

## 道路上移動物体の干渉モデルを考慮したマイクロ交通流 シミュレーション

### Development of Micro-scale Traffic Simulator for Analyzing Mutual Interference between Any Traffic Objects

主任研究員名：北澤 章平

分担研究員名：金子 哲也

#### 1. 研究背景と目的

国内の道路交通事情において隅々まで張り巡らされた道路網，高度に管理された交通信号や標識，高度道路交通システム（Intelligent Transport Systems: ITS）の普及など，道路インフラは発展し続けている。また，道路上の移動体単体の安全性能や整備状況も非常に高いレベルが維持されている。さらに今後も先進運転支援システム（ADAS）などのドライバサポート技術の発展は続くと考えられ，いずれは自動運転車両の登場も予測される。これらにより近年の事故件数に対する死亡者数は著しく減少した。しかしながら，世界的な事故統計を挙げれば交通事故の発生割合は先進国中でも特に高いレベルにある事実がある。現在，時代の変化と共に車両の運動性能やその多様性，台数比率，環境や世代の移行による自転車や自動二輪車の普及，とくに近年ではカーシェアリングのような自動車の所有形態の変化や多種多様なモビリティの登場など，交通環境には大きな変革が訪れている。一方で道路交通インフラや交通ルールにおいては，当初の交通流の調和を最適化するという概念が存在しない時代の形態を基本的に踏襲しており，慢性的な渋滞の問題や交通事故の形態など交通安全の環境は長年に渡りほとんど変化していない。また，今後自動車の高度知能化が進展し，自律走行車両やパーソナルモビリティと呼ばれる小型自動車が登場すれば，新たな交通相互干渉の問題が起こりえる。

これらの問題に対して，我々は様々なモビリティの利用形態と道路交通インフラの不調和に着目し，様々なモビリティと道路交通インフラの調和性を定量的に評価が可能なツールとしての交通流シミュレータの開発を行う。とくに実際の交通場面を詳細に模擬し，交通流に影響を及ぼす干渉を表現するため，対象はミクروسケール交通流シミュレータとし，車両運動やドライバの運転行動を詳細に模擬する。これを用いた解析結果に基づき交通流の調和の観点から最適化した道路インフラの提案を目指す。

#### 2. ミクروسケール交通流シミュレータの構成要素

我々が構築するミクロスケール・交通流シミュレータは以下に述べる要素技術により構成した。

##### 2.1 シミュレータに内蔵される車両モデルの構築

様々な交通移動物体として、一般的な四輪自動車、二輪自動車については古くから車両モデルが構築されており、我々のシミュレータにおいても一般的な車両モデルあるいは多自由度を有する車両モデルをベースとして対象交通要素の運動を再現した。また、近未来の身近なモビリティとして、我々はパーソナルモビリティビークル（Personal Mobility Vehicle：PMV）に着目している。このうち、自動二輪車のようにリーンしながら旋回するPMVは、独特の旋回姿勢や運動性能を有し、一方で車輪数や操舵輪の位置、操舵方法などについて定まったものは無いことから、他の交通に与える影響を十分に検討する必要がある。また、既存の交通との混合交通下において、交通流の調和と安全の確保を行うために、PMV自体の運動性能特性を明らかにする必要がある。そのため、車輪の配置と操舵機構の違いによる運動性能の違いについて詳細な分析をおこなった。

想定しているリーン機構を有するPMVを図1に示す。ホイールベース、トレッド共に一般的な自動車と比べて短く、平面専有面積が小さい。しかしながら、運転者の車室内快適性を確保するため、車両平面のサイズ、特にトレッドに対して相対的に重心は高い。このことからタイヤの転舵のみによる旋回では横転のリスクが高くなるため、旋回時には積極的に旋回内側にロール運動をさせ、自動二輪車のように大きくリーンさせることにより、車体質量による重力の水平成分と旋回による横加速度の反力との釣り合いにより横転安定性を確保している。また自動二輪車同様にタイヤのキャンパスラストを積極的に利用して旋回する特性を有する。一方で急操舵時においてリーン制御と車体のロール運動応答特性に依存する車輪の浮き上がりが発生することから、横転安定性とその収束性能について検討を行った。

この結果に基づき、車両の基本設計に関する提言を行い、同時に車両運動力学モデルの開発をおこなった。

## 2.2 シミュレータに内蔵されるドライバモデルの構築

車両モデルに組み合わせるドライバモデルは、図2に示すように操縦者の運転特性をリスクポテンシャルモデルおよび前方多点注視モデルの組み合わせによるものとした。これはヒューマンドライバが運転時に感受している危険感覚から運転行動を決定しているとの考えに基づいている。また、道路環境に合わせた様々なリスク配置を検討することで適用出来る交通場面の範囲を広げ、より詳細に運転行動を再現した。交通環境およ

