

[研究論文]

定置型サイクリングシミュレータ環境における自転車の旋回性能の検証 Verification of Steering Performance Using Cycling Simulator

櫻井 淳[†], 三宅 智也[‡], 松本 修一[†]
Jun SAKURAI, Tomoya MIYAKE, Shuichi MATSUMOTO

[†] 文教大学 情報学部

[‡] 元 文教大学 情報学部

^{† ‡} Faculty of Information and Communications, Bunkyo University

要旨

自転車は、日常生活やレジャーなどの様々な用途において重要な役割を担っているが、自転車乗車中の死者数は増加傾向にあり、安全で快適な自転車通行空間の整備が喫緊の課題である。こうした背景から、自転車の安全対策や走行空間を検討するために、サイクリングシミュレータ (CS) が活用されはじめている。この走行特性を検証するため、実環境と同じシナリオをシミュレータで再現し、実環境と CS 環境の走行を比較する研究が多く実施されている。しかし、これらは直線経路の道路を対象とした実験が主であり、連続した旋回挙動を強いる複雑な走行環境における定置型 CS の走行特性までは十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、定置型 CS を用いて実際の自転車道を想定した直線型と曲線型の2種類のシケイン形状のシナリオを作成し、実環境の走行データと比較することで自転車の旋回性能を検証した。その結果、走行速度の有意差がないことや、曲線型のシケイン形状で CS 環境の走行位置の誤差が大きい傾向となることがわかった。

Abstract

A bicycle plays an important role in various applications in daily life, in which the number of deaths on the bicycle has shown an upward trend. It is, thus, urgently required to develop a safe and comfortable driving space for the bicycle. With this background, a cycling simulator (CS) is beginning to be used to investigate the safety measures and driving spaces. To examine the reproducibility of the CS, many studies have been conducted by simulating the real road environment to compare the riding in the real environment and the CS environment. However, these experiments are mainly conducted on straight roads. In this study, two types of chicane-shaped scenarios, a straight road type, and a curved road type, were prepared. Based on these scenarios, we compared the riding data of stationary CS and the real environment to verify the steering performance of the bicycle. As a result, it was found that there was no significant difference in riding speed between the real environment and the CS environment, and that the error of the position of the riding bicycle in the CS environment tended to be larger in curved chicanes.

1. はじめに

自転車は、通勤や買い物などの日常生活、サイクリングなどのレジャーのほか、コンパクトシティに向けたまちづくりを支える移動手段などとして重要な役割を担っている。国土交通省の調査^[1]によると、日本の自転車保有台数は増加傾向にあり、2013年時点で約7,200万台と自動車保有台数と同程度である。また、人口1人あたりの保有台数も欧米諸国と比較して高水準である。一方で、自転車乗車中の死者数を占める割合は増加傾向にあることが問題視されている。そのため、国土交通省と警察庁では、自転車通行空間の整備に関するガイドライン^[2]を作成するなど、各自治体への自転車ネットワーク計画の策定を推進している。しかし、この計画が策定済の自治体は、2020年3月末時点で人口集中地区を有する市区町村の約25%^[3]となっており、安全で快適な自転車通行空間の計画立案および整備が喫緊の課題といえる。

このような中、交通事故の状況を再現するなど現実で行うことが困難な事象を扱うため、サイクリングシミュレータ (以下、CS) が活用されはじめている。CSは、走行条件や路面環境などを設定し、一定の条件下で複数回繰り返す走行実験や事故の評価などが可能である。一方、自動車の分野においては、自動車教習所、大学や企業の研究などでドライビングシミュレータ (以下、DS) が利用される機会が多く、これまで小規模なものから大規模なものまで数多く開発されてきた。その種類として、ゲーム用コントローラを用いた「簡易型DS」、実車部品を使用した「据置型DS」、動揺装置を備えた「モーション

[研究論文]

2022年2月17日受付, 2022年8月4日改訂, 2022年9月17日受理

© 情報システム学会

付き DS」, 加速度を再現する移動レールを加えた「大型 DS」に分類される^[4]. これらに対して, CS では, スクリーンやヘッドマウントディスプレイ (HMD) 上に映像を投影し, 実物自転車の後輪をローラ台に固定して走行するシミュレータ (以下, 定置型 CS) が一般的に活用されている^[5,6]. また, 定置型 CS は自転車が自立し左右の傾きを考慮したハンドル調整などに課題があることから, Chen, C.-K. et al.^[7] によるピッチ角とロール角の 2 軸の制御や, Kwon, D.-S. et al.^[8] や He, Q. et al.^[9] による 6 軸の制御を行う動揺装置が開発されている. ただし, これらはデバイス開発が主な目的であるため, シミュレータ特性の検証が十分になされておらず, 実用まで至っている事例は少ない. そのため, 現状では定置型 CS を活用する事例が多く, その特性を検証する研究が多く実施されている.

