

光斑质量评价在路基沉降监测系统中的应用

闵永智*, 孙天放

兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 相机链式路基沉降监测系统通过图像式测量的方法可以实现高精度、非接触的铁路路基沉降监测。图像式测量的精密性和灵敏性对准确快速评估系统性能提出了要求,需要变定期维护为动态维护,提出了利用光斑图像质量反映系统性能的策略。引入了边缘清晰度、相对亮度、图像信息熵、光线垂直程度 4 个参数用以评估光斑质量,应用层次分析法和熵权法确定上述参数所占权重,构建了光斑质量综合评价模型,完成了模拟实验和现场实验。模拟实验结果表明,该模型能很好地跟踪光斑图像质量分数变化,具有较好的灵敏性;现场实验结果表明,该模型评价光斑质量结果准确,分析得出设置质量分数阈值为 0.95,定位误差小于 1 mm(沉降测量规范中允许误差范围)。当光斑图像质量分数持续未达到阈值且超过静置时间时,系统需要维护,实现了系统状态实时监测以及动态维护功能。

关键词 路基沉降; 图像式测量; 设备维护; 光斑质量评价; 层次分析法; 熵权法

中图分类号 TP391.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212798

Application of Spot Quality Evaluation in Subgrade Settlement Monitoring and Measurement System

Min Yongzhi*, Sun Tianfang

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract Monitoring and measurement systems for railway subgrade settlement using a chain of cameras can realize high-precision, non-contact railway subgrade settlement monitoring with the image measurement method. The precision and sensitivity of image measurement requires accurate and rapid evaluation of system performance, and regular maintenance should be changed to dynamic maintenance. Herein we propose a strategy for determining system performance using the spot-image quality and introduce four parameters, viz. edge definition, relative brightness, image information entropy, and light vertical degree, to evaluate the quality of light spots. The weight of each parameter can be constructed using the analytic hierarchy process and the entropy method. A comprehensive evaluation model for spot quality is constructed. Simulation and field experiments are conducted. The simulation shows that the proposed model can track changes in the spot-image quality score with good sensitivity. The field experiment shows that this model can be used to accurately evaluate spot quality. In addition, when the quality score is set at 0.95, the positioning error exceeds 1 mm (the allowable error range in subsidence for settlement measurement). The system requires maintenance when the light spot-image quality score continuously misses the threshold and exceeds the resting time. This method realizes system-state real-time monitoring and dynamic maintenance.

Key words subgrade settlement; image measurement; equipment maintenance; spot quality evaluation; analytic hierarchy process; entropy weight method

1 引言

无砟轨道由于具有平顺性好、几何形位能持久保持的特点,已经成为高速铁路道床的主要结构形式。然而高速铁路对无砟轨道沉降要求十分严格,要求工

后沉降不大于 15 mm^[1]。高速铁路速度快、车次多,微小的路基沉降都可能造成十分严重的后果,发生沉降变形也可能造成路基裂缝、钢轨弯曲甚至路面坍塌等事故。为保证列车安全运行,对路基沉降进行长期、稳定和高精度的监测十分重要,但使用例如沉降板法、

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-11-30; 录用日期: 2021-12-21; 网络首发日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61663022, 62066024)、甘肃省自然科学基金(20161105)

通信作者: *minyongzhi@mail.lzjtu.cn

沉降水杯法等传统方法监测,自动化程度低、人工成本高、准确性低。针对此问题,课题组在于起峰等^[2-4]提出的基于激光测量形变方法这一新型非接触式测量方法的基础上,提出了相机链式路基沉降监测方法^[5-7]。该方法具有高精度、全自动、实时性的特点,健全了报警预防系统,可以防患于未然。

相机链式铁路路基沉降监测系统,通过多相机间激光信号传递,完成长距离的路基沉降测量。由于该系统工作在铁路沿线,不可避免地会受到恶劣环境的影响,又因其具有更加精密、更高灵敏度的特点,如不及时维护,会产生误报警,系统可靠性大大降低,然而环境变化随机性强,定时维护系统的方法难以适用。因此,判断系统状态成为决定图像式监测系统可行性的关键问题,亟待解决。通过分析,环境对系统运行的影响主要包括:激光光线因大气环境中粉尘、水雾发生散射,粉尘附着于接收靶面、激光器老化或电池电量不足而光斑亮度衰减^[8-9]。因此,有必要通过评价光斑图像质量,来确定系统状态。

现阶段对光斑质量评价研究较少。王园宇等^[13]提出基于一级多散射模型下的图像退化模型,并基于暗原色原理的图像恢复方法,完成图像恢复,沈丽丽等^[14]基于相对梯度和 Laplacian of Gaussian (LOG) 算子并通过神经网络的训练得出图像质量评价方法,能很好地反映主观视觉感受。然而上述方法运算量大,对计算机要求较高,不适合多监测点的相机链传系统。苏

晋等^[15]提出光强集中性参数和对称性参数反映光斑质量,郑肇葆^[16]提出引用信息熵解决图像分类问题,但是仅通过 1 或 2 个参数反映光斑质量的可信度不高,不能通过光斑质量评价结果判断系统状态。

为解决相机链式路基沉降监测系统的光斑质量评价问题,本文根据系统应用的实际工况,将激光传输距离分为近段、中段、远段,通过层次分析法确定各距离工况所占权重。设计边缘清晰度、相对亮度、图像信息熵、光线垂直程度 4 个质量参数,并在每种工况下进行实验,结合层次分析法和熵权法,确定 4 个质量参数在每种工况下所占权重,最终形成光斑质量评价模型。通过实验室试验,验证该模型的可靠性,并完成现场测试。

