

交差点部におけるスロースタート効果を持つ車両の最適行動

野村 宗広¹, 西成 活裕^{1 2 3}

¹ 東京大学大学院 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 ³ (独) 科学技術振興機構 さきがけ

概要

交差点の信号機前における混雑の解消策をドライバー行動の改善というアプローチから、CA シミュレーションおよび数理解析によって明らかにした。平均旅行時間の最適化に着目し、これを最適化する車間距離の存在および最適車間距離の逆転現象の存在を示した。逆転現象によりスロースタート効果の強弱により、車間距離を取り停止することで平均旅行時間が改善する場合とそうでない場合が存在することがわかった。

Optimal driver's behavior with slow start effect at intersection

Munehiro NOMURA¹, Katsuhiko NISHINARI^{1 2 3}

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

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

³ PRESTO, Japan Science and Technology Agency

Abstract

The purpose is to suggest the solution of traffic jam at intersection. We focused on the behaviour of drivers. We clarified them by simulations and analysis. A solution is found here. It shows that it is optimized to stop cars with intervals in certain condition. The condition depends on the parameter of slow start effect.

1 はじめに

現状として、我々は生活の多くを自動車に負っており、多くの利便性を得ている一方、多くの交通問題に直面している。その中のひとつが交通渋滞であり、さらにその一つは信号交差点における交通渋滞である。信号機運用に関する研究として待ち行列を用いたものなどがあるが [2] 車の慣性効果や空間構造を考えたものはあまりない。本論文では信号機による交通流の最適化方法を提案するべく、平均旅行時間に注目をした。最適化するドライバーの行動を CA シミュレーションにより明らかにし、よい近似解を得た。これにより信号機運用の更なる効率化とドライバーへの模範的行動の提起が行われるものと期待する。

2 交通流モデル

自動車の挙動についてはスロースタート効果付 CA ルール 184 を用いて CA モデルによるコンピュータシミュレーション及び理論解析を行った。

2.1 道路構造

本論文では図 1 のような構造を考える。車両は左端から流入し右端から退出する。右端には信号機が設置されており、各車両はそのオペレーションに従うものとする。 L : Lane のセル数、 α : 左端での車両の流入確率 β : 右端での車両の退出確率、と定義する。

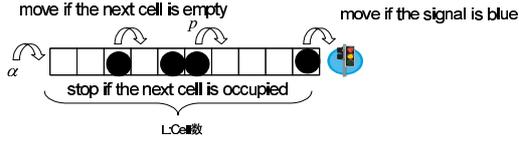


図 1: 信号機モデルの道路構造

2.2 信号機の運用

信号機が赤信号の時は $\beta = 0$ であり、青信号の時は $\beta = 1$ となる。 t_r : 赤信号の step 数、 t_b : 青信号の step 数、 $T(= t_r + t_b)$: 信号周期と定義する。

2.3 車両の挙動

x : 道路セルの座標 ($1 \leq x \leq L$) と定義し、左端を $x = 1$ 、右端を $x = L$ とする。さらに x_i^t : 時刻 t における車両 i の座標である。次に車両間の相対的な位置情報指標として、時刻 t における車両 i とその前方車両の車間距離 d_i^t を定義する。たとえば $\text{if } (x_i^t, x_i^t + 1) \text{ is full, } d_i^t = 0$ である。最後に、時刻 t における車両 i のホップ確率を p_i^t と定義する。車両の挙動ルールは CA ルール 184、スロースタート効果、インターバル効果の 3 つから構成されており、update rule は parallel update とした。CA ルール 184 では、($x_i^t \neq L$) のホップ確率は以下のように記述される。

$$p_i^t = \begin{cases} 1, & (d_i^t \neq 0) \\ 0, & (d_i^t = 0) \end{cases} \quad (1)$$

