観察調査に基づく信号交差点における左折車と自転車流入パターンの交通錯綜分析

御所名　航也[1]・吉田　長裕[2]

[1]学生会員　大阪公立大学大学院　工学研究科都市系専攻（〒591-8022 大阪府堺市北区金岡町 1608-15）
E-mail: si22034u@st.omu.ac.jp

[2]正会員　大阪公立大学准教授　工学部都市学科（〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138）
E-mail: yoshida-na@omu.ac.jp

信号交差点における直進自転車と左折車の事故は，典型的な重大事故の一つのパターンである．自転車通行空間の種類としては，自転車道や自転車通行帯などの専用通行帯，車道混在，自転車歩行者道などがあり，それらが信号交差点に接続されると自転車と左折車との相互作用により，危険な錯綜に至ることがある．こういった左折巻き込み事故の発生メカニズムをよりよく理解し，プロテクテッド型交差点へ段階的な対策を導いていくためには，自転車と左折車の運転挙動に着目し，自動運転車時代に対応可能なより安全な交差点隅角部の設計要件を明らかにする必要がある．そこで，本研究では，直進自転車と左折車の錯綜挙動を，走行軌跡や衝突余裕時間 TTC(Time to Collision)指標を用いて分析することで，交差点隅角部の設計に関する基礎的な知見を得ることを目的とする．

Key Words: *Signalized Intersections, Protected Intersections, Corner Design, Left-turn Accident, Selective Conflicts*

1. 研究背景・目的

信号交差点における直進自転車と左折車の事故は，典型的な重大事故の一つのパターンである[1]．自転車通行空間の種類としては，自転車道や自転車専用通行帯，車道混在，自歩道などがあり，それらが信号交差点に接続されると自転車と左折車との相互作用により，危険な錯綜に至ることがある．こういった左折巻き込み事故の発生メカニズムをよりよく理解し，自転車通行の安全を高めたプロテクテッド型交差点[2]へ段階的に導いていくためには，自転車と左折車の運転挙動に着目し，自動運転車時代にも対応可能なより安全な交差点隅角部の設計要件を明らかにする必要がある．

自転車事故の多くは，自動車ドライバによる認知の誤りと関係していると考えられており，「選択的認知」や「非注意性盲目」に関する先行研究がある[3][4]．これらの研究は，錯綜対象の見落としに着目した内容であることから，自動車ドライバの観点からは，信号交差点における複数の錯綜対象の選択が生じていると考えられる．既往研究では，1 対 1 の直進自転車と左折車の錯綜条件を扱っていたが，より複雑な錯綜対象を選択するような状況を扱う研究はされていない．

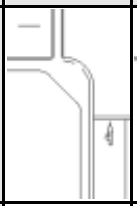
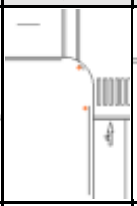
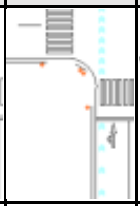
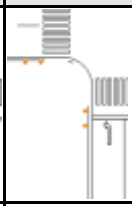
そこで，本研究では，自転車・自動車の交差点流入条件の異なる信号交差点において，直進自転車と左折車の錯綜現象を実際の複数の交差点において撮影する．撮影した映像を用いて，オブジェクトトラッキングによる座標データから，錯綜挙動を走行軌跡や TTC 指標を用いて分析し，交差点隅角部の設計の改善に資する知見を得ることを目的とする．

2. 研究方法

(1) 対象交差点概要

本研究では，自転車インフラの整備形態，自転車の走行挙動，左折車の走行挙動の関連性について分析を行うため，整備形態の異なる 4 つの交差点を調査対象とした（表 1）．交差点の選定では，自転車通行環境の整備が進んでいる東京都内の大規模な信号交差点を対象とした．2020 年度撮影を行った亀戸，富ヶ谷交差点は，ビデオ撮影により交差点の自転車・左折車の挙動を分析するため，比較的高さのある位置からの撮影が行えるよう，交差点

