4 輪制駆動・ステア統合制御による最短回避制御

服部 義和*・小野 英一*・細江 繁幸**

An Optimum Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance with the Shortest Longitudinal Traveling Distance

Yoshikazu HATTORI*, Eiichi ONO* and Shigeyuki HOSOE**

This report focuses on developing a control algorithm for obstacle avoidance in automobile maneuvering. For the derivation, an optimal control problem is formulated as minimizing the longitudinal movement to avoid the collision. The optimal inputs are obtained through a simple map in a three dimensional space comprised of the vehicle velocities in the longitudinal and lateral directions, the distance to avoid and the force acting to the vehicle. The optimal force input is then shown to be expressed as the forces distributed to the four tires.

Key Words: vehicle control, optimum control, brake, steering

1. はじめに

20 世紀後半, 車両の運動制御は急速に発展してきた。その開発は ABS, TCS から始まり, 車両横滑り防止装置である ESC の登場により車両の安定性は飛躍的に向上した^{1), 2)}。近年, さらにそれら単一の機能を統合し, 複数のアクチュエータを用いて複数の機能を実現する統合車両運動制御 VDIM に注目が集まっている。

筆者らはこれまでに VDIM を実現するために有効な階層型のアルゴリズム構造を提案し, 最適制御に基づき最適な 4 輪のタイヤの力と種々のアクチュエータの協調制御を実現する手法を示してきた³⁾。これにより, VDIM は限界走行時の安定性向上のみならず, 通常走行時からのシームレスな制御による操縦性の向上が実現された。

ここで実現したアルゴリズムは, ドライバのステアやブレーキ, アクセルペダル操作から所望の車両運動を求め, それを実現するものであった。一方でドライバ以外からの情報としては, 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, これらの情報を用いた車両運動性能の向上が望まれている。これに対し向井らは移動する障害物に対して車体に発生する力と車体の横移動距離を最小にしつつ回避を行なう手法を示している⁴⁾。一方で, 車

両の限界性能を引き出したり, 適切な警報タイミングを与える上で, 障害物のどれくらい手前から回避を開始すればよいかを知ることは重要である。

筆者らはこれまでに, プレビュー情報などにより回避すべき横移動距離が与えられたときに, 最短距離での回避を実現する制御手法を提案してきた⁵⁾。提案手法では制御アルゴリズムを以下の階層に分解して考えている。一つは車体の最適軌跡を実現する力とモーメントを求める問題, もう一つは目標となる軌跡を実現する車体の力とモーメントを 4 輪の制駆動, ステア制御によって実現する問題である。これまでの手法では, 車体の最適軌跡を実現する力とモーメントを求める問題については, 鍾線形計画法などの高速な数値演算手法に基づき最適解の時系列を求めていた。これに対して本報告では, まず車体を質点と見なし, 終端時間自由の最適制御問題として定式化する。つぎに最適性の条件により最適開ループ制御 $u(t)$ を導出し, フィードバック制御へ変換する。最後に, 最適フィードバック制御のコントローラが 2 次元マップで表現できることを示す。ここで導出したコントローラは, 車体に与える最大加速度を指定することが可能で, 路面状態や乗り心地などを考慮した制御が可能である。

こうして得られた最適な車体前後横力は, すでに提案している疑似逆行列を用いた逐次 2 次計画法に基づいて 4 輪のタイヤの発生力への配分が可能⁶⁾であり, 各輪の駆動力, ブレーキ, ステアの統合制御によって最短回避を実現できる。

最後に提案手法の効果をシミュレーションによって検証する。

* (株) 豊田中央研究所 愛知県愛知郡長久手町

** 理化学研究所 名古屋市守山区下志段味字穴ヶ洞

* Toyota Central R&D Labs., Nagakute, Aichi

** RIKEN, Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya

(Received April 24, 2007)

(Revised September 18, 2007)

Fig. 1 Obstacle avoidance problem

Fig. 2 Passing problem for point mass

2. 最短距離での障害物回避

2.1 二つの回避行動：停止とすり抜け

車両が最短距離で障害物を回避することを考える場合、Fig. 1 に示すような二つの行動が考えられる。すなわち、(a) 障害物までに停止する場合と (b) 障害物を避けてすり抜ける場合である。ここでは、すり抜けるとは、障害物までに障害物の大きさにあたる横距離 Y_e だけ移動し、かつ終端状態で横速度を 0 にすることと定義する。

