

電動パワーステアリングによる 路面摩擦係数推定技術

高木史朗* 藤岡宏司***
竹家章仁** 佐竹敏英***
栗重正彦**

Estimation of Maximum Tire-road Friction Coefficient Using Electric Power Assist Steering

Fumiaki Takagi, Akito Takeya, Masahiko Kurishige, Hiroshi Fujioka, Toshihide Satake

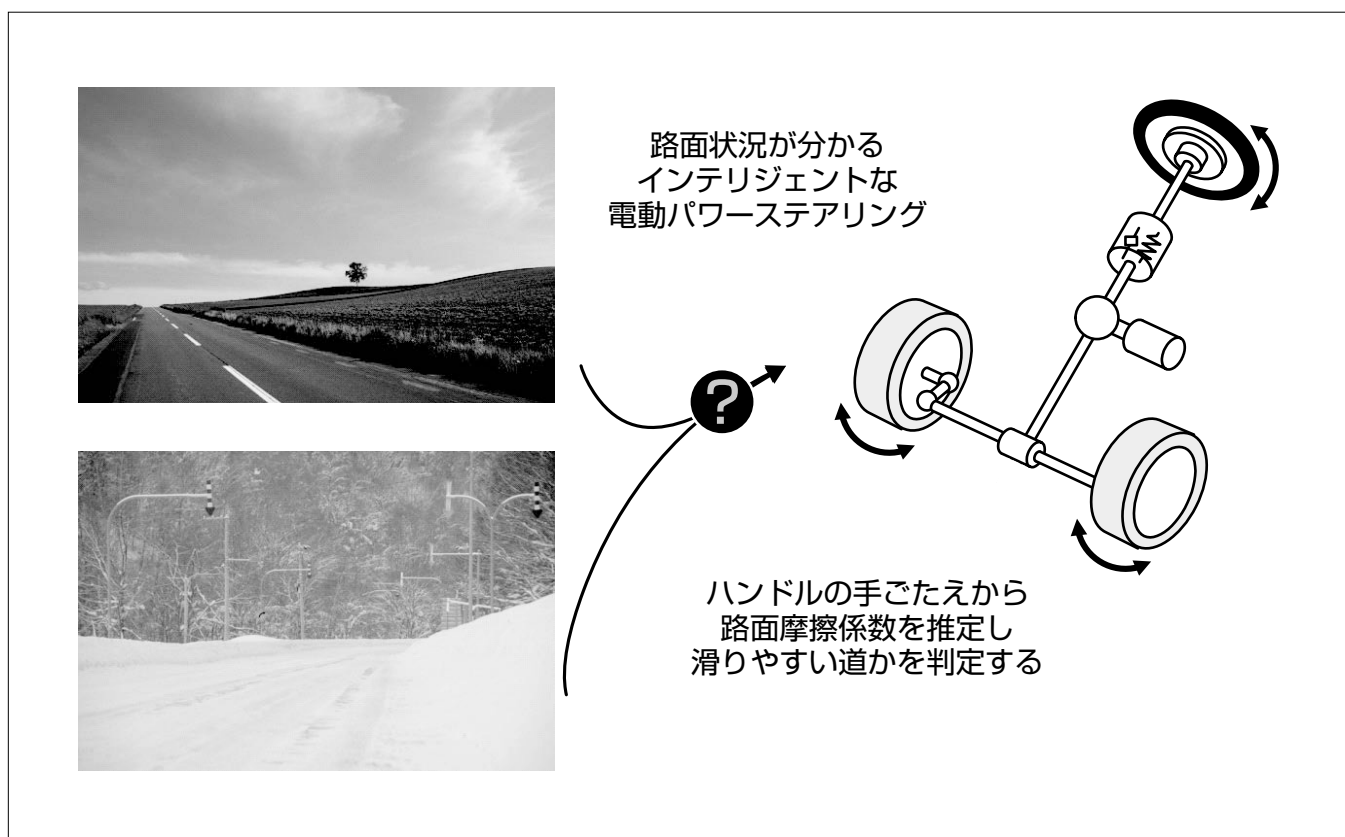
要 旨

一般に雪道のような滑りやすい路面では、急ハンドルによる車両挙動の不安定化や、車速超過による目標軌道からの逸脱が起こりやすい。このような路面状況を検出、すなわち、摩擦係数を推定することで、適切なブレーキを付与する横滑り防止装置や、ドライバーのハンドル操作による車両挙動の立て直しを補助するアクティブステアといった予防安全装置の性能向上を図ることができるが、低価格な自動車への浸透はまだ十分とは言えない。その理由の一つとして、従来の推定技術は高価なセンサ類を必要とするために、コスト増となる点が挙げられる。

