ニュートラルステア特性実現のための直接ヨーモーメント制御

岡 島 寛*・松 永 信 智*・川 路 茂 保*

Direct Yaw-moment Control of Automobiles for Neutral Steering

Hiroshi OKAJIMA*, Nobutomo MATSUNAGA* and Shigeyasu KAWAJI*

Electric automobiles with four in-wheel motors have been developed in recent year. By using dynamic differential force between wheels, lateral motion of the automobile can be controlled with yaw moment. This framework is known as “Direct Yaw-moment Control (DYC)”. In many previous works of DYC methods, yaw-moment is used for increasing the stability. However, maneuverability has not been discussed. In this paper, a novel DYC controller is proposed that gives the neutral steering, where neutral steering is a good evaluation index of maneuverability of automobiles. The proposed controller is derived based on the output zeroing control. The effectiveness of proposed method is shown by numerical example.

Key Words: direct yaw-moment control, neutral steer, vehicle control

1. はじめに

近年、省エネルギーや騒音、排気ガスへの対策として電気自動車やハイブリッド車に関する研究開発が広く行なわれている。電気自動車においては、個々の車輪にモータを取り付けることが内燃機関自動車と比べて容易であり、これによって4輪独立に駆動、制動力を発生させることができる¹⁾。しかし、人が操作できる入力数には限りがあるため、ハンドル角、アクセル/ブレーキを除いたアクチュエータの操作量は自動制御によって決められる必要があり、そのための制御手法が多く提案されている^{2)~9)}。駆動力を4輪独立に設定できる点を利用し、タイヤ負荷を考慮して各タイヤ力を再配分する手法^{5),7)}や、安定性の観点から横滑りを零化する手法^{3),6)}が考えられている。特に、左右輪の制駆動力差を利用してヨーモーメントを直接制御する手法は直接ヨーモーメント制御 (Direct Yaw-Moment Control, DYC)^{3),8),9)}として知られており、操舵とは独立したヨー運動の制御により走行時の車体安定性が向上できる。

このように、従来、車体の安定性などの性能に着目したDYC則は提案されているが、操舵とは独立してヨーモーメントを発生できるDYCの特徴を考えれば、操舵特性の向上を目的としてDYCを用いることも有用と考えられる。操舵に関する基本的な指標としてニュートラルステア特性¹⁰⁾がある。この特性は、一定の速度で走行中に操舵角を一定に保ったまま

加速する場合を考えると、異なった速度になっても旋回半径が変わらないというものである。したがって、速度の高低にかかわらず同じ旋回に必要な操舵角が変わらないため運転しやすい。

通常、ニュートラルステア特性などの操舵特性は車体構造に依存し、エンジン位置やタイヤの種類、自動車の構造的なレイアウトなどによって変化するものである。さらに、人や荷物を乗せることによる重心位置変化や、路面状況の変化などによっても変化する。しかし、自動車の車体構造としてニュートラルステア特性を持たない場合にもDYCによってこの特性を達成できるならば、自動車における運転者のストレスの軽減やそれに伴う安全性向上などの観点から有用と考えられる。また、将来的には、この特性をDYC則によって達成することを見越した上で車の構造的なレイアウトや設計を自由に行なえる利点ももつ。

DYCを用いたニュートラルステア特性の実現可能性については文献8)で検討されているが、具体的な制御手法の提案がなされていない。また、文献9)ではニュートラルステア特性とすべり角の零化を同時に実現する手法がモデル予測制御の枠組みで示されているものの、ヨー角の目標値をハンドルの角度とは別に設定する必要がある、人の操舵によってハンドル角が変わった場合には目標値を別途定めなければならない。そのため、ハンドル角度入力とアクセル/ブレーキ入力のみ依存してDYCの入力が決まることが望ましい。

そこで本論文では、ニュートラルステア特性を実現する新たなDYC手法を提案する。まず、第2章で自動車の運動モデルを示し、ニュートラルステア特性について説明後、問題を定式化する。第3章で出力零化制御に基づいてDYC則の導出を行なう。最後に、第4章でニュートラルステアでない

* 熊本大学大学院自然科学研究科 熊本市黒髪 2-39-1

* Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto

(Received September 25, 2008)

(Revised January 6, 2009)

自動車に対する数値例により, DYC 則を用いない場合と第 3 章の提案手法との比較を行ない, 有効性を検証する.

