

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.150



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于迭代 Otsu 法的低光照条件下桥梁结构 动挠度视觉测量方法

翟国华^{1,2,3,4}, 谭志森^{5,6}, 梁亚斌^{1,2,3,4}

(1. 中国地震局地震研究所, 武汉 430071; 2. 湖北省地震预警重点实验室, 武汉 430071; 3. 湖北省地震局, 武汉 430071; 4. 武汉地震工程研究院有限公司, 武汉 430071; 5. 深圳市城市公共安全技术有限公司, 广东 深圳 518046; 6. 城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室, 广东 深圳 518046)

摘要:在低光照环境下,被测结构表面自然纹理可见度和分辨率下降,进而影响结构动挠度视觉测量的精度,研究人员多采用 LED 标靶结合图像阈值法来解决。但在实际应用过程中,周围复杂的环境光线和不良天气会对结构动挠度视觉测量结果的准确性造成影响。为此,提出一种基于迭代 Otsu 法的桥梁结构动挠度视觉测量方法。该方法通过多次迭代求解光斑图像 ROI 区域前景阈值,配合光斑圆形度和帧间面积一致性约束,不断缩小灰度阈值范围,最终找到能有效分离图像前景光斑与背景的理想阈值,并结合灰度质心法准确计算出被测结构的动挠度变化。首先,介绍基于迭代 Otsu 法的图像阈值分割原理和结构动挠度计算流程;之后,通过一个悬臂梁试验验证所提方法在有强光和雾气干扰的低光照环境下识别结构动挠度的准确性。

关键词:视觉测量;桥梁挠度;LED 标靶;Otsu 法

中图分类号: TU317; U446.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)02-0180-10

Vision-based bridge dynamic deflection measurement method under low light conditions based on the iterative Otsu method

ZHAI Guohua^{1,2,3,4}, TAN Zhisen^{5,6}, LIANG Yabin^{1,2,3,4}

(1. Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, P. R. China; 2. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Wuhan 430071, P. R. China; 3. Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, P. R. China; 4. Wuhan Institute of Earthquake Engineering Co. Ltd., Wuhan 430071, P. R. China; 5. Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute Co. Ltd., Shenzhen 518046, Guangdong, P. R. China; 6. Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning, Ministry of Emergency Management, Shenzhen 518046, Guangdong, P. R. China)

Abstract: Currently, researchers use LED targets in combination with the image thresholding method to

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51708520); 中国地震局地震研究所和应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务费(IS202226319)

作者简介: 翟国华(1999-), 男, 主要从事基于计算机视觉的结构健康监测研究, E-mail: guohuazhai17@mail.nwpu.edu.cn。
梁亚斌(通信作者), 男, 副研究员, E-mail: yabinliang@hubdzj.gov.cn。

Received: 2023-10-12

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51708520); Scientific Research Fund from Institute of Seismology, CEA and National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China (No. IS202226319)

Author brief: ZHAI Guohua (1999-), main research interest: vision-based structural health monitoring, E-mail: guohuazhai17@mail.nwpu.edu.cn.

LIANG Yabin (corresponding author), associate researcher, E-mail: yabinliang@hubdzj.gov.cn.

address the issue of decreased visibility and resolution of structural surfaces in low-light environments. This approach ultimately leads to poorer performance when measuring structural dynamic parameters using vision-based technology. However, complex ambient lighting and unfavorable weather in practical applications will inevitably induce negative effects on the vision-based measurement of structural parameters. Therefore, in order to deal with this issue, a novel vision-based measurement method is proposed in this paper based on the iterative Otsu algorithm. In this method, the correct segmentation of the foreground spot and the background under strong light and fog interference can be realized by iteratively solving the image foreground threshold while combining with the iterative constraints of spot roundness and inter-frame area consistency, and finally the structural dynamic deflection can be obtained after the spot center is collected using the gray centroid algorithm. Firstly, this paper introduces the principle of image thresholding segmentation based on the proposed iterative Otsu algorithm, as well as the corresponding procedure for structural displacement measurement. Subsequently, a cantilever beam specimen is employed to validate the feasibility and effectiveness of the proposed method, and finally the results demonstrate that the proposed method can realize the accurate identification of the structural dynamic deflection under low-light conditions even when influenced by strong light and fog.

Keywords: vision-based measurement; bridge deflection; LED targets; Otsu method

桥梁结构在长期服役过程中难免产生各种损伤,进而给其安全运营带来诸多隐患。因此,及时准确地对桥梁结构的日常服役状况开展检测、监测和评估工作具有十分重要的现实意义^[1]。作为评定桥梁结构健康状况的重要参数之一,动挠度的主要测量方法分为接触式测量^[2]和非接触式测量^[3]。近年来,非接触视觉测量技术因操作简单、成本低等优点受到学术界和工程界的广泛关注^[4],各种视觉测量系统也被应用于公路桥梁^[5]和铁路桥梁^[6]的结构响应参数识别和日常监测。

然而,在利用视觉传感技术开展桥梁结构长期监测的过程中,不可避免会遇到需要在低光照条件下(如夜间、阴雨天等)进行测量的情形。此时,桥梁结构表面自然纹理的可见度和分辨率均显著下降,给基于视觉传感的结构动挠度测量技术的工程应用带来了诸多困扰^[7]。为此,研究人员尝试结合对比度更高的LED标靶与图像阈值分割方法,对桥梁结构的动挠度变化进行追踪监测^[8]。例如,在室内光照不良环境下,Nikfar等^[9]利用LED标靶实现了振动台上独立结构动位移的准确测量,测量绝对误差小于0.39 mm。Ho等^[10]结合LED标靶与Otsu阈值法提出了一种结构多点实时动态位移测量系统,在实验室暗光环境下成功测得了实验室振动台的多点位移变化,相较于位移传感器的测量结果,该方法的误差小于2%。此外,徐秀秀等^[11]设计了基于LED标靶和Otsu阈值法的视觉测量系统,成功实现了柔性臂结构在低光照条件下多点位移的实时测量。

