曲線路の障害物回避ドライバモデルに関する研究*

原 田 正 範^{*1}, 永 友 恒 知^{*2}
三 谷 仁 宏^{*2}, 吉 本 堅 一^{*1}

Driver Models for a Vehicle Avoidance Maneuver in Cornering

Masanori HARADA^{*3}, Tsunenori NAGATOMO,
Yoshihiro MITANI and Kenichi YOSHIMOTO^{*3} Department of Mechanical Engineering, National Defense Academy in Japan,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

This paper presents driver models for a vehicle avoidance maneuver in cornering. The models are based on a preview driver model which has either a compensation control or a pursuit control. The preview point is detected by a variation of the present radius which is equivalent to a third-order prediction model, including a centrifugal jerk. The unknown control gains in the models are determined by an optimization program based on a Legendre pseudospectral method. A second-order prediction model, commonly used in cornering analysis, is compared to numerical examples. For the compensation model, the Proportional-Integral (PI) control results in a steering angle with two distinct behavior clearly: 1) steady-state cornering due to the Integral (I) control and 2) transient response due to the Proportional (P) control. The pursuit control has a sufficient response when the steering angle for the steady-state cornering is provided via feed-forward control, even if the P control is used for the compensator.

Key Words: Automobile, Optimal Control, Human Engineering, Preview Driver Model, Avoidance Maneuver, Cornering

1. 序 論

交通事故の形態は様々であり、曲線路における事故もその一例である。曲線路における事故は、速度超過や障害物回避操作に起因する車線逸脱などがあり、車両運動の解析により事故発生メカニズムを把握することは重要である。曲線路走行に関する車両運動の研究の多くは、定常状態での偏差の低減と安定性の向上を目的としている。また、障害物回避に関する研究の多くは、直線路における解析である。しかしながら、ドライバの障害物回避操作は曲線路においても発生するため、これらを組み合わせた解析が必要である。このためには、複雑なドライバの操作を、数学的にモデル化したドライバモデルの構築が重要となる。

前方誤差修正モデルは、ドライバが現在の車両状態を基に車両が将来到達する位置の予測を行い、予測位置と目標コースとの誤差が無くなる様に操舵を行うモデルである。将来位置の予測方法は、直線状に予測を行う一次予測モデルや⁽¹⁾、曲率に沿った予測を行う二

次予測モデルがある⁽²⁾。これらの予測モデルでは、得られた誤差が小さくなる様に、比例制御(P制御)や積分制御(I制御)などの演算を行って必要な操舵角を得ている。

曲線路解析で有用な二次予測モデルは、現在の速度と加速度が保持されると仮定されている。しかし、二次予測と積分制御を組み合わせた吉本モデルでは、障害物回避などの急激な操舵は表現できない⁽³⁾。一方、人間の腕の操作等では移動時の躍度の情報を感知しているという研究があり⁽⁴⁾、また障害物回避における目標コース設定において躍度が最小になる目標軌道をドライバが選択すると仮定している研究がある⁽⁵⁾。

そこで本研究では、ドライバが躍度を感知でき、操舵に用いることができると仮定して、躍度まで考慮した三次予測モデルを提案する⁽⁶⁾。この三次予測による将来偏差に対するフィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせた操舵モデルと、従来の二次予測を用いた操舵モデルの曲線路の障害物回避の比較を行い、三次予測の有効性を検証する。

* 原稿受付 2005年5月25日。

^{*1} 正員、防衛大学校システム工学群機械工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)。^{*2} 防衛大学校研究科。

E-mail: mharada@nda.ac.jp

Fig. 1 Driver-vehicle system

2. ドライバ-自動車系の定式化

ドライバ-自動車系の概念を図1に示す。ドライバは、目標コースと車両運動で得た情報により、予測部と操舵部で車両に入力をする操舵角の演算を行う。予測部では、現在の車両状態を用いて将来の車両位置の予測を行う。操舵部には、目標コースの情報を用いてあらかじめ操舵を行うFF（フィードフォワード）操舵部と、走行誤差を修正するFB（フィードバック）操舵部がある。

