

DOI:10.11784/tdxbz202312002

基于计算机视觉的海上漂浮式光伏浮岛运动响应监测研究

练继建^{1,2,3}, 许文靓^{1,2}, 梁超^{1,2}, 姚焯^{1,3}, 邵楠⁴, 段翔宇⁴

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;
3. 天津理工大学海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384; 4. 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056038)

摘要: 近年来国内外建成了多个海上漂浮式光伏电站实证项目, 但相关结构的破坏事故屡屡发生。动位移作为反映结构运行状态和系统性能的重要指标, 对其进行有效监测具有重要意义。为了克服传统监测手段在海上环境中的局限性, 提出了基于计算机视觉的浮岛运动位移监测方法。该方法采用长焦摄像设备进行视频采集, 利用自然标志物进行目标追踪, 运用尺度因子法进行位移计算, 并根据工程特点提出了一种基于三次样条曲线插值的亚像素级位移计算方法。为了对该方法的准确性和实用性进行检验, 设计实施了简单标定试验、漂浮式光伏浮岛水力学模型试验和天津某海域实际光伏浮岛原型监测试验, 并进行了详细的误差分析。结果表明: 基于三次样条曲线插值的亚像素级位移计算方法在精度和计算速度上都比高斯曲面拟合等方法更具优势, 可以更好地缓解整像素模板匹配方法随拍摄距离增大而导致的误差显著增长问题; 当拍摄距离大于等于 100 倍的物距变化时, 可以基本消除浮岛沿光轴方向运动对成像平面内位移的影响; 所提方法在试验室内 20 m 拍摄距离下的归一化均方根误差为 1.78%, 具有较好的精度; 原型监测得到的竖向运动位移的双幅值与波浪高度相近, 归一化相关匹配系数矩阵的峰值十分明显, 亚像素计算拟合效果较好。综合分析认为, 监测结果合理有效, 所提方法在海上漂浮式光伏浮岛运动响应监测方面具有较好的应用价值。

关键词: 计算机视觉; 海上漂浮式光伏; 运动响应; 实时监测; 误差分析

中图分类号: P75; TM615; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2024)11-1211-10

Research on Motion Response Monitoring of Offshore Floating Photovoltaic Island Based on Computer Vision

Lian Jijian^{1,2,3}, Xu Wenliang^{1,2}, Liang Chao^{1,2}, Yao Ye^{1,3}, Shao Nan⁴, Duan Xiangyu⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Marine Energy and Intelligent Construction Research Institute, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 4. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In recent years, multiple empirical projects of offshore floating photovoltaic power stations have been built at home and abroad. However, related structural damage accidents have occurred repeatedly. The dynamic displacement is an important indicator reflecting the operational status and system performance of structures, and its effective monitoring is of significance. To overcome the limitations of traditional monitoring methods in marine environments, a computer vision-based monitoring method for the motion displacement of a floating island was proposed, which used telephoto camera equipment for video capture, selected a natural marker for target tracking, and employed a scale factor method for displacement calculation. In addition, a sub-pixel displacement calculation method based on cubic spline interpolation was put forward according to the engineering characteristics. To verify the accuracy and practical-

收稿日期: 2023-12-02; 修回日期: 2024-04-24.

作者简介: 练继建(1965—), 男, 博士, 教授, jjlian@tju.edu.cn.

通信作者: 梁超, chaos@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金联合重点基金资助项目(U21A20164); 国家自然科学基金资助项目(51909185).

Supported by the Joint Key Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U21A20164), the National Natural Science Foundation of China (No. 51909185).

ity of the proposed method, simple calibration tests, hydraulic model tests for a floating photovoltaic island, and prototype monitoring tests for an actual photovoltaic floating island in certain sea area of Tianjin were designed and implemented, and the corresponding detailed error analyses were also performed. Results show that compared with the methods such as Gaussian surface fitting, the sub-pixel displacement calculation method based on cubic spline interpolation has advantages in terms of accuracy and calculation speed, which can better alleviate the problem of significant error growth caused by an increase in shooting distance in the pixel-level template matching method. When the shooting distance is greater than or equal to 100 times the object distance variation, the influence of the floating island moving along the optical axis on the displacement in the imaging plane can be basically eliminated. The proposed method has a normalized root mean square error of 1.78% at a shooting distance of 20 m in the laboratory, indicating a good accuracy. Furthermore, the double amplitude values of vertical motion displacement obtained from prototype monitoring are quite close to the wave height, the normalized correlation matching coefficient matrix has significant peak values, and the sub-pixel calculation results demonstrate good fitting effects. Based on the comprehensive analysis, it can be concluded that the monitoring results are reasonable and effective, and the proposed method has application prospects in monitoring the motion response of offshore floating photovoltaic islands.

