

行人交通流自由速度模型研究

龚晓岚, 魏中华

(北京工业大学 北京市交通工程重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了估计行人交通流的自由速度及其分布, 在分析行人步行速度受约束概率的基础上, 基于改进的 Kaplan-Meier 估计方法, 对行人的自由速度估计方法进行了分析, 用大量的实测数据建立了不同步行设施上行人的自由速度分布模型, 经检验行人的自由速度符合正态分布。这为相应的步行交通设施的设计和行人交通仿真提供了良好的数据支持。

关键词: 行人安全; 行人速度; 估计; 分布模型

中图分类号: U 491

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2009)04-0493-05

行人的自由速度或期望速度是指在不受其周围其他人及障碍物的影响时行人的步行速度。这个值受到行人自身性质、步行设施及各种外部条件的影响。

自由速度及其分布无论是对机动车交通还是行人交通, 它都是宏观和微观模型中的一个关键参数, 也是交通仿真软件中的一个重要的输入数据。国内外的研究者提出了机动车流自由速度的获取和分析方法, 如在低流量时进行数据实测, 然后对实测数据进行 K-V 回归^[1]。无论机动车交通还是行人交通都只有在非高峰时段才会出现低流量的情况。而这种情况下, 由于交通参与者的时间压力偏低, 其表现出的速度也会与高峰期有较大的差别。为了解决这一问题, Hoogendoorn^[2]提出了一种基于改进后的非参数 Kaplan-Meier 估计方法来对车辆的自由速度及其分布进行分析, 取得了较好的成果。

由于行人交通与机动车交通在很多方面有着明显的区别, 所以 Hoogendoorn 提出的方法并不能完全适用于行人自由速度的分析, 特别是双向和交叉行人交通流情况下。本文在 Hoogendoorn 研究的基础上, 对行人运动时的相对位置关系做了进一步的研究, 提出了一种新的行人自由速度分析方法。

1 数据采集

考虑到在不同的步行交通设施条件下行人的行为特征是不同的, 本文在选取调查地点时着重选择了一些有代表性的步行设施。本文分别观测了室内和室外两种环境中, 行人在不同步行设施条件下的通行情况。观测地点分别为室内通道和室外人行步道。

通过实地拍摄, 应用何民^[3]开发的基于视频的交通流数据采集软件 Track 对拍摄的视频进行分析处理。Track 通过坐标变换把投影坐标和物理坐标建立联系, 在 Track 软件平台上通过鼠标点击行人的特征点进行视频录像数据采集, 同时测量行人在不同时刻的位置、速度以及运动轨迹, 在 70 m×70 m 视场中, 其测量精度相对误差低于 0.4%^[4]。

通过对拍摄视频的处理, 可以得到如表 1 所示的数据。

表 1 行人步行速度实测数据

Table 1 Pedestrian speed

行人 ID	帧数	视点坐标		实际坐标		即时速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
		x	y	X	Y	
3	148	64	50	4.381	9.350	1.27
3	150	68	60	4.428	7.987	1.32
3	152	72	80	4.474	6.641	1.38
3	154	76	90	4.519	5.309	1.35

2 改进后的 Kaplan-Meier 自由速度估计方法

目前,很少有研究专门针对行人的自由速度及其分布进行估计.已有的资料中,许多研究对机动车流的自由速度进行了研究,提出了一些有代表性的方法,因此本文借鉴对机动车自由速度模型的研究方法.国内的机动车自由速度模型研究方法通常是在低流量时对车辆的速度进行实测,然后对实测样本进行统计.但是在低密度交通流一般出现在非高峰时段,由于高峰时段和离峰时段驾驶员的时间压力不同,其表现出来的驾驶行为也不一样,因而对速度的期望有也有所不同.对于行人交通,也存在相同的情况.因而,用这种方法会导致对期望速度的估计偏低.

针对这种不足,Hoogendoorn 提出了一种基于改进后的非参数 Kaplan-Meier 方法^[5].它是基于对车辆的车头时距的分析来判断车辆速度受约束的概率 θ ,用 θ 和车辆的速度 v 来确定改进后的 Kaplan-Meier 生存函数 S

$$S_{\infty}(v^0) = \prod_{j=1}^{m(v^0)} \left(\frac{n-j-1}{n-j-\theta_j} \right) \quad (1)$$

式中, v^0 为车辆的自由速度; $m(v^0)$ 为观测样本 v_j ($v_j \leq v^0$) 的个数; n 为观测样本的总量; θ_j 为观测对象 j 受约束的概率.

