

道路交通環境と自動車運転行動データマッチングによる 新たな運転者特性抽出手法の開発

Development of a new driver characteristic extraction method by pattern-matching data of road traffic environments and automotive driver driving behaviors

主任研究員名：金子 哲也

分担研究員名：北澤 章平

本研究では自動車の運転者（ドライバ）の運転行動データと車両周辺環境の計測データのマッチングにより個々のドライバの詳細な操縦特性の違いや個々のドライバにおける時系列変化を定量的に記述する新たな手法の開発を行うものである。本手法の確立により、多種多様な運転特性を有するヒューマンドライバに対して、最適で個人適用型（オーダーメイド）の運転支援手法の提案やドライバの異常状態、危険運転状態を高精度で検出することが可能である。

本研究においてドライバの運転行動を記述する手法として、ヒューマンドライバが周辺環境から感受する危険感覚（リスクポテンシャル）を関数化、定量化して考慮したモデル（ドライバモデル）を用いる計画である。自動車の運転行動は一般的に周辺環境の知覚・認知・判断・操作の過程を繰り返して行われている。上記モデルの考えを用いることにより、個々のドライバの運転行動特性の違いとして、特に周辺物体などの知覚から認知、危険予測など道路交通安全の重要事項となる運転者特性を表現する可能であり、運転者の認知機能の異常状態や運転技能の不足などが検出可能と考える。

1.1 研究背景と目的

自動車の先進運転支援システム（ADAS: Advanced driver-assistance systems）は、ドライバのヒューマンエラー防止や運転負担軽減により、事故を予防し、安全な道路交通環境の確立を目指し、各メーカーの開発競争が激化している。さらに近年では自動操縦車両の開発競争も進んでいる。しかしながら一般車両の完全自動運転には技術面、法規面、また社会の受容性の面において、実用化のために越えなくてはならない壁が多くあり、当面乗用車においての基本操作は人間が行うものとする。また、完全自動運転車両が実用化されたとしても既存の道路交通がすべてそれに置き換わることは考え難い。よって今後も人間が操縦した車両が道路交通上に存在し、またヒューマンエラーによる事故は発生し続ける。

警察庁によると、2005～15年の10年間で全体の死亡事故件数は6165件から3585件まで減少したが、75歳以上の高齢ドライバによる死亡事故件数は横ばい。高齢者人口の増加に伴い、死亡事故全体に対する高齢者の構成比は増加傾向にある。昨今、メディアなどで頻繁に話題となっている高齢者ドライバの運転操作ミスによる事故においては、加齢による認知機能や運動機能の低下が主要因と指摘されており、それを早期に検出、または運転機能を補うシステムの開発と普及が急務であるとする。しかしながら、そ

これらの人間特性は個人差が大きく、平均的なドライバを想定して設計されたシステムでは十分な効果が得られない場合が多い。よって、多様なドライバ個々の認知能力など運転特性を適切に評価し、個人特性に適合した運転支援手法を検討する必要がある。

我々はこれまで人間のドライバが感受するリスク感覚を考慮した考え方として、リスクポテンシャルを用いた自動運転車両のための制御目標生成技術を確立してきた。本アルゴリズムの基本概念は、ヒューマンドライバが車両周辺環境の認知物体から感受する危険感覚（リスクポテンシャル）を推定、定量化してモデリングし、車両運動がリスク最小となる制御目標（目標軌跡、ハンドル操舵、目標速度パターン）をモデル化する手法である。

1.2 研究計画・研究方法

本研究における学術的課題を以下に示す。

- ① 多様な操縦者の運転特性を詳細に表現するモデルの基本構造構築。
- ② 個々の操縦者の運転特性を評価可能なシミュレーション環境の構築。
- ③ ドライバの運転行動特徴抽出に有効な実道路交通下における場面抽出。
- ④ 運転車両周辺環境データと運転行動モデルにより定量化された運転行動特徴抽出。
- ⑤ のデータ蓄積による運転行動特性変化の定量化、危険、異常状態検出手法の提案。

上記において最も学術的に重要度の高い課題は、②多様な操縦者の運転特性を詳細に表現するモデルからの特徴抽出手法、および③個々の操縦者の運転特性変化を詳細に表現するアルゴリズムの構築である。これは、人間工学と制御工学の観点から運転動作の特徴を詳細に表現できるモデルを構築し、適用する必要がある。

本研究では、運転行動の特徴抽出アルゴリズムにおいて、これまで申請者が主に自動運転車両の制御目標生成アルゴリズムの開発に活用してきたリスクポテンシャルドライバモデルのモデリング手法を応用する。本ドライバモデルの基本的考えとして、自動車のドライバは車両周辺の状況を知覚、認知し、危険（リスクポテンシャル）の最も少なくすることを目標に操縦動作を行っているものとする考えから提案されている。なお、ここでドライバに危険感覚を及ぼす物体とは図 1 示すように、走行路上の他車両、歩行者や障害物などの顕在的な物体のみならず、見通しの悪い交差点からの物体の進入予測によるリスク感覚などの潜在的リスクも運転行動に影響を与える要素として考える。また、車線規制などの交通法規についてもドライバに与えるリスク要因と考える。先行研究により、図 2 に示すように、物体に対する接近リスク値は指数関数で定義する可能であるということを用いて、各物体のリスク値を設定する。これらの考えは認識物体からの距離に対して、瞬時心拍の上昇などの生体計測や主観評価により説明し構築されたモデルである（参考文献：景山一郎：前方視野の危険感を用いたドライバモデルについて、自動車技術会論文集 Vol.24, No.2, p.81-87 (1993)など）。これは人間の運転動作を忠実に再現することを目的に開発され、本研究課題に応用することは有効であり、かつ学術的に独創的手法であると考えられる。

