障害物回避のための車両の最適軌道制御* (車体合成力の最大値最小化問題)

大 室 朗^{*1}, 服 部 義 和^{*1}

Optimum Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance (A Minimax Problem of Resultant Vehicle Force)

Akira OHMURO^{*2} and Yoshikazu HATTORI^{*2} TOYOTA CENTRAL R & D LABS., INC.,
41-1 Yokomichi, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi, 480-1192 Japan

This paper discusses an obstacle avoidance problem in vehicle maneuvering. For the avoidance of collision, an optimal control method minimizing the longitudinal movement was proposed. In this method, however, the optimal trajectory is effective for the emergency avoidance primarily. Therefore, an optimal control problem is formulated as minimizing the maximum of the resultant vehicle force by using the relative distance and velocity between vehicle and obstacle. It is shown that an optimal input-map in a 2-dimensional space is derived for online controller of vehicle.

Key Words: Vehicle Control, Optimum Trajectory, Minimax Problem, Resultant Vehicle Force

1. は じ め に

近年、カメラやレーダなどの車載センサや認識技術の発展、ITS などのインフラからの情報整備によって車両前方の走路情報が得られるようになりつつあり、ドライバ操作以外にもこれらの情報を用いた車両運動性能の向上が期待されている。その課題の一つに障害物との衝突回避問題があり、その技術としてモデル予測制御法によるオンライン制御で回避する手法⁽¹⁾や、ポテンシャルフィールドを用いて経路生成を行い目標経路へ追従するように操舵角を制御する手法⁽²⁾などが提案されてきている。また操舵と制動との複合動作による衝突回避問題の理論限界⁽³⁾や、衝突危険値を最小にする最適制御法⁽⁴⁾なども提案されている。

このような背景の下、筆者らは所望の最適軌道及びその軌道に必要な車体の前後横力とヨーモーメントを算出する問題に対して最短回避制御法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を提案した。そして、所望の前後横力とモーメントを実現するために4輪の制駆動とステア制御を行う手法として、階層型車両運動制御法⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を提案してきた。ここでは、回避に必要な横移動距離と車体合成力(車体の前後横力とヨーモーメントの合成力)の最大値が与えられた時に、縦方向の回避距離を最短にする手法が述べられている。

本論文では、車両のヨー角及びヨー角速度の初期値が0で、かつ従来技術⁽⁵⁾⁽⁶⁾によりもとまる最短回避距離よりも障害物と車両との相対距離が大きい場面、すなわちシングルレーチェンジのような車両挙動で衝突回避ができる場面を想定して、車体合成力の最大値が最小となる衝突回避軌道の生成と、その前後横力の導出法を述べる。この場合、ヨー角変化を伴わない軌道が最良となることが明らかであり、4輪操舵車両によればヨー運動を最小限に抑えた運動も可能である。そこで車両運動を質点モデルで表現して車体合成力に関する最適制御問題を定式化する。そして、その制御則の導出により本制御問題と最短回避距離問題⁽⁶⁾とが双対であることを示し、さらに2次元マップを用いてオンラインコントローラが構築できることを示す。最後に、衝突回避の数値シミュレーションを行い、導出した制御器により最適軌道に従って車両が制御されていることを示す。

2. 問 題 設 定

本論文では、車両の運動を質量 m の質点モデルで表現する。まず現在の車両位置を原点に取り、図1のように回避後の速度方向と X 軸が平行になるように X - Y 平面を設定する。そして、入力にあたる前後横力を $F_x(t), F_y(t)$ 、車両の位置を $X(t), Y(t)$ とすると、車

* 原稿受付 2010 年 6 月 1 日。

^{*1} 正員、(株)豊田中央研究所(〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町横道 41-1)。

E-mail: hattori@vdlab.tytlabs.co.jp

Fig. 1 Obstacle avoidance Problem

両運動は次式のように表現できる.