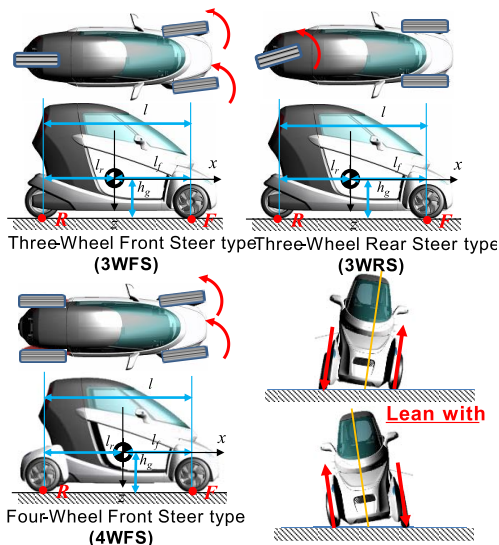


Fig.1 Vehicle types of PMV

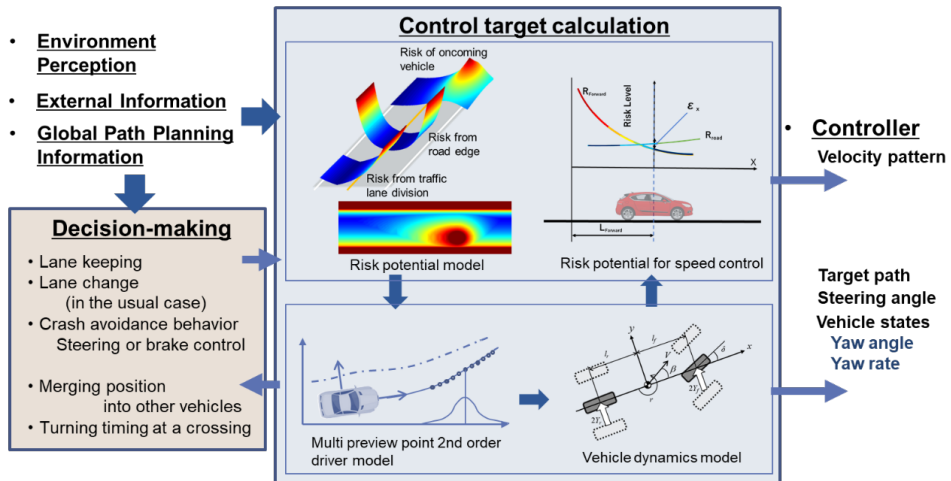


Fig.2 Schematic of control target calculation algorithm using risk potential driver model and multiple preview point driver model

び交通参加者のリスクポテンシャルは図3に示すように定義した。各交通参加者の進行方向およびその垂直方向に、(1)式および(2)式で表現されるリスクポテンシャルを配置した。

$$R_i = C_i \cdot e^{-\frac{x_i}{\tau_i}} \quad (1)$$

$$\tau_i = C_{r0i} + C_{r1i}(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2) \quad (2)$$

ここで  $C_i$  は障害物の大きさおよび感受する危険感覚の大きさを考慮したリスクポテンシャル関数のゲイン、 $x_i$  は自車と交通参加者との相対距離、 $\tau_i$  は自車と各交通参加者の相対速度ベクトルの関数として定義したリスクポテンシャル傾きを示すパラメータであり、 $C_{r0}$  および  $C_{r1}$  は危険感覚に関する定数、 $\mathbf{V}_1$  および  $\mathbf{V}_2$  は自車および対象交通参加者の速度ベクトルである。自車周辺に検出された交通要素それぞれのリスクポテンシャルを合成することにより図4のようにリスクポテンシャルフィールドを生成した。パラメータ  $\tau_i$  はヒューマンドライバの運転行動を再現するため適切に定める必要がある。そのため、ヒューマンドライバによる運転行動を計測するための実験計測車両を構築し、運転操作に加えて周辺の交通状況および走行軌跡を計測し、この結果を用いてパラメータを決定することにより、ヒューマンドライバによる運転行動を再現した。このリスクポテンシャルフィールドの最小点を目指して前方多点注視ドライバモデルにより操舵角を決定し、車両モデルにより目標とする走行制御目標を算出した。

