

夜間における路上駐車車両に対するサイクリングシミュレータの 追越し挙動特性

松本 修一*¹ 百目鬼智輝*¹ 櫻井 淳*¹

1正会員 文教大学准教授 情報学部 情報社会学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

E-mail: shuichi@bunkyo.ac.jp

2非会員 元文教大学 情報学部 情報社会学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

3正会員 文教大学専任講師 情報学部 情報システム学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

サイクリングシミュレータの再現性や走行特性に関する研究は、昼間の交通環境に関するものが主であり、夜間における CS の走行の特徴に関する走行特性に関しては明らかにされていない。そこで本研究では、夜間における CS の走行特性および知覚特性を把握するため、実走行と CS での走行挙動データおよび距離感、操作感等の知覚データを比較した。その結果、路上駐車車両を追越す際の自転車の走行速度に関しては統計的に有意な差がみられないが、路上駐車車両を追越す際の離隔距離に関しては、実走では距離を過大評価する傾向が、CS では過小評価をする傾向がみられた。

Keywords : Cycling Simulator, Bicycle Passing distance, Night-time, Performance Analysis

1. はじめに

日本では他の先進国と比べ自転車の交通事故における事故死者の割合が極めて高い状況である (図-1)¹⁾。この中で、特に夜間の自転車での交通事故における重大事故の割合は全体の 40%弱を占め自転車の交通量との兼ね合いを考えると非常に大きく、今後の自転車の交通安全を考えていく上で重要な課題の 1 つである²⁾。

このような中、自転車の安全性に関しては、錯綜リスクの路上観測や事故統計データから自転車の交通事故の発生状況に関する分析^{3) 4)}やドライブレコーダデータなどをもとにした自動車での実態調査⁵⁾、プローブ自転車などを用いた自動車の追越し挙動や離隔距離などの実走行調査^{6) 7)}など多くの試みがなされてきた。また、近年では、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、ドライビングシミュレータ (以下「DS」と記す) の技術を応用したサイクリングシミュレータ (以下「CS」と記す) を用いた研究^{8) 9)}などが行われるようになった。シミュレーションは走行条件や路面環境を設定し、一定の条件での繰り返しや事故の再現なども可能であり、実走行に比べて安全面とコスト面で

優れている。Lauer¹⁰⁾によると DS に関しては、1930 年代にはじめて開発されたとされている。シミュレータを用いた研究を行うにあたり、実際の走行環境とシミュレーション環境での走行挙動や感覚の違いがあることが多くの指摘されており、その特徴把握や走行再現性の検証に関する研究がなされてきた¹¹⁾。

その一方で、CS に関しては、DS に比べ歴史が浅く、研究事例が少ないことが指摘されている¹²⁾。CS に関しては、スクリーンやヘッドマウントディスプレイ (HMD)

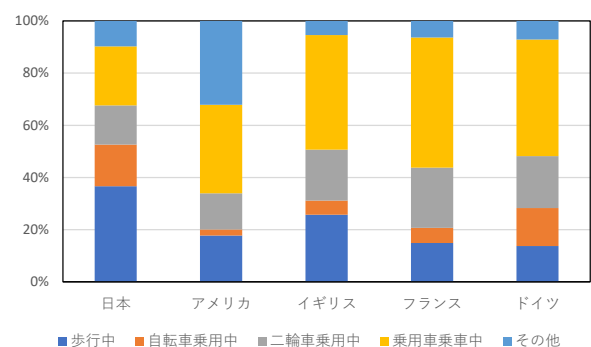


図-1 事故死者数の国際比較 (2019年)

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が多く活用されている^{13),14)}。このタイプの CS では、自転車の左右の傾きを考慮できないため点が課題として挙げられる。ことから、Chen, C.-K. et al.¹⁵⁾はピッチ角とロール角の 2 軸の制御、Kwon, D.-S. et al.¹⁶⁾や He, Q. et al.¹⁷⁾は 6 軸の制御を行う動揺装置を、Bruzelius F ら¹⁸⁾は”motion platform with 8 degrees of freedom and a 180-degree projection screen”を付与した CS を開発した。

