

路面摩擦係数推定ロジックの開発

Development of Road Friction Coefficient Estimation Logic

金 圭 勇*
Keiyu KIN

霧 生 浩 誠*
Hironobu KIRYU

矢 野 修*
Osamu YANO

要 旨

路面摩擦係数を正確かつリアルタイムに推定する技術はVSA (Vehicle Stability Assist)等車両運動制御の性能向上に必要である。本研究では、非線型タイヤ特性データを用いて車体スリップ角推定ロジックと統合することで従来のロジックよりも高精度で応答性の高い新規推定ロジックを開発した。さらに、実車テストでその推定精度を確認した結果、このロジックの妥当性が証明された。

ABSTRACT

The improvement of vehicle stability assist (VSA) and other such forms of vehicle dynamics control requires techniques for estimating the road friction coefficient accurately and in real-time. The present research integrated non-linear tire characteristics data with vehicle side slip angle estimation logic to develop a new estimation logic that is more accurate and has greater response than the conventional logic. The estimation accuracy of this logic was further verified in tests with actual vehicles, thus demonstrating the validity of the developed logic.

1. まえがき

筆者らは車体スリップ角(以下 β)推定、タイヤ路面間摩擦係数(以下 μ)推定、タイヤ特性データ、4輪スリップ(以下 λ)制御の各ロジックを用いてVSAの性能向上を図る研究を続けてきた^{(1), (2)}。其中で、 μ 推定ロジックは路面情報を把握する上で最も重要な役割を担っている。本研究では、従来の μ 推定ロジックの課題を示し、今回新たに開発したリアルタイムかつ高精度の推定ロジックを解説する。さらに、実車テストでロジックの妥当性を証明する。テスト車はFR車とオンデマンド式フルタイム4WD車を用い、テストコースは雪上路、ウェットバサル低 μ 路、ドライアスファルト路の各路面を用いた。

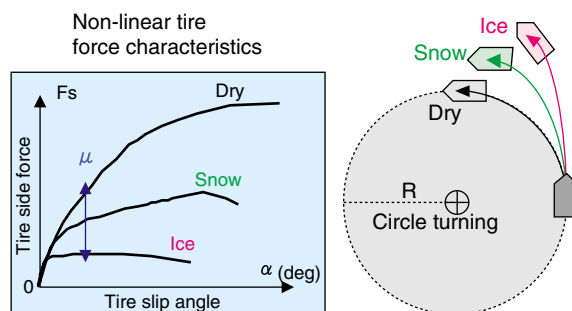


Fig. 1 Tire force characteristic and vehicle dynamics

2. 課題と研究目標

旋回中のタイヤ横力はFig. 1に示すように非線型特性と路面状況によって変動し、タイヤスリップ角(以下 α)が大きい程また路面 μ が下がるほど飽和しやすくなる。このタイヤ横力の飽和が目標コースからの逸脱を誘発する。その際、Fig. 2に示すように各4輪のグリップ不均衡からオーバーステア(以下OS)になったりアンダステア(以下US)になっ

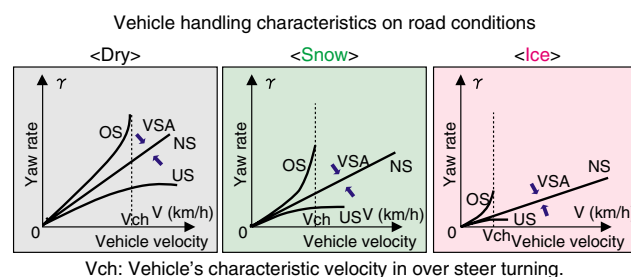


Fig. 2 Vehicle dynamics control

*栃木研究所

たりと不安定な挙動を示す。特に冰雪路走行では、タイヤ横力が極度に低下するため挙動不安定に陥りやすい。そこで、VSA 等による安定化制御が必要になるが、制御効果は路面 μ に影響されるため μ 推定ロジックが不可欠である。本研究では舵角、加速度、ヨーレートセンサを用いて経験的に要求される μ 推定精度 ± 0.05 (μ の範囲は 0 から 1, ドライ路面を 1 で正規化) を目標に定めロジックを開発した。

