

基于骑车者行为的无信号交叉口自行车线路规划模型

黄 玲¹, 徐建闽^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 自行车是一种人力驱动, 相对低速、灵活的交通工具, 它的行驶线路与基于车道行驶的机动车截然不同. 通过对混交交通流中冲突最集中的无信号交叉口中的骑车者行为分析, 提出了基于模糊逻辑的自行车线路规划模型. 首先通过分析骑车者的行为, 提出了模糊逻辑的方法和模型框架, 并对各个子模型进行建模, 然后采集实际数据(问卷调查和视频数据)对模型进行参数校验和验证, 仿真验证和误差分析结果表明该模型的可靠性和有效性. 模型既可为微观混交交通流计算机仿真模型提供理论基础, 也可应用于个人机动车(PMV)的智能线路规划模型方面.

关键词: 线路规划; 模糊逻辑; 自行车; 交通流仿真; 行为模型; 混交交通流; 无信号交叉口

中图分类号: TP27; U491 **文献标识码:** A

Behavioral-analysis-based cyclists' path-planning model in mixed traffic unsignalized intersections

HUANG Ling¹, XU Jian-min^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Bicycle is a man-powered, relatively low speed, agile and vulnerable traffic tool, its moving trajectory is quite different from that of a motorcar. By analyzing the cyclist's behaviors at unsignalized intersections in mixed traffic flow situations (where most conflicts exist among motorcars, non-motor vehicles and pedestrians), we build a path-planning model for the cyclists based on the fuzzy logic. First, by analyzing the cyclist's behaviors in road-crossing, we propose a fuzzy-logic-based model framework for building various sub-models; and then, perform the model calibration and validation, using field data collected from surveying to electronic surveillance recording. The simulation results are promising, suggesting that this model may be adopted for mixed traffic-flow simulation or as a path-planning model for personal mobility vehicles(PMV).

Key words: path planning; fuzzy logic; bicycle; traffic flow simulation; behavioral model; mixed traffic flow; unsignalized intersection

1 引言(Introduction)

混交交通流又可称为非同质交通流, 是指多种交通参与者, 包括自行车、行人与机动车, 共用车道或交叉口的交通流^[1]. 在中国城市, 混交交通流交叉口中存在大量的机非冲突, 尤其在无信号交叉口, 但交通流量较大时, 自行车在机动车和行人之间灵活穿行, 这些现象不仅对交通安全, 对交叉口通行能力和服务水平也有很大影响. 但目前对此类自行车的线路规划或线路选择行为的研究还很少. 自行车是一种人力驱动, 相对低速、灵活的交通出行方式, 其行驶线路与方式和基于车道行驶的机动车截然不同.

目前对于自行车在交叉口的行为研究大多集中于自行车穿越冲突机动车流动间隙接受行为^[2~7], 也有少数针对自行车在信号交叉口的跟驰行为^[8]. 间隙接受行为和跟驰行为都可以纳入到自行车穿越交叉口时的线路规划(path planning)行为中. 自行车在交叉口进行线路规划时, 当预期遇到某个冲突车辆时, 通常会考虑改变线路来减少冲突和延迟. 因此, 对自行车在机非无信号交叉口(机非冲突最多的地点)线路规划行为研究, 是对自行车行为的一个综合研究. 此外, 对自行车穿越多冲突交叉口的线路规划进行研究, 对个体机动车(PMV)、自主移动机器人等的线

路规划、冲突避让问题也有一定的启示作用。

本文提出了一个基于模糊逻辑的自行车穿越机非无信号交叉口线路规划模型。首先通过对自行车穿越交叉口的行为进行分析,进而构建模型框架,然后对模型进行描述;最后通过实例仿真验证模型的有效性和可靠性。

2 自行车线路规划模型框架(Cyclist's path planning model framework)

2.1 线路规划行为分析(Path planning behavior analysis)

为了更好地理解骑车者在穿越机非无信号交叉口时进行线路规划的决策过程,在2007年随机对30多名不同年龄、性别、职业的骑车者进行问卷调查。调查结果表明,大多数骑车者在到达交叉口时,首先看交叉口大致交通情况,然后形成一个大致穿行线路。当没有冲突发生时,通常是直接按原速匀速到达目的地。只有当有可能冲突的车辆/自行车/行人存在时,骑车者才进行线路的规划或选择。考虑因素通常包括冲突的危险性(安全)、穿越花费时间(快速)、体力的耗费(省力)等。当沿着制定的大致线路前进时,他们会不停观察周围的交通情况,实时调整自身速度避让冲突,并在必要的时候变更线路。由以上分析,将自行车线路规划行为划分为3个阶段:

