

文章编号:1000-582X(2005)05-0086-04

# 基于元胞自动机原理的微观交通仿真模型\*

孙跃,余嘉,胡友强,莫智锋

(重庆大学自动化学院,重庆 400030)

**摘要:**描述了一种对高速公路上的交通流仿真和预测的模型。该模型应用了元胞自动机原理对复杂的交通行为进行建模。这种基于元胞自动机的方法是将模拟的道路量离散为均匀的格子,时间也采用离散量,并采用有限的数字集。同时,在每个时间步长,每个格子通过车辆跟新算法来变换状态,车辆根据自定义的规则确定移动格子的数量。该方法使得在计算机上进行仿真运算更为可行。同时建立了跟车模型、车道变换的超车模型,并根据流程对新建的VP算法绘出时空图。提出了一个设想:将具备自学习的神经网络和仿真系统相结合,再根据安装在高速公路上的传感器所获得的统计数据,系统能对几分钟以后的交通状态进行预测。

**关键词:**元胞自动机;交通仿真;数学模型

**中图分类号:**TP15;TP391.9

**文献标识码:**A

## 1 元胞自动机

生物体的发育过程本质上是单细胞的自我复制过程,50年代初,计算机创始人著名数学家冯·诺依曼(Von Neumann)曾希望通过特定的程序在计算机上实现类似于生物体发育中细胞的自我复制<sup>[1]</sup>,为了避免当时电子管计算机技术的限制,提出了一个简单的模式。把一个长方形平面分成若干个网格,每一个格点表示一个细胞或系统的基元,它们的状态赋值为0或1,在网格中用空格或实格表示,在事先设定的规则下,细胞或基元的演化就用网格中的空格与实格的变动来描述。这样的模型就是元胞自动机(cellular automata)。

80年代,元胞自动机以其简单的模型方便地复制出复杂的现象或动态演化过程中的吸引子、自组织和混沌现象而引起了物理学家、计算机科学家对元胞自动机模型的极大兴趣<sup>[1]</sup>。一般来说,复杂系统由许多基本单元组成,当这些子系统或基元相互作用时,主要是邻近基元之间的相互作用,一个基元状态演化受周围少数几个基元状态的影响。在相应的空间尺度上,基元间的相互作用往往是比较简单的确定性过程。用元胞自动机来模拟一个复杂系统时,时间被分成一系列离散的瞬

间,空间被分成一种规则的格子,每个格子在简单情况下可取0或1状态,复杂一些的情况可以取多值。在每一个时间间隔,网格中的格点按照一定的规则同步地更新它的状态,这个规则由所模拟的实际系统的真实物理机制来确定。格点状态的更新由其自身和四周邻近格点在前一时刻的状态共同决定。不同的格子形状、不同的状态集和不同的操作规则将构成不同的元胞自动机。由于格子之间在空间关系不同,元胞自动机模型分为一维、二维、多维模型。在一维模型中,是把直线分成相等的许多等分,分别代表元胞或基元;二维模型是把平面分成许多正方形或六边形网格;三维是把空间划分出许多立体网格。一维模型是最简单的,也是最适合描述交通流在公路上的状态。

## 2 基于元胞自动机的交通仿真模型的优点

目前,交通模型主要分为3类:

1) 流体模型(Hydrodynamic Model),在宏观上,以流体的方式来描述交通状态;

2) 跟车模型(Car-following Model),在微观上,描述单一车辆运动行为而建立的运动模型;

3) 元胞自动机模型(Cellular Automaton),在微观

\* 收稿日期:2005-01-04

基金项目:重庆市自然科学基金项目(6972)

作者简介:孙跃(1960-),浙江温州人,重庆大学教授,博士,研究方向:微观交通仿真、电力电子技术、运动控制技术及其系统。

上,以一组自定义规则的来描述车辆行为。

在流体模型与跟车模型中,速度和密度的关系是由微分方程式中的  $V(P)$  或  $V(\Delta x)$  所确定的,而在元胞自动机模型中,基于平均场原理通过计算来确定二者之间的关系。

