

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

近藤啓介^{*1} 鈴木高宏^{*2} Nathan A. Webster^{*1} 桑原雅夫^{*2}
東京大学大学院工学系研究科^{*1}
東京大学生産技術研究所^{*2}

車線変更などの横方向の運転行動モデルは前後方向に比べて複雑であり、提案されているモデルの数も少ない。本研究ではマイクロ交通シミュレータに組み込むことを前提として比較的簡単なモデルで横方向の運転行動を記述することを目指した。追従走行時と自由走行時のモデルを区別して考えながら、シミュレーションプログラム上では車線変更要求の発生構造を共通化できる構造とした。このうち追従走行時のモデルについて、固定カメラによる高速道路走行データを利用してモデルのパラメータ同定を試みた。

Calibration of Human-Driver Model Interactive with Surrounding Vehicles

Keisuke Kondo^{*1} Takahiro Suzuki^{*2} Nathan A. Webster^{*1} Masao Kuwahara^{*2}
School of Engineering, The University of Tokyo^{*1}
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo^{*2}

Human-driver models for lane changing are complicated than models for car following. We tried to construct simple lane changing models in order to be applied in a microscopic traffic simulator 'KAKUMO'. We separate the model when a vehicle is in car following and free driving, and estimated the parameters of lane changing model in the case with car following using vehicle trajectory data captured by video cameras on highway.

Keyword: ITS, Driver Model, Lane Changing

1. 緒言

自動車交通の分野において、ITS（高度道路交通システム）は、安全性の向上、輸送効率の向上、快適性の向上、環境負荷の低減を目指して推進されている。将来の自動車交通を考える上でこれらの課題の克服は不可避であり、そのための研究開発は極めて重要である。

自動車交通に関する研究を進めるにあたって、現

実の交通における実証実験での検証は実用化を考える上で必要であるが、コストや再現性の面から難しい場合が多い。もし、こうした実験を高い現実性を有する仮想環境内で行うことができれば、実験は低コストで容易になり、研究・技術開発は飛躍的に加速すると考えられる。このような考えから、東京大学ITSセンターでは、複合現実感交通実験スペースを開発し、多目的な実験環境を構築してきた^[1]。こ

の実験環境を利用して，現在さまざまな研究が行われている．

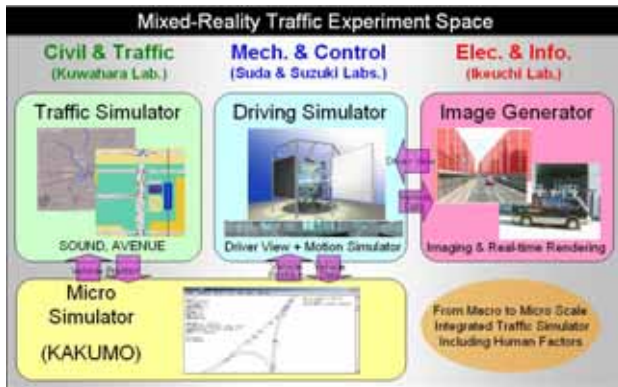


図1 複合現実感交通実験スペース

この実験空間の一部をなすマイクロ交通シミュレータ(KAKUMO)には，車線変更挙動を含む運転行動モデルが組み込まれている．このモデルは他車両との相互作用を取り入れているが，実際に運用するにあたって，必要な精度を有するかの検証は十分でない．一方，高速道高度利用化プロジェクト(AHS)などにおいては，例えばサグ渋滞の解消を目的として，渋滞原因となる車線利用率の偏りを是正するために車線を付加的に増やした場合の効果などについて，検証や影響評価を行う要求がなされている．そのためには，交通流内でのより精緻なシミュレーションを行い，シミュレータにより再現される周辺車両の運転行動を検証することが課題となっている．

2. 戦略・戦術・操作モデル

運転行動のモデルについては過去に様々なモデルが提案されてきたが，前後方向の運転行動についてのものが多い．左右方向についてはGippsら^[2]により研究されているが，本研究では他車両との相互作用を取り入れながらも，比較的シンプルでシミュレータ環境にも取り入れやすい運転行動モデルの同定を目指す．