なお, 本論文では, $\cdot$ (ドット) を時間微分 d/dt の表記に用いる. すなわち, 信号 $h(t)$ の時間微分を $\dot{h}(t)$ と表記する.

2. 問題設定

2.1 自動車の運動モデル

Fig. 1 に示す自動車の運動モデルを考える. 車軸に関して左右の特性が対称であるものすると, 車体すべり角とヨー角速度を状態とする自動車の運動方程式は

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(v)x(t) + B(v)u(t) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} \beta(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix}, u(t) = \begin{bmatrix} \delta(t) \\ f(t) \end{bmatrix} \\ A(v) &= \begin{bmatrix} -2\frac{K_f + K_r}{Mv} & -1 - 2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^2} \\ -2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{I} & -2\frac{l_f^2 K_f + l_r^2 K_r}{Iv} \end{bmatrix} \\ B(v) &= \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{Mv} & 0 \\ \frac{2l_f K_f}{I} & \frac{l_x}{I} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

となる^{3), 11)}. ただし, $\dot{\psi}$ はヨー角速度, β は車体すべり角であり, v は自動車の速度, M は自動車質量, I は自動車の慣性モーメント, K_f, K_r は前後輪コーナリング係数, l_f, l_r は重心から前後輪までの距離, l_x は車軸中心からタイヤまでの距離である. タイヤの横方向には, タイヤと進行方向との偏角であるタイヤすべり角に比例した力が横力として発生し, タイヤすべり角は車体すべり角 β を用いて表現される¹¹⁾. さらにここでは, 四輪独立駆動の自動車を対象としているため, 操舵角 δ だけでなく, 四輪の制駆動力を入力としてみなす. ただし, モデルの簡略化のために前後のタイヤでそれぞれ駆動力が等しいものとし, 左右の駆動力の差 $f (= 2(f_{\text{right}} - f_{\text{left}}))$ および和 $w (= 2(f_{\text{right}} + f_{\text{left}}))$ を入力と考える. このとき, $l_x f$ は車体重心に掛かるモーメントとなるので, f によって直接的にヨーモーメントを制御できる³⁾. なお, 本論文は限界性能での走行ではなく, 通常走行を想定するため, 急激な速度変動が無いもの^(注 1)として K_f, K_r は一定と仮定する.

Fig. 1 Vehicle model

(注 1) もし, 急激な速度変動が起こると, 荷重移動 (ローリング運動) に伴う左右コーナリングパワーの変動が生じる.

また, ここでは $l_f K_f - l_r K_r < 0$ と仮定する. この仮定は前輪のコーナリング係数が小さいことに対応する.

一方, 速度 v の運動は速度に比例した摩擦および駆動力の和に支配されるものとして次式で与える.

$$\dot{v} = -a_1 v + a_2 w, a_1 > 0 \quad (2)$$

ただし, a_1, a_2 はそれぞれ摩擦による減衰係数, 入力 w に関する係数である. (1) 式, (2) 式を合わせて自動車の挙動は非線形運動方程式として表わされる. もし, $w = a_1/a_2 v_0$ と与えれば, v は v_0 に収束し $A(v), B(v)$ は定数行列となるため, (1) 式は線形時不変システムとして扱うことができる. 一般には, 自動車の速度を一定とした線形システムとして扱われる場合が多いが, 本論文では速度は一定ではなく非線形状態方程式として扱うことに注意する.

自動車が描く軌跡は, 自動車の各時刻の曲率によって特徴付けられる. ここで, 曲率 κ は各点での曲がり方を局所的な円とみなしたときの曲がり度合いを表わしたものであり (**Fig. 2**), 直線のときに 0 となる量である. 自動車の旋回半径 ρ は $\rho = 1/|\kappa|$ で表わされる. (1) 式の自動車に対して κ は次式で表わされる.

