

# 日常择路行为的多智能体模拟<sup>\*</sup>

刘天亮 黄海军<sup>†</sup>

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083)  
(2007 年 1 月 28 日收到 2007 年 2 月 19 日收到修改稿)

日常路径选择是一个长期的、多体参与的非合作博弈过程. 基于多智能体环境, 对交通信息公开和不公开两种路径更新规则进行了模拟研究, 结果表明, 信息公开比不公开能够使路径流量更快地演化到 logit 随机用户均衡状态, 但若对信息的依赖程度过大, 则可能导致系统振荡. 出行者完全依靠自身经验完成路径选择也可以使系统演化至稳定态, 但代价是演化效率太低. 因此, 既要公开交通信息, 又要注意合理使用信息.

关键词: 日常路径选择, 多智能体模拟, 随机用户均衡

PACC: 0565, 0250, 0520

## 1. 引 言

城市交通网络中, 人们的日常路径选择是一个复杂的多体非合作博弈过程. 巨量的参与者根据自己的过往经验或借助交通信息系统的支持, 在个人利益极大原则下不断调整出行路线, 逐步达到一个稳定状态.

利用实验和模拟结果, 揭示人们的路径选择规律, 加深对交通行为的理解, 是非线性科学研究的一个重要应用领域<sup>[1-3]</sup>. 目前利用元胞自动机模型模拟交通行为的研究, 主要针对只含一条道路的交通系统, 不具备路径选择功能<sup>[4-8]</sup>. 文献[9]用元胞机模型研究了信息作用下的双通道决策问题, 提出了合理利用交通信息的建议. 针对只有两条路径的简单路网, Selten 等人以 18 个 Bonn 大学的学生为对象完成了路径选择行为实验<sup>[10]</sup>. Klügl 和 Bazzan 设计一套自适应更新规则描述司机的日常路径选择行为, 模拟结果表明当司机以 50% 的概率忽视预测信息而采取经验规则时, 路网的流量分布效果最接近实际<sup>[11,12]</sup>. 他们后来又进一步考虑了信息提供的类型, 并对 Braess 诡异现象进行了模拟<sup>[13,14]</sup>. 最近, 文献[15]设计了 4 种自适应更新规则描述司机的日常路径选择行为, 并在简单网络上进行了模拟.

本文考虑现实中可能存在的择路机理, 设计了

交通信息公开和不公开两种情形下的路径更新规则, 采用基于多智能体的模拟环境——SeSAm 完成对日常路径选择过程的模拟, 目的在于回答如下问题: 所设计的更新规则能否使路网流量收敛到 logit 随机用户均衡状态? 不同更新规则的模拟结果是否存在显著差异? 原因是什么?

## 2. 随机用户均衡模型

考虑交通网络  $G = (N, A)$ , 其中  $N$  为节点集,  $A$  为路段集. 让  $W$  表示所有 OD 对的集合,  $R_w$  表示 OD 对  $w \in W$  之间所有路径的集合,  $d_w$  表示 OD 对  $w \in W$  之间的交通需求.  $t_a = t_a(v_a)$  为路段  $a \in A$  上的实际行驶时间函数, 是路段流量  $v_a$  的增函数.  $c_{rw} = \sum_{a \in A} \delta_{ar} t_a(v_a)$  是 OD 对  $w \in W$  之间路径  $r \in R_w$  的实际时间, 若路段  $a$  在路径  $r$  上, 则  $\delta_{ar}$  为 1, 否则为 0.  $T_{rw}$  是 OD 对  $w \in W$  之间的出行者对路径  $r \in R_w$  的理解时间.  $f_{rw}$  为 OD 对  $w \in W$  之间路径  $r \in R_w$  上的路径流量.

