

I-4 解析的なパラメータ推定に基づく交通事故時の車両運動再現システムの開発

Traffic Accident Reconstruction System Based on Analytical Parameter Estimation

ハジホセイナル マンスール
Mansour Hadji Hosseinlou

中 辻 隆
Takashi Nakatsuji

魏 朗
Lang Wei

[抄録] 実際の交通事故データから未知のモデルパラメータを解析的に推定する手法を確立すること、およびユーザインターフェイスに優れた入力ルーチンやアニメーションの実現を図ることを目的とし、タイヤモデル、ドライビングモデル、および衝突モデルを統合した交通事故再現システムの開発を行った。モデルの作成では、影響の大きいタイヤモデルに関して3つのモデルの比較を行った。パラメータの推定では、最終停止位置の推定誤差を目的規範とする非線形の最適化問題への定式化を行った。また、パソコンの Windows システムを用いることによって、メニュー方式による入力データの作成と分析結果のアニメーション表示の実現を図った。

[Abstract] To estimate parameters in a traffic accident reconstruction model, an analytical method was proposed. A two-dimensional car-to-car impact model combined with a tire model and two-wheel equivalence model was developed for reconstructing traffic accidents. Normal and tangential restitution coefficients in an impact model, as well as the friction coefficient, slip ratio and steering angle of a tire model were adopted as unknown model parameters. The parameters were estimated so as to minimize the difference between the calculated and observed rest positions of vehicles. For evaluating the effect of tire model in reconstructing traffic accidents, three tire models were compared; Sakai's tire model, modified Sakai's tire model and Gim's tire model. After the validity of the estimation method was investigated for an artificial accident, the method was applied to two actual traffic accidents and the model parameters were evaluated. A computer animation system that works on the Windows system was also developed.

[キーワード] 事故再現、衝突モデル、タイヤモデル、ドライビングモデル、非線形最適化

[Key words] Accident reconstruction, Impact model, Tire model, Driving model, Nonlinear optimization

1. まえがき

交通事故が発生した時に車がどのような運動を行ったかを、最終的な停止位置を確かな与件として、路上のスキッド痕、車両の破損状況、あるいは運転者の証言などの情報を利用することによって、出来る限り復元しようとすることを交通事故の再現という。また、それを実現するシステムを事故再現システムという。交通事故の分析においてこのようなシステムの重要性は論を待たないが、それを実現するためには、タイヤと路面の間に作用する力を表現するタイヤモデル、運転者の運転操作と車の運動の関係を記述するドライビングモデル、あるいは衝突時の力学的挙動を表す衝突モデルなどを統合的に組み合わせる必要がある。さらには、将来的には運転者の回避操作などを表現するために外的な刺激に対する運転者の応答特性を表すドライバーモデルも考慮する必要がある。こうした交通事故再現システムは、既に諸外国において CRASH¹⁾、SMAC²⁾、あるいは IMPAC³⁾ などといったプログラム開発が行われている。また、わが国においても日本自動車研究所によって J2DACS⁴⁾⁵⁾ モデルの作成が行われている。

交通事故の再現は、現場に残された限られた情報を基に全体像を復元するという作業であり、そこでは大

胆な仮説に基づく試行錯誤的な作業の繰り返しが要求されている。そして、様々な仮説を検証するためのツールとして事故再現システムは不可欠なものであるが、それを表現するためのモデルには未知のパラメータが含まれている。しかしながら交通事故の現場に残されているデータからそれらの値を同定することは多くの場合困難である。従来の再現システムは、車両構造の安全設計を主眼に作られており、実車による衝突試験を通して蓄積されたデータに基づいてパラメータの推定を行うことを想定しているものが多い。そのため道路・交通管理者が交通事故の分析のために使用するのには適していない。また、実車試験には莫大な費用が要すること、実車試験の条件設定が限られていること、あるいはモデル構造が高度化するにつれパラメータの数も増加しており、実車の衝突試験を通してパラメータの推定を行うことが困難になってきている。そのため、未知パラメータを解析的に推定する手法の確立が求められている。同時に、パソコンの Window システムを利用したプログラムが容易に作成できるようになってきており、道路・交通技術者が手軽に利用できる交通事故再現プログラムを提供が可能となってきている。

本論文は、実際の交通事故データからモデルパラメータを推定し、その結果をアニメーション表示することを想定し、1) タイヤモデル、ドライビングモデル、および衝突モデルを統合したモデルを開発すること、2) 未知のパラメータを解析的に推定する手法を確立すること、および3) データの入出力においてはユーザインターフェイスに優れたシステムを開発することを目的としている。モデルの作成に当たっては、影響の大きいタイヤモデルに関して3つのモデルの比較を行った。パラメータの推定に当たっては、最終停止位置の推定誤差を目的規範とする非線形の最適化問題への定式化を行った。また、パソコンのWindowsシステムを用いることによって、メニュー方式による入力データの作成と分析結果のアニメーション表示の実現を図った。次節では、統合された事故再現モデルの概要、特に3つのタイヤモデルについて紹介する。3節では、未知パラメータの推定法に関し、BoxのComplex法を用いた定式化について述べる。4節においては、先ず仮想的に作成した“事故”データを用いて推定手法の妥当性の評価を行う。次に、実際の交通事故を例として、パラメータ推定を行った結果について述べる。5節では、本モデルの入力ルーチンとアニメーションルーチンについて紹介する。最後に、本論文の成果と今後の課題に対して総括を行う。