由此,元胞自动机模型有以下 4 个主要的优点:

- 1) 在元胞自动机模型中,以易操作的规则取代复杂的方程式,所以易于以电脑来探讨其呈现的特性;
- 2) 道路被划分大量细小的格子。当车辆转弯时,简化为直线运行,这样使道路的参数被简化;
- 3) 元胞自动机模型是空间无限离散、状态有限离散、时间离散的全离散为整数一个动力学模型。该模型则用上述简单的描述来分析复杂的系统,同时模型中主要的参数为整数,该特性与真实的交通情况相吻合;
- 4) 元胞自动机模型通过定义局部的元胞邻近关系以及使用局部演化的规则,来描述现象的变化。类似车辆的行为也是由其周围车辆行为所决定。同时元胞自动机模型中,网络的交点占据中心地位,实际的交通系统中道口在网络中的分布也是主要方面。

### 3 目前基于元胞自动机的交通模型概况

研究表明,元胞自动机建模技术是研究交通流动态问题一种简单有效的方法。自从 Wolfram 在 1986 年提出了关于元胞自动机模型的理论与应用以来<sup>[2]</sup>,元胞自动机模型已经广泛应用于人工智能、动力系统、计算机图形学、生物学、复杂的物理过程、化学、地理、经济社会等行为的模拟。随着现代道路的发展,基于元胞自动机理论的建模技术对于复杂交通现象研究具有重要意义而受到了学术界的广泛关注。作为元胞自动机在交通行为仿真中的应用,Wolfram 提出的 184 号 CA 模型之后,Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出了把车辆当成基本研究单元处理的 NS 模型<sup>[3]</sup>,其后,Fukui 和 Ishibashi 于 1996 年提出了 FI 模型<sup>[4]</sup>。这两个模型成为最重要的一维交通流模型。

### 4 新建模型

在上述 NS 模型<sup>[3]</sup>、FI 模型<sup>[4]</sup> 两个模型的基础上,笔者将规则进行了拓展并讨论了如何将一维元胞自动机应用于多车道高速路,并详细描述了模型建立情况,对数据进行定义,同时给出了车辆跟驶模型和车道变换模型。

作者还讨论了跟车模型和超车模型,进行了相应的仿真。该模型使用 Java 进行编写。将高速公路离散化为大小相等的单元格,并将格子状态赋值为空或被

占有。被占有的格子的另一个扩展特性为占有该格子车的特性。在每条道路有很多‘入口格’与‘出口格’,车辆将按照一种特定的概率分布通过这些网格进入或离开道路。在每个时间步长,模型应用算法更新车辆的速度和位置、格子的状态。模型定义了如下道路参数:路的长度、车道数、超车道的数量和位置、“出口格”和“入口格”的位置、路段的限制速度、单元格的大小、时间步长。当格子状态为被占有使,格子需要扩展上述相关的特性。同时定义占有格子车的跟驶参数:车辆的类型、车辆的长度、最大加速度、最大减速度、超车能力、当前速度、最大速度等。

#### 4.1 基本规则

- 1) 产生阶段:以按发车概率在空格点产生不同速度的车辆,相当于不同速度的车辆进入车道占据不同的空格子<sup>[5]</sup>;
- 2) 加速阶段<sup>[5]</sup>:如果当前车辆速度小于  $V_{\max}$ ,则车速加  $\Delta V$ ,  $V' = V + \Delta V$ ;
- 3) 减速阶段:如果一辆车到它前面最近邻的另一辆车的距离  $\Delta X$  小于或等于  $V$  ( $\Delta X \leq V$ ),则车子减速为  $V' = \Delta X - 1$ ;
- 4) 转出阶段:如果车辆的车速为零,则以一定的概率  $\delta$  消失,它代表车辆的转出<sup>[5]</sup>;
- 5) 运动阶段:各车辆以自己的速度向前运动  $V_i$  个格子<sup>[5]</sup>。