由于交通拥挤或其他因素, 出行者不可能精确地提前预知路径的实际时间, 只能依据自己的理解时间抉择路径. 理解时间是以实际时间为期望值的随机变量, 即

$$T_{rw} = c_{rw} + \zeta, \quad r \in R_w, \quad w \in W, \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 70521001)和国家“973”基础研究计划(批准号 2006CB705503)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: hjhuang@mail.nsf.gov.cn

其中  $\zeta$  是服从独立同分布、均值为零的 Gumbel 随机变量. 根据多体系统的离散选择理论, 个人利益极大原则导致的流量分布为

$$f_{rw} = d_w \frac{\exp(-\lambda c_{rw})}{\sum_{l \in R_w} \exp(-\lambda c_{lw})}, r \in R_w, w \in W, (2)$$

式中  $\lambda$  表示路径选择行为的随机程度或与理解时间方差相关的参数,  $\lambda$  越小, 路径选择的随机性越强, 反之路径选择越明智. 容易证明, 获得如 (2) 式所需要的 logit 随机用户均衡流量分布等价于解下述凸规划问题<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} \min Z(f) = & \frac{1}{\lambda} \sum_w \sum_{r \in R_w} f_{rw} \ln f_{rw} \\ & + \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx. \end{aligned} \quad (3)$$

约束

$$\sum_{r \in R_w} f_{rw} = d_w, w \in W, \quad (4)$$

$$f_{rw} \geq 0, r \in R_w, w \in W, \quad (5)$$

$$v_a = \sum_w \sum_{r \in R_w} f_{rw} \delta_{ar}, a \in A. \quad (6)$$

### 3. 基于多智能体的路径更新规则 and 实现

上一节提到的随机用户均衡虽然赋予路径时间一定的随机性, 但仍然假设所有出行者的决策信息是公开和共享的. 现实中, 存在两种情况, 一是当交通信息完全公开时, 出行者完全掌握上一轮所有路径的时间, 据此在新一轮选择中按照最有利原则调整自己的路径. 二是当交通信息不向外发布时, 出行者所掌握的路网信息就是不完整的, 他不清楚别人的路径选择, 只能根据自己积累的亲身经验, 确立一种路径更新规则, 并不断地调整自己的路径. 本节描述两种路径更新规则 and 实现这两种规则的多智能体模拟技术.

每个出行者依据当前自己的理解路径时间来选择路径. 当路网中的交通信息公开时, 出行者  $i$  在第  $t+1$  天(当前天)将路径  $r \in R_w$  的时间理解为

$$T_{rw}^{(i,t+1)} = \tau_{rw}^{(i,t)} + \xi, \quad (7)$$

其中  $\tau_{rw}^{(i,t+1)}$  是  $T_{rw}^{(i,t+1)}$  的期望值,  $\xi$  是误差项. 当路网中的交通信息不向外发布时, 出行者  $i$  在第  $t+1$  天(当前天)将路径  $r \in R_w$  的时间理解为

$$\hat{T}_{rw}^{(i,t+1)} = \hat{\tau}_{rw}^{(i,t)} + \hat{\xi}, \quad (8)$$

其中  $\hat{\tau}_{rw}^{(i,t+1)}$  是  $\hat{T}_{rw}^{(i,t+1)}$  的期望值,  $\hat{\xi}$  是误差项.

假设  $\xi$  和  $\hat{\xi}$  服从均值为零、独立相同的 Gumbel 分布, 与时间刻度、OD 对和具体路径无关. 显然, 根据上一节的推导, 当路网中的交通信息公开时, 出行者  $i$  在第  $t+1$  天(当前天)选择路径  $r \in R_w$  的概率为<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} p_{rw}^{(i,t+1)} &= \frac{\exp(-\theta \tau_{rw}^{(i,t+1)})}{\sum_{l \in R_w} \exp(-\theta \tau_{lw}^{(i,t+1)})}, \\ r &\in R_w, w \in W. \end{aligned} \quad (9)$$

类似地, 当路网中的交通信息不向外发布时, 出行者  $i$  在第  $t+1$  天(当前天)选择路径  $r \in R_w$  的概率为

$$\begin{aligned} \hat{p}_{rw}^{(i,t+1)} &= \frac{\exp(-\hat{\theta} \hat{\tau}_{rw}^{(i,t+1)})}{\sum_{l \in R_w} \exp(-\hat{\theta} \hat{\tau}_{lw}^{(i,t+1)})}, \\ r &\in R_w, w \in W. \end{aligned} \quad (10)$$

参数  $\theta$  和  $\hat{\theta}$  与 (2) 式中的  $\lambda$  有相同的物理意义.