ここで、停止によって障害物を避ける場合は、車両の質量を m 、初速を v_0 、車両が発生できる最大力を F_{max} とすると、最短回避距離 X_{es} は、

$$X_{es} = \frac{m v_0^2}{2 F_{max}} \quad (1)$$

と簡単に求まる。一方で、すり抜けによる回避を考えると、制動と横移動の複合運動が必要となり簡単には求まらない。そこで、本報告では、すり抜けによる最短距離での回避を取り上げる。一般に車両の運動は Fig. 1(b) に示すように並進・ヨー運動を伴う剛体運動に簡略化できるが、4 輪の制駆動・ステアリングを自由に制御できるとすれば、ヨー運動なしに並進運動することも可能であり、このとき最大の回避性能が得られることは自明である。よって、以下では車両を質点と仮定して最短距離での回避問題を解く。

2.2 すり抜けによる最短距離回避問題

ここでは、緊急回避問題を以下のように考える。

- 車両は質量 m をもつ質点とする。
- Fig. 2 に示すように、質点は $x-y$ 平面内で x 方向、 y

方向にそれぞれ初速 v_{x0}, v_{y0} で運動しているとする。

- 質点を Y_e だけ横 (y 軸) 方向に移動させて、終端での横速度を 0 にしたい。
- このときに質点が縦 (x 軸) 方向に進む距離 X_e を最小にしたい。
- 質点には x 軸方向、 y 軸方向にそれぞれ力 $F_x(t), F_y(t)$ を加えることができる (制御入力)。ただしその合力の大きさは F_{max} 以下とする。

この問題は以下のように定式化できる。

運動方程式

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x(t) \\ m\ddot{y} = F_y(t) \end{cases} \quad (2)$$

初期条件

$$\begin{cases} \dot{x}(0) = v_{x0} \\ \dot{y}(0) = v_{y0} \\ y(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

終端条件

$$\begin{cases} \dot{y}(t_e) = 0 \\ y(t_e) = Y_e \end{cases} \quad (4)$$

拘束条件

$$F_x(t)^2 + F_y(t)^2 \leq F_{max}^2 \quad (5)$$

の下で、

$$X_e = x(t_e) - x(0) \quad (6)$$

を最小化する $F(t)$ ((7) 式) を求めよ。ここで、 $t_e > 0$ は終端時刻で未定とする。また、 $\dot{x} \geq 0$ とし、後退はしないとする。

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 最短回避問題に対する最適解の導出

3.1 最適性の条件⁷⁾

一般に、制御対象が状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \in [t_0, t_e] \\ x &\in R^n, \quad u \in R^r \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられ、不等式拘束条件

$$g(x(t), u(t), t) \leq 0 \quad (9)$$

および終端条件

$$\theta(x(t_e), t_e) = 0 \quad (10)$$

が課せられているとする。ただし、 t_e は終端時間でフリーとする。このとき、評価関数

$$L = S(x(t_e), t_e) + \int_{t_0}^{t_e} f_0(x(t), u(t), t) dt \quad (11)$$

を最小化する最適解 $\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t)$ に関して以下の結果が知られている。

ハミルトン関数を以下のように定義する。

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \psi(t), t) = f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \psi(t)^T \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (12)$$

ただし, $\psi(t) \in R^n$ はラグランジュ乗数関数ベクトルを表わす。このとき最適性の条件から, ベクトル値関数 $\lambda(t) \geq 0$, $\lambda(t) \in R^m$ および定数ベクトル ν が存在し, 以下の条件が成立する。

$$\dot{\psi}(t) = -\frac{\partial H(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t), t)}{\partial \mathbf{x}(t)} - \lambda^T \frac{\partial g(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t), t)}{\partial \mathbf{x}(t)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial H(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t), t)}{\partial \mathbf{u}(t)} + \lambda^T \frac{\partial g(\mathbf{x}^o(t), \mathbf{u}^o(t), \psi(t), t)}{\partial \mathbf{u}(t)} = 0 \quad (14)$$

$$\lambda_i(t) g_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), y) = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (15)$$

また, 終端条件に対しては, 以下の式が成立する。

$$\psi^T(t_e) = \frac{\partial S(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}(t)} + \nu^T \frac{\partial \theta(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}(t)} \quad (16)$$

$$H|_{t=t_e} = -\frac{\partial S(\mathbf{x}(t), t)}{\partial t} - \nu^T \frac{\partial \theta(\mathbf{x}(t), t)}{\partial t} \quad (17)$$

