

情報提供による分岐のある道路における交通流の最適化

今井武晃¹, 西成活裕²

¹ 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

² 東京大学 先端科学技術研究センター

概要

分岐のある道路では、ナビゲーションシステムがドライバーの意思決定の手助けをする。しかし、不適切な情報を与えてしまうとハンチング現象と呼ばれるような交通渋滞をかえって引き起こしてしまう事がある。本研究では Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) を用いた分岐モデルを作り、なぜハンチング現象が起こるのかを提供する情報の内容と時間遅れの観点から分析した。また、数学モデルを作り、交通状況の良し悪しを情報の普及率という点から分析した。本発表ではそれらの成果を紹介する。

Optimal Information of Forked Road

Takeaki Imai¹, Katsuhiro Nishinari²

¹Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo

²Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Abstract

In a forked road, navigation systems helps drivers decide which route is better to go. However, inappropriate informations ironically cause traffic jams called hunting phenomenon. We propose the forked ASEP model and investigated the reason why hunting phenomenon occurs in terms of types and time delay of information. Moreover we also proposed a mathematical model and investigated how many drivers should obtain the information.

1 はじめに

情報というのは、多くの社会システムにおいて重要な役割を果たしている。現実の交通ではドライバーはリアルタイムの情報を ITS やカーナビゲーションシステムなどを用いることで手に入れることができ、ルート選択の手助けをしている。そのため、交通情報がドライバーや実際の交通状況に与える影響については従来様々な研究がなされている。[1, 2] 情報は社会システムの最適化のために重要だが、不適切な情報はかえってハンチング現象と呼ばれる一種の渋滞を引き起こす事がある。しかしそのメカニズムについて詳しく分析している研究はない。交通流を模したセルオートマトンのモデル [3, 4] は様々あるが、

本研究では最もシンプルな ASEP[5] を用い、ハンチング現象の原因について情報の提供内容と情報の時間遅れという2つの観点から解析する。加えて、ドライバーが情報を得られている割合 (share rate と定義する) にも着目する。実際の交通状況でもすべての人がナビゲーションシステムを持ち、従うわけではないため、share rate は非常に重要な指標である。実際に share rate を導入している研究例はあるが [6]、焦点をおき交通状況の挙動を分析した研究は数少ない。本研究では、share rate が交通状況に与える影響についても、ASEP と数学モデルを用いることで解析する。

2 モデル

ASEP を用いて、分岐路のモデルを考える。(図1) 確率 α で流入し、ドライバーが分岐路まで到着すると次のルートを選ばなければならない。分岐路はルート1、ルート2それぞれ L 個のセルから構成される。それぞれのルート内で右にホップする確率は等しく $p = 1$ とし右端まで到着するとそれぞれ確率 β_1, β_2 で退出する。ドライバーには情報を受け取ることができそれに必ず従う dynamic driver と情報を受け取れずランダムに道を選ぶ static driver の2種類が存在し、その両者の割合を share rate x と定義する。

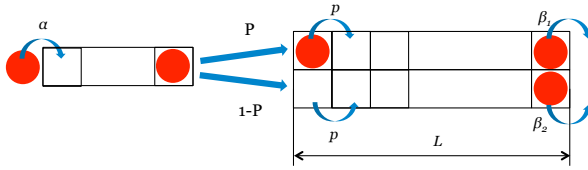


図1: 分岐 ASEP モデル

ドライバーに与える情報の内容には3種類ある。

1. ルート内の平均速度

平均速度は、ルート内の粒子の総数 N_{all} と1ステップの間に動いた粒子の数 N_{move} を用いて $V_{\text{mean}} = \frac{N_{\text{move}}}{N_{\text{all}}}$ と書ける。

