

ドライバー意図の遷移を考慮した 統合型車両走行モデルの提案

柳原 正実¹・宇野 伸宏²・嶋本 寛³・塩見 康博³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター438号室)
E-mail: yanagihara@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学経営管理大学院 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター436号室)

³正会員 京都大学大学院工学研究科

本稿では、車両挙動モデルについて包括的にレビューした後、交通マイクロシミュレーションの再現性向上を目標とした、統合型車両走行モデルを提案する。

当該モデルは既存の速度調整行動モデル、車線変更モデルを踏まえ、速度調整と車線変更、双方の挙動を一つに統合した概念の中で扱う。ドライバーの意図の推移過程と速度調整方法の選択行動を考慮したモデルを提案する。車線変更意図や速度調整方法をモデル中では潜在変数として表現する。

更にモデルパラメータを確率的に最尤推定する方法と、従来のモデルとの差異について述べる。

Key Words : *driving behavior, microscopic modelling, Hidden Markov Model, literature review*

1. はじめに

市販の交通マイクロシミュレーションは其中で利用されているモデルについて、利用者側は詳細な知見を得ることが難しく、内容がブラックボックス化していることが多い。よって、開発者側は基本検証、複合検証、実用検証に分類されるモデルの検証を行い、その結果を提示すべきであると指摘されている¹⁾。動的シミュレーションが本格的に実務で利用されるようになったのは1990年代に入ってからであるが、大規模なシミュレーションを行う際には運転者属性を含む車両の発生集中データの作成が困難であるという問題がある²⁾。しかし、近年、車載通信機器の発達によって発生集中データが大量に収集できるようになってきている³⁾⁴⁾。再現性を確認する作業であるCalibrationについて様々な研究が存在し⁵⁾⁶⁾⁷⁾、その確認には仮想の交通量を用いる場合 (Verification) や、発生集中データなどから得られる実現交通量を用いる場合 (Validation) がある。マイクロシミュレーションにおけるCalibrationはそこに用いられているモデルが複雑であるため困難であり、また、交通状況が異なる場合、その検証結果と同じ再現性が得られるとは限らない。

このように、これまで多くのマイクロシミュレーションではマクロなデータを用いてその検証が行われており、

その検証方法に関してまとめたものも存在する⁸⁾。しかし、車両1台1台の動きに対する検証はほとんど行われておらず、多頻度で車線変更が生じ、交通流のコンフリクトが顕著な区間では、シミュレーションの利用者が期待するマイクロな挙動が十分に再現できていない場合も多いと考えられ、特に安全性を評価する上では改良の余地があるといえる。加えて、高い再現性への需要とマイクロシミュレーションのニーズは、特に交通流のコンフリクトが顕著な区間で高いと考えられる。本稿では車両挙動モデルについて包括的にレビューし、シミュレーションに適用する上での問題点を指摘した後、マイクロな車両挙動の再現性向上を目的とした速度調整と車線変更の挙動を統合したモデルの提案を行う。

2. 追従モデル

車両挙動を表現するために用いられているモデルには、進行方向の挙動、すなわち、ドライバーの速度調整行動を表現するモデル (追従モデル) と車線変更等の挙動を表現するモデル (車線変更モデル) の2つに大きく分けられる。

前者の追従モデルは1950年代後半から研究が進められ

てきており、交通ミクロシミュレーション中においては、車両挙動の主要な部分を表現する⁹⁾ために最も多く利用されていると言える。追従モデル全般に関しては大口¹⁰⁾が詳しい。大口は追従モデルを反応(出力)が反応強度(感度)と刺激(入力)の積で与えられるものとして単項初等関数型・単項指数関数型・線形多項式型・非線形多項式型・非線形多項式複数反応遅れ時間型・変動反応遅れ時間多項式型の6つのモデルに大別している。

単項初等関数型のモデルはPipes¹¹⁾によって初めて提案された加速度を相対速度と反応強度の積で表現するモデルである、当初は定数の反応強度で提案されたが、後に速度、相対距離に、 m -1次比例した反応強度を用いるものが提案されている¹²⁾。このモデルは一般にGMモデルと呼ばれ広く利用されている。また、Chandlerら¹³⁾によって反応時間を考慮したものが提案されている。単項指数関数型のモデルはNewell¹⁴⁾によって提案されており、Newellモデルとして知られている。このモデルは単項初等関数型の反応強度に相対距離の指数値で表現される。Kometaniらによって提案、解析された線形多項式型¹⁵⁾ 16)、非線形多項式型¹⁷⁾ 18)のモデルは刺激項を複数にしたものである、また、複数の反応時間を用いた非線形多項式複数反応遅れ時間型や反応遅れ時間を時間的に変動するものとして扱った変動反応遅れ時間多項式型のモデルが存在する¹⁹⁾。これらのモデルでは、加速度の説明に相対距離や相対速度を用いた場合において、マクロな交通流との整合性を分析するため、安定性の解析などが多数行われている。