Keywords: computer vision; offshore floating photovoltaic; motion response; real-time monitoring; error analysis

中国的“双碳”目标对清洁能源提出了迫切的需求,太阳能作为主要的清洁能源之一,其大规模开发利用受到了广泛关注.然而,陆上光伏的开发将占用大量的土地资源,内陆水面光伏由于环保、景观等条件限制,可开发总量较小,因此海上漂浮式光伏成为了近年来的研究热点. Ocean Sun 公司、Ocean of Energy 公司、国电投、中集集团等均建设了海上漂浮式光伏电站,其分别位于挪威西海岸、荷兰海域、天津渤海海域和山东半岛海上风电场以及烟台附近海域.但由于强台风、大波浪、易腐蚀的恶劣海洋环境,海上漂浮式光伏电站的破坏事故屡屡发生,亟需研究全面有效的监测技术,对相关结构和系统进行实时监测,以便尽早发现异常,及时采取措施,避免严重事故.

动位移是反映结构运行状态和系统性能的重要指标^[1],就海上漂浮式光伏结构而言,水下锚固点位置偏移^[2]、系泊缆的张拉应力^[3]、浮岛结构和浮岛间连接件的受力和变形^[4]、光伏板日照角度和所受辐射能大小^[5],甚至包括浮岛附属结构的动力学特性和损伤情况^[6]等,均可以通过浮岛动力位移进行评估和分析.目前,动位移的测量方法主要包括接触式和非接触式两类.接触式动位移测量常采用线性可变差动变压器、磁致伸缩位移传感器、速度和加速度传感器等:前两种传感器在海洋环境下难以找到固定参考点,不易安装;速度和加速度传感器由于积分常数难以确定,因而无法将所测数据准确换算为动位移.非接触式动位移测量常采用卫星定位技术、激光多普勒仪、雷达干涉测量技术和计算机视觉技术等:卫星定位技术成本较高且易受干扰产生较大误差;激光多普勒仪的测试距离一般在 5 m 以内,远程测量所需的激

光强度会危害人体健康;雷达干涉测量技术需要在结构上设置反射面,使用不便.

计算机视觉技术因其具有非接触、远距离、全局性、高精度、低成本、易实施等诸多优点而备受关注.随着 Humber 桥梁静动力位移监测的实施^[7],计算机视觉技术已广泛应用于各种桥梁^[8-10]、高层建筑^[11-13]和机械结构^[14-15]的动位移监测项目中.随着技术的迭代更新,自然标志物追踪^[16-17]、亚像素级精度^[18-20]和全局多点监测^[21-23]等技术取得了良好的应用效果.

本文基于计算机视觉技术,提出了适用于海上漂浮式光伏浮岛结构的有效监测方法.室内试验及误差分析表明,本文基于三次样条曲线插值的亚像素级位移计算方法在精度和计算速度上都比高斯曲面拟合等方法更具优势,可以更好地缓解整像素模板匹配方法随拍摄距离增大而导致的误差显著增长问题,且在海上漂浮式光伏浮岛监测的应用场景下,监测对象沿光轴方向运动所造成的误差较小.原型观测表明,测试得到的光伏浮岛竖向运动位移的双幅值与波浪高度相近,归一化相关匹配系数矩阵的峰值十分明显,亚像素计算拟合效果较好,进一步证明了所提方法的合理性和有效性.相关研究将为海上漂浮式光伏浮岛结构的实时监测、状态评估和及时预警提供技术支撑.

1 基本理论

1.1 模板匹配技术

基于计算机视觉进行位移测量的核心技术是目

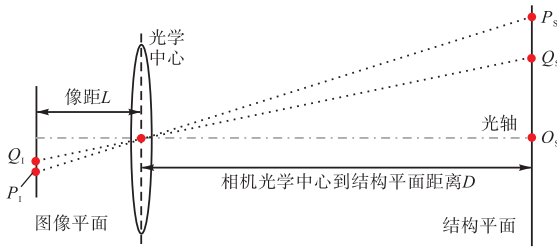


图 2 相机光轴垂直于结构平面时的相机投影模型
Fig.2 Camera projection model when camera optical axis is perpendicular to structure plane

从实际位移到像素点位移的比例因子 r 可以由一维对应关系确定,其可表示为

$$r = \frac{|P_s Q_s|}{|P_1 Q_1|} \quad (7)$$

式中 $|P_s Q_s|$ 和 $|P_1 Q_1|$ 分别为结构表面上已知的物理尺寸和图像中投影对应的像素长度.

当获取到 t 时刻目标中心点的像素点坐标 (x_t, y_t) 和初始时刻图形中心点的像素点坐标 (x_0, y_0) 后,可以推导出目标的水平结构位移 $x(t)$ 和垂直结构实际位移 $y(t)$, 即

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} x_t & x_0 \\ y_t & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 计算机视觉位移测量系统及标定试验

2.1 计算机视觉监测系统

图 3 为基于计算机视觉的海上漂浮式光伏浮岛运动响应监测系统的原理图. 在远离海上漂浮式光伏浮岛的岸边安装带有高倍变焦镜头的摄像机, 然后通过摄像机拍摄测量目标的运动图像. 基于所拍摄的视频, 利用上述的基于三次样条曲线插值的亚像

