

# 信号交差点における疑似一次元衝突余裕時間を用いた自転車と左折車の錯綜分析

吉田 長裕<sup>1</sup>・澤田 和樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 大阪市立大学大学院工学研究科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138)

E-mail: yoshida@eng.osaka-cu.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 元大阪市立大学工学部都市学科 (同上)

E-mail: a17tr016@gmail.com

自転車通行環境の安全性に関しては、自動車が車道外の自転車を認識しづらいことが事故の原因になると考えられることから、車道上を自動車と同一方向に走行することが望ましいとされ、車道上の通行を基本とした走行空間の整備が進められている。本研究では自転車・左折車の交差点流入条件の異なる複数の信号交差点でビデオ撮影を行い、錯綜時の速度変化に着目し、錯綜の危険度を交通コンフリクト指標である TTC を擬似的な一次元手法として用いて評価した。その結果、自転車は区間の違いによる速度変化が少ない一方、錯綜の有無と通行位置が速度決定の大きな要因となっており、特に錯綜時には、自転車の錯綜パターンによって左折車との優先関係の傾向が異なることが明らかとなった。

**Key Words:** bicycle transportation, Intersection design, Time-to-collision

## 1. はじめに

近年、車道通行を基本とした自転車通行環境の整備が進められている。自転車通行環境の安全性に関しては、自動車が車道外の自転車を認識しづらいことが事故の原因になると考えられていることから、車道上を自動車と同一方向に走行することが望ましいとされ、自転車の車道上の通行を基本とした整備となっている<sup>1)</sup>。自転車と自動車の交通事故に着目すると、諸外国と比べて重大事故の割合が高いことに加え、およそ7割が交差点で発生しており、信号交差点では左折時の事故が特に多くなっている<sup>2)</sup>。交差点部では、自転車・自動車相互の位置関係、流入条件、視認性に関わる条件の違いで錯綜挙動が異なることから、これらの関係性を明確にすることで、自転車・自動車が相互に認識しあって安全に通行でき、さらに避けることの出来ない錯綜状況を引き起こさないような通行環境整備を進めていくための一助となると考えられる。

錯綜に関する研究として、小川ら<sup>3)</sup>は自転車と歩行者の錯綜現象の分析に衝突余裕度 Time-To-Collision (TTC) 指標を適用し、自動車の場合とどのような違いがあるかを検証した。その結果、自動車の適用と同様の長所、短所が検出されたが、実際はより複雑な錯綜現象が起きており、TTC 指標だけでは危険性を十分に捕捉できない可能性を指摘している。また、山中ら<sup>4)</sup>は、協調型のドライビングシミュ

レータを用いた錯綜分析を行っており、信号交差点における自転車安全施策について、自転車と自動車の走行空間を交差点進入部まで完全に分離する方式(分離方式)、交差点手前で左折する自動車を自転車レーンまで寄せることで自転車と左折自動車を直列に並ばせ混在して交差点に進入する方式(混在方式)を対象に、TTC などによる評価をしている。その結果、TTC が1秒以下の発生率や衝突発生率、視認回数などの指標から見ると、混在方式が分離方式よりも安全性の面で優れているが、利用者の不安感に課題が残されていることを明らかにしている。

以上のように、TTC などを用いた危険度の分析がなされているが、信号交差点のように優先関係が関わる状態で、通行実態に基づいた自転車通行環境及び錯綜条件に関する課題とその対応策等は具体化されていない。また、米国では、自転車通行空間の交差点整備において、Safe System Approach に基づいた Protected Intersection<sup>5)</sup>の導入が進められているものの、交差点隅角部のデザインと錯綜の関係や衝突危険度への影響については必ずしも明確に示されおらず、わが国への適用可能性についても検討していく価値がある。

そこで本研究では、自転車・自動車の交差点流入条件の異なる信号交差点において、朝・夜の直進自転車と左折車の錯綜現象を実際の複数の交差点において撮影する。撮影した映像を用いて、高速畳み込みニューラルネットワーク手法による走行軌跡デー