1) 感知。获取交叉口大致信息(地理几何信息,交叉口对面最终目的地位置 D_f ,交通状况,定位可能冲突车辆等)。

2) 线路制定。由以上信息制定一个大致穿越线路,包括线路关键点(TD_i)位置以及到达关键点的预期时间(T_i),关键点相连形成的折线即大致线路。

3) 轨迹生成。沿着大致线路前进时,根据周围动态交通情况必要时改变线路轨迹。

模糊逻辑应用模糊集合和模糊规则进行推理,表达定性知识经验,模拟人脑方式,实行模糊综合判断,推理解决常规方法难于对付的规则型模糊信息问题^[9]。由于以上特点,模糊逻辑已广泛应用于交通系统并取得良好效果^[10],这里采用模糊逻辑作为主要建模方法。

2.2 模型框架(Model framework)

自行车线路规划模型框架如图1所示,包括3个子模型:感知、线路制定和轨迹生成。其中感知和线路制定模型都应用模糊逻辑,而轨迹生成模型将应用势能场方法进行建模^[11~14]。

线路规划模型的主要流程如下: 1) 当骑车者 α 到达交叉口 Ω 时,感知模型获得基础信息,如交叉口其他交通个体 j 的位置和速度等,并进行冲突个体判

断和冲突个体危险程度估计。2) 上述信息将输入备选线路生成模型,生成多个备选线路,并进行模糊评价,得出最终大致线路 P_0 : 一个从骑车者当前位置到 D_f ,由一系列关键点(TD_i)形成的折线。3) P_0 输入到目的地吸引模块,与冲突车影响力模块结果共同生成自行车轨迹。4) 轨迹生成模型的输出将更新交叉口动态交通信息,从而形成骑车者动态线路规划。

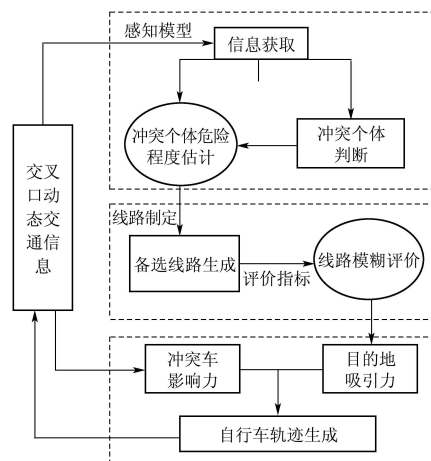


图1 线路规划模型框架

Fig. 1 Path planning behavioral model framework

3 自行车线路规划模型(Cyclist's path planning model)

3.1 感知模型(Perception model)

感知模型的功能类似于人的感知系统:检测周围的动态信息,选择相关信息并应用模糊逻辑判断物体的大小、速度和危险程度。

1) 冲突个体危险程度估计。

该模块应用模糊逻辑对每个移动个体进行危险程度估计。将模型的输入、输出变量,如速度、物体大小、可能冲突个体的危险程度以及大致线路制定模型里面的变量(直达性、舒适度、效率)用“高,中,低”或“大,中,小”或“很大,大,中,小,很小”等模糊语言进行描述。各模糊变量的隶属度见图2。本质上模糊规则是定义的二元模糊关系,模型中冲突物体大小和危险程度估计模糊规则如表1,2所示。

表1 冲突物体大小判断模糊规则

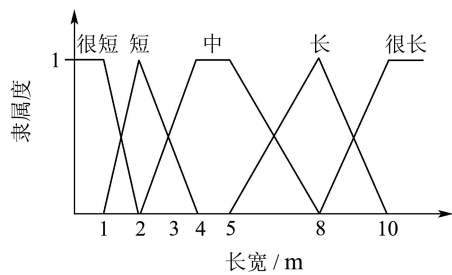
Table 1 Object size fuzzy rules

宽度	长度				
	很短	短	中等	长	很长
很短	很小	小	中等	中等	大
短	小	中等	中等	大	大
中等	中等	中等	中等	大	很大
长	中等	中等	大	很大	很大

