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

宮之上 慶¹・鈴木 美緒²・高川 剛³・細谷 奎介⁴・屋井 鉄雄⁵

¹学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)
E-mail: miyanoue.k.aa@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学大学院助教 総合理工学研究科人間環境システム専攻 (同上)
E-mail: mios@enveng.titech.ac.jp

³非会員 シミュレーション・リサーチ・ラボ株式会社 (〒 107-0051 東京都港区元赤坂 1-7-10)
E-mail: tkgw@tlvroom.com

⁴学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)
E-mail: hosoya.k.aa@m.titech.ac.jp

⁵正会員 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科人間環境システム専攻 (同上)
E-mail: tyai@enveng.titech.ac.jp

自転車の車道走行が原則となり走行空間の整備が進む中、自転車利用者にとって決して快適だとは言えない空間の一例として、狭幅員かつ横断防止柵が連続した対面通行自転車道が挙げられており、単路部での回避挙動の困難さ、交差点部での自動車との錯綜が危険視されている。このような現状を受け、自転車走行空間における安全性分析や空間評価ツールとして近年、自転車シミュレータ（以下、CS）の開発及び利用がなされている中、運転挙動や運転感覚における再現性検証はCS利用のための前提条件として重要であり、目的に応じたCSの開発要件が満たされた上で利用しなければならない。そこで本研究では、開発要件に対する再現性評価を行った上で、上記の対面通行自転車道における対向自転車とのすれ違い挙動特性をCSを用いて明らかにし、危険性評価を行った。

Key Words: cycling simulator, validation analysis, weaving, passing behavior, two-way cycle track

1. はじめに

自転車は、日常的な短距離の移動においてニーズが高い交通手段であり、近年では地球環境への負荷の軽減のために、都市内における自転車の利用が促進されることが期待される一方で、歩道通行に起因する事故が深刻化し、自転車が関連する交通事故の割合は増加傾向¹⁾であることから、今後日常的な都市内交通手段として広く自転車の利用促進を図るために、自転車が安全かつ快適に走行できる空間の整備が必要である。

近年、自転車の車道走行の原則が強化され¹⁾、各地で自転車走行空間の拡充が検討され、実際に整備が進む中、自転車利用者にとって決して快適だとは言えない空間も存在している。その一例として、導線確保や幅員が不十分な対面通行自転車道が挙げられる。交差点部で直線的な導線が確保されていない桜通自転車道（名古屋）開通1年後のアンケート調査結果²⁾では、自転車道の安全性に対する評価として、約20%の回答者が「すれ違い時の危険な状況があった」、「速度差のある自転車の混在による支障があった」と回答している。（回答者数1009名）また、阿部ら³⁾は、幅員2.0mの対面通行自転車道の整備前後における満足度評価アンケート

調査において、自転車同士の接近の評価項目が整備前後でマイナス評価に留まっていることから、整備後の通行スペースの不足がその要因であることを指摘している。

このような現状を受け、自動車交通量や道路総幅員の制約といった制限がある中でも、不適切な自転車走行空間がこれ以上整備されないようにする必要がある。また、今後、走行空間のネットワーク化に向けて、既存の自転車走行空間を繋げながら整備が進むことが考えられ、ネットワーク化という観点からも、既存の自転車走行空間に対する様々な交通主体や道路構造の種別における定量的な事後評価が求められる。

そのためのツールとして、近年、自転車シミュレータ（以下、CS）の開発が進んでいる。シミュレータの利用により、計画段階で社会実験を行うよりも、安価に走行空間整備後の評価を行うことが出来ることから費用や法規制により、実際には整備困難な自転車走行空間の評価が可能であり、大規模なネットワーク規模の走行空間の評価も同様の観点から可能となる。また、実走実験では取得困難なデータを、安全かつ高い分析場面の再現性を以て得ることが可能であり、国内外問わず様々な目的でCSが利用されている^{4),5)}。CSを利

用する際、運転挙動や運転感覚における再現性は、分析評価するための前提条件として確保されるべきものであり、分析対象となるシナリオ毎に必要なシミュレータの要件として設定されなければならない。

本研究では、自転車走行空間として整備後に狭幅員かつ横断防止帯が連続していることから安全性について指摘がなされている 2.0m 幅員の対面通行自転車道を対象とし、危険性の走行空間評価指標として対向自転車とのすれ違い挙動に着目した上で、対面通行自転車道におけるすれ違い挙動を取得するための CS の開発要件をビデオ観測調査や人間工学的な文献調査により明らかにした。そこで、上記の目的に対する CS 開発要件として、満たされているものと満たされていないものを明らかにした。次に、満たされていない開発要件であり、かつ、今後の様々な安全性分析場面で CS を用いるために重要な検討課題であると考えられる、中速（時速 7km 以上）直進時のペダリングに伴うふらつき挙動及び、空走時の速度減衰挙動を独自に挙動モデルを開発し CS に組み込むことで再現性の検証を行った。最後に、対面通行自転車道におけるすれ違い挙動を観測する上で必要な開発要件を満たした CS を用いて、すれ違い挙動特性分析を行い、走行空間の危険性について同時に考察した。

2. 本研究の位置づけと CS の概要

(1) 本研究の位置づけ

自転車道での走行挙動を取り扱った既往研究をみると、整備後の速度や走行軌跡の比較評価といったものが多い中、Vansteenkiste et al.⁶⁾は、自転車道の路面状態の質が走行挙動に与える影響を調査し、路面状態に関わらず走行速度には差が無いこと、視認行動については、低質路面の方がより近くを見ながら走行することを明らかにしている。相知ら⁷⁾は、自転車道区間内の単路・交差点・バス停等における看板柱・架空看板・路面表示の注視特性や運転挙動について分析している。一方通行と対面通行を比較した研究としては、Thomas ら⁸⁾は、一方通行及び対面通行自転車道と走行挙動比較を行い、対面通行自転車道では特に、交差点部で危険が高まることを明らかにしている。対向自転車とのすれ違い挙動に関しては、山中⁹⁾は歩行者、自転車の混合交通における、危険感の生じるすれ違いの交錯挙動の頻度と交通量、速度、幅員の関係を明らかにしているものの、CS を用いてかつ、すれ違い時の安全回避行動（横断防止柵や対向車とのすれ違い間隔の取り方）にまで言及し、定量的な分析を行っている例はない。

本研究では、対向自転車とのすれ違い挙動（特に、横断防止柵や対向自転車との間隔の取り方）を対面通行

自転車道を走行する際の危険性評価指標の一つとして捉え、これまで行われてこなかった CS を用いた実験により、すれ違い挙動特性を定量的に明らかにしている。

(2) CS の概要

自転車交通の安全性研究に活用できる全く新しいコンセプトの「動作反映没入型サイクリングシミュレータ」(Morics: Motion reflected immersive cycling simulator) は、道路利用者の視点から自転車走行環境を分析するためのツールとして、かつ道路整備事業における行政・市民間のコミュニケーションツールとしての活用も視野に入れ開発された、高い再現性を有する小型可動式の自転車シミュレータである。Morics の特徴は、1) 被験者自身の自転車を含む多様な型の実物自転車で走行挙動データを収集でき、2) HMD により 360 度の視認が可能で仮想空間への没入感が高く、3) 自転車の傾きやふらつき等の挙動を反映でき、4) 機構がコンパクトで持ち運びできる点等にある。CS の概略図を図-1 に、システム全体の構成を図-2 に示す。

