自動車運転時におけるビジョンに基づく車線逸脱の検出と警告*

加藤 晋^{*1}, 津川 定之^{*1}An Algorithm for Lane Departure Detection and Warning
for Automobile DrivingShin KATO^{*2} and Sadayuki TSUGAWA^{*2} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Intelligent Systems Institute,
AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564 Japan

This paper describes an algorithm for lane departure detection, warning and shift to automated driving with a vision system that detects reference lines including lane markings along which the vehicle drives. Lane departure is detected by comparison of steering by a human driver and that calculated with a vision-based lateral control system. The algorithm is featured by the use of whole data in the field of view of the vision system as well as by preview characteristics, which enables the warning in advance. Simulation studies and outdoor experiments with an automobile have been conducted to show the feasibility of the algorithm.

Key Words: ITS, AVCSS, Lane Departure, Autonomous Vehicle, Vision System, Lateral Control

1. まえがき

重大な交通事故のうち、ドライバの不注意や居眠りが原因で車線を逸脱することによる事故は、死亡事故の2割以上を占めている⁽¹⁾。そのため、居眠り運転の検出や車線逸脱の検出に関する研究が様々に行われてきている^{(2)~(5)}。例えば、ドライバの目をカメラでとらえ、目の開閉パターンの解析から居眠りを検出する方法⁽²⁾や、ステアリングの操舵量を常時監視し居眠り運転時に特有な車線復帰の操舵との比較によって居眠りを検出する方法⁽³⁾や、ビジョンによってレーンマーカを検出し車両がレーンマーカを交差する時間を予測することで車線逸脱を判断する方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾などがある。

一方それらの研究とは別に、ビジョンを用いた自律車両の自動誘導の研究も数多く行われてきている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。著者らはこれまで、自律車両の経路を路面上の参照線で与え、これをビジョンで検出し、これに沿って走行するための方法について研究を行ってきた^{(8)~(11)}。これは、ビジョンの視野内で検出した参照線を三次曲線で近似することにより操舵量を決定し、ラテラル制御を行うものである。この方法は車両前方の二次元的な視野を有効に利用でき、スムーズでロバストな操舵が可能という利点を持っている。これまでに参照線の追従、障害物の回避、車線変更を実現するプレビ

ユーラテラル制御アルゴリズムの研究について報告を行ってきている^{(12)~(16)}。

本論文では、路面上のレーンマーカや路肩をビジョンを用いて検出し、これに沿って走行するためのプレビューラテラル制御アルゴリズムを、車線逸脱の検出に応用することを提案する。本アルゴリズムは、車載のビジョンで検出したレーンマーカや路肩に基づいて求めた操舵角と、現在ドライバが運転している操舵角とを比較することによって、車線逸脱を検出するものである。ビジョンに基づく操舵角は、視野内のレーンマーカ全体から求めるために、ロバストに車線逸脱を検出することができる可能性がある。この車線逸脱の検出アルゴリズムの有効性について、シミュレーションによる検証と乗用車を用いた走行実験の結果を報告する。

2. ラテラル制御アルゴリズム

2.1 アルゴリズムの導出 本論文で用いるラテラル制御アルゴリズムは、地点追従法というアルゴリズムを基本としている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。地点追従法は、車両の予定経路を点列と各点における方位で与え、順次与えられた方位でその点を通過するように車両を操舵するアルゴリズムである。現在の車両位置と方位、および、車両が現在目標としている目標点とそこでの目標方位を図1に示して説明する。まず、移動座標系として車両の代表点が原点に、車両の方位が0、すなわちx軸と一致するように定義する。このとき目標位置とそこで

* 原稿受付 2000年1月7日。

^{*1} 正員、産業技術総合研究所知能システム研究部門(〒305-8564 つくば市並木1-2-1 産総研つくば東)。

E-mail: shin.kato@aist.go.jp

の方位は、 x - y 系で (x_1, y_1) , θ_1 と表されるものとする。このとき、移動座標系内で、原点と目標点を通り、それぞれの点で車両方位を接線方向とする曲線を予定経路とする。このような曲線は無数に存在するが、予定経路であるという性質と一意に定まるという特性から予定経路を三次曲線とする。三次曲線を