スクリーンを用いた定置型 CS の特性に関する既存研究に着目すると, 溝口ら^[10]は, 大学構内の道路の走行実験より, 実環境と CS 環境の速度感覚と距離感覚の相違の程度を定量的に示している. しかし, CS の速度が指示速度よりも約 1.5 倍大きい結果であったことを課題として挙げている. また, Shoman, M. et al.^[11]は, SSQ や NASA-TLX などのアンケートにより利用者の主観的な作業負荷を評価しているが, 挙動把握までは行われていない.

一方, HMD を用いた既存研究に着目すると, 宮之上らは, 対面通行自転車道のすれ違い挙動^[12,13]や, 路上駐車車両の追い越し挙動^[14]における走行特性の検証を実施している. また, O' Hern, S. et al.^[15]は, 2 つの交差点を含む中距離道路を対象とし, 実走行と HMD 型 CS の走行特性の比較実験を実施している. 具体的には, 平均速度や平均移動距離などの 7 項目で検証を行い, 実走の速度が CS よりも約 1.3 倍大きかったことなどを示しているが, 複雑な走行状況下における包含的な特性評価を行うことを課題として挙げている.

このように, スクリーンや HMD を用いた定置型 CS を使用して, 実環境と CS 環境との走行を比較するなどして, シミュレータの走行特性の把握を試みた既存研究が多く存在する. しかし, これらは直線経路の道路を対象とした実験が主であり, 連続した旋回挙動を強いる複雑な走行環境における定置型 CS の走行特性までは十分に明らかにされていない.

そこで, 本研究では, 定置型 CS を用いて実際の自転車道を想定したシナリオを作成し, 実環境の走行データと比較することで自転車の旋回性能を検証することを目的とする. まず, 2 章にて日本の自転車道の現状を調査する. 次に, 3 章にて調査結果に基づいた実験の概要を記述し, 4 章にてその結果と考察を述べる. 最後に, 5 章にて本研究を総括する.

2. 日本の自転車道の整備状況と本研究の位置づけ

我が国の自転車交通に関しては, 1960 年に制定された道路交通法において, 自転車は車両と位置付けられ, 車道通行が原則とされた. しかし, 当時, ルールやマナーが確立されておらず, 交通事故件数が大きく増加した. そのため, 自転車の安全対策などを目的として 1970 年に道路交通法が改定され, 条件付きで自転車の歩道通行が初めて認められた. しかし, 歩道上での歩行者と自転車による事故が増加したことから, 1978 年に道路交通法改正により普通自転車という新たな規定が策定され, 普通自転車歩道通行可の道路標識がある歩道に限定して通行が可能となった. このように, 自転車の道路交通の位置づけが時代の変遷とともに変化している^[16,17].

一方, 自転車道に関しては, 1970 年, 道路交通法の改正とともに, 「自転車道の整備等に関する法律」が制定された. これは, 交通事故防止と交通円滑化を目的に, 自転車が安全に通行できる自転車道の整備などに関する必要な措置を定めたものである. これにより, 道路構造令が改正され, 自転車道に関する道路構造が規定された. そして, 1974 年には, 自転車道などの設計基準^[18]が定められた. これによると, 自転車道の曲線半径の最低長は一般の場合で 10m, 特別な事情によりやむを得ない場合に限り 3m 以上と定義されている. これに関して, 国土交通省国土技術政策総合研究所の研究^[19]によると, S 字曲線とシケイン形状の走行実験の結果から, 走行安全性を確保するためには, 曲線半径が既往基準の 3m, シケイン長がシフト幅の 2 倍以上を必要とすることを示唆している.

また, 国土交通省では, さらなる自転車道の通行の安全性を確保することを目的に, 2016 年に「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」^[2]を策定した. この中で, 自転車道の線形は, 幅員 2m 以上の場合でシフト比を 1:4 以上とすることを定めている.

以上を踏まえ, 本研究では, 日本の自転車走行空間を想定した自転車の旋回性能を検証するため, 既往の設計基準^[18]と現行のガイドライン^[2]に準拠したシナリオを設定する.

