

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04720

研究課題名(和文) 時空間的な横断選択行動を考慮した安全・円滑な歩行者横断施設計画方法の提案

研究課題名(英文) Pedestrian Crossing Facility Planning Method considering Safety and Efficiency based on Spatio-Temporal Crossing Choice Behavior

研究代表者

井料 美帆 (Iryo, Miho)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：80469858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、信号交差点の設置密度の高い都市内の往復二車線道路を想定し、無信号の単路部横断歩道と隣接する信号交差点との距離が、交通円滑性・安全性に与える影響の定量化を行った。円滑性では、無信号横断歩道と信号交差点の距離に応じた交差点の容量低下条件等を分析した。安全性の観点からは、現地観測調査とバーチャルリアリティ環境の歩行実験を組み合わせ、歩行者が信号の表示に合わせて横断歩道外横断(乱横断)する傾向にあることや横断施設の種類に応じた乱横断抑制効果を示した。さらに、安全評価交通シミュレータを構築し、信号待ち行列と歩行者の横断位置との関係が横断歩行者と対向側車両との交錯安全性に与える影響を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の交通事故死者の3分の1以上は歩行者であり、横断歩行者の交通安全確保は重要な課題である。また歩行者の安全で利便性の高い横断機会の確保は、ウォークアブルなまちづくり実現の大前提でもある。本研究では、信号交差点が密に設置される都市内街路における交通特性が周囲に信号がない場合と明確に異なることを示しており、都市内で追加的な横断施設の設置可否を検討するうえで有用な知見を得ている。さらに、バーチャルリアリティ歩行実験の実環境との比較検証を通じて、本手法の歩行者行動分析への適用可能性を示したことや、視距を考慮した安全評価交通シミュレータの構築は新規性が高く、今後の交通安全分析に有用な学術的意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：This study quantified the impact of the distance between an unsignalized midblock pedestrian crossing and an adjacent signalized intersection on traffic efficiency and safety, at urban two-way two-lane road where a high density of signalized intersections is expected. For efficiency, the conditions under which the intersection capacity deteriorates were analyzed as a function of the distance between the pedestrian crossing and the intersection. In terms of safety, a combination of field survey and pedestrian virtual reality experiment were conducted. It was found that pedestrians tend to cross outside of crosswalk (jaywalking) according to signal settings, and that jaywalking probability decreases by type of crosswalks. Furthermore, a traffic simulator for safety evaluation was developed. Using the simulator, the impact of vehicle queue length from signalized intersection and pedestrian crossing location on the conflicts between pedestrians and opposing vehicles was analyzed.

研究分野：交通工学

キーワード：横断歩行者 無信号横断施設 バーチャルリアリティ 都市内街路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

わが国の交通事故死者数全体に占める横断歩行者の割合は近年増加傾向にある。このうち単路部の横断歩行者事故では、約9割が2車線以上の道路の横断歩道外横断(乱横断)である。乱横断では、運転者による歩行者への対応が遅れ、安全性を著しく低下させる。例えば自動運転車でも、歩行者の存在が容易に想定できる横断歩道より、乱横断の歩行者は検知しづらいつ考えられる。よって、歩行者の安全向上には、危険な乱横断を抑止し、安全な横断施設での横断を促すことが要求される。

しかし安全な横断施設は、単路のどこにでも設置できるわけではない。日本の市街地における典型的な幹線道路は、信号交差点が既に比較的密に設置されている。この密度は車両円滑性の観点から検討されているものの、歩行者の利便性を考慮すると、横断歩道をさらに密に設置することが望ましいともいえる。横断施設の設置は、周辺交差点を含む道路区間全体に影響を及ぼす可能性があるが、ほとんどの既往研究は横断施設単独での検討に留まり、横断施設の設置間隔という視点は考慮されていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、市街地の幹線道路区間において、隣接する信号交差点との相互の影響や、歩行者の乱横断の選択行動を踏まえ、安全性と円滑性を両立する単路部横断施設の設置位置や施設形式提案への知見を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、大きく3つのアプローチに分けられる。1つ目は、無信号横断歩道を信号交差点近傍に設置することによる円滑性への影響分析であり、ショックウェーブ理論の考え方をを用いて整理した。2つ目は、乱横断を行う歩行者を無信号交差点に誘導する効果の分析であり、観測調査や実験を通じて歩行者の行動把握を行うものである。また3つ目は、歩行者横断時の安全性に関するシミュレーション解析である。なお、以降の分析はいずれも往復二車線の街路を対象としている。また、無信号横断歩道の種類として、一回で横断する通常の横断歩道に加えて、中央に交通島のある二段階横断歩道も比較検討した。二段階横断歩道では、歩行者の1回の横断時間が短縮され、それぞれの車線の横断タイミングを個別に決定できることや、自動車側から見た横断歩道の視認性が高まること等から、近年日本でも導入検討が進められている。

