四輪車両の性能限界を考慮した衝突回避における実時間最適化

学籍番号：90118112　大塚研究室　七尾 真士

1　序論

近年，車両の運動制御技術が急速に発展し，エレクトロニックスタビリティコントロール (ESC) といったアクティブセーフティシステムも開発されており，衝突回避に関する数多くの研究がある [1]．アクティブセーフティシステムが進行方向に障害物を発見すると，事故を未然に防ぐためにドライバーを支援する何らかの動作をする．このようなシステムが動作するタイミングは非常に重要であり，動作後に障害物を回避できなければ意味がない．

本研究では非線形四輪車両モデルに対して，障害を避けることが物理的に可能であるかどうかを考慮するために車両の性能上障害物を回避することができない領域 (進入禁止領域) を考え，C/GMRES アルゴリズム [2] を用いたモデル予測制御 (MPC) による，衝突回避手法を提案する．

2　非線形モデル予測制御

制御対象の状態ベクトルを $x(t) \in \mathbb{R}^n$，制御入力ベクトルを $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$ とおく．状態方程式と，状態や入力に関する m_c 次元の拘束条件がそれぞれ

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

と表されるとする．モデル予測制御では，各時刻 t において次の最適制御問題を解く．初期条件を $x(t)$ として，評価関数

$$J = \phi(x(t+T)) + \int_t^{t+T} L(x(t'), u(t'))\,\mathrm{d}t' \tag{1}$$

を最小化する．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非線形連立方程式 $F(U, x, t) = 0$ に帰着される．この方程式に連続変形 (continuation) 法を適用する．すなわち，制御入力の時間変化を追跡することにより，条件は

$$F(U(0), x(0), 0) = 0, \tag{2}$$

$$\dot{F}(U(t), x(t), t) = -\zeta F(U(t), x(t), t) \quad (\zeta > 0) \tag{3}$$

と書き直せる．U は評価区間上での離散化された入力と拘束条件に関するラグランジュ乗数を含むベクトルである．これらの方程式は GMRES (Generalized Minimum RESidual) 法 [3] で効率よく解ける．これにより反復計算なしに最適制御入力を更新することができる．

3　四輪車と等価な二輪車モデル

左右輪の垂直荷重が等しく，ヨー運動のみを考慮し，後輪の操舵を行わないものとして，走行抵抗としてタイヤ-地面間のすべり摩擦のみ考慮するものとすると，Fig. 1 に示されるように二輪車モデルに近似できる．

Fig. 1 から運動方程式を立てて，その運動方程式から以下のように入力を u，状態を x とする状態方程式を立てる．

$$\dot{x} = f(x, u),$$
$$x = [V \quad \beta \quad r \quad X \quad Y \quad \theta]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^6,$$
$$u = [D_f \quad D_r \quad \delta]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3.$$

ただし，状態を構成する項はそれぞれ，速度，横滑り角，ヨー角速度，世界座標系における X，Y 座標，車両-X 軸間の角度であり，入力は前後輪の駆動力，操舵角で構成される．

4　評価関数

障害物回避において車両の性能上，障害物を絶対に回避できない領域が存在する．車両の性能限界を考えるにあたって車両が発生しうる最大力について考えるとタイヤと地面の間に働く水平面内のあらゆる方面の力の合力は，そのときの垂直荷重に摩擦係数を掛けた値以上になることはできないため，どのような場合にも次式を満足しなければならない．

$$\sqrt{F^2 + T^2} \leq \mu N. \tag{4}$$

ここで，F はコーナリングフォース，T は駆動力，μ は摩擦係数，N は垂直荷重である．このように合力のベクトルは半径 μN の摩擦円と呼ばれる円内に留まる．従って，理論上の最大力は μN となる．進入禁止領域の導出に当たり，保守性をできるだけなくしつつ計算量を減らしたい．車両に固定された座標系において力が常に一定方向に一定値，すなわち理論上の最大力で働くものとすると，計算効率を考慮することにより，進入禁止領域は Fig. 2 に示されるような円軌道の外側と近似することができる．

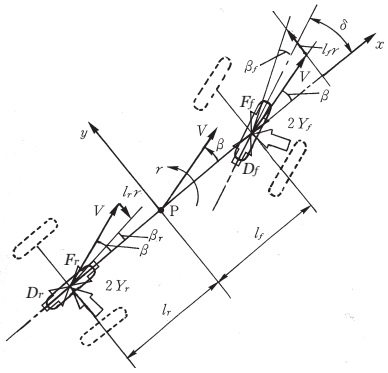

Fig. 1: 四輪車と等価的な二輪車モデル

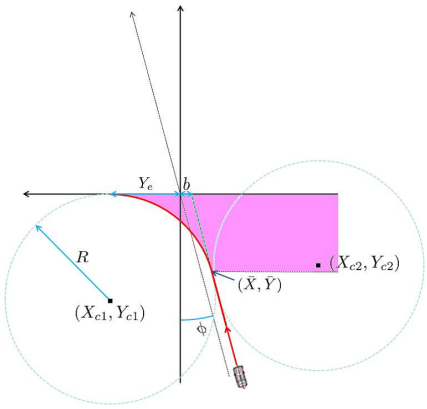

Fig. 2: 車両の軌道と進入禁止領域

5　シミュレーション

サンプリング周期を 0.002sec，評価区間の分割数を 100，障害物の幅 Y_e を 2m としてシミュレーションを行った．Figs. 3, 4 は初期状態を $(V_0, \beta_0, r_0, X_0, Y_0, \theta_0) = (20, 0, 0, -18, 0.1, 0)$ としてシミュレーションを行った結果である．障害物までの距離が 18m と比較的に短い距離でありながらも幅 2m の障害物を回避できたことが分かる．

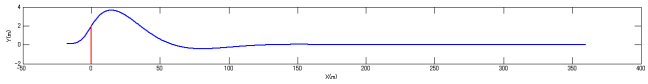

Fig. 3: X-Y 平面上の車両の軌道

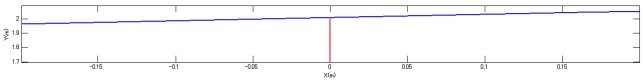

Fig. 4: X-Y 平面上の車両の軌道 (拡大図)

6　結論

本稿では四輪車を，操舵角が大きく速度の変化も扱える二輪車モデルとして扱い，進入禁止領域を導入した非線形モデル予測制御を提案した．

参考文献

1) Y. Hattori, “Optimum Vehicle Trajectory Control for Obsstacle Avoidance Problem,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **11**-5, 507/512 (2006)

2) T. Ohtsuka, “A Continuation/GMRES Method for Fast Computation of Nonlinear Receding Horizon Control,” Automatica, **40**-4, 563/574 (2004)

3) C.T. Kelley, “Iterative Methods for Linear and Nonlinear Equations,” No.16 in Frontiers in Applied Mathematics. SIAM (1995)