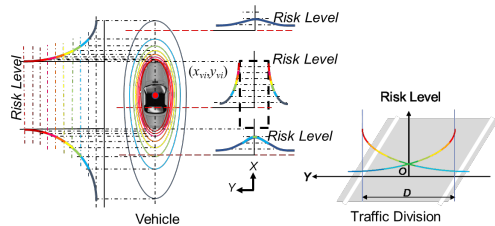


Fig. 3. Schematic of risk potential

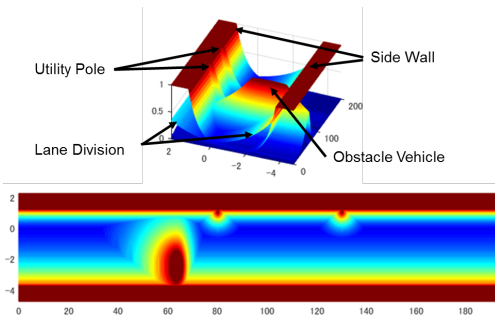


Fig.4. Example of risk potential field

対象とした交通場面は交差点での右折や狭い道路でのすれ違いとし、制御対象は車両の走行経路および車速とした。モデルの検証には多自由度走行シミュレーションを用い、計測した運転行動と比較することで、その有効性を検証した。

### 2.3 交通流シミュレータの検討

複数のモビリティが定められたマイクロな範囲内で互いに影響を与えながら走行する場面を想定し、互いのドライバモデルが持つリスクポテンシャルの干渉について交通流シミュレーションにより検討を行った。ミクروسケール交通流シミュレータの概要図を図5に示す。前述の車両運動力学モデルおよびドライバモデルを用いて個々に再現された各モビリティのパラメータを用いて、他車から受けるリスクと自車が他車に与えるリスクの干渉についてシミュレーションにより検討した。とくに道路交通上のローカルな場面を想定し、複数種類のモビリティが相互に影響を与えて運転行動を変化させる場合において、各モビリティの車両運動性能やドライバの運転動作を詳細に表現することにより親和性の評価を試みた。

## 3. 研究成果

本シミュレータにおいて、道路交通上のローカルな場面を想定したシナリオにおいて車両運動性能やドライバの運転動作を詳細に表現することにより既存交通流と新たなモビリティであるPMVとの親和性を評価する。

本シミュレーションシステムを用いた再現事例として、PMVと一般車両の干渉による危険場面の再現と緊急回避シミュレーションの結果を示す。図6に本シミュレータの検証例として行ったシミュレーション条件を示す。同一方向に対して2車線の道路を設定

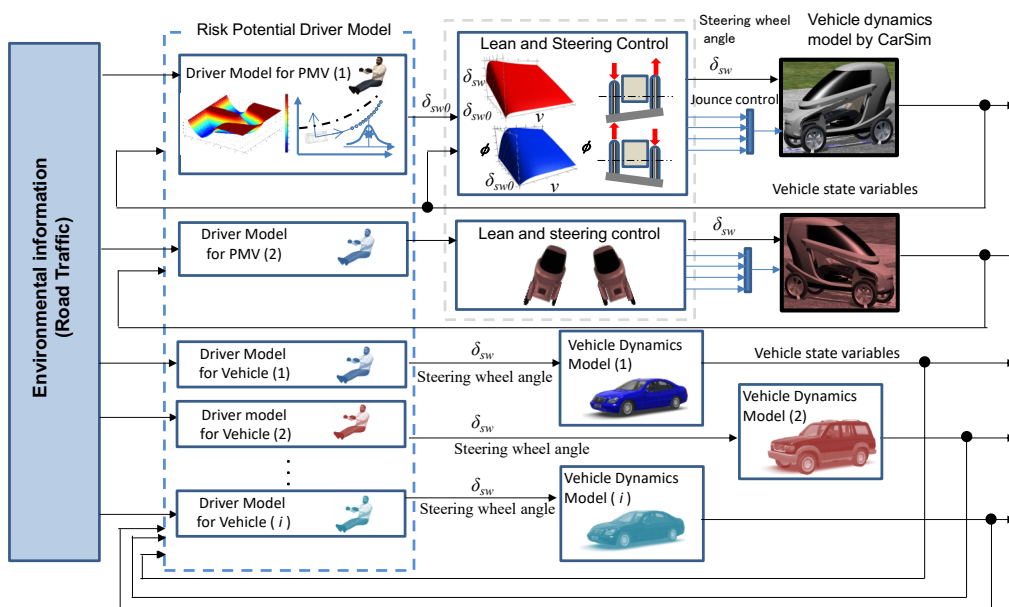


Fig. 5 Driver model and vehicle dynamics model in the micro-scale traffic simulator

