

1 概要

本研究では横滑りを考慮した非線形四輪車両モデルを近似なしに用いて、目標軌道に追従する最適制御問題のシミュレーションを行った。特に非線形性が顕著となる横滑りが大きい場合での車両の最適制御について検証した。

2 四輪車両モデル

走行条件として左右輪の垂直荷重の差を無視し、車両の回転運動をヨー運動のみに限定して、後輪操舵を行わないとして、走行抵抗として滑り摩擦のみを考慮すると、四輪車両を等価な二輪車両モデルに近似できる。その車両モデルから運動方程式を立て、それをもとに以下のように入力 u 、状態 x に関する状態方程式を立てる。

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$x = [V \ \beta \ r \ X \ Y \ \theta]^T, \quad u = [D \ \delta]^T$$

状態を構成する各項は速度 V 、横滑り角 β 、ヨー角速度 r 、世界座標系での X 座標 X 、 Y 座標 Y 、 X 軸との角度 θ であり、入力は車輪駆動力 D と操舵角 δ である。また、タイヤモデルとして横滑り角に対する横力が Fig. 1 となるマジックフォーミュラ¹⁾を用いた。また、本研究では横滑りの大きい状態としてドリフト走行を考え、車両のタイヤスリップ角が最大横力を発生させるスリップ角を一時的に超えて走行する状態をドリフト走行と定義した。

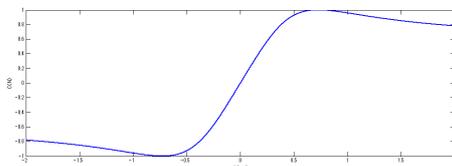


Fig. 1 横滑り角に対する横力の変化

3 非線形 Receding Horizon 制御

状態ベクトルを $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 、制御ベクトルを $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$ と定義し、制御対象の状態方程式と状態や入力に関する拘束条件が以下のように表されるとする。

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)), \quad C(x(t), u(t)) = 0$$

Receding Horizon 制御 (以下, RH 制御) では、各時刻 t において以下の最適制御問題を解く。初期条件を $x(t)$ として、以下の評価関数を最小化する。

$$J = \phi(x(t+T)) + \int_t^{t+T} L(x(t'), u(t')) dt'$$

各時刻での最適制御問題は評価区間の離散化と変分法により以下の非線形連立方程式に帰着される。

$$F(U(0), x(0), 0) = 0 \quad (1)$$

U は評価区間上での離散化された入力とラグランジュ乗数を含むベクトルである。この方程式に連続変分法を適用する。つまり、(1) 式を満たす初期解 $U(0)$ を決定し、

$$\dot{F}(U(t), x(t), t) = -\xi F(U(t), x(t), t)$$

が成り立つように $\dot{U}(t)$ を求め、実時間で数値積分することで $U(t)$ を更新する。これは GMRES 法によって効率的に解くことができ、全体のアルゴリズムを C/GMRES²⁾ と呼ぶ。

4 軌道追従

軌道追従制御は各時刻における制御対象の状態と目標状態の差を評価し、その差を最小化することで目標となる軌道に制御対象を追従させる。評価関数は、被積分項 L と終端条件 ϕ を以下のようにとった。

$$L = x^T Q x + u^T R u - g_1 \log(\delta_{max}^2 - \delta^2) - g_2 \log\left(\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \beta^2\right) - g_3 \log V \quad (2)$$

$$\phi = x^T P x \quad (3)$$

P, Q, R は重み行列であり、 g_1, g_2, g_3 は正のスカラであり、対応する各項はそれぞれ操舵角 δ 、横滑り角 β と速度 V の制約に関するバリア関数である。

5 シミュレーション

(2) 式、(3) 式の評価関数に適切な重みを用いて行ったシミュレーション結果を Fig. 2、Fig. 3 に示す。

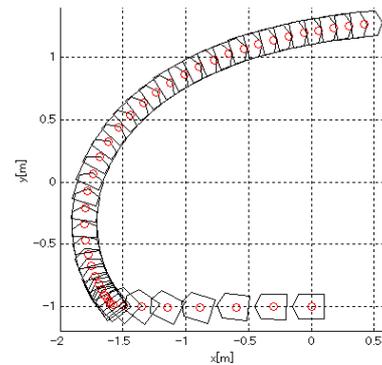


Fig. 2 X-Y 平面上の軌道追従

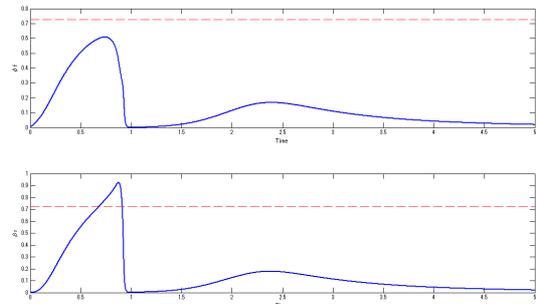


Fig. 3 各時刻の前後輪のタイヤ横滑り角 (上:前輪, 下:後輪)

Fig. 2 より、横滑りを考慮した車両モデルでの旋回運動を行っていることがわかる。また、Fig. 3 での赤い破線は最大横力を発生させる横滑り角であり、後輪横滑り角がこれを超えていることからこの走行はドリフト走行である。

6 まとめ

本研究ではドリフト走行を含む横滑り角の大きい場合の運動を考慮した四輪車両モデルに対して、RH 制御による軌道追従のシミュレーションを行い、その結果を示した。

参考文献

- 1) H. B. Pacejka, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE, 890087 (1989)
- 2) T. Ohtsuka, "A Continuation/GMRES Method for Fast Computation of Nonlinear Receding Horizon Control," Automatica, 40-4, 563/574 (2004)