

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.014

使用驾驶人瞳孔直径的固定物冲突识别方法

李世武^{1,2}, 徐 艺¹, 王琳虹^{1,2}, 孙文财^{1,2}, 郭 栋³

(1.吉林大学 交通学院, 130022 长春; 2.吉林省道路交通重点实验室(吉林大学), 130022 长春;
3.山东理工大学 交通与车辆工程学院, 255000 山东 淄博)

摘 要: 以寻找可反映驾驶人心理负荷的交通冲突识别指标及基于该指标的交通冲突识别方法为目的,通过比较分析明确了冲突刺激与瞳孔直径的相关关系,针对原始 GSA(gravitational search algorithm)识别方法仅可搜索最优解的缺陷并面向交通冲突识别要求提出了基于瞳孔直径的 GSA-T 交通冲突快速识别方法. 撞固定物冲突验证结果显示 GSA-T 方法的对比次数和识别时间均比枚举方法少,证明 GSA-T 方法具有较低时间复杂度和空间复杂度的优势,可满足交通冲突识别和道路安全评价的要求.

关键词: 交通冲突技术; 识别方法; 驾驶人; 瞳孔直径; 撞固定物冲突

中图分类号: U491.265 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)03-0082-07

Construction conflict identification method using driver's pupil diameter

LI Shiwu^{1,2}, XU Yi¹, WANG Linhong^{1,2}, SUN Wencai^{1,2}, GUO Dong³

(1.Transportation School, Jilin University, 130022 Changchun, China; 2. Key Laboratory of Road Traffic in Jilin Province (Jilin University), 130022 Changchun, China; 3. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, 255000 Zibo, Shandong, China)

Abstract: To find traffic conflict identification indicator which can reflect driver's mental load and traffic conflict identification method based on the indicator, the correlation between the conflict stimuli and the pupil diameter is identified by comparative analysis, a pupil diameter based GSA-T fast traffic conflict identification method is proposed to remedy the defects of original GSA to meet the requests of traffic conflict identification. The result of construction conflict shows that the computation and the identification time of the GSA-T is shorter than the Enumeration method, thus the low time complexity and space complexity are testified. It is proved that GSA-T can meet the requests of traffic conflict identification and road safety evaluation, and can lay foundation for further study of relationship between traffic conflict severity and pupil diameter.

Keywords: traffic conflict technique; identification method; driver; pupil diameter; construction conflict

交通冲突技术是当前道路交通安全评价方法的主流^[1],许多专家学者对其进行了广泛关注和深入研究,并在常规交通冲突判别指标方面取得了丰硕的研究成果^[2-5].但是,多年前已被广泛认可的道路交通设计理论指出要以道路使用者的交通需求和生理-心理反应特征作为道路设计的理论基础^[6],而当前的道路交通安全评价技术特别是交通冲突技术并未从驾驶人心理角度对道路交通状况进行安全性评价,究其原因未找到反映驾驶人心理负荷的交

通冲突量化指标以及基于该指标的交通冲突辨识方法.外界刺激与瞳孔直径的关系研究为寻找可反映驾驶人心理负荷的交通冲突量化指标提供了新的方向:裴玉龙等^[7]研究了酒精刺激对驾驶人瞳孔直径的影响;Neumann D L 等^[8]研究了精神负荷对瞳孔直径变化的影响;Einhäuser W 等^[9]研究了知觉变化对瞳孔直径的影响并分析了引起瞳孔直径变化的生理因素;Stuart R Steinhauer 等^[10]从神经层面分析了任务难度对瞳孔直径的影响规律;Barry Winn 等^[11]研究了年龄、性别等因素对光照刺激下瞳孔直径变化的影响;Marco Pedrotti 等^[12]研究了声音等刺激因素造成的心理压力及其导致的瞳孔直径变化.

上述研究成果未面向交通冲突刺激对驾驶人瞳孔直径的影响进行研究,因此本文拟通过相关分析

收稿日期: 2014-10-10.
基金项目: 国家自然科学基金(51308251, 51308250, 51508315);
中国博士后基金特别资助(2014T70292);
吉林省科技发展计划(20130521004JH, 20140204021SF).
作者简介: 李世武(1971—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 王琳虹, wanghonglin0520@126.com.