3.2 最適解の導出

前章で示した最短回避問題における状態方程式は, (2), (3) 式より, 以下のように書ける。

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T = [\dot{x}(t) \ y(t) \ \dot{y}(t)]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{u}(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T = \left[\frac{F_x(t)}{m} \ \frac{F_y(t)}{m} \right]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = [u_1(t) \ x_3(t) \ u_2(t)]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{x}(0) = [v_{x0} \ 0 \ v_{y0}]^T \quad (21)$$

評価関数 ((11) 式) は

$$L = \int_0^{t_e} \dot{x}(t) dt = \int_0^{t_e} x_1 dt \quad (22)$$

と表わされる。すなわち,

$$S(\mathbf{x}(t), t) = 0 \quad (23)$$

$$f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = x_1(t) \quad (24)$$

である。また, 制約条件 ((9) 式) は, 本問題ではスカラー関数であり, (5), (19) 式より,

$$g(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = u_1(t)^2 + u_2(t)^2 - \left(\frac{F_{max}}{m} \right)^2 \leq 0 \quad (25)$$

で与えられる。さらに, 終端条件 ((10) 式) は (4) 式より,

$$\theta(t) = [x_2(t) - Y_e \ x_3(t)]^T \quad (26)$$

$$\theta(t_e) = 0 \quad (27)$$

と定式化できる。

つぎに最適性の条件を満たす制御入力 $\mathbf{u}^o(t)$ を求める。まず, ハミルトン関数 ((12) 式) は, (20), (24) 式より

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = x_1(t) + \psi_1(t)u_1(t) + \psi_2(t)x_3(t) + \psi_3(t)u_2(t) \quad (28)$$

となる。よって,

$$\frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{x}} = [1 \ 0 \ \psi_2(t)]^T \quad (29)$$

$$\frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = [\psi_1(t) \ \psi_3(t)]^T \quad (30)$$

$$\frac{\partial g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = [2u_1(t) \ 2u_2(t)]^T \quad (32)$$

であり, 最適性の条件 ((13)-(15) 式) より,

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \psi_1(t) \\ \frac{d}{dt} \psi_2(t) \\ \frac{d}{dt} \psi_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -\psi_2(t) \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_1(t) + 2\lambda(t)u_1^o(t) \\ \psi_3(t) + 2\lambda(t)u_2^o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\lambda(t) \left(u_1(t)^2 + u_2(t)^2 - \left(\frac{F_{max}}{m} \right)^2 \right) = 0 \quad (35)$$

となる。ここで, $\nu = [\nu_1 \ \nu_2]^T$ とすると, 終端条件 ((16), (17) 式) は,

$$\frac{\partial \theta(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\frac{\partial \theta(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = 0 \quad (37)$$

より

$$\psi(t_e) = [0 \ \nu_1 \ \nu_2]^T \quad (38)$$

$$H(\mathbf{x}^o(t_e), \mathbf{u}^o(t_e), t_e) = x_1(t_e) + \psi_1(t_e)u_1(t_e) + \psi_2(t_e)x_3(t_e) + \psi_3(t_e)u_2(t_e) = 0 \quad (39)$$

となる。これらを解くことにより, 最適解 $\mathbf{u}^o(t)$ が得られる。

まず, (34), (35) 式から $\mathbf{u}^o(t)$ は

$$\mathbf{u}^o(t) = \begin{bmatrix} -\frac{F_{max}}{m} \frac{\psi_1(t)}{\sqrt{\psi_1^2(t) + \psi_3^2(t)}} \\ -\frac{F_{max}}{m} \frac{\psi_3(t)}{\sqrt{\psi_1^2(t) + \psi_3^2(t)}} \end{bmatrix} \quad (40)$$

と表わせる。つぎに (33), (38) 式より $\psi(t)$ を得る。

$$\psi(t) = \begin{bmatrix} -t + t_e \\ \nu_1 \\ -\nu_1 t + \nu_1 t_e + \nu_2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

さらに, (27), (40), (41) 式より, x 方向の終端速度 $x_1(t_e) = v_{xe}$ は

$$x_1(t_e) = \frac{F_{max}}{m} |\nu_2| = v_{xe} \quad (42)$$

である。

以上の結果から (18), (19), (40), (41) 式を (8) 式に代入し,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{F_{max}}{m} \frac{-t + t_e}{\sqrt{(-t + t_e)^2 + (\nu_1(-t + t_e) + \nu_2)^2}} \\ x_3(t) \\ -\frac{F_{max}}{m} \frac{(\nu_1(-t + t_e) + \nu_2)}{\sqrt{(-t + t_e)^2 + (\nu_1(-t + t_e) + \nu_2)^2}} \end{bmatrix} \quad (43)$$