CS の妥当性に関する研究に着目すると、Shoman, M. et al.^{19),20)}は、SSQ や NASA-TLX などのアンケートを用いて利用者の主観的な作業負荷を評価している。また、Horne D らの研究では²¹⁾、CS と自転車のサイクルコンピュータでのデータ算出方法により、CS と実際の自転車での速度の違いを指摘しており、CS の走行速度の妥当性を向上させる方法を提案している。O’Hern, S. et al.²²⁾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、開発したシミュレータのパフォーマンスが良好であったことを示していた。このように、スクリーンや HMD を用いた 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再現性を試みた既存研究が行われてきた。

しかし、これらでは、昼間の交通環境に関するものであり、夜間における CS の走行の特徴に関する走行特性に関しては明らかにされていない。そこで本研究では、夜間における CS の走行特性および知覚特性を把握するため、実走行と CS での走行挙動データおよび距離感、操作感等の知覚データを比較する。

2. 実験概要

(1) 実験環境

CS 実験では、文教大学松本研究室が所有している CS を活用した(図-2 参照)。このシステムは、筐体、自転車、ヘッドマウントディスプレイ(以下「HMD」と記す)、主計算機、スピーカー、速度センサ、角速度センサ等から構成される。自転車からセンシングされたブレーキ、ハンドル、車輪の回転数、走行距離等の情報がリアルタイムに主計算機に伝達され、それに応じて株式会社フォーラムエイト製の UC-win/Road version13.1 で生成された CG の走行環境が変化する。また、実験データとして自転車のブレーキ、速度、ハンドル操舵角、走行距離等が算出した。実走実験では、図-3 に示すプローブ自転車を活用し、速度メータから自転車の速度を、超音波センサから自動車との離隔距離を出力した。

実験シナリオは、実走、CS とともに路上駐車車両の後方 20m から自転車の走行を開始し、自動車の右側方である



図-2 CS の概観図



図-3 プローブ自転車

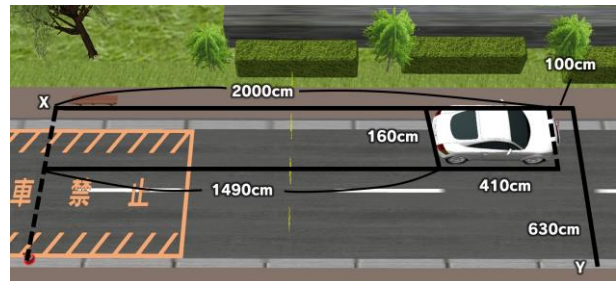


図-4 実験シナリオの外観

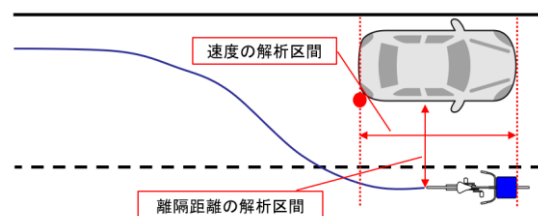


図-5 評価区間の概略図

410cm をデータ収集区間とした(図-5 参照)。Waller の研究²³⁾では、VR 環境下では現実空間と比較して、距離を過少推計されることが報告されている。被験者には後述する教示の他に自転車および CS の走行性能を比較するため、Black A.A²⁴⁾の夜間における自転車を自動車が追越す実験を参考に、路上駐車車両の側方 1m を目安に追越す

よう指示を行った。なお、被験者は 19～22 歳までの大学生（男性 14 名、女性 6 名）である。

実験時の自動車の外観を図-4 に示す。シミュレータの妥当性に関する研究では、CS に関しては、O' Hern, S. et al.²²⁾の研究が有名であるが、DS と比べ非常に少ない。DS に関する研究事例に関しては、Wynne, A. R. et al.¹¹⁾が、DS 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 件の論文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 件で報告されており、19 件が平均速度を使用していると指摘している。また、速度以外の指標として、「走行位置」が 11 件、「全体的な運転性能」が 10 件であると述べている。次に、Schneider and Bengler²⁵⁾によって、VR 環境下での歩行者行動に関するレビュー論文において、87 件の論文を調査した結果、VR 環境と実世界の挙動の整合性に関して、26 件がアンケートやインタビューを活用していることが報告されている。

本研究では、これらの結果を踏まえ、自転車の挙動に関しては、「走行速度」と「走行位置」の 2 項目を実走および CS の比較項目とした。また、被験者の主観評価として、難易度および危険感に関して 4 件法でアンケートを行った。また、1m の距離を置く走行に関する主観評価として、1 走行毎に追越し時の距離感に関して、「1m 以下」「1m 程度」「1m 以上」の 3 つの中から 1 つを選択してもらった。