明确以撞固定物冲突^[13-14]为代表的交通冲突刺激对驾驶人瞳孔直径的影响,在此基础上研究面向道路交通安全评价需求的交通冲突快速识别方法。

1 数据的采集与处理

1.1 试验数据采集

使用驾驶模拟器对机动车、道路环境和固定障

碍物进行撞固定物冲突的室内情景仿真。模拟试验车型为捷达轿车,路面类型为沥青路面,道路线形为直线,道路长度为 115 m,为便于试验环境的量化并排除碰撞角度等因素的影响,将固定障碍物设置为驾驶训练场内的高墙。设置直线加速距离为 100 m,制动位置到固定障碍物的距离为 15 m。试验场景示意图如图 1 所示。

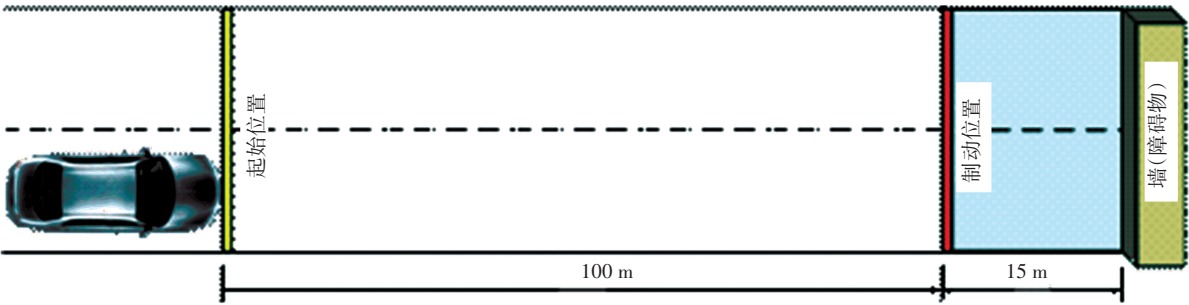


图 1 试验场景示意图

选择驾龄超过 20 a 的 6 位男性驾驶人作为试验对象,调节室内照度,首先要求驾驶人分别在 370 lx 和 490 lx 的平均照度下静止注视试验场景,然后要求驾驶人在 370 lx 和 490 lx 的平均照度下驾驶捷达轿车在 100 m 直线道路内从起始位置由静止分别加速到 20、30、40 km/h,越过制动位置后自由制动,重复试验 10 次。使用 Smart Eye Pro 5.7 眼动仪以 60 Hz 的采样频率采集驾驶人瞳孔直径数据,使用 TES-1339R 照度计及其电脑端软件同步记录驾驶人位置处的照度数据。按照照度将试验数据分为

370 lx 照度下的 L 组和 490 lx 照度下的 H 组,记 370 lx 照度下的静止注视、20 km/h、30 km/h、40 km/h 试验数据分别为 L0、L1、L2、L3,记 490 lx 照度下的试验数据分别为 H0、H1、H2、H3。

1.2 试验数据处理

首先剔除眨眼时的瞳孔直径数据。根据眼动仪提供的同步眨眼数据 blink,剔除 blink 不为 0 帧号 (framenumber) 所对应的瞳孔直径数据。未剔除眨眼噪声的瞳孔直径曲线如图 2 所示,眨眼噪声剔除后的瞳孔直径曲线如图 3 所示。