$$\ddot{X} = \frac{F_x}{m}, \quad \ddot{Y} = \frac{F_y}{m} \quad (1)$$

そして, 状態量と入力を次のように取り,

$$\begin{aligned} x_1 &= X, \quad x_2 = \dot{X}, \quad x_3 = Y, \quad x_4 = \dot{Y} \\ u_1 &= \frac{F_x}{m}, \quad u_2 = \frac{F_y}{m} \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T$, $\mathbf{u} = (u_1 \ u_2)^T$ として, 次のような状態方程式に変形する.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{pmatrix} x_2 \\ u_1 \\ x_4 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ v_{x0} \\ 0 \\ v_{y0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで, 車体の摩擦円の大きさを F_{max} とおき μ 利用率 (= 車体合成力の大きさ / 車体の摩擦円の大きさ) として $q(>0)$ を導入し, 回避に必要な車体合成力の最大値を $F_{max}q$ とおく. すると, 車体合成力 $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ の最大値最小化問題 (図 1) は, 次のような評価関数 I および初期・終端条件 ϕ と入力制約 g により定式化できる (図 2 参照). ただし, q は時不変なパラメータで t_e は終端時刻とし, 共に不定とする.

$$I = q, \quad \phi(\mathbf{x}(t_e)) = \begin{pmatrix} x_1(t_e) - X_e \\ x_3(t_e) - Y_e \\ x_4(t_e) \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, q) = u_1^2 + u_2^2 - \left(\frac{F_{max}q}{m} \right)^2 \leq 0$$

なお, この不等式制約条件 g は $\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq F_{max}q$ と等価である.

3. 車体合成力最大値最小化の解法

3.1 最適性条件 まず最適性条件を求めるために, ラグランジュ乗数 $\psi(t), \lambda(t)$ を導入して, ハミルトン関数 H を次式のようにおく⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾.

$$H(t) = \psi(t)^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (5)$$

Fig. 2 Trajectory of resultant vehicle force

そして, 最適解を $\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), q^o$ とおくと, オイラー方程式より次のような関係を満足する.

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(t) &= -H_x(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t))^T \\ &\quad - g_x(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), q^o) \lambda(t) \\ H_u(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t))^T &= 0 \\ &\quad + g_u(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), q^o) \lambda(t) = 0 \\ \lambda(t) g(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), q^o) &= 0, \quad \lambda(t) \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

また横断条件より, ある定数ベクトル $\eta = (\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3)^T$ が存在して次のような関係を満足する.

$$\begin{aligned} \psi(t_e) &= I_x + \phi_x^T(\mathbf{x}^o(t_e)) \eta \\ H(\mathbf{x}^o(t_e), \mathbf{u}^o(t_e), \psi(t_e)) &= -I_t - \phi_t^T(\mathbf{x}^o(t_e)) \eta \\ I_q + \int_0^{t_e} \{ &H_q(\mathbf{x}^o(\tau), \mathbf{u}^o(\tau), \psi(\tau)) \\ &+ g_q(\mathbf{x}^o(\tau), \mathbf{u}^o(\tau), q^o, \psi(\tau)) \lambda(\tau) \} d\tau \\ &= -\phi_q^T(\mathbf{x}^o(t_e)) \eta \end{aligned} \quad (7)$$

ただし, 本節の右下添え字の $\mathbf{x}, \mathbf{u}, t, q$ は偏微分を意味している.

3.2 最適入力 of 導出 式 (6) を 2 章の制御問題に適用すると以下のように変形される.

$$\dot{\psi} = \begin{pmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\psi}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\psi_1 \\ 0 \\ -\psi_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \psi_2 + 2\lambda u_1^o \\ \psi_4 + 2\lambda u_2^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\lambda(t) \left((u_1^o)^2 + (u_2^o)^2 - \left(\frac{F_{max}q^o}{m} \right)^2 \right) = 0 \quad (10)$$

また終端条件は次のようになる.

$$\psi(t_e) = (\eta_1 \ 0 \ \eta_2 \ \eta_3)^T \quad (11)$$

$$[\psi_1 x_2^o + \psi_2 u_1^o + \psi_3 x_4^o + \psi_4 u_2^o]_{t=t_e} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{2F_{max}^2 q^o}{m^2} \int_0^{t_e} \lambda(\tau) d\tau = 1 \quad (13)$$

