

高精度な交通シミュレーションのための一般道路ネットワーク に対する Stochastic Cell Transmission Model の応用

Application of Stochastic Cell Transmission Model in General Road Network
for Traffic Simulation with High Accuracy

徳田 渉^{*1} 金森 亮^{*2} 伊藤 孝行^{*1*2*3}
Sho Tokuda Ryo Kanamori Takayuki Ito

^{*1}名古屋工業大学工学部情報工学科 Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology
^{*2}名古屋工業大学しくみ領域 Shikumi College, Nagoya Institute of Technology

^{*3}名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻 School of Techno-Business Administration, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Traffic flow simulation has been applied for various traffic measures. When predicting traffic condition, the travel time reliability is important to supply transportation information to drivers. Stochastic cell transmission model (SCTM) that can evaluate the travel time reliability is proposed. Because SCTM introduces the uncertainty of realistic traffic conditions, accuracy of simulation is improved. Although effectiveness for simple network and highway has been confirmed by SCTM, general network is not introduced. In this study, SCTM is improved to apply to general road network. In empirical study, simulation is conducted to verify the reproducibility of SCTM in general road. Besides, the travel time reliability of general road is evaluated.

1. はじめに

ドライバーへの情報提供は道路交通の円滑化において必要不可欠である。情報提供には道路のサービスレベルの評価が必要となる。しかし、各道路の旅行時間にばらつきが存在するため、ドライバーに対して正確な情報提供をおこなうことができない。そのため、現在では時間信頼性という指標が提案されている。時間信頼性は道路の旅行時間の平均と標準偏差の水準を示しており、ドライバーは道路の時間信頼性の高さにより経路選択をおこなうことで遅刻のリスクを回避することができる。

時間信頼性をより適切に評価できる流体近似モデルとして、Stochastic Cell Transmission Model (SCTM) が挙げられる。SCTM は道路交通における不確実性を考慮しており、精度の良いシミュレーションをおこなうことができる。現状では、SCTM は高速道路のような単純なネットワークにのみ適用されており、混合分布の理論に基づいて道路の密度の推移を予測する。SCTM の現状のアルゴリズムでは大規模で複雑なネットワークである一般道路に対して適用が困難である。

本研究では、SCTM を一般道路に適用できるよう拡張した Modified Stochastic Cell Transmission Model (MSCTM) を提案する。大規模で複雑なネットワークに対して経路を探索することで、各車両の出発地と目的地に応じて車両が経路選択をおこなうことができる。また、混合分布に対する処理を簡略化することで計算の複雑さを軽減し、大規模なネットワークに対しての適用が可能となる。MSCTM の再現性の検証として、一般道路に対して実験をおこなう。実験では各車両の所要時間とある地点の 10 分間の交通量について評価する。また、一般道路の全てのリンクについて時間信頼性の評価をおこなう。

本論文では、第 1 章で研究の概略を述べ、第 2 章では SCTM の特徴と問題点を示し、第 3 章で本研究で提案する MSCTM について説明する。第 4 章でシミュレーションによる実験について説明し、第 5 章で本論文のまとめをおこなう。

連絡先: 徳田 渉, 名古屋工業大学工学部情報工学科,
〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
tokuda.sho@itolab.nitech.ac.jp

2. Stochastic Cell Transmission Model

2.1 特徴

SCTM は A. Sumalee によって 2011 年に提唱されたモデルである [1]。SCTM はセルを用いて道路を表現しており、2 つのセルを用いて 1 つサブシステムと呼ばれる固まりを構成し、複数のサブシステムを連結させることにより全体のネットワークを構成する。

SCTM は道路の需要と供給の不確実性を考慮可能である。一般的に、道路に対する需要と供給は不確実であり、道路状況に変動が生じるため予測の精度が低下する。SCTM では平均が 0 である正規分布に基づくノイズを付加することで道路交通における不確実性を表現する。需要の不確実性と供給の不確実性はそれぞれサブシステムから流出する車両台数とサブシステムの各パラメータにノイズを付加することで表現される。ノイズを付加することによって、サブシステムに流入する車両台数とサブシステムの各パラメータは確率変数となる。