決定論的に振る舞い、次のセルが空いていれば前進し占有していれば停止する。

2.4 スロースタート効果

スロースタート効果としては、Cecile モデル [3] や Benjamin モデル [1] などがあるが、本研究では Benjamin モデルを用いた。そしてスロースタートパラメータを s_B と定義する ($0 \leq s_B \leq 1$)。この場合パラメータが小さいほどスロースタート効果は大きくなる。Benjamin モデルでは、式 (2) や図 2 にあるように、一旦停止をすると次の前進機会にのみホップ確率は s_B 倍される。

$$p_i^t \rightarrow \begin{cases} p_i^t \times s_B, & (p_i^t = 1, p_i^{t-1} = 0) \\ p_i^t, & (\text{else}) \end{cases} \quad (2)$$

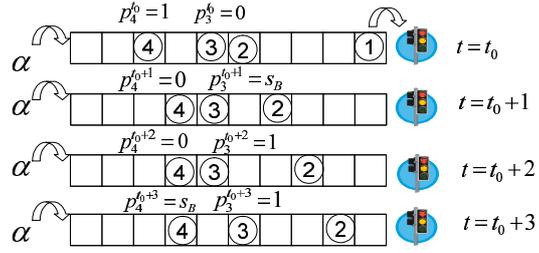


図 2: スロースタート効果

2.5 インターバル効果

インターバル効果とは、信号機が赤色を灯している場合に車間距離を取って停車しようとする効果である。ここでは赤信号時における各車両の許容車間距離をインターバルパラメータ I_v と定義する。許容車間距離とは最低車間距離を意味し、たとえば $I_v = 0$ の状態は通常のスロースタート効果付 CA ルール 184 に対応する。この効果によって図のように、
 1) 赤信号時に車間距離 I_v で停車 (図 3)
 2) 赤信号時に車間距離 $I_v + 1$ 以上で走行 (図 4)
 という 2 つの挙動が起こる。赤信号時における ($x_i^t \neq L$) でのインターバル効果によるホップ確率を式で表すと以下ようになる。

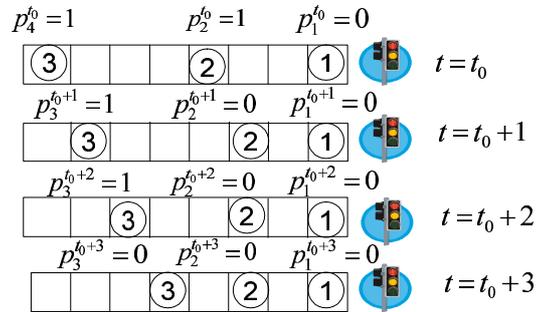


図 3: インターバル効果 1)

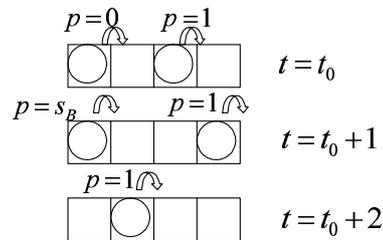


図 4: インターバル効果 2)

$$p_i^t = \begin{cases} 1, & (d_i^t \geq Iv + 1) \\ 0, & (\text{else}) \end{cases} \quad (3)$$

2.6 最適化指標：平均旅行時間

本論文の目的は最適な運転手の行動の解明であるが、その最適化指標として平均旅行時間 (\overline{TT}) を導入する。旅行時間とは流入から退出までにかかった step 数であり、その車両についての平均が平均旅行時間である。

3 シミュレーション：ドライバー最適行動

本章では $T = 100(\text{step})$ 、 $L = 100(\text{cell})$ の条件下において、各行動戦略 Iv 毎に Benjamin スロースタートパラメータ s_B に対する平均旅行時間 \overline{TT} を求めた。シミュレーションは 105000step までを行い、 $t=5000\text{step}$ から 105000step までの時間平均を用いた。シミュレーション結果を以下の図に示す。図 5

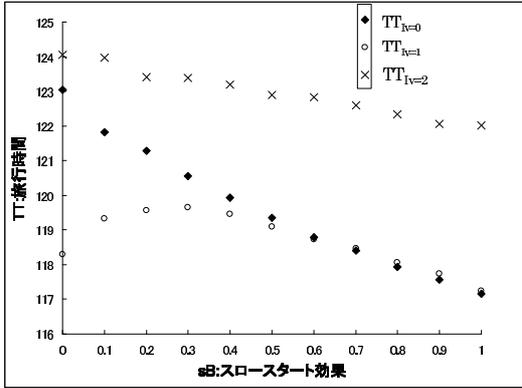


図 5: TT versus s_B .
 $\alpha = 0.15$ における各行動規範 Iv の平均旅行時間

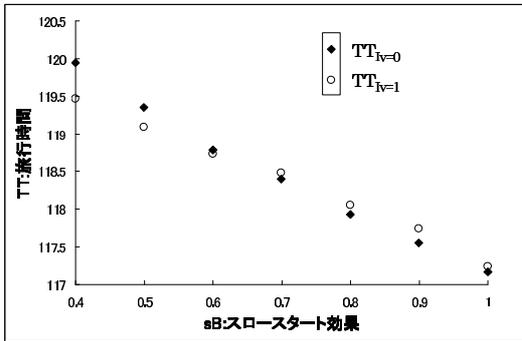


図 6: TT versus s_B .
 $\alpha = 0.15$ における最適行動の逆転部拡大図

は $Iv = 0, 1, 2$ のケースにおける平均旅行時間をス

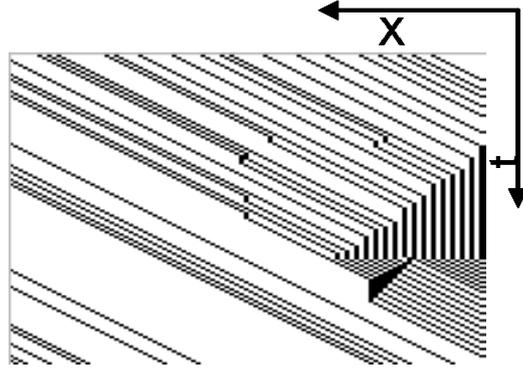


図 7: $(\alpha, s_B, Iv) = (0.15, 0.1, 1)$ における時空図

ロースタートパラメータ s_B に対してプロットしたものであり、図 7 は図 1 の右端を $X = 0$ とした時の時空図である。図 5 からスロースタート効果が大きい (s_B が小さい) 領域では最適戦略は $Iv = 1$ であるが、スロースタート効果が小さい領域では最適戦略は $Iv = 0$ となり、逆転現象が起きていることがわかる。逆転箇所を拡大したものが図 6 である。これにより僅かではあるが最適戦略が逆転していることがわかる。図 5 において、 $TT_{Iv=1}$ が極大値を持つのは時空図 7 にも見られるように、 $s_B \neq 0, 1$ では青信号時の退出において渋滞波が発生するからである。

4 平均旅行時間の近似解

本節では $Iv = 1$ における平均旅行時間の近似解を示す。各セルの平均占有率 ρ 、平均流量 q を定義すると、自由流領域において $q = \rho = \frac{\alpha}{1+\alpha}$ となることが分かっている [4]。信号周期 T_{step} の間に右端信号機から退出する平均車両台数 N は $N = \rho T$ となる。

TT_{red} : 赤信号間の停車時間の全車両に対する累積
 TT_{blue} : 青信号間の停車時間の全車両に対する累積
 TT_{road} : インターバル効果による停止時間の累積
 を用いて平均旅行時間は以下のように構成される。

$$\overline{TT}_{Iv=1} = \frac{T_{red} + T_{blue} + T_{road}}{N} + L \quad (4)$$

L は cell 数であり、最大でホップ確率は 1 であるので、旅行時間の最短時間を意味する。渋滞波の伝播速度 V_{jam} を用いて、 T_{red} は以下のように近似的に書ける。

$$T_{red} = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \left(\frac{T}{2} V_{jam} \right) \quad (5)$$

図8は赤信号時における渋滞波伝播速度 V_{jam} と T_{red} の関係を時空図に模式的に表現したものである。図8のように、渋滞波は速度 V_{jam} で伝わることにより赤信号によって平均 $\frac{T}{2}V_{jam}$ 台の車両の列が生じる。これらによる平均旅行時間の増分は図の面積となるため式5となる。 V_{jam} は車両 i 番目と $i+1$ 番

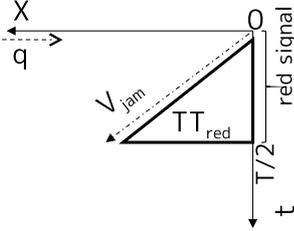


図8: 赤信号時における渋滞波伝播速度 V_{jam} と T_{red} の関係

目の相関を切り、平均場近似を行うことで以下のように書ける。

$$V_{jam}^{-1} = q^{-1} - 2 \quad (6)$$

青信号時の退出時における旅行時間の増分 TTb_i は、

$$TTb_i = (1-s) \frac{P(i)}{1-s} + i(1-s_B)(1-P(i)) \quad (7)$$

$P(i)$ は i 番目の車両以前で渋滞が発生する確率、 $P(i) = \sum_{k=0}^{i-1} s_B^k (1-s_B)^{i-k}$ である。式7の第1項は i 番目の車両が渋滞に巻き込まれない場合の増分、第2項は渋滞に巻き込まれた場合の増分を意味する。 T_{blue} は TTb_i の停車車両台数 N_{queue} にわたる和である。

$$T_{blue} = \sum_{j=1}^{N_{queue}} TTb_j \quad (8)$$

N_{queue} は赤信号時に到着する停車台数と青信号時に到着する停車台数の和として以下のように記述される。

$$N_{queue} = \frac{T}{2} \frac{\alpha}{1-\alpha} + \alpha \frac{T}{2} \frac{\alpha}{1-\alpha} (1-s_B) \quad (9)$$

車間距離 $lv+1$ 未満の車両が停止することによる旅行時間の増分を考える。これに影響を受ける後続車両数が n 台である確率を $Q(n)$ と定義すると、

$$T_{road} = N(2-s_B) \sum_{n=0}^{\infty} Q(n)(n+1) \quad (10)$$

となる。車間距離が $d=1, 2, \text{ or } 3$ の場合後続車は渋滞に巻き込まれるので $Q(n) = (1-(1-\alpha)^3)^n$ であ

る。平均場近似により自車と後続車 n 台を含む $n+1$ の車両が被る停車時間を $2-s_B$ とした。図9は以上のように求めた近似解とシミュレーションの結果を比較したものである。これにより良い近似解を得ることができた。

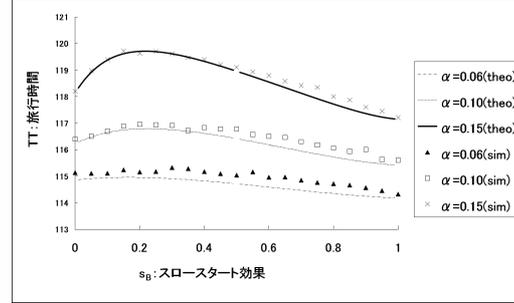


図9: $TT_{lv=1}$ versus s_B . シミュレーションと平均場近似により得られた結果の比較

5 まとめ

本論文では、スロースタート効果とインターバル効果を付加した CA ルール 184 に従う交通流モデルを用いることによって、平均旅行時間に対して最適なインターバル間隔が存在することを示した。さらにその最適間隔にはスロースタート効果の強弱によって逆転現象が生じることが分かった。

参考文献

- [1] S.C.Benjamin, N.F Johnson, and P.M. Hui, Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction, J. Phys. A:Math. Gen. **29**(1996), 3119-3127
- [2] F. Viti, Henk J. van Zuylen, Probabilistic models for queues at fixed control signals, Transp. Res., Part B: **44**(2010) 120-135.
- [3] Cecile Appert and Ludger Santen, Boundary Induced Phase Transitions in Driven Lattice Gases with Metastable States, Phys.Rev.Lett. **86**,(2001) 2498-1501
- [4] Exact Stationary State for an asymmetric exclusion process with Fully Parallel Dynamics, Phys. Rev. E: **59**(1999) 4899-4911