ここで式(9)(10)より,

$$2\lambda(t) = \frac{m}{F_{\max} q^0} \sqrt{\psi_2^2 + \psi_4^2} \quad (14)$$

となるので, 制御則は

$$\mathbf{u}^0(t) = \begin{pmatrix} -\frac{F_{\max} q^0}{m} \frac{\psi_2}{\sqrt{\psi_2^2 + \psi_4^2}} \\ -\frac{F_{\max} q^0}{m} \frac{\psi_4}{\sqrt{\psi_2^2 + \psi_4^2}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

と求まる. また式(8)(11)より $\psi(t)$ を求めると次式のようなになる.

$$\psi(t) = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_1(t_e - t) \\ \eta_2 \\ \eta_2(t_e - t) + \eta_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

さらに終端条件の式(12)は

$$\eta_1 x_2^0(t_e) + \eta_3 u_2^0(t_e) = 0 \quad (17)$$

を満たすので, 次式が得られる.

$$x_2^0(t_e) = \frac{F_{\max} q^0}{m} \frac{|\eta_3|}{\eta_1} \quad (18)$$

なお, 式(13)より次式の関係も成り立つ.

$$-\frac{F_{\max}}{2m} \frac{\eta_2 \eta_3 |\eta_3|}{\eta_1^2 + \eta_2^2} + \frac{F_{\max}}{2m} \left\{ t_e + \frac{\eta_2 \eta_3}{\eta_1^2 + \eta_2^2} \right\} \sqrt{\eta_1^2 t_e^2 + (\eta_2 t_e + \eta_3)^2} \quad (19)$$

$$-\frac{F_{\max}}{2m} \frac{\eta_1^2 \eta_3^2}{\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}^3} P_0(t_e) = 1$$

$$P_0(t_e) = \ln \left| \frac{P_1(0)}{P_1(t_e)} \right|, \quad (20)$$

$$P_1(t) = (\eta_1^2 + \eta_2^2)(t - t_e) - \eta_2 \eta_3 + \sqrt{\eta_1^2(t_e - t)^2 + (\eta_2(t_e - t) + \eta_3)^2} \sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}$$

ここで $x_2^0(t_e)$ は終端速度を意味し, q^0 が μ 利用率であることを考慮すると, 式(18)より $\eta_1 > 0$ として考えることができる. このとき, 状態方程式は,

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -\frac{F_{\max} q^0}{m} \frac{\eta_1(t_e - t)}{\sqrt{\eta_1^2(t_e - t)^2 + (\eta_2(t_e - t) + \eta_3)^2}} \\ x_4 \\ -\frac{F_{\max} q^0}{m} \frac{\eta_2(t_e - t) + \eta_3}{\sqrt{\eta_1^2(t_e - t)^2 + (\eta_2(t_e - t) + \eta_3)^2}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

と書け, ここに初期条件と終端条件を適用することで, $t_e, \eta_1, \eta_2, \eta_3, q^0$ に関する関係式が得られる. さらに, 次式の変数変換により,

$$F_{\max} q^0 = F_0, \quad v_1 = \frac{\eta_2}{\eta_1}, \quad v_2 = \frac{\eta_3}{\eta_1} \quad (22)$$

式(15)は

$$\mathbf{u}^0(t) = \begin{pmatrix} -\frac{F_0}{m} \cos \theta(t) \\ -\frac{F_0}{m} \sin \theta(t) \end{pmatrix}, \quad (23)$$

$$\therefore \theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{v_1(t_e - t) + v_2}{t_e - t} \right)$$

となる. すなわち, このコントローラの構成は文献(6)と等価である.