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad \dots\dots\dots (1)$$

とすると、

$$A = \frac{x_1 \tan \theta_1 - 2y_1}{x_1^3}, \quad B = \frac{3y_1 - x_1 \tan \theta_1}{x_1^2}, \quad C = 0, \quad D = 0$$

である。一方、幾何学的関係から自動車型の車両の運動方程式はキネマティックモデルを用いると

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{l} \tan \alpha \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される。ここで、 (x, y) は車両の代表点座標、 θ は車両の方位、 v は車両の速度、 α は操舵量(実舵角)、 l はホイールベースである。

このとき三次曲線の式(1)と車両の運動方程式(2)から、車両が目標点を与えられた方位で通過するため、現在とるべき操舵量 α は、車両の現在の目標点の位置 (x_1, y_1) とそこにおける車両の目標方位 θ_1 の関係として表され

$$\alpha = \arctan 2 / B \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。導出のさらなる詳細については、参考文献(8)、(9)にある。

この地点追従法は、参照線をビジョンを用いて検出する自律車両にも応用ができる^{(10)~(11)}。自律車両の視野と参照線の位置を図1に重ねて表示する。自律車両が参照線上をほぼそれに沿って走行する場合を考える。自律車両が検出した前方の視野内の参照線を x - y 移動座標系において、三次曲線の式(1)で近似するとき、この参照線に沿って自律車両が走行するために、この

Fig.1 Derivation of the lane following algorithm

時刻において与えられるべき操舵量 α は、式(1)の三次曲線の係数 B を用いて、式(3)で与えられる。ただし、このときの係数 B は目標点から算出されるものではなく、最小二乗法などによる参照線の三次曲線近似から得られるものである。

自律車両は制御周期毎に x - y 移動座標系を生成し、参照線を近似する三次曲線を生成し、その係数によって与えられる操舵量を用いて参照線に沿って移動する。このとき制御周期が一定である必要はない。また、自律車両の走行軌跡は参照線と必ずしも一致しない。

式(2)は車両のモデルとしては誤差を含むものとなっている。しかし、参照線を検出することによって操舵を行うためにフィードバック制御系が構成されており、モデルに含まれる誤差の影響は小さくなっている。また、このアルゴリズムでは、大きな曲率に沿った操舵は不可能である。

このプレビューラテラル制御アルゴリズムでは、操舵量がサンプル点列を最小二乗近似する三次曲線の係数で与えられることを考えると、必ずしも参照線上にサンプル点を置く必要はない。参照線上をサンプル点の初期位置とし、これらのサンプル点を視線と垂直に平行移動することによって、検出したレーンマークや路肩に沿って走行する場合、検出した障害物を回避する場合、車線変更させる場合など、図2に示すように様々な運転操作にこの制御アルゴリズムを拡張可能である^{(12)~(16)}。

2.2 参照線検出 このプレビューラテラル制御アルゴリズムでは、各制御周期ごとに参照線の位置を図1に示した x - y 系座標系内で同定する必要がある。しかし、対象となる参照線を全線検出する必要はなく、参照線を三次曲線で近似するために参照線上に点列を検出するだけで充分である。この点列をここではサンプル点列と呼び、サンプル点を検出するための走査線を探索線と呼ぶことにする。視野内の参照線を示す m 個のサンプル点の位置を図1の x - y 系座標系内で同定

Fig.2 Movement of the sampled points for generation of a path

する。その結果、求めたサンプル点の位置から最小二乗近似で参照線を近似する三次曲線を求め、操舵量を決定する。サンプル点は必ずしも等間隔に置く必要はない。参照線の検出方法は、様々な手法が考えられるが、サンプル点列を視野範囲内で同定可能であれば、参照線や検出方法の制約はない。

