

# 外界センシングとシャシー制御による 限界コーナリングの制御システム

Critical Cornering Control System by External Sensing and Chassis Control

野崎博路<sup>\*</sup>)

Hiromichi Nozaki

自動運転の近い将来の実用化が期待されている。一方、運転する楽しみも重要であり、これらが自由にスイッチで切り替えられる方向が望ましいと考えられる。いずれにせよ、共に交通事故0を目指した開発が望まれる。そこで、前報に引き続き、外界センシングとシャシー制御による、限界コーナリング制御システムについて検討を行い、その有効性を明らかにした。

The practical use of automatic driving in the near future is expected. On the other hand, it is thought that the direction where the driving pleasure is important, and these are freely changed by the switch is preferable. Anyway, development aims at both is hoped for traffic accidents 0. Then, following the previous my paper, a critical cornering control system using external sensing and chassis control was examined and its effectiveness was clarified.

## 1. はじめに

走行安全性の向上には、近年目覚ましく性能向上している、外界センサによる情報フィードバックは、予測的コントロールでドライバの運転操作をより正確にアシストでき、走行安全性に大きく寄与できる。

そこで、本論文では、前報(参考文献1, 2)に引き続き、以下の検討を行った。具体的には、ドライビングシミュレータを用いて、外界センサを用いた、目標コース追従制御の手法について検討し、シャシー制御との連動を試みた。更に、製作した小型電気自動車を用い、コーナリング限界での操縦安定性向上を目的に、外界情報フィードバックとシャシー制御による連動の効果について検討した。

限界コーナリング時のシャシー制御は、ヨーモーメントをコントロールする内外輪制駆動力制御に対し、限界横加速度も高めることができるキャンバ角制御は、より効果的と判断できる。一方、微分操舵アシストは、通常領域でも操舵の遅れをカバーでき効果的であるが、特に、コーナリング限界を越えた、ドリフトコーナリング時のカウンターステアにおいて効果的である。

すなわち、ドリフトを伴う限界コーナリングにおいて、微分操舵アシストは、カウンターステアの遅れをカバーできる。

外界センシングによる外界情報フィードバックは、ドライバの操舵の遅れをカバーできる、先読みの効果があり、これ

とシャシー制御を連動させると、更に効果的な限界コーナリングの制御システムになると判断できる。

## 2. ドライビングシミュレータによる実験

### 2.1 外界情報フィードバックとシャシー制御の連動の実験に用いたドライビングシミュレータ

ドライビングシミュレータは、緊急回避等の実験を容易にできる利点がある。そこで、三菱重工業(株)と共同開発した「ドリフトコーナリング対応ドライビングシミュレータ(図1)」を用いて実験を行った。このドライビングシミュレータは、各自由度を独立させ、大きなヨーイングと大きな横加速度を体感可能としている。すなわち、無限回転可能なヨーイング

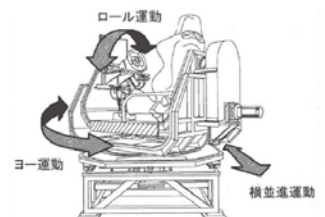


図1 ドリフトコーナリング対応ドライビングシミュレータ

<sup>\*</sup>)工学院大学工学部教授

機構を有し、また、ロールにより、定常的な横加速度を模擬させ、並進運動により過渡的な横加速度を模擬し、合成することにより、実走行時の大きな横加速度(±0.7G)をシミュレートしたものである。

## 2.2 外界センシングアシストとシャシー制御

ドライビングシミュレータを用いており、目標コース追従制御の方式を図2に示す。目標コースが白線間の中央に位置する時、車両正面検知距離Lの左右2つの外界センサにより車両前方と目標コースの方位角 $\theta$ を求める。式(1)に示すように、車速、旋回半径を考慮した操舵ゲインと方位角 $\theta$ より操舵角を算出し出力する。方位角 $\theta$ を操舵角にフィードバックすることで、コース追従を行う。

