

DOI: 10.7672/sgjs2026130047

免标志机器视觉位移监测方法研究*

吴忠明¹, 陈国锋¹, 吴立新², 甄凡炎³, 林 跃⁴

(1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江省人民政府驻上海办事处在沪企业服务中心, 上海 200031; 3. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 4. 中共乐清市委组织部, 浙江 乐清 325600)

[摘要] 机器视觉位移监测技术往往需要预先布设人工标志物, 而人工标志物的安装不仅受到现场环境、施工成本及结构表面特性的多重限制, 在某些恶劣或特殊工况下甚至难以实现。因此, 本研究开展免标志机器视觉位移监测方法研究。针对低光环境下图像细节缺失、亮度不足以及目标结构表面的自然纹理特征难以稳定提取与精准追踪等问题, 提出了一种融合了同态滤波图像增强算法与 RG-DIC 的低光环境免标志机器视觉位移监测方法。为系统评估方法有效性, 开展了低光环境位移监测试验, 并设置主动标志物作为基准予以验证。结果表明, 天然标志物与主动标志物在水平与竖向的位移均方根误差分别为 0.33pixel 和 0.35pixel, 且二者位移呈现较高一致性的动态变化规律, 相关系数均高于 0.75。综上所述, 该免标志机器视觉位移监测方法在无人工标志物的情况下能保持稳定的识别精度与监测可靠性, 且能够有效克服低光环境的不利影响, 为拓展免标志机器视觉监测技术在低光工况下的应用提供了可行的解决方案。

[关键词] 机器视觉; 位移; 监测; 低光环境; 同态滤波法; 数字图像相关

[中图分类号] TU196 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2026)13-0047-08

Research on Marker-free Machine Vision Displacement Monitoring Method

WU Zhongming¹, CHEN Guofeng¹, WU Lixin², ZHEN Fanyan³, LIN Yue⁴

(1. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China;
2. Zhejiang Provincial People's Government Office in Shanghai Enterprise Service Center in Shanghai, Shanghai 200031, China;
3. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
4. Organization Department of the Communist Party of China Yueqing Municipal Committee, Yueqing, Zhejiang 325600, China)

Abstract: Machine vision displacement monitoring technology often requires the pre installation of artificial markers, and the installation of artificial markers is not only limited by multiple factors such as site environment, construction cost, and structural surface characteristics, but may even be difficult to achieve under certain harsh or special working conditions. Therefore, this study conducted research on marker-free machine vision displacement monitoring methods. Specifically, a low-illumination environment marker-free machine vision displacement monitoring method combining homomorphic filtering image enhancement algorithm and RG-DIC is proposed to address issues such as missing image details, insufficient brightness, and difficulty in stably extracting and accurately tracking natural texture features of target structure surfaces in low-illumination environments. To evaluate the effectiveness of the proposed method, low-illumination environment displacement monitoring experiments were conducted, and active markers were set as benchmarks for verification. The results showed that the root mean square errors of horizontal and vertical displacement of natural markers and active markers were 0.33pixel and 0.35pixel, respectively, and the displacement of the two showed a highly consistent dynamic change pattern, with correlation coefficients higher than 0.75. In summary, the marker-free machine vision displacement

* 国家自然科学基金面上项目(52278320)

[作者简介] 吴忠明, 正高级工程师, 硕士, E-mail: wu_zm@hdec.com

[收稿日期] 2026-02-25

monitoring method can maintain stable recognition accuracy and monitoring reliability without artificial markers, and can effectively overcome the adverse effects of low-illumination environments, providing a feasible solution for expanding the application of marker free machine vision monitoring technology in low light conditions.

Keywords: machine vision; displacement; monitoring; low-illumination environments; homomorphic filtering; digital image correlation (DIC)

0 引言

机器视觉位移监测技术因其非接触式、高精度、实时性以及多目标同步监测等突出优势,已成为当前土木工程结构健康监测领域的关键技术手段之一^[1-5]。为实现机器视觉目标识别的精确性和可靠性,往往需要设置人工标志物。然而,对于大跨度桥梁或高层建筑等不易企及的区域,人工标志物安装困难。为此,免标志机器视觉位移监测技术逐渐受到关注^[6]。该技术避免了布设人工标志物带来的复杂流程及潜在干扰,直接利用被测结构表面的自然纹理特征(混凝土表面凹坑、钢结构表面铆钉和螺栓等紧固件)作为天然特征,通过对天然特征进行目标跟踪与匹配,实现结构位移监测。该技术不干扰或改变被测结构及环境,从而保护了被测结构的完整性,在难以或不宜安装人工标志物的应用场景中优势突出。