同时有:

- 1) 若该车辆前方(右方)为空,则该车辆可向前移动几格或静止不动;
- 2) 若该格子有车辆占据,且其前方也有车辆占据,则不管前方车辆在下一时刻是否向前运动,该车辆均不能向前运动。

以上演化步骤作为一个周期反复进行下去,它实际上描述了较为接近实际的高速公路上车辆的运动状况。另外,关于车辆发生的规则在文献[7]中详细阐述。

#### 4.2 跟车模型

在交通模型中,根据驾驶员在驾车过程中的心理状态,抽象出一般性心理学原理 PIEV(Perception-Intellection-Evaluation-Volition) 模式<sup>[8]</sup>。PIEV 模式有以下具体内容:1) Perception 过程中需要引入驾驶员觉察环境的概念:交通流环境、交通控制环境、道路几何环境。2) Intellection 过程依据 Perception 过程提供的信息进行深化加工得到对当前驾驶员判断决策操作有直接意义的一系列参数值,仍为信息不是结果。3) Evaluation 过程是对驾驶员自身收集并整理的信息被转化为对下一步操纵方式的决策,确定的驾驶行为。4) Volition 过程就是从本车的当前行驶状态达到下一

时刻的行驶状态,得到当前速度和加速度,确定下一时刻本车的位置和速度。并把这一模式合理地应用在跟车模型和超车模型中。采用时间扫描法,在每一个单位时间内,模拟驾驶员的 PIEV 模式,然后更新车辆速度和位置。在每一个时间步里,首先获得每辆车的速度和位置,然后计算出该车辆的车头时距,再判断出该车辆的行驶目标是继续跟车还是变换车道准备超车,根据不同行驶目标采用不同的算法计算出车辆的加速度,最后更新车辆在下一个单位时间中的速度和位置。

驾驶员在行驶过程中主要依据本车与前车的距离决定驾驶动作。如果距离足够安全,就可以加速;否则,就要考虑减速。所要求的安全距离  $G_s$  与当前车速有关,理论上安全距离的关系式为:

$$\frac{1}{2}mv^2 = f \times (G_s - G_0),$$

$f$  为刹车时的摩擦力;  $G_0$  为车辆减速并停车时与前车之间应有的最小距离。

则:  $G_s = \frac{m}{2f}v^2 + G_0.$

考虑正常车速低于 200 km/h,驾驶员心理接受距离高于理论安全值,同时在大量数据进行仿真利于计算机的实现,则将安全距离  $G_s$  和当前车速  $V$  近似于简化为正比例关系(见图 1),如(1):

$$G_s = G_0 + bV. \tag{1}$$

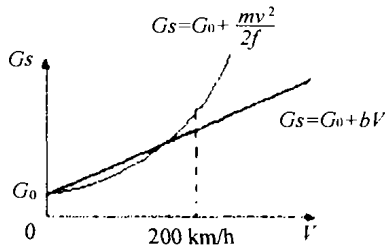


图 1 安全距离与车速的关系

根据当前与前车的距离  $G_r$  决定对车辆运动状态:

- 1) 当  $G_r > G_s$ , 车辆会尽量加速, 达到路段的限制速度或车辆的最高速度;
- 2) 当  $G_r < G_s$ , 车辆会根据超车概率  $P_o$  决定是超车还是减速或跟车。

当  $G_r < G_s$  且不具备超车条件, 则只能进行加速、减速和保持原速 3 种操作。如图 2 所示, 引入两个变量: 加速概率  $P_a$  和减速概率  $P_b$ , 速度越低  $P_a$  越大,  $P_b$  越小。其中  $V_L$  是公路所允许的最高速度,  $V_{max}$  是车辆所能达到的最高速度。在这种模型中, 是考虑了现在高速公路上有一部分不可忽略的车辆的行驶速度超过了公路的限速。在大于  $V_L$  的部分有一定的概率使车辆超速行驶。具体实现时可以取随机变量  $R$ :

