

最適速度モデルを用いた 交通信号制御のシミュレーション

大塚楓太^{†1} 高見利也^{†1}

概要: 現代の社会では年々、自動車の交通量は増加し、交通渋滞も増加している。本研究では交通渋滞の一因である信号機の影響について研究する。現実の交通渋滞は様々な要因が絡まりあって発生するため、理論的な解析と実際の現象の間には違いがある。そのため、理論と現実の間を埋めるためのシミュレーションが必要である。そこで、現実の車両の動きに近い最適速度モデルを用いて、信号制御による交通流量の変化を調べるシミュレーションを行う。具体的には、サイクル長・オフセット・スプリットの変化による交通への影響を調べ、理想的な環境での理論予測と比較する。

キーワード: 計算機システム化技術、リアルタイム処理技術、実装技術

Simulation of traffic signal control on the optimal velocity model

FUTA OTSUKA^{†1} TOSHIYA TAKAMI^{†1}

Abstract: Traffic volume of cars increases year by year, and traffic congestion is also increasing. In this study, we investigate the influence of traffic light which is one factor of traffic congestion. Since actual traffic congestion occurs due to complex factors, there is a difference between theoretical analysis and actual phenomenon. Therefore, we introduce simulations to fill the gap between theory and reality. We perform a simulation to investigate the change of the traffic flow rate by signal control using the optimal velocity model roughly representing the actual situation. Specifically, we investigate the influence on traffic due to the change in cycle length, offset, split. We also compare the result with the theoretical prediction in the ideal environment.

1. はじめに

1.1 研究背景

現在、世界各国では慢性的な交通渋滞に悩まされている。また、渋滞に関する研究もいくつも行われている。この研究は「渋滞学」という学問のひとつとして存在している。また、現実の車両の流れをカメラやセンサなどで取得して、現実の道路配置にできるだけ忠実にシミュレーションを構築することを目指した研究も行われている。[1]これまでの研究で渋滞が発生する原因はいくつも考えられるが、その原因のひとつとして信号機の制御についても挙げられる。信号制御には定周期制御と呼ばれるものと交通感应制御と呼ばれるものがある。定周期制御はあらかじめ定められた周期で動作する様に制御する方式である。一方、交通感应制御は道路上に設置された感知器により収集した交通流、交通量などにに基づき信号現示を制御する方式である。どち

らの信号制御でもサイクル（信号機の周期時間）、スプリット（1サイクルの内、青信号の時間の割合）、オフセット（隣り合う信号機の青信号の時間差）を変化させることでスムーズな交通流を実現している。これらの信号制御のシミュレーションにはセルオートマトンと呼ばれるモデルが基本になっているモデルが多く存在する。このモデルとは別に交通流のモデルで使われる、最適速度モデルと呼ばれるモデルが存在する。セルオートマトンと比べ、より現実に近いシミュレーションができるのではないかと考えられる。

2. モデル（技術）

本章では交通流の研究で使われる代表的なモデルであるセルオートマトンと最適速度モデルについての説明をおこない、比較する。また、信号制御の代表的な方式についても説明する。

^{†1} 大分大学
Oita University

2.1 セルオートマトン

セルオートマトンとは、あるセルの次のステップの状態が、そのセルの周りの状態によって決まるモデルのことである。簡単なセル間の相互作用から複雑な現象を再現でき、様々な社会現象や自然現象の解析への応用ができる。セルオートマトンの特徴としては次のようなことが挙げられる。

- ・同じ大きさの均一なセルから成り立っている
- ・複雑な組織構造を簡単な同一の規則で生成できる
- ・近傍から次のセルの状態を定義するため各セル同士が相互作用している

・並列計算構造なので、計算コストが削減できる
 1次元2状態セルオートマトンには256通りのルールがあるが、交通流の自然渋滞モデルとしてルール184が広く知られている。

ルール184の特徴としては以下のようなものがある。

- ・1つのセルの中に位置できる車両は最大1台
- ・進行方向はx軸の正方向にとり、一回の時間の更新で1セル分だけ前進する。
- ・一つ前のセルに車両が存在したら、次の時間更新で前進できない
- ・一つ前のセルに車両が存在しなかったら、次の時間更新で前進