2. 交通事故再現システム

一般的に事故再現システムは、衝突時の力学的挙動をどのように表現するかによってエネルギー損失モデルと反発モデルに大別される⁸⁾⁷⁾。本システムは後者のモデルに立脚して開発された。すなわち、タイヤと路面の間の相互作用を表すタイヤモデル、運転操作に基づく車の運動を表すドライビングモデル、および衝突時の力学的挙動を表す反発モデルを組み合わせモデルの作成を行った。交通事故時の車両の運動は、その時間的経過から、衝突前、衝突時、および衝突後の3つのフェーズに分けられる。本システムでは、路上のスキッド痕、あるいは運転者の証言等の情報から衝突前の運動については事前に推定出来ると仮定し、衝突時および衝突後の運動に関わるモデルパラメータの推定を行うものとした。

(1) タイヤモデル

路面上を走行しているタイヤの座標系とタイヤに作用する力の関係をFig.1に示す。タイヤのスリップ角が β 、スリップ比が s である時に路面との間に制動力(駆動力) D_F と横力 S_F が作用している。タイヤが x 、 y 方向にそれぞれ V_x 、 V_y の速度で、 z 軸回りに ω の角速度で運動している時、これらの力、および z 軸回りのモーメント M_z と鉛直力 F_z 、スリップ角、スリップ比、および路面のすべり摩擦係数 μ の関係を記述する関数をタイヤモデルという。前後車輪のスリップ角 β_f と β_r は、角速度 ω や舵角 δ などの変量との間に以下の関係が成立する。

$$\beta_f = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right) + \frac{\omega l_f}{V_x} - \delta \quad (1)$$

$$\beta_r = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right) - \frac{\omega l_r}{V_x} \quad (2)$$

ここで、 l_f と l_r は、車の重心点と前後車軸間の距離を表している。ここでは、以下の3つのモデルを取り上げ事故再現システムへの適用性を検討した。

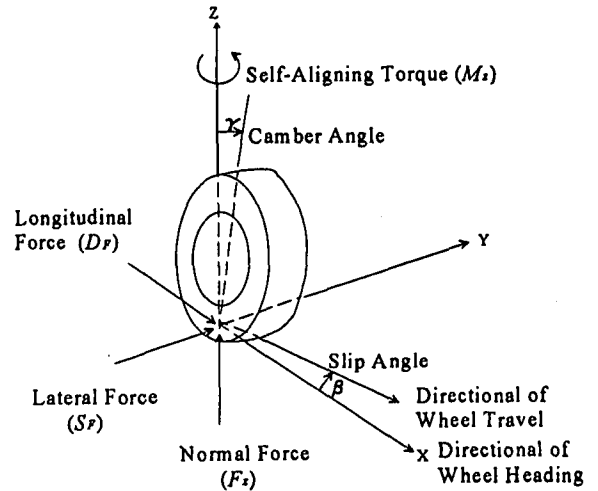


Fig.1 Forces and moment applied to a tire

a) 酒井モデル⁸⁾⁹⁾

スリップ角とスリップ比が充分小さく、タイヤは横方向に曲げの作用を受けないとの仮定の下に作られたモデルである。

b) 修正酒井モデル⁸⁾⁹⁾

横力によるベルトの曲げやねじれによる変形を考慮して、スリップ角が大きい場合にも適用出来るようにしたモデル。すべり摩擦係数の速度依存性、あるいは接地圧の分布形状も改良を行っている。

c) G i mモデル¹⁰⁾¹¹⁾

タイヤの旋回時に、タイヤの z 軸回りにキャンバ角 γ (Fig.1)があると大きな横力が発生する。スリップ角とスリップ比の他にキャンバ角 γ を考慮したモデル。曲げやねじれの影響は考慮していない。アリゾナモデルとも言われている。

(2) ドライビングモデル¹²⁾

車に作用する力に基づいて、車の運動を規定するドライビングモデルとしては、最も単純な二輪車等価モデル¹¹⁾を採用した。すなわち、車が二次元の平面運動を行っているとは仮定し、ローリングとピッチングは無視できるものとした。Fig.2に示すように、車の重心に作用する力とモーメントは、前輪と後輪に作用する力の合成として表すことができ、 x 方向、 y 方向の並進運動、および z 軸回りの回転運動に対して運動方程式を表すことができる。

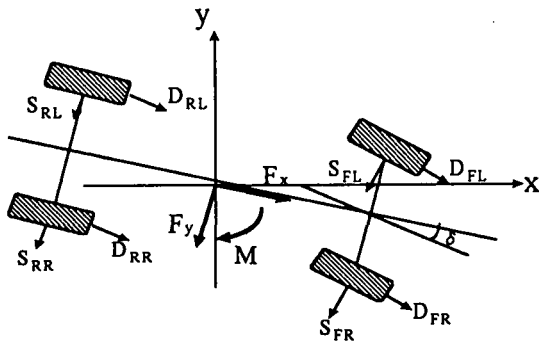


Fig. 2 Driving model

(3) 衝突モデル

先に述べたように、衝突時の車両相互の挙動を記述する手法として、車の破損状態からエネルギーの損失量を求め衝突前後の速度を推定する方法と、反発係数によって非弾性衝突の状態を表しそれらの速度を推定する方法とがある。さらに、石川^{4) 5)}は、鉛直方向の反発係数に加え接線方向の反発係数を導入した手法の提案を行っている。ここでは石川のモデルに準拠してプログラムの作成を行った。衝突の鉛直方向、接線方向を Fig. 3 に示すように定義すると両方向の反発係数は以下のように表すことができる。

$$e_n = - \frac{(v_{2n} - b_2 \omega_2) - (v_{1n} - b_1 \omega_1)}{(v_{20n} - b_2 \omega_{20}) - (v_{10n} - b_1 \omega_{10})} \quad (3)$$

$$e_t = - \frac{(v_{2t} + a_2 \omega_2) - (v_{1t} + a_1 \omega_1)}{(v_{20t} + a_2 \omega_{20}) - (v_{10t} + a_1 \omega_{10})} \quad (4)$$