2.1 車両の運動方程式 車両の運動方程式は、図2に示される等価二輪モデルを用いると式(1)~(5)で表される。座標系や記号の定義は図2、3に示す通りである。

$$m(\dot{v} + ur) = S_f + S_r \quad (1)$$

$$I_z \dot{r} = aS_f - bS_r \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (3)$$

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \quad (4)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (5)$$

ここで、 m は車両の質量、 I_z はヨー軸まわりの慣性モーメントである。タイヤが発生する横力 S_f 、 S_r は、タイヤの横滑り角の変化に対して飽和しない領域では式(6)、(7)で表される。本研究では、障害物回避はハンドルにより行われると仮定し、走行速度 u は変化しないとする。

$$S_f = C_f \left(\delta_f - \frac{v + ar}{u} \right) \quad (6)$$

$$S_r = C_r \left(-\frac{v - br}{u} \right) \quad (7)$$

2.2 予測部 曲線路を走行中のドライバは、図3の様にコースに沿った予測を行うと考えられる。曲線路を円弧と仮定し、円の中心と座標系の原点を一致させ、現在の車両位置 (x_0, y_0) とすると、 T_p 秒後の車両位置 (x_p, y_p) は式(8)、(9)で表される。従来の研究では、車両の現在位置における速度と加速度が保

Fig. 2 Equivalent bicycle model

Fig. 3 Preview model in cornering

持されると仮定して、2階微分項までを考慮した二次予測⁽²⁾が用いられている。

$$x_p = x_0 + \dot{x}_0 T_p + \frac{1}{2} \ddot{x}_0 T_p^2 + \frac{1}{6} \dddot{x}_0 T_p^3 \dots \quad (8)$$

$$y_p = y_0 + \dot{y}_0 T_p + \frac{1}{2} \ddot{y}_0 T_p^2 + \frac{1}{6} \dddot{y}_0 T_p^3 \dots \quad (9)$$

ここで提案しているドライバモデルは横方向の躍度を感じできると仮定しているため、3階微分項までを含めた式(8)、(9)になり、数値計算の負担が増加する。そこで、一定の曲率半径 ρ_0 と、その変化を考慮した式(10)を、新たな三次予測モデルとして提案する。

$$\rho_p = \rho_0 + \dot{\rho}_0 T_p \quad (10)$$

二次予測は、現在位置での曲率半径 ρ_0 と、 T_p 秒後の予測位置における曲率半径 ρ_p が等しくなる予測である。これに対して式(10)は、3階微分項が曲率変化

$\dot{\rho}_0 T_p$ に相当し、速度や加速度に加えて、躍度が保持されると仮定した三次予測である。旋回中は $\rho_0 \neq 0$ であり、 ρ_0 , $\dot{\rho}_0$ は式 (11), (12) で与えられる。

$$\rho_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_0 = \frac{x_0 \dot{x}_0 + y_0 \dot{y}_0}{\rho_0} \quad (12)$$

2.3 操舵部 操舵部は、以下の補償制御と追跡制御の二種類を考える。

(1) 補償制御：FB 操舵部のみ

(2) 追跡制御：FF 操舵部とFB 操舵部

FB 操舵部は、予測部で得られた曲率半径 ρ_p と目標コース ρ_c の差 ϵ に対して、P 制御もしくはPI 制御を行うものとする。FF 操舵部は、一定の速度と曲率半径の定常円旋回に必要な操舵角を与える。また、FB 操舵部には機械的および生理的な時定数 T_s 秒の一次遅れを考慮する。

2.3.1 FB 操舵部による補償制御 目標コースとの誤差を ϵ とすると、P 制御による操舵角 δ_{fP} は式 (13)、I 制御による操舵角 δ_{fI} は式 (14) となる。

$$\delta_{fP} = G_p \frac{1}{T_s s + 1} \epsilon \quad (13)$$

$$\delta_{fI} = \frac{G_i}{s} \frac{1}{T_s s + 1} \epsilon \quad (14)$$

二次予測による定常円旋回では、P 制御を行うと定常偏差を生じるため、I 制御による補償が必要となることが知られている。提案する三次予測では、式 (15) に定常旋回の条件 $\dot{\delta}_{fP} = 0 = \dot{\rho}$ を考慮すると式 (16) が得られる。これは目標コースと現在位置が一致する場合は操舵角が得られず、目標コース上の定常円旋回が不可能であり、必要な操舵角を得るためには、定常偏差が発生することを示している。

