自律車両におけるビジョンによる車線変更のためのラテラル制御

正員 加藤 晋 (機械研)
正員 津川 定之 (機械研)

Lateral Control for Lane Change Maneuvers on Vision-Based Vehicle

Shin Kato, Member, Sadayuki Tsugawa, Member (Mechanical Engineering Laboratory, AIST, MITI)

This paper describes an algorithm for lateral control of an automated vehicle with a vision system for autonomous navigation and an extension for lane change maneuvers. The lateral control consists of steps of reference line detection, path generation, and lateral control calculation. A coefficient of a cubic curve that approximates a series of sampled points on the reference line provides the lateral control. A path for various maneuvers including lane changing is generated by shifting the series of sampled points. Simulation studies and outdoor experiments on lane changing have been conducted to show the feasibility of the algorithm.

キーワード: ITS, AVCSS, 自律車両, ビジョンシステム, 車線変更, ラテラル制御

1. はじめに

ビジョンシステムを用いた自律車両のナビゲーションには様々な方法が提案されている⁽¹⁾。筆者らはこれまで、自律車両の経路を路面上の参照線で与え、これをビジョンシステムで検出し、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^{(2)~(5)}。これは、視野内に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であるという利点を持っている。これまでに参照線の追従と障害物の回避を実現するプレビューラテラル制御アルゴリズムについて報告を行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

本論文では、路面上のレーンマーカ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の車線変更への応用を提案し、乗用車を改造した実験車を用いた屋外走行実験の結果を報告する。自律車両のナビゲーションにおいて車線変更は、障害物回避や追越しだけでなく、複数台の自律車両による協調走行⁽⁸⁾において必要な運転操作である。

2. ラテラル制御アルゴリズム

〈2・1〉 アルゴリズムの導出 本研究ではラテラル制御に地点追従法を拡張したアルゴリズムを用いる。地点追従法は、車両の代表点を原点とする座標系において設定経路上に配置された目標点を通る三次曲線が一意に定義され、その三次曲線の係数からその時点での車両の操舵角を算出する手法である⁽⁹⁾。本研究ではこの手法を目標点でなく、経路を示す参照線を用いる手法に拡張している。ビジョンシ

ステムを持つ自律車両とその視野、参照線の配置を図1に示す。ここでX-Y系は絶対座標系、x-y系は自律車両の代表点を原点、方位をx軸方向とする移動座標系である。ここではまず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

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

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、この時刻において与えられるべき操舵量は、次のように表される。

自律車両が自動車型の場合は、実舵角で表した操舵量 α は、(1)式の三次曲線の係数Bを用いて

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

で与えられる^{(2)~(5)}。lはホイールベースを表す。

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

図1 自律車両の視野と参照線を近似する三次曲線
Fig. 1. Derivation of the cubic curve approximation algorithm.

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。

このラテラル制御アルゴリズムの導出には、自動車型の車両の動特性として、 (x, y) , θ , v をそれぞれ車両の代表点座標、方向、速度とすると幾何学的関係から導かれる

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \quad \dots\dots\dots (3) \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{l} \tan \alpha \end{aligned}$$

を用いており、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。

〈2・2〉 参照線検出 この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。

以上のことからわかるように、本研究ではビジョンシステムを用いて実環境から得た参照線の情報により、サンプル点の位置を同定することが基本となる。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。そのため、地図情報から仮想的な視野範囲内に参照線を得ることで、サンプル点の位置を同定することも可能である。

〈2・3〉 様々な運転操作への適用 このラテラル制御アルゴリズムでは、サンプル点列を最小二乗近似する三次曲線の係数で操舵量が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車両の方向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、様々な運転操作にこの制御アルゴリズムを適用できる⁽¹⁰⁾。

自律車両がレーンマークや路肩を検出し、それに沿って走行する場合は、検出したレーンマークや路肩に基づいてサンプル点を平行移動して仮想的な参照線を想定し、サンプル点を三次曲線近似することで、ラテラル制御のための操舵量を決定する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ビジョンシステムの視野範囲や機能によって、検出する対象や位置が異なり仮想的な参照線