を得る。

これを (21) 式による初期値, (26), (27), (42) 式による終端条件に基づいて解くと, 以下の三つの式を得る。

$$\frac{m}{F_{max}} v_{x0} - \frac{\nu_2^2}{\sqrt{\nu_2^2}} - \frac{\sqrt{(\nu_1 t_e + \nu_2)^2 + t_e^2} - \sqrt{\nu_2^2}}{1 + \nu_1^2} - \frac{\nu_1 \nu_2}{\sqrt{1 + \nu_1^2}^3} Q = 0 \quad (44)$$

$$\frac{m}{F_{max}} v_{y0} - \frac{\nu_1 \sqrt{(\nu_1 t_e + \nu_2)^2 + t_e^2} - \nu_1 \sqrt{\nu_2^2}}{1 + \nu_1^2} + \frac{\nu_2}{\sqrt{1 + \nu_1^2}^3} Q = 0 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{m}{F_{max}} v_{y0} t_e + \frac{\nu_2 \sqrt{\nu_2^2} (2 - \nu_1^2)}{2(1 + \nu_1^2)^2} \\ + \frac{((1 + \nu_1^2)(\nu_2 - \nu_1 t_e) - 3\nu_2) \sqrt{(\nu_1 t_e + \nu_2)^2 + t_e^2}}{2(1 + \nu_1^2)^2} \\ - \frac{3\nu_1 \nu_2^2}{2\sqrt{1 + \nu_1^2}^5} Q - \frac{m}{F_{max}} Y_e = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

ただし,

$$Q = \ln \left(\frac{-(1 + \nu_1^2)t_e - \nu_1 \nu_2 + \sqrt{(\nu_1 t_e + \nu_2)^2 + t_e^2} \sqrt{1 + \nu_1^2}}{-\nu_1 \nu_2 + \sqrt{\nu_2^2} \sqrt{1 + \nu_1^2}} \right) \quad (47)$$

よって, (44)-(47) 式から, $v_{x0}, v_{y0}, Y_e, F_{max}, m$ が既知ならば未知数 t_e, ν_1, ν_2 を決定することができる。これを (40), (41) 式に代入すれば, 次式の最適制御入力 $u^o(t)$ を得ることができる。

$$u^o(t) = -\frac{F_{max}}{m} \mu^o(t) \quad (48)$$

ただし, $\mu^o(t)$ は

$$\mu^o(t) = \begin{bmatrix} \frac{-t + t_e}{\sqrt{(-t + t_e)^2 + (\nu_1 t_e + \nu_2)^2}} \\ \frac{-\nu_1 t + \nu_1 t_e + \nu_2}{\sqrt{(-t + t_e)^2 + (\nu_1 t_e + \nu_2)^2}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

である。

4. フィードバックコントローラの導出

4.1 任意の車速, 加速度以内での回避の実現

ここまでの議論で, $v_{x0}, v_{y0}, Y_e, F_{max}, m$ という五つの値から最適入力を決めるパラメータ t_e, ν_1, ν_2 を定めることができることを示したが, これらを求める式は非線形性が高く, 制御中オンラインで解を得ることは難しい。さらに入力 ν_1, ν_2 が 5 次元のため, オフライン計算でマップ化しても多くのメモリ量が必要になる。そこでより少ない次元でマップを構成することを考える。

さて, (44)-(46) 式の形から, t_e, ν_1, ν_2 を定めるには, $mv_{x0}/F_{max}, mv_{y0}/F_{max}, mY_e/F_{max}$ の値が与えられればよいことは自明である。すなわち, これらを変数に選べば, t_e, ν_1, ν_2 は 3 次元のマップで表現できる。以下では, 最適入力の決定にはさらにこれより 1 次元低い 2 次元マップを用いることができることを示す。