$$T_s \dot{\delta}_{fP} + \delta_{fP} = G_p(\rho_0 + \dot{\rho}_0 T_p - \rho_c) \quad (15)$$

$$\delta_{fP} = G_p(\rho_0 - \rho_c) \quad (16)$$

定常偏差の補償のためにはI 制御が有効であるが、障害物回避の応答性まで考慮する場合はP 制御を含める必要がある。そこで式 (17) のPI 制御操舵角 δ_{fPI} を考える。

$$\begin{aligned} \delta_{fPI} &= \delta_{fP} + \delta_{fI} \\ &= \frac{sG_p + G_i}{s} \frac{1}{T_s s + 1} \epsilon \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) より式 (18) が与えられ、定常円旋回時は δ_{fPI} , ρ_0 , ϵ は変化しないので式 (19) が得られる。これは定常偏差が生じないことを示している。

$$T_s \dot{\delta}_{fPI} + \delta_{fPI} = G_p \epsilon + G_i(\rho_0 + \dot{\rho}_0 T_p - \rho_c) \quad (18)$$

$$0 = G_i(\rho_0 - \rho_c) \quad (19)$$

以上より、補償制御の解析を行う場合は、P 制御では $\delta_f = \delta_{fP}$ 、PI 制御では $\delta_f = \delta_{fPI}$ とする。

2.3.2 追跡制御 ドライバは、曲線路走行においては走行速度、曲率半径、運転経験などの情報に基づいて、FF 制御により曲線路走行に必要な操舵をあらかじめ行い、走行誤差をFB 制御で補償していると考えられる。そこで、 δ_f をFF 操舵部の操舵角 δ_{fF} とFB 操舵部の操舵角 δ_{fB} を組み合わせた、式 (20) で与えられる追跡制御を考える。

$$\delta_f = \delta_{fF} + \delta_{fB} \quad (20)$$

δ_{fF} の値は、目標コースの曲率半径を、一定速度により定常円旋回を行うために必要な操舵角を考える。これは定常円旋回の釣り合い条件 $\dot{v} = 0 = \dot{r}$ を式 (1), (2) に代入する事で与えられる一定値である。 δ_{fB} はFB 操舵部より与えられ、P 制御操舵角 δ_{fP} もしくはPI 制御操舵角 δ_{fPI} による誤差の修正制御を考える。

2.4 パラメタ最適化法による操舵ゲインの探索 設定した走行条件における操舵ゲイン G_p , G_i の値は、パラメタ最適化手法により探索を行う。状態変数を $X(t)$ 、未知のパラメタを Π とすると、パラメタ最適化問題は式 (21)~(24) で表される。

$$\text{Minimize } J(X(t), \Pi) \quad (21)$$

$$\dot{X}(t) = f(X(t), \Pi) \quad (22)$$

$$X(t_0) = X_0 \quad (23)$$

$$g(X(t), \Pi) \leq 0 \quad (24)$$

式 (21) は評価関数、式 (22) は式 (1)~(5) の運動方程式と操舵角 δ_f に関する状態方程式、式 (23) は状態量の初期条件、式 (24) は拘束条件である。本研究の解析では、 X , Π は以下のとおりである。

$$\text{P 制御 } X = [v \ r \ \psi \ x \ y \ \delta_{fP} \ \dot{\delta}_f]^T$$

$$\text{PI 制御 } X = [v \ r \ \psi \ x \ y \ \delta_{fP} \ \delta_{fI} \ \dot{\delta}_f]^T$$

また Π は以下の様になる。

$$\text{P 制御 : } \Pi = [G_p]$$

$$\text{PI 制御 : } \Pi = [G_p \ G_i]^T$$

評価関数は、目標コースと現在位置の誤差 $\rho_0 - \rho_c$ 、操舵角速度 $\dot{\delta}_f$ を用いて式 (25) で定義する。

$$J = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \{q_1(\rho_0 - \rho_c)^2 + q_2 \dot{\delta}_f^2\} dt \quad (25)$$

