T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	シミュレータ環境への適応性を考慮した交通安全分析用自転車シミュレータの開発
Title(English)	Development of Cycling Simulator for Traffic Safety Analysis Considering an Adaptability to the Simulator Environment
著者(和文)	宮之上慶
Author(English)	Kei Miyanoue
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10206号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:屋井 鉄雄,朝倉 康夫,盛川 仁,室町 泰徳,福田 大輔
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10206号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

平成27年度 学位論文

シミュレータ環境への適応性を考慮した交通安全分析用自転車シミュレータの開発

-Development of Cycling Simulator for Traffic Safety Analysis Considering an Adaptability to the Simulator Environment-

指導教官　　屋井 鉄雄 教授
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

宮之上　慶
Kei MIYANOUE

第1章 序論 1
1.1 本研究の背景 2
1.2 本研究の目的 4
1.3 本研究の構成 5

第2章 既往研究の整理と本研究の位置づけ 7
2.1 CS 開発に関する既往研究の整理 8
2.2 シミュレータ環境への適応性に関する既往研究の整理 16
2.3 対面通行自転車道での走行挙動を扱った既往研究の整理 22
2.4 追い越し挙動を扱った既往研究の整理 23
2.5 CS 開発計画及び本研究の位置づけ 24

第3章 交通安全分析用自転車 シミュレータ"MORICS"の概要と再現性向上のための工夫 26
3.1 "MORICS"の概要と開発コンセプト 27
3.2 人間特性に着目した CS 開発の方向性の検討 28
３.２.１ 運動学習 28
３.２.２ 意思決定プロセスが存在する課題 29
３.２.３ 同期的マルチタスクな課題 30
３.２.４ 人間特性に着目したシミュレータ環境への適応性を考慮した CS 開発の方向性 31
3.3 運転挙動・運転感覚の再現性向上に向けた CS 開発項目の検討 32
３.３.１ 速度 33
３.３.２ 傾き 33
３.３.３ ステアリング 34
３.３.４ ブレーキ 34
３.３.５ 慣性力(その他) 35
3.4 "MORICS"のシステム開発と再現性向上のための工夫 35
３.４.１ ハンドル操作の表現と再現性向上のための工夫 35
３.４.２ 空走状態・ブレーキ制動の表現と再現性向上のための工夫 40
３.４.３ ペダリングの表現と再現性向上のための工夫 41
３.４.４ 頭部動作及び視界環境の表現と再現性向上のための工夫 41
３.４.５ 傾きの表現と再現性向上のための工夫 42
３.４.６ 減速・勾配・段差・路面凹凸 43
3.5 結語 44

第4章 ハンドル・ペダル操作に起因する走行挙動の不安定性の再現 45
4.1 自転車操作に起因する挙動の不安定性に影響する項目の整理 46
４.１.１ キャスター角，トレイル 46
４.１.２ ジャイロ効果 47
４.１.３ 重量効果 48
４.１.４ サイドスライド効果 49
４.１.５ トレール効果 49
４.１.６ キャンバースラスト効果 50
４.１.７ セルフアライニングトルク 50
４.１.８ 自転車の運動モード 51
4.2 直進中速走行時のハンドル・ペダル操作に起因するふらつきの表現 53
４.２.１ ハンドル操舵角モデルの考え方 53
４.２.２ 実走実験 55
４.２.３ モデル推定 61
４.２.４ 誤差発生要因の検討 65
４.２.５ ふらつき挙動の再現性確認 CS 実験 66
4.3 対面通行自転車道シナリオの開発要件の設定及び CS の改良 68
４.３.１ 対面通行自転車道における CS 開発要件の設定 68
４.３.２ 対面通行自転車道シナリオにおける再現性検証実験 75
4.4 対面通行自転車道におけるすれ違い挙動観測実験 77
４.４.１ CS 実験の概要 77
４.４.２ シミュレータ環境への適応性に関わる実験結果・考察 77
４.４.３ 対面通行自転車道における走行挙動に関わる実験結果・考察 78
4. 5 結語 83

第５章 ブレーキ制動や空走による速度減衰挙動の再現 84
5.1 空走・前後輪ブレーキ・再漕ぎ出し挙動の表現 85
５.１.１ 速度減衰に影響する項目の整理 85
５.１.２ 速度減衰モデルの設計 86
５.１.３ 速度減衰モデルの推定 87
５.２ 駐車車両追い越しシナリオの開発要件の設定 90
５.２.１ 実走実験の概要 90

５.２.２　実走実験観測結果と考察.....91
５.２.３　駐車車両の追い越し場面におけるCS の再現性要件.....94
5.3 駐車車両追い越し挙動観測 CS 実験.....97
５.３.１　CS 実験の概要.....97
５.３.２　駐車車両追い越し場面における走行挙動に関わる実験結果・考察.....98
5. 4 結語.....102

第６章 シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良 _____ 103
６.１ シミュレータ環境への適応性に着目した CS 走行実験.....104
６.１.１　シミュレータ環境への適応段階における課題抽出のためのCS走行実験の概要.....104
６.１.２　実験結果.....106
６.２ シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良.....114
６.２.１　ハンドルの復元力と回転負荷の調整.....114
６.２.２　駐車車両追い越し場面走行に向けた HMD 支持装置の改良・微調整.....115
６.２.３　普段通りの自転車に乗ってもらう感覚をより早く再現する工夫.....115
６.２.４　実験時間の調整.....115
６.３ シミュレータ環境への適応観測 CS 実験.....115
６.３.１　CS 走行実験の概要.....115
６.３.２　CS 走行実験結果・考察.....117
6. 4　結語.....123

第7章 総括 _____ 124
7.1 本研究の成果.....125
7.2 今後の課題.....126

参考文献

第１章　序論

１.１　本研究の背景

１.２　本研究の目的

１.３　本研究の構成

１.１ 本研究の背景

近年，二酸化炭素を排出しないエコな乗り物である自転車は，近・中距離移動における身近な交通手段として注目されている．しかし，我が国での自転車を取り巻く状況は決して芳しいものとは言えない．図 1. 1 は自転車乗用車の法令違反別死傷者数を表しており，交通ルール違反による死傷者の割合が全体の 65%を占めている [1)]．また，道路交通法の改正により自転車は原則車道走行となったが，図 1. 2 に示されるようにルールを知っているのにも関わらず遵守しない人が多く [2)]，自転車交通ルールやマナーの教育の必要性が窺える．このような事態が生じた理由として，我が国における自転車交通の歴史が挙げられる．

1970 年の道路交通法改正以降，それまで車道走行であった自転車が自動車との交通事故の増大を理由に歩道通行が可能となり約 40 年，現在では歩道通行が常態化している．2007 年に再度自転車を車道走行に戻すべく道路交通法が改正されたが，歩道通行する自転車の数は絶えず，図 1. 3 に示されるように自転車対歩行者の事故件数が近年，増加傾向となっている [3)]．一方，車道上に整備される自転車走行空間も図 1. 4 のように路上駐車等による直進性，安全性の低下が懸念されるものが存在し，その環境は決して自転車利用者にとって良いものであるとは言えない．また，導線確保や幅員が不十分な対面通行自転車道もそのような空間の一つとして挙げられる．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 [4)]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 [5)]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．2012 年 11 月，わが国でもようやく自転車走行空間のためのガイドライン [5)]が作られ，自転車専用レーンを基本形態とする自転車走行空間のネットワーク化に向けて空間整備が行われている．

このような，我が国が抱える自転車安全問題や走行空間設計に関する課題を解決する一つの有効な手段として，近年，交通安全教育ツールとして普及しつつある [6)]自転車シミュレータ（以下，CS）が国内外を問わず注目されている [7,8)]．（図 1. 5）

一般的に，シミュレータを用いることで，安全性分析には，「実走行では安全性の確保が困難な事故やヒヤリハット等の実験条件が可能」，「道路環境や車両特性，他車両挙動を任意に設定可能」，「同じ運転状況を繰り返し実行可能」，「発生事象，運転者の反応・操作等の観測が容易」といった利点が存在する．また，空間設計・評価には，「コストや法規制により実際に整備困難な走行空間や，社会実験を行うことが不可能である走行空間での評価が可能」といった利点が存在する．

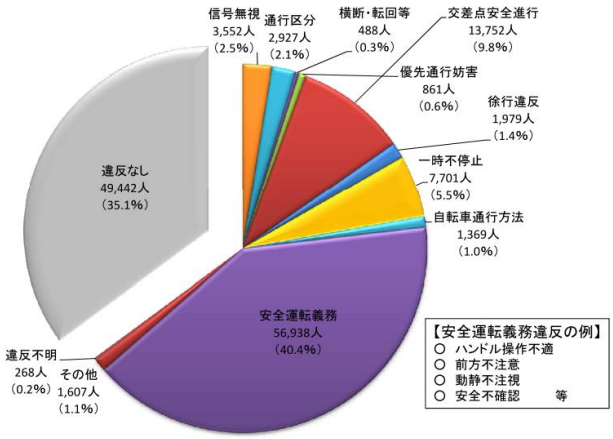


図 1. 1 自転車乗用者（第 1･2 当事者）の法令違反別死傷者数（H.23）[1)]

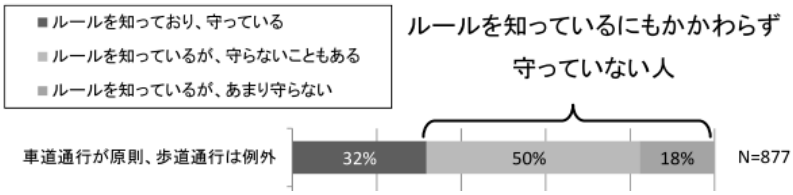


図 1. 2 自転車通行ルールに関する遵守状況（H.23）[2)]

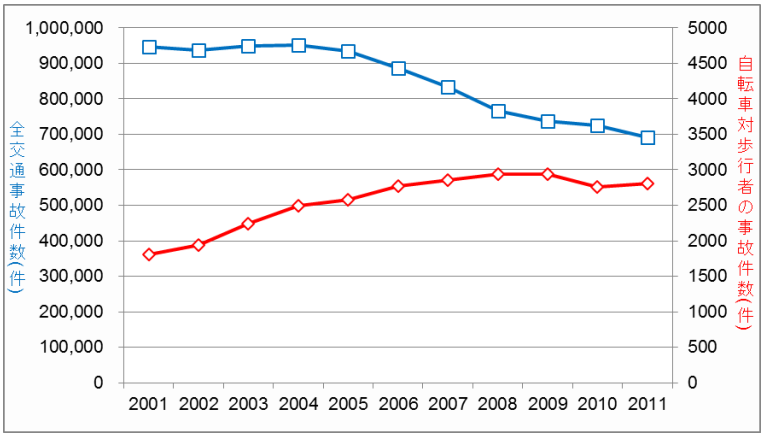


図 1. 3 全交通事故件数（青線）及び自転車対歩行者事故件数（赤線）の推移 [3)]

図 1. 4 直進性が確保されない自転車走行空間の例 (※google street view より画像転用)

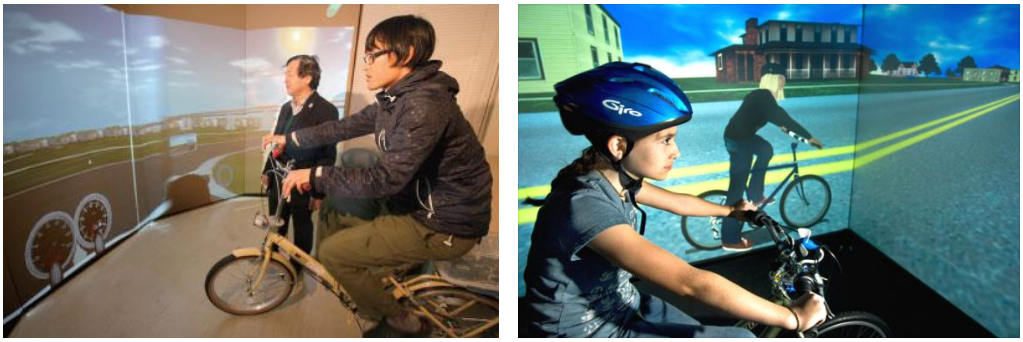


図 1.5　国内外を問わず開発が進む自転車シミュレータ（左：徳島大学　右：米アイオワ大学）[7,8)]

安全性分析や空間設計・評価に CS を用いる場合，シミュレータを利用することでの恩恵を十分に受けるためにも，現実環境で運転しているような感覚があるかどうかが非常に重要である．しかし，実際には，現実環境とシミュレータ環境の運転挙動や運転感覚は完全には一致しない．

例えば，自転車走行しているときに取得している外部情報は，運転感覚を表現するためのデバイスの処理能力や精度といった技術的な制約により，両者の間で必ず相違が存在する．この相違が，シミュレータ酔いという乗り物酔いに似た現象に繋がり，シミュレータ利用を妨げる一因となっている．そのため，相違をどれだけ少なくすることができるかがまず，第一に重要であると言える．また，両者の環境の相違を埋めようと，運転者はシミュレータ環境の中で学習し，適応しようとする．この場合，適応とは，「現実環境とは異なるシミュレータ環境において，現実環境と同じように安全に自転車を運転するために意思や行動を変えること」を意味している．そこで，運転者がどのようにシミュレータ環境へ適応していくかを観察し，シミュレータ環境への適応後に，現実環境で運転しているような感覚があるかどうか，実際に運転挙動として観察できるかどうかについて注目することが重要であると言える．

１.２　本研究の目的

１.１で述べたように，交通安全性分析，自転車走行空間設計・評価ツールとして CS が国内外で注目される中，運転感覚のリアリティの確保は，シミュレータ環境への適応性も含め注目すべき大変重要な課題である．

そこで，本研究では，現実環境とシミュレータ環境との間の相違がシミュレータ環境への適応性に与える影響や運転感覚の再現性について検討を行いながら，錯綜の危険が懸念されている対面通行自転車道や駐車車両追い越しのような場面で交通安全分析を可能とする自転車シミュレータの開発を行うことを目的とする．

その際，再現性の評価を走行軌跡や速度，ハンドル操舵角等の物理量やアンケート調査による運転感覚の主観評価値を軸に行い，さらに適応段階における練習時間やプロセス，シミュレータ酔いの程度についても併せて調査を行うこととする．

１.３ 本研究の構成

本研究の構成を図 1. 6 に示す.

第 2 章では，国内外で開発されている CS 及び，シミュレータ環境に適応する運転者に関連する既往研究を調査し，既往研究で開発された CS を交通安全性分析用 CS として用いた場合の課題についてまとめた．次に，対面通行自転車道での走行挙動，追い越し挙動を扱った既往研究を整理し，交通安全性分析用 CS としての妥当性を検証するために行ったシナリオ走行挙動分析の位置づけを示した．最後に，本研究における交通安全分析用 CS の開発計画の全体像を示した.

第 3 章では，第 2 章で示した開発計画を元に CS のハード・ソフト設計を行い，特に運転感覚の再現性に関係する部分について詳細を明らかにした.

第 4 章では，既往研究で開発された CS をそのまま用いてしまうと，自転車が自立することからハンドルを操作しなくても安定して真っすぐ走れてしまうという課題を解決するために，直進中速時のペダル操作や自転車の傾きによる左右へのハンドルの自然なブレを再現し，現実環境と同じようなハンドル操作の不安定性を機能として加えた．次に，第 4 章までの機能を備えた CS の交通安全分析用としての妥当性を示すために，「対面通行自転車道での対向自転車とのすれ違い挙動」について分析を行い，運転挙動や運転感覚の再現性について確認し，2.0m の狭幅員対面通行自転車道における危険性について明らかにした.

第 5 章では，既往研究で開発された CS をそのまま用いてしまうと，前輪ブレーキのみをかけても止まらない，また，自転車が運動状態にないので，ブレーキをかけてもすぐ速度が落ちてしまうといった課題を解決するために，前後輪ブレーキ量に応じて，現実環境の速度減衰を HMD 画面上で再現し，現実環境と同じようなブレーキ・空走挙動を機能として加えた．次に，第 5 章までの機能を備えた CS の交通安全分析用としての妥当性を示すために，「駐車車両の追い越し挙動 107597」について分析を行い，運転挙動や運転感覚の再現性について確認し，駐車車両追越し時における後方接近車両位置や自転車専用レーンの有無が自転車運転者の走行挙動や心理に与える影響について明らかにした.

第 6 章では，比較的シミュレータ環境に適応力が高い学生を対象とした第 5 章までの検討では明らかとならなかった，高齢者や女性，機械に不慣れな人や乗り物酔いになりやすい人といったシミュレータ環境への適応力が低い運転者を対象として，シミュレータ環境への適応性について調査を行い，彼らでも利用することができる CS に向けたシステムや実験方法に関する改良を行った．次に，改良後の CS を用いて彼らのシミュレータ環境への適応性について観測を行い，乗り物酔いになりやすい人以外の運転者において，シミュレー

タ酔いの発生も無く，運転感覚の再現性について確認することができた．

最後に，第 7 章では，本研究の成果についてまとめ，自転車走行シナリオや被験者属性の拡大に向けた今後の課題について整理を行った．

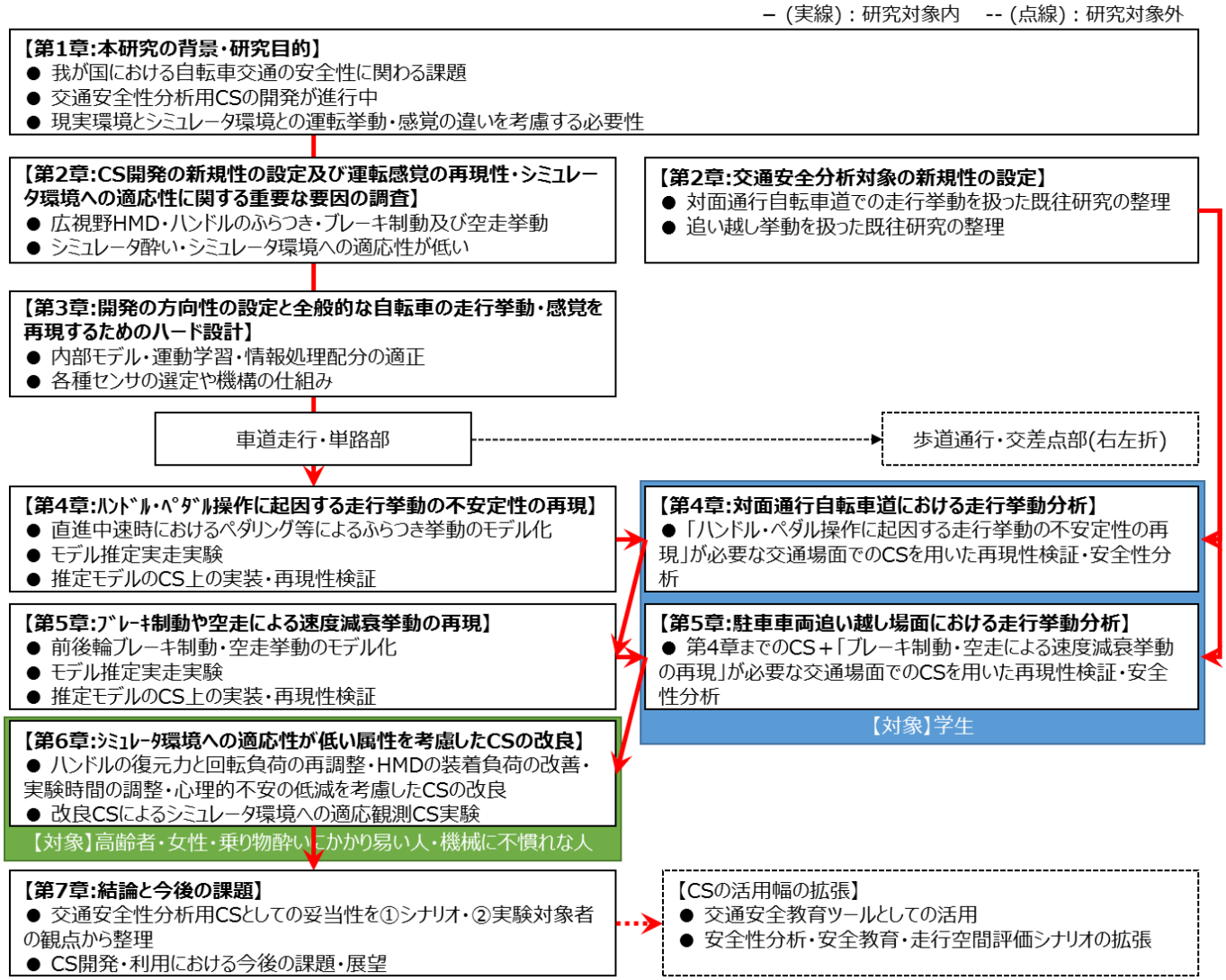


図 1.6　本研究の構成

第 2 章

既往研究の整理と

本研究の位置づけ

１.１ CS 開発に関する既往研究の整理

１.２ シミュレータ環境への適応性に関する既往研究の整理

１.３ 対面通行自転車道での走行挙動を扱った既往研究の整理

１.４ 追い越し挙動を扱った既往研究の整理

１.５ CS 開発計画及び本研究の位置づけ

本章では，交通安全分析用 CS を開発するために，まず，国内外で開発されている CS 及び，シミュレータ環境に適応する運転者に関連する既往研究を調査し，既往研究で開発された CS の特徴や交通安全分析に対する課題についてまとめる．次に，対面通行自転車道での走行挙動，追い越し挙動を扱った既往研究を整理し，交通安全性分析用 CS としての妥当性を検証するために行ったシナリオ走行挙動分析の位置づけについて明らかにする．最後に，本研究における交通安全分析用 CS の開発計画の全体像を示す．

１.１ CS 開発に関する既往研究の整理

本節では，国内外で開発されている CS に関する既往研究から，ハンドルやブレーキ，視界環境等の開発項目やシステムの特徴をレビューし，交通安全分析用 CS を開発するために必要なデバイスや機構を検討する上で重要な情報を収集し活用することが目的である．

交通安全分析を目的とした CS 開発を扱った既往研究はいくつか存在する．溝口ら [7]は，軽快車を搭載した後輪固定型で，2D 画面を 5 枚使用した広視野角の CS を用いて，自転車走行速度・駐車車両との距離感，標識の判読距離の比較実験を現実環境との比較を行いながら，CS の性能分析を行っている．この CS は，図 2. 1 に示すような，半径 200cm の半円に内接する形で高さ 2.4m 幅 1.2m のパネルを 5 枚使用し，3 台のプロジェクタ投影方式（解像度 1024×768）を採用している．プロジェクタの画像は，幾何補正ソフトを用いて折れ曲がりスクリーン形状への補正及び重なり部分のブレンディングを行っており，水平視野角約 170 度，垂直視野角 45 度の画角で視野が確保されている．結果として，走行速度については，シミュレータ環境の方が，速度が出やすく（指示速度の約 50%増），車間距離に関しては，2D 画面による奥行き感の制約によってか，シミュレータ環境の方が長く距離を取ろうとしている．（現実環境の値よりも約 50%増）また，看板や路面表示文字の判読距離については，プロジェクタ方式の解像度の課題により，シミュレータ環境の方が短くなってしまう（現実環境の値の約 30%～40%）ことが示されている．近年，この研究室では，DS と同じ空間を共有させ，インタラクティブな自転車×自動車の走行挙動分析を可能とするシステム開発が進んでいる [9]．

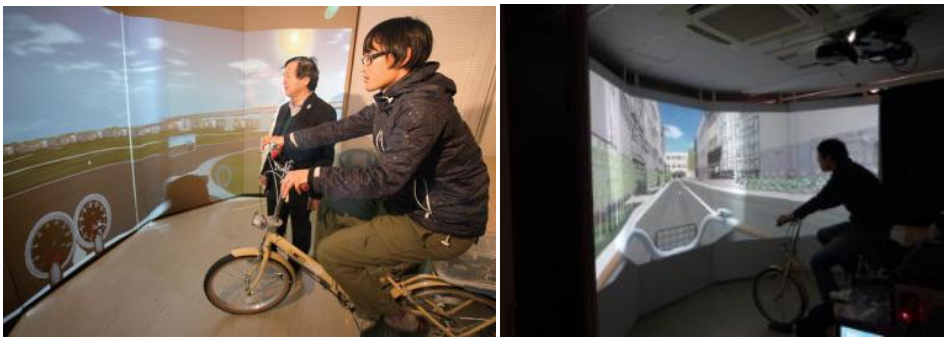


図 2. 1 5 枚の 2D 画面を使用した CS 走行の様子

Plumert ら [10]は，10 歳～12 歳までの子供と大人を対象に，交差点で他車両との間合いと取りながら自身が動くタイミングについて，交通量に応じた実験環境を準備し，CS を用いて走行挙動分析を行っている．この CS は，図 2. 2 に示すような，軽快車を搭載した後輪固定型で，2D 画面を 3 枚使用し，270 度の水平視野角が確保されている．結果として，10 歳の子供の方が，対向車との間合いを取る時間をより多く必要とし，12 歳の子供と大人との間で，その時間に有意な差はなかったことが示されている．

図 2. 2　3 枚の 2D 画面を使用した CS 走行の様子

長ら [11]は，空間制約下の道路において車線内左端部に塗装を施し自転車通行帯の目安とする一方通行の自転車通行帯を想定した上で，その通行帯と幅，運転者の心理との関係を，CS 実験を通じて明らかにすることで，最適幅の検討を行っている．この CS は，図 2. 3 に示すような，軽快車を搭載した後輪固定型で，HMD（水平視野角 45 度）を使用している．しかし，ハンドル操作の反映については困難なため対象としないことが明記されており，ハンドルが利かない状態で真っすぐ走る実験を行っている．30cm ごとに 0m～1.2m まで検討した結果，HMD の視野制約のためか，60cm と非常に狭い幅が最も望ましいことが示されている．

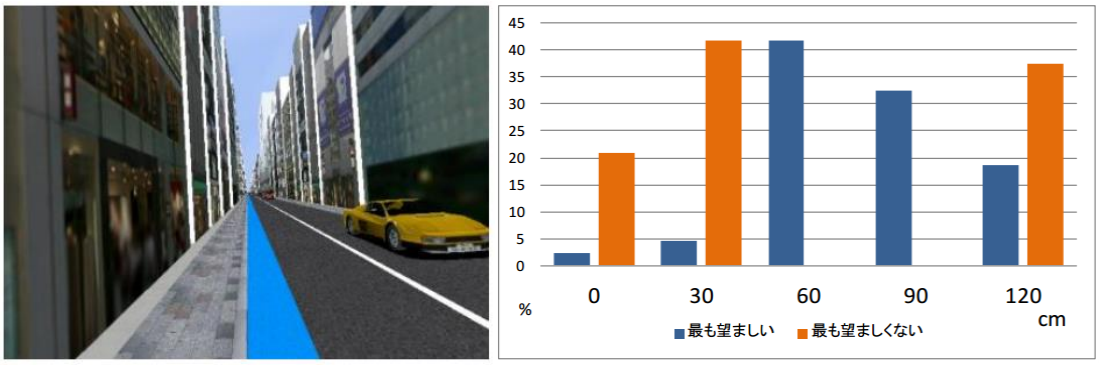


図 2. 3　HMD 画面（左）と自転車通行帯の幅に対する選好アンケート調査結果（右）

Oregon 大学（米国）の Hurwitz 研究プログラム [12]では，交通安全分析用に CS を独自開発しており，図 2. 4 に示すように，後輪固定型で 2D の画面を 1 枚使用した簡素な構造でありながら，様々なタイプの自転車と搭載することが可能であり，後方確認用に LCD ディスプレイがバックミラーとして機能している．また，ドライビングシミュレータ（以下，DS）を CS と同じ空間に共有させることで，インタラクティブな自転車×自動車の走行挙動分析が可能なシステムとなっている．

図 2. 4　様々な自転車を搭載可能な CS

その他にも，成田ら [13]は，図 2. 5 に示すような本田技研の CS[6]を用いて，大学生と高齢者におけるハンドル等の自転車操作の比較を行っている．

図 2. 5　Honda 自転車シミュレータ（ハードの特徴）[6]

交通安全分析以外の分野でも CS 開発が進んでいる．福祉の分野では，リハビリを行う中で，"再び自転車に乗りたい"という要望から，高齢者などで，下肢の筋力低下や関節痛で歩行が困難であっても，自転車であれば移動可能な人は多く，歩行の代替移動手段として利用することで，生活の自立度が高まる．しかし，自転車を用いて実際にリハビリを行うためには，広い場所の確保，転倒や衝突による事故を防ぐため複数のセラピストが補助を行う等，安全確保に十分な設備と人員が必要であるため，実施は容易ではない．そこで，東洋大学の医用・生活支援メカトロニクス研究室[14)]では，脳血管障害者が安全に自転車の運転訓練を可能とする，リハビリテーション用 CS 開発を行っている．この CS は，図 2. 6 に示すように，後輪固定型の 2D 画面を 1 枚使用した簡素な構造となっている．

図 2. 6 リハビリテーション用 CS の外観

Carraro ら[15)]は，Peloton という VR 空間を作製するための言語を用いて CS システムを開発している．この CS は，図 2. 7 に示すように，後輪固定型で自身のアバターを，PC 画面を見ながらコントロールするという簡素なシステムながら，一度に多くのユーザが同じ空間を共有できるシステムが開発されている．また，娯楽・トレーニング用で快適性を考慮したためか，風環境が扇風機によって再現されている．

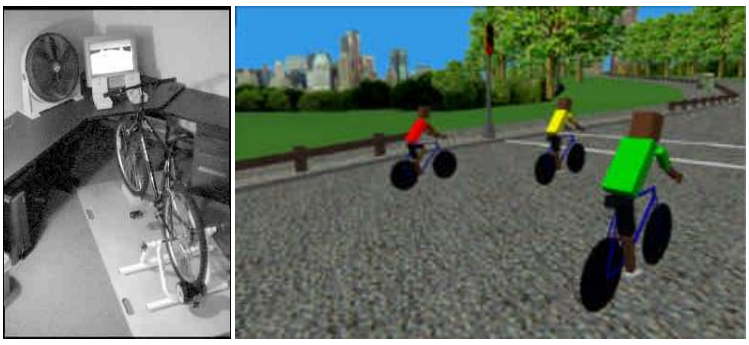


図 2. 7 マルチユーザスポーツ CS の外観

小林ら[16]は，高齢者向けの安全かつ継続可能な運動を提供する CS システムを開発している．この CS は，図 2. 8 に示すように，水平視野角は 45 度以下ながらも，立体視が可能な 2D のディスプレイを用いており，また後輪速度を計測するロードジェネレータに円筒型 MR（磁気粘性：Magneto-rheological）流体ブレーキを用いて，よりリアリティのある速度減衰を再現していることが特徴である．

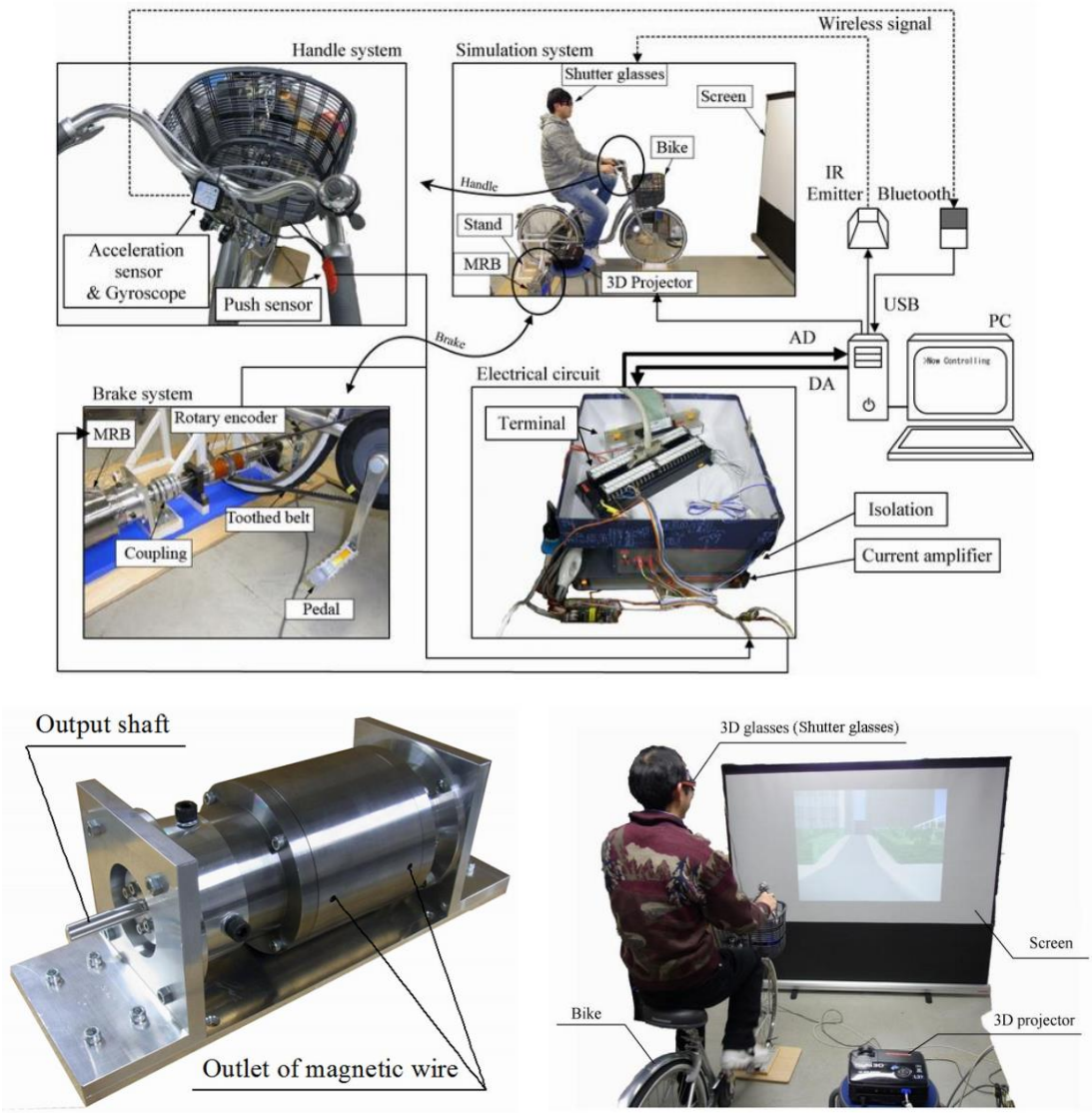


図 2. 8　MR 流体ブレーキを用いた CS のシステム構成と外観

これまでの CS は，自転車をサイクルトレーナに乗せるタイプのものが多かったが，これから紹介する CS は，自転車走行中の左右へのふらつきや慣性といったより臨場感のある自転車の動きを再現しようとしたものである．

Chen ら[17]は，自転車によるエクササイズ促進と娯楽目的で CS 開発を行っている．この CS は，図 2. 9 に示すように，2 軸のモーションシステムの上に自転車が搭載されており，サイクルトレーナで後輪を固定するだけの簡素な CS システムに比べ, 左右へのふらつきや前後への慣性の表現ができるようになっている．しかし，ただモーションシステムを動かすだけではハンドルにその振動が伝わり，現実と異なる挙動をしてしまう．そのため，モーションシステムが稼働しても，ハンドルを安定的にコントロールできるような制御の工夫が施されている．

図 2. 9　2 軸 CS プロトタイプの外観

Kwon ら[18]は，高臨場感のレーシング CS システムの開発を行っている．この CS は，図 2. 10 に示すように，自転車のもつ 6 軸の動きを再現させようと，スチュアートプラットフォームの上に自転車を搭載する形を採用している．また，ステアリング反力を実際の自転車のフロントスポーク部分にモーターと MR 流体を用いたクラッチを挿入し，よりリアルなステアリング感覚を再現しようとしている．さらには，よりリアルなペダリング感覚を再現するために，MR 流体ブレーキを採用している．KAIST の次世代シミュレータがこの翌年論文で発表されており[19]，そこでは 2 つの CS が同じ空間を共有するシステムが開発されている．

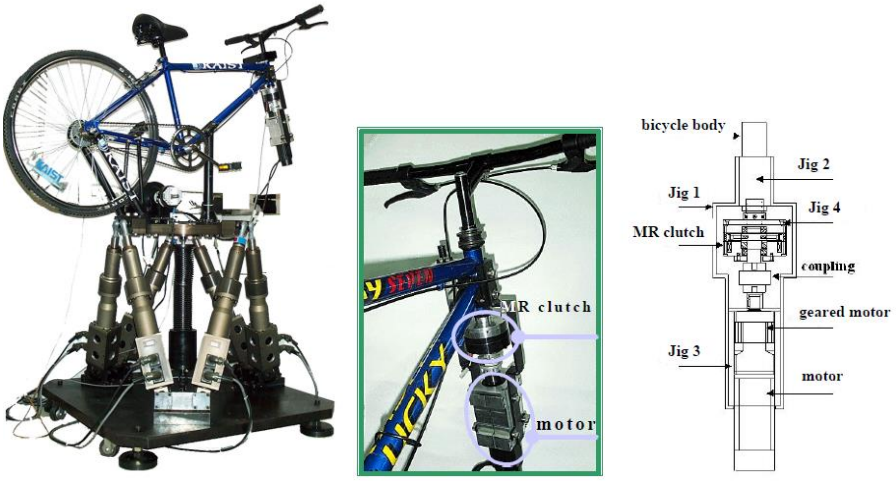


図 2. 10　6 軸スチュアートプラットフォーム＆ステアリング反力機構を用いた KAIST interactive CS

Herpers ら[8]は，交通安全教育用・訓練用に CS を開発している．この CS も，6 軸のスチュアートプラットフォームを採用しており，2D 画面を 3 枚使用し，180 度以上の視野角を確保している．また，手軽に交通安全システムを様々な人に利用してもらうために，図 2. 11 に示す高精細な CS ではなく，図 2. 12 に示すような，これまで紹介してきたサイクルトレーナで後輪を固定するだけの簡素な CS システム（Immersion Square）も開発しており，実験用・普及用の 2 軸で CS 開発を行っている．

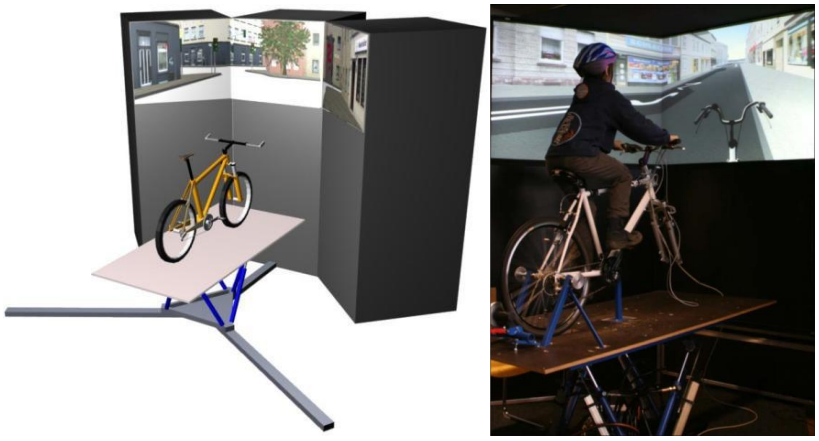


図 2. 11　6 軸スチュアートプラットフォームを用いた FIVIS Bicycle Simulator

図 2. 12　低コスト化を図った FIVIS の Immersion Square

国内外で開発されている CS のシステムの特徴に関して，表 2. 1 のようにまとめることができる．まず，自転車本体において，後輪固定型の簡易な CS では，自転車に何も改造を加えず，そのままマウントするタイプを採用しているが，センサ等を組み込みより精細な挙動を反映させるために CS 用に改造した自転車を用いているものも少なくない. 視界の画面について，既往研究では，2D 画面を使ったものが多く，180 度以上の視野角を確保できるものも存在するため，視野の制限によって現実環境で見えているものがシミュレータ環境では見えないといったような課題はないが，奥行き感がつかみにくい，プロジェクタ東

映方式により解像度が低く文字等の視対象物が判読しづらいといった課題が存在する．一方で，HMD や 3D 眼鏡を使った立体視可能なものはあるが，視野角が非常に狭いという特徴がある．視野が狭すぎると速度感や横方向の相対的な幅を知覚するのに影響が出てしまうことが課題として存在する．次に，音環境において，シミュレータの使用目的により，再現の有無やその程度は様々であり，立体音響を採用しているところも存在する．また，風環境においては，速度感が向上し実際に走っている感覚につながるためか採用しているところも存在するが，ほとんどの CS では採用していない．

ハンドル操作については，ハンドル操作自体はでき，自転車の車体力学モデルを反映した土台も存在はするが, 基本的には後輪固定型の CS を用いており, 自転車が自立するため, ハンドルを操作しなくても安定して真っすぐ走れてしまうという課題が存在する．ペダリングやブレーキ操作については，ペダリング速度やブレーキ制動は後輪部に取り付けられたローラーで制御されている．これでは，前輪ブレーキのみをかけても止まらない，また，自転車が運動状態にないので，ブレーキをかけてもすぐ速度が落ちてしまうといった課題が存在する．最後に，交通安全分析や娯楽目的に複数のシミュレータを連携させてシステムを開発しているところもあり，今後，歩行者シミュレータ等も含めたマルチインタラクティブなシミュレーションシステムが開発されることが期待される．

