

基于摄像机自标定的视频对比度能见度检测算法与实现

陈钊正 陈启美

(南京大学通信技术研究所 南京 210093)

摘要: 由于气象能见度仪应用范围有限且难以架设、现有视频检测算法对外部要求过高且容易受噪声影响,无法大范围布设。该文提出了基于摄像机自标定的视频能见度检测方法,并构建了能见度检测系统。该方法利用摄像机自标定模型、小波变换、视频对比度检测模型曲线拟合等手段,克服原有方法和算法在距离信息、目标物、噪声、稳定性等原因的缺点。其系统已在江苏 1/5 的高速公路上试运行,结果误差符合国际及国家相关标准。

关键词: 视频能见度; 摄像机自标定; 小波变换; 对比度; 曲线拟合

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2907-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01630

Video Contrast Visibility Detection Algorithm and Its Implementation Based on Camera Self-calibration

Chen Zhao-zheng Chen Qi-mei

(Institute of Communication Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Because tradition meteorological sensor's range is limited and hard to be erected, video detections require good external condition and are easily effected by noise. A new method of detection of visibility is proposed based on camera self-calibration. And a system of visibility detection is constructed. The camera self-calibration, wavelet transform, video contrast detecting model, curve fitting is used to overcome disadvantages of tradition detections algorithms at distance, targets, noise and stability. Now the system has been used on 1/5 of Jiangsu's high-ways. The errors of result conform to national and foreign standards.

Key words: Video visibility; Camera self-calibration; Wavelet transform; Contrast; Curve fitting

1 引言

低能见度天气经常造成公路交通的堵塞或封路。据统计,高速公路上因浓雾造成的交通事故大约占事故总数的1/4左右,雾天高速公路的事故率是平常的10倍,恶劣天气、突发性自然灾害已成为威胁人民生产财产安全的重大隐患。传统的能见度仪由于其价格、架设方式、检测方法等原因导致其在交通领域,特别是高速公路上应用有限,无法对小范围的团雾、霾、沙尘、雨、雪等天气进行较好的预警。随着视频技术的发展,使用视频手段,采用基于正常视距分析模式,确定路况能见度距离的方法已成为目前研究的热点。国外机构^[1]研究目前基本没有较大突破,而国内研究正处在起步阶段。

视频能见度检测涉及到的主要问题是如何从亮度不均匀、噪声丰富的路况监控视频图像中提取能

能见度检测需要的图像边缘特征,同时在边缘特征提取过程中很好地模拟人视觉心理,减小算法检测值与正常视距观测值之间的误差。目前世界上所研究的视频能见度检测一般限于两种:(1)双亮度差法:即通过两组人工架设目标的亮度的比值来确定当前能见度距离;(2)视频对比度法^[2]:即模拟人眼分析图像中能观测到最远目标物为当前能见度距离。两种方法在检测手段上都依赖于人工架设目标物,容易局限于外界条件且误差较大。

为此,本文提出了一种基于摄像机自标定和对比度的视频能见度检测方法,通过摄像机自标定技术恢复出图像距离信息,建立图像中的虚拟观测目标物,同时采用小波变换对图像提取虚拟目标物的边缘,剔除噪声,并采用归一化对比度对虚拟目标物的边缘进行能见度对比度检测,最后通过曲线拟合得出能见度曲线,并根据正常视距对比度阈值得出当前能见度距离或等级。

2 能见度算法整体框架

由于视频能见度检测对外界条件具有一定的依赖性,如:摄像机是否正在转动、摄像机镜头上是

2009-12-22 收到, 2010-04-06 改回

中国交通部科技攻关项目(2004-353-352-04)和江苏交通厅科研基金(06x05、07x03)资助课题

通信作者: 陈钊正 czz05g@yahoo.com.cn

否有污渍、图像传输质量等等，同时还必须考虑到摄像机和监控人员共用，所以文中主要考虑在雾天或低能见度发生情况下，视频监控的紧急等级低于能见度检测等级，在进行能见度检测时刻点上摄像机处于静止状态、图像传输质量良好、没有较大污渍情况下能见度检测。