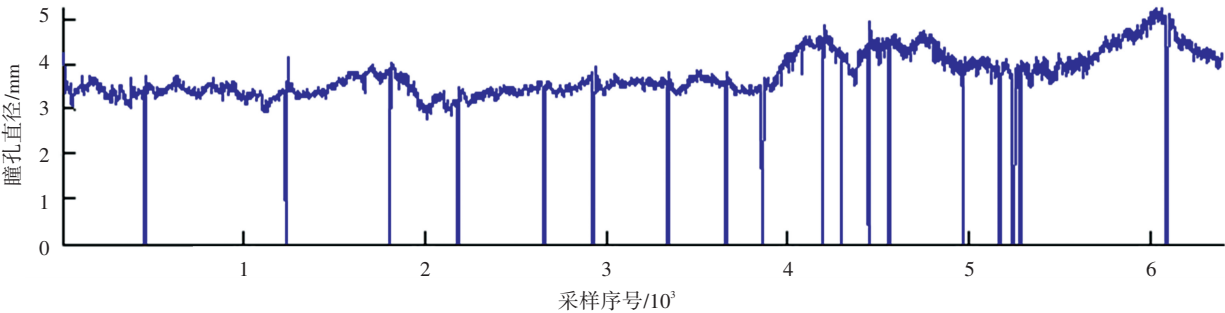


图 2 未剔除眨眼噪声的瞳孔直径曲线

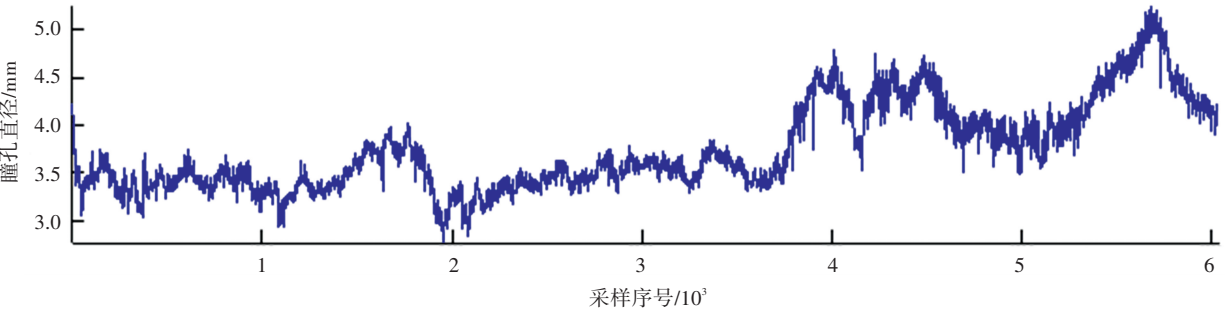


图 3 眨眼噪声剔除后的瞳孔直径曲线

为在后续研究中可更有效地分析瞳孔直径的变化特征,并降低交通冲突识别的计算成本,有必要对瞳孔直径数据进行基于离散小波变换的降噪处

理^[12]. 使用 Haar 小波基进行 5 级小波变换并重构后的部分瞳孔直径曲线如图 4 所示.

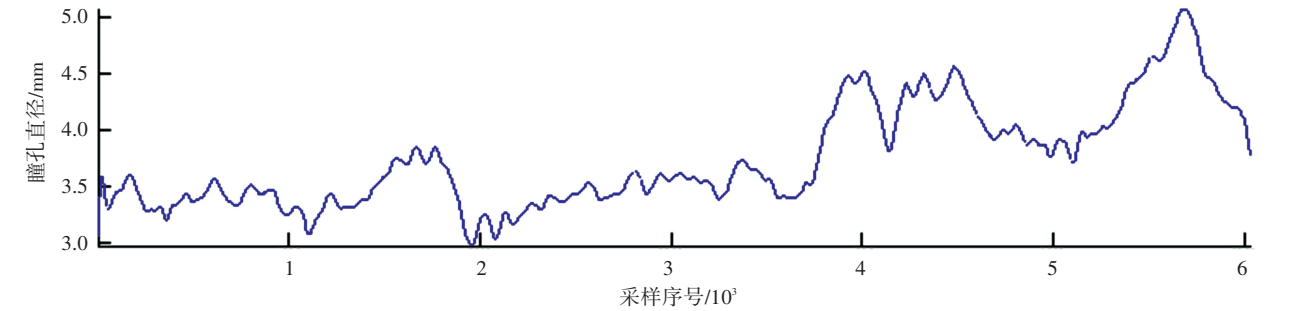


图 4 5 级小波 (Haar) 分解的瞳孔直径曲线

根据照度和冲突程度的不同,可将试验数据分为 L0、L1、L2、L3、H0、H1、H2、H3 共 8 组,每组试验包含 60 个样本数据,以每个样本的均值作为组内单元值求得的组内方差见表 1.

表 1 试验数据组内方差表

组别	平均瞳孔直径/mm	组内均方差/mm	样本波动幅度/%
L0	3.60	0.026	0.72
L1	3.77	0.031	0.82
L2	3.92	0.026	0.65
L3	3.96	0.025	0.63
H0	2.67	0.026	0.96
H1	3.06	0.030	0.99
H2	3.24	0.024	0.74
H3	3.32	0.027	0.82

由表 1 可见,每组中各样本均值相对每组样本总数的平均值,其波动幅度均未超过 1.00%,说明组内样本差异不大,驾驶人个体区别未显著影响试验数据的稳定性.

2 瞳孔直径与撞固定物冲突的相关性分析

2.1 瞳孔直径与照度的相关性分析

为确定照度对瞳孔直径的影响程度,需进行照度与瞳孔直径的相关性分析. 首先分析 L 组和 H 组

的平均照度与平均瞳孔直径的相关性.