これらの追従モデルや、その他の古典的な追従モデル等²⁰⁾では動的な自由流から渋滞流への推移現象は説明不可能であろうという指摘を基に、サグなどにおけるボトルネック現象を表現するため、横断勾配の説明変数を用いたモデルが越ら²¹⁾ 22) 23)によって提案されている。当該モデルはXingら²⁴⁾によって実データを用いた検証が行われており、個人属性を考慮した場合に追突が生じてしまう可能性があるという指摘がされている。そこで、尾崎は、追突が生じる原因の一端は加速時と減速時において反応時間が異なることにありと考へ、加速時と減速時における反応時間が異なることを実データより示した²⁵⁾ 26) 27)。その後もサグの影響は無視できないものと考えられ、近年ドライビングシミュレータを用いて追従モデルについての知見を得ようとする研究が行われている。飯田ら²⁸⁾は複数の説明変数でサグの影響を考慮するモデルを提案しており、吉澤ら²⁹⁾によってサグやその他の道路特性によって追従挙動が異なることが示されている。

追従特性は道路線形の影響とともに個人間の差異でも異なるのではないかと考えられている。Chiabautら³⁰⁾はNewellモデルを用いて渋滞中で個人間の差異が渋滞延伸にどのような影響を与えるかを分析している。

追突が起こらないようなモデルとは対極的に、シミュレーション中で安全性を考慮するためのモデルが構築されている。Bonsallら³¹⁾は説明変数に希望走行速度、希望追従間隔、反応時間、加速・減速の割合・最大値、車両間隔、運転規則などを用いた追従モデルを提案している。Xinら³²⁾も既存のモデルで衝突安全性を考慮することは難しいと指摘し、衝突を考慮した追従モデルを考案している。当該モデルでは、反応時間は個人間だけでなく速度、密度などの交通状況によって異なるとした上で、反応時間や周囲の交通状況の知覚間隔・知覚範囲、更に希望追従間隔等を考慮している。

他方で、車両の追従挙動において相対速度、相対距離の変化を観測すると、スパイラル曲線が見られるという知見を基に、スパイラル曲線によって追従挙動を表現しようという試み³³⁾が見られる。石田ら³⁴⁾はスパイラル曲線の表現を直接各加速度などによって行うことを試みている。葛西ら³⁵⁾ 36)は車線変更やカーブ、合流等の二次元的な動きを表現するためにスパイラル曲線を導入しており、追従挙動を分類し、分類された挙動ごとのモデルを構築している。その中で線形多項式型のモデルのような、相対加速度を相対速度と相対距離、定数項で表現するばね質点系モデルが提案されている。

また、葛西ら³⁷⁾によって効用理論に基づいて追従挙動を記述する試みも行われている。当該モデルは不快感を最小化させ、効用が最大となる加速度を選択するものであり、モデルに先読み概念を与えることによって更に説明力が向上することが示されている³⁸⁾。

更に、追従モデルにはファジィ理論を用いたものも存在する。菅沼ら³⁹⁾は、一般国道の織込み区間において、車線変更時のコンフリクトを考慮して、多重ファジィ理論を利用した加減速挙動のモデル化を試みている。

3. 車線変更モデル

車両挙動の内、前後の速度や加速度を表現する追従モデルと並行して、車線変更など横方向の移動を記述するモデルが多数提案されてきた。特に織込みや合流は交通の効率性や安全性を低下させる重要な要因になっているとして、織込みや合流に着目した研究が多数行われてきている⁴⁰⁾。飯田ら⁴¹⁾ 42)は強引な合流挙動が潜在的危険性を向上させると指摘している。

織込み合流に関して、内山⁴³⁾は、高速道路の夜間工事での車線規制区間を対象として、画像データを用いて得られた車両軌跡データを用いて、「合流を開始する」と「合流を見送る」という2つの選択を2項選択ロジットモデルで表現している。渡辺ら⁴⁴⁾は、高速道路の織込み合

流部について画像データを利用し、「直近のギャップに合流する」「追い越して1台先のギャップに合流する」という2項選択のロジットモデルを構築し、さらに合流車の加速度推定モデルも提案している。Kita⁴⁵⁾は合流挙動を、非ゼロ和・非協力の2人ゲームとして表現しており、ファジィ推論や離散選択モデル以外にも合流挙動を表現するアプローチが提案されている。また、柳原ら⁴⁶⁾は主車線同士が統合される合流部において車両が進入する車間を選択するモデルを構築している。

