

路面状況に注目したドライバの操舵特性に関する研究

日大生産工(院) ○田村 悠一郎 日大生産工 景山 一郎
日大生産工 栗谷川 幸代

1. 序言

近年, 自動車は, 便利で快適な交通システムとして, 非常に多くの人に利用されている. それゆえ, 現代交通社会の大きな課題の一つに, 車両の安全性, 快適性の確保が挙げられる. 特に, 圧雪路や氷路など低 μ 路では, 車両の操縦性・安定性が乾燥路にくらべ著しく低下するためドライバにとって負担や危険を伴う走行となる. これには, 自動車単体の基本運動性能の向上はもとより, ドライバの操縦動作を考慮した車両制御システムが必要と考えられる. また, ドライバに違和感を感じさせることなく, 車両を制御するにはドライバの運転意図を制御システム側がくみ取り介入する必要がある. それゆえ, 乾燥路のような通常走行はもとより, 圧雪路や氷路のような操縦性を著しく損なう状況でのドライバの操縦動作の解析が重要となってくる. そこで, 本研究では, 路面摩擦係数の違う(乾燥路, 圧雪路, 氷路)の三種類の路面で実験を行い, 各路面でのドライバの操舵特性の違いを表現するドライバモデルの構築を行った.

2. レーンチェンジ走行試験

2.1 実験概要

路面摩擦係数の低下がドライバの操舵に及ぼす影響を観察するために乾燥路, 圧雪路, 氷路の三種類の路面においてパイロンで囲まれたレーンチェンジ走行試験を行った. 各路面の特性として車体速度40km/hで行ったロック制動試験によって求めた動摩擦係数を表1に示す. 実験コースは直線部とレーンチェンジ部からなり, レーンチェンジ部は式(1)に示すような車体縦方向速度 v の関数としている. 式中の t は時間 s である. 実験コースと各路面での車両軌跡を図1に示す. 実験車両は国産3000ccの普通乗用車を使用し, 被験者は男性, 年齢55歳, 運転歴36年の熟練ドライバで行った. 被験者には車体速度40km/h一定でコースに突入し, ハンドル操作を行いながら通過するよう教示した. 計測項目は自車の状態量, 自車の位置, ドライバの操舵量として操舵角操舵トルクとした.

Table.1 Friction coefficient of road

	Friction coefficient
Dry surface	0.982
Snow surface	0.351
Ice surface	0.157

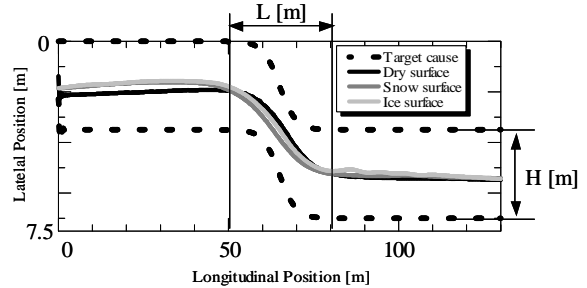


Fig.1 Target cause and Vehicle Position

$$y_f = \frac{H}{2} [1 + \tanh\{p(\frac{2L}{V}t - 1)\}] \quad (1)$$

2.2 実験結果

図1に示した各路面の車両軌跡によると, 乾燥路に対して圧雪路, 氷路では早めにレーンチェンジを開始しており, 乾燥路とは異なった車両軌跡を示している事がわかる. 図2にレーンチェンジ開始にあたる縦方向変位40mから70m区間において各路面の車両軌跡を x の二次関数で近似した際の x^2 の係数を示す. これより乾燥路に対して, 圧雪路や氷路ではレーンチェンジの開始が早いだけでなく走行軌跡が直線に近づいている事がわかる. つまりドライバは路面摩擦係数によって, ハンドル操舵を開始するタイミングや操舵の周波数を変えている事になる.

次に, 路面状況によってドライバの操舵がどのように変化するか注目した. 図3にドライバの車両への操作量である操舵トルクに対し周波数解析を行った結果を示す. 3種類の路面ともコース追従のためのドライバの操舵として0.3Hz付近にピークが現れている. また, 氷路では1Hz付近に2つ目のピークが現れており高い周波数の修正操舵を行っている事がわかる. この結果より, 路面摩擦係数の低下によってドライバがコース追従のための操舵と車両を安定化するための修正操舵の二通りの操舵を行っている事がわかる.