走行画面はヘッドマウントディスプレイ (HMD) に投影され、HMD 上部に取り付けてあるトラッキングセンサにより、ライダーの顔の向きと表示する走行画面が連動される、これにより 360° の仮想空間を再現しており、複数の大型プロジェクタやスクリーンを利用しない省スペース化を図ることが出来る上、視界には仮想空間のみが映し出され、現実感のある走行環境を再現可能である。また、走行中にライダーが感じる体感加速度をアクチュエータを用いた 1 軸モーションベースにより再現することで、ブレーキや衝突といった慣性力を運転者に体感させることができる。これにより加減速だけでなく、勾配や路面凹凸のある道路における走行実験も可能となり、あらゆる道路形状の再現にも応用可能である。

図-1 CS の概略図

図-2 CS のシステム構成

(3) シミュレータの再現性に着目した Morics の特徴

本節では、本研究で用いた自転車シミュレータ Morics において、運転挙動や運転感覚の再現性の観点に着目した特徴を、Morics が利用可能な具体的な交通場面を挙げながら説明する。

a) ハンドル操作に対する再現性確保の工夫

ハンドル操作はハンドル回転軸に取り付けたジャイロセンサ（ATR-Promotions 社製小型無線多機能センサ TSND121）により、ハンドル回転速度を計測し、ハンドル回転角を反映させている。その際、仮想空間上の走行軌跡をハンドル回転角から以下の式 (1)、式 (2) を用いて変換を行っている。

$$\theta = \delta \quad (\text{ハンドル操舵量が大きくないため})$$

$$\dot{\psi} = \begin{cases} 0 & (\delta = 0) \\ \frac{V \tan \delta}{L} & (\delta \neq 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi = \int \dot{\psi} dt \quad (2)$$

ただし、 $(x, y) = (\int V \cos \psi dt, \int V \sin \psi dt)$ 、 θ ：ハンドル操舵角 (rad)、 δ ：ハンドル操舵角 (rad)、 ψ ：自転車旋回角 (rad)

システム上、視野角の制限が存在する HMD（水平視野角 102 度）を使用しているため、上記の物理モデル式をそのまま用いても、HMD の視野に対してハンドル操舵に伴う自転車の旋回変化が過大評価され、実際よりも大きく左右に振れるといった感覚に陥る恐れがある。そこで、本システムでは、上記の自転車旋回角の物理モデル式に対して、視野角に応じた調整パラメータを設けて、ハンドル操舵に伴う自転車の旋回変化を実際と近づける工夫を行っている。本研究では、HMD の視野角 (102 度) 及び実際には機能している眼球運動が CS 上で機能しないこと（前庭動眼反射が働かない）を留意し、調整パラメータを決定し、高い再現性を表

表-1 本システムで使用する HMD の主な仕様

	NVIS nVisor MX120	NVIS nVisor SX111

視野角	水平方向	114°	102°
	対角線方向	120°	111°
	垂直方向	64°	64°
解像度	1280×1024(640×1024/1lens)		
重さ	1400g(重り無し)		1300g
センサ	角度センサ		
オーバーラップ	50%		66%
IPD range(両眼間隔調整)	53~73mm		
リフレッシュレート(画面のちらつき)	60Hz		
パネル	マイク0.5° x 0.5° (LCOS)		

現している（10 名中 7 名が乗車してすぐハンドルを制御できるようになり、2~3 回の練習走行により 10 名全員が制御可能となった）。

b) 空走状態・ブレーキ制動に対する再現性確保

後輪負荷発生装置（ロードジェネレータ）及びブレーキ上に取り付けた圧力センサ（東洋測器 (株) 製超小型ロードセル MCDW-5L）により、空走状態に関わる速度変化に伴う後輪負荷の制御や、ブレーキ量に応じたブレーキ挙動を反映させている。

システム上、後輪のみに負荷を与え速度制御や制動制御を行っていること、タイヤと後輪負荷装置のローラーとの間の抵抗が現実世界の自転車と運転者の自重と一致しないため、回転に対する慣性エネルギーが小さく、実際と比較すると後輪が速く止まってしまう。そこで、現実世界の走行より、空走及びブレーキ制動における速度減衰を線形近似したモデルを開発しシステムに組み込むことで、画面上で現実世界と同じような空走及びブレーキ制動時における速度減衰状態を表現している。

本研究では、5 章で、実走実験によって速度減衰挙動（ブレーキ及び空走）をモデル化し、CS に組み込むことにより、速度減衰挙動において高い再現性を示している（10 名中 8 名が速度減衰挙動において実際と同程度の感覚と回答）。

c) 頭部動作及び視野に対する再現性確保

仮想空間内の視界映像を反映する HMD（頭部装着式装置）は、頭部の動きを感知するトラッキングセンサと組み合わせることにより、表示画面を頭部の動きと連動することが可能で、スクリーンやプロジェクタ式と異なり、走行空間以外は視界に入っていないので、バーチャル空間への高い没入感や奥行き感に対するリアリティが得られることが大きな特徴である。本研究では、表-1 の右側の nVisor SX111 を使用した。ただし、現実世界における人間の視野角（水平視野角 180~210 度）に

比べ、本システムで用いる HMD は視野が狭いため（水平視野角 102 度）、視界に対する再現性が確保されていないことが懸念される。そこで、本システムでは、HMD 環境下で使用する際の視野制限に対する分析可能交通場面の限界を考慮に入れた上で使用している。例えば、単路部では、対面通行自転車道や自転車歩行者道における歩行者や自転車との錯綜を扱うことは容易であり、また、側面から他交通主体が視界に進入してくるような交差点でも、見通しの悪い細街路と幹線道路が接続するような場所での出会い頭状況¹³⁾等、視界が狭く、視界が開けた場面でも視線移動がある程度限定化するような場面で有効であることが明らかになっている。

また、HMD を頭に装着した時の重量感や大きく重心が前に移動してしまう状態が、シミュレータを利用する際に大きな問題となるシミュレータ酔いを誘発してしまうという課題が存在する。そこで、本システムでは、シミュレータ酔いを生じさせにくいように、独自に HMD 支持機構を作製し、装着時の軽量性・バランス性・スムーズな可動性に留意している。本研究では、実際に対面通行自転車道及び駐車車両追い越し場面においてシミュレータ酔いにより実験が続けられなくなった被験者は存在しなかった（10 名中 0 名）。

d) ペダリング挙動に対する再現性確保

ペダリングは、ロードジェネレータ（後輪負荷発生装置）のローラー部分の回転負荷（慣性二次モーメント）とローラー表面部の摩擦負荷（転がり抵抗係数）に連動しており、本システム上では、ローラー部分の回転負荷をプログラム上で制御し、ローラー表面部の摩擦抵抗をローラー部分に摩擦抵抗の変化する素材等を負荷することで変化させ、より再現性の高いペダリング感覚（ペダリング負荷）を表現可能である。また、筆者らの研究¹³⁾により、実走実験によるペダリング負荷と CS 実験によるペダリング負荷がほぼ同等となっていることを確認している。空走状態に関しては、ロードジェネレータ回転負荷の調整範囲外にあるため、独自の空走モデルを用いて走行速度を減衰させている。

e) 上体が傾く挙動に対する再現性確保

上体を傾ける挙動に関しては、図-3 のようにゴムが挟まれた 1 点支持構造のサイクルトレーナを使用し、これにより左右に上体を移動させる方向への自由度をある程度確保することが可能となっている。さらに、本システムでは、上体の重心移動による交差点を曲がるといった挙動における再現性に対しては改善の余地がある一方で、直進時における上体の左右への移動に関しては、筆者らの研究¹³⁾により現実世界と同様に傾くことが可能である（左右方向に約 5 度以下）ことを明らかにしている。また、頭部動作をトラッキングするシステムと併せて、上体の傾きに連動して映像も傾く