2. ルート内の渋滞列の長さ

ルートの右端から止まっている粒子の数を数え上げることで求めることができる。

3. ルート内の密度

$\rho = \frac{N_{\text{all}}}{L}$ と書ける。

情報の内容に加えて、与える情報を情報の時間遅れにより分類した。速度と渋滞列の情報は過去 (300ステップ前) 情報、現在の情報に加えて予測情報の3種に分類し、密度情報に関しては過去と現在の情報の2種に分類した。交通流の予測情報は、簡単な近似計算を行った。 N_0 をドライバーが分岐に到達したときにルート内にある車の数とすると、

$$l = \begin{cases} 1 & \left(N_0 < \frac{p-\beta+\beta L}{p} \right) \\ N_0 - \frac{L-N_0}{p-\beta} \beta & \left(N_0 \geq \frac{p-\beta+\beta L}{p} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$T = \begin{cases} \frac{1}{\beta} + \frac{L-N_0}{p-\beta} & \left(N_0 < \frac{p-\beta+\beta L}{p} \right) \\ \frac{N_0}{\beta} & \left(N_0 \geq \frac{p-\beta+\beta L}{p} \right) \end{cases} \quad (2)$$

を用いる。ここで、 l は予測された渋滞列を表し、 T は予測された旅行時間を表している。

3 シミュレーション結果

上記のモデルを用いてシミュレーションを実行した。それぞれのパラメータにおいて30000ステップのシミュレーションを100回繰り返し、旅行時間の平均値を交通状況の指標として用いた。つまり、旅行時間の値が小さいほど交通状況は良いということになる。

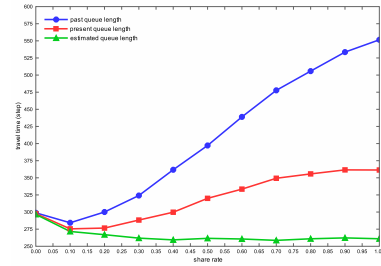


図2: share rate x に対する travel time の振る舞い。丸が過去の情報、四角が現在の情報、三角が予測情報を示している。すべての情報は渋滞列の長さの情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。

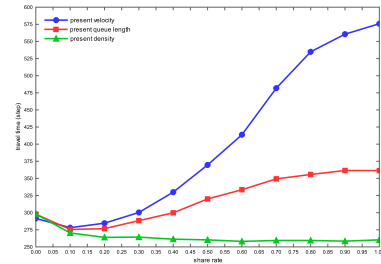


図3: share rate x に対する travel time の振る舞い。丸が速度の情報、四角が渋滞列の長さの情報、三角が密度情報を示している。すべての情報は現在の情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。

1 図2は share rate x に対する travel time の振る舞いを示したグラフで、丸が過去の情報、四角が現在の情報、三角が予測情報を示している。すべての情報は渋滞列の長さの情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。同じ情報の内容が与えられても、情報の時間遅れが大きければ大きいほど平均旅行時間は長くなり交通状況は悪化するということがわかる。図3は share rate x に対する travel time の振る舞いを示

したグラフで、丸が速度の情報、四角が渋滞列の長さの情報、三角が密度の情報を示している。すべての情報は現在の情報であり、 $\alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ である。グラフから、速度情報、渋滞列の長さの情報、密度情報の順に交通状況が良くなっていく事がわかる。この結果は、速度情報と渋滞列の長さの情報自体が内在的に情報遅れを含んでいることに起因する。分岐点において渋滞列の情報をドライバーは受け取るが、その情報は実際に自分が渋滞の最後尾に並ぶ時の長さとは違う。2章で予測した渋滞列の情報が自分が経験する情報だとすれば、現在の渋滞列情報は自分が渋滞の最後尾に並ぶまでの時間分の遅れを内在的に含むことになる。

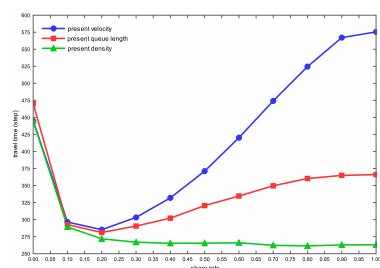


図 4: $\alpha = 0.2, \beta_1 = 0.09, \beta_2 = 0.11$ の条件下での share rate x に対する travel time の振る舞い。丸が過去の情報、四角が現在の情報、三角が予測情報を示している。すべての情報は渋滞列の長さの情報である。

