九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

自動車のタイヤ一路面間摩擦係数の推定法に関する研究

田口，学
九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻 ： 修士課程

松永，勝也
九州大学大学院システム情報科学研究院知能システム学部門

松木，裕二
九州大学大学院システム情報科学研究院知能システム学部門

合志，和晃
九州大学大学院システム情報科学研究院知能システム学部門

他

https://doi.org/10.15017/1515718

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 6 (1), pp.65-68, 2001-03-26. Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

九州大学大学院
システム情報科学紀要
第6巻　第1号　平成13年3月

Research Reports on Information Science and
Electrical Engineering of Kyushu University
Vol.6, No.1, March 2001

自動車のタイヤ－路面間摩擦係数の推定法に関する研究

田　口　学*・松永勝也**・松木裕二**・合志和晃**・志堂寺和則**

Inference of Friction Coefficient between Tire and Road

Manabu TAGUCHI, Katsuya MATSUNAGA, Yuji MATSUKI, Kazuaki GOSHI and Kazunori SHIDOJI

(Received December 15, 2000)

Abstract: Car accidents occur when headway distance is shorter than the stopping distance. Stopping distance consists of reaction distance and breaking distance. It is necessary for drivers to understand the stopping distance in real time to preventing traffic accidents from occurring. To estimate the breaking distance in real time, it is required to presume friction coefficient, which is one of the factors in determining breaking distance and it was difficult to calculate in real time in driving. So we examined whether it was possible to presume friction coefficient in real time. In this study, we analyzed the noise that was generated by friction between tire and road to presume friction coefficient in non real time, using Fast Fourier Transform (FFT) and a back propagation algorithm for the neural network. We could presume the proper friction coefficient and breaking distance from the analysis. It suggests that we can presume the friction coefficient in real time.

Keywords: Friction coefficient, Real time, Stopping distance, Breaking distance, Neural network, Traffic accident

1. 研究の背景

自動車の衝突事故は,停止距離が進行方向空間距離(当該自動車からその進行方向上にある最も近い対象物までの距離)よりも大きい場合に発生する(KMモデル)[1]．停止距離は空走距離と制動距離からなっており，空走距離は認知・反応時間の突発的な延長によって，また，制動距離は制動条件の変化により延長することがある．一方，進行方向空間距離については，人の持つ先急ぎ衝動や到着時間の短縮のための先急ぎ運転によって短縮する傾向がある．このようなことから，衝突事故の発生条件が満たされるようになる．運転者が衝突事故を防止するためには，停止距離が突発的に延長しても，それよりも大きな進行方向空間距離を保持して走行しなければならない．

ところで，進行方向空間距離はレーザレーダによって測定が可能である．また，空走距離は運転者の認知・反応時間と自動車の速度により推定が可能である．しかしながら，制動距離は，タイヤと路面間の摩擦力が不明であることから，運転中に推定することは困難である．

制動距離は車輪が固定された状態とそうでない状態とでは異なる[2]．車輪が固定された場合は(1)式で表される．

$$S = \frac{v^2}{2g\mu} \tag{1}$$

また，車輪が固定されていない場合は(2)式で表される．

$$S = \frac{m + m_{red}}{2(W \cdot \mu_R + P\frac{r}{R} \cdot \mu)} v^2 \tag{2}$$

ただし，Sは制動距離，gは重力加速度，vは制動時の速度，μは摩擦係数，$m = W/g$は全車質量，$m_{red} = (1/R^2)\sum J\lambda$は車輪及び他の回転部分の慣性能率を車輪の周辺速度について換算した相当質量，Rは車輪の有効半径，Jは回転部分各個の慣性能率，λは回転部分各個の回転数/車輪の回転数，μ_Rはころがり抵抗係数，Pは全車輪にかかる制動圧力の合計，rはドラムの半径を表す．走行中にブレーキを踏む際，制動力が最も低下するのは車輪の動きが完全に固定された状態である．制動力が低下すると制動距離が延長する．本研究では，制動距離が長くなる場合を考えて式(1)を採用した．式(1)より，制動距離は速度及び路面の摩擦係数により決定される．これらの要因を実時間で推定する必要がある．速度に関しては現在，実時間で測定が可能である．ところが，摩擦係数に関しては現在のところ推定が困難である．そこで，実時間で制動距離を算出するために必要な路面の摩擦係数の推定を試みた．

