引文格式：周学友,王西苑,刘永畅,等. 基于YOLOv5目标检测模型和视觉的垂直位移测量方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 25-28. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.12.005

基于YOLOv5目标检测模型和视觉的垂直位移测量方法

周学友[1]，王西苑[1]，刘永畅[2]，刘亚文[2]，覃　磊[2*]
（1. 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司，河南 南阳 473132；2. 武汉大学遥 感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：基于视觉的结构位移测量方法具有低成本、高精度、多点测量等优点，在实际工程中得到了广泛的应用。提出基于YOLOv5目标检测模型和视觉的封闭空间建筑物垂直位移测量方法，该方法利用YOLOv5目标检测模型识别和提取标志物兴趣区域，减少了后续标志物定位与跟踪的计算量。以基准点反算CCD相机架设的观测点位移量，并归算由相邻帧间标志物圆心像素变化转化的垂直位移值，实现观测点移动状态下封闭空间建筑物位移测量。实验结果表明，该方法得到的垂直位移测量的最大误差小于0.16 mm，能够满足工程结构垂直位移测量与监测的需要。

关键词：垂直位移测量；YOLOv5目标检测模型；视觉；封闭空间建筑物
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0025-04

Vertical Displacement Measurement Method Based on YOLOv5 Object Detection Model and Computer Vision

ZHOU Xueyou[1], WANG Xiyuan[1], LIU Yongchang[2], LIU Yawen[2], QIN Lei[2]
(1. Qushou Branch of China South-to-North Water Diversion Middle Route Co., Ltd., Nanyang 473132, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The displacement measurement method based on computer vision has advantages like low cost, high accuracy and multi-point measurement, which have been widely applied in practical engineering. We proposed a vertical displacement measurement method for enclosed space buildings based on the YOLOv5 object detection model and computer vision, which using the YOLOv5 object detection model to identify and extract the interest region of target, reducing the computational cost of target center point localization and tracking. We used the reference point to inversely infer the displacement of the observation point mounted with the CCD camera, and calculated the vertical displacement value converted from the center pixel changes of targets.Finally, we achieved displacement measurement of enclosed space buildings. The experimental results show that the maximum error of vertical displacement measurement obtained by this method is less than 0.16mm, which can meet the needs of vertical displacement measurement and monitoring of engineering structures.

Key words: vertical displacement measurement, YOLOv5 object detection model, computer vision, enclosed space building

视觉位移测量可分为基于单目、双目和多目视觉的位移测量方式，由于单目视觉位移测量方式仅需要一台相机进行拍摄，视角相对较大，可采集到的数据点分布广泛，且计算简单方便，更适用于实时监测。文献[1-2]提出将平面棋盘格靶标和PnP算法相结合，建立了一套单目视觉测量方法,用于结构位移的非接触测量。文献[3]提出一种基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量方法，采用单目相机对圆形和正弦条纹组合图案进行连续成像，实现结构三维振动的同步测量。文献[4]则通过在复杂地下交通枢纽工程位移检测中对比机器视觉和测量机器人2种方法，验证了机器视觉技术在测量实时性、自动化程度和成本方面均有优势。单目视觉位移测量主要包括相机检校、标志物特征提取、特征跟踪和位移计算4个步骤，其中现有研究中标志物兴趣区域（ROI）的提取主要采用人工方法，位移测量过程中CCD相机架设的观察点多为测量目标之外的固定点。但对于重力坝内部廊道、涵洞等封闭区间建筑物位移监测，观测点本身在测量目标内，即观测点为动点。为此，本文提出基于YOLOv5目标检测模型和视觉的封闭空间建筑物垂直位移测量方法，可实现标志物ROI自动检测与跟踪，同时能够满足观