タから、錯綜挙動を速度変化や TTC 指標などを用いて分析し、整備形態による危険性の違いを比較し把握することを目的とする。

## 2. 研究方法

### 2.1 対象交差点概要

自転車と自動車の通行位置等の異なる 7 交差点を対象に、左折車と直進自転車の錯綜状況を調査した(表 1)。撮影時間帯に関しては、朝・夜およそ 2 時間ずつとし、自転車の交通量を考慮し、朝は通勤ピーク時間帯である 7 時~9 時付近で、夜は日の入り後 30 分程度経過した時間帯での撮影を行った。

表 1 観測交差点概要

分離タイプ	構造的分離		視覚的分離					車道混在						
	亀戸	光が丘	大森	寝屋川	富ヶ谷	渋谷	王子							
概要図														
整備・運用形態	自転車道	自転車専用通行帯	左折車線 + 矢羽根	左直車線 + 矢羽根	自転車横断帯	左折車線	なし							
第 1 車線	左直	左直	左折専用	左直	左直	左折専用	左直							
交差角	90°	90°	90°	120°	85°	90°	90°							
隅角部半径 R	12.0m	5.5m	13.0m	4.5m	11.0m	9.5m	10.0m							
セットバック	5.5m	2.0m	4.5m	0.0m	4.0m	0.0m	4.5m							
撮影方向	西→東	南→北	北→南	北東→南西	東→西	東→西	北→南							

### 2.2 分析方法

#### (1) 解析方法概要

各交差点において、撮影した映像を 0.1 秒ごとの静止画に分割する。その分割した画像から、自転車や自動車の座標を習得する方法を示す。本研究では、静止画像から深層学習による物体検知を行うことができる Faster R-CNN を用いた。Faster R-CNN (Faster Region Convolutional Neural Network) は、R-CNN アルゴリズムを使用してオブジェクトの検出を行うもので、物体のありそうな画像領域を Region とし、領域提案 (Region Proposal) し、画像の特徴を圧縮 (畳み込み) して、その特徴量からオブジェクトを分類することで、物体検出を行うものである。Faster R-CNN は Region Proposal の部分を画像情報の畳み込み後に Neural Network に組み込むことで、より高速化したものとなっている。なお、学習に用いた静止画像に関しては、MS COCO のアノテーション付きデータセットを用いた。対象とする画像の検知結果は、バウンディングボックスとして得られ、その上下左右辺の座標データと、自転車や自動車などを分類したクラスデータも出力される。

使用した座標について、原点は画像の左上であり、

自動車自転車共に y 軸については地面との接地点である下端とした。x 軸について、自動車は自転車に近い側 (歩道側) の座標を用い、自転車は車輪の位置として右辺と左辺の midpoint とした。このように取得した座標に関しては、交差点現地において主な目標物地点における GNSS 簡易測量を行い射影変換パラメータを求め、平面直角座標に変換した。

#### (2) 錯綜の定義と分析対象

本研究において、錯綜の定義は「減速やハンドル操作がない場合に衝突の恐れがあり、回避行動をとったもの」とした。観測調査結果における錯綜件数について、左折車複数台と自転車複数台の錯綜といった複雑な錯綜現象は対象としていない。なお、撮影・解析条件等によって左折車と直進自転車の錯綜分析に適さない場合があり、信号停止の影響による減速等の影響がみられるもの、左折車が歩行者や逆走自転車、右折車など順走自転車以外の影響をうけて減速したと考えられるもの、他の通行自動車や障害物の陰に隠れるなどが原因で、画像解析による座標の取得が困難なものについては除外した。

#### (3) 自転車と左折車の位置関係について

観測された錯綜現象について、自転車と左折車の位置関係を見るため、停止線の位置において、左折車・自転車のどちらが先行しているか、また、横断時においては左折車・自転車のどちらが優先されたかを表 2 のように分類した。位置関係 a、d は停止線地点での先行関係のまま横断する形態である。位置関係 b は自転車が左折車の後方から追い抜くような形態、位置関係 c は自転車を左折車が追い抜くような形態である。