実験では、実走、CS ともに自動車がハザードランプの点灯の有無の 2 条件で走行を行った。実験走行の順番は、順序効果を加味し、ランダムに行った。被験者は各条件を 1 回ずつ走行した。実験時の自動車の外観を図-6～9 に示す。本研究では、Open GL を用いて、グローバル環境光、月光に関しては、Phong 反射モデル²⁶⁾を用いた。但し、ブレーキランプに関しては赤、ハザードランプに関しては黄色を画面に描画した。VR 環境下での夜間の設定に関しては、描画機能の技術革新等も踏まえ、その妥当性の向上に関する検討を行う必要がある点は今後の留意事項である。

(2) 実験方法

実験開始前にインフォームドコンセントとして、1) 実験により生じる実験参加者への不利益、2) プライバシーへの配慮、3) 実験に参加しない自由の確保等に関して十分な説明を行い、実験に参加することの同意を得た。実験に際しては、CS、実走共に被験者が十分操作に慣れたと感じるまで練習走行を行った後、データ収集を行った。実走、CS ともに被験者には以下のような教示を行った後、走行を行った。

- ・実際の自転車を走行するように運転してください。
- ・安全運転を心掛けて下さい。



図-6 実走行（ハザードランプ無）



図-7 実走行（ハザードランプ有）



図-8 CS 走行（ハザードランプ無）



図-9 CS 走行（ハザードランプ有）

- ・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。
- ・時速 12km/h で走行するように心掛けて下さい。
- ・追いつく際は、1m 程度自動車から距離をとるように心掛けて下さい。
- ・「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

3. 実験結果

(1) 自転車挙動

自動車を追越す際のハザードランプの有無での実走、CS の速度、離隔距離の平均値を図-10, 11 に示す。二元配置の被験者内分散分析の結果、平均速度に関しては走行条件、ハザードランプの有無において統計的に有意な差がなかった。離隔距離に関しては、ハザードランプの主効果に関しては、有意な差がみられなかったが、走行条件に関する主効果には統計的に有意な差がみられた ($F(1,76)=11.9, p<0.001$)。また、Scheffe の多重比較を行った結果、ハザードランプの無い実走とハザードランプの有る CS 走行で有意な差がみられた。

(2) 離隔距離に関する主観評価

次に、離隔距離の距離感に関する主観評価と実際の離隔距離の関係を表-1, 2 に示す。この表は、Black の研究を参考に 0.9m 以下の走行を「1m 以下」、0.9m~1.1m の走行を「1m 程度」、1.1m 以上の走行を「1m 以上」と区分し、実際の離隔距離の走行回数の割合を行、主観評価の割合を列に分類した表である。

実走では主観評価と離隔距離の関係が一致した走行の割合、主観評価が離隔距離より大きくなった走行の割合、主観評価が離隔距離より小さくなった走行の割合がそれぞれ 30.0%、45.0%、25.0% となった。その一方で、CS では主観評価と離隔距離の関係が一致した走行の割合、主観評価が離隔距離より大きくなった走行の割合、主観評価が離隔距離より小さくなった走行の割合がそれぞれ 30.0%、20.0%、50.0% という結果になった。このことから実走では路上駐車車両を追越す際の離隔距離を過大評価する傾向が、CS では過小評価をする傾向がみられた。

4. まとめ

シミュレーションにおける妥当性に関する研究においては、主に DS における研究の蓄積が多く、CS に関する研究事例は多いとは言えない。

本研究では、夜間における CS の走行特性の把握のため、自転車の路上駐車車両に対する追越し挙動に限定して、自転車の走行挙動および距離感に関する意識ギャップに関して実走と CS における比較実験を行った。走行挙動に関しては、平均速度においては、統計的に有意な差がみられなかった。また、1m 程度の距離を空けて追越すよう教示を行ったが、CS 環境下では距離を空ける傾向がみられた。