3. 車線逸脱の検出への応用

3.1 車線逸脱の検出 上記に述べてきたレーンマーカや路肩に沿った自動運転を実現するためのプレビューラテラル制御アルゴリズムを、車線逸脱の検出に応用する⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。自動運転時には、ビジョンで検出されたレーンマーカや路肩を基に参照線の三次曲線近似を行い、その曲線の係数から操舵量を求め、ステアリングに取り付けたアクチュエータによって自動操舵することで車線追従を実現した。そこで、図3に示すようにビジョンに基づきこの算出した操舵角とドライバの操作による実際の操舵角を比較することによって、車線逸脱を検出することを提案する。ビジョンによる車線検出を基に算出された操舵角を $\alpha_v(t)$ とし、ドライバの操作による操舵角を $\alpha_h(t)$ とすると、車線逸脱を以下の式に示す条件によって判別することができる。ただし、 t は制御周期で離散化した時刻を示す。

$$|\alpha_v(t) - \alpha_h(t)| \geq K \quad \dots\dots\dots (4)$$

K は、車線逸脱を判定するしきい値である。ここで簡略化のために、上式の $|\alpha_v(t) - \alpha_h(t)|$ を車線逸脱の判定値 $\delta(t)$ とする。さらに、2つの操舵角の時系列的な比較 $\Delta\delta(t) = \delta(t-1) - \delta(t)$ によって、車線に対する車両の状態を判別できる。車線に対し車両が離脱状態の場合は、

$$\Delta\delta(t) < 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

車線に復帰しようとしている状態の場合は、

$$\Delta\delta(t) > 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Fig.3 Configuration of the lane departure detection and warning

で示される。また、これらの数値の大きさから車線逸脱の変化の割合を判別することができる。上記の式(5)では車線に対し車両が離脱する状況をとらえられるため、車線逸脱の傾向を以下のような条件によって判別できる。

$$\Delta\delta(t) \leq H \quad \dots\dots\dots (7)$$

H は、車線逸脱の傾向を判定するしきい値で、負の数値である。操舵角の計測周期によってこの判定値の大きさは異なってくる。計測周期が短くなると式の値はゼロに近くなるため、ドライバのステアリング操作の時系列変化が計測で可能な周期が必要である。車両の走行速度が速い場合には、少しの操舵角変化で車両方向が急激に変化するため、計測周期が短いほうがよいことになる。最適な計測周期についての検討は今後の課題である。

3.2 特長 提案する車線逸脱の検出アルゴリズムの特長として、以下のようなことがあげられる。

- 1) 参照線を受動的に与えるために、インフラストラクチャは既存のものでよい。
- 2) 参照線探索アルゴリズムに依存するが、参照線は不連続でもよい。
- 3) ビジョンによるプレビュー性があり、車両前方の2次元的な視野全体を有効に利用できるため、ロバストに車線逸脱を検出することが可能である。
- 4) 直進路だけでなく、緩いカーブなどにおいても車線逸脱の検出が可能である。
- 5) 車線に対する車両の逸脱状態をドライバのステアリング操作に対応して的確に提示することが可能であり、車線復帰への情報をステアリング操作量を含めて指示可能である。
- 6) 逸脱判定のしきい値の大きさによって警告のレベルを変化させ、ドライバの個人差にあわせることが可能である。
- 7) ビジョンに基づく操舵角 $\alpha_v(t)$ を求めるために対象とするレーンマーカの位置とサンプル点のシフト量は容易に変更可能であり、運転状況や個々のドライバにあわせて調整することができる。

さらに、居眠り運転時の特有なドライバの操舵の検出に関しても、操舵パターンからだけでなく、ビジョンを用いた車線との車両位置の関係を基にして求めた操舵角の変化情報を組み合わせることで、より確実な居眠り運転検出が可能となる。上記に述べたようにビジョンを用いた操舵角の算出は、緩やかなカーブでもできるため、高速道路などにおいて居眠りや不注意に

による車線逸脱が重大事故となるような環境における走行車両に利用できる。さらに、自動運転による車線追従のためのラテラル制御を応用していることから、車線の逸脱の検出・警告だけでなく、自動運転への移行による車線逸脱回避もアクチュエータの整備により可能となる(図3)。

4. シミュレーション

4.1 車両モデル 提案した車線逸脱の検出アルゴリズムの有効性と特性を検証するためにシミュレーションを行った。ビジョンに基づく操舵角を算出するプレビューラテラル制御アルゴリズムは、コーナリングでの動特性を考慮しない幾何学的な車両モデルの式(2)から得られている。しかし、車線逸脱の検出のシミュレーションを行うにあたり、より現実に近い特性を得るためには新しい車両モデルを用いる必要がある。そのため、図4に示すようにコーナリングでの動特性を考慮したモデルとして、以下のような式(8)の車両モデルを用いる。

