

交通流の相転移と自律分散制御にむけて

大平徹

ソニーコンピュータサイエンス研究所

ohira@csl.sony.co.jp

http://www.csl.sony.co.jp/person/ohira.html

Abstract

本論文では交通流の自律分散的制御の方向を模索するための試みとして単純化されたコンピュータネットワークモデルと信号機のある車交通流モデルを紹介する。どちらも単純な自律分散的な制御により渋滞を緩和する可能性を示している。

1 はじめに

自動車やコンピュータネットワークの交通流の渋滞を制御する課題は現代における社会的にも工学的にも重要な問題の一つである[1]。特に一般の制御方式にみられる中央集権的な手法の適用ができにくいことが、この問題を非常に困難にしている。

このような背景に基づいて、ここでは物理学や数理生物学で使われている概念や手法を利用しながら自律分散化された交通制御システムにむけて著者の考察したモデルを2つ紹介する。どちらのモデルについても理論的な探求などはまだ行っておらず、初期的な段階にあるものであるが、問題の提起としてとらえていただけるかと考えている。(詳細については文献[2, 3]とそこでの引用文献を参照されたし。)

2. コンピュータネットワークモデル

ここではモデルコンピュータネットワーク上で大量の通信が行われるときの渋滞相への相転移現象を発現させる単純なモデルを紹介して、物理学で使われるMonte Carlo的な自律分散制御を行うことでこの渋滞相への相転移点を緩和させることの可能性をしめす。

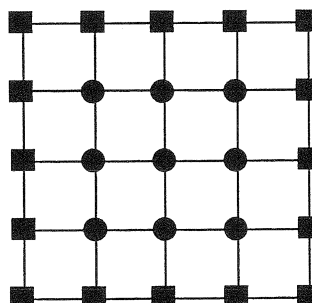


図1.

ネットワークモデルの概念図

まずモデルについて解説する。図1にあるように $N \times N$ の格子状のネットワークを考え、周囲の四角サイトよりパケットがランダムな他の四角サイトのあて先とともに単位時間に確率 λ で生成される。これらのパケットはあて先に向けてこの格子状を後に述べる自律分散転送方式によって移動する。丸印サイトではパケットの生成を行わずに、キュー（長さに制限なし）の先端のパケットを次のサイトに転送し、受け取ったパケットをキューの最後にいれる動作を行う。パケットはあて先のサイトに到着すると消滅する。基本となるパケット転送方式は以下の方針を持つ。

- (1) パケットのあて先をみて最短の経路の方向に転送する。
- (2) 最短の経路が複数（ここでは最大2つ）ある場合には過去の転送量 X がより少ない方向に転送する。

このモデルにおいて渋滞はパケットの生成から消滅までの平均寿命 $\langle L \rangle$ によってはかることとする。パケット生成率の関数としたとき、このシステムは 図 2A にあるように渋滞相への相転移を発現させる。

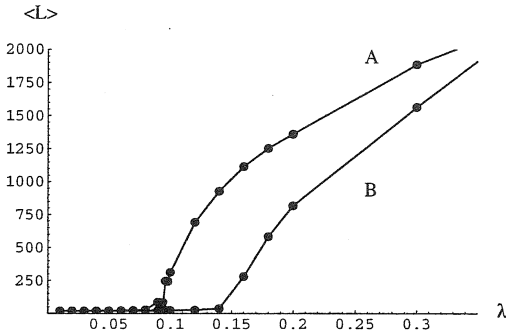


図 2.

(A)基本モデルと(B)確率型拡張モデル($\beta=0.008$)の渋滞相への相転位の比較。N=25。

さらにこの基本モデルを確率的に拡張する。拡張のポイントは上記の(2)を変更して転送量に応じた以下の確率で方向AとBの転送方向を決めることである。

$$P(A) = \text{Exp}(-\beta X_A) / (\text{Exp}(-\beta X_A) + \text{Exp}(-\beta X_B))$$

$$P(B) = \text{Exp}(-\beta X_B) / (\text{Exp}(-\beta X_A) + \text{Exp}(-\beta X_B))$$