一方、車線変更挙動は合流とは幾分か異なる現象として扱われてきている。Lee⁴⁷⁾は車線変更挙動、織込み挙動、合流挙動の3通りの状況に応じたモデルを構築しており、Hwangら⁴⁸⁾によって合流時のギャップ選択モデルを車線変更時のギャップ選択に応用することが提案されている。車線変更挙動をシミュレーション中で扱う方法として、Gipps⁴⁹⁾はGap Acceptanceモデルを提案しており、以後、この概念を用いた多数のモデルが構築されることとなる。Websterら⁵⁰⁾は事後の状態を考慮した戦術的な車線変更モデルを提唱しており、Gap Acceptanceモデルのように安全にGapに流入できるかを確認し、車線変更することによる効用を確認すると言った2段階の戦術を考慮することによって、従来の効用理論に基づいた車線変更より説明力が高いモデルを構築している。車線変更要求が生じたタイミングを表現するモデルとしては、近藤ら⁵¹⁾によって他車両との相互作用を取り入れたモデルが提案されており、当該モデルはTTCや前方車両との相対速度に関する効用が一定値に達した時点で車線変更するというものである。論文の中では車線変更の判断を行ってからハンドル操作に移行するまでに1秒程度の時間間隔があると述べられている。また、車線変更前に進入するGapを選択するモデルとして倉内ら⁵²⁾は前方、直近、後方の車間から進入したGapを選択させるモデルを構築しており、当該モデルはGap選択結果が車線変更のおよそ5秒前で良好な結果を示すことが記述されている。さらに、これら車線変更要求、Gap選択、Gap Acceptanceを統合したモデルとして、Ahmed⁵³⁾、Toledo⁵⁴⁾、Ben-Akivaら⁵⁵⁾はドライバーの段階的な選択を考慮したモデルを提案している。一方でToledo⁵⁶⁾はGap Acceptanceによって車線変更が瞬時に行われることを避け、車線変更に一定の所要時間を持たせることが有用であるとして、車線変更にかかる時間を推定するモデルを構築している。

本節でこれまでに述べた多くのモデルでは、目的車線・進入Gap等の選択が随時行われるものとして表現されている。しかし、これらのモデルでは、ドライバーの一連の選択結果が次の選択に与える影響を考慮することができない。目的車線・進入Gap等は一度決定されると少なくとも数秒間は変更されない傾向があるのではないだろうか。このような傾向は随時選択が行われるモデル

の枠組みでは表現が難しい。その解決策としてChoudhuryら⁵⁷⁾は隠れマルコフチェーン(HMM)を応用し、その潜在変数として車線変更要求、進入先Gap選択結果を持つモデルを構築している。モデル中の潜在変数は総括してPlanと呼ばれ、ドライバーがどのような行動をしようとしているかを示すものとして扱っている。潜在変数の値を確率的に求めるための顕在変数には車線変更動作を用いており、Actionと呼んでPlanと対比させている。当該モデルにおけるActionの選択確率は式(1)のように表現される。

$$P(j_{n,t}|j_{n,t_0:t-1}) = \sum_{l_{n,t}} P(j_{n,t}|l_{n,t}) P(l_{n,t}|l_{n,t-1}j_{n,t_0:t-1}) \quad (1)$$

- n : 個人/車両番号
- t : 時刻(番号)
- t_n^0 : 車両 n の初期観測時刻
- $P(j_{n,t}|*)$: 個人 n 時刻 t の条件付きAction選択確率
- $P(l_{n,t}|*)$: 個人 n 時刻 t の条件付きPlan選択確率

式(1)では $P(l_{n,t}|l_{n,t-1}j_{n,t_0:t-1})$ の項がPlanの推移を表現しており、Planの下段階の選択としてActionの選択(Gap Acceptance)を $P(j_{n,t}|l_{n,t})$ の項で表現している。

論文中では、当該モデルのパラメータは車両軌跡データを用いて推定されており、シミュレーションの再現性向上を図れることが示されている。

4. 車線変更挙動と速度調整挙動の統合

車線変更挙動と速度調整挙動を包括的に単一の概念で扱うものの1つとして、セルオートマトンと呼ばれるモデルが存在し⁵⁹⁾、複数のシミュレーションで利用されている⁶⁰⁾。しかし、当該モデルは道路を一台の車両が占有できる多数の区間(セル)に分割した上で、車両が存在するセルを表現していくことで交通状況を再現するものであり、離散的なモデルであるため高い再現性が求められる事例には応用が難しい。対極的に車両の動きをハンドル角と加速度から説明し、車線を考慮しない二次元の動きとして扱うナノシミュレーションモデルと呼ばれるモデルも存在する⁶¹⁾。しかし、基本的にドライバーは車線の中心を維持して走行していると考えられ、ナノシミュレーションは車線を認識するドライバーの判断を記述するには向かない手法であると言える。