3. 実験概要

3.1. 実験環境

(1) 走行シナリオ

本実験では、実際の自転車道を想定して、図1に示す2種類の走行シナリオを作成した。

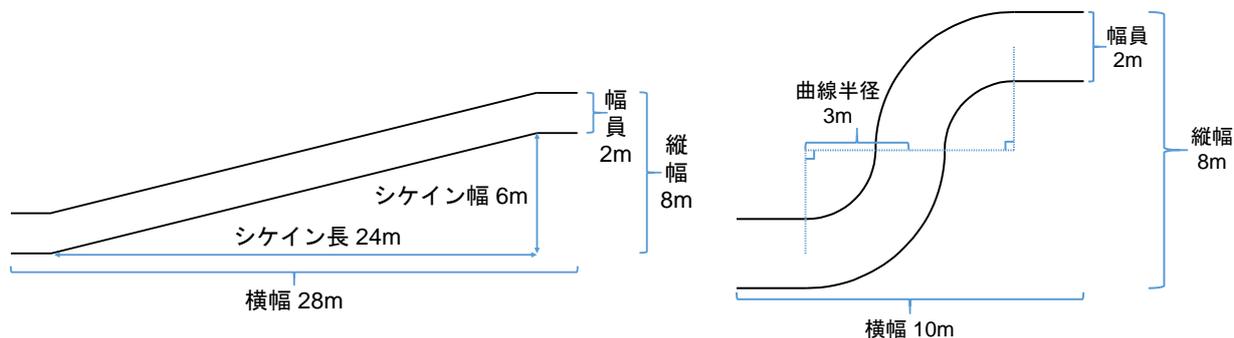


図1 走行シナリオ (左：直線型, 右：曲線型)

1つ目は、図1左に示すように、幅員2m、シケイン幅6m、シケイン長24mの直線で構成されたシケイン（以下、直線型）である。これは、国土交通省のガイドライン^[2]に準拠して走行シナリオを設定した。2つ目は、図1右に示すように、幅員2m、曲線半径3mの曲線で構成されたシケイン（以下、曲線型）である。これは、自転車道の既往の設計基準^[18]に基づいて、最も条件の厳しい走行経路を想定して設定した。

(2) 実走の実験環境

実走の実験で使用した機材を図2に示す。



図2 実環境の実験機器 (自転車, ドローン)

実走実験では、大学構内のグラウンドにおいて、白線でシケインのコースを作成し、図2左に示す自転車（タイヤ26インチ、変速機無し）にて走行した。また、自転車走行中、約45m上空から図2右に示すドローン（DJI社 Mavic2 Pro）による空撮を行い、地上画素寸法が約1cmの動画を撮影した。そして、撮影後に画像処理にて自転車の走行軌跡データを作成した。なお、画像処理で自転車の識別を容易にするため、自転車の前方の籠に33.5cm×40cm幅の青色の板を設置した。また、画像と実際の寸法と縮尺を合わせるために、グラウンドの走行経路を囲うように矩形を作成し、それらの四隅に画像上で判読可能なターゲットを設置した。

画像処理による走行軌跡データの処理の流れを図3に示す。

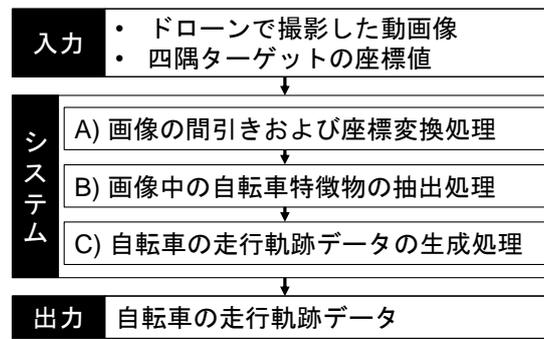


図3 画像処理による走行軌跡データの生成の流れ

まず、A) 画像の間引きおよび座標変換処理において、出力データの分解能を CS 環境と合わせて 10Hz とするために、ドローンで撮影した動画画のフレームの間引きを行う。なお、本研究では、1 秒あたり 30 コマのフレームレートで撮影したために、3 枚に 1 枚の間隔で画像を抽出した。また、四隅ターゲットの座標値を用いて、すべての画像に射影変換処理を行い、画像上の座標値を実際の寸法と縮尺を合わせる。次に、B) 画像中の自転車特徴物の抽出処理では、自転車に載せた青板を特徴物として、その中心の座標値を抽出する。具体的に、背景差分処理と HSV 色空間による青色領域の抽出処理を行う。前者は、自転車を走行する直前の自転車が存在しないタイミングの画像を背景画像とし、各フレーム画像との一定の輝度値の差分から自転車候補の画素を抽出する。後者は、HSV 色空間の HSV それぞれに閾値の範囲を設定し、自転車候補の画素から青色領域のみを抽出する。また、これらの画素はノイズが含まれるために、膨張収縮処理を行った後、ラベリング処理にて青色領域の中心位置を特定している。最後に、C) 自転車の走行軌跡データの生成処理では、B) で抽出したすべての座標値をまとめて、座標値、速度、走行距離、道路中心線 (2m の幅員中心) に対する横方向の誤差を算出し、CSV 形式で出力する。