三菱電機では、ハードウェア追加によるコスト増を避けるため、電動パワーステアリングが標準的に備えているセ

ンサ信号のみを用いて路面摩擦係数を推定する手法を開発した。その推定原理は、ハンドルを中央に復帰させようとするトルク(路面反力トルク)が、走行路面の摩擦係数に応じて異なるというタイヤの性質に基づくものである。

路面摩擦係数推定によって、路面が滑りやすい状態なのか、乾いたアスファルト等の通常状態なのかを判定可能となる。この判定結果に基づき、例えばエンジン出力やハンドルトルクを適正に制御することで、車速超過による逸脱や、不適正なハンドル操作による車両挙動の不安定化を抑制し、低コストで車両の操縦安定性の向上を図ることへの応用が期待できる。



路面状況を判定する電動パワーステアリング

一般にハンドルを切ってゆくに連れてハンドルの手ごたえが大きくなるが、この手ごたえは、通常走行するドライアスファルト路面と滑りやすい路面とで異なる。当社は、ハンドルの手ごたえと路面摩擦係数との関係を定式化し、電動パワーステアリングのコントローラ上に推定アルゴリズムを実装することで、路面状況が分かるインテリジェントな電動パワーステアリングを開発した。この路面状況情報は自動車の予防安全制御の高機能化への応用が期待できる。

1. ま え が き

一般に雪道のような滑りやすい路面では、急ハンドルによる車両挙動の不安定化や、車速超過による目標軌道からの逸脱が起りやすい。このような状況を検出して車両を安定化させる車両安定化装置の普及が進んでいるが、低価格な自動車への浸透はまだ十分とは言えない。その理由の一つとして、コストの増加が挙げられる。

本稿では、電動パワーステアリングが標準的に備えているセンサ信号のみを用いて、低コストに路面摩擦係数を推定する手法について述べる。

2. 路面摩擦係数の推定手法

ハンドルを切るときの手ごたえは、車速やハンドルの切れ角、そして路面によって異なる。この手ごたえのうち路面に起因する成分のみを電動パワーステアリングで検知することで、路面摩擦係数を推定できる。この原理について背景を踏まえて述べる。

2.1 Fialaのタイヤモデル

タイヤに働く横方向の力を説明するモデルとしてFialaのモデルが広く知られている⁽¹⁾。このモデルは、タイヤに働く横方向の力を説明するものである。タイヤの転動方向と実際の運動方向は一致しているように見えるものの、実際には、車がカーブを曲がっているときなどにはわずかにずれており、その角度差がタイヤに横方向の力を発生させると説明している。なお、この角度差をタイヤ横すべり角という。また、この横すべり角に対して、荷重の影響やタイヤ自身のグリップ性能などの影響を補正して無次元化したものを無次元化横すべり角 ψ という。

このFialaのモデルによれば、ハンドルを切り増すことで無次元化横すべり角 ψ を増加させると、図1に示すように、タイヤの横力 F は摩擦の限界まで漸増し、タイヤ中心軸に対してタイヤを回そうとするトルク M はある角度で飽和して減少する。

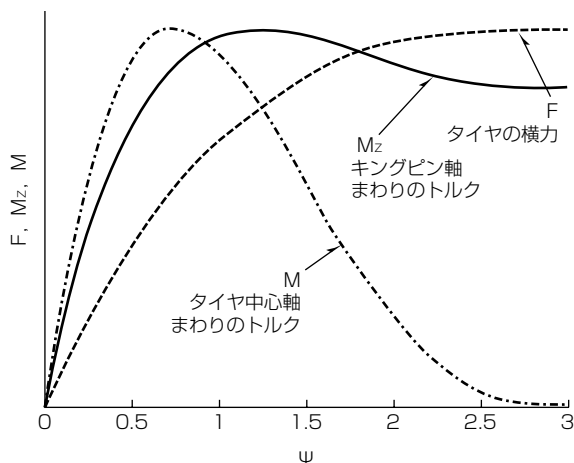


図1. Fialaのモデル

2.2 ステアリングの影響

ただし、Fialaのモデルによるトルク M 自体は、ハンドルの手ごたえには一致しない。実際のステアリングシステムは図2に示すように、キングピン軸がタイヤ中心軸に対して傾いているため、ハンドルの手ごたえに相当する路面反力トルク M_z はトルク M とは異なる。なお、キングピン軸とはステアリングによってタイヤが回される軸を指す。