由于肉眼相对于颜色信息，对亮度信息更加敏感，所以本文只对亮度进行分析和处理。在已有视频能见度研究基础上，克服原有研究不足，考虑到检测算法及其系统可用性和稳定性，首先采用摄像机自标定技术恢复出图像中的距离信息建立以路面为背景的虚拟目标物，避免已有检测方法中在道路两边架设带有距离信息的目标实体；接下来采用小波变换手法去除噪声对目标物边缘的影响，提取出属于边缘的像素点，使用符合正常视距的归一化对比度模型进行目标物特征提取，根据目标物的特征信息和距离信息进行正常视距能见度曲线拟合，最后根据所得能见度变换曲线，结合CIE(国际照明委员会)对比度阈值0.05得出能见度距离。

如图1所示为算法流程模块：使用摄像机自标定技术恢复出图像中的距离信息，建立带有距离信息的观测目标物，消除图像中冲击噪声的图像预处理，使用小波变换提取目标物中属于边缘的像素点，摄像机图像肉眼模拟的边缘特征的提取，根据所得分析结果与距离映射关系进行曲线拟合，得出能见度距离。

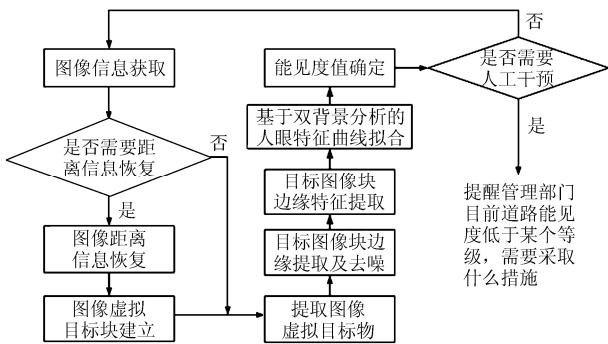


图1 能见度检测算法框架

2.1 图像距离、目标物提取

2.1.1 摄像机自标定提取距离信息 文中利用视频采集设备所采集的视频图像，建立图像坐标至路面坐标的映射关系，将图像距离信息转换成路面距离信息。

(1)车道分割线模型拟合，使用 Canny 边缘检测算法，提取车道分割线的边缘点，利用建立的像平面模型，通过逼进算法连接各边缘点，并求出各模

型参数，以完成车道分割线的像平面重建。模型参数估计用霍夫变换：以直线检测为例，直线 $y=kx+c$ 可以用极坐标参数 ρ 和 θ 描述。它的参数方程为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \tag{1}$$

利用 Canny 算子提取全平面的边缘点，得到二值边缘点图像；接着利用霍夫变换^[3]对此二值图像下半部分进行直线边缘连接，并以共线点个数作为权重，提取直线中权重较大的两条直线为所需的车道分割线，参见图2。



图2 基于 Kluge 模型的车道分割线重建

(2)建立路况摄像机成像模型^[4]，如图3所示，图中定义了3种坐标系，其中地面坐标系 $X_w-Y_w-Z_w$ 和摄像机坐标系 $X_c-Y_c-Z_c$ 用来表征3维空间；图像平面坐标系 X_f-Y_f 表征成像平面。建立世界坐标系，其原点为摄像机光轴与地面交点。建立摄像机坐标系，原点为摄像机光心位置。设摄像机光心与世界坐标系原点距离为 l ，摄像机的俯仰角为 t ，偏角为 p ，旋角为 s ，以地平面上平行线间的区域来对应摄像机视域内高速公路路面。