図 4 はパラメータ $\alpha = 0.2, \beta_1 = 0.09, \beta_2 = 0.11$ の条件下での share rate x に対する travel time の振る舞いを示したグラフで、丸が過去の情報、四角が現在の情報、三角が予測情報を示している。すべての情報は渋滞列の長さの情報である。share rate が 0 付近では交通状況が悪くなっている事がわかる。これは、情報を得られる人がいないもしくは少なすぎるために、情報によるフィードバックが追いついていない状態を示している。ある点を超えると交通状況は劇的に改善されることもわかる。

情報が交通状況に与える影響について詳細に調べるために、時系列データを取って考察を行った。図 5 の時系列プロットはそれぞれ share rate $x = 1.0$ における (a) 過去 (b) 現在 (c) 予測の情報を与えた時のルート 1, 2 の密度の時系列データを示している。(a) では粒子の数が一方に偏り振動していることがわかる。この現象をハンチング現象と呼ぶ。(b) でもハンチングは起こっているがその周期は短い。(c)

ではハンチングは見られず、交通状況は最も良かった。この結果から、時間遅れが大きいほどハンチングの周期は大きくなり、そのため交通状況が悪化することがわかる。同様のことが図 6 にも言える。図 6 はそれぞれ share rate $x = 1.0$ における (a) 速度 (b) 渋滞列の長さ (c) 密度の情報を与えた時のルート 1, 2 の密度の時系列データを示している。a,b,c の順に交通状況は良くなり、交通状況が最も悪くなる速度情報のハンチングの周期が最も長くなっている。

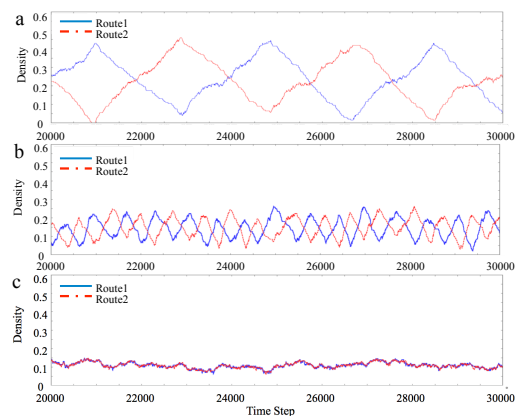


図 5: share rate $x = 1.0, \alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ における (a) 過去 (b) 現在 (c) 予測の情報を与えた時のルート 1, 2 の密度の時系列データ。すべての情報は渋滞列の長さの情報を与えている。

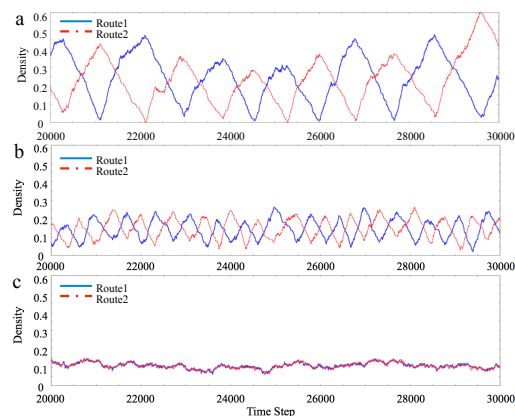


図 6: share rate $x = 1.0, \alpha = 0.2, \beta_1 = \beta_2 = 0.1$ における (a) 速度 (b) 渋滞列 (c) 密度の情報を与えた時のルート 1, 2 の密度の時系列データ。すべての情報は現在の情報を与えている。

4 数学的アプローチ

シミュレーションに加え数学モデルを作り分析を行った。空間構造を無視することで、それぞれのルート内の粒子の時間変化は以下の式で書き表すことができる。

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = \alpha x P(t - \tau) + \frac{1}{2}\alpha(1 - x) - \beta_1 \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = \alpha x(1 - P(t - \tau)) + \frac{1}{2}\alpha(1 - x) - \beta_2 \end{cases} \quad (3)$$