そこで当社は、ハンドルの手ごたえを示すキングピン軸周りのトルク(路面反力トルク)について検討を加え、このトルクもタイヤのトルク M と同様に極大値を持ち、かつ、その極大値は路面摩擦係数 μ に比例することを示した(図3)。

この極大値を検出し、この比例関係から路面摩擦係数を推定することができる。

2.3 路面反力トルクの推定

路面反力トルクは、操舵(そうだ)系に働く力の釣り合いを考えて求める。すなわち、人間が操舵するトルクと電動パワーステアリングがアシストするトルクの和に基づいて路面反力トルク M_z を推定する。なお、その際にはノイズ等を除去するための信号処理を実施している⁽²⁾。

2.4 路面反力トルク極大値の検出

路面反力トルク M_z の極大値は、本来は無次元化横すべり角 ψ に対する極大条件で検出すべきだが、代わりにハンドル角 θ に対する極大条件で検出した。条件を代用することで使用センサを削減可能となる。ただし、路面外乱の影響による極大値の誤検出を避けるため、若干の補正処理を加えている⁽³⁾。

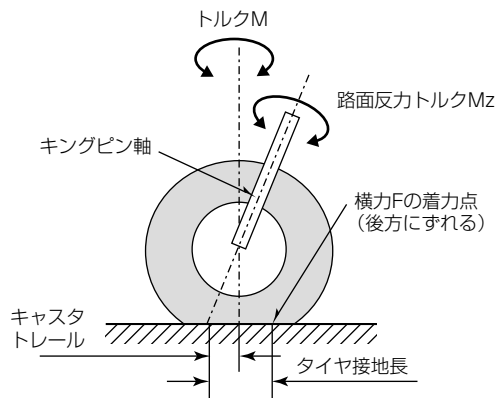


図2. 車体内側から見た車輪側面の模式図

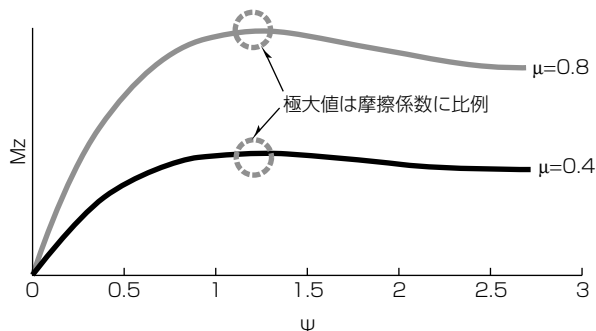


図3. 路面反力トルクの極大点

2.5 路面反力トルク変換係数の設定

この研究の結果、路面反力トルク極大値 M_{zmax} と路面摩擦係数 μ との比例関係は下記の式(1)で表される。

$$M_{zmax} = \frac{1}{512l^3}(l + 6\xi_c)(27l^3 + 134l^2\xi_c - 156l\xi_c^2 + 72\xi_c^3)W\mu \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 l はタイヤ接地長、 ξ_c はキャストトレール、 W はタイヤ垂直荷重の各タイヤパラメータを表す。ただし、これらの値を直接使用しても、路面摩擦係数は必ずしも高精度には求められない。パラメータの測定誤差やモデル化誤差が積み重なるためである。

そこで、図4に示す路面摩擦係数と路面反力トルクの極大値を測定し、複数回の測定結果から図5に示す回帰直線を引いて比例係数を求めた。具体的な手順としては、様々な摩擦係数の路面でJターン走行を行い、各走行での最大横加速度と先に述べた手法で求めた路面反力トルクの極大値を記録し、走行ごとに1点をプロットした。なお、走行した路面は、表1に示すとおり、ドライアスファルト路面、