表 2. 1 国内外で開発されている CS の特徴のまとめ

	国内					アメリカ			ドイツ	韓国	中国
	山形大学	徳島大学	東京農工大学	東京大学	東洋大学	アイオワ	オレゴン州	ニュージャージー	Bonn-Rhein-Sieg, Koblenz	KAIST	香港大学
自転車	リアル	リアル	部分	リアル	リアル	リアル	リアル	リアル	リアル	部分	リアル
画面種類	立体視2D	2D ×5枚	2D	HMD	2D	2D ×3枚	2D	2D (PC)	2D×3	HMD (2D)	立体視2D
水平視野角	45度以下	180度以上	45度以下	45度	45度以下	270度	90度以下	とても狭い	180度以上	とても狭い	45度以下
バックミラー	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×
音環境	○	○	×	○	○	○	×	○	×	立体音響	×
風環境	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×
ふらつき傾き	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
ハンドル	×	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○
速度ペダリング	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ブレーキ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
シミュレータ連携	×	×	×	×	×	×	DS CS	共有空間	×	CS CS	×

１.２ シミュレータ環境への適応性に関する既往研究の整理

シミュレータを扱う上で克服すべき重要な課題がシミュレータ酔いである．本節では，自転車のみならず多くのシミュレータの分野から，シミュレータ酔いの記述があるものやシミュレータ環境への適応段階について調査した文献をまとめ，シミュレータ酔いに関係する因子やシミュレータ環境への適応を阻害する要因について調査を行う．

Sean ら[20]は，実験者の期待効果（期待が認識や行動に影響を与える）・対比効果（前の選択肢が評価基準となり，それとの対比によって後続の選択肢への評価が左右される）が被験者の要求特性（被験者が判断材料とする手がかり）となり，実験結果に影響が及ぶことを危惧し，実験前後に SSQ を行うグループと実験後のみに SSQ を行うグループとでシミュレータ酔いにかかる比率を比較している．この実験では，図 2. 13 のように HMD に映るボールを 3D 空間上で下から突き上げ移動させるタスクを行わせており，被験者は 20 歳から 45 歳の 30 人の被験者（男性:20 名　女性:10 名），使用した画面は V8（Virtual Research 社製、2panel LCD 640*480 922kPIX 3D）である．一人当たりのタスクは約 25 分～30 分であった．結果として，実験前に SSQ を行うことで，実験後の SSQ スコアが有意に高くなったことが示されている．これは，実験前に酔いの発生が予測されたことで，被験者が，実験が上手くいくか心配になりその不安が実際の酔いの発生に影響を与えたものであると考えられる．

図 2. 13 実験の様子（イメージ）

Lin ら[21]は，E2I(Engagement, Enjoyment, Immersion)指標を開発し，SSQ でシミュレータ酔いの評価を行いながら，水平視野角(HFOV)が 60°，100°，140°，180°の時の E2I 指標の各要素の評価を行っている．この実験は，2 分の実験コース（左右曲がる行為を含む）を 4 つ，計 8 分のドライビングシミュレータを用いたものであり，各走行の間に 5 分の休憩をはさみ，アンケート調査も含め，総実験時間は 1～1.5 時間である．被験者は 20 歳から 31 歳までの 10 名（男性 : 5 名　女性 : 5 名）であり，使用したシミュレータは，図 2. 14 に示すような Real Drive driving simulator(Illusion Technologies International, Inc. 製) で，

3800×600pixel の解像度，3230cm×175cm のスクリーン，220°の水平視野角を持つ．結果として，水平視野角が増えるほど，SSQ スコアも増加しており，また，シミュレータ内での存在感を示す presence のスコアも増加している．さらに，水平視野角が 140 度を超えたところで，SSQ スコアと presence は漸近線をたどることが示されている．これは，ベクション（自己誘導感覚）が水平視野角の増加と共に増加したこと，また水平視野角が 140 度辺りで，動体視野で視認可能な視野が限られていることが要因として考えられる．

次に，presence とシミュレータ酔いは正の相関，enjoyment とシミュレータ酔いは負の相関を示しており，シミュレータ内での自身の存在感（没入感）が増加すれば，現実環境との違和感に対する感度もそれだけ増加し，また，違和感よりも自身がシミュレータ上で経験していることに対する好奇心や楽しいという気持ちが上回る場合，違和感として被験者があまり感じていないことが考えられる．

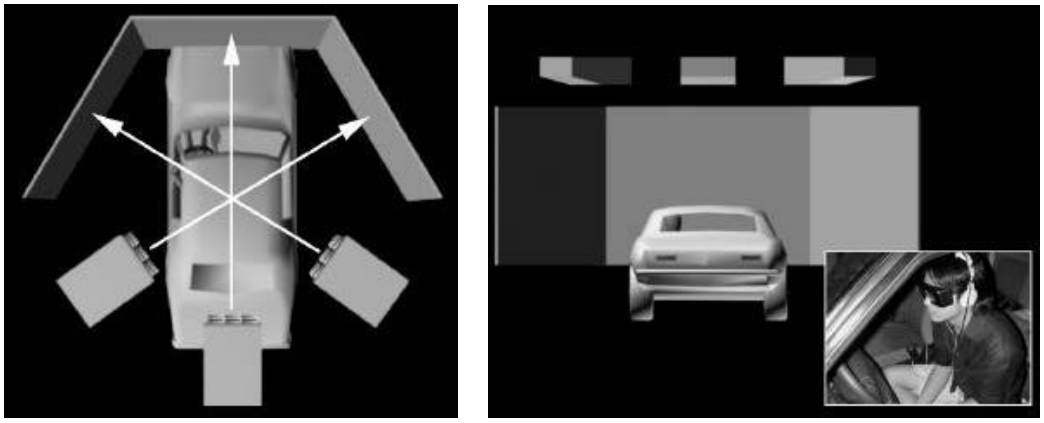


図 2. 14　実験で使用されたシミュレータ

Freund ら [22]は，65 歳以上(65-89, mean76, 62.5%が male)の 180 人の被験を対象に，ドライビングシミュレータを用いた実験を行っている．30 分の運転評価を 3 つの認知テストを用いて行っており，走行シナリオ内に停止標識が 3 つ，左折が 8 つ，右折が 7 つ，赤信号が 5 つ，青信号が 1 つ含まれている．この実験は，図 2. 15 に示す STISIM Drive™ を利用しており，プロジェクタにより写され，4feet(120cm)×8feet の 3 つの連続ディスプレイを使用し，135 度の水平視野角がある．シミュレータ酔いに関する記述として，実験続行できないほどの酔いが発生した被験者はいないが，15 人（全体の 7%）の被験者が不快感を抱いていることが示されており，その 15 人の内，約半数の 7 人が意図しない加速があったと回答している．

図 2. 15　STISIM DriveTM と外観と運転シーン

Lee ら[23]は，129 人の 60 歳以上の被験者（60-88 歳，Mean=72.9，SD=7.1，78%が男性，運転頻度は 1-35 時間(M=11 SD=8.35)/週）を対象に，図 2. 16 に示す PC-based STISIM Driving Simulator を利用したドライビングシミュレータの実験を行っている．シミュレータ環境での適応過程に関する記述として，被験者の 90%以上が普段ミラーをよく確認すると言っているのにも関わらず，シミュレータ上ではめったにバックミラーを確認する被験者はいなかったことが示されており，没入感が小さいと普段の運転の感覚が再現されにくいことが考えられる．また，シミュレータ酔いに関する記述として，被験者の 9%（11 人）が軽度のめまいを感じていたが、ほんの短い間しか症状は続かず、実験を中断させることは起こらなかったことが示されており，2D かつ視野角が狭いことで、没入感が小さくシミュレータ酔いが軽度に収まったと考えられる．

図 2. 16　実験で用いられたドライビングシミュレータ

Yan ら[24]は，ドライビングシミュレータを用いて，年齢や性別，幹線交通速度（25km～55km/h）による左折間隔受入れ判断（gap accenptance）を評価している．このシミュレータは，に示す I-Sim Mark-II（6 軸自由度，1280×1024pixels の解像度の 5 つのスクリーン，音，振動，ハンドル負荷制御，車種モデル，60Hz，180°の水平視野角）である．シミュレ

ータ酔いに関する記述として，左折間隔受入れ判断の評価にはSSが影響してしまう（被験者はSSによる不快さから逃れるため，なるべく早く終わらせようとしてしまう）こと，また，より高齢な女性被験者が一番SSに反応が敏感であり，10人中4人が何のSSもなく実験を終わらせることができたことが示されている．

Zöllerら[25]は，60人の被験者（23-69歳，Mean=43.6，SD=15.7）を対象に，後方追突事故回避シナリオにおいて，図2. 17に示すような，180度の水平視野角のあるドライビングシミュレータの交通安全分析用としての妥当性があるかどうかを分析している．この研究は，妥当性評価に対し，広視野を持ったシミュレータが妥当な結果を得るのに十分なリアリティを持っているかどうか，モーションベースがこのような動的状況に対して必要かどうか，どの程度の大きさの空間が適切なモーションベースシミュレータに必要か，について着目したものである．シミュレータ酔いに関する記述として，全体の約22%（13名）が実験を続けられないほどのシミュレータ酔いになっており，また，動的感覚の無さがシミュレータ酔いの増加につながっていることが示されている．

図2. 17 実験で用いられたDSの外観

Babaeeら[26]は，70歳以上の高齢者77名を対象として，MMSE等の心理的・身体的能力テストの後，ドライビングシミュレータを用いた実験を行っている．10分の練習走行の後，200m停止線の手前から発進し停止線で止まる挙動，50・70km/hの車への追従挙動，またその時の被験者の走行速度を分析している．使用したシミュレータは，STISIM M400（180°の水平視野角，シームレス屈曲スクリーン（後方及び側方スクリーンが付加），3つのプロジェクタで1024×768の解像度，60Hzのリフレッシュレート）である．シミュレータ酔いに関する記述として，77名の内，約30%に当たる22名がシミュレータ酔いにより実験データから外したことが示されている．

Min ら[27]は，39 人の男性被験者（内，18 人は 18-35 歳，M=25.17，SD1.94．21 人は 65-78 歳，M=71.33，SD5.43．1 年以上の運転経験）を対象に，ドライビングシミュレータを用いた実験を行っている．高齢者の運転パターンを運転パフォーマンスインディケータ（移動時間，接近速度，速度，ハンドル振れ），視点移動インディケータ（視線方向・走査時間）に関して測定を行っている．使用されたシミュレータは，図 2. 18 に示す GDS-300S(Korea) で，32 型 LCD ディスプレイを 3 枚用いた構造となっている．実験シナリオとして，3 分の練習走行の後，2 つの 10 分の走行シナリオ（各 12 回右左折有）が含まれている．シミュレータ酔いに関する記述として，39 人の内，3 人の高齢被験者がシミュレータ酔いのため実験を続けられなくなっていることが示されている．全体でカーブが 24 回も含まれる走行であるが，垂直視野角が狭いため，シミュレータ酔いにかかる被験者が少なくなったと考えられる．

図 2. 18　GDS-300S の外観

Matas ら[28]は，88 人の高齢被験者（M=72.82，SD5.42）を対象にドライビングシミュレータを用いた実験を行い，シミュレータ酔いの個々の要因とデスクトップ型 DS を用いた時の実験中断について調査を行っている．実験の流れとして，練習走行と 2 つのテスト走行を行い，5-10 分の休憩（被験者がリクエストすれば、追加休憩時間がもらえる）が各走行の間に含まれており，1 回目の走行後に認知タスク試験を行っている．全部で約 2 時間の実験である．シミュレータ酔いに関する記述として，88 人中 52 人の高齢者が実験を中断していることが示されている．また，女性・過去の乗り物酔い経験・mini-SSQ スコアが中断に関係しており，中断者と完遂者との間に何も認知能力テストの差が無いことが示されている．ここまで多くのシミュレータ酔いが発生してしまった理由として，被験者の目線やハンドルの位置に対して，画面が近すぎるため，ハンドルを動かした時の左右への回転のブレが非常に大きく見えてしまったことが考えられる．また，慣性が表現されていないために，現実環境とシミュレータ環境との間の相違が大きくなってしまったことも要因として考えられる．

図 2. 19　実験に用いられた DS の外観

これらのシミュレータ酔いやシミュレータ環境への適応性に関する既往研究より，シミュレータ酔いに関係する因子やシミュレータ環境への適応を阻害する要因についてまとめると表 2. 2 のようにまとめることが出来る．

まず，最初に，実験計画に関して，実験を行う前に，シミュレータを目の当たりにして，仮想空間での実験であることや機械を制御可能なのか，上手く実験をやることができるのかといった不安感により，シミュレータ酔いの発現が高まることが明らかとなっている．次に，個人属性に着目すると，特に，高齢者や女性，過去の乗り物酔いの経験，過去の経験と異なること，視空間認知能力の低下がシミュレータ酔いの発現のリスクと正の相関があることが明らかとなっている．一方で，高齢者の高解像度・高精細に対する知覚では，視認識能力の低下から映像酔いに対するリスクが減ることも明らかとなっている．シミュレータベースで考えると，見ている画面の水平及垂直視野角の増加によってベクションが増加し，シミュレータ酔いの発現のリスクが高まっていることが明らかとなっている．最後に，シナリオベースで考えると，カーブが存在するかが大きく，カーブ時の感覚性入力の矛盾の大きさがシミュレータ酔いの発現のリスクを大きく高めていることが分かる．また，シミュレータ環境にさらされている時間にも正の相関がある．よって，シミュレータ酔いの許容量が個別に存在し，現実環境とシミュレータ環境との間の相違の大きさや，暴露時間によって積分的に相違が蓄積し，最終的にその許容量を超えてしまうことで酔いが発現するということである．さらには，シミュレータ環境への没入感により，シミュレータ酔いの発現のリスクが高まる一方で，シミュレータ環境にいることで楽しさを感じるとそのリスクが低下するといったことも明らかとなっている．

表 2.2　シミュレータ酔いやシミュレータ環境への適応性に影響する要因のまとめ

分類	項目	要因	結果
実験計画	事前の予測	要求特性	シミュレータ酔い↑
個人属性	過去の乗り物酔いの経験	要求特性	シミュレータ酔い↑
	視空間認知能力低下	認識低下	追従走行課題の成績↓ 車線維持課題の成績↓ シミュレータ酔い↑
	過去の経験と異なる	感覚性入力の矛盾	シミュレータ酔い↑
	熟練運転者	感覚性入力の矛盾	シミュレータ酔い↑
	高解像度・高精細に対する知覚	認識低下	高解像度・高精細ディスプレイと従来の液晶ディスプレイとで映像が動くことでの重心動揺に有意差なし
	女性	（男性と比べ） 空間認知能力↓動体認識↓	シミュレータ酔い↑
シミュレータ	水平視野角増加	ベクション	シミュレータ酔い↑
	垂直視野角増加	ベクション	シミュレータ酔い↑
シナリオ	カーブ	感覚性入力の矛盾	シミュレータ酔い↑
	存在感・没入感	動作のﾘｱﾘﾃｨや目的意識等	シミュレータ酔い↑
	楽しさ	当事者意識、好奇心等	シミュレータ酔い↓
	酔いの発現時間	酔いの許容量の存在	8 分～10 分を越える実験時間で発現

１.３ 対面通行自転車道での走行挙動を扱った既往研究の整理

本節では，4 章で行う「対面通行自転車道でのすれ違い場面における走行挙動分析」に関して，対面通行自転車道での走行挙動を取り扱った既往研究を整理し，走行挙動分析の位置づけについて示していく．

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 ら[29]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[30]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[31]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[32]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（横断防止柵や対向自転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．

4 章で行う対面通行自転車道での走行挙動分析では，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点が特徴であると言える．

１.４ 追い越し挙動を扱った既往研究の整理

本節では，5 章で行う「駐車車両追い越し場面における走行挙動分析」に関して，追い越し挙動を取り扱った既往研究を整理し，走行挙動分析の位置づけについて示していく．

自転車対自動車（二輪車）における追い越し挙動を取り扱った既往研究としては，後方接近車両側から見た自転車に対する追い越し挙動を扱ったものが多く，Kroll ら[33]は，自転車専用レーンでも自転車を追い越す時の追い越し幅は変わらないことを明らかにしている．Guthrie ら[34]は，より広い車道は追い越しと速度上昇の確率を高め，また，追い越し幅も広くなることを明らかにしている．運転者属性に関するものとしては，Basford ら[35]や，Sando ら[36]は，小型車の運転に慣れている自動車運転者は追い越し時によりリスキーな行動を取ること，Walker[37]は，女性に見える自転車運転者には二輪車運転者はより追い越し幅を確保して追い越すことを明らかにしている．さらに，自転車の走行条件に影響する後方接近車両側の挙動として，Franklin[38]は，自転車運転者が少なくとも 1m は縁石から離れた時に，車道幅が狭い場合，自動車は気を付けて追い越しをしようとすること，Hunter ら[39]は, 自転車運転者が縁石近くを走り過ぎていると車両は追い越しが不適な場面でも追い越しをしようとすることを明らかにしている．

逆に，自転車運転者側から見た後方接近車両が自転車を追い越す時の自転車の挙動を扱った研究例は少なく，Chuang ら[40]は，自動車追い越し時の自転車走行挙動として，大型車が追い越してきた時により不安定な挙動となる，通行帯標示がある方が安定的に遅い速度で走行する，路面凹凸を避けるといったことを明らかにしている．また，Frings ら[41]は，赤信号待ちしている自動車に対する自転車運転者側の追い越し挙動を扱っており，自転車専用レーンの有無や縁石と車両との間隔，車種がその要因として明らかにされている．細谷ら[42]は，駐車車両の追い越し開始距離への影響を扱っており，後方確認の有無，車線数，自転車専用レーンの有無，走行速度，追い越し幅，駐車幅，追い抜き車両側の挙動，追い抜き車両との間隔，相対速度が影響項目として，統計的な分析により明らかにしている．

5 章で行う駐車車両追い越しの走行挙動分析では, 表 2. 3 に示すように分析対象が自転車側の挙動であり，かつ，追い越し時の挙動への影響要因として道路構造（自転車専用レーンの有無），他車両属性（走行位置・安全行動の有無）を扱っており，また，分析手法として CS を用いたものとなっていることが特徴として挙げられる．

表 2.3 追い越し挙動を扱った既往研究の整理

<table>
<tr><td colspan="2">分析対象</td><td colspan="3">自転車側挙動</td><td colspan="2">自動車(二輪車)側挙動</td></tr>
<tr><td colspan="2">分析手法</td><td colspan="2">CS以外</td><td>CS</td><td>DS以外</td><td>DS</td></tr>
<tr><td rowspan="5">追越し挙動への影響要因</td><td>速度</td><td>Chuang et al. (2013)</td><td rowspan="3">細谷ら (2014)</td><td rowspan="5">本研究</td><td></td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td>方向位置</td><td rowspan="3">Frings et al. (2014)</td><td>Franklin (2007)
Hunter et al. (2011)</td></tr>
<tr><td>道路構造</td><td>Kroll et al. (1977)
Guthrie et al. (2001)</td></tr>
<tr><td>他車属性</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>自車属性</td><td colspan="3"></td><td>Basford et al. (2002)
Walker (2007)
Sando et al. (2011)</td></tr>
</table>

１.５ CS 開発計画及び本研究の位置づけ

以上の既往研究の整理より, 交通安全分析用 CS 開発に必要な開発課題と開発計画について示していく.

２．１，２．２より，交通安全分析用 CS を開発する上で重要な課題として，①ペダリングによるハンドル操作の不安定性の再現，②速度減衰挙動の再現性向上，③シミュレータ環境の適応力が低い属性でも利用可能なシステムの設計が挙げられる.

①については，後輪固定型の CS のため自転車が自立し，ハンドルを操作しなくても安定して真っすぐ走れてしまうという課題が存在する．交通安全分析用に CS を活用する場合，ハンドルが現実よりも容易に操作可能であるため，より周辺環境に意識が向くことにつながってしまい，回避や錯綜挙動を観測する際に，現実環境では危険なのにも関わらず，シミュレータ環境では危険ではないといった実験結果に結びつく可能性が出てくる．また，ハンドルを握り，左右にぶれないように押さえておく必要がなくなるため，ブレーキや突然の回避の際に反応が遅れる可能性が出てくる.

②については，ペダリング速度やブレーキ制動は後輪部に取り付けられたローラーで制御されているため，前輪ブレーキのみをかけても止まらない，また，自転車が運動状態にないので，ブレーキをかけてもすぐ速度が落ちてしまう，といった課題が存在する．交通安全分析用に CS を活用する場合，例えば，停止線前でうまく止まれない，駐車車両の手前で後方接近車両の位置や速度に応じて自車の速度をコントロールすることが難しくなるため，現実環境では他車両との関係性の中で上手に対処できるのにも関わらず，シミュレータ環境では他車両とぶつかってしまう，より安全側に行動してしまい現実環境での運転が不可能となってしまう可能性が出てくる.

③については，自動車と違い自転車は動きがより複雑なため，シミュレータ酔いが発現

するリスクが高まる課題が存在する．交通安全分析に CS を活用する場合，若年者や男性では問題なく交通安全分析が可能な CS を開発できたとしても，高齢者や女性はシミュレータ酔いになりやすく，シミュレータ環境への適応性が低いことから，交通安全分析ができなくなってしまう可能性が出てくる．

①～③の課題を解決するために，まず，奥行き感がつかみにくい，解像度の低さより，視対象物の判読が難しい 2D 画面の利用ではなく，立体視可能な広角の HMD を使用することとした．HMD を使用し，基本的な自転車の挙動を CS 上で表現するために行ったシステム開発は主に第 3 章で述べられる．次に，①の解決策として，直進中速時のペダリングによるハンドルのぶれを CS 上で再現することで，ハンドルを左右にぶれないように押さえたり，左右へぶれた時に微調整を行ったりすることが自然にできるようにする．また，交通安全分析の場面として「対面通行自転車道でのすれ違い挙動」に着目し，CS 実験により交通安全分析用 CS としての妥当性を示していく．この検討は，第 4 章に組み込まれる．また，②の解決策として，前後輪ブレーキ制動時や空走時に現実と同じような速度減衰を HMD 画面上で表示させることで，現実環境と同じような前後輪ブレーキ・空走挙動を行えるようにする．また，交通安全分析の場面として「駐車車両追い越し挙動」に着目し，CS 実験により交通安全分析用 CS としての妥当性を示していく．この検討は，第 5 章に組み込まれる．ここまでの CS 開発では，シミュレータ環境への適応性が比較的高い学生を対象としているが，高齢者や女性，乗り物酔いになりやすい人，機械操作が不慣れな人といったシミュレータ環境への適応性が低い被験者を対象にも実験を行った．第 5 章で取り扱った「駐車車両追い越し」を走行シナリオとして，まずは学生以外の属性に試験的に CS 実験を行い，そこで明らかとなった改良項目から，シミュレータ環境への適応性が低い人でも実験が可能な CS を開発する．この検討は，第 6 章に組み込まれる．

図 2. 20 に本研究で行う CS の開発計画の概要を示す．

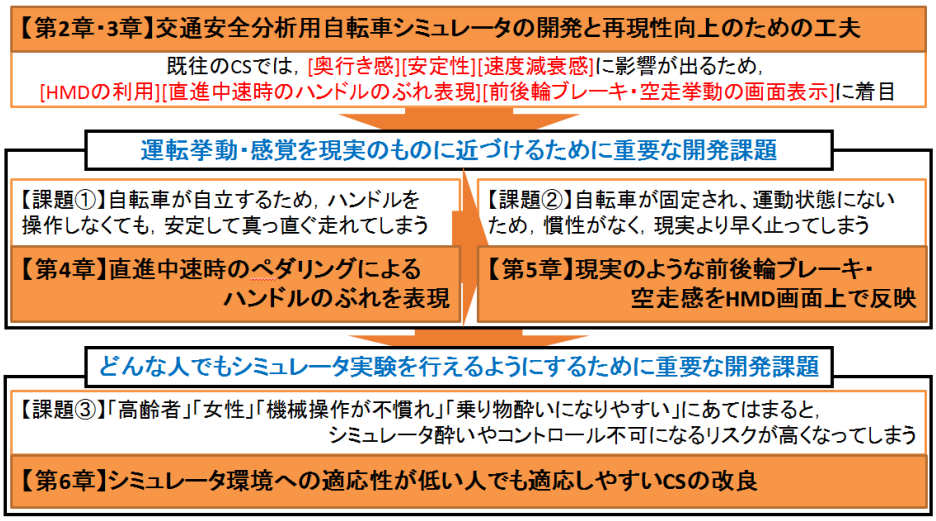


図 2. 20 本研究の CS 開発計画

第 3 章　交通安全分析用自転車シミュレータ"Morics"の概要と再現性向上のための工夫

１.１ "Morics"の概要と開発コンセプト

１.２ 人間特性に着目した CS 開発の方向性の検討

１.３ 運転挙動・運転感覚の再現性向上に向けた CS 開発項目の検討

１.４ "Morics"のシステム開発と再現性向上のための工夫

１.５ 結語

１.１ "Morics"の概要と開発コンセプト

本節では，交通安全分析用自転車シミュレータ"Morics"の概要及び開発コンセプトについて示す.

DS（MOVIC-T4*）の計算システムを一部応用し，自転車交通の安全性研究に活用できるコンセプトの「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,（MoriCS，以下 CS）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．本 CS 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，②HMD 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．Morics の外観を図 3. 2 に，システム構成を図 3. 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ほかの映像が入ってこないため，現実感のある走行環境を再現することができている．また，走行中にライダーが感じる体感加速度を 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れることができる．これにより加減速だけではなく，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，あらゆるシナリオ，道路形状などの再現にも応用可能である.

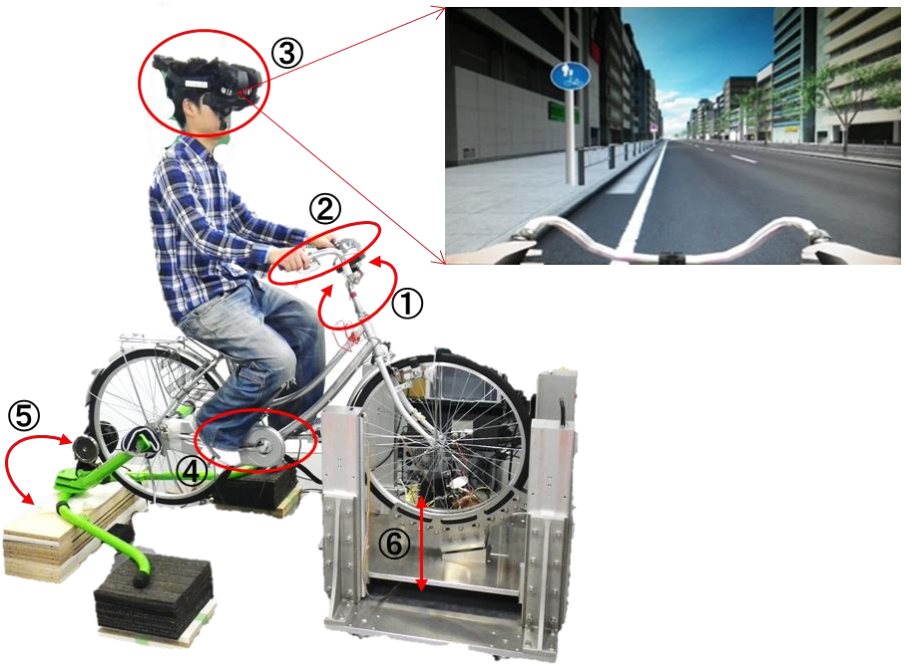


図 3. 1　Morics の外観

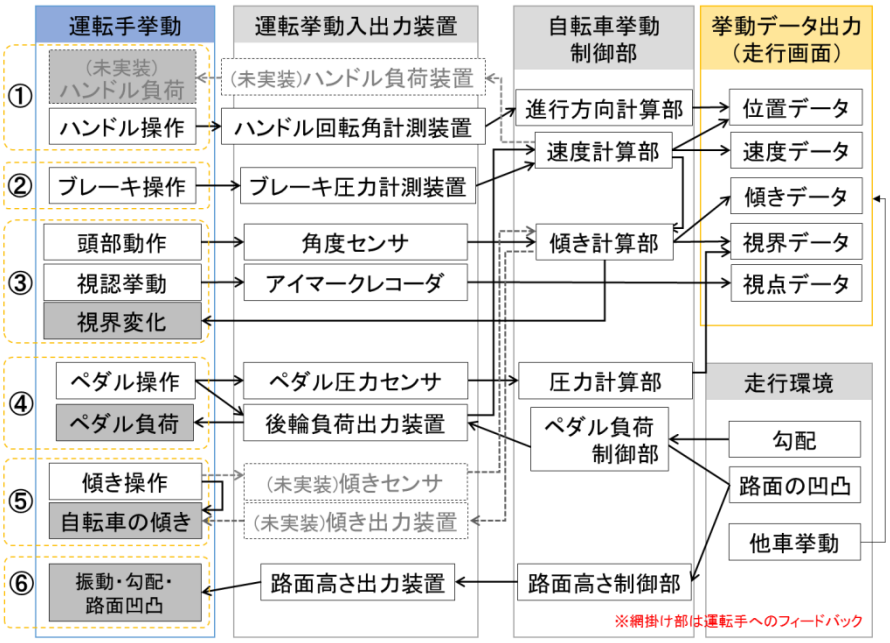


図 3. 2　Morics システムの概要

１.２　人間特性に着目した CS 開発の方向性の検討

本節では，交通安全分析用CSの運転挙動や運転感覚を再現するために必要な人間特性について検討を行う．ここでは，まず，最初に，現実環境で"自転車を運転する行為"とは何かについて考えていく．その中から，シミュレータ環境上で運転挙動や運転感覚をどのように再現していくかについての方向性について定めていく．

１.２.１　運動学習

初めて自転車に乗った時に，バランスを取りながら安定した自転車走行が出来るようになるまでに長時間を要した．自転車の乗り方を理解する行為は，一種の運動課題であり，これは，例えば「１＋１＝２」という数式を理解することとは全く異なる学習過程である．つまり，"自転車を運転する行為"とは，自転車の乗り方を理解するという運動課題であり，①全般的な自転車の乗車方法を頭で学習する，②身体を用いて自転車や自身の動きを制御する，という，二段構えの過程[43)]である．運動学習過程の概念図を図3. 3に示す．この二つの過程の中で，我々は，交通場面の中での自転車の乗り方を理解している．

①　学習過程

自転車の乗り方を学習する際に，バランスを取りながら自転車を進めようとすることは，自転車と運転者の運動や周辺環境との相互関係を理解するためのプロセスであり，理解には長時間を要する．言い換えれば，外部世界の仕組みを脳の内部で模倣・シミュレーショ

ン可能にするためのモデルを築くプロセスであり，このモデルは内部モデル[44]と呼ばれている．このモデルを築いた後に，我々は，次に何が起こるのかについて予測が可能となる．

② 制御過程

自転車の運動や周辺環境との相互関係を頭の中で理解するだけでは，安定した自転車を運転可能な状態とはならない．一度頭で理解した後，つまり，自転車運転の内部モデルを構築した後に，適切なバランスを取ったり，軌跡を辿ったりするために，その内部モデルを使ってモデルを強化し，短時間かつ少しの努力で反射的に反応できるようにする．この状態は，自動化(Automatism)と呼ばれている．

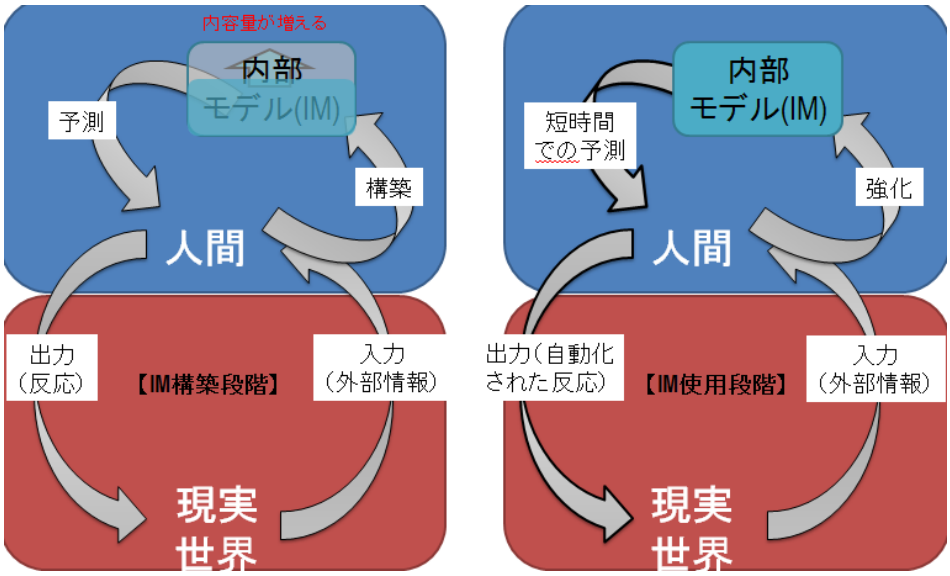


図 3. 3 運動学習過程の概念図

1.2.2 意思決定プロセスが存在する課題

本研究のCSは，自転車運転の安全性向上や自転車構造の強靭性向上を解析するためではなく，ある道路空間における他交通主体との相互関係を，特に安全性の観点から分析するために開発されている．それには，他主体との相互関係を認識し，その関係の中から次に何が起こるのかを予測，その認識や予測を基にどう次に行動しなければならないのかを決定し，最後にその決定を基に行動（運転）する必要がある．つまり，日常的な自転車運転とは，自転車操作や他主体との相互関係がある中での意思決定過程，と位置づけられる．戦争や経営分野で用いられている戦略モデル[45]を参考に，日常的な自転車運転がどのような戦略のもと，行われているのかを図式化すると，図3. 4のように示すことができる．そこで，我々が再現性を考える上で注目すべき，意思決定プロセスは戦術(tactics)に相当すると言える．

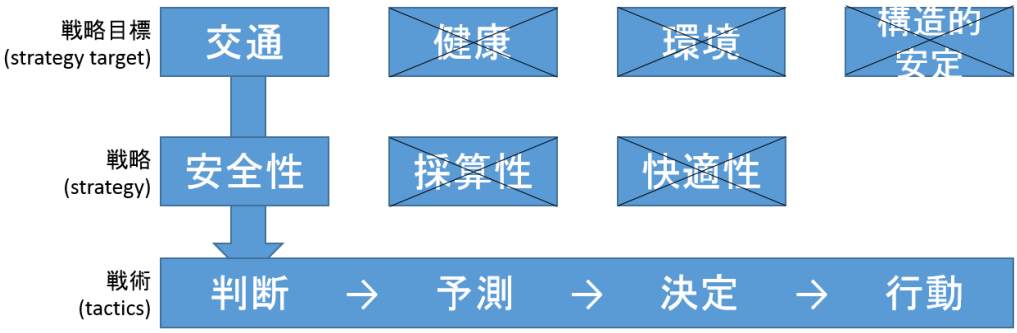


図 3.4　自転車運転における意思決定の概念図

1.2.3　同期的マルチタスクな課題

日常的な交通場面は複雑であり，その複雑な状況の中で，我々は同時に多くのことに注意を払い，同時に複数のタスクをこなしていく必要がある．しかし，これらを全て処理可能かと言えば，我々には同時に処理できる情報処理量に限界があることが知られている．また，同時に処理するタスク間の関係性は競合的であり，これらの人間の特性から，①安全な自転車運転に対して適切なタスク量配分があること，②情報量が多すぎる場面（複雑な交通場面）では情報超過になり得ることが言え，適切なタスク量配分ができず，情報量が多すぎる場面で我々は人的ミスを引き起こすと考えられる．このミスは，自転車を操作する行為だけでなく，周辺環境の認知にも及ぶ．つまり，日常的な自転車運転はマルチタスクな活動であり，かつ複雑な状況下でのタスク量やその配分に大きく影響されるものであるということが出来る．

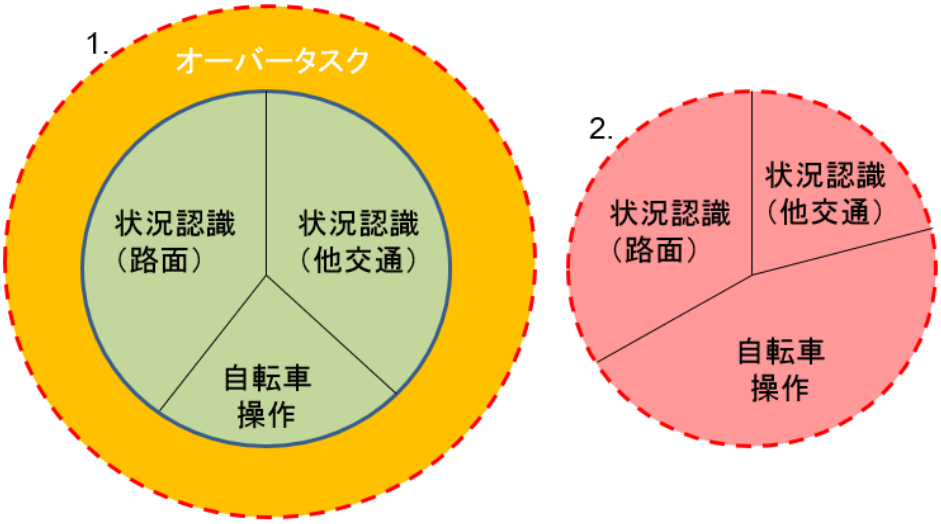


図 3.5 人的ミスにつながるタスク量と配分に関する概念図

（左：タスク量超過　右：タスク配分不適）

１.２.４ 人間特性に着目したシミュレータ環境への適応性を考慮した CS 開発の方向性

上記で述べた観点から自転車運転について整理すると，以下のようにまとめられる．CSで日常的な自転車運転挙動を被験者から取得するために必要なCSの再現性には，これら5つのごく自然な人間の特徴に基づいて考える必要があると言える．安全性分析には，運転時の車体制御（操作）と状況把握（認知・判断）との間の情報処理バランスに着目し，自転車運転がマルチタスクで意思決定プロセスが必要なものであることを理解する必要がある．つまり，シミュレータ上での各タスクの情報処理量や配分に配慮しなければ，意思決定プロセスに影響し，最終的には運転挙動にまで影響が出てしまうということである．よって，我々の目的に適ったCSは，シミュレータ上の自転車制御において，適切な，すなわち，実際の自転車制御より簡単でもなく，難しくもない，全く同じレベルの難しさを探し求めることで達成されるものであると言うことができる．

- 既に自転車運転における内部モデルを個々の経験や技術レベルに応じて所持している．
- 常に学習し，内部モデルや脳内に蓄積されたデータベースは新しい状況に適応するために刻々と変化している．
- 意思決定プロセスを経て行動している．
- 情報処理に対して一定の許容量があり，それゆえに，複雑な状況下では複数のタスクを同時に処理しなければならない．
- 許容量を超える情報処理量や，競合的なタスク処理における不均衡さによって人為的ミスを引き起こしている．

そこで，人間とシミュレータを一つのシステムとして扱うと，人間がシミュレータをコントロールするために，①シミュレータを人間に合わせる，②人間をシミュレータに合わせる，という2つの方向性があると考えられる．①に関しては，人間が現実環境の感覚のまま，シミュレータ環境でも自転車を制御できるようにシミュレータを調整することを意味する．②に関しては，現実環境とシミュレータ環境との間のギャップを埋めるために，人間がシミュレータに適応することを意味する．①を達成することが理想であるが，実際は，運転感覚を表現するデバイスの処理能力の限界（技術的制約）や個人属性により，現実環境とシミュレータ環境との間には必ず運転感覚の相違が存在する．この相違が，シミュレータ酔いの発生や運転挙動に影響を与えている．よって，①と②の2つの方向性を両方考慮に入れながらCS開発をする必要がある．つまり，現実環境とシミュレータ環境との間のギャップを最小限にするために現実環境での運転感覚の再現性向上に向けた開発をしつつ，埋めきれないギャップに関しては，違和感があっても制御できるように学習しようとするプロセス（運動学習）を観察し，最終的に周囲への意識が向いているか等のマルチタスクとしてシミュレータ環境上で運転ができているかについて着目すること（同期的なマルチタスク処理）で再現性検証をする必要があると言える．

１.３ 運転挙動・運転感覚の再現性向上に向けた CS 開発項目の検討

本節では，実際にどのような外部情報を自転車運転中に得ているかについて整理し，シミュレータ環境上で必要な自転車の運転感覚について考察を行っていく．

シミュレータの再現性を考慮する上で重要な要素として位置づけられるものの一つにシミュレータ酔い [46,47,48]の存在がある．シミュレータ酔いは，広義には動揺病とも呼ばれ，一般には乗り物酔いと呼ばれている．生じる環境要因を指して，船酔い，車酔い，VE 酔い，宇宙酔いなどと呼ばれることもあり，シミュレータ酔いは動揺病の一種として扱われている．シミュレータ酔いの発生要因として，視覚，深部知覚，内耳前庭からの情報は，通常では平衡を保つために円滑に処理されているが，長時間の不規則な刺激により中枢での情報処理に混乱が生じ，酔いが発生するという説（感覚性入力の矛盾説 [49,50,51,52]）が現在最も有力視されている説である．