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{\dot{\beta} + \dot{\psi}}{v} \\ &= -2\frac{K_f + K_r}{Mv^2}\beta - 2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^3}\dot{\psi} + \frac{2K_f}{Mv^2}\delta \end{aligned}$$

以上より, 本論文で用いる自動車の運動方程式 (1) 式, (2) 式は, 状態を $\beta, \dot{\psi}, v$ とし, 制御入力を $\delta(t), f(t), w(t)$, 制御出力を $\kappa(t)$ として与えられる. さらに, 制御対象の各時刻での位置は κ, v を用いて次式で表わすことができる¹²⁾.

$$\theta(t) = \int_0^t v(\tau)\kappa(\tau)d\tau + \theta(0) \quad (3)$$

$$x(t) = \int_0^t v(\tau)\cos\theta(\tau)d\tau + x(0) \quad (4)$$

$$y(t) = \int_0^t v(\tau)\sin\theta(\tau)d\tau + y(0) \quad (5)$$

ただし, $\theta(t)$ は車両速度ベクトルと固定座標系との相対角であり, $\theta(t) = \beta(t) + \psi(t)$ で表わされる. $\theta(0), x(0), y(0)$ はそれぞれ時刻 $t = 0$ での慣性座標との相対角, 位置座標である. さらに, 自動車の初期時刻 $t = 0$ からの移動距離 s は次式で表わされる.

Fig. 2 Curvature of vehicle

$$s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (6)$$

一方, (3)~(5) 式をつぎのように変形することで移動距離 s の関数として位置を表わすこともできる.

$$\theta(s) = \int_0^s \kappa(\mu) d\mu + \theta(0) \quad (7)$$

$$x(s) = \int_0^s \cos \theta(\mu) d\mu + x(0) \quad (8)$$

$$y(s) = \int_0^s \sin \theta(\mu) d\mu + y(0) \quad (9)$$

このとき, 軌跡 $(x(s), y(s))$ は初期位置と $\kappa(s)$ のみによって決まる.

2.2 ニュートラルステア特性

本節ではニュートラルステア特性について述べる¹⁰⁾.

Fig. 3 は操舵特性を表わしたものである. 操舵角を一定とした上で加速させた場合, 最初に描いていた円軌跡よりも内側を通る軌跡となる場合, すなわち曲率が大きくなる場合をオーバーステア (Over Steering), 曲率が小さくなる場合をアンダーステア (Under Steering) と呼ぶ. さらに, 描く軌跡が加速しない場合と同一となる場合, すなわち曲率が変わらない場合にはニュートラルステア (Neutral Steering) と呼ぶ.

ある与えられた経路に沿って走行する場合, オーバーステアやアンダーステアでは速度が速い場合と遅い場合に必要なハンドル角が他の速度の場合とは異なる. そのため, 過度なオーバーステア/アンダーステア特性は運転者にとって操舵しにくい. 一方, ニュートラルステアでは必要な操舵角は一致し, 運転者にとっては運転中に加減速の方策と操舵の方策を独立に考えることができる. そのため, 操舵しやすい運動特性として知られている.

2.3 制御問題の定式化

本節では $f(t)$ の制御則によってニュートラルステア特性を実現する問題を定式化する. ここでは, 操舵角 $\delta(t)$ と左右の駆動力の和 $w(t)$ は運転者によって与えられるものとする. したがって, $\delta(t)$ および $w(t)$ は時変の外部入力となる. ここでは, 自動車が切り替えしを行なわないよう, $v > 0$ を満

たす w が与えられるとする. 以降, $\delta(t)$ は微分可能で, 各時刻 t での $\delta(t)$, $w(t)$ および $\dot{\delta}(t)$ は計測できるものとする.

まず, ニュートラルステア実現のために規範モデルを考える. 規範モデルに対する変数などには適宜, 添え字 c を用いることとする. 理想速度を v_c とし, v_c の値は与えられているものとする^(注2). 速度 v_c で自動車が運動する場合の $\delta(t)$ に対する応答が規範モデルの出力となる. なお, 規範モデルの速度は一定であるため $w(t) = a_1 v_c / a_2$ とし, ヨーモーメントは制御されないものとして $f(t) = 0$ とする. このとき, (1) 式の自動車運動モデルの v を v_c とすることで規範モデルの状態方程式が得られる.

$$\dot{x}_c = A(v_c)x_c + \tilde{B}(v_c)u_c \quad (10)$$

ただし, 規範モデルの状態 x_c は $x_c = [\beta_c, \dot{\psi}_c]$ であり, 入力 u_c は $\delta(t)$, $f(t)$ の測定値を用いて $u_c = [\delta, f]^T$ とする. なお, $f(t) = 0$ より $\tilde{B}(v_c)$ は次式とする.

