L-15

確率速度モデルを用いた交通流セルオートマトンモデルの変換に関する研究

Transformation of Traffic Flow Cellular Automaton Models Based on the Stochastic Velocity Model

○山本尚輝 [1],　星野貴弘 [2]
*Naoki Yamamoto[1], Takahiro Hoshino [2]

Abstract : This study investigates a method for transforming continuous car-following models into cellular automaton (CA) models. While car-following models, such as the Pipes model and its extensions, can realistically reproduce vehicle behavior, they are often computationally intensive. In contrast, CA models, with their discrete representation of space and time, offer high computational efficiency suitable for large-scale simulations. To define a relationship between these two approaches, we focus on the extended Bexelius model and examine a conversion method into a CA model. Simulation results show that the converted CA model exhibits behaviors consistent with the original car-following model, demonstrating the validity of the proposed approach. Future work will extend this methodology to more advanced car-following models, such as the optimal velocity model and IDM+, and evaluate the validity of the CA transformation by comparing traffic flow characteristics before and after conversion.

１．はじめに

近年, 高速道路のサグ部やトンネル付近などで発生する交通渋滞が社会問題となっている．これらの渋滞は運転者にとっての移動時間の増大を引き起こすだけでなく, 経済的な損失や二酸化炭素排出量の増加といった社会的コストを増加させている．そのため, 渋滞の発生メカニズムを明らかにし, 効果的な緩和策を検討することは重要な課題となっている．

交通渋滞の研究では, 様々な交通流モデルが活用されてきた．交通流を数理的に表現する方法としては, 大きく分けて追従モデルとセルオートマトン（CA）モデルがある．一般的な追従モデルは各車両の位置や速度を連続値として扱い, 微分方程式で表現されるが, 厳密解を得られるものはごく一部であり, 現実的な運転挙動を表現するモデルでは, 近似解法が必要となる．一方, CA モデルは時間や状態量を離散的に表現するモデルであり, 簡潔な更新ルールに基づいて車両の挙動を決定する．この特徴により, 大規模かつ並列的な計算に適しているという利点がある．今後さらに渋滞改善の研究を発展させるためには, 両モデルの関係を明確にすることが重要であると考えられる．特に, 追従モデルが持つ現実的な車の挙動再現性と, CA モデルの計算効率を両立させることができれば, より実用的な交通流解析が可能になる．これまでの研究では, 最も基本的な追従モデルである Pipes モデルをセルオートマトン化する検討を行ってきた．Pipes モデルは相対速度に車両感応度を掛けることで加速度を決定する単純なモデルである．しかし, このモデルでは現実の運転挙動を再現するには限界がある．そこで本研究では, Pipes モデルをより現実的なモデルに拡張した拡張 Bxelius モデルを対象にセルオートマトンモデルへの変換手法を検討し, 元のモデルとの対応関係を整理する．

２．交通流モデル

＜２．１　確率速度モデル[1]＞

確率速度モデルとは, CA モデルの一つであり, このモデルでは最高速度v_{max}と自車速度vの比率v/v_{max}を計算し, 一様乱数pとの関係が$v/v_{max} > p$の時に, 自車両を１セル進める．この考え方に基づき, 任意の速度を離散値に変換できるため, この方法をベースに追従モデルからセルオートマトンモデルへの変換を行う．

＜２．２　拡張 Bexelius モデル[2]＞

拡張 Bexelius モデルは自車両と前方 3 台の車両との速度差により， 次時点の加速度を決定するモデルである．拡張 Bexelius モデルは(1)式のように表される．

$$\dot{v}_n(t+\tau) = \sum_{i=1}^{3} k_i\{v_{n-i}(t) - v_n(t)\} \quad (1)$$

(1)式においてτは遅れ時間を表し，x_nはn番目の車両の位置である． また，k_iはi台前の前方車両に対する車両感応度であり， 各前方車両の速度差に対してどの程度鋭敏に加速度を増減させるかのドライバーごとのパラメータである． 一般的に， 自車に近い車両程大きくなるので$k_1 > k_2 > k_3$となる．