シミュレータにおける再現性を考える上で，シミュレータ酔いに関して考慮することは前提条件ともいえる．また，視覚・前庭・体性感覚が関与していると言われていることから，我々が普段生活している上でも，これらの 3 つの感覚から主に外部情報を得ているものであると考えられる．は、自転車運転時の走行挙動（発車・加速・定速・空走・制動・カーブ・蛇行・再加速・停止）を念頭に、自転車運転時に取得していることが想定される外部情報をまとめたものである．走行挙動から，特に，速度・傾き・ステアリング・ブレーキ・（段差や勾配による）慣性力が重要であると考えられ，その 5 項目に関して，3 つの感覚器官（視覚・前庭・体性感覚）別に外部情報の分類を行った．これに加えて，音を耳で取得している．外部情報の感覚器官による分類をまとめたものを表 3. 1 に示す．

表 3. 1　自転車運転時に取得していることが想定される外部情報

	視覚(視)	前庭(前)	体性感覚(体)
速度	・オプティカルフロー(加速・定速)	・加(減)速	・風圧　・ペダル圧力　・加(減)速
傾き	・視野の傾き ・自動的ハンドル角による左右振れ		・身体バランス(サドルの反力) ・自動的ハンドル力　・ペダル圧力
ステアリング	・手動的ハンドル角による左右振れ ・オプティカルフロー(回転)	・回転速度	・ハンドル力　・遠心力　・ペダル圧力
ブレーキ	・オプティカルフロー(ブレーキ・減速)	・減速	・ブレーキ力　・減速
慣性力(段差)	・段差・勾配の存在の認識 ・その大きさの認識		・ペダル　・サドル　・ハンドルでの振動
慣性力(勾配)			・ハンドル力　・ペダル力 ・ブレーキ力　・サドル圧力

１.３.１ 速度

- 加速時・定速時におけるオプティカルフローからの速度認識
  人間が日常生活の中で多く目にしている風景は，静止時や歩行時におけるものであり，そもそも自転車速度(15km/h 程度)に対しては不慣れである．
  →運転経験の違いや VR・現実世界の違いに関わらず存在する不慣れ感と，VR 空間における不慣れ感とは別に考える必要がある．
- 加速時における後ろのめり感（前庭・体性感覚）
  自然な加速時には制動時や立ち漕ぎ時と比べると小さいが慣性力の変化を感じる．前庭の耳足器において直線加速度を反射的に知覚し，また，ハンドル・サドル等で反力の変化を感じる．
- 空気の流れによる皮膚刺激と速度感との関係（体性感覚）
  人間は速度知覚に風圧を用いているものと考えられる．
- ペダル反力と速度感との関係（体性感覚）
  ペダル踏力がスピード調整・感覚と関係していると考えられる．

１.３.２ 傾き

- 視野の傾き角（視覚）
  直進時は約 1～3 度，カーブ時は約 5 度傾く．わずかな角度であるが，視野の傾きが運転感覚に影響を与えているものと考えられる．
  →実際には，絶対値を知覚しているわけではないと考えられ，（現に直進やカーブの時に何度傾くかはわからない）相対的な傾きの程度とその方向や傾き速度によって，自身の傾きの状態を視覚的に判断しているものと考えられる．
- 自然とハンドルが切れることによる左右のぶれ（視覚）
  自転車が傾いたときに，ハンドルを運転者が意図的に回そうとしなくても自然とハンドルが切れるという現象が起こる．ハンドルは回転させず，傾きのみでカーブを曲がる際，傾き度合の調整は，左右への視覚的な移動量により判断されると考えられる．
- 身体バランス（サドルの反力）・自動的ハンドル力・ペダル圧力（前庭・体性感覚）
  自転車を傾けるために体重移動を行い，それに応じて自転車が傾くという知覚は，視界だけでなく，平衡感覚やサドル反力（偏力）としてお尻で感じられるものも影響していると考えられる．また，傾いた時に自然とハンドルが回転し，左右に自転車が動くという現象（ハンドルレバーから伝わってくる意図しないハンドル回転の知覚），また，元の中立軸に身体を戻そうとする時に，自然とハンドルも真っすぐ進むように戻ってくる現象（身体バランスとハンドル力との相互感覚）が知覚されるはずである．

１.３.３ ステアリング

- 運転者の意図的なハンドル回転による左右のブレ（視覚）
  運転者が自らハンドルを切った時に，切れたかどうかの知覚はハンドル回転角ではなく，むしろ，左右にどれだけ自転車が移動したかという視覚的な変化であると考えられ，視覚的変化により，運転者はハンドル回転を制御しているものと考えられる．
- オプティカルフロー（視覚）
  自転車速度(15km/h 程度)に対してはそもそも不慣れであり，ましてや，回転運動に関してはさらに不慣れである．
  →運転経験の違いや VR・現実世界の違いに関わらず存在する不慣れ感と，VR 空間における不慣れ感とは別に考える必要がある．
- 回転速度（前庭）
  カーブ時は，前庭(三半規管)が回転速度を知覚している．
  →前庭動眼反射により検知可能
- ペダル圧力・ハンドル回転力（体性感覚）
  特に，蛇行時・低速カーブ時に，ペダリングとハンドル回転は同時に起こる．
- 遠心力（体性感覚）
  カーブ時は遠心力が身体に働く．

１.３.４ ブレーキ

- 制動時におけるオプティカルフロー（視覚）
  歩行によって制御可能な減速度以上の減速に対して不慣れである．
  →運転経験の違いや VR・現実世界の違いに関わらず存在する不慣れ感と，VR 空間における不慣れ感とは別に考える必要がある．
- 減速・制動時における前のめり感（前庭・体性感覚）
  減速・制動時には慣性力の変化を感じることになる．空走時よりも制動時のほうがはるかに大きな変化である．また，自転車の種類や前・後輪ブレーキの種類やかけ方によって前のめり感は異なる．
  →加速時とは違い，減速・制動時における前のめり感は影響すると考えられる．
- ブレーキ力（体性感覚）
  ブレーキの種類によって，ブレーキの利き方は異なる．この点に関しては，VR 空間上で慣れが必要である．ただし，自分自身の自転車を用いることが可能というコンセプト通りのものができれば，この慣れは必要なくなるものと考えられる．

１.３.５ 慣性力(その他)

- 勾配・段差の視覚的知覚（視覚）
  進路に段差や勾配の存在を，まず目で確認することで，運転の度合いを判断しているはずである．勾配に差し掛かる前にはギアチェンジを行い，段差の前には速度をかなり落として段差を越えた時にハンドルが取られないようにハンドルを強く握る．最後に，段差を越えた時，勾配時にどれだけ自分がぶれているかについて目で見て判断する部分も存在すると考えられる．
- 段差を越えるときの振動や勾配による負荷変化
  段差を越える時や勾配に差し掛かる時に，ハンドル（強く握っている）・サドル・ペダルの変化を知覚していると考えられ，それにより運転者は運転強度を変化させているものと考えられる．また，下り勾配時には，ブレーキも使用する．

１.４ "Morics"のシステム開発と再現性向上のための工夫

本節では，１.３で述べた開発項目に合わせて，シミュレータ環境で運転感覚を再現するために必要な CS 開発を行う．また，現実環境とシミュレータ環境との間の相違を埋めるための再現性向上のための工夫点について併せて述べていく．

１.４.１ ハンドル操作の表現と再現性向上のための工夫

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，VR 空間上の走行軌跡を，ハンドル回転角からハンドル回転させたときの自転車の旋回角を，前輪・後輪の位置とハンドル回転角を考慮した物理挙動モデルにより変換を行っている．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，4 章で，上記の自転車旋回角の物理的なモデル式に対して，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，現実のハンドル操作に近づける工夫を行っている．

1. 4. 1. 1 小型無線多機能センサ TSND121 の仕様とハンドル旋回角の表現

ハンドル回転角速度を取得している角速度センサの外観と仕様を図 3. 6，表 3. 2 に示す．

図 3. 6　小型無線多機能センサ TSND121 の外観

表 3. 2　小型無線多機能センサ TSND121 の仕様

データ保存		
	形式	csv 形式(Excel 処理可)
	メモリ保存	512Mbyte
データ送受信方法		
	無線送信	Bluetooth (通信距離最長　10m)
	有線接続	USB シリアル通信
搭載センサ		
	加速度 角速度センサ	サンプリング：　約 4～最大 1000Hz（1～255msec 周期）
		角速度レンジ：±250dps/±500dps/±1000dps/±2000dps
		角速度分解能：±0.08dps/±0.15dps/±0.30dps/±0.61dps

車体の走行軌跡を求める際のハンドル操舵角からの展開式を以下に示す.

- ハンドル操舵角と前輪操向角度との関係

$$\theta \propto \delta \quad \text{（ハンドル操舵角度が小さい→}\theta = \delta\text{と仮定）・・・式(3-1)}$$

- 前輪操向角度と車体旋回角速度との関係

$$\dot{\psi} = \begin{cases} 0 & (=0) \\ \dfrac{V\tan\delta}{L} & (\neq 0) \end{cases} \text{・・・式(3-2)}$$

- 角速度から角度への展開

$$\psi = \int \dot{\psi} dt \text{・・・式(3-3)}$$

- 車体旋回角度から走行軌跡への展開

$$(x, y) = \left(\int V\cos\psi dt, \int V\sin\psi dt\right) \text{・・・式(3-4)}$$

θ：ハンドル操舵角度(deg)：自転車車体軸をゼロとした時のハンドルが切れている角度
δ：前輪操向角度(deg)：ハンドル操舵に対して，前輪が切れる角度
ψ：車体旋回角度(deg)：自転車車体軸をゼロとした時の自転車の進行方向角度
$\dot{\psi}$：車体旋回角速度(deg/s)
V：自転車速度(km/h)

1.4.1.2 角速度センサの誤差要因

測定誤差は 3 つの要因に分類可能である．1 つ目に，ドリフト誤差である．この誤差は，キャリブレーション終了後に発生する測定器（測定システム）の性能変化による誤差である．測定値は，オフセットやゲインが温度変化や経過時間で変わってゆくことになり，これは測定器内部の接続ケーブルの熱膨張や周波数変換器の温度ドリフトなどが主な要因となる．温度ドリフトの影響が最も大きいと言われる．周囲温度の変化に応じてより頻繁にキャリブレーションを実行する，あるいは測定における周囲温度をできる限り一定に保つことなどにより，これらの誤差を低減することができるとされている．

2 つ目に，ランダム誤差である．この誤差は時間を関数として不規則に変化する誤差である．ランダム誤差はその振る舞いを予測できないため，取り除くことはできない．ランダム誤差は主に以下の 3 つの誤差要因に分類できる．

- 機器ノイズ誤差；測定器内部に使用されている部品の電気的変動に起因する．
- スイッチ再現性誤差；測定器内部に使用されている機械式 RF スイッチのオン時の特性が，スイッチングごとに変化することに起因する．
- コネクタ再現性誤差；コネクタの摩耗によりその電気的特性が変化することに起因．

3 つ目に，システマティック誤差である．この誤差は測定器およびテスト・セットアップ（ケーブル，コネクタ等）の不完全性に起因する誤差である．これらの誤差は予測でき，その特性は時間とともに変化しないと仮定できる．キャリブレーションによってこれらの誤差の特性を測定し，数値的にこれらの誤差を取り除くことができることになる．

■　ドリフト誤差の補正方法

①．周囲の環境（温度や湿度など）を一定に保つ．

②．定期的にキャリブレーションする測定シーケンスを組む．
　→センサの出力は常に小さく変化しているので，センサ出力を移動平均する．

③．同程度のドリフトを持つ測定器を 2 組用意してドリフトをキャンセルする．
　→この 2 組をセットとして考えるのが差動型センサと呼ばれるもの．

1.4.1.3 角速度センサ精度確認実験

機器のデータ精度を確かめるために 2 度，精度確認実験を行った．

分度器（図 3.7 左）の上に回転台・センサを載せ（図 3.7 右）、目分量による角度とセンサによる角度がどれだけ一致しているかでキャリブレーションを行う．そこで，左右交互回転（赤線）と一方向回転（青線）を行い、繰り返し精度・分解能精度・ノイズ誤差を検定する．分解能精度は，1 回目：最低（0.61dps/±2000dps），2・3 回目：最高（0.08dps/±250dps）である．

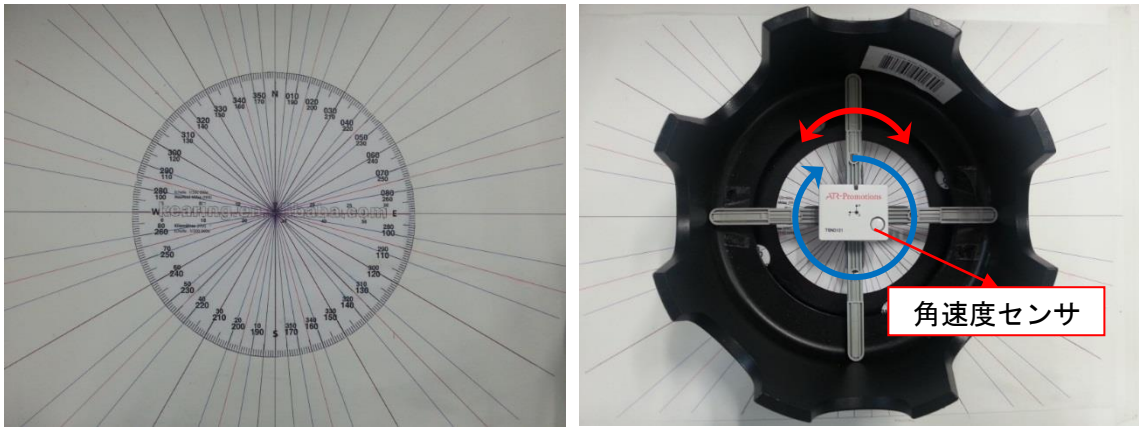


図 3. 7　実験の様子

＜実験結果＞

1 回目の精度確認実験では，主に，機械的ノイズ誤差，異なる回転方向や回転速度の場合での誤差について検討した．そこで，以下の知見を得た．（表 3. 3，表 3. 4）

- 機械的ノイズは時間とともに周期的に動く
  →機械的ノイズの平均値を求め，各測定値からノイズ誤差を差し引く方法で誤差補正を行う
- 機械的ノイズの平均値は全ての測定において 0.18～0.24 の間
  →ある程度一致したノイズ量ではあるが，測定ごとにノイズを測定し誤差を補正していく
- 角速度レンジが分解能を最高にしても測定可能範囲である
  →次回からは分解能を最高に
- 一方向回転において，回転速度に関わらずほぼ同じ誤差が発現
- 左右回転において，回転速度に関わらず，約 2 度の測定誤差（目分量の誤差含）
  →回転速度に関わらず，一定方向回転量に応じて誤差が線形で出る
  →左右方向の回転では，各方向での誤差が左右で打ち消され，最終的にゼロとなる

2 回目では，分解能を最高にし，回転速度を 1 種類のみで行い，左右交互（周期）回転でより多くの周期回転を行った時に発生する誤差と，一方向回転の回転数に対して発生する誤差の性質をみた．そこで，以下の知見を得た．（表 3. 5）

- 左右交互回転において，左右に振る角度の大きさに関わらず，誤差が±1°程度
  →目分量で測定していることを考えると，左右に同じ量だけ振った時の誤差はゼロであると考えられる
- 一方向回転では，1 回転で約 4 度，4 回転で約 16 度の誤差が発生
  →誤差が回転量に対して線形で発生している

3 回目では，一方向回転のみで行い，再び回転量における誤差量の関係を調べ，さらに，左右に回転させた時の誤差量の違いについてみた．そこで，以下の知見を得た．（表 3. 6）

- 一方向回転では，1 回転で約 4 度，４回転で約 16 度の負の誤差が発生している
  →誤差が回転量に対して線形で発生し，センサの測定値の方が実測値よりも小さい
- 一方向回転の向き（左右方向）と誤差量には差がほぼ無い
  →「純粋に回転量に対して誤差量が線形で発生する」と言える

3 回の誤差確認実験により，角速度センサの誤差発生の性質と，測定限界について知ることができた．実走実験及び CS 走行実験では，機械的にどうしても発生してしまう約 1%の誤差補正と，機械的ノイズの時間的誤差補正を行うことでセンサのキャリブレーションを行っている．

表 3. 3 サンプリング間隔における機械的ノイズの平均値

dps（角度/秒）	低速回転			高速回転		
	1 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
一方向回転	0.237	0.213	0.201	0.240	0.193	0.195
左右回転	0.210	0.208	0.195	0.202	0.178	0.178

表 3. 4 機械的ノイズ補正後における誤差①

角度（deg）	低速回転			高速回転		
	1 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
一方向 4 回転	-19.9	-19.4	-19.4	-19.2	-21.8	-21.0
左右 5 周期	1.9	2.3	1.1	0.1	0.2	1.6

表 3. 5 機械的ノイズ補正後の誤差②

角度（deg）		低速回転			平均
		1 回目	2 回目	3 回目	
左右交互	±5°(20 周期)	-0.50	-1.70	-0.49	
	±15°(20 周期)	-1.19	-0.95	-1.05	
	±30°(20 周期)	×	+0.25	+0.20	
	±45°(5 周期)	+0.52	+0.80	+0.80	
	±60°(5 周期)	0.39	-1.01	-0.09	
一方向	1 回転	-3.85	-4.49	-4.54	-4.29
	4 回転	-16.3	-14.6	-16.1	-15.67

表 3. 6　一方向回転における回転数別・左右別測定誤差結果

			回転角（deg）			平均 (deg)	1 回転辺りの回転誤差 (deg)
			1 回目	2 回目	3 回目		
一方向回転	1 回転	右	356.2	355.5	355.5	355.7	4.3
		左	356.6	355.9	355.6	356.0	4.0
	4 回転	右	1423.7	1425.4	1423.9	1424.3	3.9
		左	1423.5	1424.3	1423.3	1423.7	4.1

1. 4. 1. 4 ハンドル回転のための支持台

ハンドル回転のための支持台に関する課題点とそれに対する本研究で製作を行った支持台の要件と効果について，表 3. 7 にまとめる．回転台製作に当たり，設計コンセプトに関しては筆者が担当し，設計デザインや製作においては，高谷工業株式会社の協力を得て，共同開発を行った．

表 3. 7　本研究で製作したハンドル回転のための支持台に関する課題点・要件・効果の整理

課題点	要件	効果
ハンドル回転時にタイヤの接地位置が変化し、回転台が移動してしまう	フォーク回転軸とタイヤとの交点に接するように設置	回転軸にタイヤの接地点が乗っているため、ハンドル回転に対して接地位置が変化せず、回転台が移動しない
地面に対して平行に接地しないことで、重力による余計な力が自転車に働く	前輪中心から地面への垂線に対して回転台の接地点と対称となるように支持台を設置	重力の作用点（2 点）が前輪中心から地面への垂線に対して対称な位置のため、重力の反力が垂直上向き方向となり、余計な力ベクトルがキャンセルされる

1.4.2 空走状態・ブレーキ制動の表現と再現性向上のための工夫

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) 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，5 章では，実走行実験により，空走及びブレーキ制動における速度減衰状態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．

１.４.３ ペダリングの表現と再現性向上のための工夫

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）を表現している．ペダリング負荷に関して，Whitt and Wilson が提唱しているように，ペダル負荷は速度及びライダーと自転車の重量の一次関数となっていることが分かる．

その際，再び漕ぎ出すような状況がある場合，その時のペダリング負荷は，１.４.１.４で述べた速度減衰状態を線形近似したモデルから計算された走行速度に応じたものを表現できるようにロードジェネレータの回転抵抗を調整する工夫を行っている．

$$\mathrm{W} = \frac{C_v}{\eta_{mech}}\left[\sum mg\left\{C_r + \frac{s}{100} + \frac{a}{g}\left(1 + \frac{m_w}{\sum m}\right)\right\} + 0.5C_D A\rho(C_v + C_w)^2\right]$$

・・・式(3-5)

W: power(w), C_v: speed of the bicycle(m/s), η_{mech}: mechanical efficiency of the bicycle

$\sum m$: mass of rider and machine(kg), g: accelration due to gravity(m/s^2), C_r: coefficient of rolling resistance

s: gradient(%), a: acceleration of the bicycle(m/s^2), m_w: effective rotational mass of the wheels and the tyres(kg)

C_D: aerodynamic drag coefficient, A: frontal area of rider and machine(m^2), ρ: density of air(kg/m^3), C_w: headwind(m/s)

１.４.４ 視界環境及び頭部動作の表現と再現性向上のための工夫

Morics では，現実空間の映像を使用せず，仮想空間として視環境を設計している．現実空間の映像を使用しなかった理由として，同一の実験条件を設定することが難しいことが挙げられる．これは現実空間で実験をする上での欠点でもあるが，車両や歩行者以外の道路環境だけを現実のものとして表現する（拡張現実：Augmented Reality）ことで，よりリアルな視環境を再現可能であるとも考えられる．しかし，このような拡張現実の技術を使用すると，仮想物体と現実環境・物体との相互作用，例えば，視覚要素では，照明や影，テクスチャーを合わせることが難しく，合わせられない部分が違和感として感じられてしまう可能性がある．これらの理由から仮想空間での視環境設計を行っている．仮想空間の構築に際し，シナリオ設計は筆者が担当し，仮想空間の 3D モデリングや車両等の制御はタイダルウェイヴ株式会社の協力を得て，共同開発を行った．

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こないので，仮想現実空間（以下，VR 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 3. 8** の右側に示されている NVIS 社製 nVisor

SX111 を使用した．しかし，この HMD を使用する際に，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ことが考えられる．そこで，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，HMD 支持機構を独自に作製して本システムに組み込んだ．さらに，6 章では，これまでの支持機構を改良し，可動性が高く，HMD の軽量化が図れるようになった．

表 3. 8 本システムで使用する HMD の主な仕様 [53)]

		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°	
解像度		1280×1024(640×1024/1lens)	
重さ		1400g	1300g
センサ		角度センサ	
オーバーラップ		50%	66%
Latency		<16.7ms	
IPD range（両眼間隔調整）		53mm-73mm	
リフレッシュレート		60Hz	
パネル		マイクロディスプレイ(LCOS)	

１.４.５ 傾きの表現と再現性向上のための工夫

一般的にトレーニングで用いられる図 3. 8 に示すサイクルトレーナのように後輪部が固定されていると，左右に傾くことができず傾きにおける再現性が低い．そのために，最近では図 3. 9 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が存在し，これにより左右に傾く方向への自由度がある程度確保することが可能となり傾きの再現性が向上している．本研究の CS では，このタイプのものを用いて左右の傾きに対する再現性をある程度確保している状態をスタートポイントとして，傾きの CS 上での更なる再現性の向上について検討している．

図 3. 8 完全固定式サイクルトレーナ [54)]

図 3. 9 左右に傾き可能な仕組みのサイクルトレーナ [55)]

1.4.6 減速・勾配・段差・路面凹凸

CS では，減速感，勾配，段差，路面凹凸などの慣性や衝撃といった感覚を，1 軸モーションベース（最大移動速度 30cm/s）で前輪部の上下動のレンジや速度，周期を調整することで表現する．表 3. 9 に，自転車走行中の具体的場面を各状態においてにまとめる．

表 3. 9 各状態における自転車走行中における具体的場面

勾配	・歩道面から車道面にゆるりと上り下りする勾配(±2°程度) ・上り坂・下り坂(±5°程度)
路面凹凸	・舗装面を走行する際の周期的な路面凹凸(毎秒 1 振動程度)
段差越え	・歩道面⇔車道面の段差(5cm 程度)
制動･衝突	・急ブレーキ時の前のめり感 ・ガードレールや歩行者等への衝突感

１.５ 結語

本章では, 第 2 章で示した開発計画を元に交通安全分析用 CS のベースとなる設計開発を行った．１.２では，シミュレータ環境への適応性を考慮した CS 開発の方向性を決定づけるのに重要な人間特性の要素として運動学習，意思決定，同期的マルチタスクを挙げ，現実環境とシミュレータ環境との間のギャップを最小限にするために運転感覚の再現性向上に向けた開発をする必要性を示した．同時に，現実環境とシミュレータ環境との間の埋めきれないギャップに関して，違和感があっても制御できるように学習しようとするプロセス（運動学習）を観察し，最終的に周囲への意識が向いているか等のマルチタスクとしてシミュレータ環境上で運転ができているかについて着目すること（同期的なマルチタスク処理）で再現性検証を行う必要性についても示した．１.３では，実際にどのような外部情報を自転車運転中に得ているかについて整理し，シミュレータ環境上で必要な自転車の運転感覚について，速度，傾き，ハンドル，ブレーキ，慣性力に関係する外部情報を視覚・前庭感覚・体性感覚情報別に分類を行った．１.４では，１.３で分類を行った自転車運転中の外部情報を基に，Morics のベースとなる設計開発の詳細について述べ，再現性向上のために必要な工夫についても併せて示した.

第４章ハンドル・ペダル操作に起因する走行挙動の不安定性の再現

１.１　自転車操作に起因する挙動の不安定性に影響する項目の整理

１.２　直進中速走行時のハンドル・ペダル操作に起因するふらつきの表現

１.３　対面通行自転車道シナリオの開発要件の設定及び CS の改良

１.４　対面通行自転車道におけるすれ違い挙動観測実験

本章では，CS の操作性において重要な検討課題のうちの 1 つである「自転車操作に起因する挙動不安定性」について，中速直進時におけるふらつき挙動をハンドル操舵角モデルとして CS 上で再現し，再現性評価を行った上で，人間特性を考慮した調整により，よりシミュレータ環境への適応性及び運転挙動・感覚の再現性について検討を行う．また，交通安全分析用 CS の妥当性検証対象として，対面通行自転車道のすれ違い挙動分析を行う．

１.１ 自転車操作に起因する挙動の不安定性に影響する項目の整理 [56)]

１.１.１ キャスター角，トレール

キャスター角（α）とは自転車のフロントフォークが鉛直よりも前よりに傾いている角度のことであり，トレール（ｐ）はフォーク延長の接地点と前輪中心との水平距離を指す．一般的に，キャスター角が大きいほど，トレールが長いほど，直進安定性が増し，両者の間には $p = r\tan\alpha$ という関係がある．これは，図 4. 2 左側に示すようにトレールによって前進方向にモーメント M が働くためで，重力を W とすると $M = W \times p$ で表わされる．このモーメントはトレール長に依存して，図 4. 2 右側ではモーメントの車輪のサイズによる変化を示している．半径が大きい方のモーメントは$M_1 = W \times p_1$，半径が小さい方のモーメントは$M_2 = W \times p_2$となり，半径が大きい方のモーメントはトレールが長いため，その分モーメントが大きくなり，直進安定性が増すことが言える．

また，手押しワゴンに代表される図 4. 3 に示すような自転車とは逆方向のトレールでは，直進安定性よりも回転性を向上させる方向に働く．その反面，直進性が低下し，ふらつきやすくなるといった特徴がある．

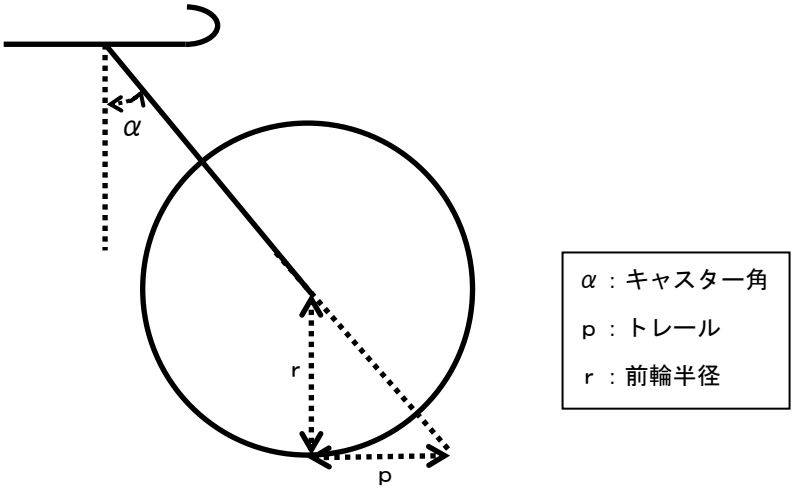


図 4. 1 キャスター角･トレール

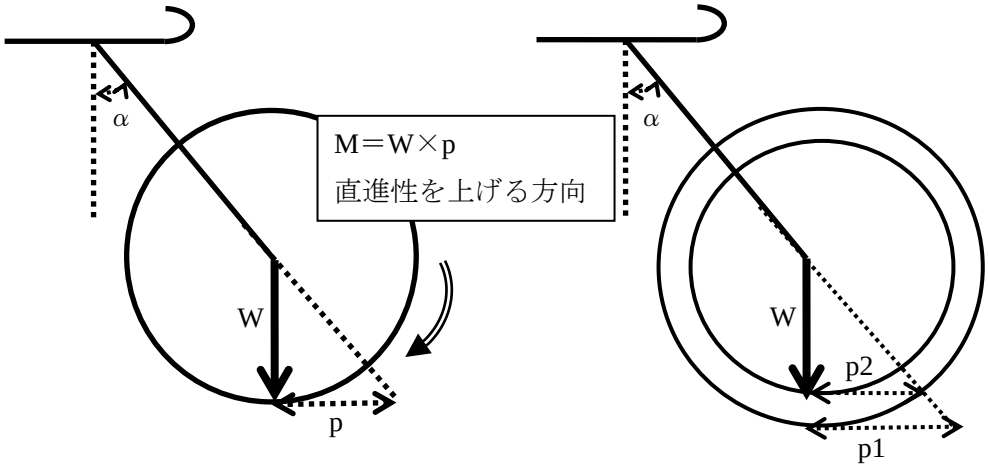


図 4. 2 トレールによるモーメント

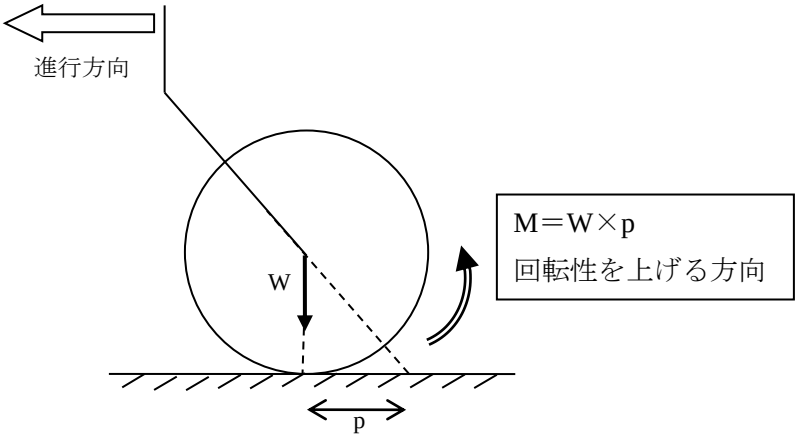


図 4. 3 手押しワゴンのトレール

１.１.２ ジャイロ効果

角運動量保存則と歳差運動の 2 つを併せて「ジャイロ効果」と言う．この 2 つの物理現象があるため，自転車は車輪の回転を維持（角運動量保存則）し，乱れた場合は回転を立て直す（歳差運動）ことが可能となる．角運動量保存の効果により，直進安定性が高まり，歳差運動の効果により，重心移動安定性が高まる．また，回転速度（角運動量）が大きくなるほど，接地荷重が小さくなるほど，この効果は大きくなる．

□ 角運動量保存則

角運動量が大きいほど，角運動量の変化がゆっくりしているため倒れにくい．ここで角運動量 L とは運動量のようなもので，「運動の勢い」を表わす．慣性モーメント I と角速度 ω の積で表わされ，向きを持つベクトル量である．基礎物理学での運動量と比較すると，慣性モーメントが質量にあたり，角速度が速度にあたる．外力が働かない状態では角運動量は保存し，外力が働くときは角運動量の時間変化が外力と等しくなる．

慣性モーメントは $I=mr^2$ で表わされ，質量が大きいほど大きく，半径が大きいほど大きい．そのため，重くて径の大きい車輪のほうが慣性モーメントは大きい．
また，角運動量の小さいキックボードが倒れない理由も示す．それは，重心移動を使うことによってバランスをとりやすくしているためである．重心が高いと，人の姿勢変化による重力の影響が大きく，制御しやすいと言える．

$$L(\text{角運動量}) = I(\text{慣性モーメント}) \times \omega(\text{角速度})$$

・・・式(4-1)

進行方向を x'軸，車輪の回転軸を y'軸，ハンドルの回転軸を z'軸とする．前輪が角速度ωで回転している時，車体が角速度φで傾いたとする．すると，ハンドルには z'軸まわりに図 4. 4 で表される右回りのモーメント T_{gyro} が発生する．このような現象をジャイロ効果の，特にプレセッション効果と呼ぶ．この現象も傾いている方向にハンドルを回すので，自立機能として働く．

$$T_{gyro} = I_f \cdot \omega \cdot \dot{\varphi}$$

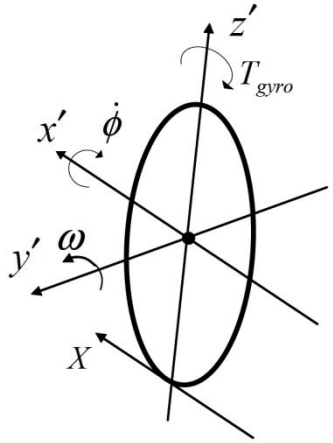


図 4. 4 ジャイロ効果（前輪）

１.１.３ 重量効果

前輪系の重心 Gf はハンドルの回転軸よりも距離 f だけ前方にある．そのため，自転車が傾くと，図 4. 5 に示すように車体の垂直方向に重力の分力が生じ，ハンドルの回転軸には図 4. 6 で表されるトルクが発生する．これを前輪系の重量効果という．このトルクは，傾いている方向にハンドルを回そうとするので，重量効果は自転車の自立機能として働くことが分かる．

$$T_{front} = f \cdot m \cdot g \cdot \sin\varphi \text{・・・式(4-2)}$$

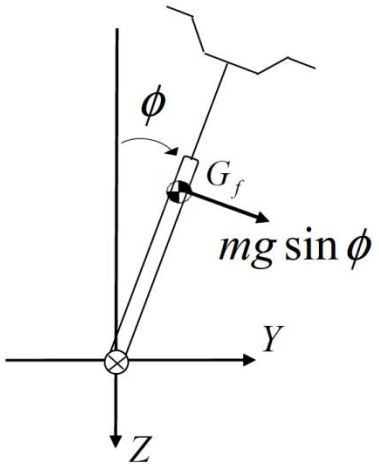


図 4. 5 重力の分力（自転車の後面図）

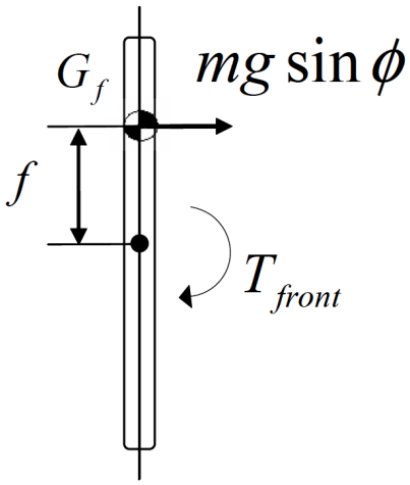


図 4. 6　発生するトルク（前輪の上面図）

１.１.４　サイドスライド効果

図 4. 7 のように，自転車が傾くと接地点では進行方向と垂直な方向に力 F が発生する．この力をコーナリングフォースという．コーナリングフォースによって，接地点が傾いている方向に押されるので，自転車が起き上がる．この効果をサイドスライド効果という．旋回時にはこのコーナリングフォースと遠心力がつり合って走行している．

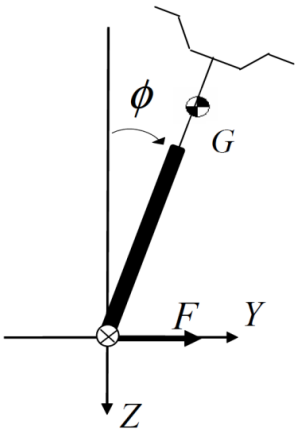


図 4. 7　コーナリングフォース（自転車の後面図）

１.１.５　トレール効果

前輪の接地点はハンドルの回転軸よりもトレールL_1だけ後方にある. 前輪の接地点には図 4. 8 の F で表されるコーナリングフォース及び図 4. 9 の F'で表される走行抵抗が働いている．これらの分力が，ハンドルの回転軸から$L_1 \sin a$だけ離れた地点に働くため，で表すトルクT_{trail}が発生する．これをトレール効果という．ここで，コーナリングフォース F，走行抵抗 F'はそれぞれキャンバ角φ，車輪の回転角ωに比例すると仮定し，その係数をキャンバースラスト係数C_t，摩擦係数μとした．走行抵抗は自転車の速度が速くなるほど大きくなるの

で，トレール効果は高速時に大きなトルクを生む．つまり，ハンドルのぶれを防ぎ，自転車の直進安定性を高めている．

$$T_{trail} = T_a + T_b = (F\cos b + F'\sin b)L_3\sin a = (C_t\varphi\cos b + \mu m\sin b)L_3\sin a \cdot\cdot\cdot 式(4\text{-}3)$$

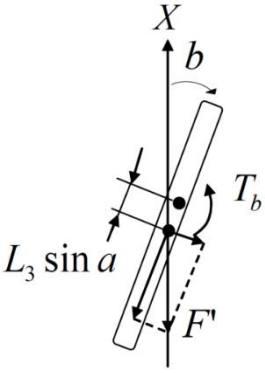


図 4. 8 トレール効果（コーナリングフォース）

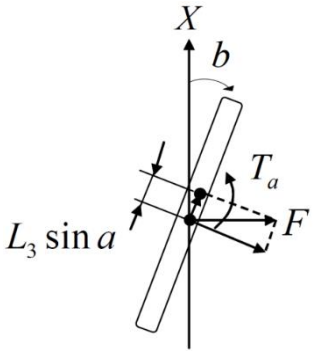


図 4. 9 トレール効果（走行抵抗 F'）

1.1.6 キャンバースラスト効果 [57)]

キャンバースラストとは，タイヤが傾くことによって接地面のイン側部分の方がアウト側より円周が短いことで働く力であり，自転車の直進安定性を高めている．キャンバ角が大きければ大きい程，キャンバースラストも大きくなる．

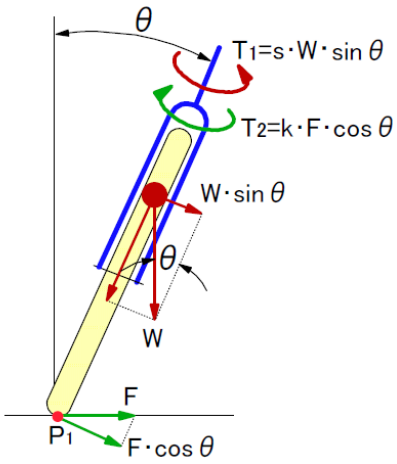


図 4. 10 キャンバースラスト効果（コーナリングフォース F）

1.1.7 セルフアライニングトルク [57)]

スリップ角がついて横力を発生しているタイヤはそれ自身でスリップ角ゼロの状態に戻ろうとするモーメントを発生している．このトルクをセルフアライニングトルクと言い，ハンドルを切って旋回している状態からハンドルを放すと直進状態に戻っていく主な要因は，上記のトレール効果とこのセルフアライニングトルクが関係している．また，スリッ

プ角に対するセルフアライニングトルクは，スリップ角が小さい領域では横力の上昇にしたがって増加し，スリップ角が大きくなってくると次第にニューマチックトレールが短くなってくるため減少して，スリップ角が非常に大きい領域では負の値になる．（図 4. 11）

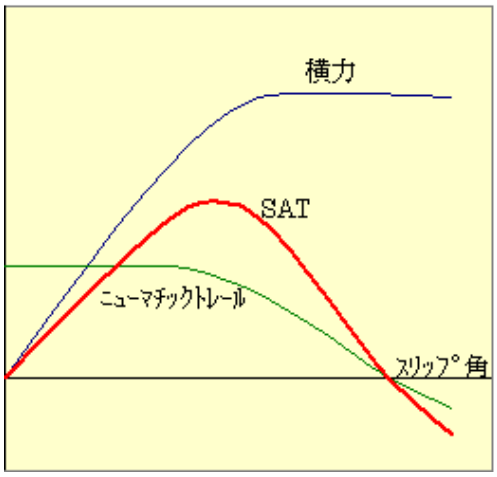


図 4. 11 スリップ角に対するセルフアライニングトルク(SAT)

１.１.８ 自転車の運動モード

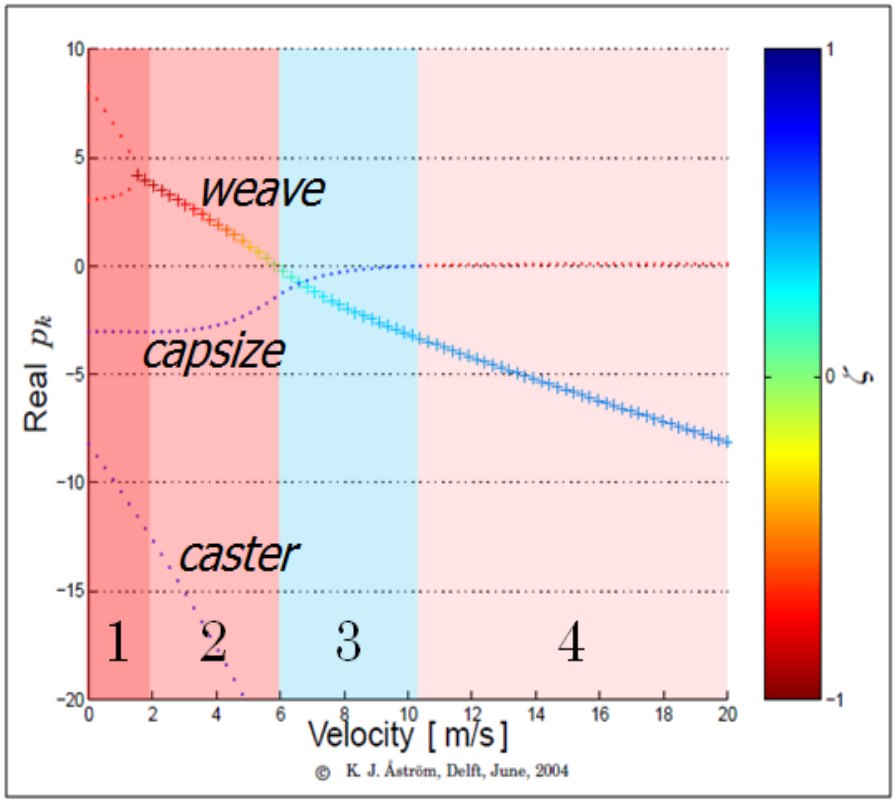


図 4. 12 自転車の運動の固有値(1/s)と自転車速度(m/s)の関係 [58)]

縦軸に自転車の運動の固有値が表されており，正が不安定状態，負が安定状態を表している．これより，速度帯に応じて固有の運動状態が存在することがわかる．また，固有値の絶対値が小さいほど運動状態として支配的なものとなる．主に，Capsize（転倒）と Weave（蛇行）モードが支配的であり，Caster（キャスター角による直進性）は他の二つのモードと比較すると絶対値が大きいので影響が小さい．各運動状態の説明を速度帯とともに説明したものが表 4. 1 である．特に，赤で示された Weave モードが発現する速度帯での自転車の安定性の再現性が都市内の自転車走行の再現をする上で重要なものとなると言える．

表 4. 1　速度に応じて変化する自転車の運動モード [58)]

	モードの特徴	実挙動との対応
Capsize (転倒)	・ 2m/s(7.2km/h)以下の低速度域 ・ 倒立振子（逆立ちした振り子）としての特性が支配的 ・ 放っておくと倒れてしまうような状態	ライダーは上半身を傾けて重心をずらして、倒れないようにしないといけないような状態
不安定な Weave (蛇行)	・ 2m/s(7.2km/h)～6m/s(21km/h) ・ 振動的な Weave モードが発現	ステアリング(ハンドル)を動かして、倒れないようにする状態
安定な Weave (蛇行)	・ 6m/s(21km/h)～10.4m/s(37km/h) ・ Weave モードは安定的な状態	外力がかかると蛇行するが、 じきに収まって直進する (手放しでも走れる)
不安定な Capsize (転倒)	・ 10.4m/s(37km/h)以上の高速度域 ・ 不安定な状態	不安定具合はとても低く、ゆっくりと方向が変わるのでライダー操作によって簡単に安定化する

１.２ 直進中速走行時のハンドル・ペダル操作に起因するふらつきの表現

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．

１.２.１ ハンドル操舵角モデルの考え方

村上[56]は，ハンドル操舵に影響を与える要因として，１.１で説明した前輪系の重量効果，ジャイロ効果，トレール効果の他に，人為的なハンドル回転及び路面摩擦による外乱の５つの影響を挙げている．それに，キャンバースラスト効果も加えて，計 6 つの効果をハンドル操舵角モデルで表現することを目標とした. 7 つ目に挙げたセルフアライニングトルクに関しては，走行中のタイヤ変形量は微小であり，無視可能であると考えた.

