

预制梁场中节段梁模板位姿快速测量方法

马智亮^{1*}, 刘昱¹, 刘世龙¹, 石庆波², 王志兵³¹清华大学土木工程系, 北京 100084;²中铁十八局集团第四工程有限公司, 天津 300450;³天津泰达工程科技有限公司, 天津 300450

摘要 针对预制梁场中节段梁模板位姿的传统测量方法存在的耗时、费力和效率低等问题,提出一种基于三维重建和图像识别等计算机视觉技术快速测量模板位姿的方法。通过实验室内外实验,探究工程现场常见因素对测量精度的影响,并总结获得较高测量精度的拍摄条件。在此基础上,通过实际预制梁场实验,验证所提方法的可行性和适用性。结果表明,所提方法在满足精度要求的前提下,能够快速、方便、低成本地测量节段梁模板的位置和姿态。

关键词 测量; 计算机视觉; 三维重建; 模板调整; 编码标记识别; 测量精度分析

中图分类号 TU198

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512001

Rapid Position and Pose Measurement Method for Segment Girder Formwork in Precast Girder Yard

Ma Zhiliang^{1*}, Liu Yu¹, Liu Shilong¹, Shi Qingbo², Wang Zhibing³¹Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;²China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Tianjin 300450, China;³Tianjin Teda Group Co., Ltd., Tianjin 300450, China

Abstract A rapid formwork position and pose measurement method based on computer vision techniques, such as three-dimensional reconstruction and image recognition, is proposed to address the time-consuming, labor-intensive, and inefficient problems of traditional position and pose measurement methods for segment girder formworks in precast girder yards. Experiments are conducted inside and outside the laboratory to investigate the influences of common factors at the engineering site on measurement accuracy, and the shooting conditions for obtaining high measurement accuracy are summarized. On this basis, the feasibility and applicability of the proposed method are verified through experiments at actual precast girder yards. The results show that the proposed method can measure the position and pose of segment girder formworks quickly, easily, and inexpensively in addition to meeting accuracy requirements.

Key words measurement; computer vision; three-dimensional reconstruction; formwork adjustment; coded mark recognition; measurement accuracy analysis

1 引言

在我国市政工程建设中,越来越多地使用通过预应力钢索连接的预制节段梁来形成高架轨道交通线路结构。出于使用要求和经济考虑,每个节段梁的平面形状和断面尺寸都有一定的变化,这就要求在预制梁场中采用可调的模板。在生产每个节段梁时按平面形状和断面尺寸要求对模板进行调整,这就需要对节段梁模板姿态进行较高精度的测量。由于涉及的待测点

位多,且模板需要根据测量结果反复调整多次才能到位,因此迫切需要中短距离间快速、多点和低成本的测量方法。

预制梁场中传统的测量方法包括全站仪测量、激光扫描和全球定位系统(GPS)测量等。全站仪测量精度高且性能稳定,在工程测量中最为常见,但存在价格较高、培训耗时、逐点测量较为繁琐和人工计算易出错等不足,同时不能单次测量多个点位。激光扫描技术能精准全面地反映被测物体的几何特征,在对预制梁

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-02-18; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51678345)、天津市轨道交通重大专项(18ZXGDGX00050)

通信作者: *mazl@mail. tsinghua. edu. cn

场进行体积和形状测量时具有很大优势^[1-2],但其价格昂贵、不便携带,同时产生的激光可能危害人体健康^[3]。GPS 测量覆盖范围广、监测时间长,适用于城市、道桥等大规模测量^[4],但在中短距离测量时优势较小。

三维(3D)重建和图像识别等计算机视觉技术为满足上述需求提供了可能性。在土木工程领域,计算机视觉技术越来越多地被用于测量^[5-6]和获取物体的三维模型^[7]。已有一些学者将计算机视觉技术用于土木工程测量中,并研究了三维重建精度的影响因素。Feng 等^[8]利用三维重建技术开发了一套可同时测量多点结构位移的非接触视觉传感器,并指出在现实的野外环境中系统测量精度会受到光照波动、目标遮挡和背景干扰等各种情况的影响。Xu 等^[9]通过理论分析指出,基于计算机视觉的系统的测量精度取决于摄像机相对目标的距离、目标模式特征和光照条件等,并指出现场实验的测量精度可能远远低于控制条件下的测量精度。Ye 等^[10]针对室内环境,研究了环境光照、数码相机仰角和目标周围蒸汽等因素对目标测量精度的影响,提出在室内光照强度较低时测量误差较大,并指出在室内采用数码相机,镜头的仰角为 5° 、 10° 和 15° 时测量精度较好。Marčič 等^[11]利用室内单反相机挂架近距离测量了混凝土板的形变,达到毫米级测量精度。简振雄等^[12]研究了数字图像相关法在空间目标位姿测量中的应用,在较小的误差范围内实现了空间目标多个位姿参数的测量。王永红等^[13]为克服金属表面检查时易受表面高亮反射影响的不足,提出了一种基于近场非朗伯光度立体视觉的高亮金属表面纹理重构方法,测量相对误差小于 15%。刘胜道等^[14]基于双目测量原理建立了双目视觉远距离测量的位置误差模型,通过模型分析和数值仿真探究了相机内外参数、特征点匹配误差、像元大小、焦距长度、基线长度和测量距离等因素对系统测量精度的影响。余慧杰等^[15]从理论角度分析了光轴夹角、基线距离等因素对视觉系统测量精度的影响。汪义志等^[16]通过理论和实验定性分析了实际距离、基线长度和焦距等因素对测量精度的影响。肖志涛等^[17]从理论分析了摄像机标定精度和光轴夹角对视觉系统测量精度的影响。

调研结果显示,已有一些学者通过计算机视觉技术实现了对土木工程构件的测量,但无法满足预制梁场中模板位置和姿态测量的要求,因此有必要开展相关研究。

本研究选取生活中常见的智能手机作为数据采集设备,提出并验证了一种基于计算机视觉的节段梁模板姿态快速测量方法。首先,基于三维重建和图像识别等计算机视觉技术编制用于预制梁场模板控制点三维坐标测量的程序。然后,通过实验探究光照强度、背景特征、图片数量和光轴夹角等因素对系统测量精度的影响程度,并总结获得较高测量精度的拍摄条件。最后,分别通过实验室和预制梁场的实验验证了所提测量方法的适用性。

