

交通流シミュレーションによる動的利用者均衡配分の高速計算

石原雅晃[†] 福田和輝[†] 井料隆雅[†][†]神戸大学大学院工学研究科

1. はじめに

一般的な交通流シミュレーションでは、各車両の出発地、到着地、出発時刻を与え、ドライバーの経路選択行動を計算することにより道路の混雑を予測する。一般に、ドライバーは旅行時間をできるだけ短くするように経路を選ぶとされる。ここで問題となるのは、ドライバーが参照する混雑の状況はどの時刻のものであるか？という点である。多くのシミュレータでは、ドライバーは走行している時点での混雑が将来も継続すると考えて経路選択をする、としている。しかし、混雑の状況は時々刻々と変動するため、このような方法では、旅行時間を最小にするような経路を正しく選択させることができない。

道路ネットワークにおいて、全ての車両が「結果として」旅行時間が最小の経路を選択している状態を求める問題は、一般に利用者均衡配分問題と呼ばれ、多くの研究成果が蓄積されている。特に、交通流の動的な変化を正確に扱うものは動的利用者均衡配分問題と呼ばれる。この問題の求解には一般には反復計算を要するが、多くの解法ではその収束性が保証されていないことが知られる^[1]。また、動的均衡配分の解には、唯一性すら保証されない^[2]など理論上重要な問題の存在が知られている。

理論上の問題に加えて、動的利用者均衡配分問題には計算量上の問題もある。反復計算の実施の際には似たような状況における交通流シミュレーションをかなりの回数だけ実施しなくてはならない。例えば AIMSUN と呼ばれるシミュレータ^[3]は動的利用者均衡配分をサポートするが、上記の理由によりかなりの計算時間を要する。

上記のうち前者の問題に対する解決策としては、均衡解を直接求解するのではなく、ドライバーが日々の道路混雑に応じて経路を日々変更する行動の動学 (Day-to-day ダイナミクス) を記述し、その動学がマルコフ連鎖の定常状態に達したらそれを均衡解とみなすアプローチがある^{[4][5]}。この方法であれば、少なくとも十分な時間を費やせば必ず求解が可能なが期待できる。一方、この方法は交通シミュレータを日数分だけ反復計算することを要求する

ため、計算量の問題を解決するどころかむしろ悪化させてしまう。現実的な時間で計算するためには高速に計算するためのアルゴリズムが必須である。

本稿では、上述の Day-to-day ダイナミクスによる反復計算を高速化するための計算手法を提案し、それを評価する。この計算手法は、ドライバーのごく一部が経路を変更したときに、交通流の状態を一から計算しなおすのではなく、経路変更により影響のある部分だけを計算させ、計算時間を短縮することを目指している。また、特に HPC(High Performance Computing)の適用を視野に入れ、並列化による高速化も考慮し、その効果の検証も行う。

2. 定式化

2.1 交通混雑を計算するモデル

混雑はリンクでのみ発生する。各リンクはあらかじめ定められた容量 (単位時間あたりに通過できる車両の台数) を持つ。それを超えた量の車両が流入した場合には車両はリンク内で待ち行列を形成する。これにより遅れ時間が生じる。この待ち行列がリンクの外へ延伸することは考慮しない。このようなモデルはポイントキューモデルと呼ばれる。リンクの旅行時間は、遅れ時間に、あらかじめ指定された自由流旅行時間を加えたものになる。

各車両は指定された起点ノードから終点ノードへ向かって走行する。経路は後述の方法によりシミュレータ上で計算される。各車両はあらかじめ指定された時刻に起点ノードを出発する。

2.2 経路選択を決定する Day-to-day ダイナミクス

個々の日において、各車両は以下のようなステップで経路選択を行うとする。

1. 各車両は 5%の確率で経路変更を検討する。しないときは前日の経路をそのまま使用する。
2. 経路変更を検討しようとする車両は、前日の混雑状況を前提として、自身の最短経路を探索し、その経路を当日以降、次に経路を変更するまで使用しつづける。

3. 高速計算のための手法

3.1 リンク交通流の更新方法

Day-to-day ダイナミクスにより一部の車両の経路が変更された後にはリンク交通流を更新しなくてはならない。ここで注意したいのは、経路変更の影響

Fast calculation method of dynamic user equilibrium assignment by traffic simulation

Masaaki Ishihara[†], Kazuki Fukuda[†], and Takamasa Iryo[†]

[†]Graduate School of Engineering, Kobe University
657-8501, Kobe, Japan

は、経路変更直接影响到かわらないリンクにも及ぶことである。この影響を空間的に追跡し、影響がある範囲だけを更新対象として計算量を削減する。また、経路変更の影響はそれがあつた時刻以前には及ばないので、このことも計算量の削減に使用できる。

3.2 逐次的な車両のローディング

2.で示した Day-to-day ダイナミクスは何らかの初期状態の存在を仮定している。もっとも単純な初期状態は、全車両が距離は最短になる経路を選んでいるとするものである。しかしこの初期状態は同一経路を多数の車両が選ぶため、混雑が激しくなり、均衡状態から離れた状況になりがちである。全車両を一度にネットワークに配分するのではなく、逐次的に少しずつ配分することによりこの問題は緩和できる。