また、車速ごとに検知距離及び操舵ゲインを変化させ回避可能となる検知距離及び操舵角をシミュレーションにて把握した。

ここでは実験結果は省略するが、車速に対して検知距離は比例し、操舵角は反比例することがわかった。また、直線走行時は線形の傾向に対して、旋回中の障害物回避の場合は非線形であった。これは、旋回時に横加速度が生じている状態において障害物回避を行っているためと判断できる。

しかし、実車への適用を考えると、目標コースとの方位角のズレをフィードバックしているので、線形とみなして検知距離と操舵ゲインの制御定数を変化させても問題なさそうと判断できる。

$$\delta_a = a \cdot \theta \cdots \cdots (1)$$

$$\left( \begin{array}{l} \delta_a : \text{アシスト操舵角} \\ a : \text{車速と旋回半径を考慮した操舵ゲイン} \\ \theta : \text{目標コースに対する方位角} \end{array} \right)$$

また、目標コース追従制御を応用した障害物回避アシスト

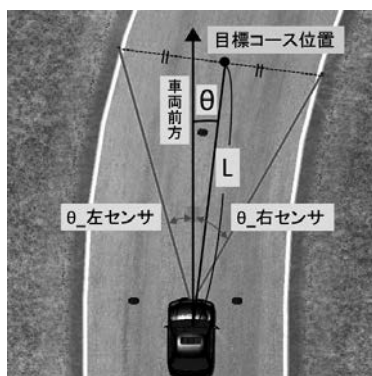


図2 目標コース追従制御の方式

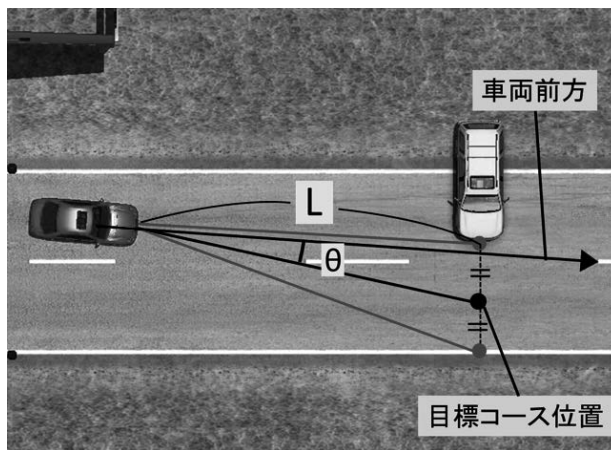


図3 目標コース追従制御を応用した障害物回避

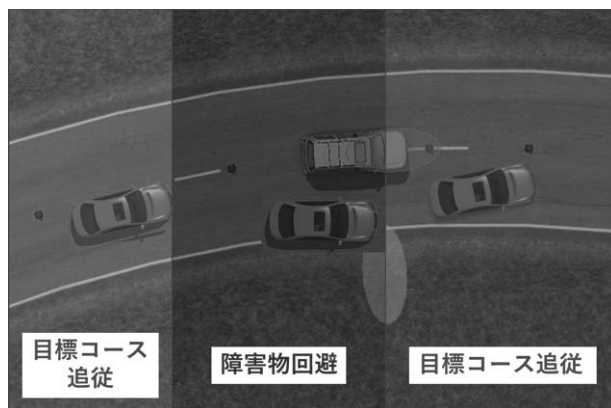


図4 目標コース追従制御と障害物回避プログラム

は、図3に示すように、走行車線上に障害物を検知した際に、対向車線の白線及び障害物から目標コースとの方位角をフィードバックしアシスト操舵の出力により障害物回避を行う。

回避後は目標コース追従制御として白線間中央を目標コースとし、走行車線への復帰へのアシスト操舵を行う(図4)。

ここでは、目標コースの追従制御を応用し、旋回中の障害物回避を行った。

目標コースの追従制御{アシスト操舵(100%)}と手動操舵(100%)を比べ、制御の効果を把握した。ここで、アシスト操舵(100%)とは、ドライバ操舵無しで、全自動操舵のケースを示す。

