

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108070

改进稠密双目匹配算法在输电线路 基础三维重建的应用研究*

周 茂¹ 胡立锦¹ 欧开鸿¹ 林 羲²

(1. 国网重庆市电力公司建设分公司 重庆 410021; 2. 国网重庆市电力公司经济技术研究院 重庆 410021)

摘要: 三维扫描技术具有准确性强、精度高等优势,在工件尺寸测量、体积测量等方面得到了初步的应用。然而,针对输电线路基础这类大尺寸、低纹理特征的对象,其获得的三维点云较为稀疏,匹配精度还存在一定问题,测量精度无法达到特高压电网建设的要求,应用还存在一定难度。为了解决上述问题,本文建立双目摄像系统的数学模型,通过改进的 Census 变换和高斯加权操作提高图像匹配代价计算的精度,结合基于纹理信息的图像边缘保留滤波方法,计算得到目标表面的稠密点云,实现了三维表面重建。通过对 220 kV 电网基建工程进行三维测量实验,实验结果表明本文提出的三维测量方法和系统,测量误差低于 1 mm,满足输电线路工程基础质量设计和验收规范要求,能够广泛应用于电网基建工程基础验收等环节,提高验收精确度。

关键词: 三维测量;线路基础;地脚螺栓;双目摄像;稠密点云

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.40

Application of 3D rebuild based on improved dense binocular matching algorithm in transmission line foundation positioning and measurement

Zhou Mao¹ Hu Lijin¹ Ou Kaihong¹ Lin Xi²

(1. Construction Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 410021, China; 2. Research Institute of Economics and Technology of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 410021, China)

Abstract: With great accuracy and high precision, the three-dimensional scanning technology has been preliminary applications in workpiece measurements, volume measurements, etc. However, for the objects of large size and low texture characteristics (like transmission line), the three-dimensional point clouds are more sparse, the matching accuracy is still problematic, and the measurement accuracy cannot meet the requirements of the special high-voltage grid construction, which means that its application may have some difficulties in this regard. In order to solve the above problem, the paper establishes the mathematical model of the binocular camera system. The accuracy of the image matching cost calculation is improved by improved Census transform and Gaussian weighting operation. Combined with the image edge preserving filtering method based on texture information, the dense point cloud of the target surface is calculated, and the 3D surface reconstruction of the measured target is realized by splicing the dense point cloud. Through the 3D measurement experiment of 220 kV grid infrastructure, the results show that the measurement error is less than 1 mm. the 3D measurement method and system proposed by the papers, which meet the basic quality design and acceptance requirements of transmission line project, can be widely used in the power grid infrastructure project, to improve the accuracy of acceptance.

Keywords: three dimensional measurement; line foundation; anchor bolts; binocular camera; dense point cloud

0 引 言

随着中国社会和经济的快速发展,建设特高压交直流

输电线路已变成当今电网前进的重要方向。然而,目前特高压输电线路的基础验收仍依靠人工测量,实际验收时发现传统的检测验收手段在检测精度、检测全面性、真实性等

收稿日期:2021-10-12

* 基金项目:国网重庆市电力公司科技项目(20201E-9001005-1636)资助

方面存在较明显的局限性,为后续的输电线路安全稳定运行埋下安全隐患。因此,有必要利用现代化方法,对验收测量手段进行改进和提升,三维扫描技术就是一个不错的方案。

三维扫描技术分为接触式和非接触式,接触式的方法并不适合输电线路工程的现场测量。非接触式测量的常用方法有激光三角法、室内 GPS 测量系统、结构光测量法、双目视觉测量系统等,它们在在系统精度,设备昂贵程度,适用范围方面都有所不同^[1]。激光三角法^[2]使用利用相似三角形的原理,不断改变发射激光束的角度,并通过传感器采集后,计算出被测物体表面的坐标。该方法适应性强,实时性好,但无法获得被测物的纹理信息,因此误差偏大。室内 GPS 基于三角测距的原理,测量精度高,但操作复杂,时间成本和价格都较高。结构光法使用光栅相位法可以实现三维测量,精度较高,但拍摄过程容易受到环境光的变化和细微震动的影响,无法适用于室外工程测量。双目视觉测量^[3]通过模仿人眼进行三维扫描,将双目相机获取的图像信息匹配处理和视差计算,得到物体表面的坐标信息。双目视觉测量优点是成本较低,理论精度高,可以满足输电线路的工程测量,但该方法的精度取决于匹配算法,且不利于远距离测量^[4]。