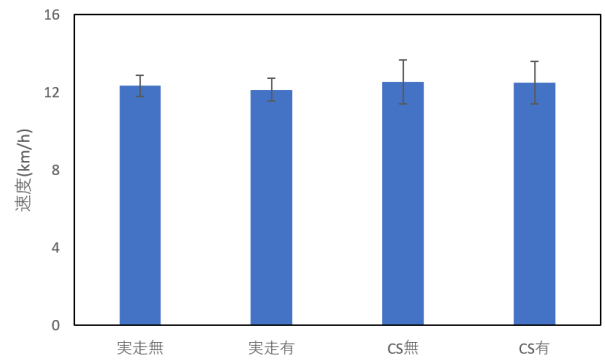


図-10 平均速度の比較

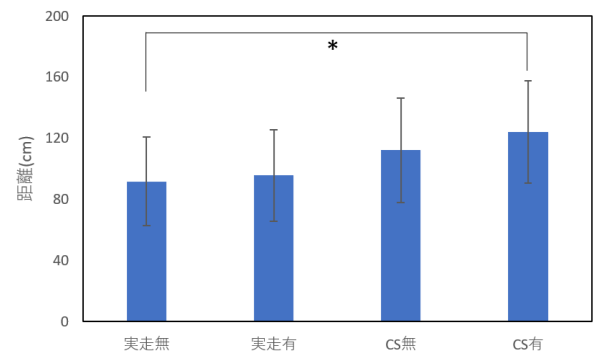


図-11 離隔距離の比較

表-1 実走における離隔距離に関する主観評価と離隔距離の関係

| | 自己評価 | | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | 1m以下(<0.9m) | 1m程度(0.9-1.1m) | 1m以上(>1.1m) |
| 結果 | 5.0 | 35.0 | 7.5 |
| 1m以下(<0.9m) | 2.5 | 17.5 | 2.5 |
| 1m程度(0.9-1.1m) | 0.0 | 22.5 | 7.5 |

表-2 CS における離隔距離に関する主観評価と離隔距離の関係

| | 自己評価 | | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | 1m以下(<0.9m) | 1m程度(0.9-1.1m) | 1m以上(>1.1m) |
| 結果 | 5.0 | 12.5 | 0.0 |
| 1m以下(<0.9m) | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| 1m程度(0.9-1.1m) | 10.0 | 32.5 | 17.5 |

O'Hern らの研究では、HMD タイプの CS において、実走と CS での平均速度に関しは、CS と比べ実走の方が速くなるとの結果が得られていることが知られている。本研究では、走行速度を 12km/h と指示したため CS、実走共に誤差が少ない結果になった。実走と CS 環境下での速度に関する誤差に関しては、事前の練習走行での習熟等で誤差がなくなる可能性を示唆することが出来たと考えられる。今後は、速度を指定しない環境下での比較実験等を行い、本研究結果の妥当性を精査していく必要がある点は、留意すべきである。

離隔距離に関しては、走行条件に関する主効果で有意な差が出たので、夜間の環境下では CS の方が実走より

大きな距離をとる傾向があるという結果になった。REBEKKAS らの文献調査²⁷⁾では、VR 環境下の主観的な距離感 (egocentric distance) が現実の距離より 74%程度に過少推計される指摘しており、その要因として Technical Factor、human Factor、Compositional Factor が VR 下での距離知覚に影響を与えると述べている。本研究で得られた結果に関して、その詳細な要因に関しては、今後精査する必要があるが、距離知覚が VR 下で短くなる傾向に関しては、既存の研究と合致していると考えられる。

次に、夜間において 1m の距離を空けて自転車を追越す研究事例では、過少推計する傾向があったが、自転車での走行実験では、過大推計する結果になった。この原因に関しては、今後離隔距離を変更すること、今回の実験とは異なる環境や自動車と自転車との比較等を行うことで、CS や自転車での距離知覚に関する含蓄を増やしていく予定である。

