

交差点構造の影響を考慮した左折車両挙動のモデル化^{*1}

A Left-turning Vehicle Maneuver Model Considering Intersection Geometry^{*1}

勇川邦浩^{*2}・鈴木一史^{*3}・浅野美帆^{*4}・中村英樹^{*5}

By Kunihiko YUKAWA^{*2}・Kazufumi SUZUKI^{*3}・Miho ASANO^{*4}・Hideki NAKAMURA^{*5}

1. はじめに

日本での交通事故件数が減少傾向にある中でも、横断歩道における自動車と横断者(歩行者または自転車)との交通事故件数は依然として高い水準にある¹⁾。そのため、横断歩道においては効果的な安全対策が求められている。

交差点の安全性に関する既往研究²⁾では、交差点改良の前後での車両速度比較など、既に実施した対策についての分析がほとんどである。しかし、一般的に対策の実施においては、実施前にも複数案の中から対策効果を定量的に比較・検討できることが望ましく、渋滞対策においてはこのような評価を行うものとして交通シミュレーションがよく用いられる。しかし、安全対策においては、このような評価手法が確立されていない。

安全性評価をシミュレーションで行うことが困難な理由としては、①事故のような発生頻度の低い事象の再現が困難、②対策内容である幾何構造の変更が車両挙動に与える影響が定量的に示されていない、ことが挙げられる。既往の手法では、車両の平均的な挙動の再現を重視しており、個々人の判断の違いによる車両挙動のばらつきを表現することができない。また、横断者の影響のみならず、そもそも交差点幾何構造が交差点内の車両挙動の分布にどのような影響を与えるのかを定量的に分析した研究は非常に少ない。

本研究では、自動車-横断者間の安全性評価のためのシミュレーション構築に向け、交差点構造に応じた車両単体の走行軌跡・速度をモデル化することを目的とする。その際、車両挙動のばらつきについても表現を行う。

なお、大規模交差点では右折には専用現示が割り振られることが多いために、横断者と交錯するのは左折車であることが多い。そのため、本稿では対策の効果検証に重要と考えられる左折車の挙動を対象とする。

表-1 対象交差点の概要

交差点名	流入部	調査日時	隅角部の半径 (m)	交差角 (°)	流出部車線数	セットバック (m)	サンプル数
末盛通2	東	2008/11/18 9:00-12:00	9.7	88.3	2	4.8	72 (7)
	西		19	65.4	2	8.3	23 (7)
	北		17	117	3	13.1	47 (5)
地下鉄堀田	東	2009/6/18 9:00-10:30	14	94.1	3	3.5	11 (4)
	南		12	88.3	3	13.7	23 (3)
太閤通3	西	2009-10/13 7:30-10:30	17	94.1	3	12.4	5 (3)
	南		17	88.3	2	14.6	14 (5)
西大須	西	2008/1/18 9:00-12:00	17	76.9	3	17.8	30 (1)
川名	西	2008/12/1 7:30-10:30	21	106	2	22.0	13 (1)

* サンプル数の括弧内の数値は走行速度推定モデルに用いた台数

2. 対象交差点とデータ取得方法

1) 対象交差点の概要

名古屋市内の幾何構造の異なる5つの交差点の9つの流入部において、ビデオ観測調査を行った。それら対象交差点の概要を表-1に示す。なお、隅角部の半径は観測時に計測した歩道の巻き込み線の半径を円に近似した値を使用した。

2) データ取得方法

横断者がいないときの左折車の幾何構造による影響を把握するために、左折車が単独走行するケースについて走行軌跡のデータ取得を行った。単独走行の条件は左折車が交差点を通過する間に横断歩道上に歩行者及び自転車が存在せず、かつその車両の前方及び側方に他の車両が存在しない場合とした。また、交差点及びその近傍で停止した車両や車線変更をした車両、第1走行車線以外から交差点に進入してくる車両については対象から除いた。その結果、対象左折車は全体で238台であった。