3. 従来の路面 μ 推定ロジック

3.1. スリップ率を用いる手法

車輪の加減速度から車体加減速度とスリップ率を算出し、そのゲインを路面 μ 変化として捉える手法が最も簡易的な手法である。初期の ABS, TCS (Traction Control System) は Fig. 3 に示すように、直進制駆動時のタイヤ-路面間の相対的な入を捉えることにより間接的に μ を推定し、それに応じた制御ゲインを選択している。センサは車輪速度センサのみでありシンプルなシステム構成であるが、さらに旋回中においても推定可能にする改良が必要である。

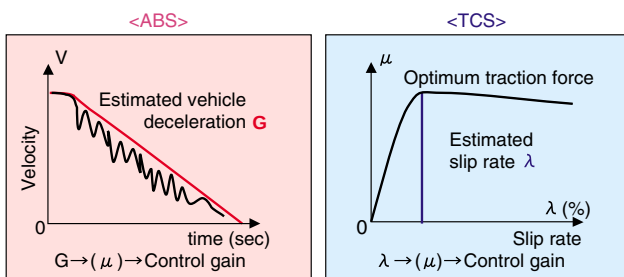


Fig. 3 Primitive slip estimation for ABS and TCS

3.2. ヨーレイトを用いる手法

前記システムに操舵角センサを追加し、操舵角と推定車体速度から算出した規範ヨーレート(ドライ路面基準)と実際のヨーレートとの差分を路面 μ 変化として捉えることで、旋回中の路面 μ 推定を可能にするロジックへと発展した。この手法を用いれば、Fig. 4 に示すように OS または US を判定し操安制御が実現できる。これは最小限のセンサ

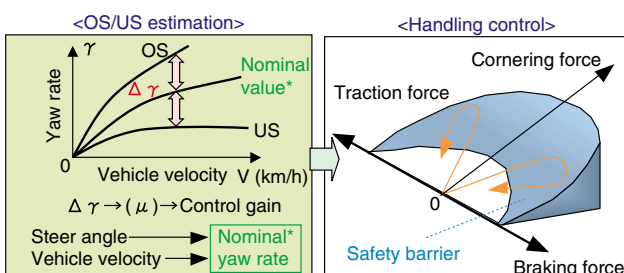


Fig. 4 OS/US estimation for handling control system

とロジックによって旋回中の路面 μ が推定可能であり、ABS, TCS, 4WS の性能向上が可能である。しかし、この手法は舵角依存性が高いため、あらゆる路面で規範ヨーレートを最適に設定することが難しく、特に路面 μ が低くなるほどドライバーの過剰操舵による OS 判断が困難になる課題を解決する必要がある。

3.3. 横加速度を用いる手法

車輪速度センサ、操舵角センサにさらに加速度センサを追加して車体の前後・横方向の力を求めることにより、車両旋回力(向心力)の推定を可能にした。Fig. 5 に示すように、車両を一つのタイヤとして捉えその摩擦円からタイヤ発生力を算出することで、旋回時に直接 μ を推定するロジックへと発展した。この手法を用いれば、前記舵角規範ヨーレートをこの推定路面 μ により補正でき、特に冰雪路における規範ヨーレートの精度を向上させることが可能である。しかし、さらに発展させて VSA 等のタイヤスリップ制御中も推定精度を安定維持するためには、4 輪のタイヤグリップ力を個別に算出する必要があり、基本的にはタイヤスリップ角(以下 α)と車体スリップ角 β 推定ロジックを併せた μ 推定手法が不可欠になる。また、タイヤの特性も単純な摩擦円ではなく、 λ と α に対応した制駆動力と横力の非線型データにより推定 μ 値の精度をさらに向上させる必要がある。