在多智能体的模拟环境 (SeSAM Shell for Simulated Agent Systems, <http://www.simsesam.de>) 中是这样实现出行者对各条路径的选择并进行路径流量统计的. 假设出行者  $i$  有  $n$  条路径可供选择, 前面计算给出的路径选择概率分别为  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , 使用随机数发生器产生 0 到 1 之间的一个随机数  $a$ , 若  $\sum_{j=1}^{k-1} p_j < a \leq \sum_{j=1}^k p_j$ , 则出行者  $i$  选择的路径是对应  $p_k$  的路径  $k$ , 且路径  $k$  的累计流量增加一个单位.

下面考察期望值  $\tau_{rw}^{(i,t+1)}$  和  $\hat{\tau}_{rw}^{(i,t+1)}$  的演化过程. 当路网中的交通信息公开时, 第  $t+1$  天的出行者知道第  $t$  天全部路径的出行信息, 所以第  $t+1$  天的路径期望时间可以表示成第  $t$  天该路径的实际时间与期望时间的加权和<sup>[17,18]</sup>

$$\tau_{rw}^{(i,t+1)} = \alpha c_{rw}^{(i,t)} + (1-\alpha) \tau_{rw}^{(i,t)}, \alpha \in (0,1]. \quad (11)$$

当路网中的交通信息不向外发布时, 第  $t+1$  天出行者  $i$  只掌握第  $t$  天自己所走过的路径信息, 假设他走过的路径为  $k \in R_w$ , 那么第  $t+1$  天该出行者对路径  $k$  的期望时间可以表示成第  $t$  天该路径的实际时间与期望时间的加权和, 而他对其他路径的期望时间维持不变, 即

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{kw}^{(i,t+1)} &= \beta c_{kw}^{(i,t)} + (1-\beta) \hat{\tau}_{kw}^{(i,t)}, \\ k &\in R_w, \beta \in (0,1], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\tau_{rw}^{(i,t+1)} = \tau_{rw}^{(i,t)}, r \in R_w, r \neq k.$$

(11) 和 (12) 式中的  $\alpha$  和  $\beta$  体现了出行者对昨日实际时间和期望时间的依赖程度.

4. 模拟结果

图 1 是模拟所使用的网络,共有 9 个节点和 12 条路段.每条路段的出行时间函数是

$$t_a(x_a) = t_a^0(1.0 + 0.15(x_a/C_a)^4), \quad (13)$$

其中  $t_a^0$  是路段  $a$  的自由流行驶时间,  $C_a$  是路段  $a$  的通行能力,它们的取值见表 1.网络的 OD 对是起点 1 到迄点 9,OD 需求  $q_{1,9} = 500$ ,出行者有 6 条路径可以选择.使用 logit 随机均衡分配模型(3)–(6)可以得到对应不同路径选择随机程度(即不同的  $\lambda$  值)的流量分布结果,表 2 以路径 1–4–7–8–9 为例给出了该路径的流量结果.当  $\lambda \geq 0.5$  时,流量不再显著变化,此时已经接近确定性用户均衡状态.

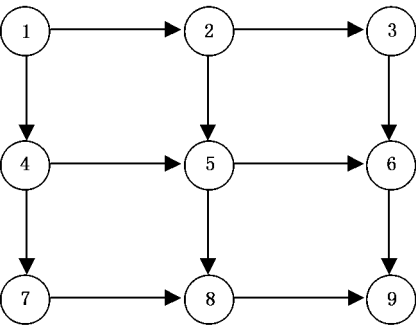


图 1 模拟用的网络

表 1 路段时间函数中的参数取值

| 路段     | $t_a^0$ | $C_a$ | 路段     | $t_a^0$ | $C_a$ |
|--------|---------|-------|--------|---------|-------|
| (1, 2) | 20      | 360   | (5, 6) | 12      | 180   |
| (2, 3) | 12      | 360   | (4, 7) | 15      | 240   |
| (1, 4) | 15      | 240   | (5, 8) | 10      | 150   |
| (2, 5) | 12      | 180   | (6, 9) | 30      | 360   |
| (3, 6) | 12      | 360   | (7, 8) | 15      | 240   |
| (4, 5) | 10      | 150   | (8, 9) | 15      | 240   |