收稿日期：2023-08-23。
项目来源：中国南水北调集团中线有限公司资助项目（NSBDZX/QS/YW/GC-2022-022）。
第一作者简介：周学友（1981—），高级工程师，研究方向为水利工程监测与安全运行，E-mail：710916@qq.com。
通信作者：覃磊（1999—），硕士研究生，研究方向为摄影测量与遥感，E-mail：1074754250@qq.com。

测点布设在封闭建筑物区域内的垂直位移高精度测量。

1 基于视觉的垂直位移测量方法

本文提出基于YOLOv5目标检测模型和视觉的封闭空间建筑物垂直位移测量方法，主要包括基于YOLOv5模型的标志物提取、定位及基于视觉的垂直位移测量三部分。首先利用YOLOv5目标检测模型提取影像上标志物兴趣区域ROI，然后在ROI内进行图像预处理，canny算子边缘提取及边缘点拟合椭圆提取圆心，最后考虑观测点为动点状态下，将相邻帧间标志物圆心像素变化转化的垂直位移值，实现封闭区间建筑物位移监测。

2 标志物感兴趣区域提取与定位

2.1 基于YOLOv5模型的标志物提取

封闭空间建筑物影像灰度对比度低，纹理匮乏，不易提取特征点。为提高监测精度，需要设计标志物作为监测点。圆形标志物形状简单，且在图像处理中易于识别，考虑到弱光线的封闭空间环境，设计标志物背景色为黑色，标志物为4个白色圆形的排列。

标志物通常在图像中所占区域不大，为了减少计算量，可将标注物所在的区域即感兴趣区域ROI提取出来，后续的标志物定位和跟踪可以在标志物ROI内进行。传统方法采用人工框选标志物ROI，随着深度学习模型的发展，卷积神经网络在目标检测方面取得了出色的表现，本文采用单阶段YOLOv5目标检测模型识别与提取标志物ROI[5]。YOLOv5对标志物的识别与提取过程为，首先输入端对图像进行预处理，并进行自适应锚框计算；然后主干网络在不同图像细粒度上聚合，提取3种尺度的特征图；再次特征融合模块使用空间金字塔池化结构（spatial pyramid pooling，SPP）进行特征融合，将新得到的特征图通过路径融合网络（path aggregation network，PANet）进行特征传递，进一步融合特征；最后输出端对图像特征进行预测，生成边界框并预测类别[6]。

2.2 基于椭圆拟合的标志物圆心定位

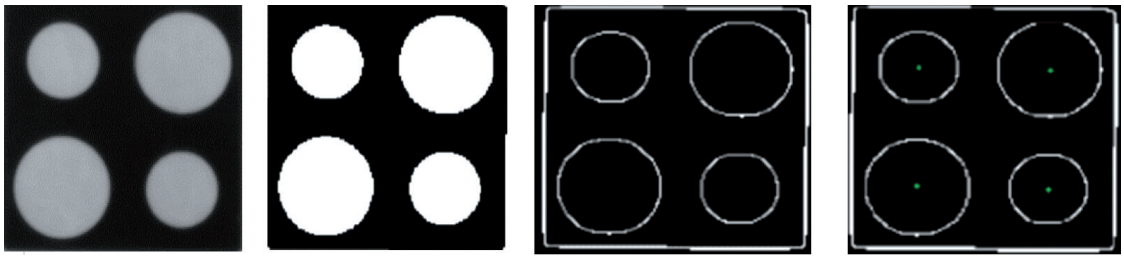
YOLOv5模型检测的标志物ROI，先要经过图像灰度化、中值滤波和大津法二值化等图像预处理，然后利用canny算子进行边缘提取及边缘点拟合椭圆，最后得到椭圆圆心。

