10倍ほど値が大きい。また最短移動経路は躍度最小軌道に比べて約50倍ほど値が大きいことがわかる。つまり、提案手法の軌道は、最短移動経路に比べて約5倍ほど値が小さいことが確認できる。そのため、提案手法の軌道は最短移動経路より評価関数が小さいことが確認できるので、提案手法の信地旋回は躍度最小軌道に近く、最短移動経路より横方向へスムーズに走行することが示された。

提案手法の軌道は式(3.9)により通路の幅から軌道を導出できる利点が存在する。そのため、狭路内で倒立2輪ビークルが壁にぶつからずに移動できる領域を設定でき、安定して横方向へ走行が可能である。それに対し、躍度最小軌道では式(3.11)より車体の制約を考慮して軌道の生成を行うことが困難である。これにより、狭路内では躍度最小軌道よりも提案手法の軌道の方が壁にぶつからずに横方向に走行ができる。結果として、提案手法の軌道は狭路内において他の軌道よりも横移動に最適であると考え、本研究での検証に使用する。

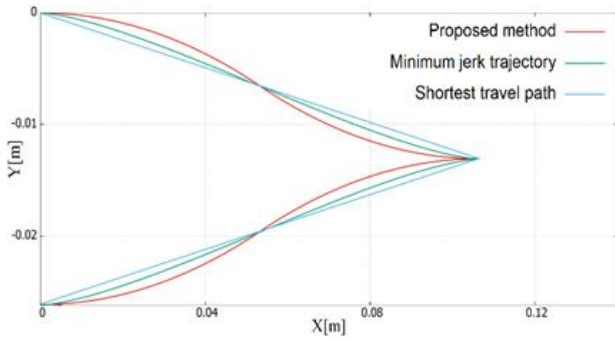


Fig.3.2 各軌道の結果

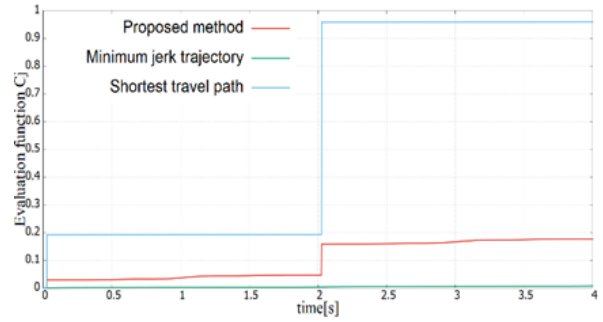


Fig.3.3 評価関数 C_j による各軌道の評価

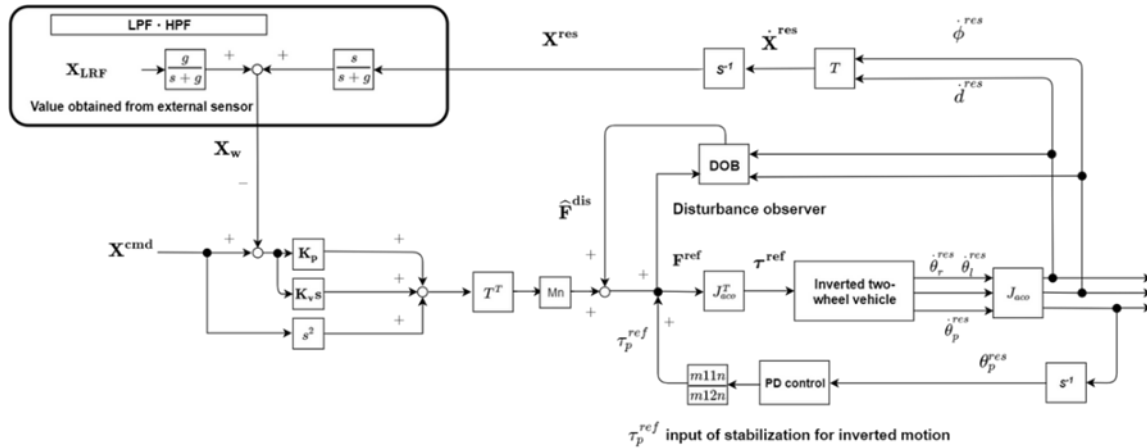


Fig.3.4 狭路におけるブロック線図

3.4 制御系設計

本研究の制御設計について述べる. 倒立 2 輪ビークルは倒立状態を維持したまま, 目標位置へ走行を行う. 倒立制御には並進及び旋回方向で PD 制御を適用した. また, 位置制御は状態 \mathbf{X} の 1 階微分, 2 階微分した関数を速度, 加速度指令値として, 次式の加速度参照値を用いて加速度制御を行う. ここで, K_v, K_p は速度ゲイン及び, 位置ゲインである.

$$\ddot{X} = \ddot{X}^{cmd} + K_v(\dot{X}^{cmd} - \dot{X}_w) + K_p(X^{cmd} - X_w) \quad (3.12)$$