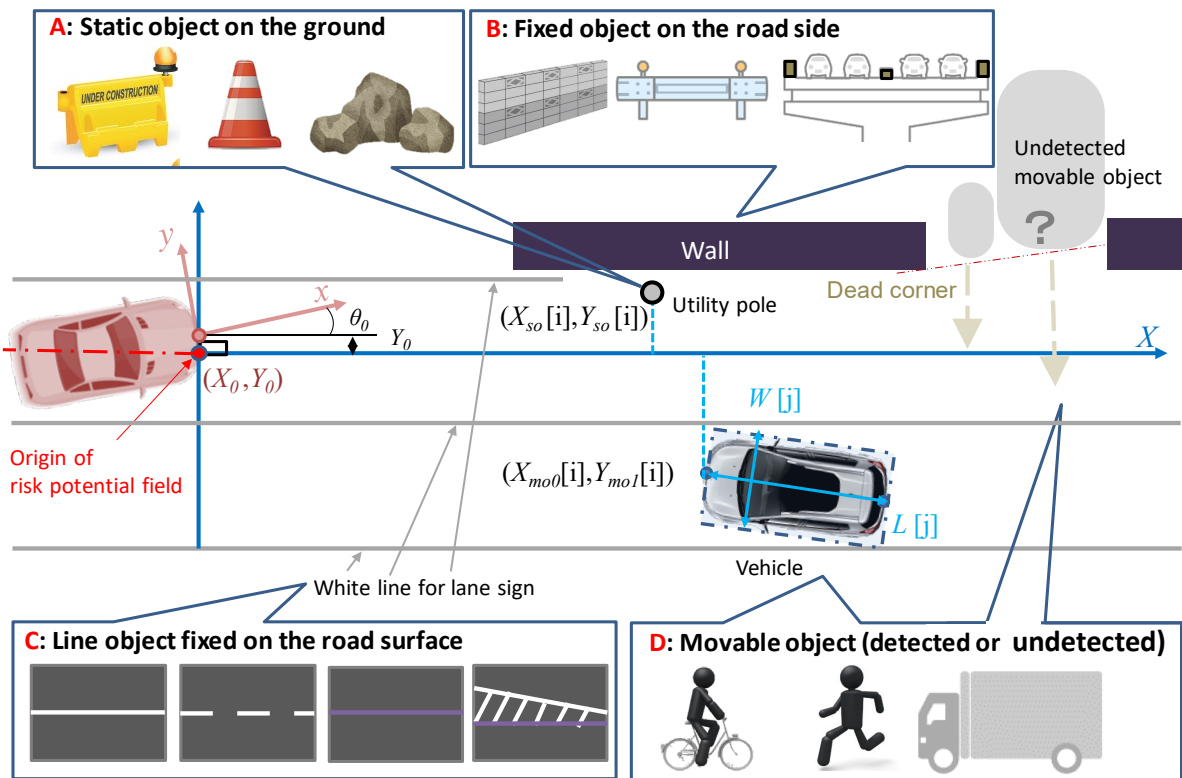


図 1 道路交通物体の分類

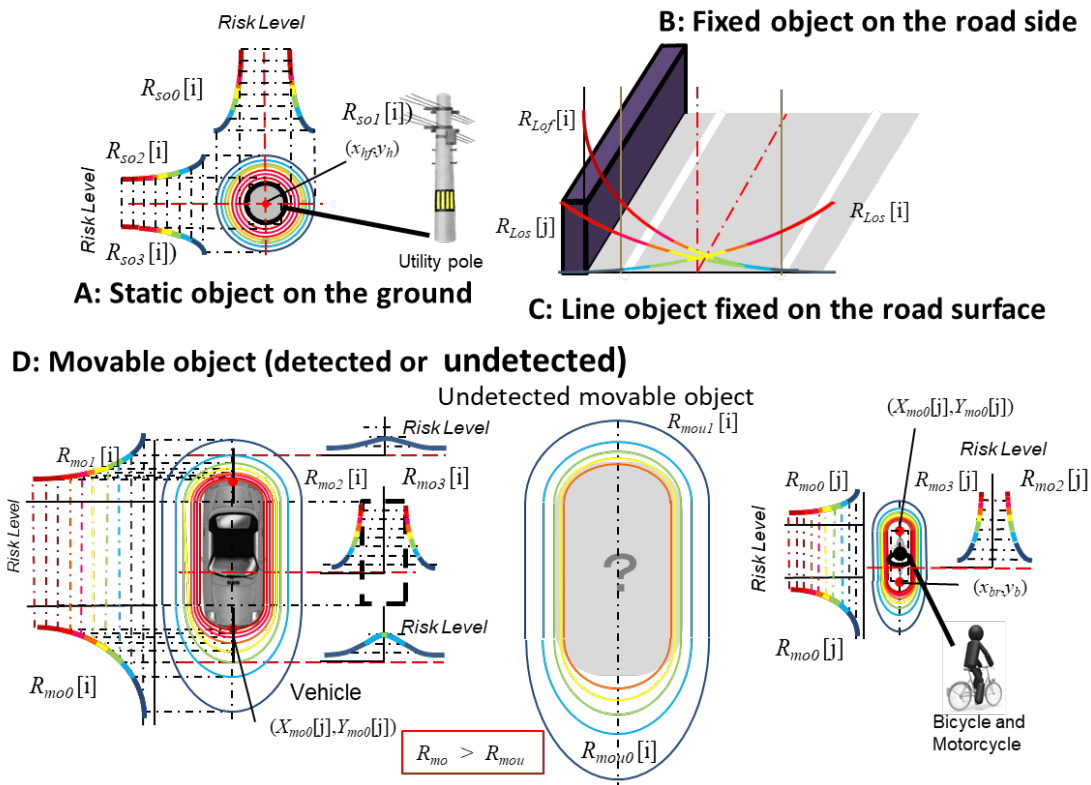


図 2 道路交通物体のリスクポテンシャル関数化

本研究では、前述の考えを用い、自車両周辺環境情報とドライバの運転行動計測データから、そのドライバが感受しているリスク感覚を推定（前述の自動運転アルゴリズムの逆演算になる）し、個々の要素ごとに推定したリスクポテンシャルを合成することで、特定の環境下におけるドライバ運転特性固有のマップを生成する。個々ドライバの知覚、認知、操作の過程の個人差の表現やドライバ個人の変動を示すことができると考える。