非参数方法对总体分布所加的条件较少,具有较广泛的适用性和较好的稳健性.改进后的非参数 Kaplan-Meier 方法克服了人为确定的阈值来严格地区分观测速度是否受约束这一不足.在新的方法中利用 θ_j 根据车头时距描述车辆速度受约束的概率,通过实验验证了该方法可以提供自由速度的一致无偏估计^[6].然而必须注意到的是,行人与机动车相比,行人的运动有更大的自由度.在行进中,行人不仅仅会受到其前面行人的影响,还会受到其侧面行人的影响,从而使行人的速度受到约束.因此,在确定行人的受约束概率时需要考虑行人周围各个方向的影响因素.

3 行人受约束概率分析

用改进后的 Kaplan-Meier 方法估计交通参与者的自由速度,首先要求出观测对象的 θ_j .在机动车交通中,由于受车道的约束,车辆只受到同一车道上前方车辆的影响.而行人行进时的自由度要远大于机动车,因为对行人速度产生影响的不仅仅是其前方的行人,还包括其周围有可能在行走过程中发生冲突的其他行人^[7].

如图 1 所示,在某观测区域内,行人 p 的周围有行人 $q_1 \sim q_4$,用箭头表示每个行人的速度大小和前进的方向.通常,行人只对受其前方较近距离范围内的行人影响,所以在该观测区域内,只考虑行人 q_2 和 q_3 对 p 的影响.假设行人 p 、 q_2 、 q_3 都保持当前的速度大小和运动方向不变,则 p 与 q_2 及 p 与 q_3 的相对距离随时间的变化关系如图 2 所示.

用模糊函数 θ^D 表示,当 p 与 q 的相对距离为 d 时,行人 p 的速度受约束的大小.当隶属度 $\theta^D = 1$

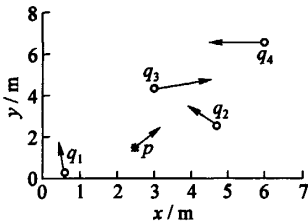


图1 行人 p 在观测区的位置
Fig.1 Conflict area of pedestrian p

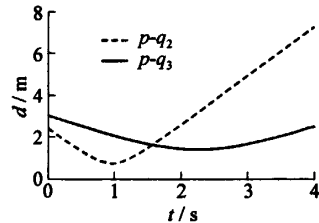


图2 行人 p 与 q_2 、 q_3 的相对距离变化规律
Fig.2 Distance between pedestrian p and pedestrian q_2 and q_3

时,表示行人 p 完全受约束,而当 $\theta^D = 0$ 时,表示行人自由运动.

行人行走时所需要的横向宽度由行人肩宽和心理空间量组成,在研究中取 $60 \sim 80 \text{ cm}^{[8]}$,当行人的间距小于等于 0.65 m 时,行人的速度完全受到约束;以往的实验表明,当行人的纵向距离在 $2 \sim 2.5 \text{ m}$ 时,行人速度的实测数据的差异非常小^[9-10],因此当行人的间距超过 2.2 m 时,行人的速度完全不受约束.隶属度函数如图3所示.行人 p 因 q_i 的影响而受到的约束大小随时间的变化情况可表示为

$$\theta_{p,q_i} = \theta^D(d_{p,q_i}) \quad (2)$$

则在此观测区内,行人 p 因 q_2 和 q_3 而受到的约束如图4所示. q_2 对行人 p 的影响随着他们相对距离的缩小而逐渐增大,反之亦然.而过了约 2 s 以后, q_2 对 p 的影响下降到0.当有多个行人对 p 构成影响时,取各影响值中的最大值表示行人 p 受到的约束,即

$$\theta_p = \max_{q_i}(\theta_{p,q_i}) \quad (3)$$

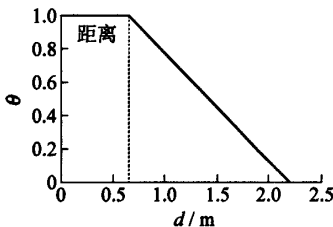


图3 相对距离隶属度函数
Fig.3 Membership function of relative distance

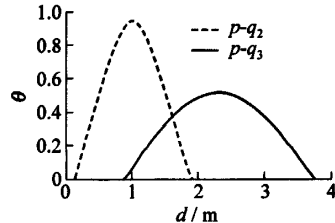


图4 行人 p 因 q_2 和 q_3 而受到的约束
Fig.4 Membership degree of pedestrian p being constrained by pedestrian q_2 and q_3