これらの車両に対しビデオ画像処理システム³⁾を用い、0.1~0.5秒おきに右側後輪タイヤの接地点を基準に追跡することで走行軌跡を取得した。これらの走行軌跡を射影変換により画像座標系から地図座標系へ変換を行ったのち、カルマンスムージングにより観測誤差の補正、及び補間推定を行った上で、車両の車長及び車幅といった車両形状情報を基に、車両重心位置での0.1秒単位の走行位置、速度、曲率などのデータを得た。

*1 キーワーズ: 車両挙動, 左折, 安全性評価

*2 正会員, 修(工), 奈良県高田土木事務所 (奈良県北葛城郡河合町佐味田2202, TEL:0745-56-3851,

E-mail:yukawa-kunihiko@office.pref.nara.lg.jp)

*3 正会員, 博(工), 国土交通省国土技術政策総合研究所

*4 正会員, 博(工), 名古屋大学大学院工学研究科

*5 正会員, 工博, 名古屋大学大学院工学研究科

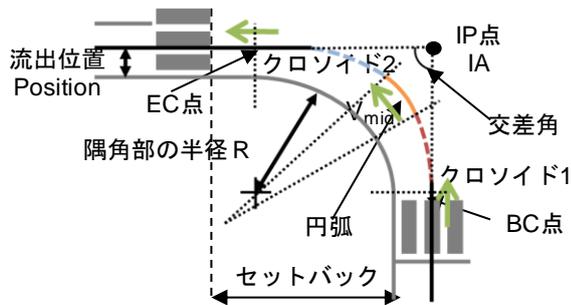


図-1 左折車両の走行軌跡及び幾何構造要素

3. 基礎分析

1) 走行軌跡の近似

走行軌跡を簡便に表現するため、鈴木ら⁴⁾と同様に、左折車の走行軌跡を直線、円弧、クロソイドの組み合わせに近似する(図-1)。これにより、クロソイドの形状を示すパラメータ A_1 、 A_2 及び曲率最大時の半径 R_{min} によって、走行軌跡を表すことが可能になる。

隅角部の半径の大きさが異なり、かつ比較するのに十分な数のサンプルが得られた3箇所の流入部について、近似により得られた A_1 、 A_2 、 R_{min} の平均値と標準偏差を表-2に示し、さらにクロソイドと円弧の構成比を図-2に示す。流出後に通過する車線が外側になるほど、 A_1 、 A_2 、 R_{min} の標準偏差が減少する傾向がある。これは外側の車線に流出する車両は、隅角部に近い場所を通過するために走行位置の自由度が低くなり、走行軌跡のばらつきが小さくなると考えられる。また、隅角部の半径が小さい末盛通2交差点では、円弧の構成比が低くなっている。これは小さい半径のカーブを曲がる場合には、ドライバーは隅角部に沿って曲がり続ける必要がないため、ハンドルを切った後、すぐに戻すためと考えられる。

2) 流入部別の速度の比較

隅角部の大きさや交差角の大きさが異なる3流入部において、1時間における単独走行の左折車の最小速度が最小となる位置とその時の速度の大きさ、及び流出側の横断歩道への進入速度の比較を表-3に示す。自動車が交差点を左折する場合には、曲がることのできる安全な速度になるまで減速する。そのときの速度が左折時の最小速度となる。左折時に最小速度となる横断歩道からの位置は流入部によって大きく異なることがわかる。横断歩道から近い位置で最小速度をとる地下鉄堀田交差点では、横断歩道への進入速度は低く、標準偏差も小さい。地下鉄堀田交差点は交差角がほぼ直角で、横断歩道が交差点中心に近い位置にある。一方、太閤通3交差点では最小速度は3流入部の中で最も低い、横断歩道の進入速度は最も高くなった。これは横断歩道のセットバック距離が長いと考えられる。このように、たとえ左折時に大きく減速する交差点であっても、幾何構造条件によ