また、SCTM は switching-mode モデル [2][3] の概念を利用しており、移動元と移動先の混雑状況に合わせた車両の移動をおこなうことができる。モードとは隣り合った 2 つのセル、つまりサブシステムの混雑状況を示す概念である。モードには FF (Free flow-Free flow) モード, CC (Congestion-Congestion) モード, CF (Congestion-Free flow) モード, FC1 (Free flow-Congestion1) モード, および FC2 (Free flow-Congestion2) モードの 5 つの種類モードが存在する。サブシステムにおける 5 つのモードについて図 1 に示す。図 1 の青い四角が車両が少なく空いているセル, 赤い四角が車両が多く混雑しているセルを表している。FF モードは上流セルと下流セルがともに空いている場合である。CC モードは上流セルと下流セルがともに混雑している場合である。CF モードは上流のセルが混雑しており下流のセルが空いている場合である。FC モードは上流のセルが空いており下流のセルが混雑している場合である。FC モードはさらに 2 種類に分類することができる。FC1 モードは混雑している下流セルに存在する車両が加速している場合である。FC2 モードは混雑している下流セルに存在する車両が減速している場合である。

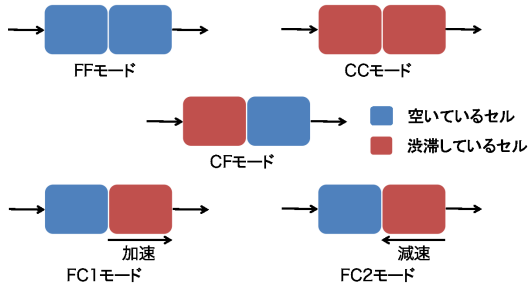


図 1: サブシステムにおける 5 つのモード

サブシステムのモードはサブシステムに属している 2 つのセルの交通密度とパラメータによって決まる．しかし、パラメータは確率変数であることから、モードは一意に決定されない．したがって、各サブシステムについて各モードの生起確率を導くことができる．FF モードの生起確率、CC モードの生起確率、CF モードの生起確率、および FC モードの生起確率の計算式をそれぞれ式 (1)、式 (2)、式 (3)、および式 (4) に示す．

$$P_{FF} = Pr(\rho_u < \rho_{c,1} \cap \rho_d < \rho_{c,2}) \quad (1)$$

$$P_{CC} = Pr(\rho_u \geq \rho_{c,1} \cap \rho_d \geq \rho_{c,2}) \quad (2)$$

$$P_{CF} = Pr(\rho_u \geq \rho_{c,1} \cap \rho_d < \rho_{c,2}) \quad (3)$$

$$P_{FC} = 1 - (P_{FF} + P_{CC} + P_{CF}) \quad (4)$$

式の ρ_u と ρ_d は、サブシステムの上流セルの交通密度と下流セルの交通密度を示している．また、 $\rho_{c,1}$ と $\rho_{c,2}$ はそれぞれパラメータであり、サブシステムの上流セルの渋滞密度と下流セルの渋滞密度を示している．FC1 モードと FC2 モードの生起確率の算出の方法は他のモードと少し異なる．FC1 モードの生起確率を式 (5)、FC2 モードの生起確率を式 (6) に示す．

$$P_{FC1} = P_{FC} Pr(v_{f,1} \rho_u \leq w_{c,2} (\rho_{J,2} - \rho_d)) \quad (5)$$

$$P_{FC2} = P_{FC} Pr(v_{f,1} \rho_u > w_{c,2} (\rho_{J,2} - \rho_d)) \quad (6)$$

$v_{f,1}$ 、 $w_{c,2}$ 、および $\rho_{J,2}$ はそれぞれサブシステムの上流セルの自由速度、サブシステムの下流セルの渋滞時における減速波の速度、サブシステムの下流セルの渋滞密度を示しており、それぞれがパラメータである．