表 1　観測交差点概要

	構造的分離	車道混在		
対象交差点	亀戸	富ヶ谷	板橋	熊野町
				
整備・運用形態	自転車道＋自転車横断帯	自歩道＋自転車横断帯	自歩道＋横断歩道	自歩道＋横断歩道
第 1 車線	左直	左直	左直	左折専用
隅切半径	12.0m	11.0m	7.0m	9.0m
停止線ｾｯﾄﾊﾞｯｸ	9.0m	11.0m	19.0m	10.0m
自転車ｾｯﾄﾊﾞｯｸ	5.5m	4.0m	1.0m	3.0m
交差角	90°	85°	100°	85°

の付近に歩道橋等の構造物があることも考慮して選定した．2021 年度撮影した板橋，熊野町交差点は，歩道橋の有無に関わらず，東京都内における交通人身事故発生件数が多かったことから選定した．撮影時間帯は，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とした．

(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．緊急自動ブレーキの国際基準では，ドライバがブレーキを操作しなくてもシステムが自動でブレーキをかけるタイミング，すなわち緊急とみなすタイミングとして，TTC の値が 3 秒以下になった時と定めている[9]．そこで本研究では，TTC が 3 秒以下となる自転車が現れた時間を錯綜開始時間とし，TTC が 4 秒以内の他の自転車も分析対象とする．

(3)　自転車通行パターンの分類

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, B, C, D, E, F の 6 パターンに分類した（図 1）．パターン A は車道上を走行してきた自転車がそのまま直進するような挙動を示すもの，パターン B は車道を走行してきた自転車がそのまま直進せずに自転車横断帯や横断歩道に接続してから横断する挙動を示すもの，パターン C は自転車道（歩道）を走行してきた自転車が自転車横断帯や横断歩道に正規に接続せず，交差点に飛び出すような挙動を示すもの，パターン D は自転車道（歩道）を走行してきた自転車が自転車横断帯や横断歩道に正規に接続し横断する挙動を示すもの，パターン E は歩道通行パターン（C, D）複数台で構成されたもの，パターン F は車道通行パターンと歩道通行パターンの組み合わせにより構成されたものを示す．各交差点で A～F のいずれか，あるいは複数のパターンに該当する自転車走行挙動が観測された．

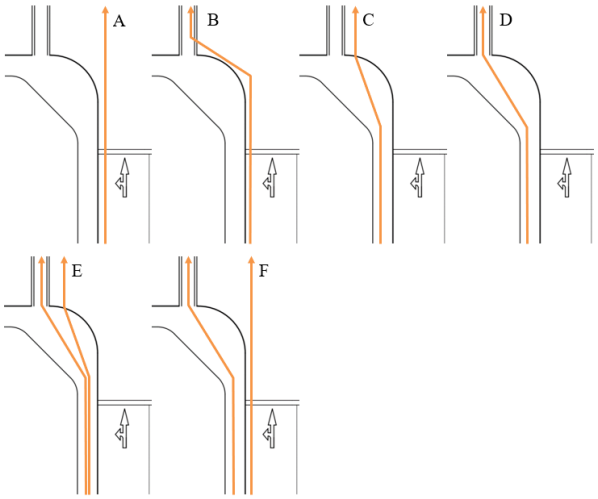


図 1　自転車通行パターン（6 種類）

(4)　動画解析と評価手法

2020 年 10 月～2021 年 11 月に各交差点においておよそ 3 時間ずつビデオ観測調査を行った．解析手法は，撮影したビデオからオブジェクトの種類と座標をカルマンフィルタを用いてトラッキングできる DEEPSORT を用いた（図 2，3）．

物体検知の出力結果として，静止画ごとに，自転車や自動車，人などを class として分類したクラスデータと，静止画左上からのピクセルによる検知物体の上下左右辺の座標データを取得することができる．本研究では解像度 4K（水平 3840×垂直 2160 画素）での撮影を行った．自動車と自転車の座標もバウンディングボックスとして得られる．使用した座標について，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(by)とした．x 軸については自動車は自転車に近い方（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中点((lx+rx)/2)とした．また，オブジェクトトラッキングの際，物体誤検知により座標が適切に取得できていない場合があったため，座標データに対して欠損値の補間および平滑化処理を行った．