#### (1) 円滑性の観点からの横断歩道位置の制約条件検討

都市内街路では信号交差点の密度が高く、歩行者の横断は信号交差点により整流された自動車の車群に影響を受けると考えられる。そこでまず、信号交差点の近傍において、歩行者が単路部で横断する場合の自動車と歩行者双方の円滑性への影響について検討を行った。

無信号横断歩道の設置が可能な信号交差点との距離

無信号横断歩道の手前で停止する車両が待ち行列を形成することにより、信号交差点の円滑性に影響を与えることとなる。無信号横断歩道が信号交差点の下流にある場合には、待ち行列が交差点より上流まで延伸することにより信号交差点の交通容量が低下する可能性がある。同様に、無信号横断歩道が信号交差点の上流にある場合は、信号交差点の待ち行列が無信号横断歩道に達した場合、無信号横断歩道の横断需要が多いと信号交差点の交通容量が低下する。

仮にすべての車両が横断歩行者に対して道を譲ると仮定したときの、信号交差点の容量を低下させない条件について、自動車交通量、横断歩行者交通量、信号パラメータおよび横断歩道の位置を変数として定式化を行った。

信号交差点までの距離に応じた無信号横断歩道利用者の旅行時間

無信号横断歩道を設置した場合、歩行者は迂回しなくてよいため旅行時間の減少が見込まれる。ここでは、とは逆に、すべての車両が無信号横断歩道では停止しないと仮定して、無信号横断歩道で横断を行う歩行者の遅れ時間を計算し、信号交差点まで迂回することを想定した場合との旅行時間の比較を行った。

#### (2) 歩行者の横断位置選択行動分析

歩行者が乱横断を行う条件を明らかにするため、実道の観測調査とバーチャルリアリティ環境での歩行実験を組み合わせる歩行者の横断位置選択行動分析を行った。対象は名古屋市の金山駅南側道路とし、まずビデオ観測調査により車両の接近状況、隣接する信号の表示タイミングと歩行者の出発地・目的地に応じた横断位置の情報を取得し、歩行者の横断位置選択行動に関する基礎的な分析を行った。

その後、この道路周辺を模擬したバーチャルリアリティ(VR)環境を構築した。VRにはフォーラムエイト社 UC-Win/Road を用いた。被験者はヘッドマウントディスプレイ(HTC-VIVE)を装

着し、コントローラを操作して VR 空間を出発地から目的地まで移動する（図 1 ~ 3）。実験では、出発・目的地を固定したうえで、車両の到着条件（信号のタイミング）や追加的な無信号横断施設（図 4）の有無・種類の異なるシナリオでの歩行を計 9 回行った。また毎回の VR 実験前に、被験者に横断歩道の位置や種類を示した地図を見せ、横断希望位置を尋ねる事前評価アンケートを実施した。シナリオの順番は、順序効果を排除するためランダムとした。この結果をもとに、歩行者が横断位置を逐次選択する行動モデルの推定を行った。



図 1 HTC VIVE Pro 装着時の VR 映像



図 2 実験時の様子

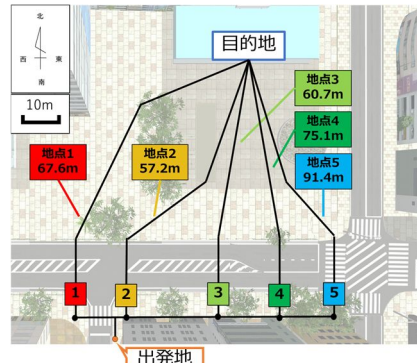


図 3 金山駅周辺を模擬した VR 平面図



a) 横断歩道



b) 横断歩道+交通島



c) 交通島のみ

図 4 横断施設の設定

### (3) 交通シミュレータによる横断歩行者の安全性評価

単路部における歩行者と車両の交錯安全性評価のためのシミュレーションモデル構築を行った。このミクロ交通シミュレーションでは、自動車は速度により異なる運転者の視野角を考慮し、視野内に入った横断歩行者について、自車両とどちらが先に交錯領域を通過できるかを判定したうえで、車両の加減速行動を表現する。また歩行者は、接近車両の横断歩道への到着時刻を現在の速度から予測したうえで横断判断を行うものである（図 5，6）。既往研究から得られている車両挙動や反応時間等の一般的知見をもとに実装し、実測の歩行者横断挙動や車両挙動との比較によりシミュレーションの検証を行った。また、信号待ち行列と横断歩道との距離に応じた歩行者安全性の評価を行った。