$$\tilde{B}(v_c) = \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{Mv_c} & 0 \\ \frac{2l_f K_f}{I} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

このとき, 規範モデルにおける旋回曲率は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \kappa_c(t) &= \frac{\dot{\beta}_c + \dot{\psi}_c}{v_c} \\ &= -2 \frac{K_f + K_r}{Mv_c^2} \beta_c - 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv_c^2} \dot{\psi}_c + \frac{2K_f}{Mv_c^2} \delta \end{aligned}$$

$\delta(t)$ が一定のときに, 車速に依らず $\kappa(t)$ を一定にできればニュートラルステア特性を満足する. 規範モデルの曲率は速度 v_c の場合でのものであるため, 任意の速度に対して $\kappa(t)$ を規範モデルの曲率 $\kappa_c(t)$ に一致させることでニュートラルステア特性を実現できる. ここで, 人間は時刻を計りながらハンドル角を決めるのではなく, 道路の形状など環境に合わせてハンドル角を決めている. このことから, δ は移動長さ s の関数として考えることが望ましい. これを踏まえ, 本論文では以下の制御問題を考えることとする.

[問題] 任意に与えられた $\delta(s)$ に対し, $\kappa(s) = \kappa_c(s)$ となる左右の制駆動力差 f の制御則を求めよ. ■

[問題] の制御則が求められれば (7)~(9) 式より $x(s)$ および $y(s)$ が任意の速度列について一致する. もし, 上記の [問題] の代わりに任意の $\delta(t)$ に対して $\kappa(t) = \kappa_c(t)$ とする制御則を考えた場合, 車速が異なれば (3)~(5) 式が異なった値を取る, すなわち, 描く軌跡が異なったものになる点に注意する.

3. 制御則の導出

3.1 拡大制御系

[問題] の解を導くために, (1) 式, (2) 式, (10) 式を合わせた拡大制御系を考える.

(注2) 本論文では理想速度 v_c は与えられるものとする. その決定法は今後の課題であるが, たとえば, 車両の制限速度を用いることなどが考えられる.

Fig. 3 Neutral steering

$$\dot{x}_g = \begin{bmatrix} A(v) & 0 & 0 \\ 0 & A(v_c) & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 \end{bmatrix} x_g + \begin{bmatrix} B(v) & 0 \\ \tilde{B}(v_c) & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} u_g \quad (12)$$

ただし, x_g は自動車の状態 x , $v = v_c$ とした規範モデルの状態 x_c および v を要素とする, すなわち, $x_g = [x^T, x_c^T, v]^T$ である. また, $u_g = [\delta, f, w]^T$ である. ここで, [問題] より, 自動車の曲率 κ および規範モデルの曲率の差

$$e = \kappa - \kappa_c \quad (13)$$

を考えると, [問題] は (12) 式で表わされるシステムにおいて $e = 0$ の実現を制御目的とみなすことができる.

3.2 出力零化に基づく f の制御則

制御目的が任意の $\delta(s)$ に対して

$$\lim_{s \rightarrow \infty} e(s) = 0 \quad (14)$$

を満足させることであるので, ここでは $e(s)$ を出力とした出力零化^{13), 14)}により (14) 式を実現する.

そこで, ある与えられた $\alpha (> 0)$ に対して f によって次式

$$\frac{d}{ds} e(s) + \alpha e(s) = 0 \quad (15)$$

を満足させることを考える. ただし, $de/ds = de/dt \cdot dt/ds = 1/v \cdot de/dt$ であり, $v > 0, \forall t$ ならば時間軸でも考えることができる¹⁵⁾. そのため, (15) 式は s 軸に関する式であるが, 以下では時間軸に関して式を考える. 操舵角が $\delta(s)$ と与えられるとき, (15) 式を満足する f は次式のように求められる (付録参照).

$$\begin{aligned} f &= \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{N}} \quad (16) \\ \mathcal{D} &= 2 \frac{K_f + K_r}{Mv^3} \dot{\beta} + 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^4} \\ &\quad \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} A(v)x + \frac{2l_f K_f}{I} \delta \right) \\ &\quad - \frac{2K_f}{Mv^3} \dot{\delta} + \left(-4 \frac{K_f + K_r}{Mv^4} \beta \right. \\ &\quad \left. - 6 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^5} \dot{\psi} + 4 \frac{K_f}{Mv^4} \delta \right) \dot{v} \\ &\quad + \frac{\dot{\kappa}_c}{v} - \alpha e \\ \mathcal{N} &= -2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^4} \frac{l_x}{I} \\ \dot{\kappa}_c(t) &= -2 \frac{K_f + K_r}{Mv_c^2} \dot{\beta}_c - 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv_c^3} \ddot{\psi}_c + \frac{2K_f}{Mv_c^2} \dot{\delta} \end{aligned}$$