2. 研究期間における総括

研究期間において、実交通下での車両周辺環境と運転行動の計測とそのデータの蓄積を行う。そしてそのデータを用いて前述のドライバの運転行動抽出のためのモデルの基本構造の確立を行った。ここでは、実路走行データのみでは十分でない場面、実際に危険が想定される場面、走行シナリオの再現が求められる場合などのためドライビングシミュレータでの計測実験を行うが、本学所有のモーションベース型ドライビングシミュレータの現状では他の交通物体の詳細な運動を再現できないため、ドライビングシミュレータおよび二輪車用ライディングシミュレータの構築、および改修を行った。さらにパーソナルモビリティ用ドライビングシミュレータについては主任研究員名が兼任する名古屋大学ナショナル・イノベーション・コンプレックス（NIC）の協力を得て活用した。



図3 モーションベース型ドライビングシミュレータ

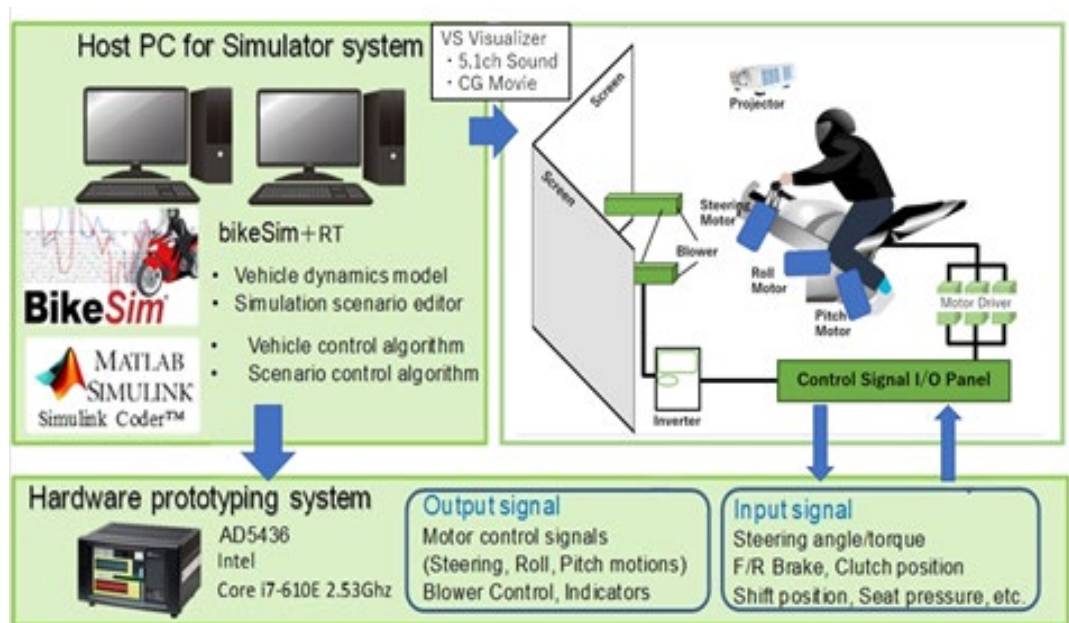


図 4 二輪用ライディングシミュレータの概要

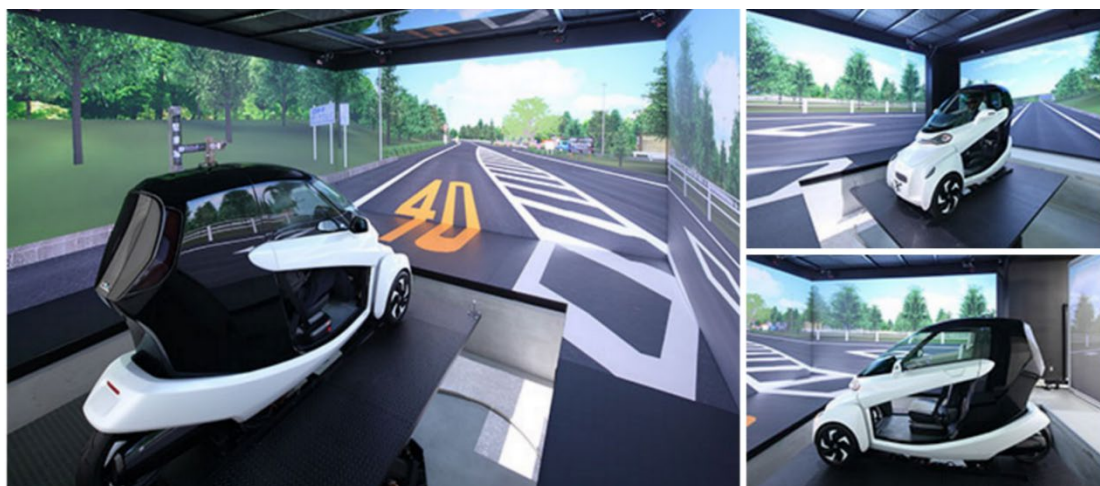


図 5 PMV 用ドライビングシミュレータの概要

(名古屋大学ナショナル・イノベーション・コンプレックス：NIC)

提案してきたドライバの運転行動特徴種出モデルの確認作業とドライバの運転行動特徴の定量化に有効な実道路交通下における場面（走行シナリオ）の抽出を行う。本研究においては多くの実車およびシミュレータの走行データが必要なため、研究期間全般を通して実験データの収集を行う。以降、本研究の主題である個々のドライバの運転行動特徴抽出アルゴリズムの開発を行い、その妥当性確認を行う。研究期間後期では、開発したアルゴリズムを活用し、ドライバの運転行動の基本となる知覚、認知に注目した解析を行い、運転者の異常状態検出手法を提案する。また、多様なドライバ個々の運転特性を適切に評価し、個人特性に適合した運転支援手法を検討する。

本研究課題の研究期間において得られた新たな知見や学術的価値がある内容は、適時国際会議、国内学会、研究会などにおいて発表し、多くの有識者、研究者との意見交換から研究をさらに発展させる。本研究は、車両運動性能、制御、道路交通システムに関する研究であることから、申請者の所属する日本機械学会（特に交通物流部門）、自動車

技術会，計測自動制御学会における査読付きの論文投稿を行った．関連国際会議として車両の運動力学に関する国際会議 IAVSD2017(International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks)，アクティブセーフティに関する国際シンポジウム Fast-Zero2017，車両運動力学と先進制御に関する国際会議 AVEC(International Symposium on Advanced Vehicle Control)での発表，ほか国際ジャーナル紙への投稿を行った．