目前,已有一些学者对免标志机器视觉位移监测技术开展了相关研究。Shao 等^[7]提出一种用于全场三维振动位移测量的非接触式光学位移监测方法,基于立体视觉原理并引入深度学习关键点检测算法,无需设置靶标即可完成目标测量。Bartilson 等^[8]提出一种基于最小二次差分原理的视觉测量技术,与高精度接触式应变计结果进行交叉对比,验证了其在结构表面应力评估中的有效性与工程应用潜力。Li 等^[9]针对大型风力发电机叶片表面纹理特征微弱问题,提出了一种基于免标志视觉监测方法(discriminative scale space tracker, DSST),用于实现对叶片结构的持续跟踪与动态响应特性的高精度提取。然而,前述免标志算法计算过程复杂,需要大量计算资源,对硬件设备的性能要求较高,并且这些算法的实行通常依赖良好的环境条件,并未涉及阴天、夜间等低光恶劣环境,而长期的机器视觉位移监测难以避免遇到低光照情况,易导致图像细节丢失、监测目标跟踪错误,严重影响了机器视觉位移监测精度,限制了其在全天候条件下的应用^[10-11]。因此,低光环境免标志机器视觉位移监测方法尤为值得研究。

综上所述,本研究融合同态滤波增强算法与可

靠性引导的数字图像相关算法(reliability-guided digital image correlation, RG-DIC),提出了一种低光环境免标志机器视觉位移监测方法。首先,开展免标志机器视觉位移监测试验,并布设主动标志物作为基准,分别采集主动标志物与天然标志物的序列图像。随后,采用同态滤波增强算法对低光环境下的图像进行增强提升,系统分析其在图像对比度与纹理细节特征等方面的整体增强表现。最后,针对增强后的图像,采用 RG-DIC 算法计算天然标志物位移,并以主动标志物位移作为真实值,分析天然标志物位移与真实值的绝对偏差与相关性,验证了所述免标志机器视觉位移监测方法在低光环境下的可行性。

1 免标志机器视觉位移监测方法

数字图像相关(digital image correlation, DIC)是一种通过分析序列图像中的像素灰度变化,并结合数值计算以实现结构位移与变形监测的非接触式光学测量技术^[12-13],它将被测物体表面的自然纹理作为天然特征点,通过对比图像所选感兴趣区域(region of interest, ROI)内特征点变形前后的灰度分布变化,实现位移场和应变场的精确计算。该方法与免标志机器视觉测量高度契合,因此,常用于免标志机器视觉位移监测技术中。然而,传统 DIC 算法通常从 ROI 左上角开始逐行或逐列计算每个子区域的位移,计算量大、耗时长,且容易因误差累积导致位移测量精度下降。针对此类问题, RG-DIC 选取高对比度特征子区域作为种子子集进行初始匹配,基于变形连续性假设,利用已知位移预估邻域子集变形范围,并按相关系数降序依次计算各子集位移^[14-16],从而显著提升计算效率与测量精度,有效避免图像因噪声和光照不均匀导致识别错误,更适用于免标志机器视觉位移监测。然而,免标志机器视觉测量方法在长期位移监测任务下的可靠性与准确性,易受环境因素的干扰(阴天、傍晚和夜间等低光环境),会导致图像对比度与亮度降低,使图像点灰度值减小,难以实现天然标志物追踪。因此,需要对低光图像进行增强^[17]。目前,常用的图像增强算法包括:同态滤波增强算法、直方图均

衡化算法 (histogram equalization, HE)、自适应直方图均衡化算法 (adaptive histogram equalization, AHE)、单尺度视网膜增强算法 (single scale retinex, SSR) 和多尺度视网膜增强算法 (multi-scale retinex, MSR)。其中,同态滤波增强算法通过特定滤波器对图像频域的低频部分和高频部分施以差异化的衰减和增强处理,有效缓解光照不均匀或对比度不足的问题,进而提升图像整体质量。鉴于此,本研究融合了同态滤波增强算法与 RG-DIC 算法,形成了一种低光环境免标志机器视觉位移监测方法,流程如图 1 所示。首先,采用同态滤波增强算法提升低光照原始图像的整体对比度与清晰度,从而有效突出天然标志物细节。接着,选择增强图像中图像特征明显、对比度高的天然标志物区域作为 ROI。最后,对增强后的序列图像 ROI 实施位移跟踪,应用 RG-DIC 算法获取相应位移信息。相关算法如下。

1.1 可靠性引导的数字图像相关算法

传统 DIC 算法将 ROI 划分若干个尺寸相同的子区域,从 ROI 左上角的第 1 个子区域开始,按照逐行或逐列的顺序依次处理每个子区域,每个子区域均采用全局整像素搜索策略,通过相关系数的最大化实现变形前后子区域的精确匹配,进而获取全

