

タイヤの横力に基づいた路面摩擦リアルタイム測定システム

Realtime Measurement System of Road Friction Using Cornering Force

○岡 宏一（高知工科大学） 児玉 迪弘（高知工科大学）
熊谷 靖彦（高知工科大学）

Koichi OKA, Kochi University of Technology, Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kochi
Michihiro KODAMA, Yasuhiko Kumagai

This paper describes a development of realtime measurement system of the road friction between a tire and road when the car is turning a corner. The principle of the measurement system is by solving the equation between the lateral force of a tire from the centrifugal force and the lateral force from the deformation of the tire. To solve the equation, the informations of car velocity, weight acting on the tire, turning radius, slip angle, modulus of rigidity of the tire, and so on are required. In this paper, we propose the concept for the measuring system. The consideration of the lateral force is explained. The experimental setup for the measurement system is introduced, and the experimental results are shown for the feasibility of the proposed measurement system for road friction.

Key Words: road friction sensor, lateral force, slip angle, GPS

本研究は、車両がコーナリング走行中であるときに、路面摩擦の検出を行うシステムの提案である。直進走行時には、スリップ率を用いて路面摩擦の検出が行えることを確認しているが、本報告では、直進走行時に加えてカーブなどを走行する場合にもリアルタイムで、路面摩擦を検出できる方法を提案する。提案した方法を用いて実際の車両による実験結果を示し、その有効性を検証したので、その結果を報告する。

車両が旋回するときには、タイヤにはFig. A1に示すような力が働くと考えられる。タイヤの慣性力を無視できるものとする、ブレーキをかけていない従動輪ではコーナリングフォースと遠心力はつりあうと考えることができる。このとき遠心力 c_f は、車の運動挙動から次式によって求めることができる。

$$c_f = mv^2/R \quad (1)$$

一方タイヤが発生する横力 l_f は、タイヤの加重などに基づいてタイヤが歪む量を仮定し、路面摩擦係数の関数として次式で考えることができる。

$$l_f = lsG \tan \beta/2 \quad (2)$$

ただし、 l はタイヤ設置長さ、 s は滑り位置、 G :タイヤ横弾性係数、 β :スリップ角である。これらの2つの式を等値する。

提案するシステムは、路面摩擦係数を求めるために以下の変数を検出する必要がある。タイヤの回転速度、車の向いている方向、車が進む方向、操舵角、スリップ角などであり、これらの変数は、モデルなどから計算することは困難であり、実験的に求めることが必要である。このために、車の向いている方向や車が進む方向は、GPSを2つ内蔵したセンサを用いることにより検出した。タイヤの回転速度やスリップ率などは、ABS信号から推定した。操舵角は前輪の操舵装置にポテンショメータを取り付けて測定した。

実際の車両を用いて実験を行った結果をFig. A2に示す。これは、ハンドルの舵角を35度に固定したときの実験結果であり、横軸は時刻、縦軸は路面摩擦係数の推定結果である。なお、走行時の速度は変化させて、実験を行った。得られた路面摩擦係数は、速度や車体方向、旋回半径に関わらずほぼ一定の値が得られていることがわかる。推定値に乱れが発生している部分は、ABSの信号の乱れと一致しており、この乱れが旋回半径に影響し、その結果推定値に大きな誤差が発生したと考えられる。ABS信号の乱れの原因

は、ABS信号が20km/h以下で走行した際に正常に取得できない仕様といるためと考えられる。

今回の報告は、車両が旋回時にあるときに路面摩擦係数をリアルタイムで計測するためのシステムを提案し、その装置に必要な諸量について考察し、実際に実験を行うことによって、提案するシステムの有効性を確認したものである。この結果、速度などの変化に対し、推定値はほぼ一定の値を示すことから提案したシステムの可能性を確認することができた。推定した数値は、実際の数値とは少し異なると考えられるが、研究の第一段階としてタイヤのゴムの厚さや横弾性係数など、多くの仮定を用いていることを考えると、今後の展開を考えることは可能であると思われる。

