デッドレコニングを利用した予見フィードバック制御による 自動車の自動操舵に関する研究 A Study on Automatic Steering of a Car by Foreknowledge Feedback using Dead Reckoning

○ 飯田 正光(金沢大), 正 菅沼 直樹(金沢大), 正 藤原 直史(金沢大)

Masamitsu IIDA, Suganuma NAOKI and Naofumi FUJIWARA

Kanazawa University, 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-8667 JAPAN

1. はじめに

自動車の運転者は、進行方向の全体状況を目で把握するとともに、走行すべき目標コースを設定し、現在の車両位置と状態を判断して将来位置・状態を予測しハンドルを切ったり、速度を変化させたりして適切な運転操作をしているのだが、人間はこれら一連の操作をととてもスムーズに行っている。本来、デッドレコニングとは、いままでの状態量から自分の位置を知るのだが、これを利用すれば、現在の位置と状態から将来その目標とする地点に到達するために必要とされる前輪操舵角度を求めることができる。これは、人が自動車を運転するときの考え方とよく似ていて理に適っていると思われる。

自動走行を実現する場合、縦方向(速度、車間距離)の制御と横方向(ステアリング)の制御の両方を考える必要があるが、本研究では、縦と横の動作を分離できるものと考え、横方向の制御に注目し、自動走行時における適切な操舵角を決め、操舵系における自動車の自動走行を目指す。

本研究は、交通事故の発生の多くは人為的なものが大半を占めるので、自動車の自動操舵が実現できれば運転者の負担軽減、安全性向上にも繋がる。

2. 仮定

制御系の設計において、制御対象となる制御モデルを、使用目的、モデル表現、計算方法に考慮して導出するべきであるが、本研究では基本的な性質がわかれば十分であると考え、モデルを複雑化しないために次の4つの仮定を設けた。

- 【仮定1】 道路は平面であり、勾配や片バンクは無い。
- 【仮定2】 自動車のピッチングとローリングは無視する。
- 【仮定3】 制御車両速度は一定である。
- 【仮定4】 目標コースが既知である。

3. 二輪モデルによる状態方程式

本研究で用いた車両の運動モデルについて説明する。車両の運動方程式を導く際、四本すべてのタイヤに掛かる力を考えるのは困難であるため、車両速度を一定とみなした二輪モデルを用いて考えればよい。

自動車の横方向モデルは、仮定1, 2, 3を考慮したモデルを用いる。導出過程は省略するが、以下に数式モデルを記す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \dots (1)$$

ただし、

$$a_{11} = \frac{-2(K_f l_f^2 + K_r l_r^2)}{I_y V}, \quad a_{12} = \frac{-2(K_f l_f + K_r l_r)}{I_y V}, \quad b_1 = \frac{2K_f l_f}{I_y},$$

$$a_{21} = \frac{-2(K_f l_f + K_r l_r)}{m V^2} - 1, \quad a_{22} = \frac{-2(K_f + K_r)}{m V}, \quad b_2 = \frac{2K_f}{m V}$$

γ : 重心軸回りのヨーレート[rad/s]

β : 自動車の重心における横滑り角[rad]

δ : 前輪操舵角[rad]

V : 車両速度[m/s]

l_f, l_r : 前、後輪軸から重心までの距離[m]

m : 車体重量[kg]

I_y : 重心軸回りのヨー慣性モーメント[kgm²]

K_f, K_r : 前、後輪コーナリングパワー[N/rad]

4. 前輪操舵角度の決定の仕方

図1において、与えられた点列を制御車両が沿うべき目標コースとする。制御車両が時刻 k において一定の車速 V_k [m/s]、ヨーレート γ_k [rad/s] 及び、滑り角 β_k [rad/s] で走行したとすると、 l [m] 先の参照点に、 t_p [s] 後に到達することになる。ここで制御車両の旋回半径は、 $R = V/\gamma$ [m] である。従って、幾何学的な関係により、予見時間 t_p [s] 後の制御車両の横方向変位量 y_p は、

$$y_p = l \sin \left(\frac{1}{2} \gamma_k t_p + \beta_k \right) \dots (2)$$

目標とする横変位量を ε_f とすると、 $y_p = \varepsilon_f$ となればよく、

$$\varepsilon_f = l \sin \left(\frac{1}{2} (\gamma_k + \gamma_{des}) t_p + \beta_k \right) \dots (3)$$

となるように γ_{des} を発生させられればよい。従って、(3)において γ_{des} について解くと、

$$\gamma_{des} = \frac{2\varepsilon_f}{V_k t_p^2} - \frac{2\beta_k}{t_p} - \gamma_k \dots (4)$$

ここで、(1)の上の成分を差分の形で表すと、

$$\frac{\gamma_k - \gamma_{k-1}}{\Delta t} = a_{11} \gamma_k + a_{12} \beta_k + b_{11} \delta \dots (5)$$