次に，モデルに組み込む 6 つの効果を説明するための説明変数を決定していく．まずは，モデルの形であるが，１.１で検討した各効果の慣性モーメントや自転車車体寸法等，実測が容易であったり，複雑であったりするものはあるが，定数項として扱える部分をパラメータとして考え，回転運動の運動方程式である「慣性モーメント I(kg・m^2)×角加速度(rad/sec^2)＝トルク(N・m)」の関係から，ハンドル操舵角加速度を表すモデル式を最初に検討した.

しかし，多くの効果項に車体傾き角が存在するために各項を独立として扱えず，また，角加速度をモデルとして表せたとしても，角加速度を積分して角度を求めていくために，積分段階でモデルによる誤差が溜まってしまう恐れがある．よって，今回は各効果を表す代表的な説明変数を設定し, かつ CS に組み込むためになるべく計算負荷が少なく簡単に処理が可能なモデル式とするために一般非線形重回帰モデルとした．以下に，ハンドル操舵角を表すモデル式を示す.

$$\theta(\text{操舵角}) = \beta_1 + \beta_2 \omega \dot{\varphi} + \beta_3 \varphi + \beta_4 P \cdots \text{式(4-4)}$$

$$\begin{cases} \omega：\text{車輪回転速度(rad/s)} \\ \varphi：\text{車体傾き角(deg)} \\ \dot{\varphi}：\text{車体傾き角速度(deg/s)} \\ P：\text{右手ハンドル回転荷重(g)} \end{cases}$$

モデルの説明変数は，各効果の物理量を分けて抽出すると，ジャイロ効果（車輪回転速度×車体傾き角速度），人為的なハンドル回転（右手ハンドル荷重），車体傾き角に集約される．これらを説明変数として設定した理由を実験的，感覚的な観点からも説明する.

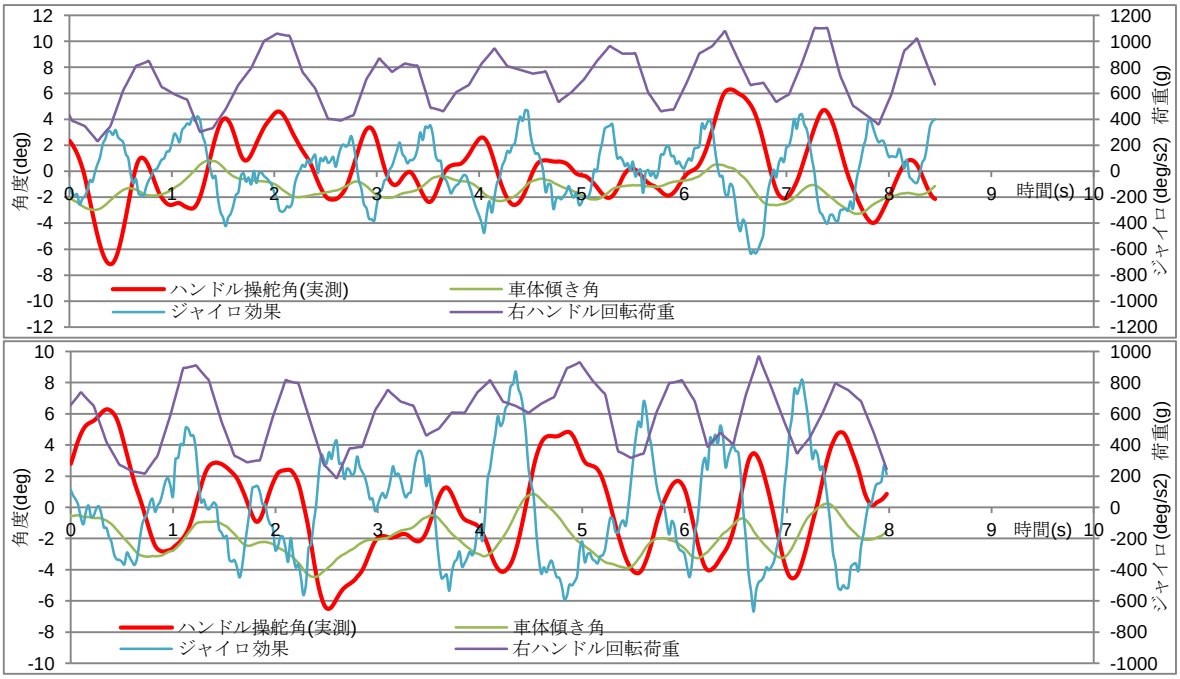
図 4. 13 は実走実験より得られた，ハンドル操舵角に対する，車体傾き角，ジャイロ効果，右ハンドル回転荷重の推定区間における時間的推移を示したものである．実走実験の概要については，１.２.２で詳細を述べる．これより，全体的な数値の傾向を見ると，以下のような特徴が見て取れる.

- 全体的にサインカーブのような周期的な動きが見られる
- 右ハンドル荷重が増える（減る）と，右（左）方向にハンドルが切れている
- ジャイロ効果の数値が減る（増える）と，右（左）方向にハンドルが切れている
- ジャイロ効果の値が大きい（小さい）ほど，ハンドルが切れる角度が大きい（小さい）
- 右ハンドル荷重の挙動では捉えられないような細かなハンドル回転もジャイロ効果の挙動によってハンドル回転との相関が見られるような部分がある
- 右ハンドル荷重やジャイロ効果とハンドル操舵角との相関を見ている時よりも大きな周期で見ると，傾き角が増える（減る）と，右（左）方向にハンドルが切れているといった動きが見られる

また，感覚的に考えても以下のようなことが言える．

- 速度が大きい（小さい）ほど，直進性が増す（減る）
- 傾き角速度が大きい（小さい）ほど，自転車が起き上がり直立状態に戻ろうとする（あまりしない）
- 右ハンドル回転の力の大きさが大きい程，右にハンドルが切れる
- 傾けば傾くほど，ハンドルは傾いた方向に切れていく

これらの実験的・感覚的理由から，理論的な物理式も考慮に入れた上で，ジャイロ効果，右ハンドル回転荷重，車体傾き角を説明変数として採用した．また，ハンドル操舵角に対して，右ハンドル回転荷重はハンドル操舵角と正の相関，ジャイロ効果は負の相関，傾き角は正の相関があると推定できる．



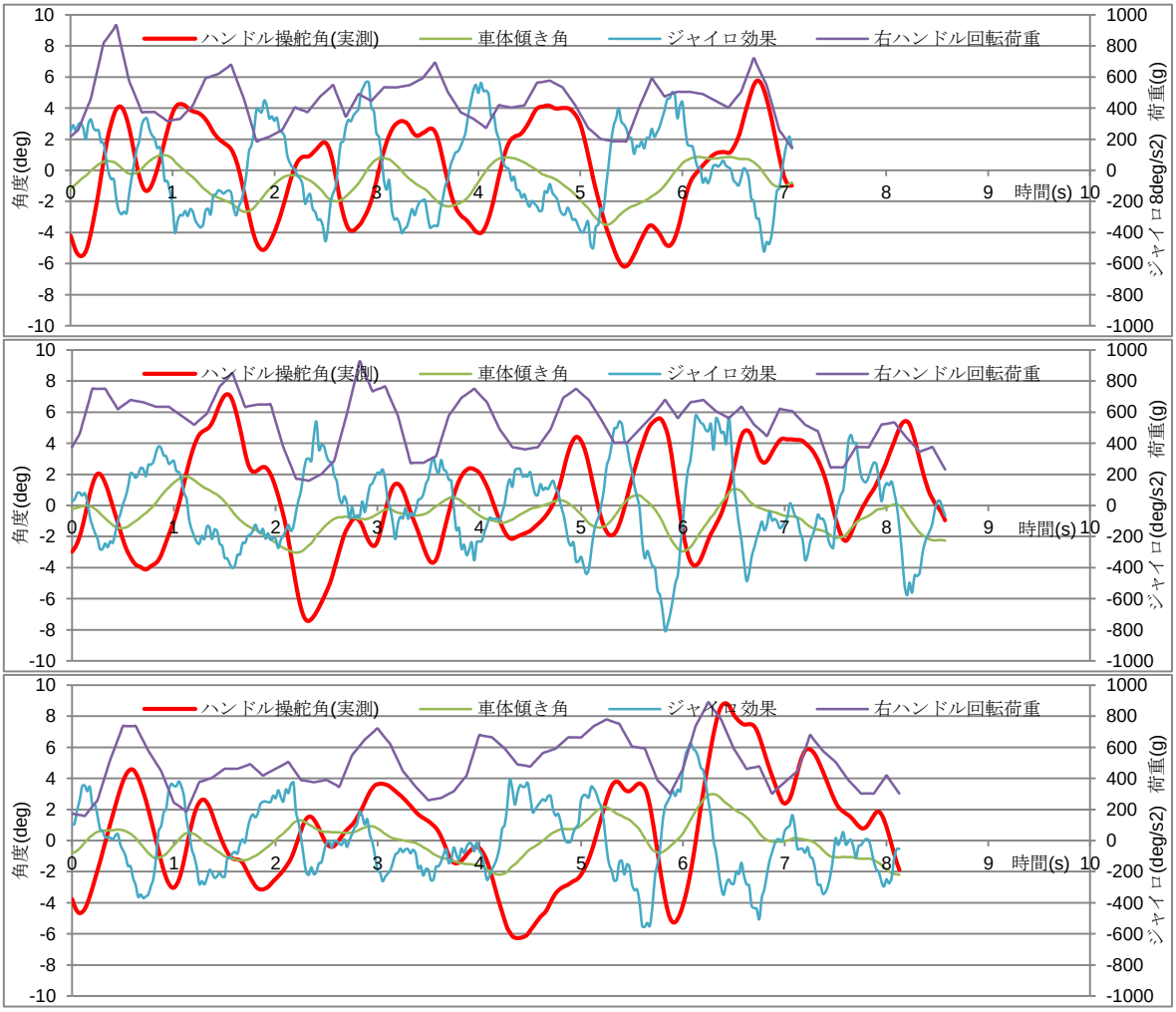


図 4. 13　5 回走行分のハンドル操舵角，車体傾き角，ジャイロ効果，右ハンドル回転荷重との関係

１.２.２　実走実験

1. 2. 2. 1　プローブバイシクルの設計

4 章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．その外観図と各種センサの装着位置を図 4. 14 に示す．収集するデータ，計測・算定方法については表 4. 2 に示す．

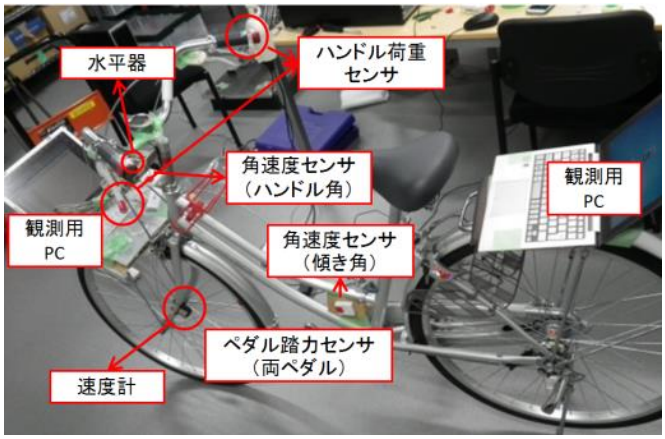


図 4. 14　プローブバイシクルの外観図と各種センサの装着位置

表 4. 2　プローブバイシクルで観測するモデル入力項目の計測・算定方法及び計測データ

モデルへの入力項目	計測方法	算定方法	計測データ
ハンドル回転力	圧力センサ	直接計測	回転方向の荷重
傾き角	角速度センサ	1 階積分	傾き角速度
傾き角速度		直接計測	傾き角速度
ハンドル角		1 階積分	操舵角速度
車輪回転速度	速度計	直接計測	速度・タイヤ外周長
ペダル踏力（左右両方）	圧力センサ	直接計測	ペダル荷重

1. 2. 2. 2 各種センサの測定精度検定

プローブバイシクルに装着した各種センサの測定精度・時刻同期について検討し，モデル推定のためのデータとして，センサから出力されたデータをそのまま用いることが可能か，それとも補正が必要かどうかの考察を行っていく．

表 4. 3　速度計の仕様

データ形式・転送	
形式	hrm 形式(text 変換後、Excedl 処理可)
転送	POLAR 受信機→USB アダプタ→解析ソフト(PolarPro5)
データ送受信方法	
無線接続	Bluetooth (通信距離制約)
計測系	
速度計 回転数計	**サンプリング： 最大 1Hz(1 秒に 1 回)**
	速度計計測単位：0.1(m/s)
	回転数計計測単位：1rpm(回転数/min.)

【速度センサ】

実走実験での自転車速度及び車輪回転速度の収集には，Polar CS400 速度計を用いた．仕様を表 4. 3 に示す．サンプリングが 1 秒に 1 回と，スポーツ・トレーニング用に開発されたセンサなので，他のセンサと比べるとサンプリングレートが少ないことが問題点として挙げられるが，実走実験ではある程度一定の速度で走行した時の速度を収集しようとしているので，サンプリングレートが少なくても安定した速度計測が可能であると仮定した．計測の際には，安定した速度計測が可能であることを確認してから実験を行った．

【ハンドル回転力センサ（圧力センサ）】

実走実験でのハンドル回転力の収集には，FlexiForce センサとキャリブレーション用に ELF システムを使用した．圧力センサの仕様を表 4. 4 に示す．センサをハンドル回転に対して反応するように設置したかったため，ハンドルの内側（グリップ時にハンドルを回転させた時，一番多く荷重を受ける面）にセンサを左右一つずつ張り付けて実験を行った．（図 4. 15）その際，初期状態ではセンサは荷重の絶対値を認識していないので，荷重を任意に与えていき，その値を認識させていくためのキャリブレーションが別途必要となってくる．キャリブレーションの様子を図 4. 16 に示す．センサのセンシングエリアに面が平たいピンを載せ，各センサに上荷重が均等に載せられるようにセンサを設置し（図 4. 16 左），キャリブレーションを行った 4 つのセンサの内，精度・感度の良いものから順に 2 つを選んで実験を行った．

表 4. 4　圧力センサの仕様

型式	測定範囲 N	測定範囲 kgf	長さ mm	幅 mm	センシングエリア mm
B201-L	4.4 – 110	0.45－11.3	227	14	9.5

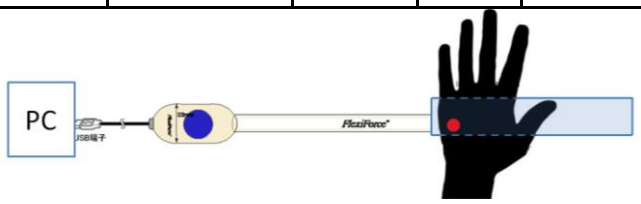


図 4. 15　ハンドル回転力センサの配置イメージ図（赤丸＝センシングエリア）

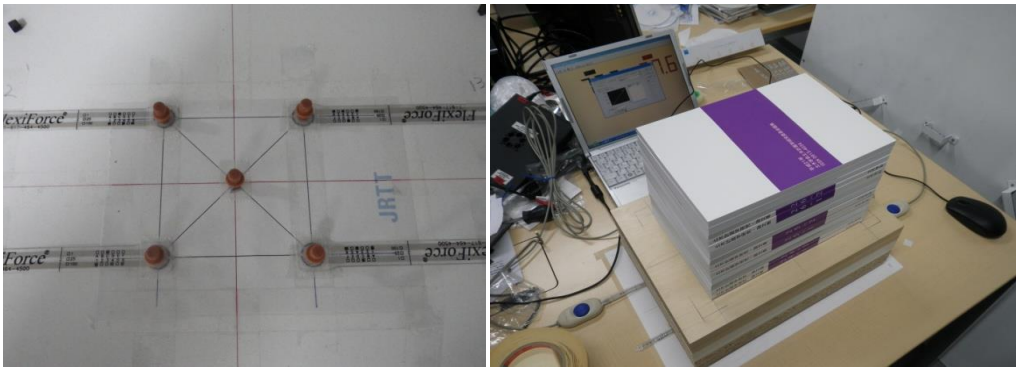


図 4. 16　キャリブレーションの様子

【ペダル圧力センサ】

実走実験でのペダル圧力の収集には，ロードセルをペダルのサイズに合わせて加工したものと携帯型無線指示計を使用した．圧力センサの仕様をに示す．計測データは 1 秒間に 8 サンプルなので，結果をプロットする際は，線形補完を行っている．ロードセルをペダル上面に装着させるとペダル部分の重心位置が上にずれ，少しでもペダルを回転させると，半回転してしまう．そこでペダル下面にも上面に設置したロードセルと同じ形，重さのものを付属し，ペダルが勝手に回転してしまうことを防ぐ形となっている．（図 4. 17）

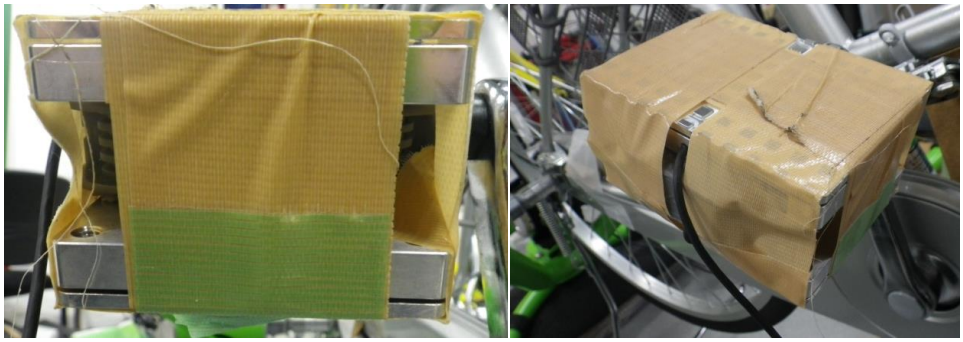


図 4. 17 ペダルとロードセルの接着部分の様子

【種類の異なるセンサ系の時刻同期】

実走実験では，圧力センサが 32bit 環境下での PC，角速度センサは 64bit 環境下での PC，速度計は専用の受信機でデータを記録するため，異なる観測系における時刻同期が重要な作業となる．そこで，まず始めに時刻同期をインターネット上の標準時刻を参照するフリーソフトを使用して行った．しかし，インターネット上の時刻参照は通信速度によって，同期を行う度に 0.1 秒～1 秒の時間差がランダムで生じる．そこで，今回は時刻同期をデジタルな方法では行わず，ブレーキをかけた時に速度計と圧力センサを，走行終了後にハンドルを大きく横に切る動作を行い，圧力センサと角速度センサを同期させることで 3 つのセンサの時刻同期を行った．また，ペダル圧力センサに関しては，角速度センサと PC 時刻によって時刻同期が自動的に行われている．

1. 2. 2. 3 実験の概要

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（図 4. 18）で行い，測定区間内を直進中速で走行した．直進中速で測定データを収集したのは①運転者の体重や身長の影響を受けやすい低速やカーブでの走行は不適②ハンドル回転角のデータ補正を行い易い，といった理由が挙げられる．

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，図 4. 19 のように設置された水平器を用いた時の水平状態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. 18　実験走行場所（室内廊下）

図 4. 19　水平器を装着した観測用自転車

1. 2. 2. 4 実験手順・方法

高精度なセンサデータの取得のために，図 4. 20 に示す実験条件のもと，以下のような手順により実験を行った．①全センサの電源を入れる，②開始ラインにおいて，車体と前輪が直進方向に向いている状態を目分量で，車体が水平を保っている状態を水平器でゼロ位置とし，全センサで記録モードをオンにする，③開始数秒は角速度センサの機械的ノイズを推計するため，静止した状態で待つ，④自転車に乗車し走行開始，⑤走行が安定するまで速度を上げ，定速でペダルをこぎ続ける，⑥ブレーキをかけ停止，⑦停止後，2 番目で説明したゼロ位置にハンドル，車体を戻し，全センサの記録モードをオフにする．⑧開始位置に戻り，1)～7)の繰り返しである．

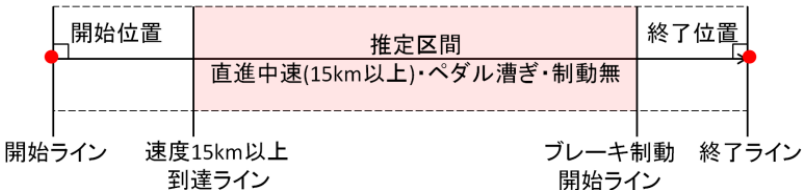
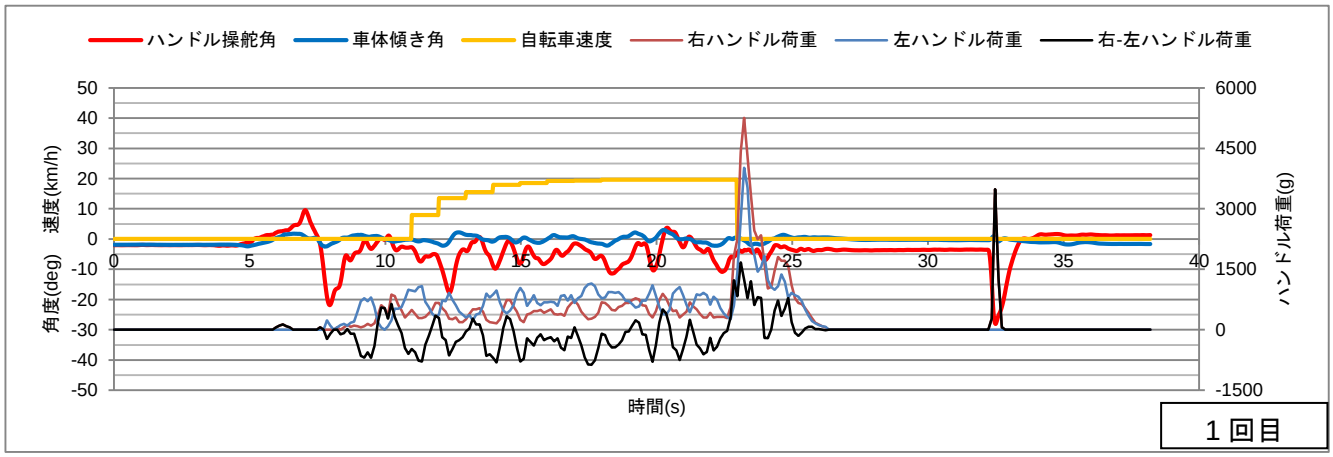


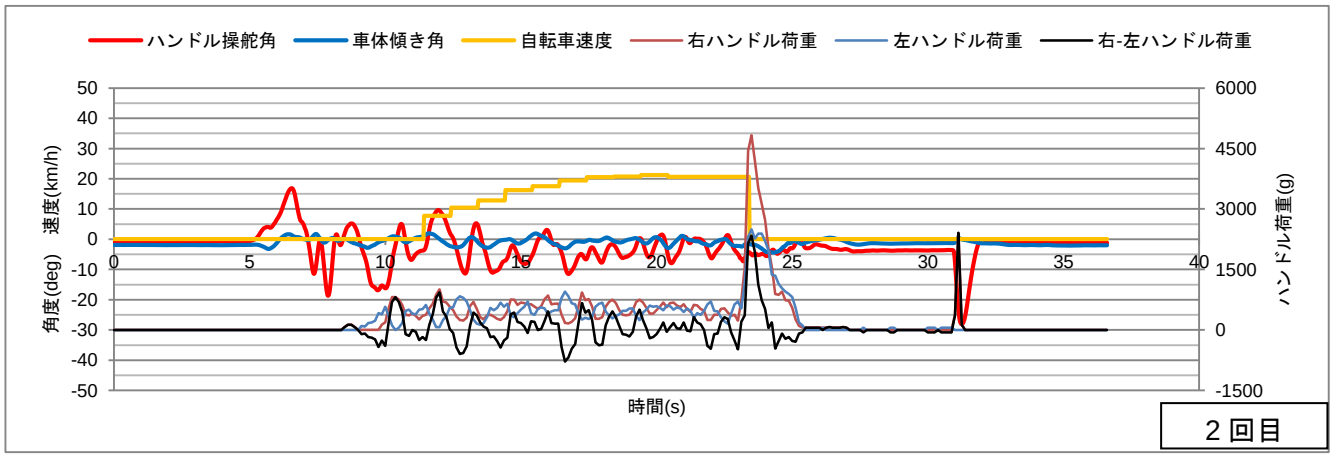
図 4. 20　実験走行条件のイメージ図

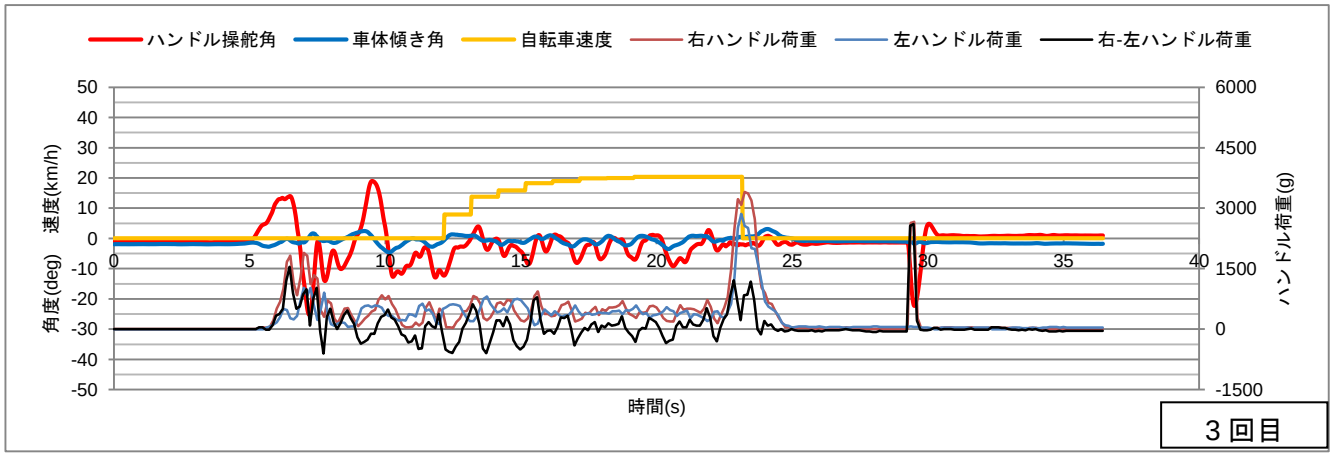
1. 2. 2. 5 実験結果

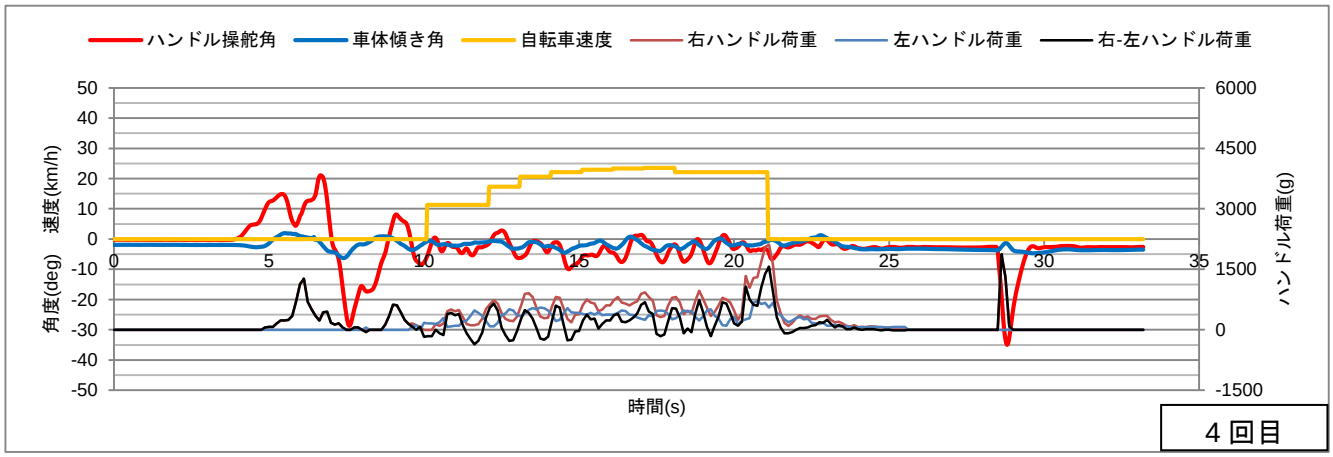
図 4. 21 に被験者 1 人による 5 回分の走行結果を示す. ブレーキをかけた時のハンドル荷重の急激な増大と速度の低下，また，測定時間の最後の方で行った急激なハンドル回転によるハンドル荷重とハンドル操舵角の増大が見て取れる．この 2 つの目印をもとに各センサの時刻同期を行った．

次に，観測されたそれぞれの項目の挙動から，ふらつき挙動の基本的特徴を見ていく．時速 15km 以上で直進走行をした場合のハンドル操舵角は左右 5 度前後である程度周期的な振幅が現れており，傾き角はハンドル操舵角と同様に，周期的な振幅が現れているが，ハンドル操舵角の振幅より小さかった．また，ハンドル荷重に関しても同様に周期的な振幅が見られた．速度に関しては，速度が上がるほどハンドル操舵角の振幅が小さくなるといったような現象は 2 回目の走行ではっきりと見て取れる．よって，ハンドル操舵角，傾き角，ハンドル荷重，速度との間の相関が実験結果のグラフから可能性として示唆される．


ハンドル操舵角
車体傾き角
自転車速度
右ハンドル荷重
左ハンドル荷重
右-左ハンドル荷重
速度(km/h)
角度(deg)
ハンドル荷重(g)
時間(s)
1 回目


ハンドル操舵角
車体傾き角
自転車速度
右ハンドル荷重
左ハンドル荷重
右-左ハンドル荷重
速度(km/h)
角度(deg)
ハンドル荷重(g)
時間(s)
2 回目


ハンドル操舵角
車体傾き角
自転車速度
右ハンドル荷重
左ハンドル荷重
右-左ハンドル荷重
速度(km/h)
角度(deg)
ハンドル荷重(g)
時間(s)
3 回目



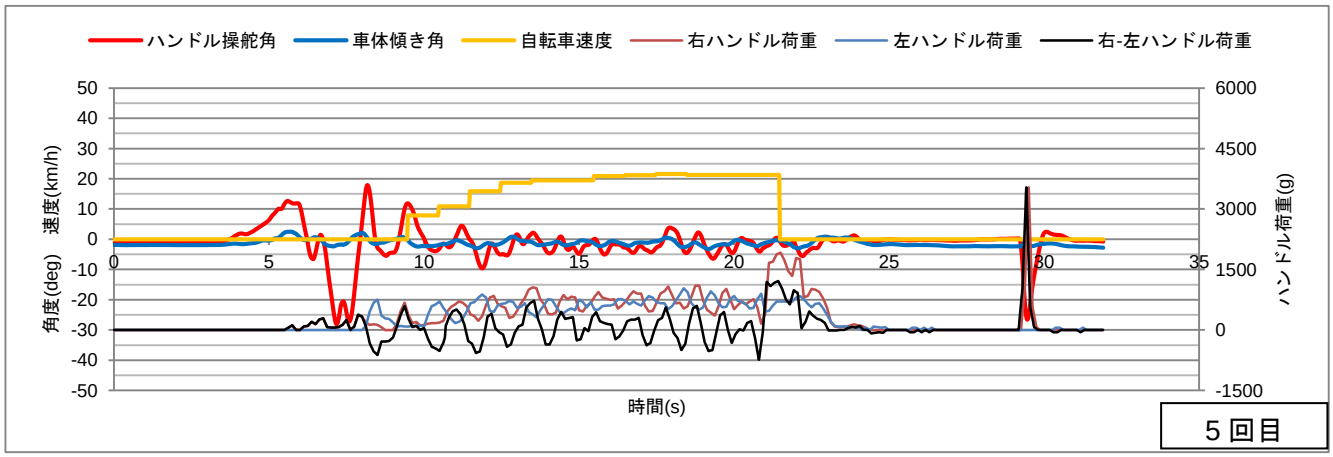


図 4. 21　実験結果（正：右回転　負：左回転）

1.2.3　モデル推定

まず，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，15km/h 以上の中速度域でかつペダルを漕ぎ続けている区間を推定区間として，5 回分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 4. 5 に示す．

ここで，各回帰係数の符号について説明する．表 4. 5 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．

表 4. 5　重回帰分析結果

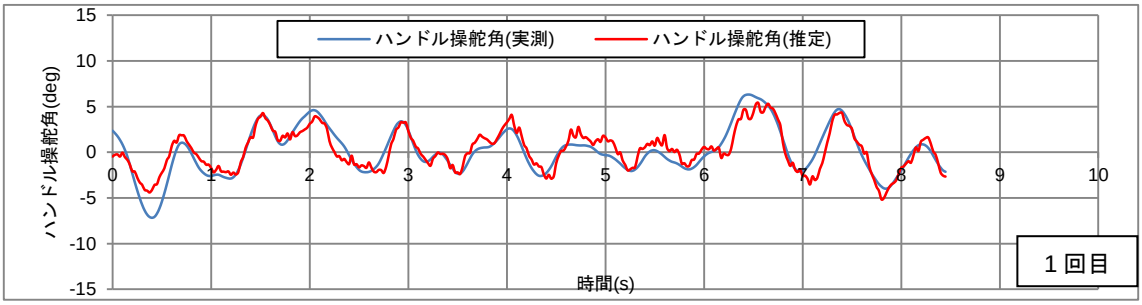
自由度修正済決定係数			0.722
観測数			1613
	偏回帰係数		t 値
定数項	-6.71.E-01		-5.16
傾き角	1.02	***	31.7
右手ハンドル荷重	3.36.E-03	***	15.8
ジャイロ効果	-7.73.E-03	***	-50.1
		***	0.1%有意

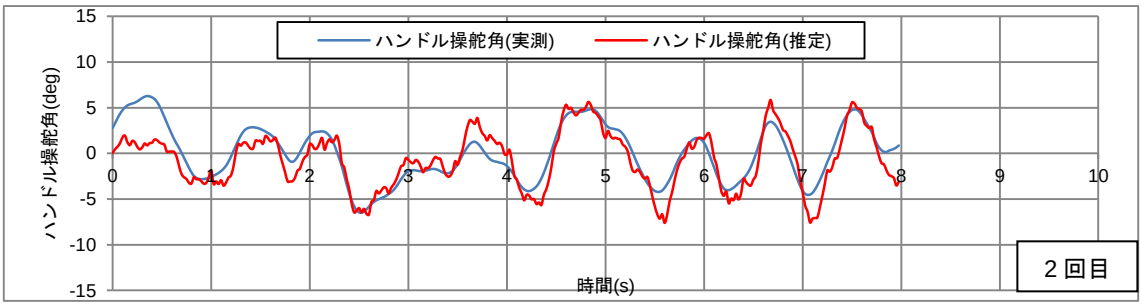
さらに，各説明変数の影響の大きさを見るために，値を標準化し，標準化回帰係数を求めた．その結果を表 4. 6 に示す．これより，ジャイロ効果の影響が最も大きく，ハンドル荷重の影響一番小さく出ていることが分かる．これは，直進中速(15km/h 以上）という実験条件によるものだと推測できる．速度が増加するほど，ジャイロ効果の影響は大きく出て，また，ハンドル操作は安定するのでほぼ行われないため，ハンドル荷重の影響は小さく出たと考えられる．

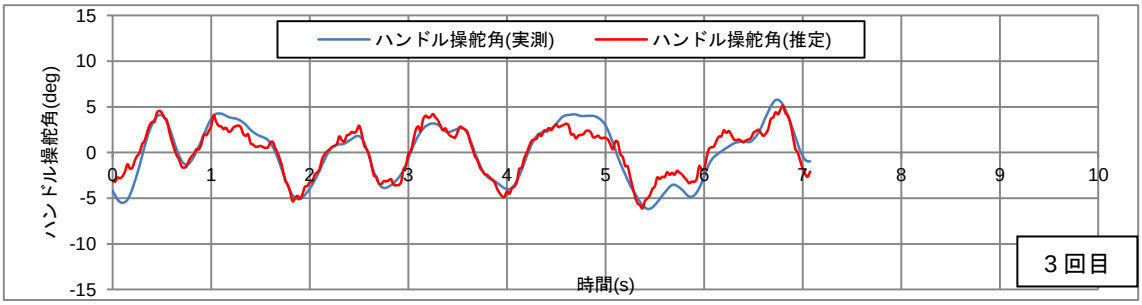
表 4. 6　重回帰分析結果（標準化）

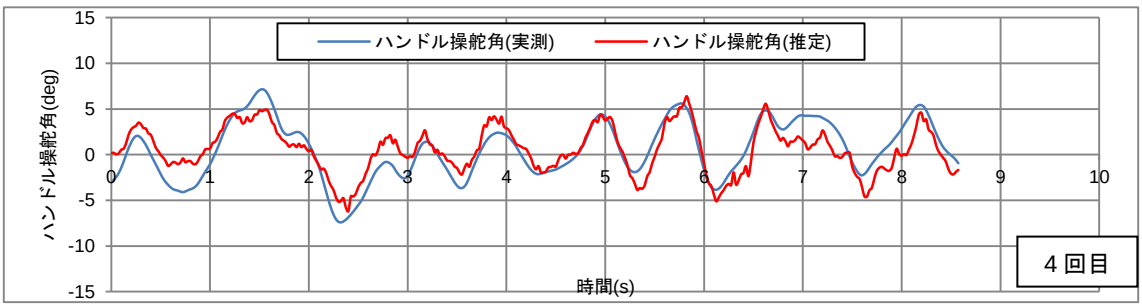
自由度修正済決定係数			0.741
観測数			1613
	標準化回帰係数		t 値
傾き角	1.31	***	31.9
右手ハンドル荷重	0.485	***	11.5
ジャイロ効果	-2.14	***	-52.7
		***	0.1%有意