このとき, $f(t)$ は状態および $\delta, \dot{\delta}, w$ に基づいて決まる. この制御系の概略は Fig. 4 のように表わされ, 規範モデルの状態と自動車の状態に基づいて制御入力 $f(t)$ が決まる構造となっている. 制御対象の曲率と理想モデルの曲率との差をフィードバックする制御という観点からは, 内部モデル制御に似た手法と考えることも可能である.

(16) 式の制御則で得られる $f(t)$ を (1) 式の入力に用いることで次式を満足する.

Fig. 4 Proposed control system

$$e(s) = e(0) \exp[-\alpha s] \quad (17)$$

ここで, $v > 0$ であるので s は単調増加し, 時間の増加とともに $|e(t)|$ の値は減少する. さらに, 初期値において $e(0) = 0$ の場合には $\kappa(s) = \kappa_c(s), \forall s > 0$ が成り立ち, 車速に依らず同じ操舵の距離系列に対して自動車が描く軌跡は同じものになる. すなわち, [問題] に対する解となる. 特に, 自動車の速度を $v = v_c$ と保った場合には, 明らかに $f(t) = 0$ となる.

また, 拡大制御系の安定性については以下のように調べることができる. v, x_c はそれぞれフィードフォワード的に与える項であり, 各状態はそれぞれ発散せず, 外生信号として考えることができる. このため, (16) 式の制御則に起因する $\beta, \dot{\psi}$ の安定性について考察する. (1) 式の状態 (β, ψ) を座標変換により (β, σ) とする. ただし, $\sigma = -2 \frac{K_f + K_r}{Mv^2} \beta - 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^3} \dot{\psi}$ であり, $e(t)$ のうち $\dot{\psi}, \beta$ が係る部分を集めたものに相当する. このとき, $e \rightarrow 0$ より $\sigma = \kappa_c - \frac{2K_f}{Mv^2} \delta$ となり, 外生信号で与えられるため有界となる. 一方, β のダイナミクスは $\sigma = \kappa_c - \frac{2K_f}{Mv^2} \delta$ を (1) 式に代入することで次式

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= s_1 \beta + s_2 \\ s_1 &= \frac{v(K_f + K_r)}{l_f K_f - l_r K_r} \\ s_2 &= -\frac{v K_f}{l_f K_f - l_r K_r} \delta + \left(v + \frac{Mv^3}{2(l_f K_f - l_r K_r)} \right) \kappa_c \end{aligned}$$

で表わされる. ここで, 任意の速度 $v > 0$ に対して $s_1 < 0$, かつ s_2 が有界となることから β は安定となる. よって拡大制御系の安定性が示された.

4. 数 値 例

前章で導出した DYC 則の有効性を検証するため, 数値シミュレーションを示す. シミュレーションには (1) 式の状態方程式の係数として Table 1 に示す軽自動車に関するパラメータ¹⁶⁾を用いる. 規範モデルの速度 $v_c = 12$ とする ($a_1 = -0.5, a_2 = 5$). また, 自動車の初期状態を $x = [0, 0, 12]$ とする.

1) 操舵角を一定とした場合

ここでは, 数値例に用いる自動車の動特性を確かめると共に, 操舵角を一定とした自動車に対して提案する DYC 則を

Table 1 Parameters of automobile model

K_f	45372.9	N/rad
K_r	74405.5	N/rad
l_f	1.122	m
l_r	1.428	m
I	2205	kg · m ²
M	1507	kg
l_x	0.6	m

Fig. 5 Velocity of vehicle **Fig. 6** Vehicle trajectories for constant steer angle