3. ドライバモデルの基本構成

ドライバは通常, 目標コースの情報や自車の状態量を認識しながら車両をコースに追従させるべくステアリングを操舵していると考えられる. そこで前章での結果を踏まえ, ドライバの行う操舵を考えると, 次のような分類が可能となる.

- (1) コースに従った位置規定の操舵

- (2) 車両の安定性を確保する操舵
- (3) 外乱に対する修正や不随意に行う操舵

(1)はドライバが行う第一のタスクであり、前章において0.3Hz付近ピークが見られる操舵となる。(2)は氷路において1Hz付近にピークが見られる修正操舵成分に相当する。(3)は本実験において、主に路面の凹凸による影響となる。そこでドライバの制御アルゴリズムを解明するには、これらの要素を個別に検討し、ドライバモデルの構築を行う必要がある。

3.1 コースに沿った位置規定の操舵

3.1.1 コース情報によるフィードフォワード

コース追従を行う際のドライバへの入力情報について、本研究ではドライバの出力である操舵トルクと高い相関があった目標コースのヨー角速度をフィードフォワード情報として採用する¹⁾。また、この値は前方の目標コースから事前に認識しているものと思われるが、どの段階で操舵に活かしているかを検討する必要がある。そこで、目標コースのヨー角速度に対する操舵トルクの相互相関関数を取りそのピーク値までの時間をドライバの遅れ時間とした。この値を図4に示す。この結果からドライバは、乾燥路、圧雪路に比べ氷路では早くからコース情報を意識し操舵している事がわかる。また、ドライバは路面によって操舵の周波数を変化させている事が前章で明らかとなっているために、この情報に移動平均を適応する。遮断周波数は、前述同様に操舵トルクとの相互相関が最大になるよう決定した。路面毎の遮断周波数と相関係数の関係を図5に示す。この結果から摩擦係数の低い路面ほど遮断周波数が低い所で相関係数のピークがみられる。つまり、ドライバは路面摩擦係数によって急操舵を避けるよう、滑らかな操舵を心懸けている事がわかる。ここで、この値に実験値の操舵トルクに合うようにゲインを乗じたものをドライバのフィードフォワード成分とする。この値と実験値の操舵トルクを図4に示す。この結果より、各路面ともレーンチェンジ部が開

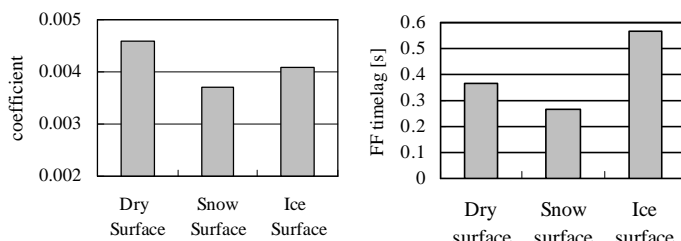


Fig.2 Approximation result in the quadratic function

Fig.4 Feed forward timelag

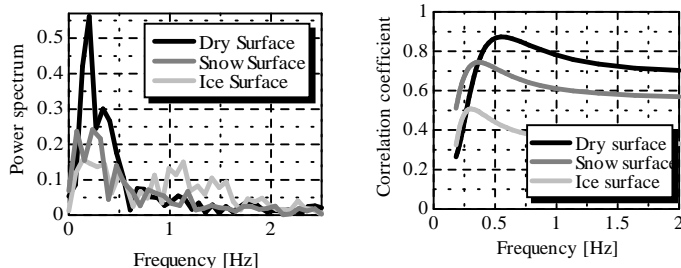


Fig.3 Frequency of Steering torque

Fig.5 Feed forward cut-off frequency

始する50m地点からレーンチェンジ部が終了する80m地点までにおいては、モデルが十分に実験値を表現している事がわかる。しかしながら、コース開始の0mから50m地点までの区間では実験値を十分表現できていない事がわかる。つまり、この区間ではドライバが別の入力情報を主として受け取って操舵している事が考えられる。そこで、この操舵について別途検討する必要がある。

