

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514796

基于激光定位的视频测流三维坐标精确标定方法^{*}

闵 星¹, 王 越², 蔡 钊¹, 刘宏伟¹, 刘九夫¹

(1. 南京水利科学研究院 南京 210029; 2. 水利部南京水利水文自动化研究所 南京 210012)

摘 要:利用视频监测河道表面流速推求断面流量是一种近年来广受关注的非接触式水文测流方法,其基本原理是通过图像识别算法计算水流表面纹理或粒子的像元位移速度,然后通过像素实际长度计算得到表面示踪体的实际速度,并将该速度作为水流速度。计算表面纹理或粒子的实际移动速度,需要获取视频范围内每个像素的精确坐标,因此视频测流的技术要点之一是获取相机视场范围内每个像素所对应的实际物理坐标,即视频标定,这对最终流速解算精度具有直接影响。通过对比分析设置标定靶点、旋转相机角度、利用岸基线等标定方法发现,目前视频标定存在工作效率低、精度不足、布点受环境制约、工作人员安全难以保证等局限性。通过理论分析结合应用实践,提出了一种基于激光定位的视频标定方法,适用于无岸基或复杂河道环境下的视频标定情景,一般单站点的标定工作可在 1 h 内完成,标定误差可达到 cm 级。以西霞院水文站视频测流设备标定为例,证明了该视频标定方法百米平均误差为 0.04 m,平均像素误差为 1.85 pixels,标定误差显著减小,有效提高了视频测流的准确度。该研究将从激光定位视频标定所需设备、解算方法、适用环境及注意事项等方面对该方法进行了详细论述。

关键词:激光定位;视频测流;三维坐标;视频标定;标定误差

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 570.15

Precise 3D coordinate calibration method for video-based flow measurement

Min Xing¹, Wang Yue², Cai Zhao¹, Liu Hongwei¹, Liu Jiufu¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: In recent years, video-based monitoring has become a well-established non-contact method for measuring river surface velocity and estimating cross-sectional flow. The basic principle involves calculating the pixel displacement velocity of water surface textures or particles, converting it into the actual velocity using the spatial scale corresponding to each pixel, and subsequently using this velocity as the water flow velocity. Accurate acquisition of pixel coordinates within the video frame is an essential process in video-based flow measurement, which directly affects the accuracy of the final velocity calculation. A comparison of several commonly used video calibration methods shows that current video calibration methods commonly suffer from low efficiency, insufficient accuracy, environmental constraints on target placement, and safety risks for personnel. Through theoretical analysis combined with practical application, the author proposes a laser positioning-based video calibration method tailored for scenarios without bank-based references or in complex river environments. This calibration method typically requires less than one hour per site, achieving centimeter-level accuracy. A case study of video calibration at the Xi Xiayuan Hydrological Station confirms that this method achieves an average error of 0.04 m over a hundred-meter distance and an average pixel error of 1.85 pixels, demonstrating a significant reduction in calibration error and improving the accuracy of video-based flow measurements. This paper provides a detailed discussion of this method from the perspectives of required equipment, calculation methodology, applicable environments, and key considerations.

Keywords: laser positioning; video flow measurement; three-dimensional coordinates; video calibration; calibration error

0 引 言

水文断面流量测验是防汛抗旱、水库调水调沙、水资源开发利用、流域生态环境保护等工作的关键和基础,人工水文流量测验不仅需要耗费大量人力物力资源,还需要配备相应的工程基础,且一般无法做到连续在线监测。侧扫雷达、视频法、时差法、固定式 ADCP (acoustic doppler current profiler) 等现代化流量在线监测设备可较好地应对上述人工测流面临的问题。其中基于视频法监测河道表面流速并推求断面流量是一种新兴的非接触式水文测流方案,也可能是未来的水文现代化测流技术发展的主要方向,近年来广受关注^[1-2]。视频测流的基本原理是通过分析视频图像中的水流表面示踪体特征(如波纹、气泡、漂浮杂物等)的变化速度来计算水流速度^[3]。较为常见的方法包括粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术^[4]、大尺度粒子图像测速 (large-scale particle image velocimetry, LSPIV) ^[5]、时空图像测速法 (space-time image velocimetry, STIV) ^[6]、光流跟踪测速法 (optical tracking velocimetry OTV) ^[7]、表面结构图像测速法^[8]等。这些方法根据适用性被广泛地应用于高水位落差、平直浅河、多漂浮物等情景,基本原理均是通过图像识别算法计算水流表面纹理或粒子的像元位移速度,即单位时间内表面纹理或粒子经过的像素数,再由像素实际长度计算得到表面示踪体的实际速度,并将该速度作为水流速度。因此,要计算表面纹理或粒子的实际移动速度,则需要获取视频范围内每个像素的精确坐标,即视频标定,这对视频测流的精度具有直接影响。