従来，機械工学の分野では，事故予防や運転負担軽減を目的とした様々な運転支援のためのモデルが研究され，交通工学の分野では，交通量や交通密度などの観点から運転行動モデルが研究されてきた．前者はミクロ的視点からの，後者はマクロ的視点からの研究といえる．しかし，高い現実性を有する運転行動モデルを構築するためには，ミクロ・マクロ両面において現実と整合する交通流内での運転行動を解明することが必要である．そのような観点から，

本研究では，多数の車両が走行する交通状況下の計測データに基づき人間運転行動の同定を行い，ミクロ的視点，マクロ的視点の両方からの評価指標を用いてモデルを構築し，検証を行う．なお，本研究では，運転行動を図2のように戦略，戦術，操作の三段階に分けて考えており^[3]，特に戦術層にかかわる運転行動モデルを構築する．

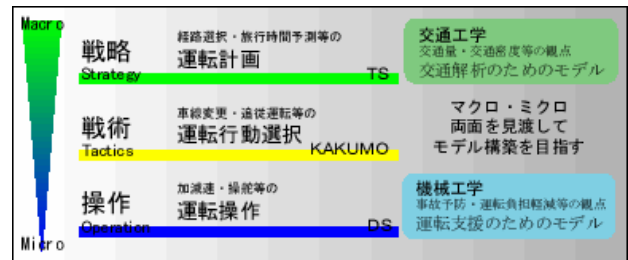


図2 戦略 戦術 操作モデル

3. NGSIM車両軌跡データの利用

3.1. 解析に使用したデータ

米国Federal Highway AdministrationのNext Generation Simulation(NGSIM)より提供されている高速道路車両走行データを用いて，運転行動モデルの検証を行った．このNGSIMデータは，U.S. Highway 101 (Hollywood Freeway) Los Angeles, Californiaの6車線全長約900[m]にわたる車両の時刻，位置，速度，加速度，走行車線，車幅，車長などのデータを7台の固定カメラの画像から解析し，0.1[s]単位で記録したものである．

利用できるデータは16時台と17時台のうち計45分間である．本研究ではそのうち16:00 から16:15までの15分間のデータを利用した．この時間の通過台数は2052台であった^[4]．

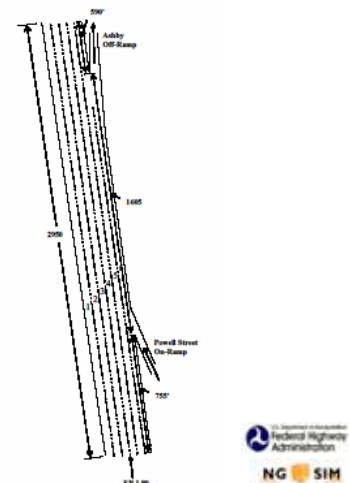


図3 NGSIMデータ収集区間^[4]



図4 NGSIM固定カメラ画像

3.2. NGSIMデータによる前後方向のパラメータ同定

左右方向に取り組む前に、まず前後方向についてNGSIMにおけるデータをもとに車間時間一定モデルのパラメータ推定を行った。用いたモデル式を以下に示す。

$$a(t + \Delta t) = k(X_p(t) - X(t) - T_m \cdot V(t))$$

目標車間時間 T_m 、フィードバックゲイン k は各ドライバーの特性によるものであり、加速度のデータからパラメータの同定を試みた。このような速度調整モデルの同定精度に関しては宮本ら^[5]が検討を行っているが、本研究で対象としている平坦直線道路で混雑した状況ではモデル間の差は小さく、その中でこの車間時間一定モデルが比較的簡便で一致度も高かったことからこれを用いた。図5に加速度実データと車間時間一定モデルにより計算した加速度の時間変化を示す。このドライバーの場合、 $k = 0.12 [s^{-2}]$ 、 $T_m = 2.34 [s]$ であった。