した. ここでまず右側車線に乗用車, 左側車線に PMV が一低速で走行している. そしてそれらの前方に故障車両を想定した RV 車両が走行路内をまたいで停止しており, 右側車線を走行している車両は停止車両を減速せずに回避するものとする. 本条件において, PMV と乗用車の干渉問題の例として, 乗用車ドライバーが感受する PMV のリスクポテンシャル値を低く設定 (車両の認識度, 危険感覚を鈍く設定) し, 車両間の相互干渉による, それぞれの運動変化をシミュレーションした.

図 7 に停止車両回避前のそれぞれの車両のドライバモデルにおけるリスクポテンシャルフィールドの比較を示す. 図よりリスクポテンシャルパラメータの設定により自動二輪車や PMV のような小型車両から受けるリスク感覚が相対的に低いことがわかる.

図 8 にシミュレーション結果として, PMV と先行する乗用車の横偏差, ヨー角速度, PMV ロール角の時間変化を示す. これらの結果より本シミュレータが各車両間の相対運動に対して干渉することによる車両運動御状態の変化を忠実に再現していることがわかる.

#### 4. まとめ

様々なモビリティが高い安全性を保つことを目的に, 局所的な交通場面における交通流の調和を目指し, リスクポテンシャルを用いて交通流の調和を定量的に評価するミクروسケール交通流シミュレータの開発を行った. 本シミュレータでは PMV と一般車両の詳細な車両運動性能と, 車両間の相互干渉をリスクポテンシャルドライバモデルによって表現したシミュレーションにより道路交通一般車両-PMV の交通流調和を検討できることを示した.

今後, リスクポテンシャルパラメータの自動推定などさらなる信頼性の向上を目指し, 交通流の調和について高精度な定量的評価を行なう.