今, 任意の実数 a によって,

$$\frac{m'}{F'_{max}} v'_{x0} = a \frac{m}{F_{max}} v_{x0} \quad (50)$$

$$\frac{m'}{F'_{max}} v'_{y0} = a \frac{m}{F_{max}} v_{y0} \quad (51)$$

$$\frac{m'}{F'_{max}} Y'_e = a^2 \frac{m}{F_{max}} Y_e \quad (52)$$

で関係付けられる 2 組のパラメータ集合 $P = \{v_{x0}, v_{y0}, Y_e, F_{max}, m\}$ および $P' = \{v'_{x0}, v'_{y0}, Y'_e, F'_{max}, m'\}$ を考える。また, P が与えられたときの (44)-(46) 式の解を $\{t_e, \nu_1, \nu_2\}$ とする。このとき,

$$t'_e = a t_e \quad (53)$$

$$\nu'_1 = \nu_1 \quad (54)$$

$$\nu'_2 = a \nu_2 \quad (55)$$

と置くと, $\{t'_e, \nu'_1, \nu'_2\}$ が P' に対する (44)-(46) 式の解となることを確かめるのは容易である。

一方, パラメータ集合が P であるときの最適制御の現在値 $u^o(0)$ は, (49) 式より

$$u^o(0) = -\frac{F_{max}}{m} \mu^o(0) = -\frac{F_{max}}{m} \begin{bmatrix} \frac{t_e}{\sqrt{(t_e)^2 + (\nu_1 t_e + \nu_2)^2}} \\ \frac{\nu_1 t_e + \nu_2}{\sqrt{(t_e)^2 + (\nu_1 t_e + \nu_2)^2}} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Fig. 3 The map of optimum controller

で与えられる。さて、式中の $\mu^o(0)$ はその形からわかるように、(53)-(55)式が成り立つとき、 $\{t'_e, \nu'_1, \nu'_2\}$ に対しても同じ値をとる。よって、上の議論を遡れば、 $\mu^o(0)$ は、(50)-(52)式が満たされれば P に対しても P' に対しても値は同じである。これは、 $\{m'v'_{x0}/F'_{max}, m'v'_{y0}/F'_{max}, m'Y'_e/F'_{max}\}$ の3変数のうち、一つは常に1に基準化できることを示す。ここでは、

$$\frac{m'}{F'_{max}}Y'_e = a^2 \frac{m}{F_{max}}Y_e = 1 \quad (57)$$

となるように a を選ぶ。このとき

$$\begin{aligned} \frac{m'}{F'_{max}}v'_{x0} &= a \frac{m}{F_{max}}v_{x0} \\ &= \sqrt{\frac{m}{F_{max}Y_e}}v_{x0} \quad \left(\equiv \frac{1}{\alpha}\right) \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \frac{m'}{F'_{max}}v'_{y0} &= a \frac{m}{F_{max}}v_{y0} \\ &= \sqrt{\frac{m}{F_{max}Y_e}}v_{y0} \quad (\equiv \beta) \end{aligned} \quad (59)$$

となる。したがって、 $\mu^o(0)$ は2変数 α, β の関数とみなすことができるので、以下ではこれを

$$\mu^o(0) \equiv h(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} h_1 \left(\sqrt{\frac{F_{max}}{m}} \frac{\sqrt{Y_e}}{v_{x0}}, \sqrt{\frac{m}{F_{max}}} \frac{v_{y0}}{\sqrt{Y_e}} \right) \\ h_2 \left(\sqrt{\frac{F_{max}}{m}} \frac{\sqrt{Y_e}}{v_{x0}}, \sqrt{\frac{m}{F_{max}}} \frac{v_{y0}}{\sqrt{Y_e}} \right) \end{bmatrix} \quad (60)$$

と記述することにする。

h_2 に関しては、Fig. 3に示すようにあらかじめマップを用意し、その値を決定する。 h_1 は(56)式から(61)式が成立するので、 h_2 より簡単に計算できる。また、Fig. 3のマップは F_{max}/m を陽な形で含んでおり、 F_{max}/m の変化についても対応可能である。

$$h_1^2 + h_2^2 = 1 \quad (61)$$

さて、以上では $u^o(0)$ は開ループ制御 $u^o(t)$ ((48)式)の時

Fig. 4 The Minimum Avoidable Distance of each maneuver

刻 $t=0$ における値と考えてきた。しかし、 $t=0$ は単に最適制御の設計時刻を表わしているに過ぎない。よって、これを現在の時間と考えてよい。このとき、(56)、(60)、(61)式およびFig. 3から求められる $u^o(0)$ は、‘現在’の車両状態量と目標値 v_{x0}, v_{y0}, Y_e (回避に必要な横移動量)を逐次初期値として用いることにより、フィードバックコントローラを構成していると見なすことができる。