2 相机链式路基沉降监测系统概述

相机链式路基沉降监测系统的整体结构如图 1 所示。首个发射端固定在路基表面基准点,接收端固定在下一个监测点,每个监测点的监测站由接收端与发射端组成,用于接收上一级监测站发射的激光和向下一级发射激光。各监测点间隔距离设置为 20~50 m^[17-19],具体路段可根据实际情况设置。首尾相接的多个监测站形成链式沉降监测系统,实现了对整个监测区间的监测。综合考虑高速铁路沉降连续监测的要求和路基沉降这一缓慢的过程,本系统每隔 3 min 采集一次沉降数据,对路基沉降情况实时分析。

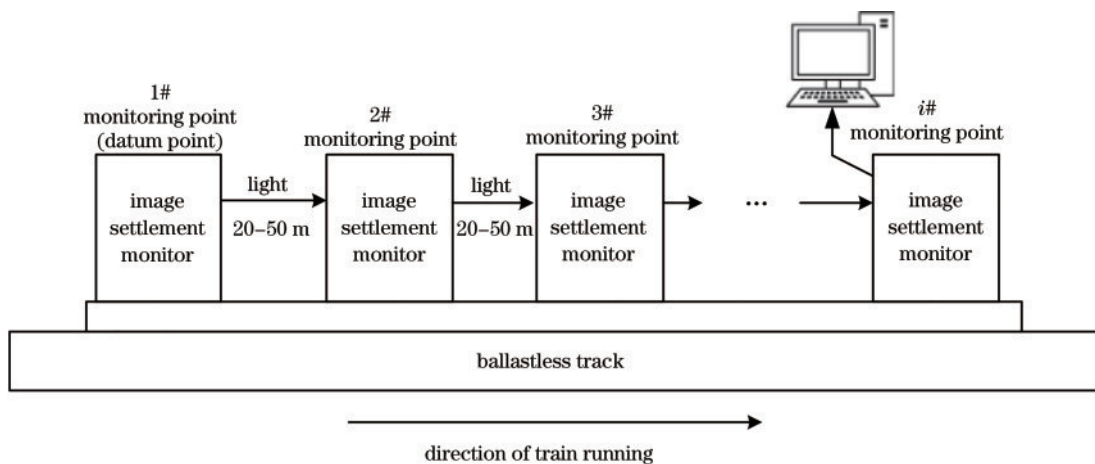


图 1 基于图像的无砟轨道沉降测量系统

Fig. 1 Surface settlement monitoring system of image-based ballastless track

单个监测站内部工作原理如图 2 所示。发射端激光器发出的激光光线会在接收靶面处形成圆形光斑,沉降发生前激光器位置为 L_1 ,激光照射到靶面形成光斑 P_1 ,沉降后激光器位置为 L_2 ,激光照射到靶面形成光斑 P_2 ,通过相机采集靶面上前后两幅光斑图像。通过光斑中心定位算法,求解出光斑中心位置 $P_1(X_1, Y_1)$, $P_2(X_2, Y_2)$,两点差分即可得出在水平与竖直方向上的沉降量 ($\Delta X = X_2 - X_1, \Delta Y = Y_2 - Y_1$),由此求出

单个测量环节的沉降量。将各个监测点的结果通过无线通信手段传递至监测中心处,对全部监测站沉降数据综合分析,最终求出整个监测区域内各点的沉降值^[5-7]。

根据光斑形状,使用基于圆拟合的光斑中心定位算法,计算出光斑中心。该方法利用最小二乘法原理,用圆曲线逼近实际光斑边缘。

假设圆曲线方程为 $(x - X)^2 + (y - Y)^2 = r^2$,

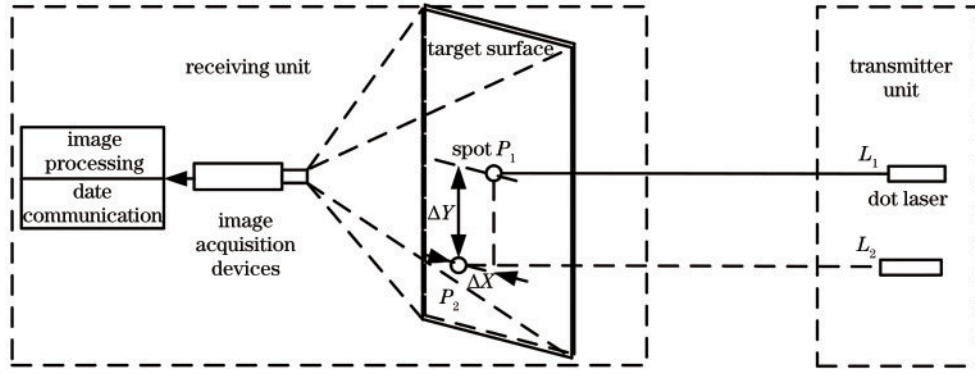


图 2 单个路基沉降监测站工作原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of a subgrade settlement measurement unit

(x_i, y_i) 为曲线上边界点坐标, 共 n 个点, E 为圆曲线边界的集合, $(x_i, y_i) \in E$, 取残差 $\epsilon_i = (x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 - r^2$, 则残差平方和函数 $\theta = \sum_{i \in E} \epsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 - r^2]^2$.