- v : 速度ベクトル (v_x, v_y),
- δ_f, δ_r : 前後輪での横滑り角,
- θ : 絶対座標上での車両ヨー角,
- α : 前輪操舵量,
- m : 車両質量,
- I_θ : 重心周りでの慣性モーメント,
- l_f, l_r : 重心からの前後車軸までの距離,
- l : ホイールベース, $l = l_f + l_r$,
- c_f, c_r : 前後輪のコーナリングステイフネス.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{mv_x} & -\frac{mv_x^2 + a_2}{mv_x} \\ \frac{a_3}{I_\theta v_x} & -\frac{a_4}{I_\theta v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \alpha \quad \dots (8)$$

ここで, $a_1 = c_f + c_r$, $a_2 = c_r l_r - c_f l_f$, $a_3 = -l_f c_f + l_r c_r$, $a_4 = l_f^2 c_f + l_r^2 c_r$, $b_1 = c_f / m$, $b_2 = l_f c_f / I_\theta$ である。

しかし、本アルゴリズムの原理は式(2)であることから、式(2)、式(8)の2つのモデルを用いたときの車両の移動軌跡の比較が必要であるが、その違いは小さいことが既に明らかとなっている⁽¹⁹⁾。

シミュレーションで用いる車両のパラメータは、後述する実験用の車両から $m = 1700[\text{kg}]$, $I_\theta = 2631[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $l_f = 1.13[\text{m}]$, $l_r = 1.615[\text{m}]$, $c_f = 2 \times 33650[\text{N/rad}]$, $c_r = 2 \times 35250[\text{N/rad}]$ としている。車両前方から重心までの距離は

Fig.4 The notation of vehicle model

2.3[m]としている。また、ビジョンの視野範囲は、重心から遠近方向に4[m]～22[m]まで2[m]ごとに10本の探索線を設定し、横幅は、4[m]で6[m], 22[m]で10[m]と実際のビジョンシステムよりも狭く設定している。視野範囲の最適化については議論されてきている⁽¹⁹⁾が、ここではこれまで実験車両で用いてきた値を利用し、視野範囲は車線を検出する範囲と等しいものとしている。走路は平坦路としている。視野範囲と車線逸脱の検出との関係については後述する。この視野範囲内において連続した線で与えたレーンマーカを検出するものとしている。このレーンマーカを参照線とし、この参照線から右に1.8[m]の位置に車両の中心がくるように、車線追従を行うことを基準としてシミュレーションを行った。車両速度は50[km/h]、検出周期は0.1[sec]としている。実際の車両の特に自動車専用道上の一般的な走行における操舵制御を想定し、最大操舵角速度を3.5[deg/sec]とし、操舵角の最大値は±40[deg]としている。マニュアル運転時の車両は、故意に車線逸脱が生じるように、直進方向を0[deg]として左方向(マイナス)から右方向(プラス)へ検出周期毎に操舵量を変化させて入力し、蛇行走行させている。

Fig. 5. Simulation results of lane departure detection in straight roadways (Vehicle speed = 50 km/h, $K = 2.5$ deg)

4.2 車線逸脱の検出結果と考察 図5に直線路, 図6に直線路から曲線路への走行時における車線逸脱の検出についてのシミュレーション結果を示す. 車線逸脱を判定する K の値を2.5[deg]としてグラフ上に逸脱判定を示している. 図5を見ると, 操舵角の変化から遅れて車両位置が変化していることがわかる. しかし, ビジョンによるレーンマーカの検出によって得られたサンプル点列を三次曲線近似して算出した操舵角は, 非常に反応が早く, 実際に入力された操舵角の変化や, レーンマーカと車両との位置関係を良く反映した値となっていることがわかる. 実際の入力された操舵角と三次曲線近似から算出された操舵角との比較によって判断された車線逸脱の判定値 $\delta(t)$ を見ると, 車線逸脱が早期に確実に検出されている. また, 車線に対する車両状態の判断も $\Delta\delta(t)$ の値によって確実に検出できることがわかる. 車線逸脱を判定する K の値は, 車線逸脱の度合いを示すものであるため, 車線逸脱の検出レベルをこの値によって変えることが可能である. 車線逸脱の警報を出す場合には, K の値の大小によって, 警報のレベルに大小をつけてドライバに提供することが可能である.