但在实际应用过程中,桥梁上复杂的环境光源

(如自然光、路灯、景观灯、车辆照明等)和不良天气状况(雾、霾、降雨等)均可能对LED光斑图像阈值计算造成干扰,进而直接影响被测结构动挠度测量的准确性。为此,Vicente等^[12]与李怡岚^[13]基于LED标靶与周围环境光的色彩图谱差异,采用色彩阈值分割方法对图像进行阈值化处理,从而有效消除了环境光的不良影响。Tian等^[14]与Yang等^[15]则基于LED标靶与周围环境光的波长差异,通过在相机镜头前加装带通滤光片,成功滤除了环境光源的干扰。然而,上述方法仅适用于LED标靶与环境光存在明显色彩或波长差异的情形;当标靶周围出现雾气干扰时,产生的干扰光线与LED标靶颜色、波长相近,此时色彩阈值分割与加装带通滤光片的方法便不再适用。此外,Maksymenko等^[16]、杨威^[17]与桂金瑶等^[18]还尝试采用图像滤波、腐蚀膨胀等方法,以减轻或消除外部环境干扰,但该类方法仅依靠初级的图像预处理操作,在应对激光光斑因外界干扰产生轻度色散、拖影等情况时有一定效果,而面对强光、雾气等强环境干扰时效果有限。

基于此,笔者提出一种基于迭代Otsu法的低光照条件下桥梁动挠度视觉测量方法。该方法通过迭代求解光斑图像ROI区域的前景阈值,不断缩小灰度阈值范围,从而找到图像前景光斑与背景的最优分割阈值,实现强光、雾气干扰条件下LED光斑图像的准确分割;最终结合灰度质心法计算得到测点的动挠度变化值。相较于常规Otsu法,迭代Otsu法具有更强图像抗干扰能力和更优目标识别效果,即使在面对强光和雾气干扰时,仍能实现前景光斑与背景的准确分割。最后,在实验室悬臂梁模型上

分别开展无干扰、雾气干扰和强光干扰3种工况的对比试验,验证了所提方法的有效性和适用性。

1 Otsu法及环境干扰影响

1.1 Otsu法

Otsu法又称大津法、最大类间方差法,是一种确定图像二值化分割阈值的算法,由日本学者大津于1979年提出,其核心思想是阈值分割后的前景部分(灰度值大于等于阈值的所有像素点)与背景部分(灰度值小于阈值的所有像素点)具有最大类间方差^[19]。一幅大小为 $M \times N$ 的图像共有 L 个灰度等级,假设该图像中灰度等级为 $i(i=0,1,2 \dots L-1)$ 的像素点个数为 n_i ,在图像中的出现概率为 p_i ,则

$$p_i = \frac{n_i}{M \times N} \quad (1)$$

假设存在一个图像阈值 $T(0 \leq T \leq L-1)$,使用该阈值可将图像所有像素点分为灰度值小于 T 的背景部分 C_1 与灰度值大于等于 T 的前景部分 C_2 。在此情形下,像素点属于 C_1 、 C_2 的概率分别为 P_1 和 P_2 ,其表达式分别为

$$P_1(T) = \sum_{i=0}^{T-1} p_i \quad (2)$$

$$P_2(T) = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_1(T) \quad (3)$$

此时,背景部分 C_1 像素点的平均灰度值 $m_1(T)$ 与前景部分 C_2 像素点的平均灰度值 $m_2(T)$ 分别为

$$m_1(T) = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} (i \times p_i)}{P_1(T)} \quad (4)$$

$$m_2(T) = \frac{\sum_{i=T}^{L-1} (i \times p_i)}{P_2(T)} \quad (5)$$

整个图像的平均灰度 m_G 为

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} (i \times p_i) \quad (6)$$

此时,定义背景部分 C_1 与前景部分 C_2 的类间方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = P_1 \times (m_1 - m_G)^2 + P_2 \times (m_2 - m_G)^2 \quad (7)$$

由式(4)~式(6)可得, $m_1 \times P_1 + m_2 \times P_2 = m_G$,将其代入式(7)即可得到Otsu法的目标函数

$$\sigma^2(T) = \frac{(m_G \times P_1 - m_1)^2}{P_1 \times (1 - P_1)} \quad (8)$$

在计算图像Otsu阈值时,需遍历计算 $L=256$ 个像素灰度分别对应的目标函数 $\sigma^2(T)(T=0,1,2 \dots L-1)$,进而找到使 $\sigma^2(T)$ 取最大值的阈值。即当图像前景 C_2 与背景 C_1 的类间方差最大时,对应的像素灰度 T^* 为最佳的Otsu阈值,其表达式为

$$\sigma^2(T^*) = \max_{0 \leq T \leq L-1} \sigma^2(T) \quad (9)$$

1.2 环境干扰影响

部分学者将Otsu法与LED标靶相结合,用于低光照条件下桥梁动态挠度的视觉非接触测量。然而,在实际应用过程中,受强光、雾气等外界环境干扰,Otsu法易将部分图像背景误判为前景,致使光斑提取产生误差,干扰后续光斑中心的计算,造成桥梁动挠度测量结果出现偏差。例如,图1(a)、(c)分别为LED标靶在无雾气干扰和有雾气干扰时的采集图像,分析其灰度直方图可知:无雾气干扰