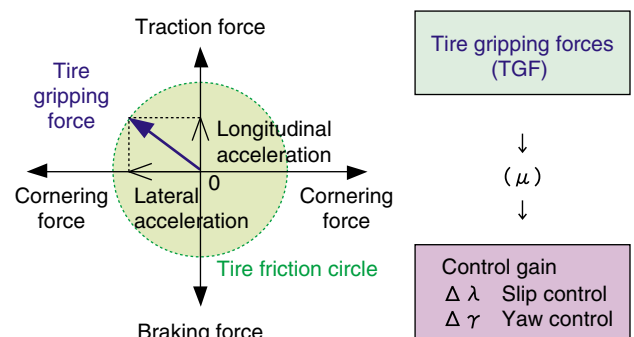


Fig. 5 Estimation of the tire gripping force

4. 新規開発ロジック-車体スリップ角を用いる手法

VSA 等車両運動制御に適用できる路面 μ 推定を実現するには、 λ 制御作動中も安定して推定路面 μ の目標精度を維持できるロジックが必要である。そのためには 4 輪全ての α , λ をあらゆる状況で正確にかつリアルタイムに推定し、さらに動的輪荷重(以下 F_w)の影響も考慮したタイヤの制駆動力と横力が算出できなくてはならない。

今回開発した新規開発の μ 推定基本ロジックを Fig. 6 に示す。基本構成は、実路面に見合った非線型のタイヤ特性

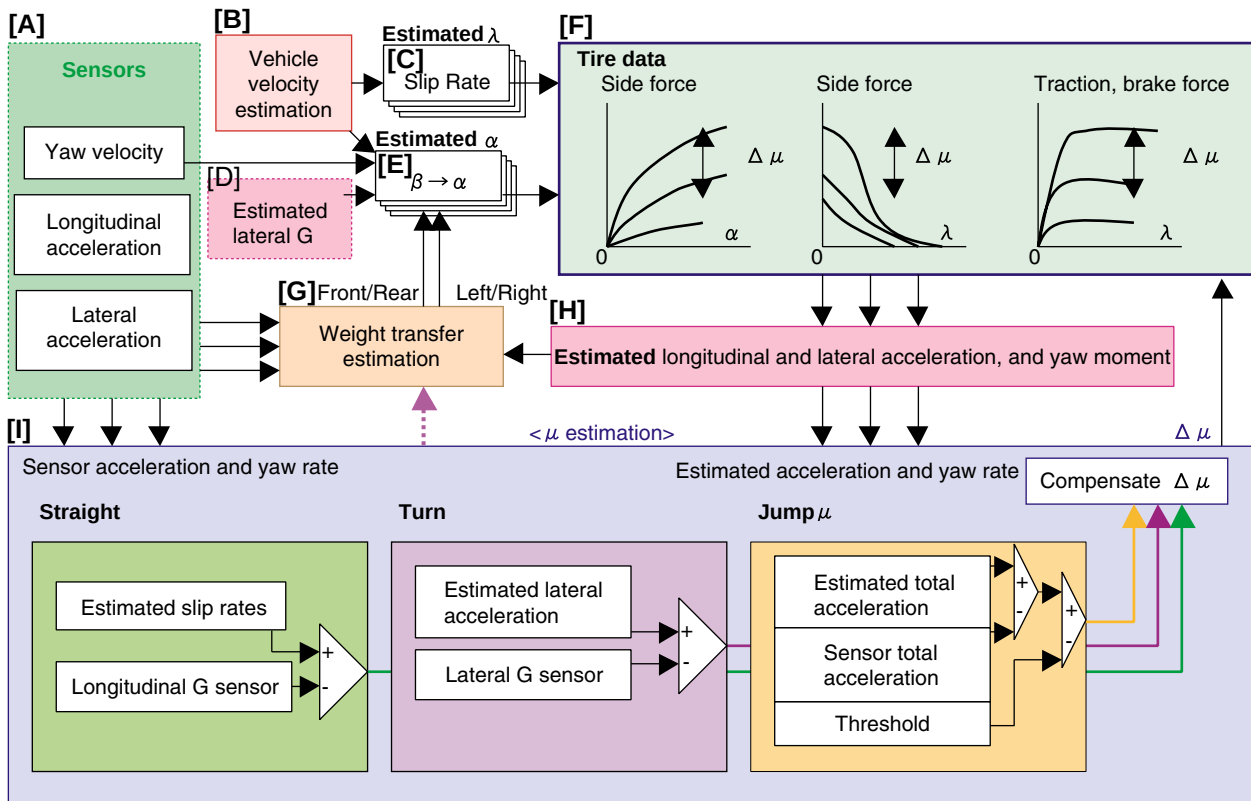


Fig. 6 μ estimation logic

データマップ(以下、タイヤデータ)をベースにしてβ推定ロジックと一体化し、さらに車両運動の三基本パラメータであるヨーレート、前後加速度および横加速度を用いて逐次推定μ値を補正し続けるロジックとした。

このμ推定ロジックの新規性は大きく分けて二つある。一つ目はβ推定ロジックと組み合わせて各輪の推定タイヤ発生力からヨーレートと加速度を推定し各センサ値と比較し随時補正し続ける点、二つ目はタイヤの基本特性を実車運動特性に見合う非線型なデータで表現した点である。

次に、Fig. 6 のロジックの流れを説明する。

- (1) β推定([D], [E])と非線型タイヤデータ([F])から推定した車両のヨーレート、前後加速度、横加速度([H])を、搭載しているセンサの出力値([A])とそれぞれ比較して補正値を算出する。
- (2) このμ補正値は直進走行、旋回走行、ジャンプμの三つの走行モードに分けて算出している([I])。
- (3) さらに、このμ補正値をもとに非線型タイヤデータを適応する([F])。