3.1.2 一次予測モデルによる切り始めの操舵

直線区間である0mからレーンチェンジ開始の50m地点までのドライバの取得情報について検討を行う。ドライバの操舵の開始は図6よりレーンチェンジ開始の20m~30m手間である事から、ドライバは前方のコース情報を視覚から得てこのような操舵を行っていると考えられる。また、車両がどの位置を走るかによって、操舵開始のタイミングは変化するためフィードバック情報として考える必要がある。そこで、0mから50m地点における一次予測偏差、二次予測偏差、二次予測偏差積分値と操舵トルクとの相関をとった所、一次予測偏差に対して各路面とも0.70以上の高い相関がある事がわかった。この事からドライバはレーンチェンジ部に入るまでの直線区間では一次予測偏差を、レーンチェンジ部からはフィードフォワード成分としてのコースのヨー角速度を重視するよう取得情報のスイッチングを行っている事がわかる。そこで、一次予測偏差に実験値の操舵トルクに合うようゲインを乗じ、一次予測モデルとした。そこで、前述のフィードフォワード成分の0mから50m地点までの値をこの値に入れ替える事で取得情報のスイッチングを表現できる事になる。なお、予見時間については、操舵トルクとの相互相関が最も高くなるよう設定している。

3.1.3 位置決めのためのフィードバック操舵

通常、外乱などを受ける車両がコースに対して安定して追従するためにはフィードフォワード制御だけでは十分ではない、また、フィードバック制御であっても比例、微分制御だけでは、定常偏差を発生する。つ

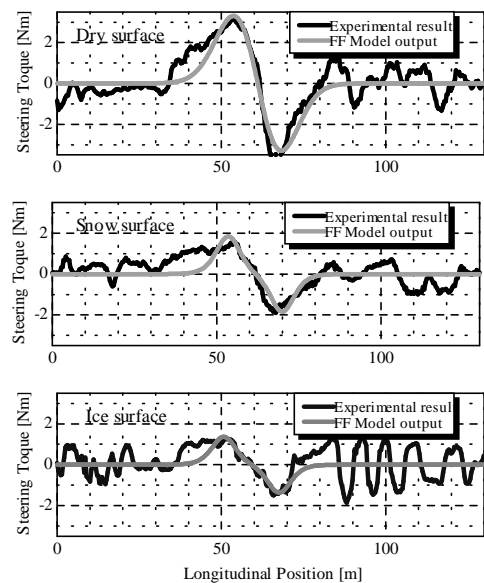


Fig.6 Feed forward model output

まり、ここまでのドライバの操舵成分に加え、位置決めのために別途フィードバック制御が必要となる。そこで、実験値の操舵トルクに対して、前項の一次予測モデルとフィードフォワード成分からなる値を差し引く事で、このフィードバック要素を検討できると考えられる。この値に対し、相関が高くなるよう幾つかの入力情報の選定を行った所、横偏差、横偏差の積分値、相対ヨー角の三項目を用いた重相関解析が有効であった。そこで、これらの各情報に重相関解析で求めた偏回帰係数を乗じ、フィードフォワード同様、遅れを考慮する事でドライバのフィードバック成分とした。このフィードバック成分に前項までの操舵成分を加える事で「コースに沿った位置規定の操舵」となる。この値と実験値の操舵トルクを図7に示す。この結果より、乾燥路、圧雪路ではモデルがドライバの操舵を十分模擬できた事がわかる。ただし、氷路に関しては、レーンチェンジ後の高周波の操舵(車両の安定性を確保する操舵)についてはフィードバック成分によっても表現出来ない事が明らかとなった。そこで、この操舵に関して次節で検討する。

3.2 車両の安定性を確保する操舵

3.2.1 スピン防止のカウンターステア

乾燥路、圧雪路に比べ氷路では、レーンチェンジ後の周波数の高い操舵が顕著に表れているため、ここでは氷路に注目して検討する。前章と同様、実験値の操舵トルクから、前章までで算出した「コースに沿った位置規定の操舵」を差し引く事で車両安定化のための操舵を検討する。この値を図8に示す。また、車両応答として実験データの操舵角とヨーレイトを図9に示す。これらのグラフから検討するに、図8における85m付近の操舵トルクのピークによってヨーレイトのハンチングがもたらされている事がわかる。そこで、まず、ハンチングの原因であるこのピークについて考える必要がある。図9より車両応答に着目すると、70m付近から85m付近において、操舵角に対してヨーレイトが追従していない領域がみられる。つまり、タイヤがグ