ここで、a と b は衝突点を基準とした車の重心点の N-T 系の座標を表している。添え字 0 は衝突前の速度、あるいは角速度を意味している。

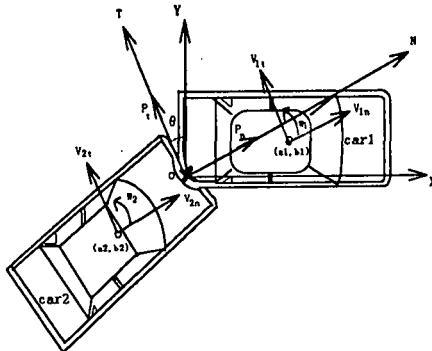


Fig. 3 Impact model of two vehicles

3. モデルパラメータの推定手法

(1) 未知パラメータ

前節のモデルには多くの未知のモデルパラメータが含まれている。タイヤモデルには、路面の摩擦係数 μ 、運転者の制動挙動を表すスリップ比 s 、操舵挙動を表す操舵角 δ とスリップ角 β が含まれ、衝突モデルには両方向の反発係数 e_n と e_t が含まれている。その他にも剛性係数などのタイヤや車の材料特性に関す

るパラメータもある。ここでは、材料特性に関しては既知であると仮定し、路面状態や運転状況によって変わるために事前の推定が困難である摩擦係数やスリップ比や反発係数などを未知パラメータとした。さらに、これらの未知パラメータは、本来的には時間的、あるいは摩擦係数においては空間的に変化するので、それらは動的に推定されるべきものであるが、現場に残されているデータから得られる情報が限られているので、本研究では、それらの値を定数であると仮定した。すなわち、各パラメータの平均値の推定を試みた。さらに、交通事故時の車の運動を、衝突前、衝突時、および衝突後の3つのフェーズに分け、衝突前の運動については、交通事故現場の状況データから推定可能であると仮定し、衝突モデルにおける両方向の反発係数 e_n と e_t 、衝突後のタイヤモデルにおける摩擦係数 μ_i 、舵角 δ_i 、前後輪のスリップ比 s_{Fi} と s_{Ri} を未知パラメータとした。添え字 i は衝突車と被衝突車を区別するためのものである。なお、スリップ角 β は式(1)(2)によって定義されるので独立変量としては取り扱わない。以上、ここでは10個のパラメータを推定することになる。

(2) Box の Complex 法¹³⁾

衝突車と被衝突車の2つの車の初期条件と任意のモデルパラメータ値を与えると、タイヤモデル、ドライビングモデル、および衝突モデルを介して2台の車の停止位置を計算することが出来る。パラメータ値が適切でない時には、その停止位置は実際の位置と乖離する結果となる。ここでは、実測の停止位置に出来る限り近づくようパラメータ値の調整を行うことを考える。すなわち、車 i の計算された停止位置と向きを $x_{si}, y_{si}, \theta_{si}$ 、実際の停止位置と向きを $x_{ai}, y_{ai}, \theta_{ai}$ とする時、目的関数

$$J = \sum_{i=1}^2 \left[\lambda_x (x_i - x_{si})^2 + \lambda_y (y_i - y_{si})^2 + \lambda_\theta (\theta_i - \theta_{si})^2 \right] \quad (5)$$

を最小とするよう未知パラメータの推定を行った。ここで λ は、無次元化のための係数であり、ここでは標準偏差を用いた。各パラメータはそのとり得る値の範囲に以下のような制約条件を受ける。

$$\begin{aligned} -1 \leq e_n \leq 1 & , & -1 \leq e_t \leq 1 \\ 0 \leq \mu_i \leq 1 & , & \delta_{min} \leq \delta_i \leq \delta_{max} \\ 0 \leq s_{Fi} \leq 1 & , & 0 \leq s_{Ri} \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

これらの範囲は、事故の形態や現場の状況に応じて変化させる。例えば、冬期の事故であれば、路面の摩擦係数の範囲をより小さな値の範囲に設定する。

ある未知パラメータの組に対して、目的関数 J は上記の3つのモデルを介して計算されるので未知パラメータの非線形関数となる。すなわち、ここでの問題は制約条件(6)の元で、目的関数 J を最小化する非線形最適化問題に帰着する。その数値的解法としてここ

では、Box の Complex 法を用いた。本手法は、非線形の制約条件を受ける非線形の最適化問題における最適解を極値探索的に求める手法であるが、ローカルミニマムに陥らずにグローバルミニマム解を探索する能力に優れていることを特色としている。