以上の特徴を踏まえたモデルは図1のようになる。

このモデルでは車間距離が空いても加速しない等の不都合が生じるため、速度変化を加えた Nagel-Schreckenberg のモデル等の様々なモデルが派生して誕生している。

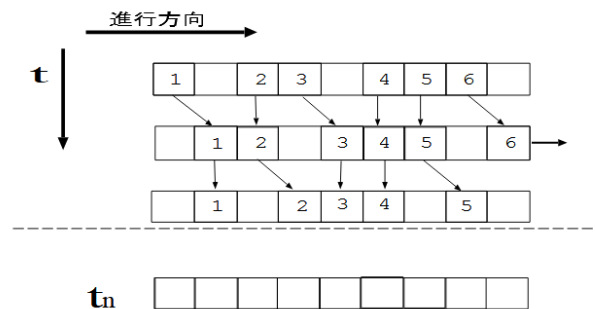


図1 セルオートマトンのルール184のモデル

2.2 最適速度モデル

最適速度モデルは、Bando らによって1990年代に開発された交通流を表す。具体的には以下のような基礎方程式によって表される。

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right\}$$

aは感応度(Sensitivity)と呼ばれ、運転者の反応速度を示すパラメータである。Vは車間距離によって決まる最高速度を表しており、 \tanh 型の関数が用いられており、式としては下記の関数で表される。

$$V(x) = \frac{V_{max}}{2} \left\{ \tanh\left(\frac{x-A}{C}\right) + \tanh\left(\frac{A}{C}\right) \right\}$$

V_{max} は最適速度を表しており、xはひとつ前方の車両との車間距離、A、C、は定数を表す。性質としては、前方に車両がなければ自分の最高速度まで加速して走行し、前方に車両がいれば、その車両との車間距離に応じた最適速度で走行する。現在の速度と、最適速度との差によって加速度が決まり、また、運転者の反応速度を示すパラメータである感応度aにも比例する。前方の車との車間距離が大きければ、速度を最高速度に近づけていき、車間距離が狭まってくると、その車間距離に応じた最適速度に速度を近づけて走行する。

最適速度モデルを用いて、交通の基本図を作ることができる。交通の基本図とは交通流の特性を示す図であり、図2のようなものである。縦軸は交通流量q、横軸は車両密度ρとの関係を表したものである。交通流量は観測時点で単位時間あたりに通過した車両の台数で、車両密度は単位長あたりの車両の台数で定義される。

交通の基本図は2つの領域で示すことができ、車両密度が小さい領域では密度の増加に比例して流量も増加していく。これは車の流れがスムーズでほぼ一定の速度で走行していることを示している、車両の台数が増えてもスムーズな状態を維持できているために流量が比例して増加している。しかし、流量がピークに達するとそれ以上密度が増加しても流量は増加することなく、むしろ減少している。また、データが離散しており、これは渋滞が発生していることを意味している。流量がピークに達しており、流れが急激に移り変わる点を相転移点(臨海密度)と呼ぶ。信号機を設置した際にこの相転移点に達しないような制御を行えば、渋滞が発生しない状態になる。

低密度で車の流れがスムーズな領域のことを自由相と呼び、高密度で車の流れが一定でない領域のことを渋滞相と呼ぶ。このように2つの流れがあり、その移り変わりをみることができるのが交通の基本図である。図3は最適速度モデルを用いて、シミュレーションした結果の基本図である。