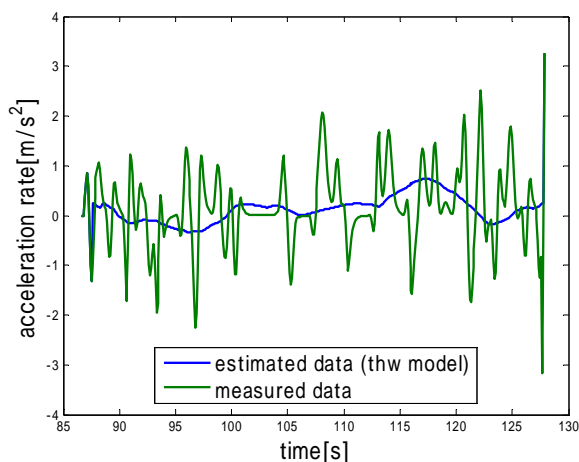


図5 加速度データによる比較

他のドライバーにおいても、実際の加速度データとパラメータ同定したモデルの加速度データを比較すると、大まかな傾向としては合っているものの、個々の数値に注目すると乖離もある。このように位置の二階微分値である加速度で見ると、固定カメラによるデータにおいては粗さが目立ち、計測車で収集したデータに比べて精度が劣る。しかし、図6のように車両の位置の時刻歴を見れば固定カメラによるデータでも推定値と観測値がほぼ一致していることがわかる。

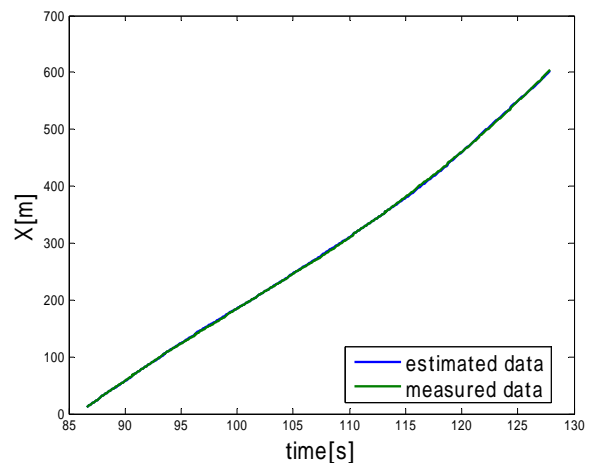


図6 車両位置データによる推定

4. 現行KAKUMOの横方向の車線変更モデル

現在KAKUMOに用いられている運転行動モデルは、図7に示すように左車線変更、右車線変更、追従走行、自由走行の優先順位で運転行動が選択され、それぞれの運転行動のモデル内で、要求、判断、目標点設定、操作というフェーズで真偽が判断されていく構造となっている^[6]。本研究では、そのうち車線変更の特に要求発生構造について着目しモデルの検討を行った。

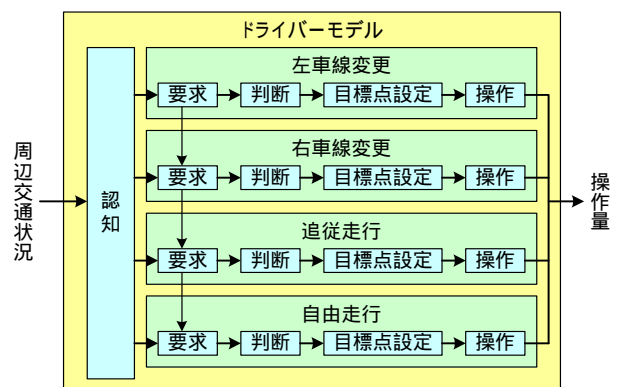


図7 KAKUMOにおけるドライバーモデル^[6]

現行のKAKUMOにおいて車線変更の要求が発生する条件は次に示すとおりである。

- 前方車両の速度が希望速度より遅い
- ストレス値が閾値1.0以上である
- 右車線前方車両がない、または右車線前方車両と同一車線前方車両との速度差が希望速度の1/2以上である