表 2 路径 1–4–7–8–9 上的 logit 随机均衡流量

| $\lambda$         | 0.01  | 0.05  | 0.10  | 0.50 | 1.00  | 1.50  | 2.00  | 3.00  | 5.00  |
|-------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f_{(1,4,7,8,9)}$ | 86.39 | 94.12 | 99.99 | 113  | 115.8 | 116.7 | 117.2 | 117.6 | 117.9 |

在多智能体的模拟环境——SeSAm 中,设定模拟天数为 500,从第二天开始,出行者在每一天都根据我们所设计的路径更新规则选择当天的路径,第 1 天的路径理解时间和实际时间均设定为自由流行驶时间.为了节省篇幅,我们选择路径 1–4–7–8–9 为例开展分析,该路径的模拟和统计结果如图 2 和表 3 所示.

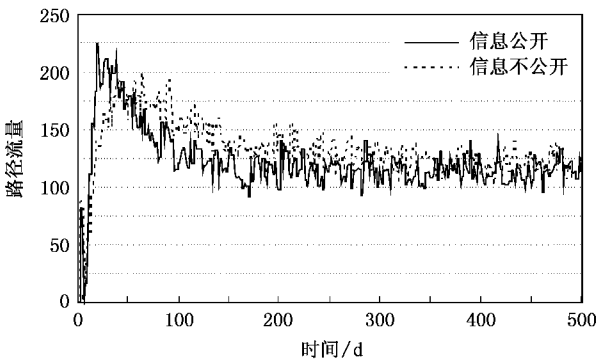


图 2  $\alpha = \beta = 0.01$  和  $\theta = \hat{\theta} = 0.5$  时,500 天内路径 1–4–7–8–9 上的流量演化

图 2 和表 3 显示,无论路网中的交通信息是否公开,经过长时间的博弈和学习,两种更新规则产生的最后 50 天的平均流量都非常接近  $\lambda \geq 0.5$  时 logit 随机用户均衡下的结果.表 3 还显示,交通信息公开时,流量朝着随机均衡态演化的速度比较快,在第 151 天至第 200 天期间的平均流量已经很接近稳态值了,这是因为信息公开起到了稳定出行者决策行为的作用,且人们有限理性地接受公开信息的指导.

保持其他参数不变,只让(11)式中的  $\alpha$  从 0.01 至 0.9 变化,考察最后 100 天路径 1–4–7–8–9 上流量的平均值和标准差,结果如图 3.当  $\alpha \leq 0.2$  时,

表 3  $\alpha = \beta = 0.01$  和  $\theta = \hat{\theta} = 0.5$  时,路径 1–4–7–8–9 上流量演化的统计结果

| 时间/d  |      | 1–50   | 51–100 | 101–150 | 151–200 | 201–250 | 251–300 | 301–350 | 351–400 | 401–450 | 451–500 |
|-------|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 信息公开  | 平均流量 | 154.08 | 146.08 | 123.60  | 112.24  | 116.12  | 114.56  | 111.76  | 116.72  | 110.56  | 116.16  |
|       | 标准差  | 67.19  | 17.56  | 9.45    | 11.06   | 10.77   | 10.37   | 8.50    | 9.44    | 8.87    | 8.30    |
| 信息不公开 | 平均流量 | 127.76 | 168.44 | 148.96  | 132.88  | 130.72  | 126.64  | 122.80  | 119.92  | 118.80  | 118.72  |
|       | 标准差  | 59.75  | 14.39  | 11.21   | 9.97    | 10.89   | 9.35    | 9.17    | 8.92    | 9.13    | 8.43    |

信息公开情形下的多智能体路径更新规则能够产生随机用户均衡的路径流量,而当  $\alpha$  超过 0.2 并继续增加时,路径流量的标准差突然急剧上升,说明出行者的路径选择“摇摆不定”,一天换一次,流量分布达不到某种稳定状态.这是因为出行者过于依赖信息系统提供的路径时间信息,没有自己的惯性主见,简单地“紧跟和服从”信息系统的指示,天天改变路径,比如,信息系统显示 A 路径昨日拥挤,大家今日就都选择路径 B,信息系统再告诉大家 B 路径今日拥挤,大家明日就都选 A,从而无法达到一个稳定的路径选择均衡状态.图 3 表明,对于本算例,存在一个  $\alpha \approx 0.2$  的临界值,在这个值之下,多智能体路径更新规则可以使系统演化至某个稳定的均衡状态,而超过该值,系统就发生相变,出现了振荡.