根据最小二乘法原理, 存在约束条件: $\frac{\partial \theta}{\partial X} =$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0。$$

代入边界点坐标 (x_i, y_i) , 化简后求得

$$\begin{cases} X = \frac{(\bar{x}^2 \bar{x} + \bar{x} \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x} \bar{y}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2 \bar{y} + \bar{y} \bar{y}^2 - \bar{x}^2 \bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})^2} \\ Y = \frac{(\bar{x}^2 \bar{y} + \bar{y} \bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2 \bar{y})(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2 \bar{x} + \bar{x} \bar{y}^2 - \bar{x} \bar{y}^2 - \bar{x}^3)(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$; $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$; $\bar{x}^2 = \frac{\sum x_i^2}{n}$; $\bar{y}^2 = \frac{\sum y_i^2}{n}$ 。

遍历边缘所有坐标点后, 即可得出满足残差平方和最小的光斑中心坐标 (X, Y) 。

3 光斑质量评价模型

系统运行过程中, 会出现粉尘附着于接收靶面、激光器老化或电池电量不足导致光斑亮度衰减的问题, 这些会使光斑质量逐渐下降, 系统性能降低。使用低质量光斑图像计算光斑中心, 会增加定位误差, 即使未发生沉降, 系统还可能误报警, 导致监测系统测量结果可信度下降, 甚至无法正常监测路基沉降, 为铁路运行带来隐患。因此, 通过建立光斑质量评价模型, 筛选出优质光斑计算路基沉降值。

3.1 光斑质量评价参数设置

为量化表示采集到光斑图像的质量, 在分析影响中心定位的因素基础上, 引入了 4 个光斑质量评价参数。

光斑边缘清晰度: 光斑边缘清晰度表征了光斑图像的边缘清晰情况。能否准确地提取出光斑边缘限制了中心定位的精度, 从而影响系统测量精度, 将光斑边缘区域定义为 Ω (采用 100~120 灰度值范围), 区域内像素点数为 n , $I(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值。则边缘清晰度 I_s 为 $I_s = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$

$$I_R = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} [I(x, y) - I(x, y-1)]^2}{n}}$$

$$I_C = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} [I(x, y) - I(x-1, y)]^2}{n}}$$

相对亮度: 相对亮度表征了图像中光斑与背景之间的亮度差异。亮度差异显著情况决定了光斑区域能否通过算法准确识别。设 L 为激光光斑区域, N 为激光光斑范围内的像素个数, 定义激光光斑平均亮度(灰

度值) L_{avr} 为 $L_{avr} = \frac{\sum_{x,y \in L} I(x, y)}{N}$; B 为背景区域, M 为背景范围内的像素个数, 定义背景灰度值 B_{avr} 为 $B_{avr} = \frac{\sum_{x,y \in B} I(x, y)}{M}$, 相对亮度 L_{re} 为 $L_{re} = \frac{L_{avr} - B_{avr}}{B_{avr}}$ 。

图像信息熵: 图像信息熵反映了图像携带的信息量, 与图像各级灰度值的像素数量有关。理想的光斑图像只有两级灰度值, 即 255 和 0, 此时图像信息熵很小。在光斑图像中, 不同像素点对应的灰度值不同, 最多有 0 到 255, 共计 256 个灰度级, 用 g_i 表示灰度级, p_i 为图像中各灰度级出现的概率, 其中 $i=0, 1, \dots, 255$ 。则定义图像信息熵 $H(G)$ 为: $H(G) = -\sum_{i=0}^{255} p_i(g_i) \lg p_i(g_i)$ 。

光线垂直程度:在监测系统中,采集到的光斑图像需要通过基于圆拟合的光斑中心定位算法求出光斑中心,光斑越接近圆形,定位越准确,误差越小。激光器在安装时尽量做到与靶面垂直,采集到的光斑图像为标准圆形,但振动或发生沉降导致激光器激光与靶面不再垂直,光斑图像呈椭圆,影响定位精度。定义光线垂直程度 S_L 为 $S_L = S_1/S_2$ (S_1 为光斑面积; S_2 为以光斑最大线度为直径的圆面积)。光斑面积由光斑像素点数表示,光斑最大线度直径以 pixel 为单位。

3.2 光斑质量评价模型

评价方法分为主观评价和客观评价,主观评价过程通常受到人为干扰,而客观评价方法过于依赖数据,导致评价结果与实际不符。故基于层次分析法(AHP)和熵权法(EWM)设计了主客观结合的光斑质

量评价模型,得出光斑图像质量评分。

1) 通过 AHP 建立光斑质量评价模型

AHP 是美国运筹学家提出的定性与定量结合的分析方法,是一种主观赋权法,可以将包含多个因素的问题,通过确定权值实现因素统一,达到对总目标的分析。建模时,通常分为目标层、准则层、方案层,逐层构造判断矩阵求出特征向量,最后求出方案层对目标层的组合权向量。

研究光斑图像质量评价问题,设光斑图像质量分数 Q 为目标层。在不同的接收端、发射端间距下,不同光斑质量评价参数对定位结果的影响可能不同,因此设工况 D 为准则层。方案层为 3.1 节提出的 4 个光斑质量参数。参考文献[20],通过 AHP 建立光斑质量评价模型的层次结构,如图 3 所示。