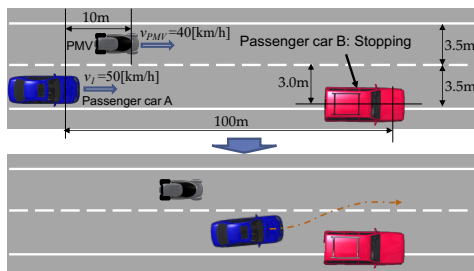


Fig. 6 Condition of the emergency avoidance simulation

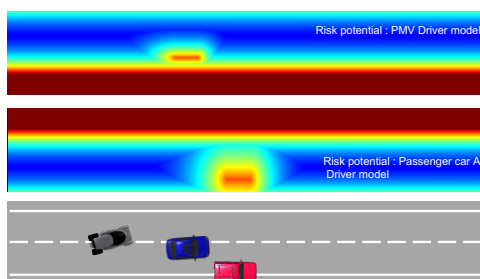


Fig. 7 Risk potential field for the simulation

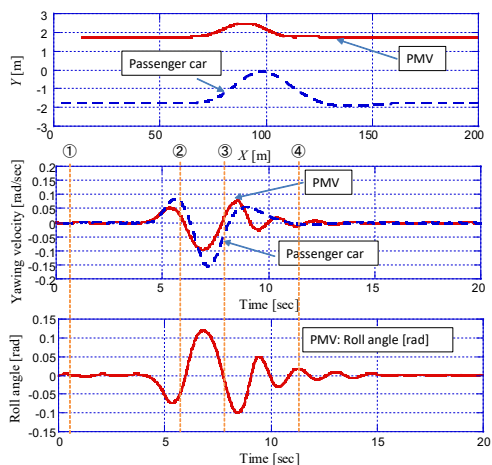


Fig. 8 Time histories of vehicle states in the simulation

## 5. 成果の公表

本研究課題に関連する成果として、複数の研究発表および論文発表を行った。その一部を以下に記す。

- Control Target Algorithm for Direction Control of Autonomous Vehicles in Consideration of Mutual Accordance in Mixed Traffic Conditions :Shohei Kitazawa, Tetsuya Kaneko, Proceedings of The 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC' 16 in Munich, Germany, 2016
- Development of A Traffic Simulator for Analyzing Mutual Interference between Personal Mobility Vehicles and Traffic Flow in consideration of Vehicle Dynamics : Tetsuya Kaneko, Ichiro Kageyama(Nihon University), Yukio Kuriyagawa(Nihon University), Tetsunori Haraguchi(Nagoya University) , Proceedings of Bicycle & Motorcycle Dynamics (BMD2016), Vol.10, 2016
- 周辺交通との相互調和を考慮した自律走行車両の制御目標生成に関する研究（第2報）ーリスクポテンシャルおよび車両運動力学モデルを用いた加減速を伴う制御目標生成ー：北澤章平，金子哲也，自動車技術会 2016年秋季大会，2016
- Dynamic Rollover Characteristics of Personal Mobility Vehicles with Lean Mechanism, Tetsuya Kaneko, Ichiro Kageyama, Tetsunori Haraguchi, Proceedings of IAVSD 2017, CRC Press, 2017
- Control Target Calculation for an Autonomous Vehicle to Maintain Traffic Harmony in an Urban Area, Shohei Kitazawa and Tetsuya Kaneko, FAST-zero 2017 Symposium (Future Active Safety Technology Towards zero traffic accidents),2017
- リーン機構を有するパーソナルモビリティビークルの動的横転限界特性，金子哲也，景山一郎，原口哲之理，（公社）自動車技術会 2017年秋季大会学術講演講演予稿集，2017
- 市街地走行環境におけるリスクポテンシャルフィールド推定と自律走行車両のための制御目標生成アルゴリズムの開発，山口昌志，上田大貴，北澤章平，金子哲也，日本機械学会 第26回交通・物流部門大会（TRANSLOG2017）講演予稿集，2017
- 内傾型パーソナルモビリティビークルの急操舵時内輪浮き特性，原口哲之理，景山一郎，金子哲也，自動車技術会 2018年春季大会 学術講演会
- リスクポテンシャルを用いた自律走行車両の誘導制御目標の生成タイミングの検討，北澤章平，金子哲也，自動車技術会 2018年春季大会 学術講演会
- 乗用車・二輪車との障害物回避性能比較によるパーソナルモビリティビークル(PMV)の操舵応答性の検討，原口哲之理，金子哲也，景山一郎，自動車技術会 2018年秋季大会 学術講演会
- リーン機構を有するパーソナルモビリティの急操作時の車両応答特性とその性能向上手法に関する一考察，金子哲也，景山一郎，原口哲之理，自動車技術会論文集 公益社団法人 自動車技術会 Vol. 50/ no. 3, pp.796-801 2019/05

# 道路上移動物体の干渉モデルを考慮した マイクロ交通流シミュレーション

北澤 章平（全学教育機構テクニカルセンター）

## 研究概要

著者らはこれまで自動運転車両の各走行場面において人間のドライバーが感受するリスク感覚を考慮したドライバーモデルによる制御目標生成技術を確立してきた。リスクポテンシャルモデルはドライバー個々の運転動作を表現するパラメータを持ち、ヒューマンドライバーの運転動作からパラメータを高精度に推定することでシミュレーション精度を向上させることが出来る。本分担研究ではとくにリスクポテンシャルパラメータを推定手法の確立を目指し、特に周辺車両から感受する危険感覚を基に操舵制御および車速制御について検討を行い、ヒューマンドライバーの運転行動を用いて検証した結果について述べる。

本研究で想定する自律走行車両システムを図 1 に示す。自車周辺の情報は環境認識部および V2X 通信により取得できるものとした。これらの情報から自車の走行経路および車速について制御目標を算出した。車線内の障害物や他車両などの周辺交通環境から感受する危険感覚をリスクポテンシャルにより表現し、前方注視モデルおよび車両運動力学モデルによって自車の誘導制御目標経路を生成した。さらに、生成された目標経路上の危険感覚を基に加減速行動を決定した。