3.3 制御パラメータの導出 文献(6)を参考に, 式(21)を時間積分して $F_0, t_e, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ を導出する関係式を求め, 式(22)を適用することにより F_0, t_e, v_1, v_2 に関する非線形方程式が得られる.

$$\frac{m}{F_0} v_{x0} - |v_2| - \frac{\sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - |v_2|}{1 + v_1^2} - \frac{v_1 v_2}{\sqrt{1 + v_1^2}^3} Q = 0 \quad (24)$$

$$\frac{m}{F_0} v_{y0} - \frac{v_1 \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - v_1 |v_2|}{1 + v_1^2} + \frac{v_2}{\sqrt{1 + v_1^2}^3} Q = 0 \quad (25)$$

$$\frac{m}{F_0} v_{y0} t_e + \frac{v_2 |v_2| (2 - v_1^2)}{2(1 + v_1^2)^2} + \frac{(1 + v_1^2)(v_2 - v_1 t_e) - 3v_2}{2(1 + v_1^2)^2} \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - \frac{3v_1 v_2^2}{2\sqrt{1 + v_1^2}^5} Q - \frac{m}{F_0} Y_e = 0 \quad (26)$$

$$\frac{m}{F_0} v_{x0} t_e - \frac{3v_1 v_2}{2(1 + v_1^2)^2} |v_2| - \frac{(1 + v_1^2)t_e - 3v_1 v_2}{2(1 + v_1^2)^2} \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} + \frac{(2v_1^2 - 1)v_2^2}{2\sqrt{1 + v_1^2}^5} Q - \frac{m}{F_0} X_e = 0 \quad (27)$$

$$Q = \ln \left| \frac{Q_1(0)}{Q_1(t_e)} \right|, \quad (28)$$

$$Q_1(t) = -(1 + v_1^2)(t_e - t) - v_1 v_2 + \sqrt{(t_e - t)^2 + (v_1(t_e - t) + v_2)^2} \sqrt{1 + v_1^2}$$

この式に v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e を与えることで F_0, t_e, v_1, v_2 が算出され、式 (23) により制御入力が決まる。また、式 (19)(22) の関係より η_1 と F_0, t_e, v_1, v_2 の間には

$$\eta_1 = \frac{2m}{F_{max}Q_2} \quad (29)$$

$$Q_2 = \left\{ t_e + \frac{v_1 v_2}{1 + v_1^2} \right\} \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - \frac{v_2^2}{\sqrt{1 + v_1^2}} Q - \frac{v_1 v_2 |v_2|}{(1 + v_1^2)} \quad (30)$$

が成り立つので、式 (22) により η_1, η_2, η_3 が求まる。

この式 (24)~(27) もまた文献 (6) の制御パラメータ導出式と一致している。よって、本制御問題と最短回避距離問題が双対な関係にあるということが出来る。この双対性とは、文献 (6) の手法において車体合成力の最大値に基づいて最短回避距離を求めた後、その最短回避距離を相対距離として本論文の手法に与えた場合、求まる車体合成力の最大値が文献 (6) の手法で最初に設定した値と一致することを意味している。

4. オンラインコントローラの導出

車両の速度 v_{x0}, v_{y0} と障害物との距離 X_e および横移動距離 Y_e が与えられた時に、式 (23) と式 (24)~(27) より車体合成力の大きさの向きを算出したい。しかし、式 (24)~(27) が複雑であることから数値演算を導入する必要がある、オンライン制御に適用できる程の高速演算は容易ではない。また、 $v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e, m$ をパラメータとする 5 次元マップをオフラインで求めたとしても多くのメモリを必要とする。

そこで、文献 (6) で提案された $v_{x0}, v_{y0}, Y_e, F_{max}, m$ を既知として式 (24)~(27) の解に基づく θ, X_e を 2 次元マップから導出する手法を応用し、本論文では、 $v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e, m$ を既知として θ, F_0 を出力する 2 次元マップを作成する。

4.1 マップの低次元化 まず式 (24) を次式のように変形し、

$$\frac{m}{F_0} = \frac{A_0}{v_{x0}}, \quad (31)$$

$$A_0 = |v_2| + \frac{\sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - |v_2|}{1 + v_1^2} + \frac{v_1 v_2}{\sqrt{1 + v_1^2}} Q$$