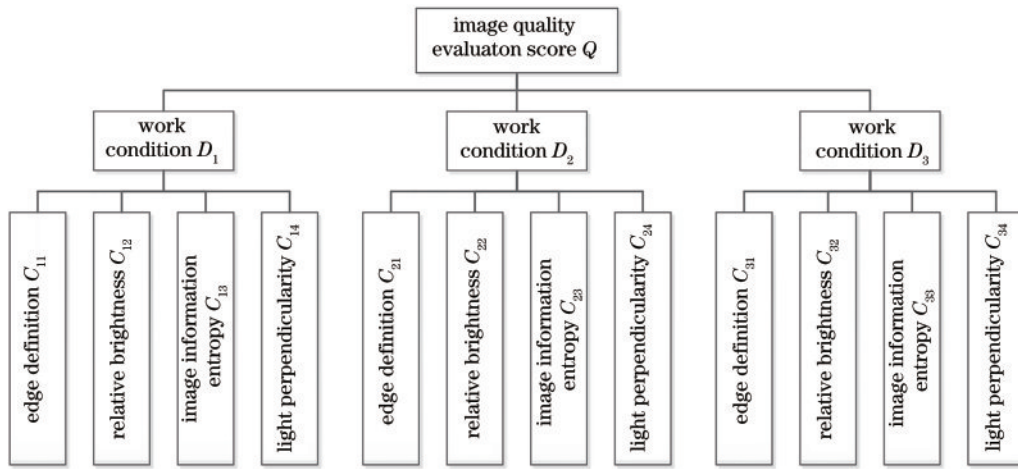


图 3 光斑质量评价模型

Fig. 3 Spot quality evaluation model

2) 通过主客观结合的方法优化评价模型

EWM 是一种客观赋权法,利用样本中某个指标的熵值来判断该指标的离散程度,离散程度越大,表明该指标对综合评价的影响(权重)越大。当某个指标在样本中取值恒定时,该指标对总体评价的影响为 0,权值为 0。

为减轻主观评价过程中的人为干扰,确定方案层对准则层的权重时,采用主客观结合的方法。分别通过 AHP 和 EWM 确定权重矩阵,使用算法合理综合两权重矩阵,并以此作为方案层对准则层的权重矩阵。

3) AHP 实现过程

① 构造 $m \times m$ 判断矩阵 A , m 为因素个数,矩阵元素 a_{ij} 为 i 因素相对于 j 因素的重要程度,一般采用 1~9 尺度,矩阵元素 $a_{ji} = 1/a_{ij}$; ② 求出判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 对应的归一化特征向量 W_A ; ③ 一致性检验,当一致性比例 $C_R = C/R < 0.1$ 时,判断矩阵 A 可接受,否则应重新构造判断矩阵。其中, C 为一致性指标, $C = (\lambda_{\max} - m)/(m - 1)$, R 为随机一致性指标,取

值如表 1 所示。

表 1 随机一致性指标

Table 1 Random consensus index

m	1	2	3	4	5	6
R	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24

4) EWM 实现过程

假设 p 个样本、 q 个指标的数据矩阵 B , b_{kl} 为第 k 个样本的第 l 个指标。① 通过正向归一化 $b_{kl} = \frac{b_{kl} - \min\{b_{1l}, b_{2l}, \dots, b_{pl}\}}{\max\{b_{1l}, b_{2l}, \dots, b_{pl}\} - \min\{b_{1l}, b_{2l}, \dots, b_{pl}\}}$, 去除各指标量纲; ② 计算各指标比重 $p_{kl} = b_{kl} / \sum_{k=1}^p b_{kl}$; ③ 计算第 j 项指标熵值 $e_l = -\frac{1}{\ln q} \sum_{k=1}^q p_{kl} \ln p_{kl}$; ④ 计算信息熵冗余度 $d_l = 1 - e_l$; ⑤ 计算 EWM 权重向量 W_B , $w_l = d_l / \sum_{l=1}^q d_l$ 。

4 判断矩阵的确定

4.1 准则层对目标层的判断矩阵

相机链式路基沉降监测系统为图像式系统,借助激光完成测量。激光器光线传输距离会影响光斑亮度,因此,激光器有效传输距离会影响系统间隔距离的设置。此外,待监测路基的监测精度要求也作为影响因素之一。

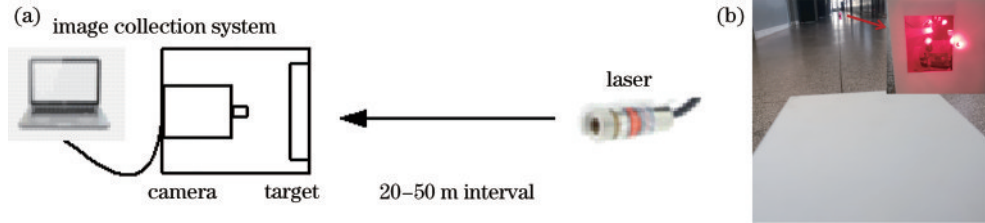


图 4 实验原理图和实验过程。(a)实验原理图;(b)实验过程

Fig. 4 Experimental schematic diagram and experimental process. (a) Experimental schematic; (b) experimental procedure

在 20~50 m 范围内,设 20~30 m 为近段工况、30~40 m 为中段工况、40~50 m 为远段工况。按 5 m

步长增加间距,采集光斑图像。20~50 m 范围内激光光斑图像采集结果如图 5 所示。

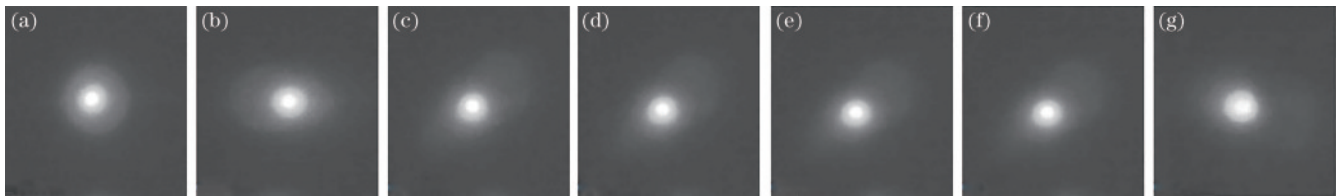


图 5 激光光斑图像采集结果。(a)靶面距激光 20 m 的光斑图像;(b)靶面距激光 25 m 的光斑图像;(c)靶面距激光 30 m 的光斑图像;(d)靶面距激光 35 m 的光斑图像;(e)靶面距激光 40 m 的光斑图像;(f)靶面距激光 45 m 的光斑图像;(g)靶面距激光 50 m 的光斑图像