既存の知見を有効に活用するのであれば、追従モデル

と車線変更モデルを統合した形のモデルを考慮すべきである。Sarviら⁶⁰⁾は織込み合流部における車両挙動のモデルを構築し、シミュレーションとドライビングシミュレータによる実験を行い、モデルの評価を行っている。モデルでは相対距離と速度の関係式に速度調整と車線変更行動の2段階で異なるものを用いて速度調整、流入挙動を表現している。このように合流部においては合流の選択行動のみでなく、その時の速度調整挙動にも特異性を考慮した分析が多い。Salvucciら⁶⁴⁾によって行われた多車線区間におけるドライビングシミュレータを用いた実験では、車線変更に関しても車線変更前の減速、その後の加速がみられるなど速度調整挙動に、一般の追従挙動とは異なる挙動が含まれることが示されている。当該論文では車線変更開始直後に視線が目的車線に移動したという結果が示されており、車線変更中は前方のみを注視している訳ではないことがわかる。また、進入される側の車両も特異な挙動を強いられると考えられる。しかし、車線変更の現象自体は多くのシミュレーションモデルの中で瞬時に起こる現象として扱われている。このように車線変更が瞬時に起こるものとして扱われることによって、主車線の譲り合いの影響がうまく表現できない等の問題が生じる。この問題を回避するために、Gap Acceptance前後における追従モデルの関連性を弱めたモデルを構築する研究が行われている。Lavalら⁶⁵⁾は既存のモデルに車線変更に要する時間を表すパラメータを加えた簡潔なモデルによって問題を回避している。Chevallierら⁶⁶⁾はこの問題が渋滞時に顕著になり、ドライバーの予測行動が重要になることを指摘している。

このように車線変更などが含まれる車両挙動は車線変更モデルと追従モデルが独立した枠組みでは表現し難い。しかし、これまで、多くの研究において車線変更と追従を独立させて扱ってきた。Toledoら⁶⁷⁾は車線変更に関する選択行動と加速度調整を単一のモデルで表現できるモデルを提案している。本稿においても当該モデルの考え方がマイクロな車両挙動の表現に有用であると判断し、当該モデルを車線変更に関する柔軟性の上で拡張する。

Toledoらのモデルは各時点において、目的車線、Gap Acceptance、Gap選択という段階的な選択をするものであり、各段階の選択行動は、各効用が式(2)で表現される最大効用選択モデルとなっている。

$$U_{n,t}^d(t) = \beta^d X_{n,t}^d + \gamma^d EMU_{n,t}^d + \chi^d v_n + \epsilon_{n,t}^d \quad (2)$$

- n : 個人/車両番号
- t : 時刻 (番号)
- d : 選択肢
- $U_n^d(t)$: 個人 n 時刻 t 選択肢 d の効用
- $X_n^d(t)$: 説明変数

- v_n : 個別パラメータ
- $\beta^d, \gamma^d, \chi^d$: モデルパラメータ
- : Expected Maximum Utility
- $EMU_n^d(t) = \max_d U_{lower_n}^{d^*}(t)$
- $\epsilon_n^d(t)$: 誤差

ここで、 $EMU_n^d(t)$ は下段階の選択結果を反映する指標として用いられている。EMUの値は下段階における選択肢の効用値の内、最も大きいものをその値にとる。各効用には誤差を仮定し、最下層の加速度のEMUには加速度誤差の確率密度を当てはめ、行動の選択結果を確率的に扱うことによって尤度関数を定義している。結局、この尤度関数を最大化することによって、選択確率と加速度の実現値を算出するサブモデルパラメータを推定している。

5. 統合型車両モデルの提案

ドライバーの実際の判断過程では、ドライバーは「何らかの刺激」が加わった時点で「判断」を下し、その意図を変更していると考えられる。よって、何らかの判断を下す、あるいは、判断を下さないという、時々刻々の選択をモデル化することができれば、直接的なドライバーの判断行動が表現できるであろう。第3節で述べたChoudhuryらのモデルでは、目的車線、進入Gapに対するドライバーの判断過程が潜在変数Planの推移として表現できており、その結果として、再現性向上が実現されていたと考えることができる。Choudhuryらは加速度等も車線変更に関わる選択過程を説明する要素になりえると述べており、また、第2節で挙げた論文の中では複数の加速度調整行動が存在する可能性が示唆されていた。単純な追従状態であっても、接近しすぎれば急減速するといったようにドライバーの判断過程が存在すると考えられる。よって、本項では統合型車両挙動モデル中で、車線変更と加速度制御に関わるドライバーの判断過程、すなわちドライバーの意図の推移を表現するモデルを提案する。

本稿で提案するモデル中では、ドライバーが持つ車線変更や速度調整行動に関する意図を複数種類の「PLAN」で表す。考慮するPLANは、主に現在の車線のまま走行する「車線維持」、車線変更調整に伴うGAP選択を行う「車線変更調整」、実際に車線が変わる「車線変更実行」の3段階と「追従走行」、「減速走行」、「自由走行」といった3種類の走行挙動で区分するものとし、それらの間の推移を考慮する。特に車線変更調整段階から車線変更実行段階への推移は、当該車両が「車線上の領域」

から「車線間の領域」へ「走行領域」を移行する遷移と定義し、 $PLAN$ を車線変更と密接に関連した概念として用いる。この走行領域は車線の横方向の位置を表す領域、具体的には、図-1で色分けされているような車線上の領域と車線間の領域を区別する領域として定義する。本モデルは近年取得がある程度容易になってきた2次元以上の空間軸をもつ図-1のような詳細な車両軌跡データによって推定されることを想定しており、どの走行領域をたどって車両が走行していくかを表現するものとなっている。この定義によって、車線変更を時間的に幅のある事象として扱い、車線変更車両が隣接する2車線上の車両に影響を及ぼす区間が存在するという従来の問題を解決できると考える。