以上のシミュレーションの結果より, 提案する車線逸脱の検出アルゴリズムは, 車線逸脱と車線逸脱傾向の早期判定が可能で, さらにドライバに対し的確な操舵角を提示することが可能である.

4.3 車両位置と方向および速度と車線逸脱検出との関係 提案する手法は, 従来の研究で良く用いら

れる車線逸脱までの時間を予測する手法ではなく, 車線を追従していくために現時点で必要な操舵角と実際の操舵角との差から逸脱を予測するものである. そのため, 車線逸脱の判定値 $\delta(t)$ の大小は, 逸脱までの時間を直接的に示してはいない. $\delta(t)$ の大小は, 車両の車線との位置と方向, 操舵角, 視野範囲により決定される. ここで, 車線逸脱を起こす操舵角の大きさを変えてシミュレーションすることにより, 車線に対する車両の位置と方向と, 車線逸脱検出との関係を検証し考察する. シミュレーションにおける設定値は, 前述したものと同様とし, 直線路において故意に車線逸脱を起こさせた. 操舵角を0.5[sec]間だけ, 初期値0[deg]から-1[deg]に変化させた場合の結果を図7に, -2[deg]に変化させた場合の結果を図8に示す. 操舵角の入力が大きくなると車両の方向が大きく変化するため, 車線を逸脱するまでの時間は短くなり, 車線逸脱の危険性は高くなる. 図7と図8の結果を比較すると $\delta(t)$ の値は, 車両の車線との位置関係の変化をよく反映しており, 逸脱の度合いを示すのに充分であることがわかる. また, 車両の状態を示す判定値 $\Delta\delta(t)$ は, その大小によって車両がどのくらい逸脱していく傾向にあるのかを示しており, 負の値が大きくなるほど逸脱傾向が高いことを示している. $\Delta\delta(t)$ の値は, 逸脱を起こす操舵角が入力された時点において大きく変化しており, 操舵角の値と車両の方向を反映して逸脱傾向の強弱を示していることがわかる.

さらに, 車両速度の違いと車線逸脱検出との関係を

検証してみる. 図7で示した設定で, 車両速度を80[km/h]としてシミュレーションを行った結果を図9に示す. 車両速度の速い方が, 車線逸脱までの時間は短くなる. 図7と図9の結果を比較すると, $\delta(t)$ の値は, 前述のシミュレーション結果と同様に車両の車線との位置関係の変化をよく反映しており, 逸脱の度合いを示すのに充分であることがわかる. また, $\Delta\delta(t)$ の値も速度に応じて負の値が大きくなっており, 逸脱の傾向が大きいことを示している. そのため, 車両速度が未知であっても, 車線逸脱の判定や車両状態として逸脱傾向の判定をすることが可能であることがわかる.

Fig. 6. Simulation results of lane departure detection in straight and curved roadways (Vehicle speed = 50 km/h, $K = 2.5$ deg)

4.4 視野範囲と車線逸脱検出との関係

次に車線を検出するビジョンシステムの視野範囲と車線逸脱検出との関係について考察を行う。ここで視野範囲は車線の検出範囲と等しいものとしている。図10(a), (b), (c)にビジョンの視野範囲を変化させて、同じ操舵角の入力による車線逸脱の走行を検出させたシミュレーション結果を示す。図10(a)は、これまでのシミュレーションと同様な視野範囲によるもので、車両重心から4[m]から22[m]まで2[m]ごとに10本の探索線を設定し、探索線上に検出される10点と車両重心点を最