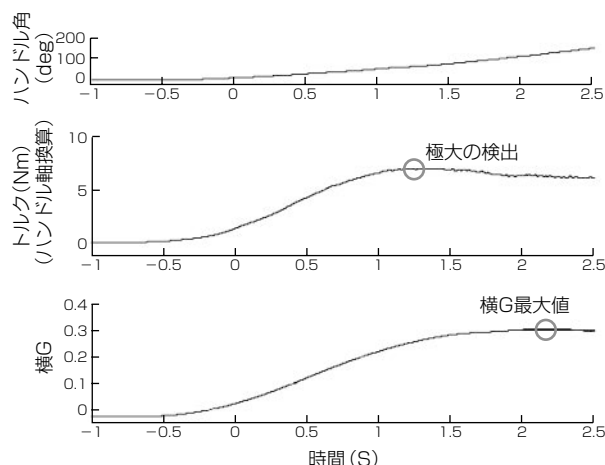


図4. 路面反力の時間履歴

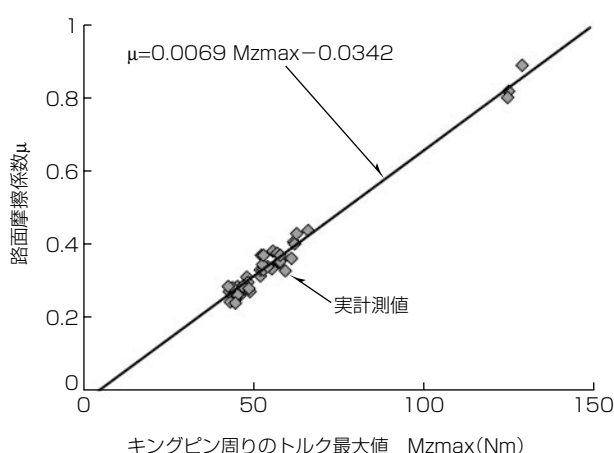


図5. 路面摩擦係数と路面反力トルクの相関

表1. 路面の公称路面μ値

	公称路面μ値	横加速度最大値(G)
ドライアスファルト路面	0.9	0.8~0.9
バサルタイル路面	0.4	0.3~0.45
磁器タイル路面	0.2	0.25~0.35

バサルタイル路面、磁器タイル路面である。

なお、求められた回帰直線は、定数項がゼロとはならず、式(1)に示した比例関係とは異なり原点を通らない、これは操舵系の摩擦成分の影響であり、x切片が摩擦トルク量に相当する。

2.6 推定精度の検証

先に述べた手法による路面摩擦係数推定法(図6)について、次の3項目の精度検証を実施した。

- (1) 変換係数の設定時と同じ条件での精度
- (2) 実際の圧雪路面での推定精度
- (3) 変換係数の設定時と異なる条件での精度

なお、変換係数の設定時とは、2.5節に示した手法で変換係数を求めたときのことであり、以降ノミナル時と呼ぶ。また、変換係数の設定時と異なる条件とは、2.6.3項で後述するとおり、車両の積載荷重とタイヤ空気圧とを変更したことを指す。

2.6.1 ノミナル時の推定精度

ノミナル時の推定精度検証として、2.5節に示した変換係数の設定時と同じ条件で走行し、路面摩擦係数推定を実施した。その結果を図7に示す。横軸は路面摩擦係数の実測値を示し、横加速度センサの最大値から求めたものである。縦軸はこの手法による推定値である。また各点は、判定ごとの値をプロットしたものである。図から明らかなように、推定誤差は±0.1以内であった。