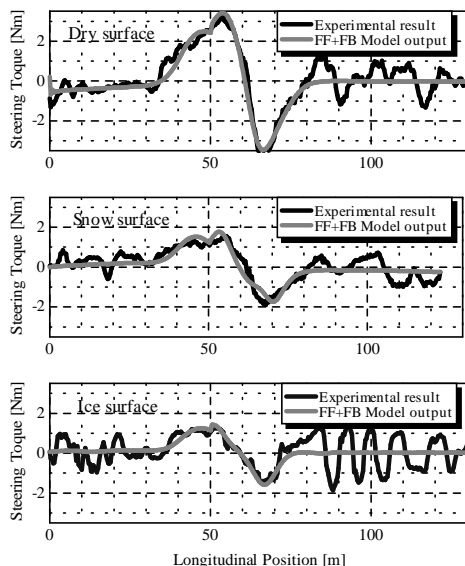


Fig.7 Model output

リップを失いドライバの意図に関係なく車両が旋回を続けスピン状態に入りかけていることがわかる。図8の操舵トルクのピークは、これとほぼ同地点で発生していることが見てとれる。つまり、この操舵はスピン防止のカウンターステアである。しかるに、ドライバへの入力情報としては、操舵角とヨーレイトの関係を用いる事が有効であると考えらる。そこで、操舵角からドライバがイメージする規範ヨーレイトを出力し、この値と実際のヨーレイトとの差分を入力情報に考える。なお、規範ヨーレイトは実験データの操舵角に、ヨーレイトとの相関が最大になるような無駄時間とゲインを用いて構成するとした。この入力情報が図8に示す操舵トルクに合うようにゲインを乗ずる事で、スピン防止のカウンターステアの成分となる。この値と操舵トルクを図10に示す。これより、この操舵トルクのピークをスピン防止のカウンターステア成分が模擬できている事がわかる。

3.2.2 安定化のための状態フィードバック

前節までで、氷路におけるヨー方向のハンチングの原因であるドライバのカウンターステアについて検討を行ったが、別途ヨーレイトのハンチングを収束させたための操舵を考える必要がある。これまで同様、実験値の操舵トルクから「コースに沿った位置規定の操舵」及び、「カウンターステア成分」を差し引いた値で検討を行う。幾つかの状態量に対して検討した結果、これまでの操舵成分の微分値にゲインをかけて求めたヨー角加速度成分と実際のヨー角加速度の差分をフィードバックする事が有効であった。遅れとゲイン

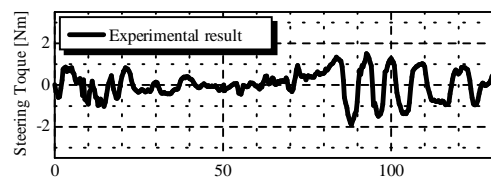


Fig.8 Feed back for stability

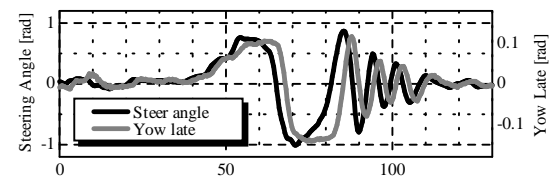


Fig.9 Experimental result of steer angle and yaw late

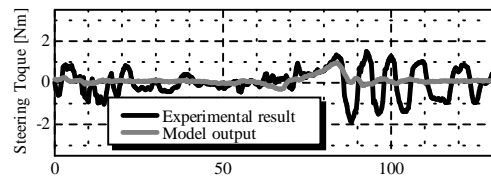


Fig.10 Counter steer

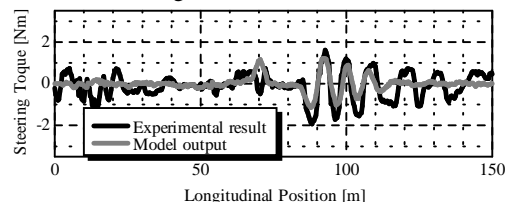


Fig.11 Feed back for stability

もこれまで同様、実験値に合うよう決定する事で、安定化のための状態フィードバック成分とした、この値と実験値から前項までの各操舵成分を差し引いた操舵トルクを図11に示す。これより、安定化のための状態フィードバック成分が、高い周波数のドライバの操舵まで模擬できている事がわかる。

結果として氷路での実験結果をもとにこの節で、検討した、カウンターステア成分及び、安定化のための状態フィードバック成分をコースに従った位置規定操舵に加えたものがドライバモデルの出力となる。なお、乾燥路、圧雪路においても、カウンターステア成分と安定化のための状態フィードバックの双方を計算し氷路と同様の扱いをした。