摩擦係数を推定する方法としては，これまで車軸の回転を分析する方法[3]，光の反射を利用する方法[4]及びタイヤが路面を捉える力を利用した方法[5]が試みられている．車軸の回転を分析する方法及びタイヤが路面を捉える力を利用した方法では摩擦係数を実時間で測定するまでには至っていない．また，光の反射を利用する方法は実時

平成12年12月15日受付
* 知能システム学専攻修士課程
** 知能システム学部門

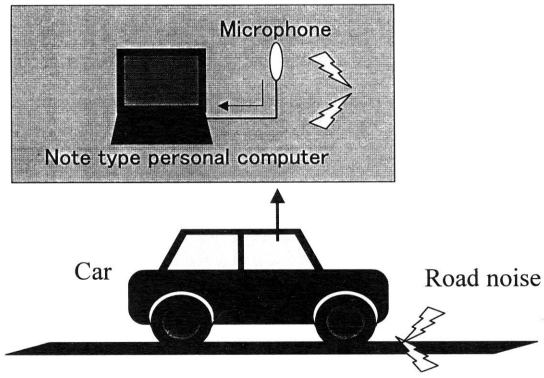


Fig.1　View of recording.

間で推定することは可能ではあるが，路面の乾湿状態の判別までにとどまっており，摩擦係数を推定するところまでには至っていない．

ところで，タイヤと路面間に発生する走行音は広帯域に存在することが知られており[6]，この走行音の周波数は摩擦係数の違いによっても異なると考えられる．本研究では，自動車のタイヤと路面間に発生する走行音を周波数解析し，非実時間ではあるが，摩擦係数の推定を試みた．その際，判別手法として，木構造による方法およびニューラルネットワークを用いる方法を検討した．

2.　実験1 閾値を用いた路面の判別

2.1　目的

タイヤと路面間に発生する走行音から，周波数分析により路面の種類及び状況の特徴を抽出し，木構造を用いた路面判別を試みた．

2.2　方法

2.2.1　実験条件

路面の種類(アスファルトとコンクリート路)及び状態(乾いた状態と濡れた状態)の組み合わせによる計4種類の条件を設定した．**Table–1**にこれらの路面の摩擦係数μを示す．これらの摩擦係数はバネ計により測定し，算出した値である．測定時の走行速度は時速40kmと時速60kmの2条件で，測定時の速度は一定に保った．

Table-1 The friction coefficient.

	Dry condition	Wet condition
Asphalt	0.74	0.43
Concrete	0.70	0.42

2.2.2　装置および標本数

Fig.1に示すように，マイクロホンを実験車輌室内の右後方に固定し，自動車の走行音をコンピュータに入力し，保存した．このときの入力条件は，標本周波数44.1kHz，量子化数16bit及びチャンネル数1(モノラル)とした．標本化時間は1サンプルあたり1秒間とし，データ数は，80サンプル(10サンプル×路面4条件×速度2条件)とした．

2.2.3　処理

録音した走行音に対しフーリエ解析(FFT)による周波数分析を行った．また，エンジン音を除去するために，停止状態においてエンジンを走行時の回転数にしてエンジン音を標本化し，周波数分析を行った．各周波数において走行時のデータとエンジン音のデータとの差をとり元データとした．この元データの周波数特性例を**Fig.2**に示した．**Fig.2**での横軸は周波数(単位はHz)，縦軸はpowerを表す．

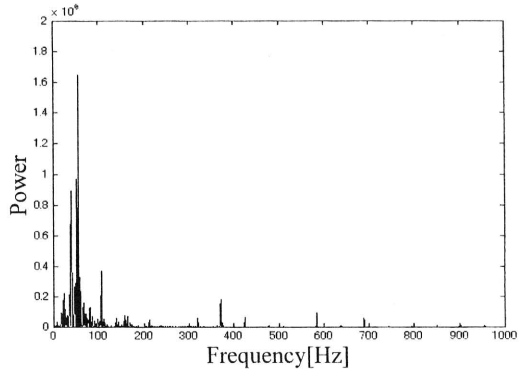


Fig.2　Frequency dependence.