表-2 流入部別線形要素パラメータ

交差点 (流入部)	流出車線	A_1		R_{min}		A_2		サンプル数
		平均 [m]	標準偏差 [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]	
末盛通 2(東)	1	12.5	1.8	9.9	1.4	12.3	1.9	14
	2	14.0	1.7	11.4	1.3	14.4	1.7	58
西大須 (西)	1	18.8	1.3	16.4	1.3	22.8	3.9	8
	2	19.7	2.2	18.8	2.2	24.2	3.6	11
	3	22.6	2.5	19.6	1.9	26.8	3.7	11
川名 (西)	1	22.4	1.2	19.6	1.4	19.9	1.9	5
	2	22.4	1.7	20.0	1.9	21.2	2.4	8

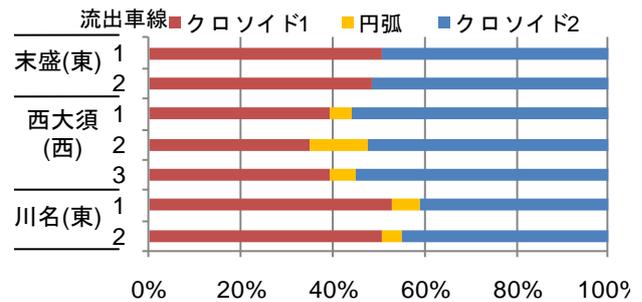


図-2 流入部・流出車線別のクロソイドと円弧の構成比

表-3 横断歩道への進入速度と最小速度

	西大須(西)	太閤通3(南)	地下鉄堀田(東)
	平均 (標準偏差)	平均 (標準偏差)	平均 (標準偏差)
最小速度 (km/h)	24.5 (2.81)	18.8 (3.53)	22.9 (3.08)
最小速度となる横断歩道からの位置 (m)	-10.8 (4.42)	-6.63 (3.20)	-2.58 (2.53)
横断歩道への進入速度 (km/h)	27.3 (4.35)	32.4 (5.84)	23.3 (3.20)
時間帯	9:00-10:00	7:30-8:30	9:10-10:10
サンプル数	14	6	9

ては、横断者と交錯の危険がある横断歩道での走行速度が大きくなることがわかる。

4. 左折車両挙動推定モデル

1) 車両挙動推定モデルの構成

左折車両挙動をモデル化するにあたり、以下の仮定をおいた。交差点進入時にドライバーは交差点内の幾何構造から安全に曲がることのできる最小速度を決める。次に、その最小速度をとることができる走行軌跡を決定する。通過する走行軌跡と最小速度といった目標をあらかじめ決めたいうで、車両は交差点に進入し、速度調整を行っていくものと考えた。

本研究の左折車両挙動モデルは、最小速度決定モデル、走行軌跡推定モデル、速度推移推定モデルの3つからなる。まず、左折時の最小速度を交差点構造から確率的に決定する。次に、求めた最小速度と構造から走行軌跡、すなわちクロソイドパラメータ A_1 、 A_2 と曲率最大時の半径 R_{min} の組み合わせを求める。この軌跡と個別車両の交

差点進入速度を所与として、交差点内の速度推移を求める。

左折時の個々の車両挙動にはばらつきがあり、その違いが事故発生には重要であると考えられる。そこで、モデルは車両挙動のばらつきを考慮したものとす。具体的には、最小速度と軌跡の曲率最大時の半径を推定する際にばらつきを考慮する。それによって車両挙動のばらつきを表現することが可能になる。

