セルラオートマトンによる交通流のモデル化とその制御*

山本直史^{*1}, 森下 信^{*2}

Simulation of Traffic Flow by Cellular Automata and its Control

Naofumi YAMAMOTO and Shin MORISHITA^{*3}^{*3} Yokohama National University, Dept. of Mechanical Engineering,
Tokiwadai 79-5, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

This paper describes traffic flow simulation by Cellular Automata, where the traffic flow emerges considering just interactions among each vehicle in the flow, and the flow is controlled by optimizing the period of traffic signals with the help of Genetic Algorithm. Cellular Automata are mathematical systems characterized by discreteness, local interactions and an inherently parallel form of evolution. All the parameters in analytical space, time and state variables are treated as discrete ones, and the whole phenomena can be emerged considering just local neighbor rules among state variables defined on each divided area called "cell". In the present paper, various types of road module, such as crossing, straight road or T-type intersection were prepared as analytical space for Cellular Automata and the traffic flow was simulated on arbitrarily composed road module system. Furthermore, the period of traffic signals on the road system was optimized by Genetic Algorithm so that the number of moving cars might be maximized and at the same time the waiting cars minimized.

Key Words: Traffic Flow, Automobile, Information Processing, Layout Planning, Cellular Automata, Genetic Algorithms, Optimization

1. 緒 言

近年の交通量の増加による都市部の交通渋滞は激しさを増し、その対策を講じて交通渋滞の緩和を図ることが急務となっている。この種の問題に対しては交通流に関するシミュレータを開発してあらかじめ十分な検討を行うことが有効とされる^{(1), (2)}。従来開発されている交通流のモデルは2通りに大別できるとされ、一つは交通流を連続流としてモデル化し支配方程式を導き解析を行う手法である。もう一つは道路を通行する車両の個々の動きを捉えて全体の流れを形成させる手法であり、コンピュータの処理能力の向上に伴い近年特に注目を集めている^{(3), (4)}。

交通流とはマクロな視点で車両の動き捉えた用語であるが、交通流の形成過程を考えれば、道路上を往来する車両は目的地を目指しながらも周囲の車両の動きに応じて車線変更などを行い、さらに交通信号に従うことで流れが形成される。このように、構成する要素間の相互作用で現象が創発される系の捉え方自体は古くは一般システム理論とよばれ⁽⁵⁾、近年では複雑系と称されている⁽⁶⁾。交通流は社会工学分野における複雑

系の典型例として捉えることができる。

本研究では、現象を構成する要素間の相互作用を用いて現象の再現を行う手法であるセルラオートマトンを用いて、形成過程を考慮した交通流のモデル化を提案する。その結果のひとつとして簡単な交通流シミュレータを開発した。従来セルラオートマトンもしくは類似の手法を利用して交通流等をモデル化した研究がいくつかあるが、多くは直線道路や単一の交差点のモデル化に限定されている^{(7) - (9)}。本研究では、交差点、T字路、直線道路等の種々の道路の形式をモジュール化し、それらを組み合わせることで道路網を形成可能なシステムを構築した。さらに最適化手法として知られる遺伝的アルゴリズムを適用して交通信号機の表示時間を調整し、移動車両の数に関する最適化を行うことにより交通流の制御を試みた。

2. セルラオートマトン

オートマトンは、主として情報科学の分野で用いられる記号処理システムの1つで、有限状態の順序機械を意味する。順序機械とは記憶のある回路や機械を抽象化したもので、入力と内部状態に依存して出力が決定される記号処理機械をいう。セルラオートマトン(Cellular Automata; CA)は格子(セル)構造を有するオートマトンとして位置付けられ、von NeumanとUlamにより1940年代に米国で開発された^{(10) - (12)}。von Neuman

* 原稿受付 1998年3月6日。

^{*1} 横浜国立大学大学院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。^{*2} 正員, 横浜国立大学工学部。

E-mail: mshin@ynu.ac.jp

は生物の成長のメカニズム、特に脳の生理学的働きの数値モデルを構築するためにCAの研究を行ったとされ、自己複製する機械の腕のモデルをCAにより示している。その後、CAは流体解析の分野への応用が進み、現在ではラティスガスオートマトン (Lattice Gas Automata; LGA) という手法で知られ、混層流や複雑な境界を有する流れ解析に適用されている。