小二乗法を用いて三次曲線近似してビジョンに基づく操舵角を算出している。図10(b)は車両重心から10[m]から28[m]まで2[m]ごとに10本の探索線を設定した場合、図10(c)は車両重心から4[m]から31[m]まで3[m]ごとに10本の探索線を設定した場合のシミュレーション結果を示している。今回のシミュレーションでは、車両速度を50[km/h]、計測周期を0.1[sec]、レーンマーカと車両との設定距離を1.8[m]とした。車線逸脱は、レーンマーカとの距離が1.0[m]となるような操舵角を入力し、車線に対する車両位置の片寄りを起こさせた。

前述したようにビジョンに基づく操舵角を算出するアルゴリズムは、視野範囲で得た参照線による3次曲線に沿った走行を実現するための現時点での操舵角を算出している。それぞれの結果を比較すると図10(b)の場合のように、視野範囲の設定を車両の遠方にすれば、相対的に遠い地点を目標として操舵角を算出することとなる。そのため、参照線からの車両位置のズレに対する反応としての車線逸脱の判定値 $\delta(t)$ は小さくなり、しきい値 K も小さくする必要がある。また、図10(c)の場合のように、視野範囲を車両の近傍から遠方まで広い範囲に設定しても、上記と同じ影響により、ズレに対する反応は小さくなっている。今回のシミュレーションの設定では図10(a)の場合が、車線逸脱検出の感度が高く良い結果を示しているといえる。

プレビューラテラル制御アルゴリズムにおける視野の最適設定については、制御周期による影響が大きい

が、周期が10[msec]程度と高速であれば、速度にあまり依存せずに視野範囲をある程度の範囲で固定できることが既に報告されている⁽¹⁹⁾。今回は、ドライバーの操舵角との比較を行うため、検出周期が100[msec]程度と比較的遅いが、今回のシミュレーションの設定では、図10(a)のように視野範囲を車両の近傍に設定することで、車線逸脱の検出感度を高くすることができ、逸脱検出に良い結果を得ている。しかし、適切な感度の設定やカーブなど経路方向が変化する道路環境では、さらに最適な視野範囲の設定につ

Fig.7 Simulation results of lane departure detection (Vehicle speed = 50km/h, Steering angle = -1.0deg; 0.5sec)

Fig.8 Simulation results of lane departure detection (Vehicle speed = 50km/h, Steering angle = -2.0deg; 0.5sec)

Fig.9 Simulation results of lane departure detection (Vehicle speed = 80km/h, Steering angle = -1.0deg; 0.5sec)

(a) Case of field of view : 4~22[m]

(b) Case of field of view : 10~28[m]

(c) Case of field of view : 4~31[m]

Fig.10 Simulation results of lane departure detection

いての検証が必要であり、今後の課題である。

5. 実験車両を用いた走行実験

5.1 実験車両の構成 参照線としてレーンマーカを用い、それに沿った走行を基準に車線逸脱の検出アルゴリズムの有効性を検証するために、乗用車に基づく実験車両を用いてテストコース上で走行実験を行った。車両は、図11に示す開発中のSFV(Smart and Friendly Vehicle)を用いている。車両の大きさは、長さ4825[mm]、幅1770[mm]、高さ1395[mm]、ホイールベース2745[mm]である。図12に示すように車両には、コンピュータ(Pentium 150MHz)、ドライブ回路、CCDカメラ、モニタ等が搭載されている。実験車両のステアリングロッドにエンコーダが取り付けられている。

実験車両には、ビジョンシステムとして車両前方の道路シーンを得るためにカラーCCDカメラを車両上部のキャリアバー上の雲台に1台設置している。このCCDカメラのレンズは焦点距離7.5[mm]、視野角水平約60.8[deg]、垂直約47.5[deg]である。雲台は車両前部より230[cm]、カメラは車のほぼ重心に設置し、高さ160[cm]、水平方向に下向き12[deg]で、視野範囲は車両重心から前方に4[m]から22[m]までの路面上で等間隔の距離2[m]毎に対応する10本の走査線を探索線として設定している。この設定は前述したシミュレーションでの設定と同一である。参照線には、連続した白線からなるレーンマーカを用いている。レーンマーカの検出方法は、ウィンドウやテンプレート等を用いた方法があるが、本研究では、単に探索線上の画素の輝度値と幅による判断から、その画素列の中点をサンプル点の候補として検出している。検出は、画面