设每组第 i 个样本的平均瞳孔直径值为 $\overline{D}_i$, 每组的第 i 个样本中第 j 个数据采集点对应的瞳孔直径为 d_j , 且 $j \leq n_j$, 每组的平均瞳孔直径 D 按下式计算,照度与瞳孔直径的均值见表 2.

$$\overline{D}_i = \frac{\sum_j d_j}{n_i}, D = \frac{\sum_i \overline{D}_i}{60}.$$

(1)

表 2 照度与瞳孔直径均值表

组别	平均照度/lx	平均瞳孔直径/mm
L0	371.85	3.60
L1	368.55	3.77
L2	368.66	3.92
L3	369.53	3.96
H0	497.1	2.67
H1	480.64	3.06
H2	487.55	3.24
H3	492.37	3.32

经计算,平均照度与平均瞳孔直径的相关系数为-0.89,属于高度负相关.

为明确照度波动对瞳孔直径的影响,需分析每组照度数据与对应瞳孔直径的相关性. 部分照度与对应瞳孔直径的曲线如图 5.

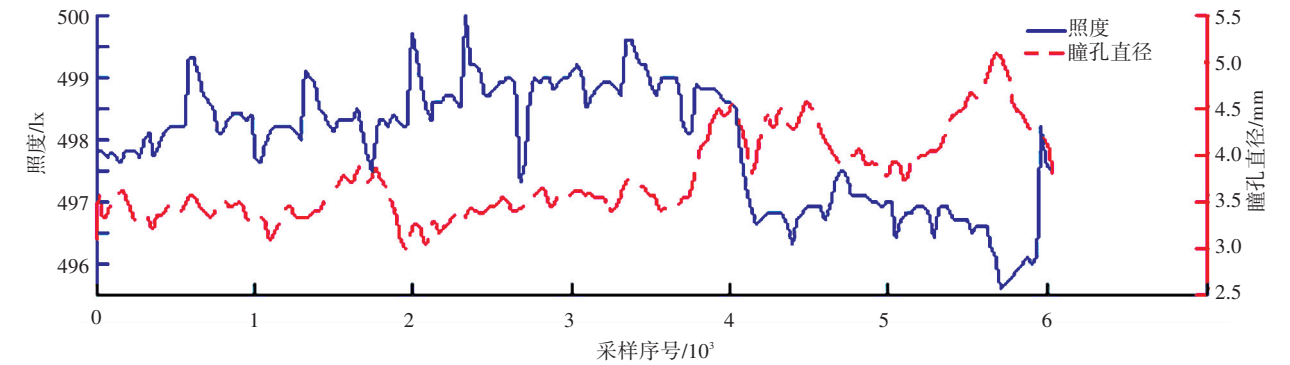


图 5 照度曲线与瞳孔直径曲线

经计算, L0、L1、L2、L3 各组照度与瞳孔直径的相关系数分别为-0.247、-0.033、-0.091、-0.188,最大照度差分别为 3.62、4.02、4.45、5.49 lx; H0、H1、H2、H3 各组照度与瞳孔直径的相关系数分别为-0.050、-0.067、-0.297、-0.075,最大照度差分别为 4.00、5.47、5.64、5.89 lx.

各组中照度与瞳孔直径的相关系数绝对值均未超过 0.30,属于微相关. 平均照度与平均瞳孔直径的相关性明显,而未取均值的照度与瞳孔直径仅为微相关.

2.2 瞳孔直径与交通冲突的相关性分析

设起始位置到制动位置时间内驾驶人接受的刺激为 0,制动位置后至车辆停止时间内冲突对驾驶人的刺激为 1,构造冲突刺激曲线,计算冲突刺激与瞳孔直径的相关系数. L1、L2、L3 各组冲突刺激与瞳孔直径相关系数分别为 0.64、0.64、0.77, H1、H2、H3 各组冲突刺激与瞳孔直径相关系数分别为 0.94、0.81、0.77.

由各组相关系数可见,相关系数均在 0.64 以上,属于显著相关范围,说明冲突刺激对驾驶人瞳孔直径产生了明显的影响,通过瞳孔直径识别交通冲突具有可行性.

3 基于瞳孔直径的交通冲突快速识别方法

3.1 GSA 原理与优势

万有引力搜索算法(GSA)^[15]假设搜索粒子在空间中具有一定质量且遵循万有引力定律和动力学定律,在引力作用下均朝质量较大粒子的方向移动. 空间中的粒子以引力的形式相互影响,使粒子群向最优解的区域展开搜索. 算法中,每个粒子包括 4 个特征:位置、惯性质量、主动引力质量和被动引力质量,粒子的位置即为问题的解.