パーソナルな次世代モビリティの提案と シミュレーションモデルの構築

金子 哲也（工学部交通機械工学科）

1. 研究概要

小型で道路専有面積が小さく、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。

本研究組織では、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内側に倒れ込む（リーン）ことにより旋回する機構を有する新しい PMV の研究開発を進めている。ここでは提案の PMV 車両の運動性能の検証を目的とする。本稿では、多自由度の運動力学モデルを用いたシミュレーション解析により用いるために IPG Automotive 社製 CarMaker を用いて構築した多自由度の運動力学モデルについて説明する。特にここでは提案の本車両固有のリーン制御機構について説明する。

2. リーン機構を有する PMV の基本運動特性

固有の運動特性を持つ PMV について車両運動性能を検討するために IPG Automotive 社製、車両運動解析ソフトウェア CarMaker を用いて構築した多自由度の運動力学モデルについて説明する。特に本章ではリーン制御機構についての詳細を説明する。

本研究における PMV 車両は図 1 に示すように、前輪 2 輪、後輪 1 輪の 3 輪タイプと前後 2 輪の 4 輪タイプの計 3 タイプの車両運動モデルを想定している。3 輪タイプは前輪操舵と後輪操舵、4 輪タイプは前輪操舵とする。そして、いずれも左右 2 輪のタイヤが車体垂直方向に上下に移動することにより、車体を旋回内側に大きく傾斜（リーンまたはロール）させる。図 2 と表 1 に代表的な車両として 3 輪タイプの車両の外観と主要諸元を示す。車両はホイールベース、トレッド共に短く、平面専有面積が小さい。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くなっている。そのため、乗用車のように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。そこで提案する PMV 車両では、旋回時には積極的に旋回内側に車体を傾斜させることで、自動二輪車のように大きくリーンさせる機構を有する。これにより、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を確保する。よって車両は乗用車の様に操舵によるコーナリングフォースと同時に自動二輪車の様にタイヤのキャンバスラストを積極的に利用して旋回する特性を有する。キャンバスラストとは、路面に対して傾いて接地することで変形したタイヤが元の形に戻ろうとし、トレッド面から発生する旋回外側に路面に伝える力の反作用としてタイヤが受ける力のことであり、旋回と同じ方向に発生する。この時、タイヤの回転面が鉛直となす角をタイヤのキャンバ角という。

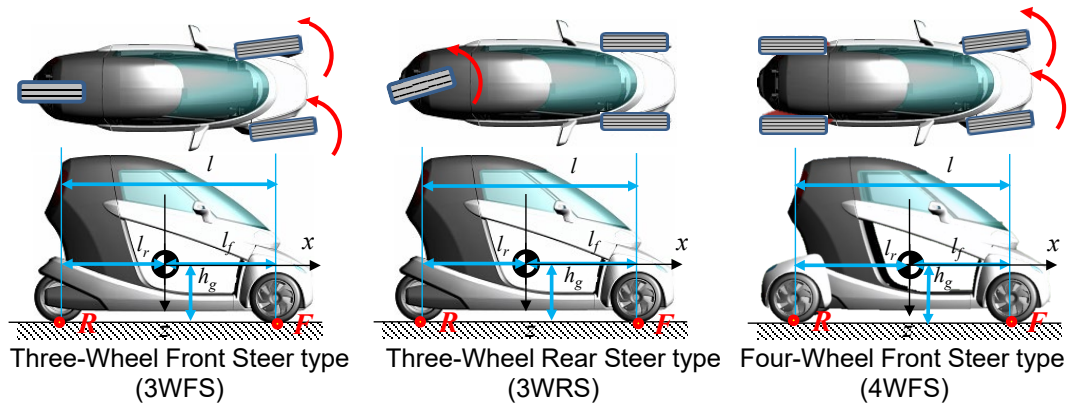


Fig.1 Vehicle types of PMV

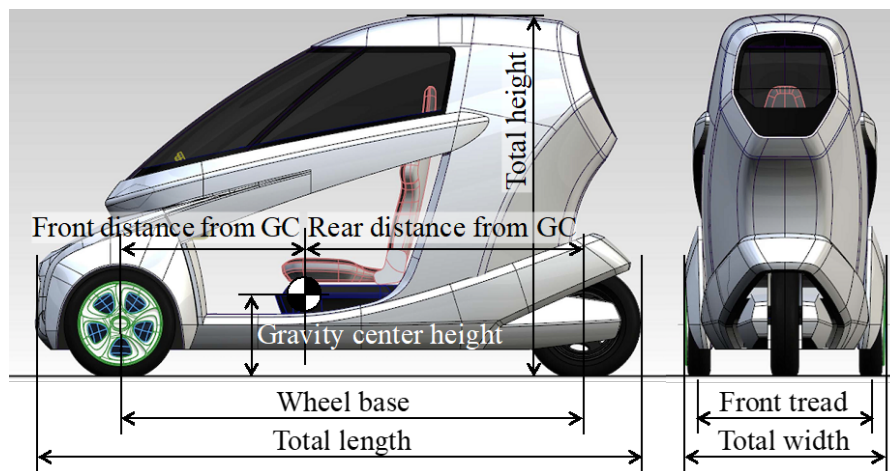


Fig.2 Specifications of PMV

Table 1 Specifications of proposed vehicle

Item	Unit	Value	Item	Unit	Value
Total length	m	2.65	Total mass	kg	370.0
Total width	m	0.88	Front mass distribution	kg	222.0
Total height	m	1.45	Rear mass distribution	kg	147.0
Wheel base	m	2.02	Roll inertia moment	kgm ²	58.8
Tread	m	0.85	Pitch inertia moment	kgm ²	197.0
Height of c.g.	m	0.358			
Front tire distance from c.g.	m	0.81	Rear tire distance from c.g.	m	1.21

3. タイヤ力の動特性を考慮したタイヤモデルの作成

本研究のシミュレーション解析における車両モデルで表現されるタイヤ力は、タイヤモデルとして Magic Formula タイヤモデルを使用した。Magic Formula タイヤモデルは H. Pacejka が考案し、R. Sharp が確立したモデルであり、図 3 に示すように大キャンバ