次に，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図 4. 22 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．図 4. 23 は推定区間における前輪走行軌跡及び車体走行軌跡の実測値を示している．実測値と推定値共に, 5 回走行全てにおいてハンドル操舵で見られた左右へのふらつきが表現されていることが分かる．また，走行軌跡がほぼ真っすぐなものに関しては，走行軌跡はほぼ一致しているが，左右どちらかへ前輪の走行軌跡がずれていっているものに関しては，両値の間に差が見られ，多くの場合その差は距離とともに増加している．これは，実測値，推定値における推定区間開始位置を（0,0）と定めているため，ハンドル操舵の両値における誤差が積分された結果が両値の走行軌跡の差となって表れているためである．









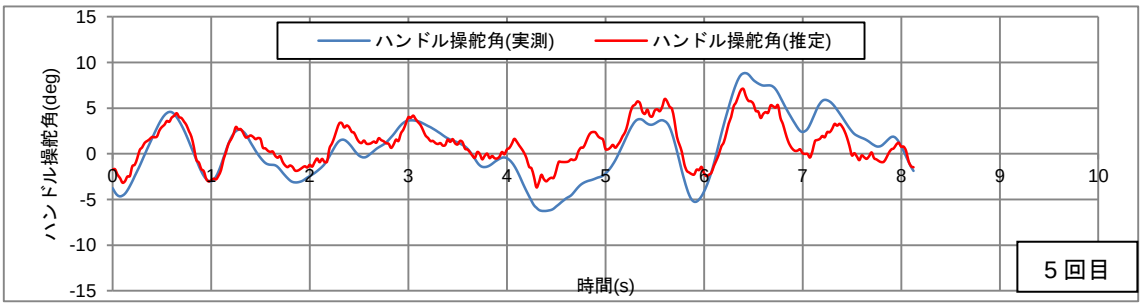
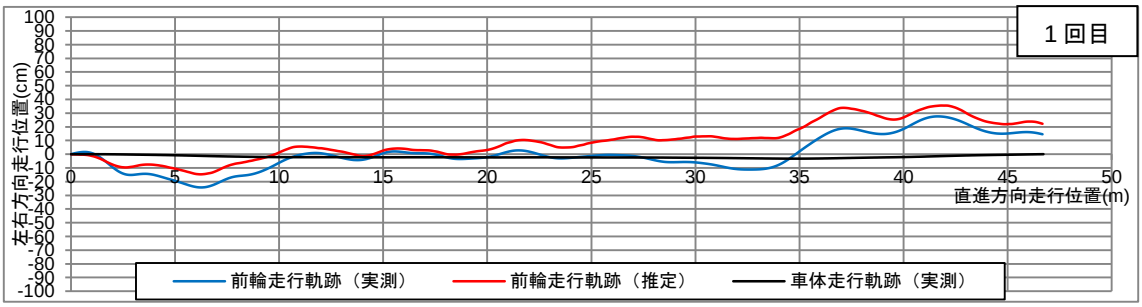
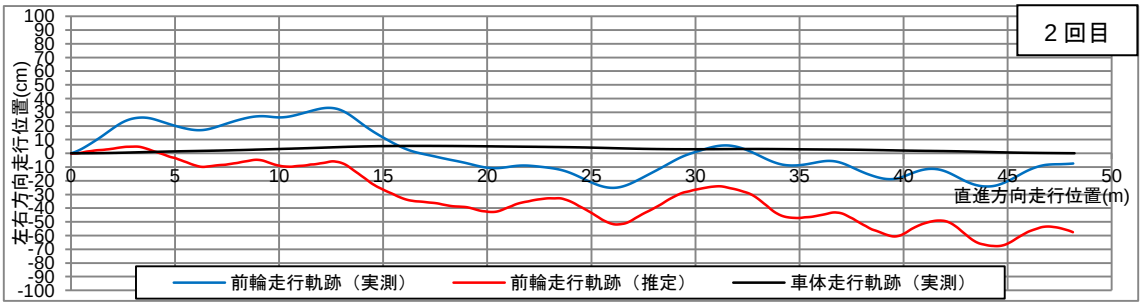
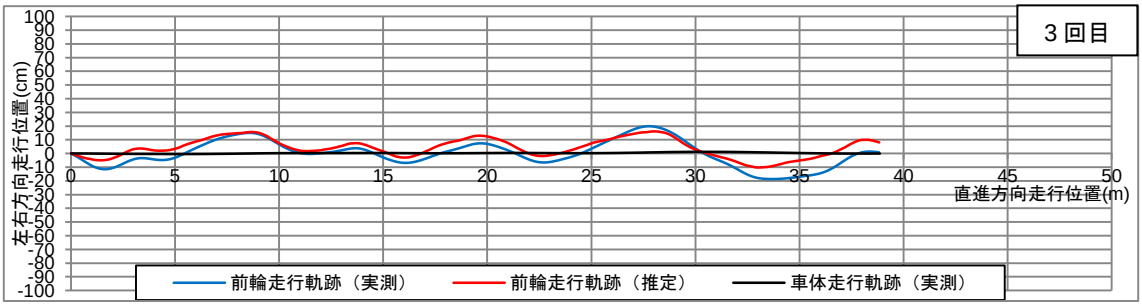
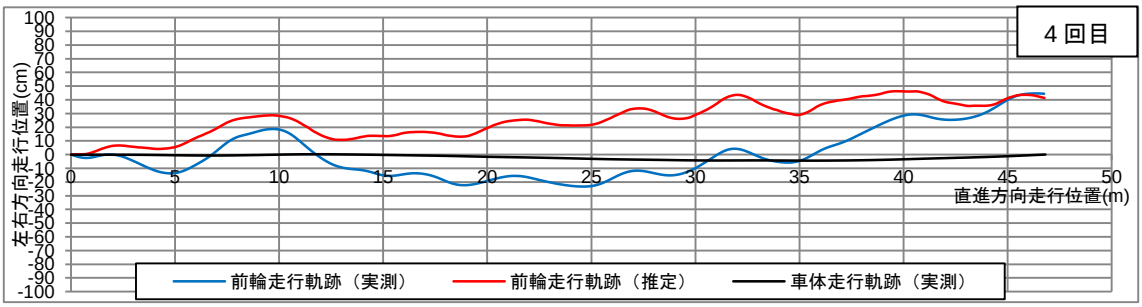


図 4. 22　ハンドル回転角の実測値と推定値の時間的推移（正：右回転　負：左回転）









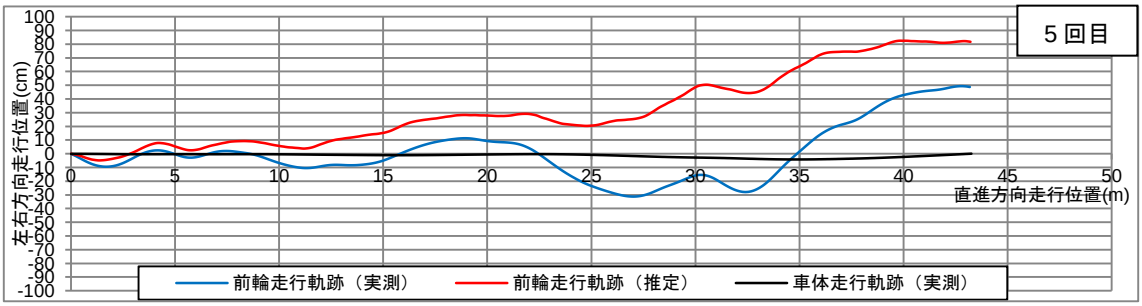


図 4. 23　推定区間における前輪走行軌跡及び車体走行軌跡の実測値(正：運転者右手側)

１.２.４ 誤差発生要因の検討

１.２.３で求めたモデルの推定値と実測値との比較を行った．まず，図 4. 24 のように横軸に実測値，縦軸に推定値を取って，どの部分で誤差が大きいのかをグラフにして可視化した．y=x の直線は実験値と推定値が一致する場合を示し，直線からの縦方向の距離が誤差となる．図 4. 24 より，特徴として以下の点を指摘することができる．

- 実測値よりも推定値の方が全体的に小さく出ている（近似式の傾きが 1 以下）
- 実測値に対して誤差の範囲が 5 度程度であり，ハンドル操舵角の値に関わらずある程度一定に出ている．

誤差の要因として，計器の測定誤差，積分誤差による誤差の蓄積が考えられる．

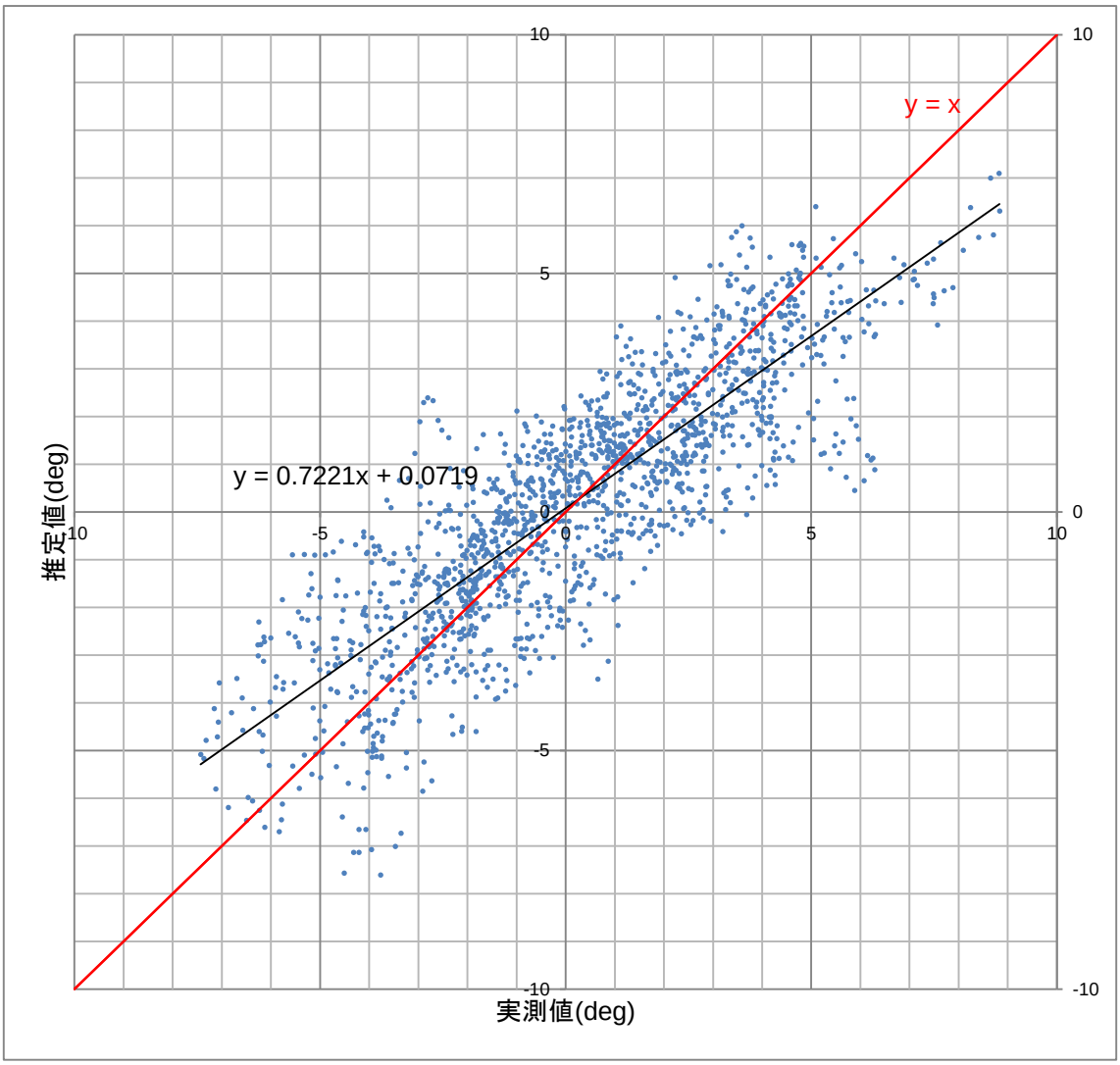


図 4. 24 実測値と推定値との比較

１.２.５ ふらつき挙動の再現性確認 CS 実験

１. ２. ５. １ 実験概要

１.２.３の推定結果を基に，自動的操舵角モデル及び傾き角モデルを 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．被験者は男子学生 3 名である．図 4. 25 に実験の様子を示す．

その際，実走実験ではハンドル回転荷重項で表現していた人為的ハンドル操舵角を，CS では実際にハンドルが切られる時のハンドル操舵回転角速度を時間積分することにより求めていった．また，ペダル踏力の左右の差分による回転モーメントによって自転車は傾くと考えられることから，ペダル踏力の差分を傾き角速度の説明変数とし，式(4-6)のように表した．CS 走行中の車体の傾き角を直接計測しない理由として，CS 走行と実走での自転車の車体の傾きに関する挙動が，自転車が動いていない，後輪部分が固定されている等の理由により異なる可能性があることが挙げられる．式(4-5)，(4-6)の両方に定数項が含まれている理由として，式(4-5)では，傾き角，傾き角速度の積分誤差の調整，式(2)では，ペダル踏力差の定常的な偏り分の調整を行う必要があることが挙げられる．

$$\theta = \theta_{hand} + \theta_{natural} = \int \dot{\theta}_{hand} dt + \beta_1 + \beta_2 \omega \dot{\varphi} + \beta_3 \varphi \qquad \cdots 式(4\text{-}5)$$

$\dot{\theta}_{hand}$：ハンドル回転角速度(deg/s)
ω：車輪回転速度(rad/s)
φ：車体傾き角(deg)
$\dot{\varphi}$：車体傾き角速度(deg/s)

$$\dot{\varphi} = \beta_5 + \beta_6 (P_{right} - P_{left}) \qquad \cdots 式(4\text{-}6)$$

P_{right}：右ペダルの踏力(kg)
P_{left}：左ペダルの踏力(kg)

図 4. 25　CS 走行実験の様子

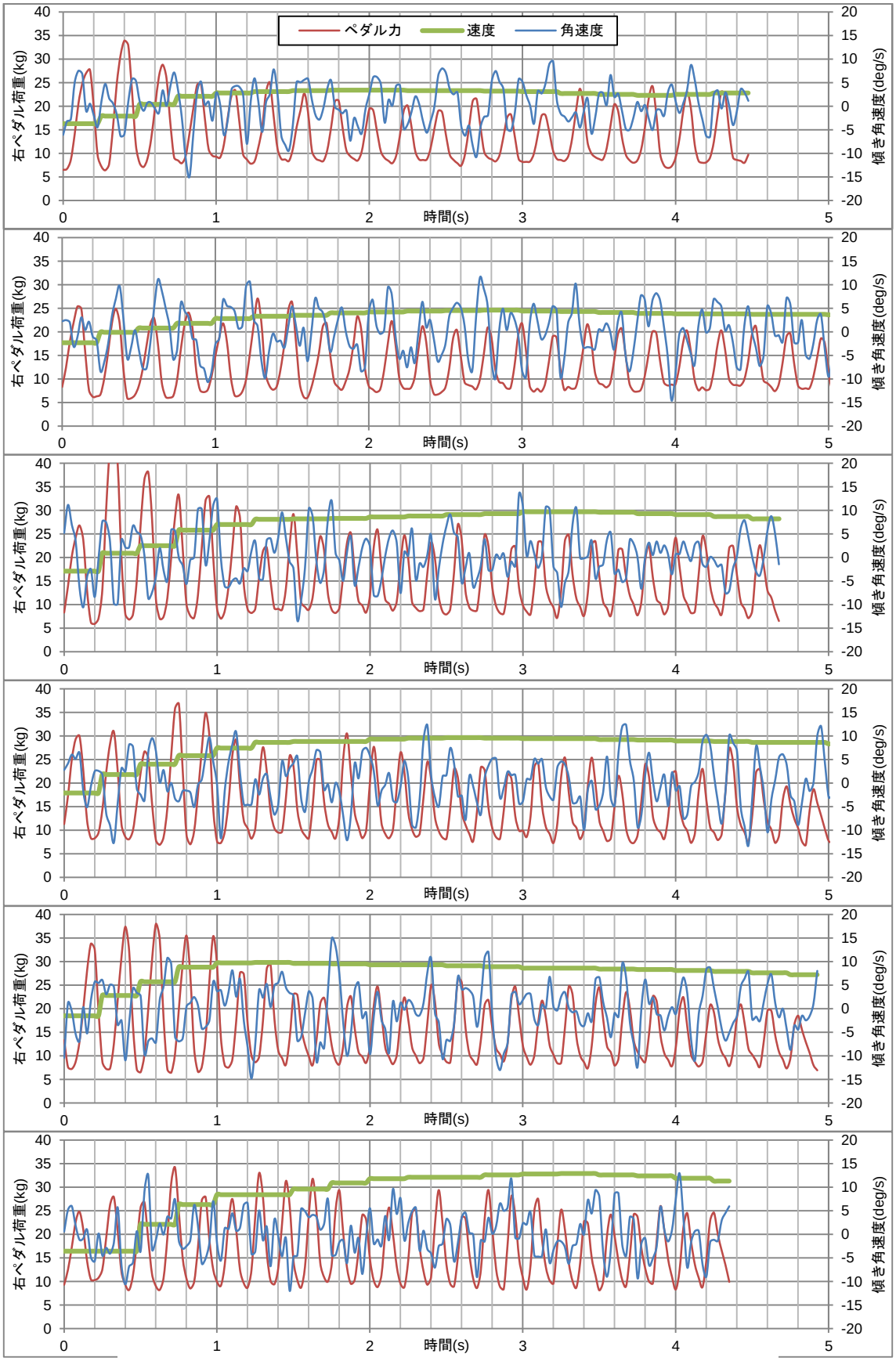


図 4. 26　6 走行分のペダル荷重，速度，傾き角速度の関係

ここで,傾き角速度をペダル荷重差の関数で表せるとした根拠を示しているのが,**図 4. 26** である．傾き角速度とペダル荷重の関係を見ると，周期幅と左右方向の振幅挙動が非常に似ている形となっている．今回は簡易的に，ペダル荷重差のパラメータを（傾き角速度の振幅幅）÷（ペダル荷重差の振幅幅の平均）で一意に決定している．

1. 2. 5. 2 実験結果・考察

図 4. 27 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，図 4. 22 の実走実験での実測値とモデルによる推定値との比較で見られたような周期的な蛇行挙動（周期が約 0.8 秒）と振幅が CS 走行実験でも見られることが分かる．また，十分な練習を重ね，シミュレータ環境への適応後にハンドル操作等の自転車走行において自然な走行ができたという意見を聞くこともできた．しかし，1 回 1 分半の走行シナリオを 10 分以上練習走行してやっとハンドル操作が制御できるようになったレベルであり，シミュレータ環境への適応性を考慮に入れると，ハンドルの切れ具合に関して更なる改良が必要であることが分かった．

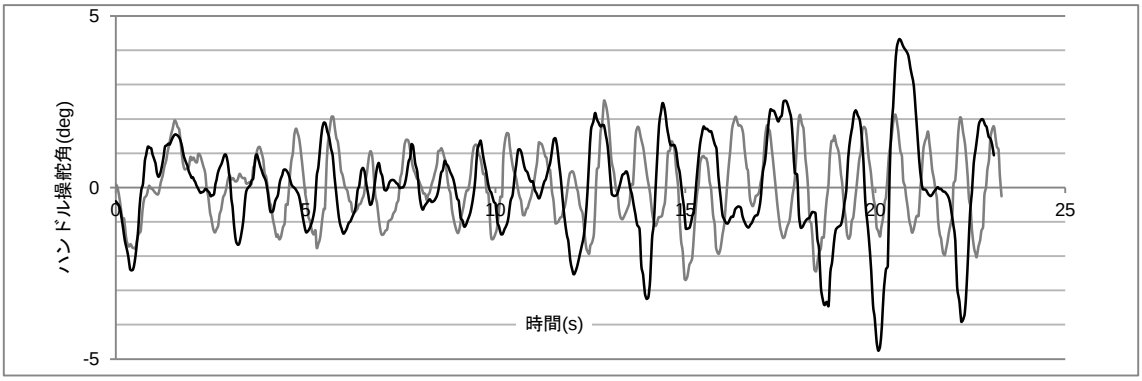


図 4. 27 CS 走行実験でのハンドル操舵角(正:右回転 負:左回転)

１.３ 対面通行自転車道シナリオの開発要件の設定及び CS の改良

１.３.１ 対面通行自転車道における CS 開発要件の設定

本節では，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. 3. 1. 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2.0m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．観測日時は2013年4月16日AM7:30～9:00，11:00～12:00及び4月18日PM3:30～6:00である．図4. 28に亀戸地区自転車道のビデオ撮影風景を示す．

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

図 4. 28　亀戸地区自転車道のビデオ映像

1. 3. 1. 2 ビデオ観測調査結果と考察

【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，①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，②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，③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，④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，⑤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，の5通り観察された．

【対向自転車とのすれ違い挙動】

図4．29に，すれ違い時の自転車の間隔の分布，及び速度分布を示す．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，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4．30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，5cm～35cm）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．

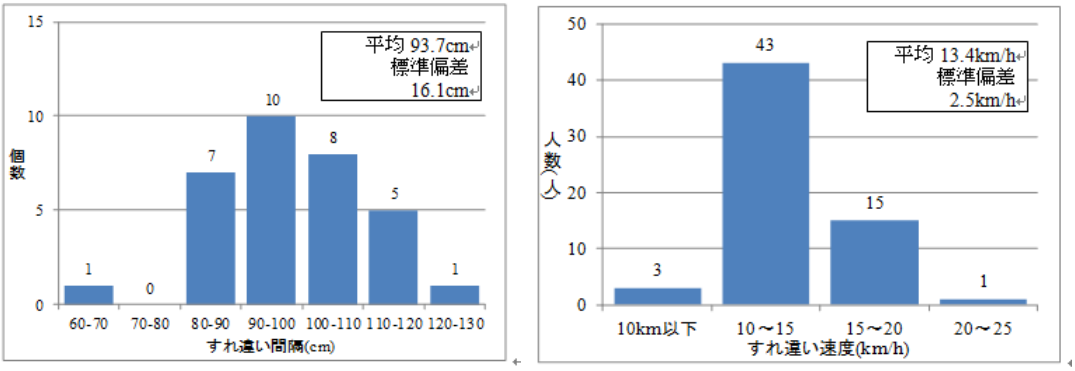


図 4. 29　すれ違い間隔の分布（左）及びすれ違い時の自転車速度の分布（右）

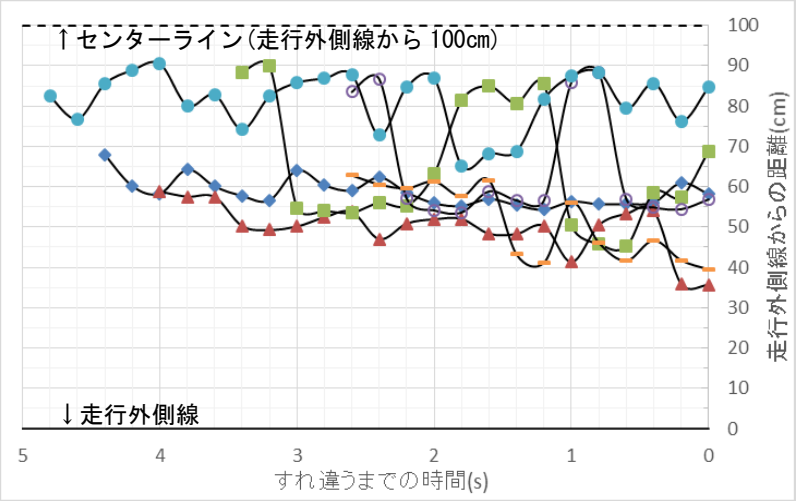


図 4. 30　すれ違い前の走行軌跡

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4. 7及び図4. 31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，15km/h同士と，25km/h・5km/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. 8及び図4. 32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)

表 4. 7　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	

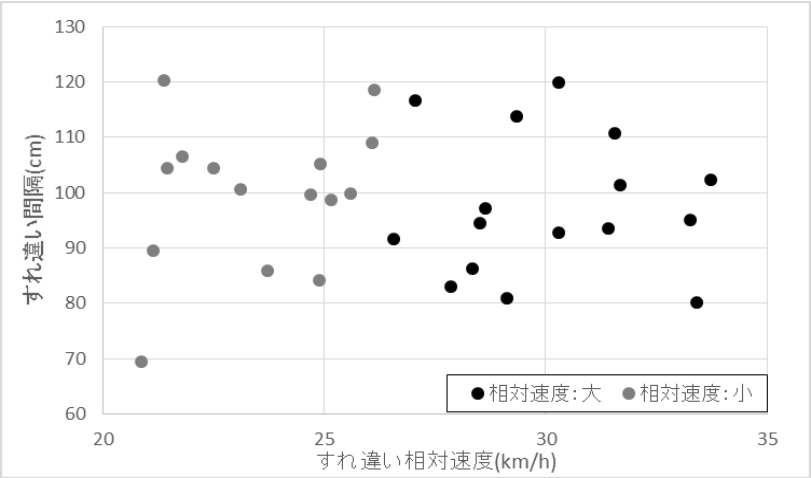


図 4. 31　自転車の相対速度とすれ違い間隔の関係

表 4. 8　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)

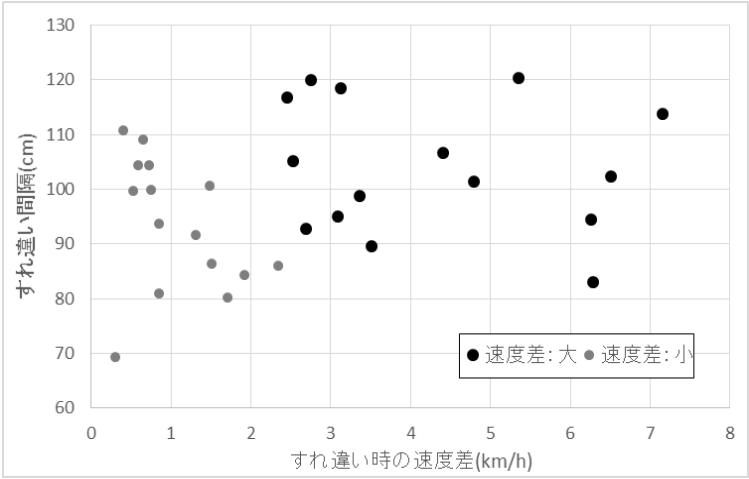


図 4. 32　自転車の速度差とすれ違い間隔との関係

次に，すれ違い時にブレーキ制動や空走等の安全挙動について調査した結果を表4. 9に示す．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ケースのみであり，その1ケー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．

表 4. 9　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2.0m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．

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，①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，②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，③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，といった特徴が見られた．

１．３．１．３ 対面通行自転車道における開発要件の設定

１．３．１．２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，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

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，また，適応後も速度があまり上昇しないことから，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

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る．

③ ハンドル操作

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，既にその挙動については，１.２までで検証されている．しかし，現システムでは慣れるまでに時間を要するため，再現性検証を行う必要があると考えられる．

④ ペダリング操作

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る．

⑤ 速度減衰

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，１.３.１.２のビデオ観測調査結果から，ブレーキ制動を行うものはいなかった．空走挙動に関しては，空走の速度減衰を線形近似した速度モデルを組み込んでおり，感覚の再現性検証が必要であると考えられる．

⑥ 音

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

対象場面では，平地でか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，①，③，⑤に関して，CS 実験時に再現性検証を行う必要があることがわかる．

１.３.２ 対面通行自転車道シナリオにおける再現性検証実験

本システムで使用している頭部動作に連動している HMD の視界環境及び，１.２で述べた，直進中速時(7km/h-21km/h 程度)におけるペダリングによる挙動の不安定性の表現が，CS 上でのハンドル操作及び走行速度に与える影響，空走感覚を評価するために，CS 走行実験を行った．実験シナリオとしては，上記の挙動の不安定性が重要となる対面通行自転車道（道路幅員 2.0m，横断防止柵あり）での前方から直進してくる対向自転車（コンピュータ制御）とのすれ違い場面を用いた．被験者は本学学生 10 名（20 代男性：8 名　20 代女性：2 名）である．

その際，１.３.１.２のビデオ観測調査より，すれ違い時の自転車の走行速度の約 9 割（64 サンプル中 58）が時速 10km～20km の間となっていたこと，また，すれ違い時に走行路の真ん中を走行する場合と回避して横断防止柵寄りを走行する場合が観測されたことから対向自転車の走行パターンを表のように設定した．データに偏りが出ないようにランダムに走行パターンを変えたシナリオで実験を行っている．

実験の流れとして，まず，被験者には普段通りの自転車運転をするように指示し，HMD を装着した状態で HMD 視界環境やハンドル操作，ペダリング操作に対する練習走行を行った．練習走行後に，ハンドル操作や走行速度調整が問題なくでき，周囲に注意が向くようになった時点で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実験を行った．

本実験は，倫理規定に基づき，シミュレータ酔い等の実験中に想定され得る危険性について事前にインフォームドコンセントを取り，被験者の安全確保（不測の事態に備え，被験者が運転する自転車の横に顔色や被験者の挙動を観察する人員を配置）とプライバシーを確保しつつ実験を行った．

表 4. 10　対面通行自転車道の実験シナリオ

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)

1.3.2.1 実験結果・考察

自転車や運転者が傾く挙動に対する再現性に関しては，練習走行の序盤で，10 名中 4 名の被験者が，自ら左右に倒れこんでしまい自身の中立軸が保てなくなるといった運転挙動を観測した．最終的には，2~3 回の練習走行(1 回-約 2 分)で全員制御可能な状態となった．この要因として，傾き方向（Roll 方向）における視覚情報と前庭感覚情報との間の不一致が積算して，最終的にコントロールが出来なくなってしまうことが考えられる．現システム上，ジャイロセンサを頭部に装着し走行するため，映像に反映される傾きは自転車を含めた運転者の傾き角度ではなく，頭部の傾き角度が表現されている．左右を向く（Yaw 方向）時には，前庭感覚によって取得される頭部の回転角と，ジャイロセンサ情報が反映された映像を見た時の視覚によって取得される回転角が一致するため問題ないが，傾き方向では，両者が一致するわけではない．また，傾き情報をジャイロセンサによって高精度で取得しているが，映像として見た時に通信速度の僅かな遅れ(<16.7ms)により映像が頭部動作に対して遅れて見えてしまうことが，僅かな遅れであっても影響していることが想定される．

ハンドル操作に対する再現性に関しては，練習走行を開始して直ぐハンドルを制御できた被験者は誰もおらず，何回も練習をした後に 3 人の被験者がやっと制御できたという結果となった．また，シミュレータ酔いによって実験が続けられなくなった被験者が 2 名存在した．この要因として，まず，HMD 視界(102 度)に対するハンドル回転に応じた画面回転の感覚が, 実際の視界(動体視野 140-150 度)に対するハンドル回転に応じた視界の回転の感覚と異なり，（実際よりも，大きくハンドルを回転させてしまったように見える）ハンドル操作が出来なくなったことが考えられる．次に，現実の世界では機能する人間の眼球運動のうちの一つである前庭動眼反射がシミュレータ上では機能しないことが要因として考えられる．前庭動眼反射が起こることで，眼で知覚される回転は実際の回転量より小さく感じられる．しかし，シミュレータ上では実際に走行しているわけではないので前庭動眼反射が機能せず，実際よりも大きく回転したように見えてしまった可能性が考えられる．

最後に，速度減衰に関して，CS 実験でもブレーキ制動を行ったものはおらず，空走感覚に関して，10 人中 8 人が実環境と同程度と回答しているため，現システムのままで妥当であったと考えられる．

1.3.2.2 ハンドル操作及び頭部動作に対する改善点

１.３.２.１より, 頭部動作の反映方法及びハンドルの操作性に対して修正が必要であることが分かった．そこで，上記 2 つの要素に対して実際に行った改善策について以下にまとめていく．

頭部動作の反映方法に対する改善に関しては，頭部回転動作をそのまま映像の傾きと連動させていることで，roll 方向（首を傾げる方向）において実際よりも大きく映像が傾いて見えてしまっていることが，運転者が制御できなくなってしまった大きな原因であると考えられる．実際には，首を傾げた角度の分だけ眼で見えているものも傾くわけではなく，ほとんど傾いて見えない．そこで，roll 方向の回転データを入力せず，pitch と yaw 方向の

回転データのみ映像と連動するように調整を行った．

ハンドル操作に対する改善に関しては，HMD の視野角制限や人間の眼球運動の性質を考慮にいれないで，そのまま物理モデルをシミュレータに組み込んでしまったことが，運転者が制御できなくなってしまった大きな原因であると考えられる．そこで，式(4-7)に示すようにハンドル回転角を表現するモデル式に調整パラメータを設け，ハンドルの切れやすさを変更する調整を行った．具体的には，人間の動体視野(140-150 度)に対する HMD 視野(102 度)及び前庭動眼反射(自転車旋回角より約 15 度)によって頭部回転方向に対して眼球が逆向きに回転する特性を考慮に入れると，$0.58((102-15)/150) < \psi_{adj} < 0.62((102-15)/140)$となる．よって，0.58 と 0.62 の平均値であるψ_{adj} =0.6 を調整パラメータとして設定し，式(4-7)をハンドル操舵角モデルとして CS に組み込んだ．

$$\psi = \psi_{adj} \int \frac{V tan(-6.71 \cdot 10^{-1} - 7.73 \cdot 10^{-3} \omega \dot{\varphi} + 1.02\omega + \theta_{own})}{L}$$

・・・式(4-7)

θ: ハンドル回転角(rad) ω: 後輪回転速度(rad/s) φ: 傾き角(deg) $\dot{\varphi}$: 傾き角速度(deg/s)

θ_{own}: シミュレータのハンドル回転角(deg) L: ホイールベース(m) ψ_{adj}: ハンドル旋回制御調整パラメータ

１.４ 対面通行自転車道におけるすれ違い挙動観測実験

１.４.１ CS 実験の概要

１.３.２と同様の実験条件で，１.３.２.２で講じたハンドル操作及び頭部回転に対する改善策の効果及び速度感に与える影響を検証するために再度，CS 走行実験を行った．被験者は 3 章と異なる本学学生 10 名（20 代男性：7 名　20 代女性：3 名）である．3 章の CS 走行実験と同様に，倫理規定に基づき，シミュレータ酔い等の実験中に想定され得る危険性について事前にインフォームドコンセントを取り，被験者の安全確保（不測の事態に備え，被験者が運転する自転車の横に顔色や被験者の挙動を観察する人員を配置）とプライバシーを確保しつつ実験を行った．

１.４.２ シミュレータ環境への適応性に関わる実験結果・考察

１.４.２.１ 自転車や運転者が傾く挙動に対する改善

Roll 方向の回転データを取得しない修正をしたことで，従来システムでは発生していた左右に倒れこんでしまうという現象は生じず，10 名中全員がシミュレータ酔いも感じず，問題なく実験を続行することが可能となった．

1.4.2.2 ハンドル操作の改善

HMD 視界(102°)におけるハンドル回転に応じた画面回転及び, 前庭動眼反射の眼球運動を考慮に入れたことで，実空間での動体視におけるハンドル回転に応じた視界回転の感覚と近くなり，10 名中 7 名の被験者が最初からハンドルを制御できるようになった．大きな違和感を持つ被験者もおらず，2~3 回の練習（約 5 分程度）で全員がハンドル制御可能な状態となった．また，実験後のハンドル操作に対するアンケート結果から，10 名中 8 名の方が現実環境よりも少し利きが良い～同程度と回答している．

1.4.2.3 走行速度の改善

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 4. 11 である．１.３.１.２におけるすれ違い時の自転車速度（平均 13.4km/h，標準偏差 2.5km/h，サンプル数 64）と表 4. 11 を比較すると，CS 実験値の方が僅かに約 1.0km/h 平均速度が下回る結果となっている．また，調整モデルを反映後に，平均走行速度が 8.0km/h から 12.0km/h へ走行速度が改善されている結果となっている ($p<0.01$)．実験後のアンケート調査結果から，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も，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多少速度が小さいながらも，調整モデルの組み込みにより，大きく速度が現実の値に近づいていることが見て取れる．最後に，実験後のペダリング挙動に対するアンケート結果から，10 名中 9 名の被験者が現実環境のペダリング感覚と同程度であると回答している．

１.４.３ 対面通行自転車道における走行挙動に関わる実験結果・考察

1.4.3.1 走行速度

表 4. 11 より，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 4. 33 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も，「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．

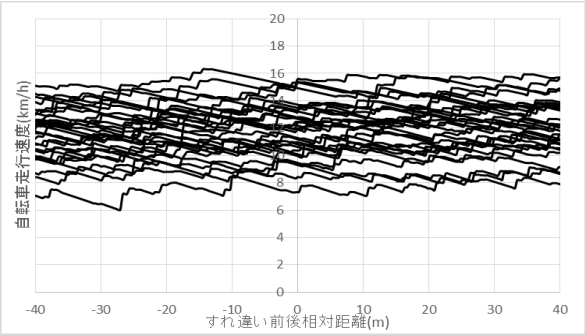


図 4. 33　すれ違い前後の自転車走行速度

1. 4. 3. 2 すれ違い挙動

対向自転車とのすれ違い前後での挙動について分析を行った．図 4. 34 は，対向自転車とのすれ違い行動パターンを示しており，縦軸の道路鉛直方向位置では，100cm が 2.0m 対面通行自転車道の中央線，200cm が自転車道の端（横断防止柵）位置となっている．１.３.１.２と同じ挙動が観測され，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 4. 34 実線(太))，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 4. 34 破線)，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 4. 34 点線)，④直線運動を維持してすれ違う(図 4. 34 実線)，の 4 つの特徴があった．

表 4. 11　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

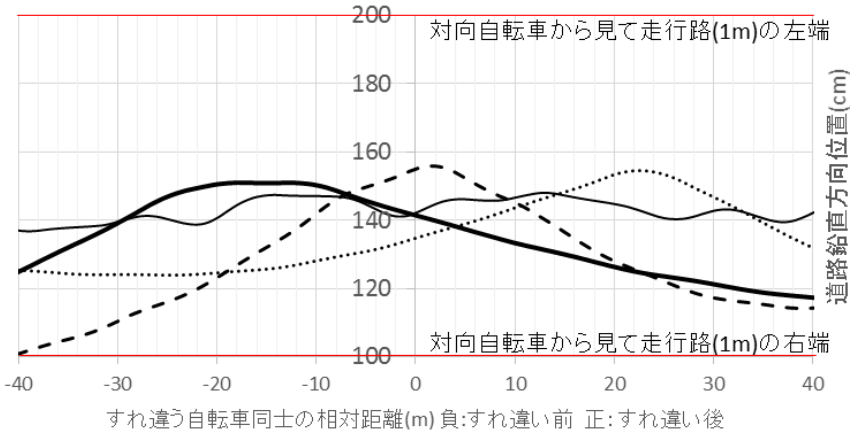


図 4. 34　対向自転車とのすれ違い挙動パターン

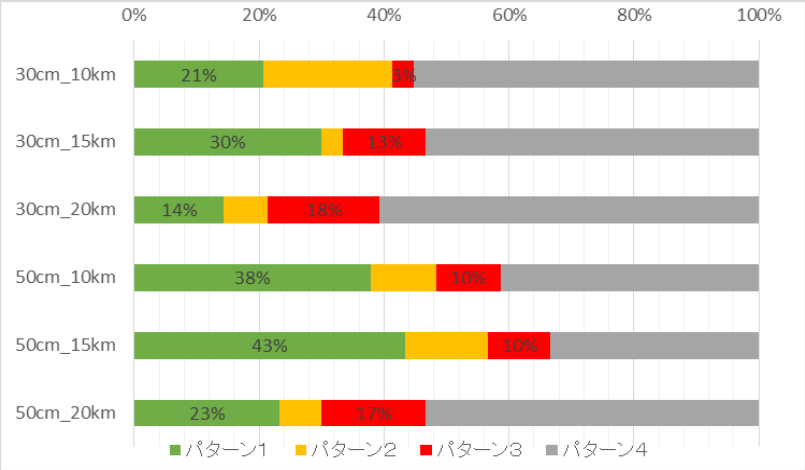


図 4. 35　対向自転車走行位置別速度別すれ違い行動割合

30cm：走行路端寄り　50cm 走行路真ん中　Xkm：対向自転車速度

図 4. 35 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傾向が見て取れる．

1. 4. 3. 3 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 4. 13** 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 4. 14** 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 20cm 中央線に近づく分，すれ違い間隔が平均値で 20cm 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 60cm 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 4. 12）

また，表 4. 12 の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 4. 15 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 4. 12　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

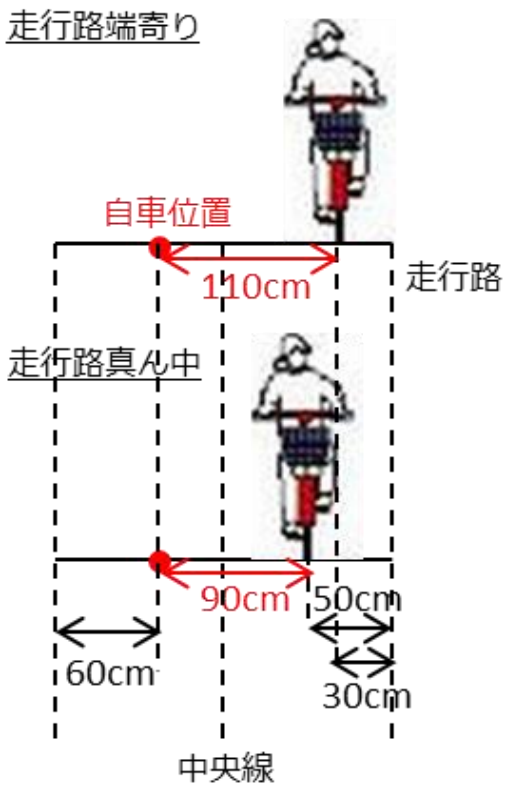


図 4. 36　対向自転車位置別の自車位置の関係図

表 4. 13　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 4. 14　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	
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

表 4. 15　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

1. 4. 3. 4 幅員 2.0mの走行幅員における対向自転車とのすれ違いの危険性

ここで，幅員 2.0m 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 40cm を切ると，図 4. 37 左に示すように，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 4. 37 右に示すように，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 4. 16 では，図 4. 37 左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 >1.1m）を考慮すると，幅員 2.0m 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．

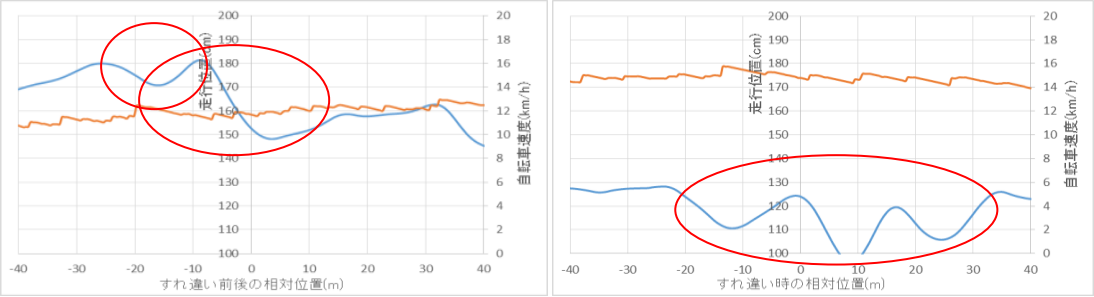


図 4. 37　横断防止柵からの回避挙動例（左）・すれ違い時の大きなふらつきの例（右）

表 4. 16　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

１.５　結語

本章では，CS の操作性において重要な検討課題のうちの 1 つである「自転車操作に起因する挙動不安定性」について，中速直進時におけるふらつき挙動をハンドル操舵角モデルとして CS 上で再現し，再現性評価を行った上で，HMD の視界制約や眼球運動といった人間特性を考慮した調整により，よりシミュレータ環境への適応性及び運転挙動・感覚の再現性が取れることを示すことができた. また, 交通安全分析用 CS の妥当性検証対象として, 対面通行自転車道のすれ違い挙動分析を行い，2.0m の道路幅員の対面通行自転車道における危険性を対向車とのすれ違いや横断防止柵との衝突の観点から明らかにすることができた.