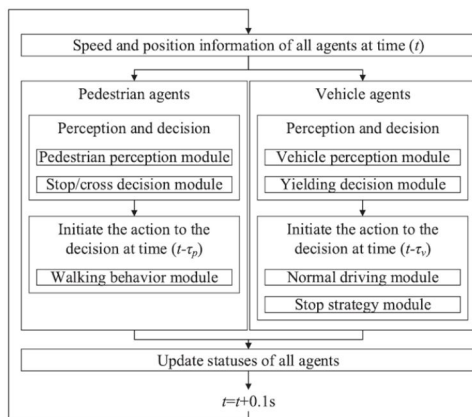


図 5 交通シミュレータのモジュール構成

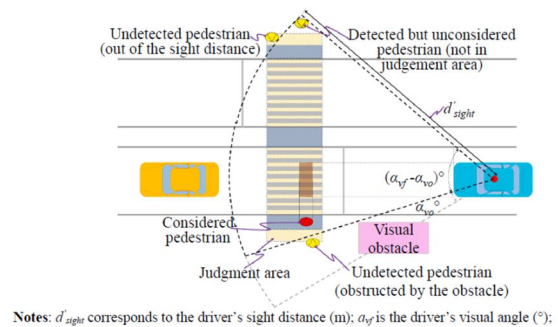


図 6 自動車・歩行者の配置と運転者の認識範囲

上記を踏まえて、主に信号交差点の近傍において、横断歩道の設置位置や種類を検討するために必要な検討事項について整理を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

円滑性の観点からの横断歩道設置検討

まず、信号交差点の容量を低下させない横断歩道の位置については、例えばサイクル長を 12 秒、対象方向の有効青時間を 60 秒としたとき、自動車交通量が 600 台/時であれば歩行者交通量が 200 人/時程度までであれば、交差点近傍に横断歩道を置いても交通容量への影響がないことが示された。二段階横断歩道であれば、自動車交通容量への影響はさらに小さくなる。

また歩行者の遅れ時間については、通常の無信号横断歩道であれば、信号が存在しない場合に比べて全体的に歩行者の横断遅れ時間は大幅に減少することが示された。これは、信号で車群が整流されることで、自動車がほとんど到着しない時間帯が形成されることによる。「車両が全く譲らない」横断歩道での横断は、交通条件的には横断歩道外での横断の状況とほぼ変わらないので、信号交差点の存在により乱横断がよりしやすくなっている状況であることも示唆された。

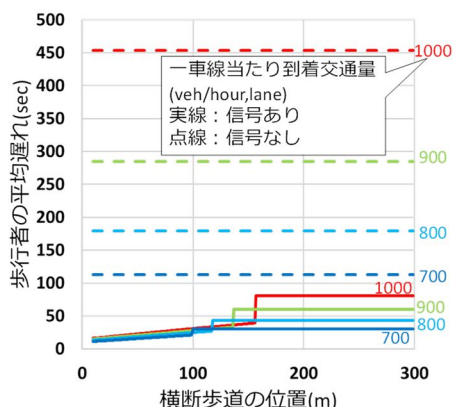


図7 横断施設の位置と遅れの関係 (通常の横断歩道)

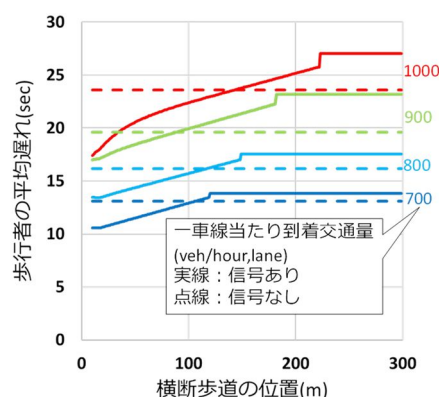


図8 横断施設の位置と遅れの関係 (二段階横断歩道)