視察による結果，1kHz以下の周波数に路面の種類による違いが見られた．そこで，解析を簡単にするために1kHz以下の周波数帯域のスペクトルを25Hzごとにまとめ，合計40帯域に分割した．その結果，176Hz以上200Hz以下，226Hz以上250Hz以下及び676Hz以上700Hz以下の周波数帯域に違いが表れた．

解析したグラフの一例を**Fig.3**と**Fig.4**に示す．**Fig.3**及び**Fig.4**はそれぞれ，アスファルト路の乾いた状態とコンクリート路の乾いた状態の解析結果を表す．グラフの縦軸はpowerの平均値，横軸は周波数(単位はHz)を表す．また，判別アルゴリズムを**Fig.5**に示す．

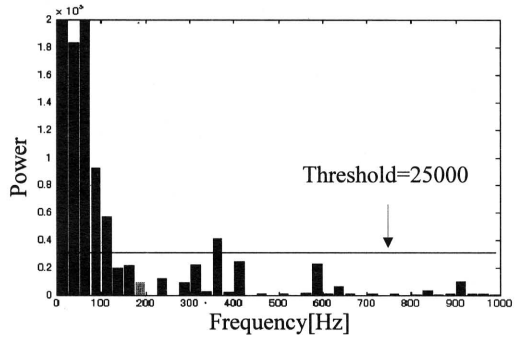


Fig.3　Spectrum at the dry condition of asphalt (40km/h).

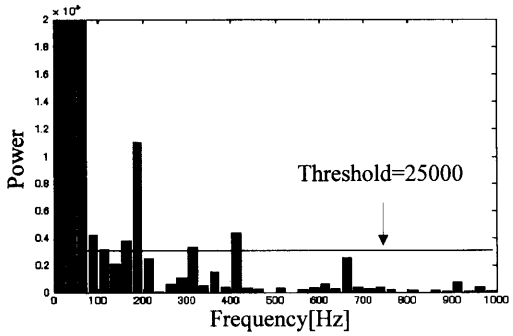


Fig.4 Spectrum at the wet condition of asphalt (40km/h).

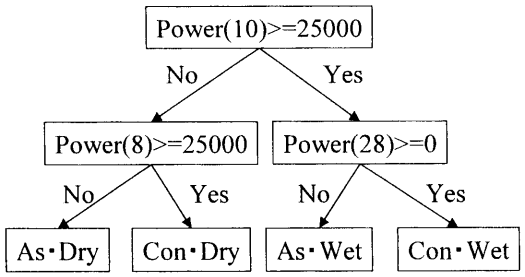
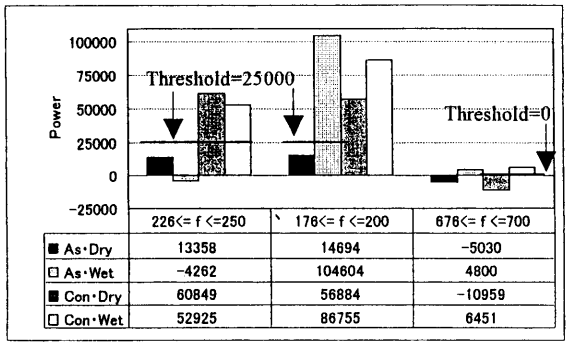


Fig.5 Load distinction algorithm.

2.3 路面の種類及び状態の判別結果

路面の種類の判別は，周波数帯域が226Hz以上250Hz以下の周波数帯域のpowerにより行うことができた．このときの判別に用いた閾値は25000(相対値)であった．次に路面状況の判別は，アスファルト路については閾値25000で，176Hz以上200Hz以下の帯域のpowerにより判別可能であった(**Fig.3**,**Fig.4**参照)．また，コンクリート路については閾値0で，676Hz以上700Hzの帯域のpowerにより判別可能であった．

これらの結果を**Fig.6**に示す．$226 \leq f \leq 250$は周波数帯域fが226Hz以上260Hz以下であることを意味する．また，特徴抽出に用いた各帯域ごとに，アスファルト路の乾いた状態(As·Dry)，アスファルト路の濡れた状態(As·Wet)，コンクリート路の乾いた状態(Con·Dry)及びコンクリート路の濡れた状態(Con·Wet)のpowerの平均値で表した．



	226<= f <=250	176<= f <=200	676<= f <=700
■ As・Dry	13358	14694	-5030
□ As・Wet	-4262	104604	4800
■ Con・Dry	60849	56884	-10959
□ Con・Wet	52925	86755	6451

Fig.6 Power of the distinctive frequency bands (average).