2) 走行軌跡推定モデルの推定結果

最小速度 V_{min} についてはばらつきを考慮するため、 V_{min} の分布形を正規分布と仮定して式(1)のように推定式を構築し、最尤法によりパラメータ推定を行った。

$$V_{min} \sim N(\mu, \sigma) \quad (1)$$

$$\mu = \alpha_{1,1}R + \alpha_{1,2}IA + \alpha_{1,3}Heavy + \alpha_{1,4}Position + \alpha_{1,5}$$

$$\sigma = \alpha_{2,1}Position + \alpha_{2,2}$$

ここに、 R : 隅角部の半径、 IA : 交差角、 $Heavy$: 大型車ダミー、 $Position$: 流出位置、 α : パラメータ、である。

さらに、曲率最大時の半径 R_{min} については、最小速度 V_{min} と同様に、 R_{min} の分布形を以下の正規分布と仮定し、最尤法を用いてパラメータ推定を行った。なお β はパラメータである。

$$R_{min} \sim N(\mu, \sigma) \quad (2)$$

$$\mu = \beta_{1,1}R + \beta_{1,2}IA + \beta_{1,3}Position + \beta_{1,4}$$

$$\sigma = \beta_{2,1}R + \beta_{2,2}IA + \beta_{2,3}Position + \beta_{2,4}$$

また、走行軌跡を表すクロソイドのパラメータ A_1 、 A_2 については重回帰分析を行った。推定結果をそれぞれ表-4と表-5に示す。表-5では、大型車ダミーはクロソイド2でのみ有意となったが、これは大型車の回転半径が普通車の回転半径よりも大きいためである。

これらの結果を用いて得られたクロソイドのパラメータ A_1 、 A_2 、円弧の半径 R_{min} の推定結果を表-6に示す。

また、太閤通3交差点 南側流入部に推定結果を適用したときの走行軌跡と実際の走行軌跡の比較を図-3に示す。なお、実際の走行軌跡については、比較を行いやすくなるため、IP点を一致させるように描画を行った。

表-4~6より、全ての推定値と観測値の値は近く、モデルの再現性は良好と考えられる。図-3から、走行軌跡についても良好に再現されていると考えられる。

3) 走行速度推定モデルの推定結果

次に、上記の軌跡を所与として、軌跡上を走行する車両の地点速度を逐次的に推定するモデルの構築を行った。モデルはクロソイド1の開始位置での速度と走行軌跡を所与として、 Δt 秒ごとの速度を逐次的に求めていくものである。さらに、走行速度推定モデルにおいては、上述のモデルで使用したサンプルのうち、速度に影響を与える交差点及びその近傍での駐停車車両が存在している場

表-4 $V_{min} \cdot R_{min}$ の推定結果 (n=238)

		最小速度 V_{min}	円弧の半径 R_{min}
説明変数		係数 (t 値)	係数 (t 値)
μ	定数項	1.20(0.91)	-6.46(-6.31)
	隅角部の半径 (m)	0.212(4.20)	0.390(12.9)
	交差角 (deg)	0.156(11.6)	0.127(13.1)
	大型車ダミー(大型車:1)	-4.62(-5.32)	—
	流出位置 (m)	0.794(9.22)	0.862(16.8)
σ	定数項	2.22(8.26)	-2.86(-3.77)
	隅角部の半径 (m)	—	0.0624(3.09)
	交差角 (deg)	—	0.0363(4.95)
	流出位置 (m)	0.169(3.15)	0.118(3.89)

表-5 クロソイドのパラメータの推定結果 (n=238)

説明変数	クロソイド1 A_1	クロソイド2 A_2
	係数 (t 値)	係数 (t 値)
定数項	-1.65(-1.85)	2.33(2.83)
隅角部の半径 (m)	0.334(8.73)	0.335(7.52)
交差角 (deg)	0.0404(3.61)	—
大型車ダミー(大型車:1)	—	2.05(2.89)
流出位置 (m)	0.461(7.70)	1.04(15.2)
最小速度 V_{min} (km/h)	0.369(9.04)	0.268(6.88)
補正 R^2 値	0.772	0.774