図-3 左右に傾き可能な仕組みのサイクルトレーナの外觀

表-2 モーションベース仕様

動きの自由度	上下動(1 軸)
アクチュエーター機能	最大速度 30cm/sec

ように作られており、視覚と体性感覚共に整合性の取れたシステムになっている。

f) 振動・勾配・路面凹凸

一軸モーションベースを採用し、高応答性のアクチュエーターにより自転車の前輪を動揺させ、動きの自由度は上下動である（表-2）。加減速時に生じる体感加速度や勾配、段差や衝突感、路面の凹凸といったものを上下動のレンジにより再現している。

3. 対面通行自転車道における CS 開発要件の設定

本章では、対面通行自転車道の挙動分析評価を行うために必要な CS の開発要件を設定するために行ったビデオ観測調査及び、シミュレータに関わる人間工学的な文献調査結果について述べる。

(1) ビデオ観測調査の概要及び挙動データ作成方法

対象路線は、江東区亀戸地区（国道 14 号）である。片側 4 車線の道路において、車線を削減し両側に幅員 2.0 m の自転車道を整備し、歩行者・自転車・自動車の通行区間を分離している。しかし、区分内を通行する自転車同士の安全性については、必ずしも向上しているとは言えず、自転車同士の錯綜などが課題となっている。一日を通して自転車交通量は多く、交差点の信号が青に切り替わった直後には何台もの自転車が縦列をなして走行している。この自転車道を選定した理由として、自転車道の真上のある程度の高さから撮影するために歩道橋が存在し、サンプルを撮影区間において効率よく得るために、ある程度の交通量が見込めることが挙げられる（図-4）。

幅員 2.0 m の自転車道の真上、約 5 m の高さ（歩道橋の上）からビデオ撮影し、約 40 m の区間内において以下の手順に従って挙動データを作成した。今回、作成し

図-4 亀戸地区自転車道のビデオ撮影風景
(観測日時: 2013.04.16 AM 7:30~9:00, 11:00~12:00 および 2013.04.18 PM 3:30~6:00)

図-5 すれ違い間隔の分布

たデータは、1 台の自転車同士の間で生じる錯綜を分析するために、1 対 1 ですれ違う自転車のみに限定した。

- 1) ビデオ撮影した動画ファイルを高解像度のまま、0.2 秒 (5 フレーム/秒) ごとに静止画として切り出す
- 2) 切り出した静止画から任意の座標取得が可能な PC ソフトを用いて、前面が見える自転車については前輪タイヤの接地点、後面が見える自転車については後輪タイヤの接地点の任意座標を取得する
- 3) 任意座標取得後、実寸が明確な部分 (今回は、自転車道中央線) を基準に、任意座標を実寸座標に変換する。実寸が不明な区間に関しては、一点透視図法を用いて距離を補完する
- 4) 各接地点の位置座標の時間推移から速度を、また、すれ違う自転車同士のタイヤの接地点間における幅員方向の距離からすれ違い間隔を推定する

(2) ビデオ観測調査結果と考察

a) 錯綜挙動

ビデオ観測より、実際に確認された対面通行自転車道内での錯綜事象は以下の通りである。

- 特に速度を下げず、あわや衝突してしまうほどの狭い間隔でのすれ違い
- 相対的に速度の遅い高齢者運転者を後続の自転車が上手く追い越せず、バランスを失うというふらつき
- 複数自転車間で追い越しとすれ違いが同時に生じたことでの衝突
- 前方から並走してくる複数自転車を上手く回避できないことでの急ブレーキ、もしくは停止
- 車道左側端に停車させた自動車に乗り込むために自転車道を横断する歩行者が、自転車の通行の支障となっている状態

b) 対向自転車とのすれ違い挙動

図-5 に、すれ違い時の自転車の間隔の分布、図-6 に、その時の速度分布を示す。すれ違い時の自転車同士の間隔 (双方のタイヤ接地点同士の間隔) は約 1.0m で、

図-6 すれ違い時の自転車速度の分布

図-7 すれ違い前の走行軌跡

お互いの自転車の占有幅ギリギリでのすれ違いとなっている。

次に、観測区間内で比較的すれ違うまでの時間が長いデータに関して、対向自転車とのすれ違うまでの走行軌跡をプロットしたものを図-7 に示す。全体的に、すれ違うまでの時刻までの時間が短くなるにつれ、より走行路端側 (センターラインより離れる) を走行する傾向にあり、それとは別に、全ての走行において個人差はあるものの、周期的な蛇行挙動 (周期幅にして、5 cm ~ 35 cm) があることが見て取れる。これは、自転車運転者が意図的にハンドル操作を行った時の大きなハンドルの動きと左右のペダルを周期的に漕ぐことで、自転車の構造的な問題から運転者が意図しない物理的な

表-3 相対速度の大小におけるすれ違い間隔の検定結果

		相対速度大	相対速度小
すれ違い 相対速度	平均値	30.1km/h	23.6km/h
	標準偏差	2.2km/h	1.8km/h
すれ違い 間隔	平均値	97.5cm	99.2cm
	標準偏差	12.1cm	12.6cm
サンプル数		16	16
t値		0.37

図-8 自転車の相対速度とすれ違い間隔の関係

力が自転車及び運転者に働くことが要因として考えられる。

さらに、すれ違う自転車同士の相対速度が大きいほど、お互いに速く接近して見え、それだけすれ違い時における間隔が大きくなると推測できるので、相対速度とすれ違い間隔との関係について調査した。その結果を表-3及び図-8に示す。これより、相対速度とすれ違い間隔の間において関係性があるとは言えないことが分かり、要因として道路幅員の制約や個人差による影響が推察される。その際、例えば、15 km/h 同士と、25 km/h・5 km/h の場合と、相対速度は等しいので、同じ条件としての評価となり、個々の速度を基準として見る必要性も窺える。

最後に、個々の速度を基準とした見方として、すれ違う自転車同士の速度差に着目した。速度差の上位と下位 16 サンプルずつにおいて、すれ違い間隔の平均に差が見られるかの検定を行った。その結果を表-4及び図-9に示す。速度差が大きいグループの方が小さいものと比べ、すれ違い間隔が大きくなっており、また、すれ違い時にどちらが回避するかの挙動を観測した結果、自転車同士の速度差が大きいほど、双方の自転車がより危険を感じ、すれ違い時により大きく避けることが推察される（5%有意）。

自転車同士がすれ違うまでの区間（すれ違う自転車の走行方向に対する距離が 15 m 以内と定義）において、少なくともどちらか一方が明らかな速度低下（20%以上の速度低下を示すものと定義）を示す自転車は、全 32 ケースの内、わずか 1 ケースのみであり、その 1 ケー

表-4 速度差の大小におけるすれ違い間隔の検定結果

		速度差大	速度差小
すれ違い 速度差	平均値	4.2km/h	1.1km/h
	標準偏差	1.6km/h	0.7km/h
すれ違い 間隔	平均値	103.1 cm	93.7 cm
	標準偏差	11.6cm	11.3 cm
サンプル数		16	16
t値		2.25 *	

(*:5%有意)

図-9 自転車の速度差とすれ違い間隔との関係

表-5 すれ違い時に安全挙動を取る自転車の速度とすれ違い距離（網掛は、安全挙動を取った自転車であることを表す）

運転者1) 自転車速度(km/h)	運転者2) 自転車速度(km/h)	すれ違い距離 (cm)
18.2	13.4	101.4
12.3	8.8	89.6
17.4	11.1	94.5
16.5	13.8	92.8
16.1	15.3	93.6