これらの条件がすべて満たされた時に車線変更の要求が発生する。

ストレス値 s は自車の希望速度と実際の走行速度との差に基づき蓄積される量で以下の条件で決まる値である。

$$s(t + \Delta t) = \begin{cases} s(t) + 0.01(V_d - V) & V < 0.1V_d \\ s(t) + 0.001(V_d - V) & 0.1V_d \leq V < 0.5V_d \\ s(t) + 0.0001(V_d - V) & 0.5V_d \leq V < 0.8V_d \end{cases}$$

V_d :希望速度 V :走行速度

ストレス値に基づく要求発生構造は、比較的空いている状況では一旦低速車に追従しないと車線変更をしないため不自然な運転行動になる恐れがある。また、追従走行時も、渋滞時など極端な混雑状況では希望速度に基づいて運転行動を決めているとは考えにくい。現実の運転行動と異なる恐れがある。これらの問題点を解決するため、本研究では自由走行時の車線変更と追従走行時の車線変更とを区別し、それぞれの横方向モデルの検討を行った。

5. 自由走行時の横方向モデルの検討

まず、自由走行下での運転行動としてTTC(Time To Collision)に基づくモデルを検討した。既往の研究により、安全に車線変更を行う場合の相対速度とTTCの関係が明らかにされている^[6]。この結果に基づいてモデルの構築を行った。TTCは次のような式で表される。

$$TTC = \frac{X_p - X}{V - V_p}$$

ここで添字Pは前方車両を示す。ただしTTCは相対速度が0になると値が無限大に発散する扱いにくさを持っている。このためモデルではTTCの逆数値を用いることとした。

$$TTC^{-1} = \frac{V - V_p}{X_p - X}$$

現行KAKUMOの構造を利用するため、追従走行時と同様にストレス値に用いられている構造を利用することとした。自由走行時に前方車両に接近するとTTCの値が徐々に低下する。このTTCの値が前述の相対速度とTTCの値の関係式から算出される閾値を下回るとストレス値に1.0が加算され要求発生の条件の一つを満たすモデルとした。これにより追従走行を経ることなく車線変更要求が発生する構造となる。このモデルの評価、検証については自由走行状態における車線変更挙動のデータが必要であるが、本研究で利用したNGSIMのデータでは比較的混雑した状況であり自由走行のデータが少ないため、これらのデータを実験車走行により収集し、解析を行うことが今後の課題である。

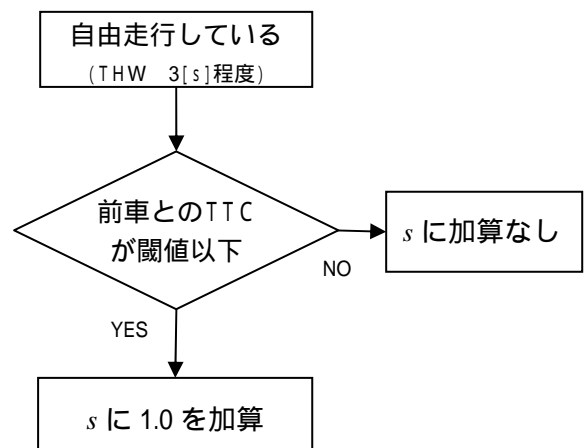


図8 自由走行時の横方向モデルの概念

6. 追従走行時の横方向モデルの検討

6.1. TTCを利用したモデル

次に、追従走行からの車線変更のモデルについて検討した。自由走行時と同様にTTCを基にしたモデルを検討した。ただし、混雑時における車線変更要求の発生要因には隣接車線の影響が含まれると考えられるため、隣車線の前車と、自車との間にTTCの考え方を適用した TTC_R^{-1} を導入した。