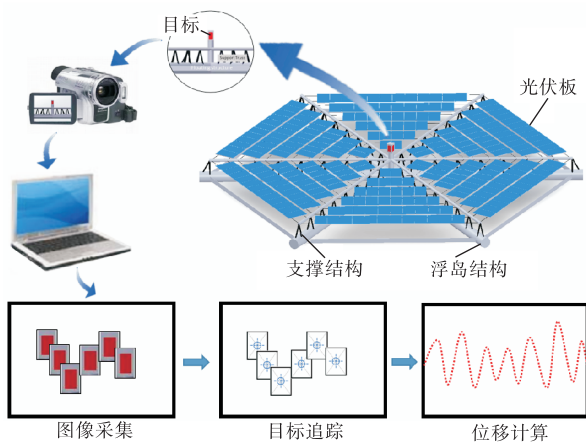


图 3 基于计算机视觉的海上漂浮式光伏浮岛位移测量系统
Fig.3 Displacement measurement system for offshore floating photovoltaic island based on computer vision

素模板匹配算法和尺度因子法求解目标对象的运动历程.

计算机视觉位移测量系统硬件部分主要包括摄像设备、变焦镜头、笔记本电脑和以太网线, 其中摄像设备采集帧率为 30 Hz, 镜头采用 20 倍光学变焦镜头, 最高分辨率为 1920×1080 . 计算机视觉位移时程采用 python 语言及其自带的 OpenCV 方法库进行计算.

2.2 标定试验

为了验证本文方法是否可以更加有效地弥补远距离拍摄导致的误差, 进行了基于简谐运动位移计算的简单标定试验. 使用 MATLAB 在电脑屏幕上生成了一个做简谐运动 ($s = A \sin(\omega t + \varphi), \omega = 2\pi f$) 的动画物块, 运动幅值 $A = 5 \text{ mm}$, 频率 $f = 0.25 \text{ Hz}$. 然后使用计算机视觉对其进行了追踪和位移计算, 拍摄距离分别为 2 m、5 m、10 m 和 20 m, 其中几种距离下不同方法的计算结果时程曲线如图 4 所示.

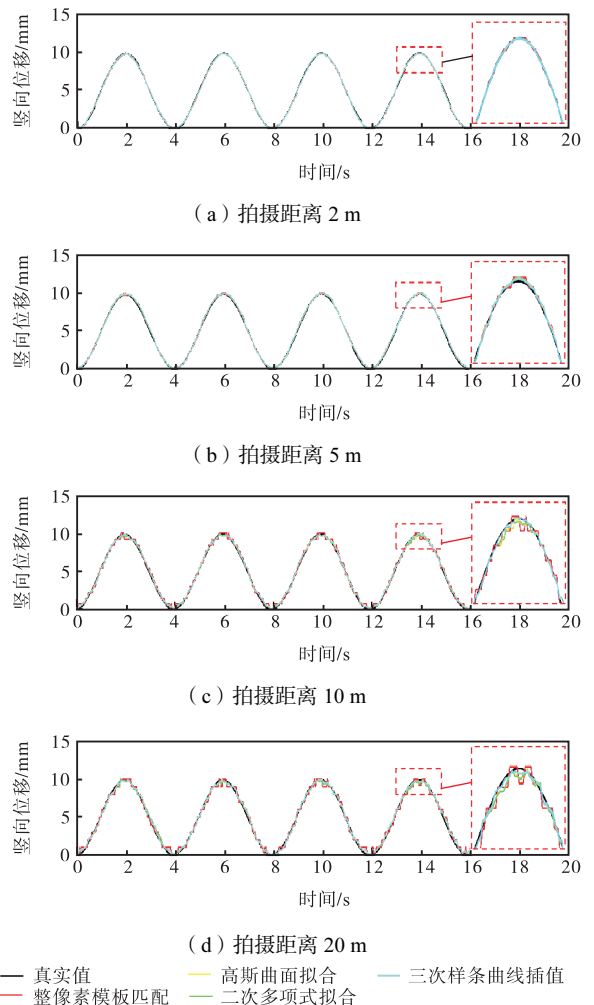


图 4 不同拍摄距离计算结果
Fig.4 Calculation results at different shooting distances

由于整像素模板匹配方法的目标定位只能在整

像素点上,随着距离变大,比例因子 r 会越来越大,当相邻帧间发生的位移小于 r 时就无法跨越整像素点,使得像素点位移没有变化,出现了如图 4(d)中的“阶梯状”不光滑位移变化.相比之下,基于高斯曲面拟合、二次多项式拟合和三次样条曲线插值的方法可以通过计算定位到整像素点之间的亚像素点位置,使计算结果更加连续光滑.由图 4 可以看出,由于基于三次样条曲线插值的方法更加灵活,更好地利用了归一化相关匹配系数沿所求位移方向的变化规律,使得竖向位移结果相比于高斯曲面拟合和二次多项式拟合方法的位移结果更加接近真实值,更好地体现了峰值变化.