如在时间为 1.3 s 时, $\theta_{p,q_2} = 0.8$, $\theta_{p,q_3} = 0.21$,则行人 p 受到的约束为 0.8 .

4 不同观测场所行人的自由速度估计

对象 p 对其周围行人 q_i 间的相对距离,由式(2)和式(3)计算得到 p 所受到的速度约束

$$d_{p,q_i} = \sqrt{(X_p - X_{q_i})^2 + (Y_p - Y_{q_i})^2} \quad (4)$$

行人自由速度的生存函数 S_p 为

$$S_{p_{\infty}}(v_p^0) = \prod_{j=1}^{m(v_p^0)} \left(\frac{n-j-1}{n-j-\theta_{p_j}} \right) \quad (5)$$

式中, v_p^0 为行人的自由速度; θ_{p_j} 为行人 j 所受约束的概率;其余符号意义与前述相同.

应用改进后的 Kaplan-Meier 估计方法对室内通道和室外人行步道的实测数据进行了分析,结果如图5所示.其中 $f(v)$ 表示实测数据的分布曲线, $f_{\text{KM}}(v)$ 表示用改进后的 Kaplan-Meier 估计方法分析得到的分布曲线.不同观测地点的速度分析结果如表2所示.

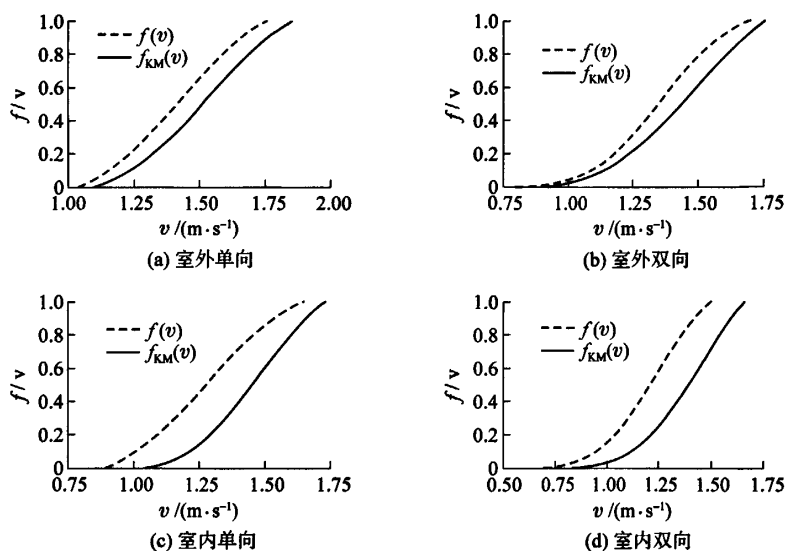


图 5 行人速度的估计结果

Fig. 5 Estimation Results of pedestrian speed

表 2 不同场所下行人速度的分析结果

Table 2 Estimation Result for different places

m/s

观测对象	实测数据			改进后的结果		
	均值	中值	标准差	均值	中值	标准差
室外单向	1.43	1.37	0.28	1.53	1.52	0.27
室外双向	1.36	1.35	0.21	1.49	1.50	0.28
室内单向	1.28	1.25	0.27	1.48	1.47	0.22
室内双向	1.24	1.20	0.22	1.46	1.45	0.25

如图 5 显示,由改进后的 Kaplan-Meier 方法分析得到的自由速度要高于直接由实测数据分析的结果,各种设施下行人的自由速度都较其他文献中的行人速度要高。这是因为原来的研究中直接以观测到的速度来进行分析^[11]。