2 节段梁模板姿态快速测量方法

本文建立的基于计算机视觉的节段梁模板姿态快速测量方法包括准备、3D 重建和转换测量 3 个阶段,其流程如图 1 所示,本节将对各阶段展开说明。

2.1 准备阶段

本阶段的主要目的是为 3D 重建阶段提供数据,包括输入已知信息、在待测区域布置编码标记点、采集多张待测区域图像和相机标定 4 个步骤。其中,输入已知信息和相机标定步骤无需在实验现场进行。

在输入已知信息步骤中,输入已调整就位模板上编码标记点的相对坐标。在相机标定步骤中,所提方法选取以黑白棋盘内角点为特征点的标定板,采用 MATLAB 工具箱中的 Camera Calibrator 模块进行相机内参数标定^[18],实验中用于相机标定的棋盘网格标定板如图 2 所示。值得说明的是,对于一定数量的相机,相机标定只需要进行一次。

在待测区域布置编码标记点步骤中,需要在节段梁模板上设置编码标记点进行识别和定位。常见的编码标记点包括环状、点状、方形和分布式等种类。其中,环状编码标记点具备仿射不变、平移旋转不变和尺度不变的特性,故更容易被计算机视觉系统识别和定位^[19]。因此,所提方法采用具有编码带的环状编码标记点进行识别和定位,如图 3 所示,其中:中间为白色的圆,通过识别该圆像素的形心确定标记点位置;圆周边为 15 等分的编码带,编码带上不同的黑白排列组合构成不同的编码值。通过算法对编码标记点进行解码,首先将黑色和白色编码带定义为二进制码,选择任意起点按顺时针顺序读取二进制码,并选择所有二进制数里最小的数对应的十进制数作为编码点的编号^[20]。

在采集多张待测区域图像步骤中,所提方法采用满足精度要求的数码相机。为不失一般性,本研究采用常见且成本较低的智能手机华为 Mate 30 作为图像采集设备,用相同焦距从不同的角度分别拍摄多张待测区域图像。采集设备的具体参数如表 1 所示,其中 f 为相机焦距。

2.2 三维重建阶段

本阶段的主要目的是获得编码标记点的 3D 坐标,包括识别编码标记点并计算坐标、3D 重建得到相机位姿、计算编码标记点 3D 坐标和提高编码标记点 3D 坐标精度 4 个步骤。

在识别编码标记点并计算坐标步骤中,本方法通过开源计算机视觉库 OpenCV (Open source Computer Vision library) 计算各图像中编码标记点以 pixel 为单位的坐标,其网址为 <https://opencv.org>。

在 3D 重建得到相机位姿步骤中,本研究综合考虑了 Open MVG, Bundler, Visual SFM 和 ContextCapture 4 种方案,并对其进行对比,具体内容见表 2。对比结果显示,开源 3D 重建库 Open MVG 具有文档多、费用低和完全开源等优势,更适用于解决本