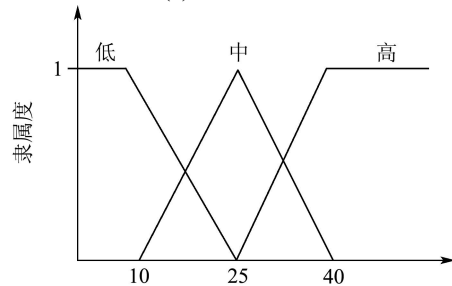
表2 冲突个体危险程度估计模糊规则

Table 2 Hazard level estimation rules

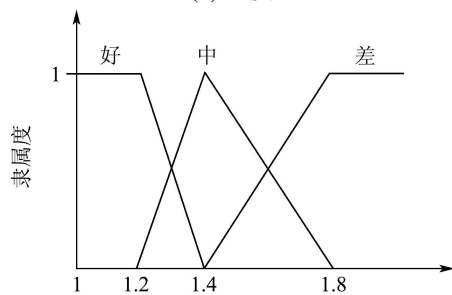
大小	速度		
	低	中等	高
很小	低	低	高
小	低	低	高
中等	低	中	高
大	低	中	高
很大	中	高	高



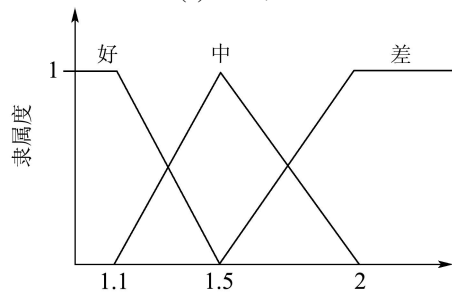
(a) 长度/宽度



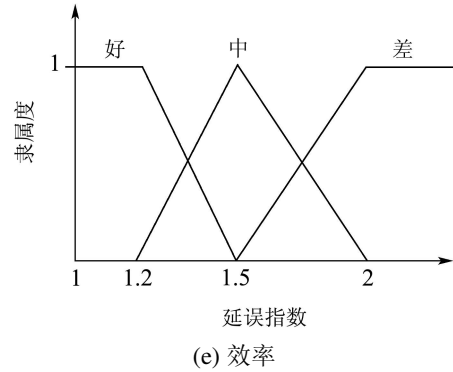
(b) 速度



(c) 直达性



(d) 舒适度



(e) 效率

图2 各模糊变量的隶属度((a)~(e))

Fig. 2 Membership functions of the fuzzified variables

((a)~(e))

2) 冲突个体判断.

当判断可能的冲突个体时, 骑车者 α 认为交叉口内的移动个体(包括自己)都将保持原有速度前进, 如果在某个时间(t_β)交通个体 β 与 α 的最小距离小于安全间距 L_s , 那么认为 β 为可能冲突车辆, 将其列入可能冲突车辆列表 C_j , 而预期冲突时间 ToC_j 即为 t_β . 判断公式为

$$i = \begin{cases} 1, & \min E(\|B(\vec{x}_\alpha(\tau)) - B(\vec{x}_\beta(\tau))\|) \leq L_s, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $i = 1$ 表示交通个体 β 与自行车 α 可能发生冲突. τ 为时间; $B(\vec{x}_\alpha(\tau))$ 为交通个体 α 位于 $\vec{x}_\alpha(\tau)$ 时的边界; $E(\|B(\vec{x}_\alpha(\tau)) - B(\vec{x}_\beta(\tau))\|)$ 为 β 和 α 预期间距. 安全间距 L_s 将会随 β 的危险程度高低而取不同值, 根据2.1节问卷调查结果, 危险程度高的安全间距取3 m, 危险程度中和低的安全间距分别取2 m和1 m.

感知模型的输出包括最终目的地 D_f , 可能冲突车辆列表 C_j :

$$C_j = \{(\beta_j, \vec{x}_{\beta_j}(ToC_j), ToC_j)\}. \quad (2)$$

其中: β_j 为冲突个体, $\vec{x}_{\beta_j}(ToC_j)$ 为冲突位置, ToC_j 为冲突时间.