进一步用 SPSS 对行人的自由速度做 P-P 概率图。P-P 概率图是用来检验变量分布的一种图形。它是变量分布累积比与某一分布累积生成的图形。如果已知数据符合正态分布,则其正态分布 P-P 图中的各点应近似成一条直线(对角线)^[12]。如图 6,为 Kaplan-Meier 估计方法分析得到的室外单向行人交通流速度的 P-P 图,说明室外单向行人交通流的自由速度满足正态分布。同理,可以得到其他几种情况的 P-P 图,说明不同情况下的行人交通流的自由速度满足正态分布。

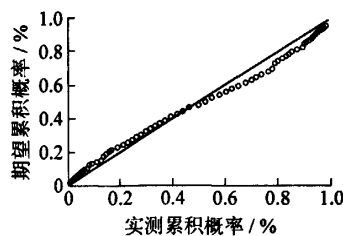


图 6 室外单向行人自由速度的 P-P 图

Fig. 6 P-P plot of free speed of one-direction inside

5 结束语

本文在改进后的 Kaplan-Meier 估计方法对机动车交通自由速度分析的基础上,利用行人在行进过程中相对距离的隶属度函数来描述行人受约束的概率,进而对大量的实测数据进行分析,得到了行人自由速

度的分布,该分布满足正态分布.由改进后的 Kaplan-Meier 估计方法得到的行人的自由速度较以往的观测统计值要高,是因为本文充分考虑到行人在行进中受到的约束,并且速度越高的行人其受到约束的可能性就越大.

参考文献:

- [1] 白旭,曾胜男,杜豫川,等.城市快速路自由流车速研究[J].交通与运输,2006,12:28-31.
BAI Xu, ZENG Sheng-nan, DU Yu-chuan, et al. The research of urban expressway free-flow velocity[J]. Traffic and Transportation, 2006, 12: 28-31. (in Chinese)
- [2] HOOGENDOORN S P. Unified approach to estimating free speed distributions[J]. Transportation Research Part B, 2005, 39: 709-727.
- [3] 何民.混合交通流微观仿真关键技术研究[D].北京:北京工业大学建筑工程学院,2003.
HE Min. Study on key issues of mixed traffic flow micro simulation[D]. Beijing: The college of architecture and civil engineering, Beijing University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [4] 孙智勇,葛书芳,荣建,等.行人交通数据采集方法研究[J].北京工业大学学报,2006,32(6):530-533.
SUN Zhi-yong, GE Shu-fang, RONG Jian, et al. Study on pedestrian traffic data collection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(6): 530-533. (in Chinese)
- [5] 范金城,梅长林.数据分析[M].北京:科学出版社,2002:45-72.
- [6] DAAMEN W, HOOGENDOORN S P. Free speed distribution- based on empirical data in different traffic conditions[C]// Pedestrian and evacuation dynamics 2005. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 13-26.
- [7] GARDER P E. The impact of speed and other variables on pedestrian safety in maine[J]. Accident Analysis and Prevention, 2004, 36: 533-542.
- [8] 史建港.大型活动行人交通特性研究[D].北京:北京工业大学建筑工程学院,2007.
SHI Jian-gang. Research on pedestrian traffic characteristics in special events[D]. Beijing: The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] DAAMEN W. Modeling passenger flows in public transport facilities[D]. Delft: Delft University of Technology, Department Transport & Planning, 2004.
- [10] DAAMEN W, HOOGENDOORN S P. Experimental research of pedestrian walking behavior[J]. Transportation Research Record, 2003, 28: 20-30.
- [11] TARAWNEH M S. Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors[J]. Journal of safety research, 2001, 32: 229-236.
- [12] 郝黎仁,樊元,郝哲欧,等.SPSS实用统计分析[M].北京:中国水利水电出版社,2003:206-216.

Research on Distribution Model of Pedestrian Traffic

GONG Xiao-lan, WEI Zhong-hua

(Beijing University of Technology Key Laboratory of Beijing Transportation Engineering, Beijing 100124, China)

Abstract: Probabilities of pedestrian being constrained is analyzed, and based on the improved Kaplan-Meier method, the method to estimate pedestrian free speed is described in this paper. An application on pedestrian data from large-scale investigation shows that pedestrian free speeds fit into normal distribution. The model could be applied in the operating speed design and traffic simulation.

Key words: pedestrian safety; pedestrian speed; estimation; distribution models

(责任编辑 张士瑛)