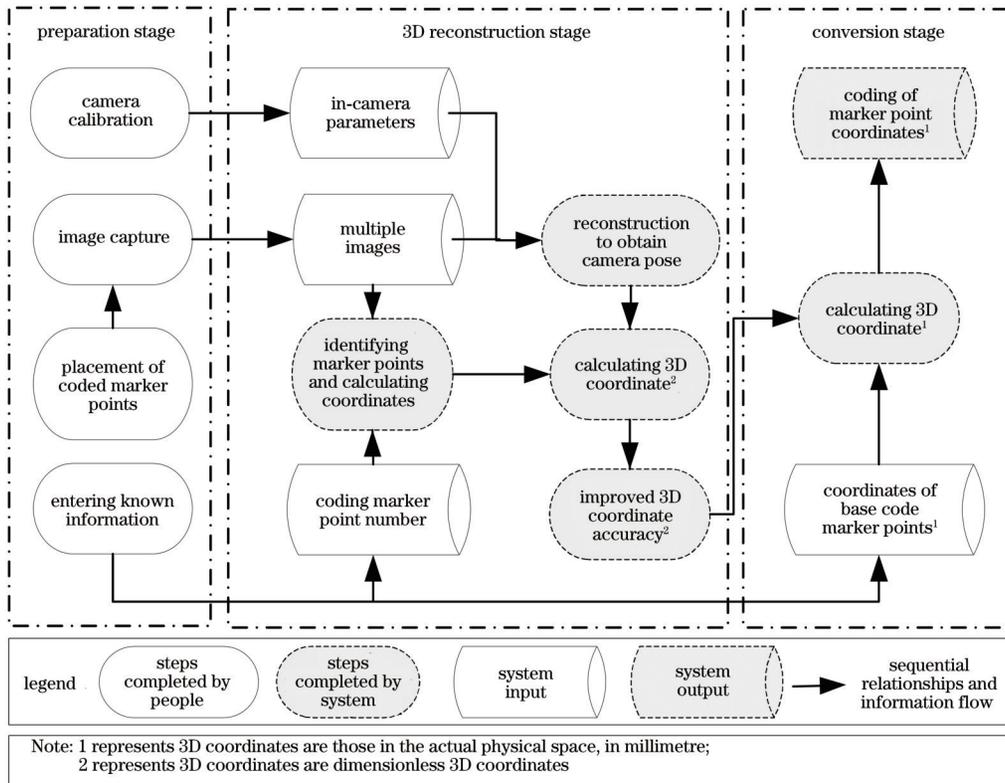


图 1 基于计算机视觉的快速测量方法流程

Fig. 1 Process of fast measurement method based on computer vision

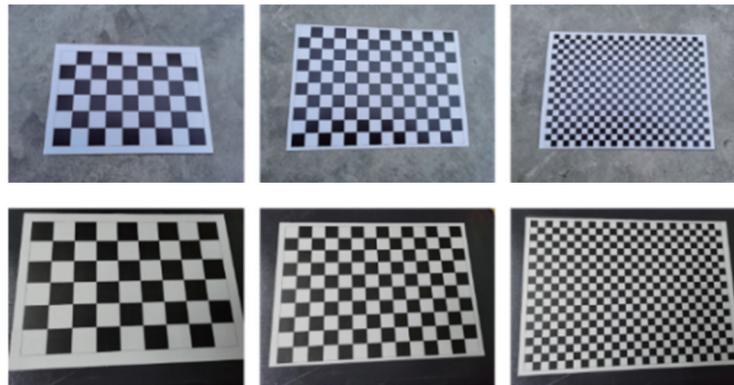


图 2 实验中用于相机标定的棋盘网格标定板

Fig. 2 Checkerboard grid calibration plates for camera calibration in experiment

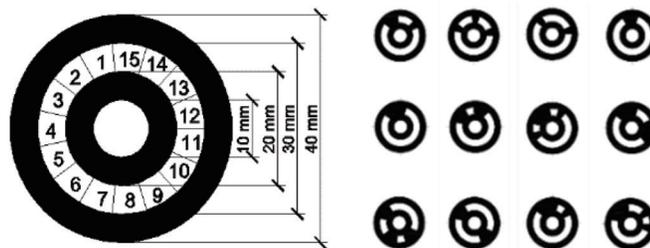


图 3 编码标记点样式和示例

Fig. 3 Styles and examples of coded marker points

文提出的工程问题。此外,调研发现有学者通过 4 个实际建筑外表面的 6 组图像分别对 Open MVG、Bundler 和 Visual SFM 重建得到的相机 3D 位置的精

度进行测试^[21],测试结果显示:在各组数据中,Open MVG 的精度均高于 Bundler 和 Visual SFM;在多数几组数据中,Bundler 的精度高于 Visual SFM;在少数几

表 1 采集设备参数

Table 1 Parameters of collecting device

Parameter	Description
Price of equipment /yuan	4499 (CNY)
Weight of equipment /g	Approximately 196 (with battery)
Rear main camera /pixel	4×10^8 ($f/1.8$ aperture)
Photo resolution	Supporting up to 7296 pixel \times 5472 pixel, 3648 pixel \times 2736 pixel in regular mode

表 2 3D 重建阶段可调用开源库对比

Table 2 Comparison of open source libraries for 3D reconstruction stage

Software	Positioning	Level of open source	Cost	Maintenance	Documentation
Visual SFM	Enabling image-based 3D reconstruction	Some modules open source	Free for personal, non-commercial, academic applications	Personal	Less
Bundler	Enabling image-based 3D reconstruction	Fully open source	Free for non-commercial use	Personal	Less
Open MVG	Multi-view geometry library	Fully open source	Free for non-commercial use	Groups	Enrichment
ContextCapture	Bentley's software	Not open source	Business software	Groups	Enrichment

在计算编码标记点 3D 坐标步骤中,根据编码标记点的图像坐标和各图像的相机参数计算编码标记点的 3D 坐标,该步骤在摄影测量中有较为成熟的算法^[24]。

在提高编码标记点 3D 坐标精度步骤中,使用开源软件 SBA (Sparse Bundle Adjustment)^[25]实现光束法平差算法,该算法以相机参数、点的 3D 坐标和图像坐标为输入,基于改进的 Levenberg-Marquardt (LM) 算法调整所有点的 3D 坐标和相机参数,以使各点(用调整后的 3D 坐标表示)在图像上的投影与对应图像上该点图像坐标的距离之和最小,最终输出误差最小的点的 3D 坐标、相机内参数和相机外参数。本模块通过直接调用 SBA 的相应模块实现。

2.3 转换测量阶段

从上一阶段中得到的是无量纲的坐标,因此需要将其转换为实际 3D 坐标。在现场测量时,为了求解转换矩阵参数并进行平差,本研究编制的程序需要读入 5 组编码标记点在实际空间中的相对 3D 坐标,该数据可通过包含不少于 5 个基准编码标记点相对 3D 坐标的基准标定物得到。基准标定物制作方便,将打印出的编码标记点粘贴在边长已知的立方体块和背胶磁片上,将两者组合即可得到,基准标定物示意图如图 4 所示。

在测量时,首先将标定物放在已调整就位的节段梁模板的指定位置处,如角点等易于定位的区域,以便确定标定物在节段梁模板上所处的位置。然后,根据标定物尺寸和设计图纸或模型确定标定物上编码标记

组数据中,Visual SFM 的精度高度 Bundler。因此,认为 OpenMVG 的 3D 重建精度和适用性均为最好,是用于本研究的最佳方案。

采用 OpenMVG 对图片进行 3D 重建并获取用于拍摄的相机的位置与姿态,其网址为 <https://github.com/openMVG>。在重建过程中主要调用了获取图像初始信息、计算特征点、计算匹配和增量运动恢复结构 (SfM) 4 个模块。主要原理包括:使用尺度不变特征转换 (SIFT) 算法^[22]提取图像的特征点;通过随机抽样一致 (RANSAC) 算法^[23]估计基础矩阵,将满足几何约束的匹配对合并为轨迹;在此基础上进行增量式 SfM,估计摄像机姿态。

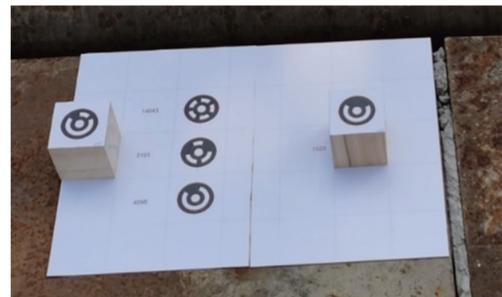


图 4 基准标定物示意图

Fig. 4 Schematic diagram of baseline calibrator

点在实际空间坐标系中的 3D 坐标,在此基础上可通过

$$x_d = rx_n + t \quad (1)$$

求得转换矩阵(旋转矩阵 r 和平移向量 t)。将该转换矩阵作用于待测模板上放置在指定区域的编码标记点的无量纲 3D 坐标,即可得到待测编码标记点实际 3D 坐标。式(1)中 x_d 为编码标记点实际 3D 坐标, x_n 为编码标记点无量纲 3D 坐标。