CAは、その名称にあるように、解析領域をセルと称する区分領域に分割し、各セル上で内部状態を表す離散的状態量を定義し、近傍のセル同志の相互作用を定める局所近傍則を用いて状態量を離散時間の経過に沿って遷移させ現象を再現する^{(11), (12)}。CAにより現われる全体としての挙動は、その系の局所の挙動の重ね合わせとして創発されたものであり、系の局所の挙動は要素間の相互作用を定めた局所近傍則に基づいて決定される。従って、CAでは系全体の挙動は解析者が設定する局所近傍則によって支配され、ある現象をCAで忠実に再現するためには、実際の現象を構成している要素の振る舞いを局所近傍則という形でモデル化することが重要である。

3. 交差点における交通流

3.1 モデル化 交通流のモデル化に際し、図1に示すように、約150m×150mの直線道路からなる交差点とその近傍を解析対象とした。ここでは解析領域を21×21の441セルに分割した。各セルに与える状態量として、本解析の場合は、「道路」、「進入禁止道路」、「右折車進入禁止道路」、「停止線」、「車」さらには「道路でない領域」の6種類を定義した。このうち、「車」以外の5つの状態量は時間の経過に依存せず位置により決定する。また、状態量が「車」である場合は、さらに「方向」を状態量として与え、東西南北から流入してくる直進、右折、左折をする車を流入時にあらかじめ定めてあるので12種類の状態量となる。この状態量も時間に依存しない量である。

解析空間への車両流入のタイミングはどのように設定しても恣意的であると考え、ランダムに流入させてシミュレーション結果を示すのが適当であると判断した。ランダムに流入させるひとつの方法として、1ステップごとに各流入ポイントから一定の確率で車両を発生させ、さらにその車が次に交差点に入った場合にどのように進むかをさらに確率で与えた。すなわち本解析では、解析空間に入った時点で交差点での進行方向まで規定されていることになっている。

図2に状態量の計算対象となるセルおよび局所近傍セルの定義領域を示す。局所近傍則は直進車、右折車、左

Fig.1 Simulation Space

Fig.2 Local neighbor

折車それぞれについて、後方確認、左右確認などの交通規則に従った現実の運転者の動作を表現するものとし、道路の形状が変わった時でも解析可能な汎用性のあるものを採用した。車両の進行を考える場合、近傍として選ぶセルは直進、右折、左折の場合に応じて異なっており、その領域の大きさを含めて局所近傍則を含めた解析手順の概略を示したものが、図3～図5である。これらの図に示す近傍則を与える順序は、車両が交差点の西側から流入する場合の例である。

3.2 解析結果 図6および図7にCAによるシミュレーション結果を示す。図6は交差点内の車の動きをアニメーションにしたものの一画面であり、図7は西方向から流入する車両の時間一移動距離線図である。このシミュレータでは、流入量（直進、右折、左折の割合）および信号の表示時間等が変更できるようになっている。

図6に示す例では、1ステップあたり直進車、右折車、左折車がそれぞれ20%の確率で流入し、残りの40%は流入しないとす。信号の表示時間は、ステップ数で青30、黄3、右折4、赤40で信号の1サイクルあたり77ステップとなる。本計算では1ケースについて300ス

トップまで計算している。また、出口に関しては、30%の確率で車を停止させ、出口の先にも道路が続いているように仮定している。

図7は西方向から流入してくる車に番号をふり、1セル移動するたびに移動距離を1づつ加算することによ

て個々の車の移動の様子をグラフに表したものである。また図中の太い縦線は全ての信号が赤になったことを示し、その間隔が信号の半周期を意味する。このように、全体の車の流れを支配する方程式を与えることなく、局所近傍則を用いて交差点における車の流

Fig.3 Local neighbor rule (straight)

Fig.4 Local neighbor rule (left-turn)

Fig. 5 Local neighbor rule(right-turn)

Fig. 6 Simulation of traffic flow on a crossing

Fig. 8 Simulation of traffic flow in a road network

Fig. 7 Travel locus diagram

れを短時間で表現することができる。このアニメーションは、パーソナルコンピュータ(CPU:PentiumII,OS:LINUX)程度を用いることで実行することが可能である。

4. 汎用道路網シミュレータ

次に、より複雑な形状の道路網のシミュレータの開発を行った。図1で示したような21×21セルの空間を1つのモジュールとして、直線、十字路、T字路などのいくつかの考えられる道路形状をもつモジュールを用意し、それらをディスプレイ上で組み合わせを行って種々の形態の道路網に対応可能なシステム構築を行った。ただし、斜め方向の道路の扱いが自由に組み合わせることができる段階には至っていない。