適用し、結果を検証する。ただし、 $w(t)$ は次式で与えられるものとする。

$$w(t) = 1.2 : t < 2 \quad (18)$$

$$w(t) = 0.1t + 1 : 2 \leq t < 10 \quad (19)$$

$$w(t) = 2 : 10 \leq t \quad (20)$$

$w(t)$ は時刻 $t = 2$ 以降で加速する入力となっている (Fig. 5). 操舵角を $\delta(t) = 0.05$ と一定に定めるとき、Table 1 のパラメータを用いて $f = 0$ とした場合の自動車の軌跡を Fig. 6 において破線で、(16) 式を用いた自動車の軌跡を実線で示す。ただし、初期位置は (65, 0) である。同図より Table 1 のパラメータの自動車はアンダーステア特性を示している。一方、実線の軌跡は円になっており、(16) 式の制御によりニュートラルステア特性が実現されていることがわかる。

Fig. 7 Velocities of vehicle with each w **Fig. 8** f for each w **Fig. 9** Vehicle trajectories for each w

2) 操舵角が移動に伴って変化する場合

操舵角は距離の関数として以下のように与えられている場合を考える。

$$\delta(s) = 0.05 \sin(0.01 s) \quad (21)$$

このとき、初期速度を 12[m/sec]、初期位置を (0, 0) としてつぎの 3 つの場合について数値例を示す。ただし、それぞれ 60 秒間の応答を示す。

case 1 : 低速の場合 ($w(t) = 0.8 + 0.2 \sin(0.5t)$)

case 2: 高速の場合 ($w(t) = 2$)

case 3: $v = v_c$ の場合 ($w(t) = 1.2$)

case 1, 2 はそれぞれ規範モデルの速度よりも遅い場合、速い場合である。また、case 3 は規範モデルと速度が同じ場合である。それぞれの $w(t)$ に対する自動車の速度を Fig. 7 に示す。太い実線が case 1, 細い実線が case 2, 破線が case 3 をそれぞれ示す。case 1 は、遅いだけでなく振動的な速度である。また、case 2 の定常速度は 20[m/sec] であり、大きな速度差のある例となっている。

Fig. 8 はそれぞれの速度に対する左右の駆動力差 $f(t)$ を表わす。case 3 では規範モデルと同じ速度で走行しているため $f(t) = 0$ となっていることが確認できる。また、細い実線 (case 2) からアンダーステア特性の Table 1 の自動車に対してヨーモーメントを補うような入力 $f(t)$ となっていることがわかる。また、太い実線 (case 1) では振動的な操舵角を与えていることに加えて加減速も振動的であることから正弦波を合成したような $f(t)$ が得られており、傾向として操舵に起因するモーメントと逆方向にヨーモーメントを加えるような入力となっている。

Fig. 9 は Fig. 8 の $f(t)$ を加えた場合のそれぞれの 60 秒間での軌跡を示す。速度が異なるため描いた軌跡の長さは異なる。しかし、case 1, 2, 3 の軌跡はそれぞれ重なっており Fig. 8 で得られた $f(t)$ が有効に作用していることがわかる。

5. ま と め

本論文では、自動車にニュートラルステア特性を実現するための DYC 手法を提案した。曲率を出力とした規範モデルを考え、出力誤差を零化する制御によりニュートラルステア特性を実現している。提案手法では円旋回の場合だけでなく、任意に操舵角 $\delta(s)$ が与えられた場合に対しても速度によらず同じ軌跡を描く制御則となっており、その有効性は数値例により確認した。本論文ではニュートラルステア特性のみを扱ったが、DYC を用いて操舵特性を変更する枠組みとしてはアンダーステアなどの別の特性への応用が期待できる。

なお、提案手法において、あらかじめ別の目的のために $f(t)$ を制御している場合でも、その制御を含む規範モデルを設定することで本手法も併用することが可能である。また、自動車の正しいモデルが得られたものとして導出した制御手法であるため、モデル化誤差に対するロバスト性の検証は今後の課題となる。

参 考 文 献

- 堀 洋一：電気自動車の制御—東大三月号のめざすもの—、計測と制御, **45**-3, 243/253 (2006)
- 服部義和：制駆動力と操舵をどう制御するのか?, 計測と制御, **45**-3, 191/196 (2006)
- 永井, 王：左右駆動力の配分制御による電気自動車の運動制御, 電気学会論文誌 (D 編), **116**-3, 279/284 (1996)
- 服部, 小野, 細江：4 輪制駆動・ステア統合制御による最短回避制御, 計測自動制御学会論文集, **43**-11, 1047/1054 (2007)
- 坂井, 佐渡, 堀：4 輪独立駆動電気自動車における動的な制駆