角に対応したモデルである。

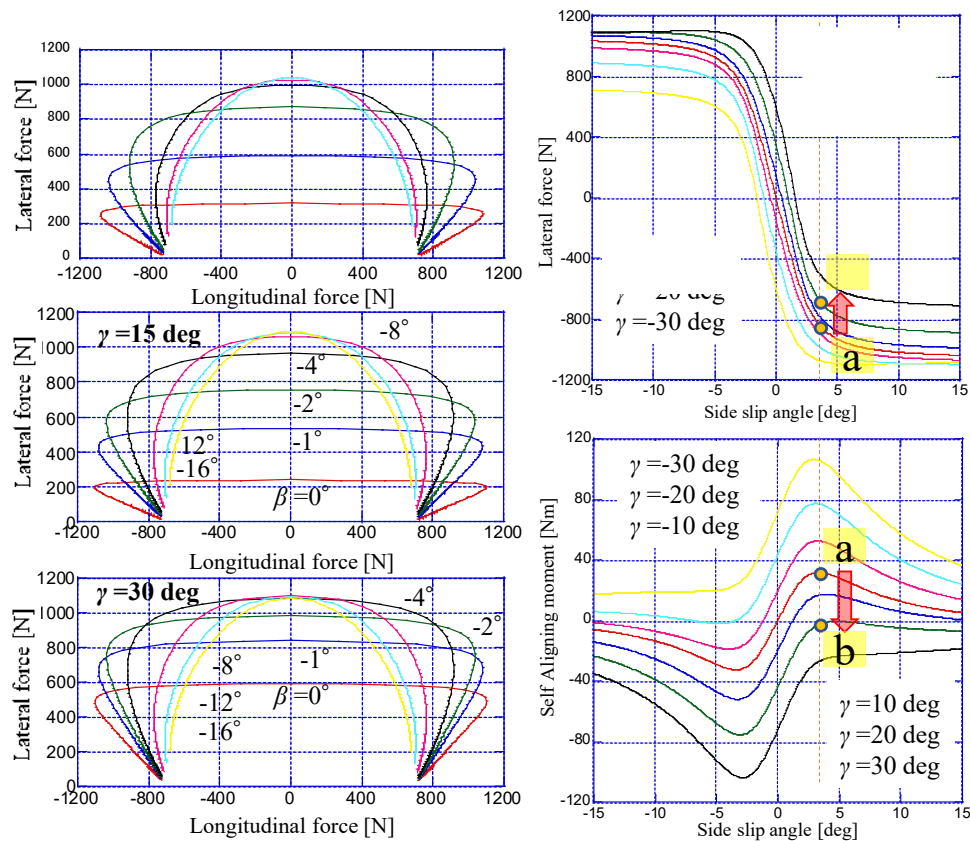


Fig.2.6 Tire model characteristics

前輪操舵とアクティブリーン機構を複合した車両においては、タイヤの発生する力の応答速度や位相差が運動性能として重要となる。操舵によりタイヤは角度がつき、その接地面部分が変形することで力が発生する。その中で、横すべり角により発生するコーナリングフォースとキャンバ角に由来するキャンバスラストのタイヤ力の応答が大きく異なることが知られている。通常、乗用車の運動解析では、コーナリングフォースに比べキャンバスラストは小さく、タイヤ力発生への応答性を示すパラメータは統合した形でシミュレーションモデルに一定数として適用される場合が多い。しかし、実際にはキャンバスラストはコーナリングフォースよりもその位相は大きい。リーンすることで積極的にキャンバスラストを利用する PMV 車両の運動特性解析においては、これらの動特性の違いを詳細に表現する必要があると考え、それぞれの力の動特性を切り分けて表現できるようタイヤモデルを拡張した。

タイヤはその大部分が弾性体であるゴムでできていることから、変形により力が発生し、タイヤモデルの式で定められた定常値となるには時間的な遅れが生じる。この遅れのことを、タイヤの動特性や緩和長と呼ぶ。

緩和長は図 4 に示すように、発生した力が定常値になるまでにタイヤが走行した距離として表す。また、緩和長による影響について、キャンバ角がついた状態でステップ状に荷重を与えた時のタイヤ横力の応答とモーメントの応答について示す。また、タイヤ

にキャンバ角をつけ，3 種類の荷重によるステップ入力を加えた際の緩和長の変化について図 2.10⁽¹³⁾に示す．これらの応答を参考に，ここでは緩和長を距離基準の一次遅れ系の伝達関数により近似してタイヤモデルに適用した．よって，図 2.6 の変化，点 a から点 b はこの緩和長分遅れることとなる．

構築したタイヤモデルの動特性として，横すべり角のステップ入力に対するタイヤ横力とモーメントの応答を図 5 に示す．また横すべり角一定 (3[deg])，タイヤキャンバ角のステップ入力に対するタイヤ横力とモーメントの応答を図 6 に示す．実際はこの図に示すように横すべり角による影響が発生してから，キャンバ角によるキャンバスラストの影響が表れる．

