L-5

インテリジェント交通流のモデル化と近似解析

Modeling and Approximate Analysis the Intelligent Traffic Flow

○張　征陽 [1]，浜松　芳夫 [2]，星野　貴弘 [2]
*Zhengyang Zhang[1], Yoshio Hamamatsu[2], Takahiro Hoshino[2]

Abstract:Traffic system has changed significantly with development of Intelligent Transport Systems(ITS). Examples of develoment of ITS are Cruise Control (CC) and Adaptive Cruise Control (ACC). CC automatically maintains a constant speed of vehicles. ACC is an optional cruise control system. Vehicles equipped with ACC automatically adjust distance from the vehicles ahead to control speed. It is expected that traffic flow move more smoothly by their functions. In this paper, in order to show the characteristics of a traffic flow model including ACC and CC vehicles, we analyze the traffic flow model based on the Nagel-Schreckenberg model(NaSch model), which is a probabilistic cellular automanton model.

1. はじめに

長距離の移動や荷物の運搬など自動車は，我々の生活に多くの利益をもたらしている．その一方で渋滞などの社会問題の原因となっている．本研究では，交通システムの問題である渋滞に着目し，それを改善することを目標としている．交通渋滞の原因の 1 つとして，適切な車間距離が維持されないことが挙げられる．近年，ITS の発展に伴い，クルーズコントロール (定速走行機能，以降 CC) とアダプティブクルーズコントロール (車間制御機能，以降，ACC) が活発に開発されている．CC は定速走行機能によって，運転者の疲労軽減並びに快適性向上に寄与する．さらに CC の発展形である ACC では，車間距離を維持する機能があるため，渋滞の緩和が期待されている．

このような背景から今後の交通現象をよく再現するにはインテリジェント交通流 (一般車両と ACC や CC などの運転支援システム機能付きの車両が混在する交通流) を検討する必要がある．本研究ではインテリジェント交通流のモデル [3] の近似計算法を示す．近似計算法としては交通流セルオートマトンモデルの基本的な解析手法の 1 つである交通流 Site-oriented mean-field(SOMF) 手法 [2] を用いる．

2. 対象モデルの数学的記述

インテリジェント交通流モデル [3] は，時間，速度，位置を離散値として扱う．対象モデルの概略図を Fig.1 に示す．位置 $n(=1,2,...,N)$ にある車両の状態はその時の速度 $v_n(v_n=0,1,...,v_{max})$ によって定められる．n 番目の車両の位置を x_n とすると，$d_n=x_{n+1}-x_n$ は n 番目の車両と $(n+1)$ 番目の車両の車頭距離になる．車両総数 N に対する ACC 車両の占める割合を α，CC 車両の占める割合を β，一般車両の占める割合を $\gamma(=1-\alpha-\beta)$ とする．有限格子 L にある N 台の車両 (すなわち，全体密度 $\rho=N/L$) の任意の時刻 t の推移 $t\to t+1$ は次のルールによって更新する [3]．

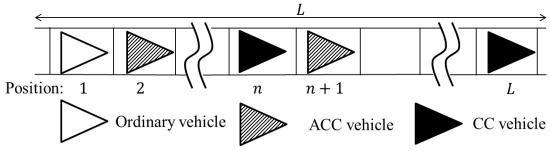

Fig. 1: Schematic diagram

Step1 加速:$v_n<v_{max}$ の時，$v_n\to v_n+1$

Step2 減速:$d_n\le v_n$ の時，衝突を回避のため，$v_n\to d_n-1$

Step3 ランダム化:一般車両は，Step2 で決定された速度 v_n が $v_n>0$ の時，確率 p で速度を 1 減少させる．ACC 車両 Step2 での減速の有無に関わらず，速度をそのまま維持する．また，CC 車両は，Step2 で減速が生じず，かつ速度が v_{max} ならば，無条件に速度 v_{max} を維持する．式で表すと，下記のようになる．

一般車両と $v_n<v_{max}$ の CC 車両，$v_n\xrightarrow{p}v_n-1$

ACC 車両と $v_n=v_{max}$ の CC 車両，$v_n\to v_n$

Step4 車両の移動:Step1～Step3 で決定された速度によって車両が移動する．$x_n\to x_n+v_n$

Step1 はできるだけ早く進みたいドライバーの意思を表す．Step2 は，前方車との衝突を回避するための減速操作に相当する．一般車両及び定速走行機能を使用していない $(v_n<v_{max})$ の CC 車両は，Step3 により，ヒューマンドライバー特有の減速が確率 p でランダムに発生する．速度 v_{max} で定速走行中の CC 車両と ACC 車両 [3] は，自動運転の状態にあるため，上記のような減速は生じない．Step4 の車両移動は今まで説明してきた Step1～3 のルールにより決定された速度を車両の位置に加えることで次時点 $t+1$ の車両位置を決定する．