第 5 章　ブレーキ制動や空走による速度減衰挙動の再現

１.１　空走・前後輪ブレーキ・再漕ぎ出し挙動の表現

１.２　駐車車両追い越しシナリオの開発要件の設定及び CS の改良

１.３　駐車車両追い越し挙動観測実験

１.４　結語

速度減衰挙動のリアリティに関して，ペダリング速度やブレーキ制動は後輪部に取り付けられたローラーで制御されているため，前輪ブレーキのみをかけても止まらない，また，自転車が運動状態にないので，ブレーキをかけてもすぐ速度が落ちてしまう，といった課題が存在する．交通安全分析用に CS を活用する場合，例えば，停止線前でうまく止まれない，駐車車両の手前で後方接近車両の位置や速度に応じて自車の速度をコントロールすることが難しくなるため，現実環境では他車両との関係性の中で上手に対処できるのにも関わらず，シミュレータ環境では他車両とぶつかってしまう，より安全側に行動してしまい現実環境での運転が不可能となってしまう可能性が出てくる．そこで，本章では，前後輪ブレーキ及び空走挙動を速度減衰モデルとして CS 上で再現し，再現性評価を行った上で，交通安全分析用 CS の妥当性検証対象として，駐車車両の追い越し挙動分析を行う．

１.１ 空走・前後輪ブレーキ・再漕ぎ出し挙動の表現

１.１.１ 速度減衰に影響する項目の整理

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．

１.１.１.１ 路面との摩擦（転がり）抵抗

$$F_{RS} = C_{RS} \cdot m \cdot g$$

・・・式(5-1)

F_{RS}: 路面との摩擦抵抗　C_{RS}: 路面との摩擦(転がり)抵抗係数　m: 自転車と運転者の質量　g: 重力加速度

- 摩擦抵抗＝動摩擦抵抗(タイヤロック時)
- 転がり抵抗(空走時)
- その中間状態が存在する(ロックしていないがブレーキはかかっている状態)

１.１.１.２ 空気抵抗

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot C_A \cdot A \cdot \rho \cdot (V_B + V_W)^2$$

・・・式(5-2)

F_A: 空気抵抗 C_A: 空気抵抗係数 A: 自転車と運転者の前面投影面積 ρ: 空気密度 V_B: 自転車速度 V_W: 風速

- 空気抵抗係数はレイノルズ数に比例する。（0.9）
- 自転車と運転者の前面投影面積を定数として固定（$0.67\times10^4 cm^2$）
- 空気密度は理科年表より．温度に比例　（$1.208\times10^{-3} kg/cm^3$(25℃)）
- 風速は向かい風(+)，追い風(－)

1.1.1.3 ブレーキ制動抵抗

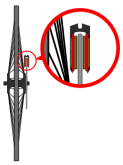
【ブレーキ制動抵抗（キャンチレバー）】

$$F_B = C_R \cdot F_R$$

・・・式(5-3)

F_B: ブレーキ制動抵抗　C_R: リムとパッドとの間の摩擦抵抗係数　F_R: リムにかかる圧力

【ブレーキ制動抵抗（ディスク）】



$$F_B = C_D \cdot F_D$$

・・・式(5-4)

F_B: ブレーキ制動抵抗　C_D: ディスクとパッドとの間の摩擦抵抗係数　F_D: ディスクにかかる圧力

1.1.2 速度減衰モデルの設計

本節では，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_t}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(5-5)に示す．

$$\frac{1}{2}m\left(V_t{}^2 - V_{t+\Delta t}{}^2\right) + \frac{1}{2}J(\omega_t{}^2 - \omega_{t+\Delta t}{}^2) = \int_{t+\Delta t}^{t} R_{roll_x} dx \cdot L_{\Delta t} = L_{\Delta t}(R_{roll_t} + R_{air_t})$$

・・・式(5-5)

ω: 角速度, J: 慣性モーメント, $L_{\Delta t}$: Δt 間の移動距離 R_{roll}: 転がり抵抗 R_{air}: 空気抵抗

ここで，回転運動エネルギー部分の慣性モーメント J は$J = m' \cdot r^2$ (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る．よって，$V_t = V_{r_t}, V_{t+\Delta t} = V_s'$とすれば，式(5-6)のように空走時の速度を表すことができる．

$$V_s' = \sqrt{V_{r_t}{}^2 - \frac{2V_{r_t}\Delta t}{m}(R_{roll_t} + R_{air_t})}$$

・・・式(5-6)

次に，ブレーキ時の t および t+Δt 時点での運動エネルギー差を式(5-7)に示す．

$$\frac{1}{2}m\left(V_t{}^2 - V_{t+\Delta t}{}^2\right) + \frac{1}{2}J(\omega_t{}^2 - \omega_{t+\Delta t}{}^2)$$

$$= \left[\left\{\left(C_{RS_f} + \beta_f \cdot F_f\right) \cdot m_f + \left(C_{RS_r} + \beta_r \cdot F_r\right) \cdot m_r\right\} \cdot g + R_{air_t}\right] \cdot L_{\Delta t}$$

・・・式(5-7)

式(5-6)と同様に，ブレーキ制動時に対しても式(5-8)のように速度を表すことができる．

$$V_s{}' = \sqrt{{V_{r_t}}^2 - \frac{2V_{r_t}\Delta t}{m}\left\{\left(C_{RS_f} + \beta_f \cdot F_f\right)\cdot m_f \cdot g + \left(C_{RS_r} + \beta_r \cdot F_r\right)\cdot m_r \cdot g + R_{air_t}\right\}}$$

・・・式(5-8)

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(5-6)及び式(5-8)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 $V_s', V_{r_t}, \Delta t, m, F_f, F_r$ であるため，これらの値とパラメータ係数(α, β, γ…)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 Rair，前後輪質量比 mf/m:mr/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 $V_{r_t}^2$ に比例するため，速度減衰のモデル式はパラメータ係数(α, β, γ, Θ)を用いて，以下の式(5-9)のように表現することができる．

$$V_s{}' = \sqrt{{V_{r_t}}^2 - \boldsymbol{\alpha}\Delta t {V_{r_t}}^3 - \boldsymbol{\beta}\Delta t V_{r_t} - \gamma \Delta t V_{r_t}(F_f + \Theta F_r)}$$

・・・式(5-9)

１.１.３ 速度減衰モデルの推定

１.１.３.１ 実走実験の概要

１.１.２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，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を作製した．実験概要は，表 5. 1 に示すとおりである．被験者は男子学生 1 名である．

表 5. 1　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

図 5. 1　実験場所

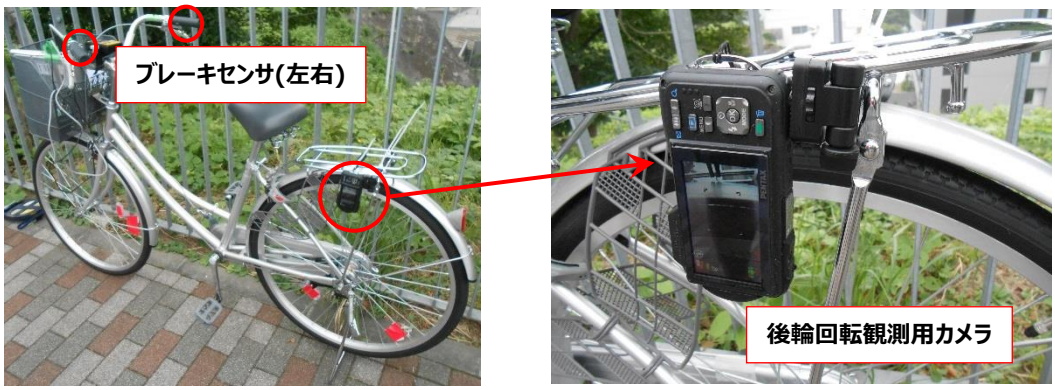


図 5. 2　プローブ用自転車の外観

図 5. 3　分析画像

1. 1. 3. 2 速度減衰モデル推定

1.1.3.1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った．　推定は以下の手順で行っていった．

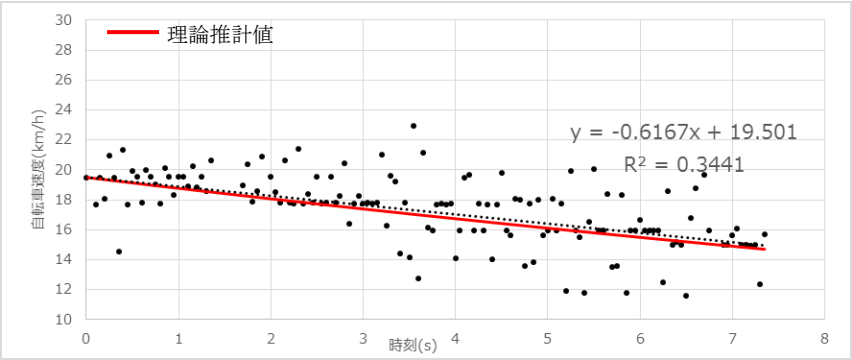


図 5. 4　空走時の速度減衰の例

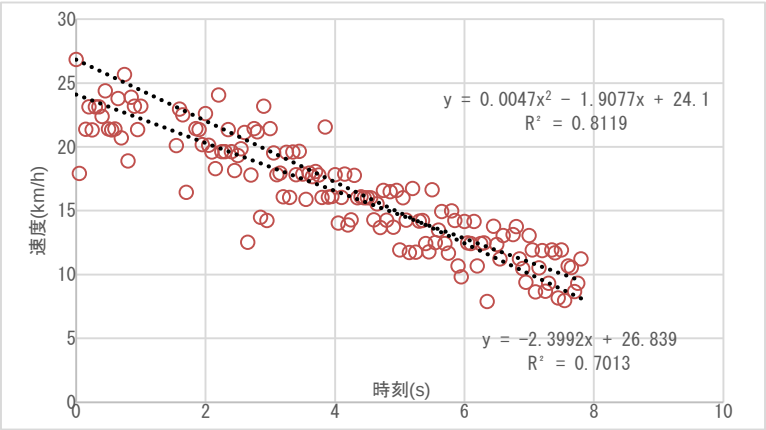


図 5. 5　ブレーキ制動時の速度減衰の例

まずは，観測実験より得られた安定したある一回の走行データ（図 5. 4）を用いて，空走時の速度を時刻 t に対して一次近似式で表した．この近似式で求められた値を実測値として用いて，式(5-9)への代入を行い，パラメータを推計すると $\alpha=1.54\times10^{-6}$($p<0.001$), $\beta=1.23$($p<0.001$)となった．

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(5-7)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 5. 5 に一例を示す．

図 5. 5 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+Δt 時の速度をV_s'として代入し，以降の推定を行う．

式(5-9)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+Δt 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(5-10)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 5. 6 左に結果を示す．

$$\sum_{t=1}^{m} \frac{\gamma_{n_t}}{m} = \gamma_n$$

$$\sum_{t=1}^{m} \frac{\Theta_{n_t}}{m} = \Theta_n$$

・・・式(5-10)

式(5-9)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 γ=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 Θ=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）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 5. 6 右に示す．

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

・・・式(5-9')

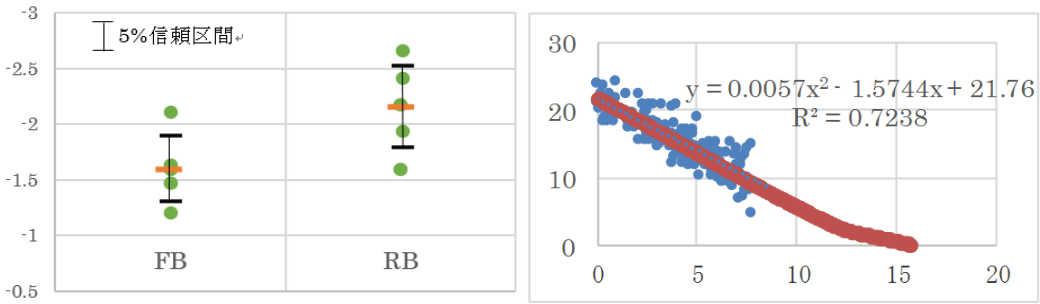


図 5. 6 ＦＢとＲＢにおける γ（左）及び実験値とモデル推計値の比較（右）

１.２ 駐車車両追い越しシナリオの開発要件の設定

１.２.１ 実走実験の概要

CS を用いた駐車車両追い越し挙動実験を可能にするための CS に必要な新たな再現性項目について知見を得るために，まず，車道混在道路上での自転車運転者の走行挙動を観測する目的で行う．実験概要を表 5. 2 に示す．実験期間は，2014 年 4 月 8 日から 4 月 15 日までの 1 週間で，対象路線は，路上駐車車両が存在するような車道混在道路（町田街道・都道 141 号線，町谷原交差点～金森交差点）である．速度計・3 軸角速度センサ（ハンドル回転・頭部回転データ取得用），ビデオカメラ付 PC（後景撮影用），ボイスレコーダ（交通音取得用），アイマークレコーダ（視線・注視観測・前景撮影用）を

取り付けた，図 5. 7 に示すようなプローブバイシクルを用いて実走実験を行った．被験者は，20 代の眼鏡を着用していない男子学生 5 名（I,M,S,N,K）である．アイマークレコーダは，nac 社製 EMR-9 のキャップタイプのものを使用した．また，実走実験中，路面の凹凸による振動や風により帽子がずれることが懸念される場合にのみ，帽子に顎ひもを取り付け，固定を行った．

表 5. 2　実験概要

<table>
<tr><td colspan="2">実験場所</td><td colspan="2">町田街道・都道 141 号線(東京都町田市)
町谷原～金森交差点　約 1.5km(片 1 幅員 3.5m)</td></tr>
<tr><td colspan="2">被験者</td><td colspan="2">20 代男子 5 名（眼鏡無し）</td></tr>
<tr><td>4/8</td><td>18 :30-19 :30</td><td>プレ実験</td><td rowspan="7">取得データ
○スピードセンサ(自転車速度)
○ジャイロセンサ
(ハンドル回転・頭部回転)
○ビデオカメラ付き PC(後景)
○アイマークレコーダ
(視線・注視観測，前景)
○ボイスレコーダ(交通音)</td></tr>
<tr><td>4/9</td><td>14 :30-15 :30</td><td>被験者 M</td></tr>
<tr><td>4/10</td><td>12 :00-13 :00</td><td>被験者 T</td></tr>
<tr><td>4/12</td><td>13 :30-14 :30</td><td>被験者 S</td></tr>
<tr><td>4/13</td><td>12 :00-13 :00</td><td>被験者 I</td></tr>
<tr><td>4/14</td><td>15 :00-16 :00</td><td>被験者 T(2 回目)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4/15</td><td>11 :00-12 :00</td><td>被験者 N</td></tr>
<tr><td>16 :00-17 :00</td><td>被験者 K</td></tr>
</table>

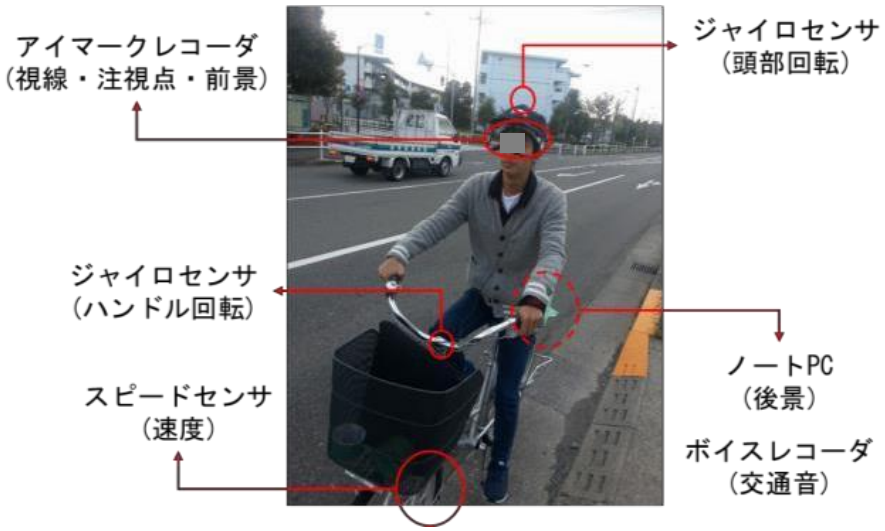


図 5. 7　プローブバイシクルの外観と各種搭載センサの説明

１.２.２　実走実験観測結果と考察

1. 2. 2. 1　走行速度とペダリング

２～３往復分の走行時（赤信号等の停止時は省く）の被験者5 人分の平均速度を表 5. 3 に表す．走行時の平均速度は 22~26km/h であり，被験者全員の平均は 23.5km/h であった．

表 5. 3 走行時の平均走行速度

単位: km/h	1st（往	2nd（往	3rd（往	1st（復	2nd（復	3rd（復	平均速度
被験者 I	21.1	20.6	24.9	22.5	21.5	21.3	22.0
被験者 M	22.7	24.5	--	21.8	22.8	--	22.9
被験者 S	24.2	24.5	27.6	24.5	27.2	28.2	26.0
被験者 N	21.4	21.9	22.8	20.8	20.9	23.5	21.9
被験者 K	23.8	28.2	22.2	24.8	25.3	24.7	24.8
平均速度（全体）				23.5			

1. 2. 2. 2 注視対象と総注視時間割合

路上駐車車両の追い越し前後で注意が向く対象について知見を得るために，車道の左側端を走行している時の注視対象の調査を行った．図 5. 8 はアイマークレコーダの画像での各視対象を分類したもの，次頁の図 5. 9 に被験者 4 人分（I,M,N,K）の走行区間内における各視対象の総注視時間割合を示す．総注視時間を導出する際に，信号待ちの時間は含まず，0.15 秒以上視点が滞留した視対象に関して集計を行った．「路面」や「縁石」を注視する時間割合が被験者 N と K に関して，被験者 I や M よりも高くなっているのは，路肩走行をする時間が長かったため，路面凹凸や縁石の存在をより意識したためである．車道左端を走行していた被験者 I や M は，「路面」に意識が行かない分，「前方」・「先行車」・「信号」に対して，より意識が向くようになっていることがわかる．

図 5. 8 アイマークレコーダ映像での各視対象の分類

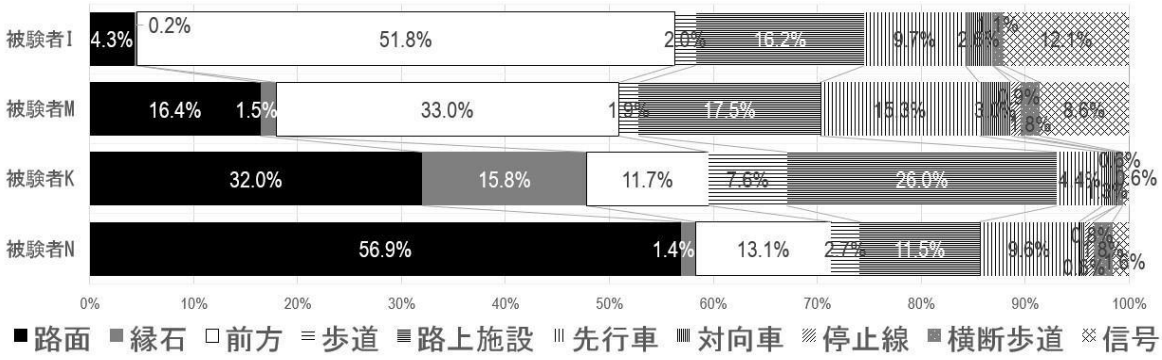


図 5. 9 各視対象への総注視時間割合

1. 2. 2. 3 後方車両接近時の視認行動

HMD の視野制限の中，後方接近車両の配置のさせ方について知見を得るために，後方接近車両に対する視覚・聴覚情報がハンドル操作及び頭部回転に及ぼす影響について調査を行った．後方接近時は 2 つのパターンに分かれる．1 つ目に，車道左側端を自転車が直進している横を後方接近車両が追い越す場合，2 つ目に，自転車が路上駐車車両及びバス停に停車しているバスを追い越す時に後方から車両が接近してくる場合である．図 5. 10 に自転車の側方を後方接近車両が通過する前後（通過 2 秒前から 2 秒後まで）の最大ハンドル回転角と最大頭部回転角（双方共に進行方向を 0 度とする）との関係を示す．個人差は大きいものの，多くは頭部回転に伴ってハンドル回転も大きくなるような傾向であり，頭部回転につられてハンドルも回転していることが想定される．また，頭部回転角の平均は約 10 度（最大値 50 度以下）であり，自動車が後方から接近しても自動車の存在を大きく頭を回転させ中心視で捉えることがないと解釈できる．最後に，頭部はあまり回転せず，ハンドルが大きく回転しているような挙動もいくつか観測されており，後方接近車両を接近音や振動によって認識して回避行動を取ったものと想定される．最後に，音環境として，後方接近車両の音は約 15-20m 手前（約 2 秒前）から車の走行音が聞こえだすことが分かった．

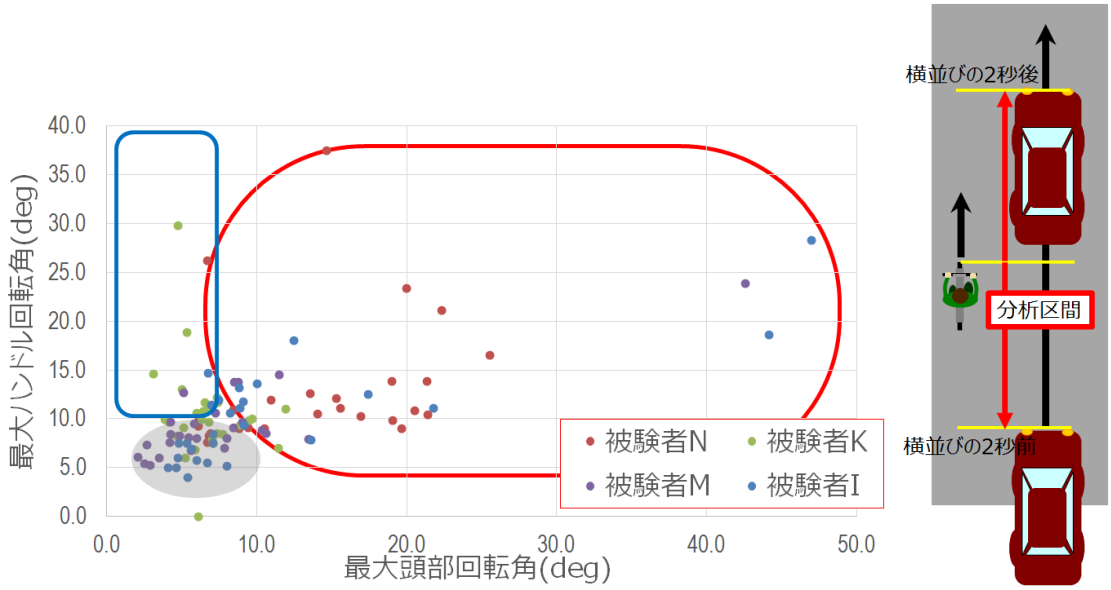


図 5. 10 自転車のハンドル回転と頭部回転との関係

1.2.3 駐車車両の追い越し場面における CS の再現性要件

本節では，3 章で行った CS の再現性に関する実走実験結果を基に，駐車車両の追い越し場面を CS 上で再現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，要件が満たされているものと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 速度感及び奥行き感

対象場面では，駐車車両及び後方接近車両を知覚するために奥行き感及び速度感に関する再現性が重要である．これに対し，奥行き感については，HMD を使用することで立体的に見えることから駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．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言える．

② 上体が傾く動き

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が，頭部回転時に roll 方向（首を左右に振る回転方向）のデータをそのまま自転車の傾きとして画面上で表示してしまうと，視界が首の傾きと連動して傾くように見えてしまう．実際には，首を傾けても視界上

のものは傾いて見えるわけではないため, 本研究では, roll 方向のデータを切り, yaw 及び pitch 方向のデータのみ取得し，HMD 映像と連動させた．これにより，駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる.

③　ハンドル操作

対象場面では，自転車操作に対するワークロードを表現するために，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）による不安定性が再現性項目として必要である．これに関しては，4 章で開発した，直進時の左右へのふらつきを考慮した挙動モデルが含まれており, 駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．次に，駐車車両を追い越す時にハンドルを曲げる操作が必要であり，その挙動に対する再現性が必要である．これに関しては，追い越し時のあまりハンドル操作を大きく，急に行わない動作に対して挙動の再現性が確保されたハンドル旋回角導出モデルを使用している．また，HMD の視野制限がハンドル回転の見え方に対して影響についても考慮がなされているので，駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．

④　ペダリング操作

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る．

⑤　速度減衰挙動

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る．前後輪ブレーキ挙動に関しては，5 章で開発した，前後輪ブレーキによる速度減衰及び空走挙動を表現した重回帰モデルについて物理的な挙動モデルとして既に組み込まれている．ただし，ブレーキ制動や空走による速度減衰は自転車ごとに異なってくるため，実験では練習段階でこの感覚の違いを補っている．よって，駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．

⑥　音環境

対象場面では，１.２.２.３より，後方接近車や交通外騒音に対する再現性が必要である．後方接近車に関しては，約 15-20m 手前から車の走行音が聞こえだすこと，また，接近距離や位置に応じて音量や音程を調整し，自然な音環境の再現が必要である．本システムでは，今回，以上の点に留意した音環境システムの実装を行って対応した．よって，音環境の駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．

⑦　路面凹凸・勾配等の慣性力変化

対象場面では，１.２.２.３より，路面状況に対する注視行動が見られたが，今回の実験では，平地で良好な路面状態を想定しているために，再現が不要なものとして考える．

⑧　HMD 視認環境

対象場面では，HMD 視界制限による，駐車車両及び後方接近車両の視認性に対する再現性が必要である．駐車車両に対しては，前方視野で HMD 視界内でもはっきりと認識できるため，駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．後方接近車両に対しては，HMD の視野範囲制約の中で車両を認識できるような状況を想定したシナリオ作りが必要となり，HMD の視野制限や HMD を被って真後ろまで向くことが難しいハード的な理由より，追い越し開始前に 180 度真後ろの後方状況を視認することが難しいことが問題となる．

１.２.２.３より，追い越し前後（距離にして，自転車と車両が横並びになる前後約 20m 以内）で自転車の側方を車両が通過する際に 50 度以上頭部回転がされないことにより，追い越し前後における後方接近車両の確認行動は，その後方接近車両音により，HMD の視野制限や HMD で真後ろを向くことが難しいハード的な制限が問題とならないと考えられる．しかし，追い越し前後ではなく，自転車が駐車車両の追い越しをし始める際に，大きく首を振って後方を確認するような状況が考えられる．これに関しては，後方接近車両の CS 内での発生のさせ方に留意して CS 実験を行った．

まず，CS 実験の練習段階で，各被験者が追い越し開始時に大きく首を振って後方を確認するタイミングを数回の走行から判断し，本番走行では，大きく首を振って後方を確認するタイミングで既に頭部回転を 90 度以上行わなくても，車両の存在を HMD 視野内で捉えられるように 1 台目の後方接近車両を発生させた．また，駐車車両を追い越す（約 2 秒）前後で 2 台目の後方接近車両が自転車の側方を通過するように発生させた．これにより，追い越し開始時及び追い越し前後における後方接近車両の確認行動が HMD の視野制限や HMD で真後ろを向くことが難しいハード的な制限があっても問題なく実験ができる環境が整えられたと考えることができるため，駐車車両追い越し CS 実験を行う妥当性に関して適当であると考えられる．さらに，後方接近車両の車両走行位置を正確に伝えるため，後方接近車両のシナリオ条件を予め被験者に伝えることで対応を行った．

①～⑧より，速度減衰挙動，音環境，後方確認行動に伴う HMD の視認環境の設定が追加の CS 再現性課題として開発を行った．次節の実験では，これらの再現性検証を行う必要があることがわかる．

１.３ 駐車車両追い越し挙動観測 CS 実験

１.３.１ CS 実験の概要

１.２.３で挙げた再現性項目を備えた CS を用いて，後方から自動車が接近してくる場面における，後方接近車両及び自転車専用レーンの有無が自転車運転者の駐車車両追い越し挙動に与える影響を分析するために、自転車運転者の駐車車両追い越し挙動観測実験を行った．実験を開始する前の練習段階で，１.２.３で示した再現性項目を基に，被験者本人に自分自身で制御可能な段階にあることを確認してから実験を行っている．また，シナリオ走行パターンである表 5. 5 に示すように，実験の後半では，追い越し時に運転者にかかるメンタルワークロードを測定するために二重課題法を用いた走行実験を行い，最後に，走行感覚や被験者属性，駐車車両追い越し場面で気になったものに関するアンケート調査を行った．シナリオの道路構造及び後方車両の走行位置を示したものが図 5. 11 である．被験者は，本学学生 10 名（20 代男性：8 名　20 代女性：2 名）である．

二重課題法とは，本来の作業（主課題）とは異なる課題（副次課題）を被験者に与えて，副次課題の成績によって主課題の余裕度を測る手法で，もっとも簡便で非侵襲性があり，信頼性の高いメンタルワークロード測定法として広く用いられている．副次課題選定の大前提として，主課題である作業遂行の妨害にならず，かつ作業負荷を測定した課題と心的資源が競合するようにしなければならない．そこで，前者に対してまず，HMD 視野内の映像を観る邪魔とならないように，周辺視（特に，HMD 視野外）で課題を提示することとした．次に，後者に対しては，主課題をこなすために視覚情報と聴覚情報が主に必要であることから，光刺激という視覚情報に対して，発話という聴覚情報を与える課題とした．（表 5. 4）

表 5. 4 主課題と副次課題の内容

主課題	駐車車両の追い越し
副次課題	実験走行中にランダムで部屋の電気が消える．被験者は HMD の周縁部でその輝度の違いを認識したら直ちに，被験者自身が発話しやすいと思う言葉で意思表示を行う

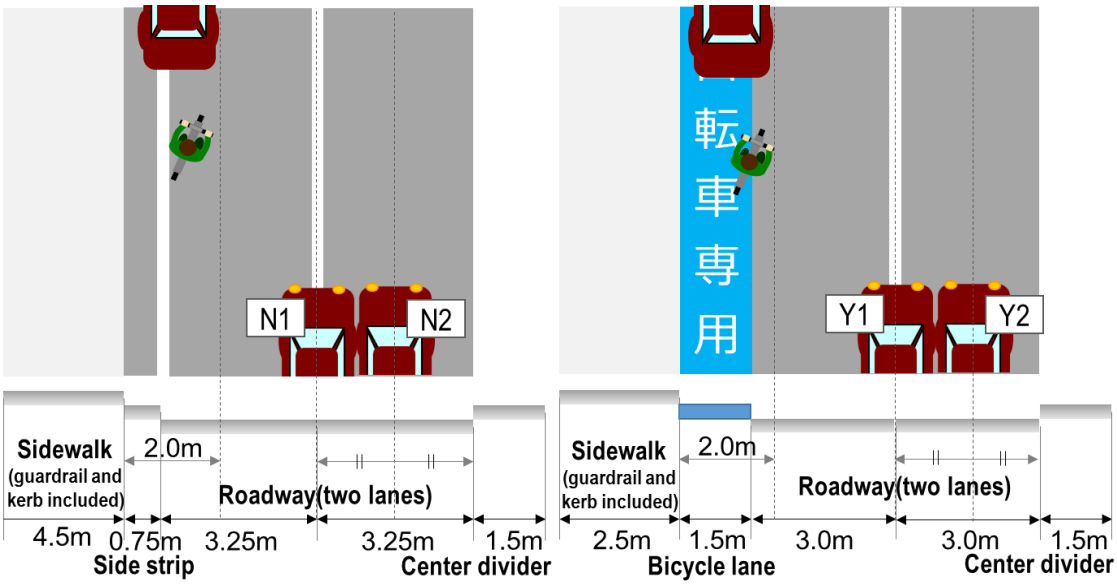


図 5. 11 シナリオの道路構造と走行位置

表 5. 5 各シナリオの走行パターン

【N1】	後方接近車両が第一車線と第二車線の間の白線を走行し、駐車車両追い越し時に、自転車に追従する安全行動を取る
【N2】	後方接近車両が第二車線中央を走行し、駐車車両追い越し時に、自転車に追従する安全行動を取らない
【Y1】	自転車専用レーンがある 後方接近車両が第一車線と第二車線の間の白線を走行し、駐車車両追い越し時に、自転車に追従する安全行動を取らない
【Y2】	自転車専用レーンがある 後方接近車両が第二車線中央を走行し、駐車車両追い越し時に、自転車に追従する安全行動を取らない
【N2h】 【Y2h】	ハンズフリーによる通話を模擬した走行 後方接近車両は第二車線を走行し、駐車車両追い越し時に、自転車に追従する安全行動を取らない

１.３.２ 駐車車両追い越し場面における走行挙動に関わる実験結果・考察

1. 3. 2. 1 走行速度及びブレーキ制動・空走挙動

表 5. 6 に各シナリオ別の駐車車両追い越し時の速度調整パターンを示す．N2 及び Y2(後方接近車両第 2 車線通過)に比べ，N1 及び Y1(後方接近車両第 1 車線通過)では，駐車車両の手前で完全に停止する，または加速調整をするといったパターンが見受けられることから，第 1 車線を通過する自動車に対しては，一定程度の衝突の危険性を感じ，被験者は走

行していることが見て取れる．また，加速調整する自転車が N1(第一車線・後方接近車安全行動あり)の方が N2(第 1 車線・後方接近車安全行動なし)よりもサンプル数が多くなった理由としては，後方接近車が安全行動を取り，被験者の後ろに追従する形で進行していることが，主に音環境より認知できることから生じたものであると考えられる．

次に，第 4 章でのハンドル回転の時とは異なり，速度減衰挙動モデルをそのまま CS に組み込んで実験をした結果，1，2 回のブレーキ・空走の試行で，停止線前で止まりたいところで停止する等の課題が達成されており，アンケート結果からも最初から問題なくブレーキ制動や空走をすることができたと 10 人中 8 人が回答していることからも，適応性を考慮した改良をしなくても問題のないことが伺える．

表 5. 6 各シナリオ別駐車車両追い越し時の速度調整パターン

	N1	N2	Y1	Y2
①駐車車両手前で完全に停止する	2	0	2	0
②駐車車両手前で加速調整する	5	0	1	0
③駐車車両手前で減速調整する	5	6	5	6
④一定速度で通過する	8	14	12	14

1. 3. 2. 2 追い越し開始距離・追い越し幅・走行軌跡

図 5. 12 に駐車車両(図中黒線四角 : 車幅 1.8m×車長 5.0m)追い越し時の各シナリオ別走行軌跡を示す．追い越しのパターンとして，①余裕をもって追い越しを緩やかに開始し，駐車車両の手前でも緩やかに車両を追い越す，②駐車車両の手前で初めて，一気に車両を追い越す，③緩やかに追い越しを開始するものの，後方車両が気になり一度，元いた導線に戻りつつ，駐車車両の手前で一気に車両を追い越す，の 3 つが観測された．

次に，追い越しを開始した時の駐車車両までの距離(追い越し開始距離)の各シナリオ別値を表 5. 7 に示す．「N1 と N2」及び，「N1 と Y1」の組み合わせで有意な差があり(5%有意)，第一車線を後方接近車が通過する時に，被験者自身が駐車車両を追い越すという意思表示を前もって示そうとしていることが見て取れる．また，自転車専用レーンの存在が，追い越し開始距離を縮める結果となった．実験後のアンケート調査結果と照らし合わせると，追い越し時に自転車専用レーンの有無が気になったという回答が全体の 60%を占めており，また，自転車専用レーンがあった方が，「より安心して，自信を持って走行できる」という自由回答からも，両者に違いが出たものと考えられる．

最後に，追い越し時の駐車車両との間の最大幅(追い越し幅)の各シナリオ別値を表 5. 8 に示す．各シナリオで有意な差は全ての組み合わせにおいて無く，後方接近車両の車線位置や自転車レーンの有無は追い越し幅に対して影響を与えているとは言えないことが分かる．

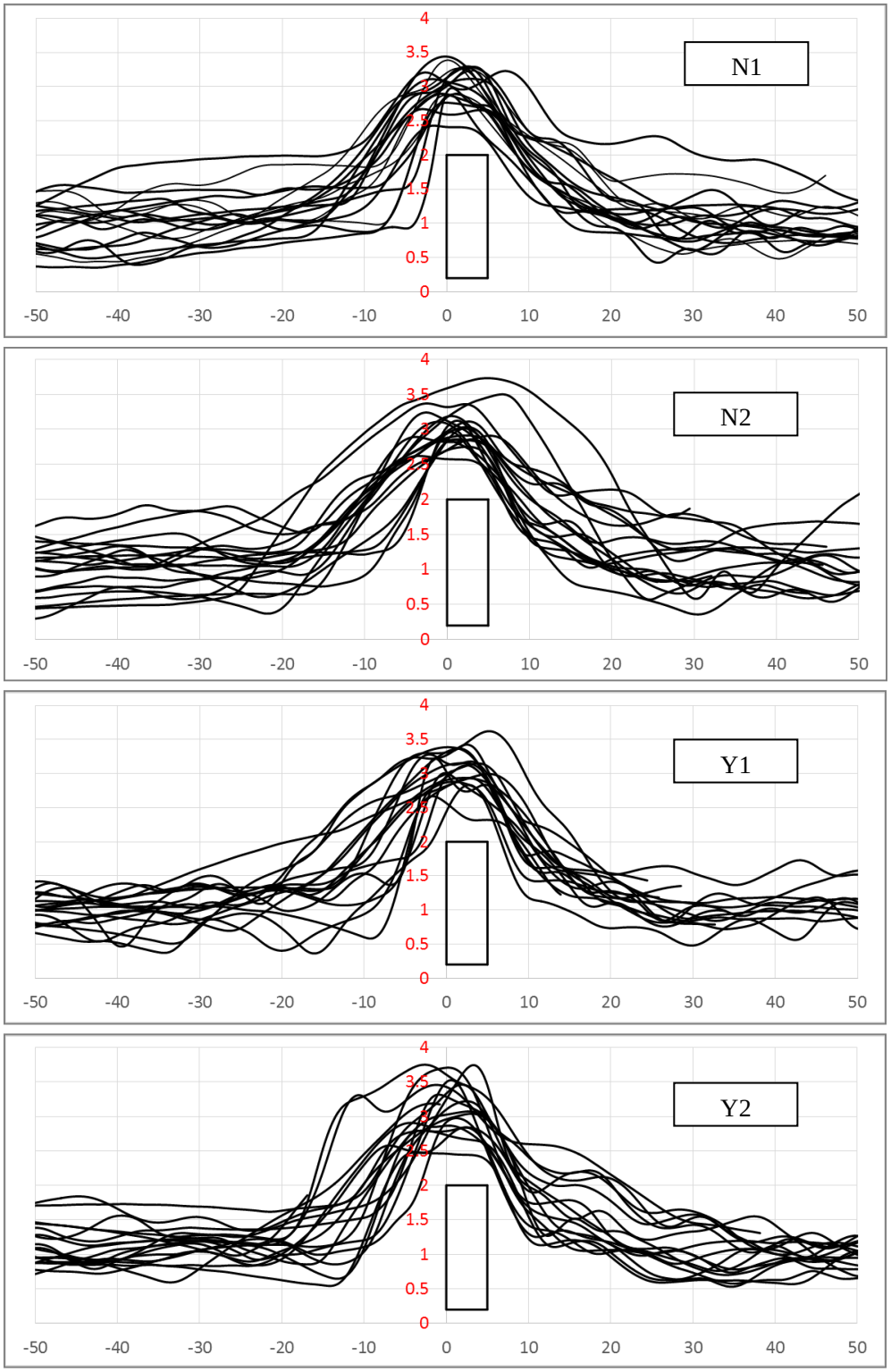


図 5. 12　各シナリオ別追い越し走行軌跡

(縦軸：縁石からの道路垂直方向距離(m)　横軸：駐車車両後端部までの距離(m)　負:追い越し前)

表 5. 7 各シナリオ別最大追い越し幅

反応時間(s)	N1	N2	Y1	Y2
平均値(m)	1.07	1.06	1.14	1.21
標準偏差(m)	0.27	0.27	0.25	0.37
観測数	20			

表 5. 8 各シナリオ別追い越し開始距離

反応時間(s)	N1	N2	Y1	Y2
平均値(m)	-32.9	-21.5	-23.0	-17.4
標準偏差(m)	16.1	7.42	9.78	6.75
観測数	20			

1. 3. 2. 3 追い越し時のメンタルワークロード

追い越し時に運転者にかかるメンタルワークロードを危険性指標として用いるために，メンタルワークロード測定として汎用的な二重課題法を用いた．表 5.4 に示すように，主課題を駐車車両追い越しとし，副次課題を，実験走行中にランダムで部屋の電気が消えた時に，HMD の周縁部でその輝度の違いを認識することができるので，認識をしたら直ちに，被験者自身が発話しやすいと思う言葉で意思表示を行うこととした．

光刺激を認知課題として選定した理由として，周辺視との関係性が挙げられる．人間の視覚における光の認識は，かん状体細胞と錐状体細胞の二つの細胞が働くことによって行われ，前者が光の強弱を，後者が色を感受する役割を持つ．周辺視野を作るのは主に前者であり，周辺視野は光の強弱に対して敏感であると言える．

本実験で用いた副次課題の成績を反応時間として数値化し，道路条件別（自転車レーンの有無）・後方接近車両条件別（第一車線・第二車線での自転車側方通過）・自転車レーンの有無における副次課題の成績を見たものが表 5. 9 である．第二車線を後方接近車両が通過する場合に比べ，第一車線を通過する場合，ハンズフリー通話を想定した場合で，反応時間が約 20%，40%増大したことがわかる．

表 5. 9 条件別副次課題の成績（反応時間）

反応時間(s)	N1	N2	Y1	Y2	その他 1	その他 2
平均値	0.744	0.651	0.744	0.632	0.872	0.873
標準偏差	0.119	0.084	0.086	0.111	0.224	0.333
観測数	10	7	9	9	10	10

１.４ 結語

本章では，CS の操作性において重要な検討課題のうちの 1 つである「速度減衰挙動」について，前後輪ブレーキ及び空走挙動を速度減衰モデルとして CS 上で再現し，再現性評価を行った上で，第 4 章のように，CS に用いている機器の技術的制約や人間特性を考慮した調整は必要なく，運転感覚の再現性を確認することができた.