2.3 误差分析

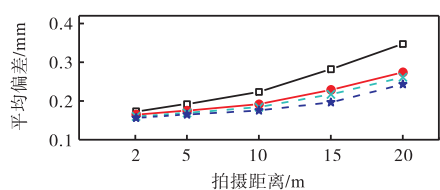
为了对测试结果进行误差分析,分别计算平均偏差 ζ 和均方根误差 RMSE,其计算公式分别为

$$\zeta = \frac{1}{q} \sum |V_i - M_i| = \frac{1}{q} (|V_1 - M_1| + |V_2 - M_2| + \dots + |V_q - M_q|) \quad (9)$$

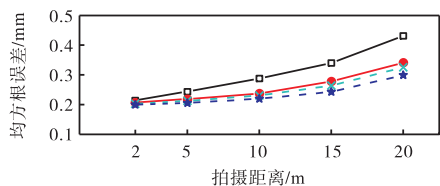
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (V_i - M_i)^2}{q}} \quad (10)$$

式中: V_i 为计算机视觉位移测量系统测量值; M_i 为同时刻对应的标准正弦曲线值; q 为测量值个数; $i = 1, 2, \dots, q$.

整像素模板匹配和其他 3 种方法计算结果的平均偏差和均方根误差对比如图 5 所示.由图 5 可以看出,随着拍摄距离的增大,不同方法的平均偏差和均方根误差均明显增大,说明位移精度对拍摄距离的变化较为敏感.



(a) 不同拍摄距离的平均偏差



(b) 不同拍摄距离的均方根误差

□- 整像素模板匹配 ●- 高斯曲面拟合
×- 二次多项式拟合 ★- 三次样条曲线插值

图 5 不同拍摄距离的误差结果对比

Fig.5 Comparison of error results at different shooting distances

通过对比不同方法可知,在拍摄距离由 2 m 增长

到 20 m 的过程中整像素模板匹配方法的均方根误差增长了约 102%,基于高斯曲面拟合和二次多项式拟合方法的均方根误差增长了约 60%~65%,基于三次样条曲线插值方法的均方根误差增长了约 50%,由此可以看出基于三次样条曲线插值的方法可以更有效降低误差的增长,缓解因拍摄距离远、拍摄设备自身性能问题所导致的误差变大问题,其在 20 m 拍摄距离时平均偏差 ζ 为 0.24 mm,均方根误差 RMSE 为 0.30 mm,具有较高的精度.以整像素模板匹配的运算时间为参照,二次多项式拟合方法的计算时间增长了约 1.67%,高斯曲面拟合增长了约 1.58%,三次样条曲线插值增长了约 0.75%.由此可见,基于三次样条曲线插值方法的亚像素竖向位移求解过程的计算机计算速度也更快,有利于实时监测.

3 基于模型试验的浮岛位移测量系统研究

3.1 模型试验设计与布置

基于天津市某海域的海上漂浮式光伏浮岛原型结构,按照《水运工程模拟实验技术规范》制作了试验模型,模型比尺为 1:25.试验造波类型为不规则波,水深约为 0.46 m,波浪频谱采用 JONSWAP 谱,有义波高约为 0.12 m,谱峰周期为 6.48 s.

为了对计算机视觉方法的位移监测结果进行校核,试验中采用激光位移传感器测距和陀螺仪倾角矫正的方法同步监测浮岛的竖向位移时程,其原理和传感器参数如图 6 所示.

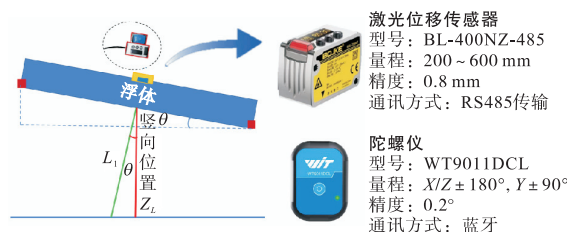


图 6 激光位移传感器及陀螺仪设备参数

Fig.6 Equipment parameters of laser displacement sensor and gyroscope

设定激光位移传感器输出值为 L_1 ,陀螺仪输出 X 轴倾角为 θ_x , Y 轴倾角为 θ_y ,则测点的竖向位置为

$$Z_L = L_1 \cos \theta_x \cos \theta_y \quad (11)$$

由此可计算得到精确的浮岛竖向运动位移时程,以便于与基于计算机视觉方法的测量结果进行对比和误差分析.图 7 给出了模型试验设计及现场布置情况.

为了验证本文方法对浮岛结构运动响应监测的有效性,通过改变拍摄方向和距离,共设置了 3 组试

验,具体拍摄位置如图 8 所示.