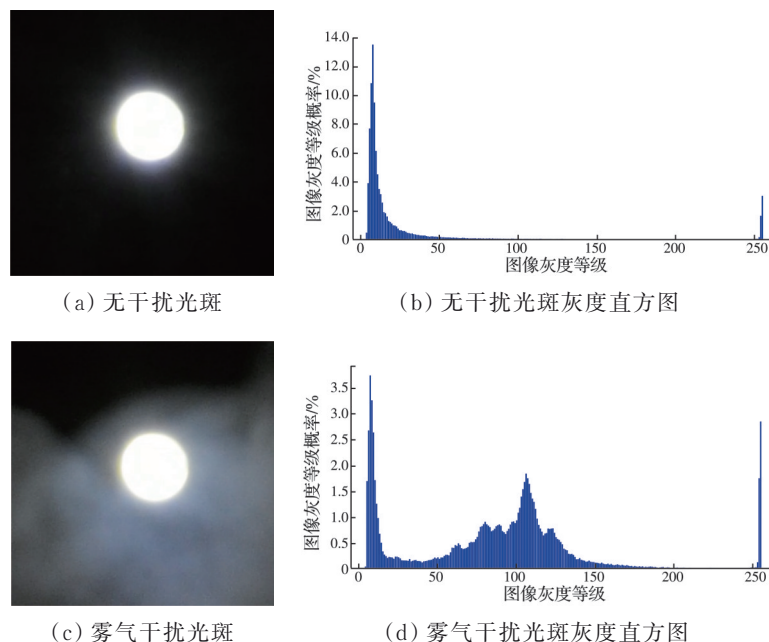


图1 无干扰与雾气干扰下LED光斑的灰度直方图

Fig. 1 Gray level histogram of the LED spot with and without fog interference

时图像的灰度直方图(图 1(b))中,灰度值接近 255 的前景灰度(LED 光斑)与灰度值接近 0 的背景灰度(黑色背景)区分明显;而受雾气干扰时的光斑图像灰度直方图(图 1(d))中出现了介于前景与背景灰度之间的中间灰度(灰色背景)。此外,如图 2 所示,雾气干扰产生的中间灰度像素点数量远多于前景光斑的灰度像素点。在此情况下,由于 Otsu 法求解阈值时所采用的类间方差(式(8))与图像灰度值概率直接相关,该方法计算得到的光斑图像阈值 T_{wrong} 会受到中间灰度的干扰,使得灰度值大于等于 T_{wrong} 的像素点同时包含部分中间灰度与前景灰度,这将直接导致前景光斑提取出现偏差,进而影响结构动挠度的最终测量结果。为此,需对常规 Otsu 法进行改进,以计算得到准确的光斑图像阈值 T_{right} ,确保灰度值大于等于 T_{right} 的像素点仅包含前景灰度。

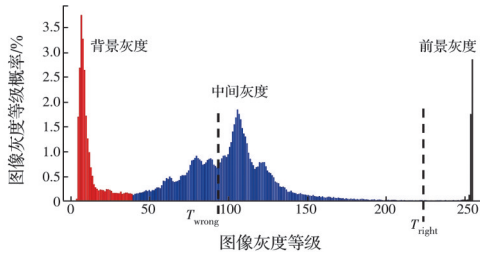


图 2 雾气引入中间灰度对 Otsu 阈值计算的影响

Fig. 2 Influence of fog interference on Otsu threshold calculation

2 迭代 Otsu 法

在雾气等外界环境因素的干扰下,通过 Otsu 法计算得到的阈值 T_{wrong} 会将部分中间灰度与前景灰度归为同一类。由图 2 可知,灰度值大于等于 T_{wrong} 的中间灰度与前景灰度区分明显,这一特征与图 1(b)类似。若图像中仅存在这两类灰度,那么再次运用 Otsu 法计算便可对这两类区分明显的像素灰度实现准确分割。由此可以设想,在对受雾气干扰的光斑图像进行首次 Otsu 阈值计算并得到 T_{wrong} 后,仅对灰度值大于等于 T_{wrong} 的中间灰度与前景灰度像素点进行第 2 次 Otsu 阈值计算,即可得到准确的光斑图像阈值 T_{right} ,进而实现前景光斑的准确提取。值得注意的是,由于雾气、强光等环境因素的干扰较为复杂,相比于图 1(c)图像,中间灰度的像素数量会有所增加,同时其灰度值也会更加接近前景灰度。在此情况下,灰度图像中大于等于 T_{wrong} 的像素点分布特征仍类似于图 1(d),因此,仅计算 2 次 Otsu 阈值无法实现两类灰度的准确分割。为此,提出迭代 Otsu 法的理念和方法,通过多次迭代求解光斑图像的前景阈值,最终确定准确的图像阈值 T_{right} 。

2.1 阈值求解目标函数

在采用 Otsu 法计算图像阈值的过程中,根据离散型方差计算公式,灰度值大于等于阈值 T 的图像前景 C_2 像素点的类内方差 σ_2^2 可表述为

$$\sigma_2^2 = \sum_{i=T}^{L-1} \frac{(i - m_2)^2 \times p_i}{P_2} \quad (10)$$

由图 1 所示的 LED 图像灰度直方图可知,在灰度值大于等于阈值 T_{right} 的前景区域(LED 光斑),其像素点的灰度值基本一致,即前景类内方差较小。因此,在 Otsu 法最大类间方差(式(8))的基础上,增加前景类内方差最小的约束条件,构建迭代 Otsu 法的目标函数 $\sigma_{\text{LED}}^2(T)$,其表达式为

$$\sigma_{\text{LED}}^2(T) = \frac{(m_G \times P_1 - m_1)^2}{P_1 \times (1 - P_1) \times \sigma_2^2} \quad (11)$$