ここで X_A と X_B はAとBの方向のそれぞれへの過去の転送量であり、 β は確率の度合いをコントロールするパラメータである。 β が無限大の場合は上記の基本モデルとなり、0のときは完全ランダムな転送となることに注意していただきたい。この拡張された確率型自律分散モデルにおいて適切な β を選ぶことにより渋滞相への相転移が緩和される、すなわちシステムとしてより多くのパケットを渋滞相に移らずに許容できることがシミュレーションによって示唆された。図 2Bと図 3にそのような結果の例を示した。このように適切な確率(もしくはノイズ)によってシステムのある着目する性能が上昇する現象については、

近年 Stochastic Resonance[4]の名のもとに盛んに研究されているが、これも多体系におけるそのような現象の一つととらえることもできる。モデルが単純であることから理論的な考察も可能ではないかと思われるが、これについては今後の研究の展開をまたねばならない。

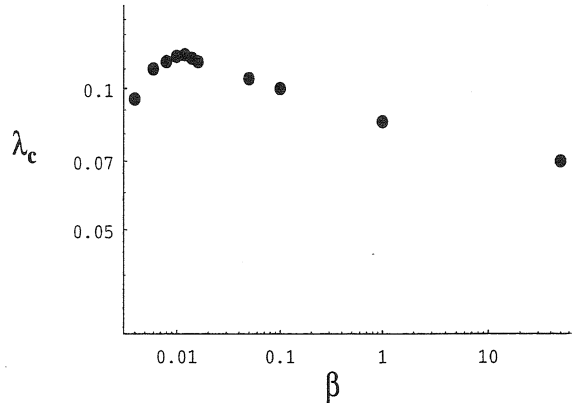


図 3.

確率型拡張モデルにおいて β の変化とともに渋滞相への相転位のポイント λ_c がどのように変化するかを示した。N=25。

3. 分散信号制御を含む交通流モデル

次に自律分散型の信号制御を含む交通流モデルについて紹介する。モデルは2次元正方形格子で周期境界条件を持ち総数N個の距離Dごとの各交差点には信号機が存在する離散時間、離散空間セルラーオートマトンモデルである。単純のため車の移動はUターンや交差点での右折、左折はなく、東西、もしくは南北方向に移動するとする。信号機 i の性質は南北方向の青と赤の時間である $T(i, b)$ と $T(i, r)$ によって規定される。車はもしもその直前のポジションがあいていれば移動できる。交差点においては交差点の次のポジションがあいていて、かつ信号が青である時のみ移動ができる。(車は交差点の中には留まれない。)

このモデルの中心となるアルゴリズムは以下の信号機の挙動により規定される。

$$T(i,b)(t+1) = \phi(w(bb)X(i,b)(t) - w(br)X(i,r)(t))$$

$$T(i,r)(t+1) = \phi(w(rr)X(i,r)(t) - w(rb)X(i,b)(t))$$

ここで $w(bb)$ などは正のパラメータである。 ϕ は

$$\phi(u) = T_0 (1 + \alpha \tanh(\beta u)), \quad (\alpha < 1)$$

で与えられる非線形関数であり T_0, α および β はパラメータである。 $X(i,b)(t)$ と $X(i,r)(t)$ は周期 t において i 番目の信号機を南北方向に青と赤の時間それぞれに通過した車の数である。(もし車が渋滞によりまったく動けない場合には $X(i,b)(t) = T(i,b)(t)$ 等とする。) このモデルは車を神経パルスにとらえ、信号機の状態を神経の活動度にとらえることで形式的には神経回路のモデル[5]との類似を考えることができる。神経回路モデルが自己組織化をつうじて様々な情報処理の機能を出現させることができることから、形式的な類似ながらも、交通流の制御の方向性も見つけられないかと考えている。

