

補助事業番号 2023M-406

補助事業名 2023年度 自転車に配慮する自動運転車設計のための  
サイクリストモデル構築 補助事業

補助事業者名 国立大学法人名古屋大学 工学研究科 機械システム工学専攻  
奥田 裕之

## 1 研究の概要

本研究は、「自転車に配慮する自動運転車の設計」を目指し、サイクリストの行動を数理的に再現可能なモデル（サイクリストモデル）を構築することを目的とする。特に、仮想環境上で走行可能なリーン対応自転車シミュレータを開発し、実験データに基づいて判断・操作モデルを同定する。複数の数理モデル構造についてその推定精度を比較、検討し、モデルから行動の特徴を解析する。また、得られたモデルを用いた自動運転車（AD車）の制御アルゴリズムを検討する。

## 2 研究の目的と背景

日本における自転車事故の多くは自動車との接触に起因しており、交通弱者（VRU: Vulnerable Road User）であるサイクリストの安全確保は喫緊の課題である。近年、自動運転車（AD車）の開発が進む中で、自動車側に効率や安全を考慮した自動運転を実装するだけでなく、VRUにとって「優しい」設計が、世の中に認められる自動運転を設計する上で重要である。本研究では、このような背景から、VRU、特に自転車に注目し、サイクリストの挙動をシミュレータを用いて観測、数理モデリングすることで、サイクリストの行動の特徴を工学的に理解し、AD車の制御器設計にサイクリストに配慮する、という視点を導入する新たな枠組みを提示する。

## 3 研究内容

### (1) リーン対応自転車シミュレータの開発

<https://www.suzlab.mae.nagoya-u.ac.jp/2023-jka-report/>

市販のサイクルトレーナを基盤に、リーン操作が可能な搭乗型の自転車シミュレータ（Cycle Simulator: CS）を開発。視覚的臨場感を高めるため7面モニタとVR提示機構を搭載し、リーン角、ステア角、車速、ペダル踏力などのデータ取得が可能なセンサ群を実装した。加えて、制御用マイコンや仮想環境との統合も行い、複雑な自転車挙動の再現が可能な計算環境を整備した。



図 1. 構築したサイクリストシミュレータ



図 2. VR として表示される CS 搭乗者の視野

### (2) リーン可能で計算が軽量の自転車のシミュレーションモデルの構築と低速走行時のふらつき再現モデルの構築

開発したCSは、搭乗する自転車そのものがリーン可能であり、搭乗時のリアリティにつながっているが、シミュレーションにおいてはリーンを伴う場合の自転車の挙動計算モデルが必要となる。従来もリーンまで考慮した自転車のダイナミクスモデルが存在するが、本研究では将来的な多数の自転車エージェントのシミュレーションを見越し、比較的軽量で、かつ粗いサンプリング周期でも動作する自転車のダイナミクスモデルを構築し、実車実験によりそのパラメータを求めた。また、自転車の低速走行時には、傾きを補正するためのふらつきが大きくでるが、上記シミュレータでは、停止時でも倒れないようにスプリングでロール方向が支えられており、倒立不安定性から来るふらつきが出にくい。

サイクリストをAD車の安全検証シミュレーションにおいて考慮する場合、このようなふらつきも考慮すべき重要な要素である。そこで、自転車のダイナミクスを考慮し、人の操作の遅れを考慮することで、低速でのふらつきをシミュレーションするモデルを構築した。



図 3. 自転車の動特性とふらつきモデルのパラメータ推定実験の様子

$$\begin{aligned}
 mV \left( \frac{d\beta}{dt} + \omega \right) - mh \frac{d^2\phi}{dt^2} &= -K_f \left( \beta + \frac{l_f}{V} \omega - \delta \right) - K_r \left( \beta - \frac{l_r}{V} \omega \right) - K_{cf}\phi - K_{cr}\phi \\
 I_z \frac{d\omega}{dt} &= -l_f K_f \left( \beta + \frac{l_f}{V} \omega - \delta \right) + l_r K_r \left( \beta - \frac{l_r}{V} \omega \right) - l_f K_{cf}\phi + l_r K_{cr}\phi \\
 (I_x + mh^2) \frac{d^2\phi}{dt^2} - mhV \left( \frac{d\beta}{dt} + \omega \right) &= mgh\phi
 \end{aligned}$$

図 4. 計算に用いた倒立振り子挙動付き動的二輪モデル

### (3) サイクリスト判断モデルの構築と評価

開発したCSを用い、自転車が自動車との関連の中で大きな事故につながる、自動車の交差点左折のシーンを具体例として、サイクリストの行動観測を実施した。行動信号としてペダル踏力を用い、「巡行・力行・ブレーキ」の各状態に対応した意図分類モデルを構築した。

具体的にはロジスティック回帰モデル (LRM) やGaussian Mixture Model (GMM), ニューラルネットワークモデル等を用いて上記の意図推定モデルを構築し, その性能を比較検討した. また, 説明可能なLRMをもちいて, サイクリストの操作特性を解析し, モデル適用の有効性を明らかにした. 得られたモデルを用いると, 交差点付近におけるサイクリストの行動を模擬, 生成でき, AD車の安全検証をシミュレーションで実施することができるとともに, AD車の制御器設計にも直接的な応用が可能となる. 例えば, 事業代表者が近年提唱する, エントロピー最小化制御を適用することで, サイクリストへの危険だけでなく, サイクリストが判断に迷うような状況を避けるようにAD車を制御できると考えられる.