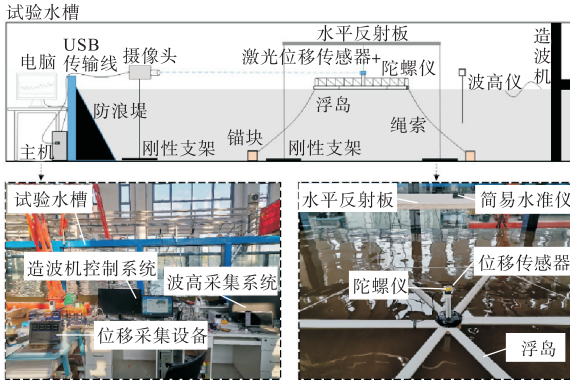


图 7 模型试验设计及现场布置

Fig.7 Model experimental design and on-site layout

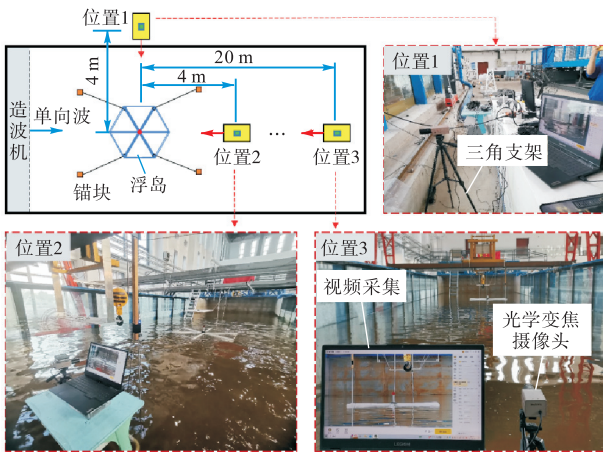


图 8 不同拍摄位置布置

Fig.8 Layout at different shooting positions

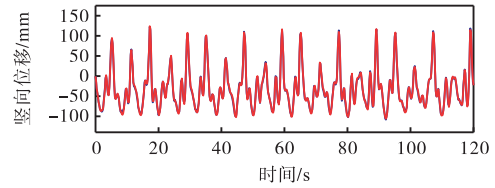
3.2 试验结果

试验中选择浮岛重心正上方的结构作为自然标志物,分别在位置 1、2 和 3 处由激光位移传感器和计算机视觉同步采集该点的竖直方向运动响应时程,结果如图 9 所示.

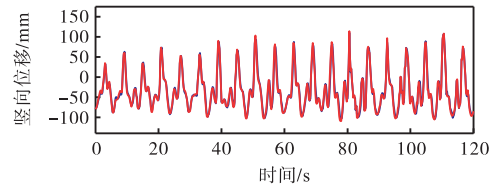
图 10 给出了该工况下由陀螺仪监测得到的浮岛纵摇和横摇时程,以及由计算机视觉技术在位置 1 处测量得到的浮岛水平运动位移时程.浮岛的最大纵摇角度约为 6° ,横摇角度基本为 0° ,最大水平距离(运动最远位置与静止状态位置的距离)约为 10 cm.

3.3 误差分析

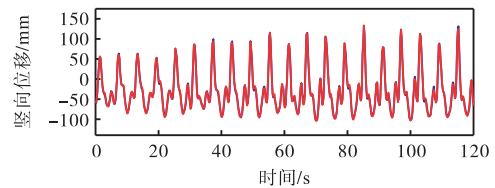
图 9 所示的监测结果表明,基于计算机视觉测量的位移轨迹与接触式传感器测量的轨迹重合度较高.为了更好地评估结果,采用 ζ 、RMSE 和 NRMSE(归一化均方根误差,即均方根误差与位移变化范围的比值)作为评价指标,对计算机视觉技术的监测数据进行误差分析,具体结果如表 1 所示.



(a) 位置 1 处计算浮岛竖向位移结果



(b) 位置 2 处计算浮岛竖向位移结果

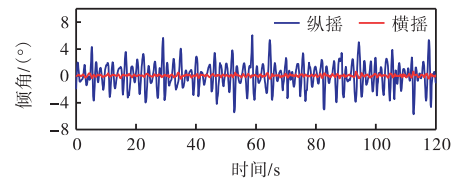


(c) 位置 3 处计算浮岛竖向位移结果

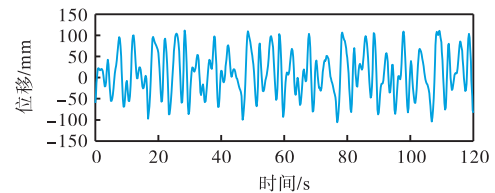
— 位移传感器 — 计算机视觉

图 9 基于接触式传感器和计算机视觉技术的浮岛竖向位移监测结果对比

Fig.9 Comparison of vertical displacement monitoring results of floating island based on contact sensors and computer vision technology



(a) 浮岛晃荡倾角情况



(b) 浮岛水平位移情况

图 10 浮岛晃荡倾角及水平运动响应时程

Fig.10 Slushing angle and horizontal motion response time-history of floating island

表 1 模型试验误差分析

Tab.1 Error analysis of model test

相机位置	ζ /mm	RMSE/mm	NRMSE/%
位置 1	2.37	2.88	1.25
位置 2	5.35	7.30	3.40
位置 3	3.36	4.19	1.78

由图 10 所示的浮岛水平运动情况可知,当拍摄

位于位置 2、3 时测点的物距会发生变化,从而导致测量误差. 图 11 给出了标准透镜物距变化对图像平面内位移影响的理论模型^[28].