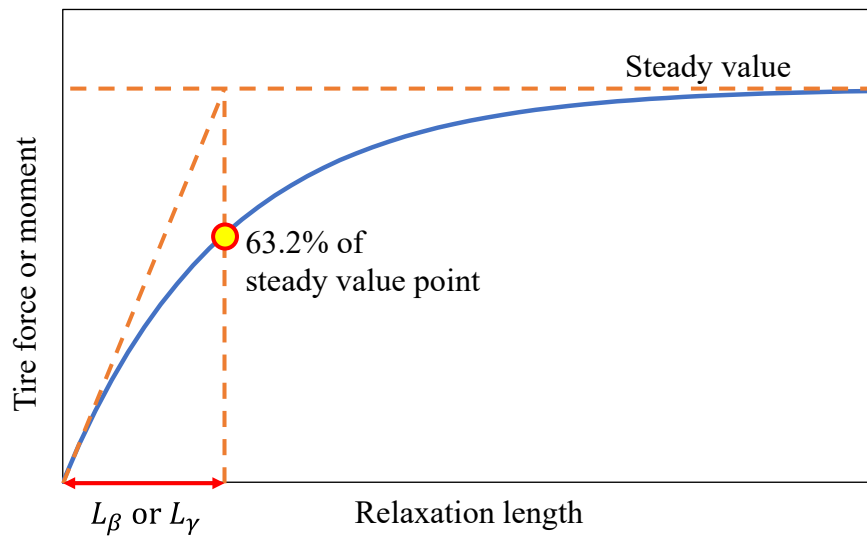


Fig.4 Relaxation length of tire force and moment

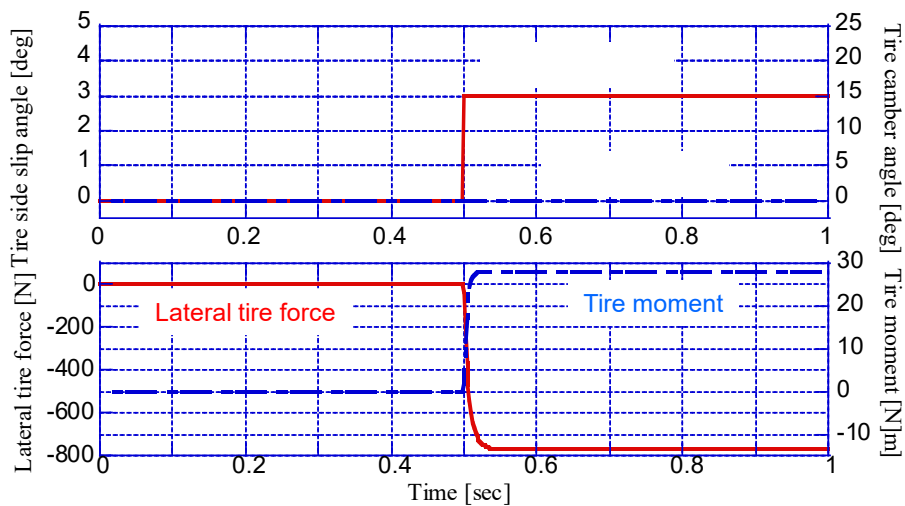


Fig.5 Tire lateral force and moment response to step change in side slip angle

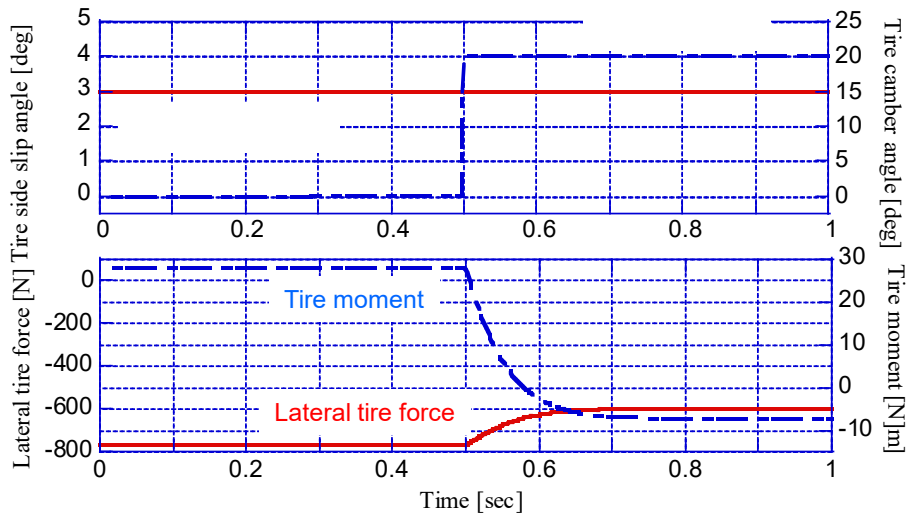


Fig.6 Tire lateral force and moment response to step change in tire camber angle

4. リーン制御モデルの構築

本車両の旋回運動は、前述のように車両に対してハンドル操作に伴う舵角と強制リーン角の2系統の入力により制御される。それに加え、ドライバには加減速の操作が課されることになり、多入力系の操縦負担は人間-車両系として好ましいとは言えない。そこで本車両では舵角と強制リーン運動との関係を比率で定義し、操舵角の1入力により前輪舵角とロール角を決定した。

目標となるロール角 ϕ_i は、転舵輪の実舵角とホイールベースから算出される仮想旋回半径と、走行車速から導出される仮想旋回横加速度に釣り合うように規定した。その導出過程を以下に示す。まず、ロール角を含む車両の運動方程式として、この関係が成り立つことを前提とする。

$$\phi = k(v)\delta \quad (1)$$

ここで k を強制リーン角操舵比と定義し、速度の関数とする。四輪車両の運動を簡素化するために左右のタイヤ力の影響を車体横方向中央に集中させた二輪モデルに置き換える。(この考え方は4輪車の運動力学モデルにおいて基本となっている) キャンバスラストを主求心力とする車両の場合、運動を表現する座標系は SAE (Society of Automotive Engineers) 座標系を用いると理解しやすい。これは操舵角を正とした場合、コーナリングフォースおよびヨー角速度が正、キャンバ角が正となるためである。また、車体が大きくロールするため、座標の原点を後輪タイヤ接地点中心におく。ここで式の簡素化の関係からタイヤの幅を考慮せず、また、タイヤ力はタイヤ横すべり角に対してコーナリングスティッフネスを比例定数とする線形モデルとして考え、次式で定義する。

$$F_{yi} = K_{Ci}\phi - K_{Si}\alpha_i \quad (2)$$

ここで、 K_{Ci} : キャンバススティッフネス、 K_{Si} : コーナリングスティッフネス、 α_i : タイヤ横すべり角とする。また i はタイヤ番号を示し、 $i=A$ を後輪、 $i=B$ を前輪とする。

まず、座標の原点における速度、加速度等を示す。この場合、慣性座標系 ($O-XYZ$) の

方向を表す単位ベクトルを i, j, k とする．また，動座標系 $A-x_A, y_A, z_A$ の方向を表す単位ベクトルを e_{xA}, e_{yA}, e_{zA} とする．これらを用いると A 点における速度および加速度は次式で与えられる．