ドライバーモデルの構成を図 2 に示す。自車両周辺の交通環境および交通参加者から感

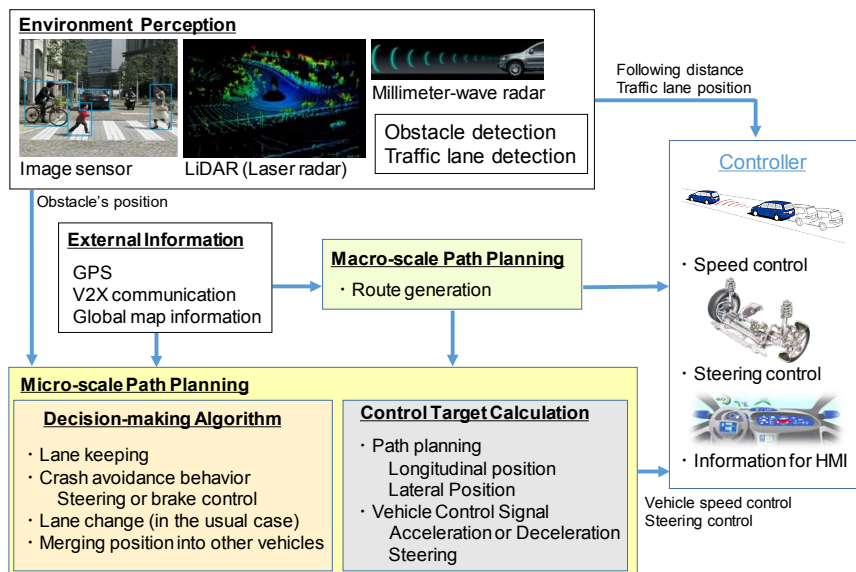


Fig.1 Diagram of an automated driving vehicle

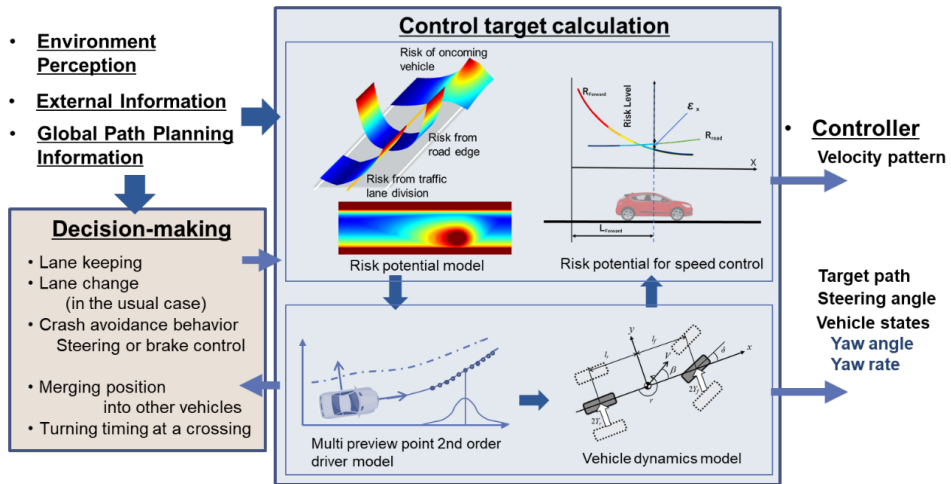


Fig.2 Schematic of control target calculation algorithm using risk potential driver model and multiple preview point driver model

受する危険感覚をリスクポテンシャルとして配置し、それらを合成することでリスクポテンシャルフィールドを生成する。ドライバはリスクを小さくとどめるよう行動選択していると仮定し、リスクの最小点を目指して運転を行う、およびリスクを小さくとどめるために必要に応じて車速の制御を行うとの考えに基づいてモデルを構築した。

モデル検証のため、図3に示すような実交通下でのヒューマンドヒューマンドライバの運転行動を計測し、その運転行動のアルゴリズムによる再現を行った。ドライバは運転免許保有の成人男性であり、安全に十分配慮して運転することのみを指示し、車速や対向車とのすれ違い位置などは自由に走行させた。

このときの自車走行軌跡と車速の時系列データ、走行実験の結果を用いてリスクポテンシャルパラメータを推定し、ドライバモデルにより算出した走行経路および車速の制御目標、この制御目標を多自由度シミュレーションソフトに入力することで車両の制御目標追従性

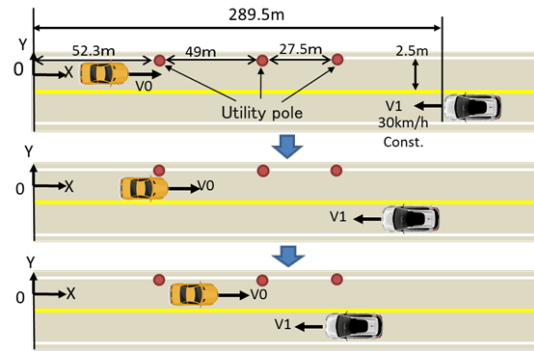


Fig.3 Experimental condition

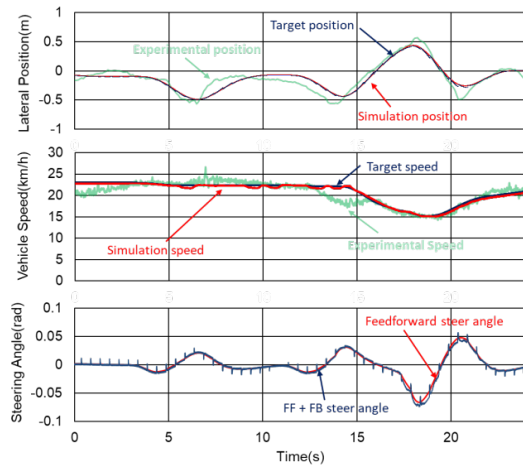


Fig.4 Comparison of the traveling path and the vehicle speed between control target and simulation result