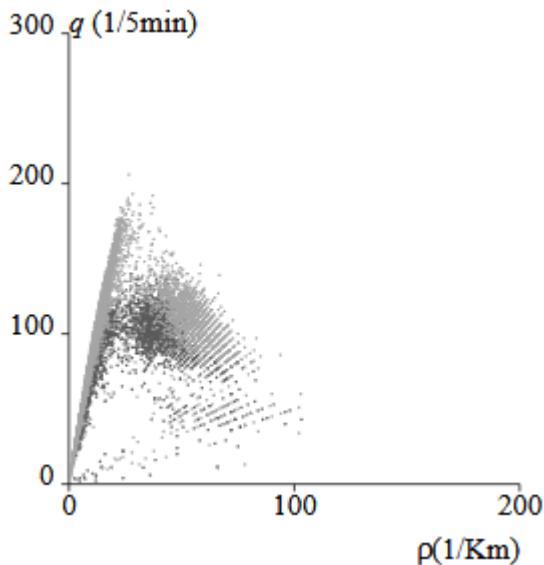


図 2 東名高速での交通流の図

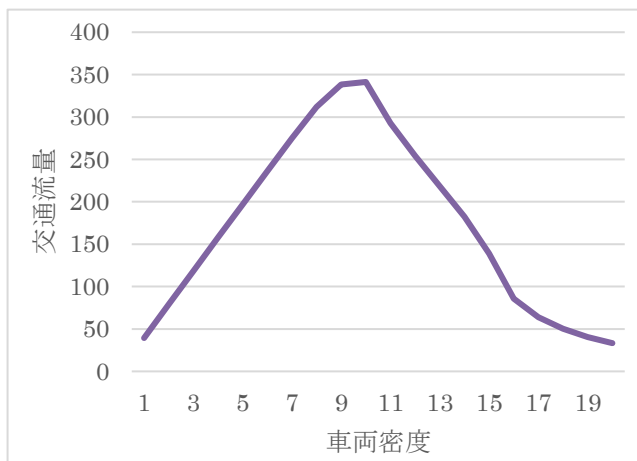


図 3 交通の基本図

2.3 モデルの比較

この2つのモデルはマイクロモデルと呼ばれるモデルで1台1台をシミュレーションし、それらの相互干渉の結果として交通流を表現している。

セルオートマトンの場合は1マスに1台という絶対的な制約があるため、多様な動きをする車両を表現することが難しい。しかし、最適速度モデルを用いるとそのような制約がないのでより現実に近いシミュレーションが可能になるのではないかと考えられる。

2.4 信号制御の方式

道路上に設置されている信号機は様々な制御方式が存在する。

まず、制御対象範囲によって3種類に分類される。

- ・地点制御：交差点ごとに単独で制御する方式
- ・系統制御：連続して設置されている信号機を互いに制御

する方式。車両の停止を減らし、交通の安全と円滑を図る

- ・地域制御：面的に広がる道路網に設けられた多数の信号機を一括して制御する方式

一方で、信号現示を切り替える条件によっても制御方式が以下の二つに分類される。

- ・定周期制御：予め定められた現示構成、サイクル長、スプリット、オフセットによって制御する方式。
- ・交通感应制御：車両や歩行者などのセンサ情報によって制御する方式。

研究背景でも述べたが、信号制御に必要なパラメータとして以下の3種類が存在する。

- ・サイクル長：信号表示が一巡する時間
- ・スプリット：各現示に割り当てられる時間、または割合
- ・オフセット：隣接する交差点同士で系統制御するために、系統方向における青の開始時間の差

3. 信号制御と流量の関係

本研究では信号制御と交通流量の関係を調べることで、交通渋滞の原因となる。もしくは渋滞を緩和できる信号制御のモデルを探る。具体的にはサイクル長、スプリット、オフセットを変化させたときの流量の変化について調査していく。

3.1 調査環境

本研究でのシミュレーションは全て、Processing3.3.1を用いて行った。特に追記がない場合は以下の条件で調査する。一定の長さがある道路上に信号機を設置し、両方向から車両を一定間隔で流入させる。その後、車両が道路外に出て行くときの時間を一台ごとに記録し、そのデータから流出量を計算する。道路は片側1車線で各車両は追い越しを行わず、最適速度モデルを適応させた走行をする。

3.2 地点制御での信号制御

まず、道路上に信号機を1つだけ設置し地点制御を行った。地点制御は信号制御の最も、基本となる制御である。サイクル長、スプリットを変化させ流量の変化を調査した。地点制御のためオフセットについては考えないこととする。