3.2 线路制定模型(Path planning model)

由感知模型输出的 D_f 和 C_j , 线路制定模型首先根据机器人线路规划里的最近原则^[15], 对每个可能冲突个体 β_j 的可能冲突区域外临近两端各产生一个备选关键点(TD 与 TD'). 然后将对各备选关键点形成的线路进行多目标模糊评价. 根据调查问卷分析结果, 骑车者线路比选的模糊评价指标为: {直达性; 舒适度; 效率}; 模糊评价结果为: {好; 中; 差}分别表示骑车者对备选线路的评价是满意、可接受还是不接受. 各模糊指标定义如下:

1) 直达性.

采用线路的绕行指数 D 来表征线路的直达性:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{m+1} l_i}{L_{OD_f}}. \quad (3)$$

其中: l_i 为关键点 TD_{i-1} 到 TD_i 的直线距离(TD_0 为骑车者起点, TD_{m+1} 为 D_f); m 为线路关键点个数; L_{OD_f} 为起点 $\vec{x}(t_0)$ 到终点 D_f 的直线距离.

2) 舒适度.

采用自行车 α 的绝对加速度 A 来表征线路的舒适度:

$$A = \|\vec{a}_\alpha(t)\|. \quad (4)$$

其中 $\vec{a}_\alpha(t)$ 为 t 时自行车 α 的加速度矢量.

3) 效率.

采用延误指数 D_y 来表征线路的效率:

$$D_y = \frac{T_f - t_O}{L_{OD_f}/v^0}. \quad (5)$$

其中: T_f 为到达 D_f 的预期时间; t_O 为 α 最初到达 Ω 的时间; v^0 为自行车穿越交叉口理想平均速率.

各模糊评价指标的隶属度函数见图2, 线路模糊评价规则见表3.

表3 线路模糊评价规则

Table 3 Fuzzy rules for path evaluation

规则	输入			输出
	直达性	舒适度	效率	
1	好	好	好	好
2	好	好	中	好
3	好	中	中	好
4	中	好	好	中
5	好	中	好	好
6	中	中	好	中
7	中	中	中	中
8	中	好	中	中
9	差	-	-	差
10	-	差	-	差
11	-	-	差	差

注1 “-”代表所有情况“好/中/差”.

3.3 轨迹生成模型(Trajectory generation model)

轨迹生成模型获得自行车 α 较为精细的运动轨迹, 为有序对集 $\{(\vec{x}_\alpha(t), t)\}$, $t \in [t_O, t_f]$, $\vec{x}_\alpha(t) \in \Omega$, 时间间隔为 α 感知时间间隔 Δt . 轨迹生成模型是由心理学家列文提出的“场”的概念发展而来. 在“场”理论模型中, 行为改变的动力表示为

$$\vec{F}_\alpha(\vec{x}, t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} + \xi = \frac{d^2\vec{x}(t)}{dt^2} + \xi. \quad (6)$$

其中: $\frac{d\vec{v}(t)}{dt}$ 为个体行为(速度) $\vec{v}(t)$ 的改变率; $\vec{v}(t)$ 为轨迹 $\vec{x}$ 在 t 时刻的导数; ξ 为表现个体行为差异的随机干扰项; $\vec{F}_\alpha(\vec{x}, t)$ 为驱动 α 的行为(速度) $\vec{v}$ 产生系统性变化的“场”力, 由 α 的目的地产生吸引力 $\vec{f}_\alpha^0$ 以及冲突个体 β 产生的影响力组成:

$$\vec{F}_\alpha(\vec{x}, t) = \vec{f}_\alpha^0 + \sum_{\beta} \vec{f}_{\alpha\beta}, \quad (7)$$

$$\vec{f}_\alpha^0(t) = \gamma_\alpha(\vec{v}_\alpha^0(t) - \vec{v}_\alpha(t)), \quad (8)$$

$$\vec{f}_{\alpha\beta} = f_{\alpha\beta} \cdot \vec{e}_{\alpha\beta} = (M_\beta R b^{-2}) \cdot \vec{e}_{\alpha\beta}, \quad (9)$$

$$\vec{e}_{\alpha\beta} = \frac{\vec{x}_\beta(t) - \vec{x}_\alpha(t)}{\|\vec{x}_\beta(t) - \vec{x}_\alpha(t)\|}, \quad (10)$$

$$b = \frac{\|\vec{x}_\beta(t) - \vec{x}_\alpha(t)\| + \|\vec{x}_\beta(t + \Delta t) - \vec{x}_\alpha(t)\|}{\sqrt{4R^2 + (\Delta t \times v_\beta)^2}}. \quad (11)$$

其中: $\vec{v}_\alpha^0(t)$, $\vec{v}_\alpha(t)$ 分别为 α 的理想和当前速度; γ_α 为 α 动机参数; $\vec{e}_{\alpha\beta}$ 为 β 指向 α 的方向; M_β 为冲突车辆 β 的类型参数; R 为待估计的基本影响参数; $b > 0$ 为影响距离; $\vec{x}_\beta(t)$, $\vec{x}_\alpha(t)$ 分别为 β 和 α 在 t 时间的位置; Δt 为 α 感知时间间隔, 通常为0.5 s; v_β 为 β 的速率.

