

拡張セルオートマトンモデルを用いた自動運転車の混在下における交通流解析

An Analysis of Mixed Traffic Flow of Autonomous and Non-autonomous Vehicles Using Extended Cellular Automaton Models

情報工学専攻 醍醐 優志
Yushi DAIGO

概要

近年、自動車の普及により道路交通問題が多発している。自動運転車は人間に比べて安全かつ円滑な運転を実現できると期待されている。本研究では、従来車と自動運転車の混在環境における交通流量の変化を確認することを目的とした交通流の解析を行う。また、複数車線で交通流量が多い高速道路上を走行する車の挙動を数理モデルとして再現するため、個々の車の挙動を再現することのできるセルオートマトンモデルを用いて、複数車線や合流部に対応できるモデルを提案し、複数車線の交通流の解析を行う。

キーワード: セルオートマトンモデル, 自動運転車, 交通渋滞, 高速道路。

1 はじめに

近年、自動車保有台数の増加により交通渋滞や交通事故などの道路交通問題が多発し社会問題になっている。大都市周辺では特に高速道路の渋滞が頻繁に発生しており、渋滞の緩和を目的として、道路の新設、増設が実施されているが、交通量の増加に追いついていないのが現状である。また、近年は自動運転車の増加によって、人間の運転と比べ、より安全かつ円滑な運転を実現することが期待されており、従来車と自動運転車が混在する環境が増えることが予想される。

本研究では、東名高速道路下り車線の東名川崎 IC 付近から伊勢原 JCT 付近までの区間を対象に、自動運転車の普及過程の予測を目的とした交通流の解析を行う。従来車や自動運転車のモデル化には、マイクロモデルの一つであるセルオートマトン (CA) モデルを用いる [5]。従来車と自動運転車の挙動を再現することで従来車と自動運転車の混在環境下において、自動運転車の割合によって交通流量の増減を確認し、渋滞緩和の条件を見つけることが目的である。また、実際の高速道路の状況を再現するために複数車線や合流部に対応できるモデルを

提案し、複数車線の交通流の解析を行う。

2 交通流モデル

2.1 交通流の解析

本研究で扱う従来車と自動運転車の特徴をまとめる。従来車は、自車の情報と直前の先行車の情報を持ち、先行車の情報から挙動を予測して走行する。また、運転手の判断による減速を考慮した速度の揺らぎも従来車の特徴である。自動運転車は、直前の先行車だけではなく通信可能な台数分の情報を持ち、それらの情報から挙動を予測して走行する。自動運転車の場合は、運転手の判断が介入することはないので速度の揺らぎが発生しない。

また、渋滞が発生しやすい高速道路の特徴として、交通量が多く、複数車線であること、ジャンクション (JCT) やインターチェンジ (IC) の合流部であることが挙げられる。本研究では、上記の特徴を全て持ち、渋滞が頻発する海老名 JCT 付近を対象に、実環境に近い状況を再現し、複数車線や合流部での交通流の解析を行い、交通渋滞が起りやすい区域での渋滞を緩和する対策を見つける。

2.2 交通流のセルオートマトンモデル

渋滞学の研究を進めていく中で欠かせないのが数理モデルである。その中でも現在最もよく用いられているモデルの一つがセルオートマトン (CA) モデルである [5]。道路はすごろくのように各セルに区切られているものとする。車は前が空いていれば進むことができる自己駆動という特徴と、前が詰まっていると進めない排除体積という効果をもつため、これらを考慮して車の動きを考えると、最も単純なルールは前が空いていれば 1 セル進むで与えられる。

上記のルールに従って車を前に動かすと図 1 のようになる。現在の時刻を t として、時間経過の様子を表現する。たとえば、時刻 t で前方 (右隣) に他の車がいる場合、排除体積効果によって動くことができず、次の時刻 $t+1$ でも同じ場所にどまっている。また、渋滞クラスタが後方へ移動するという現実の現象を再現でき

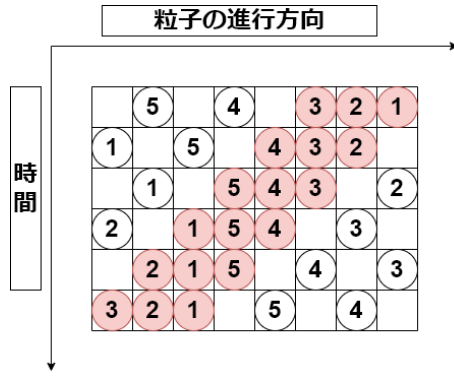


図1 CAモデルの例

Algorithm 1 NS モデル

Accelerate

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, v^{\text{limit}})$$

Maximize Velocity

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t+1), g_i)$$

Decelerate

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t+1) - 1, 0) \text{ with probability } p$$