したがって、前輪操舵角度は(5)において δ について解と、

$$\delta_{des} = \frac{\frac{\gamma_k - \gamma_{k-1}}{\Delta t} - a_{11} \gamma_k - a_{12} \beta_k}{b_{11}} \dots (6)$$

よって、前輪操舵角は(6)式について、 γ_k を、

$$\gamma_k = \gamma_k + \gamma_{des} = \frac{2\varepsilon_f}{V_k t_p^2} - \frac{2\beta_k}{t_p} \dots (7)$$

と、現在のヨーレートと発生させたいヨーレート変化量分を加えたもの、 γ_{k+1} を、現在のヨーレートとすれば、求めることができる。しかし、この δ だけではただ単に、目標地点に到達するだけで、そのときの車の姿勢は考えていないのでこれだけでは不十分である。車両の向きが目標コースの向きと一致するためには、車両の向いている方向を目標コースの方向とも一致させる必要がある。よって、前方の注視距離をフィードバックさせればよい。結局、必要な操舵量は、重み係数を用い次式で与えることができる。

$$\delta = k_1 \delta_{des} + k_2 \varepsilon_f \dots (8)$$

ここで予見時間 t_p は注視距離を D とすると、 D/t_p と自動的に決まる。仮定4で目標コースは既知としているが、先行車をおき、画像処理などにより、追従したい先行車の相対座標

が得られればその軌跡を制御車両が追従する目標コースとみなせば同様に自動操舵できるため、プラトゥーン走行も可能となる。

Fig.1 Dead Reckoning

5. シミュレーション

道路設計基準となる道路構造令を参考に、図2のようなコースを設計した。スタート地点は図2中、右下で初期誤差無しとし、20m直線、曲率半径R1、80m直進、R2、直線で終了とする。直線道路構造令によると、道路の最小曲率半径は速度に依存している。表1において、速度40km/h以上は最小曲率半径をR1に、止むを得ない場合の曲率半径をR2に設定した。速度40km/h未満では最小曲率半径と止むを得ない場合の曲率半径は同一で、R2に設定した。このコースを4節で示した制御方法により走行シミュレーションを行った。ここで車両の諸パラメータは当研究室の実験車両のものをを用いた。シミュレーション方法は、まず、制御車両前方、注視距離の範囲内の与えられたコース点列を探し、得られた点の絶対座標を保存する。得られた分の点を制御車両座標へと変換し、最小二乗法により二次式($y = a_2x^2 + a_1x + a_0$)で近似する。二次式で与えられた近似曲線について、 $x=0$ を代入し、このときの y の値を追従誤差errorとして決めた。また、操舵量の各パラメータ k_1, k_2 は、シミュレーションから試行錯誤によりテーブルを作り速度に依存した形でそれぞれ与えた。

シミュレーションする際、ここで目標とする精度は、制御車両の最大車幅を2m、道路幅を低、中、高速度とそれぞれ3m, 3.25m, 3.5mと設定すると、道路の中心を走行することを想定し、低速度で $\pm 0.25m$ 、中速度で $\pm 0.275m$ 、高速度では $\pm 0.30m$ と決めた。

シミュレーション結果を図3に示す。この結果、最大追従誤差が、20km/h, 30km/hで0.15m以下、40km/hで0.25m以下、50km/h以上でも0.20m以下と、低、中、高速、いずれも目標とする精度を満足し、この操舵制御によって目標コースに逸脱することなく走行できていることがわかる。更なる精度向上のためには、直線からカーブに差し掛かる付近やカーブから直線に抜け出す個所でやや追従誤差が出てしまっている。これを解決するためには、この2個所で目標注視距離を操作する関数を加えると良い。

Fig.2 course

Table.1 Relation of Velocity between R1 and R2

V[km/h]	R1[m]	R2[m]
100	460	380
80	280	230
60	150	120
50	100	80
40	60	50
30	40	30
20	30	15

Fig.3 result of error

6. まとめ

本研究では横方向に対しての制御、即ち、自動車の自動操舵を目的とした。制御方法として、比較的簡単と思われるデッドレコニングを利用し、将来位置を予測、注視距離の予見誤差をフィードバックすることにより姿勢の安定、どのような速度でも所要の精度で目標コースに追従することができた。

当面の課題は、実車実験により低速域での追従性を評価することであり、また、直線からカーブ、カーブから直線へと差し掛かる個所での更なる精度の向上である。

7. 参考文献

- (1) 藤岡健彦, 大前学, 「ラテラルプラトゥーン制御方式に関する研究」自動車技術会論文集, Vol.28, No.2, April, (1997), pp109-114
- (2) 大前学, 藤岡健彦, 「DGPS を利用した絶対情報に基づく自動車の自動運転システムに関する研究」日本機械学会論文集(C編)65巻634号, No.98-1358, (1999-6), pp221-218
- (3) 久保田正美 「視覚情報を用いたゲインスケジュールド H_∞ 制御による自動車の自動操舵に関する研究」, 金沢大学工学部電気・情報工学科 卒業論文, (2001)