ここで，本研究で使用した Yolov5 の物体検知状況について検証をするため，抽出したサンプルに対して，正しく物体検知が行われているかを座標データから確認した．画像認識を行ったすべての物体についての割合を出すことは困難であるため，撮影を行った各交差点の分析サンプルから，自動車走行挙動 5 件，自転車走行挙動 5 件ずつをランダムに抽出し，その物体検知の精度についての検証を行った．抽出したサンプルは左折車 1 台と自転車

1 台の錯綜ケースであり，実際には車両の重なりなどで物体検知が正しく行えない場合がさらに増えるものと考えられる．物体検知及び座標取得結果の分類を（a）正しく認識，（b）認識無し，（c）複数台検知の 3 つとして，左折車，自転車それぞれの結果を集計した．なお，自転車物体検知割合の集計にあたり，画面奥で明らかに距離が遠いことによる（b）認識なしの状況が続いているような場合については（b）認識なしとしてカウントしておらず，物体検知が連続してなされた場合からのカウントとしている．その結果，左折車では 95%が正しく認識されているのに対して，自転車が正しく認識された割合は 80%程度となった（図 4，5）．認識なしのケースの殆どは，障害物や他自転車によるオクルージョンのケースが多かった．

錯綜の危険性は，TTC（Time to Collision）指標で評価した．TTC 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．本研究では，潜在的な衝突点を逐次計算し，その点までの距離を速度で割った 2 次元 TTC（ベクトル型）指標を使用した．本研究においては車両の大きさ等を考慮しない座標（点）データによって算出を行う．簡易的な算出方法として，逐一算出される交点までの自転車・左折車の到達時間のうち最大のものを 2 次元 TTC（ベクトル型）の値として用いるものと定義した．

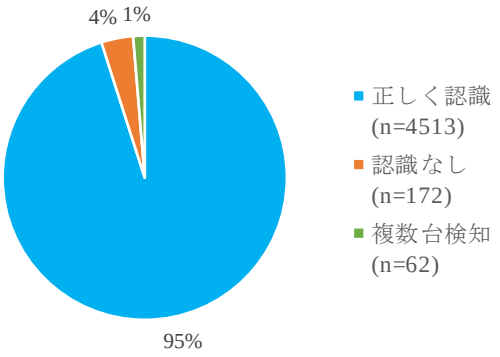


図 4　左折車物体検知割合

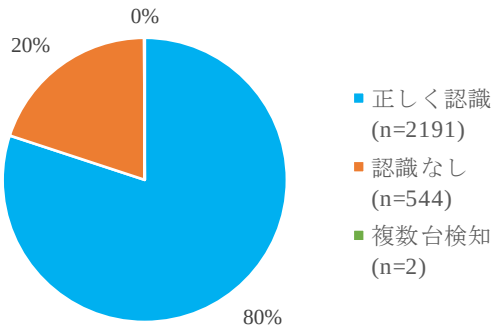


図 5　自転車物体検知割合



図 2　トラッキングの様子（frame: t）



図 3　トラッキングの様子（frame: t+1）

3.　分析結果

(1)　各交差点観測結果

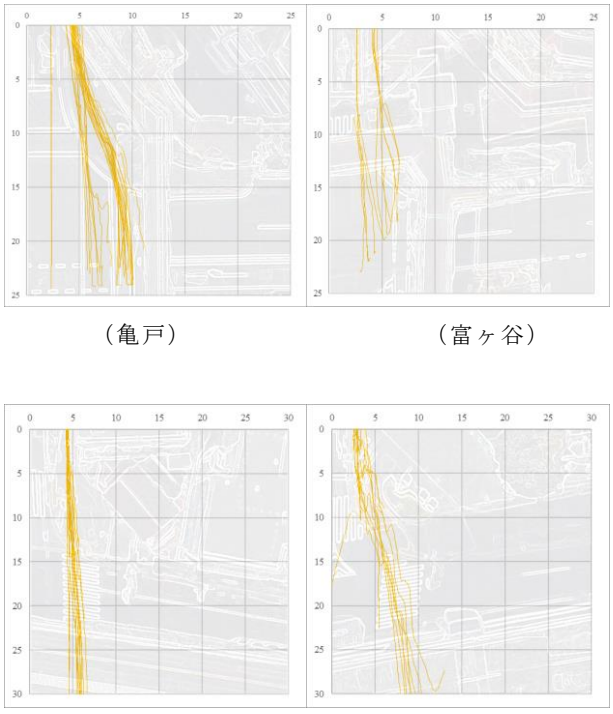
表 2 は各交差点での観測結果である．錯綜自転車台数は亀戸交差点で最も多くなっている．また，左折車台数は亀戸交差点，板橋交差点で多くなっている．自転車通行パターンに着目すると，亀戸交差点，板橋交差点，熊野町交差点では，自転車道（歩道）から横断帯や横断歩道に接続するパターン D がよく見られた．亀戸交差点ではショートカットして交差点に進入するパターン C が，富ヶ谷交差点では車道を直進するパターン A が他交差点に比べて多く見られた．