由于节段梁模板为刚体,因此可以根据不共线的三个待测编码标记点的 3D 坐标确定待测节段梁模板相对已调整就位节段梁模板的姿态。

2.4 程序编制及实验设备

在编制测量程序时,本研究基于 C++ 开发测量程序的功能模块。在开发过程中,如上所述,采用 OpenMVG 和 OpenCV 等可靠的开源软件代码。系统开发环境为 Visual Studio 2019,调用的第三方软件的

版本为 OpenMVG 1.4、OpenCV 4.0.0 和 SBA 1.6。

在实验中,本研究所采用的图像采集设备为华为 Mate 30 智能手机。采用的图像处理设备为联想 Y7000P 型笔记本电脑,其 CPU 型号为 Intel i7-10875H,内存为 16 GB DDR4,硬盘容量为 1 TB。

3 测量精度影响因素分析

为提高测量精度,有必要确定影响测量精度的因素。经分析,主要影响因素包括现场光照强度、现场背景特征、拍摄图片数量和相机光轴夹角。这里未包含拍摄距离,因为假定拍摄时相机焦距一定,且拍摄距离的选取必须保证所有编码标记点都能落入每张图片内。在此条件下,拍摄距离变化较小,故可以不考虑。

另外,有必要建立评估测量精度的指标。利用所提方法进行测量时,关键是把握编码标记点的测量精度,而其取决于 3D 重建的精度。在 3D 重建阶段,通过计算编码标记点 3D 坐标、提高编码标记点 3D 坐标精度等步骤,可以得到所有编码标记点无量纲的 3D 坐标。将这些 3D 坐标重新投影回各编码标记点所在的图片中,可得到重建后重新投影点与重建前标记点间以 pixel 为单位的二维距离差值,该差值能够集中体现 3D 重建相机位姿和编码标记点 3D 坐标重建的精度,也能够决定通过转换矩阵所求得的编码标记点实际 3D 坐标的精度。因此,利用该差值计算编码标记点重投影误差 M_{Error} ,用来衡量编码标记点 3D 重建的精度。 M_{Error} 的表达式为

$$M_{\text{Error}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{i,1} - x_{i,0})^2 + (y_{i,1} - y_{i,0})^2]}{n}}, \quad (2)$$

式中: $x_{i,1}$ 和 $y_{i,1}$ 分别为重建所得编码标记点 3D 坐标重新投影回各图像坐标系中的 x 坐标和 y 坐标,单位均为 pixel; $x_{i,0}$ 和 $y_{i,0}$ 分别为该编码标记点重建前在该图像中的 x 坐标和 y 坐标,单位均为 pixel; n 为 3D 重建过程中包含该编码标记点的图片数量。

在拍摄过程中,编码标记点的大小仅会影响编号识别,并不会影响测量精度,因此在进行实验和实际使用时,使用者在保证标记点编号可识别的前提下可以根据实际情况自主选择直径。由于重投影误差 M_{Error} 本身可能会受到光学镜头畸变、畸变标定参数精度和旋转幅度等因素的影响,本研究中采用控制变量的思想,本节所使用的图片数据均由相同智能手机以相同的拍摄模式和像素采集,计算时采用同一相机内参数,因此光学镜头畸变、畸变标定参数精度等因素对本文的重投影误差没有影响。在采集各组数据时,均将中心编码标记点置于图片中央,编码标记点在图片中所处的位置相近,在同组中确保用于重建的图像的拍摄位置遵循相同的角度和拍摄规律,以降低相机在采集过程中的旋转幅度对最终结果的影响。因此,在控制其他变量的情况下,重投影误差能够较好地反映被研究变量对相机位姿 3D 重建精度和编码标记点 3D 重建精度的影响。基于上述分析,在实验室内外分别对各

影响因素的影响程度进行了探究实验和分析,考虑在预制梁场中进行拍摄的可行性,并分别确定了能够获得较高测量精度的拍摄条件。

3.1 现场光照强度

预制梁场中存在多种日照情况,且每日各时段光照强度变化范围较大,因此有必要探究所提测量方法在不同光照强度下的表现。本研究在实验室外选择少特征水泥场地布置编码标记点,采用 TASI/TA8123 光照度测试仪测量光照强度,其量程为 2×10^5 lx,分辨率为 0.1 lx,精度为 $\pm 4\%$,取样率为 2 Sa/s,质量约为 150 g,能够满足实验测量需求。

本研究选取 4 种常见的光照情况采集图像数据,分别为正午晴天直射 (80000 lx)、正午多云直射 (45000 lx)、下午背阴 (15000 lx) 和傍晚背阴 (2500 lx)。采集数据时拍摄高度为 1.5 m,编码标记点实际直径为 4 cm,图片中编码标记点直径为 80~90 pixel,各编码标记点间相距 10 cm,拍摄现场的光照情况如图 5 所示。

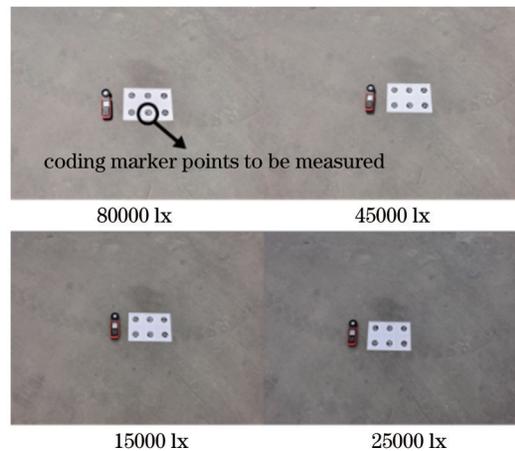


图 5 拍摄现场光照条件

Fig. 5 Illumination conditions on site

选取位于中下部位置的编码标记点进行对比实验,测量过程中各组编码标记点布置、背景纹理和拍摄位置均不变,各组拍摄的图片张数均为 5,拍摄时标记点位于图片中央,4 组实验结果如表 3 所示。

表 3 不同光照情况下的测量精度

Table 3 Measurement accuracy under different illumination conditions

Light intensity /lx	Illumination condition	M_{Error} /pixel
2500	Shady	0.357
15000	Shady	0.397
45000	Direct sunlight	0.171
80000	Direct sunlight	0.657