2.4 考察

今回は4条件の路面に対しての判別を行った結果，すべてのデータを判別することができた．このことにより，ある特定の路面状況に対応する摩擦係数に関しては推定可能であることが示唆された．

3. 実験2 ニューラルネットワークでの路面判別

3.1 目的

前述の閾値を用いた木構造による摩擦係数推定の可能性を示したが，未知データに対応できないことが予想される．そこで本実験ではこの問題に対応するため，ニューラルネットワークを用いての摩擦係数の推定を試みた．

3.2 方法

3.2.1 条件

録音条件は実験1と同一であった．また，路面及び速度の条件に関しては同一であるが，使用データ数は200サンプル(詳細は処理を参照)とした．

3.2.2 ニューラルネットワークの構成

バックプロパゲーション(BP)アルゴリズムによる3階層型ニューラルネットワークを構成した．入力層のニューロンの数は周波数帯域の数の40であった．出力層のニューロンの数は摩擦係数の推定値とし，中間層のニューロンの数は100とした．また，摩擦係数の実測値を教師信号として用い，繰り返し学習回数は1サンプルあたり最大2000回とした．

3.2.3 処理

周波数解析については，実験1の手続きと同様であった．周波数解析後，ニューラルネットワークに通す各周波数帯域のpower値を正規化し，BPアルゴリズムで学習させた．このとき学習に160サンプル(20×路面4条件×速度2条件)のデータを用いた．学習後，構築したニューラルネットワークを40サンプル(5×路面4条件×速度2条件)用いて評価した．

3.3 結果

Fig.7に各条件における摩擦係数の推定値(平均値と標準偏差)と実測値を示す．但し，**Fig.7**のAsはアスファルト路，Conはコンクリート路，Dryは乾いた状態，Wetは濡れた状態を表す．

アスファルト路の乾いた状態(As·Dry)，アスファルト路の濡れた状態(As·Wet)，コンクリート路の乾いた状態(Con·Dry)及びコンクリート路の濡れた状態(Con·Wet)の推定値はそれぞれ，時速40kmでは，0.78，0.43，0.72，0.44であった．また，時速60kmでは，0.78，0.46，0.68，0.44であった．

また，**Fig.8**に各条件における摩擦係数の推定値と実測値の誤差(平均値と標準偏差)を示す．アスファルト路の

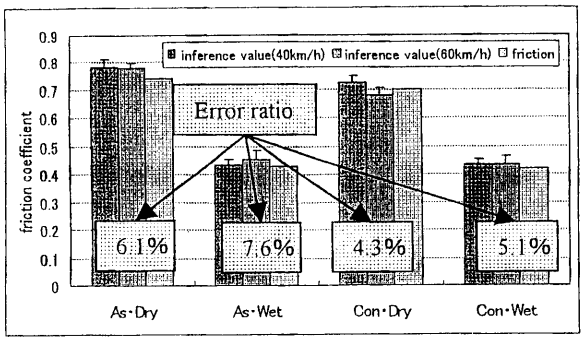


Fig.7　Inference value of friction coefficient.

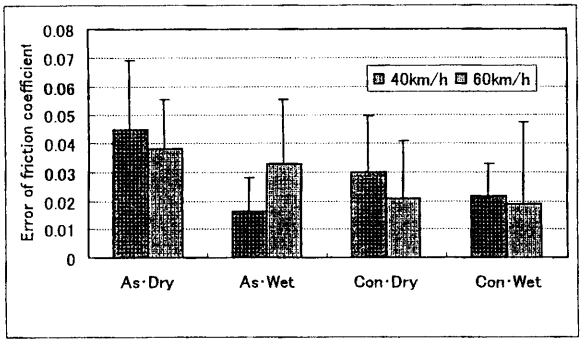


Fig.8　Errors of friction coefficient.