#### (4) 区間の設定

自転車と左折車の走行挙動の特徴を明らかにするため、図 1 の設定に基づいて錯綜の有無別に自転車及び左折車の区間走行速度を求めた。区間設定について、単路部は車道上の停止線までの区間とし、横断部については横断歩道や自転車横断帯などの開始位置から横断位置とし、隅角部については単路部から横断歩道や自転車横断帯の間までとした。自転車の通行順序は、順走自転車のみを対象としているため、単路→隅角→横断、左折車の通行順序は、単路部→交差点部→横断部となっている。区間での走行速度を求めた理由は、画像解析による座標取得のばらつきの影響を小さくするためである。

#### (5) 走行位置による分類

交差点毎に似た挙動の比較を行うため、自転車走行位置を A~G の 7 パターンに分類した (図 2)。A は車道直進、B は自転車道 (歩道) からショートカットして交差点部を直進、C は車道寄りの歩道から横断、D は車道から横断帯へ接続し直進、E は建物寄りの歩道を通行し横断、F は車道から交差点直前で歩道、G は車道右側通行で左折車を回避する場合である。

### 2.3 危険度を分析するための指標

本研究では、危険度を分析するために、主に 2 つ

の指標を用いた。ひとつは錯綜危険度の安全性評価として、TTC 指標を、もうひとつは交錯点通過速度差（相対速度）を用いた。交錯点通過速度差を用いる理由は、後に示す TTC だけでは錯綜の危険性を十分に捕捉できず、Safe System アプローチ等で考慮されている衝突時の力学エネルギーのインパクトを考慮するためである。TTC は衝突余裕時間であるため、衝突の生じやすさを示す指標である一方、通過速度や相対速度は衝突の深刻度を表す指標であるとされている。

(1) TTC

Time to Collision (TTC)<sup>9)</sup>とは、速度と進行方向を維持すると仮定した場合の衝突までの時間(s)で定義される。自転車と自動車を対象とした TTC の種類には図 3 のようなものがある。追従の形態は 1 次元型の TTC として評価できる。左折車と直進自転車の錯綜現象は 2 次元上で生じるため、これを 2 次元まで拡張したものが 2 次元（相対距離型）として示したものである。また、ある時間における自転車・左折車の進行方向ベクトルから、衝突地点を逐一算出し、衝突地点までの距離を速度で除して求めるものを 2 次元 TTC（ベクトル型）としている。自転車や左折車に占有空間を設定することで衝突の判定を行うことが可能である。

本研究では、自転車と左折車の優先関係についても考慮できるように、2 次元 TTC の考え方を踏まえた TTC（以下、擬似 1 次元 TTC とする）の算出方法<sup>9)</sup>を用いた。擬似 1 次元 TTC の 2 次元 TTC と異なる点について、2 次元 TTC（ベクトル型）は衝突地点がベクトルにより逐一算出されるが、擬似 1 次元 TTC では、自転車と左折車の実際の走行軌跡交点で固定している。また、衝突地点直前の自転車速度が維持されたと仮定し、自転車の衝突地点到達時間を固定している。左折車について、減速地点にて減速を行わず速度及び走行軌跡を維持したと仮定した際の左折車と自転車の衝突地点における到達時間差によって算出するもので、TTC の正負により自転車・左折車の先行関係について着目することが可能である。TTC の値は減速が行われなかった場合に自転車が先に通過する場合正の値を、左折車が先に通過する場合負の値を取るよう設定する。

(2) 交錯点における通過速度差

交錯点における通過速度差については、錯綜地点（あるいは最も錯綜地点に近い位置）を通過した時の非錯綜時の自転車の速度と自動車の速度をそのまま用いて、（自動車速度－自転車速度）としている。つまり自動車の速度の方が速ければプラスの値を、自転車の速度の方が速ければマイナスの値をとる。なお、錯綜時ではなく、非錯綜時に着目したのは、非錯綜時の走行挙動は、交差点構造、自転車通行空間の整備形態に依存すると考えられること、衝突は予想していない状況で生じることが多いが、その際は非錯綜時挙動に近いと考えられること、本研究において実際に観測できた非錯綜の件数は多くあったこと、を理由としている。