则 α 的加速度 $\vec{a}_\alpha(t)$ 为 $\vec{F}_\alpha(\vec{x}, t)$ 的期望值, 即

$$\vec{a}_\alpha(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = E(\vec{F}_\alpha(\vec{x}, t)). \quad (12)$$

轨迹生成模型的输出为 α 的轨迹, 利用运动动力学由 $\vec{x}_\alpha(t)$, $\vec{v}_\alpha(t)$ 和 $\vec{a}_\alpha(t)$ 可计算获得.

4 模型参数校验与仿真验证(Model calibration & simulation validation)

4.1 实地数据采集(Field data collection)

为了校验参数和验证模型, 于2007年在北京对骑车进行了问卷调查, 回收有效调查问卷1016份(男: 602, 女: 404). 并在北京典型的无信号机非交叉口上空架设摄像机(图3). 利用专门开发的视频采集系统VSpeed^[16]进行视频数据析取, 获得的车辆位置数据误差不超过 ± 0.2 m, 时间误差不超过0.04 s. 共获取225个机非冲突案例, 120例用于模型参数校验, 105例用于模型仿真的验证.



图3 视频数据采集交叉口

Fig. 3 Field data collection sites

4.2 参数校验和仿真结果分析(Model calibration & simulation results analysis)

模型待估参数包括轨迹生成模型中的冲突个体的类型参数 M_β 以及基本影响参数 R , 参数校验结果见表4. 从模型校验结果, 可看出 M_β 的估计值和各类型的车辆大小比例有关: 如行人的面积($M_{VS} = 0.5$)差不多是自行车占地面积的一半($M_S = 1$). 这似乎与我们日常的直觉观念, 认为大的物体比小的物体有更大的影响力不谋而合.

表4 模型参数校验结果(R, M_β)
Table 4 Model calibration results of R & M_β

模型参数	很大	大型	中等	小	很小	障碍
	R	M_{VL}	M_L	M_M	M_S	M_{VS}
估计值	1	-	8	4	1	0.5

注2 “-” 由于缺乏样本无法估计.

在仿真验证中, 根据冲突个体 β 的类型和个数将105个冲突实例分为五大类情形进行比较分析: 自行车-机动车(BC): 冲突车辆为机动车; 自行车-自行车(BB): 冲突车辆为自行车; 自行车-行人(BP): 冲突车辆为行人; 自行车-障碍物(BO): 绕行障碍物或停止的车辆; 和复杂情形(COM): 同时可能冲突的车辆不止一个且类型不同.

图4为一个冲突实例的自行车模型仿真结果和实际轨迹比较. 采用均方误差RMSE作为模型误差评价的指标. 对自行车轨迹和速度两个主要模型数据进行计算, 如表5所示, 可看出该模型在机非无信号交叉口的自行车(线路规划)轨迹生成方面效果良好. 感知时间间隔 Δt 取0.4 s, ΔV_x 和 ΔV_y 分别为 x 轴和 y 轴方向的速度偏差, ΔX 和 ΔY 分别为 x 轴和 y 轴方向轨迹偏差.

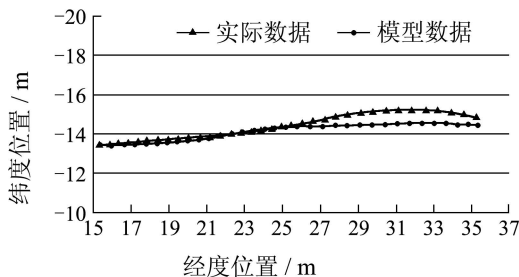


图4 模型仿真与实际自行车轨迹对比(m)

Fig. 4 Comparisons on motion track of bicycle(m)

表5 不同冲突情形的速度和轨迹均方误差RMSE
Table 5 Speed & trajectory RMSE errors for various conflict situations