Move

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

る。このルールが車の渋滞を再現する最も単純な数理モデルとなっている。

2.3 Nagel-Schreckenberg モデル

Nagel-Schreckenberg(NS) モデルは CA モデルに速度の概念を拡張するモデルである [3]。NS モデルの車 i の走行ルールを Algorithm1 に記す。時刻 t において、車 i の位置 $x_i(t)$ 、速度 $v_i(t)$ 、車間距離 g_i 、制限速度 v^{limit} を入力して上から順番に走行ルールを実行し、次の時刻の車 i の位置 $x_i(t+1)$ を出力する。

減速確率を p ($0 \leq p \leq 1$) とする。減速確率を作ることで、車の運転手による判断で減速した場合の速度の揺らぎを再現している。NS モデルでは前方のセルが空いていれば前に進み、追い越しをせず、前に車があれば減速して停止するという単純な車の挙動を再現している。

拡張 NS(ExNS) モデルは、NS モデルの運転ルールに先行車 $i+1$ の車間距離 g_{i+1} と先行車の速度 $v_{i+1}(t)$ を導入し、先行車の予測速度 v_{i+1}^{pred} を計算し、それを用いて車 i の速度 $v_i(t+1)$ を求めることで、先行車の情報を考慮した運転ルールを導入したモデルである [4]。

拡張 NS モデルの走行ルールを Algorithm2 に示す。Algorithm2 により、従来車の挙動をモデルで再現することが可能になる。

Algorithm 2 拡張 NS モデル

Maximize Velocity

$$v_{i+1}^{\text{pred}} = \max(\min(v_{i+1}(t), g_{i+1} - 1, v^{\text{limit}} - 1), 0)$$

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t+1), g_i + v_{i+1}^{\text{pred}})$$

Algorithm 3 車線変更を可能とする速度の条件

$$V_i = \min\{v_i(t) + 1, v^{\text{limit}}\}$$

$$\text{if } V_i(t) > v_{i\text{back}}^{\text{pred}} - d_{i\text{back}} \text{ and } V_i(t) < v_{i\text{front}}^{\text{pred}} + d_{i\text{front}}$$

then

速度 $V_i(t)$ で車線変更可能

end if

Algorithm 4 車線変更を可能とする速度の条件

$$V_i = \min\{v_i(t) + 1, v^{\text{limit}}\}$$

while $V_i \geq \min\{v_i(t) - 1, 1\}$ **do**

$$\text{if } V_i(t) > v_{i\text{back}}^{\text{pred}} - d_{i\text{back}} \text{ and } V_i(t) < v_{i\text{front}}^{\text{pred}} +$$

$d_{i\text{front}}$ **then**

速度 $V_i(t)$ で車線変更可能

break

end if

$$V_i = \max\{V_i - 1, 0\}$$

end while

2.4 自動運転車モデル

NS モデルに車車間の通信機能を搭載した Generalized NS(GNS) モデルを用いて自動運転車の挙動を再現する [1]。拡張 NS モデルでは直前の先行車 1 台のみの挙動を予測していたが、GNS モデルは先行車が通信できる距離に存在し、通信可能台数以内であれば何台でも挙動予測ができるモデルである。自動運転車では運転手の判断による減速がないため、速度の揺らぎである減速確率 p を $p = 0$ とする。

3 複数車線の交通流モデル

3.1 3車線モデル

高速道路の中でも渋滞が頻発している区間は複数車線であることが多い。そのため、実際の高速道路の中でも渋滞が頻発している区間を改善するために、車線変更ルールを導入する必要がある [2]。

文献 [2] によると、車線変更ルールでは走行している車線上で加速、あるいは最大制限速度で走行できない場合に車線変更を考える。車線変更したときに次の時刻で衝突しなければ車線変更を行う (Algorithm3)。

3.2 合流モデル

車線変更モデルを拡張し、高速道路上における一般道やサービスエリアからの車の合流を再現するモデルを提案する。合流部と走行車線間、車線数が減少する直前、合流部に向かうための車線変更は以下の条件で行う。