なお、自転車特徴物 (青板) の抽出においては、日照の影響によって青板の一部に白飛びが発生し、特徴物の中心を捉えられない場合があった。この影響度合いを確認するため、本実験の走行データを用いて、直線型と曲線型で各 10 フレーム分の処理結果を対象に、青板の中心位置と処理結果の位置との横方向の誤差を算出した。その結果、平均値と標準偏差で $1.6 \pm 1.5\text{cm}$ であったため、cm 単位の誤差は許容範囲であると考えられる。

(3) CS の走行環境

CS 環境での走行実験では、実験機材として、図 4 に示すようにスクリーン型のシミュレータを使用する。

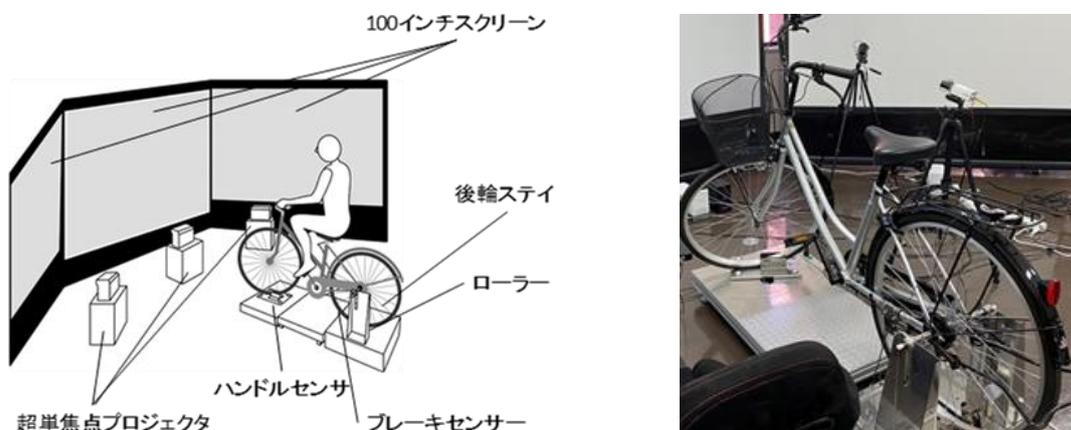


図4 CS 環境の概観図および使用した自転車

本シミュレータは、100 インチ (高さ 155 cm, 幅 220 cm) のスクリーン 3 面, 主計算機 1 台, 超単焦点プロジェクタ 3 台から構成される。また、ソフトウェアはフォーラムエイト社製の UC-win/Road

version14.2 を使用する。このソフトウェアを活用することで、様々な交通環境を想定した道路や走行シナリオが柔軟に作成可能である。そのため、直線型と曲線型それぞれのシケイン形状の作成は、すべてソフトウェア上で行った。なお、本シミュレータは、走行軌跡の座標値、速度、走行距離などを 10Hz でログ出力可能なため、本実験ではこのデータを使用した。なお、自転車（図 4 右）は実環境と同様のものを用いた。

(4) 被験者

本実験の被験者は、表 1 に示すように、20 代 10 名（男性 8 名、女性 2 名、年齢：21.9±2.73 歳、右目視力：1.13±0.24、左目視力：1.11±0.26）であった。なお、実験において、身長の違いによる影響を考慮するために、被験者ごとに適切な自転車のサドルの位置となるように調整を行った。

表 1 被験者の属性

No.	年齢	性別	視力			自転車 運転頻度
			眼鏡等	右目	左目	
A	21	男	無し	1.5	1.5	めったに乗らない
B	21	男	有り	1.0	1.2	めったに乗らない
C	21	男	無し	0.9	0.9	週 3, 4 回程度
D	24	男	有り	1.0	1.0	週 1, 2 回程度
E	20	女	有り	1.2	1.2	めったに乗らない
F	21	男	無し	1.2	0.8	週 3, 4 回程度
G	20	男	有り	1.0	1.0	月 1 回程度
H	21	男	有り	0.8	0.8	ほぼ毎日
I	21	男	無し	1.2	1.2	ほぼ毎日
J	29	女	無し	1.5	1.5	週 1, 2 回程度

3.2. 実験方法

(1) 実走の走行実験

実環境での走行実験では、2 種類のシケインに対して、一般的な自転車の走行速度を考慮して 10, 15km/h の 2 種類の速度を指定し、1 人あたり合計 4 パターンの走行を測定した。実験手順として、まず、自転車の速度感覚を掴むために、自転車にスピードメータを取り付け、指定速度による練習走行を行った。次に、十分に練習ができたことを判断した後、速度感覚を再確認するための直線の確認走行を行い、その後に本番走行を行った。なお、本番走行では、指示速度で評価区間を走行できるように、スタート地点までの助走区間を設けた。また、走行直前には、以下の教示を行った。

- ・ ゲーム感覚で運転するのではなく、実際の自転車を走行するように運転して下さい。
- ・ 出来るだけ白線の枠を出ないで走るよう心掛けて下さい。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 10, 15km/h でそれぞれ走行して下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