- 動力配分法, 電気学会論文誌 (D 編), **120**-6, 761/768 (2000)
- 平岡, 西原, 熊本：タイヤ負荷の Minimax 最適化による制駆動力配分 (四輪アクティブ操舵による横すべり零化制御の場合), 日本機械学会論文集 (C 編), **71**-704, 1238/1246 (2005)
- 西原, 平岡, 熊本：独立操舵車両における横力と制駆動力の最適配分 (タイヤ負荷の Minimax 最適化), 日本機械学会論文集 (C 編), **72**-714, 537/544 (2006)
- 福島直人：車両の超旋回限界域における DYC 制御手法に関する研究 (第 2 報, 後置エンジン後輪駆動車への適用), 日本機械学会論文集 (C 編), **71**-705, 1583/1590 (2005)
- 福島直人：非線形最適制御問題の近似解法と大横滑り角追従制御への適用, 日本機械学会論文集 (C 編), **72**-713, 84/91 (2006)
- 安部, 大沢：自動車の運動性能向上技術, 自動車技術会, 朝倉書店 (1998)
- 安部正人：自動車の運動と制御, 山海堂 (1992)
- 小林昭七：曲線と曲面の微分幾何, 裳華堂 (1977)
- A. Isidori: Nonlinear Control Systems, Springer (1995)
- 美多 勉：非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論—, 昭晃堂 (2000)
- 三平, 古田：時間軸を考慮に入れた非線形システムの解析—軌跡に着目した外乱局所化問題への応用—, 計測自動制御学会論文集, **22**-8, 604/609 (1986)
- 川邊, 越智, 金井：ビークル制御, 横書店 (2004)

《付 録》

A. f の制御則の導出

ここでは、(16) 式を導出する。まず、 $de(s)/ds$ は次式のよう書き下すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{de(s)}{ds} &= \frac{1}{v} \frac{de(s(t))}{dt} = \frac{1}{v} (\dot{\kappa} - \dot{\kappa}_c) \\ &= -2 \frac{K_f + K_r}{Mv^3} \dot{\beta} - 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^4} \\ &\quad \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} A(v)x + \frac{2l_f K_f}{I} \delta + \frac{l_x}{I} f \right) \\ &\quad + \frac{2K_f}{Mv^3} \dot{\delta} - \left(-4 \frac{K_f + K_r}{Mv^4} \beta \right. \\ &\quad \left. - 6 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^5} \dot{\psi} + 4 \frac{K_f}{Mv^4} \delta \right) \dot{v} - \frac{\dot{\kappa}_c}{v} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

(A.1) 式を (15) 式に代入し、式の両辺を

$$\mathcal{N} = -2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^4} \frac{l_x}{I}$$

で割って整理することで (16) 式が得られる。

[著者紹介]

岡 島 寛 (正会員)

1980年5月23日生。2004年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了。2007年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。熊本大学自然科学研究科助教となり現在に至る。車両の運動制御, 制御性能限界の解析に関する研究に従事。博士(工学)。システム制御情報学会の会員。

松 永 信 智 (正会員)

1987年熊本大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年オムロン(株)中央研究所入社。93年熊本大学大学院自然科学研究科博士課程修了。博士(学術)。オムロン(株)にてロボット制御, パワーエレクトロニクス, プロセス制御などの研究に従事。2003年熊本大学工学部数理情報システム工学科助教授。改組により, 2006年熊本大学自然科学研究科助教授。2007年同研究科准教授。メカトロニクス制御, プロセス制御系の設計などの研究に従事。電気学会, 日本機械学会, ASME, IEEEなどの会員。

川 路 茂 保 (正会員・フェロー)

1969年熊本大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年同工学部助手, 同助教授を経て, 88年同教授, 99年大学院自然科学研究科教授, 現在に至る。この間, 94~95年カリフォルニア大学バークレイ校, ハーバード大学などの客員研究員。ロボasts制御理論とメカニカルシステムへの応用, インテリジェント制御系の構築, ロボティクスなどの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会常任理事, システムインテグレーション部門長などを歴任。計測自動制御学会技術賞受賞。電気学会上級会員, 日本機械学会フェロー, 日本人工学会, IEEEなどの会員。