式(3.12)を用いることで, 倒立 2 輪ビークルは姿勢が安定しながら目標軌道の位置・速度・加速度に追従が可能である. また, それぞれの制御のゲインは限界感度法により試行錯誤的に決定した. さらに本研究では, 摩擦やモデル化誤差などの外乱の影響を低減ロバスト性を高める目的で並進及び旋回空間で外乱オブザーバ(DOB)を用いる [8].

また, 制御設計を含むビークルのブロック線図を Fig.3.4 に示す.

4. 実機による検証

4.1 実機の条件

提案された手法の有効性を検証するために実機での実験を行う. シミュレーションの条件と同様に, 倒立 2 輪ビークルの初期位置 X^{res}, Y^{res} を 0, 0, 初期旋回角度 ϕ^{res} を 0rad として曲がり角までの通路の幅を 0.5m, 横移動を行う通路の長さ L を掃除ロボットのルンバの大きさを参考に 0.3m とする. 上述の条件を含む狭路の曲がり角を想定し壁を作成した. 本研究で作成した実験環境を Fig.4.1 に示す.

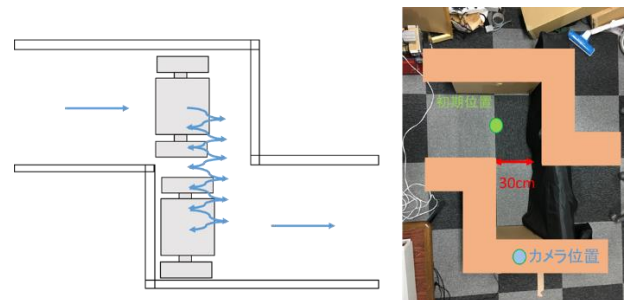


Fig.4.1 狭路を想定した実験環境

Fig.4.1 より, 曲がり角の手前を初期位置として, 図の下方向に横移動を行う. その際の走行の様子を 120deg カメラ撮影を用いて撮影する.

4.1 実機での横移動における横移動走行の検証

狭路での横移動走行実験での様子 Fig.4.2 に, 得られた車体の位置, 車体の傾きの結果を Fig.4.3, Fig.4.4 に示す.

Fig.4.2 より倒立 2 輪ビークルは狭路内において信地旋回を繰り返しながら走行を行っていることが見てとれる. Fig.4.3 より, 倒立 2 輪ビークルは目標軌道に対して追従していると言える. また, 移動可能領域内を走行しているため, 倒立 2 輪ビークルは壁にぶつからずに横移動を行えている.