この式を式 (25)~(27) に代入する。

$$\frac{v_{y0}}{v_{x0}} A_0 - \frac{v_1 \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - v_1 |v_2|}{1 + v_1^2} + \frac{v_2}{\sqrt{1 + v_1^2}} Q = 0 \quad (32)$$

$$\frac{v_{y0}}{v_{x0}} A_0 t_e + \frac{v_2 |v_2| (2 - v_1^2)}{2(1 + v_1^2)^2} + \frac{(1 + v_1^2)(v_2 - v_1 t_e) - 3v_2}{2(1 + v_1^2)^2} \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} - \frac{3v_1 v_2^2}{2\sqrt{1 + v_1^2}} Q - \frac{Y_e}{v_{x0}} A_0 = 0 \quad (33)$$

$$A_0 t_e - \frac{3v_1 v_2}{2(1 + v_1^2)^2} |v_2| - \frac{(1 + v_1^2)t_e - 3v_1 v_2}{2(1 + v_1^2)^2} \sqrt{t_e^2 + (v_1 t_e + v_2)^2} + \frac{(2v_1^2 - 1)v_2^2}{2\sqrt{1 + v_1^2}} Q - \frac{X_e}{v_{x0}} A_0 = 0 \quad (34)$$

すると、 v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e が与えられた時に v_1, v_2, t_e が求まるので、式 (31) から回避条件を満足する最小な F_0 が得られる。

次に、マップの低次元化を検討する。そのために任意の正数 a を用いて

$$\frac{v'_{y0}}{v'_{x0}} = \frac{v_{y0}}{v_{x0}}, \quad \frac{Y'_e}{v'_{x0}} = a \frac{Y_e}{v_{x0}}, \quad \frac{X'_e}{v'_{x0}} = a \frac{X_e}{v_{x0}} \quad (35)$$

のような関係を満たす 2 組のパラメータ $P = \{v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e\}$, $P' = \{v'_{x0}, v'_{y0}, X'_e, Y'_e\}$ を考える。すると、それぞれの解 $\{v_1, v_2, t_e\}$ と $\{v'_1, v'_2, t'_e\}$ は、次式の間関係を満たすことが式 (32)~(34) よりわかる。

$$v'_1 = v_1, \quad v'_2 = a v_2, \quad t'_e = a t_e \quad (36)$$

そこで、式 (35) の第 3 式より

$$a = \frac{v_{x0} X'_e}{X_e v'_{x0}} \quad (37)$$

とおけば、 v'_{y0}, Y'_e について次式のように変形できる。

$$v'_{y0} = \frac{v_{y0}}{v_{x0}} v'_{x0}, \quad Y'_e = \frac{Y_e}{X_e} X'_e \quad (38)$$

この式は、 $v'_{x0} = 1.0(\text{m/s})$, $X'_e = 1.0(\text{m})$ と設定すれば、 $P = \{v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e\}$ に対応する $P' = \left\{ 1.0, \frac{v_{y0}}{v_{x0}}, 1.0, \frac{Y_e}{X_e} \right\}$ の解が求まり、さらに式 (36) を用いて逆算すれば $\{v_1, v_2, t_e\}$ が得られることを意味している。よって、 P' に対応する $(v_{y0}/v_{x0}, Y_e/X_e)$ を変数とする 2 次元マップを予め作成しておけば十分となる。

4.2 マップ作成とオンラインコントローラ ここでは、 $v'_{x0} = X'_e = 1$ とした場合における v'_{y0} と Y'_e をパラメータとした 2 次元マップを導出する。まず非線形方程式 (32)~(34) の解である v'_1, v'_2, t'_e のマップを求めると図 3 のようになった。この 3 つのマップと式 (36) を用いれば v_1, v_2, t_e が得られるので、式 (23)(31) より

Fig. 3 The optimal input-map of v_1' , v_2' and t_e' Fig. 4 The optimal input-map of θ and F_0'/m'