- 1) 如果  $R < P_b$ , 则车辆减速;

- 2) 如果  $R > 1 - P_b$ , 则车辆加速;
- 3) 其他的, 则车辆维持速度不变。

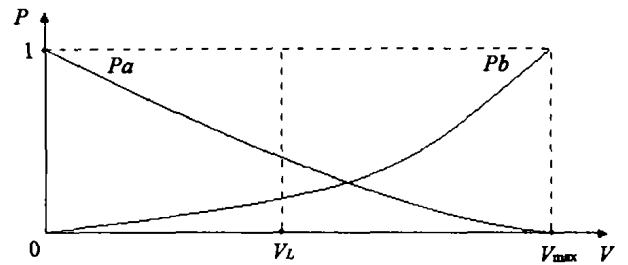


图 2 加速概率  $P_a$  和减速概率  $P_b$  与速度  $V$  的关系

由此创建 Variable Probability 规则(简称 VP 规则):(其中第  $i$  辆车的位置记为  $X_i$ , 而它的速度  $V_i \in 1, 2, \dots, V_{max}$ , 其中  $i \in 1, 2, \dots, N$ , 且假定所有车辆具有相同的最大速度  $V_{max}$ , 司机反应时间为  $T_s$ , 加速概率  $P_a$  和减速概率  $P_b$  是以速度  $V$  为自变量的函数, 且  $P_a + P_b \leq 1$ )

- 1) 自由行驶阶段: 若  $X_{i-1} - X_i - 1 > T_s \times V_i$ , 则:

$$V'_i = \begin{cases} \min(V_{max}, V_i + 1), & \text{以概率 } P_a; \\ \max(0, V_i - 1), & \text{以概率 } P_b; \\ \dots\dots\dots \\ V_i, & \text{其他.} \end{cases}$$

- 2) 安全减速阶段: 若  $X_{i-1} - X_i - 1 \leq T_s \times V_i$ , 则:

$$V'_i = \max(0, V_i - 1);$$

- 3) 避免车辆碰撞: 如果  $V_i > X_{i-1} - X_i - 1$ , 则:

$$V'_i = X_{i-1} - X_i - 1;$$

- 4) 车辆位置更新:  $X'_i = X_i + V'_i$ .

$P_a$  和  $P_b$  的取值见表 1。

表 1 加速概率和减速概率随速度变化取值表

$V/\text{格} \cdot \text{s}^{-1}$	0	1	2	3	4	5
$P_a$	1	0.8	0.7	0.5	0.3	0
$P_b$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.8

### 4.3 超车模型

当车辆超车时, 必须变换车道, 则可用车道变换模型来描述超车行为。当  $G_r < G_s$ , 车辆会根据超车概率  $P_o$  决定是否超车。当为是超车时, 还要判断超车是否安全。所以还要计算超车的安全系数  $Z$ , 在  $t$  时刻车辆  $A$  的安全系数表示为  $Z_A(t)$ , 则:

$$Z_A(t) = G_A(t) - G_A(Vt). \tag{2}$$

$G_A(t)$  表示车辆  $A$  当前的前车车距,  $G_A(V_i)$  表示车辆  $A$  在速度  $V_i$  时的安全车距。当车辆  $A$  前面没有车辆时,  $Z_A(t)$  记为  $+\infty$ 。

车辆  $A$  超车时必须变换车道。如图 3 所示, 设车辆  $A$  换到 2 号车道, 则必然使车辆  $A$  插入到车辆  $C$  与车辆  $D$  之间。则车辆  $A$  变换车道后的安全系数表示为  $Z_A^2(t + \Delta t)$ , 即:

$$Z'_A(t + \Delta t) = (Z_A^2(t + \Delta t) + Z_C(t + \Delta t))/2. \tag{3}$$

当  $Z'_A(t + \Delta t) > |Z_A(t + \Delta t)|$  时, 车辆 A 才能安全变换车道。这样, 就可以用比较简单的规则, 把高速公路上的车流情况比较准确描述出来。