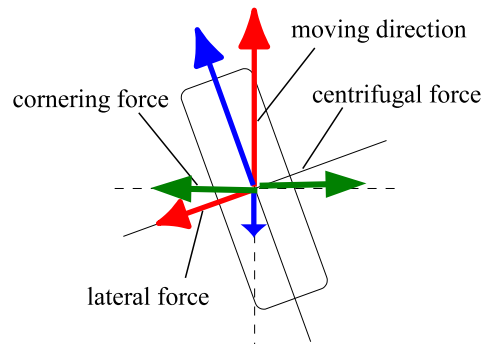


Fig.A1 Various force about tire

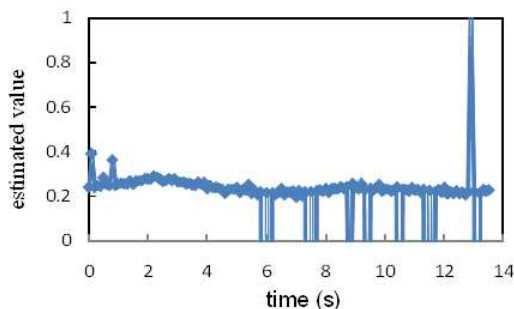


Fig.A2 Experimental results when a car is turning on a stationary circle

1. はじめに

高知県などの温暖な地方でも、冬季の降雪や路面凍結、また中山間地域では橋上などの凍結がおこる。その場合には、このような路面に日頃慣れていないための事故が発生することがある。この対策として、路面の状況をリアルタイムで検知し、路面摩擦が低下している場合には注意を喚起するようなシステムがあると有効である。

凍結を検知することを目的として、赤外線カメラによる路面温度からの凍結検知、路面モデルと気象状況による凍結予想、滑り測定車を用いた路面摩擦測定、加速度計などによる車両の運動からの凍結検出などの方法が開発されている。しかし、これらの検出システムは、赤外線カメラを道路に施設する工事が必要、路面モデルのための気温や風速を計測する装置が必要、滑り測定のための別の車輪を持った車両が必要、など高価で大がかりなシステムとなる。また、加速度計を用いるシステムは、ブレーキをかけた場所だけの局所的な測定しかできない。このような、高価で大がかりなシステムを温暖な地方での凍結の対策として利用することは難しいと考えられる。

より簡便にリアルタイムで路面の摩擦状況を検出するシステムとして、ABS信号を用いた路面摩擦検出システムが開発されている¹⁾。この装置は、車の加速度とタイヤのスリップ率の関係から、路面摩擦を推定するシステムである。しかし、検出のために車の加速度変化を駆動力と考えて用いている装置であるため、車両が直進走行しているときにしか路面摩擦を推定できないシステムとなっている。旋回時の旋回時の摩擦係数の推定のためにも種々の方法が提案されている。しかしこれらの方法は正確なシミュレーションモデルが必要であるものや、大型の専用車両が必要であるもののため、簡便で車載できる装置とは言えない。

本研究ではABS信号及びGPS信号から得られる情報から、車両が旋回しているときにリアルタイムで路面摩擦を推定するシステムを提案する。まず、本システムの原理を述べ、そのために必要な諸量を計測する実際の装置を紹介する。これらの装置を用いることにより実際の車両を用いて実験を行い、提案した方法の可能性を検証する。

2. 路面摩擦測定原理

2.1 タイヤに働く力

車両が旋回している時、タイヤの移動方向とタイヤの向いている方向には差が生じる。その角度をスリップ角という。このときのタイヤの運動に関する説明を図1によって行う。図の上方向が進行方向であり、タイヤの方向はその方向とずれている。タイヤに働く力は、車両から加えられる力と路面から加えられる力である。このうち図に示す水平面内の力を考えると、車両からは遠心力と駆動トルクがタイヤに働き、路面からはタイヤのゴムの変形による横力が働くと考えられる。