2.2 問題点

SCTM は一般道路に対する適用が困難である点が問題となる．Zhong ら [4] は、SCTM を単純なネットワークに適用させた．Zhong らの実験で使用されたネットワークを図 2 に示す．図 2 は、各分岐点において分岐率が設定されており、車両の出発地と目的地がそれぞれ一つずつしか存在しない．一般道路の道路交通において、車両の出発地と目的地の組み合わせは複数存在する．しかし、出発地と目的地が複数存在するネットワークに対して分岐率を設定することは困難である．したがって、一般道路に対して分岐率が設定し難く、SCTM の適用が困難となる．

また、一般道路に対する SCTM の適用を想定すると、車両の移動台数を求める過程で混合分布の計算処理が複雑になり、計算コストが増加し問題となる．混合分布の導出について式 (7) に示す．

$$f(\bar{y}(k)|\theta(k)) = \sum_S P_S(k) f(y(k)|\theta_S(k)) \quad (7)$$

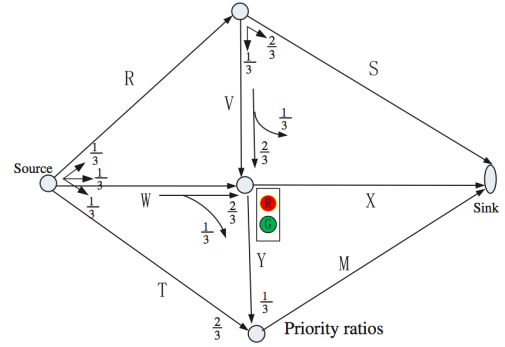


図 2: Zhong ら [4] の実験で使用されたネットワーク

式 (7) の f は車両の移動台数の確率密度関数を示しており、 $y(k)$ 、 $y_S(k)$ 、および P_S はそれぞれ時刻 k に移動させる車両台数、モードが S である場合に時間 k に移動させる車両台数、および時刻 k におけるモード S の生起確率を示す．また、 $\theta(k)$ は各モードにおける生起確率と車両の移動台数をまとめたベクトルであり、 $\theta(k) = \{\theta_S(k)\}$ 、 $\theta_S(k) = (P_S(k), y_S(k))$ で表される．求めた混合分布の平均値を算出しなければならないため、計算が複雑になりコストが増加する．計算コストは大規模なネットワークへの適用の際に非常に重要な要素であり、計算コストが低ければ低いほど望ましい．

3. Modified Stochastic Cell Transmission Model

3.1 分岐率の代替

分岐率を設定していないネットワークに適用させるには、分岐点で各車両による経路選択をおこなう必要がある．そこで MSCTM では、あらかじめ車両の出発地から目的地までの最短経路を求め、車両は求めた最短経路をもとに経路選択をおこなう．経路探索の経路コストはセルの通過所要時間を設定する．経路コストをセルの通過所要時間に設定することで、混雑した道路のコストが高くなり、混雑した道路を除いた最短経路を求めることができる．セルの通過所要時間は式 (8) で求める．

$$t = \frac{l}{v} \quad (8)$$

式 (8) の t はセルの通過所要時間、 l はセルの長さ、 v はセルの平均速度を示す．セルの平均速度は、グリーンシールズ&オルコットの式を用いることによって求めることができる．グリーンシールズ&オルコットの式を式 (9) に示す．

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right) \quad (9)$$

式 (9) の v はセルの平均速度、 v_f は自由速度、 k は交通密度、 k_j は飽和密度を表す．自由速度は交通密度が 0 であるときの速度を示し、飽和密度は速度が 0 であるときの交通密度を示す．式 (8) と式 (9) から、交通密度が高く道路が混雑しているときはセルの所要時間が長く、交通密度が低く道路が空いているときはセルの所要時間が短いという関係を示すことができる．そして、セルの所要時間を経路コストに設定することで混雑した道路を除いた最短経路を探索できる．