謝辞

本研究は国土交通省新道路技術会議「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 (研究代表者: 吉田長裕)」の研究費で実施された。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- International Road Traffic and Accident Database https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IRTAD_CASUAL_BY_AGE (2022 年 3 月 30 日アクセス)
- Cabinet Office "Situation of Road Traffic Accidents and Current State of Traffic Safety Measures", p8, 2019.
- Knut Veisten, Kjartan Sælensminde, Kari Alvær, Torkel Bjørnskau, Rune Elvik, Trude Schistad, Børge Ytterstad, "Total costs of bicycle injuries in Norway: Correcting injury figures and indicating data needs", Accident Analysis & Prevention, Vol.39, pp.1162-1169, 2007.
- Shanley Chong, Roslyn Poulos, Jake Olivier, Wendy L. Watson, Raphael Grzebieta, "Relative injury severity among vulnerable non-motorised road users: Comparative analysis of injury arising from bicycle-motor vehicle and bicycle-pedestrian collisions", Accident Analysis & Prevention, Vol.42, pp290-29, 2010.
- HAYAKAWA Kosei, KONDO Yuma, MIZUNO Koji, ITO Daisuke, THOMSON Robert, PICCININI Giulio, HOSOKAWA Naruyuki, "Comparison of Real Accident and Near Miss Incident of Cyclist Collisions based on Drive Recorder", Proceedings of the 2017 JSAE Annual Congress, CD-ROM, 2017.
- Ben Beck, Monica Perkins, Jake Olivier, Derek Chong, Marilyn Johnson, "Subjective experiences of bicyclists being passed by motor vehicles: The relationship to motor vehicle passing distance" Accident Analysis & Prevention, Vol.155, pp.1-6, 2021.
- Marco Dozza, Ron Schindler, Giulio Bianchi-Piccinini, Johan Karlsson, "How do drivers overtake cyclists?", Accident Analysis and Prevention, Vol.88, pp.29-36, 2016.
- Carlos Llorca, Antonio Angel-Domenech, Fernando Agustin-Gomez, Alfredo Garcia, "Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance", Safety Science, Vol.92, pp.302-310, 2017.
- Hisham Jashami, Douglas Cobb, David S. Hurwitz, Edward McCormack, Anne Goodchild, Manali Sheth, "The Impact of Commercial Parking Utilization on Cyclist Behavior in Urban Environments", Transportation Research Part F, Vol.74, pp.67-80, 2020.
- Masoud Ghodrati Abadia, David S. Hurwitz, Manali Sheth, Edward McCormack, Anne Goodchild, "Factors impacting bicyclist lateral position and velocity in proximity to commercial vehicle loading zones: Application of a bicycling simulator", Accident Analysis and Prevention, Vol.125, pp.29-39, 2019.
- Lauer, A.R., The Psychology of Driving: Factors of Traffic Enforcement. Springfield: C. C. Thomas, p13, 1960.
- Rachael A. Wynne, Vanessa Beanland, Paul M Salmon, "Systematic review of driving simulator validation studies", Safety Science, Vol.117, pp.138-151, 2019.
- 例えば Daniela Ullmann Daniela, Julian Kreimeier, Timo Götzelmann, Kipke Harald Kipke, "BikeVR a virtual reality bicycle simulator towards sustainable urban space and traffic planning", Proceedings of the Conference on Mensch und Computer, pp.511-514, 2020.
- Shoman, M. and Imine, H., "Subjective Validity of Bicycle Simulators", VEHICULAR 2020, pp.72-77, 2020.
- 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.
- 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,
- 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., Wohn, K.-Y. and Ahn, J.-H., "KAIST interactive bicycle simulator", Proc., IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp.2313-2318, 2001.
- 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.
- Fredrik Bruzelius, Bruno Augusto "CykelSim: development and demonstration of an advanced bicycle simulator" 2018.
- Shoman, M. and Imine, H., "Bicycle Simulator Improvement and Validation", IEEE Access, Vol.9 pp.55063-55076, 2021.
- MURAD M. SHOMAN AND HOCINE IMINE, "Bicycle Simulator Improvement and Validation", IEEE Access, Vol.9, pp. 55063 – 55076, 2021.
- Horne D, Abadi G M, Hurwitz S D, "Bicycle Simulator Calibration: Proposed Framework", Transportation Research Record, 2019.
- 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.
- 24) Waller, D., & Richardson, A. R. , "Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: Effects of task and available sensory information.", *Journal of Experimental Psychology*, Vol.14, No.1, pp.61-72, 2008.
 - 25) Alex A.Black, Rebecca Duff, Madeline Hutchinson, Ingrid Ng, Kirby Phillips, Katelyn Rose, Abby Ussher, Joanne M.Wood, "Effects of night-time bicycling visibility aids on vehicle passing distance", *Accident Analysis & Prevention*, Vol.144, 2020.
 - 26) Sonja Schneider, Klaus Bengler, "Virtually the same? Analysing pedestrian behaviour by means of virtual reality", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.68, pp.231-256, 2020.
 - 27) Richard Szeliski, "Computer Vision: Algorithms and Applications", pp.58-59, 2010.
 - 28) REBEKKA S. RENNER, BORIS M. VELICHKOVSKY, JENS R. HELMERT, "The Perception of Egocentric Distances in Virtual Environments - A Review" *ACM Computing Surveys*, Vol.45, No.23, pp.1-40, 2013.