2.2 更新阈值与迭代终止条件

提出迭代 Otsu 法,用于寻找可有效区分 LED 光斑和背景的图像阈值。针对第 j 帧 LED 光斑图像,在第 1 次迭代计算时将阈值 T_{new} 更新为零,之后,根据式(11),仅对图像中灰度值大于等于 T_{new} 的图像像素点计算目标函数 $\sigma_{\text{LED}}^2(T)$,找到使 $\sigma_{\text{LED}}^2(T)$ 取最大值对应的像素灰度等级 T' 。此时,更新 T_{new} 的值,令 $T_{\text{new}} = T'$,并判断 T_{new} 是否满足迭代终止条件;若不满足,则重复上述步骤,继续计算目标函数取最大值时对应的像素灰度等级 T' 并更新 T_{new} ;若满足,则停止迭代, T_{new} 的值不再变化。迭代停止时,令 $T_{\text{right}}^j = T_{\text{new}}$, T_{right}^j 即为迭代 Otsu 法计算得到的第 j 帧图像的阈值,该阈值能够正确分割出 LED 前景光斑。值得注意的是,在计算目标函数最大值时,与 Otsu 法对 255 个像素灰度等级全部进行计算不同,提出的迭代方法在每一次计算 $\sigma_{\text{LED}}^2(T)$ 时需遍历的像素灰度等级为 $L - T_{\text{new}}$ 个 ($T = T_{\text{new}}, T_{\text{new}} + 1 \dots L - 1$)。

此外,考虑到现阶段桥梁视觉测量普遍采用标准圆形 LED 灯作为标靶,因此,在迭代计算过程中可将阈值化后灰度值大于等于 T_{new} 的 LED 标靶像素点区域的圆形度作为第 1 个迭代终止条件。其中,圆形度用于表征光斑图像趋近于理想圆形的程度,其取值与区域面积、周长有关。前景圆形度 R_d 定义为^[20]

$$R_d = \frac{F^2}{4 \times \pi \times A} \quad (12)$$

式中: F 为前景区域的图像周长; A 为前景区域的图像面积。

圆形度公式建立的理论依据是:对于标准圆来说,由其周长 F 计算得到的半径 r_1 ($r_1 = F/(2\pi)$) 和由其面积 A 计算得到的半径 r_2 ($r_2 = \sqrt{A/\pi}$) 相等。而

当周长相同时,标准圆的面积最大,非圆形图形的面积小于标准圆,由此由非圆面积计算得到的半径 r_2 也会小于标准圆半径。因此,可用待测图形 r_1 与 r_2 比值接近 1 的程度来判断当前区域接近标准圆的程度,即圆形度。由此可知,当前景图像为理想圆形时,其圆形度等于 1;当前景为非圆凸多边形时,其圆形度大于 1;而当前景为凹多边形时,其圆形度小于 1。考虑到 LED 标靶受强光、雾气等干扰后,图像经灰度转换和阈值分割得到的光斑图形多为凸多边形,由此给出第 1 个迭代终止条件

$$1 \leq R_d \leq R \quad (13)$$

式中: R 为给定的大于 1 的圆形度参数允许值。当满足上式时,认为阈值分割后前景图像满足圆形度要求;本研究中取 $R=1.2$ 。

但需注意的是,若强光、雾气等外界环境因素产生的中间灰度均匀分布在 LED 光斑周围,即使图像阈值计算错误,灰度值大于等于阈值部分的圆形度也可能接近 1,使图像圆形度满足迭代终止条件,导致迭代提前终止。但此时并未找到正确的图像阈值,即发生误判。为此,迭代 Otsu 法增加帧间面积一致性约束作为第 2 个迭代终止条件:认为振动视频中前后帧 LED 光斑面积不会发生显著变化,因此第 j 帧的前景图像面积 A_j 与第 $j-1$ 帧的前景图像面积 A_{j-1} 满足式(14)。

$$(1 - D_c) \times A_{j-1} \leq A_j \leq (1 + D_c) \times A_{j-1} \quad (14)$$

式中: D_c 为相邻两帧光斑图像面积的偏差,当 $D_c=0$ 时,两帧图像面积相同,考虑到实际应用场景, D_c 取 0.1。

值得注意的是,圆形度允许值 R 与图像面积偏差 D_c 的取值均参考后续悬臂梁试验中雾气、强光干扰条件下 LED 光斑的图像特征来确定。在实际工程应用中,可根据现场环境干扰下 LED 光斑图像阈值分割的结果对圆形度允许值参数和帧间图像面积偏差进行调整,综合考虑计算效率和识别准确性,实现 LED 光斑图像阈值的快速准确求解。例如,若需提高光斑识别准确性,可适当减小圆形度允许值 R ,此时迭代终止条件更为严格;若需提高计算效率,则可增大圆形度允许值 R ,迭代次数随之减少,计算耗时更短;若 LED 帧间光斑图像一致性较好,则可适当减小图像面积偏差 D_c 。

针对提出的迭代 Otsu 法,在迭代计算过程中,仅当前景图像的圆形度与面积一致性同时满足设定的终止条件时,迭代才会终止。

如图 3 所示,迭代 Otsu 法的迭代计算步骤可归纳如下:

1) 输入第 j 帧 LED 光斑图像 I_j ;

2) 对图像 I_j 中灰度值大于等于更新阈值 T_{new} 的像素点计算目标函数 $\sigma_{LED}^2(T)$ (第 1 次迭代时, $T_{new}=0$); 找到使 $\sigma_{LED}^2(T)$ 取最大值的对应像素灰度等级 T' , 更新 T_{new} , 令 $T_{new}=T'$;

3) 计算图像中灰度值大于等于 T_{new} 的像素点区域圆形度 R_d , 判断是否满足式(13)。若满足,跳转到步骤 4); 若不满足,返回步骤 2), 计算新的更新阈值 T_{new} ;

4) 计算图像中灰度值大于等于 T_{new} 的像素点区域面积 A_j , 判断是否满足式(14)。若满足,则认为光斑图像阈值 T_{new} 的计算结果符合预期,令 $T_{right}^j = T_{new}$, 得到第 j 帧图像的最终阈值 T_{right}^j ; 若不满足,返回步骤 2), 计算新的更新阈值 T_{new} 。