场的位移分布信息。全局整像素搜索方式存在计算量大、耗时长等问题,不仅如此,由于计算顺序始终从左上角子区域开始,当前一子区域相关系数较低或位移预估误差较大时,会导致误差沿计算路径累积传播。为解决上述问题, RG-DIC 算法选取具有高对比度和特征显著的子区域作为种子子集,以保证准确进行初始匹配,利用相邻子区域变形连续的特点,通过已知子集位移预估其邻域子集变形区域,避免全局搜索从而提升计算效率,并按照相关系数从高到低的顺序完成各子区域的位移计算,从而有效抑制误差传播,提高计算精度。具体而言:首先,与传统 DIC 算法类似, RG-DIC 算法将 ROI 划分为若干尺寸相同的子区域,但优先选择包含高对比度和显著纹理特征的子区域作为种子子集以开始计算;其次,对每个种子子集采用全局搜索策略,通过变形前后子集的相关系数峰值确定其位移,并对种子子集相关系数实施降序排列;接着,选取最优子集 (相关系数最大的子集),基于相邻子区域变形连续性假设,利用该最优子集的位移预估其上下左右 4 个邻域子集的变形范围,并分别计算各邻域子集的相关系数和位移;然后,通过亚像素迭代对相关系数最大的邻域子集进行连续逼近以精确求解位移,同时重新对所有子集的相关系数排序;最

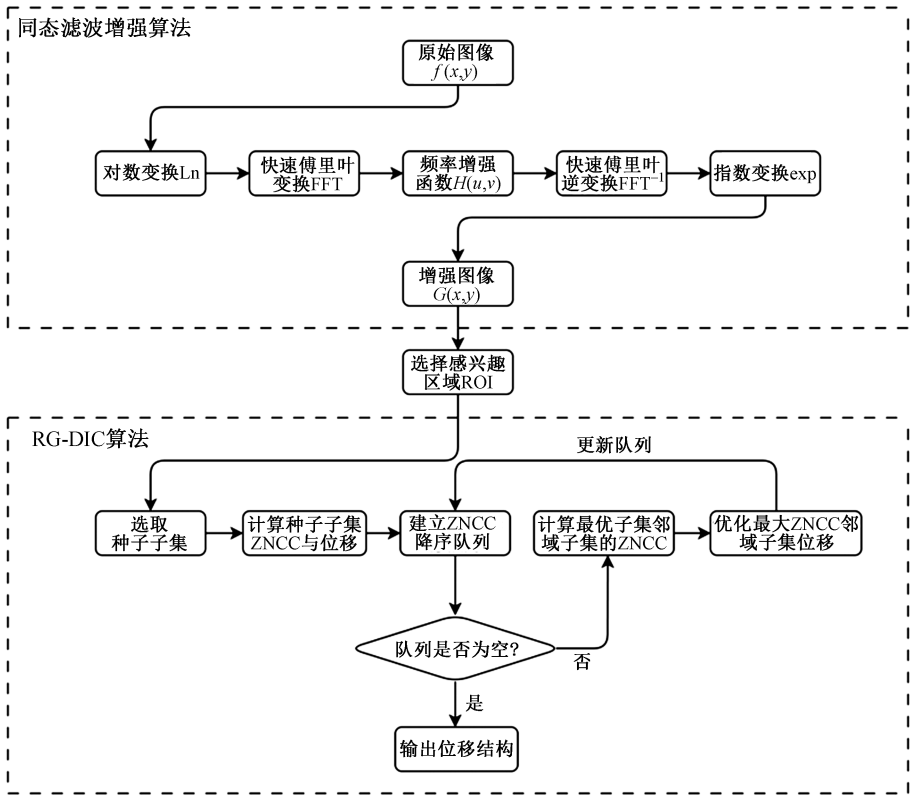


图 1 低光环境免标志机器视觉位移监测方法流程

Fig. 1 Flow chart of marker-free machine vision displacement monitoring method under low-illumination environment

后,根据最大相关系数重复执行上述过程,直至所有子集完成计算并输出全场位移分布结果。

目前,常见的图像匹配相关系数包括:归一化互相关(normalized cross-correlation, NCC)、误差平方和(sum of squared differences, SSD)、零均值归一

化互相关(zero mean normalized cross-correlation, ZNCC)等。其中,ZNCC 对因光照变化而引起的整体灰度线性改变呈现较低的敏感性,抗干扰能力强、计算精度稳定,故得到广泛应用。其计算公式如下:

$$\text{ZNCC} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_M] \times [g(x',y') - g_M]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_M]^2} \times \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_M]^2}} \right\}^2 \quad (1)$$

$$f_M = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y)] \quad (2)$$

$$g_M = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y')] \quad (3)$$

式中: M 为子区域像素尺寸; $f(x,y)$ 为原始图像某点的灰度值; $g(x',y')$ 为变形后图像某点的灰度值; f_M 为原始图像平均灰度值; g_M 为变形后图像的平均灰