(2) CS の走行実験

CS 環境の走行実験においても、実環境と同条件で計 4 パターンの走行を測定した。実験手順として、まず、シミュレータの運転特性や速度感覚に慣れるために、スクリーン上に速度を表示した状態で、練習コースで十分な練習走行を行った。次に、直線の確認走行を行い、実環境と同じ教示を実施した後、本番走行を行った。

3.3. 評価方法

実環境と CS 環境のそれぞれ 40 走行分の走行軌跡データを集計して、走行特性の違いを評価する。ここで、DS の既存研究に着目すると、これまで多くの走行特性に関する検証が実施されている。Wynne, A. R. et al.^[20]は、シミュレータと実際の車両運転を比較した論文を対象に、1977 年から 2017 年の間に発

行された 44 件の原稿のレビューを行っている。これによると、「走行速度」が最も一般的な指標であり、44 件中 21 件で報告されている。また、それ以外の代表的な指標として、「走行位置」が 11 件、「車線変更の動作」が 5 件、「全体的な運転性能」が 10 件で評価されている。これらの中で、本研究では、自転車の旋回性能の検証に関連する項目として、「走行速度」と「走行位置」の 2 項目を対象とする。

走行速度の評価に関しては、上述の 21 件中 19 件において、シミュレータと実走の平均速度を用いた評価が実施されている。これを参考に、本研究では、直線型と曲線型それぞれの各走行の平均速度と標準偏差を算出し、実走と CS との間に有意差があるかを確認する。なお、走行速度の算出方法として、10Hz で出力した走行軌跡データの各座標間の距離をもとに、各座標間における走行速度を算出し、それらの平均値と標準偏差を使用した。

走行位置の評価に関しては、上述の 11 件すべてにおいて、横方向の位置関係を比較している。一方、本研究は湾曲部を含むコースであるため、自転車の進行方向に対する垂直な方向を横方向と定義し、幅員 2m の中間である道路中心のラインを基準に、そのラインから自転車位置までの最短距離を算出した。このとき、自転車位置は 10Hz で測定した自転車の走行軌跡データを使用し、図 1 に示す各走行シナリオの開始地点から終了地点までの全観測点を対象とした。また、連続的な旋回挙動における走行位置の変化を検証するため、自転車の走行軌跡データを用いた評価も実施する。その手順として、まず、走行軌跡データと幅員 2m の走行コースをグラフ上にプロットする。次に、幅員範囲内から超過するケース（以下、逸脱）を目視で確認する。そして、その逸脱中の走行時間（以下、逸脱時間）から、走行時間に対する逸脱時間の割合（以下、逸脱率）を算出する。これにより、走行シナリオのコース上を逸脱せずに走行が可能であることを検証する。

4. 実験結果と考察

4.1. 走行速度

直線型と曲線型のシケインごとに、走行速度の平均値と標準偏差の結果を図 5 に示す。

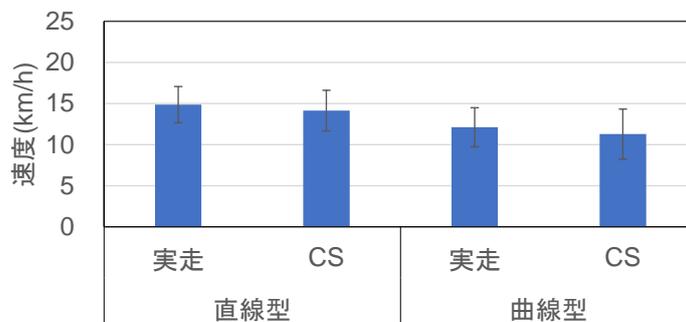


図 5 走行速度（平均値±SD）

まず、直線型に着目すると、実走が $14.9 \pm 2.2 \text{ km/h}$ 、CS が $14.1 \pm 2.5 \text{ km/h}$ であり、実走が CS に比べて平均値で約 1.06 倍大きいですが、実走と CS の間に有意差はみられなかった ($t(19)=1.55, p=0.14$)。次に、曲線型に着目すると、実走が $12.1 \pm 2.4 \text{ km/h}$ 、CS が $11.3 \pm 3.1 \text{ km/h}$ であり、実走が CS に比べて平均値で約 1.07 倍大きいですが、同様に実走と CS の間に有意差はみられなかった ($t(19)=1.18, p=0.25$)。