4. 数値解析

(1) 推定手法の妥当性

実際の事故データに適用する前に、推定手法の妥当性を評価するために、予めパラメータを設定した上で仮定の衝突事故を発生させ、計算された停止位置を事件としてパラメータの推定を行い、設定した値との比較を行った。Fig. 4 に仮想した追突事故を示す。衝突車 (T社、小型乗用車、1800cc) と被衝突車 (I社、2 tトラック、2800cc) の各々に対して、重量、車長、車幅、ホイールベース長、タイヤ半径、タイヤの曲げやねじり剛性、トレッド剛性、コーナリングや制動ステイフネス等々、所要とされる車やタイヤの諸元を入力した後に、モデルパラメータを制約条件を満足する範囲内の値に設定した。次に、2台の車に対して初期状態の速度 (乗用車 :

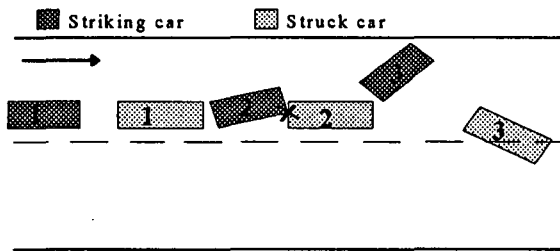


Fig. 4 An artificial front to rear accident

60 km/h、トラック : 30 km/h) と位置を与えることによって、Fig. 4 に示すような事故が発生する。

1の位置が初期状態、2、3がそれぞれ衝突位置と最終的な停止位置を表している。衝突に至るまでに乗用車の衝突直前の速度はブレーキ操作のために45 km/hに低下したがトラックの速度は変わらないものと仮定した。この事故を“実測”データとして、停止位置データが与えられたとの仮定の元に、衝突時と衝突後のパラメータの推定を行った。まず、モデルパラメータを制約条件の範囲内においてランダムに設定した後、BoxのComplex法のアルゴリズムに従って、目的関数Jを最小とするようパラメータ値の調整を行った。設定値を基準とした誤差率の絶対値をFig. 5に示す。いずれのタイヤモデルにおいても、パラメータの推定誤差が充分小さいことが分かる。酒井モデルによる前輪のスリップ比を除いて10%以下の誤差率になっている。特に、Gimモデルにおいては、すべてのパラメータに対して5%以下の推定精度を与えている。修正酒井モデルにおいては、元のモデルより誤差率のばらつきが小さくなっており、モデルの改善の効果が見られている。

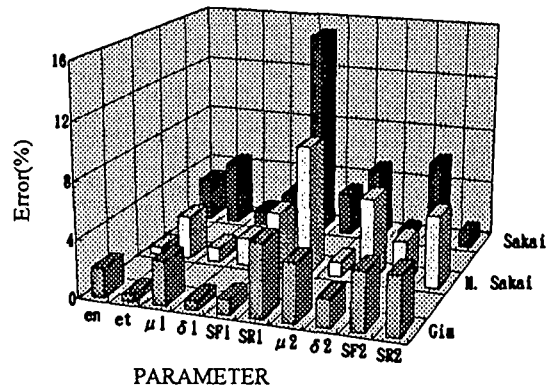


Fig. 5 Errors between assumed and estimated parameters

Fig. 6は、推定されたパラメータによる停止位置と“実測”の停止位置の差 (絶対値) を表している。酒井のモデルでは、衝突車のも両方向とも数10cm、被衝突車のx方向で1m弱の誤差を生じているのに

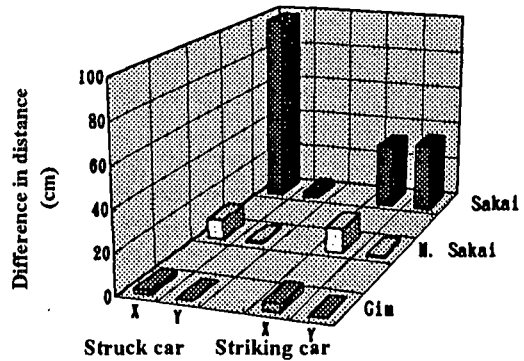


Fig. 6 Differences in distance for an assumed accident

対し、修正酒井モデルでは、両車とも10 cm程度、Gimモデルにおいては、5 cm以下の誤差となっている。すなわち、修正酒井モデルにおけるベルトの曲げやねじれに変形の考慮、あるいはGimモデルにおけるキャンバラストの考慮による横力の表現能力の改善が効果的であったことを裏付けている。車の向きの推定誤差は、酒井モデルでは衝突車と被衝突車ともに約3°、修正酒井モデルとGimモデルでは1~2°の誤差と充分小さな値となっている。

ここでの検証結果は、極めて満足の行くものではあるが、これは推定手法の妥当性を確認しているが必ずしも交通事故再現モデル自体の有用性は保証していないことに留意する必要がある。仮想の“事故”データそのものが、事故再現モデルを用いて作成されているからである。

(2) 実交通事故解析

ケース1: 側面衝突事故

実際に札幌市内の交差点で発生した側面衝突事故

を例にしてモデルパラメータの推定を行った。事故の形態を Fig. 7 に示す。交差点左方から約 30 km/h で進んできた軽乗用車 (M社、550cc、FF車) が、交差点上方から同じく 30 km/h で走行してきた小