度值。由式(1)可见,ZNCC 系数计算过程涉及复杂的乘法与开方运算,导致整体计算难度增加,难以高效实现相关系数最小化,因此,可采用零均值归一化最小平方差和相关系数(zero-normalized sum of squared differences criterion, ZNSSD)提升计算效率,计算公式如下:

$$\text{ZNSSD} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{f(x,y) - f_M}{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_M]^2} - \frac{g(x',y') - g_M}{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_M]^2} \right\}^2 = 2 - 2\text{ZNCC} \quad (4)$$

可见,ZNCC 与 ZNSSD 在函数形式上具有高度的线性相关性。因此,计算时可先以最小化 ZNSSD 为目标函数进行优化求解,继而依据式(4)的线性转换关系求得 ZNCC 系数,最终将该相关系数作为评定匹配点可靠性的量化指标,用于 RG-DIC 算法中的子区域相关性计算。

1.2 同态滤波增强算法

同态滤波增强算法是一种在频域中对图像进行增强的技术^[18]。该算法基于图像的成像物理模型,将原始图像分解为入射分量和反射分量,即:

$$h(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y) \quad (5)$$

式中: $h(x,y)$ 为原始图像; $i(x,y)$ 为图像中的入射分量; $r(x,y)$ 为图像中的反射分量。入射分量主要来源于外部光照条件,在图像频域中对应低频成分;而反射分量则与物体本身的材质和表面特性密切相关,表现为频域中的高频成分。同态滤波图像增强算法的核心在于对图像的不同频域进行细致分离和独立处理,以达到增强图像的效果。该算法流程如图 1 所示。首先,通过对原始图像施加非线性对数变换,将乘性分量转变为加性形式,以实现入射分量与反射分量的分离。接着,利用快速傅里叶变换将 2 个分量转换至频域。然后,通过同态滤波频率增强函数,对图像的高频与低频部分实施针对性差异化处理。最后,借助快速傅里叶逆变换与指数变换,将处理结果恢复为图像信号,生成最终的增强图像。在低光环境下,图像频域的高频部分

包含了图像的细节与边缘信息,而低频部分包含与图像内容无关的随机噪声与没有明显边缘或纹理的区域。需针对性地抑制低频入射分量并增强高频反射分量,从而显著改善图像的整体质量。因此,将高斯高通滤波器的传递函数引入同态滤波框架,将其作为核心的增强函数,定义如下:

$$H(u,v) = 1 - e^{-\frac{D(u,v)}{2D_0^{2n}}} \quad (6)$$

式中: $D(u,v) = \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}$, 为频率 (u,v) 到中心频率 (u_0,v_0) 的距离; D_0 为截止频率。该增强函数能有效地增强图像的反射分量,同时减少入射分量的影响,突出图像的边缘和细节,能够显著改善图像在低光环境下的视觉质量。

2 试验与结果分析

2.1 场地布置

为验证所述低光环境免标志机器视觉位移监测方法的有效性与可行性,本研究在某 5 层建筑屋面开展试验。试验布置如图 2 所示,相机安装在西南角,镜头焦距为 180mm,分辨率为 1 024×1 024 像素。距离相机约 90m 处的东北角栏杆为天然标志物,同时增设主动靶标(LED 灯珠)作为主动标志物,以进行监测结果交叉验证。试验以 1 次/s 的采样频率获取图像数据,采用模板匹配法对主动标志物进行识别,天然标志物则采用 RG-DIC 算法进行位移跟踪。值得一提的是,本研究所使用的天然标志物始终维持其原始物理形态与表面属性,未施加

任何人工标记、涂层或其他形式的干预性处理,从而保证试验环境与现实应用场景的一致性,以客观地评估该方法在真实、复杂工况下的实际性能。

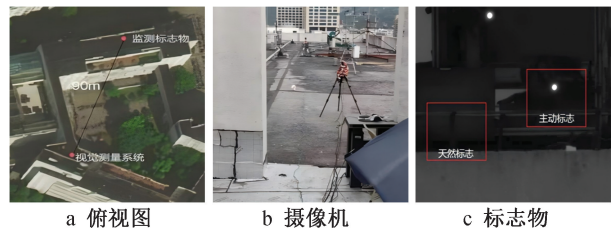


图2 试验布置

Fig. 2 Experimental layout

2.2 图像增强

作为示例,某正午时刻与夜晚时刻的两帧图像如图3所示。可见,在正午时刻,除主动标志物外,

$$cg = \frac{\sum_{x=2}^{m+1} \sum_{y=2}^{n+1} \{ [f'(x,y-1) - f'(x,y)]^2 + [f'(x-1,y) - f'(x,y)]^2 + [f'(x,y+1) - f'(x,y)]^2 + [f'(x+1,y) - f'(x,y)]^2 \}}{4(m-2)(n-2) + 3[2(m-2) + 2(n-2)] + 4 \times 2}$$