4.2 最短距離での回避を実現する回避行動の決定

2.1節で述べたように、回避には「停止」と「すり抜け」という2種類の行動パターンがあり、実際にはこのうちの回避距離が短いほうの行動パターンが最短回避となる。「停止」の場合の最短回避距離 X_{es} は、(1)式で与えられる。一方で、「すり抜け」の場合の最短回避距離 X_{ep} は、(43)式の $\dot{x}_1(t)$ を0から t_e まで積分することで得られ次式となる。

$$\begin{aligned} X_{ep} &= v_{x0}t_e - \frac{F_{max}}{m} \frac{3\nu_1\nu_2\sqrt{\nu_2^2}}{2(1+\nu_1^2)^2} \\ &\quad - \frac{F_{max}}{m} \frac{((1+\nu_1^2)t_e - 3\nu_1\nu_2)\sqrt{(\nu_1t_e + \nu_2)^2 + t_e^2}}{2(1+\nu_1^2)^2} \\ &\quad + \frac{F_{max}}{m} \frac{\nu_2^2(2\nu_1^2 - 1)}{2\sqrt{1+\nu_1^2}} P \end{aligned} \quad (62)$$

Fig. 4に $v_{y0} = 0$ [m/s], $Y_e = 1$ [m], $F_{max}/m = 9.8$ [m/s²]のときの直進制動距離 X_{es} 、単純に横移動のみによって回避したときの回避距離 X_y と X_{ep} の関係を示す。Fig. 4の条件では、初速 $v_{x0} = 10$ [m/s] 辺りを境に車速が高いときにすり抜けによる回避が最短回避となることを示している。

5. 車体に発生させたい力の各輪への配分

ここでは前章で求めた最適軌跡を与える車体への力 u^o を各輪が発生する力に配分する手法について述べる。一般にタイヤの力は路面状態などによって決まる最大値 F_{maxi} 内に拘束される。ここで、 $(i = 1, 2, 3, 4)$ は各輪を表わす。さらに通常、駆動方式や操舵装置の構成などによってもその発生力は拘束を受けるが、ここでは4輪の制駆動力、ステアリングは自由に制御可能と仮定して、各輪のタイヤの力は最大値の範囲内でその大きさと向きを自由に制御可能とする。

Fig. 5 The Axis of Vehicle Body

配分手法の詳細については、すでに参考文献5で報告しており、紙面の都合上詳細は割愛するが、次式で示す各輪のタイヤの力の利用率 γ_i を各輪均等化($\gamma_i = \gamma$)し、 γ を最小化する各輪のタイヤの力(F_{xi}, F_{yi})を求めることを考える。

$$\gamma_i \equiv \frac{\sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}}{F_{maxi}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (63)$$

まず、簡単のために Fig. 5 のように車体に対する力の座標系を u° の方向を x 軸と定める。ここで、 a_i, b_i はそれぞれ各輪と車両重心との位置関係を示し、 $|u^\circ| = F_0$ とする。また、 M_0 は車体に与えるヨーモーメントである。ただし、本報告では $M_0 = 0$ としている。さらに、各輪の座標系を Fig. 6 のように置き、各輪の力を車体の力と各輪の力の方向の違い q_i と利用率 γ_i で示す。以上の準備の上で、

$$\gamma \sum_{i=1}^4 F_i \cos q_i = F_0 \quad (64)$$

$$\gamma \sum_{i=1}^4 F_i \sin q_i = 0 \quad (65)$$

$$\gamma \sum_{i=1}^4 F_i (-a_i \cos q_i + b_i \sin q_i) = M_0 \quad (66)$$

を満たし、次式で与える評価関数 J を最大化 (すなわち γ を最小化) する各輪の力の向き q_i を求める。

$$J = \frac{(lF_0)^2 + M_0^2}{\gamma} \quad (67)$$

ここで、 l は力とモーメントの次元をあわせるための定数で、たとえば各輪と車両重心の平均値とする。以上の問題は、擬似逆行列を用いた逐次2次計画法によりオンラインで解を得ることができる。

6. シミュレーション

これまでに示した最短回避制御の結果をシミュレーションで検証する。車両パラメータ m は一般的な乗用車の値とし、 F_{max} は比較的滑りやすい路面を想定した値を用いる。シミュレーションに用いた条件は Table 1 のとおりである。

Fig. 7 に (48) 式によって与えられる最適解ループ制御に

Fig. 6 The Axis of Tire

Table 1 Simulation condition

m	2000	[kg]
F_{max}	9800	[N]
Y_e	3	[m]
v_{x0}	27	[m/s]