$$TTC_R^{-1} = \frac{V - V_{RP}}{X_{RP} - X}$$

添字Rは右隣車線を示す。モデルはKAKUMOに組み込むことを考慮して従来のストレス値の構造を利用する仕組みとした。モデル式を以下に示す。

$$s_r = k \int (TTC^{-1} - TTC_R^{-1}) dt$$

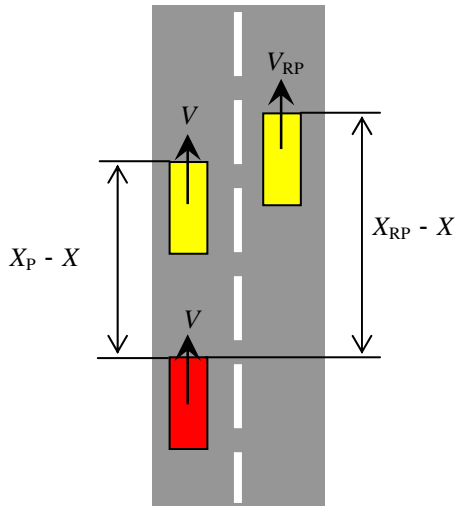


図9 自転車と前方車両の関係

このモデルにNGSIMデータを用いてパラメータ同定を試みた．図10に $k=0.05$ のときの s_T の値の変化を示す．

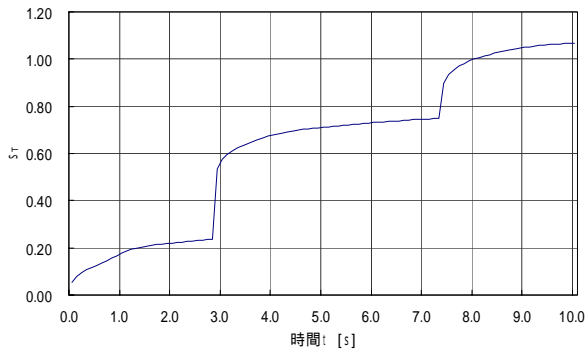


図10 TTCモデルにおける s_T の値の変化

このモデルでは，速い車両に追い抜かれるごとに s_T の値が増えることがわかる．この値が一定値に達すると車線変更の要求が発生すると考えた．しかし，このモデルでは，追い越し車線側の車両と自転車の車頭距離の差を分母に含んでいるため，サンプリングのタイミングによって $X_{RP} - X$ が0に近い値となることがあり，追い抜き時に大きな値が積算されるという問題点がある．

6.2. 先行車両の速度差に基づくモデル

TTCを利用したモデルには先に述べたような問題点があることがわかったため，これにかわるモデルについて検討を行った．自転車からの車間距離については判断の段階で考慮することとし，単純に自転車の走行している車線の先行車と隣接する車線の先行車との速度差を利用することを考えた．モデル式を以下に示す．

$$s_V = k_1(V_{RP} - V_p) + k_2 \int_t^{t+T} (V_{RP} - V_p) dt$$

TTCに基づくモデルと同様にこのモデルについても同じドライバーのデータを用いてパラメータ同定を試みた．積分時間については，パラメータの一つであるが，今回は，あるドライバーの車線変更直後から次の車線変更までの約 10 秒間について検討した．パラメータ値 $k_1 = 0.020$ ， $k_2 = 0.0080$ での s_V の値の変化を図11に示す．

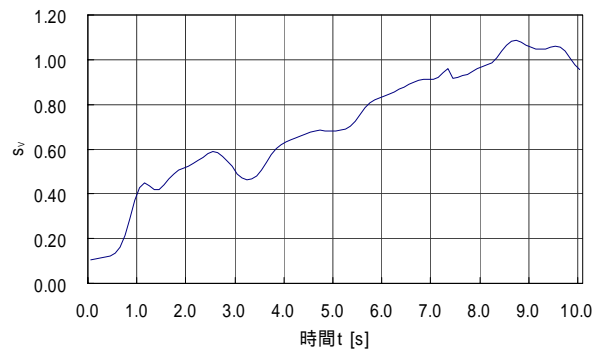


図11 速度差モデルにおける s_V の値の変化

このドライバーは時刻 9.0[s] 付近でハンドル操作を開始している．NGSIMデータからは，判断に要した時間を読み取ることはできないが，判断と操作までの反応時間を約 1[s] として考えると，8[s] 付近で車線変更の要求をしたと考えられる．図11より s_V の値がその付近で閾値 1.0 を超えていることがわかる．