(7)

$$H = - \sum_{i=1}^L p_i \log_2 p_i$$

(8)

式中:cg为对比度梯度;m和n为图像x和y方向像素尺寸; $f'(x,y)=f(x-1,y-1)$, $2 \leq x \leq m+1, 2 \leq y \leq n+1$;H为图像熵; p_i 为该像素值在图像中出现的频率;L为像素值的总数。图像评价指标统计数据如表1所示。可见,夜晚图像的对比度为19.88,仅为正午时刻图像对比度的31.54%,表明夜间图像明暗差异微弱、边缘模糊,无有效特征。夜晚图像熵值(4.54)较正午(6.50)降低30.15%,说明夜间环境严重制约了图像的信息丰富度,光照不足导致图像纹理细节丢失,边缘轮廓模糊不清,致使天然特征点的提取与匹配难度显著增加,表明夜间低光环境会削弱免标志机器视觉位移监测的可行性。

女儿墙、栏杆等建筑构件均清晰可见,可作为免标志机器视觉位移监测的天然标志物。然而,在夜晚低光环境下,虽主动标志物因其自身发光特性仍可保持较高的成像质量,但栏杆已无法辨识,女儿墙仅能勉强辨识出其大致轮廓,严重缺乏清晰的边缘与纹理细节,无法为免标志机器视觉位移监测提供天然标志物。为进一步客观评估图像质量,本研究采用对比度与图像熵作为图像质量量化评价指标。其中,对比度主要用于衡量图像清晰程度,其数值大小直接表征图像中明暗区域的差异显著性,数值越高,则图像细节表现越清晰锐利;图像熵则用于表征图像的信息丰富度与纹理复杂性,熵值越高,表明图像所承载的信息量越大,有效视觉内容越丰富。其定义如下:

表1 图像评价指标统计

Table 1 Statistics of image evaluation metrics

图像处理	对比度	图像熵	PSNR	SSIM
正午原图	63.04	6.50	—	—
夜晚原图	19.88	4.54	—	—
同态滤波算法增强图	24.52	5.43	18.27	0.60
HE增强图	63.80	6.56	6.08	0.23
AHE增强图	1.03	4.54	24.94	0.93
SSR增强图	22.12	4.57	8.96	0.27
MSR增强图	22.19	4.65	8.96	0.27

同态滤波算法的增强性能,本研究还采用4种典型图像增强算法(HE算法、AHE算法、SSR算法和MSR算法)作为对比参照。HE算法依据图像灰度级的统计分布特性,对直方图进行全局性调整,实现图像对比度增强,从而使细节信息得以更清晰地呈现。AHE算法是对传统直方图均衡化方法的一种重要改进,通过将图像划分为若干区域,对每个区域独立进行直方图均衡化操作,从而显著增强图像中的局部细节与边缘特征。SSR算法通过模拟人眼对比度感知机制,对图像亮度和色度信息进行协同优化,提升图像的视觉质量。MSR算法是对SSR算法的扩展,通过在多个尺度上进行处理,增强图像的对比度和细节,改善图像在不同光照条件下的视觉效果。以图3b夜晚图像为例,各算法得到的增强图像如图4所示。如图4a所示,同态滤波算法增强图像在保留高亮度区域(主动标志物)细节特征的同时,暗部区域的纹理信息清晰度与结构特征完整性均得到显著增强,处理后图像的建筑构件(栏