タイヤの横力は、タイヤの方向と垂直方向に働くため、これをタイヤの進行方向とその垂直方向に分解することができる。タイヤの進行方向の力は旋回による走行抵抗であり、その垂直成分がコーナリングフォースと呼ばれるものである。このコーナリングフォースは車両からタイヤに働く遠心力とつりあうと考えることができる。

今回の報告で提案する路面摩擦測定の原理は、タイヤに加わるコーナリングフォースを路面からの力に基づいて求めたものと、車両からの力に基づいて求めたものの2つが釣り合うとして、その等式を解くことによって求めるものである。以下では2つの力を求める方法を述べる。なお、今回の摩擦係数の推定には従動輪のタイヤを用いるものとする。つまり車輪にはエンジンなどからの駆動力は働かず、またブレーキも使っていない状態で推定するものとする。

2.2 車両からタイヤに働く遠心力

車両から一つのタイヤに働く遠心力を求めたり、測定することは困難であると考えられるが、今回の提案では、タ

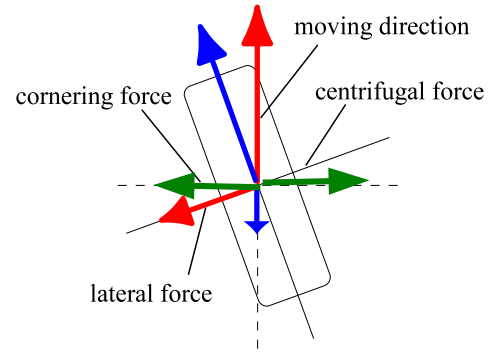


Fig. 1: Various force acting on tire

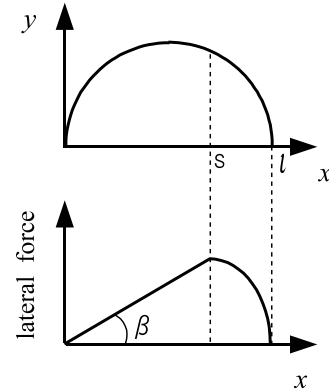


Fig. 2: Load of tire and Lateral force of tire

イヤに垂直に付加される重量分がそのタイヤの遠心力に等与すると仮定する。また、その部分の質量を m とする。つまり車両からタイヤに加わる垂直方向の力は、 g を重力加速度として mg と表せる。このとき遠心力 f_c は次式で表される。

$$f_c = mv^2/r \quad (3)$$

ただし、 v はタイヤ進行方向の速度、 r は旋回半径である。

2.3 タイヤの変形から求めるコーナリングフォース

タイヤが鉛直方向に車両重量を支持する力の分布は、図2の上の図に示すようにタイヤの接地長 l に対して放物線状にかかるかと仮定する。このとき力の分布 y は以下のように表せる。

$$y = ax(l-x) \quad (4)$$

ただし、 a は定数であり、 x はタイヤが設置した点からの距離である。この放物線を積分した値はタイヤにかかる重量となるため、以下の式が成り立つ。

$$\int_0^l y dx = \int_0^l ax(l-x) dx = mg \quad (5)$$

この式を解くことによって a が求まる。

車両が旋回するとき、タイヤには遠心力が働くため、図2の下図のようにタイヤは接地地点から後ろ方向にスリップ角 β で横方向に変形する。変形による弾性力が分布加重による静止摩擦より大きくなる点以降はタイヤは滑っていると考えられる。変形による弾性力は、タイヤの横弾性係数 G と変形量の積で表され、分布加重による静止摩擦は、図2上のグラフと静止摩擦係数 μ との積と考えられる。これより滑りはじめの点 s は、