このモデルにおいては渋滞は平均速度 $\langle v(k) \rangle$ で示すこととする。より正確には $\langle v(k) \rangle = \langle L(k)/M \rangle$ と定義する。ここで $L(k)$ は k ステップにおいて移動した車の数であり、 M はモデル内の車の総数である。このモデルにおいて車の位置をランダムにし、信号機については $T(i,b) = T(i,r) = T_0$ とおく(青、赤状態、位相はランダム) 初期状態よりシミュレーションを始めると $T(i,b)$ と $T(i,r)$ は変化し始め一様ではなくなる。しかし、典型的には平均的な青と赤の時間 $\langle T_b \rangle$ と $\langle T_r \rangle$ は時間とともに収束する。また車の平均速度 $\langle v(k) \rangle$ も安定した振動に落ち着く。

図4に示したようにパラメータを適切に選ぶことでこのシステムも平均速度を自己組織化的な形であげることができる。ここでもそれぞれの信号の作動は独立かつ自律分散的に行われていることに注目していただきたい。

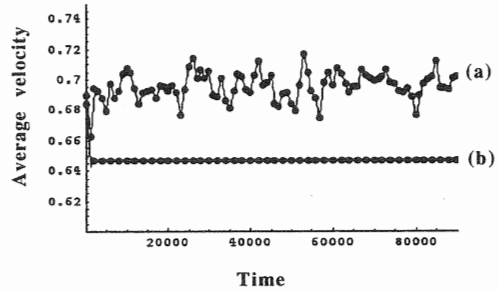


図4.

平均速度の挙動をこのモデルによって信号機の時間を变化させた場合(a)と T_0 に固定した場合(b)を比較した。パラメータは $N=100, M=500, D=10, T_0=10, \alpha=0.80, \beta=0.03, w(bb)=w(rr)=1.0$ and $w(br) = w(rb) = 0.6$.

同様の効果はモデル内の車の密度をかえた時にもパラメータをうまく選ぶことによって得られることを図5に示した。平均速度にして15%程度の効果を見ることがあった。

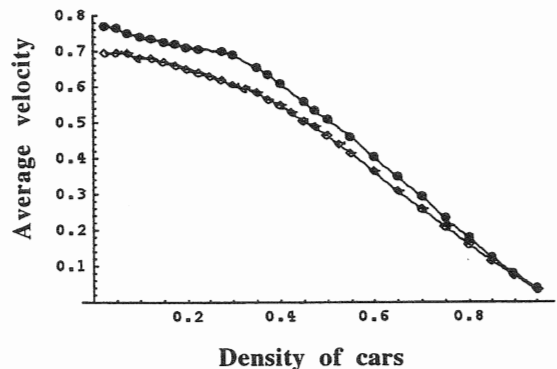


図5.

車の密度 $M/(2 \cdot D \cdot N)$ を变化させた時のモデル(黒丸)および固定信号(白丸)の平均速度の比較。M以外のパラメータは図4の時と同じ

このモデルにおいても理論的な解析はまだ行われておらず、先に述べた神経回路モデルでの理論研究の知見もとりいれながら解析の方向を模索している。

4 まとめ

ここで紹介した2つのモデルではどちらも単純な自律分散化されたルールにもとずいた制御を行うことで全体としての渋滞の発現を押さえる可能性を示した。定性的には制御する側の性質とされる側の性質がお互いに相互作用しながら、全体としての効果のある構造をつくり出すような挙動となっている。この意味でこれらのモデルは "Emergent Computation Models"[6,7]の例としても考えられる。このようなモデルにおいては一般的な指導原理や理論を作ることは困難であるが、交通流の制御などにおいては一つの可能性の方向を示しているのではないかと考えている。

文献

- [1] K. W. Huddart (chair), *Eighth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, London: IEE Conference Publication 422, 1996.
- [2] T. Ohira and R. Sawatari, *Phase Transition in a computer network traffic model*, Phys. Rev. E, 58, 1998, p. 193
- [3] T. Ohira, K. Inoue and Y. Takeshima, In *Progress in Connectionist-based Information Systems*, edited by N. Kasabov et. al. (Springer, Singapore, 1997), p.939.
- [4] A. R. Bulsara and L. Gammaitoni, Phys. Today, 49 (3) pp. 39. (1996).
- [5] L. Arbib, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Cambridge, MA: MIT Press, 1995
- [6] S. Forrest, *Emergent Computation*, Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [7] B. A. Huberman, *Computation: The Micro and The Macro View*, Singapore: World Scientific, 1992.