结果表明:所提方法在背阴情况下的测量精度比较稳定;随着光照强度的增加,测量精度有所提升,但当光照过强引起标记点或背景明显反光时,会造成测

量误差增加。

因此,在预制梁场中测量时宜选择光线不过于强烈的测量条件。若无法避开光照过强的测量时段,则可对待测编码标记点进行遮阳处理。

3.2 现场背景特征

拍摄区域的背景中包含各类纹理特征,这些特征构成了图像区域的特殊性,因此有必要探究背景特征对所提测量方法的影响。本研究在实验室内外分别采集了两组数据:第一组包含少特征的光滑平面和多特征的粗糙平面,编码标记点布置较为分散,其实际直径为 15 cm,图片中直径为 60~120 pixel;第二组包含少特征的简单纹理和多特征的复杂纹理,编码标记点布置较为集中,其实际直径为 4 cm,图片中直径为 70~90 pixel。4 种拍摄情况如图 6 所示。

在这 4 种情况下拍摄图片并重建,重建过程中特征点较多的背景重建失败概率更低,相机位姿的求解

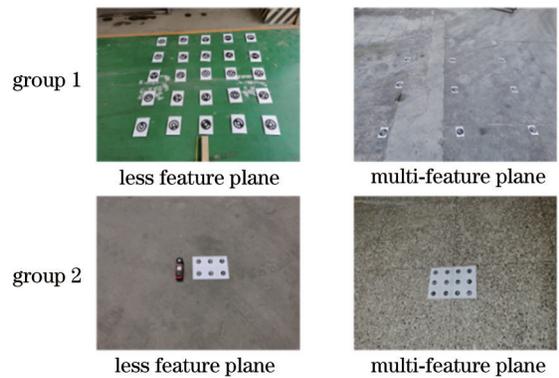


图 6 不同背景特征的拍摄情况

Fig. 6 Shooting situations with different background features

也更精确。拍摄时待测区域均位于图片中央,两组数据的测量结果和对比情况如表 4 所示。

表 4 不同背景特征下的测量精度

Table 4 Measurement accuracy under different background features

Category	Description	M_{Error} /pixel
Less feature plane in group 1	Number of images: 6;	Minimum value: 1.609;
	number of reconstructed point cloud points: 849;	mean value: 2.300;
Multi-feature plane in group 1	running time: 1.52 min	maximum value: 3.146
	Number of images: 6;	Minimum value: 0.202;
Less feature plane in group 2	number of reconstructed point cloud points: 3851;	mean value: 1.106;
	running time: 2.83 min	maximum value: 2.167
Multi-feature plane in group 2	Number of images: 5;	Minimum value: 0.657;
	number of reconstructed point cloud points: 197;	mean value: 0.784;
Less feature plane in group 2	running time: 2.87 min	maximum value: 0.883
	Number of images: 4;	Minimum value: 0.115;
Multi-feature plane in group 2	number of reconstructed point cloud points: 19429;	mean value: 0.277;
	running time: 14.32 min	maximum value: 0.392

结果显示,相较具有少特征的测量环境,在具有较多特征的测量环境中采集的数据能够被更好地重建,从而能获得更精确的相机位姿和测量精度,但测量时间也会随特征数量的增加而相应增加。

因此,在预制梁场中进行测量时,宜将编码标记点布置在反差较大、对比明显等多特征背景中,避免布置在单调纯色、简单重复等少特征背景中。如无法避免少特征背景,可以在待测区域中人为布置特征点以保证测量精度。若现场特征过多,则可适当减少图片数量以减少测量时间。

3.3 拍摄图片数量

参与 3D 重建的图片数量会对测量精度和运行时间产生影响,因此有必要探究图片数量对测量方法的影响。本研究在实验室外选取地面场地开展实验,首先确定 4 个初始拍摄位置,在各初始拍摄位置间均匀增加图片数量。采集数据时拍摄高度为 2.5 m,编码标记点实际直径为 15 cm,其在图片中的直径为 70~130 pixel,各编码标记点间相距 1.2~1.5 m。现场拍摄情况、初始拍摄位置和用于分析的编码标记点编号

如图 7 所示。

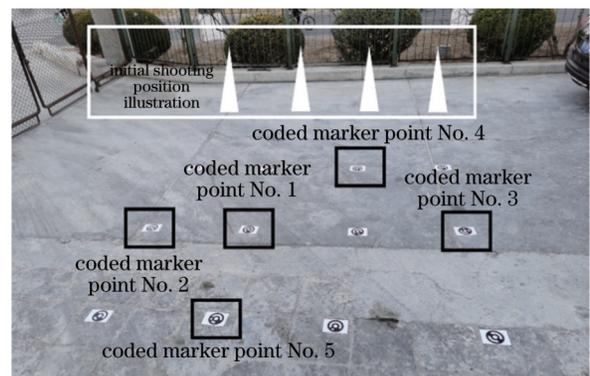


图 7 实验现场的拍摄位置和标记点位置

Fig. 7 Shooting position and marker point location of test site

在初始确定的 4 个拍摄点间采集数据,每增加 2 张图片运行一次测量程序,拍摄背景包含较多特征点,在晴天背阴条件下拍摄,拍摄时将待测区域置于图片中央,系统每次运行得到的各编号编码标记点的 M_{Error} 和运行时间如图 8 所示。

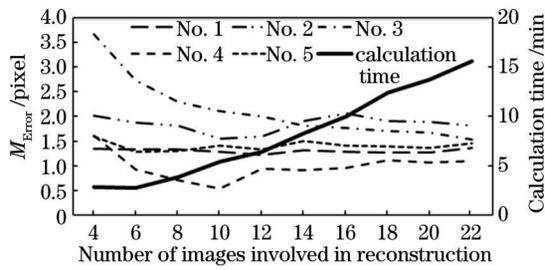


图 8 图片数量对测量精度和时间的影响

Fig. 8 Influence of image quantity on measurement accuracy and time

分析图 8 可知:在拍摄区域确定的条件下,图片数量大于 2 张时即可完成重建;当图片数量少于 8 张时,测量精度受初始图片选取的影响较大且整体误差较大;随着相同区域内所拍摄的图片数量的增加,测量精度总体上随图片数量的增加而提高;当图片数量增加到一定程度后,提升效果不再明显。此外,随着拍摄区域内图片数量的增加,测量程序运行的时间也在增加,且增速呈加快趋势。