表 2 自転車と左折車の位置関係

位置関係	停止線位置での左折車先行	自転車横断時の左折車先行
a: 左折車先行	○	○
b: 自転車優先	○	×
c: 左折車優先	×	○
d: 自転車先行	×	×



図 1 交差点における区間設定

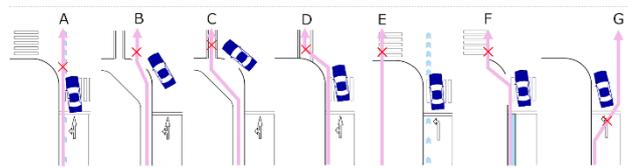


図 2 錯綜パターン毎の自転車通行パターンの分類

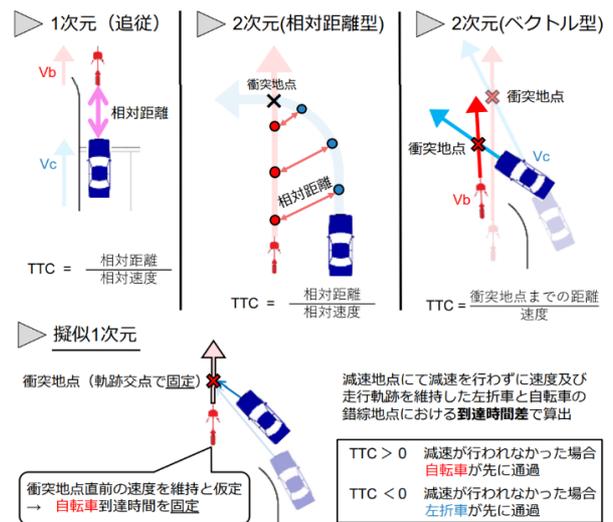


図 3 TTC の種類

3. 分析結果

3.1 擬似 1 次元 TTC 算出結果

錯綜パターン別に TTC の分布をみたところ、A,B が中心付近で分布し、C は全体的に広く分布していた（図 4）。この結果より、A,B は衝突の危険度が高くなった。車道を走行する A については、自転車・左折車共に高い速度で走行していること、B についてはショートカットで飛び出すような挙動であることがその原因として推測される。また、夜間の A は朝と比較してプラス側に、C は朝と比較してマイナス側に分布する傾向が見られたことから、夜 A は自転車が優先して通過する傾向に、夜 C は左折車

が優先して通過する傾向にあり、視認性の違いによって優先関係が変化することがわかった。

### 3.2 交錯点通過速度差と TTC の関係性

パターン別の交錯点通過速度差の平均 (表 3) と TTC 平均を散布図上にプロットした結果を図 5 に示す。全体として左上-右下の分布の傾向が見られる。交錯点通過速度差が高く、相対的に左折車の速度が高いパターンでは、TTC が負の値となる左折車優先の傾向にあることがわかる。A は TTC が 0 付近に固まって分布している一方、交錯点通過速度差より左折車に近い速度で走行する傾向にあることが確認できる。C は TTC の分布から、優先関係が明確でなく、かつ相対的に左折車の速度が高い傾向にあることが確認された。構造的に分離された位置を走行することにより相互の認識に遅れが生じることがその原因のひとつとして考えられる。

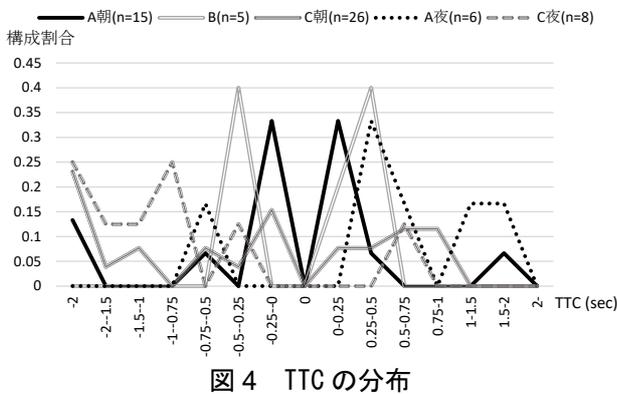


表 3 パターン別の交錯点通過速度差

	A	B	C	D	E	G
件数	48	6	45	2	11	20
平均 (km/h)	1.670	1.808	5.179	-4.830	3.303	-7.888
標準偏差	6.533	2.435	12.001	1.376	1.956	5.716