表-6 クロソイドのパラメータと円弧の半径の推定結果 (太閤通3交差点南側流入部)

	クロソイド1 A_1			クロソイド2 A_2			円弧の半径 R_{min}		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
観測値	21.6	17.7	15.7	21.4	18.4	15.7	17.0	14.9	12.3
推定値	20.0	17.5	15.0	20.5	18.1	15.7	18.6	14.9	11.2

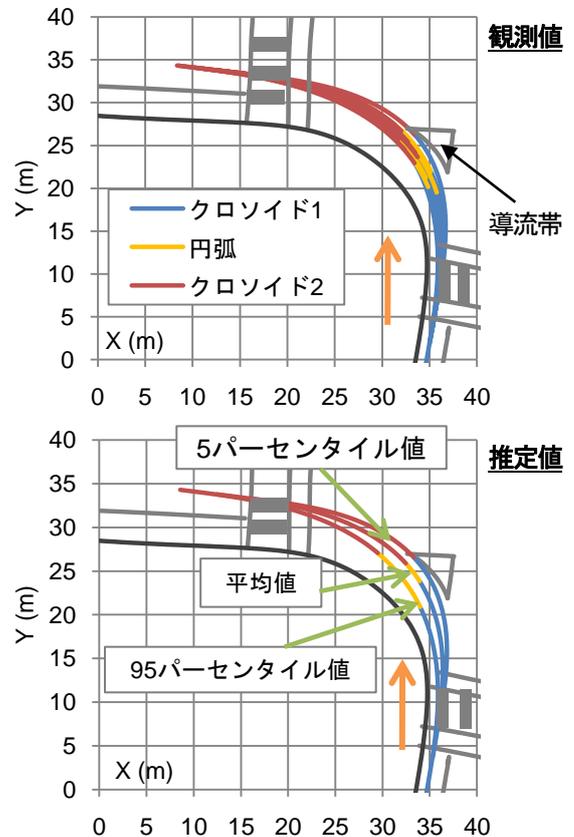


図-3 観測軌跡と推定軌跡の比較 (太閤通3交差点南側流入部)

合や、左折した先の信号が赤であるなど、信号による影響を受けている車両についても対象から除いた。このときのサンプル数は36台であった。

$\Delta t=0.5$ 秒とおき、これら対象車両の0.5秒間隔の速度データを用いて、式(3)の推定式で、最小二乗法による非線形回帰を行った。その結果を表-7に示す。

$$\text{Speed}_t = \gamma_0 \text{Speed}_{t-\Delta t} + \gamma_1 e^{\gamma_2 \text{Curvature}_t} + \gamma_3 \text{Heavy} + \gamma_4 V_{\min} \quad (3)$$

ここに、 Speed_t : 時刻 t における左折車の速度(m/s), $\text{Speed}_{t-\Delta t}$: 時刻 $t-\Delta t$ の左折車の速度(km/h), Curvature_t : 時刻 t における曲率(1/m), Heavy : 大型車ダミー, V_{\min} : 最小速度(km/h), γ : パラメータ, である。

カーブにおける車両の速度は、そのカーブ区間での半径によって変化することが既往研究⁵⁾において示されている。本研究の推定式においても、半径の逆数である曲率が有意となった。

$\Delta t=0.5$ 秒のとき、構築したモデルによる推定値と観測値とのRMSEは0.509m/sとなり、構築したモデルによる誤差は小さく、良好に再現されていることが確認できた。なお、式(3)は Δt の値を変えると係数は異なってくる。そのため、図-4に示すように、ある左折車の $\Delta t=0.5$ 秒, 1秒のときの推定速度の推移とその速度推移から求めた時間距離図について実測値と比較した。これを見ると、 Δt の変更による推定結果の差は小さいことがわかった。

また、本モデルは直前の速度を用いて速度を逐次計算するため、誤差を蓄積する形となっている。加速時に観測値より常に過小に推計する傾向があることから、減速終了後の加速区間では速度を過小に推計する傾向があると考えられる。