車線変更を動機付ける条件

合流を希望している車のみ車線変更する

車線変更を可能とする条件

現在の速度から 1 加速した速度, 現在の速度, 1 減速した速度の順番で車線変更を試みる (Algorithm4)。車線変更の際に次の時刻で衝突しなければ車線変更を行う。

4 海老名 JCT 付近の自動車走行シミュレーション

4.1 シミュレーションの環境設定

本研究では、東名高速道路の東名川崎 IC から伊勢原 JCT までを対象として自動車走行シミュレーションを行う。対象とする道路のイメージを図 2 に示す。

本研究で定めた、シミュレーションの設定は以下の通りである。1 セル = 7 m とし、シミュレーションで扱う道路の長さを 4956 セル、制限速度 v^{limit} を $v^{\text{limit}} = 5$ セル/秒とする。道路の 1 セルに最大 1 台の車が存在し、道路上にはランダムに車を配置する。本研究の環境では、横浜町田 IC から綾瀬 IC までの区間で車線数が増加する。したがって、0 - 2499 セルの範囲内で車線数を 2 車線、2500 - 4956 セルの範囲内で車線数を 3 車線に設定する。

本研究では従来車のみ、自動運転車のみ、従来車と自動運転車が混在している環境の 3 つのパターンで実験を行った。さらに減速確率 p に関して、 $p = 0$ と $p = 0.1$ の場合の 2 パターンで実験を行った。



図 2 東名高速道路のイメージ

4.2 従来車のシミュレーション結果

速度の揺らぎを考慮した減速確率 p を $p = 0.1$ 、合流を希望する車の割合 p_{conf} を $p_{\text{conf}} = 0.1$ と設定する。各区間における交通流量 q を図 3 に示す。

減速確率 p が $p = 0.1$ の場合、密度が 0.2 付近までは交通流量 q が増加している。交通量 q が最大まで増加したときの密度のことを臨界密度と呼び、この密度以上の場合は交通量 q が減少する。臨界密度付近で見ることのできる交通量に差がある相はメタ安定相であり、車線変更や速度の揺らぎによる速度の減少によって自由走行相から渋滞相に相転移することで交通量の減少や交通渋滞が発生する。交通流の基本図に現れる 3 つの相 (自由走行相・渋滞相・メタ安定相) を全て再現できているため、本研究で提案しているモデルは実際の交通流に近い挙動を再現できていると言える。

4.3 自動運転車のシミュレーション結果

通信可能台数 n を $n^{\text{com}} = 1, 2, 3$ 、合流を希望する車の割合 p_{conf} を $p_{\text{conf}} = 0.1, 0.5$ と設定する。各区間における交通流量 q を図 4、図 5 に示す。

従来車の交通流量 q と比較すると、臨界密度の大きさは従来車と同じであるが、自動運転車の交通流量 q は増加していることが分かる。また、従来車と比べてメタ安定相が大きくなっている。車車間通信により、速度の揺らぎが起こるまでの時間が長くなり、走行速度が維持されることでメタ安定相が大きくなると考えられる。しかし、車線変更や合流による走行速度の低下が大きく、通信台数が増加しても交通量は増加しない。

合流を希望する車の割合で比較すると、希望する車の割合が大きくなっても交通量に変化が見られないことが分かった。通信機能を搭載することで走行速度の低下を防ぐことができるためだと考えられる。

4.4 混在環境でのシミュレーション結果

合流を希望する車の割合 p_{conf} を $p_{\text{conf}} = 0.1$ 、通信可能台数 $n^{\text{com}} = 1, 3$ 、混在率を 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 と設定