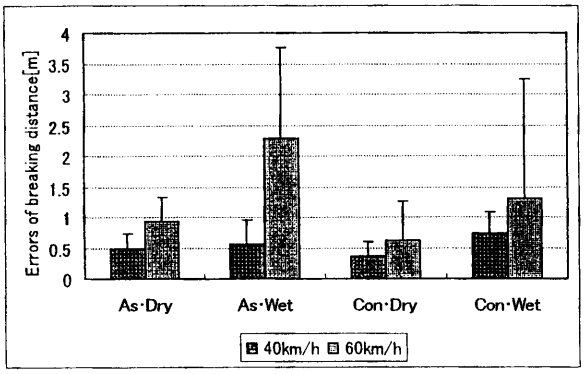


Fig.9　Errors of breaking distance.

乾いた状態(As·Dry)，アスファルト路の濡れた状態(As·Wet)，コンクリート路の乾いた状態(Con·Dry)及びコンクリート路の濡れた状態(Con·Wet)の推定値は，時速60kmではそれぞれ，0.045，0.016，0.030，0.022，時速40kmではそれぞれ，0.038，0.033，0.021，0.019であった．これらの摩擦係数推定値の誤差は実測値に対して約8%以内に収まった．また，分散分析の結果，時速40km時の摩擦係数の誤差は時速60km時の摩擦係数の誤差より有意に大きいことがわかった($F(1,32)=10.951$, $p<.005$)．

さらに，この誤差より算出した制動距離の誤差(平均値と標準偏差)を**Fig.9**に示す．時速40kmでの誤差はそれぞれ，0.48m，0.55m，0.36m，0.73m，時速60kmでの誤差はそれぞれ，0.94m，2.28m，0.63m，1.32mであった．分散分析の結果，時速60km時の制動距離の誤差は時速40km時の制動距離の誤差より有意に大きいことがわかった($F(1,32)=5.389$, $p<.05$)．

3.4　考察

制動距離の誤差が時速40km時に比べ時速60kmが大きくなったのは，式(1)に示されるように，制動距離は速度の2乗に比例するからと考えられる．

摩擦係数の推定値の誤差は,時速60kmのほうが小さくなった．その原因としては，ニューラルネットワークの学習用データによるものと考えられる．評価用データの誤差は，学習させたデータとパターンがより類似したときに，小さくなると考えられる．時速60km時の評価用データのパターンは，時速40km時の評価用データのパターンに比べて，学習用データに近かったたため，誤差が小さくなったとも考えられる．

4.　ま　と　め

自動車の衝突事故防止のためには，停止距離より長い進行方向空間距離を確保して走行する必要がある．そのためには，実時間において停止距離を推定する必要がある．そこで，路面の摩擦係数を，自動車の走行音から推定する方法を検討した．木構造を利用した方法は路面状況すなわち異なる摩擦係数を判別可能であったが，任意の摩擦係数を推定することは困難であると考えたので，ニューラルネットワークを用いた摩擦係数の推定を試みた．その結果，かなり高い確率でかつ8%以内の誤差で推定が可能であった．本方法により汎用的な摩擦係数の推定を可能にすると思われる．ただし，今後その他の路面状況及びその他の速度においても摩擦係数の推定が可能かどうかを検証する必要があろう．

参　考　文　献

1) 松永勝也：自動車の運転事故の発生要因についての一考察，交通科学研究資料, Vol.30, No.6, pp.99-102 (1997).
2) 近藤政市：基礎自動車工学 前期編, 養賢堂, pp.139-140 (1986).
3) (社)自動車技術会：自動車技術シリーズ2　自動車の制御技術, 朝倉書店, p.120 (1996).
4) 竹鼻俊夫：路面反射の偏光特性を利用した路面状態センサ, 工学工業技術協会, Vol.27, pp.158-164 (1989).
5) M.Andrews, et al.：Porsche's contribution to Safer and More Comfortable Driving in the Future, *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, Vol.4, pp.1879-1886 (1994).
6) (社)自動車技術会：自動車技術シリーズ11　自動車の振動騒音低減技術, 朝倉書店, p.37 (1996).