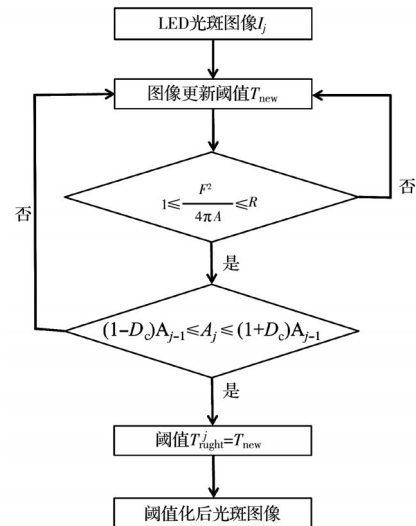


图 3 迭代 Otsu 法计算流程

Fig. 3 Calculation flow of the iterative Otsu method

3 基于迭代 Otsu 法的桥梁结构动挠度监测

提出的低光照条件下基于迭代 Otsu 法的桥梁结构动挠度监测识别方法在求解桥梁测点位移时流程如下:首先对包含 LED 光斑的感兴趣区域 (ROI) 进行双边滤波降噪;随后采用迭代 Otsu 法求解图像阈值,以提取前景光斑;之后通过灰度质心法计算每一帧图像的光斑中心,进而得到标靶的像素位移;最后根据已知标靶的尺寸计算比例因子,将像素位移转换为结构实际位移,即可得到桥梁测点的实际动挠度变化。具体流程如图 4 所示。

值得注意的是,提出的迭代 Otsu 法适用于单个 LED 标靶受环境干扰时的阈值计算;当存在多个 LED 标靶进行结构多点位移测量时,ROI 区域的选取应仅包含单个 LED 标靶图像,再开展后续计算。

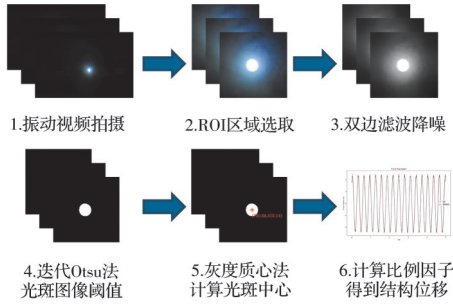


图 4 低光照条件下基于 LED 标靶的桥梁动挠度视觉监测方法

Fig. 4 Bridge dynamic deflection monitoring based on LED target under low light conditions

3.1 图像双边滤波降噪

受相机自身及外界环境干扰的影响,图像在成像、传输过程中难免引入噪声,进而模糊有效信息,降低后续目标位移识别与提取的准确性。因此,在对 LED 光斑图像进行阈值计算前,需先对图像 I 进行双边滤波降噪,滤波后输出图像 K 可表示为^[21]

$$K = \frac{\sum_{\Omega} w(c, d) \times f(c, d)}{\sum_{\Omega} w(c, d)} \quad (15)$$

式中: Ω 代表 (a, b) 的邻域点集合, (a, b) 为图像 I 中任一点的像素坐标; $f(c, d)$ 为 (c, d) 点的灰度值, (c, d) 为 Ω 内任意一点的图像坐标; $w(c, d)$ 为归一化参数, $w(c, d) = w_r(c, d) \times w_s(c, d)$, w_r 与 w_s 分别代表空间邻近度权值和灰度相似度权值,其表达式分别为

$$w_s(c, d) = \exp\left[-\frac{|a-c|^2 + |b-d|^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (16)$$

$$w_r(c, d) = \exp\left[-\frac{|f(a, b) - f(c, d)|^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (17)$$

式中: σ_s 、 σ_r 分别为给定的空间域和灰度域因子。由式(15)~式(17)可知,双边滤波计算结果与像素点邻域的坐标和灰度均相关,因此可在有效去除图像噪声的同时保护图像的边缘信息。

3.2 图像光斑中心计算

采用灰度质心法计算光斑中心。该方法原理简单、计算速度快,对于形状规则、灰度对称且分布均匀的目标光斑(如 LED 光斑),运用该方法计算其光斑中心时精度较高,其计算式为^[22]

$$\begin{cases} x_{\text{cen}} = \frac{\sum_{(a,b) \in S} b \times f(a, b)}{\sum_{(a,b) \in S} f(a, b)} \\ y_{\text{cen}} = \frac{\sum_{(a,b) \in S} a \times f(a, b)}{\sum_{(a,b) \in S} f(a, b)} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $(x_{\text{cen}}, y_{\text{cen}})$ 为计算得到的光斑中心坐标; S 为所有前景像素点的集合; $f(a, b)$ 为图像像素坐标 (a, b)

处的灰度值。

3.3 图像比例因子计算

在计算得到振动视频每一帧的 LED 光斑中心位置后,即可得到 LED 标靶的像素位移;此时需通过比例因子将图像像素位移转换为结构实际位移。在基于视觉方法的结构位移测量中,比例因子定义为图像上一个像素点代表的结构实际长度,单位为 mm/pixel。已知 LED 标靶实际物理尺寸时,比例因子可通过式(19)计算得到^[23]。

$$s = \frac{d_{\text{str}}}{d_{\text{pix}}} \quad (19)$$

式中: d_{str} 为已知 LED 标靶的实际物理尺寸; d_{pix} 为对应的图像像素长度。

4 悬臂梁模型试验

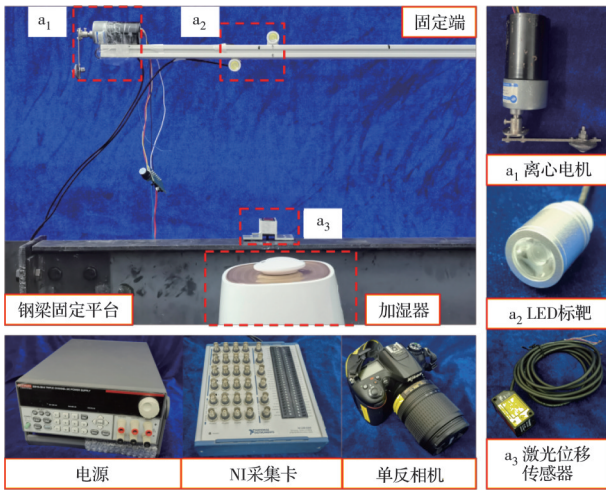
为验证所提出的迭代 Otsu 方法在低光照条件下监测识别结构动态挠度参数的有效性和适用性,采用实验室悬臂梁模型开展试验,探究其在低光照耦合强光、雾气环境干扰下的结构位移识别效果。