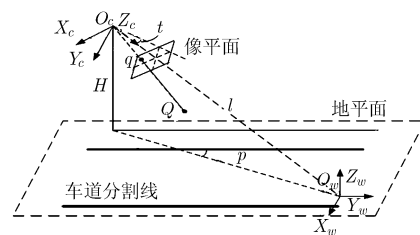


图3 摄像机成像模型

(3)建立世界坐标系与摄像机坐标系间的坐标变换关系，如式(2)、式(3)所示。

$$X_w = [l \sin p (x_f \sin s + y_f \cos s) + l \cos p \sin t (x_f \cos s - y_f \sin s)] / [x_f \cos t \sin s + y_f \cos t \cos s + f \sin t] \tag{2}$$

$$Y_w = \left[-l \cos p (x_f \sin s + y_f \cos s) + l \sin p \sin t (x_f \cos s - y_f \sin s) \right] / [x_f \cos t \sin s + y_f \cos t \cos s + f \sin t] \quad (3)$$

(4)利用霍夫变换提取车道线, 建立兴趣域, 利

$$\left. \begin{aligned} t &= -\arcsin \left\{ \left[v_0^2 (v_A - v_B + v_C - v_D) \right] / \left[[(v_0 - v_D)u_A - (v_0 - v_C)u_B + (v_0 - v_B)u_C - (v_0 - v_A)u_D] [-(v_0 - v_B)u_A + (v_0 - v_A)u_B - (v_0 - v_D)u_C + (v_0 - v_C)u_D] \right] \right\}^{1/2} \\ f &= v_0 / \tan(t), \quad l = H / \sin t, \quad \tan s = -\frac{v_0 - v_1}{u_0 - u_1} \\ p &= \arctan \left\{ \frac{[(v_0 - v_D)u_A - (v_0 - v_C)u_B + (v_0 - v_B)u_C - (v_0 - v_A)u_D] \sin(t)}{v_0 (v_A - v_B + v_C - v_D)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 (u, v) 为图像坐标系, (u_0, v_0) 为由直线 $x_a x_b, x_b x_c$ 决定的灭点, (u_1, v_1) 为由直线 $x_a x_b, x_b x_c$ 决定灭点, H 为摄像机柱高;

(6)将路面坐标系平移至以摄像机柱基为原点, 即可计算图像中任意一点距离摄像机的距离:

$$\left. \begin{aligned} X_{L_{\text{camera}}} &= X_w + l \cos t \sin |p| \\ X_{R_{\text{camera}}} &= -X_w + l \cos t \sin |p| \\ Y_{\text{camera}} &= Y_w + l \cos t \cos |p| \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $(X_{L_{\text{camera}}}, Y_{\text{camera}})$ 是路面坐标; 其中 L, R 表示摄像机在路左右两侧的情况。

2.1.2 目标物提取 路况能见度重点关注 200 m 以内, 根据上面得出的角点检测结果和距离信息, 分别在 15 m, 20 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m 等大概位置自动选取形状为平行四边形的虚拟目标物, 此项做法避免在在路侧架设固定目标物的麻烦, 系统可根据具体情况全自动化检测, 具体距离选取系统根据角点检测结果, 原则上选取离以上距离最近的角点, 虚拟目标物通过选择的角点由计算机自动画出, 原则是纵向为 5 到 2 个像素点, 而横向为角点到车道边界线。

距离恢复和虚拟目标物的建立每 30 min 检测一次(此参照于系统检测时间及道路水平能见度变化在 30 min 内基本不会发生大的等级变化), 需要指出的是, 由于文中角点检测的误差一般在 5%~10% 之内, 而能见度检测的距离误差的允许范围 10%~20%, 所以对于角点检测误差在此不予考虑, 而在道路弯曲度较大的地段设置固定摄像机或不设检测点。

2.2 图像边缘检测及特征提取

2.2.1 边缘提取 对以上基于摄像机自标定提取的带有距离信息的虚拟目标物采用去噪手段提取出图像中的有效边缘。文献[6]指出人的视觉处理过程相当

用 HARRIS 角点检测算法^[5]提取分道线角点信息。

(5)在监控路段上根据分道线角点间平行对应关系, 可解出未知的摄像机参数 p, t, s, f, l , 如式(4)所示:

于多个分辨率的边缘算子在对图像进行分析处理, 因此模拟人的视觉心理需要在多尺度下对图像进行小波处理, 具体如下:

(1)选用3次样条函数作为2维平滑函数 $\theta(x, y)$, 同时选择在尺度 $a=2, 2^2, 2^3$ 和 2^4 下对图像进行处理; (2)在大尺度 $a=2^4$ 的尺度空间中选择较高的阈值来减少噪声的影响; 在 $a=2, 2^2$ 和 2^3 的尺度空间中选择较小的阈值, 尽量保持边缘信息的完整性; (3)多尺度边缘的融合: 在相邻尺度下, 边缘的位移不会超过一个像素, 所以只需要在尺度 2^N+1 下点 (x_0, y_0) 的 3×3 邻域内寻找由尺度 2^N 下点 (x_0, y_0) 相关联点, 如果该邻域中的点 (x, y) 与尺度 2^N 下点 (x_0, y_0) 满足式(6), 则认为点 (x, y) 与尺度 2^N 下点 (x_0, y_0) 的相关联, 其中 $\Phi_N(x, y)$ 为尺度 2^N 下点 (x, y) 的幅角。

$$\left. \begin{aligned} |\Phi_{N+1}(x, y) - \Phi_N(x_0, y_0)| &\leq \alpha \\ |\Phi_{N+1}(x, y) - \Phi_N(x_0, y_0)| &\geq 360^\circ - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如果尺度 2^N 下的边缘点 (x_0, y_0) 与尺度 2^{N+1} 下的 (x, y) 相关联, 则认为 (x_0, y_0) 由 (x, y) 传递而来, 它们在不同尺度下反映同一边缘, 设这些边缘点集合为 $B1_{N, N+1}$ 。尺度 2^N+1 下还存在边缘点不与尺度 2^N 下任何边缘点相关联, 设这些边缘点集合为 $B2_{N, N+1}$ 。尺度 2^N+1 与尺度 2^N 融合的结果为 $B1_{N, N+1} \cup B2_{N, N+1}$ 。将以上步骤逐层向下执行, 最终得到多尺度融合的边缘。

2.2.2 能见度边缘特征提取 能见度的改变表征为白天对比度的变化和夜间光源的光通量的改变, 文献[7]中提出被观测物体的观测亮度与距离的关系, 如式(7)所示, L 为物体观测亮度, L_0 为本身亮度。

$$L = L_0 e^{-kd} + L_f (1 - e^{-kd}) \quad (7)$$

L_f 为天空的亮度, k 为大气的消光系数。

其后, Duntley从其中归纳总结了基于对比度的

模型, 如式(8):

$$C = C_0 e^{-kd} \quad (8)$$

C 为物体观测对比度, C_0 为本身对比度。

Jourlin和Pinoli^[8]通过使用对数图像处理技术, 建立基于图像像素点对数对比度模式, 而文献[9]在其基础上, 阐述了一种基于图像的最大对比度模型和方法来计算 C 。其方法对图像进行灰度化处理, 通过计算阈值 T , 计算相邻两点 (x, x_1) , 将满足阈值的点进行分离。

$$C_{x, x_1}(T) = \min(|T - f(x)|, |T - f(x_1)|) \quad (9)$$

Nicolas Hautièr^[9]对式(9), 结合CIE对比度定义进行了改进, 其模型为

$$C_{x, x_1}(T) = \min\left(\frac{|T - f(x)|}{\max(T, f(x))}, \frac{|T - f(x_1)|}{\max(T, f(x_1))}\right) \quad (10)$$