标志物的圆心定位是后续算法计算目标分辨率和标志物像素位移的关键，其定位的精度是影响垂直位移测量精度的重要因素之一。常用的亚像素定位方法有灰度重心法和椭圆拟合方法[7-8]，灰度重心法在标志物变形较大时，提取的重心会偏离圆心，本文采用椭圆拟合法进行标志物圆心提取。公式（1）为椭圆方程，方程包含 A、B、C、D、E 5个未知数，当边缘像素点个数 $N\geqslant 5$ 时，按照最小二乘平差求得方程系数后，根据公式（2），可得到椭圆圆心[9]。图1所示为标志物圆心定位的过程。

$$f(x,y)=x^2+Axy+By^2+Cx+Dy+E,A^2-4B<0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_c&=\frac{2BC-AD}{A^2-4B}\\ y_c&=\frac{2D-AD}{A^2-4B} \end{aligned} \quad (2)$$

本文标志物为4个排列的圆，将4个圆心的平均值作为最终标志物的圆心，用于后续相邻帧间像素位移值计算。



a 中值滤波　b 二值化　c canny边缘提取　d 圆心坐标定位

图1 圆心定位

3 基于视觉的垂直位移测量

3.1 目标分辨率

目标分辨率（K，mm/pixel)为确定像素长度与实际物理长度之间的关系，本文采用的目标分辨率的计算方法为位移标定法[7]，位移标定法为使标志物于成像系统中横向或竖向产生位移，计算图像中标志物发生位移时圆心矩像素位移值 L_h 与圆心矩已知物理位

移值 L_H 之间的比例系数。

$$K=\frac{L_H}{L_h} \tag{3}$$

3.2　相邻帧间标志物跟踪

位移监测是对不同时刻标志物位置坐标的变化进行分析，因此需要跟踪相邻帧标志物在图像中的位置。常用的目标跟踪算法有模板匹配算法、特征点匹配和光流法等[10]，本文采用标志物ROI邻近跟踪法。对当前帧中任一标志物ROI，可以获得其外接矩形框坐标，在相邻帧上搜索与该目标标志物ROI外接矩形框距离最近的标志物ROI，即为跟踪的同名标志物ROI，如图2所示（图2中红色矩形框为目标标志物ROI在相邻帧图像上的投影）。

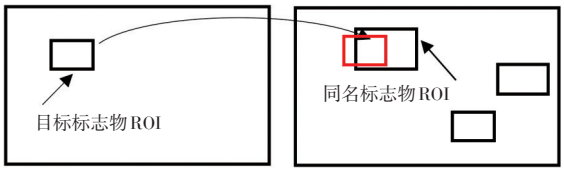


图2　邻近法

3.3　标志物垂直位移计算

当CCD相机水平，安置在固定观测点，且标志物竖直情况下，不同时刻的同名标志物圆心 y 坐标差值和目标分辨率的乘积即为该标志物垂直位移，如式（4）所示。

$$(y_2-y_1)\times K \tag{4}$$

如果观测点为动点，则任一标志物的垂直位移均要除去安置在观测点上CCD相机的垂直位移 Δd 。

$$(y_2-y_1)\times K-\Delta d \tag{5}$$

这种情况下，CCD相机获取监测点上标志物影像时，需要包含一个基准点（不动点）。基准点上标志物圆心在不同时刻的 y 坐标差值，根据目标分辨率可以转化为对应的垂直位移值 Δd ，该值即为观测点上CCD相机的垂直位移。

4　实验与分析

4.1　圆形标志物ROI提取与定位实验

YOLOv5网络模型训练的数据集采用程序合成方式生成，背景图像一部分来源真实大坝廊道影像，一部分取自矿井图像数据集 oivio Dataset[19]，共404幅。将标志物模板进行旋转、缩放、平移等操作后形成不同大小和变形后的标志物模版，并随机附加到背景图像上，记录对应的标志物模版外接框坐标范围。模型训练过程中，训练集290张，验证集114张，检测的结果显示实验中标志物均被检测出，没有出现遗漏。