稠密双目匹配算法的研究有许多,Geiger 等^[5]通过在一组支持点上形成三角剖分来建立视差的先验值以减少其余点的匹配歧义,不过实验验证该方法面对各种目标纹理情况的鲁棒性不强。Kim 等^[6]尝试借助卷积神经网络和图片的边缘信息实现低纹理目标的双目稠密匹配,但是生成的网络太过依赖数据集和目标的边缘,对于连续的大尺寸低纹理表面不能产生令人满意的结果。对于输电线路基础这类物体尺寸大、纹理性较弱,获取的三维点云较为稀疏,传统算法针对性不够、鲁棒性较差,难以对其实现精确还原与测量。

本文以解决传统人工测量精度低、检测不全面、耗费大量人力资源为目的。针对输电线路基础测量特有的大尺寸、低纹理特性,提出一种改进的三维扫描技术。通过改进的 Census 变换和高斯加权操作提高图像匹配代价计算的精度,通过有针对性的去除稠密点云的背景噪声,用高反荧光贴片提升视觉测量在强光干扰下的稳定性和准确性,实现了在输电线路基础尺寸上的非接触式测量。实验结果表明,该方法大幅提升了输电线路基础测量的检测精度与准确性,实现了大尺寸、低纹理结构的数字测量,能够有效提升电网基建的数字化、智能化水平。

1 双目视觉测量

1.1 相机成像原理

视觉测量技术是通过高倍工业相机获取高质量数字图像,通过软件编程对图像做进一步的处理以提取有效信息^[7],单目相机成像模型如图 1 所示。

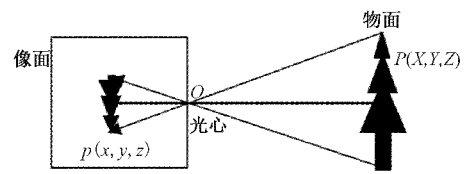


图 1 成像系统模型

图 1 中实物坐标为 $P(X, Y, Z)$, 镜像坐标为 $p(x, y, 0)$, 成像原点为 $O(0, 0, f)$, 则实物与镜像对应关系如式 (1) 所示。

$$(x, y) = \left(f \frac{X}{f - Z}, f \frac{Y}{f - Z} \right) \quad (1)$$

1.2 基于双目视觉的测量系统

双目视觉测量系统模型如图 2 所示, $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 和 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 分别为两个相机坐标系, $PO_1 O_2$ 被称为对极平面。

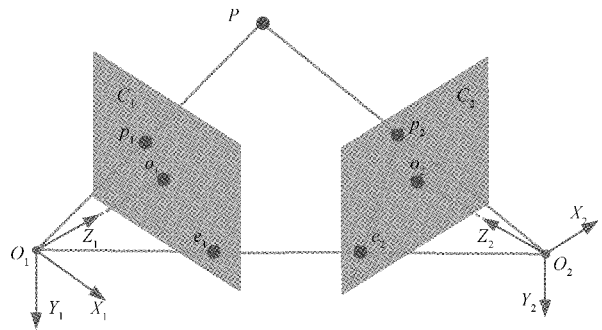


图 2 双目视觉测量系统模型

测量标定是寻找图像和现实物体之间对应关系的过程,像素空间和真实空间相对坐标系的转换关系^[8],如图 3 所示。

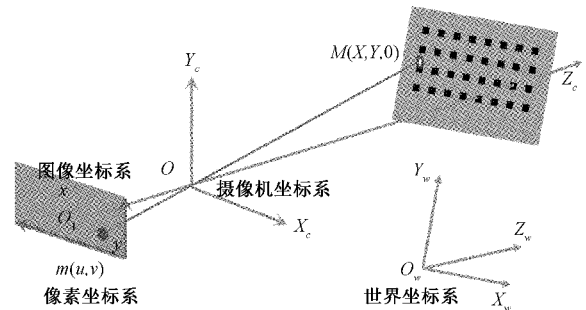


图 3 坐标系转换示意图

真实点 M 和它的镜像点 m 关系如下^[9]:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ t \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{K} 为相机内参阵, $[r_1 \ r_2 \ r_3]$ 是镜像点对真实点的旋转坐标, t 是镜像点对真实点的平移向量。