回避目標位置までの軌道と制御入力が出る。なお、オーバーシュートして目標位置に到達する軌道とそうでない軌道との間には特異点が存在し、 $v_{y0} = 2Y_e'$ を満たす線上において、 $|v_1'| = \infty$ 、 $|v_2'| = 1/v_{y0}'$ 、 $t_e' = 1.0$ となっている。

次に、 v_1' 、 v_2' 、 t_e' と式(23)(31)(36)を用いて $\theta(0)$ 、 F_0'/m' を出力するマップを作成する。実際の車両制御では現時刻の制御入力が出れば十分であることから、図4のような2つのマップと式(31)(36)の関係から成り立つ次式を用いて、 $t = 0(s)$ の車体合成力の大きさと向きが得られる。

$$\frac{F_0}{m} = \frac{F_0'}{m'} \frac{v_{x0}^2}{X_e} \quad \left(\because \frac{m'}{F_0'} = a \frac{mv_{x0}}{F_0} \right) \quad (39)$$

Fig. 5 Hamiltonian map

よって、現時刻を $t = 0(s)$ とすれば式(23)に F_0/m と θ を代入することによりオンライン制御が可能となる。また、 $\theta(0)$ は式(23)の第2式より a の値に依存しないため、マップから得られた値をそのまま現時刻の制御入力に適用できる。

なお、このコントローラは現時刻の v_{x0} 、 v_{y0} 、 X_e 、 Y_e を逐次初期値として与えているため、フィードバック制御系が構成されているとみなすことができる。

4.3 マップの精度と最適性 図3、図4のマップは、オンラインコントローラとして使用するため特異点付近の勾配を考慮して縦横軸ともに刻み幅を0.001として作成している。またマップ作成時の元データである v_1' 、 v_2' 、 t_e' の精度は、方程式(32)~(34)のそれぞれの誤差(絶対値)の和が 1.0×10^{-5} 未満となるように設定した。ただし、特異点付近ではマップの勾配が急になるため多くの v_{y0} 、 Y_e' について元データ (v_1' 、 v_2' 、 t_e') を必要とする。

さらにマップの最適性を評価するために $v_{x0} = X_e' = 1$ に対応するハミルトン関数 $H'(t)$ について調べる。ここでの最適制御問題は、式(5)のハミルトン関数において時間 t が陽に現れないため $H'(t)$ の偏微分が $H'_t(t) = 0$ となる。また式(7)の横断性条件により $H'(t_e) = 0$ となることから $H'(t) = 0$ が最終的な最適性条件となる。そこで、 $H'(0)$ を計算したところ図5のようになった。この図から、 $H'(t) = 0$ となっていることが十分確認できる。また、この $H'(0)$ はオンライン制御に用いるマップ(図3,4)の値が良好であることも併せて示している。現在の状態における $H(0)$ は、式(5)に式(22)及び式(36)~(38)の関係を適用することにより次式のように求めれば良い(導出は付録参照)。

$$H(0) = a^2 v_{x0} H'(0) \quad (40)$$

なお、図3を用いて式(30)の η_1' を計算したところ図6のようなマップになった。この図から $\eta_1' > 0$ を満たすマップ(図3,4)が得られることも確認できた。

4.4 マップの座標変換 図5のマップを特異点のラインを縦または横軸と平行にすることを考える。そ

Fig. 6 The optimal map of η_1 Fig. 7 Transformation of v'_{y0} into v''_{y0}

の目的は、実際にマップを車載する際に、コントローラの性能を維持しつつマップを記憶する容量を小さくしたいためである。

まず、特異点のラインが $v'_{y0} = 2Y'_e$ 上にあるので、 $Y'_e - v'_{y0}$ 平面上において同じ傾きを持った直線を考える。そして、図7を参考にして v'_{y0} 軸上の切片 v''_{y0} を次式のように導入する。

$$v'_{y0} = 2Y'_e + v''_{y0} \quad (41)$$

ここで、式(38)を代入すると、

$$v''_{y0} = \frac{v_{y0}}{v_{x0}} - \frac{2Y_e}{X_e} \quad (42)$$

となるので、 $Y'_e - v'_{y0}$ 平面上のマップに書き換えることで、図8のように特異点を横軸上に移動するマップに変換できる。

この変換により、特異点から離れた領域ではマップの刻み幅を0.001より大きくすることが容易になる。

5. 数値シミュレーション

前章でもとめた2次元マップ(図8)を搭載した車両において、現時刻の状態 v_{x0}, v_{y0}, X_e, Y_e を逐次初期値としてコントローラに与えるオンラインシミュレーションを行う。ここでは、図1の直線路を想定して2つの場面で行う。