の想定方法も様々な考えられる。基本的には、経路として車両の中心が通ることを想定した距離だけ、レーンマークや路肩の検出位置からサンプル点を平行移動し、三次曲線を求めればよい。さらに、障害物を回避させる場合の手法を簡単にのべると障害物の検出情報をもとにその付近の参照線に対応するサンプル点を障害物の無い所へ移動し、新たに移動したサンプル点を最小二乗近似し三次曲線を求め操舵量を決定することで、障害物回避のためのラテラル制御が実現可能である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本論文では、自律車両を車線変更させる場合について詳しく述べる。

3. 車線変更操作への適用

〈3・1〉 車線変更 追越しや障害物の回避などのために車線を変更する操作は、自律車両の運転技術においても必要である。車線変更の難しさは、走行速度、操舵量、操舵速度等の小さな違いによって車両の移動軌跡が大きく異なってくることにある。また、追越しの際には図2のように対向車の位置関係、障害回避の際には障害との位置関係から車線変更時に時間(距離)の制約をとまうこともある。しかし、急激な車線変更は、乗り心地や操舵の安定性が悪くなる。自律車両における車線変更の研究は、いくつか行われている^{(13)~(16)}が、ビジョンシステムからの情報に基づいた車線変更は、あまり研究されていない⁽¹⁷⁾。

まず、人間の車線変更における運転操作について考えてみる。人間は、周囲やレーンマーク等の目から得た情報の変化によって、速度、位置関係、方向変化などを常に認識し、運転操作の際に利用している。車線変更では、車線との位置関係、方向変化を常に考慮し、速度を加味したうえで車両が急激に方向を変化しないように、ステアリングを操作している。これらを考慮にいて、筆者らは視覚情報に基づいた車線変更の自動運転を、先に説明したラテラル制御アルゴリズムの適用によって実現することを提案している⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

前述したようにラテラル制御アルゴリズムでは、参照線(レーンマーク)に沿った走行を行う場合には、参照線の検出された位置から車両の中心が通ることを想定した距離だけ、サンプル点を平行移動し仮想的な参照線を想定すればよい(図3)。このサンプル点の移動距離によって、参照線と車両の位置関係を自由に操作することが可能である。このことを利用して車両の走行中に、検出された参照線的位置からサンプル点との距離を変化させることによって車線変更操作を実現することを提案する。

車線変更以前には、自律車両は参照線に沿ったラテラル制御を行っているものとし、検出された参照線的位置から

図2 車線変更操作
Fig. 2. Lane change maneuver.

一定距離だけ平行移動してサンプル点を設定する。図4に示すように、車線変更を参照線をはさんで右車線から左車線へ行く場合には、検出された参照線の位置からのサンプル点の移動距離を徐々に短くしていき、さらに、車線の変更位置まで移動距離を変化させる。自律車両は、走行制御周期ごとにこのサンプル点によって求められた三次曲線の係数により操舵量を更新して走行することで車線変更を実現し、最終的にはまた参照線に沿った走行が実現される。

〈3・3〉 特 長 提案する車線変更操作を含むラテラル制御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にはほとんど設備が必要ない。
- 2) 視覚システムによるプレビュー性をもつため、車両の走行は滑らかなものとなり、乗り心地の良い操舵を実現することができる。
- 3) 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。
- 4) 車両前方の2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である。
- 5) 横加速度や移動距離、制御周期、視野範囲などの設定によって柔軟な車線変更の設計が可能である。
- 6) 直進だけでなく、緩いカーブなどにおいても車線変更が滑らかに実現可能である。
- 7) 車線追従走行と車線変更との処理を連続的に行うことができる。

図3 参照線の検出とサンプル点の移動による経路の生成
Fig. 3. Path generation with lane markings detected.

図4 参照線からサンプル点までの距離を変化させることによる車線変更

Fig. 4. Lane change maneuvers by gradual shift of sampled points (a path) over the reference line.