Table 2 Optimum parameter values on the simulation

ν_1	-6.2947
ν_2	4.8778
t_e	1.6120 [s]

よる質点の運動の結果と、(56),(60),(61) 式と Fig. 3 から得られる最適フィードバック制御と4輪タイヤ力への最適配分制御を用いた車両運動シミュレーションの結果を示す。このとき Table 1 の条件で (44)-(47) 式から求めた最適開ループ制御を与えるパラメータは、Table 2 のようになる。

最適フィードバックコントローラに使用するマップ (Fig. 3) は、 $m = 1$ [kg], $F_{max} = 9.8$ [N], $Y_e = 1$ [m] の条件で求めたものであり、Table 1 のシミュレーションの条件とは回避距離 Y_e も車両の最大加速度 F_{max}/m も異なる。これは、異なる走行条件においても導出したコントローラが有効であることを示している。また、フィードバック制御のサンプリング周期は 10 [ms] とした。車両運動シミュレーションに用いた車両モデルは、ばね上6自由度をもち、最大タイヤ発生力の荷重に対する非線形性などを考慮している。そのため、質点系の最適制御入力に常時車体発生力として実現できるとはかぎらない。このような条件下でも、フィードバック制御のロバスト性により、ほぼ質点の運動と一致した軌跡 (x, y) が得られた。1.4 [s] 付近に見られる制御入力の誤差の原因は、回避終了付近で $Y_e, v_y \rightarrow 0$ となるため、数値演算誤差により入力パラメータである $v_y \sqrt{m/(F_{max} Y_e)}$ が不安定になりやすいためである。各輪への配分による車体発生力の誤差は2%未満であり、これによる回避距離の差は40cm程度であった。各輪への配分を行なったときの各輪の制御入力 (u_{xi}, u_{yi}) を Fig. 8 に示す。ここで、FR, FL, RR, RL はそれぞれ右前、左前、右後、左後輪を示す。

7. ま と め

最適性の条件から質点の障害物最短回避問題を解き、最適な車体の力を出力するフィードバックコントローラを、簡単な2次元マップで記述できることを示した。示したコントローラは任意の車体加速度内での回避を指定でき、種々の走行条

Fig. 7 Verification of the feedback controller

件に対応可能である。さらに発生力を各輪に配分することにより、4輪の制駆動・ステア制御に帰着できることを示した。

本報告で示したフィードバックコントローラは、任意の車両加速度内での最短回避を与えることが可能である。最大車両加速度をある程度余裕のある値に設定しておけば、障害物の発見が遅れたり回避中の外乱などにより最短回避距離以下に接近してしまった場合には、最大車両加速度を上方修正して必要最小限の加速度での回避を実現するなどの応用が可能である。

参考文献

- 1) S. Inagaki et al.: Analysis on Vehicle Stability in Critical Cornering Using Phase-Plane Method, *AVEC'94*, **50**, 287/292 (1994)
- 2) A.T. van Zanten: Control Aspects of the BOSCH-VDC, *AVEC'96*, 573/608 (1996)
- 3) 服部, 鯉淵: 4輪制駆動, ステア統合による車両運動最適制御, 計測自動制御学会産業論文集, **4-11**, 75/80 (2005)
- 4) 向井, 川邊, 西羅, 高木, 出口: モデル予測による自動車の障害物回避へのアプローチ, 第49回自動制御連合講演会, **SA4-1-2**, 1/4 (2006)
- 5) Y. Hattori, E. Ono and S. Hosoe: Optimum Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance Problem, *IEEE/ASME Trans. of Mech.*, **11-5** (2006)

Fig. 8 Results of distribution

- 6) E. Ono, Y. Hattori, Y. Muragishi and K. Koibuchi: Vehicle Dynamics Control Based On Tire Grip Margin, *AVEC 2004*, 531/536 (2004)
- 7) 志水清孝: 最適制御の理論と計算法, 54/72, コロナ社 (1994)

《付 録》

A. コントローラの範囲

以下では、最適解が存在するために α, β が満たすべき条件を示す。Fig. 3のマップの計算は、この範囲内の α, β についてのみ行なえばよい。

今、(2)-(5)式を満たし、すべての力をy方向に作用させて回避したときの、終端時間を t_y とする。また、Fig. 1(a)のようにすべての力をx方向(減速)に用いたときに停止までに必要な時間を t_x とする。