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究によって得られた自転車のふらつきモデルや, サイクリストの判断モデルは, 将来のAD車設計に対し, 直接的, 間接的に影響を与えると考える. 間接的な影響としては, サイクリストへの配慮, というコンセプトとその方法論を打ち出したことで, サイクリストと共存するAD車という新たな意識を, 各種自動車メーカー, OEMに持ってもらうことができる. 事実, 自動車技術会における成果発表では, 発表賞を受賞するなど大きな注目を浴び, その成果の重要性を示せた. また, 直接的には, サイクリストを含めた安全検証を行う際に, 本研究で開発したモデルを, だれでも直接的に用いることができる.

さらには, サイクリストだけでなく, 高齢者や児童など他の交通弱者についても安心して利用されるモビリティの開発が加速し, より安全で快適な交通社会の実現に貢献すると考える. また, AD車等のモビリティ設計だけではなく, 都市計画や交通インフラ設計にも応用可能な数理的評価基盤の提供への発展も期待される.

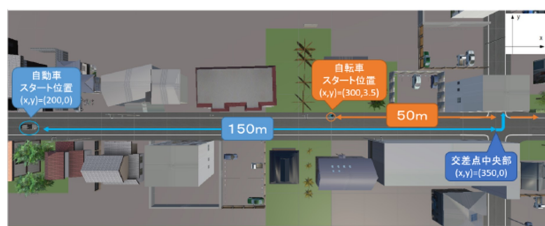


図5. サイクリストの交差点行動観測実験の環境設定

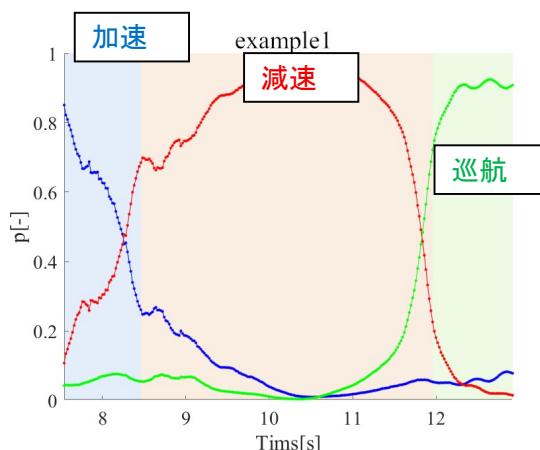


図6. サイクリストの判断モデル(LRM)を用いた意図推定結果の例

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

事業代表者である奥田は, これまでに, ドライビングシミュレータを用いた運転行動分析, 自動運転車の評価システム構築に従事してきた. 本研究は, これらの実績を踏まえ, サ

イクリストという新たな、かつ自動運転の普及にあたって重要な主体に焦点を当てた応用展開であり、「人中心の自動運転」技術開発という中長期的な研究テーマの一環である。今後、サイクリストを含む様々なVRUへの対応や、歩車混在環境を考慮するにあたって、本研究で開発したシミュレータ、自転車の数理モデル、そしてサイクリストモデルは、様々な応用、発展が考えられる大きな知的財産となる。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (i) 小出, 山口, 奥田, 鈴木, 脇坂, 伴, “自転車シミュレータにおけるモデルパラメータ検証と運動性能評価”, 自動車技術会学術講演会2023秋季大会, No. 160, 10/11-13(12), 名古屋国際会議場, 名古屋, 2023
- (ii) 脇坂, 伴, 山口, 奥田, 鈴木, “無信号交差点での左折巻き込みシーンにおけるサイクリストの判断モデル構築”, 自動車技術会学術講演会2023秋季大会, No. 161, 10/11-13(12), 名古屋国際会議場, 名古屋, 2023
- (iii) 脇坂, 伴和, 山口, 奥田, 鈴木, “無信号交差点での順行左折車両に対するサイクリストの加減速判断の分析とモデル化”, 自動車技術会学術講演会2024春季大会, No. 363, 5/22-24(5/24), パシフィコ横浜, 横浜, 2024
- (iv) 脇坂, 山口, 伴, 奥田, 鈴木, “無信号交差点での順行左折車両に対するサイクリストの行動意図の分析とモデル化”, 自動車技術会論文集, Vol.55, No. 5, 2024,

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

本事業のレポートページ (<https://www.suzlab.mae.nagoya-u.ac.jp/2023-jka-report/>)

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東海国立大学機構名古屋大学 大学院工学研究科

(トウカイコクリツダイガクキコウ ナゴヤダイガク ダイガクインコウガクケンキュウカ)

住 所: 〒464-8603

愛知県名古屋市千種区不老町

担 当 者: 准教授 奥田裕之(オクダ ヒロユキ)

担 当 部 署: 機械システム工学専攻(キカイシステムコウガクケンコウ)

E - m a i l: [hiroyuki.okuda@mae.nagoya-u.ac.jp](mailto:hiroyuki.okuda@mae.nagoya-u.ac.jp)

U R L: <https://www.suzlab.mae.nagoya-u.ac.jp/>