5. 感度分析

1) 車両挙動への影響

交差角が異なる場合の車両挙動への影響を分析するために、隅角部の半径=15mの仮想の交差点において交差角IAが鋭角(60°), 直角(90°), 鈍角(120°)と異なる場合の走行軌跡を図5に示した。 V_{\min} や R_{\min} がばらつきを持っているため、軌跡もそれぞればらつきがある。この軌跡のうち、 V_{\min} や R_{\min} が平均値をとるときの走行軌跡について、初速度を35km/hとした場合の走行速度推移を図-6に示す。なお、図-5のX軸の原点は左折車が曲がり始める直前での車両の重心位置を示し、流出入部での歩道境界線と車両重心位置の距離は1.5mとした。

この図から、交差角が鋭角な交差点では走行軌跡のばらつきが大きくなり、交差角が鈍角な交差点では走行軌跡のばらつきが小さいことがわかる。走行速度においては、交差角が鋭角な交差点ほど速度が低くなる。また、走行軌跡のばらつきが大きいと走行速度のばらつきが大きくなることから、交差角が鋭角な交差点ほどばらつき

表-7 $\Delta t=0.5$ 秒の速度(m/s)の推定結果 (n=392)

パラメータ	係数 (t値)	パラメータ	係数 (t値)
γ_0	0.660(31.2)	γ_3	0.265(-4.02)
γ_1	1.89(13.6)	γ_4	0.273(11.5)
γ_2	-26.4(-8.40)		
RMSE	0.509		

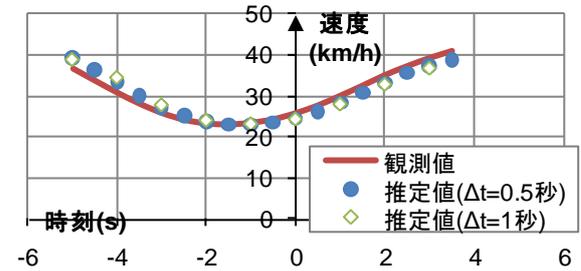
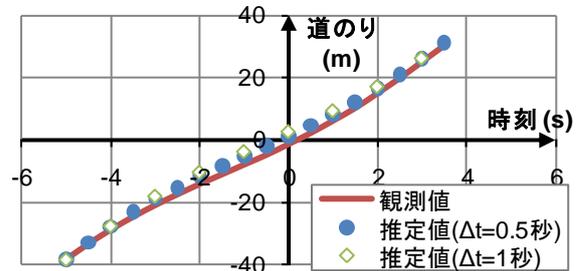