Fig. 8 The map of optimum controller

Fig. 9 Verification of feedback controller

< Scene 1 > 車両の初速度を $v_{x0} = 15.0(\text{m/s})$, $v_{y0} = 0.0(\text{m/s})$ とし、目標位置を $X_e = 20.0(\text{m})$, $Y_e = 2.0(\text{m})$, そしてサンプリング時間を $\Delta t = 0.01(\text{s})$ とし計算を行った。すると、図9のような軌道が得られた ($\|u\| \approx 3.97(\text{m/s}^2)$, $t_e \approx 1.50(\text{s})$)。また、オフラインで最適軌道を求めると図10のようになった。この時、 $\|u\| = 3.953(\text{m/s}^2)$, $t_e = 1.496(\text{s})$, $H(t) = 0.0$ であった。これらの結果を比較すると、オンライン制御とオフラインによる最適軌道との誤差は図11のようになり、良好な軌道が得られているといえる。また、終端時刻付近で誤差が大きくなっているが、これは車両が障害物に近づくにつれてマップの特異点付近に状態が近づいてしまい、マップの勾配の影響が現れたものと考えられる。なお、オンライン制御におけるハミルトン関数

Fig. 10 Simulation result of offline

Fig. 11 Error of trajectory

$H(t)$ は図 5 と式 (40) より十分小さくなる。

< Scene 2 > 本コントローラは、回避途中に検出値などの変化により Y_e が変化したとしても、タイヤ発生力の限界値以内であれば対応できる特徴を持つ。そこで、 $v_{x0} = 15.0(\text{m/s})$, $v_{y0} = 0.0(\text{m/s})$ で走行中の車両が、障害物との相対距離 $X_e = 20.0(\text{m})$ の地点で $Y_e = 2.0(\text{m})$ と認識して回避し始め、相対距離 $X_e = 10.0(\text{m})$ まで近づいた地点で $Y_e = 3.0(\text{m})$ と認識した場合を考える。すると、図 12 のようなシミュレーション結果が得られた。この結果より、回避途中に回避すべき横移動距離が変化したとしても、その変化に対応できていることが確認できた。

なお、このオンラインコントローラにより出力され

Fig. 12 Trajectory of vehicle for changes in Y_e

た前後横力を車両で発生させるためには、文献 (6) と同様に文献 (5) や文献 (7)(8) の手法を用いて各輪に力を配分すれば良い。

6. お わ り に

本論文では、障害物の回避問題において、車両の障害物の相対距離と回避すべき横移動距離、そして回避直後の速度方向が与えられた時に、その位置と速度方向に到達するために必要な車体合成力の最大値を最小化する軌道と制御則を導出した。そして、オンラインコントローラとして用いる入力マップが 2 次元のマップに低次元化できることを示し、数値シミュレーションを通じてオンライン制御ができることを示した。

また、本制御法は外部環境に応じて X - Y 座標の取り方を工夫すれば直線路に限らず様々な場面に拡張できる。よって、所望の位置と速度方向に対して、車両が移動する際に必要な車体合成力の最大値を最小化する軌道が 2 次元マップを用いて算出できることを示した。

謝 辞

精読の上、貴重なご指摘を頂きました校閲者の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Mukai, M., Kawabe, T., Nishira, H., Takaki, Y. and Deguchi, Y.: On Model Predictive Control for Pedestrian Avoidance using Mixed Integer Programming (in Japanese), Proceedings of the 49th Japan Joint Automatic Control Conference, (2006), SA4-1-2, pp.1-4