スについてビデオ映像を目視した結果、片方の自転車がブレーキをかけていることが分かった。

また、明らかな速度低下は見られないが、全 32 ケースの内、4 ケースにおいてブレーキは使用しないながらも、すれ違い時に空走していることを確認することができた。これら 5 ケースにおける自転車の区間平均速度と、その際のすれ違い距離を表-5にまとめる。サンプルが少ないながらも、すれ違い前に速度の速い方が安全挙動をとる傾向が見て取れる。

その他の 27 ケースにおいては、すれ違い時も速度を維持しながらペダルを漕ぎ続けている。ここから推察されることは、幅員 2.0 m の自転車道内で現利用者の大半は、すれ違い時に、自身の走行を安定させる速度で通過しようという意識が強く働いている可能性が示唆される。併せて、駅前の自転車道であること、また、買い物・通勤通学利用が多い観測時間帯のため、日常的

な利用者が多く、自転車道の利用に慣れ親しんだ人の挙動を集計しているに過ぎない可能性も示唆される。

(3) 対面通行自転車道における開発要件の設定

自転車道における自転車同士のすれ違い挙動を観測・分析した結果から、以下のような特徴が挙げられる。

- すれ違う前に、空走及び制動挙動を行う自転車運転者は少ないながらも存在するが、多くの場合、ペダルを漕ぎ続け、速度を一定に保ちながらすれ違う
- すれ違い時に、曲がるような、大きく自転車が傾いたり、ハンドルを大きく動かしたりしない
- すれ違う自転車同士の速度差が、すれ違い挙動に影響を与えている

(2) で述べたビデオ観測調査結果より、対面通行自転車道においてすれ違い挙動を観測するために必要な開発要件を考慮し、Morics の従来システムと比較した時に、開発要件が既に満たされているものと満たされていないものを区別すると以下のように言及できる。

1) 速度感及び視界環境

本研究の対象場面では、対向自転車の速度を知覚するために奥行き感及び速度感が必要である。奥行き感に関しては、HMD を使用することで立体的に見えることから再現性に関して妥当であると考ええる。また、速度感に関しては、速度感を決定づける要因として、臨場感の重要な指標でもある自己運動感覚¹²⁾を考慮することが重要である。その感覚は、水平視野角 20 度程度から起こり始め、110 度程度で飽和することが知られており、本システムで使用する HMD が水平視野角 102 度であることから、速度感に関しては、ハードの面である程度確保されていると考えられるが、視野の制限といった制約により実際の感覚とは異なることから、再現性検証を行う必要があると考える。

2) 上体が傾く動き

本研究の対象場面では、自転車運転者は基本的に直進するのみであるので、そのまま従来のシステムを利用しても動きの再現性に関して妥当であると考ええる。

3) ハンドル操作

本研究の対象場面では、直進時のペダリングによって誘発される左右への重心移動（ふらつき）によるハンドル操作の微調整及びすれ違いにおけるハンドル操作調整が必要であり、従来のシステムを改善する必要がある。その際、上記操作性を再現した後の、ハンドル操舵角・走行軌跡・どれだけ早くハンドル操作に慣れることが出来たかどうかを再現性評価の指標として用いる。

4) ペダリング操作

本研究の対象場面では、ペダリングの負荷に対する再現性が必要であるが、筆者らの研究¹³⁾により、ペダ

ル負荷が実走実験上でも、本システム上でもほぼ一致していることが明らかとなっており、ギアや車種等のペダル負荷の感覚違いに関しては、実験前にペダリング感覚の練習をすることで、再現性に関して妥当であると考ええる。

5) 速度減衰

本研究の対象場面では、空走及びブレーキ制動における速度調整に対する再現性が必要であり、前後輪ブレーキのかけ具合の調整に関して従来のシステムを改善する必要がある。空走感覚に関しては、筆者らの研究¹³⁾により、空走の速度減衰を線形近似した速度モデルについて既に検証されている。今回、5 章において実走実験により速度減衰挙動をモデル化しさらに精度を上げている。

6) 音

本研究の対象場面では、対向自転車が音を発しないこと、あくまで分析対象は対向自転車との間のすれ違い挙動であるため、他交通主体の音を含む必要がないものとして考える。

7) 路面凹凸・勾配等の慣性力変化

本研究の対象場面では、平地で良好な路面状態を想定しているために必要がないものとして考える。

1)～7) より、1) に関しては、CS 実験時に再現性検証実験を行うこととし、3) と 5) の開発要件に関しては、従来システムを改善する必要があることから、次章以降で各挙動の再現性について検討していく。

4. 直進時におけるふらつき挙動の再現性

本章では、3 章で設定した重要な開発要件である直進時におけるふらつき挙動の再現のために、ふらつき時のハンドル操舵角、走行軌跡を再現性の評価指標として用いて、ハンドル操舵に対するモデル化を行う。次に、ハンドル操舵モデルの再現性を実走実験及び CS を用いた実験により検証を行った。

(1) ハンドル操舵における説明変数の検討

ハンドル操舵角をモデル化するに当たり、説明変数の検討を行った。村上¹⁰⁾は、ハンドル操舵に影響を与える要因として、1) 人為的なハンドル回転、2) 前輪系の重量効果、3) ジャイロ効果、4) トレール効果、5) 路面摩擦による外乱の 5 つを挙げている。その他にも、6) キャンバースラスト効果¹¹⁾、7) セルフアライニングトルク¹¹⁾が影響することが知られている。

そこで、7) に関しては走行中のタイヤ変形量は微小であるとし無視できるものとして考え、ここでは、1)～6) までをハンドル回転に影響を与える要因として考慮する。

表-6 ふらつきを含んだハンドル操舵の表現範囲

速度モード	速度帯	走行挙動
低速	～7km/h	ハンドル操作に加えて上半身の重心移動で倒れないようにバランスを取る状態
中速	7km/h～20km/h	ハンドル操作及びペダル漕ぎによる蛇行状態
高速	20km/h～	ハンドル操作及びペダル漕ぎによる蛇行状態（手放し可能）

表-7 実走と CS 走行によるハンドル操舵表現の考え方

	人為的操舵角	自動的操舵角
実走	操舵角モデル	
CS走行	実測値	自動的操舵角モデル

(2) ハンドル操舵モデルの考え方と表現範囲

(1) で述べた、1) の“人為的なハンドル回転”に対し、1)～6) は運転者が意図的にハンドルを動かさなくてもハンドルが切れる要素であることから、“自動的なハンドル回転”として扱う。すなわち、これら2つのハンドル操舵角の合計によって、実際の走行でのハンドル操舵角は定義可能と考えられる。そこで、表-7に実走行環境とCS走行環境との間におけるハンドル操舵表現の考え方の違いを示す。実走実験によって、人為的操舵と自動的操舵の両方を観測し、操舵角モデルを推定する。そこから人為的操舵部分を取り除き、自動的操舵モデルとしCSに実装する。CS走行では人為的操舵部分を直接観測することで求め、それと自動的操舵モデルを合わせることで、CS走行における操舵角と定義する。

次に、表-6にハンドル操舵の表現範囲を示す。

(3) ハンドル操舵モデル

(1), (2) で述べたハンドル操舵に与える要因及び、自動的・人為的ハンドル回転という2つの操舵角の考え方をもとに、操舵角のモデル化を行った。操舵角を目的変数に、車体傾き角、車体傾き角速度、車輪回転速度、ハンドルに加える荷重を説明変数として、外乱や機械的ノイズ等の計測誤差の影響を定数項として与え、式(3)のように、重回帰モデルによって表現する。

$$\theta(\text{操舵角}) = \beta_1 + \beta_2 \omega \dot{\varphi} + \beta_3 \varphi + \beta_4 P \quad (3)$$