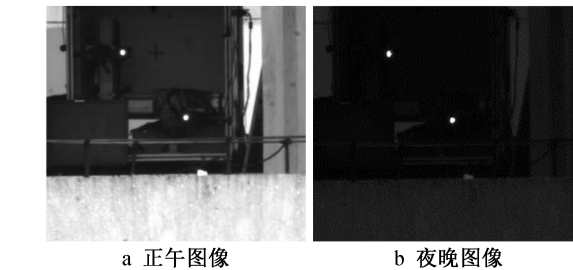


图3 不同时刻的原始图像

Fig. 3 Raw images collected at different times

针对夜间图像整体对比度偏低、细节层次模糊及噪声水平较高等问题,本研究采用同态滤波算法对低光夜间图像进行增强处理。此外,为全面评估

杆、女儿墙)对比度明显提升,其边缘清晰度与纹理辨识度也得到有效改善,可为后续免标志机器视觉位移监测提供更可靠的天然纹理特征。对于 HE 图像增强算法(见图 4b),虽然图像暗部的对比度得到增强,但由于算法的全局性质致使图像亮部细节缺失,并放大噪声导致图像失真。对于 AHE 算法增强算法(见图 4c),图像整体亮度提升不明显,仍保持原有低光环境图像的灰度特征。此外,主动标志物经处理后亮度反而下降,这是由于大部分区域的灰度值较低,因均衡化过程优先增强暗部区域,从而导致高亮度区域的动态范围被压缩,造成主动标志物等亮区出现明显的亮度衰减现象。SSR 算法虽然显著增强了背景细节和纹理,但在图像灰度幅值较高的区域易引入噪声干扰,严重劣化整体的图像质量(见图 4d)。与 SSR 算法类似,MSR 算法同样增强了图像的亮度和细节,尤其是在背景纹理方面,效果较为清晰,然而,在图像灰度梯度剧变区域仍存在显著的噪声干扰(见图 4e)。

类似地,采用对比度和图像熵作为量化指标,以综合评价增强图像质量。此外,为进一步分析图像增强效果,还采用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性(structure similarity index measure, SSIM)作为图像增强效果评价指标。PSNR 通过计算最大信号功率与噪声功率的比值来量化失真程度,其值越高,代表图像质量保留得越完整。而 SSIM 则从结构、亮度及对比度 3 个维度评估增强图像与原始图像的一致性,其指数越接近于 1,表明结构保真度越高。其定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left\{ \frac{\max[f(x,y)]^2}{\frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [f(x,y) - G(x,y)]^2} \right\} \quad (9)$$

$$\text{SSIM}(a,b) = \frac{(2\mu_a\mu_b + C_1)(2\sigma_{ab} + C_2)}{(\mu_a^2 + \mu_b^2 + C_1)(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + C_2)} \quad (10)$$

式中: $G(x,y)$ 为增强图像坐标为 (x,y) 点的灰度值; μ_a 和 μ_b 为原始图像和增强图像的亮度平均值; σ_a^2 和 σ_b^2 为原始图像和增强图像的对比度方差; σ_{ab} 为原始图像和增强图像的对比度协方差; $C_1 = (K_1L)^2$ 和 $C_2 = (K_2L)^2$ 是常数,为避免计算过程中分母出现零值, K_1 和 K_2 一般分别设定为 0.01 和 0.03。增强图像的对比度、图像熵、PSNR 和 SSIM 也列于表 1。可见,AHE 算法虽在 PSNR 和 SSIM 两项指标表现最佳,但图像熵仅为 4.54,与原始图像无显著差异,更甚的是,对比度仅为 1.03,下降 90% 以上,表明 HE 算法在低光环境下的图像增强性能存在明显局限,难以满足实际应用的需求。HE 算法在对比度与图像熵两项指标表现最优,达到正午图像的水平,但 PSNR 仅为 6.08,SSIM 更是不足 0.3,在几类算法中表现最差,表明图像出现了明显的失真和信息丢失。相较于其他算法,同态滤波算法在各项评价指标中均位列第 2,展现出优异的综合性能。经同态滤波算法增强处理后,图像对比度由原始图像的 19.88 提升至 24.52,相对提升幅度为 23.34%,同时,图像熵从 4.54 增至 5.43,相对提升幅度为 19.60%,表明该算法能够显著增强图像中的纹理细节。尽管与正午图像相比,增强后图像的对比度和图像熵仍存在差距,但已能清晰辨识建筑构件的几何轮廓与表面纹理特征,符合免标志机器视觉位移监测方法要求。值得注意的是,同态滤波算法在改善 PSNR、图像熵与对比度的同时,仍有效保持图像的结构一致性,实现了图像增强过程中噪声抑制与细节保留的良好平衡,是一种有效的低光照图像增强方法。

2.3 位移跟踪

为验证所述免标志机器视觉位移监测方法的实际性能,本研究选取光照条件具有显著差异的白天(12:00—15:00)与夜晚(18:00—21:00)2 个时段的数据,通过跨光照条件对比验证该方法的稳定性与适应性。白天图像具有理想的对比度与丰富的



图 4 增强图像

Fig. 4 Enhanced images

细节特征,能够满足免标志机器视觉位移监测的技术要求,故白天图像不作预处理;而夜晚低光环境下采集的图像则使用同态滤波算法进行处理,以提升图像对比度和改善细节表征性能。主动标志物与天然标志物的位移监测结果如图 5 所示,无论是白天还是夜晚时段,主动标志物与天然标志物的位移轨迹基本吻合,位移变化趋势表现出高度一致性,位移监测结果保持较好的相关性,表明该免标志位移监测方法在不同光照条件下均具备稳定的测量能力与可靠性,能够有效克服环境光照变化对测量精度的影响,验证了其具备较好的可行性。为定量评估免标志机器视觉位移监测方法的性能,以主动标志物的位移作为位移真实值,天然标志物的位移作为位移估算值,计算了均方根误差(root mean square error, RMSE) 和 相 关 系 数 (correlation coefficient, CC)。其定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i' - y_i')^2}$$