3.3 計算の並列化

最短経路探索は車両ごとに独立に行えるので、そのまま並列化が可能である。リンク交通流の更新もリンク単位で並列化できる。ただし、リンク間の変更の影響の伝播計算においては、計算がリンク間で干渉しないための排他制御を要する。

4. 数値計算

Chicago Sketch Network^[6] (リンク数: 2950) を入力データとする。これはネットワークデータと OD (起終点) 交通量データを含む。同一ノードを起終点とする車両を削除し、60 分間で各 OD 交通量がすべて出発するように各車両の出発時刻を定める。車両は合計 1,133,783 台である。計算には Intel Xeon E5-2687W v3 3.10GHz, gcc 4.8.4, OpenMP を用いた。言語は C++ である。

図 1 に Day-to-day ダイナミクスの経過を示す。300 日分の繰り返し計算を行った時点で全ての車両が配分されている。また、全車両に対する配分車両

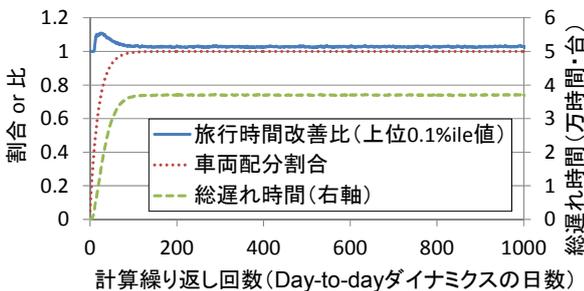


図 1: Day-to-day ダイナミクスの経過

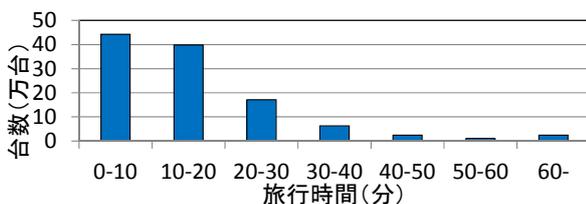


図 2: 1000 日後の経路旅行時間のヒストグラム

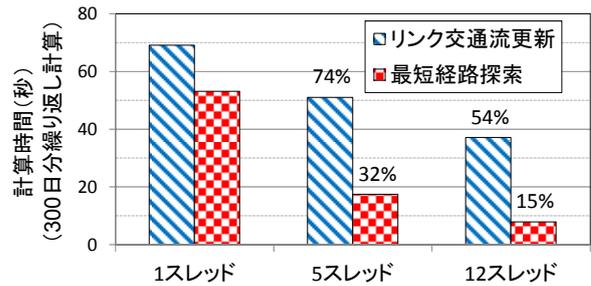


図 3: スレッド数による計算時間の変化

の旅行時間改善比 (経路変更後の旅行時間に対する、前日の経路旅行時間の比) の上位 0.1%ile 値が 1 (1.03 程度) に収束しており、ほとんどの車両が最短経路かそれにごく近い経路を選んでいる状態に到達していると考えられる。総遅れ時間も一定値に収束している。また、計算結果の一例として、1000 日後の経路旅行時間のヒストグラムを図 2 に示す。

最短経路探索とリンク交通流更新それぞれの所要計算時間が、スレッド数を増やすことによりどう変化するかを図 3 に示した。最短経路探索については並列化による一定の速度向上が達成されているが、リンク交通流については効果が限定的である。

5. まとめと今後の課題

リンク交通流の更新計算方法の改良、逐次的な車両のローディング、計算の並列化によって、現実的な規模のネットワークにおける 100 万台クラスの車両に対する動的利用者均衡配分を高速に実施する方法を実装し計算例を示した。リンク交通流更新については並列化の効果が低いが、これは排他制御によるものと思われ、これの改良が必要である。そのほか、待ち行列の延伸の表現、MPI による分散メモリ型並列計算機への実装が今後の課題である。

参考文献

- [1] Iryo, T.: Properties of Dynamic User Equilibrium Solution: Existence, Uniqueness, Stability, and Robust Solution Methodology, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol.1, No.1, pp.52-67, 2013.
- [2] Iryo, T.: Multiple Equilibria in a Dynamic Traffic Network, *Transportation Research Part B*, Vol.45, pp.867-879, 2011.
- [3] TSS – Transport Simulation Systems : AIMSUN7.0, <http://www.aimsun.com/>,
- [4] 石原雅晃・井料隆雅: マルコフ連鎖による動的ネットワーク交通量配分, *土木学会論文集 D3*, Vol.71, No.5, pp.I_503-I_509, 2015.
- [5] 石原雅晃・藤原龍・井料隆雅: 多数ケースの動的交通量配分の数値計算の高速化, 第 13 回 ITS シンポジウム 2015, 東京, 2015 年 12 月
- [6] Bar-Gera, H. : *Transportation Test Problems*, <http://www.bgu.ac.il/~bargera/tntp/> [Accessed 6 January 2016]