さて、Fig. 1(b)に示したようなすり抜けによる緊急回避を最短距離で行なう時の終端時間 t_e を考えると、 t_e が(2)-(5)式を満たすためには、力をすべてy方向に用いた場合よりも長い時間を必要とする。つぎに、 $t_e \geq t_x$ とすると、回避するために必要な距離 X_e は直進制動で停止するために必要な距離 X_{es} ((1)式)より長くなり、すり抜けるよりもFig. 1(a)のように直進制動することが望ましい。すなわち、 t_e は少なくとも次式の条件を満たす必要がある。

$$t_y < t_e < t_x \quad (\text{A.1})$$

今、(3)式の初期条件に対して、直進制動を考えると、

$$t_x = \frac{m}{F_{max}} v_{x0} \quad (\text{A.2})$$

つぎに t_y について考える。Fig. A.1に示すように F_y

Fig. A.1 Lateral moving

の切りかえ時刻を t_1 , そのときの横速度を v_{y1} , 終端の時刻を t_2 とする. ここで, $v_{y0} > \sqrt{(F_{max}/m)Y_e}$ の場合, Fig. A.1(b) のように横位置は Y_e に対して必ずオーバーシュートするため, 他の回避行動を考える必要がある. ここで $v_{y0} \leq \sqrt{2(F_{max}/m)Y_e}$ の場合を考える. Fig. A.1(a) より, $t_y (= t_2)$ は以下の連立方程式を解くことによって得られる.

$$\begin{cases} v_{y0}t_1 + \frac{1}{2} \frac{F_{max}}{m} t_1^2 + v_{y1}(t_2 - t_1) - \frac{1}{2} \frac{F_{max}}{m} (t_2 - t_1)^2 = Y_e \\ v_{y0} + \frac{F_{max}}{m} t_1 = v_{y1} \\ v_{y1} - \frac{F_{max}}{m} (t_2 - t_1) = 0 \end{cases} \quad (A.3)$$

$$t_y = \frac{m}{F_{max}} \left(-v_{y0} + 2\sqrt{\frac{v_{y0}^2}{2} + \frac{F_{max}}{m} Y_e} \right) \quad \text{ただし } v_{y0} \leq \sqrt{2 \frac{F_{max}}{m} Y_e} \quad (A.4)$$

t_e が存在するためには, $t_y \leq t_x$ である必要があり, (A.2), (A.4) 式より次式が得られる.

$$\frac{m}{F_{max}} \left(-v_{y0} + 2\sqrt{\frac{v_{y0}^2}{2} + \frac{F_{max}}{m} Y_e} \right) \leq \frac{m}{F_{max}} v_{x0} \quad (A.5)$$

$m > 0, F_{max} > 0$ に注意してこれを整理すると,

$$2v_{y0}^2 + 4 \frac{F_{max}}{m} Y_e \leq (v_{x0} + v_{y0})^2 \quad (A.6)$$

$$v_{x0}^2 + 2v_{x0}v_{y0} - v_{y0}^2 \geq 4 \frac{F_{max}}{m} Y_e \quad (A.7)$$

(58), (59) 式を代入しさらに整理すると,

$$\frac{1}{\alpha^2} - 2\frac{\beta}{\alpha} - (\beta^2 + 4) \geq 0$$

$$\text{ただし } \beta \leq \sqrt{2} \quad (A.8)$$

また, $v_{x0} > 0, Y_e > 0$ より $\alpha > 0$ である. さらに, $-\beta \gg 1$ の領域では, h_2 の値は F_{max} に漸近することから, Fig. 3 に示したコントローラは Fig. A.2 のハッチング範囲で求めておけば十分である.

Fig. A.2 Map region

[著者紹介]

服部 義和 (正会員)

1990 年大阪府立大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期過程修了. 同年 (株) 豊田中央研究所入社, ドライブモデル, 車両運動制御の研究・開発に従事. システム制御情報学会, 自動車技術会会員.

小野 英一 (正会員)

1987 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年株式会社豊田中央研究所入社. 94 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 工学博士. 自動車の制御理論応用, 車両運動状態推定などの研究に従事. 計測自動制御学会, 自動車技術会, 日本機械学会の会員.

細江 繁幸 (正会員)

1967 年名古屋大学大学院修士課程修了 (金属工学専攻). 同年, 名古屋大学工学部助手. 同講師, 助教授を経て 88 年名古屋大学工学部情報工学科教授. 2006 年理化学研究所バイオミメティックコントロールセンター長, 現在に至る. 制御理論, システム理論などに関する研究に従事. 工学博士.