Fig. 5 Laser spot image collection results. (a) Spot image when the target surface is 20 m away from the laser; (b) spot image when the target surface is 25 m away from the laser; (c) spot image when the target surface is 30 m away from the laser; (d) spot image when the target surface is 35 m away from the laser; (e) spot image when the target surface is 40 m away from the laser; (f) spot image when the target surface is 45 m away from the laser; (g) spot image when the target surface is 50 m away from the laser

由图 5 可知,近段光斑中心亮度高、光斑中心明显,但激光光线散射造成的光晕较大,光斑边缘不清晰,会导致光斑边缘提取误差大,影响定位精度;随着设备间距离增加,光斑中心亮度逐渐减弱,光晕逐渐变小,边缘逐渐清晰;由于距离过远,光斑亮度较低,光斑边缘模糊,如图 5(g)所示。

综合上述分析及路基沉降监测规范^[18-19]中路基沉降监测工程相关要求,中段工况 D_2 所占权重最大;此外部分区域由于易发生沉降,需要高密度监测,因此近段工况 D_1 所占权重次之。 D_1 、 D_2 、 D_3 对质量评价分数 Q 的两两比较矩阵 A_{12} 为

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} & 3 \\ 4 & 1 & 6 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

最大特征值为 $\lambda_{\max} = 3.0536$, $C_R = 0.0462$,通过一致性检验,对应特征向量的归一化结果 W_{12} (1、2 为准则层对目标层的影响权重)为

$$W_{12} = [0.2176 \quad 0.6910 \quad 0.0914]. \quad (3)$$

4.2 方案层对准则层的判断矩阵

相机链式路基沉降监测系统基于图像式测量方法,通过定位光斑图像光斑中心确定激光器位置,反映监测点的沉降情况。3.1 节中设置了 4 个光斑质量参数,用以反映光斑图像质量,本节需要确定在近段、中段、远段 3 种工况下各参数所占权重。

由于 3 种工况距离跨度大,选取 25 m、35 m、45 m 3 个测量距离分别为近段、中段、远段。在每种工况下采集 3 张光斑图像,由于实际工况下导致光斑质量下降的原因复杂,采用加入噪声的方式模拟光斑质量下降^[22]。高斯噪声通常用于模拟图像传感器拍摄时视场不够明亮、亮度不均匀、电路元件相互影响形成的噪声;泊松噪声服从散粒噪声分布,用于模拟光子到 CMOS 元件传

输过程中光源亮度波动产生的噪声;椒盐噪声用于模拟靶面大颗粒粉尘附着时产生的噪声;瑞利噪声用来模拟少量粉尘附着靶面产生的噪声。因此,在本文中,对每张光斑图像分别加入服从 $G(0, 0.01)$ 、 $G(0, 0.02)$ 的高斯噪声,方差为 5 的泊松噪声,3%、5% 的椒盐噪声,方差为 0.01、0.05 的瑞利噪声,每张光斑图像可生成 7 张含噪声的光斑图像。计算其光斑质量参数值,并通过圆拟合中心定位算法确定光斑中心。

以原图像为基础,分析加入噪声图像的光斑质量参数。共计实验 $a \times b$ 次,其中 $a=9, b=7$, 定义定位误差 $\Delta_{ab} = \sqrt{(x_{ab} - x_{a0})^2 + (y_{ab} - y_{a0})^2}$, 其中 (x_{ab}, y_{ab}) 为第 a 张光斑图像的第 b 张含噪声图像算法定位中心, (x_{a0}, y_{a0}) 为第 a 张光斑图像的算法定位中心。其中,中段第一组实验结果如表 2 所示。对实验结果按定位误差顺序排序,得出 4 个质量参数与定位误差的变化曲线,如图 6 所示。

表 2 第 4 张光斑图像加入噪声的实验结果

Table 2 Experimental results of adding noise to the 4th spot image

Experiment number	I_s	L_{re}	$H(G)$	S_L	(x_{4n}, y_{4n})	(x_{40}, y_{40})	Δ
E41	5.3520	0.8959	5.1080	0.9178	(476.95, 672.66)	(477.87, 672.82)	0.9338
E42	5.1779	0.8673	5.1756	0.9171	(475.24, 672.80)	(477.87, 672.82)	2.6300
E43	5.2232	0.8678	5.1914	0.9112	(476.01, 672.73)	(477.87, 672.82)	1.8621
E44	5.2509	0.8918	5.1684	0.9235	(476.28, 672.35)	(477.87, 672.82)	1.6580
E45	5.1538	0.8717	5.2081	0.9090	(475.06, 672.62)	(477.87, 672.82)	2.8171
E46	5.3181	0.9008	5.0190	0.9161	(476.50, 672.81)	(477.87, 672.82)	1.3700
E47	5.1492	0.8591	5.2332	0.9115	(475.04, 672.72)	(477.87, 672.82)	2.8317