最後に，交通安全分析用 CS の妥当性検証対象として，駐車車両の追い越し挙動分析を行った．自転車専用レーンや後方接近車両の存在により，自転車運転者の追い越し開始位置等に影響を与え，また，メンタルワークロード評価により，後方接近車両の走行位置によって反応速度に影響がでることを明らかにすることができた.

第 6 章シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良

１.１ シミュレータ環境への適応性に着目した CS 走行実験

１.２ シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良

１.３ シミュレータ環境への適応観測 CS 実験

１.４ 結語

２．２の既往研究で示したように，シミュレータ環境への適応力が低い運転者は，現実環境とシミュレータ環境との間の相違を埋めるために行う練習段階で，より多くの時間，シミュレータ環境にさらされるため，シミュレータ酔いを生じるリスクが高い．5 章までの検討では，比較的シミュレータ環境への適応力が高い学生を被験者としているため，その課題の重要性について明確にならなかった．そこで，本章では，5 章で実験を行った駐車車両追い越しシナリオを用いて，学生以外の方に CS 実験走行をしてもらい，シミュレータ環境への適応段階で生じる課題を分析し，現 CS システムの改良を行う．次に，改良版 CS を用いて, シミュレータ環境への適応力が低い被験者を対象に同様のシナリオを用いて CS 実験を行い，シミュレータ環境への適応レベルについて検証を行う．その際，評価指標として，①走行速度やハンドル操作の安定，②シミュレータ環境への適応過程，③シミュレータ環境の暴露時間，④シミュレータ酔いを用いることとし，①平均速度やハンドル最大操舵角，②達成レベル，③HMD 視時間，実験走行時間，④SSQ スコアと酔いが発現した人数により評価することとする．

１.１ シミュレータ環境への適応性に着目した CS 走行実験

２．２の既往研究で示したように，シミュレータ環境への適応力が低い運転者は，現実環境とシミュレータ環境との間の相違を埋めるために行う練習段階で，より多くの時間，シミュレータ環境にさらされるため，シミュレータ酔いを生じるリスクが高い．5 章までの検討では，学生を被験者としているため，その課題の重要性について明確にならなかった．そこで，本節では，学生以外の方に CS 走行をしてもらい，シミュレータ環境への適応段階で生じる課題を分析し，現 CS システムの改良の必要性について検討を行う．

１.１.１ シミュレータ環境への適応段階における課題抽出のための CS 走行実験の概要

シミュレータ環境への適応力が比較的高い学生以外の人々に，５．３で行った駐車車両追い越し実験のコースを運転してもらった時に，シミュレータ環境への適応段階で生じる課題について調査するために，CS 走行実験を行った．走行シナリオは適応段階を調査するため，５．３で行った N2（自転車が駐車車両を追い越す際に，後方接近車両が第 2 車線中央を直線走行し，安全行動を取らない）を用いて，繰り返し走行を行った．2015 年 11 月 14 日～15 日に，東京都台東区の生涯学習センターに訪れた 12 名（30 歳以上の男性 6 名，女性 6 名（内，55 歳以上の高齢者，6 名））の方にご協力いただいた．また，CS 走行に必要な追加条件として，HMD 装着時に眼鏡が HMD 画面にぶつかってしまい，映像がよく見えなくなってしまったり, HMD の固定の妨げとなってしまったりすることを避けるために，眼鏡無しで 0.7 以上の視力を確保した. さらに, 26 インチの軽快車を用いたので身長 148cm 以上の方を起用し，シミュレータ酔いを誘発する要因として睡眠不足と満腹感が影響する

ため，前日の十分な睡眠（6 時間以上）と実験直前に 1 時間以上食事をしないようにしてもらった．

実験手順としては，まず，最初にシミュレータ上での留意事項，実験目的，実験の流れを説明し，インフォームドコンセントを取った上で，自転車運転や生活習慣，シミュレータ酔いに関するアンケート調査を行った．（約 5～10 分）次に，サドルの高さ調整や HMD 画面の見え方の調整を行った．（約 5 分）事前調整後，直ぐに 1 つの決まったコース（T2）を繰り返し練習走行していただき（約 5～10 分），①速度制御感覚（加速・空走），②ブレーキ感覚，③駐車車両との距離感，④駐車車両追い越しの時のハンドル感覚，⑤後方確認や周辺交通音での後方接近車両の認識，5 項目について制御可能，意識が向くかについて一つずつ確認を行なっていった．実験終了後，CS の乗り心地やシナリオ走行，シミュレータ酔いに関するアンケート調査を行った．（約 10～15 分）その他，システムの起動時間等を含め，全体で 30 分程度の実験である．

図 6. 1　CS 走行実験ブースの様子

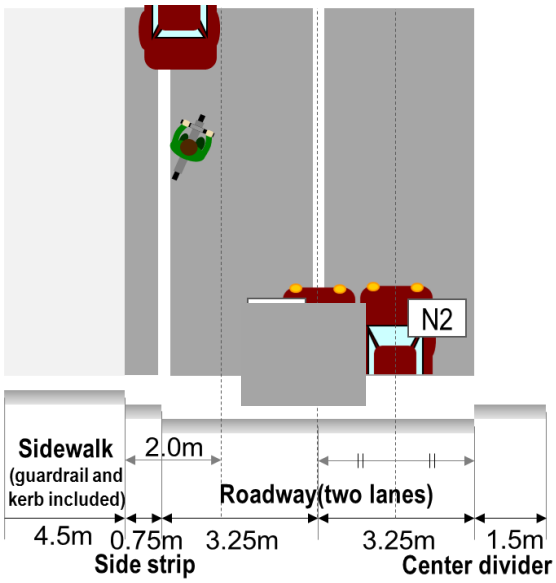


図 6. 2　シナリオの道路構造と走行位置

１.１.２ 実験結果

１.１.２.１ ハンドル操作の偏り

図 6. 3 のように，ハンドルが右に切れてしまう人が 12 人中 2 人存在した．シミュレータ環境上では，遠心力が働かない，HMD 装着により手元が見えない等，HMD 画面の回転速度で判断するしかない．そのため，運転者の中には回転に対する反応の遅れが生じてしまい，現実環境では生じない左右へのハンドルの切れから，より大きくハンドルを切ってしまうという事象が起こってしまう．当然，大きくハンドルを切れば，それだけ大きく画面も回転しているように見え，ハンドルの制御不能に陥り，突然の大きな画面回転によるシミュレータ酔いの誘発につながってしまう．

一方で，ハンドルを安定化させて運転できた人の特徴として，ハンドル操作角が左右共に 10 度以下であった．

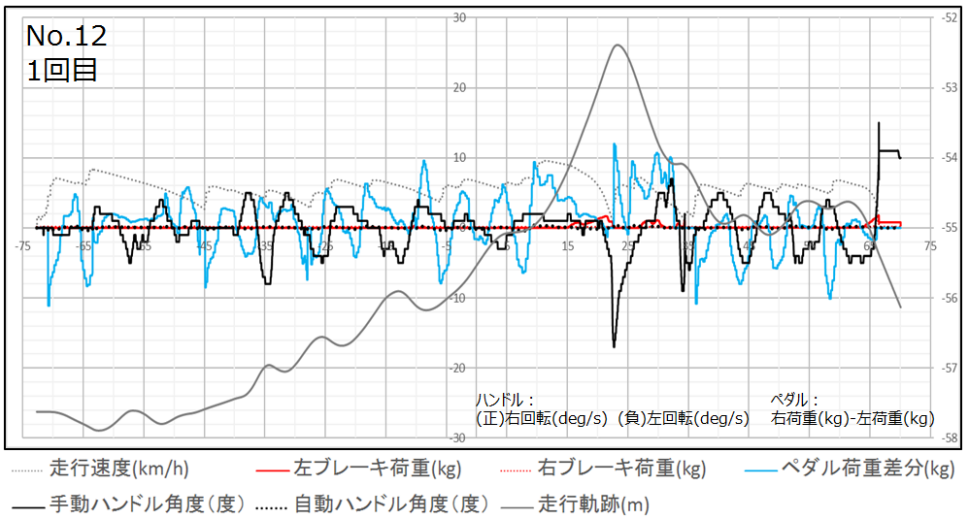


図 6. 3 被験者 No.12 の 1 回目の走行データにおける走行軌跡の偏り

１.１.２.２ 走行速度の上昇

シミュレータ環境への適応性を見る上で重要な要素の 1 つである走行速度について，適応過程における走行速度について調査を行った．被験者 12 人中，走行速度を最終的に安定化させることができた 4 人の内，3 人分（No.4，No.6，No.8）のものを図 6. 4 に示す．平均速度・最高速度共に練習を重ねるたびに上昇している傾向にあることが見て取れる．しかし，今回の実験では，1 人あたりの走行時間に制約があったため，十分な練習時間が取れず，走行速度が上昇した後，速度が漸近的に安定してくる様子までは観察できなかった．

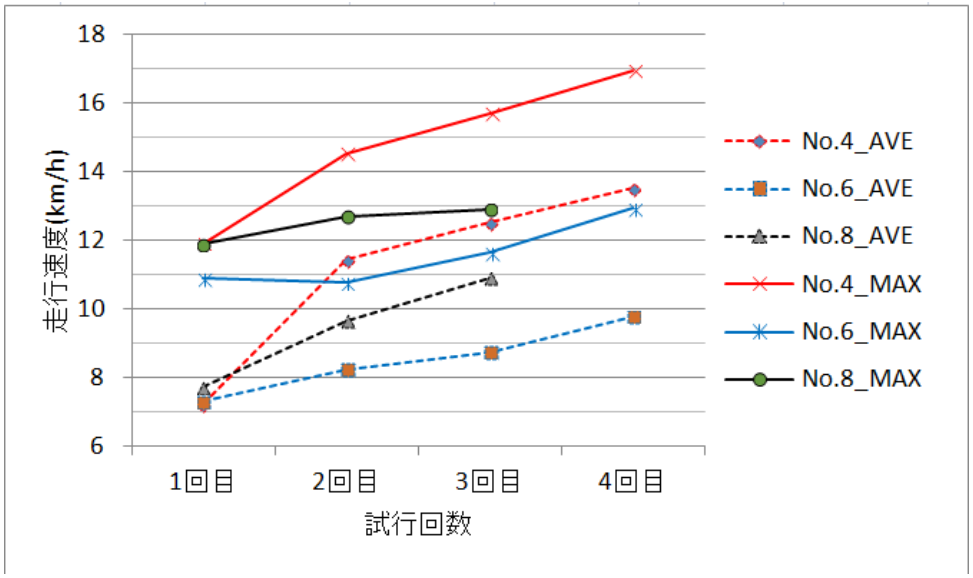


図 6. 4　適応過程における走行速度の上昇（点線：平均速度　実線：最高速度）

1. 1. 2. 3 シミュレータ酔いと実験時間

２．２より，高齢者を含む被験者に対するシミュレータ酔いが発生する時間の目安が 8～10 分程度であったため，まずは，HMD の調整時間も含め，10 分以内で実験を組んだ．結果として，時間内にシミュレータ酔いで実験を続けられなくなった人は 12 人中 1 人（被験者 No.8）しかいなかった．被験者 No.8 の実験時間は HMD の調整時間を含め 4 分 35 秒であったが，練習段階におけるハンドル操作が主なシミュレータ酔いの原因であると思われる．図 6. 5 は被験者 No.8 の 1 回目と 2 回目の練習段階における駐車車両追い越しの時の大きなハンドル回転を示しており，旋回角にして，1 回目が約 24 度，2 回目が約 38 度という値となっている．

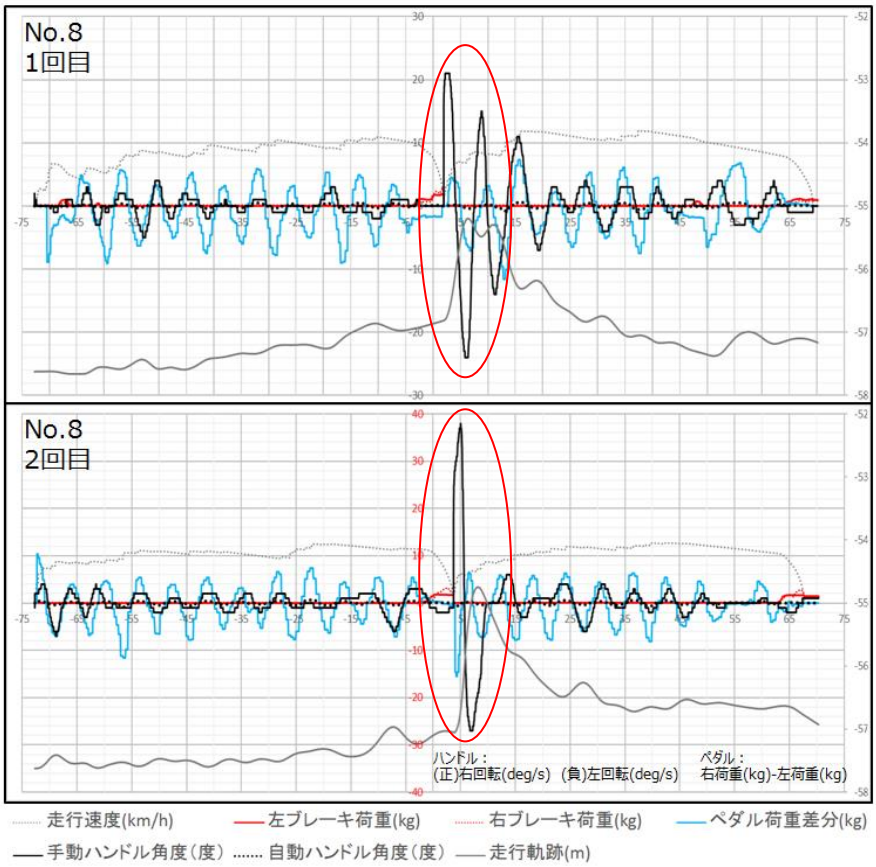


図 6. 5　駐車車両追い越しにおける非常に大きなハンドル回転

1. 1. 2. 4 シミュレータ環境への適応過程とコントロールできるようになるまでの早さ

駐車車両追い越し場面におけるシミュレータ環境への適応過程を見た時に，全員に共通していたことの 1 つに，どの要素から慣れようとしているかが挙げられる．まずは，自身の走行を安定させようとする方向で①速度の出し方，②直線走行時の車線位置のキープ，③ブレーキ（使用しない人はなし），④追い越し開始のタイミング，⑤追い越しのハンドル操作，といったものを練習しようとする．さらに慣れてきたところで，⑥後方接近車両の認識，⑦周囲の他の環境への気付きや首の回転移動，まで意識が向く．適応の初期段階では，⑥，⑦のような要素について，存在には気づいているが，自発的に注意を向けるまで①～⑤の要素を試して，走行が安定してからでないと意識が向かない．

また，被験者の中には，練習 1 回目からハンドル操作を始めていたり，2 回目から漕ぎ出しの踏み込みができていたりする人がおり，練習の初期段階でハンドル操作や速度を出す行為ができている人は，上記の⑦まで 5 回程度の練習走行（約 3～4 分）で意識が向かうようになっている．被験者 No,4 と No.6 の方に走行後のアンケートで，CS を自転車だと思って漕ぎ始めたと回答しており，最初に自転車だと思って CS を練習し始めているかによって，練習時間や適応レベルに違いが出たものと思われる．

それに対して，被験者 No.3 は，典型的なシミュレータの漕ぎ出しの例で，最初はハンドル操作に意識は行かず，①の速度の出し方を試している．その後の，駐車車両を追い越す場面では，大きくハンドルを切り過ぎてしまい，追い越し後にハンドルを左右に切りながら自身の走行を安定化させる挙動となっている．この方は，3 回の練習走行で③までの制御ができるようになったレベルである．

その他にも，CS を自転車だと思えず，恐る恐る機械に触れるような感覚で走行を開始している人が，特に女性に見受けられた．思うように速度を出すことができず，ハンドル操作に敏感になってしまい，少しハンドルが切れた時に必要以上に大きくハンドルを切ってしまう行為によりハンドル制御もできず，上記のどの段階もクリアできなかった人は 12 人中 2 人存在した．

そこで，実験前後での SSQ テスト結果及びシミュレータ酔い発現の有無，また，駐車車両追い越しシナリオに対する適応段階に着目し，①ペダリング速度，②車線位置をキープする，③ブレーキ制動・空走，④追い越し開始位置，⑤追い越し時のハンドル操作，⑥後方接近車両の認識，⑦周囲の他の環境への気付きや首の回転移動を評価項目として，達成できたものを○，部分的に達成できたものを△，未達成のものを×として各被験者の到達レベルをまとめたものを表 6.1 に示す．

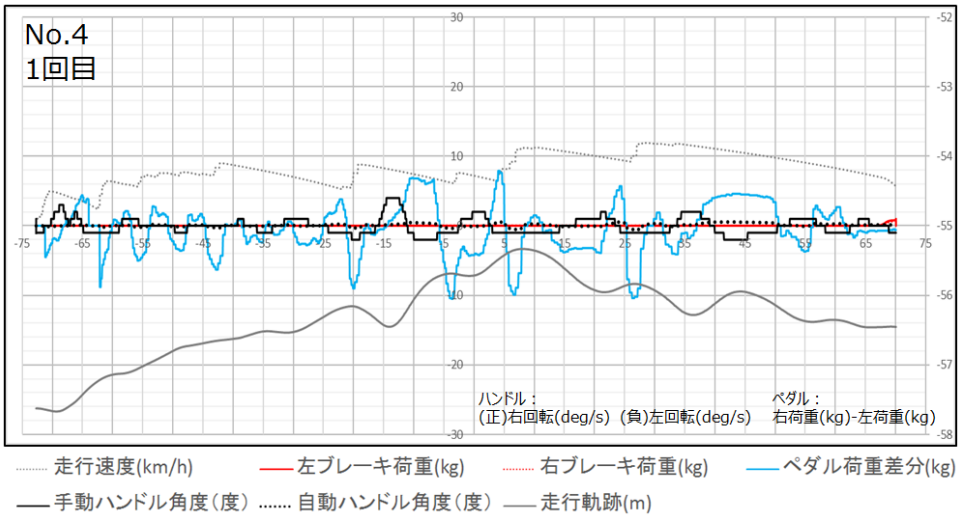


図 6. 6　1 回目の走行でハンドル操作を始めている人の例（被験者 No.4）

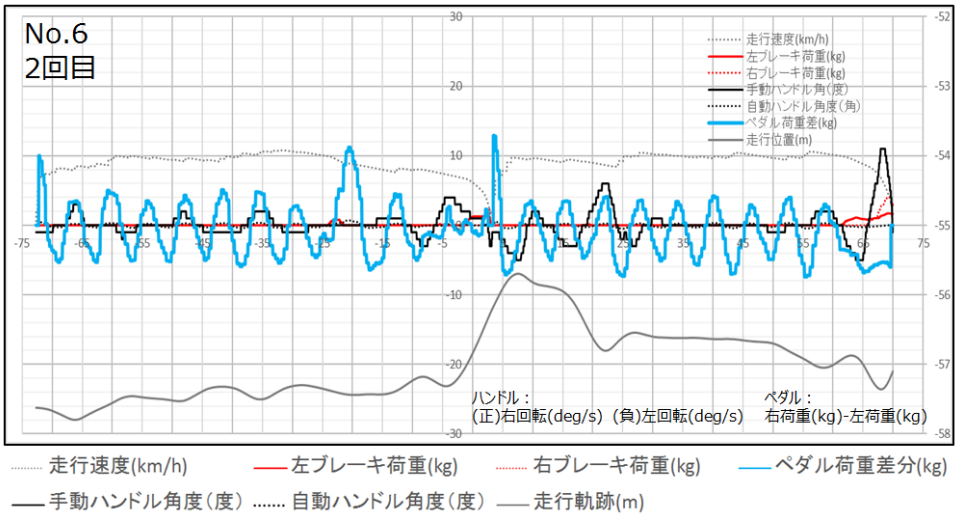


図 6. 7　2 回目の走行で最初の漕ぎ出しを上手く行えている人の例（被験者 No.6）

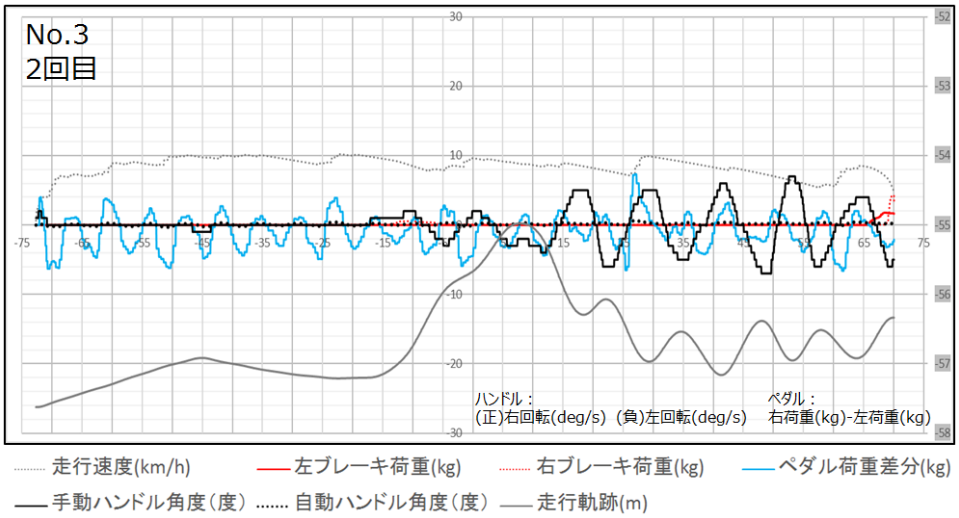
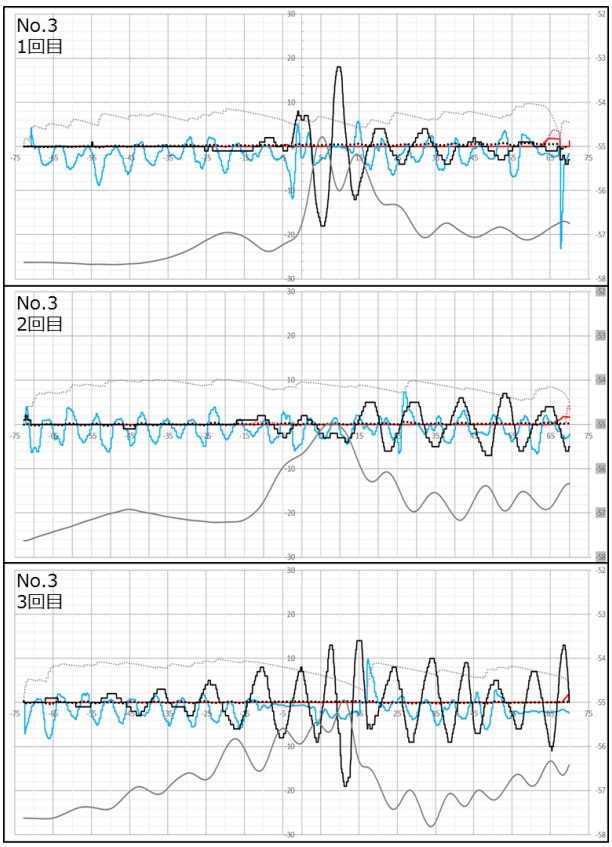


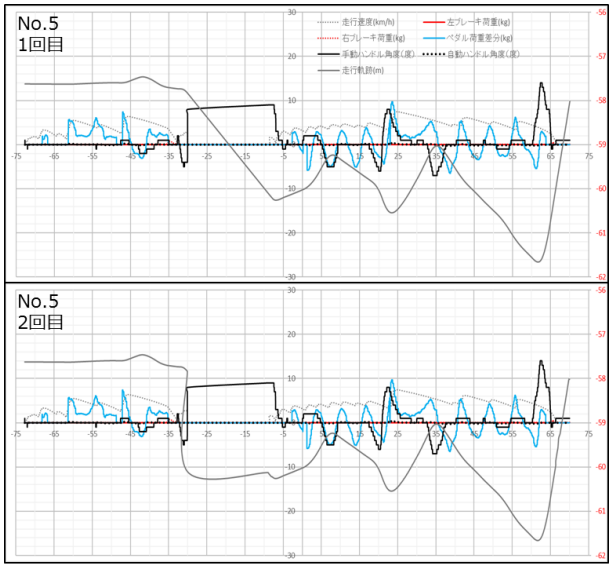
図 6. 8　典型的な CS の適応過程の初期段階の例（被験者 No.3）

表 6.1 適応段階に着目した各被験者の到達レベル

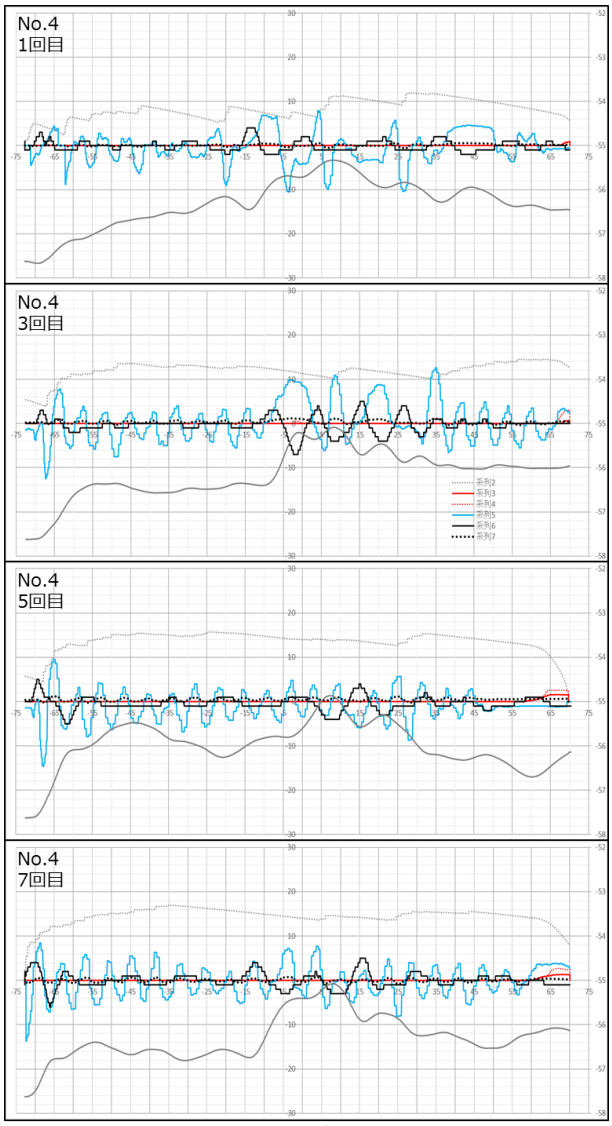
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	シミュレータ酔いの有無（SSQ テスト結果）
No. 1	×	×	×	×	×	×	×	無 (2→2)
No. 2	×	×	×	×	×	×	×	無 (0→0)
No. 3	△	△	--	×	×	×	×	無 (1→7)
No. 4	○	○	--	○	○	○	○	無 (3→1)
No. 5	×	×	×	×	×	×	×	無 (15→8)
No. 6	○	○	○	○	○	○	○	無 (1→6)
No. 7	×	×	×	×	×	×	×	無 (0→6)
No. 8	△	○	△	○	×	×	×	有 (0→17)
No. 9	○	○	○	○	○	○	○	無 (0→4)
No. 10	○	○	--	×	×	×	×	有（無回答）
No. 11	○	△	○	×	×	×	×	無 (3→3)
No. 12	×	×	×	×	×	×	×	無 (10→5)



ハンドル：
(正)右回転(deg/s)　(負)左回転(deg/s)　　ペダル：
右荷重(kg)-左荷重(kg)



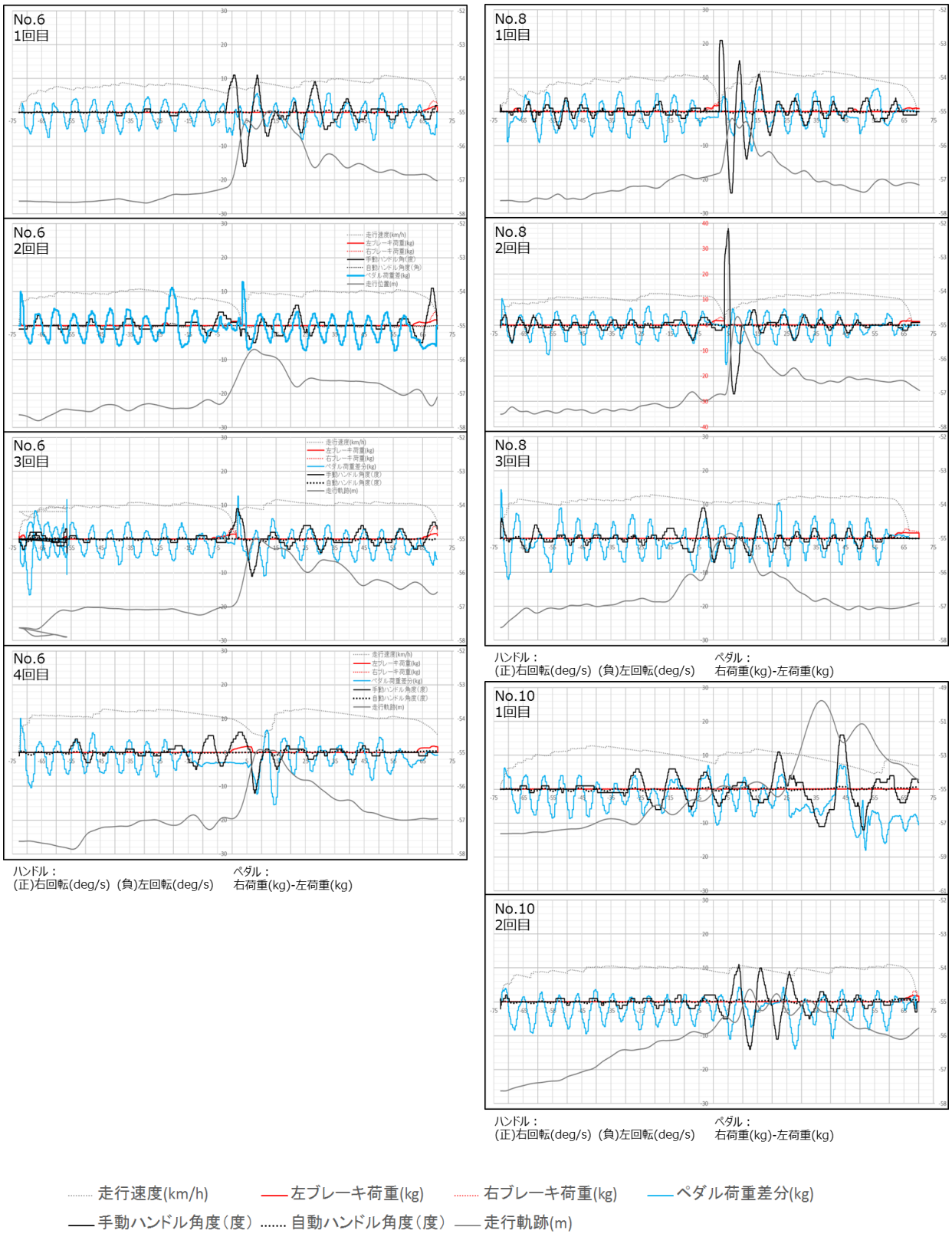
ハンドル：
(正)右回転(deg/s)　(負)左回転(deg/s)　　ペダル：
右荷重(kg)-左荷重(kg)



ハンドル：
(正)右回転(deg/s)　(負)左回転(deg/s)　　ペダル：
右荷重(kg)-左荷重(kg)

走行速度(km/h)　左ブレーキ荷重(kg)　右ブレーキ荷重(kg)　ペダル荷重差分(kg)
手動ハンドル角度（度）　自動ハンドル角度（度）　走行軌跡(m)

図 6. 9　被験者 No.3, No.4, No.5 の走行データ



走行速度(km/h)　左ブレーキ荷重(kg)　右ブレーキ荷重(kg)　ペダル荷重差分(kg)
手動ハンドル角度（度）　自動ハンドル角度（度）　走行軌跡(m)

図 6. 10　被験者 No.6, No.8, No.10 の走行データ

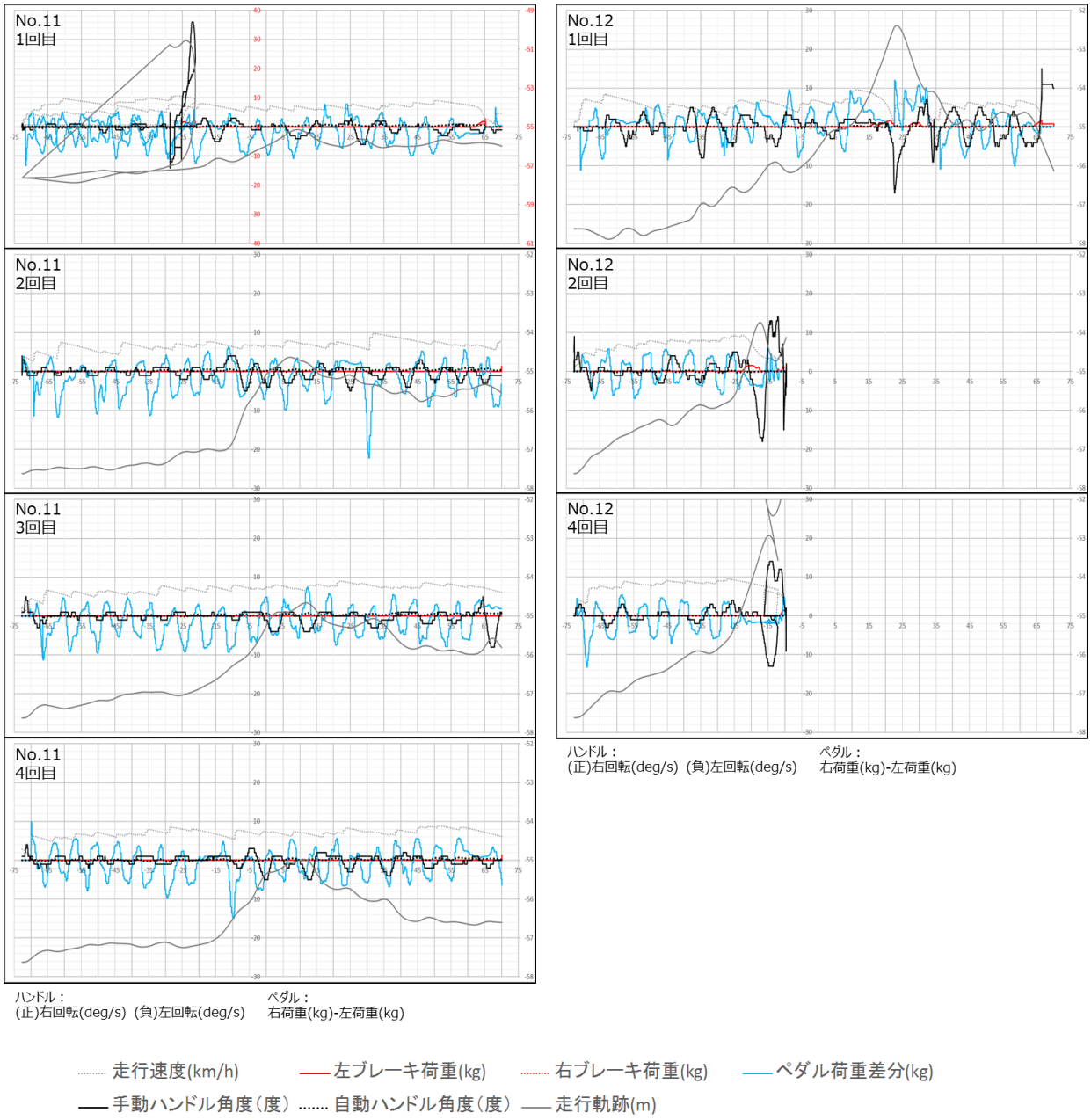


図 6. 11　被験者 No.11，No.12 の走行データ

１.２ シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良

本節では，６．１の検討に基づいて，シミュレータ環境への適応力が低い運転者でも実験が行えるようなシステム開発を目指して行った改良について述べる．

１.２.１ ハンドルの復元力と回転負荷の調整

図 6. 12 に示すように，シミュレータ環境では自転車を漕いでも運動状態にあるわけではないので，ハンドルを切っても，セルフアライニングトルクにより自然とハンドルが真っすぐ戻るわけではない．コースの特性上，車道の左側端に移動したり，駐車車両を追い越したりする際に，ハンドルを右に切る行動が発生する．その時，現実環境より大きく左にハンドルを切らなければ進行方向に対して真っすぐ走れないために，上記のような事象が発生したと考えられる．

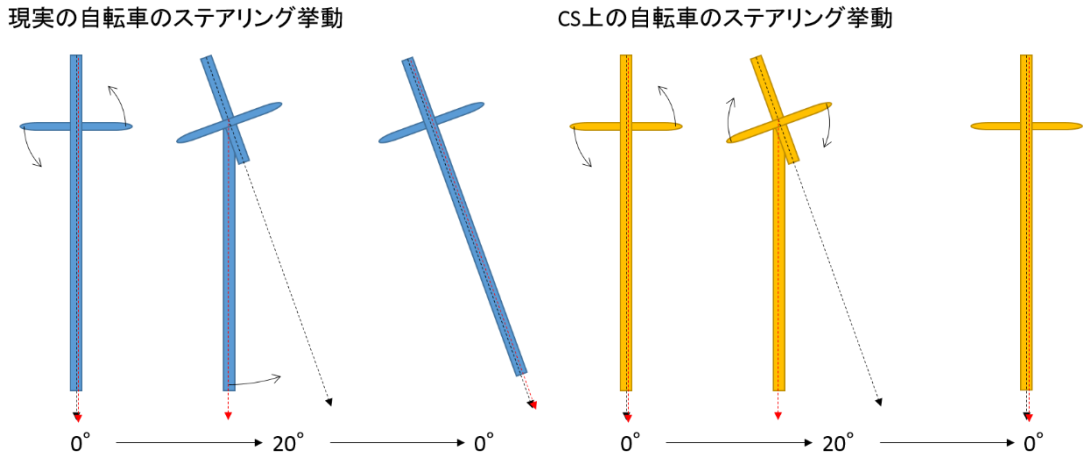


図 6. 12 現実環境とシミュレータ環境との間のステアリング挙動の違い

さらに，走行実験後のアンケート調査で，「ハンドル回転に対してどれだけ左右に回転するかの感覚については現実環境でも意識はしていない」，「現実環境よりもハンドル回転の負荷が小さいために，大きくハンドルを回転させているつもりはなくても大きく切れてしまう」といった意見があった．の実験結果からも練習の初期段階で，ハンドルを大きく切り過ぎてしまうことが確認されている．

そこで，ハンドル回転負荷をゴム紐やバネを用いて重めに調整し，ハンドル回転させた時の復元力を増加させ，上記の課題を軽減する改良を行った．また，実験結果より，ハンドル回転角（最大）は約 10 度程度であることであったことから，ゴム紐の長さを調整し，10 度以上のハンドル回転が効きにくいように調整を行った．

１.２.２ 駐車車両追い越し場面走行に向けた HMD 支持装置の改良・微調整

後方確認方向に対する HMD の可動性を上げ、オーバーラップの調整等、HMD への適応性を上げる改良及び実験手順の見直しを行った.