4. ドライバモデルの構成

これまで検討のしてきたドライバの操舵成分をドライバモデルとして表現する。各操舵成分における遅れを無駄時間 $e^{-T_d s}$ とし、操舵ゲインを K_i とする事で記述した。ドライバモデルのブロック線図を図12に示す。なお、 Y_r はドライバの注視点でのコース横変位、 Y_R 、 q_R はそれぞれコースの横変位、ヨー角を示し、 Y_v 、 f_v は車両の横変位とヨー角を示す。 T は一時予測モデルにおける予見時間である。 T_d はドライバの出力である操舵トルクを示し、 q が操舵角、 d が実舵角、 SAT がセルフアライニングトルクを示している。なお、各路面における実験値とモデルの出力値を図13に示す。実験値をモデルが良く表現している事がわかる。相関係数においても乾燥路で0.93、圧雪路で0.86、氷路で0.77と高い値を得られた。

5. 因子解析

各操舵成分の出力に対する影響度に注目する。各路面のレーンチェンジが開始50m地点から150m地点までの区間で、個々の操舵成分がモデルの出力に及ぼす影響度合いを求めた。結果を図14に示す。これより路面摩擦係数の低下にともなってフィードフォワード成分の割合が低下している事がわかる。また、その影響として雪路ではフィードバック成分が、氷路ではカウンターステアや安定化のための状態フィードバック成分の影響が大きくなっている。実際の走行においても、高い操縦性を持つ乾燥路ではドライバの意図した車両応答が発生する事からフィードフォワードによる影響が大きく、操縦性の低下する低 μ 路になるほど影響が小さくなると安易に想像できる。したがって、本モデルが路面摩擦係数によるドライバの操舵への影響を的確に表現していると考えられる。また、氷路に注目すると、各の操舵成分の割合が大きく変化しないため、ドライバは多くの情報を一回の走行で処理している事がわかる。同時に、高次の微分項で構成されている、安定化のための状態フィードバックの影響度が他の路面に比べ大きい事から、強い予測動作を行っている事がわかる。これらの事が、摩擦係数の低い路面を走る際にドライバに緊張や負担を産む原因であると推測できる。

6. 結言

本報告では、路面摩擦係数の違いがドライバの操舵に及ぼす影響を明らかにする事を目的とし、その制御動作に着目したドライバモデルの構築を行った。結果、路面摩擦係数の異なる3種類の路面(乾燥路、圧雪路、氷路)におけるドライバの操舵特性の違いを表現し、各操舵要素のモデル出力への影響度を解析する事で、ドライバの取得情報の違いについても明確にできた。

参考文献

- 1) Ichiro Kageyama Analysis for Control Action of Driver's Steer CProceedings of 2005 JSAE Annual Congress No.64-05

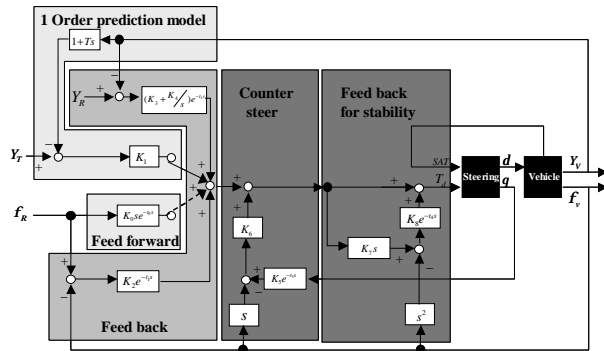


Fig.12 Driver model

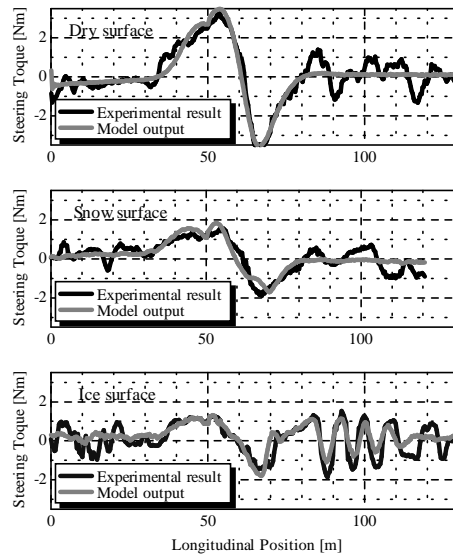


Fig.13 Model output

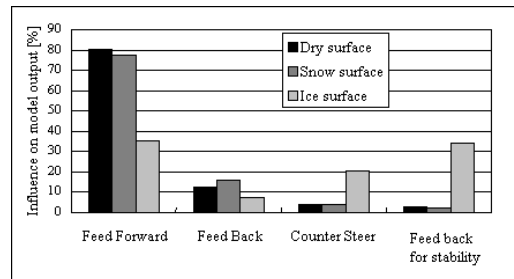


Fig.14 Influence on model output