

大規模マルチエージェント交通シミュレーションのための 運転者のモデル化手法の提案

Modeling Individual Driving Behavior for Multiagent Traffic Simulation

田中 祐介 中島 悠 服部 宏充 石田 亨
Yusuke Tanaka Yuu Nakajima Hiromitsu Hattori Toru Ishida

京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University

Multiagent-based traffic simulation, which can explicitly distinguish between a wide variety of each decision-making entities, appear to be the best approach to reproducing and analyzing diverse traffic situations. In order to model diverse traffic situations, such as vehicular traffic with significant numbers of senior drivers, it is essential to model the individuality of drivers; almost all previous works assumed the uniform driver model. In order to accomplish the key issue, we propose a novel methodology that can model each driver's individual behaviour. The proposed approach uses a 3D virtual driving simulator to collect realistic driving log data from human subjects. We extract driving rules from the log data by interviewing each subject. We then construct unique driving models, which can explain each driver's behaviour, by the application of hypothetical reasoning. In this paper, we show that our proposed method can generate driving models which represent different types of driving styles.

1. はじめに

実世界における問題を模擬し、問題の理解、および解法の検討手段として、マルチエージェントシミュレーションが有望視されている。具体的な問題として、都市交通問題がある。例えば、社会の高齢化は、都市交通に変化をきたすと考えられるが、実際にどのような変化や問題が発生するか予測することは極めて困難である。本研究では、この課題に対し、大規模マルチエージェントシミュレーションによる接近を試みる。

筆者らは、大規模エージェントサーバ *Carribbean* を用いて [Yamamoto, G. 01]、大規模マルチエージェント交通シミュレーションの実現を試みている。現実的な交通シミュレーションを実現するために、実世界の運転者（車両）の挙動を再現するモデル化技術の開発を行っている。ここでは、特徴的な運転操作の抽出により、運転者の個性を表現する事が課題となる。交通問題に注目したマルチエージェントシミュレーションに関する従来の研究の多くは、均質的なエージェントを仮定している [Balmer, M. 04]。しかし実際には、運転操作の特徴は様々であり、また運転者の性質変化に伴う都市交通の変容を検証するには、運転者の個性の表現は不可欠である。本論文では、人間の運転操作のログデータを基に、個々に特徴的な操作を再現可能な、運転者モデルの構築手法を提案する。

本論文では、運転者モデルを優先順序付きの操作ルールの集合と定義する。各操作ルールは、任意の状況下で運転者が何を観測し、どのような操作を行ったかを表す。各運転者の性質の相違は、用いる操作ルールと、ルール間の優先順序の違いとしてモデル化される。本論文では、特に以下の課題に注目する。

1. ドライビングシミュレーションのログデータからの操作ルールの抽出
様々な性質を持った運転者モデルを獲得するために、ドライビングシミュレーションで得られた被験者の走行ログデータから操作ルールを抽出する。

2. 個々の被験者の振舞いを説明する運転者モデルの獲得
運転者モデルは抽出した操作ルールから成る。ドライビングシミュレーションにおける各被験者の振舞いを説明可能な運転者モデルを獲得する。

上記の課題に対し、運転操作ログを基に行ったインタビュー結果から操作ルールを抽出し、次に、仮説推論に基づくモデル化手法 [Murakami, Y. 05] を適用し、運転者モデルを獲得できる事を示す。具体例として、提案手法により、人間の異なる運転パターンを反映した運転者モデルが獲得できた事を示す。

2. インタビューによる操作ルールの抽出

2.1 運転者のモデリングプロセス

運転者モデルの構築は以下の4ステップから成る。

1. ドライビングシミュレータ上でのシミュレーション実施
3次元の仮想道路環境を提供するドライビングシミュレータを利用し、実際の運転操作ログを得る。
2. 観測事象の記述
シミュレーションの過程で被験者が観測した環境を、述語論理に基づいて形式的に記述する。
3. 被験者へのインタビュー
シミュレーションで観測された振る舞いについて、その理由・動機を明らかにし、ルール化する。
4. 仮説推論 [Poole, D. 87] に基づくモデル構築
操作ルールと観測事象を基に、被験者のシミュレーションでの振る舞いを説明可能なモデルを構築する。

ドライビングシミュレーションのログデータ解析、および観測事象やインタビュー箇所の選定は、交通工学の知見を持つ研究者の協力の下で行う。以下、各ステップの詳細を述べる。