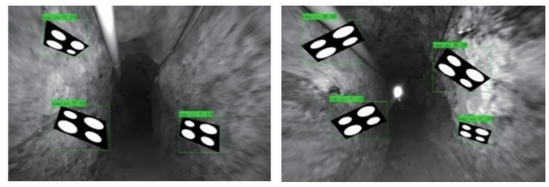
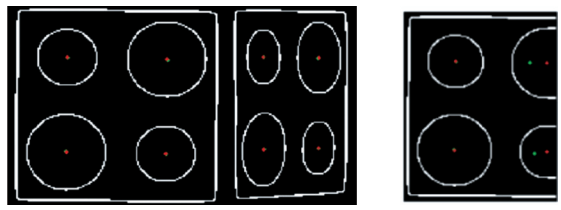


图3　标志物检测结果

分别采用重心法和椭圆拟合法对标志物圆心定位，实验结果表明二者计算得到的标志物中心坐标差异并不大，通常小于1个像素，如图4a所示，绿色十字标志代表灰度重心法的结果，红色十字标志代表最小二乘椭圆拟合法的结果。但是，对于遮挡导致标志物边缘提取不完整情况下，使用最小二乘椭圆拟合法提取的圆心更准确，如图4b所示。



a 标志物提取完整　　b 标志物提取不完整

图4　标志物圆心定位对比

4.2　标志物垂直位移测量实验

本文实验包括两部分，实验一为不同目标分辨率标定方法及CCD相机是否固定对标志物垂直位移精度的影响，实验二为实际场景下目标垂直位移监测。

实验一的数据采集设备主要由CCD相机、垂直移动平台、计算机和高度尺（分辨率为0.01 mm）组成。为了能够获得标志物移动真值，将标志物安置在垂直移动平台上，通过转动上升螺旋调整标志物的位移，高度尺显示位移数值。CCD相机水平放置，分别上升垂直移动平台到不同高度，获取标志物影像，影像大小为1 944×2 592像素。

目标分辨率还可以用尺寸标定法和比例尺标定法，尺寸标定为影像上标志物圆的直径与实际标志物圆直径之比，比例尺标定法为焦距与CCD相机到标志物的垂直距离之比。表1和表2分别为CCD相机安置在固定和移动观测点情况下的垂直位移测量结果，选用平均误差和中误差作为精度评价指标。表1和表2可以看出：①位移标定法测得的标志物垂直位移精度最高。②CCD相机固定时较移动情况下垂直位移测量精度高。

实验二为室内实习场横梁垂直位移测量。如图5所示，横梁固定在实习场屋顶上方，挂件悬挂在横梁中部，通过升降可调整其高度，升降的震动会引起横梁垂直方向产生位移。以挂件为中心，在横梁左右方向上各布设2个标志物，CCD相机水平架设在支架上。

表1 CCD相机安置在固定观测点的垂直位移测量/mm

真值	位移标定法计算值	误差	尺寸标定法计算值	误差	比例尺标定法计算值	误差
4.35	4.29	−0.06	4.35	0.00	4.46	0.11
6.10	6.15	0.05	6.22	0.12	6.38	0.28
8.10	8.09	−0.01	8.19	0.09	8.40	0.30
10.16	10.16	0.00	10.28	0.12	10.55	0.39
平均误差	−0.005		0.083		0.270	
中误差	0.04		0.10		0.29	

表2 CCD相机安置在移动观测点的垂直位移测量/mm

真值	位移标定法计算值	误差	尺寸标定法计算值	误差	比例尺标定法计算值	误差
2.03	2.01	−0.02	1.56	−0.47	1.69	−0.34
3.90	3.78	−0.12	3.65	−0.25	3.72	−0.18
7.99	7.83	−0.16	7.42	−0.57	7.63	−0.36
9.97	9.88	−0.09	9.30	−0.67	9.41	−0.56
平均误差	−0.098		−0.490		−0.360	
中误差	0.11		0.51		0.38	