4. シミュレーション

〈4・1〉 車両モデル ここで提案したアルゴリズムはコーナリングフォースを考慮しない幾何学的な車両モデルの(3)式から得られている。しかし、走行制御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図5に示すようにコーナリングフォースを考慮した新しい車両モデルを用いる必要がある。

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_o : 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,

とするとコーナリングフォースを考慮した車両モデルは

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{mv_x} & \frac{-mv_x^2 + a_2}{mv_x} \\ \frac{a_1}{I_o v_x} & -\frac{a_2}{I_o v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \alpha \quad \dots\dots(4)$$

で記述される。ここで、 $a_1 = c_f + c_r$, $a_2 = c_r l_r - c_f l_f$, $a_3 = -l_f c_f + l_r c_r$, $a_4 = l_f^2 c_f + l_r^2 c_r$, $b_1 = c_f / m$, $b_2 = l_f c_f / I_o$ 。

しかし、本アルゴリズムの原理は(3)式であることから、(3)、(4)式の2つのモデルの比較が必要であるが、二つの車両モデルを用いたときの軌跡の違いは小さいことが明らかにされている⁽²⁰⁾。

〈4・2〉 前提条件と設定 提案する車線変更に対するラテラル制御アルゴリズムの有効性を検証するために、まず、乗用車を想定し上記の車両モデルを用いてシミュレーションを行った。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 $m = 1700 \text{ kg}$, $I_o = 2631 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_f = 1.13 \text{ m}$, $l_r = 1.615 \text{ m}$, $c_f = 2 \times 33650 \text{ N/rad}$, $c_r = 2 \times 35250 \text{ N/rad}$ とした。前後輪での横滑り角は0とし、車両前方から重心までの距離は2.3 mとした。また、ビジョンシステムの視野範囲は、重心から遠近方向に4m~22mまで2mごとに10本の探索線を設定し、横幅は、4mで6m、22mで10mと実際のビジョンシステムよりも狭く設定している。この視野範囲内において連続した線と与えたレーンマーカを検出するものとしている。視野範囲の最適化については議論されてきている⁽²⁰⁾が、ここではこれまで実験車両で用いてきた値を利用している。このレーンマーカを参照線とし、幅3.6mの道路の中央を車両が走行す

図5 車両モデル

Fig. 5. The notation of vehicle model.

るものとして、初期位置をレーンマーカから右に1.8mに車両の中心がくる位置として、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。車線変更後の車両の位置はレーンマーカから左に1.8mの位置とし、3.6mの車線変更を行うように設定している。制御周期10period後に車線変更の制御を開始させる。実際の車両の自動制御を想定し、最大操舵速度を3.5deg/secとし、操舵角の最大値は±40degとしている。本シミュレーションでは、アクチュエータの遅れ、非線形性等を考慮していない。そのため、走行速度が高速な場合には、実際の走行軌跡と違いが生じるが、横加速の制約や操舵変化量が小さいことなどから、差異はさほど大きくない。

横加速度 c の算出は、

$$c = v \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

を用いている⁽²¹⁾。 v は走行速度、 $\dot{\theta}$ は、(4)式より算出された値を用いる。また、ラテラル制御の収束性を評価する指標として、車線変更後の位置が±10cm以内の誤差でかつ操舵制御が0.01deg以下に落ち着いた時点車を車線変更終了とした車線変更距離と時間を求めている。

〈4.3〉 サンプル点の移動距離の変化量 一般に、車線変更は、乗り心地として横加速度や操舵の安定性、車線変更距離(時間)によって評価される⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。ここで提案するアルゴリズムでは、サンプル点の移動距離をどのように変化させるかによって、車両は様々な走行軌跡をとり得、したがって各評価の値が変化する。この研究では、車両速度によって急激な姿勢角の変化を招かないようにすること、視野範囲内から参照線を見失うことがないようにすること、ならびに横加速の限度を越えないようにすることを車線変更時の制約とした。これらの制約を満たしたうえ、車線変更距離(時間)を最小とすることで制御の評価を行った。