2.6.2 実圧雪路での推定精度

次に、表1に示した路面だけでなく、実際の圧雪路面や氷盤路面でも推定精度を検証した。その結果は、図8に示すとおり、推定誤差は+0.1から-0.2の範囲内であった。

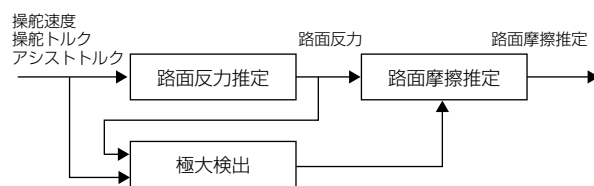


図6. 推定系の構成

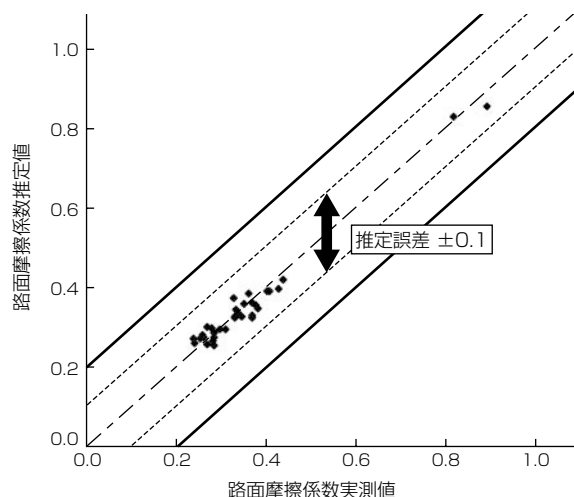


図7. ノミナル状態での推定精度

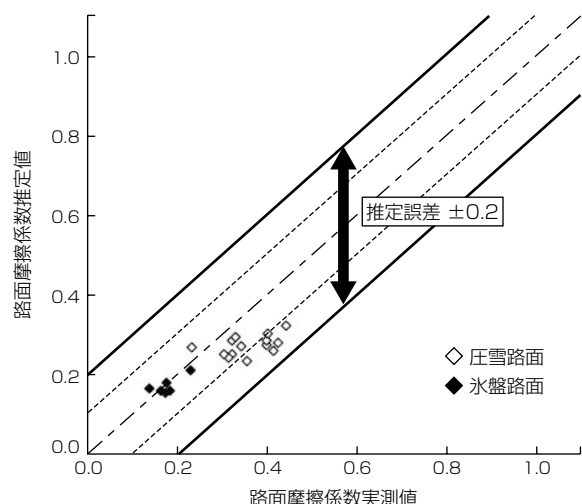


図 8. 圧雪路・氷盤路での推定精度

氷盤路面については精度 ± 0.1 であったが、圧雪路面では小さい側へと推定誤差が生じている。この原因として次の2点が考えられる。

- (1) 路面摩擦係数の推定値をJターン中の横加速度の最大値から求めているが、圧雪路面は一樣ではなく、部分的に μ の高いところを走行したため
- (2) 圧雪路面の凹凸によって操舵系が振動し、実質的な摩擦トルクが低下した結果、路面反力トルクが小さく推定され、路面摩擦係数も小さく推定されたため

2.6.3 車重・タイヤ条件が変動したときの推定精度

この推定手法はモデルパラメータとして、タイヤの接地長及びタイヤ垂直荷重を固定値としている。これらが発動した際には、推定精度の劣化が懸念されるので精度検証を実施した。これらのモデルパラメータが変化する場合、現実的な条件として、具体的には表2に示すとおり、タイヤ空気圧や積載荷重を変更した。条件Aは路面摩擦係数の推定値が実値よりも小さくなる場合であり、条件Bは逆に推定値が実値よりも大きくなる場合である。

その検証結果を図9に示す。タイヤ空気圧や積載荷重を変化させることによって、タイヤモデルのパラメータ(タイヤ接地長やタイヤ垂直荷重)が変化するため、路面反力トルクと路面摩擦係数間の比例係数が変わり、ノミナル時よりも推定誤差が大きくなるが、 ± 0.2 程度に収まることが確認された。

3. む す び

路面摩擦係数推定手法として、路面反力トルクの最大値と路面摩擦係数の比例係数を利用する手法を提案した。

表 2. 精度試験の条件

	積載荷重	タイヤ空気圧
ノミナル条件	ドライバーのみ	220 (kPa)
条件A	ドライバーのみ	300 (kPa)
条件B	300 (kg)	150 (kPa)

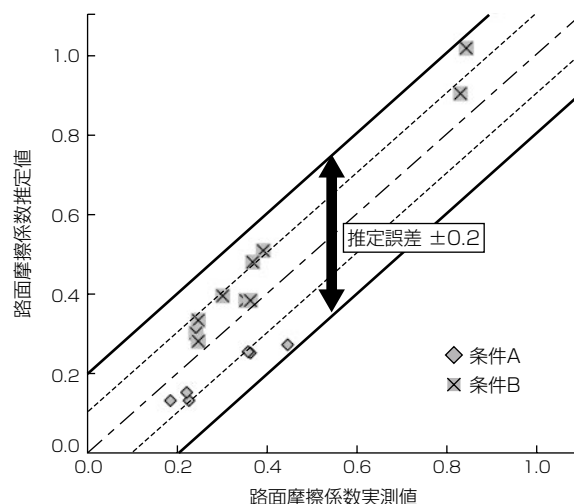


図 9. 車両条件変動時の推定精度

この手法では、路面反力トルクの最大値の検出には、加速度センサ、ヨーレイトセンサやハンドル角センサなどのセンサを別途必要とせず、電動パワーステアリング単体で検出可能であり、また必要な計算負荷も低い。このため、低コストで実現可能である。

また、先に述べた比例関係はFialaのタイヤモデルを用いて理論的に示されるが、このことを実験的にも検証した。この比例係数は、タイヤ垂直荷重やタイヤ接地長に依存するが、これらの条件が変化しても、路面摩擦係数推定値は横加速度の最大値に対して ± 0.2 の精度を持つことが分かった。

今後、この推定手法を応用した車両安定性向上システムへの発展が期待される。

参 考 文 献

- (1) Fiala, E.: Seitenkräfte am Rollenden Luftreifen, DI Zeitschrift, 96 (1954)
- (2) 田中英之, ほか: 路面反力推定を用いた電動パワーステアリングによる車両安定化制御の開発, 日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集, 2005, No.14 (20051206), 163~166 (2005)
- (3) Nakajima, K., et al.: A Vehicle State Detection Method Based on Estimated Aligning Torque using EPS, SAE Paper, No. 2005-01-1265 (2005)