- (4) 車両のヨーレート、前後加速度、横加速度推定はVSA等の入制御が作動中でも精度を維持できるように各輪ごとのタイヤ発生力を算出している([C], [E], [F])。
- (5) 旋回中は推定した前後・左右荷重移動量により推定αを補正している([G], [E])。
車両の加減速によるピッチング運動と旋回によるロール運動によって4輪のタイヤ荷重が変動すればタイヤ

発生力に変化する。この変化分を捉えるために、推定タイヤスリップ角αを補正している。具体例としては、荷重移動の影響が発生しやすいドライ路面(推定路面μが1に近い場合)において、各4輪の推定タイヤスリップ角αから算出した車体横加速度とヨーレートを、センサから直接求めた車体横加速度とヨーレートそれぞれと比較することで、推定αを補正する手法を用いている。

- (6) さらに、基本的な課題として推定タイヤスリップλの精度向上の為に、非線型タイヤスリップデータと前後加速度センサを用いて常に車体速度の推定値を補正し精度を保っている([B], [C])。

4. 実車テスト評価

5.1. FR 車テストデータ(圧雪路)

Fig. 7 に FR 車を用いた圧雪(実μ値約 0.3)におけるワインディングと半径 200m 定常円旋回走行の二つのテストデータを示す。テストは両方ともクローズドループの操舵入力で実施した。

これらのデータから過渡的な車両挙動状態でも定常状態においても、推定路面μはほぼ安定して実μに近い値を示していることがわかる。さらに、推定車体スリップ角βがスリップ角センサとほぼ一致しており、推定横加速度も横Gセンサ値に近い精度を維持できていることが読み取れる。

この結果から、この新規開発 μ 推定ロジックの基本性能は達成できていると考えられる。ただし、このテストではVSA等のスリップ制御は作動させていない。制御中の路面 μ 推定は次章で示す。

5.2. 4WD 車テストデータ(ドライ路, ウェットバサル路, 低 μ 路)