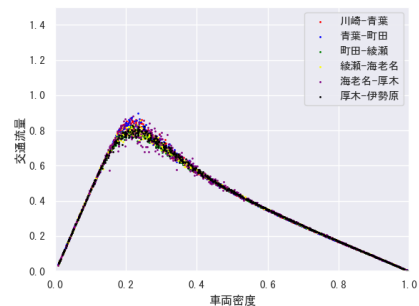


図 3 拡張 NS モデルの基本図

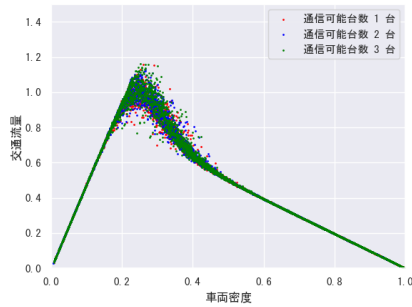


図4 GNSモデル ($p_{\text{conf}} = 0.1$) の基本図

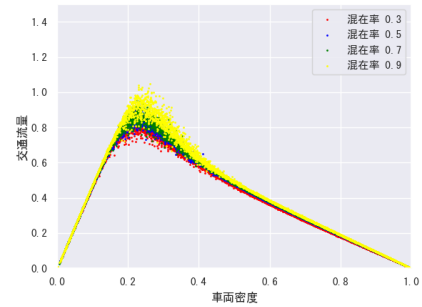


図6 混在モデル (通信可能台数 1 台) の基本図

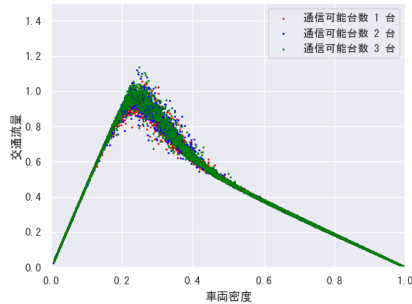


図5 GNSモデル ($p_{\text{conf}} = 0.5$) の基本図

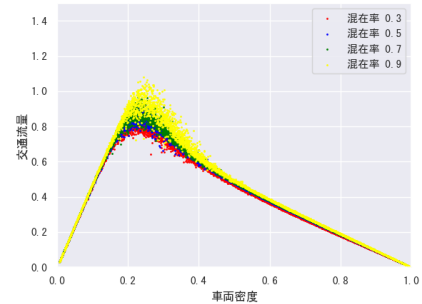


図7 混在モデル (通信可能台数 3 台) の基本図

する。各区間において、従来車と自動運転車が混在している環境での交通流量 q を図6, 図7に示す。

従来車と自動運転車の全体の交通流量と比較すると、混在率が上がるにつれて交通流量が増加していることが分かる。混在率が0.5までは従来車の交通流量と似たような傾向であるが、混在率が0.7以上になると自動運転車の交通流量と似たような傾向にある。交通流の中に通信が出来ない従来車が混在していることで予測速度が低下し、交通流量が増加しないと考えられる。また、他のモデルと同じように通信台数が増加しても交通量は増加しないことが分かった。

5 結論

本研究では、高速道路と一般道路の合流を行う車線における車線変更モデルを提案し、東名川崎ICから伊勢原ICまでの複数車線上で自動車走行シミュレーションを行った。シミュレーション結果から、交通量が多く、車線変更や合流を行う場合でも自動運転車による通信を行うことで交通流量が増加し、交通渋滞の緩和につながる事が分かった。また、複数車線の場合は車線変更や合流による速度の低下が大きく、通信台数が増加しても交通流量が増加しないことが分かった。さらに、従来車と自動運転車が混在している環境では、自動運転車の混在率が増加すると交通流量が増加することが分かった。

今後の課題として、以下の2点を挙げる。1点目は、

時間経過による高速道路上の車両数変化の反映である。この条件を考慮することでシミュレーションが実際の道路状況に近づき、より実データに近いシミュレーションを行うことができる。2点目は、前方車との車間距離を保つ渋滞吸収走行の考慮である。渋滞吸収走行を取り入れることで、走行速度を維持する時間を延ばすことができ、メタ安定相が大きくなることで交通量の増加に効果があると期待できる。

参考文献

- [1] 石川翔太, 交通渋滞抑制に向けた協調型の自動運転に関する研究, 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻, 2019.
- [2] 竹内裕, 飯田晋司, 西成活裕, CAを用いた三車線高速道路のシミュレーションと実測データの比較, 交通流シミュレーションシンポジウム論文集, 2006.
- [3] 西成活裕, 交通流のセルオートマトンモデルについて, 交通流の数理, 2002.
- [4] 増淵達也, 荒井幸代, 前方情報を考慮した走行ルールによるメタ安定相の発生と特徴の解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-D, No. 11, pp. 1935-1944, 2009.
- [5] 柳澤大地, 西成活裕, 渋滞学のセルオートマトンモデル, 応用数理, Vol. 22, No. 1, pp. 2-14, 2012.