设在一个 D 维搜索空间中包含 n 个粒子,定义粒子 i 的位置为

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^D), i = 1, 2, \dots, n.$$

式中 x_i^k 为粒子 i 在第 k 维的位置.

$$F_{ij}^k(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^k(t) - x_i^k(t)). \quad (2)$$

式中: $M_{pi}(t)$ 粒子的被动吸引质量; $M_{ai}(t)$ 为 j 粒子的主动吸引质量; ε 为较小的常量; $R_{ij}(t)$ 为 i 粒子与 j 粒子之间的欧氏距离; $G(t)$ 为 t 时刻的引力常数.

粒子 i 在时刻 t 受到的作用力 $F_i^k(t)$ 为其他粒子对其引力之和,即

$$F_i^k(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n r_j F_{ij}^k(t). \quad (3)$$

式中: r_j 为粒子 j 对粒子 i 引力的权重,取 $[0, 1]$ 的随机数; $F_{ij}^k(t)$ 为 k 维空间上粒子 j 对粒子 i 的引力.

粒子 i 在下一时刻的速度和位置的方程组为

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = r_i v_i^k(t) + a_i^k, \\ x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1). \end{cases} \quad (4)$$

t 时刻粒子 i 在 k 维空间上的加速度为

$$a_i^k(t) = \frac{F_i^k(t)}{M_{ii}(t)}. \quad (5)$$

式中 $M_{ii}(t)$ 为粒子 i 的惯性质量.

设引力质量与惯性质量相等,使用适应度函数表示粒子的质量. 引力质量与惯性质量按如下方程组更新为

$$\begin{cases} M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \\ m_i(t) = \frac{f_i(t) - w(t)}{b(t) - w(t)}, \\ M_i(t) = m_i(t) / \sum_{j=1}^n m_j(t). \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; $f_i(t)$ 为 t 时刻粒子 i 的适应度值;解决最大值问题时, $b(t)$ 和 $w(t)$ 按如下方程组定义为

$$\begin{cases} b(t) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, n\}} f_j(t), \\ w(t) = \min_{j \in \{1, 2, \dots, n\}} f_j(t). \end{cases} \quad (7)$$

GSA 算法中粒子位置的更新规则是将当前每一个粒子按照万有引力定律向最优解方向移动,避免了实际应用中因更新规则和移动规律选择不当导致的收敛速度和搜索精度的降低,且粒子受到的引力 $F_i^k(t)$ 由全局粒子的质量 $M_{aj}(t)$ 和位置 X_i 决定,可充分利用搜索空间全局解状态信息和适应度信息,提高搜索效果.

3.2 基于瞳孔直径的冲突快速识别方法

本文尝试使用 GSA 搜索瞳孔直径超过阈值的时刻,进而识别交通冲突. 本文拟在原始 GSA 搜索策略的基础上调整其迭代过程,提出一种可实现准确、快速识别交通冲突位置及数量的 GSA-T 方法. 该方法的具体识别步骤如下.

1) 数据初处理. 将含有交通冲突的瞳孔直径数据进行眨眼数据剔除和 5 级小波分解,生成待匹配瞳孔直径数据 P_0 , 计 L_0 为 P_0 中每个采样点的初始序号并将其作为采样点的位置标记.

2) GSA 初始条件设定. 设待匹配瞳孔直径数据为 P_r (r 为识别结果数量,初始值为 0), 识别出的交通冲突时段瞳孔直径第一采样点初始序号的集合为 I_r , 相应适应度值为 F_r , 设搜索粒子数量为 n , 迭代次数为 t (初始迭代次数为 $t = 1$), 粒子位置 $x(t)$ ($x(t) =$

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) 对应的瞳孔直径数据为 $d(t)$, 以粒子位置为第中位采样点且采样点个数为 L_m 的瞳孔直径数据为 P_{x_i} , 适应度值 $f(t) = d(t)$, GSA 终止条件为适应度值连续 $s_i (s_i \in N^*)$ 次相同, 交通冲突识别过程终止条件为适应度值小于已知冲突中最小的瞳孔直径峰值 $s_r (s_r \in R^+)$.

3) 适应度值计算. 更新粒子位置为 $x(t)$ (x_i 为 P_r 采样点初始序号范围内的随机数, $i = 1, 2, \dots, n$), 按照式(1)~(5)计算 M 、 α 及搜索粒子的速度和位置 (维数 $k = 1$), 按照式(6)更新 $G(t)$ 和 $b(t)$.