の確認を行った結果を図 4 に示す。走行実験の結果から、ヒューマンドライバは自車の安全を確保するために必要に応じて減速し、自車周辺の障害物や対向車との距離を適切に確保して走行したことがわかる。また、ドライバモデルにより算出した制御目標は、実走行の結果をよくトレースしており、本アルゴリズムがヒューマンドライバの運転行動をよく表現できることが確認された。

以上のことより、本アルゴリズムの構造および設定したリスクポテンシャルパラメータにより、ヒューマンドライバの運転行動が詳細に模擬できることを示した。

# 車両運動特性を考慮したマイクロ交通流シミュレータの開発

金子 哲也 (工学部交通機械工学科)

## 研究概要

近年、小型で低コストであり機動性の高い、新しいカテゴリーの移動手段としてパーソナルモビリティ (Personal Mobility Vehicle 以下 PMV) の需要が高まり、市販、研究開発、運用、実証社会実験が多方面で行われている。本研究では4輪車または3輪でありながら自動二輪車などと同様に旋回方向に対して内側に倒れ込む(リーン)ことにより旋回する車両を想定し、通常の交通流の中において固有の運動特性と走行形態を持つ超小型モビリティの動きや車両の相互の間の干渉度合い等の検証などを行い、ドライバーの操縦動作を含めたダイナミクスの詳細な検討を行った。

本研究における提案車両として、図1に示すような3タイプの車両運動モデルを考案した。何れも左右2輪のタイヤが車体垂直方向に交互に移動することにより、車体を大きくリーンさせる。車両形状は、ホイールベース、トレッド共に短く、平面専有面積が小さいが、運転者の車室内快適性を確保するために車両全高が必要なため、車両平面のサイズに対して相対的に重心が高くなる。タイヤの転舵のみによる旋回ではロールオーバーのリスクが高くなることから、旋回時に左右タイヤを垂直方向に交互に上下移動させて積極的に旋回内側にロール運動をさせることにより、車体質量による重力の水平成分と旋回による横加速度の釣り合いを確保する。本車両は特有の運動特性として操舵入力が直接的にロール運動を支配しており、比較的重心高の高いPMVでは急操舵のような状態では横転の危険性が懸念される。そのため、多自由度運動力学シミュレーションによ