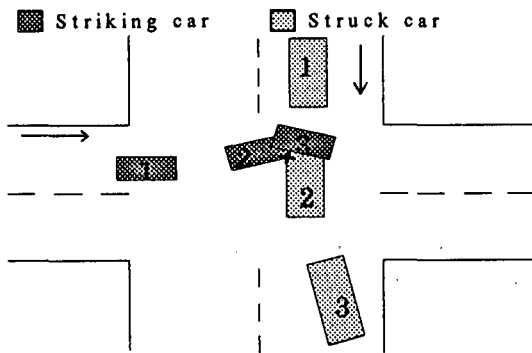


Fig. 7 A side impact accident between two passenger cars

型乗用車 (T社、1800ccセダン、FR車) の側面に衝突したものである。軽乗用車は、路上のスキッド痕や運転者の証言などから、衝突直前には 15 km/h までに減速されていたと推定された。小型乗用車はブレーキ操作の痕が見られず 30 km/h の速度は変わらないものと仮定した。Fig. 4 同様に、図中の地点 2 が衝突点、地点 3 が停止位置を表している。

3つのタイヤモデルを用いて推定した結果を Fig. 8 に示す。縦軸は、偶々マイナス1から1の範囲で表示しているが、それぞれのパラメータによって単位は異なる。なお、舵角 δ_1 と δ_2 は軸のスケールを合わせるためにラジアンで表した値である。個々のパラメータに関しては、タイヤモデルの違いによって差が見られているものもあるが、総体的に近似した値となっている。なお、反発係数 e がマイナス値であるのは両車はその方向に塑性変形したことを表している。事故時の路面状態は乾燥路面であったが、Gim モデルで摩擦係数 μ がやや過小な値となっているが、酒井モデルと修正酒井モデルではほぼ妥当な値を与えている。修正酒井モデルで両車の μ 値に若干の差が見られているが、他のモデルでは、両車の差は小さい。舵角 δ は反時計方向を正と定義しているが、被衝突車 (struck) で反時計方向、衝突車 (striking) で時計方向の舵角を行ったとしているが、両車の衝突後の動きにほぼ合致している。また転舵量はモデルによってやや相違が見られるが高々 30 度の大きさであり車の全体的な動きには大きな影響を与えていないと予想される。前後輪のスリップ比も、酒井モデルの前輪がやや小さめであるのを除き両車ともに 0.5 以上の値となっており衝突後の動きとしてほぼ妥当であると判断される。このように、ここでの推定値はあくまでも衝突時および衝突後の平均的な車の運動挙動を推定したものであるが、ある程度その現象を説明するのに成功している。

推定されたパラメータを用いて、衝突車と非衝突車の停止位置と方向を求め実際の値との差を3つの

タイヤモデルに対して比較した結果を Fig. 9 に示す。上段が並進位置を、下段がヨー角の誤差を表している。酒井モデルにおいて被衝突車の位置誤差が 1 m 近くになっているのに対し、修正酒井モデルと Gim モデルでは高々 20 cm 程度の誤差となっている。ヨー角も酒井のモデルで被衝突車の誤差が大きくなっているが他のモデルでは 5 度以下の誤差である。すなわち、両モデルにおける横力の改良による効果と考えられる。

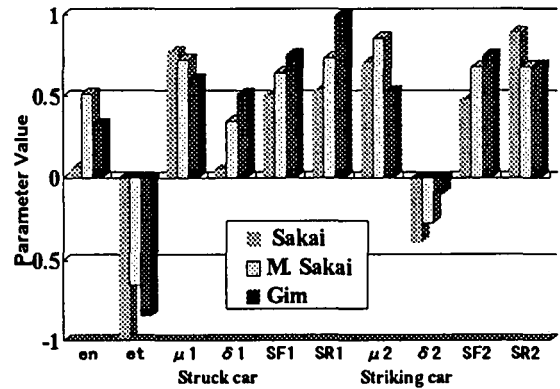
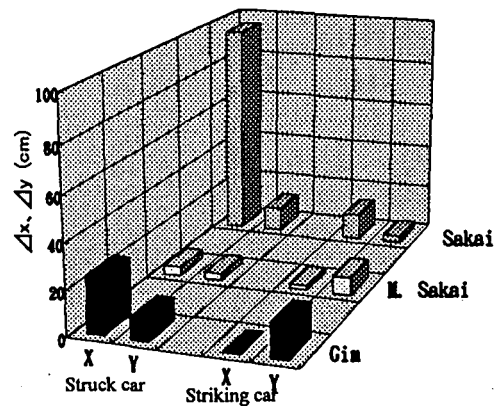
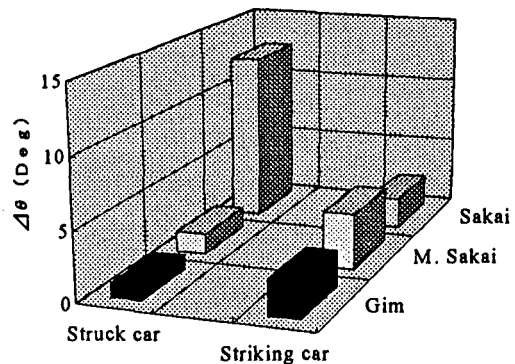


Fig. 8 Estimated parameters for a side impact accident



(1) x and y positions



(2) Yaw angle

Fig. 9 Estimation errors in rest position for a side impact accident

ケース2：追突事故

2番目の例として、単路部における追突事故を解析対象にした。衝突車が小型乗用車（M社、1600ccセダン、FF車）、被衝突車も普通乗用車（T社、2000ccセダン、FF車）である。10 km/hの低速

