緩和曲線を用いた4輪車自動駐車制御

学籍番号：90166157　大塚研究室　矢野 政輝

1 はじめに

自動駐車制御には様々な方法が研究されているが，それらの多くが操舵角の限界や駐車空間の制限などの問題が残っている．それらを考慮した方法として円周族を用いた方法 [1] が研究されている．しかし，その方法は円に沿って駐車を行うので，操舵角が 0 に収束せず，ある程度ハンドルをきったまま駐車を終えてしまう．

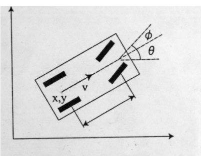
本稿ではその円周族を用いた方法に着目し，曲率が徐々に変化する緩和曲線に沿って駐車を行うことより駐車終了時の操舵角を 0 に収束させ，より良い駐車を実現するための方法を提案する．ただし，緩和曲線の存在しない範囲では円に沿うものとする．

2 準備

2.1 クロソイド曲線

本研究では緩和曲線として高速道路などで実際に使われているクロソイド曲線を採用した．クロソイド曲線とは，車の速度を一定としハンドルを一定の角速度で回した時に車が描く軌跡のことで，曲率半径 R と曲線長 L が反比例する曲線である．

2.2 制御モデル



本研究の制御モデルは後輪駆動 4 輪車モデルである．車輪に横滑りが生じないと仮定すると車両の運動学モデルは，$\dot{x} = \cos\theta v, \dot{y} = \sin\theta v, \dot{\theta} = \frac{1}{l}\tan\phi v$ のように与えられる．ここで，l は前後輪の車軸間距離，(x, y) は後輪車軸の中央座標，θ は x 軸に対する車両の方向角を表す．また，ϕ は操舵角，v は車両の進行速度を表す．本稿では，操舵角 ϕ の関数 $\eta = \tan\phi$ と v を入力として扱う．

ここで，状態ベクトル z と制御入力 u をそれぞれ

$$z = (x, y, \theta)^T, \quad u = (v, v\eta)^T$$

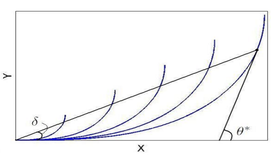
とおくと，状態方程式は次のように書ける．

$$\dot{z} = k(z)u, \quad k(z) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & \frac{1}{l} \end{bmatrix}$$

制御の目的は状態 z を原点へ収束させ，z を安定化することである．

3 制御入力設定と安定性解析

3.1 クロソイド曲線族



様々な大きさのクロソイド曲線の集合をクロソイド曲線族ということとする．θ^* をクロソイド曲線の接線方向角とし，δ を極座標系における点 (x, y) の角度とする．クロソイド曲線に限らず一般的な曲線においてに，θ^* と δ には何らかの関係があるので，$\theta^* = f(\delta), 0 \le \theta^* < \pi$ とする．4 輪車がクロソイド曲線族に沿って動けば必ず原点に到達できるので，θ^* を θ の目標値とする．

3.2 拘束条件の導出

本稿の制御則は θ を θ^* へ収束させることによって状態の安定化を図るので，$\theta = \theta^*$，すなわち $\theta - f(\delta) = 0$ になったときその状態を維持しなければならない．

補題 1 4 輪車の方向角 θ を一般的な曲線の接線方向 θ^* に拘束するためには，$g = f - \delta$ とすると，操舵角は $\eta = \eta_{ref}$ でなければならない．ただし，

$$\eta_{ref} = \frac{df(\delta)}{d\delta} \frac{l\mathrm{sgn}(x)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin(g)$$

である．

3.3 制御入力の設計

車両の原点までの距離を $r(t) = \sqrt{x^2 + y^2}$，軌道に沿った車両の移動距離を $s(t) = \int_0^t |v(\tau)| d\tau$，方向角誤差を $e = \theta - \theta^*$ で表すとする．

定理 1 制御入力 η を

$$\eta = \frac{df}{d\delta} \frac{l\mathrm{sgn}(x)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin(e + g) - \alpha l e \mathrm{sgn}(v), \alpha > 0$$

とすると，方向角誤差 e は，

$$e(t) = \exp(-\alpha s(t)) e(0)$$

のオーダーで収束する．

さらに，進行速度 v について，原点から遠いところでは $\mathrm{sgn}(x) v < 0$ を満たすとし，原点近傍では

$$v = -\mathrm{sgn}(x) c r, \; c > 0$$

とするとき，$\beta < \pi$ について，

$$|\theta(0) - \delta(0)| < \frac{\beta}{2}, \quad |g(\delta(0))| < \frac{\beta}{2}, \quad \frac{\partial g(\delta)}{\partial \delta} > 0$$

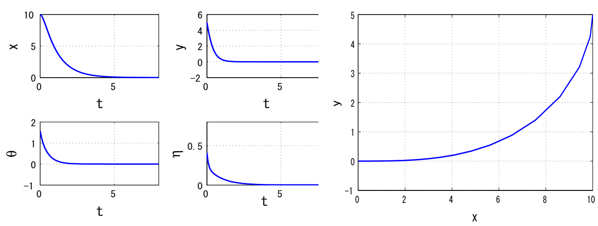
が成り立てば，原点までの距離 r は，

$$\exp(-ct) r(0) \le r(t) < \exp(-c\cos(\frac{\beta}{2})t) r(0)$$

を満たし，指数的に収束する．

4 数値例

シミュレーションを行った結果 3 つのパターン分かれることがわかったが，α, c をうまく設定することによりどれもうまくいった．その中の一例を掲載する．



5 おわりに

本論文では，4 輪車の駐車問題に対する制御則を提案した．制御則の基本方策は現在位置から駐車方向のクロソイド曲線の接線方向を基準とし車両の方向を修正していくことである．そして制御入力の設計と安定性の解析を行い，MATLAB を用いて様々な初期条件の下でシミュレーションを行った．ある程度初期条件を限定すれば正しく駐車できることがわかった．

参考文献

[1]Dao Minh Quan，劉　康志，大形　明弘:4 輪車自動駐車システムの開発-理論と実験-，計測自動制御学会論文集，Vol.40，No.12，1211/1219，2004