表 2　各交差点観測結果

交差点	動画時間（分）	左折車台数	錯綜件数	順走自転車錯綜件数				
				A	B	C	D	計
亀戸	120	288	24	2	0	8	23	33
富ヶ谷	147	117	8	5	1	1	7	14
板橋	178	483	15	0	0	0	19	19
熊野町	180	176	11	0	0	3	10	13
計	625	1064	58	7	1	12	59	79

(2) 自転車の走行軌跡

観測された自転車の走行軌跡を交差点別に重ね合わせたものを図 6 に示す．自転車道（歩道）から横断帯や横断歩道に接続するパターンDの軌跡を比較すると，亀戸，富ヶ谷，熊野町交差点では隅角部から横断部にかけてシフトする形で走行しているが，板橋交差点では隅角部から横断部までが直線的な接続となっている．これは板橋交差点の自転車道のセットバック量が小さいことによるものであり，自転車の速度上昇につながることが予想される．また，板橋，熊野町交差点では自転車走行パターンのほとんどがパターンDであるのに対して，亀戸，富ヶ谷交差点ではパターン A からパターン D まで様々な通行パターンが確認できる．特に，亀戸交差点では交差点にショートカットして進入するパターンCが多く見られ，交差点構造によるものであると考えられる．左折車ドライバの観点から，ショートカットして交差点に進入する自転車との錯綜は，潜在的な衝突点を予測することが困難であり，パターンCによる危険な錯綜も多く見られた．その他，整備形態や隅切半径など交差点条件の違いが，自転車走行挙動に関係していると考えられる．ここで，撮影方法により画角に違いがあるため，座標取得の範囲が異なっている．