シミュレーションではあらかじめ経路探索をおこない、各車両は経路探索の結果にしたがって出発地から目的地へ移動する。目的地が決まっている車両の移動に関して多くのドライバーは最短経路を選択するものとし、渋滞している道路を発見した場合には渋滞を避ける経路を選択すると仮定する。シミュレーションの流れは、まずセルの通過所要時間を求めて経路コストに設定する。そして、出発地から目的地までのコストが最小となる経路を探索し、発見された最短経路を車両に持たせる。車両は自身の持つ経路をもとに経路選択をおこない目的地を目指す。本研究では道路の最短経路を探索するためにダイクストラ法を用いる。

3.2 混合分布に対する処理

移動元と移動先の道路の混雑状況に合わせた車両の移動をおこなうため、各サブシステムの車両の移動台数は混雑状況ごとに異なるが、サブシステムのモードは一意に決定されない。車両の移動台数はサブシステムのパラメータに影響するので、混雑状況に応じて車両の移動台数に関する確率分布を持つことになる。SCTM では混雑状況ごとの車両の移動台数の確率分布を全て混合した混合分布を求め、混合分布の平均を求め最終的に車両の移動台数を決定する必要があるが、MSCTM では別のアプローチで混合分布の処理をおこなう。

サブシステム間の車両の台数移動を決定する際に、移動元のサブシステムと移動先のサブシステムの混雑状況について考慮しなければならない。まず、サブシステムの下流セルから移動する車両台数 S を決定するため、移動元のサブシステムのモードの生起確率について考慮する。 S を決定させるパターンは 2 種類存在する。サブシステムのモードが FF モードまたは CF モードである場合は S を $v_{f,1} * \rho_1$ 台、CC モードまたは FC モードである場合は S を Q_1 台に設定する。 $v_{f,1}$ は移動元のサブシステムの下流セルの自由速度、 ρ_1 は移動元のサブシステムの下流セルの交通密度、 Q_1 は移動元のサブシステムの下流セルの交通流率を示している。次に、移動先のサブシステムのモードの生起確率を考慮して、混雑具合に応じて何台の車両を移動させるかを決定する。移動先の混雑状況と移動元の車両の移動台数 S を考慮すると、次の 4 つのパターンに分類することができる。

1. 移動先のモードが FF モードまたは FC モードであり、かつ S が Q_2 以下である場合は $y_1 = S$ 台移動する
2. 移動先のモードが FF モードまたは FC モードであり、かつ S が Q_2 より大きい場合は $y_2 = Q_2$ 台移動する
3. 移動先のモードが CC モードまたは CF モードであり、かつ S が $w_{c,2} * (\rho_{J,2} - \rho_2)$ 以下である場合は $y_3 = S$ 台移動する
4. 移動先のモードが CC モードまたは CF モードであり、かつ S が $w_{c,2} * (\rho_{J,2} - \rho_2)$ より大きい場合は $y_4 = w_{c,2} * (\rho_{J,2} - \rho_2)$ 台移動する

Q_2 は移動先のサブシステムの上流セルの交通流率、 $w_{c,2}$ は移動先のサブシステムの上流セルの渋滞時の減速波の速度、 $\rho_{J,2}$ は移動先のサブシステムの上流セルの渋滞密度、 ρ_2 は移動先のサブシステムの上流セルの交通密度を示す。また、 y_1, y_2, y_3 、および y_4 はそれぞれのパターンの車両の移動台数を示す。それぞれ 4 つのパターンの生起確率を式 (10)、式 (11)、式 (12)、および式 (13) に示す。

$$P_1 = (P_{FF} + P_{FC})Pr(S \leq Q_2) \quad (10)$$

$$P_2 = (P_{FF} + P_{FC})Pr(S > Q_2) \quad (11)$$

$$P_3 = (P_{CC} + P_{CF})Pr(S \leq w_{c,2} * (\rho_{J,2} - \rho_2)) \quad (12)$$

$$P_4 = (P_{CC} + P_{CF})Pr(S > w_{c,2} * (\rho_{J,2} - \rho_2)) \quad (13)$$

P_1, P_2, P_3 、および P_4 は各パターンの生起確率を示す。

SCTM は 4 つのパターンに応じた確率分布を全て混合して混合分布を作成し、混合分布の平均を最終的に移動させる車両台数を決定する。MSCTM では各パターンの車両の移動台数の確率分布の平均を最初に求め、各平均値から混合分布の平均値を求める。混合分布の平均を求める式を式 (14) に示す。

$$\bar{y} = \sum_x^4 P_x \bar{y}_x \quad (14)$$

\bar{y} は混合分布の平均値、 P_x はパターン x の生起確率、 \bar{y}_x はパターン x における車両の移動台数を示している。式 (14) を用いることで計算コストの削減を図る。