定式化した最適化問題は非線形であるため、反復計算により解を得る必要がある。そこで、状態変数を含む非線形最適化問題の最適パラメタの探索は、擬スペクトル法を用いた離散化により非線形計画問題に変換して最適化を行うソフトウェア⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いた。

Fig. 4 Transient response for P control of compensation control

Table 1 Results for P control of compensation control

	G_p	J
Second Order	0.0738	0.0045
Third Order	0.0344	0.0074

3. 曲線路走行のドライバモデルの数値解析

半径 200[m] の定常円旋回中の車両が、障害物を視認して外側へ 2[m] のレーンチェンジによる障害物回避運動を行う場面を想定する。シミュレーション時間を $t_f = 15[s]$ 、走行速度を $u = 20[m/s]$ 、操舵遅れを $T_s = 0.2[s]$ 、各状態量の初期条件は、障害物回避前の定常円旋回時の値に設定する。最適化するパラメタが多くなると、各パラメタの影響を把握する事が困難となるため、本研究では原田⁽⁹⁾の解析を参考にして予測時間を $T_p = 1.6[s]$ に固定した。また最適化する操舵ゲイン G_p 、 G_i は時間変化しないとする。車両の諸元は国産中型車のものを用いた⁽¹⁰⁾。最適化計算の際の各変数は無次元化されており、式 (25) の評価関数値における重みは、無次元化量に対して $q_1 = 1$ 、 $q_2 = 1$ とする。以上の設定に対して、予測部を従来の二次予測と、提案する三次予測の場合について比較を行う。

3.1 FB 制御のみによる障害物回避 FB 操舵部を P 制御とした時の、曲率半径と操舵角の時間応答を

Fig. 5 Transient response for PI control of compensation control

Table 2 Results for PI control of compensation control

	G_p	G_i	J
Second Order	0.0117	0.0435	0.0028
Third Order	0.0185	0.0011	0.0028

図 4 に示し、表 1 に操舵ゲインの値と評価関数値を示す。二次予測と三次予測のどちらの場合も、定常偏差が生じている事が示されている。三次予測は二次予測よりも操舵ゲインが低い、応答が振動的でありまた定常偏差が大きくなっている。このため評価関数の値も高くなっている。

P 制御の場合は二次予測と三次予測いずれの場合も定常偏差が生じるので、これを補償するために FB 操舵部に PI 制御を適用する。図 5 に、曲率半径と操舵角の時間応答を示し、表 2 に得られたゲインの値と評価関数値を示す。二次予測と三次予測のどちらの場合も、定常偏差が無くなり目標コースに追従し、応答性も同じ様になっている。

PI 制御は、P 制御操舵角 δ_{fp} と I 制御操舵角 δ_{fi} の和であるため、それぞれの操舵角が、全体の操舵角に与える影響を検討する必要がある。図 6 に、P 制御と I 制御の操舵角の時間応答を示す。二次予測では、過渡応答の際に P 制御と I 制御とも操舵角が変化する

(a) Transient response for P control steering angle

(b) Transient response for I control steering angle

Fig. 6 Detail for PI control steering angle

が、三次予測ではI制御の操舵角は定常円旋回時の操舵角を保持してほぼ一定であり、過渡応答の制御はP制御が行っている事が示されている。したがって、車両に入力される操舵角は同じであっても、操舵部の内部で演算される操舵角には予測モデルにより違いがある事がわかる。

3.2 FF制御を付加した場合の障害物回避 補償制御の場合で示された様に、三次予測モデルのI制御操舵角は定常円旋回時の操舵角を保持していた。そこで、I制御で得ていた目標コースの定常円旋回に必要な操舵角をFF操舵部で与え、FB操舵部をP制御もしくはPI制御として誤差を補償する追跡制御が有効であると考えられる。

図7に、FB操舵部をP制御とした場合の曲率半径と操舵角の時間応答を示し、表3に操舵ゲインの値と評価関数値を示す。定常偏差は二次予測と三次予測とも発生していないが、三次予測の方が収束性がよく、操舵ゲインが小さい値となっている。また評価関数値も小さくなっている。