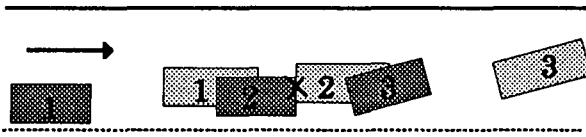


Fig. 10 A front to rear accident between two passenger cars

走行を行っていた被衝突車に小型乗用車が50 km/h（衝突直前には40 km/h）の速度で追突している（Fig. 10）。推定されたパラメータ値をFig. 11に示す。ケース1同様にFig. 11の舵角はラジアン値である。路面は乾燥状態であった。推定されたパラメータ値は、鉛直方向の反発係数は負値であり、接線方向の反発係数は小さく、舵角も小さく、あるいはスリップ比はロック状態（S=1）に近いなど、総体的には合理的な結果となっている。しかしながら、細部においては、タイヤモデルによるばらつきが見られている。例えば、Gimモデルによる路面の摩擦係数 μ は乾燥路面としてはやや過小であったり、スリップ比もモデルによる差がやや大きい。これは、各パラメータの制約条件の範囲を緩めに設定したこともその原因となっている。制約条件の範囲を事故状況に合わせてより厳密に設定することによって、モデル間のばらつきは小さくなるものと思われる。例えば、乾燥路面のときには μ の最小値を0.7程度のより大きな値に設定するなどが可能である。各モデルによる最終的な停止位置の推定誤差をFig. 12に示す。停止位置の誤差も高々50 cm程度であり、ここでも横力を改善した修正酒井モデルとGimモデルの方がやや良い結果を与えている。また、ヨー角の誤差も酒井モデル10°、他の2モデルで最大5°未満であった。

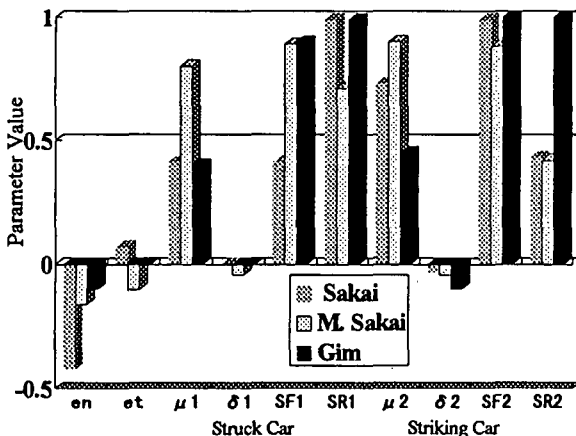


Fig. 11 Estimated parameters for a front to rear accident

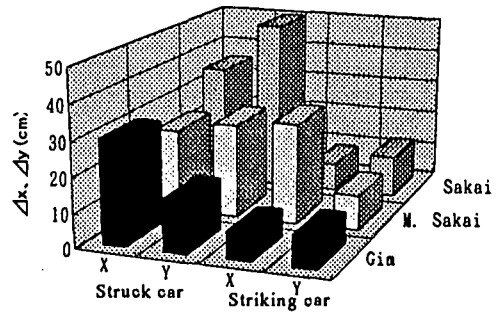


Fig. 12 Errors in rest position for a front to rear accident

5. 交通事故再現シミュレーションシステム

(1)開発環境

本交通事故再現システムは、道路技術者がパソコンのWindows上で利用することを想定し、Visual C++言語を用いて制作したWindowsアプリケーション・ソフトウェアである。Visual C++は、Windowsが提供するライブラリとその他いろいろなパーツを結びつけてグラフィカルユーザーインターフェイス機能に優れたプログラム開発を行うことを可能にするコンピュータ言語である。本システムにおいては、所要の入力データやシミュレーション条件をWindows上のメニュー画面を通して設定するとともに、シミュレーション結果をコンピュータ画面上にアニメーション表示することによって、現場の道路技術者でも手軽にプログラムの実行ができるようにすることを目標としてプログラムの開発を行った。

(2)データ入力システム

衝突事故を再現するための入力データは多岐にわたる。それらのデータを間違いなく入力するためには細心の集中力と多大な労力を必要とする。利用者の負担を軽減し入力ミスを少なくするために、Windowsのメニューとダイアログボックスを組み合わせ、穴埋め的にデータを入力するようにした。多くの項目に対してデフォルト値予め表示することによって、変更の必要がある場合にのみキー入力を行うものとした。データ入力システムはFig. 13に示すように、基本メニュー、サブメニュー、およびダイアログボックスから成っている。基本メニューは、1)場の設定、2)車両諸元、3)車の衝突状態などに分類される。場の設定は、道路の形状や路面状態などを設定するものである。天候は、路面状態データとともに、路面の摩擦係数の範囲を推定するのに用いている。道路形状は、各形状に対して基本形態が表示された後、必要に応じて車線数や交叉角などの変更を行う。運転者の状態は、本システムでは実際には使用してはならず、車両の破損状況から衝突点の座標を推定する時の参考にしてに過ぎない。データ入力でも最も大変であるのが車両諸元データである。現在は、事故調書の車名を元に「自動車諸元表」（運輸省監修）から数値を拾いデータの作成を行っている。将来的には、「自動車諸元表」が

CD-ROM化された後には、車名と型式、および年式のみから諸元を設定できるようにする必要がある。車の位置データに関しても、最も厄介であるのは衝突点の推定である。現在は、車の破損状況などから推定を行っている。