ただし、 ω ：車輪回転速度 (rad/s)

φ ：車体傾き角 (deg)

$\dot{\varphi}$ ：車体方向き角速度 (deg/s)

P ：右手ハンドル回転荷重 (g)

図-10 実走実験の概要

(4) モデル推定・検証のための実走及びCS実験

a) 実走実験の概要

(2) で検討したモデルの入力値として必要なデータを観測するために、速度計、3軸角速度センサ、ペダル踏力センサ、ハンドル荷重センサ、観測用PCを積載したデータ観測用自転車を作製した。実験走行は、路面凹凸や傾斜の影響が出ないようにするために、滑らかで平らな路面上（室内廊下）で行い、傾き角とハンドル操舵角は角速度データの時間積分で求まるため、測定開始位置での直進方向をハンドル操舵角のゼロ位置、水平状態（水平器使用）を傾き角のゼロ位置として観測を行った。被験者は男子学生1名である。ただし、速度計のデータの安定性と精度、被験者が直進する技術の関係上、直進速度は15km以上で測定するものとした。その際、表-6より、今回推定したモデルが7km以上で用いることができるものであると考えることとする。

b) ハンドル角推定及び実走データとの比較

まず、最初に実走実験より得られたハンドル操舵角速度よりハンドル角及び車体の走行軌跡を求め、ハンドル角のゼロ補正を行う。補正を行う理由としては、ハンドル操舵角のゼロ位置を自転車の直進方向と定めているものの、目分量で自転車を直立させているため、数度のハンドル操舵角のずれが判別できないためである。被験者は1名であるが、走行区間を5回繰り返し走行し、各走行の推定区間を全て合わせたものを用いて推定結果を求めた。表-8に、ゼロ補正後の値を用いたハンドル角の推定結果を示す。

ここで、各回帰係数の符号について説明する。表-8より、傾き角と右手ハンドル荷重に関して、符号が正となっている。これは、車体が右側に傾き、右手ハンドル力が加わるほど、ハンドルが右側に切れることを意味しており、実際の挙動と一致する性質である。一方で、ジャイロ効果は符号が負となっている。ジャイロ効果は、ハンドルが切れる方向と逆に車体が傾くこと

で直進性が増し、結果的にハンドルを直進方向に戻す働きをするものであるため、同様に、実際の挙動と一致する性質であることが分かる。

ふらつき挙動の基本的特徴として、時速 15 km 以上で直進走行をした場合の自転車のハンドル角はある程度周期的に蛇行していることが分かり、左右に約 5 度ずつ振れていることが分かる（図-11）。また、直進時に

表-8 重回帰分析結果

自由度修正済決定係数	0.722		
観測数	1613		
	偏回帰係数		t値
定数項	-6.71E-01		-5.16
傾き角	1.02	***	31.7
右手ハンドル荷重	3.36E-03	***	15.8
ジャイロ効果	-7.73E-03	***	-50.1
	***	0.1%有意

図-11 実走実験でのハンドル操舵角（正：右回転 負：左回転）

における左右へのふらつきをハンドル角及び走行軌跡に関して、実測値と推定値を比較した結果の一例を表したものが図-12、図-13である。実測値と推定値共に、周期的な蛇行挙動が見られ、左右に振れる値のピークもほぼ同時刻であることが見て取れる。

c) 分析対象場面でのハンドル操作の再現性評価

(4) の実走実験の結果を基に、自動的操舵角モデルをCSに組み込み、実走実験と同じようなふらつき挙動がCS上でも表現が出来ているかを確認するCS走行実験を行った。ここで、操舵角とは別に、車体の傾きに関して、車体の傾き角速度が左右のペダル踏力の差の関数となっていると仮定し、傾き角速度のモデルを追加した。これはCS走行と実走での自転車の車体の傾きに関する挙動が異なる可能性があるためである。被験者は男子学生3名である。評価項目としては、速度、空走・ブレーキ制動の有無、走行軌跡である。また、すれ違い時の危険感や運転感覚の再現性についてアンケート調査を行った。図-14にCS走行におけるハンドル操舵角（2走行分）を示す。振幅は±2度～5度と実走実験とは若干、値は小さくなっているものの、実走実験で見られたような周期的な蛇行挙動がCS走行実験でも見られることが分かる。

次に、対向車とすれ違う際の心理と挙動との整合性をアンケート調査と挙動データにより照合した。図-15、図-16はそれぞれ、すれ違い時の対向車に対する意識が異なる被験者2人のすれ違い相対速度およびすれ違い速度差とすれ違い間隔との間の関係を示したものである。そこで、被験者Kは、「すれ違う時に対向車の速度

図-12 直進中速（15 km 以上）におけるハンドル回転角の実測値と推定値の時間的推移（正：右回転 負：左回転）

図-13 直進中速（15 km 以上）における走行軌跡の実測値と推定値の時間的推移（正：運転者右手側 負：運転者左手側）

図-14 CS 実験でのハンドル操舵角 (正：右回転 負：左回転)

図-15 すれ違い間隔-相対速度関係

図-16 すれ違い間隔-すれ違い速度差関係

を見ながら自然にハンドルを切った」、被験者 S は、「対向車がはっきり認識できた瞬間から中央線をはみ出さないように、と考えて走った。対向車の速度はあまり気にしていなかった」と、回答しており、図-15、図-16 より、被験者 K がすれ違い相対速度や速度差によってすれ違い間隔が増加している傾向にあること、逆に、被験者 S が相対速度やすれ違い速度差によらず、一定の間隔を取って走行していることが見て取れる。これらの結果により、対面通行自転車道におけるシナリオの再現性が確認されたと言える。

5. 速度減衰挙動の再現性確保

本章では、3 章で設定した重要な開発要件である空走及びブレーキ制動における速度減衰挙動の再現のために、空走及びブレーキ制動時の走行速度をモデル化し、

表-9 普段使用するブレーキに関するアンケート結果

左(後輪)のみ	両方 左>右	両方 左=右	両方 左<右	右(前輪)のみ
6	1	1	0	2

次に、速度減衰モデルを実走実験により推定及び再現性の検証を行った。

(1) 速度減衰挙動に対する再現性向上の目的

ブレーキ制動時にタイヤが無回転とならない制動（ブレーキロック無し）及び、前後輪ブレーキのかかり具合の違いの表現を行うために、速度減衰モデルを改良した（表-9 参照）。

(2) 速度減衰における説明変数の検討

速度減衰をモデル化するに当たり、まず、自転車と運転者に働く抵抗力が速度減衰に影響を与えることが知られている。抵抗力として、1) 路面との摩擦（転がり）抵抗、2) 空気抵抗、3) ブレーキ制動抵抗、4) 位置エネルギーの変化、5) 動力伝達効率が挙げられる。そこで、4) に関して、勾配等を考慮していないこと、5) に関して、走行速度を目的変数とすることから無視可能であり、速度減衰に影響を与える項目として、1)～3) を設定した。

(3) 速度減衰モデル

ここでは、計測される前後輪ブレーキ圧力 F_f, F_r およびロードジェネレータによって計測される後輪速度 V_r によって、 Δt 秒後のシミュレータ速度 V'_s を算出するモデル式を設計する。