4.1 试验设置

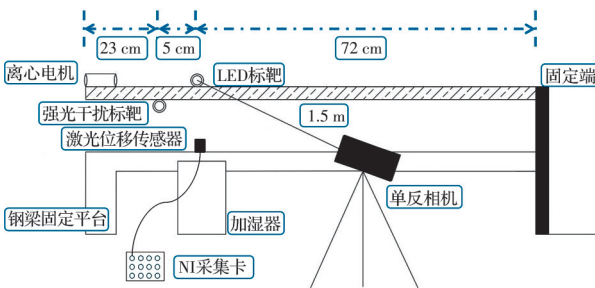
试验模型为长 1 m、截面尺寸为 2 cm × 5 cm 的铝制梁。铝梁一端固定在墙面上,另一端为自由端。在自由端安装离心电机,通过电机转动施加外力带动悬臂梁产生周期振动。在铝梁上方、距自由端 28 cm 处固定一个 LED 光源作为待测目标标靶(额定功率 3 W,直径 2 cm,光斑直径 1.6 cm)。在 LED 标靶正下方、距离悬臂梁 30 cm 处布设 HG-C1400 激光位移传感器(有效测距量程 40 cm,测量精度 0.3 mm),该传感器接入 NI-6363 数据采集卡,用于测量 LED 标靶的竖向动挠度。试验视频采集设备为 Nikon-7200 单反相机,焦距 70 mm,物距约 1.5 m,视频录制分辨率 1 280 × 720,帧率 60 fps;相机通过三角支架固定,并调整至与 LED 标靶高度近似的位置。试验过程中,设置 NI 数据采集卡的采集频率与相机视频录制帧率保持一致。

设置无干扰、强光干扰、雾气干扰 3 种试验工况:强光干扰通过在悬臂梁下方、距离目标 LED 标靶左侧 5 cm 处布设另一同型号 LED 光源实现;雾气干扰通过在目标 LED 标靶前方约 30 cm 处放置家用加湿器实现。试验设备和布置如图 5 所示。

试验中,LED 标靶振动视频均在实验室夜间无外加光照环境下拍摄,以模拟实际桥梁夜间、阴雨雾霾等低光照环境;强光与雾气干扰均在振动开始约 3 s 时引入。试验过程中,通过调整 LED 光斑亮度及相机感光度、光圈、曝光时间等参数,确保 LED



(a) 现场试验装置图及试验仪器

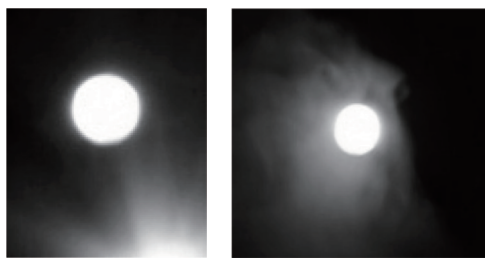


(b) 试验装置布设示意图

图 5 悬臂梁试验设置图

Fig. 5 Experimental setup for the cantilever beam

标靶清晰成像;两种干扰工况下选取的 LED 标靶 ROI 区域如图 6 所示。



(a) 强光干扰 (b) 雾气干扰

图 6 强光、雾气干扰工况

Fig. 6 Strong light and fog interference conditions

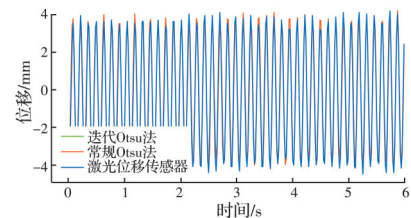
每种试验工况下,分别采用常规 Otsu 法与提出的迭代 Otsu 法计算目标 LED 标靶的动挠度数据;将两种方法的计算结果与激光位移传感器的位移测量结果(基准数据)进行对比,并通过计算标准均方根误差 (E_{NRMS} , normalized root mean squared error) 定量分析两种方法的识别效果,如式(20)所示。

$$E_{NRMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{vision}^i - D_{laser}^i)^2}}{D_{laser}^{max} - D_{laser}^{min}} \times 100\% \quad (20)$$

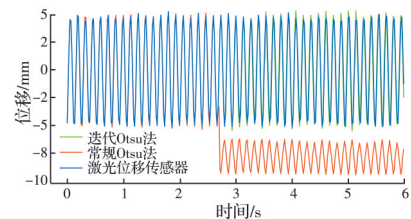
式中: D_{vision} 为基于视觉传感的测量结果; D_{laser} 为基于激光位移传感器的测量结果; D_{laser}^{max} 、 D_{laser}^{min} 分别为 D_{laser} 的最大值和最小值; n 为采样点总数。

4.2 结果分析

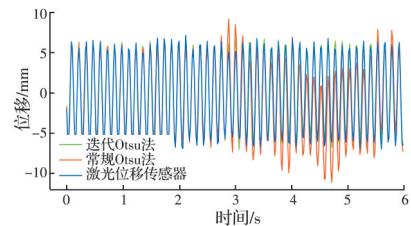
3 种试验工况下,采用常规 Otsu 法与迭代 Otsu 法计算得到的悬臂梁 LED 标靶动挠度识别结果如图 7 所示。可以看出,两种方法在无干扰工况下的识别结果与激光位移传感器测量结果吻合较好(如图 7(a));但在试验开始约 3 s 时引入强光、雾气干扰,常规 Otsu 法计算得到的结构挠度曲线出现不同程度偏移,尤其在强光干扰工况(如图 7(b))下,其位移测量结果出现显著偏差。相比之下,本研究所提迭代 Otsu 法的测量结果与激光位移传感器测量结果在 3 种不同试验工况下的曲线形状、变化趋势和峰值特征点均呈现出良好的一致性。