１.２.３ 普段通りの自転車に乗ってもらう感覚をより早く再現する工夫

実験中のビデオ映像や実験後のアンケート調査より，シミュレータを制御できるかどうかの心配がペダリングやブレーキ制動に対する過度な行動につながっていることが考えられる．そこで，制御できるか心配な方には，①CS のデモ走行を実験前に見せる，②シミュレータ環境への適応段階に応じて一つずつ指示を出しながら運転練習をしてもらう，等の手段を講じることとした.

１.２.４ 実験時間の調整

HMD 調整時間を含め 5～10 分の実験は女性や高齢者でも可能であることが実験より示された．そこで，上記改良によって，より長くシミュレータ環境で運転可能であると考えられるので，練習走行と本番走行を合わせて，10 分～15 分程度で実験を組むこととした.

１.３ 改良版 CS を用いたシミュレータ環境への適応観測 CS 実験

本節では，１.２で行った CS の改良によって，シミュレータ環境への適応力が低い運転者でも交通安全分析を行えるだけの CS システムが開発されたかどうかの検証を行う. 適応力が低い運転者として「高齢者・女性・機械に不慣れな人・乗り物酔いになりやすい人」を対象とした.

１.３.１ CS 走行実験の概要

シミュレータへの適応力の低い女性や高齢者等の運転者が, 改良後 CS へ適応する過程を観測し, 交通安全分析用シミュレータとして有効であるかどうかの考察を行うために CS 走行実験を行った．2015 年 12 月 14 日～17 日を実験の準備期間として，CS 関連機器の調整を行った後，18 日～23 日までの期間で，実験者や CS 関連機器への負荷も考え，一日最大 4 人までの実験とした．被験者はシルバー人材センターより募集した高齢者 12 名（55 歳以上 80 歳以下の男性 6 名，女性 6 名）を対象とした．また，CS 走行に必要な追加条件として，HMD 装着時に眼鏡が HMD 画面にぶつかってしまい，映像がよく見えなくなってしまったり，HMD の固定の妨げとなってしまったりすることを避けるために，眼鏡無しで 0.7 以上の視力を確保した．さらに，26 インチの軽快車を用いたので身長 148cm 以上の方を起

用し，シミュレータ酔いを誘発する要因として睡眠不足と満腹感が影響するため，前日の十分な睡眠（6 時間以上）と実験直前に 1 時間以上食事をしないようにしてもらった．

実験手順としては，まず，最初にシミュレータ上での留意事項，実験目的，実験の流れを説明し，インフォームドコンセントを取った上で，自転車運転や生活習慣，シミュレータ酔いに関するアンケート調査を行った．（約 10 分）次に，サドルの高さ調整や HMD 画面の見え方の調整を行った．（約 5 分）事前調整後，直ぐに練習走行をしていただき（約 5～10 分），①速度制御感覚（加速・空走），②ブレーキ感覚，③駐車車両との距離感，④駐車車両追い越しの時のハンドル感覚，⑤後方確認や周辺交通音での後方接近車両の認識，5 項目について制御可能，意識が向くことを確認した上で，十分，シミュレータ環境に適応できた状態の走行（本番走行）を行った．（約 5 分）

走行コースは，練習段階では 1 つの決まったコースを走行してもらい（N2），本番走行では，運転者の体調に気をつけながら，自転車レーンの有無や後方接近車両の車線位置が異なる条件で 4 走行（N1, N2, Y1, Y2）行ってもらった．本番走行におけるコースは被験者ごとにランダムに提示している．実験終了後，CS の乗り心地やシナリオ走行，シミュレータ酔いに関するアンケート調査を行った．（約 10～15 分）その他，システムの起動時間等を含め，全体で 1 時間程度の実験である．

図 6. 13　事前・事後アンケート（事後アンケート）

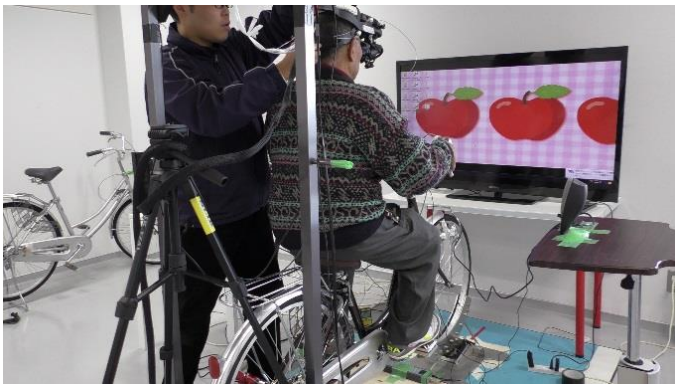


図 6. 14　実験準備（HMD 装着）

図 6. 15　CS 実験走行中の様子

１.３.２　CS 走行実験結果・考察

1. 3. 2. 1　ハンドル操作

ハンドルの操作は適応後，12 人中 8 人が「少々効きが良い～同程度」で制御可能であると回答している．効きが良い方に偏った理由として，大きくハンドルを切ると，実際よりも大きくハンドルが切れてしまうことや，一度切った方向と逆方向にハンドルを切る時の違和感が１.２.１で改良を施したものの少し違和感として残ったことが考えられる．しかし，１.１.２.１で生じていたハンドルの偏りにより，何度走行してもハンドル操作をコントロールできなかった者は 12 人中誰もおらず，ゴムやバネによる復元力がある程度上手く機能していたことが窺える．

表 6.2 に HMD や頭部回転を反映する機器を装着しなかった被験者 No.7～9 を除く，9 人分の適応後におけるハンドル回転角の最大値を示す．被験者 No.3 が少し大きな値を示していながらも，それ以外の被験者は全員 10 度以下の値となっており，ハンドル制御に関して，より適応しやすいものとなっていることが窺える．

表 6. 2　適応後におけるハンドル回転角最大値(deg)

	右ハンドル 回転角最大値(deg)	左ハンドル 回転角最大値(deg)
被験者 No.1	2	-4
被験者 No.2	9	-7
被験者 No.3	14	-11
被験者 No.4	3	-2
被験者 No.5	9	-6
被験者 No.6	3	-2
被験者 No.10	2	-2
被験者 No.11	5	-6
被験者 No.12	2	-3

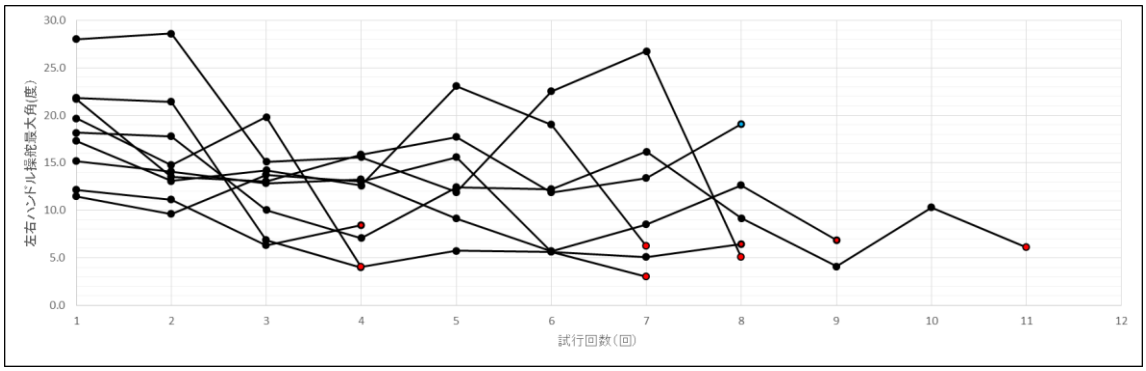


図 6.16　左右ハンドル操舵最大角の推移（被験者 8 人分）

図 6.16 にシミュレータ環境への適応段階における最大ハンドル操舵角の推移をまとめる．最終的にハンドル操作に適応できた 8 人分の被験者のデータをプロットしている．全体的に大きくハンドルを動かさず，わずかにハンドルを調整しながらハンドル操作可能となっていることが見て取れる．また，6.1 の実験結果より，左右合わせて 20 度以下のハンドル操舵で安定した走行が見られることが判明したが，改良後 CS での走行では，全員が 20 度以下のハンドル操作ができるようになっていることが見て取れる．

1. 3. 2. 2 ペダリング操作及び空走挙動

ペダル操作は，最初の漕ぎ出しが重く漕ぎにくくバランスを崩している被験者が 12 人中 4 人いたが，ペダリング負荷の調整を行った後，ペダル操作は適応後，全員同程度であると回答している．HMD の視野制約があるものの速度感覚に違和感がない理由として，110 度程度でベクションが飽和することや，普段から歩道通行する人が多く，軽いギアで走行する被験者が多かったことが考えられる．

1. 3. 2. 3 ブレーキ操作

ブレーキ操作は，適応後，12 人中 11 人が「少し効きが悪い～同程度」で制御可能であると回答している．効きが悪い方に偏った理由として，シミュレータ上では完全に止まるまで動いてしまうことが考えられる．

1. 3. 2. 4 HMD 画面による実験時間とシミュレータ酔いについて

HMD による実験が続けられなくなった被験者 No.7，No.9 を除いて，VR 走行時間の約 2～3 倍の時間，約 25 分～45 分の間，シミュレータ酔いも起こらず，HMD を被ったままの状態でいることができた．表 6.3 に各被験者の HMD 視時間・VR 走行時間・HMD 調整時間を示す．VR 走行時間は 8 分～16 分である．HMD を被ったままの状態で 3D 視を続けられた要因として，HMD 自身の重さやバランスを調整する機構がしっかり働いていたこと，また，VR 走行時間中に大きなハンドル回転が起きなかったこと，が挙げられる．

表 6.3 各被験者の HMD 視時間･VR 走行時間･HMD 調整時間のまとめ

被験者No.	HMD視時間（分:秒）	VR走行時間（分:秒）	HMD調整時間（分:秒）
1	31:50	10:30	2:30
2	28:55	9:05	1:30
3	27:05	8:45	2:00
4	34:30	10:15	8:00
5	41:25	16:45	2:00
6	43:30	14:25	3:00
7	10:00	11:40	4:30
8	28:50	14:40	3:40
9	6:00	8:30	2:20
10	38:55	15:50	1:15
11	26:00	9:40	3:20
12	38:35	12:55	2:25

1.3.2.5 現実環境での生活環境や習慣が与えるシミュレータ環境への適応性への影響

12 人中 3 人の高齢者（No.1，No.2，No.12）は，実験前よりも実験後の方が元気になっている状態が見受けられた．実験後のアンケートでの自由回答でも,「実験を楽しめた」「大変勉強になった」と回答しており，SSQ の結果からもそのことが言える．普段の生活にはない刺激が脳に良い影響を与えたためだとも解釈される．２．２の既往研究でも，シミュレータ上で楽しいと思えることでシミュレータ酔いに負の相関があることが書かれており，今後，高齢者にシミュレータを用いた交通安全教育や交通安全分析をする上で，非常に重要な点であると考えられる．

一方で，2 人の被験者（No.7，No.9）は HMD と頭部動作反映のための装置を利用して実験が続けられなかった．SSQ 結果は双方共に点数の上昇は見受けられるが，シミュレータ酔いになったかどうかの基準である 14 点以上の差は見受けられなかった．ハンドル操作に関しても，実験走行 1 回目でほとんどハンドルを切っていない．その他に，この 2 人に共通していた特徴として，①けんけん乗り，②乗り物酔いの頻度が高い，③恐る恐る運転を開始している，の 3 つが挙げられる．

これらの要素から，けんけん乗りで乗るために，漕ぎだしの動作への違和感と動作の不安定さが解消されず，恐る恐る運転を開始する動きにもつながり，ハンドルを操作した時に乗り物酔いの頻度が高いため，現実環境とシミュレータ環境との間の相違に対しての感度が高いために HMD と頭部動作繁栄のための装置を利用して実験が続けられなくなったと考えられる．実際には，被験者の前方にある 2D の画面を利用して実験を行った．表 6.3 より，2 人共，VR 走行時間は約 10 分程度走行できていることが見て取れる．

最後に，被験者 No.5，No.8 の方は，HMD を装着して実験が続けられたものの，頭部動作を反映する機器は装着して実験が続けられなかった．要因として，小刻みな左右へのハ

ンドルの切り返しにも，体重移動をしながら現実環境で運転していることが考えられる．シミュレータ環境上では，体が傾く動作に対して，スムーズにハンドルが左右に切れていくという動作が反映されていない．また，シミュレータ酔いを防ぐために，後輪固定部を左右に傾かないようにしたため，シミュレータ環境では実際に体が傾いているのに，映像上では傾いて見えず，ハンドルも切れないために，現実環境よりも大きく体を傾けながら運転しようとした．これによって，自身の中立軸が保てず，ハンドル操作においても，ハンドルを真っすぐさせることが難しくなった．頭部動作を反映する機器を外したところ，左右に体を大きく傾ける行為はなくなった．それは，頭や体を傾けても映像上は動かず，自身の軸を安定させることが容易になったためであると考えられる．

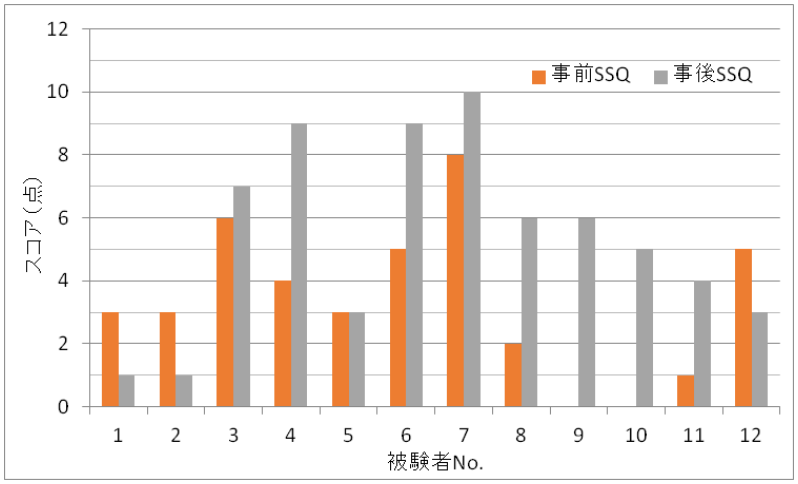


図 6. 16　CS 実験前後における SSQ テストのスコア推移（被験者 12 人分）

1. 3. 2. 6 改良前後におけるシミュレータ環境への適応レベルの変化

表 6.4 に，表 6.2 でまとめたように，実験前後での SSQ テスト結果及びシミュレータ酔い発現の有無，また，駐車車両追い越しシナリオに対する適応段階に着目し，①ペダリング速度，②車線位置をキープする，③ブレーキ制動・空走，④追い越し開始位置，⑤追い越し時のハンドル操作，⑥後方接近車両の認識，⑦周囲の他の環境への気付きや首の回転移動を評価項目として，達成できたものを○，部分的に達成できたものを△，未達成のものを×として各被験者の到達レベルをまとめたものを示す．改良後の CS を用いた場合，①～⑦までの全ての項目を達成できている人数が，改良前が 3 人なのに対して，6 人に増加している．また，シミュレータ酔いが発現している人数が，改良前が 2 人なのに対して，0 人に減少していることが見て取れる．

よって，改良前後においてシミュレータ環境への適応レベルが増加していることから，シミュレータ環境への適応力が低い人でも適応しやすい改良が行われた結果によるものであると理解される．

表 6.4　適応段階に着目した各被験者の到達レベル（改良後 CS 版）

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	シミュレータ酔いの有無
No.1	○	○	○	○	△	○	×	無(3→1)
No.2	○	○	○	○	○	○	○	無(3→1)
No.3	○	○	○	○	○	○	○	無(6→7)
No.4	○	○	○	○	○	△	△	無(4→9)
No.5	×	×	×	×	×	△	×	無(3→3)
No.6	○	○	○	○	○	○	○	無(5→9)
No.7	○	△	--	×	×	×	×	無(8→10)※
No.8	×	×	×	×	×	×	×	無(2→6)
No.9	×	×	--	×	×	×	×	無(0→6)※
No.10	○	○	--	○	○	○	○	無(0→5)
No.11	○	○	○	○	○	○	○	無(1→4)
No.12	○	○	○	○	○	○	○	無(5→3)

※HMD では気分が悪くなるという申告があったため，休憩後 2D 画面を使用

１.３.３ シミュレータ環境への適応力が低い人のための CS 走行ガイドラインの提案

６．１，６．３の実験結果から，シミュレータ環境への適応性が低い人でも，適応しやすくするための CS 走行のガイドラインを, 駐車車両追い越し場面をシナリオ例として整理したものを図 6.19 に示す.

CS 乗車前の準備として，実験前に「上手くシミュレータ運転を遂行できるか」といった心理的不安がシミュレータ酔いや走行の適応レベルに影響を与えることを考慮し，被験者とのコミュニケーションやデモ走行の呈示を行ってあげることで，安心してシミュレータ走行してもらうことが可能となると考えられる．また，HMD を使用していることで，その装着感や負担によるシミュレータ酔いへの影響は装着時間が長いほど大きくなることが予想されるため，2D 画面を用いているものとは違い，より迅速な実験準備が求められる．そこで，HMD 装着適用外の人の把握，HMD の見え方調整の効率化，シナリオローディング時間の短縮等を考慮する必要があると考えられる．また，けんけん乗りの方の場合，最初の漕ぎ出しでペダルをしっかりと踏み込むことが難しいので，漕ぎ出しでバランスを崩してしまう等の違和感を持ってしまうことが考えられる．けんけん乗りの人でもスムーズに運転を開始するためには，最初の漕ぎ出しでペダリングを手伝う等，漕ぎ出しペダリング負荷を低減させる必要がある.

CS の練習走行中では，まずは，現実環境と同じような速度を出し，真っ直ぐ走ることを被験者に意識させた後に，その速度を維持させながらハンドル操作をコントロールさせることが重要である．また，その時に，重心動揺が見られた場合，主に体幹移動によってハンドル操作を行っていることが考えられ，HMD での走行が非常に難しくなってしまうことが考えられる．わずかなハンドル操作も体幹移動によって行う被験者には，2D 画面を使用する，体幹移動によりハンドルが切れるようにする等，自身の中立軸がどこにあるかを視

覚と体性感覚との間で一致させる工夫が求められる．練習走行中に，図 6.19 の①～⑥の課題が一つずつ達成されることを確認する中で，走行時間が 10 分程度を越えた辺りから，シミュレータ酔いの発現のリスクを考慮に入れる必要がある．特に，映像が大きく回転して見えるような場合（カーブ・後方確認）は，走行時間の長短に関わらず，突如としてシミュレータ酔いになる可能性があると考えられる．

CS 乗車後のケアとしては，まず，被験者に目を閉じてもらいながら HMD を離脱させることが推奨される．いきなり HMD を外してしまうと，シミュレータ環境に適応していた体が急に現実環境に引き戻されるので，現実環境に適応できず目がくらむ等の症状が出る可能性がある．降車時の安全性についても十分に確保し，被験者のシミュレータ酔いの程度を常に気を付けている必要があると考えられる．

【CS乗車前の準備】
① 被験者とのコミュニケーション：乗車前の不安や緊張を和らげる
② 眼鏡の有無・顔や頭部の形の把握：HMD装着適用外の人を確認する
③ 乗り物酔いの頻度の把握：シミュレータ酔いの可能性がある
④ 自転車への乗車方法の把握：けんけん乗りの場合，最初の漕ぎ出しがうまくいかない可能性がある
⑤ （必要に応じて）デモプレイの呈示：特に，シミュレータを知らない人のためにシミュレータ運転と環境を理解してもらう
⑥ HMDの迅速な装着と見え方設定：HMDの装着負荷・時間が大きくて長いほどシミュレータ酔いの可能性がある
⑦ シナリオローディング時間の短縮

【CS練習走行】
① 遠くに焦点を置き，直進してもらう
□ 漕ぎ始めでペダルをしっかりと踏み込み速度を出そうとしているか
□ 不用意なハンドル操作をしていないか
□ 重心動揺が起きているか：被験者自身で制御できない重心動揺が生じる場合，HMD視環境での運転不適のため2D画面に切替
② ブレーキ制動・空走をしてもらう
□ （例えば）停止線の前で止まることが可能か
□ （例えば）速度変化する前方自転車に追従することが可能か
③ ハンドル操作をしてもらう
□ ①で確認した速度でハンドルの効き具合を調整可能か：ハンドル操作時に速度が低下してきても，なるべく①での速度を保ってハンドル操作の調整を行ってもらうように指示する
□ ハンドルを左右にわずかに動かし，蛇行挙動が可能か
④ 駐車車両（回避対象物）との距離感の把握
□ 追い越しを開始するタイミングを調整可能か
□ 追い越し時に駐車車両との側方距離の認識があるか，また，安全な間隔が取れるかどうか
⑤ 周辺環境の把握
□ （駐車車両を追い越す時に）側方を通過する後方接近車両の目視が可能か
□ （駐車車両を追い越す時に）後方接近車両の接近音を認識可能か
⑥ 周辺環境の中でインタラクティブに運転
□ （駐車車両を追い越す時に）後方を向いて車両を目視，接近音を認識しながら追い越すタイミングを取ることが可能か：後方接近車両を目視する際に，ハンドル操作が不安定になる，回転映像によってシミュレータ酔いになる可能性があるので，ハンドルが曲がらないように意識させ，首をあまり大きく後方に振らないようにさせる
□ 信号や周辺施設等に意識や目線・首が向いているか
＜注意事項＞
□ 実験走行時間が10分程度を越えた辺りからシミュレータ酔いの程度を被験者に確認する
□ こまめに目を休ませる等の休憩を取らせる

【CS乗車後】
① 被験者に目を閉じてもらいながらHMDを離脱：いきなり外すと，現実環境に適応できず目がくらむ等の症状が出る可能性がある
② 降車時の十分な安全性の確保：運転者がシミュレータ酔い等により，足元がおぼつかなくなる可能性がある
③ 被験者の体調の確認：シミュレータ酔い等，気分が悪くないかを尋ねる

図 6.19　シミュレータ環境への適応力が低い人のための CS 走行ガイドライン（実験者目線）

１.４ 結語

本章では，６．１の学生以外を対象としたCS実験により，①ハンドルの復元力と回転負荷の調整，②後方確認をスムーズに行うためのHMD支持装置の改良・微調整，③普段通りの自転車に乗ってもらう感覚を持たせる工夫（デモ走行を見せる・被験者の適応段階に応じて１つずつ指示を出す，等），④実験時間の調整が重要であることが示された．そこで，①～④を考慮し，６．２で改良したCSを用いて，シミュレータ環境への適応力が低いと考えられる高齢者，女性，乗り物酔いになりやすい人，機械操作が不慣れな人を対象に６．１と同様のCS実験を６．３で行ったところ，ハンドル操作がより安定，シミュレータ酔いの人数の減少，シミュレータ環境への各被験者の適応段階における到達レベルが上昇，といった改善が見られた．

一方で，「けんけん乗りを行う人」や「乗り物酔いになりやすい人」，「主に体幹のわずかな傾きによりハンドル操作をしている人」に対しては，改良後のシステムを用いても適応することが難しいことが明らかとなった．それぞれ，要因として「漕ぎ出しの難しさ」，「立体視や空間把握の難しさ」，「体を傾けてもハンドルが左右に動く機構ではないこと」が考えられる．

最後に，６．１，６．３で行った実験結果を元に，シミュレータ環境への適応性が低い人でも，適応しやすくするためのCS走行のガイドラインを，駐車車両追い越し場面をシナリオ例として提案を行った．

第７章　総括

１.１　本研究の成果

１.２　今後の課題

１.１ 本研究の成果

本研究では，現実環境とシミュレータ環境との間の相違がシミュレータ環境への適応性に与える影響や運転感覚の再現性について検討を行いながら，錯綜の危険が懸念されている対面通行自転車道や駐車車両追い越しのような場面で交通安全分析を可能とする自転車シミュレータの開発を行った．

第 1 章「序論」では，本研究の背景である自転車走行空間における危険個所や危険な運転挙動を整理して示し，CS を開発し活用することで，これらの問題を実証的に分析可能であることを述べるとともに，そのためにシミュレータで再現すべき運転挙動や運転感覚とその重要性を指摘して，これらに取り組む本研究の目的を明らかにした．

第 2 章「既往研究の整理と本研究の位置づけ」では，各国で開発の進む CS を網羅しそれらの得失を評価した上で，シミュレータ環境への適応性に関する従来の取組みについて特にシミュレータ酔いの観点から取りまとめ，交通安全分析に活用可能な自転車シミュレータを開発する本研究において，シミュレータ環境への被験者の適応性を課題とする研究の位置づけとその重要性とを明らかにした．

第 3 章「交通安全分析用自転車シミュレータ Morics の概要と再現性向上のための工夫」では，本研究で開発を進める自転車シミュレータにおいて，個々のパーツを新たに工夫することで全体システムの再現性を高める検討を行った．特に，ハンドルに取り付けたジャイロセンサの再現性やブレーキに取り付けた圧力センサの独自な考案，HMD の重量を軽減する工夫等により，運転挙動をより高い精度でデータ化することに成功し，HMD による 3D 視覚環境とサイクルトレーナによる走行環境との同期システムとして CS の構築を行った．

第 4 章「ハンドル・ペダル操作に起因する走行挙動の不安定性の再現」では，自転車操作に起因する走行挙動の不安定性に着目し，自由度が高い自転車固有の運動効果を整理した上で，特にふらつき挙動を再現するため統計モデルを構築し，CS に実装した．そのため，まずプローブバイシクルを設計して走行挙動データを取得することで，CS に反映すべきふらつき挙動の精度を概ね把握した上で，走行挙動データを用いて回帰モデルを推定し，その再現性を確認している．そして，そのモデルをシミュレータに組み込み，HMD に投影される画像環境に反映することで，物理的に自転車がふらつかなくとも，概ね妥当な挙動の反映ができることを，対面通行自転車道におけるすれ違い挙動の再現性検証実験から明らかにした．

第 5 章「ブレーキ制動や空走による速度減衰挙動の再現」では，自転車シミュレータの操作性に対する影響の大きな速度減衰挙動を対象に，新たに開発したブレーキセンサを搭載した自転車による実走実験より得たデータを用いて速度減衰モデルを推定し，そのモデルを組み入れることで，前後輪ブレーキが装着され空走挙動を表現した CS を開発した．その上で，駐車車両の追い越し挙動を自転車シミュレータ実験で分析し，自転車レーンや駐車車両の存在の有無で自転車運転者の追い越し開始位置や反応速度に差があることを明らかにした．

第 6 章「シミュレータ環境への適応力が低い属性を考慮した CS の改良」では，シミュレータ環境への適応力が低い運転者にミュレータ酔いが生じるリスクが高いことから，シミュレータ環境への適応段階で生じる課題を考察し，ハンドルの復元力と回転負荷の調整，後方確認をスムーズに行うための HMD 支持装置の改良・調整，普段通りの自転車に乗車する感覚を持たせる実験手順上の工夫等により自転車シミュレータの実験環境を改良した上で，高齢者，女性，乗り物酔いになりやすい人等を対象にして駐車車両の追い越し挙動を分析した結果，ハンドル操作の安定，シミュレータ酔いの減少，シミュレータ環境への適応段階に応じた到達レベルの上昇が認められた．以上の成果をもとに，シミュレータ環境への適応性が低い被験者の適応性向上のため, 駐車車両追い越し場面を対象に CS 走行実験の手順等の整理を行った.

１.２ 今後の課題

今後の課題を以下に示す.

- カーブや低速走行におけるモデルの拡張

今回は，観測計器の精度限界や誤差補正の必要性があったために，直進中速走行でのみの推定を行ったが，今後は低速やカーブにおけるハンドル操舵角も表せるモデルに拡張することが望まれる．その際，運転者の重心移動が自転車の重心移動とは別に起こるので，運転者の重心移動の影響を含めたモデルにする必要があると考えられる.

- 実走実験に用いる観測用自転車の改良

計測機器の性能的限界や仕様の違いにより，複雑な形となってしまい，データ観測をするのに大変時間がかかった．今後は，データ観測系を揃え，Bluetooth 等の無線観測系を用いてより簡素で誰でも乗りやすい観測用自転車に改良する必要があると考えられる.

- HMD 以外の映像呈示方法の試行

HMD による立体視は運転感覚の再現性を考慮する上で非常に有用である反面，装着や視界の制約によって再現が難しいシナリオがあることや被験者への負担が増加することが分かった．今後は，2D 画面や立体視眼鏡の着用など，視界や装着の制約がない映像呈示を組み合わせることで，再現可能なシナリオの拡張やシミュレータ環境への適応力が低い人でも，より安全に走行可能な CS が実現できる可能性があると考えられる.

- 被験者の数

全体的に被験者の数が少ないことで統計的な分析や一般化が難しかった．本研究では，個々の具体的な行動に着目して分析を行っていったが，今後は被験者の数を増やして，モデルの構築や CS 走行ガイドライン等，より一般性を持たせた結果につなげていきたい.

参考文献

1) 警察庁交通局，自転車の交通事故の実態と自転車の交通ルールの徹底方策の現状，自転車の交通ルールの徹底方策に関する懇談会（第 1 回）資料，平成 24 年 10 月
2) 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，平成 24 年 11 月
3) 政府統計の総合窓口 HP :「平成 23 年中の交通事故の発生状況」・「交通事故統計」より作成
4) 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
5) 阿部宏史，崎大樹，岩元浩二，冨田修一，「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
6) HONDA HP：ニュースリリース「安全運転教育用「本田自転車シミュレーター」を発売、2009 年 10 月 15 日
7) 溝口諒，山中英生，井上賢，広視野型自転車シミュレータの性能分析，土木学会四国支部技術研究発表会，2014
8) Rainer Herpers, Wolfgang Heiden, Michael Kutz, David Scherfgen, Ulrich Hartmann,Jens Bongartz, Oliver Schulzyk, “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
9) Shani Bromberg et al, The perception of pedestrians from the perspective of elderly experienced and experienced drivers, Accident Analysis and Prevention, 44, pp.48-55, 2012
10) Jodie M. Plumert, Joseph K. Keamey, James F. Cremer, Kara M. Recker, Jonathan Strutt, "Changes in children's perception-action tuning over short time scales: Bicycling across traffic -filled intersections in a virtual environment", Journal of Experimental Child Psychiligy, 2010
11) 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
12) オレゴン大学 HP, http://web.engr.oregonstate.edu/~hurwitz/BikeSim.php
13) 成田裕二，南優大，植竹照雄，下田政博，自転車操作における大学生と高齢者の比較，人類働態学会会報第 99 号，2014
14) 東洋大学大学院福祉社会デザイン研究科人間環境デザイン専攻医用・生活支援メカトロニクス研究室，リハビリテーション用自転車シミュレータの開発，2013
15) He, J., Chaparro, A., Nguyen, B., Burge, R. J., Crandall, J., Chaparro, B., Ni, R., & Cao, S. (2014). Texting while driving: Is speech-based text entry less risky than handheld text entry?, Accident Analysis & Prevention, 72, 287–295.
16) 小林慧吾，菊池武士，杉山正雄，円筒型 MR 流体ブレーキを用いたバーチャルリアリティー自転車の開発，計測自動制御学会東北支部第 267 回研究集会，2011
17) Ching-Kong Chen, Fong-Jie Chen, Jung-Tang Huang, Chi-Jung Huang, “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, 2007
18) Dong-Soo Kwon , Taejeon, Gi-Hun Yang, Chong-Won Lee, Jae-Cheol Shin, Youngjin Park, Byungbo Jung, Doo Yong Lee, Kyungno Lee, Soon-Hung Han, Byoung-Hyun Yoo, Kwang-Yun Wohn, Jung-Hyun Ahn, “KAIST Interactive Bicycle Simulator”, International Conference on Robotics 8 Automation Seoul, Korea. May 21-26, 2001

19) Hongling Wang, Joseph K. Kearney, James Cremer, Peter Willemsen, “Steering Behaviors for Autonomous Vehicles in Virtual Environments”, Virtual Reality 2005, pp.155-162, 2005
20) Sean D. Young, Bernard D. Adelstein, Stephen R. Ellis, “Demand Characteristics of a Questionnaire Used to Assess Motion Sickness in a Virtual Environment, Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (2006), pp.97-102
21) James Jeng- Weei Lin, Henry B.L. Duh, Donald E. Parker, Habib Abi-Rached, Thomas A. Furness, “Effects of Field of View on Presense, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment”, Proceedings of the IEEE, Virtual Reality (2002)
22) Barbara Freund, LeighAnnna A. Colgrove, Davithoula Petrakos, Rebecca McLeod, “In my car the brake is on the right: Pedal errors among older drivers”, Accident Analysis and Prevention, 40 (2008), pp.403-409
23) Hoe C. Lee, Andy H. Lee, Don Cameron, Cecilia Li-Tsang, “Using a driving simulator to identify older drivers at inflated risk of motor vehicle crashes”, Journal of Safety Research 34 (2003), pp.453-459
24) Xuedong Yan, Essam Radwan, Dahai Guo, “Effects of major-road vehicle speed and driver age and gender on left-turn gap acceptance”, Accident Analysis and Prevention 39 (2007), pp.843-852
25) Ilka Zöller a, Alexander Betz, Nicole Mautes, Lucas Scholz, Bettina Abendroth, Ralph Bruder, Hermann Winner, “Valid representation of a highly dynamic collision avoidance scenario in a driving simulator”, Transportation Research Part F 31 (2015) pp.54–66
26) Seddigheh Babaee, Maryam Bagherikahvarin, Renaud Sarrazin, Yongjun Shen, Elke Hermans, “Use of DEA and PROMETHEE II to assess the performance of older drivers”, Transportation Research Procedia 10 (2015), pp.798-808
27) Yoon-Ki Min, Byung-Chan Min, Boseong Kim, “Changes in eye movements and driving performance at different intersections as a function of age and turn type”, International Journal of Industrial Ergonomics 43 (2013), pp.342-349
28) Nicole A. Matas, Ted Nettelbeck, Nicholas R. Burns, “Dropout during a driving simulator study: A survival analysis”, Journal of Safety Research (2015) in press
29) Pieter Vansteenkiste, Linus Zeuwts, Greet Cardon, Renaat Philippaerts, Matthieu Lenoir, “The implications of low quality bicycle paths on gaze behavior of cyclists:A field test”, Transportation Research Part F 23, pp.81-87, 2014
30) 相知敏行，山中英生，神田佑亮，サッカード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
31) Beth Thomas, Michelle DeRobertis, “The safety of urban cycle tracks: A review of the literature”, Accident Analysis & Prevention 52 (28), 2013
32) 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
33) Kroll, B., Ramey, M.R., 1977. Effects of bike lanes on driver and bicyclist behavior. J. Transp. Eng. 103, 243-256
34) Guthrie, N., Davies, D.G., Gardner, G., 2001. Cyclists' Assessments of Road and Traffic Conditions: The Development of a Cyclability Index, TRL Report 490. Transport Research Laboratory, Crowthorne.
35) Basford, L., Reid, S., Lester, T.,Thomson, J., Tolmie A., 2002. Drievers Perceptions of Cyclists. TRL Report 549. Transport Research Laboratory, Crowthorne.
36) Sando, T., Moses, R., 2011. Operational and Safety Impacts of Restriping Inside Lanes of Urban Multilane Curbed Roadways of 11 Feet or Less to Create Wider Outside Curb Lanes for Bicyclists. University of North Florida, Jacksonville.
37) Walker, I., 2007. Drivers overtaking bicyclists: objective data on the effects of riding positions, helmet use, vehicle type and apparent gender. Accid. Anal. Prev. 39, 417-425.

38) Franklin, J., 2007. Cyclecraft: The Complete Guide to Safe and Enjoyable Cycling for Adults and Children. The Stationary Office, Norwich.
39) Hunter, W. W., Srinivasan, R., Thomas, L., Martell, C.A., Seiderman, C.B., 2011. Evaluation of sared lane markings in Cambridge, Massachusetts. Transp. Res. Rec. 2247, 72-80.
40) Kai-Hsiang Chuang, Chun-Chia Hsu, Ching-Huei Lai, Ji-Liang Doong, Ming-Chang Jeng. The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass. Accident Analysis and Prevention 56 (2013) pp.32-41
41) Daniel Frings, John Parkin, Anne M. Ridley. The effects of cycle lanes, vehicle to kerb distance and vehice type on cyclists' attention allocation during junction negotiation. Accident Analysis and Prevention 72 (2014) pp.411-421
42) 細谷奎介，鈴木美緒，屋井鉄雄，自転車の走行空間整備に向けた追越し挙動に関する基礎的研究，第 50 回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2014
43) Kimuaki Labo HP，【運動学2　運動学習】
44) Madhusudhan Venkadesan, Dynamic Dexterous Manipulation: Benefits of the edge of instability in exploring complex dynamical behavior, A dissertation presented to the faculty of the graduate school of Cornell university in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of doctor of philosophy, Jan. 2007
45) Jeffery G. Covin, Dennis P.Slevin, Randall L. Schuitz, Implementing Strategic Missions: Effective Strategic Structural and Tactical Choices, Journal of Management Studies, Vol31, Issue4, pp.481-506, Jul. 1994.
46) 高桑義直、粟屋伊智郎、後藤真弘、久保壮、岡田卓三、岡田幸一郎、シミュレータ酔いの低減を目指したドライビングシミュレータの開発、三菱重工技報 Vol.46 No.3、pp.38-42、2009
47) 氏家弘裕、安全な情報化社会を求めて、BRAIN MEDICAL 17(4)、pp.62-67、2005
48) 中川千鶴、大須賀美恵子：VE 酔い研究および関連分野における研究の現状、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.3、No.2, pp.31-39、1998
49) Reason, J.T. and Brand, J.J.: Motion Sickness, Academic Press, London, 1975
50) 石井正則：動揺病の研究-コリオリ加速度負荷による動揺病の研究-, JOHNS, vol.6, no.9, pp.41-44, 1990
51) Benson, A.J.: Motion Sickness, Vertigo, John Wiley & Sons Ltd., pp. 391-426, 1984
52) 水越鉄理：動揺病の神経耳科学的研究, JOHNS, vol.6, no.9, pp.29-34, 1990
53) nVisorHP（URL：http://www.nvisinc.com/product2009.php?id=30）
54) サイクルトレーナ（URL：http://noguchi1904.blog109.fc2.com/blog-entry-72.html）
55) KINETIC サイクルトレーナ（URL：http://blogs.dion.ne.jp/nobuchan/pages/user/m/article?article_id=10181625&page=3
56) 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
57) 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