サンプル点の移動距離の変化量を与える関数の一例として、図6に示す設定に基づき、(6)式のような直線的に変化する関数と(7)式のような曲線的に変化する関数を設計し比較を試みる⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。直線的に変化する関数では、サンプル点の移動距離を一定量ずつ変化させている。曲線的に変化する関数では、サンプル点の移動距離を車線変更後の目標とする距離まで移動変化させる時間を入力することで、制御周期の値からサンプル点の移動距離量を徐々に増大させ、また中央から減少するように曲線的に変化させている。

$$D(i) = D_s - \frac{D_s - D_g}{S_r} \cdot P_t \cdot i \quad (6)$$

$$D(i) = D_s - (D_s - D_g) \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{S_r} \cdot P_t \cdot i\right)}{2} \quad (7)$$

〈4.4〉 シミュレーション結果と考察 シミュレーションでは、走行速度を50km/h、80km/h、制御周期を0.2sec、0.1sec、0.05secとした場合において、横加速の絶対値が0.1G以下となり車線変更の距離が最短となるサンプル点の

$D(i)$ [m]: サンプル点の移動距離
 D_s [m]: 車線変更開始時のサンプル点の移動距離($D(0)$)
 D_g [m]: 車線変更終了時のサンプル点の移動距離($D(S_r/P_t)$)
 S_r [sec]: サンプル点を移動させる時間
 P_t [sec]: 制御周期
 i [period]: $0 \leq i \leq S_r/P_t$; 車線変更の制御ステップ数

図6 サンプル点の移動距離の設定
 Fig. 6. Schematic diagram of path setup.

移動時間を求めた。表1に(6)式による直線の変化関数を用いた場合、表2に(7)式による曲線の変化関数を用いた場合の結果を示す。横加速は左方向をマイナス値としている。この結果より、曲線の変化関数を用いた場合には車線変更距離を短くすることが可能であることがわかる。また、曲線の変化関数を用いると車線変更距離は、制御周期が大きくなっても制御周期の小さい時との差が小さいことがわかる。さらに、速度による影響も曲線の変化関数を用いた方が少ないこともわかる。これらの理由は、図7と図8に示したそれぞれの関数を用いた場合における移動軌跡、操舵角、横加速、車両方向、サンプル点の移動距離の変化を見ることでわかる。図7と図8には、それぞれ直線の変化と曲線の変化関数を用いて走行速度を50km/h、制御周期を0.1sec、横加速の絶対値を0.1G以下として最短の車線変更時間となる場合の結果を示している。これらの図では

表1 直線の変化による車線変更の走行速度と制御周期
 Table 1. Simulation results of lane change using uniform movement.

走行速度: V [km/h]([m/s])	50 (13.89)			80 (22.22)		
制御周期: P_t [sec]	0.2	0.1	0.05	0.2	0.1	0.05
サンプル点の移動時間: S_r [sec]	6.6	5.4	4.95	10.4	8.5	7.6
車線変更距離: L [m]	111.07	95.78	89.52	235.08	213.34	193.34
車線変更時間: T [sec]	8.0	6.9	6.45	10.58	9.6	8.7
最大横加速 (←は左 方向の最大値): C [G]	-0.09346	-0.09819	-0.09957	-0.09965	-0.09854	-0.09978

表2 曲線の変化による車線変更の走行速度と制御周期
 Table 2. Simulation results of lane change using adaptive movement.

走行速度: V [km/h]([m/s])	50 (13.89)			80 (22.22)		
制御周期: P_t [sec]	0.2	0.1	0.05	0.2	0.1	0.05
サンプル点の移動時間: S_r [sec]	4.6	4.1	4.05	5.4	5.0	4.75
車線変更距離: L [m]	77.68	73.50	73.50	133.31	124.41	119.96
車線変更時間: T [sec]	5.6	5.3	5.3	6.0	5.6	5.4
最大横加速 (←は左 方向の最大値): C [G]	-0.09101	+0.09836	+0.09975	-0.09756	-0.09617	-0.09894

図7 直線の変化関数を用いた車線変更 ($v=50\text{km/h}$, $P=10\text{sec}$)
Fig. 7. Simulation result of lane changing with uniform movement function.

