

自転車シミュレータの開発に向けた ふらつき挙動分析及び再現性検証

宮之上 慶¹・鈴木 美緒²・高川 剛³・屋井 鉄雄⁴

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
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

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)

Email: tkgw@tlvroom.com

⁴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
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:tyai@enveng.titech.ac.jp

自転車の車道走行が原則となり、各地で走行空間の拡充が検討されて整備が進む中、自転車利用者にとって決して快適だとは言えない空間が存在している。この現状を受け、走行空間を設ける際に安全性や利便性に対して事前評価が重要であり、そのためには車道走行する自転車の数が少ない現在では顕在化していない事故のリスクや心理的状态を検証する必要があると考えられる。本研究では、自転車走行環境及び、運転者の走行挙動を分析するための自転車シミュレータ（以下、CS）の開発において重要な検討課題である、ふらつき挙動の再現性について、まず最初に、ビデオ観測により実走でふらつきが想定されるケースを分析し、次に、その分析結果をもとにCS上でのふらつき挙動の再現性の検証を行った。また、CS上での運転挙動・運転感覚等の再現性についても併せて検証した。

Key Words : 自転車シミュレータ, 自転車道, ふらつき, 走行挙動, 再現性評価

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、自転車が快適かつ安全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²⁾、各地で自転車走行空間の拡充が検討され、実際に整備が進むが、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。例えば、桜通自転車道（名古屋）開通1年後のアンケート調査結果³⁾では、自転車道の安全性に対する評価として、各々約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、自転車道整備前後における満足度評価アンケートにおいて、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要因であることを指摘している。これより、自転車道整備後も交通量・幅員・柵の存在等が影響し、自転車利用者にとって依然としてストレスフルな走行環境が提供されてしまっている可能性が示唆される。このような現状を受け、自転車走行空間を設ける際に安全性や快適性に対して事前評価が重要であり、そのためには側方を走行する自動車との接触の危険性や走行中の心理的負担等、車道走行する自転車の数が少ない現在では顕在化していない事故のリスクや心理的状态を検証する必要があると考えられる。

そのための手段として、自転車シミュレータ（以下、CS）の有用性が期待されている。そこでまず、自転車

走行の安全性分析のためには、自転車そのもののもつ安定性や不安定性がシミュレータ上で表現されることが重要であるが、既存のCSでは、機構の安定性を表すふらつき挙動について表現されていないことが問題として挙げられる。

そこで本研究では、自転車走行環境及び運転者の走行挙動を分析するためのCSの開発において重要な検討課題であるふらつき挙動の再現性についてCSの適用可能性を検討するとともに、特に、直進時におけるペダリング等による自転車のふらつき挙動をCS上で再現した。次に、上記で述べた危険性が想定され、CSを用いた走行挙動分析が必要であると考えられる自転車道でのすれ違い挙動をビデオ観測によって分析し、すれ違い時における挙動特性を少しでも多くCS上で反映し、より高い再現性を確保したものにすることを目的とした。

2. CSの概要と再現性検討課題

2.1 本研究で用いるCSの概要

CSの概略図を図-1に、システム構成を図-2に示す。自転車のふらつきや傾きを表現しながら、ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）の使用によって視界制限を軽減し、2D画面を用いないコンパクトな作りとなっている点が特徴である。また、運転者自身の自転車を使用可能であり、様々な形状の自転車を常用している日本人にとって、走行感覚の向上につながっている。