令 $H = [h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda \mathbf{K}[r_1 \ r_2 \ t]$, 则可得 $r_1 = \frac{1}{\lambda} \mathbf{K}^{-1} h_1, r_2 = \frac{1}{\lambda} \mathbf{K}^{-1} h_2$, 将 $r_1^T r_2 = 0$ 和 $\|r_1\| = \|r_2\| = 1$ 代入可得内参数矩阵的基本约束^[10], 进而通过线性约束求出内参矩阵 \mathbf{K} 。

$$\begin{cases} h_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} h_1 = h_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} h_2 \end{cases} \quad (3)$$

为了进行双目匹配和三维测量, 双目系统的立体参数也需要被标定出来即右相机坐标系相对左相机坐标系的刚体变换参数^[11-12] $[\mathbf{R} \ t]$, 示意图如图4所示。

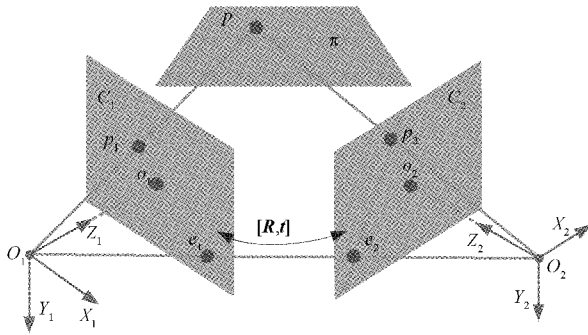


图4 图像处理程序框图

O_1 坐标系下有 $P_L = K_L[I \ 0^T] = [K_L \ 0^T]$, O_2 坐标系下有 $P_R = K_R[\mathbf{R} \ t]$, 假设被拍摄物体 P 为 $\mathbf{M} = [X_C, Y_C, Z_C]^T$, 且 $\tilde{\mathbf{M}} = [X_C, Y_C, Z_C, 1]^T$ 。两个相机获取的图像上对应点 p_1 和 p_2 的坐标分别为 $m_L = [u_L, v_L]^T H$, $m_R = [u_R, v_R]^T$ 且 $\tilde{m}_L = [u_L, v_L, 1]^T$, $\tilde{m}_R = [u_R, v_R, 1]^T$, 通过左右相机的像点即可求取双目系统的外参数旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 t 。

1.3 极线校正

在图4中, 假设左右相机相对于点 P 对称分布, 两个像点 p_1, p_2 的极线 $p_1 e_1, p_2 e_2$ 纵坐标相等, 即当极点 e_1, e_2 趋于无穷远时, 两条极线近似平行, 且需要保证两个极点有相同的纵坐标, 可得到系统的极线校正基础矩阵 \mathbf{F} 应当为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过极线校正最终可求得图像变换的单应矩阵 $\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{H}_L = \mathbf{F}$, 其中 $\tilde{m}_L = H_L m_L, \tilde{m}_R = H_R m_R$ 。使用 \mathbf{F} 的所有项计算 H_R 可以显著提高精度。

2 基于稠密匹配的三维重建

双目匹配是双目三维测量实现的最重要步骤, 即通过匹配代价计算, 得到左右目相机视图上对应匹配的点(如图2中的点 p_1 和 p_2), 从而进行三维信息的计算。为了得

到更多的点云本文采用稠密双目匹配的方法, 在对照片进行极线校正之后在右照片中找到左照片中所有像素的匹配像素点, 从而得到视差图。一般的匹配方法, 是通过点角纹理等信息, 对双目相机左右图片进行对应识别。但针对输电线路杆塔这种低纹理大尺寸的对象代价匹配是比较难的, 因此本文基于改进后的 Census 代价匹配算法进行三维重建。

2.1 改进的高斯匹配代价计算

圆形邻域内的双目纹理重合率要高于方形邻域, 为了有效增强双目相机低纹理相片匹配的鲁棒性, 本文提出一种改进的基于高斯权重的 Census 匹配代价计算方法。如图5所示, 0值(深色)区域为不做统计的区域, 其余区域的颜色代表了该位置的权重。