Fig.11 The experimental vehicle (Smart and Friendly Vehicle)

Fig.12 Configuration of the experimental vehicle

下の走査線より行い、探索線上における複数のサンプル点の候補に対しては、次の探索線の検出において、検出されたサンプル点との連続性を傾きにより判断し、さらに複数のサンプル点列の候補に対しても、最も連続性の高いサンプル点列を選択している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。レーンマーカの検出から車線逸脱の検出までの検出周期は約0.1[sec]であった。専用の画像処理装置などを用いることで、より高速な検出処理が可能である。実験時の走行速度は約50[km/h]とした。

5.2 車線逸脱の検出と警告 参照線検出とその結果にしたがって参照線を追従するために、レーンマーカと車両の中心との関係によって予め設定されたオフセットの距離だけ平行移動した位置にサンプル点列が決定される。自動運転を行う場合は、このサンプル点列を三次曲線で近似し、その係数から操舵角を求めてステアリングアクチュエータに出力するが、車線逸脱検出時には操舵角をアクチュエータに出力しない。また、ステアリングロッドに取り付けたエンコーダからの出力値によって、ドライバの操作するステアリングの操舵角を検出する。これらの2つの操舵角を比較することで、車線逸脱を検出する。今回の実験では、マン・マシンインターフェースに関する詳しい検討を行っておらず、車線逸脱の状態は、コンピュータディスプレイ、画像処理モニタおよびビープ音でドライバに提示した。今回は K の値のみを用いた判定を行い、 K の値を1.0[deg]、2.0[deg]、3.0[deg]の三段階の

レベルに分け、車線逸脱レベルの高さに応じてコンピュータディスプレイと画像処理モニタには、逸脱を修正するために必要な操舵方向を示す矢印を大きさを変えて示し、ビープ音もレベルに応じて音の間隔を短くすることで、車線逸脱を警告するようにしている。

5.3 走行実験の結果と考察 車線逸脱の検出に対する走行実験では、車両の初期位置は、CCDカメラの位置を中心にレーンマーカが左1.4[m]に位置するようにし、レーンマーカに平行とした。走行実験では、はじめに車線追従走行を行い安定した直進走行の後、ドライバがステアリングを左右に操舵させ車線逸脱を故意に起こした。

図13に車内の様子と画像処理モニタの表示を示す。これは、右カーブ(約R160)内での車線逸脱の検出の様子である。図14に直線路における走行実験における車線逸脱の検出結果を示す。走行実験の結果より、シミュレーションと同様に車線逸脱を検出し、ドライバへ警告することが可能であった。さらに、車両の状態をドライバに提示することによってドライバの操作判断の材料となることがわかった。ただし、車両の速度が速い場合には、ステアリング角の変化が非常に小さい値でも単位時間で車両方向は大きく変わる。そのため、車両の状態の判断は、1制御周期前の操舵角との時系列的な比較を行うだけでなく、数制御周期にわたる操舵角を見ることが必要であると考えられる。

車線逸脱の警報のタイミングについては、ドライバの走行挙動の解析を含めて研究が進みつつある⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が、ドライバの個人差により定量的な評価は困難である。提案する車線逸脱のアルゴリズムでは、判定のレベルを変化させることで個人差にあわせて警告が可能であり、また、カーブなどの走行環境によって警告レベルを変化させることも可能である。

Fig.13 An experimental result of lane departure detection in a right curved roadway (about R160)

Fig.14 An experimental result of lane departure detection along a straight roadway

6. むすび

本論文では、ビジョンによる車線の検出に基づいた自律車両のラテラル制御を応用した、自動車運転時における車線逸脱の一検出法について述べた。シミュレーションと実験車両を用いた走行実験の結果から、車線逸脱の検出アルゴリズムの有効性を示した。このアルゴリズムは、ビジョンに基づく操舵量を、視野内のレーンマーカ全体から求めるために、ロバストに車線逸脱を検出することができる。また、その操舵量とドライバの操舵量との時系列的な比較を行うことによって、車両の状態が車線逸脱へ向かう状態にあるのか、車線に復