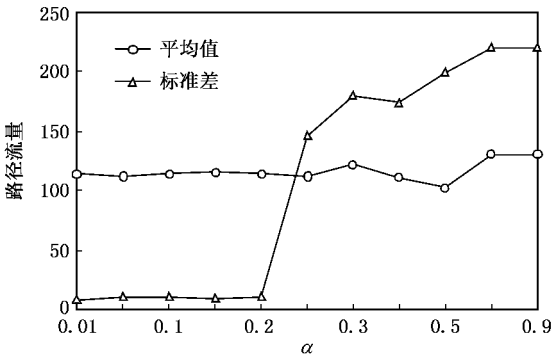


图 3 信息公开、 $\alpha$  取不同值时,最后 100 天路径 1—4—7—8—9 上流量的平均值和标准差

如果  $\alpha$  取值过于小,虽然不影响随机用户均衡流量分布的获得,但演化极慢,图 4 是  $\alpha = 0.001$  时的模拟结果,1400 天过后,才开始接近  $\lambda \geq 0.5$  所对应的 logit 随机用户均衡流量.

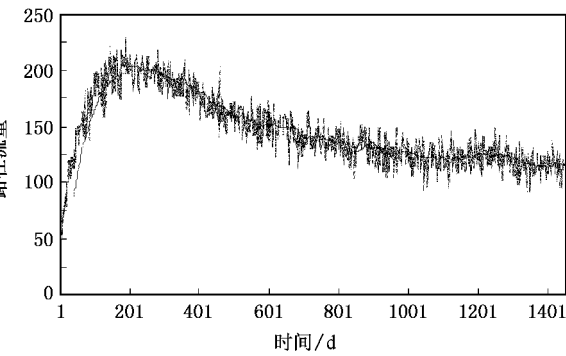


图 4  $\alpha = 0.001$  时路径 1—4—7—8—9 上的流量演化

下面我们分析信息不公开情形下  $\beta$  值的影响.图 5 给出了  $\beta$  分别取 0.001,0.01,0.1 和 0.5 时路径 1—4—7—8—9 上的流量演化情况,显然,无论  $\beta$  取何值,路径流量都可以演化到稳定的随机用户均衡状态,但所耗费的时间远比信息公开时的要多, $\beta$  值越大、越是如此.这说明一个基本的规律,信息公开可以帮助系统尽快演化到随机用户均衡态,但若对信息的依赖程度过大,却可能导致系统不稳定,而信息不公开(即完全由出行者自己摸索)总能够使系统演化到稳定态,但代价是效率太低.

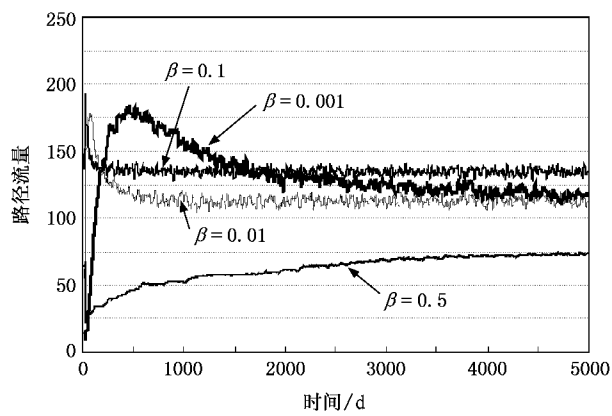


图 5  $\beta$  取不同值时路径 1—4—7—8—9 上的流量演化

## 5. 结 论

本文从微观层面、出行者个体的角度出发,设计了交通信息公开和不公开两种情形下的路径更新规则,应用多智能体模拟环境——SeSAm,对交通网络中的日常路径选择行为进行了研究.模拟结果表明,交通信息公开比不公开能够使路径流量更快地演化到 logit 随机用户均衡状态,但若对信息的依赖程度过大,则可能导致系统振荡.存在一个对信息依赖程度的临界值,超过了该值,路径选择行为就不具备历史继承性.由出行者完全自行摸索,也可以使系统逐渐演化至稳定态,但代价是演化的效率很低.研究结果有助于正确认识交通信息系统的作用,进而实现合理应用.