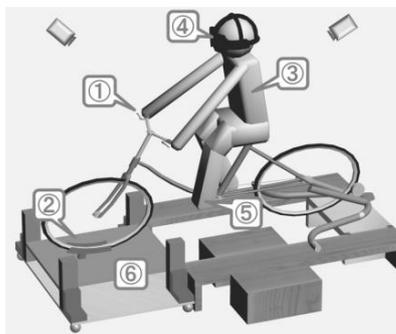


図-1. CSの概略図

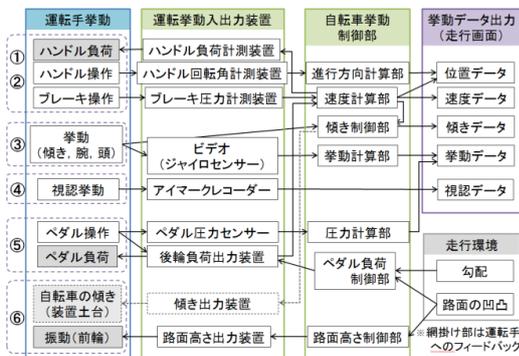


図-2. CSのシステム構成

2.2 CSの再現性検討課題

CSを実際の自転車の運転挙動や感覚に近づけるために、以下のような再現性の検討が必要である。

- ハンドル部：
ハンドルを切る際には速度等により反力が発生することから、ハンドル反力を変化させる要因を抽出した上で反力を表現するシステムが必要である。
- ブレーキ部：
実際は、前後輪のブレーキのバランスで制動を行うが、CSでは前輪を回転させない。そこで前後輪ブレーキにかかる力から仮想的に制動力を計算するシステムが必要である。
- 空走挙動：
現在のCSの速度は後輪に取り付けられた負荷発生装置の回転より計算される。その回転数とペダル負荷の感覚の両方を実走に近づけるために、自転車を漕ぎ止めた時、再び漕ぎ始めた時の走行を再現するシステムが必要である。
- ふらつき等の不安定走行挙動：
直進やカーブで自転車は傾き、その特性は速度により異なる。CSでは車体の傾きを伴う走行挙動が表現可能となるシステムが必要である。

上述したもの以外の再現性表現方法も併せてCS開発要件としてまとめたものを表-1に示す。次章では、その中でも特に重要である、ふらつき走行挙動の再現性について詳細に検討する。

3. 直進時におけるふらつき挙動の再現性

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る。そのために、ハンドル操舵角のモデル化を行う。

表-1. CS開発のシステム要件

		表現方法
自転車自体	速度	ロードジェネレータ
	傾き	モデル作成
	ハンドル操舵	モデル作成
	ペダリング	ペダル踏力の調整
	ブレーキ	ペダル踏力・ロードジェネレータ
走行感覚	音	ヘッドフォン
	風圧	扇風機&ヘッドフォン
	減速・勾配等	1軸上下動機構
	傾き	HMD画面上
	ハンドル操舵	HMD画面上
	HMD	114°視野角・パノラマ視野

3.1 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⁴⁾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⁵⁾、⑦セルフアライニングトルク⁶⁾が影響すると考えられる。

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。

3.2 ハンドル操舵モデルの考え方

3.1で述べた、①の"人為的な操舵"に対し、②～⑥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、"自動的な操舵"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、実際の走行のハンドル操舵角は定義可能と考えられる。

表-2に実走とCS走行によるハンドル操舵の考え方を、図-3にふらつき挙動を表現するまでに行われる、実走とCS走行によるデータ取得とモデル式推定の体系図を示す。まず、実走実験により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。

表-2. 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



図-3. ふらつき挙動を表現するまでの流れ

3.3 操舵角のモデル化

3.2で述べた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(1)のように、重回帰モデルによって表現する。

$$\theta(\text{操舵角}) = \beta_1 + \beta_2 \omega \dot{\phi} + \beta_3 \phi + \beta_4 P \dots \text{式(1)}$$

- ω : 車輪回転速度(rad/s)
- ϕ : 車体傾き角(deg)
- $\dot{\phi}$: 車体傾き角速度(deg/s)
- P: 右手ハンドル回転荷重(g)

3.4 モデル推定・検証のための実走及びCS実験

3.4.1 実走実験の概要

3.2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。

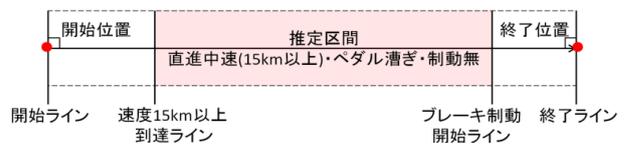
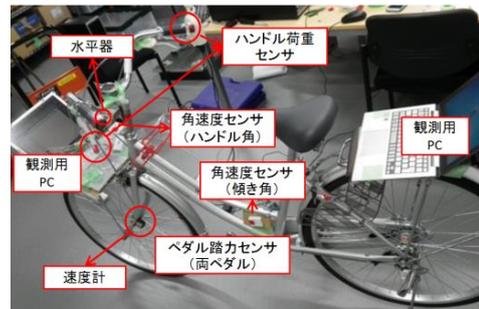


