

適応的ハイブリッド交通流シミュレーションのための基礎的検討

Study of Adaptive Hybrid Traffic Simulation

大野 詩歩^{*1}
Shiho Ohno

藤井 秀樹^{*1}
Hideki Fujii

吉村 忍^{*1}
Shinobu Yoshimura

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: In this research, an adaptive approach for hybridization of microscopic and mesoscopic traffic simulation based on multi-agent system is focused on. In a microscopic model, a car agent acts according to the result of interactions with other agents. In a mesoscopic model, a car agent acts according to macroscopic variables such as traffic density, traffic capacity and free flow speed of road segment. Calculation speed is expected to be enhanced by using a light-weight mesoscopic model in the area with low traffic. At the same time, fine granularity near intersections with heavy traffic can be expressed by using a precise microscopic model. We investigated the relationship between inflow traffic volume and traffic flow characteristics of each model as the first step. The result shows that the difference of two models is increased under the condition that right-turn cars frequently give over the right-of-way to oncoming cars.

1. はじめに

1.1 交通流シミュレーション

交通渋滞に代表される道路交通問題を解決すべく、様々な交通施策が講じられている。その施策を効率的・効果的に実施するための事前評価を目的として交通流シミュレーションが一般的に用いられている。交通施策の評価には局所的な交通現象を詳細に捉える精緻性と交通現象全体を扱う広域性を兼ね備えた交通流シミュレーションが必要である。

交通流シミュレーションはマクロモデル、メゾモデル、ミクロモデルに大別される。マクロモデルは交通流を流体として扱うため比較的計算コストが低く、広域のシミュレーションに適している。ミクロモデルは車両 1 台 1 台をモデル化し、その相互作用を考慮することで精緻なシミュレーションを行うことができるが、計算コストは高い。メゾモデルは、個々の車両をモデル化しつつも、その挙動を交通量や交通密度、平均速度のような時間的あるいは空間的な統計値であるマクロ変数から再現する。これによりある程度の精緻性と広域性を両立しながら計算コストを抑えることが可能となる。一般的なマルチエージェント交通流シミュレーションは個別の車両をエージェントとしてモデル化するため、メゾモデルあるいはミクロモデルのいずれかに属する。

1.2 シミュレーションモデルのハイブリッド化

マクロモデルからメゾモデル、ミクロモデルとなるにつれて交通現象を精緻に表現できるようになるが、一方で計算コストも順に増大する。並列計算機を用いた広域ミクロシミュレーションも提案されているが(例えば文献[Osogami 2012]など)、1 台の計算機によって精緻性と広域性を両立するためには、着目領域に解像度の高いミクロモデル、それ以外の領域に軽量のメゾモデルを適用するなど、対象とする地域の交通現象や交通問題の特性に応じてモデルを使い分ける工夫がなされる。

このようなハイブリッドモデルとして、Elbery らは主要道路をミクロモデル、それ以外の細街路をメゾモデルで扱った統合フレームワークを提案した[Elbery 2018]。また中島らは道路環境の認知・運転行動の意思決定を行う詳細交通流シミュレータ(ミ

クロモデル)と経路計画の選択と経路計画の実行を行う単純交通シミュレータ(メゾモデル)の統合シミュレーションを提案した[中島 2012]。

1.3 本研究の目的

先述の既往研究はいずれもミクロモデル・メゾモデルを適用する問題領域が事前に分割・固定されている。しかし交通は動的なシステムである、その変化に応じてそれぞれのモデル適用領域を変動させることで、ミクロモデルでの余分な計算の省略やメゾモデルでの精度悪化の低減が期待される。

そこで本研究では、ミクロモデルとメゾモデルのハイブリッドシミュレーションにおいて適応的にモデルの切り替えを行うことで、精緻性を保ちつつ計算コストを抑えることを目指す。ただし、どのような条件下でモデルの切り替えを行うべきかについては現状では十分に検討されていない。本稿では、適応的なハイブリッドシミュレーションの実現のための最初の検討として、メゾモデル、ミクロモデルをそれぞれ実装したシミュレーションにおいて、交通量に応じて現れる各モデルの特性の差について分析した結果を報告する。

なお、本研究では車両あるいはドライバの最低限の性能・個性・目的の違いを反映するため、流体近似を行うマクロモデルは考慮せず、ミクロモデルあるいはメゾモデルを採用したマルチエージェントシステムを対象とする。

2. 研究手法

本研究では、モデルごとのシミュレーションの特性の違いを検討するために、メゾモデルとミクロモデルでそれぞれシミュレーションを行い、平均リンク旅行時間を計測する。以下に構築・利用したシミュレータの概要を述べる。

2.1 道路環境の表現

いずれのモデルも、道路の粗視的な表現には交差点をノード、道路セグメントをリンクとする共通のネットワーク構造を用いる。これは将来的な統合を見据えた設計である。

一方で、個々の道路構造の微視的な表現はモデルにより異なる。道路セグメントはメゾモデルでは待ち行列として表現され、

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科,
s_ono@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

マイクロモデルでは1次元の連続空間として表現される。なお現段階では信号は取り扱わない。

2.2 エージェントの経路探索

エージェントの経路探索は、微視的な道路構造上の挙動と関係なく定めることができる。メゾモデル・マイクロモデル共通機能として、車両エージェント発生時に出発地から目的地までの経路探索を実行する。後述するように本稿においては単純十字路を扱うため、経路探索の結果として得られるのは交差点において右折するか、左折するか、直進するかという判断である。

車両エージェントは定められた経路に従って走行し、目的地に到着したらシミュレーション上から消去される。

2.3 エージェントの微視的な挙動決定

(1) メゾモデル

待ち行列モデルを応用した Queue モデル[Gawron 1998]を採用した。Queue モデルでは、リンクから流出できる車両の最大数を規定した流量制約、リンクに存在可能な車両の最大数を規定した容量制約、および自由走行速度によって交通現象を記述する。いずれも特定の車両に結びつかないマクロ変数である。

Queue モデルにおける車両移動処理は原則として以下のルールに従う。

- 時刻 t_0 にリンク l に到着した車両は、時刻 $t_0 + L_l/v_l^0$ になるとリンク l の終端にある待ち行列の末尾に追加される
- 1 タイムステップにリンク l から流出し、その下流のリンク l' に流入する台数 $q_{l,l'}$ を以下で定める

$$q_{l,l'} = \min\{n_l, C_l, N_l^{max} - N_{l'}\}$$

ここで、 L_l はリンク l の長さ[m]、 v_l^0 は自由走行速度[m/s]、 n_l は待ち行列に存在する車両台数[台]、 N_l は待ち行列を含めリンクに存在する車両の総数[台]、 N_l^{max} はリンク長と車長(停止時の車間距離を含む)によって決まる N_l の最大値[台]、 C_l はリンクから流出可能な車両の最大数[台/step]である。

流量制約および容量制約があるため、車両密度の過剰の上昇による渋滞の発生を表現することは可能である。一方で車両の詳細な挙動の計算は省略されており、次に述べるマイクロモデルより高速に計算可能である。

(2) ミクロモデル

マイクロモデルでは、1次元連続空間として表現された道路セグメント上を車両エージェントが走行する。このとき、車両エージェントは直前方を走行する車両(先行車)との車間距離や速度差の情報を取得し、追従モデルを用いて自身の次の加速度を求め、得られた加速度により速度と位置を更新する。追従モデルの例の1つとして Intelligent Driver Model (IDM)の加速度決定式[Treiber 2000]を以下に示す。

$$\ddot{x}_i(t) = a \left(1 - \left(\frac{v_i}{v_i^0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_i, \Delta v_i)}{s_i} \right)^2 \right)$$

$$s^*(v_i, \Delta v_i) = s_0 + v_i T + \frac{v_i \Delta v_i}{2\sqrt{ab}}$$

ここで、 $x_i(t)$ は車両エージェント i の位置[m]、 $v_i(t)$ は速度[m/s]、 v_i^0 は希望走行速度[m/s]、 $\Delta v_i(t)$ は先行車との速度差