車両の基本特性を考える場合，通常走行速度における定常ゲイン等が重要な要素となる．そこで定常円旋回により，速度変化に対して，どのように車両運動が変化するかについて概念を説明する．まず，極低速の旋回を考える（幾何学的な旋回）．この場合，速度が 0 およびロール角を 0 とする．この関係は次式で示される．

$$\delta = \tan^{-1} \frac{l}{R_0} \cong \frac{l}{R_0} \quad (3)$$

この旋回では，各タイヤの求心力を必要としないため，横すべり角を 0 としたホイールセンタ方向に進行することになる．これに対し，求心力がキャンバスラストのみの場合は各タイヤが横すべり角を持たない．そのため，旋回中心は後輪軸延長線上に位置する．このキャンバスラストが必要な求心力よりも小さい場合，コーナリングフォースで補填する必要がある．このため，各タイヤの横すべり角はマイナスとなる．そこで，旋回中心は後輪軸よりも前方に位置する．よって，車両の姿勢角は内向きとなり，後輪は外側に張り出すこととなる．また，キャンバスラストが必要とする求心力よりも大きい場合，定常円旋回の釣り合いからコーナリングフォースをマイナス側に発生させる必要がある．つまり，横すべり角はプラスとなるため，旋回中心は後輪軸よりも後方に位置し，車両は外を向いて旋回することになる．これらの関係から，キャンバスラストを主求心力とする車両の場合，キャンバスラストのみで旋回する状態と考えられる．そこで，定常円旋回特性の基準はこのようなタイヤ特性を有する車両となる．

ここで考慮する車両は車体とタイヤのロール角は一致するものとする．また，4 輪車であるが左右タイヤに均等に荷重がかかるようにセッティングするためには前輪と後輪で発生するキャンバスラストによりこの遠心力と同じ大きさで向きが逆の力を発生させる必要があり，さらにこの前後力が作る重心点回りのモーメントは釣り合う必要がある．また，一般的に定常特性を考える場合，重心点で検討を行う．特に基準となる A 点における幾何学的横すべり角は 0 となるため，横すべり特性が計算できない．そこで，上記式を重心点に置き換えて解析を行う．

まず，基準となる幾何学的な旋回半径 R_0 と舵角 δ_0 ，および横すべり角 β_0 との関係を示す．

$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{l}{R_0} \cong \frac{l}{R_0} \quad \beta_0 = \tan^{-1} \frac{l_A}{R_0} \cong \frac{l_A}{R_0} \quad (4)$$

この式よりステア特性を求めると次式となる．

$$\frac{\delta}{\delta_0} = 1 + K_\delta v^2 \quad (5)$$

ここで K_δ はスタビリティファクタを示す．スタビリティファクタとはその正負が車両のステア特性を支配するものであり，車両の定常円旋回の速度による変化の大きさを示す重要な量である．ここでは $K_\delta > 0$ の場合，速度の増加に伴い舵角が増加するアンダース

テア (US), $K_\delta=0$ の場合, 舵角一定でありニュートラルステア (NS), $K_\delta<0$ の場合, 速度の増加に伴い舵角が減少するオーバーステア (OS) となる. スタビリティファクタ K_δ は次式で与えられる.

ロール角と操舵角の関係は上式のようにになっている. これにより, 速度 $v[\text{m/s}]$ によって走行する車両において, ハンドル角操作による実舵角 δ_o によって決定される目標ロール角 ϕ_t は式(2.30)によって定義される.

$$\phi_t = k_\phi \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\delta_o) v^2}{lg(1+K_\delta v^2)} \right) \quad (6)$$

本モデルは, ハンドル操舵角から実舵角, 実舵角に対応した目標ロール角を算出するが, 図 7, 8 に示すようにタイヤとサスペンション系のセット全体を上下動して静的なロール角 $\phi_s = \phi_t$ を規定する. よってサスペンション機構はパッシブの状態であり車両運動に伴うサスペンションの伸縮により車体の実ロール角 ϕ は, 目標ロール角に対して変化する.

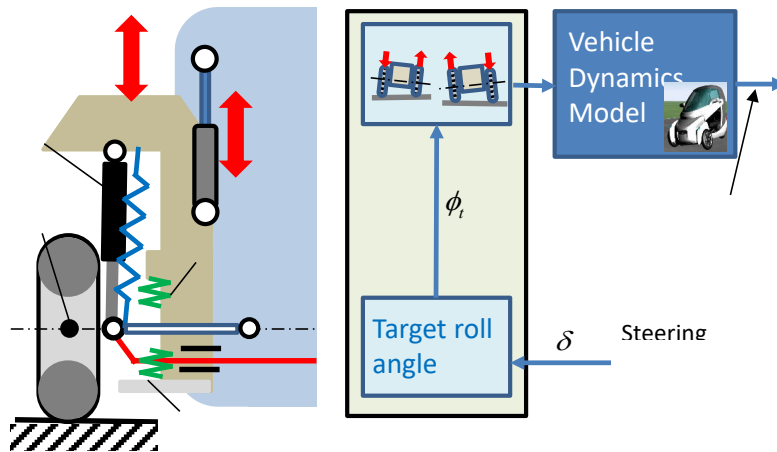


Fig.7 Open loop lean mechanism model

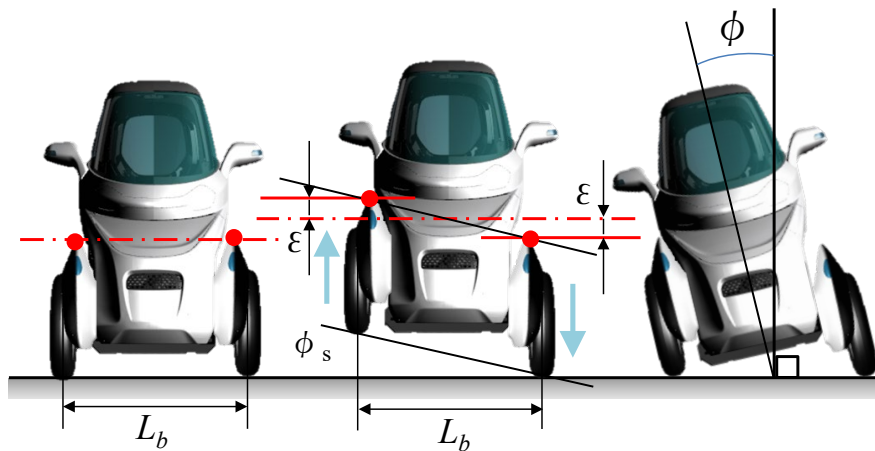


Fig.8 Operation of the tire set that specifies the roll angle

5. まとめ

本研究において構築した PMV 車両の車両運動力モデルについて述べた．また，使用したタイヤモデルについて，従来使用していたものよりも正確にタイヤ力発生の特徴を考慮するために，タイヤ力の緩和長を切り分けたモデルを作成し説明した．また，ここでは特に旋回時に強制リーンを行う機構について提案し，特徴を確認した．