次に、VSAの4輪スリップ制御を作動させ、4WD車を用いて路面と走行状態を替えてテストした。その代表例と

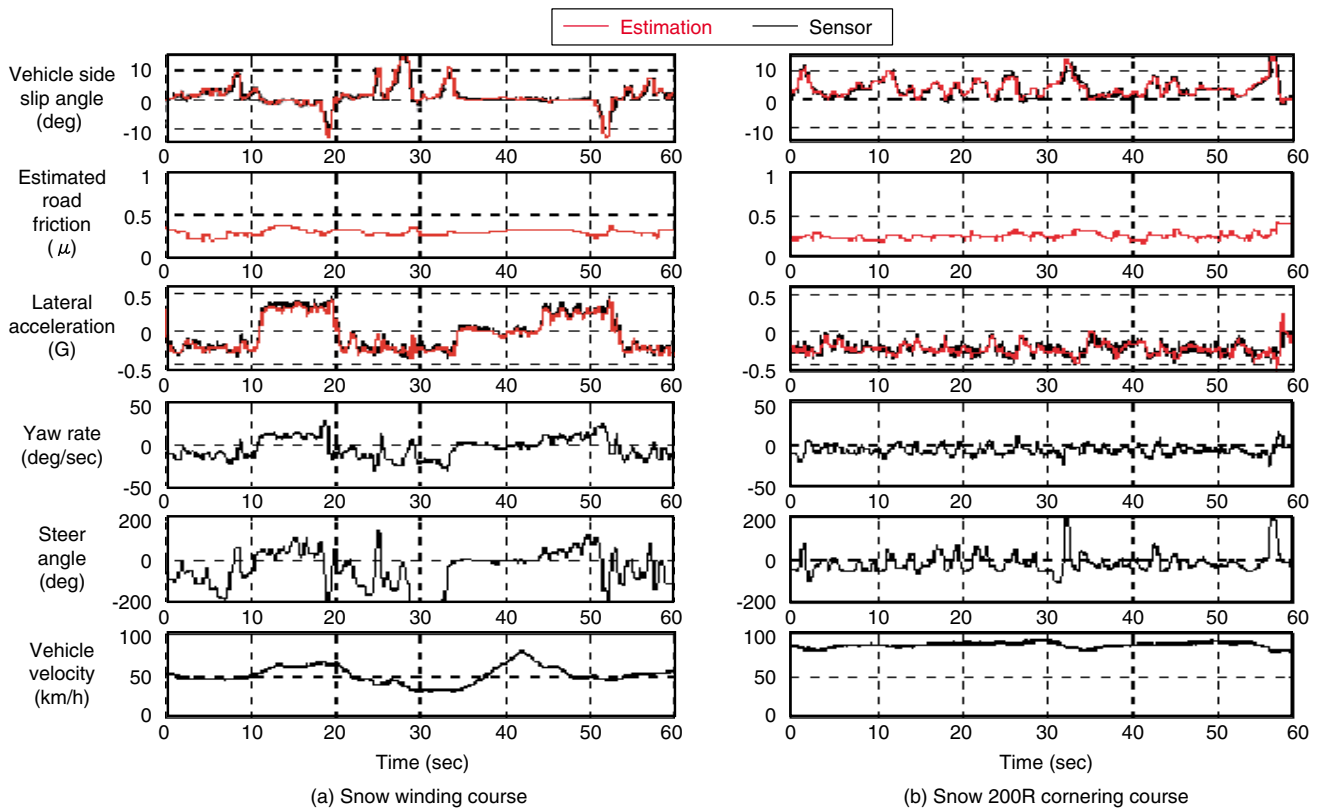


Fig. 7 FR vehicle test data at snow course

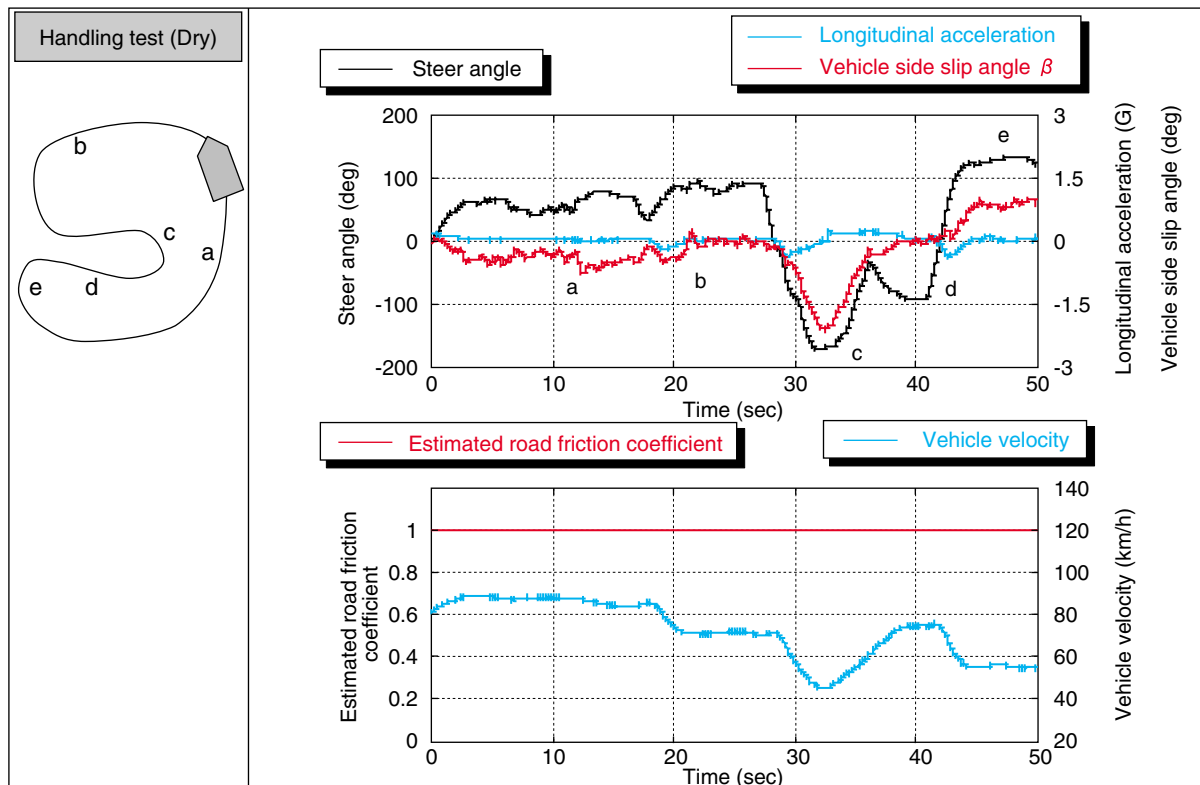


Fig. 8 4WD vehicle test data on dry winding course

して、Fig. 8にドライ路ワインディング走行、Fig. 9にウェットパサルト低 μ 路スラローム走行、Fig. 10にドライ路からウェットパサルト低 μ 路への μ ジャンプの三つのテストデータを示す。

グラフから分る様に、ドライと低 μ 路さらに μ ジャンプ時にも安定してリアルタイムに正確な路面 μ が推定できている。各テスト結果について説明する。

(1) Fig. 8 のドライ路ワインディング走行

路面 μ はドライ路面を1として正規化している。図下部のグラフから分るように、コース一周を通して正確にドライ路面として認識できている。さらに、車体スリップ角 β も安定して推定できおり、ドライ旋回走行では路面 μ 推定が正確に機能していると考ええる。