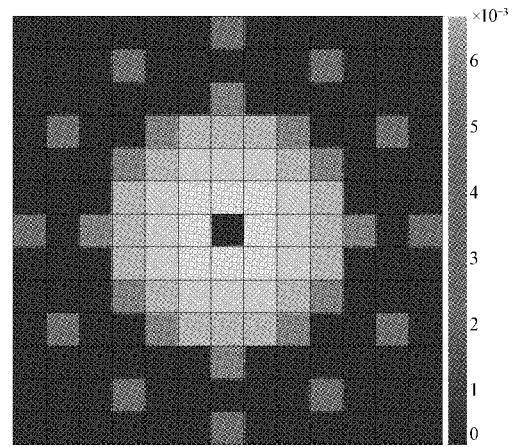


图5 加权 Census 变换图

首先使用加权 Census 变换图的统计区域按照传统 Census 变换的方式得到二进制向量 C_P , 和其等长的权重向量 W_C , 权重向量的元素和二进制向量的元素根据 Census 变换图一一对应^[12-13]。将权重向量 W_C 应用到传统匹配计算中, 对左右相机二进制向量 $C(P_L)$ 和 $C(P_R)$ 按位做异或 \oplus 运算, 再按位和权重向量相乘, 其和即为改进的 Census 匹配代价如式(5)所示^[14]。

$$C_{\text{cost}}(P_L, P_R) = C(P_L) \oplus C(P_R) \cdot W_C \quad (5)$$

2.2 表面三维重建

双目相机的标定参数经过极线校正之后, 利用视差图计算图像内容的三维信息一点云坐标。在获取点云坐标时, 因拍摄环境影响, 还存在很多离散的点, 这些离散的点大多都是由于匹配错误而出现的噪声, 为了提高后续的操作的准确性, 需将稠密匹配得到的点云坐标进行滤波, 同时滤波不能对已经准确匹配点的信息做平滑修改以避免误差累积^[15]。

为了实现大尺寸物体表面三维重建, 需对目标进行多次拍照或扫描, 并最终将多重点云拼接起来。拍摄时会在同一位置拍摄两次照片, 一次投影目标特征点的图案用于双目匹配和点云拼接, 另一次的图案用于还原物体表面的

纹理。在得到去噪后点云的同时,可根据含有投影点图案的双目图像建立一个去噪后的含有投影点纹理的三维点云。最后根据对应的匹配三维点对分别计算出两次拍摄所得点云的空间变换关系,将两组点云移动到同一个坐标系下,实现点云的拼接^[16]。

将点云信息进行八叉树分割以方便索引,通过三角网格的方法计算出点云的向量场,并根据泊松方程实现点云的三维曲面重建。

最后通过积分法,计算输出的曲面采样点与输入点云中距其最近的三维点的距离的均值来对重建模型的质量进行评价^[17],所有曲面最近点的距离之和,与所有曲面到其最近点距离均值成反比,即证明采用的方法可以达到重建精度要求^[18-20]。

表面三维重建流程框图如图 6 所示。

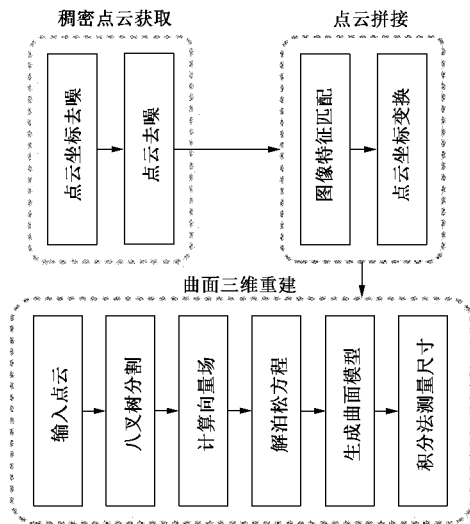


图 6 图像处理程序框图

3 输电线路基础尺寸测量系统及测试

3.1 减小双目测量误差

输电线路基础所处环境多处于野外强光环境下,外界环境容易造成背景噪声^[21-23]。同时混凝土基础外观和边缘与周围地表较为相似,往往不易实现基础部分特征信息的有效提取^[24]。

针对上述情况,本文提出了在线路基础表面增加超高反射荧光标记贴的方法,通过荧光颗粒的物理特性来提高扫描对比度和识别度。通过测试比选,将直径在 0.5 mm 左右的荧光粉颗粒,均匀涂抹在直径 1.5 cm 左右的超高反圆形纸片上如图 7 所示,所得效果更加理想,能够更好地提升双目测量在强光干扰下的稳定性和准确性。