在以上模型基础上, 构建对比度检测模块, 即: 不对整幅图像计算虚拟目标物的对比度最优阈值, 采用更适于人眼特性的四邻域, 如图4所示。

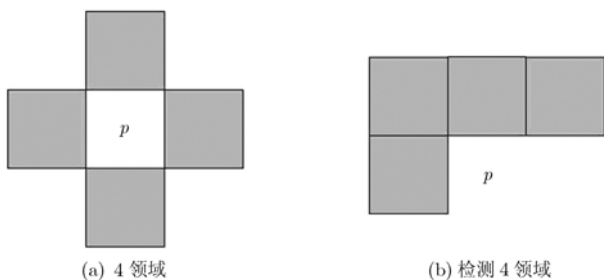


图4 V_4 邻域检测示意图

对于灰度图像 f 中的像素对 (x, x_1) , 当 T 满足式(11)所示的两个条件时, 则像素对 (x, x_1) 可以被 T 分割。

$$\left. \begin{aligned} x_1 \in V_4(x) \\ \min(f(x), f(x_1)) \leq T < \max(f(x), f(x_1)) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $V_4(x)$ 是像素点 x 的4邻域, 其中的灰色部分即为 x 的4邻域 $V_4(x)$ 。

定义 $F(T)$ 为所有能被阈值 T 分割的像素对 (x, x_1) 的集合, 其中 $x_1 \in V_4(x)$ 。此时, 对于任意的 $T \in [0, 255]$, 都可以得到对应的 $F(T)$ 。对于集合 $F(T)$ 中的任意一个像素对 (x, x_1) , 其对比度的计算方法如式(10)所示。

因此, 集合 $F(T)$ 的对比度 $C(T)$ 为

$$C(T) = \frac{1}{\text{card}(F(T))} \sum_{(x, x_1) \in F(T)} C_{x, x_1}(T) \quad (12)$$

其中 $\text{card}(F(T))$ 为集合 $F(T)$ 中元素的个数。对于整数 $T \in [0, 255]$ 中每一个值, 都相应地存在一个 $C(T)$,

因此, 最佳阈值 T_0 满足:

$$C(T_0) = \max_{T \in [0, 255]} C(T) \quad (13)$$

T_0 同时也是图像二值化的最佳阈值, 当 T_0 用于图像对比度计算, 以反应4个像素之间的亮度差时, 图像的对比度 C 为

$$C = 4C(T_0) \quad (14)$$

效果参见图5所示。为了简化运算的复杂度和去除边缘噪声的干扰, 选取目标物中高对比度像素点的对比度的平均值作为特征量 E_n 。 E_n 是目标物图像块中对比度值最大百分之 r_n 的平均值, r_n 为每块目标物的小波检测边缘点数量与总像素点的比值。

2.3 曲线拟合及能见度值确定

最后根据以上模块得到的检测结果, 绘制相应的能见度曲线及得出能见度距离。

能见度曲线: 根据前面得到的特征变量 E_n 对式(8)进行转换, 加入随机噪声 A_2 , 即

$$f(d) = A_0 e^{-A_1 d} + A_2 \quad (15)$$

其中 d 是目标物离摄像机的距离, $f(d) = E_n$, $A_0 = C_0$, $A_1 = K$, A_2 是需确定的参数。

需要对式(16)进行曲线拟合, 首先必须计算出 A_2 的最优拟合值, 具体方法如下:

令 $e^{-A_1 d} = z$, $-A_1 d = a$, 将实测数据 (f, d) 转换成 (f, z) , 式(15)转换成:

$$f(z) = A_0 z + A_2 \quad (16)$$

将非线性拟合转换成直线拟合, 并显见实测数据 (f, z) 相对应的相关系数 r 依赖于 a , 记为 $r(a)$, 且 $r(a)$ 为 a 的单峰函数。设在最小二乘意义下, 非线性模型 $f(z) = A_0 z + A_2$ 关于数据 (f, z) 的拟合参数为 A_0, A_1, A_2 , 则函数 $r(a)$ 在 a' 达到极大值 $|r(a')|$ 。函数 $r(a)$ 的极大值点 a' 可以用优选法(0.618法)得到^[10]。在得到 a' 后, 即 A_2 , 利用由数据 (f, z) 经相应变换得到的一组数据按线性回归得 A_0 和 A_2 。最终能见度值即为临界值 ε 所对应距离:

$$D_{\text{visibility}} = \frac{\ln A_0 - \ln(0.05 - A_2)}{A_1} \quad (17)$$

3 测试结果

根据交管部门要求, 视频图像采集范围一般在200 m~500 m内, 格式: H.264, 分辨率: D1(704×576)。图6所示为能见度检测效果及其与目测检测的误差曲线, 误差不超过±10%, 至于图中无雾误差比有雾误差大则是采样有限而拟合导致, 不影响检测效果。其样本为宁常高速上发生的随时间变化, 能见度由远及近再由近到远再及近一段具有代表性的小范围突发突变团雾。