(a) 无干扰工况挠度曲线



(b) 强光干扰工况挠度曲线



(c) 雾气干扰工况挠度曲线

图 7 无干扰工况、强光干扰工况与雾气干扰工况挠度曲线

Fig. 7 Deflection curve under no interference, strong light interference and fog interference conditions

进一步分析强光、雾气干扰导致动挠度识别结果出现偏差的原因。在强光干扰工况下,由于悬臂梁模型中强光干扰标靶与目标 LED 标靶的相对位置固定,常规 Otsu 法错分的背景灰度恒定出现在左下角(如图 8(b)),最终导致目标 LED 标靶的识别挠度曲线产生固定幅度的向下偏移。但在实际桥梁

的低光照环境中,行驶车辆的照明灯光、桥梁其他位置的较亮光源等环境光相互叠加,强光干扰的形式更为复杂多变,由此产生的中间灰度与 LED 光斑的相对位置会持续变化,此时采用常规 Otsu 法得到的结构挠度曲线偏移多变且无规律。在雾气干扰工况下,中间灰度会随机分布在 LED 目标光斑附近,常规 Otsu 法错分的中间灰度在 LED 标靶光斑周围的大小与位置不断发生改变,使得常规 Otsu 法计算的挠度曲线在不同位置出现无规律偏移。相比之下,迭代 Otsu 法能有效克服此类复杂光源、雾气干扰的影响,准确识别出 LED 标靶的真实动态位移,如图 8(c)、(f)所示。

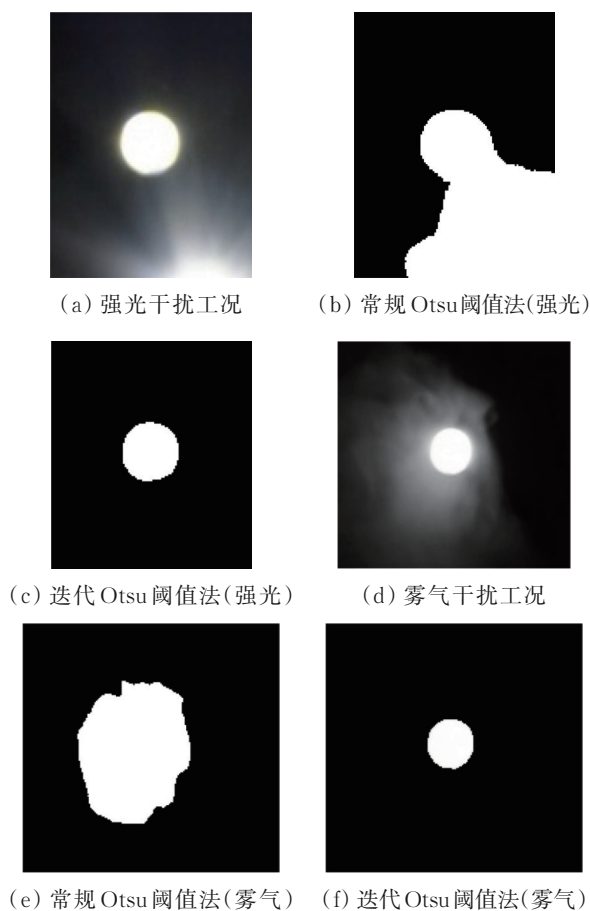


图 8 强光、雾气干扰时 Otsu 法与迭代 Otsu 法阈值分割结果

Fig. 8 Threshold segmentation results of Otsu method and iterative Otsu method under strong light and fog interference

常规 Otsu 法和迭代 Otsu 法的计算结果与激光位移传感器基准数据的 E_{NRMS} 计算结果如表 1 所示。可以看到,无干扰工况下,常规 Otsu 法能够较好地识别并计算出 LED 标靶的挠度曲线,其误差与迭代 Otsu 法相近;但在强光、雾气干扰工况下,常规 Otsu 法的计算误差明显增大。相比之下,无论在有无环

境干扰,迭代 Otsu 法在所有工况下均表现出更优的抗干扰能力和更好的识别效果,相对误差均小于 5%。

表 1 悬臂梁动挠度测量结果的 E_{NRMS}

工况	光斑图像阈值计算方法		%
	常规 Otsu 法	迭代 Otsu 法	
工况 1(无干扰)	4.51	4.34	
工况 2(强光干扰)	71.87	3.69	
工况 3(雾气干扰)	9.56	4.88	

值得注意的是,试验中 LED 标靶的视频拍摄、强光/雾气干扰的施加等操作均在夜间实验室无外加光照环境下进行,以此模拟实际桥梁夜间、阴雨雾霾等光照较差的环境。在实际工程应用中,被测桥梁周围环境可能存在多种复杂光源(如自然光、路灯、景观灯、车辆照明等),大致可分为强光源干扰和弱光源干扰。研究主要聚焦在强光源干扰的消除,而针对弱光源干扰则可以在图像拍摄阶段通过调整相机拍摄参数(感光度、光圈大小、曝光时间),或者在图像预处理阶段通过滤波降噪等手段加以消除,而后再利用该方法针对强光源等干扰进行图像阈值分割处理,消除各类环境因素干扰。

5 结论

针对现有低光照条件下 LED 标靶结合图像阈值方法在面对强光、雾气干扰时 LED 光斑图像无法进行正确阈值分割,进而导致位移视觉测量出现较大偏差的问题,提出一种基于迭代 Otsu 法的桥梁结构动挠度视觉测量方法,并通过室内悬臂梁试验验证了该方法的有效性,在低光照环境下,面对强光、雾气等干扰时,仍可实现结构位移的准确测量。得出如下结论:

1) 提出的迭代 Otsu 法解决了常规 Otsu 法在计算 LED 光斑图像阈值时易受到强光、雾气等外界环境干扰,进而无法进行正确阈值分割的问题。该方法通过多次求解光斑图像 ROI 区域前景阈值,结合光斑圆形度和帧间面积一致性两个迭代约束条件,不断修正和缩小目标灰度阈值范围,最终找到图像前景光斑与背景之间正确的分割阈值,为后续光斑中心的准确测定和提取奠定基础。

2) 为验证方法的有效性和适用性,在室内低光照环境下,在一个悬臂梁结构上布设 LED 视觉标靶,之后分别进行无干扰、强光干扰和雾气干扰 3 种工况试验测试。结果表明:相较于常规 Otsu 法在强光、雾气干扰工况下出现较大偏差的情况,在 3 种不

同工况下,迭代 Otsu 法计算结果与激光位移传感器测量结果挠度曲线的形状、趋势和峰值特点均呈现出良好的一致性。说明迭代 Otsu 法具有更强的抗外界干扰能力和更优的目标识别效果,进而为低光照环境下的结构位移视觉测量提供了一种新的解决方案。

参考文献

- [1] 赵天祺, 勾红叶, 陈莹颖, 等. 桥梁信息化及智能桥梁 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 268-279.
ZHAO T Q, GOU H Y, CHEN X Y, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 268-279. (in Chinese)
- [2] 邓扬, 张强, 钟国强, 等. 桥梁拉索动力响应监测数据质量评价方法分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(5): 208-217.
DENG Y, ZHANG Q, ZHONG G Q, et al. Data quality evaluation method for dynamic response monitoring of bridge cables [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(5): 208-217. (in Chinese)
- [3] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 14-32.
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 14-32. (in Chinese)
- [4] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 129-134.
SHAN D S, LUO L F, LI Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 129-134. (in Chinese)
- [5] WU Z Y, SHENTON H W, MO D, et al. Integrated video analysis framework for vision-based comparison study on structural displacement and tilt measurements [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 05021005.
- [6] SHAJIHAN S A V, HOANG T, MECHITOV K, et al. Wireless SmartVision system for synchronized displacement monitoring of railroad bridges [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(9): 1070-1088.
- [7] LIN C S, HUANG Y C, CHEN S H, et al. The application of deep learning and image processing technology in laser positioning [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1542.
- [8] HAN Y T, WU G, FENG D M. Structural modal identification using a portable laser-and-camera measurement system [J]. Measurement, 2023, 214: 112768.
- [9] NIKFAR F, KONSTANTINIDIS D. Evaluation of vision-based measurements for shake-table testing of non-structural components [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(2): 04016050.
- [10] HO H N, LEE J H, PARK Y S, et al. A synchronized multipoint vision-based system for displacement measurement of civil infrastructures [J]. The Scientific World Journal, 2012, 2012: 519146.
- [11] 徐秀秀, 郭毓, 余臻, 等. 基于机器视觉的柔性臂振动测量研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(增刊1): 129-132.
XU X X, GUO Y, YU Z, et al. Research on vibration measurement of flexible arm based on machine vision [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(Sup 1): 129-132. (in Chinese)
- [12] VICENTE M A, GONZALEZ D C, MINGUEZ J, et al. A novel laser and video-based displacement transducer to monitor bridge deflections [J]. Sensors, 2018, 18(4): 970.
- [13] 李怡岚. 基于视觉的隧道围岩形变量测[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
LI Y L. Deformation measurement of tunnel surrounding rock based on vision [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. (in Chinese)
- [14] TIAN L, PAN B. Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively illuminated LED targets [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1344.
- [15] YANG W J, ZHANG X H, MA H W, et al. Infrared LEDs-based pose estimation with underground camera model for boom-type roadheader in coal mining [J]. IEEE Access, 2019, 7: 33698-33712.
- [16] MAKSYMENKO O P, SAKHARUK O M, IVANYTSKYI Y L, et al. Multilaser spot tracking technology for bridge structure displacement measuring [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(3): e2675.
- [17] 杨威. 掘锚机激光导航方法及其关键技术研究[D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
YANG W. Research on laser navigation method and key technology of anchor digging machine [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2022. (in Chinese)
- [18] 桂金瑶, 胡国华. 那神经网络的激光三角位移传感器光斑自动定位[J]. 激光杂志, 2020, 41(10): 157-161.
GUI J Y, HU G H. Neural network laser triangle displacement sensor spot automatic positioning [J]. Laser Journal, 2020, 41(10): 157-161. (in Chinese)

- [19] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [20] 刘佳浩, 高军伟, 张炳星, 等. 基于机器视觉的水果分级系统[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 112-118.
LIU J H, GAO J W, ZHANG B X, et al. Design of fruit grading system based on machine vision [J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 112-118. (in Chinese)
- [21] 赫中营, 徐闻. 基于泊松噪声-双边滤波算法的桥梁裂缝修补痕迹图像分割方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 232-243.
HAO Z Y, XU W. Image segmentation method of bridge crack repair traces based on Poisson-noise and bilateral-filtering algorithm [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 232-243.
- [22] 袁靖肖, 汪洋. 基于统计学的小尺寸光点质心快速定位算法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3): 407-412.
YUAN J X, WANG Y. Fast centroid location algorithm of small size light spot based on statistics [J]. Computer Simulation, 2022, 39(3): 407-412. (in Chinese)
- [23] 修晟, 张愿, 单伽程. 基于视觉和振动监测数据融合的结构动态位移识别及其试验验证[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 90-98.
XIU C, ZHANG Y, SHAN J Z. Vision and vibration data fusion-based structural dynamic displacement measurement with test validation [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 90-98. (in Chinese)

(编辑 朱备)