3.2 双目测量仪器校准

如图 8 所示,对手持式双目三维扫描仪校准是数据采集前的一项重要工作,按照设备要求严格进行,仔细校正不准确的数据。

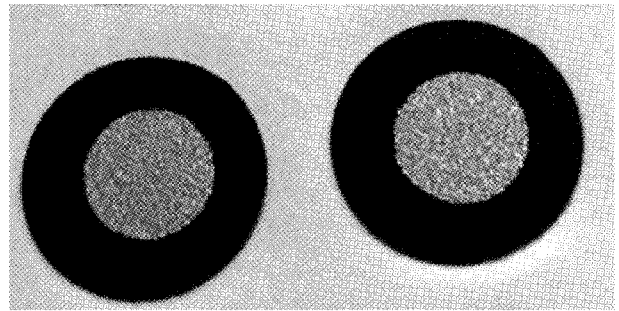


图 7 超高反射荧光颗粒

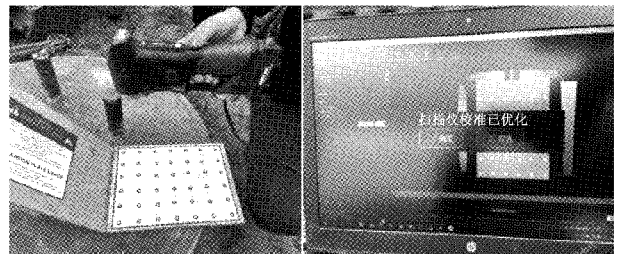


图 8 激光扫描仪校准

3.3 线路基础表面处理

由于线路基础和地脚螺栓表面尘土较多,使得直接扫描可能影响基础平整度测量,此时需要对扫描目标表面进行清理如图 9 所示,从而减少表面纹理干扰、增强漫反射,便于扫描仪更好地扫描出目标的三维特征。



图 9 线路基础表面处理

手持式双目三维扫描仪具有自定位功能,无需其他外部跟踪装置即可自动拼接完成扫描工作,而这主要通过在线路基础表面粘贴超高反射荧光标记定位靶标来实现。因此,为了快速准确地完成扫描工作,在线路基础的各个面上直接粘贴定位靶标,以满足扫描仪快速、准确完成全方位扫描的要求。

3.4 扫描数据采集

前期准备工作完成之后即可对线路基础和地脚螺栓进行扫描。利用手持式双目三维扫描设备对线路基础和地脚螺栓从不同的角度进行三维数据捕捉,并通过程序处理重建出相应线路基础的 3D 外观,如图 10、11 所示。