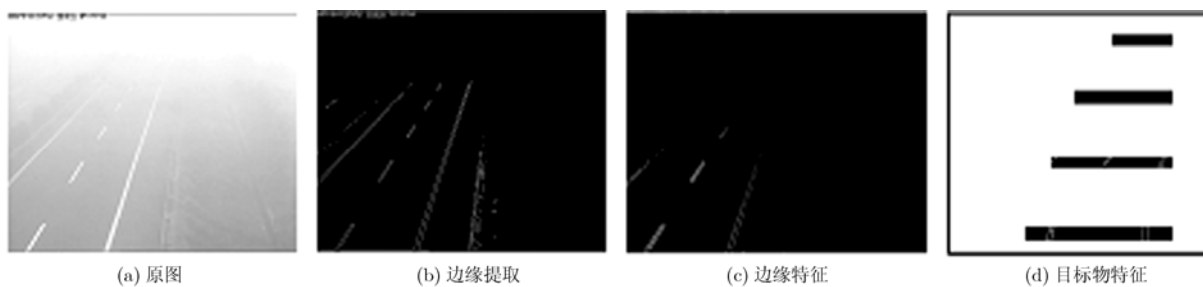


图 5 边缘特征效果

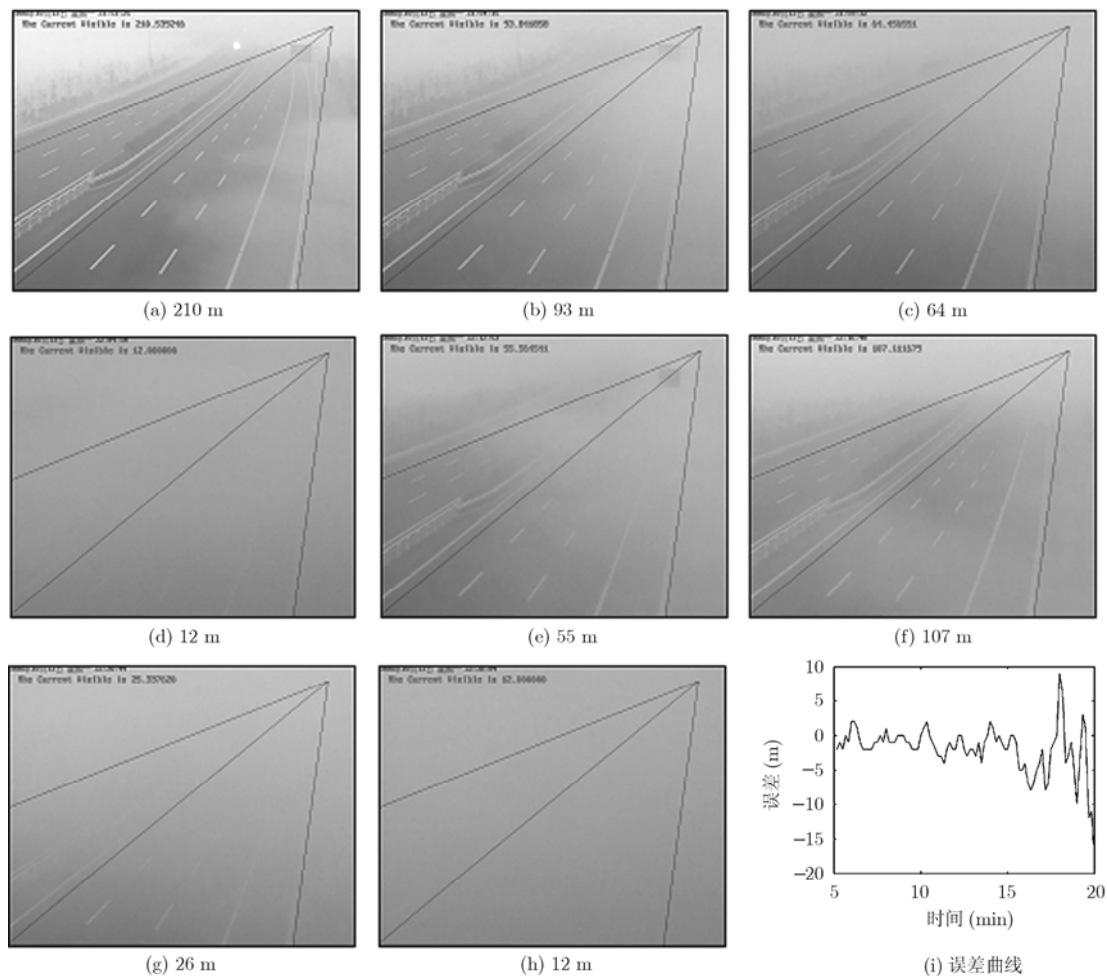


图 6 能见度视频检测结果

4 结束语

该系统保障人民生命财产安全，提高道路利用率，并有以下突出优势：(1)无需架设任何附加辅助设备及标志物，完全兼容原有监控系统，具有成本低、监测直观、效率高等特点；(2)充分利用已有视频图像，对全路段能见度统计分析，实时发布能见度分布、相应各路段能见度等级及相应信息。其不足：对低能见度天气中易发的路面“微冰”、“黑冰”现象，无法进行有效检测；下一步研究主要集于路

面结冰检测和模型自适应方面。

参考文献

[1] Cavallo V, Colomb M, and Dore J. Distance perception of vehicle rear lights in fog [J]. *Human Factors*, 2001, 43(3): 442-451.

[2] 李佳, 葛嘉琦, 陈启美. 路况视频能见度检测算法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(16): 175-177.

Li Jia, Ge Jia-qi, and Chen Qi-mei. Visibility detection algorithm for road video[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(16): 175-177.

- [3] 张小洪, 李博, 杨丹. 一种新的Harris多尺度角点检测[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1735-1738.
Zhang Xiao-hong, Li Bo, and Yang Dan. A novel Harris multi-scale corner detection algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1735-1738.
- [4] 李勃, 董蓉, 陈启美. 路况PTZ摄像机自动标定方法[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(s1): 24-29.
Li Bo, Dong Rong, and Chen Qi-mei. Automatic calibration method for PTZ camera[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2009, 32(s1): 24-29.
- [5] 田建东, 唐延东. 基于几何特征的快速高精度角点检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 287-292.
Tian Jian-dong and Tang Yan-dong. Fast and high-precision corner detection algorithm based on geometric features [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(2): 287-292.
- [6] Bush C and Debes E. Wavelet transform for analyzing fog visibility [J]. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 1998, 13(6): 66-71.
- [7] Hautiere N, Aubert D, Dumont E, and Tarel. J.-P. Experimental Validation of Dedicated Methods to In-Vehicle Estimation of Atmospheric Visibility Distance[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2008, 10(57): 2218-2225.
- [8] Jourlin M and Pinoli J C. A model for logarithmic image processing [J]. *Microscopy*, 1988, 149(1): 21-35.
- [9] Nicolas Hautière and Raphaël Labayrade. Real-time disparity contrast combination for onboard estimation of the visibility distance [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(2): 201-212.
- [10] Chudamani R, Vasudevan K, and Ramalingam C S. Real-time estimation of power system frequency using nonlinear least squares. *IEEE Power Delivery*, 2009, 24(3): 1021-1028.
- 陈钊正: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为图像处理、智能交通运输.
- 陈启美: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理、智能交通运输.