図-4. 実走実験の概要

3.4.2 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-3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3より、傾き角と右手ハンドル荷重に関しては符号が正となっている。これは車体が右側に傾けば傾くほど、右手ハンドル力が加わる程、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、これも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15km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-5) また、直進時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次

頁の図-6, 7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。

表-3.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	-6.71.E-01	-5.16
傾き角	1.02 ***	31.7
右手ハンドル荷重	3.36.E-03 ***	15.8
ジャイロ効果	-7.73.E-03 ***	-50.1
	***	0.1%有意

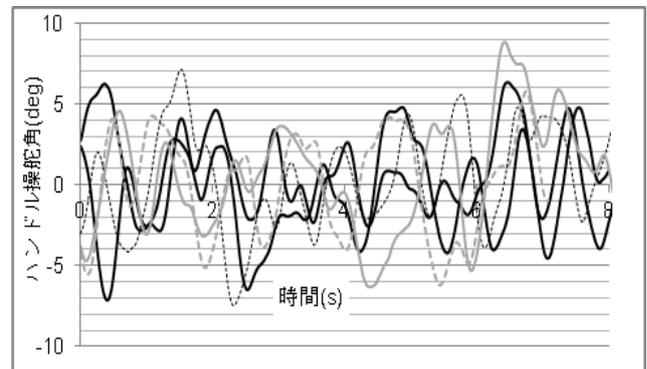


図-5.実走実験でのハンドル操舵角(正：右回転 負：左回転)

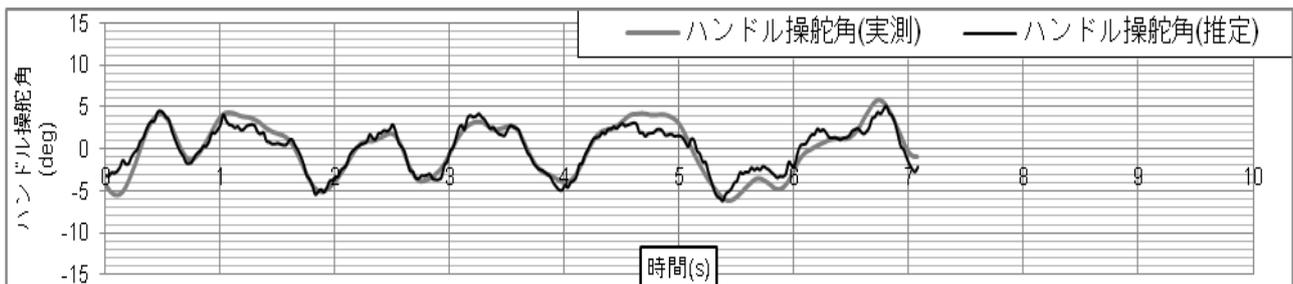


図-6.直進中速(15km以上)におけるハンドル回転角の実測値と推定値の時間的推移 (正：右回転 負：左回転)

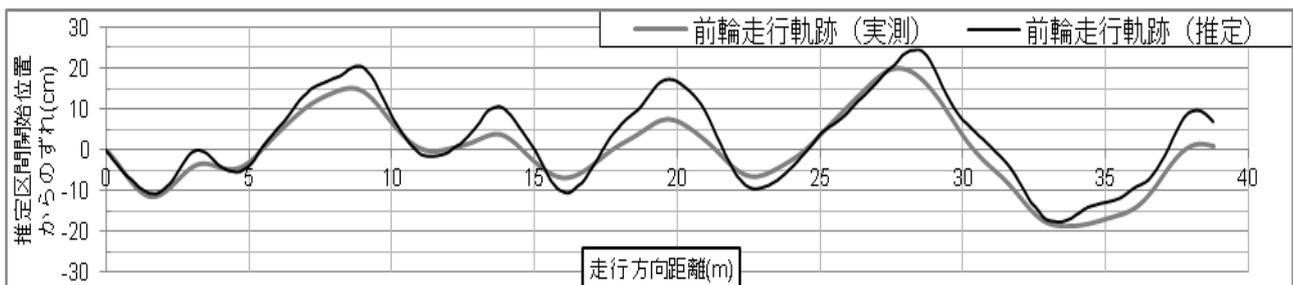


図-7.直進中速(15km以上)における走行軌跡の実測値と推定値の時間的推移 (正：運転者右手側 負：運転者左手側)