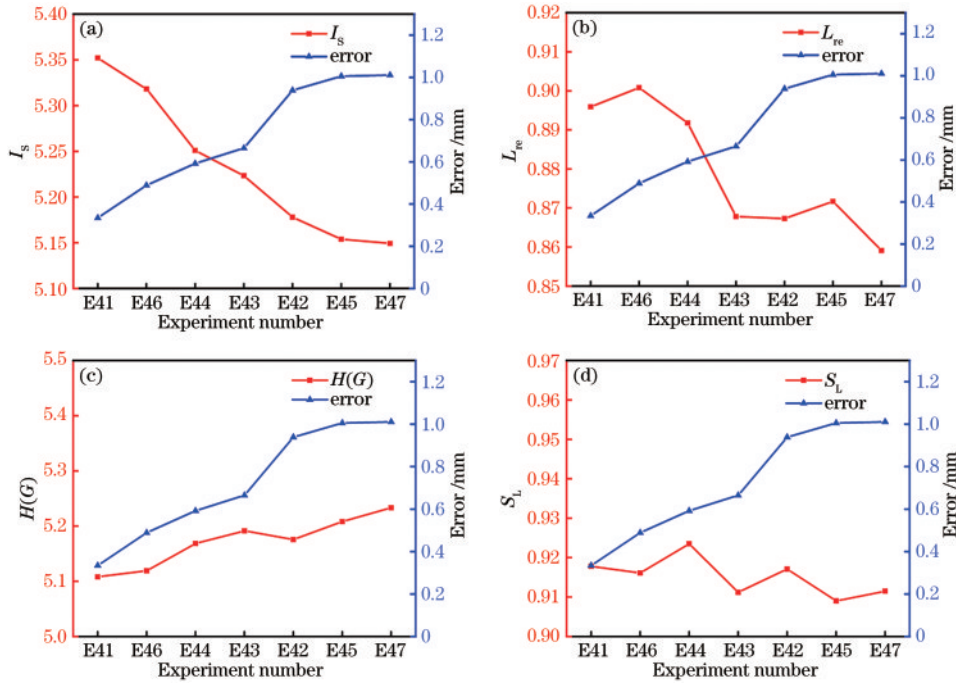


图 6 光斑质量参数与定位误差变化情况。(a)边缘清晰度与定位误差的变化曲线;(b)相对亮度与定位误差的变化曲线;(c)图像信息熵与定位误差的变化曲线;(d)光线垂直程度与定位误差的变化曲线

Fig. 6 Changes of spot quality parameters with positioning errors. (a) Relationship between edge definition and positioning error; (b) relationship between relative brightness and positioning error; (c) relationship between image information entropy and positioning error; (d) relationship between vertical state of light and positioning error

由图 6 可知:边缘清晰度、相对亮度、光线垂直程度与误差呈负相关,则与定位精度呈正相关;图像信息熵与误差呈正相关,则与定位精度呈负相关。评估质量参数所占权重时,对光斑定位结果影响大的参数,权重更大,因此,采用 4 个质量参数与定位精度的相关系数表征其影响程度,4 个相关系数向量形式表示为 $[0.9316 \ 0.8416 \ -0.7028 \ 0.5580]$ 。比较相关系数绝对值,可以看出相关性从高到低依次为边缘清晰

度、相对亮度、图像信息熵、光线垂直程度。

事实上,光斑图像增加噪声不易导致光线垂直程度变化,故其相关性较低,但中心定位算法采用基于圆拟合的中心定位算法,所以确定判断矩阵时应增大光线垂直程度所占权重。由于相关系数比值接近 1,不宜直接代入 1~9 标度法确定判断矩阵,本节中,按表 3 所示的判断矩阵标度对应规则,通过 9/9-9/1 标度法转换到 1~9 标度法确定矩阵^[20]。如本工况下清晰度

与图像信息熵的影响之比为 3(由于二者相关系数比值 0.9316/0.7028 更接近 1.286)。

以表 2 中第 4 组数据为例,得出边缘清晰度、相对亮度、图像信息熵、光线垂直程度在中段工况中的两两比较矩阵 A_{23} 为

$$A_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

最大特征值为 $\lambda_{\max} = 4.0606$, $C_R = 0.0224$, 通过

表 3 9/9-9/1 标度与 1~9 标度转换规则

Table 3 Conversion rules from 9/9-9/1 scale to 1-9 scale

1-9 scale	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9/9-9/1 scale	1.000	1.125	1.286	1.500	1.800	2.250	3.000	4.500	9.000

4.3 主客观综合的质量评价算法

现阶段在 3 种工况下求解出的权重 W_{APH23I} 、 W_{APH23II} 、 W_{APH23III} 只使用了 AHP, 根据前文分析, AHP 会由于主观因素影响过大导致评价结果与实际结果存在差距。因此, 采用 EWM 求出权重 W_{EWM23I} 、 W_{EWM23II} 、 W_{EWM23III} 。

为了综合主客观计算方法的权值, 引入式(6), 求出综合权重向量各元素值:

$$w_j = w_{1j}^\alpha w_{2j}^\beta / \sum_{j=1}^m w_{1j}^\alpha w_{2j}^\beta, \quad (6)$$

式中: $\alpha + \beta = 1$, α 和 β 分别为主客观标准的相对重要程度^[21-24]。在此认为二者同等重要, 故取 $\alpha = \beta = 0.5$, 得出综合权重 W'_{23I} 、 W'_{23II} 、 W'_{23III} 。

通过质量参数求解光斑质量评分时, 质量参数取值范围不同, 无法代入权重向量计算。因此, 提出将权重 W'_{23II} 修正为 $W_{23II} = 3W'_{23II} / (C_{40} + C_{50} + C_{60})$ 的方法, 其中 C_{40} 为第 4 张(即第 2 种工况下的第 1 张)图片的 4 个质量参数。按该方法完成对全部权重的修正,

表 4 光斑图像质量评分

Table 4 Image quality score of light spots

Experiment number	E41	E46	E44	E43	E42	E45	E47
Positioning error	0.9338	1.3700	1.6580	1.8621	2.6300	2.8171	2.8317
Score	0.9821	0.9838	0.9725	0.9650	0.9583	0.9491	0.9442

5 实验

5.1 模拟实验

为了检验该评价模型对图像质量变化的灵敏性, 设计模拟实验如下: 将两监测装置原型机相隔 2 m 放置, 中间放置 1.5 m 长粉尘箱, 每秒采集一张光斑图像。鼓风机通过导管将含有粉尘(用面粉代替)的空气吹入粉尘箱, 使环境内粉尘质量浓度达到 $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,