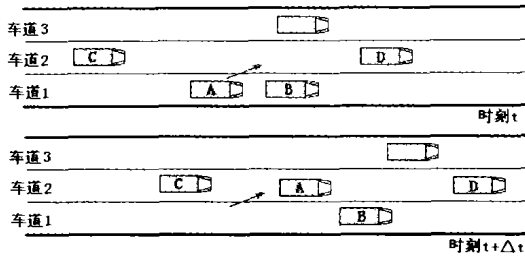


图 3 车辆 A 变换车道示意图

### 5 编程与时空图

程序使用 Java 语言编写, 在软件设计上, 以车辆行驶模型为主, 建立一个在一条单向封闭的环形公路上仿真器。根据程序流程图 (图 4), 程序中设计有元胞类、状态类、元胞自动机运行类、元胞自动机模型类、图形输出类、界面类。初始参数为: 环形公路分为 500 个格子, 每个格子长度为 7.5 m, 速度为每秒 0、1、2、3、4、5 个格子, 即最高速度 135 km/h。状态更新时间为 1 s。发车是基于泊松分布原理的断面发车模型<sup>[7]</sup>。流程图见图 4。

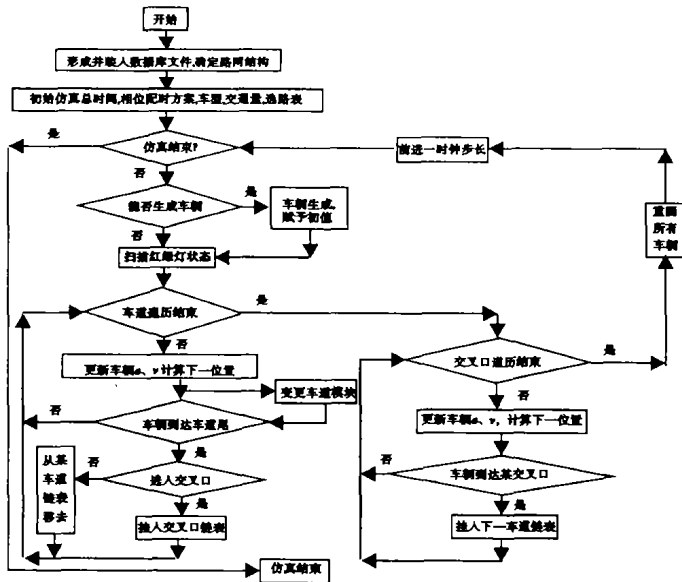
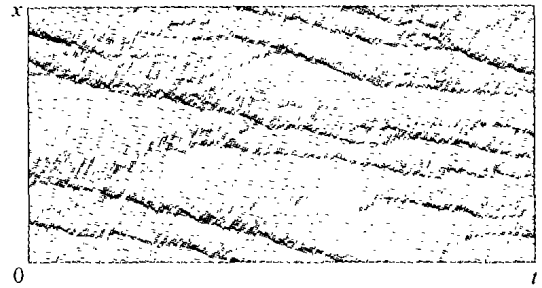


图 4 程序流程图

仿真后时空图见图 5。

在这个模型中, 存在了加速概率和减速概率变量, 使得不论是加速还是减速都是按照非固定的概率进行的, 速度可发生突变, 且在区域中的车辆以时走时停的向前运动。运动状态具有随机性, 这与现实交通状况很相似。



(车辆最大速度为 5 格 / s, 总密度设为 30%, 反应时间为 2 s)

图 5 VP 模型的时空图

### 6 结 论

以往在元胞自动机上的研究集中于理论分析, 主要是对仿真结果与从公式中推导的结论的比较, 笔者建立了交通仿真系统, 包括发车模型、车辆运动模型元胞自动机模型将道路划分为大量均匀的格子, 离散时间, 能用少量的参数和简单的规则来准确的描绘高速公路的交通情况。