まずは、空走時の任意の時点 t と Δt 秒後のエネルギーの差を式 (4) に示す。

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2}m(V_t^2 - V_{t+\Delta t}^2) + \frac{1}{2}J(\omega_t^2 - \omega_{t+\Delta t}^2) \\
 &= \int_{t+\Delta t}^t R_{\text{roll}_x} dx \cdot L_{\Delta t} + \int_{t+\Delta t}^t R_{\text{air}_x} dx \cdot L_{\Delta t} \\
 &= R_{\text{roll}_r} \cdot L_{\Delta t} + R_{\text{air}_r} \cdot L_{\Delta t}
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 ω ：角速度、 J ：慣性モーメント、 $L_{\Delta t}$ ： Δt 間の移動距離

ここで、回転運動エネルギー部分の慣性モーメント J は $J = m'r^2$ (m' ：タイヤ質量、 r ：タイヤ半径) と表すことができ、エネルギー変化量を比較すると、運動エネルギーに対して微小であるために無視可能であると考ええる。よって、 $V_t = V_{r_t}$ 、 $V_{t+\Delta t} = V'_s$ とすれば、式 (5) のように空走時の速度を表すことができる。

$$V'_s = \sqrt{V_{r_t}^2 - \frac{2V_{r_t}\Delta t}{m}(R_{\text{roll}_r} + R_{\text{air}_r})} \quad (5)$$

表-10 実験概要

実験日時	2014.08.26 10:30-12:30 (内 1 時間観測準備)
気候	天気:曇り 気温:27℃ 風:無～弱風(1～3m/s 程度)
観測対象	観測区間を走行する自転車運転者のヘルメットの頂点(黄色) (ただし、木に隠れて見えない部分は前輪接地点により補完)
取得データ	前後輪ブレーキ圧力値, 走行映像(各走行 10 回(空走は 5 回), 後輪回転映像

次に、ブレーキ時の t および $t + \Delta t$ 時点での運動エネルギー差を式 (6) に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}m(V_t^2 - V_{t+\Delta t}^2) + \frac{1}{2}J(\omega_t^2 - \omega_{t+\Delta t}^2) \\ &= [(C_{RS_f} + \beta_f \cdot F_f) \cdot m_f + (C_{RS_r} + \beta_r \cdot F_r) \cdot m_r] \cdot g + R_{air} \cdot L_{\Delta t} \end{aligned} \quad (6)$$

式 (5) と同様に、ブレーキ制動時に対しても式 (7) のように速度を表すことができる。

$$V'_s = \sqrt{V_{r_i}^2 - \frac{2V_{r_i}\Delta t}{m}\{(C_{RS_f} + \beta_f F_f)m_f g + (C_{RS_r} + \beta_r F_r)m_r g + R_{air}t\}} \quad (7)$$

最後に、空走抵抗とブレーキ制動抵抗を併せ、速度減衰モデルのパラメータ推計を行うために式 (5) 及び式 (7) を統合させたモデル式の作成を行う。実験より得られる値は $V'_s, V_{r_i}, \Delta t, m, F_f, F_r$ であるため、これらの値とパラメータ係数 ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$) を用いる。ここで、自転車と運転者の全質量 m に対する空気抵抗 R_{air} 、前後輪質量比 $m_f/m : m_r/m$ について、前者では、空気抵抗における自転車と運転者の前面投影面積が全質量 m に比例すると仮定し、後者では、前後輪における質量バランスが m に寄らず一定であることを仮定することで、運転者の自重に寄らない簡略化したモデルを考案した。以上を踏まえると、 R_{roll} の一部の項および R_{air} が $V_{r_i}^2$ に比例するため、速度減衰のモデル式はパラメータ係数 ($\alpha, \beta, \gamma, \Theta$) を用いて、以下の式 (8) のように表現することができる。

$$V'_s = \sqrt{V_{r_i}^2 - \alpha \Delta t V_{r_i}^3 - \beta \Delta t V_{r_i} - \gamma \Delta t V_{r_i} (F_f + \Theta F_r)} \quad (8)$$

(4) モデル推定・検証のための実走実験

a) 実走実験の概要

(3) で検討したモデルの入力値として必要なデータを観測するために、前後輪ブレーキ圧力センサ及び後輪回転観測用ビデオカメラを積載したデータ観測用自転車

図-17 実験場所

図-18 プローブ用自転車の外観

図-19 分析画像

を作製した。実験概要は、表-10 に示すとおりである。被験者は男子学生 1 名である。

b) 速度減衰モデル推定

a) の実験で得られた観測データから、速度減衰モデルのパラメータ推計を行う。推計手順は以下の通りである。

- 1) 空走時減速度 (時刻-速度) より近似式導出
- 2) 空走時減速度 α, β の推定
- 3) ブレーキ走行ごとの計測速度の近似
- 4) n 回目ブレーキ走行の減速度 γ_n の推定
- 5) パラメータ γ の決定

まずは、観測実験より得られた走行データ (図-20) に着目すると、空走時の速度は時刻 t に対して一次近似式でも表すことができることが分かる。この近似式より、式 (8) への代入を行いパラメータを推計すると $\alpha = 0.00000154$, $\beta = 1.232$ となる。

図-20 空走時の速度減衰の例

図-22 FB と RB における γ

図-21 ブレーキ制動時の速度減衰の例

図-23 実験値とモデル推計値の比較

次に、ブレーキによる制動力を示す項のパラメータを推定する。まずは、各走行での速度データの近似式を得る。ここでブレーキ制動時に働く力は、式(6)に示されるものであることから、近似式は二次式とし、最小二乗法によりそれぞれ求めた。図-21に一例を示す。

図-21に示されているように速度計測値はぶれ幅が大きいため、最初の計測値ではなく最初の3計測値の平均値を切片とし、近似した式を決定係数より採用することとした。近似式の t 時の速度を V_{r_t} 、 $t + \Delta t$ 時の速度を V'_s として代入し、以降の推定を行う。式(8)に V'_s 、 V_{r_t} 、 Δt ($= 0.05$)、 F_f 、 F_r 、 α 、 β を代入することで n 回目の走行における t 時の速度から $t + \Delta t$ 時の速度を算出するパラメータ値 γ_{n_t} が求まる。これを速度が測定できたすべての時刻において行い、この集合から式(11)より、平均を取ることで γ_n を得た。この際、決定係数が0.4以下の走行のデータは使用しないこととした。以下の図-22に結果を示す。

$$\sum_{t=1}^m \frac{\gamma_{n_t}}{m} = \gamma_n, \quad \sum_{t=1}^m \frac{\Theta_{n_t}}{m} = \Theta_n \quad (9)$$

式(8)により得られた前輪ブレーキ時FBにおける各走行回のパラメータ値である γ_n の平均値をCSに入力するパラメータ値 $\gamma = 1.608$ として得た。また、 Θ は理論式によると体重比で表され1.86であるが、実験値では $\Theta = 1.34$ であった。これは、特に前輪ブレーキ時の前輪と地面との接地点におけるモーメント力によって静止時とは重心が変化しているためと考えられる。これより、式に示す速度減衰モデルが求められた(速度

の3乗項は微小なため除外)。

$$V'_s = \sqrt{V_{r_t}^2 - 1.23\Delta t V_{r_t} - 1.61\Delta t V_{r_t}(F_f + 1.34F_r)} \quad (10)$$

c) 実験値とモデル推計値の比較及び再現性評価

実験走行の速度データの一例と実際に作成したモデルによって推定した速度の比較を図-23に示す。

ここで、この実験値群とこのモデル推計値の分散が等しくないと仮定したときの t 検定値は $t = 0.046$ となり、モデル推計値は5%有意水準で実験値を満たしていると言える。