図8は、3つの十字路、7つの直線、さらには1つのT字路のモジュールを組み合わせた例で、7ヶ所の流入量と流出量や各信号の表示時間、各交差点での進行方向の割合などが変更できるようになっている。7ヶ所すべての流入、流出が60%の確率で行われ、各信号の表示時間もすべて青30ステップ、黄色3ステップ、右折4ステップ、全ての信号が赤の時間3ステップになっ

Fig. 9 Travel locus diagram

ている。また十字路においては、直進車33%、右折車33%、左折車33%で、T字路では西方向から流入してくる車は左折が、東方向からは右折が、南方向からは直進がそれぞれできないため、西方向の車は直進66%、右折33%、東方向からの車は直進66%、左折33%、南方向からの車は右折66%、左折33%としてある。図9に西方向上部から流入する車の時間-移動距離線図を示す。この図には、車両が進行している時は右上がりの直線で表現され速度は一定であるが、渋滞などで車両が停止すると水平な直線となる等、信号による車両の制御、道路の混み具合などが表現されている。

5. 信号表示時間の最適化

前章までの結果で交通流のシミュレータの基本部分のできたので、次に信号の表示時間を変更もしくは最適化することで解析領域内で停止している車の総数を減じることを試みた。最適化する際に陽な形で評価関

数が与えられている訳ではなく、また微分値も直接得ることはできないので、本論文では最適化手法の一つとして知られる遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) を用いて各信号の表示時間の最適化を行った。

5.1 GAによる最適化 使用したモデルは図8と同じもので、4つの交差点に信号機を設置してある。1ヶ所における信号機は右折信号を含んだ4種類の色があり、その4種類の色それぞれの時間をGAで最適化した。計算は便宜上1世代あたり1000ステップ実行した。GAのパラメータとしては、計算機への負担および最適化の精度を考慮して、100世代のシミュレーションを行い、個体数を1世代あたり20とした。1個体の長さは後述のように64となる。また交叉点を15カ所に設定し、1カ所あたりの交叉を60%の確率で行った。突然変異率は2～0.1%の割合で世代を追うごとに線形的に低下させた。親の選択方法はエリート選択を採用した。

まず、最適化する目標を以下の2点とした。

- (1) GAを行う各計算段階で停止している車の台数の最大値を小さくし、動いている車の台数の最大値を大きくする。
- (2) 平均的に停止している車の数を下げ、動いている車の数を上げる。

以上のことから評価関数 V は次のように決定した。

$$V = \frac{1}{T} \times \sum_{i=1}^T (x_i - y_i) + \frac{1}{500} \times \sum_{i=500}^T (x_i - y_i) + \max(x_i) - \max(y_i) \quad (1)$$

ここで x_i は i ステップにおける動いている車の台数、 y_i は i ステップにおける停止している車の台数、さらに T は1世代あたりの計算時間の総ステップ数を表している。

(1) 式の右辺の第1項は動いている車の台数と停まっている車の台数の差の平均値で、第2項は1世代の計算終了前500ステップの動いている車の台数と停まっている車の台数の差の平均値、第3項は動いている車の台数の最大値、第4項は停止している車の台数の最大値である。第1項および第2項は目標の(2)に、第3項と第4項は目標の(1)にそれぞれ対応している。これにより評価値 V が大きくなればなるほど適応度を高くすれば目標を満たす最適化ができるとみなした。

Fig. 10 Gene Type

次に表示時間の遺伝子への対応について述べる。コード化は、遺伝子を0,1のビット列で表現することを考えて、10進数で表された表示時間を2進数に変換することとし、デコード化はその逆を行った。

図10は信号機1つ分の遺伝子コードの例である。ここで、次周期までの時間 (Additional) というのは信号が全て赤を表示する時間であり、交差点内に侵入した後に信号が赤になってしまった車を交差点外に出すために必要なものである。このように各色で遺伝子の長さを変えることで常識をはずれた解の算出を防いでいる。各信号の色の最大ステップ数は青が63、黄色7、右折15、待ち時間7であるので、1周期の最大値は177ステップである。この16ビットの遺伝子が信号機一つ分で、全部で4箇所の信号機の最適化を行うので、結局4倍の64ビットの遺伝子コードにして遺伝的操作を行った。