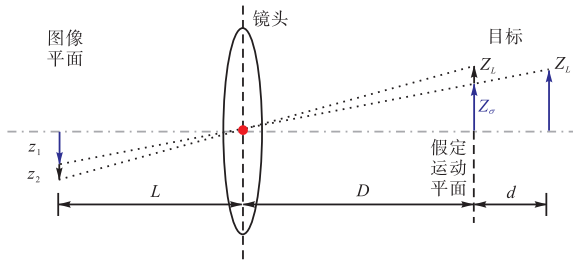


图 11 物距变化对图像平面内位移的影响

Fig.11 Effect of object distance variation on displacement in imaging plane

由平面几何关系可得如下公式,即

$$z_1 = -\frac{L}{D+d}Z_L \quad (12)$$

$$Z_\sigma = -\frac{D}{L}z_1 = \frac{D}{D+d}Z_L \quad (13)$$

$$\Delta\sigma = Z_L - Z_\sigma = \frac{d}{D+d}Z_L \quad (14)$$

相对误差 δ 可表示为

$$\delta = \frac{\Delta\sigma}{Z_L} = \frac{d}{D+d} = \frac{1}{\frac{D}{d}+1} = \frac{1}{\lambda+1} \quad (15)$$

式中: d 为目标物距变化大小; λ 为拍摄距离与目标物距变化大小的比值.

由式(15)可知,相对误差 δ 仅与 λ 有关,若物距变化是固定的,则拍摄距离越远,相对误差越小. 如图 12 所示(图 12 中也包含了曲线的局部放大),随着 λ 的增大,物距变化导致的误差显著降低: $\lambda = 40$ 时, $\delta = 2.44\%$; 当 $\lambda \geq 100$ 时,误差可降至 1.00% 以下; 当 $\lambda = 200$ 时, $\delta = 0.50\%$.

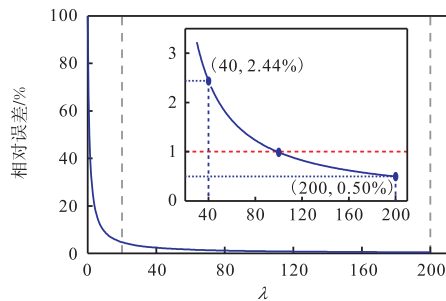


图 12 λ 与位移相对误差的关系

Fig.12 Relationship between λ and relative error of displacement

该工况下浮岛结构的最大水平运动距静止状态位置约为 10 cm,故最大物距变化 $d = 10$ cm. 在位置 1 处,由于拍摄方向垂直于波浪方向,因此几乎

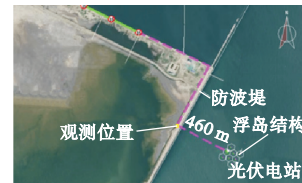
不存在物距变化导致的误差. 与位置 1 处竖向运动位移的各项误差评价指标相比,在位置 2 处($D = 4$ m, $\lambda = 40$)监测得到的竖向运动位移的各项误差评价指标增长了约 150%. 由此可见,当拍摄距离较近时,由于浮岛结构发生水平运动而导致的误差影响确实十分明显.

在位置 3 处($D = 20$ m, $\lambda = 200$),虽然拍摄距离较位置 2 更远,但竖向位移的各项误差评价指标比位置 1 处各项指标仅增长了约 40%. 由此可见,当 $\lambda \geq 100$ 时,物距变化对计算机视觉技术监测结果的影响甚微,虽然相对位置 1 处监测结果的误差仍然偏大,但这是由于拍摄距离增大所导致的合理误差变化.

综上所述,当拍摄距离满足 $D \geq 100d$ 时,可以基本消除物距变化对成像平面内位移的影响. 由于海上漂浮式光伏浮岛在四周系泊力约束下的水平运动较小,且拍摄距离较远,基本不会出现 $\lambda < 100$ 的情况,所以计算机视觉技术在海上漂浮式光伏浮岛的运动响应监测方面具有很好的适用性.

4 海上漂浮式光伏浮岛运动响应原型观测

如图 13 所示,某项目海上漂浮式光伏浮岛位于天津市某海域,距离防波堤东侧约为 460 m,单个浮



(a) 原型地理位置



(b) 测点位置



(c) 现场布置

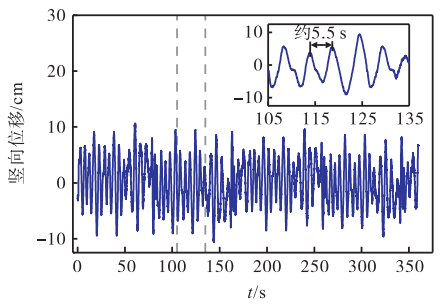
图 13 基于计算机视觉位移测量系统现场布置

Fig.13 On-site layout based on computer vision displacement measurement system

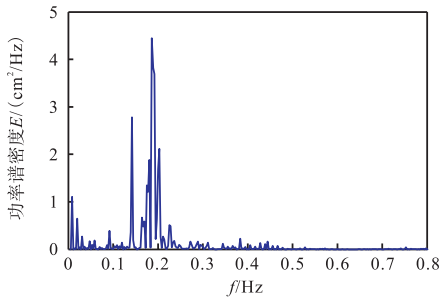
岛结构最大长度为 50 m, 计算机视觉位移测量系统布置在防波堤内, 选用浮岛结构重心正上方的设备箱外壳作为自然标志物。