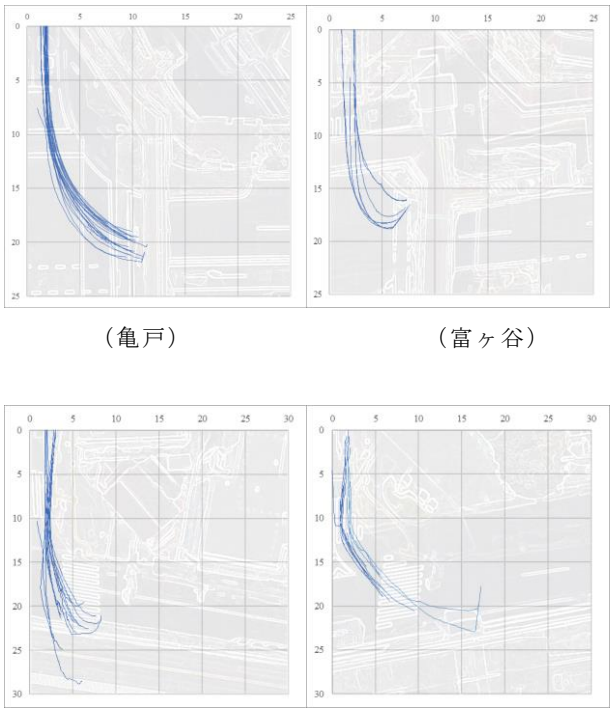
（亀戸）　（富ヶ谷）

（板橋）　（熊野町）

図 6　自転車走行軌跡

(3) 左折車の走行軌跡

観測された左折車の走行軌跡を交差点別に重ね合わせたものを図 7 に示す．交差点によって，横断帯や横断歩道に接続するときの左折車の角度が異なり，亀戸交差点では横断帯にほぼ正対しているのに対して，板橋交差点では急な角度で横断歩道に進入している．これは，自転車道セットバック量や交差角によるものであると考えられ，セットバック量が小さくなるにつれて，交差角が鈍角になるにつれて左折車は急な角度のまま交差点に進入することになる．これにより，左折車が十分に速度を落とせないまま横断帯や横断歩道で自転車と錯綜する可能性が高くなり，危険な錯綜につながることが予想される．板橋交差点の走行軌跡を見ると，大回りしている左折車が確認されるが，これは速度を落とさず交差点に進入したことが原因であると考えられる．その他，整備形態や隅切半径，停止線セットバックなど交差点条件の違いが，左折車走行挙動に関係していると考えられる．また，自転車と同様に撮影方法により画角に違いがあるため，座標取得の範囲が異なっている．



（亀戸）　（富ヶ谷）

（板橋）　（熊野町）

図 7　左折車走行軌跡

4. 危険度分析

(1) 交差点別 TTC の算出結果

TTC の平均値を交差点別に比較すると（表 3），熊野町交差点が最も小さく，次いで富ヶ谷，板橋交差点が小さくなった．また，TTCの発生割合を交差点別に比較すると（図 8），熊野町，板橋交差点の順に 1.0s 未満の発生割合が高くなった．ここで，母集団が異なると仮定しU検定を行った結果，亀戸と熊野町に有意差($p<0.01$)があった．

(2) 自転車通行位置別 TTC の算出結果

TTC の平均値を自転車通行位置別に比較すると（表 4），車道通行と歩道通行が混在した複数台のパターンが最も小さくなった．また，TTCの発生割合を自転車通行位置別に比較すると（図 9），歩道通行複数台，歩道通行 1 台の順に 1.0s 未満の発生割合が高くなった．このことから，歩道通行の順走自転車は左折車ドライバから見落とされやすい可能性があるといえる．ここで，母集団が異なると仮定しU検定を行った結果，歩道通行1台と歩道通行複数台に有意差($p<0.05$)があった．

表 3　交差点別平均 TTC

	件数	平均 (s)	標準偏差
亀戸	24	2.27	0.772
富ヶ谷	8	1.69	0.540
板橋	15	1.82	1.036
熊野町	11	1.40	0.958

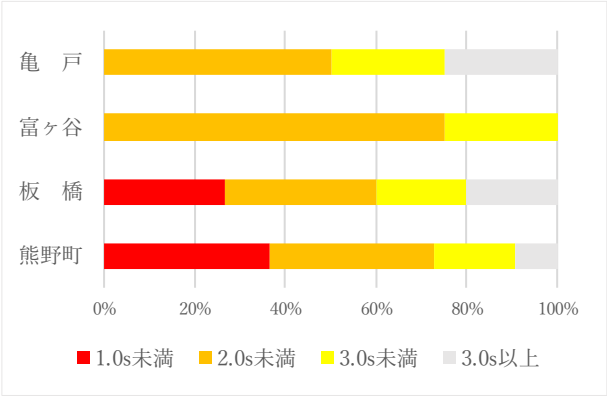


図 8　交差点別 TTC 発生状況

表 4　通行位置別平均 TTC

	件数	平均 (s)	標準偏差
1 -車道	2	1.64	0.088
1 -歩道	38	2.14	0.968
複数台-歩道	14	1.50	0.713
複数台-混在	4	1.30	0.390