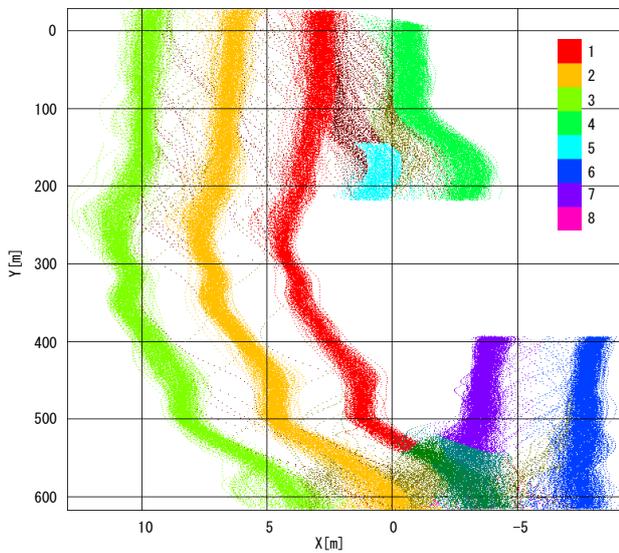


図-1 画像から抽出した走行領域別車両軌跡図

また、モデル中で $PLAN$ によって一意に決定される速度調整行動を便宜的に「 $REGIME$ 」と称し、複数種類の $REGIME$ でドライバーが行っている加速度制御方法を場合分けする。図-2は以上をまとめた本モデルの概念図である。

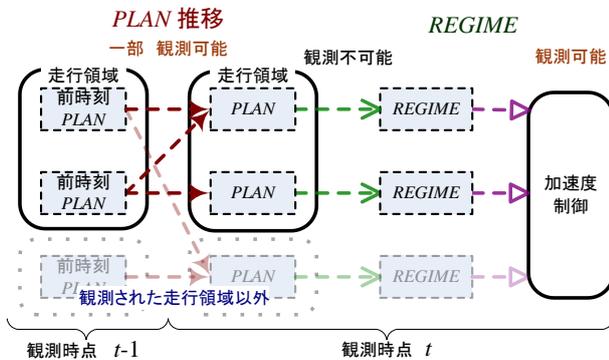


図-2 統合モデル概念図

ドライバーの意図 $PLAN$ は車両軌跡からは直接読み取れない。よって、完全に $PLAN$ 間の推移を知ることはできない。しかし、走行領域の変化のタイミングや加速度の値を考慮することによって、 $PLAN$ 間の推移を確率的に推し量ることができる。本モデルでは $PLAN$ 間の推移をLOGITモデル等によって表現し、各 $PLAN$ 状態確率はHMMの考え方をもとに $PLAN$ 間推移確率 $P^\Delta(l_{n,t}|l_{n,t-1}, \beta)$ と初期状態確率 $P(l_{n,t}^0)$ によって算出する。また、各 $PLAN$ 状態に対応した $REGIME$ の加速度は既存の追従モデル等を踏まえた式 $a_{n,t}^l(\beta)$ で表す。これらのサブモデルのパラメータ β は、詳細な車両軌跡データを用いることによって一括して推定することが出来る。具体的には、式(1)の尤度関数 $\sum_n L_n(\beta)$ を β について最大化することによってパラメータを推定する。

$$\max_{\beta} \sum_n L_n(\beta) \quad (3)$$

$$L_n(\beta) = \ln \left(\prod_t \left\{ \sum_{l_{n,t}} \left(f^{\text{acc}}(a_{n,t} | l_{n,t}, \beta) \right) \right\} \right) \quad (4)$$

$$P(l_{n,t} | l_{n,t-1}^0, \beta) = \delta_{n,t}^{l_{n,t}} \sum_{l_{n,t-1}} \left(P^\Delta(l_{n,t} | l_{n,t-1}, \beta) \right) \quad (5)$$

$$\delta_{n,t}^{l_{n,t}} = \begin{cases} 1 & \text{if } l_{n,t} \in PLAN_{n,t}^{\text{observed area}} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P(l_{n,t}^0 | l_{n,t-1}^0, \beta) &= P(l_{n,t}^0) \\ &= \text{const} \end{aligned} \quad (7)$$

- β : 推定パラメータベクトル
- n : 個人/車両番号
- t : 時刻 (番号)
- t_n^0 : 車両 n の初期観測時刻
- $l_{n,t}$: 個人 n 時刻の $PLAN$ 状態値
- $L(\beta)$: 対数尤度
- $L_n(\beta)$: 個別対数尤度
- $P(l_{n,t} | l_{n,t-1}^0, \beta)$: 個人 n 時刻 t の $PLAN$ 状態確率
- $P^\Delta(l_{n,t} | l_{n,t-1}, \beta)$: 個人 n 時刻の $PLAN$ 状態遷移確率
- $a_{n,t}$: 車両 n 時刻の加速度観測値
- $a_{n,t}^l(\beta)$: 車両 n 時刻の加速度推定値
- $f^{\text{acc}}(*)$: 加速度推定誤差確率密度
- $\delta_{n,t}^{l_{n,t}}$: $PLAN$ ・走行領域適合ダミー
- $PLAN_{n,t}^{\text{observed area}}$: 個人 n 時刻 t の選択可能 $PLAN$ 集合