(11)

$$CC(x', y') = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i' - \bar{x}') (y_i' - \bar{y}')}{\left[\sum_{i=1}^N (x_i' - \bar{x}')^2 \sum_{i=1}^N (y_i' - \bar{y}')^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

(12)

式中: N 为样本数量; x_i' 为主动标志物位移; $\bar{x}'$ 为主动标志物位移均值; y_i' 为天然标志物位移; $\bar{y}'$ 为天然标志物位移均值。

位移误差与相关性分析结果如表 2 所示。可见,对于白天时段,位移真实值与估算值在水平向和竖向的相关系数分别达到 0.84 和 0.87,表明两者的位移特征具有高度的一致性;同时,水平向和竖向的均方根误差分别为 0.27pixel 和 0.29pixel,证明 RG-DIC 算法在天然标志物跟踪方面具有优异的可靠性和识别精度。在夜晚时段,水平向和竖向的均方根误差分别为 0.33pixel 和 0.35pixel,控制在合理范围内,水平向和竖向的位移相关系数分别为 0.75 和 0.79,较白天时段降低了约 10%,但仍维持在较强的相关水平,表明即便在低光环境下, RG-DIC 算法仍表现出良好的位移监测稳定性与精度。值得一提的是,位移监测结果显示,主动标志物与天然标志物的竖向位移扰动均大于水平向,该差异可能源于重力场作用下结构动力响应的各向异性特性。在竖直方向上,重力效应与结构微振动发生耦合,放大了该方向的动力响应,从而导致竖向位移监测结果相较于其他方向呈现更为显著的变化。综上所述,在低光环境下, RG-DIC 算法仍能保持稳

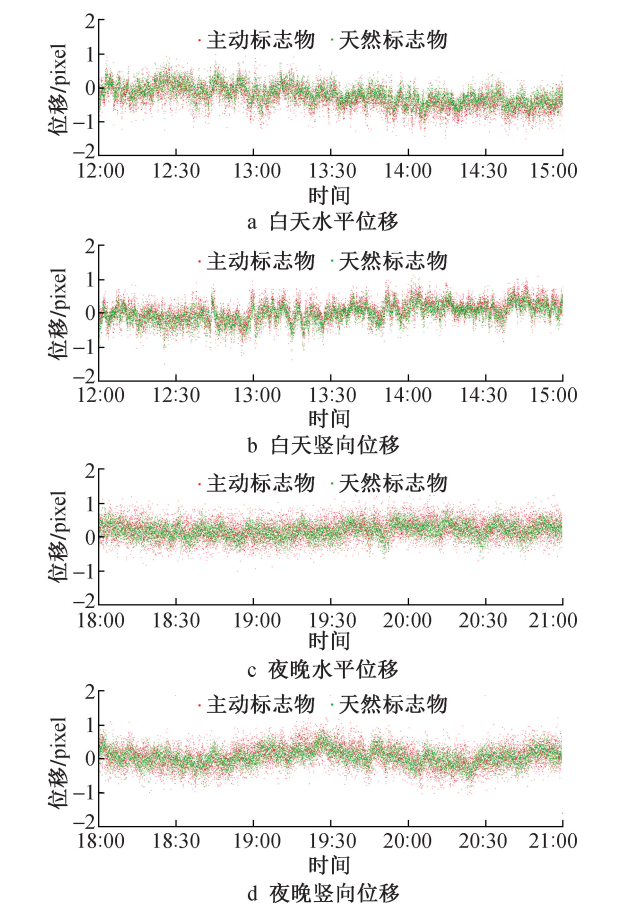


图 5 位移监测结果

Fig. 5 Displacement monitoring results

定的识别精度,可用于天然标志物的位移监测,验证了低光环境免标志机器视觉位移监测方法的可行性。

表 2 位移误差与相关性分析

Table 2 Analysis of displacement error and correlation		
方向	RMSE	相关系数
白天水平方向	0.27pixel	0.84
白天竖直方向	0.29pixel	0.87
夜晚水平方向	0.33pixel	0.75
夜晚竖直方向	0.35pixel	0.79

3 结语

本研究提出了一种基于 RG-DIC 的低光环境免标志机器视觉位移监测方法,开展了免标志机器视觉位移监测试验,主要结论如下。

- 1) 对于白天时段监测,天然标志物位移与主动标志物位移在水平向和竖向的相关系数分别为 0.84 和 0.87,表明两者位移变化趋势基本一致,且均方根误差为 0.27pixel 和 0.29pixel,其精度满足实际工程测量需求。
- 2) 对于夜晚时段监测,同态滤波算法可显著提升图像的对比度和清晰度,经处理后图像对比度与