4) 过程迭代. (a) 若 $t - s_i \leq 0$, 则 $t = t + 1$, 运行步骤 4; (b) 若 $t - s_i > 0$, $b(t) - b(t - s_i) \neq 0$, 则 $t = t + 1$, 运行步骤 3; (c) 若 $t - s_i > 0$, $b(t) - b(t - s_i) = 0$ 且 $b(t) \geq s_r$, 将最优粒子位置赋值为 I_r , 相应适应度值 $b(t)$ 赋值为 F_r , $r = r + 1$, 去除 P_{r-1} 中初始序号为 $I_r - \frac{L_m}{2}$ 至 $I_r + \frac{L_m}{2}$ 的瞳孔直径数据以生成新的待匹配瞳孔直径数据 P_r , $t = 1$, 运行步骤 3; (d) 若 $t - s_i > 0$, $b(t) - b(t - s_i) = 0$ 且 $b(t) < s_r$, 停止迭代.

5) 结果输出. 输出瞳孔直径位置 I_r 和对应的适应度值 F_r , 方法流程如图 6.

本方法在每次瞳孔直径识别中均使用 GSA 搜索方式寻找瞳孔直径最大值及其对应位置, 从而减少了搜索次数; 此外, 本方法第 4 步(b)过程重新生成 P_r 的作用在搜索到目标数据段后剔除该段数据以生成新的待匹配数据并继续进行识别, 从而克服了 GSA 仅可搜索最优值的弊端, 在保证识别出所有交通冲突的前提下减少了运算量.

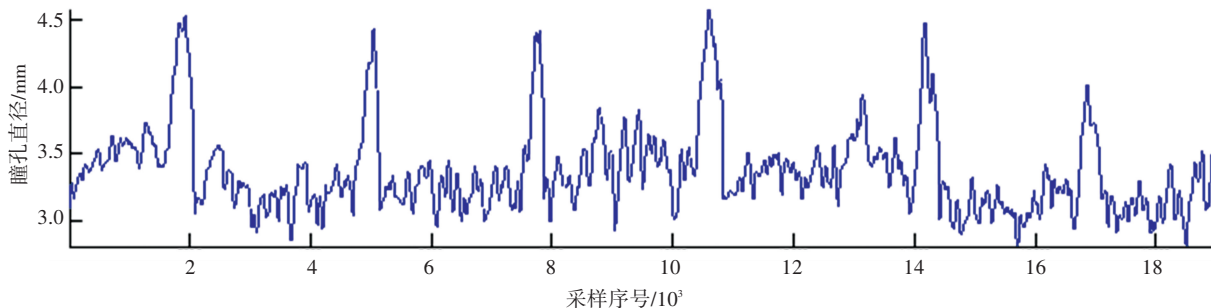


图 7 待匹配瞳孔直径曲线

2) GSA 初始条件设定. 设搜索粒子数量 $n = 20$, 初始迭代次数为 $t = 1$, $s_i = 50$, $s_r = 4$.

3) GSA 计算过程. 按照式(1)~(5)计算 M 、 α 及搜索粒子的速度和位置, 按照式(6)更新 $G(t)$ 和 $best(t)$.

4) 过程迭代. (a) 若 $t - 50 \leq 0$, 则 $t = t + 1$, 运行步骤 4; (b) 若 $t - 50 > 0$, $b(t) - b(t - s_i) \neq 0$, 则 $t =$

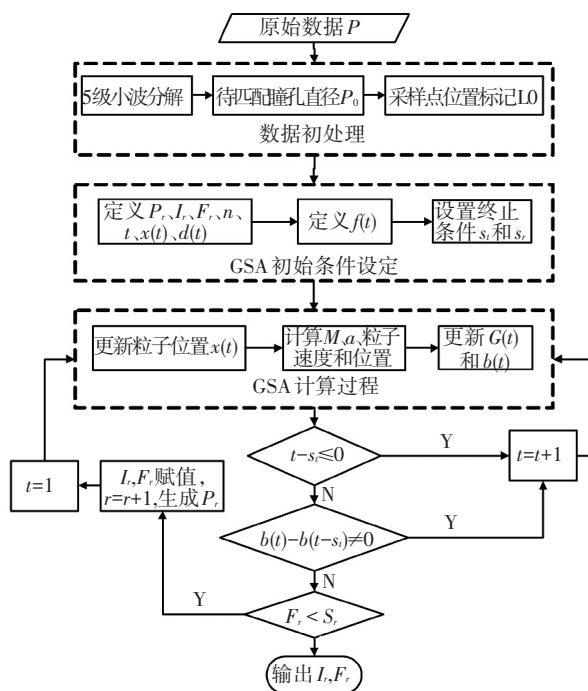


图 6 GSA-T 识别方法流程

4 识别方法验证与结果分析

4.1 识别方法验证

1) 数据初处理. 将 490 lx 照度下的 H1、H2、H3 组试验数据作为验证数据. 由于试验场景为直线路段, 所以每一车速的重复试验需单独进行, 因此将每一车速下多个重复试验数据合并于一组数据作为瞳孔直径识别的基础数据.

将含有撞固定物冲突的瞳孔直径数据进行眨眼数据剔除和 5 级小波分解, 生成 P_0 和 L_0 . 待匹配瞳孔直径曲线如图 7.

$t + 1$, 运行步骤 3; (c) 若 $t - 50 > 0$, $b(t) - b(t - s_i) = 0$ 且 $b(t) \geq 4$, 将最优粒子位置赋值为 I_r , 相应适应度值 $b(t)$ 赋值为 F_r , $r = r + 1$, 生成新的待匹配瞳孔直径数据 P_r , $t = 1$, 运行步骤 3; (d) 若 $t - 50 > 0$, $b(t) - b(t - s_i) = 0$ 且 $b(t) < 4$, 停止迭代.

5) 结果输出. 输出的瞳孔直径位置和对应的适应度值见表 3.

表 3 I_r 与 F_r 的识别结果

识别顺序	I_r	F_r
1	4 683	4.58
2	13 948	4.53
3	7 413	4.49
4	16 630	4.44
5	1 597	4.43
6	10 379	4.02

4.2 结果分析

枚举法以逐点扫描的方式对待匹配数据进行计算比较,而 GSA-T 方法借鉴 GSA 搜索策略计算全

局最优值,因而可避免对大量非目标数据的计算比较. 此外,GSA-T 方法通过剔除已识别数据并生成新的待匹配数据解决了原始 GSA 仅搜索全局最优解的问题,同时避免了数据的重复搜索,进而提高了算法的识别速度. GSA-T 方法的识别结果曲线如图 8,其中红色虚线表示识别出的撞固定物冲突区域. 枚举法对撞固定物冲突识别结果如图 9,其中红色圆圈表示识别出的撞固定物冲突点. 枚举法与 GSA-T方法的识别效果对照见表 4,表中 GSA-T 数据为 30 次识别所得均值,对比次数进行了四舍五入取整处理.