- [1] Mahmassani H S, Liu Y H 1999 *Transp. Res. C* **7** 91
- [2] Ben-Akiva M, De Palama A, Kaysi I 1991 *Transp. Res. A* **25** 251
- [3] Adler J L, Blue V J 1998 *Transp. Res. C* **6** 157
- [4] Zheng R S, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3516 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 3516]
- [5] Ge H X, Zhu H B, Dai S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4621 (in Chinese) [葛红霞、祝会兵、戴世强 2005 物理学报 **54** 4621]
- [6] Lei L, Dong L Y, Song T, Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷丽、董力耘、宋涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
- [7] Guo S L, Fong Y F, Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3336 (in Chinese) [郭四玲、韦艳芳、薛郁 2006 物理学报 **55** 3336]
- [8] Wu K F, Kong L J, Liu M R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6275 (in Chinese) [吴可非、孔令江、刘慕仁 2006 物理学报 **55** 6275]
- [9] Fu C J, Wang B H, Yin C Y, Gao K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4032 (in Chinese) [付传技、汪秉宏、殷传洋、高坤 2006 物理学报 **55** 4032]
- [10] Selten R, Chmura T, Pitz T, Kube S, Schreckenberg M 2007 *Games Eco. Behavior* **58** 394
- [11] Klügl F, Bazzan A L C 2004 *J. Artificial Societies and Social Simulation* **7** 1
- [12] Klügl F, Bazzan A L C 2004 *J. Intelligent Transportation Systems* **8** 223
- [13] Bazzan A L C, Klügl F 2003. In: *Proceedings of the Fifth Workshop on Evolutionary Game Theory and Multiagent Systems*, July Melbourne p107
- [14] Bazzan A L C, Klügl F 2005 *Transp. Res. C* **13** 299
- [15] Liu T L, Huang H J 2005 *China's Sustainable Transportation* (Beijing: China Railway Publishing House) p71 (in Chinese) [刘天亮、黄海军 2005 可持续发展的中国交通 (北京: 中国铁道出版社) 第 71 页]
- [16] Huang H J 1994 *Urban Transportation Network Analysis Theory and Practice* (Beijing: China Communication Press) p239 (in Chinese) [黄海军 1994 城市交通网络平衡分析理论与实践 (北京: 人民交通出版社) 第 239 页]
- [17] Huang H J, Liu T L, Yang H 2007 *J. Advanced Transportation* **41** 23
- [18] Cantarella G E, Cascetta E 1995 *Transp. Sci.* **29** 305

## Multi-agent simulation on day-to-day route choice behavior<sup>\*</sup>

Liu Tian-Liang    Huang Hai-Jun<sup>†</sup>

(School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(Received 28 January 2007; revised manuscript received 19 February 2007)

### Abstract

The day-to-day route choice is a non-cooperative game process with many participants during a long time period. We use the multi-agent simulation system SeSAm to investigate two different route update rules designed for traffic information release and unrelease respectively. Simulation results on a small grid network show that the rule under information release can make route flow evolve to the logit stochastic user equilibrium faster than that under information unrelease. However, the flow pattern may be unstable if travelers put undue compliance on the released information. A stable flow pattern can also be achieved only relying on travelers' perceived experience and learning ability, but the evolution is rather slow. It is thus suggested that the traffic information should be timely released to public meanwhile utilized properly.

**Keywords:** day-to-day route choice, multi-agent simulation, stochastic user equilibrium

**PACC:** 0565, 0250, 0520

<sup>\*</sup> Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70521001) and the National "973" Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705503).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hjhuang@mail.nsf.gov.cn