運転行動計測を目的としたライディングシミュレータの開発

北澤 章平（全学教育機構テクニカルセンター）

1.研究概要

二輪車の車体の運動は走行中に大きく傾くなど四輪車とは異なる特徴を有し，また二輪車単体では非常に不安定であり，ライダーに操縦されることによって車体の安定性を保つ特徴がある．これらのことから交通流において四輪車のドライバから見た場合，けっして親和性がよいモビリティとは言えない．また，二輪車の運動特性を実車実験にて解析するには，転倒によるライダーの怪我や機材の破損によるコストの増加，同一条件での繰り返し実験が困難，計測装置等を積載するスペースが限られる等の二輪車特有の問題が存在し，さらに運転中に発生するライダーの姿勢変化は車両運動に大きく影響するため，人－二輪車系で解析を行うことが重要である．これらを解決する手段として，操縦感覚の再現度が高いライディングシミュレータの活用が有効であることから，自動二輪車およびそれを操縦するライダーの運動動作特徴を抽出することを目的として，運転行動計測用ライディングシミュレータの開発を行った．

2.システム構成

図 1 に構築したライディングシミュレータのシステム構成を示す．リアルタイム OS を有するプロトタイピングシステムおよび二輪車両運動制御シミュレーションソフトを用い，ライダーに付与する映像の生成を行う．二輪の筐体は 3 自由度，ロール，ピッチおよびステア軸を制御し，車体の姿勢制御および反力制御によって擬似体感刺激を付与した．なお，実際の自動二輪車による走行においてライダーが感受する加速度情報をライディングシミュレータで模擬することは不可能であり，必要ではない．一例として車体進

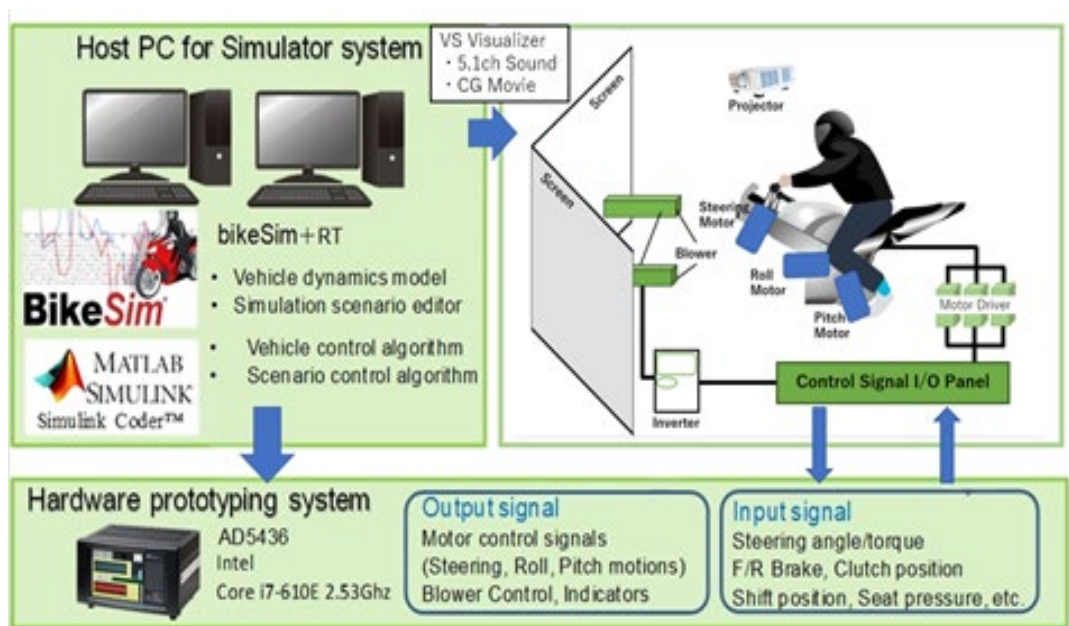


Fig.1 System Outline of Riding Simulator

行方向軸回りに働く力を考えれば、図 2 に示すようにライダーに働く遠心力と車体リーンにより働く重力の分力は釣り合っており、ライディングシミュレータで模擬する場合には車体を直立させることになる。一方でライダーは車体とは独立して傾く可能性があり、ライダーの姿勢角の検出が運転行動計測には重要となる。本研究においては図 3 に示すように画像解析によるモーションキャプチャを用いてライダーの運転姿勢検出を同時に行うことで、ライダーが感受する体感刺激を解析することとした。また、シミュレーション上の走行速度情報を利用し、走行感覚を被験者に付与するための送風機制御を行った。

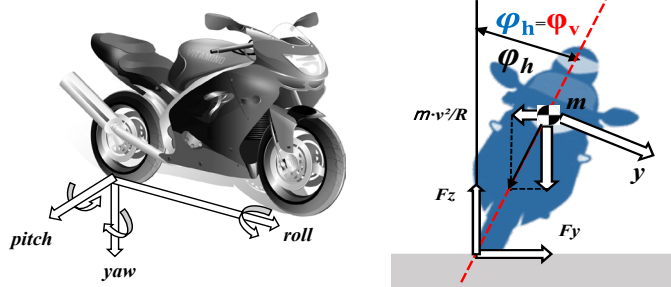


Fig.2 Vehicle dynamics in steady state turning

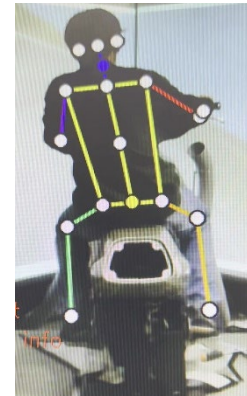


Fig.3 Measurement result with motion capture system

3.まとめ

モビリティの中でも二輪車はリーンしながら旋回し、さらにライダー姿勢が運動特性に影響を与えるなど 4 輪車とは異なる取り扱いが必要である。今後、構築したライディングシミュレータを用いた各種道路交通環境での運転行動を計測し、現実感向上のためのスケールファクタチューニングを行いながら、運転行動データの蓄積を行う。