使用已知的浮岛结构长度及其在成像中对应的像素长度对尺度因子法进行标定. 由于对应像素长度是手动标记的过程, 因此可能会存在人为误差. 为了尽可能地消除这种误差, 采用多次标定求平均值的方法来确定比例因子。

采用上述计算机视觉技术, 于 2023 年 8 月 6 日 (风向: 东风; 风级: 2 级; 浪高: 小浪, 0.21 m) 对浮岛的竖向运动位移进行了监测, 其位移时程和对应的频谱分布如图 14 所示 (图 14 中也包含了曲线的局部放大). 结果表明, 海上漂浮式光伏浮岛在环境荷载作用下, 测点处竖向运动位移在平衡点两侧大致呈随机波动, 优势频率约为 0.18 Hz; 监测时段内测得海上漂浮式光伏浮岛的最大竖向位移双幅值约为 21.36 cm, 与波浪高度相近。



(a) 竖向位移监测时程曲线

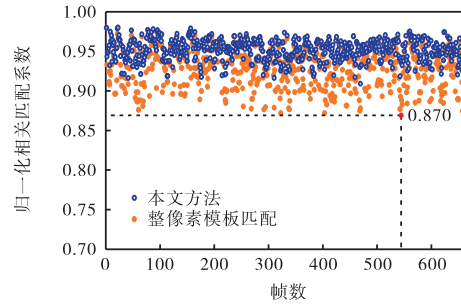


(b) 竖向位移监测时频特征

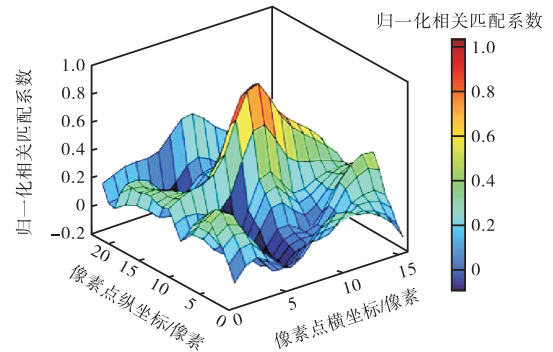
图 14 海上漂浮式光伏浮岛原型竖向位移监测结果

Fig.14 Vertical displacement monitoring results of offshore floating photovoltaic island prototype

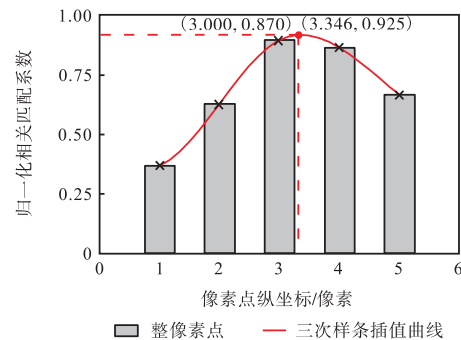
由图 15 可知, 每一帧视频图像在目标匹配过程中都达到了较高的匹配度, 整像素模板匹配方法的归一化相关匹配系数最小为 0.870, 本文方法的最小归一化相关匹配系数达到 0.910. 归一化相关匹配系数矩阵的峰值十分明显, 而且亚像素计算的拟合效果较好, 从侧面证实了监测结果的合理性和有效性。



(a) 追踪自然标志物过程中各帧归一化相关匹配系数最大值



(b) 归一化相关匹配系数矩阵 (基于图 (a) 中最小值 0.870 所在帧数据)



(c) 亚像素级定位计算结果 (基于图 (a) 中最小值 0.870 所在帧数据)

图 15 浮岛位移原型观测结果可靠性评估

Fig.15 Reliability evaluation of prototype observation results of floating island displacement

5 结 语

本文对基于计算机视觉的海上漂浮式光伏浮岛运动响应监测系统和方法开展了相关研究. 通过摄像设备直接进行视频采集, 利用自然标志物进行目标追踪, 并根据工程特点提出了一种基于三次样条曲线插值的位移计算方法, 实现了目标结构运动位移的非接触式测量并达到亚像素级精度. 基于室内试验和误差分析, 验证了该系统和方法在海上漂浮式光伏浮岛结构运动位移监测方面的准确性和有效性. 相关技术在天津某海域的海上漂浮式光伏项目中进行了实际应用, 分析表明监测结果合理可靠. 相关研究将为海上漂浮式光伏浮岛结构的实时监测、状态评估和