6. CSを用いたすれ違い挙動特性分析

(1) CS実験の概要

対面通行自転車道におけるシナリオの再現性検証を行ったCSを用いて、対向自転車(AI:コンピュータ制御)とのすれ違い挙動観測実験を行った。AIである対向自転車の走行パターンをビデオ観測実験を基に設定したものを表-11に示す。被験者は本学学生10名(20代男性:7名 女性:3名)である。実験を始める前の練習段階で、3.(3)で示した開発要件を基に、1)~7)について被験者本人に自分自身で制御できる段階にあることを確認してから実験を行っている。図-24はCS実験の様子を、図-25は、CS走行実験画面例として、被験者の左眼映像を示している。併せて、実験後に走行感覚や被験者属性に関するアンケート調査を行った。

表-11 実験条件

対向車速度	○10km/h ○15km/h ○20km/h
対向車位置	○走行路の真ん中(走行路端から 50cm) ○走行路端寄り(走行路端から 30cm)

図-24 CS 実験の様子

図-25 CS 走行実験画面例（左眼映像）

(2) 速度及び速度減衰挙動における再現性検証

a) 速度に対する再現性検証

対向自転車とすれ違う時の被験者 10 人分の平均走行速度を対向自転車の走行位置と走行速度別にまとめたものが表-12である。対向自転車の走行位置や走行速度によって、被験者自身の走行速度に大きな違いが無いことが見て取れる。このことは、すれ違い前後における走行速度変化を示した図-26より、すれ違い前後で安全行動によって走行速度を遅くしたり、ブレーキ制動や空走をしたりする被験者がいなかったことから、「すれ違い前後では、ペダルを漕ぎ続けて自身の走行を安定させる」ことを優先した結果からであると想定される。走行速度の値に関しては、事前に行ったビデオ実験観測¹³⁾におけるすれ違い時の自転車速度（平均 13.4 km/h, 標準偏差 2.5 km/h, サンプル数 64）と比較すると、CS 実験値の方が約 1.0 km/h 平均速度が下回る結果となっている。これは、走行後の被験者アンケートにより速度感に対して大きな違和感を持った人がいないことから、被験者全員が対面通行自転車道を走行したことが無いことによる走行経験の差から、補償的な行動が生じた結果であると考察できる。

表-12 対向自転車走行位置速度別走行速度

		対向自転車走行位置(cm)			
		30		50	
		平均速度 (km/h)	標準偏差 (km/h)	平均速度 (km/h)	標準偏差 (km/h)
対向自転車 走行速度 (km/h)	10	11.7	2.1	12.6	2.2
	15	11.9	2.4	11.7	2.1
	20	11.9	2.5	12.3	2.0

図-26 すれ違い前後の自転車走行速度

次に、走行シナリオとして対向自転車の速度を時速 10 km から 20 km まで 5 km ずつ変化させた。その速度差については、被験者全員が識別できたことを走行後のアンケートにより確認できている。

これらの結果より、速度及び速度差における感覚の再現性が確保できていると考えられる。

b) 速度減衰挙動に対する再現性検証

本研究では、5 章で、実走実験によって速度減衰挙動（ブレーキ及び空走）をモデル化し、CS に組み込むことにより、より高い再現性を確保した。実際に、速度減衰挙動において被験者 10 名中 8 名が速度減衰挙動において実際と同程度の感覚と回答している。

(3) すれ違い挙動特性分析

a) すれ違い速度及び間隔

すれ違い速度と間隔のビデオ観測及び CS 実験データにおける比較を表-14 に示す。すれ違い速度に関して、平均値が CS 実験の方が低いのは、CS に用いている自転車のギアが軽い設定になっていること、また、被験者全員が実験場面である対面通行自転車道を通行した経験が無かったためであると考えられる。次に、対向自転車の走行位置によるすれ違い速度及び間隔への影響度合いを調べたものが、表-15 である。すれ違い速度が対向自転車の走行位置に寄らないのに対して、すれ違い間隔に関しては、分散は似たような傾向を示す中、対向自転車が 20 cm 中央線に近づく分、すれ違い間隔が平均値で 20 cm 短くなっていることから、対向自転車の走行位置が変化しても横断防止柵との間隔を 60 cm に保ち、対向自転車との衝突のリスクをバランスさせていることが窺える。このことは、走行後に行ったア

表-13 対向自転車とのすれ違い時に気になる要素

横断防止柵	対向車属性	対向車頻度	対向車速度	対向車ふらつき	対向車走行位置
7	1	3	1	3	9

図-27 対向自転車位置別の自転車位置の関係図

表-14 すれ違い速度及び間隔の比較

		ビデオ観測	CS実験
すれ違い速度 (km/h)	平均値	13.4	12.0
	標準偏差	2.5	2.2
	t 値	3.88*** (0.1%有意)	
サンプル数		64	172
すれ違い間隔 (cm)	平均値	93.7	100.1
	標準偏差	16.4	18.5
	t 値	-1.97	
サンプル数		32	172

表-15 対向自転車位置別のすれ違い速度及び間隔

		走行路端寄り (30cm)	走行路真ん中 (50cm)
すれ違い速度 (km/h)	平均値	11.8	12.2
	標準偏差	2.3	2.1
	t 値	-1.22	
サンプル数		85	87
すれ違い間隔 (cm)	平均値	110.2	90.2
	標準偏差	15.3	16.0
	t 値	8.40*** (0.1%有意)	
サンプル数		85	87

アンケート結果からも明らかとなっており、対向車とすれ違う時に何が一番気になりましたか？（複数回答可）という質問に対して、横断防止柵と対向車の走行位置が上位となっている（表-13）。

アンケート結果にも表れているように、対向自転車の速度を意識している人はあまりおらず、表のように対向自転車速度別にすれ違い速度や間隔をみても、平均値、標準偏差ともに同じような値となっている。

表-16 対向自転車速度別のすれ違い速度及び間隔

		対向車速度 10km/h	対向車速度 15km/h	対向車速度 20km/h
すれ違い速度 (km/h)	平均値	12.2	11.8	12.1
	標準偏差	2.2	2.2	2.3
サンプル数		56	59	57
すれ違い間隔 (cm)	平均値	101.3	98.8	99.6
	標準偏差	17.6	18.1	19.7
サンプル数		56	59	57

図-28 対向自転車との4つのすれ違いパターン

b) すれ違い前後の走行挙動

ここで、対向自転車とのすれ違い前後での挙動について調査する。図-28は、対向自転車とのすれ違い行動パターンを示しており、走行位置で、100 cm が2.0 m 対面通行自転車道の中央線、200 cm が自転車道の端（横断防止柵）位置となっている。

パターン1：前もって対向自転車との間隔を取り、すれ違い時に余裕を持って回避する（図-28 実線（太））

パターン2：対向自転車とすれ違う時に間隔を最大に取れるように回避する（図-28 破線）

パターン3：対向自転車とすれ違う時に間隔を最大に取れていないが、すれ違う前に回避を開始（図-28 点線）

パターン4：直線運動を維持してすれ違う（図-28 実線）

図-29は、対向自転車の走行位置・速度別のすれ違い行動割合を示したもので、対向自転車の走行位置が自転車位置に迫るほど、パターン1の行動割合が多くなっている。また、対向自転車の速度が大きいほど、パターン3の行動割合が大きくなっている。このことより、対向自転車の走行位置が自転車位置に迫るほど、前もって対向自転車との間隔を取り、すれ違い時に余裕を持って回避しようとし、対向自転車の速度が大きくなるほど、対向自転車とすれ違うタイミングが掴み辛くなっている。