图像熵提升 20%左右,可为位移监测提供较高质量的图像。

3)利用增强后图像计算天然标志物位移,其与主动标志物位移在水平向和竖向的相关系数分别达到 0.75 和 0.79,表明夜晚时段两类标志物的位移仍保持较高的相关性,其均方根误差在水平向和竖向分别为 0.33pixel 和 0.35pixel,虽略高于白天时段监测水准,但精度仍处于工程适用范围内。

因此,该所提方法能有效解决传统免标志机器视觉位移监测技术在低光环境下性能下降的难题,为低光环境免标志结构位移监测提供了一种切实可行的方案,未来将在不同环境、更大规模的实际工程中开展验证,以更全面评估该方法的长期稳定性。

参考文献:

[1] 鲍跃全,李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019,52(5):1-11.
BAO Y Q,LI H. Artificial intelligence for civil engineering[J]. China civil engineering journal,2019,52(5):1-11.

[2] 张秋,李超,石勇,等. 机器视觉测量技术在边坡自动化监测中的精度分析[J]. 测绘通报,2025(S1):60-63.
ZHANG Q,LI C,SHI Y, et al. Accuracy analysis of machine vision measurement technology in slope automation monitoring [J]. Bulletin of surveying and mapping,2025(S1):60-63.

[3] 张明,燕飞,王鹏涛,等. 基于人工智能的路面病害自动识别方法[J]. 施工技术(中英文),2025,54(12):129-133.
ZHANG M,YAN F,WANG P T, et al. Automatic identification method of pavement diseases based on artificial intelligence[J]. Construction technology,2025,54(12):129-133.

[4] 张冰涵,杨彬,张其林. 基于视觉问答的施工过程视觉语言理解[J]. 施工技术(中英文),2024,53(17):20-24.
ZHANG B H, YANG B, ZHANG Q L. Visual language understanding in construction process based on visual question answering[J]. Construction technology,2024,53(17):20-24.

[5] 王腾义,李丹,张建. 桥梁结构轻量化健康监测思路与技术研发[J]. 土木工程学报,2025,58(6):51-68.
WANG T Y,LI D,ZHANG J. Research of lightweight structural health monitoring strategies and technologies for bridges [J]. China civil engineering journal,2025,58(6):51-68.

[6] KUDDUS M A, LI J, HAO H, et al. Target-free vision-based technique for vibration measurements of structures subjected to out-of-plane movements [J]. Engineering structures, 2019, 190: 210-222.

[7] SHAO Y D,LI L,LI J, et al. Computer vision based target-free 3D

vibration displacement measurement of structures [J]. Engineering structures,2021,246:113040.

[8] BARTILSON D T,WIEGHAUS K T,HURLEBAUS S. Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies[J]. Mechanical systems and signal processing,2015,60:571-582.

[9] LI W R,ZHAO W H, GU J Z, et al. Dynamic characteristics monitoring of large wind turbine blades based on target-free DSST vision algorithm and UAV [J]. Remote sensing, 2022, 14 (13):3113.

[10] 秦良忠,周华飞,卢成原,等. 高层建筑动态位移摄像测量环境影响及自适应滤波降噪研究[J]. 振动与冲击,2016,35(9):190-196,218.
QIN L Z,ZHOU H F, LU C Y, et al. Environmental effects on videogrammetry for dynamic displacement monitoring of high-rise buildings and adaptive filtering for de-noising of displacement measurement data[J]. Journal of vibration and shock,2016,35(9):190-196,218.

[11] SLAKER B A. Monitoring underground mine displacement using photogrammetry and laser scanning[R]. ResearchGate, 2015.

[12] YAMAGUCHI I. Simplified laser-speckle strain gauge [J]. Optical engineering,1982,21(3):436-440.

[13] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical engineering, 1982, 21 (3):427-431.

[14] PAN B. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. Optical engineering,2007,46(3):033601.

[15] BING P, WU D F, XIA Y. Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation[J]. Optics and lasers in engineering,2012,50(4):586-592.

[16] PAN B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement [J]. Applied optics, 2009, 48 (8): 1535-1542.

[17] 周华飞,梁一鸣. 基于虚拟传感器的结构位移视觉测量误差抑制方法[J]. 浙江工业大学学报,2024,52(3):305-311.
ZHOU H F,LIANG Y M. Virtual sensor-based error suppression method for visual measurement of structural displacement [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52 (3): 305-311.

[18] 冯相辉. 一种改进的同态滤波图像增强算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(1):138-145.
FENG X H. An improved homomorphic filtering image enhancement algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (natural science edition), 2020, 32(1):138-145.