既存研究において、溝口ら[10]は、大学構内の道路を対象に、被験者 5 名で指示速度を変えて 3 回ずつ走行し、CS の速度が指示速度よりも平均で約 1.5 倍大きかったことを報告している。また、O' Hern, S. et al.[15]は、約 4km のシナリオを対象に被験者 26 名の走行実験を行い、実走の速度が CS よりも約 1.3 倍大きかったことを示している。これらと比較すると、本研究では、直線型と曲線型の両方において実走と CS の間の差が 1.1 倍未満であり、有意差もみられなかったことから、急な旋回挙動を強いる自転車走行空間においても実環境と同等程度の速度で CS 上の走行が可能になったことがわかった。

4.2. 走行位置の横方向の誤差

直線型と曲線型のシケインごとに、道路中心線に対する走行位置の横方向の誤差の平均値と標準偏差の結果を図 6 に示す。

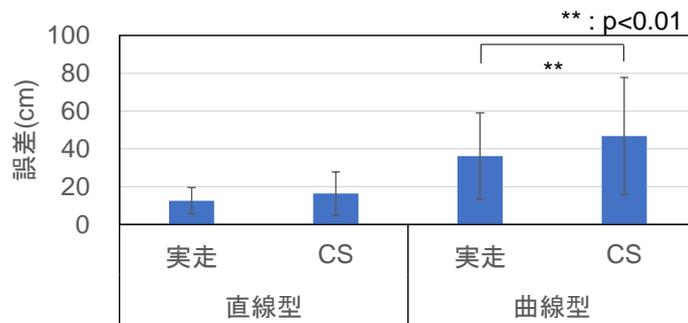


図6 走行位置 (平均値±SD)

まず、直線型に着目すると、実走が $12.6 \pm 7.0\text{cm}$ 、CSが $16.4 \pm 11.5\text{cm}$ であり、実走とCSの間で平均値の誤差が約 3.8cm であったが、有意差はみられなかった ($t(19)=1.72, p=0.10$)。次に、曲線型に着目すると、実走が $36.2 \pm 22.9\text{cm}$ 、CSが $46.8 \pm 31.0\text{cm}$ であり、CSの誤差が実走よりも約 10.6cm 大きい結果となった ($t(19)=3.18, p<0.01$)。なお、既存研究において、O’Hern, S. et al.^[15]は、直線主体のシナリオの実験を行い、実走が $72.8 \pm 11.7\text{cm}$ 、CSが $73.2 \pm 10.0\text{cm}$ の結果となり、それぞれの誤差が約 0.4cm であったことを示している。

以上を踏まえて、曲線型のように連続した旋回挙動を強いる複雑な自転車走行において、実環境に比べてCS環境の走行位置の誤差が大きくなる傾向にあることがわかった。

4.3. 幅員からの逸脱率

本実験の直線型と曲線型それぞれの走行軌跡のプロット結果を表2と表3に示す。

表2 直線型の走行軌跡データのプロット結果

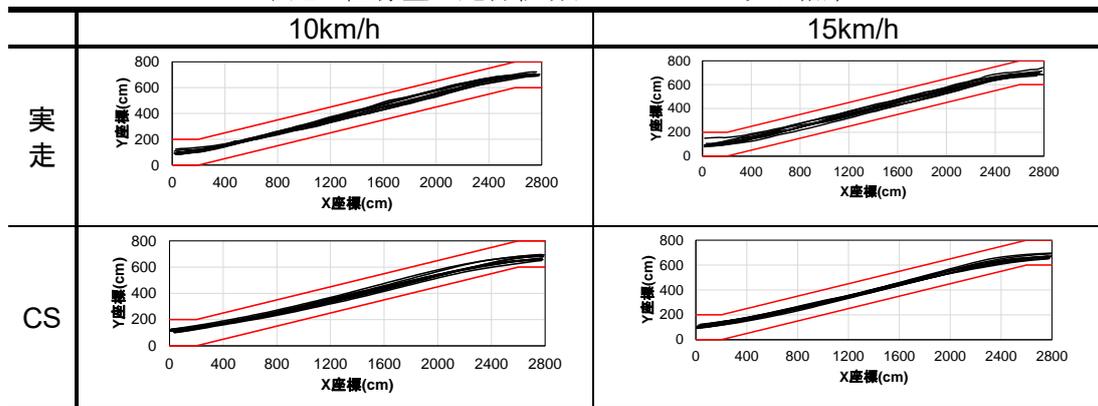
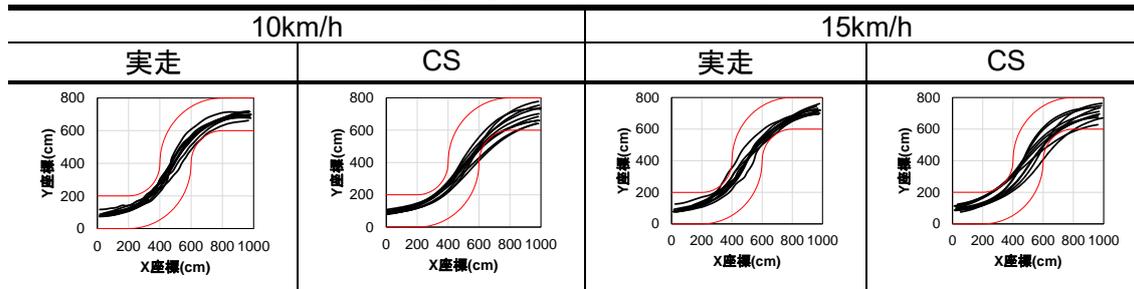


表3 曲線型の走行軌跡データのプロット結果



ここで、黒線は走行軌跡データ、赤線は走行経路の外枠を示しており、左から右方向に向けて走行している。表2の直線型に着目すると、すべての走行において幅員の範囲内で走行できている。また、速度間における軌跡の傾向の違いも特にみられない。一方、表3の曲線型に着目すると、実走よりもCSのほうが軌跡のばらつきが大きい傾向にある。具体的に、曲線型で幅員範囲内から逸脱のあった走行を確認した結果、実走が20走行中1走行、CSが20走行中10走行で確認された。これらの傾向として、

最初のカーブで十分に曲がることができず、次のカーブで内側へ走行経路が逸れるケースが散見された。すべての走行時間の内、逸脱の発生時間から逸脱率を算出した結果を表4に示す。

表4 幅員範囲内からの逸脱発生率

走行シナリオ	指定速度 km/h	実走			CS		
		走行時間(秒)	逸脱時間(秒)	逸脱率	走行時間(秒)	逸脱時間(秒)	逸脱率
曲線	10	38.9	0.0	0.0%	50.9	4.1	8.1%
曲線	15	31.7	0.4	1.3%	29.7	2.2	7.4%

この結果より、実走では約 0.0~1.3%の逸脱率に対し、CS では約 7.4~8.1%で逸脱が発生している。よって、連続した急カーブ区間においては、CS 環境は実環境に比べて旋回性能に影響が出ており、実環境の走行感覚と相違が発生した可能性が示唆される。

5. おわりに

本研究では、定置型 CS を用いて複雑な走行環境における旋回性能を検証するために、直線型と曲線型の 2 種類のシケイン形状の走行シナリオを作成し、CS 環境と実環境の比較実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 直線型と曲線型の両方において、実走と CS の間で走行速度に有意差がなく、実環境と同等程度の速度で CS 上の走行が可能と示唆される。
- ・ 曲線型のように連続した旋回挙動を強いる複雑な自転車走行において、実環境に比べて CS 環境の走行位置の誤差が大きくなる傾向にある。
- ・ 曲線型の CS 環境の走行において、走行シナリオの幅員からの逸脱率が高かったことから、連続した急カーブ区間において実環境の走行感覚と相違が発生した可能性がある。

以上のことから、自転車道の現行のガイドラインに基づいた直線型においては、走行速度と走行位置ともに実環境と CS 環境の誤差が小さく、既存研究の数値と比較しても許容範囲内の誤差であると考えられる。一方、既往の設計基準で最も条件の厳しい走行経路である曲線型においては、実環境に比べて CS 環境の走行位置の誤差が大きい結果となった。その要因として、実際の自転車では、重心移動により車体が左右に傾いて曲がるのが可能であるが、定置型 CS ではハンドル操作のみで左右の移動を行うため、走行感覚に相違があったことが示唆される。よって、曲線型のように急な旋回を強いる場面で走行再現性を向上させるためには、車体の後輪部分にバネを取付け、自転車の車体を傾ける機構に改良するなどの対策が不可欠と考えられる。また、本研究では、20 代学生の 10 名の被験者にて実験を実施したが、自転車は子供から高齢者まで幅広く利用されるため、運転頻度や年齢層などの被験者属性や車種の違いによる影響を検証する必要がある。さらに、本研究では走行軌跡データに基づいた分析を実施したが、旋回挙動ではハンドルの操作性の評価も重要と考えられるため、加速度・ジャイロセンサによる評価の可能性を模索する必要がある。これらに加えて、近年、よりリアルなシミュレーションを体験できる技術として HMD 型のシミュレータが注目されている。これと従来のスクリーン型とを用途に応じて使い分けることも必要と考えられるため、これらの比較実験による走行特性も明らかにしていきたい。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省新道路技術会議および JSPS 科学研究費 補助金 (科研費) 20K19940 の助成を受けたものである。また、本研究の遂行にあたり、徳島大学の山中英生教授、大阪市立大学の吉田長裕准教授より貴重なご意見を賜った。さらに、走行実験の実施、データ収集に際しては、文教大学情報学部 (当時) の MORALES ARENAS ANGEL 氏に多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 国土交通省, “平成 26 年度政策レビュー結果 (評価書) 自転車交通”, <https://www.mlit.go.jp/common/001259529.pdf>, (2022-02-13 アクセス).
- [2] 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”, 2016.
- [3] 国土交通省, “自転車利用環境の整備”, <https://www.mlit.go.jp/road/road/bicycle>, (2022-02-13 アクセス).
- [4] 玄葉誠, 原口哲之理, 青木宏文, 田中貴紘, “大型 5 面立体視ドライビングシミュレータによる人間

- 自動車系の研究 (第 1 報) —シミュレータ構築と効果検証—”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3, pp.783-788, 2016.
- [5] Shoman, M. and Imine, H., “Subjective Validity of Bicycle Simulators”, *VEHICULAR 2020*, pp.72-77, 2020.
- [6] Jashami, H., Cobb, D., Hurwitz, S. D., McCormack, E., Goodchild, A. and Sheth, M., “The Impact of Commercial Parking Utilization on Cyclist Behavior in Urban Environments”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.74, pp.67-80, 2020.
- [7] Chen, C.-K., Chen, F.-J., Huang, J.-T. and Huang C.-J., “Study of Interactive Bike Simulator in Application of Virtual Reality”, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol.28, No.6, pp.633-640,
- [8] Kwon, D.-S., Yang, G.-H, Lee, C.-W., Shin, J.-C., Park, Y., Jung, B., Lee, Y. D., Lee, K., Han, S.-H., Yoo, B.-H., Wahn, K.-Y. and Ahn, J.-H., “KAIST interactive bicycle simulator”, *Proc., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.3, pp.2313-2318, 2001.
- [9] He, Q., Fan, X. and Ma, D., “Full Bicycle Dynamic Model for Interactive Bicycle Simulator”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.5, No.4, pp.373-380, 2005.
- [10] 溝口諒, 山中英生, “広視野型自転車シミュレータの実環境再現性に関する分析”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I_737-I_742, 2015.
- [11] Shoman, M. and Imine, H., “Subjective Validity of Bicycle Simulators”, *VEHICULAR 2020*, pp.72-77, 2020.
- [12] 宮之上慶, 鈴木美緒, 高川剛, 細谷奎介, 屋井鉄雄, “自転車シミュレータを用いた対面通行自転車道におけるすれ違い挙動特性分析及び再現性検証”, 土木学論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I_589-I_604, 2015.
- [13] 宮之上慶, 鈴木美緒, 屋井鉄雄, “自転車シミュレータにおけるハンドル操作及び走行速度の再現性検討”, 人間工学, Vol.52, No.2, pp.81-87, 2016.
- [14] 宮之上慶, 鈴木美緒, 細谷奎介, 屋井鉄雄, “自転車シミュレータを用いた路上駐車車両の追い越し挙動分析及び再現性検証”, 交通工学論文集, Vol.2, No.4, pp.A_1-A_8, 2016.
- [15] O’Hern, S., Oxley, J. and Stevenson, M., “Validation of a bicycle simulator for road safety research”, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.100, pp.53-58, 2017.
- [16] 元田良孝, 宇佐美誠史, “わが国における自転車道整備に関する歴史的考察”, 土木計画学講演集, No.38, 2008.
- [17] 尾野薫, 山中英生, 中西雄大, “自転車の道路通行システムの変遷”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_859-I_869, 2018.
- [18] 国土交通省, 自転車道等の設計基準について, <https://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/19741129jite-nnsyadou.pdf>, (2022-02-13 アクセス).
- [19] 小金知史, 金子正洋, 蓑島治: 自転車の走行特性に関する実験的調査, 第 28 回日本道路会議, 2009.
- [20] Wynne, A. R., Beanland, V. and Salmon, M. P., “Systematic review of driving simulator validation studies”, *Safety Science*, Vol.117, pp.138-151, 2019.

著者略歴

櫻井 淳 (さくらい じゅん)

2018 年関西大学大学院総合情報学研究科博士課程修了。青山学院大学附置情報メディアセンターの助手を経て、2019 年より文教大学情報学部講師。情報システム開発, 知識情報処理, コンピュータビジョンに関する研究に従事。土木学会, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 情報システム学会, ヒューマンインタフェース学会会員。博士 (情報学)。

三宅 智也 (みやけ ともや)

2022 年文教大学情報学部卒業。同年 (株) 日本総研情報サービス入社。在学中, 自転車交通安全に関する研究に従事。

松本 修一 (まつもと しゅういち)

2003 年慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程修了。2004 年より高知工科大学助手, 助教, 慶應義塾大学専任講師を経て, 2014 年より文教大学情報学部准教授。高度道路交通システム (ITS) に関するシミュレーション実験に関する研究に従事。土木学会, 交通工学研究会, 自動車技術会, ヒューマンインタフェース学会会員。博士 (工学)。