3.5 图像的预处理

手持式双目三维扫描仪在后台程序的支持下能够实现点云的自动拼接,按照前文介绍为进一步提高点云数据可用性,通过降噪、平波等手段对原始点云坐标数据进行预处

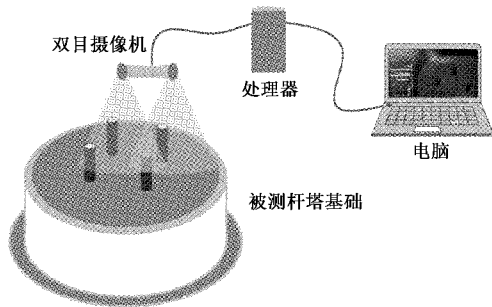


图10 扫描数据采集流程示意图

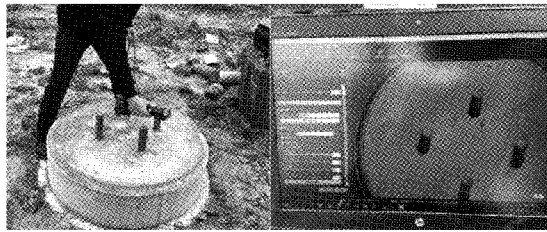


图11 扫描数据采集流程现场图

理,然后进行数据转化操作,最终才能在其基础上进行相应的几何参数检测,扫描原始数据和预处理后建模数据对比如图12所示。

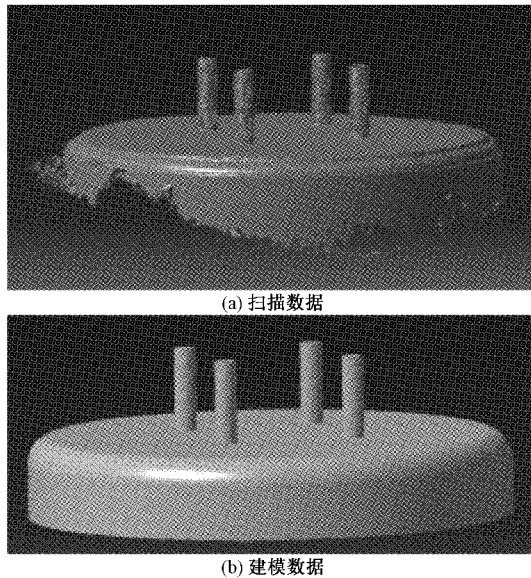


图12 扫描数据和建模数据对比

3.6 基于三维重建的尺寸测量

通过改进的三维扫描测量技术,可完整、准确地获得点云图像。在此基础上,通过边界分割提取和纹理识别实现线路基础直径、基础平整度、螺栓露高、中心点偏移等线路基础关键参数的测量,测量图像如图13所示。

4 测量数据的对比分析

4.1 人工测量的分析

目前,输电线路基础验收测量的常规手段,是采用人工

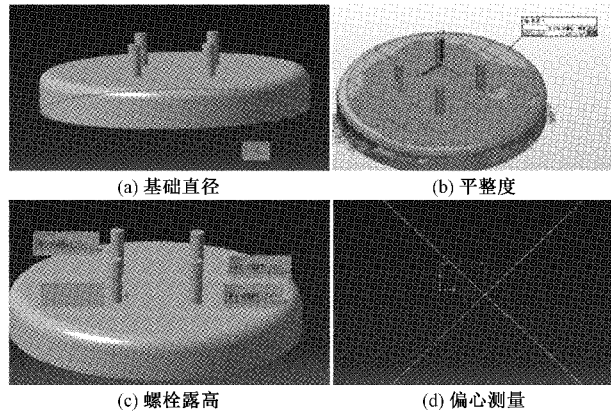


图13 测量图像

测量。为了验证稠密双目三维扫描的准确性,本文采用人工测量的方法,对线路基础直径进行了测量,并对结果进行了分析。

在本文的实测过程中,利用A、B、C、D、E五位工人对线路基础进行了5次重复测量验收如表1所示,从而分析不同人对测量结果误差的影响。

表1 人工测量数据 mm

序号	A	B	C	D	E
1	1 018	1 018	1 015	1 022	1 015
2	1 017	1 019	1 018	1 016	1 018
3	1 019	1 020	1 015	1 019	1 019
4	1 019	1 021	1 015	1 017	1 021
5	1 016	1 021	1 018	1 021	1 022

一般认为人的测量误差服从正态分布,可以用均值作为真实值^[23],如式(7)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

其中, μ 是均值, σ 是标准差。通过数据拟合,得到人工测量总体的均值 μ 为1 018.36 mm,标准差 σ 为2.23 mm。

对表1的结果分析如图14所示,5位工人的多次测量结果分析可以发现:

1)同一工人的多次测量结果,呈现明显的偏差,误差普遍在3~5 mm。在人工测量时,工人测量的手法,状态等不确定因素较多,对测量的稳定性不够,随机性很大。

2)不同工人测量的准确程度不同,其测量精度和人员素质高度相关。如工人A的测量更接近真实值,且稳定性也更好,而工人B测量值偏大,工人E的测量不够准确,且稳定性不够。

人工测量塔基的结果数据拟合,呈正态分布在95%置信度,其置信区间 $1\,018.36 \pm 2.23$ mm,可以说明人工单次测量的误差达到了4~5 mm,与GB 50233-2014《110~750 kV架空输电线路施工及验收规范》规定的3 mm在一个量级,

