

自転車シミュレータの開発におけるふらつき挙動の再現性に関する研究 A Study on the Reality of Weaving with Development of Cycling Simulator

屋井研究室 11M30405 宮之上 慶 (MIYANOUE Kei)

Keywords : 自転車シミュレータ 走行挙動 ふらつき挙動 再現性評価
Cycling Simulator Bicycle Motion Weaving Reality Evaluation

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。

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利便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。そのため的手段として、自転車シミュレータ(以下、CS)の有用性が期待されている。しかし、自転車走行の安全性分析のためには、自転車そのも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ではふらつき挙動が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ことを第一目的とし、同時にCS上での運転者の運転挙動・運転感覚といった再現性についても合わせて検討を行った。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

現在、CSは主に教育訓練用²⁾として、運転教習や交通ルールの徹底等に使用されている。CS開発例の少ない中、交通事故要因の解明や道路設計の評価といった応用研究目的のために開発された前例は無い。

一方、自転車のふらつき挙動に関して、傾き・ハンドル操舵³⁾、ペダル操作⁴⁾、速度⁵⁾、振動特性やタイヤ特性といった車体剛性、運転者属性といった様々な基礎的研究がなされている。

さらに、自転車挙動観測用のプローブバイクの研究⁶⁾も存在するが、本研究では、これらの研究の知見を一つに統合し、ふらつき挙動が再現された自転車シミュレータの開発を行う。

3. CSの概要と再現性検討課題

3.1 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。

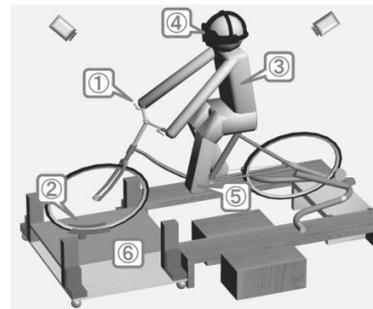


図1. CSの概略図

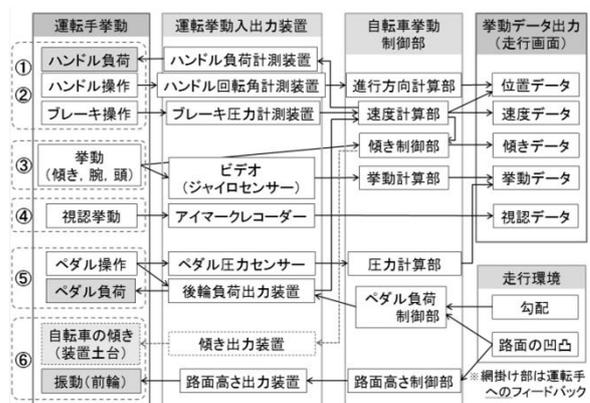


図2. CSのシステム構成

3.2 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発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。

4. ふらつき挙動の表現

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

4.1 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⁷⁾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⁸⁾、⑦セルフアライニングトルク⁸⁾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。

4.2 ハンドル操舵モデルの考え方

4.1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

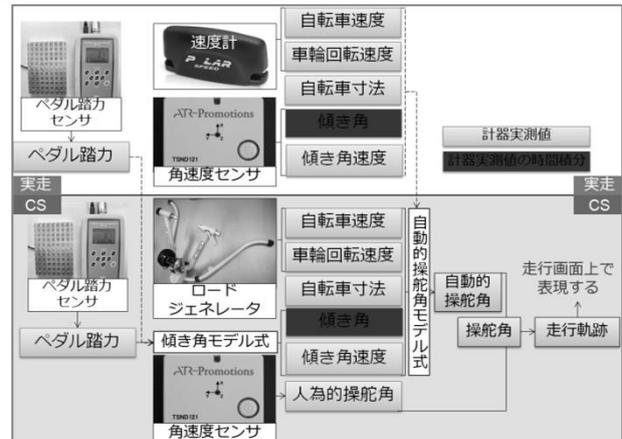


図3. ふらつき挙動を表現するまでの流れ

4.3 操舵角のモデル化

4.1 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、重回帰モデルによって表現する。(式(1))

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

- 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)

5. モデル推定のための実走実験

5.1 実走実験の概要

4.2 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めるため、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。

5.2 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



図 4. 実走実験の概要

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 回繰り返し走り、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。ゼロ補正後の値を用いたハンドル角の推定結果を表 3 に示す。

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、右手ハンドル力が増える程、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

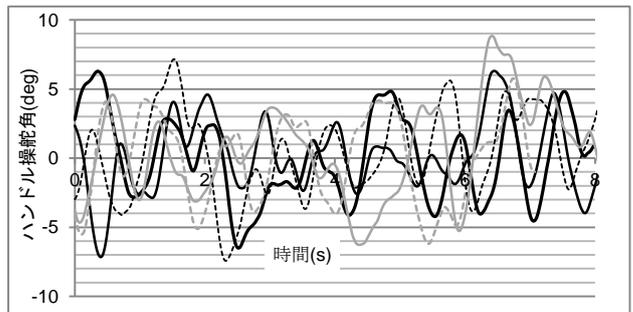


図 5. 実走実験でのハンドル操舵角(正: 右回転 負: 左回転)