一致性检验。由图 6 分析得出, 边缘清晰度、相对亮度、光线垂直程度与定位精度呈正相关, 图像信息熵与定位精度呈负相关, 考虑相关性, 得出归一化向量 W_{APH234} (角标 APH234 表示利用 AHP 求解方案层对准则层的影响程度中的第 4 组数据):

$$W_{\text{APH234}} = [0.4308 \quad 0.2606 \quad -0.1222 \quad 0.4308] \quad (5)$$

由第 2 种工况下另外两张光斑图像即可求出

W_{APH235} 、 W_{APH236} , 定义 $W_{\text{APH23II}} = \frac{1}{3}(W_{\text{APH234}} + W_{\text{APH235}} + W_{\text{APH236}})$ 为方案层对准则层的影响程度中第 2 种工况各参数权重。

并组合形成表征方案层对准则层的影响程度的矩阵 W_{23} 。最终求出 4 个光斑质量参数所占权重 W 。

$$W_{23} = \begin{bmatrix} W_{23I} \\ W_{23II} \\ W_{23III} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0837 & 0.3618 & -0.0359 & 0.4581 \\ 0.0856 & 0.3622 & -0.0398 & 0.4410 \\ 0.0880 & 0.3708 & -0.0342 & 0.4367 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$W = W_{12} W_{23} =$$

$$[0.0814 \quad 0.3629 \quad -0.0384 \quad 0.4443], \quad (8)$$

式(8)中, 向量元素分别对应光斑清晰度、相对亮度、图像信息熵、面积比在光斑质量评价时所占权值。

最终, 求解出光斑图像质量评分算法为

$$Q = 0.0814I_s + 0.3629L_{re} - 0.0384H(G) + 0.4333S_L. \quad (9)$$

例如, 第 4 组光斑图像质量评分如表 4 所示。

由表 4 可知, 光斑图像评分与定位误差负相关, 符合实际。证明了该模型判断光斑图像质量的准确性。

60 s 后停止鼓风机。计算该过程光斑图像的质量分数。实验过程如图 7 所示。质量分数变化过程如图 8 所示。

由图 8 可知, 吹入粉尘后, 质量分数迅速下降, 最低降至 0.925, 随着时间推移, 空气中悬浮粉尘量不断减少, 质量分数缓慢回升, 最终回到初始水平。实验结果表明该模型能很好地跟踪光斑图像质量下降的过程, 具有较高的灵敏性。

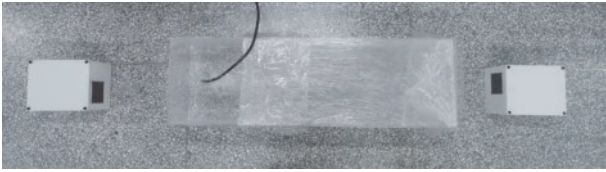


图 7 质量评价算法可靠性实验过程图

Fig. 7 Reliability experiment process diagram of quality evaluation algorithm

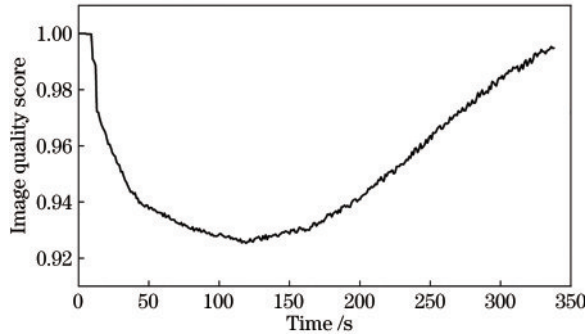


图 8 光斑图像质量分数变化过程

Fig. 8 Process of image quality score change

5.2 现场实验

为了确定质量分数阈值,需保证测量过程中测量段不发生沉降,测量定位结果仅由光斑质量影响,因此选在地基状况较好的隧道进行实验。在某线路 K175+500 处安装路基沉降监测装置的原型机,将 K175+475 处设置为观测基准点。铁路路基表面沉降监测系统在现场安装效果如图 9 所示。



图 9 路基表面沉降监测系统现场安装图

Fig. 9 On-site installation of subgrade surface settlement monitoring system

由于土地冻胀会造成监测点的隆起或沉降,为了降低此类误差,选择在 6 月进行实验^[17]。监测系统每隔 4 h 采集一次光斑图像,持续 21 d。计算采集到光斑图像的质量分数,并与初始数据对比得出观测误差。采集光斑图像的质量分数及观测误差如图 10 所示。

由图 10 分析可知,随着采集光斑图像质量分数的下降,定位误差呈上升趋势,造成这一现象的原因是粉尘附着于接收靶面、激光器老化或电池电量不足等因素导致系统测量精度下降。该结果表明光斑图像质量

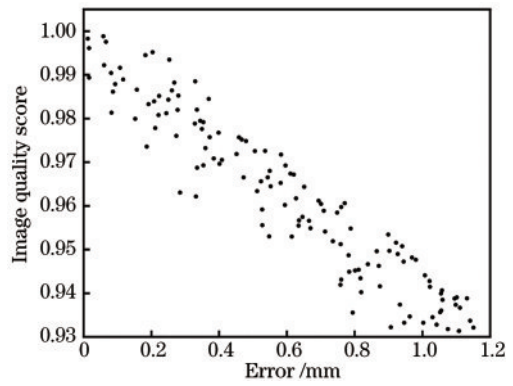


图 10 采集光斑图像的质量分数及观测误差

Fig. 10 Changing process of image quality score and positioning error

评价模型评价光斑图像质量结果准确可信。

路基沉降监测标准中规定,测量误差不得大于 1 mm^[18-19]。由图 10 分析可知,当质量分数大于 0.95 时,定位误差全部小于 1 mm,满足监测标准。因此,设置质量分数阈值为 0.95,当监测系统采集光斑图像质量分数长时间小于 0.95 时,发出维护信号,系统待维护后继续运行。