1:日大理工・院・電気　2:日大理工・教員・電気

3. 解析手法

本研究では，$v_{max}=2$ とし，流量 J の近似解の導出過程を示す．i セルに速度 v の一般車両が時刻 t において，存在する確率を $P_v^G(i,t)$ と表す．同様に CC 車両，ACC 車両についてもそれぞれ，$P_v^C(i,t)$ と $P_v^A(i,t)$ と表す．i セルが空きの状態を $\bar{P}(i,t)$(すなわち，$\bar{P}(i,t)=1-\rho$) と表す．一例として，状態確率 $P_v^G(i,t)$ の導出過程を示す．交通流密度と状態確率の関係から下記の正規化条件が成り立つ．

$$\sum_{v=0}^{v_{max}} P_v^G(i,t)=\gamma\rho \tag{1}$$

更新のルールに従い，下記の状態方程式を得ることができる [2]．

$$P_2^G(i,t+1)=(1-p)\prod_{j=0}^{1}\bar{P}(i-j,t)\sum_{j=1}^{v_{max}}P_j^G(i-2,t) \tag{2}$$

$$\begin{aligned}P_0^G(i,t+1)&=P(i+1,t)\sum_{v=0}^{v_{max}}P_v^G(i,t)+p\bar{P}(i+1,t)\\&\times P(i+2,t)\sum_{j=1}^{v_{max}}P_j^G(i,t)+p\bar{P}(i+1,t)P_0^G(i,t)\end{aligned} \tag{3}$$

状態方程式の一例として，(2) 式について説明する．右辺の総和演算の確率は $(i-2)$ セルに $v=1$ また $v=2$ の一般車両が存在することを表す．Step1 に従い，速度は 2 となる．総乗演算の確率は前方 $(i-1)$ と i セルに車両が存在しないことを表す (すなわち，減速が生じない)．$(1-p)$ はランダムブレーキ確率 p が発生しないことを表す．以上により次時点において，(2) 式は i セルに $v=2$ の一般車両が存在する確率を表す．同様に (3) 式も成り立つ．定常状態では，時間 t に依存しない．Mean-filed(MF) 近似 [2] により，上記の状態方程式と正規化条件を連立し，状態確率は次のように求めることができる．

$$P_1^G=\frac{\gamma(1-p)\rho\bar{\rho}[1-(1-p)\bar{\rho}^2]}{1-p\bar{\rho}^2},P_2^G=\frac{\gamma(1-p)^2\rho\bar{\rho}^3}{1-p\bar{\rho}^2} \tag{4}$$

状態確率 $P_v^G(i.t)$ の導出過程と同様に状態確率 $P_v^C(i,t)$ と $P_v^A(i,t)$ は次のように求まる．

$$P_1^C=\frac{\beta(1-p)\rho\bar{\rho}(1-\bar{\rho}^2)}{1-p\bar{\rho}^2},P_2^C=\frac{\beta(1-p)\rho\bar{\rho}^3}{1-p\bar{\rho}^2} \tag{5}$$

$$P_1^A=\alpha\rho\bar{\rho}(1-\bar{\rho}^2),P_2^A=\alpha\rho\bar{\rho}^3 \tag{6}$$

交通流量の期待値は次式のように求められる．

$$J(\rho)=\sum_{v=0}^{v_{max}}\left[vP_v^A(i,t)+vP_v^C(i,t)+vP_v^G(i,t)\right] \tag{7}$$

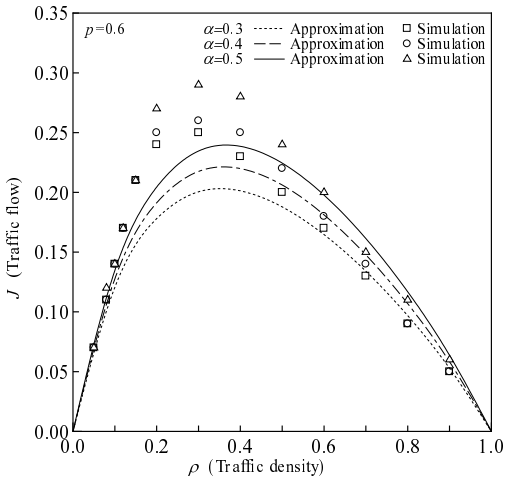

Fig. 2: Traffic flow

4. 考察

数理モデルの解析結果の妥当性をシミュレーションと比較し，検討する．ランダムブレーキ確率 p は 0.6 に設定する．ACC 車両の混在率 0.3, 0.4, 0.5 に変化させた際の流量の数値計算の結果を Fig.2 に示す．近似解とシミュレーション値は，$\rho=0.1$ 程度まで概ね一致している． $\rho=0.1\sim0.5$ の範囲の近似解は，シミュレーション値を下回っている．近似解の臨界密度が $\rho=0.37$ であるのに対し，シミュレーション値は $\rho=0.3$ が臨界密度になっている．臨界密度以降は混雑状態になるため，流量が下がり始まる．$\rho=0.7$ 以降は近似解がシミュレーション値を上回っている．近似解とシミュレーションの特性は概ね同じであるが，流量と臨界密度に誤差が生じている．それは近似計算を行う時，各セルにおいて，空間的，時間的な相互作用を無視したためである．到達不能状態 (GoE 状態 [2]) を考慮し，解析する必要がある．

ACC 車両の混在率をあげると，全体的に流量も増加する．原因として，ACC 車両は自動的に車間距離の制御を行うため，人間ドライバーのように無意識な減速が生じなかったためである．

5. まとめ

本研究ではインテリジェント交通流の数理モデル [3] を用いて，その解析方法について示した．解析結果の妥当性は，シミュレーションを用いて検討した．今後は，GoE 状態を考慮し，近似精度の向上が課題である．

参考文献

[1] A. Schadschneider Physics A 313 (2002) 153-187
[2] A.Schadschneider; M.Schreckenberg: “ Garden of Eden states in traffic models ” Physics A(1998) Vol.31 No.11
[3] 星野貴弘，小室孝文，大沼和徳，浜松芳夫：「車間制御機能及び定速走行機能を考慮した交通流のモデル化と解析」，2015 年電気学会産業応用部門大会予稿集