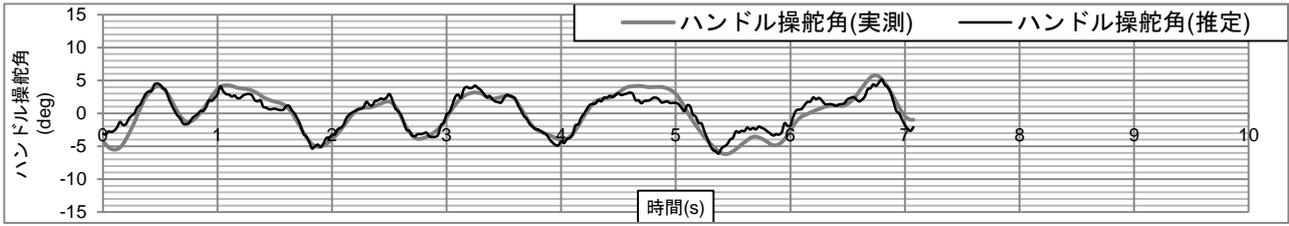


図 6. 直進中速(15km 以上)におけるハンドル回転角の実測値と推定値の時間的推移 (正 : 右回転 負 : 左回転)

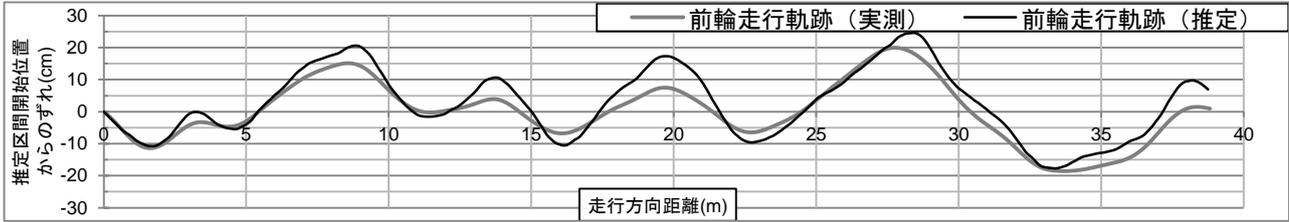


図 7. 直進中速(15km 以上)における走行軌跡の実測値と推定値の時間的推移 (正 : 運転者右手側 負 : 運転者左手側)

6. CS 走行での再現性検証

6.1 CS 走行実験の概要

5.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.CS 走行実験の様子

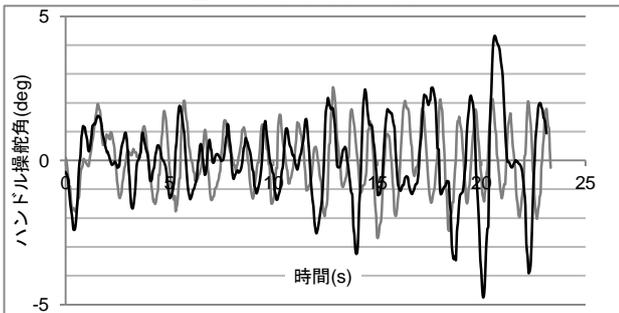


図 9. CS 走行実験でのハンドル操舵角(正 : 右回転 負 : 左回転)

6.2 実験結果

図 9 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。

7. おわりに

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 開発におけるふらつき挙動の再現性を検討した。その際、直進中速における自転車のふらつき挙動をハンドル操舵角を用いた簡易なモデルによって表現し、CS 上での挙動の再現性や運転感覚の向上に関しても確認することができた。なお、データ取得においては、計測機器の精度や実験を行う環境において厳しい制約があったが、度重なる計測機器のキャリブレーションや、実験方法の工夫を行うことでデータを高精度で取得することが可能となった。今後は、データ取得が容易な観測用自転車の設計をし、被験者を増やすことで、より一般的なふらつき挙動の再現を行うことを課題としたい。

<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) 鈴木ら,安全運転教育用自転車シミュレータの開発,本田技術研究所,2010
- 3) 仁木ら,ハンドル制御による電動自転車の走行安定化に関する一考察,電子情報通信学会論文誌 D, 125 巻 8 号, 2005
- 4) Chang K.Cho et al., An ergonomic study on the optimal gear ratio for a multi-speed bicycle, International Journal of Industrial Ergonomics 23 (1999)pp.95-100
- 5) K.J.Astrom, Bicycle Dynamics and Control
- 6) 山中ら,プロップバイクを用いた日中の自転車空間の走行特性比較,交通工学研究発表会論文報告集,2008
- 7) 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
- 8) 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