#### 歩行者の横断位置選択行動分析

現地調査は、金山南口前の道路(スクランブル交差点とその西側 60m 程度)にて、平日夕方 16 時~18 時のオフピーク時間帯に実施した。自動車交通量は観測された横断歩行者 480 名中、37%が乱横断を行っており、信号灯火や車両到着状況を判断材料としていることが示唆された。現地調査では、乱横断者の大半が図 3 の出発地の位置から金山駅に向かう歩行者であった。そのため、金山を模擬した VR 実験では、この出発地のみに着目して実験を行った。VR における乱横断の割合は現地調査の結果とほぼ同等の 3 割程度で、VR での横断選択行動が実際の行動と類似していることが示された。また、地点 1, 2 に横断歩道を設置した場合には、乱横断はそれぞれ 15%, 7%程度に減少した。このことから、追加的な横断歩道設置は乱横断の減少に寄与するものの、迂回距離による感度が大きいことが示唆される。

また、VR の実験結果を用いて、図 3 に示した各地点において逐次的に横断可否の意思決定を行う選択モデルを二項ロジットモデルで構築した。表 1 にその結果を示す。二段階横断歩道では通常の横断歩道に比べて、より横断を選択しやすくなることなどが示された。また、横断者が地図を見て事前に宣言した経路に比べると、VR 実験時には人はより多くの乱横断を行っており、その頻度は実測調査と同程度であった。このことから、紙のアンケートによる SP 調査と比較して、動的に交通環境を見せることのできる VR ではより現実に近い横断行動を観測することができたといえる。

#### 交通シミュレータによる横断歩行者の安全性評価

車両の視野角や反応時間などについて、既存研究で得られている平均的な値をシミュレーションの挙動パラメータとして設定し、シミュレーションの実行結果を実際の横断歩道での挙動と比較した。図 9 は安全性指標の 1 つである Post Encroachment Time (PET)(歩行者と車両の通過時間差)の累積分布を示したものである。歩行者と自転車それぞれについて、PET の分布に

表 1 交通状況を踏まえた移動中選択モデル推定結果

説明変数		係数
切片		-1.33
地点jから地点5までの距離[m]		$-1.05 \times 10^{-1***}$
地点jでの横断時と地点5での横断時の総移動距離の差[m]		$7.89 \times 10^{-2**}$
ダミー変数	横断歩道ダミー	5.30***
	横断歩道+交通島ダミー	6.29***
	交通島ダミー	4.23***
	車両存在ダミー	-1.29*
サンプル数		786
McFadden の疑似決定係数		0.135
的中率[%]		90.8

\* : 5%、\*\* : 1%、\*\*\* : 0.1%有意

シミュレーションと実測とで統計的な差異は見られず、シミュレーションが実際の安全性指標をよく表現できていることがわかる。

このシミュレーションを図 10 の道路環境に適用した。これは、信号待ち行列の末尾と横断歩道との距離が比較的近い場合で、対向側から接近する車両から見ると、横断しようとする歩行者が待ち行列車両に隠れてしまうケースである。対向車の交通量は 100 台/時とした。図 11 に待ち行列と横断歩道との距離別・歩行者需要別に PET が 2 秒以下となった歩行者の割合を示す。待ち行列末尾からの距離が短くなると視距が取れないため、PET の小さい危険な交錯の割合が大きくなる。さらに、歩行者需要が 300~400 人/h の場合により危険な状況が発生する。これは、歩行者需要が多いと横断歩道で停止する車両が増え、速度の高い車両と歩行者が交錯する割合が減少すること、また歩行者需要が少ないと横断歩行者が自動車と交錯する頻度が減少することの 2 つが理由として考えられる。この場合は、乱横断を防ぐための横断歩道設置という点だけではなく、横断歩道の視認性向上や車両速度抑制などの対策と組み合わせた対策が重要といえる。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究では、都市部における信号交差点による乱横断の誘発や、無信号横断歩道、特に二段階横断歩道による乱横断の抑制効果について一定の知見を得た。

乱横断の解析には信号交差点による影響が非常に大きいこと、二段階横断では通常の横断歩道に比べてより横断歩道を選択する割合が増えること、信号待ち行列による視距の低減が横断歩行者の安全に大きな影響を及ぼすことなど、いずれも既往研究や経験則にて部分的に知られていることではあるものの、VR 実験や視距を考慮した交通シミュレーションを導入したことにより、これらを定量評価した点において、新規性・有用性があると言える。