これらの入力データは、基本メニューごとにサブメニュー、さらにはダイアログボックス化されており必要に応じて表示されるようになっている。

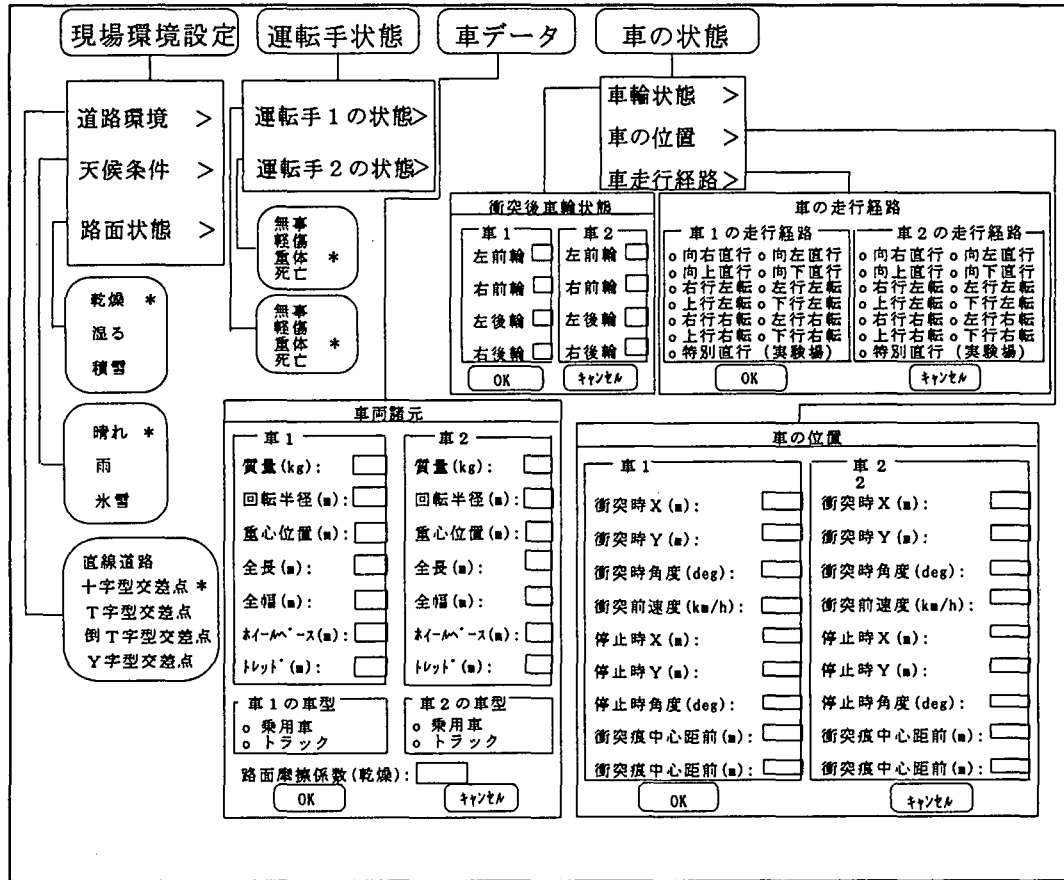


Fig. 13 Input-data system for simulating a traffic accident

(3) 解析システム

事故の解析は、次の2つに分類される。

- ・再現システム：予め仮定されたパラメータに従ってシミュレーション演算を行い、その結果を Fig. 14 に示すような形でアニメーション表示を行う。パラメータの値を試行錯誤的に推定する場合だけでなく、初期速度などの運転者の証言の妥当性を検証する場合に用いられる。
- ・推定システム：パラメータの範囲を設定した後、本論文に述べた手法に従って解析的にパラメータの推定を行う。現場に残されたデータが少なく最初の手掛かりを得る場合に有効である。推定された結果は、再現システムを用いてアニメーション表示される。

これらの解析システムの選択は、基本メニューの中のサブメニューによって行う。アニメーションも、Fig. 14 のように車を連続的に表示したり、あるいは最終の停止位置まで点描する方法などを選択することが出来る。図の例では、衝突点から停止位置までの状況を表示している。

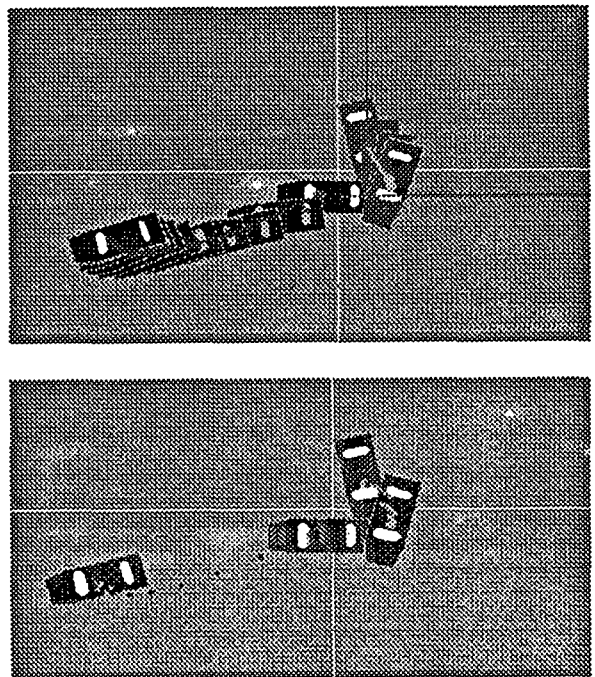


Fig. 14 Animations of a traffic accident

6. あとがき

交通事故の再現は、現場に残された数少ないデータから全体を復元するという極めて困難な作業である。運転者の証言は時として信憑性に欠ける。不幸にして当事者が死亡している時には物的データだけが頼りになる。昨今のABS装着車はスッキド痕も残さなくなり事故の再現にとって一層厳しさが増してきている。このような状況の元で交通事故の再現を行うには、大胆な仮説に基づく試行錯誤的な作業が主体となる。事故時の車の運動は操舵や制動などの運転者による操作が行われるので、単純な剛体として取り扱うには限界があり、タイヤと車に作用する力を考慮した上で車の運動や衝突時の挙動を表現する必要がある。同時に、仮説を検証する際のツールとしてコンピュータによるシミュレーションシステムが重要な役割を果たす。