図8に、FB操舵部をPI制御とした場合の曲率半径と操舵角の時間応答を示し、表4に操舵ゲインの値と評価関数値を示す。また図9に、この場合のP制御操舵角とI制御操舵角を示す。二次予測はP制御の場合に対して応答性が変化して応答性が改善され、評価関数値も改善している。この際、補償制御の場合と同

(a) Transient response for radius

(b) Transient response for steering angle

Fig. 7 Transient response for P control of pursuit control

様にI制御操舵角が変化している事が示されている。

Table 3 Results for P control of pursuit control

	G_p	J
Second Order	0.0245	0.0038
Third Order	0.0189	0.0034

これに対して、三次予測はP制御の場合に対して変化はせず、評価関数値の値も同じとなっており、またI制御操舵角はゼロとなっている事が示されている。

以上の結果より、追跡制御では、二次予測はPI制御まで考える必要があるが、三次予測はP制御でも有効であることが示されている。また、P制御を用いた解析は、運動方程式中の状態量の次数がPI制御に比べて低くなり、さらに設定する操舵ゲインが G_p のみで解析が容易となる。

4. 結 論

曲線路における障害物回避を行うドライバモデルとして、躍度を考慮した三次予測モデルを提案し、数値計算により従来の二次予測モデルと比較して、次の結果を得た。

1) フィードバック制御のみの操舵モデルでは、二次予測モデルおよび三次予測モデルともPI制御が必要で、性能はほぼ同等である。

2) フィードフォワード制御を付加する操舵モデルで

(a) Transient response for radius

(b) Transient response for steering angle

Fig. 8 Transient Response for PI control of pursuit control

Table 4 Results for PI control of pursuit control

	G_p	G_i	J
Second Order	0.0121	0.0451	0.0034
Third Order	0.0196	0.0012	0.0034

は、二次予測モデルではPI制御が必要であるが、三次予測モデルではP制御のみで十分な性能が得られる。

以上より、提案する三次予測モデルは設定すべきパラメタが少なくなり、曲線路における障害物回避の解析用ドライバモデルとして有用であることが示された。

文 献

- (1) Kondo, M., Fundamental Relation between the Steering and the Behavior of Automobile, *Jidosha Gijyutsukai Ronbunshu* (Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan), 5(1958), 40-43.
- (2) Yoshimoto, K., Simulation of Man-Automobile Systems by the Driver's Steering Model with Predictability, *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 12-51(1969), 495-500.
- (3) Nagatomo, T., Harada, M., and Yoshimoto, K., Avoidance Behavior of a Cornering Vehicle, *Kotsu Butsuryu Bumon Taikai Koen Ronbunshu 10* (Proceedings of 10th Transportation and Logistics Conference), (2001), 193-196.
- (4) Itoh, K., and M. Itoh, *Motion Control in Biological Body and Robot*, (1991), 190, The 30th Anniversary

(a) Transient response for P control steering angle

(b) Transient response for I control steering angle

Fig. 9 Detail for PI control steering angle

Publication of the Japan Society of Instrument and Control Engineers (CORONA PUBLISHING).

- (5) Amano, Y., Hada, M., and Doi, S., Model of Driver's Behavior in Ordinary and Emergent Situations, *R&D Review of Toyota CRDL*, 33-1(1998), 23-30.
- (6) Mitani, Y., Harada, M., and Yoshimoto, K., Avoidance Behavior Including Speed Control of a Cornering Vehicle, *Kotsu Butsuryu Bumon Taikai Koen Ronbunshu 12* (Proceedings of 12th Transportation and Logistics Conference), (2003), 107-110.
- (7) Fahroo, F., and Ross, I. M., Costate Estimation by a Legendre Pseudospectral Method, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24-2(2001), 270-277.
- (8) Ross, I. M., User's Manual for DIDO 2003 : A MATLAB Application Package for Dynamic Optimization, *Department of Mechanical and Astronautical Engineering, NPS Technical Report (Naval Postgraduate School)*, MAE-03-005(2003).
- (9) Harada, H., Stability Criteria and Evaluation of Steering Maneuver in "Driver-Vehicle System", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 58-546(1992), 418-424.
- (10) Harada, M., and Yoshimoto, K., Parameter Estimation Algorithm of the Vehicle Dynamics by Genetic Algorithm, *Proceedings of 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, (2002), 349-354.