図-4 時間距離図と速度推移(太閤通3交差点南側流入部) 横断歩道進入時: 時刻=0s

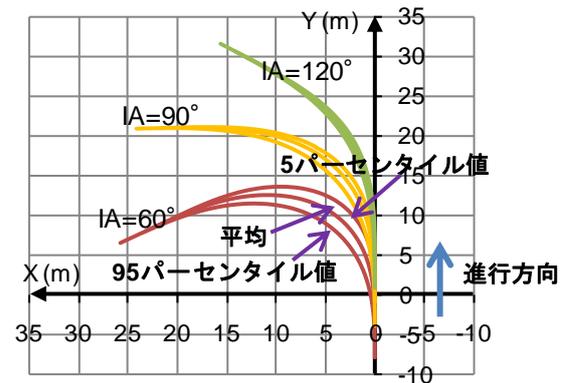


図-5 交差角の走行軌跡への影響

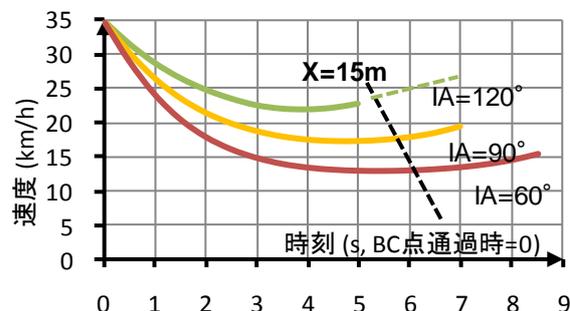


図-6 交差角の速度推移への影響

が大きくなる傾向にあることがわかった。

実際の交差点においても、鈍角な交差点では、左折車は速度低下が少なくスムーズに曲ることができるため、走行軌跡のばらつきが小さくなり、走行速度は高くなっている。

2) 挙動のばらつきの影響

車両挙動のばらつきの影響を示すために、車両が曲がり始めた点から横断歩道に到達する時間(以降、到達時間)についての感度分析を行った。横断歩道は図-5のY軸に沿って設置するものとし、そのセットバック位置を15mとした。また、横断歩道には横断者が存在しない状況であり、横断者による影響は存在しないものとして取り扱った。

交差角が 90° の場合の到達時間の95パーセンタイル値と5パーセンタイル値との差は1.3秒であった。また、同じ条件で交差角が 120° の場合には、1.3秒であり、交差角が 60° の場合には2.4秒であった。交差角が小さくなるほど速度は低く、走行軌跡のばらつきも大きいため、到達時間の差も大きくなることがわかった。

実際の車両挙動では、太閤通3南側流入部(交差角 $IA=88.3^\circ$)において、平均到達時間は4.9秒であったが、到達時間の最大値と最小値との差は2.3秒であった。モデルでは 90° の場合での95パーセンタイルと5パーセンタイル値の差は1.3秒であり、モデルから求められる到達時間のばらつきは過小である可能性がある。この原因としては、モデルでは同じ走行軌跡を通過する場合の速度推移が一意に決まるものとして取り扱ったが、実際には同じ走行軌跡を通過したとしても速度推移は異なる場合があるため、差が生じたものと考えられる。

また、今回の感度分析は交差角のみの影響をみるために、交差角のみを変更した場合の車両挙動を示した。しかし、実際の交差点において交差角を変更する場合には、隅角部の半径などの他の幾何構造も同時に変わるはずであり、これらを総合的に検討したときの幾何構造の走行挙動への影響についても考慮すべきであると考えられる。

6. おわりに

本研究では、左折車が単独走行する場合の交差点内の車両挙動を二次元的な走行軌跡と走行速度に分けて分析し、その結果を反映したモデルの構築を行った。構築したモデルは走行軌跡のばらつきまで内生化したものであるため、幾何構造を変更した場合の横断歩道における安全性を確率的に評価できるものと考えられる。

今後は、走行速度のばらつきや、周辺車両や横断者の影響がある場合の車両挙動、横断者の挙動についても分析する必要がある。また、これらを統合した評価シミュレーションモデルの構築方法についても検討を進める。

謝辞

本研究は、(財)タカタ財団による研究助成により行われた研究成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 警察庁交通局(2009):平成20年中の交通事故発生状況。
- 2) 佐藤大士・鈴木弘司・藤田素弘・伊藤太一(2009):走行特性に着目した交差点コンパクト化の効果分析,交通工学研究発表会論文集, No.29, CD-ROM.
- 3) 鈴木一史・中村英樹(2006):交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証, 土木学会論文集D, Vol.62, No.3, pp.276-287.
- 4) 鈴木一史・中村英樹・石黒公規(2009):信号交差点における幾何構造と進入条件を考慮した右折走行軌跡のモデル化, 土木計画学研究・講演集, No.29, CD-ROM.
- 5) Fitzpatrick, K., Schneider, H.W. and Park E.P. (2006): Predicting Speeds in an Urban Right-Turn Lane, Journal of Transportation Engineering, Vol.132, No.3, pp.199-204.