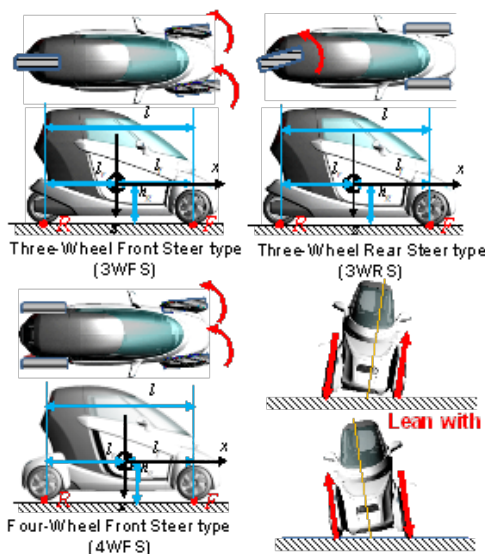


Fig.1 Vehicle types of PMV

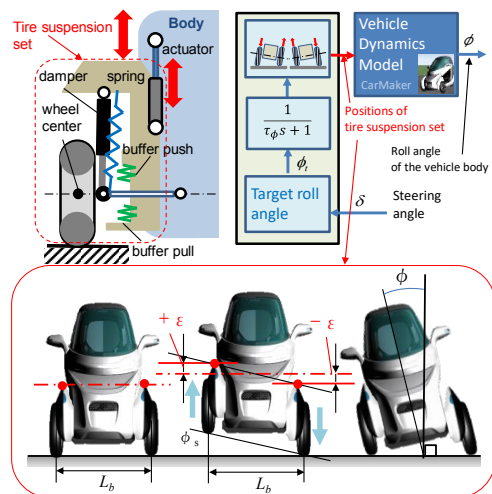


Fig.2 Proposed open loop lean mechanism model

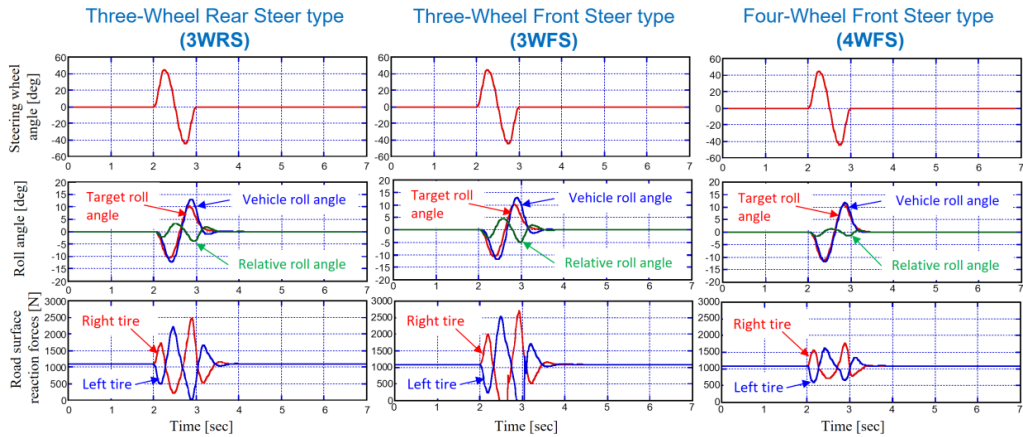


Fig.3 Time history of the simulation results with open loop lean control system

り動的横転限界特性について検討した。

ここでは図2に示すような開ループリーン制御モデルについて述べる. このモデルによるタイプ毎の操舵入力に対する応答を図3に示す. 走行速度 40km/h, 正弦波 1Hz のハンドル入力に対する主要車両挙動としてハンドル角, それに伴う目標ロール角と車体ロール角, そしてその相対角, 前輪2輪の路面反力の時間変化を示している. これらの結果より, どのタイプの車両においても従来の閉ループリーン機構モデルに比べてハンドル角入力後のロール振動はサスペンション系とロール慣性運動を制御から切り離すことにより抑制された. しかしながら3輪タイプの3FRS, 3WFSの両車両においてはタイヤの接地反力がゼロになりタイヤが浮き上がる傾向は依然確認された.

つぎに, ハンドル入力  $\theta_{sw}$  から前輪舵角  $\delta$  の伝達関数に逆操舵の特性を連続

した関数として与えるため, 不安定ゼロ点を持つ伝達関数として以下の伝達関数を用いた. 図4にハンドル入力からリーン制御および前輪舵角制御のブロック線図を, 図5に提案した伝達関数を用いて, 操舵角の入力に対する実舵角の変化を示す. この結果より, 不安定ゼロ点を持つ伝達関数により前輪舵角の逆操舵を表現でき, その効果により目標

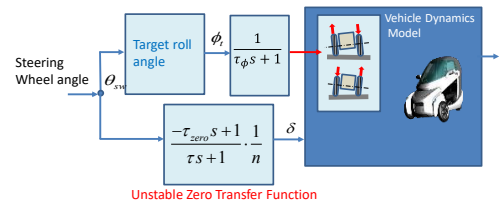


Fig.4 Block diagram for the open loop lean control system and steering control with unstable zero transfer function of steering control system

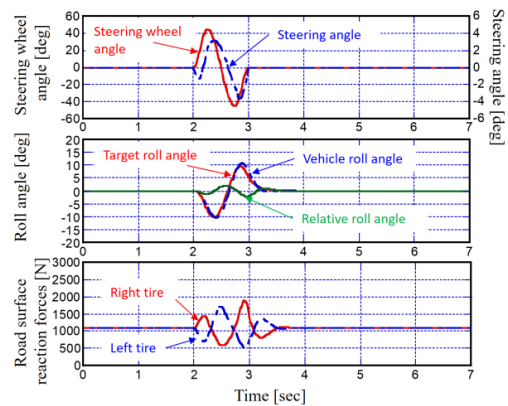


Fig.5 Time history of the simulation results with open loop lean control system and unstable zero transfer function for steering control

ロール角に対する車両ロール運動の応答が向上し、さらにタイヤの接地性が向上する結果が得られた。これらのことから PMV の運動特性の特徴を明らかにした。