

平均場ゲームに基づく交通流再現モデルの設計

M2019SS005 嶋内梨乃

指導教員：小市俊悟

1 はじめに

自動車の保有台数の増加に伴い、都市部では慢性的に渋滞が発生している。渋滞は、時間的な損失を生むだけでなく、環境にも負荷を与えるため、社会的損失が大きい。このような渋滞を解消するために、今までにも様々な道路が整備され、信号による交通制御なども行われているが、都市も常に変化するものであり、交通インフラを整えることは今後も重要なことと言える。このような交通インフラの整備について計画を立てる際、整備の前後で交通流がどのように変化するかを明らかにすることが重要であり、さらには、根本的な問題として、現状の交通流を計算機上で再現することが必要である。

本研究の目的は、交通流を再現または予測するために、平均場ゲームに基づく交通流モデルを設計することである。局所的な交通流の再現にはシミュレーションが用いられ、一定の成果を挙げている。しかし、範囲が広がるとシミュレーションでは計算負荷が大きくなり、交通流の再現は容易ではない。そこで本研究では、平均場ゲームに基づくことでより広範囲の交通流に対しても一定の精度を持った再現・予測ができるモデルを構築することを目指す。

2 道路網を対象とした平均場ゲーム

平均場ゲーム (Mean-Field Game) とは、(1) ゲームに参加するプレイヤー数が多い、(2) 各プレイヤーの戦略はプレイヤー全体の状態によって取るべき戦略が決まり、一人一人のプレイヤーが全体に与える影響は小さい、(3) すべてのプレイヤーがもつ利得関数は同じであり、プレイヤーを区別できない、といった仮定をもつ動的ゲームである。

2.1 平均場ゲームを用いた既存モデルの紹介

論文“Linearly Solvable Mean-Field Road Traffic Games” [1] で紹介された平均場ゲームに基づく都市の道路網上を走行する多数のドライバーの経路選択に関するモデルを次に説明する。

2.1.1 モデルの概要

節点の集合 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, V\}$ と枝の集合 $\mathcal{E} = \{1, 2, \dots, E\}$ からなる道路網 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ において、時間 $\mathcal{T} = \{0, 1, 2, \dots, T\}$ に道路網 \mathcal{G} 上を走行するドライバー集合を $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ とし、それらのドライバーによる動的ゲームを考える。ただし、各ドライバー n は各時刻 t において、節点上にのみ存在する。また、各枝にはどの程度の割合のドライバーがその枝を移動に際して選択すべきかが分布として与えられており、その分布を参照分布と呼ぶ。

各ドライバーが \mathcal{G} 上を移動するために枝を通過する際には、各枝一定の費用に加えて、他のドライバーと一緒になっ

て集団として示す枝の選択割合と参照分布との差に応じて決まる費用を考える。前者を通行費用と呼び、後者は利得となる場合もあることから枝の選択状況に応じた利得・費用と呼ぶ。さらには、終端時刻 T における状況によって決まる費用があり、これを終端費用と呼ぶ。各ドライバーは、通行費用と枝の選択状況に応じた利得・費用、さらに終端費用、これらの和を最小にしようと行動する。特に、枝の選択状況に応じた利得・費用は自身も含めた集団としての選択により決まるものであり、他のドライバーの選択に依存することからゲームとなる。

2.1.2 通行費用と終端費用

時刻 $t \in \mathcal{T}$ において、節点 $i \in \mathcal{V}$ から節点 $j \in \mathcal{V}$ へ移動する際にかかる費用 (燃料費など) を通行費用 C_t^{ij} とする。また、終端時刻 $t = T$ において、節点 $i \in \mathcal{V}$ にいるときの終端費用を C_T^i とする。終端費用は、例えば、時刻 $t = T$ の時点でドライバーがどのぐらい目的地点に近づけたかによって生じる費用である。そのような場合は、目的地点に近ければ近いほど終端費用を小さくし、遠ければ遠いほど終端費用を大きくすれば良い。

2.1.3 枝の選択状況に応じた利得・費用

各枝において通過するドライバーに対して、枝の選択状況に応じて利得を与える、もしくは費用を課す。時刻 t に交差点 i にいるドライバー数を $K_{N,t}^i$ 、時刻 t に節点 i にいるドライバーの中で、次の時刻 $t+1$ に節点 j へ移動すると決めたドライバー数を $K_{N,t}^{ij}$ で表す。このとき、時刻 t に交差点 i にいるドライバー n が次の時刻 $t+1$ に交差点 j へ移動する際に与えられる利得、もしくは課される費用 $\pi_{N,n,t}^{ij}$ を次のように定める。

$$\pi_{N,n,t}^{ij} = \alpha \left(\log \frac{K_{N,t}^{ij}}{K_{N,t}^i} - \log R_t^{ij} \right) \quad (1)$$