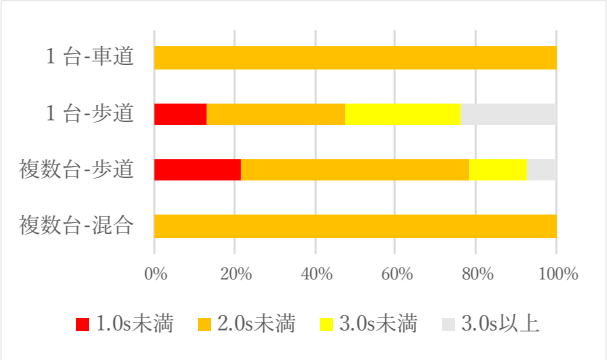


図 9　通行位置別 TTC 発生状況

5. 結果と討議

得られた結果とそれに基づく示唆は以下の通りである．

・交差点に進入する左折車，自転車の走行軌跡は整備形態によって違いが見られ，その違いが錯綜の危険度と大きく関係している可能性が示された．

・整備形態の異なる交差点では TTC の平均値に有意差が見られ，その原因として，左折車の挙動や交差点条件が関わっている可能性が示された．

・交差点に進入する自転車の安全性は通行パターンによって異なり，TTC 値は歩道通行 1 台よりも歩道通行複数台の方が有意に低く，選択的な錯綜が生じている可能性が示された．

・交差点の安全性を高めるためには，左折車から歩道通行自転車を認識できるよう工夫する必要があり，流入路を制限して自転車との錯綜場所を明確にする，左折車と横断帯（歩道）を正対させるなどの改善案が考えられる．

・プロテクテッド型交差点と比較して日本の信号交差点では，自転車の通行位置や優先権が左折車ドライバから分かりづらい傾向にある．左折車の速度を抑制する，自転車のショートカット挙動を制限する，自転車を複数同時に交差点に進入させない，流出口で自転車の順序を入れ替えさせないなどの対策が考えられ，これらを交差点隅角部設計に反映させる必要がある．また，自転車専用信号の導入についても検討すべきである．

謝辞：本研究は，国土交通省道路局が設置する新道路技術会議の技術研究開発制度により，国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究「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」で行われた．検討会において関係者の皆様から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．

REFERENCES

1) Jennifer Warnera, David S. Hurwitza, Christopher M. Monsereb, Kayla Fleskesa, “A simulator-based analysis of engineering treatments for right-hook bicycle crashes at signalized intersections”, Accident Analysis and Prevention (2017), Vol.104, pp. 46-57.
2) Katerina Deliali, Eleni Christofa, Michael Knodler Jr, “The role of protected intersections in improving bicycle safety and driver right-turning behavior”, Accident Analysis and Prevention (2021), Vol.159, pp. 106295.
3) Hanne Beate Sundfør, Fridulv Sagberg, Alena Høye, “Inattention and distraction in fatal road crashes – Results from in-depth crash investigations in Norway”, Accident Analysis and Prevention (2019), Vol. 125, pp. 152-157.
4) Yingying Yan, Shiquan Zhong, Junfang Tian, Liang Song, “Driving distraction at night: The impact of cell phone use on driving behaviors among young drivers”, Transportation Research Part F, Psychology and Behaviour (2022), Vol. 91, pp. 401–413.
5) Miller, R., Huang, Q., “An adaptive peer to peer collision warning system.”, IEEE Veh. Technol. Conf. (2002), Vol. 1, pp. 317-321.
6) 国連欧州経済委員会：衝突被害軽減ブレーキに係る協定規則 (第 131 号), 6.4.5 項, 2014.
7) 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.
8) 澤田和樹, 吉田長裕, 瀧澤重志：信号交差点における高速畳み込みニューラルネットワーク手法による軌跡データ用いた自転車と左折車の錯綜分析, 第 41 回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp.177-182, 2021.

(?)
(?)

Traffic Conflict Analysis of Left-turning Vehicle and Bicycle Inflow Patterns at Signalized Intersections Based on Observational Surveys

Koya GOSHONA and Yagahiro YOSHIDA

Accidents between straight bicyclists and left-turning vehicles at signalized intersections are one of the typical patterns of serious accidents. When they are connected to signalized intersections, the interaction between bicycles and left-turning vehicles can lead to dangerous complications. In order to better understand the mechanisms of left-turn entrapment accidents and to develop incremental countermeasures for protected intersections, it is necessary to focus on the driving behavior of bicycles and left-turning vehicles and to clarify the design requirements for safer intersection corners that can be adapted to the era of automated vehicles.

The purpose of this study is to obtain basic knowledge on the design of intersection corners by analyzing the behavior of bicycles and left-turning vehicles using trajectory and the time-to-collision (TTC) index.