式(4)では各車両各時点の尤度が加速度誤差密度とPLAN状態確率の積についての各PLANにおける和で表されることを示している。式(4)に従うと、最尤パラメータは加速度誤差が小さいPLANを高い確率で選択する傾向をもつことになる。実際に推定する際には、この性質を利用して近似を行い、滑降シンプレックス法・SAを利用したアルゴリズムで推定することが現実的である。

また、式(5)~(7)はPLANの推移確率と状態確率の関係を示しており、推定に用いる車両軌跡では観測されなかったPLAN推移が想定された場合の確率を、ダミー変数によって0補正している(式(5))。この補正は観測された走行領域の変化を尤度関数に反映させるものであり、LOGITモデル尤度関数における選択ダミーと同等の意味を持つ。

6. おわりに

本稿では車両走行に関わる追従・車線変更統合モデルと、近年取得がある程度容易になってきた詳細な車両軌跡データを用いたモデルパラメータの推定方法を提案した。

本モデルの構造は、従来の加速度モデルや車両挙動に伴う各選択モデルを包含できるモデルであり、既存研究における説明変数選択や推定による知見を応用できる可能性がある。加えて、ドライバーの「判断」を直接モデル化する構造であるため、判断ミスや判断の遅れ等を表現し、実際のドライバーの判断(ex:「たった今…しよう」と判断した。)」と対比することが容易であるという利点がある。また、従来の非統合型モデルと比較すると、加速度誤差とPLAN推移確率の誤差を最小化するように、加速度モデルと各選択モデルのパラメータ推定を統合的に行っている為、ミクロな挙動の誤差がより少なく推定され、ミクロな挙動の再現性向上を実現できると考えられる。更に、シミュレーション時に必要な全パラメータを推定によって求めることが出来るため、シミュレーション時のCalibrationに関する問題を回避し、よりクリアな検証を行うことが出来るであろう。

今後は、本モデルがどの程度従来のモデルより誤差を低減できるか、実データを用いて検証を行っていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 交通工学研究会, '交通シミュレーションのススメ', 出版, 2004.
- 2) 佐藤光, 堀口良太, 桑原雅夫, '大規模ネットワークにおける動的シミュレーション適用の現在とこれから', 土

木計画学研究発表会講演集, No.29, 2004.

- 3) Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., 'Estimation of an Integrated Driving Behavior Model', *Transpn. Res.*, Vol.17C-4, pp.365-380, 2009.
- 4) Cunto, F., Saccomanno, F., 'Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections', *ELSEVIER Accident Analysis and Prevention* 40, pp.1171-1179, 2008.
- 5) Mahanti, B., 'Aggregate calibration of microscopic traffic simulation models', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2004.
- 6) Vaze, V., 'Calibration of dynamic traffic assignment models with point-to-point traffic surveillance', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2007.
- 7) Ma, J., Dong, H., Zhang, H. M., 'Calibration of Microsimulation with Heuristic Optimization Methods', *Transpn. Res. Board.*, No.1999, 2007.
- 8) 交通シミュレーション自主研究委員会, 'モデルの基本検証(verification)マニュアル(案)第2版', 交通工学研究会, 2002.
- 9) Gipps, P. G., 'A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation', *Transpn. Res.*, Vol.15B, No.2, pp.105-111, 1981.
- 10) 大口敬, '高速道路単路部渋滞発生解析- 追従挙動モデルの整理と今後の展望-', 土木学会論文集, No.660/IV 49, pp.39-51, 2000.
- 11) Pipes, L. A., 'An Operational Analysis of Traffic Dynamics', *Journal of Applied Physics*, Vol.24, No.3, pp.274-287, 1953.
- 12) Gazis, D. C., Herman, R., Rothery, R. W., 'Nonlinear Follow-the Leader Models of Traffic Flow', *Oper. Res.*, Vol.9, pp.545-567, 1961.
- 13) Chandler, R. E., Herman, R., Montroll, E. W., 'Traffic Dynamics, Studies in Car Following', *Oper. Res.*, Vol.6, pp.165-184, 1958.
- 14) Newel, G. F., 'Nonlinear Effects in the Dynamic of Car Following', *Oper. Res.*, Vol.9, pp.209-229, 1961.
- 15) Kometani, E., Sasaki, T., 'On the Stability of TrafficFlow (Report 1)', *J. Oper. Res. Soc. Japan*, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.
- 16) Kometani, E., Sasaki, T., 'On the Stability of TrafficFlow (Report 2)', *J. Oper. Res. Soc. Japan*, Vol.2, No.2, pp.60-79, 1959.
- 17) Kometani, E., Sasaki, T., 'A Safety Index for Traffic with Linear Spacing', *Oper. Res.*, Vol.7, pp.704-720, 1959.
- 18) Kometani, E., Sasaki, T., 'Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-Speed Relationship', *Proc. of the International Symposium on Theory of Traffic Flow (GM)*, pp.105-119, 1959.
- 19) Del Castillo, J. M., 'A Car Following Model Based on the Lighthill-Whitham Theory', *Proc. of 13th ISTTT*, pp.517-538, 1996.
- 20) Gazis, D. C., Herman, R., Potts, R. B., 'Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow', *Oper. Res.*, Vol.7, pp.499-505, 1959.
- 21) 越正毅, '高速道路トンネルの交通現象', *国際交通安全学会誌*, Vol.10, No.1, pp.32-38, 1984.
- 22) 越正毅, '高速道路のボトルネック容量', *土木学会論文集*, No.371/IV 5, pp.1-7, 1986.