このモデルの妥当性を検証するため，パラメータ同定に用いた区間以外で，ドライバーがモデル通りに車線変更するかどうかをギャップセッションごとに評価した．隣車線の一台の車が自転車を追い抜いてから次の車が自転車を追い抜くまでの時間を T_i として，モデルと実データが同じ車の間に車線変更した場合は T_i に LC_i として1を，異なる場合には0を乗じて T_i の総和で割る．

$$E = \frac{\sum LC_i T_i}{\sum T_i}$$

$$LC_i = \begin{cases} 1: \text{モデルとデータの挙動が一致} \\ 0: \text{モデルとデータの挙動が不一致} \end{cases}$$

複数人のドライバーについてそれぞれ調整したパラメータを用いて算出したところ E の平均値は 0.78 という結果が得られた．

7. まとめと今後の課題

本研究では、様々な交通現象の解明と解決のためにより精緻な交通シミュレーションを実現することを目指し、複合現実感交通実験スペースへの実装を目的として、横方向運転行動モデルの追従走行時と自由走行時とに分けて考えモデル化を行った。

追従走行時については、同一車線前方車両と右車線前方車両との速度差を用いたモデルを考え、固定カメラデータを利用してパラメータの同定を行った。

自由走行時については、前方車両とのTTCの値が閾値を下回ることによって車線変更要求発生条件となるモデルを考えた。

今後は特に自由走行時モデルについて、実道走行試験と固定カメラからのデータを収集し、ミクロ面でのモデルの検証を行うことを考えている。これらの結果を踏まえて、図12のようにKAKUMO上にデータ収集区間の道路形状を再現し、追従・自由走行両方のモデルをKAKUMO上で動作させ、ミクロだけではなくマクロデータとの照合をして検証を行う予定である。

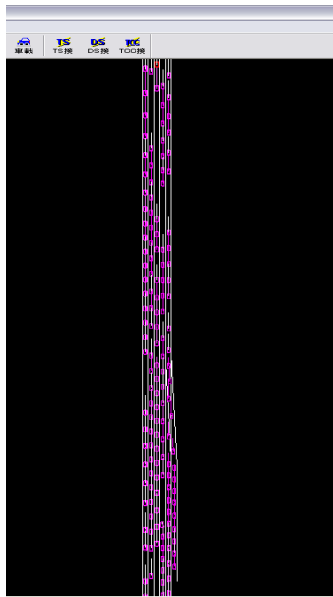


図12 KAKUMOで再現した
NGSIMデータ収集区間

参考文献

- [1]池内克史他, 産学官連携「サステイナブルITS」プロジェクト, 第2回ITSシンポジウム 2003 Proceedings, p447-452(2003)
- [2]P.G.Gipps, A Model for The Structure of Lane-changing Decisions, Transpn.Res-B Vol.20B No.5, p403-414(1986)
- [3]Michon J-A, The new driver. Human factors in transport research, Academic Press(1980)
- [4]Cambridge Systematics, Inc, NGSIM I-80 Data Analysis (4:00p.m. to 4:15p.m.) (2005)
- [5]宮本秀樹他, 速度調整操作モデルにおけるドライバー特性の解析, 自動車技術会学術講演会 2006 年秋季大会前刷集 116-06, p11-14(2006)
- [6]加納誠他, ドライバー挙動モデルの開発, 第4回ITSシンポジウム 2005Proceedings, p251-256(2005)
- [7]若杉貴志, ドライバ特性から見たSOWSの警報タイミングに関する検討, 自動車研究第23巻第11号, p 23-26(2001)
- [8]若杉貴志, 前方回避支援システムの制御開始タイミングに関する考察, 自動車研究第 27 巻第 10 号, p 53-56(2005)