4. シミュレーション実験

4.1 再現性の検証

本研究では一般道路へ MSCTM を適用する際の再現性の検証のため、吉祥寺・三鷹のベンチマークデータセット [5] のナンバープレート調査の実測データを用いて実験をおこなう。吉祥寺・三鷹のネットワークを図 3 に示す。車両の移動経路に関して、目的地が決まっている多くのドライバーは最短経路を選択するものとし、渋滞している道路を発見した場合には、渋滞を避ける経路を選択すると仮定する。シミュレーションは 130 分間を想定し、約 18000 台の車両を流す。各パラメータに付加する正規乱数は各パラメータの値の 10% を採用する。

シミュレーションの出力結果として、各車両の出発地から目的地への所要時間と各セルの 10 分間の交通量を得る。各車両の所要時間と各セルの 10 分間の交通量について、MSCTM のシミュレーションから得られた推定値と実測値を比較する。

MSCTM のシミュレーションから得られた各車両の所要時間の推定値と実測値の散布図を図 4 に示す。図 4 の横軸は実測値、縦軸は推定値を示しており、赤い点が MSCTM の推定値を示している。グラフの黒い直線は 45 度の直線であり、黒い直線に点が近いほど推定値と実測値の誤差が少ないことを示す。散布図から黒い線の周りに赤い点が密集していることがわ

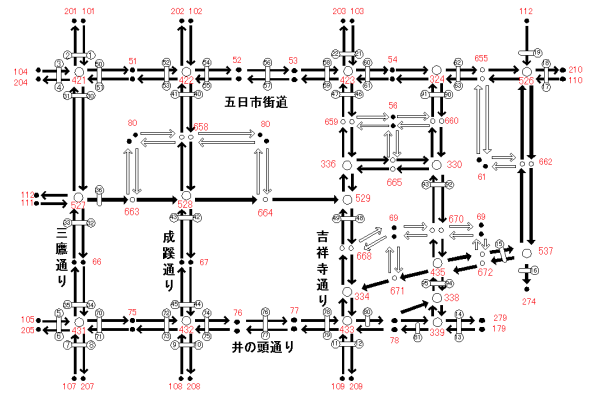


図 3: 吉祥寺・三鷹のネットワーク

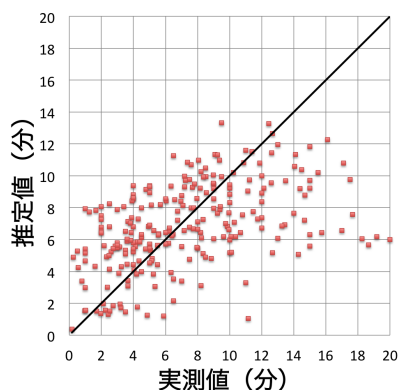


図 4: 各車両の所要時間の推定値と実測値

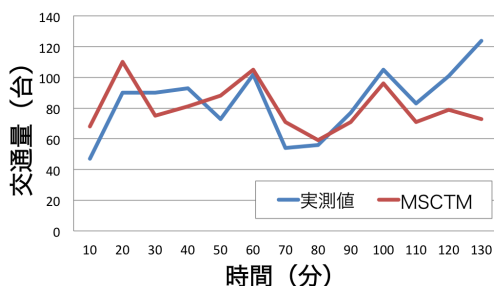


図 5: 10 分間の交通量の推定値と実測値

かる。また、MSCTM と実測値に対する相関係数を算出したところ約 0.8 となり、再現性が高いことがわかる。

次にあるセルにおける 10 分間の交通量について、MSCTM のシミュレーションから得られたセルの 10 分間の交通量の推定値と実測値のグラフを図 5 に示す。赤い線と青い線はそれぞれ SCTM の推定値と実測値を示す。図 5 から、MSCTM の推定値と実測値が近いことがわかる。