図8 曲線の変化関数を用いた車線変更 ($v=50\text{km/h}$, $P=10\text{sec}$)
Fig. 8. Simulation result of lane changing using adaptive movement function.

操舵角、車両方向はそれぞれ左方向をマイナス値としている。

直線の変化関数を用いた場合の結果を見ると、サンプル点の移動開始後と終了後において、操舵角の大きな変化が指令されるため、横加速度もそれにしがいが大きく変化している。また、今回は横加速度の上限を設けているために操舵角の変化が制限されることになり、車線変更中に操舵角をゼロとし車両方向が一定に保たれ、斜めの移動を直進で行うという無駄部分が発生している。

次に曲線的変化関数を用いた場合の結果を見ると、サンプル点の移動開始時や終了時において、操舵角を徐々に変化させることで横加速度を低く抑えていることがわかる。また、車線変更中は操舵角が常に変化し、車両方向も変化していることから、無駄のない操舵制御が行われていることがわかる。走行速度や制御周期の変化による影響は、一制御周期における操舵角の変化量に大きく影響を受ける。

そのため、曲線の変化関数を用いて操舵変化量を抑えていることが有効に作用している。

以上より、車線変更を行う際のサンプル点の移動距離量を制御周期ごとに曲線的に変化させることは、非常に滑らかな車線変更制御が実現され有効である。

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に沿った走行から車線変更を行うラテラル制御アルゴリズムの有効性を検証するために、乗用車を改造した実験車両を用いてテストコース上で走行実験を行った。車両を、図9に示すが、この車両は協調走行システムで使用するSFV (Smart and Friendly Vehicle)である。車両の大きさは、長さ4825mm、幅1770mm、高さ1395mm、ホイールベース2745mmである。図10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。実験車両の操舵装置は、パワーステアリング装置を改造したもので、コンピュータからDAボード、I/Oボードを介してサーボモータドライブ装置によって、ステアリングの回転制御やトルク制御を行うことが可能である。制御周期は約80msecである。また、移動軌跡を記録するためにD-GPS装置 (Novatel RT-2: 誤差 $\pm 2\text{cm}$)を搭載している。

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アパー上の雲台に1台設置している。このCCDカメラのレンズは焦点距離7.5mm、視野角水平約60.8deg、垂直約47.5degである。雲台は車両前部より230cm、カメラは車のほぼ重心に設置し、高さ160cm、水平方向に対し下向き12degで、視野範囲は車両重心から前方に4mから22mまでの路面上で等間隔の距離2m毎に対応する10本の走査線を探査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。

図9 実験車両 (SFV)
Fig. 9. The experimental vehicle.

図10 実験車両における装置構成
Fig. 10. Configuration of the experimental vehicle.

検出は、画面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参照線の傾きから判断し、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⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

〈5・2〉 車線変更の制御 参照線検出と結果にしたがって、参照線を追従するために、予め設定されたサンプル点の距離だけ平行移動した位置にサンプル点列が算出される。このサンプル点列を三次曲線で近似して操舵量を決定する。今回の走行実験では、あらかじめレーンマーカーに追従するように平行移動させたサンプル点に対し、車線変更の開始命令にしたがって、その移動距離を曲線の変化関数を用いて変化させた。シミュレーションと同様に、サンプル点の移動距離を変化させる制御周期(時間)を入力して走行させ、横加速度や車線変更時間(距離)を計測した。