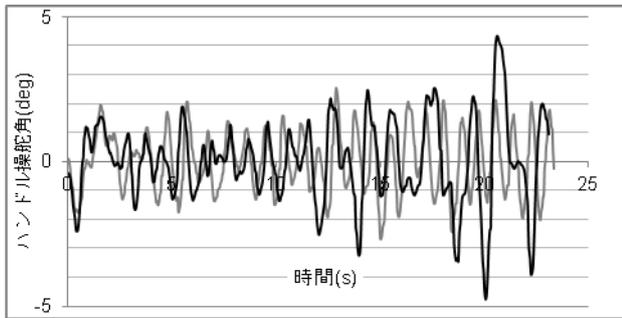


図-8. CS実験でのハンドル操舵角(正：右回転 負：左回転)

3.4.3 CS 走行実験

3.2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。図-8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。また、自然な走行であるという意見を被験者より聞くことができた。

4. 自転車道におけるすれ違い挙動

4.1 対象路線

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2.0m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-9)

4.2 観測された危険事象と挙動分析対象

ビデオ観測により、実際に確認された走行の安全性や快適性に関わる事象を以下に挙げる。これらの現利用者の挙動の中から、特に、すれ違い時における走行挙動に着目し、CS上ですれ違い場面を再現するために反映すべき挙動特性について検討を行うこととした。



図-9. 亀戸地区自転車道のビデオ撮影風景

(観測日時：2013.04.16 AM7:30～9:00, 11:00～12:00
2013.04.18 PM3:30～6:00)

- 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挙動
- 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挙動
- 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

4.3 ビデオ観測と挙動データの作成

幅員2.0mの自転車道の真上、約5mの高さ(歩道橋の上)からビデオ撮影し、約40m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

4.4 すれ違い挙動分析結果と考察

図-10に、すれ違い時の自転車の間隔の分布、図-11に、その時の速度分布を示す。

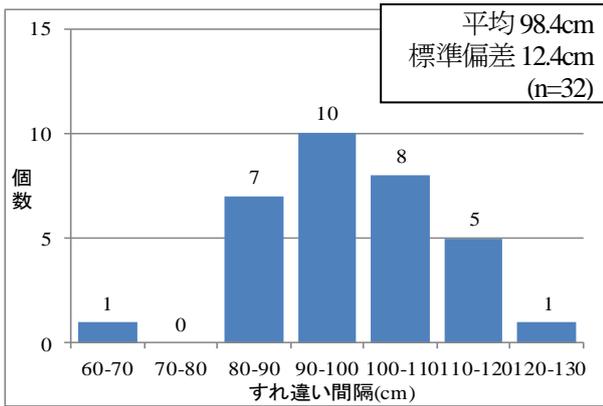


図-10. すれ違い間隔の分布

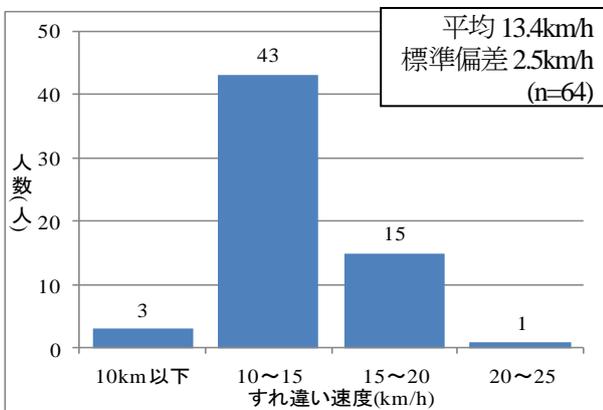


図-11. すれ違い時の自転車速度の分布

また、すれ違う自転車同士の相対速度が大きい程、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-4、図-12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。また、例えば、時速15km同士と、時速25km・時速5kmの場合と、相対速度は等しいので、同じ条件として評価することとなり、個々の速度を基準として見る必要性もうかがえる。

次に、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-5、図-13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、自転車同士の速度差が大きいほど、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。