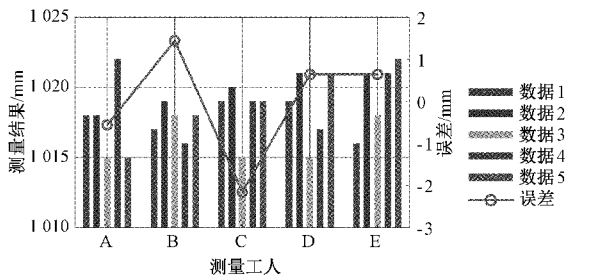


图 14 人工测量结果的误差分析

人工测量的误差对验收结果的影响是不可忽略的,因此亟需一个新型的测量方法提升测量的准确性。

4.2 双目三维扫描法

本文提出的双目三维扫描测量系统,通过双目摄像机对位置信息收集,通过程序进行降噪、滤波、积分测量,极大程度避免了人工的介入,在真实性、稳定性、精确度方面,都有着人工测量无法比拟的优势。

为了检验改进双目三维扫描法精度与可靠性,本文利用双目三维扫描测量系统,对杆塔基础与地脚螺栓的多个验收尺寸进行了测量。同时,与传统的激光三角法测量作为对比,以体现其在输电线路基础验收时的优势。并且,同前文一样,利用 5 位工人多次测量的结果的均值作为真实值,测量结果如表 2 所示。

表 2 线路基础激光三角测量与改进稠密双目匹配测量法结果对比分析表

编号	基础直径/mm			螺栓露高/mm			螺栓直径/mm			螺栓直角边距离/mm		
	激光三角测量	改进稠密双目匹配	真值	激光三角测量	改进稠密双目匹配	真值	激光三角测量	改进稠密双目匹配	真值	激光三角测量	改进稠密双目匹配	真值
GL11-A	1 015.5	1 018.2	1 018.2	145.09	151.11	151.24	40.82	46.15	46.11	266.99	277.80	278.72
				151.30	149.03	149.62	57.90	46.08	46.12	289.73	284.40	283.96
				163.02	152.05	151.03	47.81	46.33	45.40	285.01	288.70	289.04
				137.70	151.20	151.54	39.07	46.27	46.27	284.54	279.20	276.16
GL11-B	1 017.4	1 016.4	1 016.9	139.22	156.12	156.03	49.55	45.54	45.49	272.32	276.31	278.12
				160.70	152.82	152.67	46.37	45.26	45.46	281.12	284.64	283.92
				147.83	155.89	155.65	48.23	44.62	46.28	284.45	280.21	279.00
				150.34	158.68	158.27	41.00	45.14	45.12	279.42	282.52	282.24
GL11-C	1 005.1	1 003.5	1 004.0	161.08	152.09	152.00	47.99	45.07	45.3	286.15	283.50	283.36
				149.34	153.25	153.15	50.07	44.92	46.1	281.04	280.40	280.56
				153.07	154.36	154.78	44.43	45.84	45.1	287.05	286.80	286.72
				162.09	151.28	151.26	43.67	45.16	46.8	282.22	279.20	279.36
GL11-D	1 006.2	1 008.3	1 008.1	133.07	144.89	144.45	51.00	44.91	46.2	274.23	273.00	273.44
				159.22	154.09	154.53	44.23	47.06	47.3	278.10	277.50	277.36
				132.39	147.08	147.37	41.80	47.19	47.3	282.46	286.00	286.24
				162.83	150.10	150.32	48.89	45.37	45.4	280.03	281.00	279.84

需要说明的是,由于 4.1 节中已对人工测量的不确定性和误差进行了分析,本节为了避免描述的繁杂和重复,在表 2 中直接以多次测量的均值作为测量真值,不再对误差等进行重复分析。

由表 2 可知,改进后的稠密双目匹配算法都得到的结果误差更小,而激光三角法由于无法对被测物纹理识别和还原,在测量地脚螺栓的尺寸时,误差更明显。综上本文提出的稠密双目测量系统,在大尺寸、低纹理物件应用上,更具优势。改进型三维扫描测量的误差在 1 mm 以下,极大减小了测量误差,并且在测量精度方面可以精确到 0.1 mm,而常规测量方法的精度在 3~5 mm,验证了改进型三维扫描法在测量线路基础和地脚螺栓特征数据上的精度和可靠性。