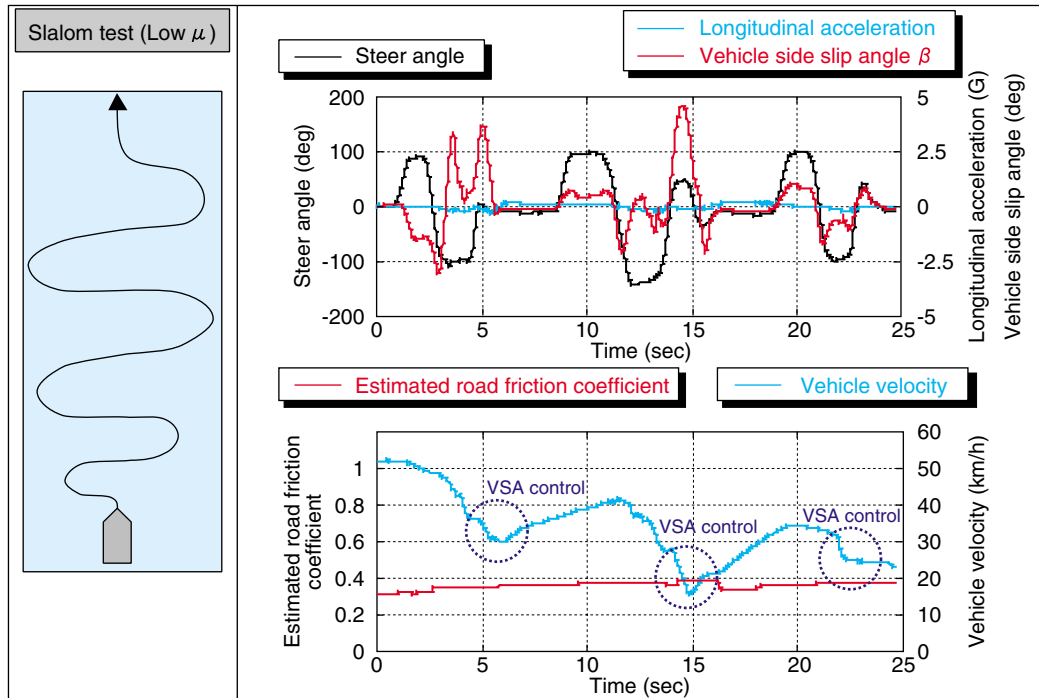


Fig. 9 4WD vehicle test data on low μ slalom course

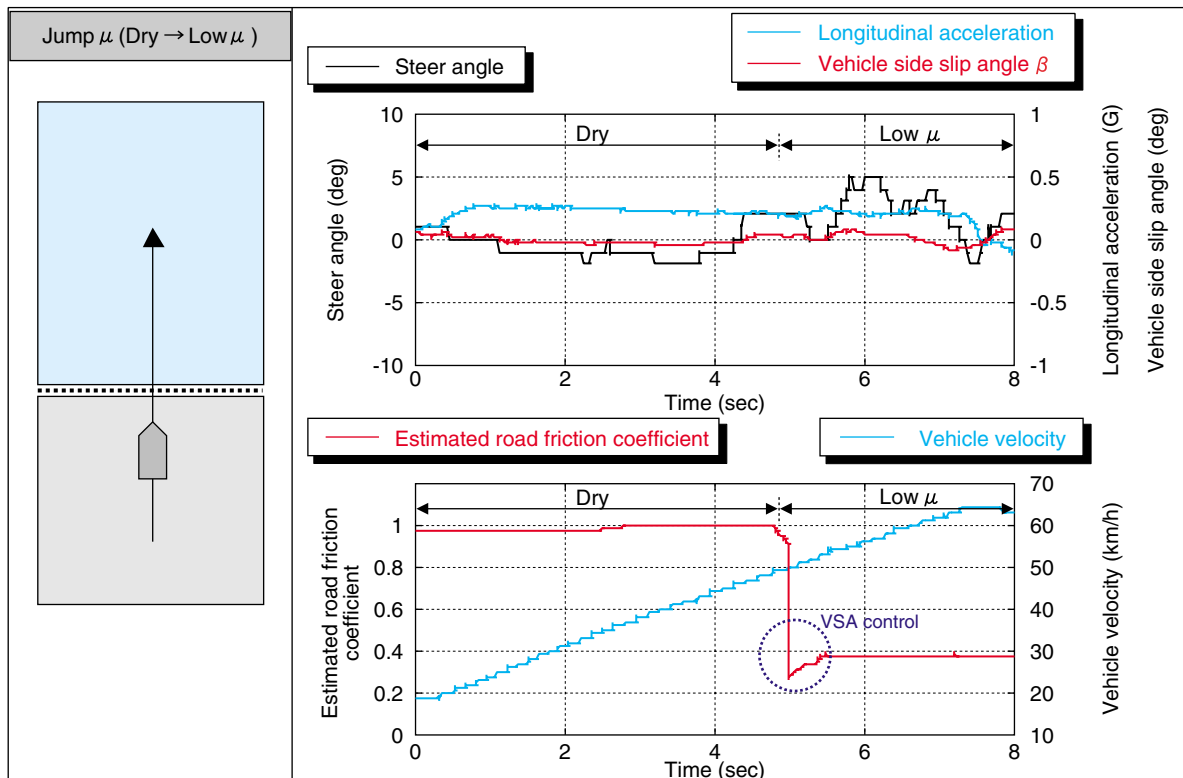


Fig. 10 4WD vehicle test data on jump μ course

(2) Fig. 9 のウェットバサル低 μ 路スラローム走行

実 μ 約 0.3 から 0.4 の路面をスラローム走行した場合でも、図下部のグラフから推定 μ の値が実値に近いことが分る。さらに、車両がOSの不安定挙動になりVSAの4輪制御が作動した場合でも、安定して精度の高い推定ができています。この結果から、氷雪路走行時にもこの μ 推定ロジックが妥当であると考えます。

(3) Fig. 10のドライ路からウェットバサル低 μ 路への μ ジャンプ

ドライ路面から低 μ 路面への直進加速進入では、図下部グラフから数100msec以内に正確に μ 変化に即応できていることが分る。また、駆動輪スリップ防止のための入制御が作動しても、安定して μ 推定を実行している。この結果から、本 μ 推定ロジックのリアルタイム性能が高いと考えます。

以上のテスト結果を考察すると、基本的にはあらゆる路面でかつ直進、旋回、 μ 変化の伴う走行モードで正確かつリアルタイムな路面 μ 推定が可能となった。よって、今回開発した新規 μ 推定ロジックの妥当性が実車テストにより証明された。