- 2.2 ドライビングシミュレータによる運転データの獲得
個々の運転者の実際的なモデルを構築するために、様々な状況下での運転者の振る舞いのデータを収集しなければならない。そこで本研究では、図1に示すような、大画面に仮想の道



図 1: 3次元仮想空間ドライビングシミュレータ

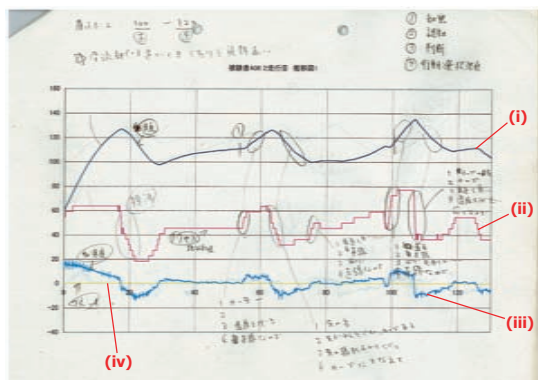


図 2: 走行ログデータのグラフの例。(1),(2),(3),および(4)は、それぞれ、速度、加速度、アクセルの使用量、およびブレーキの使用量を表している

路環境を投影し、実物の自動車の運転席上で操作が可能、3次元ドライビングシミュレータを用いた^{*1}。本シミュレータの利用により、速度、加速度、およびアクセルとブレーキの使用量について、実世界の道路の走行時に近いデータが得られる。図2は、実際に被験者から得られたログデータである。本データは、図3に示す道路線形を持つ、11kmの仮想の道路を走行した際の速度、加速度、およびアクセルとブレーキの使用量の推移を示している。本論文では、モデル化のために以下のデータを利用する。

- 1) 時刻 (sec) シミュレーション開始時からの経過時間
- 2) 走行距離 (km) 走行開始地点からの距離
- 3) 速度 (km/h) 車両の速度
- 4) アクセル・ブレーキ使用量 (%) アクセル・ブレーキペダルの踏み込み位置。全く踏込んでいない状態を0%とし、最大に踏込んだ状態を100%とする。

2.3 被験者へのインタビュー

インタビューの目的は、領域知識となる操作ルールを被験者から獲得することである。ここでは、被験者がシミュレーション時の自分の運転行動を思い出しやすくするために、シミュレーション実行時のスクリーンショット、および図2に示すグラフを用いた。インタビューに先立って、交通工学の視点

*1 本研究では、大阪大学大学院工学研究科飯田研究室のドライビングシミュレータを利用した。

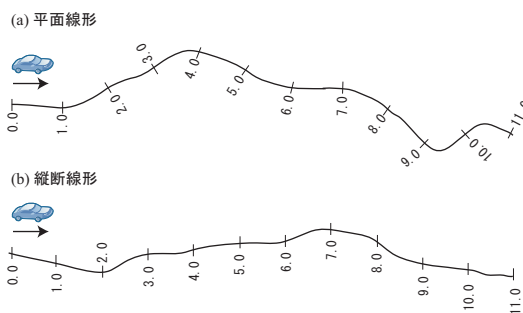


図 3: シミュレーションの道路線形

RuleID	操作ルール
rule ₁	希望巡航速度を超えていれば、アクセルを放す
rule ₂	希望巡航速度を下回ってれば、アクセルを踏込む
rule ₃	直線を走行してれば、アクセルを踏込む
rule ₄	直線を走行していて、かつ、希望巡航速度を下回ってれば、アクセルを踏込む
rule ₅	カーブが前方に見えてれば、アクセルを放す
rule ₆	カーブを走行してれば、アクセルを放す
rule ₇	緩いカーブを走行してれば、アクセルを踏込む
rule ₈	カーブの初めを走行してれば、アクセルを放す
rule ₉	カーブの終わりを走行してれば、アクセルを踏込む
rule ₁₀	上りが前方に見えてれば、アクセルを踏込む
rule ₁₁	下りが前方に見えてれば、アクセルを放す
rule ₁₂	上りを走行してれば、アクセルを踏込む
rule ₁₃	下りを走行してれば、アクセルを放す
rule ₁₄	上りの終端を走行してれば、アクセルを放す

表 1: 被験者から抽出した主な操作ルール

から、速度、およびアクセル使用量の特徴的な変化をログデータから読み取り、インタビュー箇所としてピックアップした。例えば、図2では、円で囲まれた箇所が特徴的な挙動を示しており、インタビューすべき箇所としてピックアップされている。インタビューでは、(1) 注視動機・注視対象、(2) 認知内容、(3) 評価・感情経験、および(4) 行動選択・決定理由の4点について、被験者に質問した。図2には、インタビュー結果も付記されている。例えば、グラフの中央の地点では、各質問に対して、被験者から以下のような回答を得た。