図-29 対向自転車走行位置別速度別すれ違い行動割合 (30 cm: 走行路端寄り, 50 cm: 走行路真ん中, X (km): 対向自転車速度)

図-30 横断防止柵からの回避挙動例

る傾向が見て取れる。

(4) 幅員 2.0 m の走行幅員に関する議論

ここで、幅員 2.0 m の対面通行自転車道の危険性について議論する。

横断防止柵との間の間隔が 40 cm を切ると、図-30 に示すように、横断防止柵との間の距離が近すぎると判断しハンドルを急に切るといった挙動が見て取れる。次に、図-31 に示すように、対向自転車とのすれ違い時に大きなふらつきが起きていることが見て取れる。また、表-17 では、図-30 に示すような横断防止柵からの回避挙動が、対向自転車の位置がより被験者側に来ると多くなっていること、すれ違い時の大きなふらつきが対向自転車の位置に関係なく一定程度存在することが示唆される。

これらの結果に加えて、今回の実験の設定では、すれ違い前後に、対向自転車は直線移動であり、左右へふらつかないような設定にしているが、ふらつく可能性があることによって、よりすれ違い時の間隔を取りたいと自転車運転者が判断すること (すれ違い間隔 > 1.1 m) を考慮すると、幅員 2.0 m の自転車道では、対向自転車とのすれ違い時に、操作の難しさから横断防止柵や対向自転車との間でうまく距離を保つことができず、危険な状態に陥っている時が存在する可能性が示唆される。

図-31 すれ違い時の大きなふらつきの例

表-17 すれ違い前後における対向自転車位置別危険挙動数 (各パターン 90 回中)

	30cm	50cm
横断防止柵回避	2	9
すれ違い前後 ふらつき	3	3

7. おわりに

本研究では、2.0 m 幅員対面通行自転車道における危険性等の走行空間評価指標として、対向自転車とのすれ違い挙動に着目し、CS を用いた走行挙動分析を行い、2.0 m 幅員対面通行自転車道における危険性について、すれ違い挙動の観点から改めて評価を行った。対面通行自転車道でのすれ違い挙動を CS を用いて分析するために、CS の開発要件を設定し、直進時のふらつき挙動を伴うハンドル操作や空走の再現性に加え、速度感や視界環境の再現性の必要性を明らかにした。そこで、直進時のふらつき挙動を伴うハンドル操作と速度減衰に関する再現性について、独自のモデルを開発、適用し、シナリオの開発要件を満たした。CS 走行実験により、対向自転車とのすれ違い挙動には以下の 4 つのパターンが存在していることが明らかとなった。

- 1) 前もって対向自転車との間隔を取り、すれ違い時に余裕を持って回避する
- 2) 対向自転車とすれ違う時に間隔を最大に取れるように回避する
- 3) 対向自転車とすれ違う時に間隔を最大に取れていないが、すれ違う前に回避を開始
- 4) 直線運動を維持してすれ違う

次に、横断防止柵や対向自転車の位置がすれ違い挙動に最も影響を与えていることを走行後アンケートより確認し、横断防止柵が被験者の走行軌跡に与える影響を対向自転車の走行位置別に調査したところ、対向自転車の位置が被験者寄りを走行する場合 (30 cm < 50 cm) の方が、横断防止柵との衝突を回避するために不安定な動きをする回数が増えていることが明らかとなった。また、対向自転車の位置に関わらず、一定の割合ですれ違い前後における不安定な走行が確認され、す

れ違い時における横断防止柵への衝突回避，すれ違い前後における不安定な走行挙動の観点から，2.0m 幅員の対面通行自転車道における危険走行の可能性を示すことが出来た。

参考文献

- 1) 国交省道局，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，2012.
- 2) 国交省中部地方整備局・名古屋国道事務所：桜通自転車道－開通1年後の調査結果，2012.
- 3) 阿部宏史，崎大樹，岩元浩二，富田修一：岡山市内国道53号線における自転車道整備効果の検証，土木計画学研究・論文集，No. 26, pp. 647-654, 2009.
- 4) 長拓馬，鳩山紀一郎：自転車利用者の心理を考慮した空間制約下での自転車通行帯設計，第47回土木計画学研究発表会・講演集，2013.
- 5) Herpers, R., Heiden, W., Kutz, M., Scherfgen, D., Hartmann, U., Bongartz, J. and Schulzyk, O.: FIVIS Bicycle Simulator - an Immersive Game Platform for Physical Activities, Proceedings of the 2008 Conference on Future Play: Research, Play, Share, Future Play 2008, Toronto, Ontario, Canada, November 3-5, 2008.
- 6) Vansteenkiste, P., Zeuwts, L., Cardon, G., Philippaerts, R. and Lenoir, M.: The implications of low quality bicycle paths on gaze behavior of cyclists - A field test, *Transportation Research Part F*, Vol. 23, pp. 81-87, 2014.
- 7) 相知敏行，山中英生，神田佑亮：サッカーを用いた自転車走行者の誘導サインに対する視線挙動分析，土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 5, pp. 909-916, 2013.
- 8) Thomas, B. and DeRobertis, M.: The safety of urban cycle tracks: A review of the literature, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 52, No. 28, 2013.
- 9) 山中英生：交錯指標による自転車・歩行者混合交通のサービスレベル評価方法と分離必要度の分析，土木学会論文集，Vol. 68, No. 1, pp. 49-58, 2012.
- 10) 村上俊之：H23年度電動自転車の環境適応型安心安全支援制御補助事業報告書，2012.
- 11) 安部正人：自動車と運動と制御－車両運動力学の理論形成と応用 [第2版]，東京電機大学出版局，2012.
- 12) 増田千尋：3次元ディスプレイ，p.49，産業図書，1990.
- 13) 例えば，宮之上慶，鈴木美緒，高川剛，屋井鉄雄：自転車シミュレータの開発に向けたふらつき挙動及び再現性検証，第47回土木計画研究・講演集，2013.

(2015. 2. 27 受付)

PASSING BEHAVIOR AND SIMULATOR VALIDATION ANALYSIS ON TWO-WAY CYCLE TRACK WITH CYCLING SIMULATOR “MORICS”

Kei MIYANOUE, Mio SUZUKI, Tsuyoshi TAKAGAWA, Keisuke HOSOYA
and Tetsuo YAI

As you can see, there are many styles of implemented bicycle spaces in Japan, but some spaces are inappropriate for cyclists. One of those examples is that the safety problem of cyclists on narrow two-way cycle track are considered for a long time. In response to this problem, cycling on carriageways is being encouraged especially in the urban districts. However, we don't have the detailed guideline of bicycle facility design especially in intersections which is available for various attributes or purposes of cyclists and is also adequately-considered for vehicle drivers. In addition, the bicycle facilities on carriageway are likely to be hardly accepted because most of cyclists believe that they can ride bicycles more safely on sidewalks than on carriageways. Therefore, we need to examine various road designs and traffic situations to make clear what type of bicycle facilities are safer and more comfortable for cyclists and develop them.

Cycling simulators have gotten a lot of attention recently as one of the usable tools for above mentioned problems and we developed a new cycling simulator (“Morics”) which is available for not only traffic safety education but also safety analysis among other traffic modes. Then, the validity of experimental results with the simulator is one of the most important issues for safety analysis and dependent on the validity of traffic situations and bicycle control.

We conducted simulator experiment for the safety analysis in terms of the passing behavior on two-way cycle track and evaluated 2.0m-width two-way cycle track safety in terms of the passing behavior on two-way cycle track.