6 结 论

对相机链式路基沉降监测系统进行了研究,建立了铁路路基表面沉降监测系统的技术模型。为解决系统维护时间难以确定的问题,通过光斑图像质量表示系统状态,从而提出了主客观结合的光斑质量评价算法评价光斑质量。结合 AHP 和 EWM 确定表征光斑图像质量的 4 个光斑质量参数(光斑边缘清晰度、相对亮度、图像信息熵、光线垂直程度)所占权重,完成评价模型。通过实验分析得出:

- 1) 主客观结合的光斑质量评价模型能灵敏地反映出光斑图像质量的变化情况,定位误差较大的光斑图像相应评价质量分数低;
- 2) 粉尘附着、激光器电源性能下降等问题,导致监测系统性能下降。设置光斑图像质量分数阈值为 0.95,当监测系统采集光斑图像质量分数长时间小于 0.95 时,发出维护信号,系统待维护后继续运行。

综上,本文提出的主客观结合的光斑质量评价模型,能有效判断系统状态,解决了系统维护时间无法确定的问题,同时降低了测量误差,提高了监测系统可靠性,为其长期稳定运行提供了保障。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程沉降变形观测与评估技术规范: Q/CR 9230—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Observation and evaluation specification for settlement deformation of railway engineering: Q/CR 9230—2016

- [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [2] Yu Q F, Jiang G W, Ding X H, et al. Research on method and system of broken-line optical path camera for measuring large ship deformation[C]//Celebrating the 50th Anniversary of the Founding of the Chinese Society of Mechanics and the 2007 Paper Abstracts of the Chinese Society of Mechanics Academic Conference (part 1), January 20-23, 2007, Beijing, China. [S.l.: s.n.], 2007.
- [3] 尚洋, 于起峰, 关棒磊, 等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(5): 593-600.
Shang Y, Yu Q F, Guan B L, et al. Recent advances of videometrics for large-scale structure deformation monitoring[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5): 593-600.
- [4] 姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Jiang G W. Study on pose relay videometrics method with camera-series and ship deformations measurement [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [5] Min Y Z, Tao J, Ren W Z. A high-precision online monitoring system for surface settlement imaging of railway subgrade[J]. Measurement, 2020, 159: 107707.
- [6] 闵永智, 陶佳, 任维卓. 基于特征点位置校正的靶标位姿测量方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 509-517.
Min Y Z, Tao J, Ren W Z. The measurement method of target pose based on feature points position calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 509-517.
- [7] 闵永智. 铁路路基表面沉降相机链视觉测量方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
Min Y Z. Study on camera chain vision measurement method of railway subgrade surface settlement[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
- [8] Yuan X C, Zayats A V. Laser: sixty years of advancement[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(5): 050101.
- [9] Dudley J M. Light, lasers, and the Nobel Prize[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(5): 050501.
- [10] 冯新星, 张丽艳, 叶南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512002.
Feng X X, Zhang L Y, Ye N, et al. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512002.
- [11] 郑毅. 基于空间矩的激光光斑中心亚像素定位[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 521-523.
Zheng Y. Subpixel location of the center of laser spot based on spatial moments[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(7): 521-523.
- [12] 杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1655-1660.
Yang Y Q, Shi R, Yu X N, et al. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1655-1660.
- [13] 王园宇. 粉尘环境中的图像恢复研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
Wang Y Y. The research of image restoration in dust environment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [14] 沈丽丽, 杭宁. 联合多种边缘检测算子的无参考质量评价算法[J]. 工程科学学报, 2018, 40(8): 996-1004.
Shen L L, Hang N. No-reference image quality assessment using joint multiple edge detection[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(8): 996-1004.
- [15] 苏晋, 路大举, 马沁巍, 等. 基于高速图像分析的激光器光束稳定性及光斑质量评价方法研究[J]. 实验力学, 2017, 32(4): 445-451.
Su J, Lu D J, Ma Q W, et al. On the laser beam stability and laser spot quality evaluation method based on high-speed image analysis[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4): 445-451.
- [16] 郑肇葆, 郑宏. 基于图像信息熵的高光谱图像分类[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(5): 8-10.
Zheng Z B, Zheng H. Hyperspectral image classification based on image information entropy[J]. Journal of Geomatics, 2019, 44(5): 8-10.
- [17] Min Y Z, Tao J, Ren W Z. A high-precision online monitoring system for surface settlement imaging of railway subgrade[J]. Measurement, 2020, 159: 107707.
- [18] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行): TG/GW115—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Maintenance rules for ballastless track of high speed railway (Trial): TG/GW115—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [19] 中华人民共和国铁道部. 铁路线路修理规则[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway line repair rules[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [20] 刘新究, 朱道立. 选择与判断[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990: 39-68
Liu X X, Zhu D L. Selection and judgment[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 1990: 39-68.
- [21] 储敏. 层次分析法中判断矩阵的构造问题[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
Chu M. The construction of judgment matrix in the analytic hierarchy process[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [22] 伍煜, 龙小祥, 杨坚, 等. 高分七号卫星足印相机激光光斑中心定位方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1728001.
Wu Y, Long X X, Yang J, et al. Laser spot center positioning method in Gaofen-7 footprint camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1728001.
- [23] 简朴. 一种多目标综合评价模型及其应用[D]. 广州: 暨南大学, 2004.
Jian P. A comprehensive evaluation method of multiple objective and its application[D]. Guangzhou: Jinan University, 2004.
- [24] Tan D Z, Wang Z, Xu B B, et al. Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(2): 024002.