冲突类型		BC	BB	BP	BO	COM	总体
速度误差/(m·s ⁻¹)	X轴	0.68	0.12	0.13	0.22	0.63	0.59
	Y轴	0.50	0.18	0.45	0.67	1.51	0.77
轨迹误差/m	X轴	0.50	0.17	0.15	0.26	0.43	0.54
	Y轴	0.42	0.26	0.17	0.25	0.43	0.55

5 结论(Conclusions)

本文提出一种基于模糊逻辑的机非无信号交叉口自行车线路规划模型, 并用实际数据进行模型参数校验和仿真实验, 结果令人满意. 该模型可作为微观混交交通流计算机仿真模型(如FLOWSIM^[17])的自行车线路规划行为模型基础; 对机非无信号交叉口的安全评估和改善也有帮助. 另一方面, 随着个人机动车辆(PMV)的出现和发展, 如丰田的i-swing系列^[18]概念车, PMV与自行车无论在个体大小、速度、转弯特性和行驶线路上都非常相似, 该模型可为这类新型机动车的智能线路规划和冲突避让功能开发提供启示. 未来工作集中于模型进一步改善和应用.

参考文献(References):

[1] HOSSAIN M. *Modelling of traffic operations in urban networks in developing countries*[D]. UK: University of Southampton, 1996.
[2] FORESTER J. *Bicycle Transportation*[M]. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1983: 330 – 334.
[3] SMITH D. Safety and locational criteria for bicycle facilities[R] // *Report FHWA-RD-75-112*. FHWA, U.S.: Department of Transportation, 1976.
[4] OPIELA K, KHASNABIS S, DATTA T. Determination of the characteristics of bicycle traffic at urban intersections[J]. *Transportation Research Record*, 1980, 743: 30 – 37.
[5] TAYLOR D, MAHMASSANI H. Bicyclist and motorist Gap acceptance behavior in mixed traffic[C] // *Presented at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board and publication in Transportation Research Record by Transportation Research Board of the National Academies*, 1998.
[6] PEIN W. Bicyclist performance on a multiuse trail[J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1578: 127 – 131.
[7] LING H, WU J. A study on cyclist behavior at signalized intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(4): 293 – 299.
[8] 魏丽英, 吕凯. 信号交叉口处自行车交通流的跟驰行为[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(1): 53 – 56.
(WEI Liying, LV Kai. Bicycle following behavior at signalized intersection [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(1): 53 – 56.)
[9] YEN J, LANGARI R. *Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1999.

- [10] 梁新荣, 刘智勇, 毛宗源. 高速公路非线性反馈模糊逻辑匝道控制器[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 99 – 102.
(LIANG Xinrong, LIU Zhiyong, MAO Zongyuan. Nonlinear feedback ramp controller in freeway based on fuzzy logic[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 99 – 102.)
- [11] LEWIN K. *Field Theory in Social Science*[M]. New York: Harper & Row, 1951.
- [12] HELBING D, MOLNÁR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282 – 4286.
- [13] HELBING D, KELTSCH J, MOLNÁR P. Modelling the evolution of human trail systems[J]. *Nature*, 1997, 388: 47 – 50.
- [14] MORA M C, PIZA R, TORNERO J. Multirate obstacle tracking and path planning for intelligent vehicles[C] // *proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Turkey: IEEE Inc., 2007: 172 – 177.
- [15] MINGUEZ J, MONTANO L. Nearness diagram navigation (ND): Collision avoidance in troublesome scenarios[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(1): 45 – 59.
- [16] BAI H, WU J. A flexible camera calibration for freeway scenes[C] // *1st International Conference on Natural Computation (ICNC 2005) & the 2nd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2005)*. Changsha, China: [s.n.], 2005: 27 – 29.
- [17] DU Y M, WU J P, MCDONALD M. The validation of a microscopic simulation model in Urban network of Beijing[C] // *IEEE Intelligent Transportation System Conference*. Toronto, Canada: [s.n.], 2006.
- [18] DALEY M. Extractions involving personal mobility vehicles[J]. *Fire Engineering*, 2006, 159(11): 85 – 92.

作者简介:

黄玲 (1979—), 女, 博士, 讲师, 目前研究方向为微观交通流仿真、智能交通、交通行为分析等, E-mail: hling@scut.edu.cn;

徐建闽 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能交通系统、智能交通控制理论与应用等, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn.