

# 基于自主代理和元胞自动机的交通流模型

杜小丹<sup>1</sup> 赵仕波<sup>2</sup> 鄢涛<sup>1</sup> 张凤荔<sup>3</sup>

(成都大学信息科学与技术学院 成都 610106)<sup>1</sup> (成都理工大学网络教育学院 成都 610059)<sup>2</sup>

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)<sup>3</sup>

**摘要** 提出一种新的元胞自动模型用以模拟单道高速车道的交通流动。一个机动车驾驶单元可以抽象为一个自主代理。模型集中于多种代理的提前相互作用和物理限制(特别是加速、减速能力)。物理限制通过加速减速的双向状态实现。给出了基本图、速度位置图、速度时间图和相位图,并利用互相关函数来辨别自由流和同步流。模拟结果显示这个模型能够描述大部分实际观测的结果。

**关键词** 交通流,自主代理,元胞自动机,模型

**中图法分类号** N032 **文献标识码** A

## Modeling Traffic Flow Based on Autonomous Agents and Cellular Automata

DU Xiao-dan<sup>1</sup> ZHAO Shi-bo<sup>2</sup> YAN Tao<sup>1</sup> ZHANG Feng-li<sup>3</sup>

(College of Information Science & Technology, Chengdu University, Chengdu 610106, China)<sup>1</sup>

(Network Education College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)<sup>2</sup>

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology, Chengdu 610054, China)<sup>3</sup>

**Abstract** This paper presented a new cellular automaton model to simulate traffic flow on a single-lane highway. A driver-vehicle unit was abstracted to be an autonomous agent. The model was focused on multiple autonomous agents' interactions ahead and agents' physical restrictions (particularly, acceleration and deceleration capabilities). The physical restrictions were realized by dual-regime acceleration and deceleration capabilities. The fundamental diagram, speed-location plot, space-time plot and phase diagram were presented. The cross correlation function was studied to identify the free flow and synchronized flow. The simulation results show that the model can reproduce the most empirical findings.

**Keywords** Traffic flow, Autonomous agents, Cellular automata, Model

## 1 前言

机动车交通流研究有长期的历史。模拟交通流的核心问题是:1)如何准确描述车辆的特性,例如加减速的能力、驾驶员的行为和驾驶员在微观层面上的相互作用;2)如何获取和解释交通流动的宏观特性,比如流动性和密度,相位转换。为了得到这些数据,已经建立了大量的交通模拟方法<sup>[1-4]</sup>。在这些模型中,元胞自动机(Cellular Automata, CA)通过仿真获取参数,能对单个机车相互作用和重获宏观交通流动进行建模。

近年来,交通流动的空间临时结构研究产生了三度交通流动理论。该理论假设交通流动有 3 个相位:自由流动、同步流动和宽幅的移动性堵塞。特别地,复杂的高速流动是同步流动的主要特征,但同步流动并不能由流动密度精确定义。同步流动的模拟和扩展解释成为近年来的研究热点<sup>[2-4]</sup>。

同步流动在某种程度上可用刹车灯模式和 Jiang-Wu 模型来描述。然而,这些模型对加速过程模拟均有缺陷。在

Jiang-Wu 模型中,加速过程被描述为“一个机车可以一直加速,只要其不停止”。在日常经验中,一个机车如果已经高速行驶了,就很难迅速地加速了。

Kerner, Rehborn 和 Wolf 开发了一套 CA 模型,也叫做 KKW 模型,用来仿真同步流动。在 KKW 模型中,为了产生同步流动,驾驶员被假定为一直试图和前面的车保持同样的速度,保持在同步的距离范围内<sup>[4]</sup>。在现实中,对一个驾驶员来说,一直准确预测前面车的速度是非常困难的,车辆跟随只是驾驶员许多自发运行工作中的一个。这样,跟随车在一定范围的速度波动应该是可以接受的。

在 KKW 模型中,跟随车的速度由机械限制条件决定。比如,跟随车应该一直准备最坏的情况出现,前车可能随时会刹车。然而,这种限制条件只适合于车辆不能得到其它前方车的足够信息的情况。在实践中,司机通常观察两个或者更多的引导车,相信引导车不会立即停车,除非紧急事件发生。如果引导车突然刹车,追尾就会发生。这种事故在现实世界

到稿日期:2009-07-12 返修日期:2009-09-30 本文受西域区域大型科学仪器平台网络建设,成都理工大学网络教育学院青年科技基金资助。

杜小丹(1972-),女,副教授,主要研究领域为计算机网络、计算机仿真等,E-mail:duxiaodandan@cdu.edu.cn;赵仕波(1970-),男,副教授,主要研究领域为计算机应用技术;鄢涛(1973-),男,讲师,主要研究领域为计算机仿真、多媒体技术;张凤荔(1961-),女,教授,主要研究领域为移动数据管理及其应用。

很常见。进一步说,在机械限制的基础上,跟随车的速度是现实世界的司机很难精确测算的。

在大多数的 CA 模型中,驾驶员和车辆被视为两个明显的实体。然而,一个驾驶员-机车单位被认作一个自主代理,会更加有优势(自主代理的解释为:一个系统在环境内部或者属于环境一部分,这样来感受环境,作用于环境。在一段时间中,追求本身的运行机制并且在将来影响它感受到的环境<sup>[5,6]</sup>)。首先,模拟环境  $E = \{D, V, R\}$  可以简化为  $E = \{A, R\}$ 。D 是指驾驶员;V 是机车;R 是路途;A 是自主代理。其次,不同的驾驶行为和车辆物理特性(比如,长度、加减速)可以压缩到一个目标,这个目标有助于模拟软件的开发。最后,代理技术已经被广泛应用于交通控制和管理的研究中<sup>[7]</sup>。因此,代理基础上的交通模式可以方便地合成到交通控制和管理系统中去。

本文用代理技术来模拟驾驶员相互作用和车辆物理特性,利用 CA 来推动发展交通流。CA 模型的出发点是基于以下事实:1)没有一个令人信服的原因,车辆不会停止。2)为了安全驾驶,驾驶员一般都会观察前面两个或者更多的车辆。3)加减速应该会使交通环境发生变化。本文将在第 2 节开发一个新的 CA 模型;在第 3 节提出模拟结果和讨论;最后给出结论。

## 2 模型

一般来说,交通流量包括自由流量和汽车跟随流量。在自由流量中,代理人可能以它的期望速度驾驶。在这种情况下,代理人更换的速度取决于代理人偏好,因为他们有足够的时间决定他们将做什么。而对于汽车跟随流量,跟随它前面的代理可以是宽松或接近的,即代理的速度变动取决于代理人的偏好和与引导者之间的相对速度。注意到不同的交通情况,自由推进行为和汽车跟随行为可以在他们之间无缝运行。因此,我们用  $h_c$  作为重要的车间时距(同距离或速度),区别任意驾驶和汽车跟随驾驶。如果在时间测量  $t$  的进展大于  $h_c$ ,则代理假设在自由驾驶的状态。否则,假设代理在汽车跟随的状态。

在模型中,元胞自动机方法被用于描述继续前进一条单行道高速公路的代理。路被划分成空的或被代理以速度  $v = 0, 1, \dots, v_{\max}$  占领(部分)的。在每个离散时间步  $t \rightarrow t+1$ , 系统根据以下规则平行更新:

### 步骤 1 速度更新

$$v_n'(t+1) = \alpha \min(v_n(t) + a, v_{\max}) + (1-\alpha)(\beta \min(v_n(t) + a, v_n(t) + \Delta v_n) + (1-\beta) \max(0, v_n(t) + d), v_n(t) + \Delta v_n) \quad (1)$$

$$\Delta v_n = \min(\eta_1 \Delta v_n(t), \eta_2 \Delta v_{n-1}(t), \dots, \eta_m \Delta v_m(t)) \quad (2)$$

$$\Delta v_n = \min(\eta_1 \Delta v_n(t), \eta_2 \Delta v_{n-1}(t), \dots, \eta_m \Delta v_m(t)) \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & h(t) \geq h_c \\ 0 & h(t) < h_c \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & \Delta v_n \geq 0 \text{ and } \Delta v_{n-1} \geq 0 \\ 0 & \Delta v_n < 0 \text{ or } \Delta v_{n-1} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$a = \begin{cases} a_1 & v_n(t-1) \leq \frac{1}{2} v_{\max} \\ a_2 & v_n(t-1) > \frac{1}{2} v_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$d = \begin{cases} d_1 & \Delta v_n \geq -6 \\ d_2 & \Delta v_n < -6 \end{cases} \quad (7)$$

### 步骤 2 随机

$$v_n(t+1) = \max(0, v_n'(t+1) + \gamma) \quad (8)$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1 & 0 \leq p \leq 0.68 \\ \gamma_2 & 0.68 < p \leq 0.95 \\ \gamma_3 & 0.95 < p \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

### 步骤 3 位置更新

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1) \quad (10)$$

式中,  $x_n(t)$  和  $v_n(t)$  是  $n^{\text{th}}$  的位置和速度,  $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$  是  $n^{\text{th}}$  代理的相对速度(( $n-1$ )<sup>th</sup> 代理在同一条车道的  $n^{\text{th}}$  之前),  $\eta_i$  是在前面  $n^{\text{th}}$  代理和 ( $n-i$ )<sup>th</sup> 代理之间的相互作用系数,  $h$  是  $n^{\text{th}}$  代理的车间时距,  $h_c$  是所有代理的重要车间时距,  $\alpha$  是  $n^{\text{th}}$  代理的状态(自由或汽车跟随),  $\beta$  是  $n^{\text{th}}$  代理在汽车跟随的过程中的状态(加速或减速),  $a$  是  $n^{\text{th}}$  代理加速,  $d$  是  $n^{\text{th}}$  代理减速,  $\gamma$  是  $n^{\text{th}}$  代理的自然速度波动,  $p$  是 0 和 1 之间的随机数。

注意:(i)在方程式的第一个部分,式(1)表示在自由流的  $n^{\text{th}}$  代理,第二个部分表示在汽车跟随的流程的  $n^{\text{th}}$  代理,并且  $n^{\text{th}}$  代理的加速度和减速能力由机械情况制约;(ii)式(2)和式(3)在加速和减速过程中描述  $n^{\text{th}}$  代理和  $m$  代理的相互作用。相互作用系数  $\eta_i$  代表  $n-i^{\text{th}}$  代理对  $n^{\text{th}}$  代理的影响。假设,仅在之前的 2 个代理对  $n^{\text{th}}$  代理和任意集合有直接影响,  $m=2$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1$ ;(iii)式(6)意味着代理在低速时加速度  $a_1$  通常更高,而在高速时加速度是低的(即与  $a_2$  相等);(iv)式(7)描述正常减速  $d_1$  和代理的最大减速  $d_2$ ;(v)  $\gamma_1, \gamma_2$  和  $\gamma_3$  表示在式(9)中交通状态变化时的值。当代理在一个自由流量状态(即,  $\alpha=1$ )时,它们通常加速或巡航的可能性非常大。因此我们设置了  $\gamma_1=1, \gamma_2=0$  和  $\gamma_3=-1$ 。当代理在一个接近的汽车跟随状态(即,  $\alpha=0$  和  $\beta=0$ )时,它们将减速或巡航的可能性非常大,因此设置了  $\gamma_1=-1, \gamma_2=0$  和  $\gamma_3=1$ 。在某些情况下,  $\gamma_1=0, \gamma_2=1$  和  $\gamma_3=-1$ 。因此根据正常性的假设描述用不同的交通状态,加速度、巡航和减速。

## 3 模拟和结果

周期边界条件和开放边界条件可以在 CA 模型中考虑,而周期边界条件在计算机模拟中采用。系统型号设定为  $L=10,000$ 。一个时间步骤对应 1s。每个信元对应长度为真实的道路 1.5m。每个代理的长度设定为 5 个信元。一个代理的最大速度假定为 20 个信元(108km/h)。下面的值在模拟中使用:  $h_c=3, a_1=2, a_2=1, d_1=-2$  and  $d_2=-4$  ( $d_2=-4$ , 在现实中对应最大的减速能力  $-6\text{m/s}^2$ ), 测量时间为 46000s, 第一个 10000s 舍弃以避免瞬时特性。使用平均流动和速度来测量基本视图。在以下的模拟中,考虑到密度变化,密度提高 2% 增量。

### 3.1 基本视图

基本视图(流动-密度关系)可以反映交通流动基本原理,但是不能再产生同步流动模式。这是因为交通流动在基本视图中是正常的描述,解释为基于统计的平均数的流动-密度曲线<sup>[2]</sup>。

单个代理数据集中在一个固定区域(300 个信元),接着,算出聚集的 1-min 流动( $J$ )和 1-min 平均速度( $v$ )。密度( $\rho$ )

可以通过公式  $J = \rho v$  获得。图 1 给出 1-min 流动密度关系, 这可以在微观水平上更真实地反映交通流动的特性。

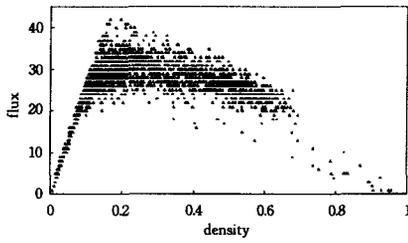


图 1 流动-密度关系,以车辆每分钟移动计算流动

在图 1 中,正角度倾斜的模糊直线对应低密度的自由移动。随着密度的增加,交通流动自发发展到同步流动,对应于广密度范围里分散的点。就是说,在同步流动中,从密度到流动没有明确的映射关系。这个基本的示意图包括图 2 给出的速度-密度数值关系,该关系对应于图 1 的流动-密度关系。

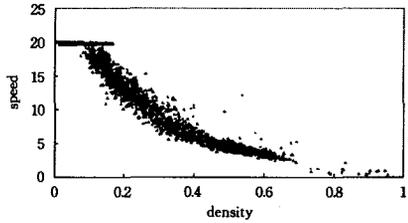


图 2 速度-密度关系

可以看到在速度降低同时密度增加的情况下,在自由流动中,车辆保持接近最大的速度<sup>[2]</sup>。

### 3.2 交叉关联分析

交叉关联分析通常用于描述两个变量的合适性。若它们关系相近,相关系数因数等于 1,不然,就是 0。为了准确辨别不同类型的交通状态,比如自由流动、同步流动和宽幅移动堵塞<sup>[5]</sup>,移动( $J$ )和密度( $\rho$ )之间的交叉关联功能可以写作:

$$c_{\rho,J}(\tau) = \frac{\langle \rho(t)J(t+\tau) \rangle - \langle \rho(t) \rangle \langle J(t+\tau) \rangle}{\sqrt{\langle \rho^2(t) \rangle - \langle \rho(t) \rangle^2} \sqrt{\langle J^2(t+\tau) \rangle - \langle J(t+\tau) \rangle^2}}$$

图 3 所示的是流动和密度之间在低密度( $\rho=0.06$ )和中密度( $\rho=0.24$ )时的交叉关联分析。在低密度时, $c_{\rho,J} \approx 1$ ,意思是在自由流动时存在大致线性关联。在速度的平均值保持一个较高值并几乎持续的情况下,流动主要决定于密度的变化。

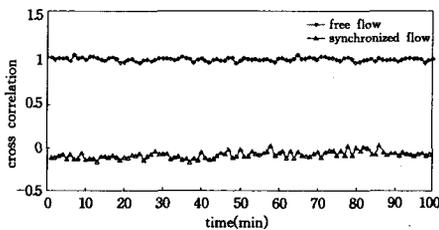


图 3 自由移动( $\rho=0.06$ )和同步移动( $\rho=0.24$ )的交叉关系分析

在中密度下, $c_{\rho,J} \approx -0.1$ ,意味着在同步流动中流动和密度之间线性关系不存在。注意到,同步流动的交叉关联分析只是在数量上显示流动对于密度的依赖程度,它们之间的数量关系不能被交叉关联功能决定。在这种情况下,流动和密度的关系可以看作是一对多的关系,但是目前还没有详细数学描述。这些交叉关系的结果包括实际的单车量数据的交叉关联分析。

### 3.3 相位图

对于同步移动中复杂的流动-密度关系描述,我们标示了 2400-min 流动和速度,其密度  $\rho=0.24$ ,参见图 4,图 5。流动-时间的图表和速度-时间的图表非常复杂。流动  $J$  分散在 [24,30] 范围内,此时速度  $v$  在 [10,13] 范围内。这意味着,在同步移动中,对于固定的密度(例如, $\rho=0.24$ )存在着不同的速度,车辆的速度归于不同的速度群。因此,我们强调不同的速度群速度导致流动的不同。

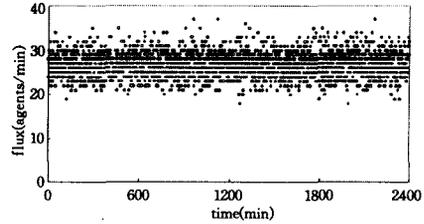


图 4 密度  $\rho=0.24$  时的流动分散点

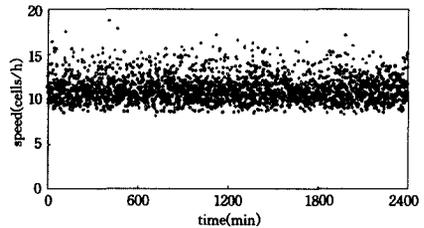


图 5 密度  $\rho=0.24$  时的报速度分散点

部分路段的快照在图 6 中显示,密度  $\rho=0.24$ 。速度剖面图显示了平滑的过程,暗示图 1 中同步移动区域的分散点归因于前面的多倍自主代理的相互作用和限制的加减速能力。

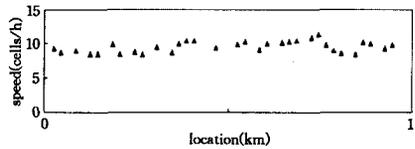


图 6 密度  $\rho=0.24$  时一部分路段的同步流动的内部结构快照

最后,给出自由流动和宽幅移动堵塞的相位图,见图 7。在密度  $\rho=0.06$  时,交通处于自由移动状态。可以看到有清楚的车辆轨道族在模拟时段存在。密度  $\rho=0.18$  时,模拟中的交通是自由流动和同步流动并存的。自由流动主导交通,同步流动部分显现。密度  $\rho=0.36$  时,宽幅移动堵塞和同步流动相互交替推动。堵塞中的外流是同步流动的。然而,同步流动仅存在很短时间,因为大密度而并成其它的堵塞。

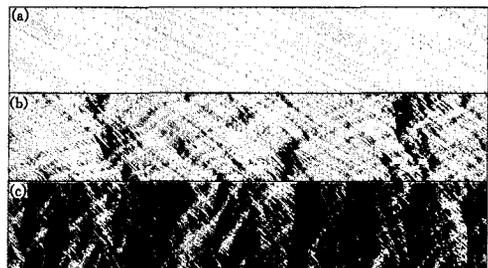


图 7 (a)密度  $\rho=0.06$  时的自由流动相位;(b)密度  $\rho=0.18$  时自由流动自发成为同步流动;(c)密度  $\rho=0.36$  时同步流动自发成为堵塞

结束语 本文提出了一个新的 CA 交通模型,考虑到了

(下转第 239 页)

务的编号一同返回给主进程,然后等待下一个任务的到来;主进程接收到子进程返回的子图像数据后,由任务编号将结果存放于整个图像缓冲区的对应位置,然后查看任务是否全部返回,若是,则保存分割结果的任务完成,否则检查任务池中是否还有任务剩余,若有,则按序取出其中之一,分配给刚返回数据的子进程,若没有,则等待回收尚未完成的任务。图2给出了这一过程的流程图。

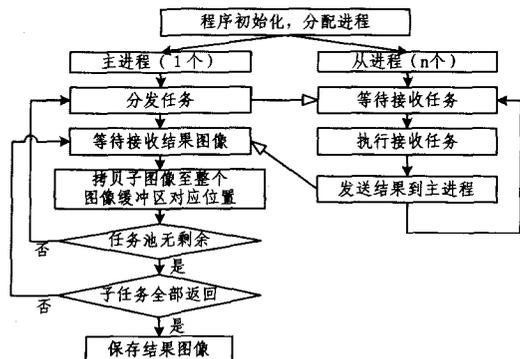


图2 并行分割流程图

在 Scientific Linux CERN 4 操作系统下实现了该并行算法,并在 EGEE 网格环境下分别指定不同计算结点数对其进行了测试,程序运行时间如表1所列。

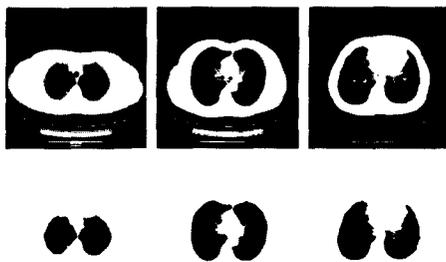


图3 分割效果图(分别为肺的上段、中段和下段)

表1 不同计算结点数时程序运行时间

计算结点数	1	2	4	8	16
运行时间(s)	1786	962	468	248	132

**结束语** 本文提出了一种基于 EGEE 的支持向量机与区域增长相结合的医学图像并行分割方法。该方法从已知分割结果的图像中选取样本训练支持向量机作为区域增长的种子点搜索器和增长规则的判别器,避免了经典区域增长算法中手动选取种子点和门限设置的困难,与单纯使用支持向量机的分割方法相比减少了需要判别的次数,增加了分割的速度,并在 EGEE 环境下实现了该算法的并行化,进一步提高了分割的速度。本文提出的方法在医学图像领域中具有一定的应用前景。

### 参考文献

- [1] Jayaram K U, Supun S. Fuzzy Connectedness and Object Definition: Theory, Algorithms, and Applications in Image Segmentation[J]. Graphical Models and Image Processing, 1996, 58(3): 246-241
- [2] Wan Shu-Yen, Higgs, William. Symmetric region growing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(9): 1007-1015
- [3] Vapnik V. Statistical learning theory [M]. New York: Wiley, 1998
- [2] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems [J]. Review Modern Physics, 2001, 73: 1067
- [3] Kerner B S. The Physics of Traffic [M]. Berlin, New York: Springer, 2004
- [4] Lee H K, Barlovic R, Schreckenberg M, et al. Mechanical restriction versus human overreaction triggering congested traffic states[J]. Physical Review Letters, 2004, 92: 238-702
- [5] 董力耘, 薛郁, 戴世强. 基于跟车思想的一维元胞自动机交通流模型[J]. 应用数学和力学, 2002, 23: 331
- [6] 雷丽, 薛郁, 戴世强. 交通流的一维元胞自动机敏感驾驶模型[J]. 物理学报, 2003, 52(9): 2121-2126
- [7] Bazzan A, Klügl F, Ossowski S. Agents in traffic and transportation: Exploring autonomy in logistics, management, simulation, and cooperative driving[J]. Transportation Research C, 2005, 13(4): 251-254
- [8] 姚云, 骆勇. 城市干线交通协调控制仿真优化[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(3): 23-27

### 3 实验与结果

本实验使用了  $512 \times 512 \times 20$  的已分割出肺实质的胸部 CT 图像(记为图像 A)和  $512 \times 512 \times 64$  的待分割胸部 CT 图像(记为图像 B)。实验中,分别从图像 A 的目标区域(肺实质)和非目标区域(肺实质以外的部分)随机地选取 500 个像素点共 1000 个样本点,从每个样本点的  $5 \times 5$  领域中提取了包括当前像素点灰度值、当前像素邻域均值、当前像素邻域中值以及由当前像素邻域的灰度共生矩阵( $\sigma = 1, \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ )导出的 5 个纹理特征(角二阶矩、对比度、相关性、方差、反差矩,取 4 个方向上的平均值)共 8 个特征,经归一化后形成 SVM 的输入向量  $x$ ; 训练支持向量机。在搜索种子点过程中粒度  $N$  取 32,即每隔 32 行 32 列取一点判别是否为种子点。应用本文的方法对图像 B 进行分割的结果如图 3 所示。

采用 C++ 语言结合 ITK (Insight Segmentation and Registration Toolkit) 开发包和 MPICH2.0 并行程序开发包

(上接第 233 页)

双面状态加减速能力和在单车道上的多代理相互作用。这显示该模型能模拟大部分实际观测结果,包括基本相位、速度-密度相位和 3 种熟知的交通相位。对速度-位置相位、1-min 压缩流动-时间相位和速度-时间相位和同步移动状态都做了总结。自由状态和同步状态的交叉关联功能分析与其它研究表现出良好的一致性,意味着同步移动的变化可以归因于自主代理在不同群体中的不同速度。

在未来的工作中,将集中研究相互作用的系数因数  $\eta$ , 这会允许考虑超过两个前面代理的相互作用。而且,将进一步调查一个速度群的速度对同步移动状态的移动的影响。

### 参考文献

- [1] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems[J]. Physics Reports, 2000, 329: 199