ただし、 R_t^{ij} は理想とする選択割合を表す参照分布であり、すべての i について $\sum_j R_t^{ij} = 1$ と、すべての枝 $(i, j) \in \mathcal{E}$ について $R_t^{ij} > 0$ を満たす。また、 $\alpha > 0$ はパラメータである。

式 (1) により、 $\frac{K_{N,t}^{ij}}{K_{N,t}^i} \leq R_t^{ij}$ ならば $\pi_{N,n,t}^{ij} \leq 0$ となり、 $\frac{K_{N,t}^{ij}}{K_{N,t}^i} > R_t^{ij}$ ならば $\pi_{N,n,t}^{ij} > 0$ となる。その枝を選択するドライバーの割合が参照分布より大きいほど、その枝を通過する時に課される費用は大きくなり、小さければ費用は小さく、場合によっては利得になる。

2.1.4 行動選択と利得関数

時刻 t においてドライバー n が節点 i にいる確率を $P_{n,t}^i$ で表し、時刻 t においてドライバー n が節点 i から節点 j への移動を選択する確率を $Q_{n,t}^{ij}$ で表す。すると、時刻 $t+1$

においてドライバ n が節点 j にいる確率 $P_{n,t+1}^j$ は次で与えられる。

$$P_{n,t+1}^j = \sum_{i \in \mathcal{V}} P_{n,t}^i Q_{n,t}^{ij} \quad (n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{V}) \quad (2)$$

ドライバ分布 $\{P_{n,t}^i\}_{i \in \mathcal{V}}$ は、その初期分布 $\{P_{n,0}^i\}_{i \in \mathcal{V}}$ から上の式に従って計算できる。

以上を踏まえて、ドライバ n の利得関数 J を以下のように定める。ただし、時刻 t におけるドライバ n の戦略は移動の選択確率 $Q_{n,t} = \{Q_{n,t}^{ij}\}_{i,j \in \mathcal{V}}$ のことである。

$$\begin{aligned} J(\{Q_{n,t}\}_{t \in \mathcal{T}}, \{Q_{-n,t}\}_{t \in \mathcal{T}}) \\ = \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{i,j \in \mathcal{V}} P_{n,t}^i Q_{n,t}^{ij} (C_t^{ij} + \Pi_{N,n,t}^{ij}) + \sum_{i \in \mathcal{V}} P_{n,T}^i C_T^i \end{aligned}$$

ここでは、時刻 t において、ドライバ n が次の時刻 $t+1$ に交差点 j へ移動する際に与えられる利得、もしくは課される費用 $\pi_{N,n,t}^{ij}$ の期待値を $\Pi_{N,n,t}^{ij}$ にしている ($\Pi_{N,n,t}^{ij} \triangleq \mathbb{E}[\pi_{N,n,t}^{ij}]$)。以後、時間 \mathcal{T} にとるドライバ n の戦略を $Q_n = \{Q_{n,t}\}_{t \in \mathcal{T}}$ と表し、 n 以外のドライバの戦略を $Q_{-n} = \{Q_{-n,t}\}_{t \in \mathcal{T}}$ と表す。

2.2 均衡解の求め方

戦略 $\{Q_n^*\}_{n \in \mathcal{N}}$ が、各ドライバ n の任意の戦略 Q_n に対して次式を満たすとき、ナッシュ均衡であるという。

$$J(Q_n, Q_{-n}^*) \geq J(Q_n^*, Q_{-n}^*)$$

先行研究によって上記の利得関数を持つ平均場ゲームには次の性質を持つような均衡解 $\{Q_n^*\}_{n \in \mathcal{N}}$ が存在することが示されている。

$$Q_1^* = Q_2^* = \dots = Q_N^*$$

この均衡解においてはドライバを区別せずに $Q^* = \{Q_t^*\}_{t \in \mathcal{T}}$ と表すことができ、ドライバも集団としての分布 $\{P_t^i\}_{i \in \mathcal{V}}$ にまとめられる。さらに、先行研究によれば、ベクトル ϕ_t^i を次のように定義することによって、 Q^* はその時間軸の後方から線形計算で求められる。

$$\begin{aligned} \phi_t^j &= \sum_{i \in \mathcal{V}} R_t^{ij} \exp\left(-\frac{C_t^{ij}}{\alpha}\right) \phi_{t+1}^j \\ \phi_T^i &= \exp\left(-\frac{C_T^i}{\alpha}\right) \end{aligned}$$

R_t^{ij} , α , C_t^{ij} , C_T^i は定数として与えられることから、 ϕ_t^i を求めることができる。さらに、 Q_t^{ij*} と P_t^{i*} は P_0^i が初期分布として与えられていることから、それぞれ以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} Q_t^{ij*} &= \frac{\phi_{t+1}^j}{\phi_t^i} R_t^{ij} \exp\left(-\frac{C_t^{ij}}{\alpha}\right) \\ P_{t+1}^{j*} &= \sum_{i \in \mathcal{V}} P_t^{i*} Q_t^{ij*} \end{aligned}$$

以後、 P_t^{i*} を時刻 t における節点 i のドライバ密度、 $P = \{P_t^{i*}\}_{i \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}}$ をドライバの密度分布と呼ぶ。

3 提案するモデル

2節で取り上げた道路網を対象にした平均場ゲームのモデルは、通過する枝の選択状況に応じて利得を与えたり、費用を課すことで、所望の交通量(分布)を実現しようとするものであった。視点を変えると、実際の交通量を所望の交通量としてパラメータを調整することで、それを再現することが可能なモデルであるとも考えられる。このような観点から、道路網を対象にした平均場ゲームのモデルを用いるには、いくつかの新たな課題に対処しなければならないため、以下では使用した実データ、対処すべき課題の指摘とその解決方法を説明する。

3.1 使用するデータ

本研究において提案モデルに使用するデータを紹介する。

断面交通量のデータ

『JARTIC 公益財団法人日本道路交通情報センター』[2]において提供されている愛知県に関するデータで、一般道路における5分ごとの断面交通量のデータである。

信号に関するデータ

同じく『JARTIC 公益財団法人日本道路交通情報センター』[2]の愛知県に関するデータで、一般道路の交差点制御に関するデータとして、信号機のサイクル長及びスプリット値に関するデータである。また、交差点の位置情報を得るため、公益財団法人日本交通管理技術協会[3]の「交差点制御情報が提供されている交差点の位置情報等の提供」から各交差点の位置情報を入手した。

道路に関するデータ

愛知県を中心とした実際の道路データを扱う。道路網の構築にあたり、『国土数値情報ダウンロード』[4]のGML(JPGIS2.1)シェープファイル[道路(ライン)]における愛知県の日本測地系のデータ(N01-07L-23-01)を利用し、用意されているGMLファイルから必要となる情報として、節点の位置情報と節点同士の結び方から枝の情報を抜き出した。

3.2 道路網の構成

GMLファイルから抜き出した節点データと、枝データから基礎となる道路網を作成した。節点や枝のデータ内に重複が見られたので重複を除く処理をし、図1のような道路網を得た。



図1 枝を繋ぎ換える前

ここまでで作成した道路網では、節点や枝の個数が多く、モデルの計算が計算量的に難しい。そこで、交差点と節点の紐付けを行い、さらに、計測地点と枝の紐付けを行なった。これにより、交差点と紐付けられた重要と考えられる節点と、断面交通量のデータをもつ計測地点と紐付けられた枝はそのままに、そのほかの節点や枝が削減された図2のような道路網となった。さらに、節点*i*から節点*j*への枝があるときは、節点*j*から節点*i*の枝も加え、枝を用いた移動は双方向に可能とした。



図2 枝を繋ぎ換えた後

3.3 道路網の拡張

3.3.1 枝のネットワーク化

2節で紹介したモデルでは、節点上にドライバ密度を与える。しかし、実データにおいては枝上に交通量、つまり、ドライバ密度が与えられている。このような違いに対処するために、道路網の各枝にダミー点を対応させ、それらのダミー点上にドライバ密度を割り当てるようにする。さらに、2節のモデルは各ステップで節点から節点に移動することが想定されている。つまり、枝の通過時間が枝によらずに一定である。しかし、実際には、枝の通過時間は対応する道路の長さや交通量にも依存すべきである。このようなことを表現するために、元の道路網の各枝を図3のようなダミー点による閉路を含まないネットワークで置き換えた。