- 23) 越正毅, 大口敬, '高速道路サグにおける渋滞とその対策', 道路, No.651, pp.65-69, 1995.
- 24) J. Xing, 大口敬, 越正毅, '高速道路単路部の交通流の動的特性', 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.621-628, 1991.
- 25) 尾崎晴男, '自動車の追従走行挙動に関する研究', 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- 26) 尾崎晴男, '車両の追従挙動とサグの隘路現象', 東京大学学位論文, 1994.
- 27) Ozaki, H., 'Assistance of Drivers to Mitigate Highway Capacity Problem', Proc. of 2nd WC on ITS, pp.1727-1731, 1995.
- 28) 飯田克弘, 藤原一雅, '3次元車両軌跡を用いた高速道路サグ部における交通流挙動解析', 交通工学研究発表会論文報告集, No.24, pp.13-16, 2004.
- 29) 吉澤隆司, 塩見康博, 宇野伸宏, 飯田克弘, 'ドライビングシミュレータを用いた高速道路サグ部における追従挙動特性の解析', 交通工学研究発表会論文集, No.30, pp.53-56, 2010.
- 30) Chiabaut, N., Leclercq, L., Buisson, C., Christine Buisson, 'From heterogeneous drivers to macroscopic patterns in congestion', Transpn. Res., Vol.44B-2, pp.299-308, 2010.
- 31) Bonsall, P., Liu, R., Young, W., 'Modelling safety-related driving behaviour-impact of parameter values', Transpn. Res., Vol.39A-5, pp.425-444, 2005.
- 32) Xin, W., Hourdos, J., Michalopoulos, P., Davis, G., 'The Less-Than-Perfect Driver A Model of Collision-Inclusive Car-Following Behavior', Transpn. Res. Recrd., Vol.2088, pp.126-137, 2008.
- 33) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎, 'スパイラル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討', 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp.25-28, 1993.
- 34) 石田貴志, 成田紘也, 野中康弘, 葛西誠, 'スパイラル曲線を用いた追従モデルの構築', 土木学会論文集, No.30(291), 2004.
- 35) 葛西誠, 内山久雄, 野中康弘, 'スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化', 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.65-75, 2007.
- 36) 葛西誠, 'スパイラル曲線として表現される車両追従挙動モデルの交通流再現性', 土木計画学研究・講演集, No.37(92), 2008.
- 37) 葛西誠, 加藤瑞穂, 内山久雄, '効用理論に基づいた追従挙動のモデル化に関する基礎的研究', 土木計画学研究・講演集, No.38(177), 2008.
- 38) 葛西誠, 加藤瑞穂, 内山久雄, '道路サービス水準評価を念頭に置いた車両追従挙動モデル', 土木計画学研究・講演集, No.39(78), 2009.
- 39) 菅沼真澄, 飯田恭敬, 宇野伸宏, '車線変更時のコンフリクトを考慮した加減速挙動のモデル化', 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.58/IV 264, 2003.
- 40) 片倉正彦, '織込み区間に関する研究の現状と課題', 土木学会論文集, No.440/IV 16, pp.33-40, 1992.
- 41) 飯田克弘, 日暮智紀, 高橋秀喜, Xing, J., 山下和彦, '高速道路の工事規制始端部における規制材配置と車両挙動との関連性分析', 土木計画学研究・講演集, No.40(215), 2009.
- 42) 飯田克弘, 山口将夫, 松本 晃一, '重交通路線合流部における交通挙動の解析', 交通工学研究発表会論文集, No.29, pp.73-76, 2009.
- 43) 内山久雄, '高速道路における工事時の合流意思決定プロセスのモデル化', 土木学会論文集, No.625/IV 44, pp.29-37, 1999.
- 44) 渡辺将光, 中村英樹, 'ビデオ画像を用いた都市高速合流部における合流挙動に関する分析', 土木計画学研究・講演集, No.32, 2005.
- 45) Kita, H., 'A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis', Transpn. Res., Vol.33A-3-4, pp.305-312, 1999.
- 46) 柳原正実, 宇野伸宏, 塩見康博, 洪多禧, 倉内文孝, '画像データを活用した都市高速合流部における合流ギャップ選択モデル', 土木計画学研究・講演集, No.40(214), 2009.
- 47) Lee, G., 'Modeling gap acceptance at freeway merges', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2006.
- 48) Hwang, S. Y., Park, C. H., 'Modeling of the gap acceptance behavior at a merging section of urban freeway', Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp.1641-1656, 2005.
- 49) Gipps, P. G., 'A model for the structure of lane-changing decisions', Transpn. Res., Vol.20B-5, pp.403-414, 1986.
- 50) Webster, N. A., Suzuki, T., Kuwahara, M., 'Driver Model for Traffic Simulation with Tactical Lane Changing Behavior.', Seisan-Kenkyu, Vol.59, No.3, pp42-45, 2007.
- 51) 近藤啓介, 鈴木高宏, Nathan A. Webster, 桑原雅夫, '他車両との相互作用を取り入れた横方向運転行動モデルの同定', 第5回 ITS シンポジウム 2006, 2006.
- 52) 倉内文孝, 丸尾香菜子, 宇野伸宏, 高木朗義, '画像データを用いた高速道路合流部の車線変更挙動のモデル化', 交通工学研究発表会論文集, No.29, pp.77-80, 2009.
- 53) Ahmed, K. I., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., Mishalani, R. G., 'Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior.', Proc. of the 13th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, pp.501-515, 1996.
- 54) Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., 'Modeling integrated lane-changing behavior.', Transpn. Res. Board., Annual Meeting CD-ROM, 2003.
- 55) Ben-Akiva, M., Charisma, C., Toledo, T., 'LANE CHANGING MODELS', Transport Simulation 2006, B4, 2006.
- 56) Toledo, T., 'Modeling Duration of Lane Changes', Traffic Flow Theory 2007, pp.71-78, 2007.
- 57) Choudhury, C. F., 'Thesis Modeling Driving Decisions with Latent Plans', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 2007
- 58) Choudhury, C. F., Ben-Akiva, M., Abou-Zeid, M., 'Dynamic Latent Plan Models', Journal of Choice Modelling, Vol.3, No.2, 2010
- 59) Nagel, K., 'A cellular automaton model for freeway traffic.', Journal de physique, Vol.2, No.12, pp2221-2229, 1992.
- 60) 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄輔, 'セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション', 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.SIG 10 (TOM 12) 数理モデルと応用, 2005.
- 61) 鈴木一史, 中村英樹, '交差点安全性評価を目的とした2D ナノシミュレーションにおける利用者挙動の表現', 土木計画学研究・講演集, No.37(86), 2008.