及时预警提供重要技术支撑。

在长期的现场实际监测过程中, 光线强度、空气湿度、雾雨影响和摄像设备振动等因素可能会对计算机视觉位移监测造成较大误差, 因此应针对上述不利条件下的监测方法进行进一步研究, 以形成一套成熟、完备的海上漂浮式光伏浮岛运动响应监测系统和方法。

参考文献

- [1] Xu Y, Brownjohn J M W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2018, 8: 91-110.
- [2] Ghigo A, Faraggiana E, Sirigu M, et al. Design and analysis of a floating photovoltaic system for offshore installation: The case study of Lampedusa[J]. *Energies*, 2022, 15(23): 8804.
- [3] 肖越, 王言英. 浮体锚泊系统计算分析[J]. *大连理工大学学报*, 2005, 45(5): 682-686.
Xiao Yue, Wang Yanying. Computational analysis of moored floating-body[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 42(5): 682-686(in Chinese).
- [4] Oliveira-Pinto S, Stokkermans J. Assessment of the potential of different floating solar technologies — Overview and analysis of different case studies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112747.
- [5] 鲁文鹤, 练继建, 董霄峰, 等. 波浪作用对海上漂浮式光伏光照辐射能的影响[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(5): 35-42.
Lu Wenhe, Lian Jijian, Dong Xiaofeng, et al. Effect of sea waves on radiant energy of floating photovoltaic[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(5): 35-42(in Chinese).
- [6] Sharma P, Muni B, Sen D. Design parameters of 10 kW floating solar power plant[C]//National Conference on Renewable Energy and Environment (NCREE-2015). Ghaziabad, India, 2015.
- [7] Stephen G A, Brownjohn J M W, Taylor C A. Measurements of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber Bridge[J]. *Engineering Structures*, 1993, 15(3): 197-208.
- [8] Lee J J, Shinozuka M. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement[J]. *NDT&E International*, 2006, 39(5): 425-431.
- [9] 叶肖伟, 张小明, 倪一清, 等. 基于机器视觉技术的桥梁挠度测试方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(5): 813-819.
Ye Xiaowei, Zhang Xiaoming, Ni Yiqing, et al. Bridge deflection measurement method based on machine vision technology[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(5): 813-819(in Chinese).
- [10] Hu B, Chen W J, Zhang Y Q, et al. Vision-based multi-point real-time monitoring of dynamic displacement of large-span cable-stayed bridges[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 204: 110790.
- [11] Liao W Y, Chen W H, Ni Y Q, et al. Development of a vision-based real-time displacement measurement system for Guangzhou New TV Tower[C]//5th European Workshop on Structural Health Monitoring 2010. Naples, Italy, 2010.
- [12] Ni Y Q, Wang Y W, Liao W Y, et al. A vision-based system for long-distance remote monitoring of dynamic displacement: Experimental verification on a supertall structure[J]. *Smart Structures and Systems*, 2019, 24(6): 769-781.
- [13] Lee J H, Ho H N, Shinozuka M, et al. An advanced vision-based system for real-time displacement measurement of high-rise buildings[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(12): 125019.
- [14] 徐超, 张一凡, 韩晓明, 等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(4): 781-786.
Xu Chao, Zhang Yifan, Han Xiaoming, et al. Machine vision based vibration displacement measurement of large flexible structures[J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2017, 37(4): 781-786(in Chinese).
- [15] Qiu Z C, Zhang X T, Zhang X M, et al. A vision-based vibration sensing and active control for a piezoelectric flexible cantilever plate[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(5): 1320-1337.
- [16] Feng D M, Feng M Q, Ozer E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 16557-16575.
- [17] Yoon H, Elanwar H, Choi H, et al. Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras[J]. *Structural Control and*

- Health Monitoring, 2016, 23(12): 1405-1416.
- [18] Schultz R R, Stevenson R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 996-1011.
- [19] Pan B, Xie H M, Xu B Q, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(6): 1615-1621.
- [20] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6): 062001.
- [21] Feng D M, Feng M Q. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(5): 876-890.
- [22] Ye X W, Yi T H, Dong C Z, et al. Multi-point displacement monitoring of bridges using a vision-based approach[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 315-326.
- [23] Kim S W, Kim N S. Multi-point displacement response measurement of civil infrastructures using digital image processing[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 195-203.
- [24] Haddadi H, Belhabib S. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(2): 185-196.
- [25] 潘 兵, 续伯钦, 陈 丁, 等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法 [J]. 计量学报, 2005, 26(2): 128-134.
- Pan Bing, Xu Boqin, Chen Ding, et al. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 128-134(in Chinese).
- [26] Han Q H, Ma Y X, Feng X X, et al. Displacement response reconstruction of slender flexible structures based on cubic spline fitting method[J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(2): 226-236.
- [27] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39.
- Ye Xiaowei, Dong Chuanzhi. Review of computer vision-based structural displacement monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 21-39(in Chinese).
- [28] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10): 746-757.

(责任编辑:武立有)