- 1) 道路の前方
- 2) カーブに接近しつつある
- 3) 道路の先の線形が見えづらい
- 4) カーブに備えるため

インタビュー結果とグラフの分析から、ある状況下で、被験者がどのような運転操作をとるか示す情報(操作ルール)が得られる。表1に、運転者から抽出した主な操作ルールを示す。

2.4 観測事象の記述

ログデータに基づき、観測事象を述語論理で記述する。本論文では、交通工学の研究者との議論を通して、運転者の行動に影響を与える可能性があるとして判定した観測事象を選定した。その結果得られた述語を表2に示す。これらの述語は、操作ルールの形式的記述にも用いる。すなわち、観測事象と操作ルールの記法を統一する。

述語	意味
$Straight(x)$	x は直線である
$Curve(x)$	x はカーブである
$Uphill(x)$	x は上りである
$Downhill(x)$	x は下りである
$On(x, y)$	x 上を y は走行している
$Start(x, y)$	x の始端を y は走行している
$End(x, y)$	x の終端を y は走行している
$InSight(x, y)$	y は x が前方に見えている
$SharpCurve(x)$	x カーブが急である
$GentleCurve(x)$	x カーブが緩やかである
$OverDesiredSpeed(x)$	x は希望巡航速度を超えている
$UnderDesiredSpeed(x)$	x は希望巡航速度を下回っている
$OverCurveSpeed(x, y)$	y はカーブ x を曲がることのできない速度である
$Accelerating(x)$	x は加速している
$Decelerating(x)$	x は減速している
$KeepAccel(x)$	x はアクセルを一定に保っている
$StepOnAccel(x)$	x はアクセルを踏んでいる
$ReleaseAccel(x)$	x はアクセルを放している
$Brake(x)$	x はブレーキを踏んでいる

表 2: 定義した主な述語

3. 仮説推論に基づく運転者モデルの構築

3.1 操作ルール

操作ルールは条件 (if 部) -動作ルール (then 部) として記述する。条件部には「被験者の観測事象」、動作部には「被験者の運転操作」を記述する。被験者は、条件部の全てのリテラルが充足するときに動作部の操作を行う。具体的な操作ルールの記述例を例 1 に示す。

例 1 操作ルールの記述 $\text{if } \text{OverDesiredSpeed}(\text{self}) \text{ then } \text{ReleaseAccel}(\text{self})$

この操作ルール例は「被験者の車両が希望巡航速度を超えていれば (OverDesiredSpeed), アクセルを放す (ReleaseAccel)」事を表している。

3.2 観測事象

観測事象はログデータから時系列に沿って、各時刻ごとに述語論理で記述する。観測事象には道路の形状, 速度, およびアクセル操作などを記述する。観測事象の記述例を例 2 に示す。

例 2 観測事象の記述

$\text{Curve}(\text{Curve}_1) \wedge \text{InSight}(\text{Curve}_1, \text{self}) \wedge \text{Uphill}(\text{Uphill}_1) \wedge \text{On}(\text{Uphill}_1, \text{self}) \wedge \text{Accelerating}(\text{self}) \wedge \text{OverDesiredSpeed}(\text{self}) \Rightarrow \text{Do}(\text{ReleaseAccel}(\text{self}))$

これは、被験者から Curve_1 が見え (InSight), Uphill_1 上を走行中であり (On), 加速中で (Accelerating), かつ希望巡航速度を超えている (OverDesiredSpeed) 場合に、次の時刻でアクセルを放した時の観測事象を示している。なお、Do は操作の実行を示す述語である。

3.3 運転者モデル

運転者モデルは、被験者が用いた操作ルールの集合と、操作ルール間の優先順位によって定義される。ある環境において、操作ルール集合の中から、条件部が満たされたルールが適用