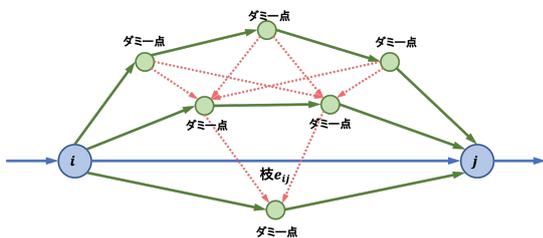


図3 ダミー点を含む場合の枝 e_{ij}

これに関連して、5分ごとであった断面交通量のデータを線形補間により、1分ごとのデータとし、1ステップが1分であることを以後では想定する。

3.3.2 Super Node の導入とドライバ数

道路網を対象にした平均場ゲームは、閉じられたネットワークを前提としており、ドライバの総数は常に一定で

ある。しかし、実際に対象とする道路網は全体の中の一部であり、対象とする道路網の外部との流入出によって、道路網内のドライバの総数は変動するものである。そこで、ドライバの総数を多めに設定した上で、Super Nodeを導入し、ステップごとにSuper Nodeと元の道路網の間で密度を移動させることで、このような変動を表現可能とした。

4 パラメータの最適化問題

ドライバの初期分布は、実際の分布を利用することとすれば、平均場ゲームにおいて、パラメータとなるのは、通行費用 $\{C_t^{ij}\}$ 、終端費用 $\{C_T^i\}$ 、参照分布となる $\{R_t^{ij}\}$ 、さらに、通行費用と枝の選択状況に応じた利得・費用のバランスを定める非負のパラメータ α である。これらを変数とみなした上で、次に説明するような最適化問題を解くことで、実際の交通量を再現するのに適切なパラメータの値を定める。対象とするのは、3.3節で拡張された道路網である。ネットワークに置換する前の枝 e は、時刻 t において、枝 e 上の交通量、すなわち、ドライバ密度 $v_{e,t}$ がわかっているものとする。枝 e をネットワークに置換する際に加えたダミー点の集合を $D_e = \{d_e^{(1)}, d_e^{(2)}, \dots, d_e^{(k_e)}\}$ とする。変数の値を一つ決めて、均衡解を求め、時刻 t における各節点 j のドライバ密度 P_t^{j*} を求める。これは先行研究の結果により、線形計算で行うことができる。ダミー点 D_e は元々枝 e に対応していたので、次を時刻 t における枝 e のドライバ密度 \tilde{P}_t^e と考える。

$$\tilde{P}_t^e = \sum_{d \in D_e} P_t^{d*}$$

この値が、 v_e と等しいほど、実際の交通量が再現されたと考えられ、それを均衡解として与えるパラメータが求めるものとなる。そこで、実際のドライバ密度と、均衡解から得られるドライバ密度の重み付き二乗誤差を目的関数として設定する。すなわち、元の道路網において交通量が測定されている枝の集合を \tilde{E} として、下記を目的関数とした最適化問題を考える。

$$f(\{C_t^{ij}\}, \{C_T^i\}, \{R_t^{ij}\}, \alpha) = \sum_{e \in \tilde{E}} \sum_{t \in T} w_t (v_{e,t} - \tilde{P}_t^e)^2$$

ただし、初期分布の信頼性が低いため、基本的に後半での再現を重視するよう w_t で重み付けをする。

4.1 最適化の方法

最急降下法を基本とした解法で、上述の最適化問題を解くことで、適切なパラメータを定める。ただし、終端費用 $\{C_T^i\}$ については更新できるようにしても得られる結果にあまり差異がなかったため、本研究では最適化しないものとする。

最急降下法では、目的関数の勾配が必要となるが、それを求めるために自動微分を活用する。その際、参照分布 $\{R_t^{ij}\}$ と α については、推移行列である必要や非負制約があるので、適切に勾配方向を修正するなどして、それらの制約を満たすように解を更新する必要がある。また、最急降下法においては、一般的に解 \mathbf{x} を $\mathbf{x} = \mathbf{x} - \gamma \nabla f(\mathbf{x})$

というような式で更新していくが、その際に用いる進み幅 γ として、参照分布に対しては $\{R_t^{ij}\}$ は $\gamma = 1.0 \times 10^{-9}$ とし、通行費用 $\{C_t^{ij}\}$ と α は $\gamma = 1$ とした。

5 検証結果

本研究で、広範囲として愛知県名古屋市の「区」の規模を想定し、中区のデータを用いる。中区は、65 の節点数と 214 本の道路からなる交通網であり、計測地点は 24 箇所である。また、2020 年 3 月 12 日（木曜日）における断面交通量のデータを使用する。

5.1 交通量の再現

実際に計測された 16 時台のデータをもとに検証を行った。時刻の数に相当するステップ数 T はメモリの限界もあり、 $T = 16$ である。図 4 のグラフはパラメータの最適化をし得られたパラメータをもとに再現した交通量をグラフにしたもので、縦軸は交通量、横軸は時刻である。ただし、24 個あるうちの 6 箇所に対する結果を示した。青のグラフは、実際に観測された交通量を表し、赤のグラフは初期分布からモデルに基づく計算により得られた交通量である。