[m/s]、 s_i は先行車との車間距離[m]、 s_0 は最小車間距離(停車時の車間距離)[m]、 T は希望車間時間[s]、 a は最大加速度[m/s²]、 b は通常時の減速度の最大値[m/s²]であり、 δ は加速パラメータである。メゾモデルと異なり位置・速度・加速度といった車両状態が直接出力される。

加えて、都市内交通にマイクロモデルを適用する際には、交差点での優先・非優先判定に基づいて道を譲る行動も考慮する。たとえば日本のような左側通行の国においては、十字路交差点で右折車両は対向直進車に進路を譲る。このような挙動は、仮想的な停車車両を交差点境界に置くことで、上述の追従モデルを自然に拡張してモデル化できる。

本研究では上記の特性を持つマイクロモデルとして、著者らが開発する交通流シミュレータ ADVENTURE_Mates [Yoshimura 2006, Fujii 2017]を利用することとした。これは追従モデルとして IDM を採用し、交差点での優先・非優先判定を厳格に行うシミュレータである。

2.4 モデル切り替えのための方針

2.3 節の説明からも分かるとおり、マイクロモデルにおいては交通需要の増加の影響が車両密度の上昇・先行車との車間距離の低下だけでなく、交差点手前で対向車に道を譲るために減速・停車する車両数の増加としても現れる。ここにメゾモデルとマイクロモデルの差が生じる。

つまり、交通量の決定要因として車両密度が支配的である状況ではメゾモデルとマイクロモデルの差は小さいが、交通量が増大するにつれ、マイクロモデルにおいて対向車に道を譲る車両が増加し、結果としてマイクロモデルとメゾモデルとの乖離が大きくなるであろうと考えた。この仮説に基づき、交通需要(入力交通量)を指標として動的にマイクロモデルとメゾモデルを切り替えることを想定する。

3. 実験

2.4 節で述べた仮説を確かめるために、マイクロモデルとメゾモデルを用いて簡単なシミュレーションを実施し、得られた結果を比較した。

それぞれのリンク長が 1000[m]の片側 1 車線の単一十字路(図 1)を用いて、シミュレーション内時間で 30 分間分のシミュレーションを実行した。ただし、交差点には信号を設置していない。自由走行速度を 60[km/h]、東西のリンク端点から発生する交通量を 100[台/h]から 1500[台/h]まで 100[台/h]ごとに変化させ、それぞれのシミュレーションで西の端点から交差点へ向かうリンクの平均旅行時間を計測した。南北のリンク端点からは車両を発生させない。メゾモデルのパラメータとして $C = 1500$ を用い、IDM のパラメータは文献[Treiber 2000]のものをを用いた。

各モデルの発生交通量と平均リンク旅行時間の関係を図 2 に示す。メゾモデルでは平均リンク旅行時間が約 60[sec]とほぼ一定であったのに対し、マイクロモデルでは交通量が 800[台/h]を超えるとリンク旅行時間が大きく増大し、2 つのモデルの平均リンク旅行時間の差が大きくなった。これはマイクロモデルにおいて、交差点で対向直進車の影響により右折車両が滞留することによって遅れが生じ、リンク全体の交通流に影響を与えたためである。この対向直進車の右折車両に対する影響はメゾモデルでは考慮されていないため、差が増大していった。

したがって、今回のような非信号交差点においては、右折車両の滞留が発生するような交通量においてはマイクロモデルを適用し、それを下回る交通量のときはメゾモデルを適用すればよいと考えられる。