5.2 結果および考察 信号表示時間の最適化結果の一例を図11と図12に比較して示す。これらは「動いている車の台数」、「停まっている車の台数」、および「停まっている車と動いている車の差」の時間ごとの経緯をそれぞれ示している。各方向から流入する車の属性は直進60%、右折20%、左折20%と仮定した。図11はGAによる最適化を行う前で、図12は最適化後の結果である。両者を比較すれば、信号の表示時間を最適化することで車の流れがスムーズになり、この評価値による最適化では特に「動いている車と停まっている車との台数の差」が小さくなっていることが明らかである。

表1には、上記の流入する車の属性に加えて、直進20%、右折60%、左折20%と設定した場合の、4ヶ所の信号表示時間の最適化結果を示す。表中の網掛けは

Table 1 Results of optimization

	unoptimized	optimized (straight 60%)	optimized (turn right 60%)
green	30	34	23
yellow	3	1	2
turn right	4	1	5
red	40	37	31
green	30	9	10
yellow	3	1	1
turn right	4	1	1
red	40	12	13
green	30	16	2
yellow	3	2	2
turn right	4	1	4
red	40	20	9
green	30	43	8
yellow	3	1	1
turn right	4	1	4
red	40	48	14

信号の位置を表している。直進する車の割合が大きい場合には青と赤の信号表示時間はほぼ同じ長さに設定され、かつ右折信号の表示時間が短く設定される。また、右折車の割合を多くすると、青と赤の信号の表示時間の差が大きくなり、右折信号の表示時間は長く設定される。このように表示時間の調整を行うだけで、図12に示すように時間あたりの車の流れが平均化される。

以上の結果は、CAにより交通流のモデル化を行い、その上で交通流の信号制御を行うことは、異なる2つの階層構造を有する解析として解釈することができる。すなわち下位のレベルで交通流を創発させ、そこで抽出した特性を上位のレベルにおいて最適化し、それを再び信号制御という形で下位レベルにフィードバックすることにより交通流に影響を与えるという、2つの階層構造の相互作用を示していることに相等する。

6. 結 言

本研究では、CAを用いて交通流の形成過程を考慮したモデル化を行うことを提案した。そのモデル化を用いて簡単な交通流シミュレータを開発し、さらに最適化手法のひとつである遺伝的アルゴリズムを用いて交通信号の表示時間の最適化を行って交通流を平均化する手法について検討し、その有効性を示した。交通流を特徴づけるパラメータに関する検討はまだ十分ではないが、各種の交差点をもつモジュールを作成することで様々な道路網を形成することが可能な拡張性の高いシステムであることを示した。なお、CAによるシミュレータの計算量は小さく、パーソナルコンピュータで十分実行可能である。

本研究を行うにあたり、貴重な助言をいただいた(株)築山研究所 築山洋氏、および(株)リクルート中野孝昭氏にお礼申し上げる。

文 献

- (1) 桑原雅夫：自動車技術，52，1（1998）28-34.
- (2) 福田正：交通工学，朝倉書店（1994）.
- (3) 木俣昇，高木秀彰，黒川浩嗣：土木計画学研究・講演集，17（1995）177-183.
- (4) 高橋伸夫，久保田尚，杉浦孝臣：土木学会第50回年次学術講演会（1995）20-21.
- (5) フォン・ベルタランフィ：一般システム理論（長野，太田訳），みすず書房（1973）28-50.
- (6) Cowan,G.A., Pines,D. and Meltzer,D. : Complexity, Addison Wesley (1994) 17-45.

Fig.11 No. of cars before optimization
(straight 60%,turn right 20%,turn left 20%)

Fig.12 No. of cars after optimization
(straight 60%,turn right 20%,turn left 20%)

- (7) Resnick,M. : Turtles, Termites and Traffic Jams, MIT Press, (1994) 68-74.
- (8) Rickert,M. : Simulation zweispurigen Verkehrsflusses auf der Basis zellulärer Automaten, Master thesis, Univ. Köln (1994)
- (9) 木下正生，前田誠一，寺田幸博：日立造船技報，56，2（1995）38-42.
- (10) Gutowitz,H. : Cellular Automata - Theory and Experiment, MIT/North-Holland (1990) 3-18.
- (11) Jackson,E.A. : Perspectives of Nonlinear Dynamics-2, Cambridge (1990) 427-504.
- (12) 中野孝昭：日本機械学会講習会資料，940-47（1994）31-40.