本研究は、道路技術者や交通管理者などが、実務的に交通事故を分析することを想定して、交通事故再現システムの開発を図った。すなわち、タイヤモデル、ドライビングモデル、および衝突モデルを統合したモデルを開発すること、実際の交通事故データから未知のモデルパラメータを解析的に推定する手法を確立すること、およびユーザインターフェイスに優れた入力ルーチンやアニメーションルーチンの実現を図ることを目的としてプログラム開発を行った。本研究での成果は以下のように要約される。

- 1) タイヤモデルとしては、酒井、修正酒井、およびGimモデルの3つを、ドライビングモデルとしては二輪車モデルを、衝突モデルとしては石川の反発係数モデルを統合した再現モデルを作成した。
- 2) パラメータの推定に当たっては、BoxのComplex法を用いて、最終停止位置の推定誤差を最小とする非線形の最適化問題への定式化を行った。
- 3) タイヤモデルに関しては、曲げやねじりによる横力の影響を考慮した修正酒井モデルやキャンパ角の影響を考慮したGimモデルが酒井モデルに比べ比較的良好な推定結果を与えた。
- 4) 仮想的な事故についてパラメータ値の推定を行ったところ、誤差率が5~10%程度であり、推定手法の妥当性が確認された。
- 5) 実際の2件の交通事故に適用し、車の運動をほぼ合理的に説明できるパラメータが推定された。
- 6) 修正酒井モデルやGimモデルでは、最終停止位置の推定誤差が20~50cm、ヨー角の誤差が数度と充分小さなものであった。酒井モデルは誤差がやや大きくなる傾向を示した。
- 7) パソコンのWindowsシステムを用いることによって、メニュー方式による入力データの作成と分析結果のアニメーション表示の実現を図った。

本再現システムは、事故時の車の運動を記述するには未だ稚拙なレベルにある。すなわち、制動や操舵の平均値を推定しており、実際の動的な挙動は表現して

いない。このような動的な挙動を実際の交通事故データから再現することは、ほとんど不可能であり、パニック時における運転者の刺激に対する応答特性、すなわちドライバモデルを組み込む必要がある。しかしながら、平常運転時におけるドライバモデルに関しても未だ研究途上であり、パニック時におけるモデルの確立には未だかなりの時間を要すると思われる。このような理由から、本システムは、あくまでも複雑な操舵を伴わない事故を対象として事故分析者が試行錯誤的に分析を行う際の補助道具に過ぎない。今後のモデル化の高度化の中でドライバモデルの実現を図って行く必要がある。

最後に、交通事故データの提供と本システムの試用において多大な便宜とご助言・ご示唆を賜りました北海道警察の関係各位に記して謝意を表します。また、本研究は、住友海上福祉財団、ならびに共栄火災交通財団からの研究助成を得て行われました。

REFERENCES

- 1) Crash3 user's guide and technical manual: U.S. DOT, NHTSA, HS 805732, 1981 (revised in 1982)
- 2) Solomon, P.L.: The simulation model of automobile collisions (SMAC) operator's manual, U.S. DOT, NHTSA, Washington, DC, 1974
- 3) Woolley, R.L.: The IMPAC computer program for accident reconstruction, SAE Paper No. 850254, pp.247-262, 1985.
- 4) H. Ishikawa: Impact model for accident reconstruction normal and tangential restitution coefficients, SAE Paper No. 930654, pp.23-43, 1993.
- 5) H. Ishikawa, Computer simulation of automobile collision, SAE Paper No. 851729, pp.271-286, 1985.
- 6) R. L. Woolley, C. Y. Warner and T. R. Perl: An overview of selected computer programs for automobile accident reconstruction, Transportation Research Record 1068, pp.85-100, 1986.
- 7) Philip H. Chenng, Michael j. Sens, and Jhon F. Wiechel: An overview of the evolution of computer assisted Motor vehicle accident reconstruction, SAE Paper No. 871991, pp.13-27, 1987.
- 8) 酒井: タイヤの力学的特性に関する研究 日本自動車研究所研究報告, No. 46, pp.1-39, 1978.
- 9) 酒井: タイヤ工学, グランプリ出版, 1987.
- 10) G. Gim and P. E. Nikravesh: An analytical model of pneumatic tires for vehicles dynamics simulations, Int. J. of vehicle design, Vol.11, No.6, pp.589-618, 1991
- 11) G. Gim and P. E. Nikravesh: An analytical model of pneumatic tires for vehicles dynamics simulations Part 2, Int. J. of vehicle design, Vol.12, No.1, pp.19-38, 1992
- 12) 安部: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1979.
- 13) J. Kuster and J. Mize; Box's Complex Algorithm in Optimization Techniques with Fortran, pp.368-386, 1973