〈5・3〉 実験結果 実験の一例として車両速度を50km/h、サンプル点の移動距離を変化させる制御周期(時間)を60period(約4.8sec)としたときの結果を図11に示す。実験の様子は図12に示す。車両の初期位置はレーンマーカーの右1.4mとし、レーンマーカーの左1.4mの位置に、幅2.8mの車線変更を行わせている。図11に示した結果では、制御周期が40periodまではレーンマーカーに追従する制御を行わせ、その後車線変更に移りサンプル点の移動を開始して、60period(約4.8sec)かけてサンプル点の距離を曲線的に変化する関数を用いて移動している。横加速度の値は、サンプル点の移動距離を曲線的に変化させる関数を用いたことで、低く抑えられている。実験の結果より、約6secで車線変更を終え、安定した車線変更とレーンマーカーに沿った走行制御が中断なく実現された。しかし車両の移動軌跡をみると、車線変更前後に右、左に少し膨らんでいることがわかる。左右方向の位置誤差は±10cm程で、これはアクチュエータの制御遅れや制御周期が大きい(約80msec)ことなどによる影響である。制御遅れなどの影響を考慮した手法として、遅れ時間における移動を推定し三次曲線を求める際の自己位置を補正し遅れを補償する方法が既に提案されている⁽⁵⁾。今後、これらの方法を用いて、実験を行う予定である。

比較のために同じ設定で行ったシミュレーション結果を

図11 走行実験における移動軌跡と操舵角、横加速度
Fig. 11. Experimental results : Automated lane change.

図13に示す。シミュレーションの結果では、横加速度は絶対値で最大0.05Gを示しているが、走行実験の結果は横加速度の移動平均値で最大約0.06Gとシミュレーションでの値に近い値を示している。このことから、シミュレーションと同様にサンプル点の移動距離を変化させる制御周期(時間)の増減によって、横加速度の限度を越えないように車線変更の制御が可能であることがわかる。シミュレーションとの大きな違いは既に述べた制御遅れの影響である。また、

図12 車線変更の実験の様子

Fig. 12. Experimental result of lane change maneuvers.

図13 走行実験と同設定のシミュレーション結果

Fig. 13. Simulation result of same setup on experiment.

図14 ドライバによる車線変更

Fig. 14. Lane change maneuvers with drivers.

実験では参照線を検出するために10本の探索線を用いているが、実環境では、探索線上にサンプル点が検出されない場合があった。検出されるサンプル点の数が大きく変化した場合、近似される三次曲線の形状も変化するため、操舵角に影響が生じる。これは、画像処理の改善により解決することが可能であるが、実験では、6本以上の探索線上のサンプル点が検出できれば、制御に大きな支障は生じていない。このことから、提案する制御アルゴリズムはロバスト性をもつことがわかる。

さらに、ヒューマンドライバによる車線変更の実験と自動車線変更の比較を行った。自律車両の自動運転機能を解除して同一車両を用いて行った実験結果を図14に示す。ドライバは、図14の(a)が50歳代の運転歴20年余りの男性、(b)が20歳代の運転歴10年余りの女性のものである。図14で示す計測結果では、はじめに車線追従を行わせ、計測周期40periodを境に、約6secという車線変更時間の制約を与えて車線変更を行わせた。計測結果より、車線変更時間を制約したことで2人のドライバの操舵角の変化には共通点が多く、これらは図11で示した自動運転による車線変更時の結果とも変化がほぼ一致していることがわかる。

〈5・4〉 実験結果の考察 提案した制御アルゴリズムを用いた走行実験の考察について述べる。まず、ビジョンを用いた車線変更の制約として、車両速度によって急激な姿勢変化をまねかないこと、視野範囲内から参照線を見失うことが無いようにすることに関しては、シミュレーションや走行実験から満たされていることがわかる。また、車線変更の評価指標の一つである車線変更時間(距離)は、シミュレーションと実験の結果から、曲線の変化関数を用いてサンプル点の距離を移動する時間を増減させることで、変化させることが可能であり、車線変更中には常に車両方向が変化するように無駄のない制御を実現していることがわかる。ヒューマンドライバによる車線変更と比較すると、制御の連続性と安定性の面から、横加速度を制限した場合には、車線変更時間が短くすることが可能であることがわかる。さらに、車線変更時の乗り心地に関して、横加速度の変化からヒューマンドライバによる車線変更と比較すると、ほぼ横加速度の変化は一致しており、操舵角の変化からみて、滑らかに乗り心地の良い車線変更制御が実現されている。サンプル点の距離を移動する時間を増減することで、横加速度を制限して制御することが可能であり、乗り心地の調整が可能である。これらのことから、提案する制御アルゴリズムによるビジョンを用いた自動車線変更は、実現可能であり、ヒューマンドライバによる運転に近く、横加速度も低く抑えられていることから乗り心地も良いという特徴をもっている。