コーナリング限界領域の旋回中の障害物回避実験における走行結果を操舵角で比較した。

図5は旋回半径Rが75m、車速71km/hにおける操舵角を示す。障害物回避及び、復帰操舵において目標コース追従制御の操舵角は抑えられ、収束しており安定していることがわかった。

次の実験では白線と障害物検知の複合による目標コース追従制御にシャシー制御を導入することによる効果把握を行った。

目標コースの追従制御 {アシスト操舵(50%)+手動操舵

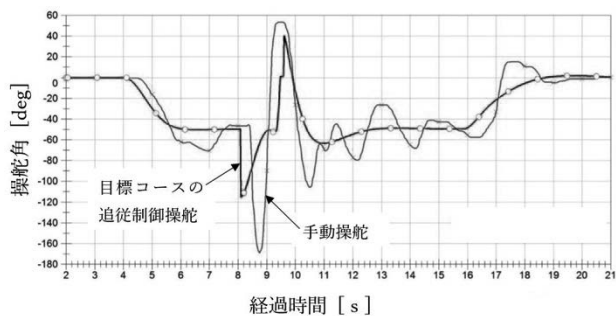


図5 旋回中の障害物回避実験結果(旋回半径R75m, 車速71km/hの操舵角)

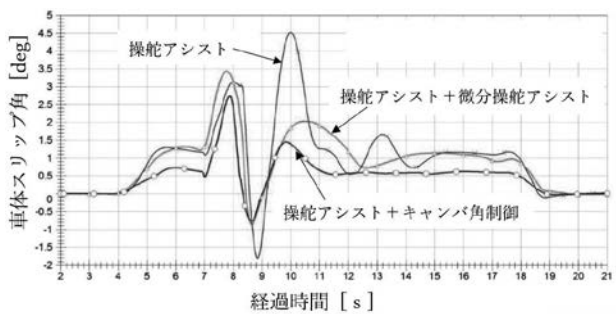


図6 旋回中の障害物回避実験結果(旋回半径R100m, 車速83km/hの車体スリップ角)

(50%)} とシャシー制御(キャンバ角制御, あるいは, 微分操舵アシスト制御)を複合した, 3通りのケースでコーナリング限界領域における比較を行った. ここで, {アシスト操舵(50%)+手動操舵(50%)} は, ゲイン定数を50%ずつとした, いわゆる半自動操舵のケースを示す.

旋回半径R100m, 車速83km/hの走行結果を図6に, 車体スリップ角の時系列波形を示す.

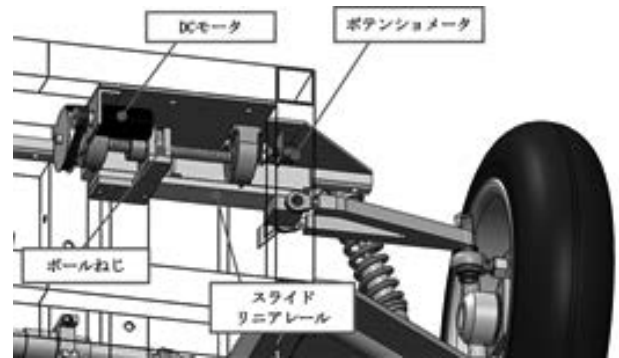
図6において, キャンバ角制御は回避操舵後の最大車体スリップ角は, 制御なしの場合と比較し抑えられている. 微分操舵アシスト制御は障害物回避から旋回到復帰する車体スリップ角が抑えられている.

### 3. シャシーテストカーによる実車実験

#### 3.1 製作したシャシー制御車両

実車では, キャンバ角制御の検討のため, 図7の様な, 小型電気自動車のシャシーテストカーを製作し, その効果を把握した. キャンバ角は,  $\pm 20\text{deg}$ の可変構造とした. タイヤは, キャンバ角制御を効果的に作用させるため, 接地面形状の丸いタイヤである2輪車用タイヤを装着した.

本実験で用いた, 微分操舵アシストを組み込んだステアパイワイヤの制御式は式(2)となり, その機構を, 装着した外界センサと共に, 図8に示す. 車体スリップ角が規定値未満の時は $P=0$ , 車体スリップ角が規定値以上の時には,  $P=0.07$ の微分操舵アシストを加える制御を行った.

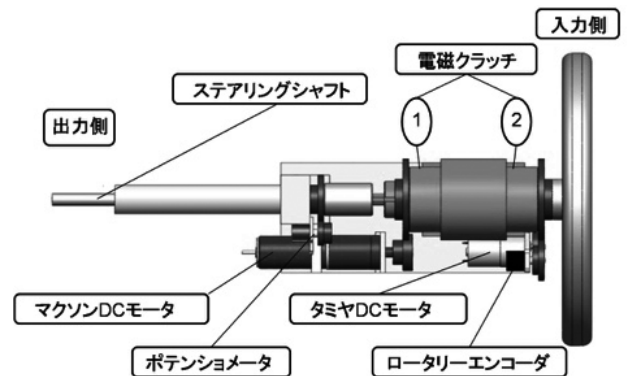


(a) キャンバ制御機構



(b) 実車の様子

図7 製作したシャシー制御車両



(a) ステアパイワイヤ



(b) 外界センサ

図8 製作したステアパイワイヤおよび装着した外界センサ



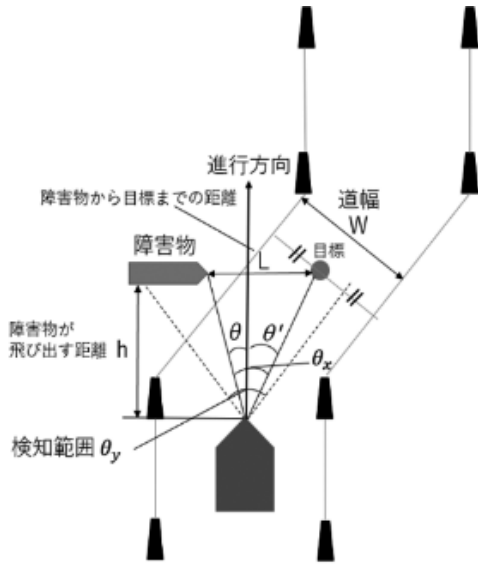


図9 障害物回避モデル

$$\delta_f = \delta_H / N + P \cdot \dot{\delta}_H \quad \cdots (2)$$

$\delta_f$ : 前輪実舵角,  $\delta_H$ : 操舵角,  $\dot{\delta}_H$ : 操舵角速度,  
 $N$ : ステアリングギヤ比,  
 $P$ : 微分操舵アシスト定数

### 3.2 外界情報フィードバックシステム

ステレオカメラにおいて任意に設定した前方注視距離、移動幅から構成される物体検知範囲内に左右から進入した物体を検知し、座標に変換する、物体との前後方向距離 $x$ と中心線から障害物の中心までの横方向の距離 $y$ から(3)式を用いて算出される障害物検知角度 $\theta$ をマイコンに送信し、(4)式で算出した値をもとに制御を行い、ステアバイワイヤのモータドライバを介して前輪実舵角を操舵させるという手段をとった。障害物回避モデルを図9示す。

$$\theta = \arctan \left( \frac{y}{x} \right) \quad \cdots (3)$$

$$\text{前輪実舵角} = k \times \theta' \quad \cdots (4)$$

$$(\theta' = \theta_x - \theta)$$

(ここで、 $k$ は操舵ゲイン定数)

#### 3.2.1 移動障害物回避実験

この実験は、低速時に、実験車両が走行中に死角から前方に飛び出した移動障害物を回避するというものである。また、回避の際に、障害物検知時に操舵アシストと同時に後輪キャンバ角の制御( $\pm 10$  deg)を加えることが車体の挙動に及ぼす効果を検証した。前輪操舵アシストとキャンバ角制御を行った際のヨーレイトを図10示す。

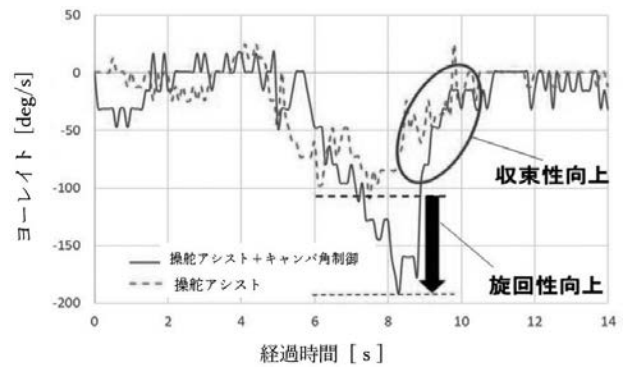


図10 移動障害物回避実験のヨーレイト

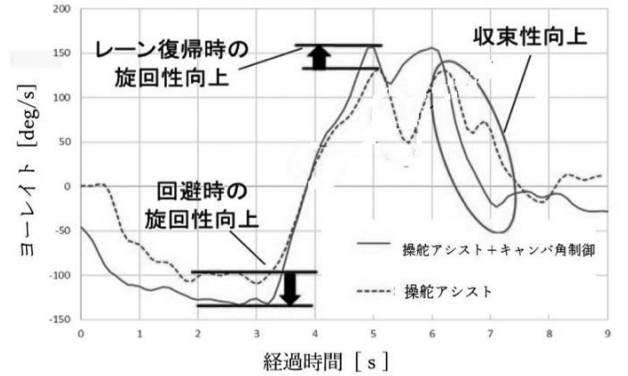


図11 回避後対向レーンに復帰を行う実験のヨーレイト

図10よりアシスト操舵(100%)のみの場合に比べ、キャンバ角制御を加えた(アシスト操舵(100%) + キャンバ角制御)の方がヨーレイトの制御値が最大約80deg/sec大きくなっており、キャンバ角制御を障害物回避動作に加えることで回避時の回頭性と収束性が向上したことを確認した。ここで、アシスト操舵(100%)とは、ドライバ操舵無しで、全自動操舵のケースを示す。

#### 3.2.2 移動障害物回避後に対向レーンに復帰を行う実験

3.2.1の実験に対し、更に、移動障害物を回避した後にレーンに復帰する実験を行った。また、3.2.1の実験と同様に、回避の際に、障害物検知時に操舵アシストと同時に後輪キャンバ角の制御( $\pm 10$  deg)を加えることで回避時とレーン復帰時に車体の挙動に及ぼす効果について検証した。実験におけるヨーレイトの結果を、図11に示す。

後輪キャンバ角制御有りの方は、後輪キャンバ角制御無しに比べ、ヨーレイトは2.7(sec)付近で最大約40(deg/sec)増加していることが確認でき、後輪キャンバ角制御によって車両の障害物回避を行うことで、回避動作時の回頭性が向上したことが確認できたとともにドライバのフィーリング評価でも明らかに向上が確認できた。

同様に5(sec)付近において、後輪キャンバ角制御ありの場合は後輪キャンバ角制御なしに比べ、ヨーレイトは最大約30

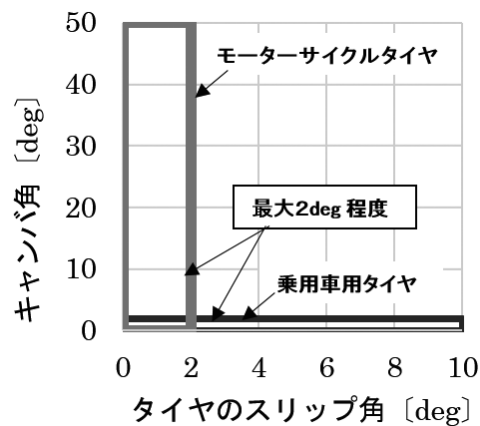


図12 4輪用タイヤと2輪用タイヤの通常走行時の使用領域の違いを示す概略図

(deg/sec)増加していることが確認できた。このことから回避後のレーン復帰においても車両の回頭性が向上したことがわかる。また、4(sec)、5(sec)、6(sec)付近において波形が後輪キャンバ角制御なしにくらべて後輪キャンバ角制御ありの方が速やかに推移していることから、キャンバ角制御によって車両の障害物回避完了からレーン復帰動作への移行及びレーン復帰完了までの収束性が向上したことを確認できた。

#### 4. キャンバ角制御の効果的な専用タイヤの考察

自動車のキャンバ角制御について考察する。

図12に示すように、4輪の自動車はタイヤのスリップ角に応じた横力を主に利用してコーナリングしているが、2輪車はタイヤのキャンバ角に応じたキャンバスラストを主に利用してコーナリングしている。

しかし、本研究により、4輪の自動車において2輪車のように、キャンバスラストを積極的に利用した場合、限界コーナリング性能が向上することがわかった。

一方、課題としては、実験車両は、仮に接地面が丸い形状である2輪車用のタイヤを用いてキャンバ角制御の効果を把握したが、望ましいのは、キャンバ角制御車両用に接地面の幅は広く、しかし接地面は丸みがあり、すなわち、2輪車用タイヤと4輪車用タイヤの中間ぐらい形状のキャンバ角制御車両に適した専用タイヤである。その様な専用タイヤの開発が、キャンバ角制御の実用化に繋げる為に有効ではと思われる。図13にその略図を示す。

#### 5. おわりに

外界センサを用いた、目標コース追従制御の手法について検討し、シャシー制御との連動を試みた。その結果、実走行でも、限界コーナリングが明らかに向上しており、その効果

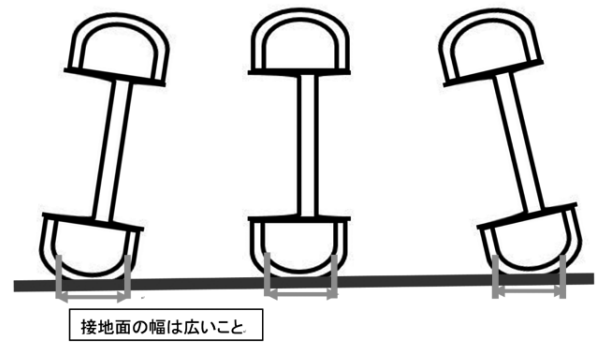


図13 キャンバ角制御車両に適した専用タイヤ案の略図

が確認できた。

外界センシングによる、半自動運転における、基本的な操舵アシスト手法について明らかにすることができた。

また、シャシー制御で特筆できるのは、Jターン走行試験から、キャンバ角制御を加えたケースでは、キャンバ角制御を行っていない車両に比べ、明らかに旋回に要する操舵角の量が減少することもわかった。

結果的に、4輪車両でも2輪車のような、キャンバスラストでコーナリングする体感フィーリングも加わり、シャープなヨー応答レスポンスで、タイヤのエッジ効果の効いた高い限界コーナリング性能が味わえることがわかった。

微分操舵アシストもドリフトコーナリング時のカウンターステアの遅れを低減し、キャンバ角制御と共に、外界センサとの連動で限界コーナリング性能が向上することがわかった。

#### 参考文献

- 1)野崎博路, 山口亮, 吉野貴彦: 外界情報フィードバックとシャシー制御の連動によるコーナリング限界での運転支援システムの考察, JAHFA(JAPAN AUTOMOTIVE HALL OF FAME), No.17, 2017年, pp.93-96,
- 2)野崎博路, 山口亮: 小型電気自動車におけるシャシー制御と外界情報フィードバックによるコーナリング限界の性能向上, JAHFA(JAPAN AUTOMOTIVE HALL OF FAME), No.18, 2018年, pp.97-100,
- 3)野崎博路, 自動車の限界コーナリングと制御, 東京電機大学出版局, 2015.