因此,在预制梁场中进行测量时,宜保证采集的图片数量不少于 8 张。同时,保持各图片拍摄间隔均匀有助于提升 3D 重建的精确性。需要说明的是,重建精度和时间不仅受图片数量的影响,还受图片组中能够匹配的特征点数量的影响,故在环境背景特征点较多时可酌情减少图片数量,在环境背景特征点较少时也宜酌情增加图片数量。

3.4 相机光轴夹角

采集数据时不同编码标记点所处光轴夹角不同,

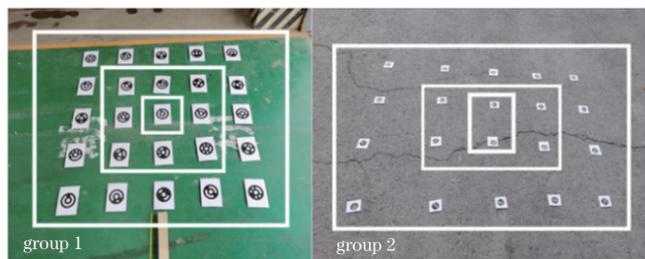


图 10 相机光轴夹角因素实验现场

Fig. 10 Experimental site of camera optical axis angle factor

表 5 不同光轴夹角下标记点测量精度

Table 5 Measurement accuracy under different optical axis angles

Group No.	Angle of optical axis / (°)	M_{Error} / pixel
1	Centre marker points: 0-5; inner circle marker points: 5-15; outer ring marker point: 15-25	Mean value of centre marker points: 1.783; mean value of inner circle marker points: 2.012; mean value of outer ring marker point: 2.477
	Centre marker points: 0-5; inner circle marker points: 5-15; outer ring marker points: 15-30	Mean value of centre marker points: 0.902; mean value of inner ring marker points: 0.975; mean value of outer ring marker points: 1.168

因此,在预制梁场中进行测量时,宜在每张图片中将待测区域置于图片中央并保持 30° 内的光轴夹角。

位于图片四角的标记点通常受畸变影响较大,因此有必要探究光轴夹角对所提测量方法的影响。为研究该问题,将编码标记点由内至外依次分为中心、内圈和外圈三个区域,分两组情况研究测量精度。本文中所描述的光轴夹角指相机光轴与相机主点连向被摄编码标记点中心的直线之间的夹角,如图 9 所示。

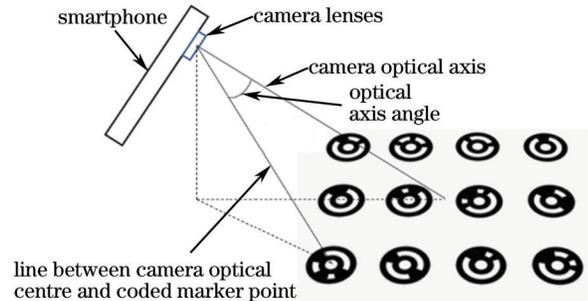


图 9 光轴夹角示意

Fig. 9 Illustration of optical axis angle

第一组编码标记点实际直径为 15 cm,图中直径为 60~120 pixel,拍摄高度为 2.0 m。第二组编码标记点实际直径为 4 cm,图中直径为 40~80 pixel,拍摄高度为 2.0 m。实验现场情况如图 10 所示。

对两组数据进行数据采集,均拍摄 6 张图片并将待测区域置于图片中央,根据测量数据分析各组数据中心编码标记点的平均 M_{Error} 、内圈标记点的平均 M_{Error} 和外圈标记点的平均 M_{Error} 。所得结果如表 5 所示。

分析表 5 可得,当被摄编码标记点光轴夹角较大时,测量误差较大,且误差随夹角的增大而增大,但误差增大并不明显。

若待测区域较大,可将点位布置紧凑,或采用调整拍摄距离和相机焦距等方法来获得更大的拍摄视野。

4 测量及调整方法验证实验

4.1 在实验室内验证测量算法精度

本研究在实验室内选取光线温和且背景具有较丰富特征的待测区域开展实验,以验证测量算法在实验室内的测量精度,现场如图 11 所示。

首先,将标定物布置在待测区域中。然后,将其他编码标记点布置在标定物周围,标记点实际直径为 4 cm,在图中直径为 70~90 pixel。接着,采集 8 张图片,采集过程中将待测区域置于图片中央,相机在拍摄过程中高度为 1.5 m,拍摄距离约为 2.0 m。最后,采用本研究中的测量方法处理各组图片。

本部分通过比较待测编码标记点间实际 3D 坐标与所提方法算得的 3D 坐标评价测量精度。其中,各基

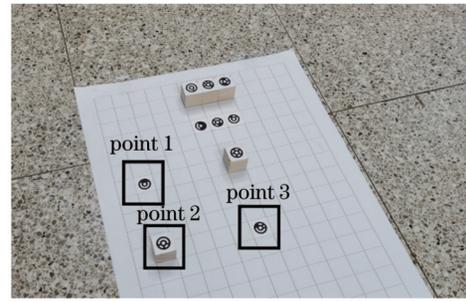


图 11 测量算法精度验证实验

Fig. 11 Validation experiment of measurement algorithm accuracy

准编码标记点实际坐标可根据平面网格和立方体块尺寸确定,测量结果如表 6 所示。

表 6 测量精度验证实验结果

Table 6 Results of measurement accuracy verification experiments

Point No.	Actual 3D coordinates of marker point read by calibrator /mm	3D coordinates of marker points obtained by proposed method /mm	Deviation /mm
1	(300.0, -240.0, 0)	(300.7, -240.8, -0.8)	1.3
2	(540.0, -240.0, 60.0)	(543.3, -241.7, 58.7)	3.9
3	(540.0, 60.0, 0)	(542.4, 58.8, 0)	2.6