- 62) Sarvi, M., Kuwahara, M., Nishikawa, I., 'A simulation model for evaluation of merging capacity on the Metropolitan Expressway.', *Seisan-Kenkyu*, Vol.52, No.2, pp16-19, 2000.
- 63) Sarvi, M., Kuwahara, M., Ceder, A., 'Free Ramp Merging Phenomena in Congested Traffic Using Simulation Combined with a Driving Simulator', *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.19, pp.351-363, 2004.
- 64) Salvucci, D. D., Liu, A., 'The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior', *Transpn. Res.*, Vol.5F-2, pp.123-132, 2002.
- 65) Laval, J. A., Leclercq, L., 'Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model', *Transpn. Res.*, Vol.42B-6, pp.511-522, 2008.
- 66) Chevallier, E., Leclercq, L., 'Do microscopic merging models reproduce the observed priority sharing ratio in congestion?', *Transpn. Res.*, Vol.17C-3, pp.328-336, 2009.
- 67) Toledo, T., 'Integrated driving behavior modeling, PhD thesis.', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2003.
- 68) Toledo, T., Haris N., Ben-Akiva, M., 'Integrated driving behavior modeling.', *Transpn. Res.*, Vol.15C, pp.96-112, 2007.
- (2011.?.? 受付)

INTEGRATED DRIVING BEHAVIOR MODEL CONSIDERING THE DRIVER'S CHANGING INTENTION

Masami YANAGIHARA, Nobuhiro UNO,
Hirosho SHIMAMOTO and Yasuhiro SHIOMI

In this paper, overall literature relevant to car-following and lane-changing behavior is reviewed. then, this paper develops a framework of modeling the driving behavior that integrates the several decision making of driving tasks related to speed/acceleration controls and lane-changing maneuvers. The framework also provides a method of estimation for proposed model parameters the proposed model with the extracted vehicle trajectory data based on maximum likelihood estimation frame.

Drivers' decision making, which change drivers' intention, cannot be ignored to represent vehicle behavior. Since it is difficult to observe drivers' intention, we deal with them as latent variables in the proposed model. The model contains a structure that represents the temporal change in driver's latent intention, and is based on the concepts of lane-changing plan and acceleration regime.