$$Gs \tan \beta = as(l-s)\mu \quad (6)$$

であり、これを s について整理すると、

$$s = l - \frac{l^3 G \tan \beta}{6mg\mu} \quad (7)$$

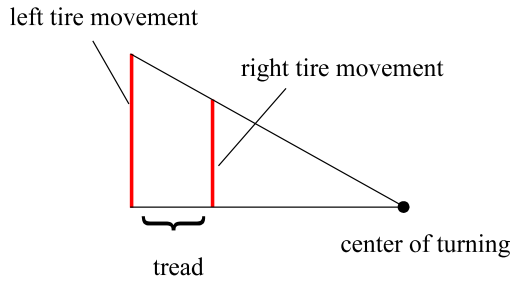


Fig. 3: Turning radius

となる．横力は図 2 の変形の面積と横弾性係数の積になるが， $x = s$ から l までの滑り状態にあるときの曲線部分を直線で近似すると，横力 f_l は以下のように計算できる．

$$f_l = lsG \tan \beta / 2 \quad (8)$$

2.4 路面摩擦係数の推定

以上 j の結果より，(3) 式，(7) 式，(8) 式を用いて，路面摩擦係数が以下のように求まる．

$$\mu = \frac{l^4 G^2 r \sin \beta \tan \beta}{6mg(rl^2 G \sin \beta - 2mv^2)} \quad (9)$$

本研究で提案する推定方法は，(9) 式を用いて路面摩擦係数を検出することである．

3. 各諸量の測定方法

式 (9) を用いて摩擦係数を求めるためには，式の右辺に出て来る諸量を検出する必要がある．今回の提案では，実際にこれらの値を本研究ではこれらの値を以下のように検出した．

3.1 タイヤの速度

タイヤの速度 v は，ABS 信号のパルスをカウントするとにより，検出した．実験に用いた車両は，スリップ率を用いて直進状態での路面摩擦係数の推定が行える車両である．スリップ率の検出は，駆動輪と従動輪の速度差から行うようになっており，このために車両の ABS 信号をデータとして取り込めるようになっている．

3.2 タイヤの旋回半径

タイヤの旋回半径は，従動輪のタイヤ回転数の差から求めるものとする．車両が旋回するときには，左右の各タイヤの間には図 3 に示すような関係があると考えられ，左右のタイヤの移動距離の差から旋回中心をもめることができる．またその図より左右それぞれの旋回半径を求めることが可能である．

なお，図 1 における考察から，左右のタイヤの移動速度 v は，それぞれのタイヤの回転速度求めた v_w と，スリップ角 β を用いて

$$v \cos \beta = v_w \quad (10)$$

と考えることができる．

3.3 スリップ角

スリップ角 β は，GPS による車両の進行方向 θ_p ，GPS コンパスによる車両の向き θ_d ，および変位センサによる実舵角 θ_s から以下の通り求まる．

$$\beta = \theta_d + \theta_s - \theta_p \quad (11)$$

GSP コンパスは，前後に GPS アンテナを一つずつ装備し，二つのアンテナで受信した GPS 信号の位相差から方角を求める装置である．外観を図 4 に示す．本装置は実験車両天井部に設置して用いる．また本装置には基本的な GPS