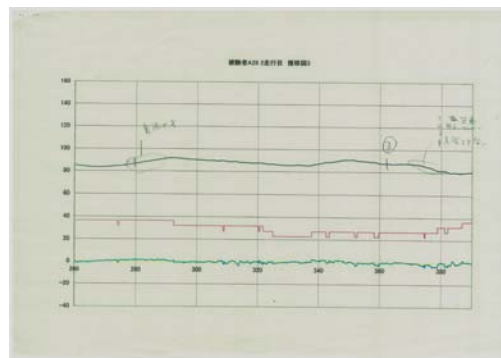


図 4: 希望巡航速度型の運転者のログデータ

される。条件部が満たされる操作ルールが複数存在する場合、優先順位が最も高いルールを選択する。運転者モデルの具体例を例 3 に示す。

例 3 運転者モデルの記述

$$P = \{rule_1, rule_2, rule_3\}, \preceq = \{rule_2 \preceq rule_1\}$$

このモデルは、被験者が $rule_1, rule_2$, および $rule_3$ を用いること、また、 $rule_2$ より $rule_1$ の方が優先順位が高いことを表している。従って、 $rule_1$ と $rule_2$ の条件部が同時に満たされた場合は、 $rule_1$ を用いる。

仮説推論に基づくモデルの構築アルゴリズムの概要を以下に示す。詳細は [Murakami, Y. 05] を参照されたい。

1. 時刻 $t-1$ における運転者モデル $\langle P, \preceq \rangle$ を入力
2. 時刻 t において、被験者が $t-1$ と同様の操作をした場合、 $\langle P, \preceq \rangle$ を返す
3. 時刻 t において、被験者が新たな操作をした場合、その状況下で適用可能、かつ操作を説明可能な操作ルール p が、 P から選択される (適切な操作ルールが P に存在しない場合はステップ 4 へ)。 p には他の適用可能なルールの中で最高の優先度を付与され、アルゴリズムは更新されたモデル $\langle P, \preceq' \rangle$ を返す
4. 時刻 t の状況下で適用可能、かつ操作を説明可能な操作ルールを p' , 操作ルール集合全体から選択する。 p' は他の適用可能なルールの中で最高の優先度を付与され、アルゴリズムは更新されたモデルを返す。適切なルールが無い場合はアルゴリズムは "fail" を返す

4. 運転者モデルの獲得例

本章では、提案手法によって獲得された運転者モデルの具体例を示す。ここでは、異なる 2 つの運転操作パターンをモデル化の対象として考える。図 4, および図 5 に、それぞれのパターンのログデータ例を示す。図 4 は、希望巡航速度の維持を重視するパターンの運転者 (希望巡航速度型) の速度データを示している。一方、図 5 は、道路線形への対応を重視するパターンの運転者 (道路線形型) の速度データを示している。前者では、走行速度に急激な増減がみられず、希望巡航速度の 85km/h 付近での速度を維持しているのに対して、後者では、道路線形に応じて、速度に大きな変化がみられる。

各々のパターンを示す被験者のログデータに対して、本論文の提案手法を適用して得られた運転者モデルの例を表 3 に

ID	運転者モデル
h_{DS01}	$P = \{rule_1, rule_3, rule_5, rule_6, rule_7, rule_8, rule_{12}, rule_{14}\}$ $\preceq = \{rule_5 \preceq rule_3, rule_{14} \preceq rule_3, rule_3 \preceq rule_1, rule_6 \preceq rule_1, rule_7 \preceq rule_1, rule_8 \preceq rule_1, rule_{14} \preceq rule_1\}$ (希望巡航速度: 85km/h)
h_{DS02}	$P = \{rule_1, rule_3, rule_6, rule_7, rule_{12}, rule_{14}\}$ $\preceq = \{rule_6 \preceq rule_{12}, rule_7 \preceq rule_{12}, rule_{14} \preceq rule_{12}, rule_3 \preceq rule_1, rule_{12} \preceq rule_1\}$ (希望巡航速度: 115km/h)
h_{RS01}	$P = \{rule_1, rule_3, rule_6, rule_7, rule_{10}, rule_{12}, rule_{14}\}$ $\preceq = \{rule_{12} \preceq rule_3, rule_1 \preceq rule_3, rule_7 \preceq rule_6, rule_{12} \preceq rule_6, rule_{14} \preceq rule_6, rule_1 \preceq rule_6, rule_6 \preceq rule_{12}, rule_7 \preceq rule_{12}, rule_{10} \preceq rule_{12}, rule_{14} \preceq rule_{12}, rule_1 \preceq rule_{12}\}$ (希望巡航速度: 105km/h)
h_{RS02}	$P = \{rule_2, rule_3, rule_6, rule_7, rule_8, rule_{12}, rule_{14}\}$ $\preceq = \{rule_{12} \preceq rule_3, rule_2 \preceq rule_3, rule_7 \preceq rule_6, rule_{12} \preceq rule_6, rule_{14} \preceq rule_6, rule_6 \preceq rule_7, rule_8 \preceq rule_7, rule_{12} \preceq rule_7, rule_2 \preceq rule_7\}$ (希望巡航速度: 85km/h)