帰していく状態にあるのかなどを、ドライバのステアリング操作の的確な指示も含めて検出することが可能である。

今後は、マン・マシンインターフェースについても検討を行い、様々な状況における走行実験を通じて提案する車線逸脱の検出アルゴリズムの検証を行う予定である。さらに、提案するシステムでは逸脱時に自動運転への移行が可能であるため、逸脱警告から円滑な自動運転に移行し、車線逸脱を自動修正するシステムの開発⁽²²⁾を進める予定である。なお本研究は、科学技術振興調整費(流動促進研究制度)「人間との柔軟な関わりをもつ機械システムの動的な自律制御」によるものであり、本論文で述べた手法や装置は特許⁽²³⁾を取得している。

文 献

- (1) 交通統計(平成10年度版), (財)交通事故総合分析センター(1999)
- (2) M. Kaneda, et al.: Development of a Drowsiness Warning System, the 14th International Conference on ESV (1994)
- (3) J. Fukuda, et al.: Estimation of Driver's Drowsiness Level using Interval of Steering Adjustment for Lane Keeping, Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, No.9433786 (1995)
- (4) T. Adachi, et al.: Application of Real-Time Simulation to the Lane-Keeping System, Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings, pp.415-418 (1994)
- (5) G. Renner, et al.: Lane Departure and Drowsiness -Two major accident causes- One safety system, 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, CD-ROM (1997)
- (6) 津川:自動車運転システムにおける制御アルゴリズム, 自動車技術, Vol.52, No.2, pp.28-33 (1998)
- (7) 津川:自動車の自動運転システム, 人工知能学会誌, Vol.14, No.4, pp.606-614 (1999)
- (8) 津川, ほか:自律車両の操舵アルゴリズム, システム制御情報学会論文誌, Vol.2, No.10, pp.360-362 (1989)
- (9) S. Tsugawa, et al.: Steering Control Algorithm for Autonomous Vehicle, Proc. of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp.143-146 (1990)
- (10) K. Tomita, et al.: Preview Lateral Control with Machine Vision for Intelligent Vehicles, Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium '93, pp.467-472 (1993)
- (11) 富田, ほか:マシンビジョンによるインテリジェントビークルのプレビューラテラル制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.7, No.2, pp.35-41 (1994)
- (12) 加藤, ほか:参照線追従と障害物回避のための自律車両のビジュアルナビゲーション, 電気学会道路交通研究会資料, RTA-96-20, pp.17-26 (1996)
- (13) 加藤, ほか:ビジョンによる自律車両における車線変更のためのラテラル制御, 電気学会 交通・電気鉄道 道路交通合同研究会資料, TER・RTA-98-6, pp.29-34 (1998)
- (14) S. Kato, et al.: Visual Navigation along Reference Lines and Collision Avoidance for Autonomous Vehicle, Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium '96, pp.385-390 (1996)
- (15) S. Kato, et al.: Lane-Change Maneuvers for Vision-Based Vehicle, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, CD-ROM (1997)
- (16) S. Tsugawa, et al.: A Lateral Control Algorithm for Vision-Based Vehicle Applicable to Various Maneuvers, 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, CD-ROM (1997)
- (17) S. Kato, et al.: Application of a Vision-Based Lateral Control Algorithm to Lane Departure Detection, 1998 JASE Spring Convention, No.64 (1998)
- (18) S. Kato, et al.: Lane Departure Detection with an Onboard Vision System, Proc. of the Intelligent Vehicle Symposium '98, pp.74-79 (1998)
- (19) S. Tsugawa, et al.: Optimal Design of Vision System for Lateral Control of Autonomous Vehicle, Proc. of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control 1998, pp.369-374 (1998)
- (20) 鈴木, ほか:車線逸脱警報発生基準の一考察, JARI Research Journal, Vol.21, No.10, pp.34-37 (1999)
- (21) 相馬, ほか:高速道路走行時における車両の動的横位置の実態調査, JARI Research Journal, Vol.21, No.10, pp.30-33 (1999)
- (22) 加藤, ほか:ビジョンに基づく車線逸脱の検出・警告と自動運転への移行, 日本機械学会第9回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp.752-757 (1999)
- (23) 加藤, ほか:自動車運転時の車線逸脱検出方法及び検出装置, 特許第3015875号(1999)