各車両の所要時間と 10 分間の交通量の結果から、SCTM の推定値と実測値との誤差が小さく、一般道路道路ネットワークに対する再現性が高いことがわかった。

4.2 時間信頼性の評価

吉祥寺・三鷹のネットワークを用いて時間信頼性を評価をおこなう。時間信頼性を評価するため、各リンクについて通過所要時間の変動係数を算出する。変動係数とは相対的なばらつきを表し、標準偏差を平均で割った値である。各リンクの変動係数を示したネットワークを図 6 に示す。図 6 は変動係数の高さによりリンクを色分けしており、赤いリンク、黄色いリンク、および青いリンクはそれぞれ変動係数が上位 30% 以内のリンク、変動係数が上位 30% から下位 30% までのリンク、および変動係数が下位 30% 以内のリンクである。

ドライバーは時間信頼性を評価したネットワークをもとに経路を選択することで遅刻のリスクを回避することができる。

5. おわりに

本研究では、SCTM を一般道路ネットワークに適用させた MSCTM を提案した。経路探索によって分岐率のないネットワークに適用させ、混合分布の処理を簡略化し大規模なネットワークに対して適用させた。MSCTM を用いたシミュレーション

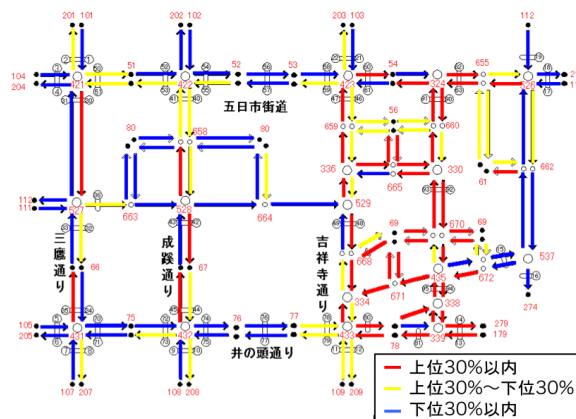


図 6: 変動係数により色分けされたネットワーク

の再現性を検証するため、各車両の所用時間と 10 分間の交通量について推定値と実測値を比較した。結果から実測値との誤差が少なく精度の良いシミュレーションをおこなうことがわかった。また時間信頼性を評価するため、一般道路の各リンクの通過所要時間について変動係数を算出した。

MSCTM で用いるパラメータは各セルについて一定の値を設定しているが、各セルについてパラメータを実測値から推定する必要があり、今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、内閣府の先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発プログラム）により助成を受けています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] A. Sumalee, R.X. Zhong, T.L. Pan and W.Y. Szeto: "Stochastic cell transmission model (SCTM): A stochastic dynamic traffic model for traffic state surveillance and assignment", Transportation Research Part B: Methodological Volume 45, Issue 3, 2011, Pages 507-533 .
- [2] Laura Munoz, Xiaotian Sun, Roberto Horowitz and Luis Alvarez: "Traffic Density Estimation with the cell transmission model", Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado, USA, pp. 3750-3755.
- [3] Xiaotian Sun, Laura Munoz and Roberto Horowitz: "Highway Traffic State Estimation Using Improved Mixture Kalman Filters for Effective Ramp Metering Control", 42th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.6, pp. 6333-6338, 2003.
- [4] R. X. Zhong, A. Sumalee, T. L. Pan and W. H.K. Lam: "Stochastic cell transmission model for traffic network with demand and supply uncertainties", Transportmetrica A: Transport Science, P567-602, 2013.
- [5] 交通シミュレーションクリアリングハウス: "交通シミュレーションシステム検証用データ公開サイト", <http://www.jste.or.jp/sim/>.