6. ま と め

本論文では、参照線としてレーンマーカを用いた自律車両の車線変更について提案した。シミュレーションと屋外での自律走行実験ならびにヒューマンドライバによる走行

実験について述べ、それらの結果からラテラル制御アルゴリズムの車線変更操作への適用における有効性を示した。実験結果は乗り心地の良い安定した効率的な車線変更が可能であることを示している。

今後は、サンプル点の移動距離の変化方法等についてさらに検討を重ね、制御遅れの補償も含め、走行実験を通じて提案する制御手法の改良を行う予定である。

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」によるものである。

(平成11年10月20日受付)

文 献

- (1) 津川：自動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)
- (2) 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)
- (3) 津川，ほか：インテリジェントビークルのためのプレビューラテラル制御，電気学会道路交通研究会資料，RTA-90-20 (1992)
- (4) K. Tomita, et al. : Preview Lateral Control with Machine Vision for Intelligent Vehicles, Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium '93, pp.467-472 (1993)
- (5) 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)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) Uno, et al. : A Merging Control Algorithm based on Inter-Vehicle Communication, Proc. of the 1999 IEEE/IEE/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.783-787 (1999)
- (9) 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)
- (10) S. Tsugawa, et al. : A Lateral Control Algorithm for Vision-Based Vehicles Applicable to Various Maneuvers, 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, CD-ROM (1997)
- (11) 津川，ほか：道路端情報に基づくインテリジェントビークルの操舵制御，電気学会道路交通研究会資料，RTA-94-12 (1994)
- (12) K. Tomita, et al. : Visual Navigation of A Vehicle Along Roads: The Algorithm and Experiments, Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings, pp.419-424 (1994)
- (13) J. K. Hedrick, et al. : Control issues in automated highway systems, IEEE Control Systems, pp.21-32 (1994)
- (14) B. Ulmer : VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic, Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium '94, pp.1-6 (1994)
- (15) W-S. Chee, et al. : Lane change maneuver of automobiles for the intelligent vehicle and highway system (IVHS), Proc. of the 1994 American Control Conference, pp. 3586-3587 (1994)
- (16) P. Fanché, et al. : Test procedures for studying vehicle dynamics in lane-change maneuvers, SAM paper, 760351 (1976)
- (17) T. Jochem, et al. : Vision Guided Lane Transition, Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium '95, pp.30-35 (1995)
- (18) S. Kato, et al. : Lane-Change Maneuvers for Vision-Based Vehicle, Proc. of the 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.129-134 (1997)
- (19) 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，電気学会道路交通研究会資料，TER・RTA-98-6 (1998)
- (20) S. Tsugawa, et al. : Optimal Design of Vision System for Lateral Control of Autonomous Vehicle, Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.369-374 (1998)
- (21) 津川，ほか：知能自動車に関する研究，機械技術研究所報告第156号 (1991)

加 藤 晋 (正員) 1989年明治大学工学部電子通信工学科卒業。1994年同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1994年～1997年科学技術特別研究員。1997年工業技術院機械技術研究所入所，現在に至る。マシンビジョン，ナビゲーション，ITS特にAVCSSの研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会，日本機械学会，計測自動制御学会，電子情報通信学会，自動車技術会会員。

津 川 定 之 (正員) 1968年東京大学工学部計数工学科卒業。1973年同大学院工学研究科博士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所入所，現在，物理情報部知識工学研究室室長，筑波大学連携大学院教授に併任。ITS，特に自動運転をはじめとするAVCSSの研究に従事。工学博士。1992年計測自動制御学会論文賞蓮沼賞受賞，1999年科学技術長官賞受賞。日本機械学会，計測自動制御学会，自動車技術会などの会員。