由表 6 可得,通过计算机视觉方法测量得到的编码标记点 3D 坐标与实际 3D 坐标的最大偏差为 3.9 mm。

4.2 在预制梁场中验证测量精度

本研究在某预制梁场中开展实验,对所提方法进行验证。预制梁场中现场待测区域光照强度较大,背景具有较丰富的特征。首先,将标定物放置在已调整就位的模板上。然后,在待测模板的指定位置处布置编码标记点,标记点实际直径为 4 cm。在钢模板上采集 2 组数据,每组各含 8 张图片,采集过程中将待测区域置于图片中央。最后,采用所提方法分别处理所采集的 2 组图片,以验证系统的精度和可重复性。为把握测量误差,在完成拍摄后,用中纬 ZTS602 全站仪测

量各编码标记点中心的 3D 坐标用于对比验证。现场图片如图 12 所示,编码标记点布置情况如图 13 所示。



图 12 预制梁场验证实验

Fig. 12 Precast girder yard validation experiments

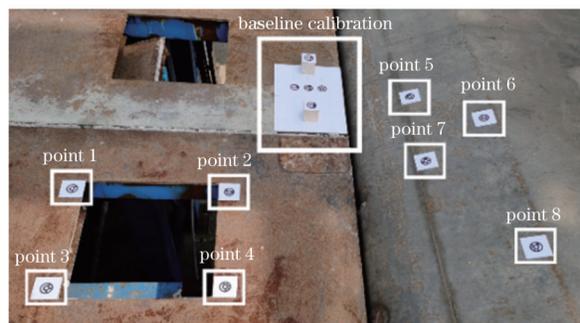


图 13 编码标记点布置情况

Fig. 13 Layout of coding marker points

本研究选取已调整就位的模板旁的底模和侧模上的 8 个编码标记点,通过比较其全站仪测得的标记点实际 3D 坐标与本文程序算得的 3D 坐标来评价所提方

法中 3D 坐标测量精度,得到的两种方法的测量结果如表 7 所示。

表 7 预制梁场验证实验结果
Table 7 Results of precast girder yard validation experiments

Point No.	Group No.	Actual 3D coordinates of marker point read by calibrator /mm	3D coordinates of marker point obtained by proposed method /mm	Deviation /mm
1	1	(-207.0, -1076.0, -92.0)	(-210.0, -1074.1, -91.9)	3.6
	2	(-207.0, -1076.0, -92.0)	(-207.2, -1075.6, -95.0)	3.0
2	1	(-458.0, -604.0, -92.0)	(-461.1, -600.7, -92.7)	4.6
	2	(-458.0, -604.0, -92.0)	(-460.3, -600.3, -94.3)	5.0
3	1	(-545.0, -1259.0, -115.0)	(-547.4, -1253.9, -109.6)	7.8
	2	(-545.0, -1259.0, -115.0)	(-549.3, -1254.3, -111.8)	7.1
4	1	(-800.0, -786.0, -115.0)	(-802.1, -781.4, -116.5)	5.3
	2	(-800.0, -786.0, -115.0)	(-804.7, -782.2, -119.7)	7.7
5	1	(-448.0, 211.0, 48.0)	(-444.9, 208.2, 47.4)	4.2
	2	(-448.0, 211.0, 48.0)	(-448.3, 207.7, 48.4)	3.3
6	1	(-738.0, 316.0, 119.0)	(-735.0, 315.4, 114.9)	5.1
	2	(-738.0, 316.0, 119.0)	(-733.8, 315.6, 117.4)	4.5
7	1	(-762.0, 40.0, 46.0)	(-758.8, 39.1, 43.6)	4.0
	2	(-762.0, 40.0, 46.0)	(-762.9, 39.3, 44.5)	1.9
8	1	(-1254.0, 51.0, 118.0)	(-1250.6, 52.2, 114.0)	5.4
	2	(-1254.0, 51.0, 118.0)	(-1257.3, 52.7, 114.9)	4.9

通过表 7 可得,由计算机视觉方法测量得到的 2 组编码标记点 3D 坐标与全站仪测量得到的 3D 坐标的最大偏差为 7.8 mm,这对节段梁模板姿态测量和架设调整来讲是可以接受的,该结果也说明所提方法具有稳定性和可重复性,能够用于工程实践。随着拍摄距离的增大,图像中每个像素所代表的实际距离也将增大,可通过采用分辨率更高的相机拍摄或缩短拍摄距离的方法来提升测量精度。

由于所提方法能够完成较高精度的 3D 坐标测量,

因此根据任意不共线的三个待测编码标记点的 3D 坐标,即可求得待测模板相对已调整就位模板的姿态。

4.3 讨 论

将所提方法的测量精度、测量成本和测量时间等指标与全站仪测量、激光扫描等方法进行对比,结果如表 8 所示。需要说明的是,笔记本电脑不是数据采集设备,但属于测量工具的一部分,因此未统计其质量,但统计了其成本。

表 8 常见测量方法性能对比
Table 8 Performance comparison of common measurement methods

Parameter	Proposed system	Total station	Laser scanning
Instrument cost /yuan	15000 (CNY)	50000 (CNY)	300000 (CNY)
Instrument weight /kg	0.2	3.5	6.0
Indoor measurement accuracy /mm	5.0	5.0	1.0
Field measurement accuracy /mm	8.0	5.0	1.0
Measurement time /min	4.0	15.0	2.0
Calculation time /min	6.0	10.0	3.0
Multi-point measurement	Support	Unsupported	Support
Personnel requirement	Single	Double	Single
3D coordinate measurement	Support	Support	Support

《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)^[26]要求节段梁模板安装过程中高程和轴线偏位的允许偏差应在-10~10 mm 以内,研究依托的项目提出测量精度符合规范要求,测量成本和时间尽可能少的工程需求。由表 8 可知,本研究中应用的基于计算机视觉的测量方法具有成本低、测量速度快和使用方便等优势,能够较好地满足这一需求。在常见的节