$N_1(t), N_2(t)$ はルート 1,2 での粒子の個数、 α, β はそれぞれ粒子の流入確率、流出確率を表している。Share rate x の割合の人が dynamic driver として情報を受け取ることができ、確率 P でルートを選ぶ。 P は

$$P(t) = \frac{1}{1 + \theta^n(t)}, \quad \theta = \frac{N_1(t)}{N_2(t)} \quad (4)$$

と表される。ここで、 n は情報に対するドライバーの感度を表す。 n が大きくなるほど、少しの差でも粒子の少ないルートを選ぶようになる。シミュレーションでは $n \rightarrow \infty$ とし、すべての dynamic driver が粒子の個数が小さい方のルートを選ぶということになる。 τ は時間遅れである。

(3) を用いて、流入確率、流出確率、share rate が交通状況に与える影響についての関係性を記述することができる。言い換えると、どのくらいの割合の人に情報を与えると2つのルートの条件差による交通状況の悪化を防ぐことができるかを求めることができる。ルート 1 の粒子がルート 2 より小さいときに、きちんと情報によるフィードバックが行われる限界の条件は $\frac{dN_1}{dt} = 0$ ($N_1 > N_2$) で表され、式を整理すると

$$x = \frac{\Delta\beta}{\alpha} \quad (\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1) \quad (5)$$

と書ける。図 7 は x, β を変数にとり、旅行時間の挙動を分析したシミュレーション結果をプロットしたグラフとなっている。左のグラフが現在の密度情報、右が過去の密度情報である。白線が式 (5) で表される理論的なクロスオーバーラインとなっており、実際そのライン付近で交通状況が劇的に変化していることがわかる。右のグラフでは、一度旅行時間が低下した後再び上昇し、交通状況が悪化している。これは情報の時間遅れが原因でハンチングが起こっていることに起因する。式 (5) を用いることで、情報の時間遅れがある場合にも、最も交通状況が良くなる share rate を見積もることができることがわかる。

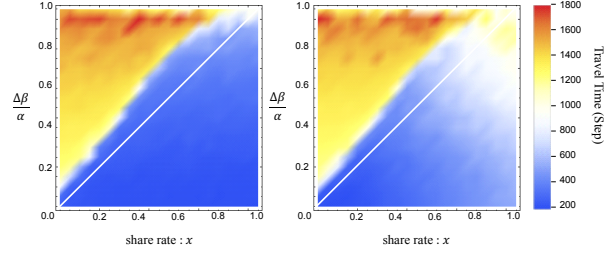


図 7: 旅行時間の挙動を分析したグラフ。横軸が share rate x 、縦軸がルート間の流出確率の差を α で規格化した $\Delta\beta$ となっている。

5 考察とまとめ

交通情報を用いてドライバーは渋滞を避けようとするが、情報によってはハンチング現象を引き起こし交通状況をかえって悪化させる事がある。本研究では情報が交通状況に与える影響を分析し、時間遅れとハンチング現象の関係性を明らかにした。また、数学的アプローチにより、情報の普及率が交通状況に与える影響について詳細に分析することができた。これら 2 つの結果は、実際に分岐における情報提供の方法を考えるにあたり非常に有益であると考えられる。

今回は 2 つのルートのホップ確率は同じという条件下でシミュレーションを行ったが、実際の交通流では高速道路と下道のようにルートによって速度が違ふという状況もある。今後はそのような異なった条件における分析も行っていきたい。

参考文献

- [1] J. Wahle, A. Lucia, C. Bazzan, F. Klugl, M. Schreckenberg, *Physica A* **287**, 669 (2000).
- [2] W.X. Wang, B.H. Wang, W.C. Zheng, C.Y. Yin and T. Zhou, *Phys. Rev. E* **72**, 066702 (2005).
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg, *J. Physique I* **2**, 2221 (1992).
- [4] K. Nishinari and D. Takahashi, *J. Phys. A; Math. Gen.* **33**, 7709 (2000).
- [5] B. Derrida, *Phys. Rep.* **301**, 65 (1993).
- [6] J. Wahle, A. Lucia, C. Bazzan, F. Klugl, M. Schreckenberg, *Trans. Res. Part C* **10**, 399 (2002).