表 3: 獲得した運転者モデルの例

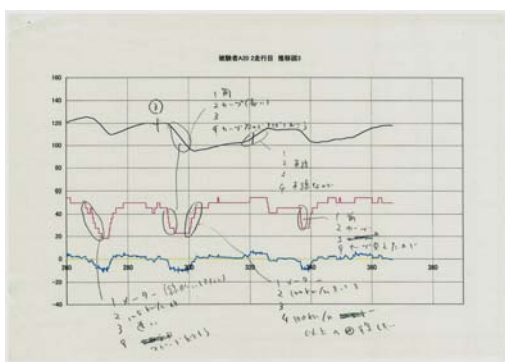


図 5: 道路線形型の運転者のログデータ

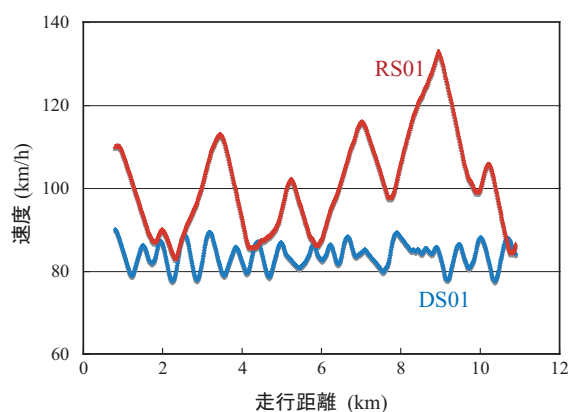


図 6: h_{DS01} と h_{RS01} のエージェントの速度のグラフ

示す. h_{DS01} , h_{DS02} は希望巡航速度型の被験者から得られたモデルであり, h_{RS01} , h_{RS02} は, 道路線形型の被験者から得られたモデルである. 希望巡航速度型のモデルでは, 希望巡航速度に関連するルール (e.g. rule1, rule2) の優先順位が高く, 一方, 道路線形型のモデルでは, 道路線形に関連するルール (e.g. rule3, rule6) の優先順位が高くなっており, 各々の運転パターンの特徴がモデル内に現れている.

図 6 は, 被験者が走行した図 3 と同様の仮定の道路上を, h_{DS01} と h_{RS01} のモデルに基づくエージェントが走行した際の速度の遷移を表している*2. 図 6 に示す通り, h_{DS01} に基づくエージェントは, 常に希望巡航速度 (85km/h) 付近で走行している. 一方, h_{RS01} に基づくエージェントの速度には大きな変化が見られるが, 例えば, 2km から 3km の間の速度変化は h_{RS01} に含まれるルールと道路線形によって説明できる. 図 3 に示すように, 道路線形の 2km から 3km までは「上り」である. 運転者モデル h_{RS01} は $rule_{12}$ を含むため, エージェントはこの上り区間でアクセルを踏み込み, かつ $rule_1 \preceq rule_{12}$ より, エージェントは希望巡航速度 (105km/h) を超えてもアクセルを踏み続ける. その結果, 図に示すような急激な速度の上昇が発生する事になる.

5. おわりに

本論文では, 異なる運転操作の特徴を表現する運転者モデルを構築するための方法を提案した. 本提案により, 従来の均

*2 非現実的な速度を避けるため, 速度の上限と下限を設定した

質的なモデルに基づく交通シミュレーションではなく, 個々の運転特性を反映した, 現実的なマルチエージェント交通シミュレーションを実現できる. 今後の課題として, 学習による運転者モデルの洗練化機能の実現がある.

参考文献

- [Balmer, M. 04] Balmer, M., , Cetin, N., , Nagel, K., , and Raney, B., : Towards Truly Agent-Based Traffic and Mobility Simulations., *Proc. of AAMAS-2004*, pp. 60–67 (2004)
- [Murakami, Y. 05] Murakami, Y., , Sugimoto, Y., , and Ishida, T., : Modeling Human Behavior for Virtual Training Systems., *Proc. of AAI-2005*, pp. 127–132 (2005)
- [Poole, D. 87] Poole, D., , Goebel, R., , and Aleliunas, R., : Theorist: A Logical Reasoning System for Defaults and Diagnosis, in *The Knowledge Frontier*, pp. 331–352, Springer-Verlag (1987)
- [Yamamoto, G. 01] Yamamoto, G., and Tai, H., : Performance Evaluation of An Agent Server Capable of Hosting Large Numbers of Agents, *Proc. of AGENTS-2001*, pp. 363–369 (2001)