段梁模板姿态测量和架设调整场景中,所提方法相较全站仪测量能够节省 50% 以上的测量时间、降低 80% 的测量成本、单次测量多个点位且不需要多人操作,所提方法相较激光扫描能够节省 95% 的设备成本、降低 80% 以上的仪器质量。此外,智能手机具有完整的网络通信功能,传输数据和展示调整量都更加方便。为此,本研究组未来将把所提方法与建筑信息模型

(BIM)、云平台等技术结合起来,通过手机开展数据采集传输和调整量展示工作,将 3D 重建和调整量计算等相关程序置于云服务器中通过手机进行调用,以使整个测量调整过程更加快捷方便。

5 结 论

基于计算机视觉技术,提出一种可以快速测量预制梁场中的节段梁模板控制点 3D 坐标的方法。首先,通过实验探究现场光照强度、现场背景特征、拍摄图片数量和相机光轴夹角等因素对测量精度的影响。然后,通过实验验证了所提方法的可行性和适用性。最后,将所提测量方法与常见测量方法进行对比。通过本研究,可以得出以下结论。

1) 通过选择光线温和且背景多特征的环境、将待测区域置于相机视野中央拍摄适宜数量的图片等措施能够保证 3D 重建的稳定性和适用性。当现场条件不满足时,可通过人工增加特征点、遮阳、更换焦距和更换拍摄位置等方法提高测量精度。

2) 所提方法在满足上述拍摄条件的前提下能保证节段梁模板控制点 3D 坐标测量的精度要求,从而比较准确地测量预制梁场中节段梁模板的姿态。

3) 所提方法在解决模板调整等工程问题时相较于全站仪测量等传统方法在测量成本、测量时间和测量方便程度等方面均具有较为明显的优势,能够有效克服现有测量方法耗时费力且成本高的不足。

参 考 文 献

- [1] Pawłowicz J A, Szafranko E, Harasymiuik J. 3D laser scanning in civil engineering: measurements of volume of earth masses[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 324(1): 012005.
- [2] Lenda G, Uznański A, Strach M, et al. Laser scanning in engineering surveying: methods of measurement and modeling of structures[J]. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2016, 100(1): 109-130.
- [3] Nassif H H, Gindy M, Davis J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration[J]. NDT & E International, 2005, 38(3): 213-218.
- [4] Ma Z W. Application of GPS positioning technology in civil engineering survey[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 560(1): 012003.
- [5] 李馨, 赵加清, 张证明, 等. 基于数字图像相关的自适应应变场计算[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2312002.
Li X, Zhao J Q, Zhang Z M, et al. Self-adaptive strain field calculation based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2312002.
- [6] 王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 200401.
Wang F, Zhao L, Wu X D, et al. Measurement and analysis of concrete deformation field based on CT and digital image correlation method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 200401.
- [7] Ma Z L, Liu S L. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 37: 163-174.
- [8] 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.
- [9] 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(1): 91-110.
- [10] Ye X W, Yi T H, Dong C Z, et al. Vision-based structural displacement measurement: system performance evaluation and influence factor analysis[J]. Measurement, 2016, 88: 372-384.
- [11] Marčíš M, Fraštia M, Augustin T. Measurement of flat slab deformations by the multi-image photogrammetry method[J]. Slovak Journal of Civil Engineering, 2017, 25(4): 19-25.
- [12] 简振雄, 王晰, 任杰骥, 等. 基于近场光度立体视觉的金属表面纹理重构[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1112002.
Jian Z X, Wang X, Ren J J, et al. Metal surface texture reconstruction based on near-field photometric stereo[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1112002.
- [13] 王永红, 朱奕磊, 高启学, 等. 基于数字图像相关法的空间目标位姿测量[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0812001.
Wang Y H, Zhu Y L, Gao Q X, et al. Position and pose measurement of spatial object based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0812001.
- [14] 刘胜道, 邢成聪, 周国华. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统的测量精度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1415007.
Liu S D, Xing C C, Zhou G H. Measuring precision analysis of binocular vision system in remote three-dimensional coordinate measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1415007.
- [15] 余慧杰, 韩平畴. 双目视觉系统的测量误差分析[J]. 光学技术, 2007, 33(S1): 157-159.
Yu H J, Han P C. Measuring errors analysis of binocular vision system[J]. Optical Technique, 2007, 33(S1): 157-159.
- [16] 汪意志, 张旭东, 熊伟, 等. 光场相机视觉测量误差分析[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1112004.
Wang Y Z, Zhang X D, Xiong W, et al. Error analysis of vision measurement based on the light field camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1112004.
- [17] 肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. 光电工程, 2014, 41(2): 6-11.
Xiao Z T, Zhang W Y, Geng L, et al. Accuracy analysis of binocular vision system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(2): 6-11.
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 左承林, 马军, 岳廷瑞. 视觉测量中环状编码标记点检测与识别方法[J]. 测控技术, 2021, 40(2): 48-52.

- Zuo C L, Ma J, Yue T R. Detection and recognition of circular coded targets in vision measurement[J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(2): 48-52.
- [20] 张维中, 张丽艳, 潘振宽, 等. 一种基于标记点的近景摄影测量系统[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(5): 741-745.
- Zhang W Z, Zhang L Y, Pan Z K, et al. Close-range photogrammetric system based on reference points[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, 36(5): 741-745.
- [21] Moulon P, Monasse P, Marlet R. Global fusion of relative motions for robust, accurate and scalable structure from motion[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 3248-3255.
- [22] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 1150-1157.
- [23] Fischler M, Bolles R. A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [24] 宋丽梅, 陈昌曼, 陈卓, 等. 环状编码标记点的检测与识别[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3239-3247.
- Song L M, Chen C M, Chen Z, et al. Detection and recognition of cyclic coded targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3239-3247.
- [25] Lourakis M I A, Argyros A A. SBA: a software package for generic sparse bundle adjustment[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2009, 36(1): 1-30.
- [26] 交通运输部关于发布《公路桥涵施工技术规范》的公告 [EB/OL]. (2020-06-30)[2022-01-16]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202006/t20200630_3321368.html. Announcement of the ministry of transport on the release of technical specification for the construction of highway bridges and culverts[EB/OL]. (2020-06-30)[2022-01-16]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202006/t20200630_3321368.html.