VR 環境を人の行動実態把握に用いることは、近年様々な分野で試みられている。道路空間の安全対策のための歩行実験の事例も増えているが、本研究は、実空間における横断行動との比較検証を行っている点で新規性がある。また、事前の経路選択行動と VR 実験中の選択行動を比較評価することで、人の行動選択の構造を試みる点も新たな内容といえる。VR 実験の結果を発表した第 44 回交通工学研究発表会では研究奨励賞を受賞しており、VR を動的な交通状況の評価するための交通行動分析に用いた事例として、新規性や今後の展開可能性が高く評価されたと考えられる。本研究の結果を踏まえた新たな展開として国際共同研究を開始しつつあり、海外も含めて関心の高い内容であると考えている。また、安全評価のシミュレーションは、視距を明示的に評価できるものであり、遮蔽物の多い都市内道路での安全性評価に有用と考えられる。

### (3) 今後の展望

本研究では、信号交差点の近傍における無信号横断歩道の扱いは、周辺に交差点がない場合と大きく異なることを示した。しかし、VR 実験は単一の出発地・目的地でしか行えておらず、知見を一般化するには至っていない。今後は、OD が異なる場合の横断選択行動を明らかにしたうえで、横断歩道外横断による危険性や円滑性への影響を定量評価するとともに、横断歩道の望ましい設置位置についてより一般的・定量的な知見を得ることが必要である。また、乱横断の実態を交通シミュレーションに実装する点については、単一 OD の VR 実験であったために一般的なモデルを実装するに至っていない。これらの点についてさらなる検討を進めたうえで、将来的に実際の横断歩道設置間隔の検討実務に反映させることが期待される。

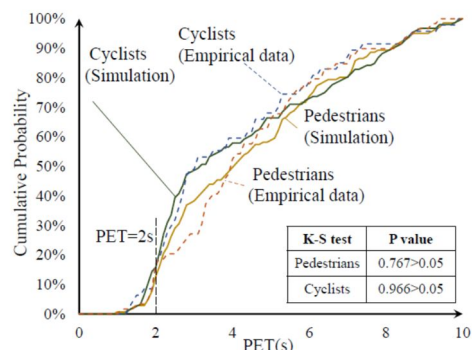


図 9 PET のシミュレーション結果と実測値との比較

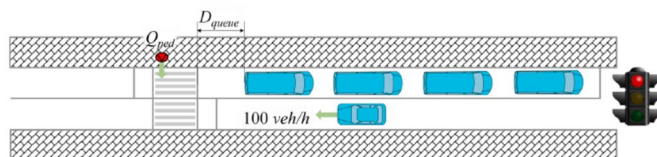


図 10 信号待ち行列の近傍での横断ケース

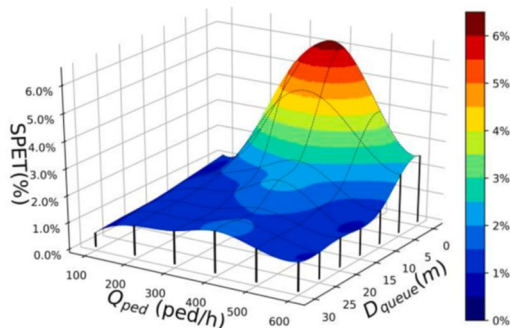


図 11 待ち行列末尾と横断歩道の距離別・歩行者需要別の PET2 秒以下の割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhu Hong, Almkudad Abdulkarim, Iryo-Asano Miho, Alhajyaseen Wael K.M., Nakamura Hideki, Zhang Xin	4. 巻 159
2. 論文標題 A novel agent-based framework for evaluating pedestrian safety at unsignalized mid-block crosswalks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Accident Analysis & Prevention	6. 最初と最後の頁 106288 ~ 106288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aap.2021.106288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中島 孝規, 井料 美帆	4. 巻 9 (2)
2. 論文標題 バーチャルリアリティ実験による歩行者の横断位置選択行動分析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_253-A_262
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14954/jste.9.2_A_253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中島孝規, 井料美帆
2. 発表標題 隣接する信号交差点が歩行者の単路部乱横断行動に及ぼす影響分析
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千田浩貴, 井料美帆
2. 発表標題 信号交差点に隣接する単路部無信号横断施設の交通円滑性への影響分析
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島孝規, 井料美帆
2. 発表標題 バーチャルリアリティ実験による歩行者の横断位置選択行動分析
3. 学会等名 第44回交通工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Muhammad Faizan ul Haq, Miho Iryo-Asano, Wael K.M. Alhajyaseen, Christian J.R. Samson, Hong Zhu
2. 発表標題 Impact of Refuge Island in Two-Lane Roads on Pedestrian Crossing Behavior: A Virtual Reality Study
3. 学会等名 World Congress on Transport Research 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関