距离横梁5 m左右，通过遥控器控制挂件进行升降，CCD相机连续获取横梁影像。表3为横梁上标志点不同时刻的垂直位移测量值。

从表3可知，挂件上下升降，对横梁产生向下的位移总体上是比较小的，最大垂直位移不超过0.21 mm。挂件升降状态不同，对横梁不同位置产生的垂直位移是不同的，标志点3在整个过程产生的垂直位移平均幅度最小，标志点1和2垂直位移起伏较大，且呈负相关。

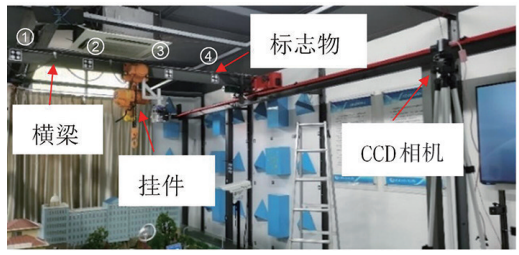


图5 横梁垂直位移数据采集

表3 不同时刻横梁标志点垂直位移/mm

标志点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	−0.16	−0.11	−0.09	−0.05	−0.10	−0.20	−0.11	−0.12	−0.16	−0.14	−0.13	−0.20	−0.17
2	−0.05	−0.15	−0.08	−0.16	−0.07	−0.08	−0.06	−0.17	−0.07	−0.15	−0.21	−0.15	−0.14
3	−0.08	−0.10	−0.09	−0.09	−0.08	−0.08	−0.08	−0.10	−0.11	−0.09	−0.11	−0.10	−0.13
4	−0.04	−0.06	−0.05	−0.08	−0.06	−0.09	−0.12	−0.06	−0.13	−0.15	−0.15	−0.14	−0.20

5 结 语

基于视觉的结构位移测量方法以其高效、便捷和高精度的优势在工程项目中得到了广泛的应用。本文提出基于YOLOv5目标检测模型和视觉的封闭空间建筑物垂直位移测量方法，适用于重力坝内部廊道、涵洞等密闭空间的垂直位移监测。该方法利用YOLOv5目标检测模型实现了标志物ROI区域的自动提取，采用最小椭圆拟合检测标志物圆心，通过最邻近法寻找相邻帧同名标志物ROI，并将同名标志物像素位移转化为实际的垂直位移量。实验设计了不同目标分辨率标定方法及安置CCD相机的观测点状态对垂直位移测量精度的影响，结果表明位移标定法测得的标志物垂直位移精度最高，CCD相机安置在固定观测点垂直位移测量精度更高。同时，将本文方法应用到真实场景–室内实习场横梁垂直位移测量，实验证明了该方法可以监测到横梁微小的垂直位移。

参考文献

[1] 何帅民,陈皓,王振宇. 基于PnP算法的单目视觉位移测量方法[J]. 技术新工艺,2023(6):46-52

[2] 周泽华,吴向东,陈自洋,等. 颜色形状识别和PnP算法的单目视觉轨道边坡位移检测方法[J]. 南学院学报,2023,44(2):37-41

[3] 林云彝,钟舜聪,钟剑锋,等. 基于组合特征图案的单目视觉三维振动测量[J]. 光与光电子学进展,2021,58(22):20-26

[4] 陈登伟,郭双喜,朱旻,等. 机器视觉技术在地下交通枢纽施工变形监测中的应用[J]. 道科学与工程学报,2022,19(12):327-336

[5] 宁健,马淼,柴立臣,等. 深度学习的目标检测算法综述[J]. 信息记录材料,2022,23(10):1-4

[6] 王年涛,王淑青,黄剑锋,等. 基于改进YOLOv5神经网络的绝缘子缺陷检测方法[J]. 激光杂志,2022,43(8):60-65

[7] 王新超. 基于图像处理技术的轨道动位移测试方法研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022

[8] 尤其泽. 激光光斑中心定位的分析与研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2020

[9] 陈献明. 基于机器学习的木材表面缺陷图像检测及应用[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020

[10] 王甜. 基于光流法的遥感影像匹配算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022