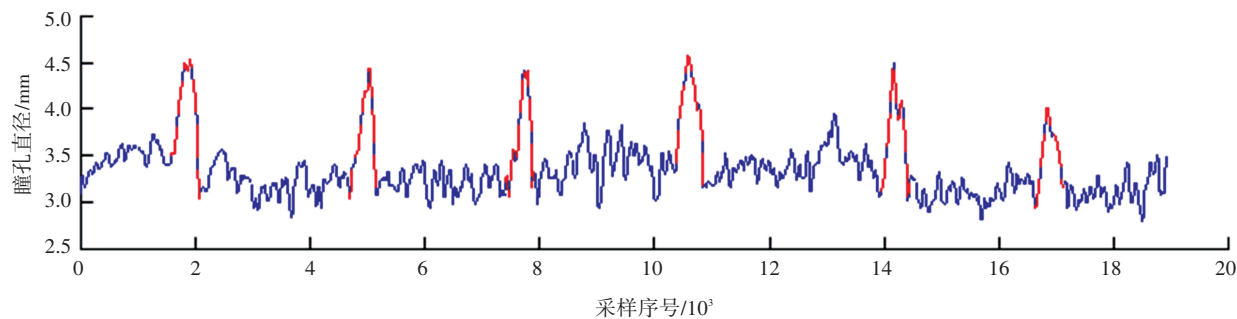


图 8 GSA-FFT 方法识别结果

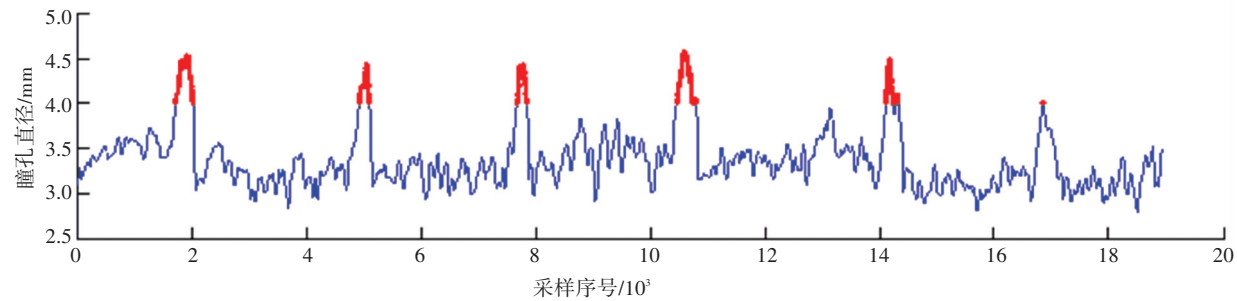


图 9 枚举法识别结果

表 4 识别效果对比表

识别方法	对比次数	识别时间/ms	识别数量
枚举	18 419	819	6
GSA-T	9 027	648	6

由表 4 和图 8、9 可见,本实例中共有 18 919 个采样点,使用枚举法逐点扫描需进行 18 419 次瞳孔直径值的对比,相比 GSA-T 方法在非目标采样点处多进行了 9 392 次傅里叶变换,是 GSA-T 方法中对比计算量的 2 倍,由于 GSA-T 方法需要进行相对复杂的初始化过程和迭代循环过程,其识别时间虽不是枚举法识别时间的 0.5 倍,但仍比枚举法节省了 170 ms. 此外,枚举法与 GSA-T 识别方法均完成了全部撞固定物冲突下瞳孔直径的识别,两种方法在识别精度上无显著差别. 但是,枚举法未能明确标记冲突过程所对应的位置,若要达到 GSA-T 方法的识别效果必将延长识别时间.

因此可判断,本文所述 GSA-T 方法可在较短时间内有效识别交通冲突下的瞳孔直径数据位置,具有较低的时间复杂度和空间复杂度,可用于交通冲突的快速辨识和道路交通安全评价.

5 结 论

- 1) 证明了冲突刺激与瞳孔直径的相关关系,明确了基于瞳孔直径数据的交通冲突识别的可行性,为交通冲突技术领域和交通安全评价领域提供了较为新颖而有效的评价指标.
- 2) 克服了原始 GSA 搜索算法仅可搜索最优解的缺陷,提出了基于瞳孔直径的 GSA-T 交通冲突快速识别方法,为完善不同交通冲突类型下的瞳孔直径模型,研究基于驾驶人眼动特征的交通冲突量化方法,逐步构建交通安全评价体系提供了技术支持.
- 3) 由于试验条件有限,仅进行了将训练场内高

墙作为固定障碍物的冲突试验,造成对瞳孔直径与冲突间关系分析的局限性.在后续研究中,将进行其他交通冲突形式的试验研究,并对驾驶人瞳孔直径和试验环境进行更为准确的量化和更为深入的分析.

参考文献

- [1] 张苏.中国交通冲突技术[M].成都:西南交通出版社,1998.
- [2] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2001, 33(1): 89-97.
- [3] ALIAKSEI L, ASE S, CHRISTER H. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: theoretical framework and first implementation[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(6): 1637-1646.
- [4] 孟祥海,徐汉清,王浩,等.基于 TTC 及 DRAC 的高速公路施工区追尾冲突研究[J].交通信息与安全, 2013, 30(6): 6-10.
- [5] 徐汉清.基于碰撞时间的侧向冲突指标计算模型研究[J].城市道桥与防洪, 2014(6): 268-271.
- [6] (苏)巴布可夫.道路条件与交通组织[M].祁振庆,译.北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [7] FU C Y, PEI Y L. Analysis on driver's physiological and eye movement characteristics under alcohol effect[J]. Advances in Intelligent Transportation System & Technology, 2012, 5(5): 138-143.
- [8] NEUMANN D L, LIPP O V. Spontaneous and reflexive eye activity measures of mental workload[J]. Australian Journal of Psychology, 2002, 54(3): 174-179.
- [9] EINHÄUSER W, STOUT J, KOCH C, et al. Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(5): 1704-1709.
- [10] STEINHÄUER S R, SIEGLE G J, CONDRA Y R, et al. Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing[J]. International Journal of Psychophysiology, 2004, 52(1): 77-86.
- [11] WINN B, WHITAKER D, ELLIOTT D B, et al. Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1994, 35(3): 1132-1137.
- [12] PEDROTTI M, MIRZAEI M A, TEDESCO A, et al. Automatic stress classification with pupil diameter analysis[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2014, 30(3): 220-236.
- [13] 罗石贵,周伟.路段交通冲突技术研究[J].公路交通科技, 2001, 18(1): 65-68.
- [14] 罗石贵,周伟.路段交通冲突的调查技术[J].长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 71-75.
- [15] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: a gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.

(编辑 魏希柱)