

# 緊急回避時におけるリスクポテンシャルモデルに関する研究

日大生産工(院) ○小林 祐人 日大生産工 景山 一郎  
 (株)本田技術研究所 坪内 淳志 木滝 泰隆 伊藤 憲悟

## 1 まえがき

近年, 自動車の評価内容として車両の限界得性を評価することが重要になってきている. 限界特性を評価する方法として緊急回避時を模擬したダブルレーンチェンジ(以下, DLC)がある. この試験では横方向加速度が1[G]近い値での車両運動となり, 車両の非線形性が強く表れる. CAEで性能を評価及び解析する際, 人間の運転行動を表現したドライバモデルを用いて評価を行っている. しかし, 緊急回避における車両運動は非線形性が強いいため, ドライバの運転行動を再現することが困難である. 従来のドライバモデルの多くは目標コースを定義して, これを追従するものが多く, 目標コース決定過程を含まないモデルとなっているため, モデルの出力の操舵と実験時の操舵は大きくこととなり, 通過する走行軌跡を詳細に表現することが困難となる. また, 緊急回避に着目したドライバモデル<sup>1) 2) 3)</sup>が提案されている. これらの車両運動は0.5[G]付近での運動であるため, タイヤが発生する力が緩和する領域でのドライバの回避行動を表現することが困難となる. 目標コース決定過程に関して, 景山は人間の危険感覚を指数関数で表現した危険感ドライバモデル<sup>4)</sup>の提案を行った. モデルの出力結果が実験結果と酷似する結果を示した. 本研究ではこの危険感の一連のアルゴリズムをリスクポテンシャル(以下, RP)と定義する. この研究では障害物に対してRPを定義しているのに対して, DLCにおける試験ではパイロンを用いたコースを規定し, 模擬緊急回避走行を行うため, 仮想の障害物に対してRPを定義することが困難となる. そこで, ドライバが感じるRPとDLCコースにおける関係を明らかにし, 目標コース決定過程を含めた制御アルゴリズムの構築と, それを用いた緊急回避モデルの提案を行う. 本研究ではDLCにおけるドライバの運転行動から, ドライバモデルにおけるフィードフォワード制御, フィードバック制御, 車両

安定化制御, プログラム制御のアルゴリズム構築を行う.

## 2 走行実験

ドライバモデルを構築するにあたり, DLCでのドライバの運転行動を計測した. 本研究で用いる DLC コースを図 1 に示す. 緊急時を模したコースを規定し, 図における赤色の実線部分はパイロンを 3.05[m]で等間隔に設置し, 10.67[m]の位置に目印を置いた. 実験参加者はテストドライバ 3 名, A, B, C とし, 車速は 65, 68, 70[km/h]の 3 条件, 各 2 セットずつ実験を行った. また, 走行方法を以下に示す.

- 1: 第 1 区間(パイロン 1~3, 2~4)を直進走行
- 2: 約 36[m]に障害物が飛び出してきたと仮定し, 第 2 区間(パイロン 5, 6)に回避
- 3: 第 3 区間(パイロン 7~9, 8~10)で第 1 車線に復帰

また, 第 1 区間における目印を通過した後, ドライバはアクセルをオフにし, 操舵のみで走行させた.

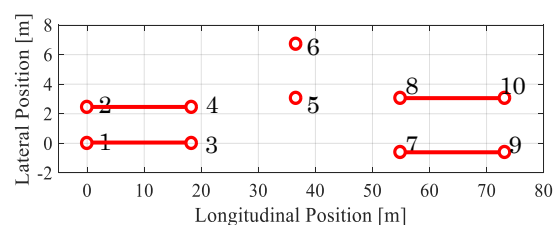


図 1 コースレイアウト

実験車両は標準サイズ国産コンパクトカーとし, 走行中の車両挙動及びドライバの運転行動を認識するため, 現在位置を含む車両応答を計測する必要がある. 本実験では, RTK-GPS, 光学式速度計, ハンドル角力計, ジャイロセンサ, 3 軸加速度計を用いて, 前後方向速度, 横速度, 横方向加速度, 操舵角,

Study on the Risk Potential Model at Obstacle Avoidance

Yuto KOBAYASHI, Ichiro KAGEYAMA,  
 Atsushi TSUBOUCHI, Yasutaka KITAKI and Kengo ITO

ヨーレイト，車両軌跡等を計測した．実験参加者 A における結果の 1 例を図 2 に示す．横方向加速度が 1[G]を超える車両運動となるが，1 秒前後における操舵角を見ると速度の変化に関わらず同じ操舵角を入力している．しかし，走行軌跡を見ると 68[km/h]以降は大きく外側に膨れて走行している．これは車両の非線形性が強く表れているためであると考えられ，本研究ではこのような車両運動時におけるドライバの運転行動を表現したモデルを構築する．

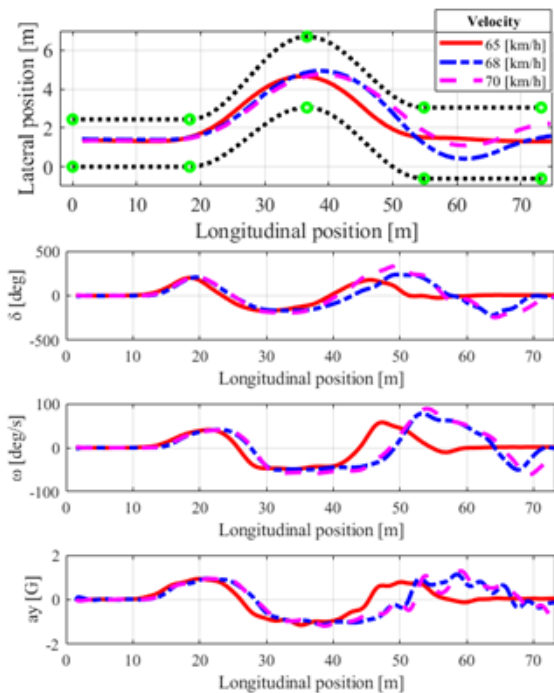


図 2 実験結果

### 3 ドライバモデル

図 3 に本研究で構築するドライバモデルを示す．フィードフォワード制御ではコース情報から RP を用いて目標コースを算出し，操舵角を求める．ドライバを表現するにあたり，このフィードフォワード制御がモデルの中心となる．また，フィードバック制御では将来位置における RP の差から操舵角を算出する．ヨー角速度差を用いた車両安定化制御ではドライバの車両を安定させるカウンターステアを算出する．第 1 区間におけるドライバの入力に一貫性があることから，この区間における操舵角は三角関数を用いたプログラム制御とした．次章以降各アルゴリズムの詳細について説明する．

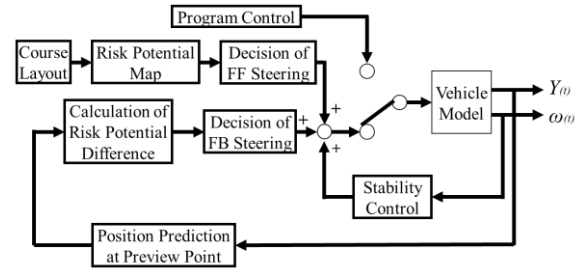


図 3 ドライバモデル

### 4 フィードフォワード制御

ドライバはコース環境から目標コースを決定していると考えられる．本研究では RP をコース路肩，コース曲率，コース曲率の微分値の 3 つを定義した．それぞれ RP の算出式を式(1)から(3)に示す．係数 A はコース路肩における RP 関数の係数となり，緩和長 L は指数関数の立ち上がりを示している．この L は時間領域における時定数に相当する値であり，人間の危険感覚に依存する．RP の計算方法は進行方向 0.1[m] 間隔で横方向に対してコース断面の RP を算出する．その際，コース路肩の座標を  $Y_{end}$  となり，0.001[m] ごとの座標 Y を代入して計算を行う．また，係数 A の中身にあたる x がドライバのその要素に対する重みとなる．

$$R = A \times e^{\left\{ \pm \frac{1}{L} \times (Y - Y_{end}) \right\}} \quad (1)$$

$$R_\rho = A_\rho \times e^{\left\{ \pm \frac{1}{L_\rho} \times (Y - Y_{end}) \right\}} \quad (2)$$

$$R_{\dot{\rho}} = A_{\dot{\rho}} \times e^{\left\{ \pm \frac{1}{L_{\dot{\rho}}} \times (Y - Y_{end}) \right\}} \quad (3)$$

$$\text{但し, } A_\rho = \rho \times \frac{V_x^2}{g} \times x_\rho, \quad A_{\dot{\rho}} = \dot{\rho} \times \frac{V_x^2}{g} \times x_{\dot{\rho}}$$

これらを用いてコース全体の RP マップを算出し，ドライバの目標コースを決定する．図 2 における走行軌跡がドライバの感じる RP の最小と仮定して RP マップの構築を行った．算出した 65[km/h] における RP マップを図 4 に示す．目標コースの算出方法は初めに各 RP をコース左側とコース右側に分け，それぞれ線形結合し，左右それぞれ 1 個ずつの RP を算出する．その 2 つの RP の最大値をとる max 結合を行う．左右の RP の交点が RP の最小ポイントとなり，ドライバの目標コースを表現する．RP マップは算出式の中にあるドライバを表現するパラメータとして係数 A もしくは重み x，そして緩和長 L の計 12 個を実験結果の走行軌跡と合うように最小二乗法を用いて算出した．RP マップにおける黄色の実線がリスクミニマムポイントと

なり、目標コースとなる。赤色の破線が実験結果の走行軌跡となる。マップのカラーバーマップはRPが大きくなるにつれて黄色へと変化する。RPの値は路肩を1とする無次元化した値を用いているため、RPの値にゲインを掛け合わせることで意味を持つものになる。また、図を見やすくするため、8以上の値は一定として示す。

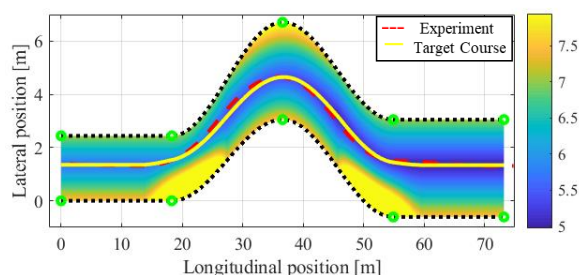


図4 リスクポテンシャルマップ(65 [km/h])

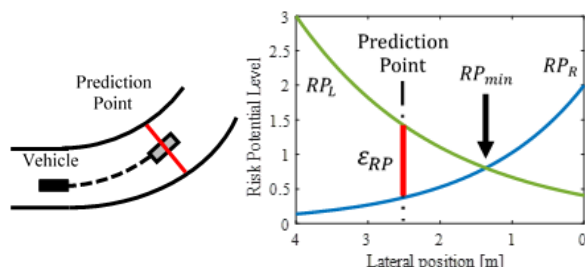
この目標コース決定過程を用いてフィードフォワード制御における操舵角を算出する。RPマップにおける目標コースの曲率を算出し、その曲率値にステアリングゲインを掛け合わせて操舵角を算出する。しかし、ドライバは曲率の最大値より先に操舵角の最大値を取りながら運転している。したがって、本研究では実験結果の操舵角との時間のずれを前方注視時間として定義し、相関係数を用いて算出する。そして、最小二乗法を用いてステアリングゲインを算出する。その際、2つのパラメータをドライバは時々刻々変化させながら走行していると考えられるため、自車の位置から1[s]後まで実験結果の操舵角を用いて解析し、算出された値を解析地点から0.5[s]後の操舵角に反映させて解析を行った。この方法により、モデルのステップ時間の間隔で解析を行うことができ、パラメータが時々刻々変化することになる。以上がフィードフォワード制御における操舵角の算出方法となるが、第1区間におけるドライバの操舵方法に一貫性があることから、操舵入力をプログラム制御とし、三角関数を用いた関数を用いた。この制御はフィードフォワード制御とは異なり、周期関数として決めたことから、スイッチングするモデルとなる。

## 5 フィードバック制御

ドライバは車両情報から自車が将来、どこに行くかを予想し、その予測位置と目標コースとの位置の関係をフィードバックして走行を行っていると考えられる。そこで、本研究のドライバモデルでは前方注視2次予測モデルを用いて

将来位置を算出し、その位置におけるRPの差から算出した操舵角をフィードバック制御における操舵角とした。

フィードバック制御のアルゴリズムを図5示したものを図5に示す。将来位置におけるRPを算出する際、XY座標と共に図5(a)の赤線にあたる将来位置における車両法線方向のコース路肩の座標が重要になる。そこで、前方注視2次予測モデルを用いて座標を算出し、将来位置における車両のヨー角を算出するため、自車の車両情報をフィードバックし、将来位置の算出を行った。将来位置を算出するにあたり、前方注視時間Tの取り方が重要になる。ドライバは時々刻々視点を変えて走行していると考えられるため、第4章フィードフォワード制御の操舵角における前方注視時間の値を用いて将来位置の計算を行うものとする。その将来位置におけるRPの差からフィードバック制御における操舵角を算出した。RPマップで算出した左右それぞれのRPから、図5(b)の赤線にあたる将来位置におけるRPの差にステアリングゲインを乗じたものがフィードバック制御における操舵角となる。ドライバモデルに反映させる際に右側のRPから左側のRPを引くことにより、RPの差が正の場合には操舵を左に切り、負の場合は右に切るものとした。



(a)前方予測 (b)将来位置におけるRP

図5 将来位置におけるRP差の算出方法

## 6 車両安定化制御

ドライバはDLCのように横方向加速度及びヨー角速度が高い車両運動の際、横すべりを起こさないように車両挙動をコントロールしながら走行する必要がある。図2に示すように第3区間ではドライバはカウンターステアを行い走行している。そこで、本研究では車両とのヨー角速度差を用いて車両安定化制御を構築した。

ドライバは操舵角に対してどの程度車両のヨー角速度が発生するか予測しながら走行していると考えられる。実際の車両ヨー角速度がこの目標値を超えた場合、ドライバはその差がなくなるように操舵角を入力していると考え

られる．そこで，第4章で算出したRPマップの目標コースを用いて目標ヨー角速度を算出する．この目標ヨー角速度と車両のヨー角速度との差をフィードバックし，ステアリングゲインを掛け合わせることでフィードバック制御における操舵角を算出する．また，目標ヨー角速度から車両のヨー角速度を引くことでカウンターステアのような逆操舵を表現する．

## 7 ドライバモデルの評価

構築したドライバモデルを評価するにあたり，緊急回避時の車両運動は非線形性が強いことから，マルチボディダイナミクスソフトウェア(CarSim)の車両モデルを用いて評価を行った．その際に車両モデルが実験車両を表現する必要がある．そこで，CarSim内におけるタイヤのパラメータを変化させ，条件を統一した．

解析結果を図6に示す．構築したドライバモデルは実験結果と酷似する結果が得られた．特に第3区間におけるドライバの操舵入力を記述した．ここで車両安定化制御のない場合と従来のモデルとして前方注視2次予測モデルとの比較を行うため，操舵角と走行軌跡に関して積分二乗誤差(以下，ISE)を算出した．算出した結果を図7に示す．左3つが前方注視2次予測モデル，右から2つ目が車両安定化制御のないド

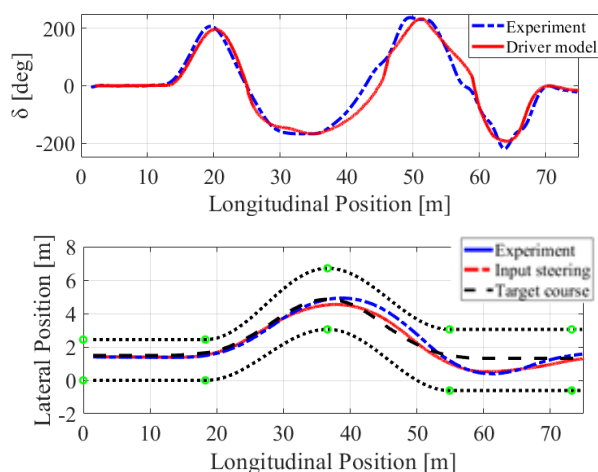


図6 ドライバモデルの出力

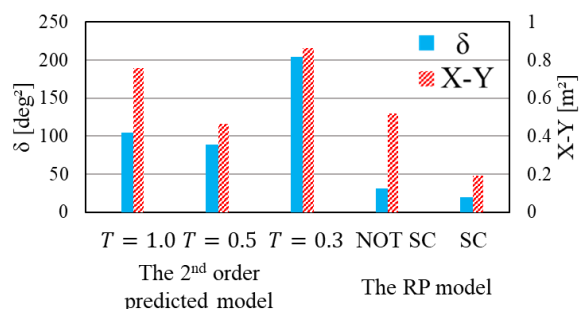


図7 各ドライバモデルのISE

ライバモデルとなり，一番右が構築したドライバモデルとなる．構築したドライバモデルは他のモデルより小さい結果が得られた．

## 8 まとめ

車両挙動の非線形性が強い緊急回避時のドライバモデルの提案にあたり，RPを用いたドライバの目標コース決定過程を含めた制御アルゴリズムの構築を行った．結果として，定性的かつ定量的に構築したドライバモデルが実験結果と酷似する結果が得られた．したがって，緊急回避時のドライバの制御入力プログラム制御，フィードフォワード制御，フィードバック制御と車両安定化制御の4つに分けられる．

今後の課題として，自動運転システムに向けて前後方向及び横方向制御の構築が必要となる．また，本研究の実験では仮想的に障害物を回避したため，実際に動く障害物に対するドライバの運転行動を計測し，どのようにRPが変化するか検討を行う必要がある．

## 「参考文献」

- 1) ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク：リスクポテンシャル予測による自動車の障害物回避運動制御，計測と制御，Vol.54，No.11，2015，pp.820-823
- 2) 横山貴士ら：緊急行動を伴うドライバモデルに関する研究，土木計画学研究・講演集，No.20(2)，1997，pp.303-305
- 3) CHARLES C.MACADAM：Understanding and Modeling the Human Driver，Vehicle System Dynamics，Vol.40，Nos.1-3，2003，pp.101-134
- 4) 景山一郎：前方視野の危険感を用いたドライバモデルについて，自動車技術会論文集，Vol.24，No.2，1993，pp.81-87