Fig.4.4 により倒立 2 輪ビークルは姿勢角を維持したまま安定的に走行ができていることが確認できる. 倒立 2 輪ビークルは横移動の切り返し際の前進時に前方に傾き, 後退時に後方に傾いている. そのため, 横移動走行時は



Fig.4.2 狭路での信地旋回を用いた横移動の様子

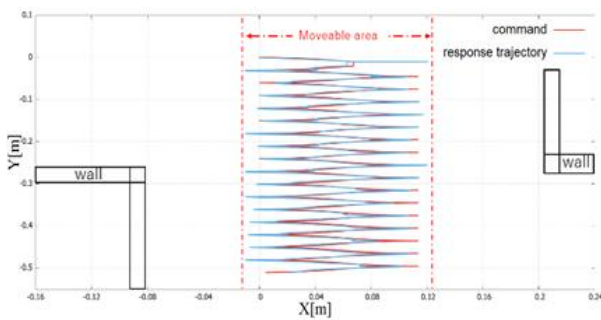


Fig.4.3 車体の位置結果

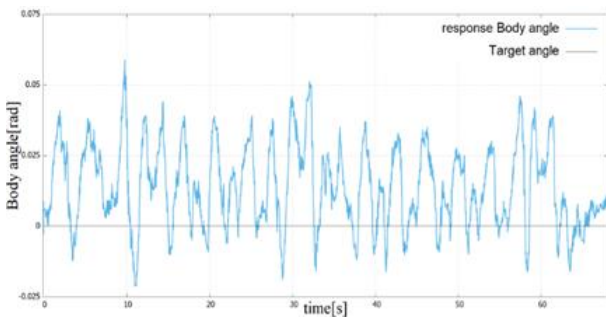


Fig.4.4 車体の傾き結果

目標姿勢角度 0rad に収束せずに目標姿勢角値近辺を拘束しながら前後に揺れており、横移動走行終了時には目標姿勢角に収束していることが確認できる。また、姿勢角は最大で 0.059rad ほど揺れ、およそ 3.4deg 傾いていることになるが値は小さく走行に影響ないと言える。そのため、倒立 2 輪ビークルは倒立及び位置制御を両立しながら提案手法を用いて走行を行っている。

以上より提案手法を用いた横移動手法は狭路でも壁にぶつからずに安定的に横移動を行えることが検証できた。

7. 結言

本研究では倒立 2 輪ビークルに対し、狭路での全方向移動が可能となる横移動手法を提案した。

従来の倒立 2 輪ビークルはその場旋回を駆使することで、全方向に移動が可能である。しかし、車体の幅より狭い通路では、その場旋回が困難であるため、狭路の方向に移動が出来なく、全方向に移動が困難であった。そこで、横移動走行が行えるよう信地旋回を用いて軌道を生成した。提

案手法は、躍度最小モデルに基づいて、従来の手法と比べて躍度が最小であることが評価関数から言え、スムーズに横方向に移動ができると証明した。

また、倒立 2 輪ビークルの実機で検証を行った結果、倒立及び位置制御を両立させながら横移動走行が可能であると確認でき、従来走行が困難であった狭路での全方向移動が可能であることが検証できた。

参考文献

- [1] 内閣府:平成 29 年版高齢社会白書 平成 28 年度高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況.pp2-6,2017
- [2] パーソナル総合研究所・中央大学:「労働市場の未来推計 2030」. pp.10. 2019
- [3] 長津裕己, 村越司昂, MeysarZeinali, 橋本秀紀:”等価制御入力 の推定値を用いたスライディングモード制御に基づく倒立二輪ビークルのロボスタ制御”, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2018
- [4] 広瀬紀章 田島良介:“車輪倒立振りロボットのモデル予測制御に基づく制御アプローチ” Advanced robotics.vol30 No.6 pp374-385 2016
- [5] 市川誠:”車輪移動機構のステアリング方式と駆動力伝達”, 日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 1, pp. 107--112, 1995
- [6] K. Murakoshi, Y. Matsubara, Y. Nagatsu, H. hasimoto, "Examination of lateral movement method in inverted two-wheel vehicle," The Robotics Society Of Japan, 2019.
- [7] T. Flash, N. Hogan, "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model," Journal of Neuroscience 5, 1688-1703, 1985.
- [8] T. Kawamura, T. Murakami, "Multifunctional Control of a Two-Wheel Driven Wheelchair Considering Comfort of a Passenger," IEEJ Transactions on Industry Applications 133(4), 404-413, 2013-04-01, The Institute of Electrical Engineers of Japan.