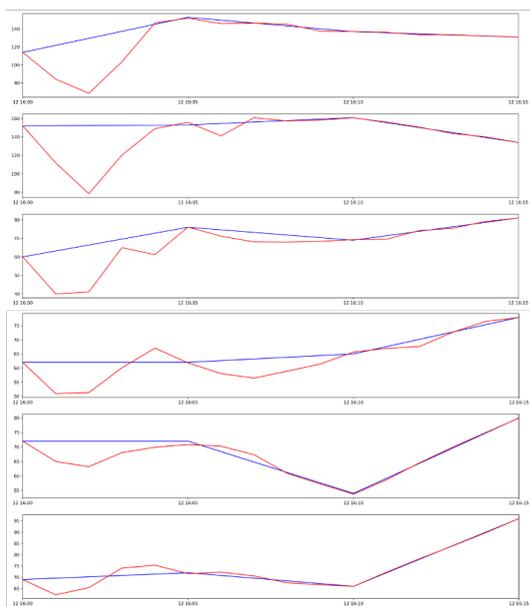


図 4 交通量の再現

後半での再現を重視するよう w_t で重み付けをしたこともあり、後半ほど、交通量が誤差少なく再現できている。

5.2 同じ曜日の別日に対する交通量の予測

また、2020 年 3 月 12 日（木曜日）に対して得られた最適なパラメータを用いて、同じ曜日の別日である 2020 年 3 月 19 日の同時刻の予測を試みた。それにより、図 5 のグラフのような結果が得られた。ただし、先ほどと同様に 6 箇所の計測地点に対する結果を示しており、縦軸は交通量、横軸は時刻である。薄い青のグラフは、実際に観測された交通量を表し、濃い青のグラフは、実際に観測された交通量を 4 時刻分ごとに平均をとったもの、濃い赤のグラ

フは予測で得られた交通量を 4 時刻分ごとに平均をとったものである。

断面交通量のデータは元々、5 分ごとであったものを線形補完により 1 分ごとのデータに変換したものであるから、一定時間で平均をとったもので比較の方が適切なのところもあると考える。

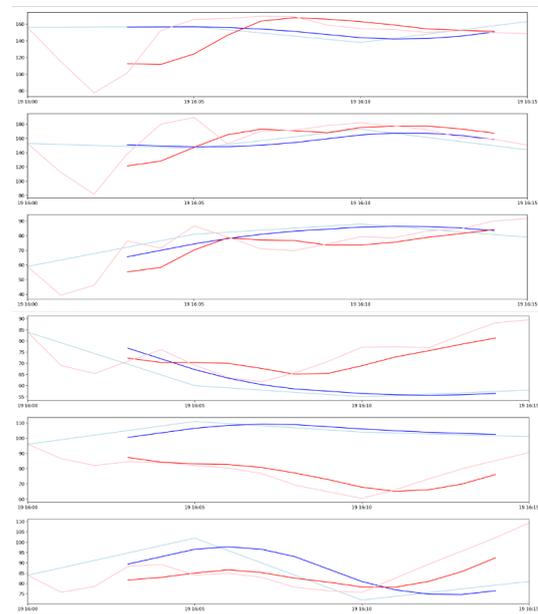


図 5 交通量の予測

実測値と予測値に違いは見られるものの、多くの計測地点で交通量の変化の傾向は捉えられていた。ただし、傾向も異なる計測地点も散見される結果となった。

6 おわりに

平均場ゲームに基づき実際に計測された交通量を再現するモデルを提案した。計算実験により、一定の精度を持つことも示せた。これを踏まえて、計測地点の交通量を再現するために得られたパラメータはどのような値かを分析することが今後の課題である。また、特定の日に對して得られたパラメータを用いて、同じ曜日の別日の交通量を予測することについては、他の時間帯や他の曜日に対して検証できていない。これも、今後の課題である。

参考文献

- [1] Takashi Tanaka, Ehsan Nekouei, Karl Henrik Johansson : Linearly Solvable Mean-Field Road Traffic Games. arXiv : 1808.05305v1[Math.OE], 2018
- [2] JARTIC 公益財団法人日本道路交通情報センター <http://public-data.jartic-raws.durasite.net/opendata.html> (2020/4/1~2020/5/1 閲覧)
- [3] 公益財団法人日本交通管理技術協会 <https://www.tmt.or.jp/research/index10.html> (2020/9/10 閲覧)
- [4] 国土交通省国土数値情報ダウンロード <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2020/9/10 閲覧)