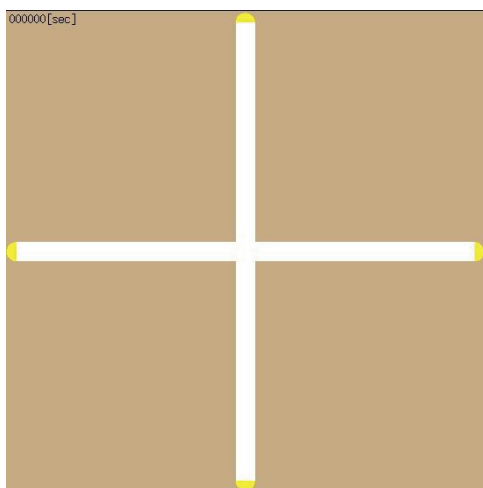


図1 シミュレーション対象の道路ネットワーク

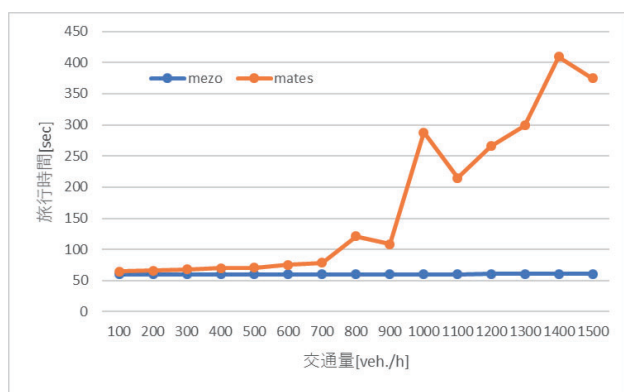


図2 各モデルの発生交通量とリンク旅行時間の関係

4. まとめ

本研究では、マイクロモデルとメゾモデルのハイブリッドシミュレーションにおいて適応的にモデルの切り替えを行うために、各モデルに対して交通量を変化させながらシミュレーションを行い、平均リンク旅行時間を計測した。その結果、ある交通量を超えるとメゾモデルとマイクロモデルの平均リンク旅行時間に顕著な差が生じた。これはマイクロモデルにおける交差点付近での厳格な車両挙動がメゾモデルにおいては考慮されていないために生じた差である。このように、右折車両の滞留が発生する交通量か否かという基準が、マイクロモデルとメゾモデルを切り替える指標の1つといえる。

今後は、信号交差点やより複雑な道路ネットワークにおける両モデルの差の検証や平均リンク旅行時間以外の指標を用いた比較を検討している。また指標を用いた切り替えのタイミングの決定だけでなく、マイクロモデルとメゾモデルとの間で車両挙動に齟齬が生じないように切り替える手法を考案する。

参考文献

- [Elbery 2018] A. Elbery, *et al.*: Large-scale Agent-based Multimodal Modeling of Transportation Networks - System Model and Preliminary Results, 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, pp. 103-112, 2018.
- [Fujii 2017] H. Fujii, *et al.*: Agent-based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams,

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 85, pp. 234-248, 2017.

[Gawron 1998] C. Gawron: An Iterative Algorithm to Determine the Dynamic User Equilibrium in a Traffic Simulation Model, International Journal of Modern Physics C, vol. 9, no. 3, pp. 393-407, 1998.

[Osogami 2012] T. Osogami, *et al.*: IBM Mega Traffic Simulator, IBM Research Report, RT0896, 2012.

[Treiber 2000] M. Treiber, *et al.*: Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations, Physical Review E, vol. 62, no. 2, pp. 1805-1824, 2000.

[Yoshimura 2006] S. Yoshimura: MATES: Multi-Agent Based Traffic and Environment Simulator — Theory, Implementation and Practical Application, Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol. 11, No. 1, pp. 17-25, 2006.

[中島 2012] 中島悠, 服部宏充: マルチエージェントシミュレーション統合のためのシミュレータアーキテクチャ, 情報処理学会論文誌, vol. 53, no. 11, pp. 2477-2484, 2012.