同时,三维建模的数据可以存档在硬盘之中,方便保

存和查验,这对提升电网基建数字化、智能化水平,有着极大促进作用。

5 结 论

本文建立双目摄像系统的数学模型,对相机内外参数进行标定,在极线校正的基础上提出基于高斯加权操作的 Census 变换来提高图像匹配代价计算的精度,结合基于纹理信息的图像边缘保留滤波方法,实现稠密点云拼接和三维表面重建。通过实验证明该方法在高压输电线路工程铁塔基础及地脚螺栓等大尺寸低纹理光滑曲面的三维测量中应用的可行性。经过对比实验,系统测量误差低于 1 mm,满足输电线路工程基础质量设计和验收规范要求,本文提出的方法对改进工程类传统测量方式有广泛的应用前景和积极的推广价值。

参考文献

- [1] 乔俊峰,周沅楨,王永,等. 三维激光扫描测体积技术及其应用进展[J]. 激光与红外,2021,51(9):1115-1122.
- [2] 南卓江,陶卫,赵辉. 激光三角测量技术的应用与前景[J]. 自动化仪表,2019,40(12):1-5.
- [3] 刘洋. 大尺寸低纹理零构件的三维测量关键技术研究[D]. 吉林:吉林大学,2020.
- [4] 张会霞. 三维激光扫描点云数据组织与可视化研究[D]. 北京:中国矿业大学,2010.
- [5] GEIGER A, ROSER M, URTASUN R. Efficient large-scale stereo matching [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2010, DOI:10.1007/978-3-642-19315-6_3.
- [6] KIM K R, KIM C S. Adaptive smoothness constraints for efficient stereo matching using texture and edge information [C]. IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2016.
- [7] FAN X, WANG X, XIAO Y. A shape-based stereo matching algorithm for binocular vision [C]. IEEE International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics, 2014:70-74.
- [8] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程,2016,24(2):300-308.
- [9] NI Y, DAI J, ZHANG Y, et al. Research on target 3D reconstruction and measurement technology based on binocular vision and lidar [C]. 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2020.
- [10] 张潘杰. 基于机器视觉的复杂工件形位尺寸的高精度测量技术研究[D]. 济南:济南大学,2019.
- [11] ZHAO F, JIANG Z. A new algorithm for three-dimensional construction based on the robot binocular stereo vision system [J]. IEEE, 2012, DOI:10.1109/IHMSC.2012.168.
- [12] 崔恩坤. 高精度双目立体视觉测量系统关键技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.
- [13] 谢家欣. 基于机器视觉工件尺寸测量方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2018.
- [14] 吴凤英,魏章波,席金强,等. 基于单目视觉的球形电机转子方位测量方法[J]. 电测与仪表,2019,56(22):95-102.
- [15] STENTOUMIS C, AMDITIS A, KARRAS G. Census-based cost on gradients for matching under illumination differences [C]. 2015 International Conference on 3D Vision (3DV), IEEE Computer Society, 2015.
- [16] 高宏伟. 计算机双目立体视觉[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [17] 罗元丹,蒋刘华. 基于近景摄影测量技术的结构变形监测应用研究[J]. 中国金属通报,2019(6):286-288.
- [18] 刘敦利,蔡勤. 基于三维激光扫描技术的汽车油罐车容量测量研究[J]. 仪器仪表标准化与计量,2020(1):41-42,45.
- [19] 武瑛. DCT 变换在图像压缩中的应用[J]. 计算机与现代化,2013,1(4):103-106.
- [20] 冯洋. 基于小波包变换的红外弱小目标检测[J]. 计算机与现代化,2020(12):112-115.
- [21] 曾宪伟,赵卫明,盛菊琴. 小波包分解树结点与信号子空间频带的对应关系及其应用[J]. 地震学报,2008,30(1):90-96.
- [22] 屈稳太,诸静. 图像小波变换中的两个关键技术——滤波器的正则性与信号的边界处理[J]. 浙江大学学报(工学版),2003,37(2):185-189.
- [23] 杨璟,朱雷. 基于 RGB 颜色空间的彩色图像分割方法[J]. 计算机与现代化,2010,1(8):147-149.
- [24] 胡立锦,杨永全. 基于机器视觉技术的电缆结构参数检测系统研究[J]. 四川电力技术,2020,43(6):16-20.
- [25] MURPHY K P. Conjugate Bayesian analysis of the Gaussian distribution [J]. Def, 2007.

作者简介

周茂,高级工程师,硕士,主要研究方向为电网规划。

E-mail:zhoumao@sgcc.com.cn

胡立锦,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网规划与建设。

E-mail:275459793@qq.com