Fig. 4: Photograph of GPS compass

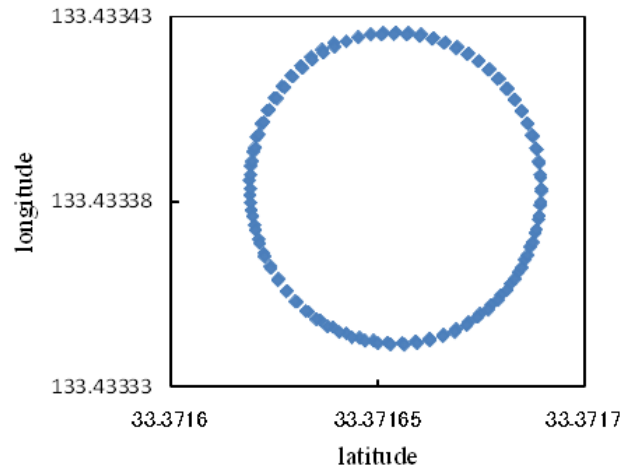


Fig. 5: Locus of car movement

に備わっている出力系統も備わっており，車両の進行方向計測のための GPS 装置として用いることが可能である．

車両の進行方向は，ディファレンシャル機能を持った GPS を用いて 3 方向の速度を GPS 信号から直接求めて用いた．

操舵角は，ポテンシオメータを本装置を車両のハンドルロッドに取り付けハンドルロッドの変位から前輪の実舵角を測定した．

4. 実車両を用いた実験

今回の実験は，定常旋回での摩擦係数推定実験を行った．

4.1 実験方法

実験は直動型変位センサを使わずにハンドルをなるべく一定に切ったまま旋回を行い，実験後ハンドルを固定したままゆっくりと停車した後タイヤの舵角を分度器にて測定した．それらの結果をもとに作成した解析プログラムにより処理を行った．今回の実験では舵角が 35 度であった．

4.2 実験結果

実験結果を図 5 ～ 10 に示す．まず，実験時の車両の軌跡を図 5 に示す．横軸は経度，縦軸は緯度を表しており，車両がほぼ同一の円上を走行していることがわかる．

また，そのときの GPS から得られた速度を図 6 に，GPS から得られた角度を図 7 に示す．図よりわかるように，走行スピードに変化があることがわかる．このときの進行方向角度と車両の角度より，車は車両の進行方向角度の位相が遅れることがわかる．がともに 0 度から 360 度までの角度が変化しており，車両が旋回していることがわかる．

次に ABS から得られた信号を図 8 に，その速度から得られた旋回半径を図 9 に示す．ABS 信号のグラフでは途中

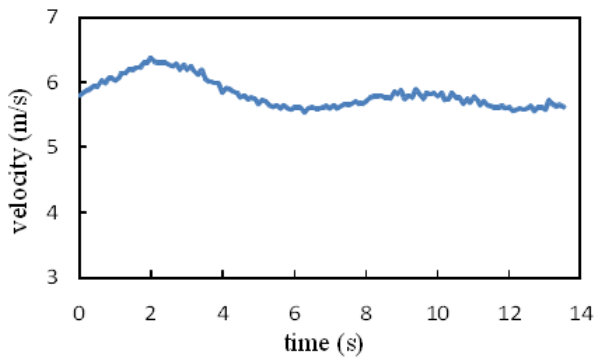


Fig. 6: Tire velocity

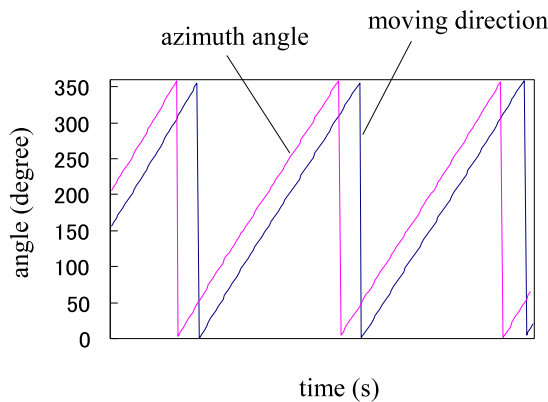


Fig. 7: Measured angle from GPS signals

カウントできない場所があり、これらの場所では旋回半径もおかしな値を出力していることがわかる。その他の場所ではほぼ一定の旋回半径が得られており、この結果は、図5に一致することが確認された。