3.2.1 片方向のみの交通流量

実験内容は片方向のみ道路に100台の車両を流入させ、途中に1台の地点制御の信号機を設置する。信号機の先にセンサを設置し車両の各車両が測定区域の外に流出する時の時間を測定した。その際にサイクル長やスプリットを変化させ流量の変化を調査した。スプリットを変化させた時の結果だが、当たり前の現象ではあるが、青の割合を増やした方が交通流量は多くなった。また、下の図のように青信号の割合と一時間あたりの交通流量（交通流率）は比例の関係にあることが分かった。

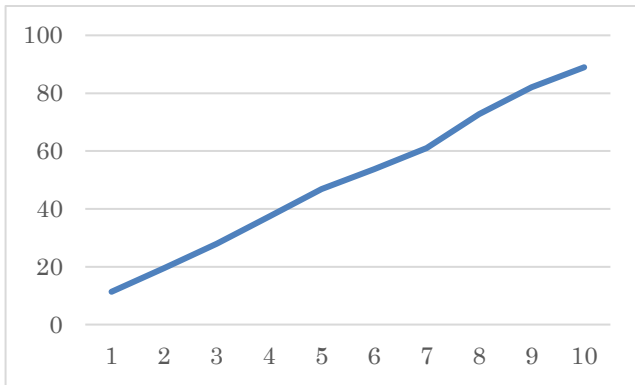


図 4 交通流量とスプリットの割合

次にサイクル長を変化させて実験した。この実験では流入車両が 100 台だけだと変化が分かりづらかったので 500 台流入させて実験した。またスプリットは 3 割が青信号になるように調整した。下の図はサイクル長と交通流率を化させたときのグラフを表現したものである。サイクル長は長ければ長いほど交通流率は高い結果となった。しかし、サイクル長が大きくなりすぎても大きな効果が得られないことも分かった。

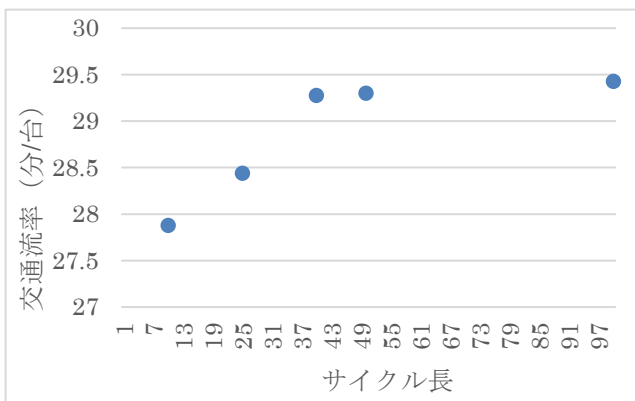


図 5 サイクル長と交通流率

3.2.2 双方向での信号制御

次に双方向でも同じような実験を行う。

双方向でも基本的には単一方向の実験と似た結果になった。サイクル長が大きい、もしくはスプリットが大きくなると交通流量は大きくなることが分かった。

この結果は図 5 の通りである。

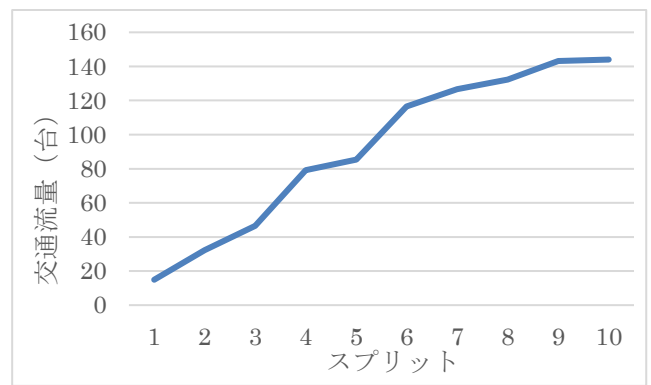


図 6 交通流率とスプリット

これは、ひとつの信号だけの場合では複雑な信号制御が必要ないことを示している。

3.3 系統制御での信号制御

信号制御は 1 つの信号機のみで行うとその交差点のみの交通流量の改善が図れても、周囲の信号機とリンクしていない場合はその交差点の周囲の交差点で渋滞が発生する等のマイナスの影響がでる場合がある。系統制御を行うことで道路の前後の信号のタイミングを調整出来るようになり、地点制御よりも全体的にスムーズな交通が実現する。