- (2) Nishira,H., Takagi,Y. and Deguchi,Y.: *Research on collision avoidance path calculation for cooperative control with human driver* (in Japanese), SICE 10th Annual Conference on Control Systems, (2010),164-2-1
- (3) Horiuchi,S., Hirao,R., Okada,K. and Nohtomi,S.: *Optimal Steering and Braking Control in Emergency Obstacle Avoidance*, (in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, vol.72, no.722, (2006), pp.3250-3255
- (4) Fujioka,T., Shibata,A., Tsukasaki,Y. and Sawada,S.: *Vehicle motion control for minimizing collision risk by use of optimal control theory* (in Japanese), 2008 JSAE Annual Congress (Spring), no.8-08, (2008), pp.21-26
- (5) Hattori,Y., Ono,E. and Hosoe,S.: *Optimum Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance Problem*, IEEE/ASME, Transactions on Mechatronics, Vol.11, No.5, (2006), pp.1-6
- (6) Hattori,Y., Ono,E. and Hosoe,S.: *An Optimal Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance with the Shortest Longitudinal Traveling Distance*(in Japanese), The Society of Instrument and Control Engineers, (2007), vol.43, no.11, (2007), pp.1047-1054
- (7) Hattori,Y. and Koibuchi,K.: *Integrated Control of Braking and Steering for Vehicle Dynamics* (in Japanese), The Society of Instrument and Control Engineers Transactions on Industrial Application, vol.4, no.11, (2005), pp.75-80
- (8) Ono,E., Hattori,Y., Aizawa,H., Kato,H., Tagawa,S. and Niwa,S.: *Clarification and Achievement of Theoretical Limitation in Vehicle Dynamics Integrated Management* (in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, vol.73, no.729, (2007), pp.1425-1432
- (9) Shimizu,K.: *Optimal Control - Theory and Algorithms* (in Japanese), Corona Publishing Co.,Ltd., (1994), pp.95-103
- (10) Kato,K.: *Engineered Optimal Control - Approach to the nonlinear* (in Japanese), University of Tokyo Press, (1988), pp.99-102, 199-201

付 録

[ハミルトン関数の関係式の導出] 式(40)の関係は以下のように容易に導出できる。まず2組のパラメータ P, P' を用いて $H'(0)$ と $H(0)$ を表記する。

$$H'(0) = \eta'_1 \begin{pmatrix} 1 & t'_e & v'_1 & v'_1 t'_e + v'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v'_{x0} \\ -\frac{F'_0}{m'} \cos \theta \\ v'_{y0} \\ -\frac{F'_0}{m'} \sin \theta \end{pmatrix} \quad (43)$$

$$H(0) = \eta_1 \begin{pmatrix} 1 & t_e & v_1 & v_1 t_e + v_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{x0} \\ -\frac{F_0}{m} \cos \theta \\ v_{y0} \\ -\frac{F_0}{m} \sin \theta \end{pmatrix} \quad (44)$$

そして、式(30)に式(36)を適用すると $\eta_1 = a^2 \eta'_1$ となるので、式(36)(39)の関係より $H(0)$ を次のように変形する。

$$\begin{aligned} H(0) &= a^2 \eta'_1 \begin{pmatrix} 1 & t'_e & v'_1 & v'_1 t'_e + v'_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} v_{x0} - \frac{aF'_0 v_{x0}}{m' v'_{x0}} \cos \theta & v_{y0} - \frac{aF'_0 v_{x0}}{m' v'_{x0}} \sin \theta \end{pmatrix}^T \\ &= a^2 \eta'_1 \frac{v_{x0}}{v'_{x0}} \begin{pmatrix} 1 & t'_e & v'_1 & v'_1 t'_e + v'_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} v'_{x0} - \frac{aF'_0}{m'} \cos \theta & \frac{v_{y0}}{v_{x0}} v'_{x0} - \frac{aF'_0}{m'} \sin \theta \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (45)$$

ここに $v'_{x0} = 1.0$ を代入すると、式(40)の関係が導出される。