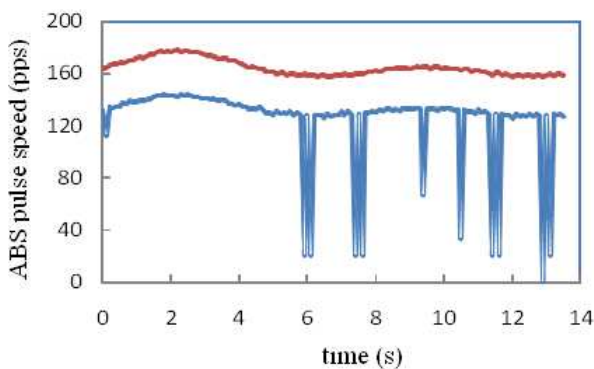


Fig. 8: ABS signal results

最後に、推定した路面摩擦係数を図10に示す。推定した路面摩擦係数は、速度や車体方向、旋回半径に関わらずほぼ一定の値が得られていることが分かる。一部路面摩擦係数の乱れが発生している部分はABSの信号の乱れと一致しており、この乱れが旋回半径を求める際に影響を及ぼし、その結果が摩擦係数を求める際に影響していると考えられる。原因としては、ABS信号は20km/h以下で走行した際に正常に取得できない仕様となっており、今回の旋回速度が20km/h前後であったため一部正常に取得できなかったと考えられる。

一般に路面摩擦係数は約1であると言われているため、

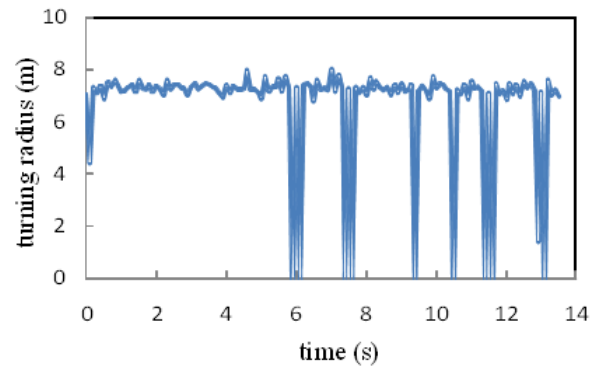


Fig. 9: Turning radius

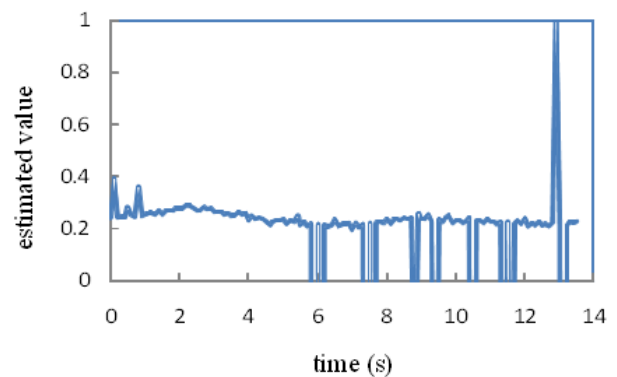


Fig. 10: Result of estimation of road friction coefficient

今回推定された値はかなりの誤差を含むものと考えられる。しかし、今回の装置はその開発の第一段階のものとして試作されたものであり、出力された結果のオーダーが同じであることを考えて、十分その可能性が示されたと考えることができると思われる。

5. おわりに

車両の旋回時においてGPS信号とABS信号を用いた新たな路面摩擦推定方法を提案し、そのための第一段階として検出装置を試作し実験を行った。この試作、および実験において種々の改善の余地が確認され、車両、装置、測定条件と見直す必要があることがわかった。

しかし定常旋回時のデータより安定して路面摩擦係数を測定できる可能性も見出した。ただし一般的な路面摩擦係数は0.4程度とされており、今後は誤差をなくすために必要な情報を考察する必要がある。

最後に、本実験装置を搭載した車両を提供していただき、またソフトの変更などにも協力いただいた住友ゴム工業株式会社情報研究部のみなさんに謝意を表する。

参考文献

- (1) 川崎裕章, 走行中のタイヤと路面間の滑りやすさ測定, 自動車技術会, 2001年秋季大会, 2002