＜２．３　最適速度モデル[3]＞

最適速度モデルとは， 道路上を走行する車列において， 各車両の加速度が前方車との車間距離に基づいて決定される運動方程式で表されるモデルである． 各車

1：日大理工・院（前）・電気　2：日大理工・教員・電気

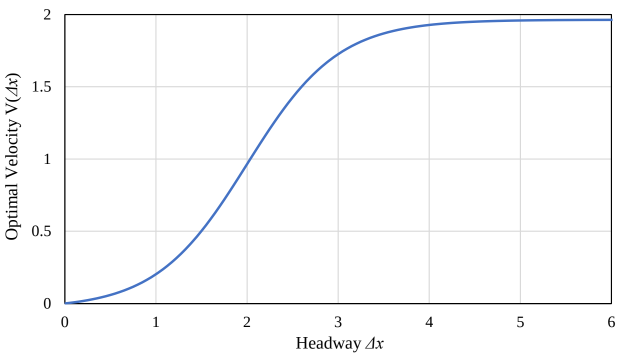

Figure1 Optimal Velocity Function

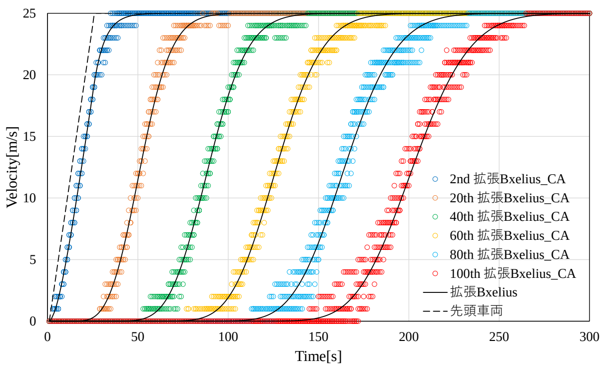

Figure 2. Numerical examples of Time-Velocity diagram

両は，車間距離に応じた「最適速度」があるという仮定の下，それとの差に応じて加減速度を決定する．i台目の車両の加速度は，最適速度関数$V(\Delta x_i)$を用いて次のように記述される．

$$\dot{v}_i(t+\tau) = k\{V(\Delta x_i) - v_i(t)\} \qquad (2)$$

ここで，iは車両番号，x_iはi番目の車両の位置，$\Delta x_i(= x_{i-1} - x_i)$は車間距離である．

$V(\Delta x_i)$は最適速度関数と呼ばれ，前方車両との車間距離に基づいてドライバーごとの最適速度を与える関数である．文献[3]において最適速度関数は，

$$V(\Delta x) = \tanh(\Delta x - 2) + \tanh(2) \quad (3)$$

で表され，(3)式を図示すると Figure1 のようになる．tanh 関数は滑らかに増加する特性を持っており，車間距離が広がるにつれて車両の速度が自然に増加していく挙動を表現できる．この特性は実際のドライバーの行動傾向と一致しており，現実的なモデル化が可能となる．

３．CA モデルへの変換方法

拡張 Bexelius モデルを CA モデルに変換する手順は以下の通りである．

[Step1] (1)式の右辺を計算し，その結果を整数部a_iと小数部a_dに分ける．

[Step2] pを 0～1 の一様乱数とするとき

(1)式の計算結果が正の場合，

$p \leq |a_d|$ならば$\dot{v}_n \to a_i + 1$，$p > |a_d|$ならば$\dot{v}_n \to a_i$とする．

(1)式の計算結果が負の場合

$p \leq |a_d|$ならば$\dot{v}_n \to a_i - 1$，$p > |a_d|$ならば$\dot{v}_n \to a_i$とする．

[Step3] [Step2]で求めた加速度と前時点での速度の和により(4)式に従い，次時点の加速度を決定する．

$$v_i(t) = v_i(t-1) + \Delta t\, \dot{v}_i(t) \qquad (4)$$

４．シミュレーション

本研究では$\Delta t = 1$sとし，拡張 Bexelius モデルと CA 化させた拡張 Bexelius（拡張 Bexelius CA）モデルの位置，速度，加速度を比較する．

＜４．１ シミュレーション条件＞

車両台数を 100 台，最大速度を 25.0m/s，車両感応度k_1, k_2, k_3をそれぞれ 0.15, 0.1, 0.06，シミュレーション時間を 300s とした．拡張 Bexelius CA モデルについては乱数の初期値を変化させて 5 回分のデータを取得した．

＜４．２ シミュレーション結果＞

Figure 2 は 2, 20, 40, 60, 80, 100 台目の車両における速度の時間変化を示す．後続の車両ほど拡張 Bexelius モデルに対して，拡張 Bexelius CA モデルの分布の広がりが見られるものの，全体としては両者が同様の傾向を示していることが確認できた．このことから，本研究で提案する CA 化手法は妥当であると評価する．

５．まとめと今後の課題

本研究では，追従モデルの一つで拡張 Bxelius モデルをセルオートマトンモデルに変換する方法を提案し，提案モデルを使用してシミュレーションを行った．その結果，変換前のモデルと変換後 CA モデルを比較し，本研究で提案した変換手法の妥当性が確認できた．

今後は，最適速度モデルや IDM+などより発展的な追従モデルにも対応した CA モデル化手法を検討し，CA モデル化の妥当性を検証する予定である．

参考文献

[1] 玉城龍洋，安江里佳，北英輔:「確率速度モデルと CA 法による交通シミ ュレーション」，情報処理学会論文誌，Vol.45, No.3, pp.858-869

[2] S.Bexelius: “An extended model for car-following”, Transportation Research, Vol.2, pp13-21, 1968.

[3] Bando. M, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, Physics Review E51, pp.1035-1042(1995)