系統制御の実験ではまず、オフセットを固定した状態でスプリットとサイクル長を変化させる実験を行う。その後、オフセットを変動させ実験する。

3.3.1 単一方向のみの交通流量

まず、オフセットを 0 (秒) にした状態でサイクル長とスプリットを変化させた。地点制御と同じくサイクル長が大きいほう、またはスプリットが大きいほうが交通流量は大きくなった。

次に、サイクル長とスプリットを固定させて、オフセットを変化させた。この実験ではオフセットを 1 秒ごと増やしていったときの交通流量の変化をグラフにまとめた。

3.4 考察

本章では、3.2 で地点制御、3.3 で系統制御の実験を行った。サイクル長、スプリット、オフセットを変化させたときの流量の変化を調べた。

3.2 の地点制御ではサイクル長を大きくする、もしくはスプリットを大きくすることで交通流量は大きくなることが分かった。ただし、サイクル長は極端に大きくしても大きな効果が得られないことも分かった。これは単一方向の実験でも双方向の実験でも同じ結果が得られた。

3.3 の系統制御の実験ではサイクル長、スプリットと交通流量の関係は地点制御と同じようにサイクル長が大きい、もしくはスプリットが大きいほうが交通流量も大きくなることが分かった。

セルオートマトンのモデルを用いたとした場合は、交通流量とスプリットの変化のグラフはきれいな比例グラフが

発生するはずである。しかし、最適速度モデルの場合は車両が詰まっている場合は速度が遅く、車両がスムーズに流れていると速度が速いので同じ信号タイミングでも通れる車両の台数はそのときの環境によって変化することがある。

4. まとめと今後

4.1 結論

地点制御では1つの信号機のみでの制御だったため、比較的検証が容易だった。しかし、系統制御ではサイクル長、スプリット、オフセットのパラメータを複雑に変化させる必要があったため、検証が困難であった。今回の実験での系統制御は信号機が2つだけという系統制御にしては容易なモデルではあったが、3つ以上の信号機での系統制御や地域制御では信号制御の最適化は今回行った実験よりも困難なものになると考えられる。

地点制御と系統制御で共通して見られた特徴もある。スプリットを大きくする、もしくはサイクル長を長くすることで交通流量が大きくなることが確認できた。これは地域制御、系統制御にかかわらず交通流量を大きくできる共通の方法であると考えられる。今回の研究では交差点で交差する道路などは考えていないのでサイクル長やスプリットを大きくしすぎても問題はないが、現実には交差する道路について考えないといけないので、極端に大きくしすぎることはできない。

4.2 今後の課題

今後の課題として、以下の2つあげる。一つ目の課題として今回の最適速度モデルはセルオートマトンに比べて、多様な挙動の仕方があるので、より現実に近いシミュレーションができるのではないかとこの仮定の基で実験を行っている。しかし、セルオートマトンで同じ環境（車両の流入量や信号サイクル）を構築し、比較を行っていないため、セルオートマトンと最適速度モデルでのシミュレーション結果の違いを確認できていない。セルオートマトンのモデルと比較することで最適速度モデルでのシミュレーションの有用性が確認できる。

2つ目の課題として、今回の研究では地点制御と2つの信号機での系統制御しかおこなっていない。しかし、現実社会では多数の信号機が設置されており現実世界にこの実験結果を還元することは困難である。そのため、3つ以上の信号機での系統制御や、地域制御のシミュレーションを行うことでより現実社会に研究結果を還元できるようにする必要がある。

謝辞

検索結果

行天 啓二教授と大城英裕助教には研究内容について議論していただき、感謝します。ならびに知識推論第2研究室皆様のご協力にも心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 実データを基にした交通流シミュレーションによる高速道路上の突発事象マネジメントの評価
- [2] 交通信号機の仕組み見聞録
<http://shingouki.crap.jp/Control.html>