若将对模型所需要的参数值由固定在道路上的传感器实时测量, 经过统计数据提供, 并将神经网络模块加入车辆更新算法。根据神经网络的自学习性与预测性, 交通仿真系统可以对预测到几分钟以后的交通流状态。这将是一个新兴的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 丁永生, 邵世煌, 万庆萱. 元胞自动机与软计算的集成及其应用[J]. 控制与决策, 1996, 11(6): 617 - 622.
- [2] WOLFRAM S. Theory and Application of Cellular Automata [M]. World Scientific, Singapore, 1986.
- [3] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic [J]. J Phys I, 1992, 15(2): 2 221 - 2 229.
- [4] FUKUI M, LSHIBASHI Y. Traffic Flow in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed [J]. Phys Rev E, Soc, Japan, 1996, 65(7): 1 868 - 1 870.
- [5] 吕晓阳, 刘慕仁, 孔令江. 一维元胞自动机随机交通流模型的理论分析与计算机实验 [J]. 物理学报, 1998, 47(11): 1 761 - 1 768.
- [6] 李华兵, 陈若航, 刘慕仁, 等. 车辆从车道进入与转出的一维多速随机交通流模型的研究 [J]. 物理学报, 1998, 47(11): 1 769 - 1 775.
- [7] 莫智锋, 余嘉, 孙跃. 基于泊松分布的微观交通仿真断面发车数学模型研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2003, 27(1): 73 - 76.
- [8] 段进宇. 高速公路微观交通仿真 [J]. 公路交通科技. 1998, 15(3): 21 - 24.

(下转第 94 页)

- works[J]. ETRI Journal, 2002, 24(4): 16-21.
- [7] XU L, PERROS H, ROUSKAS G. Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching [J]. IEEE Comm Mag, 2001, 39(1): 136-142.
- [8] DOLZER K, GAUGER C, SPTH J, et al. Evaluation of Reservation Mechanisms for Optical Burst Switching [J]. Journal of Electronics, 2001, 55(1): 82-89.

## An Adaptive Data Burst Assembly Algorithm in OBS Networks

WANG Ji-feng, JIANG Yu-lian, XIA Han-zhu

(Automation Institute, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065, China)

**Abstract:** Optical Burst Switching (OBS) is a promising paradigm for the next-generation Internet infrastructure. This paper proposes an adaptive data burst assembly algorithm in OBS networks, which can adjust parameters of assembly algorithm according to the traffic arrival rate of the edge nodes in OBS networks. Also this paper proposes how to realize the adaptive data burst assembly algorithm.

**Key words:** optical burst switching; data burst; burst head packet; edge node; assembly algorithm

(编辑 吕赛英)

~~~~~  
(上接第 89 页)

## Microscopic Traffic Simulation Mathematic Model Based on Cellular Automata

SUN Yue, YU Jia, HU You-qiang, MO Zhi-feng

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** This paper presents a model for freeway traffic flow simulation and prediction. The model uses cellular automata theory to model complex traffic behavior. The advantage of the cellular automata approach is that the roadway to be modeled is quantized into simple homogeneous cells, time is quantized into discrete steps, and physical quantities take on a finite set of values. Also, the state of the cells is updated at each discrete timestep by using a vehicle update algorithm that combines a few vehicle motion models, governed by a relatively small set of parameters. Then vehicles just move one or several cells at each discrete timestep according to the self-defined rule. This approach makes the computer operation feasible. At last, the paper puts forward a suppose that if the simulation system is equipped with the self-study system of NN (neural network) module according to the statistical data from the transducer fixed on the freeway, it can predict the traffic status ahead of 10 minutes.

**Key words:** cellular automata; traffic simulation; mathematic model

(编辑 吕赛英)