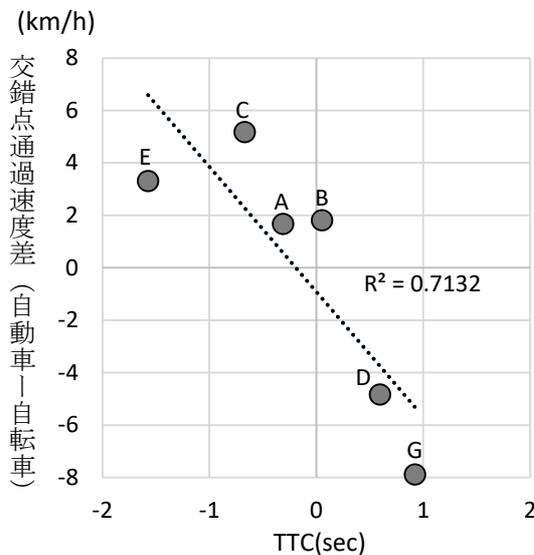


図 5 交錯点通過速度差と TTC の関係性

### 4. おわりに

本研究で得られた知見は以下の通りである。

信号交差点での自転車錯綜パターンとしては、A、C が特に多く見られる挙動であり、それぞれの錯綜パターンでの優先関係は異なる傾向を示した。A と C を比較すると、車道走行である A では優先関係が錯綜の前後で変化しない、つまり優先関係が明確である一方で、構造的に分離された位置を走行する C では優先関係が錯綜の前後で変化するケースが多く観測された。交錯点通過速度差が比較的大きく、擬似 1 次元 TTC は広く分布する傾向にあることが示された。本研究では、自転車と左折車に対する TTC の様々な考え方の中から擬似 1 次元 TTC を採用し、錯綜パターンに着目して様々な交差点での錯綜の特徴を示した。

今後の課題として、複数自転車・複数左折車の錯綜などの状況についても分析を行う予定である。

### 謝辞

本研究は国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」採択課題『車道基本の自転車通行環境整備による交通事故特性と新たな道路交通安全改善策に関する研究開発の一環として実施された。関係者の皆様には検討会において多くのご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局、警察庁交通局：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン(改定版)，2016.
- 2) 一般社団法人交通工学研究会：改訂平面交差の計画と設計自転車通行を考慮した交差点設計の手引，2020.
- 3) 小川圭一，押川智亮：自転車交通に対する交通錯綜指標の適用性に関する研究，交通科学，Vol. 36, No. 2, pp.20-28, 2006.
- 4) 山中英生，溝口諒，永松啓伍：ドライビングシミュレータを用いた信号交差点左折時の自転車安全対策の評価実験，土木学会論文集D3 (土木計画学)，Vol. 73, No. 5, pp. I\_717-I\_722, 2017.
- 5) FHWA: BIKEWAY SELECTION GUIDE, 2019.
- 6) Heyward, J.C. : Near-miss determination through use of a scale of danger, Highway Research Record, No.384, pp.24-34, 1972.
- 7) 山中英生，永松啓伍，吉岡 宏晃：ドライビングシミュレータを用いた信号交差点における自転車通行システムの安全性評価，土木学会論文集D3 (土木計画学)，Vol.73, No.5, pp. I\_705-I\_710, 2017.
- 8) NACTO: Don't Give Up at the Intersection, Designing All Ages and Abilities Bicycle Crossings, 2019.
- 9) ITF-OECD: Towards Zero- Ambitious Road Safety Targets and the Safe System Approach, 2008.
- 10) SWOV: Sustainable Safety 3rd edition – The advanced vision for 2018-2030, 2018.