表-4. 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	

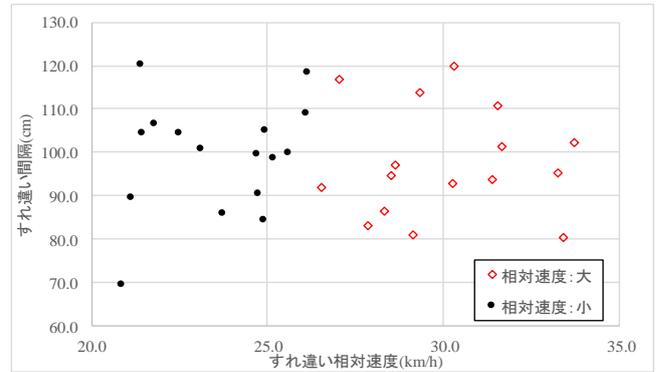


図-12. 自転車の相対速度とすれ違い間隔の関係

表-5. 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)

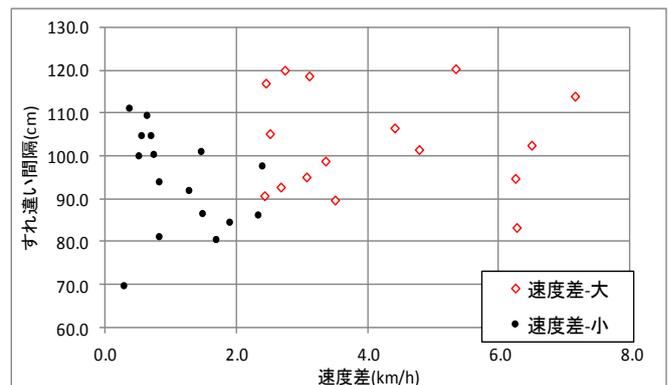


図-13. すれ違い間隔と速度差との関係

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15m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つのみであり、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。

表-6. 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

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。サンプル数が少ないので断定はできないが、すれ違い時に、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2.0mの自転車道内で現利用者の大半は、すれ違い時にガードレールや対向車との接触の危険性を認知しながらも、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。と同時に、駅前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。

5. CS実験によるすれ違い挙動再現性検証

5.1 すれ違い時の自転車挙動の特徴と再現性検討項目

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、運転者は空走及び制動挙動を行うことは少なく、多くの場合、ペダルを漕ぎ続け、速度をほぼ一定に保ちながらすれ違う
- すれ違い時に、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、すれ違い間隔に影響を与えている

これらの特徴から、自転車道におけるすれ違い挙動においてCS上で再現されるべき追加要件として、ペダルを漕ぎ続けている時の速度が運転者自身の感覚と合致すること、また、HMDを装着した状態でお互いの速度差を視覚的に感じることができ、最後に運転者自身の思うようにすれ違い間隔を相手の自転車との間にとることが出来ることが挙げられる。



図-14. CS実験コースの簡略図

5.2 すれ違いCS実験の概要

5.1で検討した再現性検討項目について、CS上で再現されているかの検証実験を行う。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、4.4で推察される内容をもとにアンケート調査を行った。再現性検討結果については発表時にゆずる。

6. おわりに

本研究では、ふらつきを伴う自転車の危険事象をCS上で再現するために、まず、直進時におけるペダリング等によるふらつき挙動を、ハンドル操舵角や自転車傾き角、自転車速度を用いてCS上で表現した。また、実挙動分析から自転車道におけるすれ違い場面をCS上で再現するための要件について知見を得ることができた。

次に、現利用者の実道路環境における走行挙動、特に、自転車道における自転車同士のすれ違い挙動を分析し、双方の速度差が大きいほどすれ違い間隔が大きくなることを有意に示すことができた。また、自転車同士がすれ違う時に、現利用者の大半は速度低下や空走といった安全挙動を伴わず、ペダルを漕ぎ続け、速度維持をしたまま走行している傾向があることが示された。これより、ガードレールや対向車との接触の危険性を認知しながらも、自身の走行を安定させる速度で通過しようとしている可能性が懸念され、すれ違い時のストレスについても調査する必要があると言える。さらに、集計した運転者の大半は、自転車道の日常的利用者であることが想定され、危険事象に対して比較的順応に対処可能な運転者であることが考えられる。幅員2.0mの自転車道で安全で快適な走行が可能かについては、すれ違い場面の再現性を検証した今、走行中の心理的負担や個人属性を追加考慮し、慎重に議論すべきであると言える。

参考文献

- 1) 国交省道路局、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、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) 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
- 5) 安部正人著、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