6. まとめ

結果をまとめると次のようになる。

- (1) 路面状態、走行モードによらず ± 0.05 の精度を実現する μ 推定の基本ロジックが構築できた。
- (2) VSA等タイヤスリップ制御が作動する状況においても安定した μ 推定が達成できた。
- (3) μ ジャンプ(特に高 μ から低 μ)時でも正確かつリアルタイムな μ 推定が達成できた。

以上から、本研究の目標は基本的に達成されたと考えます。

今後は、この基本ロジックの実用性をさらに向上させるために、特性の異なるタイヤを装着した場合でもタイヤの基本特性をリアルタイムに学習補正可能な技術を構築し、さらに実用性の高い路面 μ 推定技術へと発展させていく。

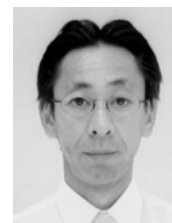
参考文献

- (1) 金圭勇, 矢野修, 占部博之: スリップ制御による車両のスタビリティとステアアビリティの向上, Honda R&D Technical Review Vol.13, No.1, p.91-98 (2001)
- (2) 金圭勇, 池田透, 矢野修: VSAによる氷雪路走行時の操縦安定性向上, Honda R&D Technical Review Vol.13, No.2, p.83-90 (2001)

■ 著 者 ■



金 圭 勇



霧 生 浩 誠



矢 野 修