黄鹏等^[9]提出相机标定是视觉测量的基础,目的是建立图像中点像素坐标与实际场景点坐标之间的转换关系。邹方星等^[10]提出提高定位精度是推动智能发展的重要基础,而标定技术是提高定位精度的主要方法。刘同龔等^[11]提出高精度的定位技术是未来自动泊车技术发展的重要基石。对于全景河道,目前通常采用岸基标定的方法,即在视频视野范围内标定河道两岸固体特征点(定位标靶),通过建立特征点的像素坐标和实际经纬度坐标之间的关系,根据投影变换,计算得到各像素对应实际坐标的标定结果。随着视频测流各类技术的发展,为了追求更高精度,不同的安装环境对标定工作提出了更高的要求。例如,长江中上游山谷性河流水位变幅可达几十米,通常这类河道断面远端距离相机实际距离可达 300~500 m,这就要求标定结果必须是三维且满足远距离高精度标定要求。王禹等^[12]提出相机测量精度容易受测量距离及环境光照影响,俞贵涛等^[13]提出基于相机的视觉 SLAM (simultaneous localization and mapping) 可以利用图像中丰富的纹理信息,但是容易受

到光线的干扰。对于大江大河,当河宽较大时(大于 200 m 以上),视频测流往往无法兼顾大视野与河道表面纹理准确识别,为保障视频图像高分辨率与解译性,只能放弃全断面监测,改为监测主河道或使用云台运动相机分区块监测,这时视频视场内将全部为河道水体表面,缺少安装标靶的陆基表面,也难有稳定的其他特征点。再者,若牺牲部分视频分辨率,采用小焦距相机获取全断面视野,在河流两岸布设大量地面控制点也存在实际困难,尤其当两岸为山区峡谷时,布设不同高程岸基特征点,不仅存在安全隐患,对工作人员的安全构成严重威胁,跨河作业还费时费力。例如,基于变高单应的标定方法,引入比降参数确定水位的影响,提升了非正射条件的测量精度,但需要在待测河流两岸布设至少 6 个非共面的分散地面控制点,工作量、工作难度、安全隐患均较大。

为解决无岸基或跨河作业的标定问题,以往采用了无人机悬停、无人船泊停、航道浮标、漂浮示踪粒子和自然岸基特征点等各种方案,但存在水流冲击波动、无人机悬停不稳定和边缘像素清晰度低等问题,使得定位标靶无法完全固定或识别精度低,这极大地影响了标定精度。郭润泽等^[14]提出尽管通过多传感器联合解算可实现定位性能的提升,但受限于无人机自身位姿和观测距离对定位误差的影响,单机定位精度难以满足实时性与可靠性需求。此外,还有一类利用相机旋转和角度读取替代大量地面标定点的方法^[15-16],该方法虽然可减少标定点,但会引入角度本身测量误差为新的误差源,进而引起标定增量误差。获取相机角度的方法主要有刻度盘测量和内置姿态仪两种,不论是高精度云台亦或人工机械测量均难以保证精度,而角度对于该类标定方法属于敏感参数^[16],由角度误差引起的标定误差与物距、镜头倾角呈正向相关关系,主要表现为河道距离镜头越远、镜头倾角越小,角度引起的位置误差越显著,在实际应用时需要同时对传感器和摄像机的偏角进行严格检校。张振等^[17]提出利用断面水边线对像机进行标定,该方法需要已知断面地形、水位及摄像机定位等信息,在河道相对顺直情况,虽然该方法显著降低了系统成本和标定的复杂度,但标定精度有限,其最大绝对误差为 0.59 m,其 17 个校验点的平均百米折算误差为 0.21 m。

针对视频测流标定工作存在的工作量大、系统复杂、存在安全隐患、需要岸基视野等问题,本文首次提出了一种基于激光定位的无岸基河道视频测流标定方法,不仅有效解决了上述问题,适用于目前大多数的标定解算方法,还具备较好的精度。

1 方法介绍

设置标定靶点、旋转相机角度、利用岸基线等标定方法的基本原理均是获取尽量多个现实世界坐标物理量与

对应像素坐标值,并建立现实世界坐标和像素坐标对应关系,从而完成标定工作。其共同特征是要求标定点具备位置固定、现实世界坐标和像素坐标易获取的特性。本文提出了激光定位并结合全站仪进行高精度测量的标定方案,不仅符合上述特性需求,还解决了无岸基情形的标定问题,布设方案如图1所示。

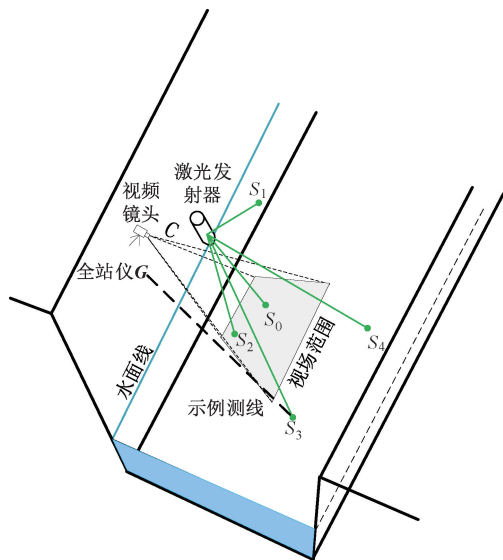


图1 布设方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of layout plan

该标定方法基本思路是首先安装固定工业相机,并布置激光发生器、架设全站仪,根据布点方案逐点同步采集实际物理坐标和像素坐标,完成采集后,进行解算获取相机标定参数。图1中绘制了5个标定点($S_0 \sim S_4$)仅为示意,实际应用中可根据需求布设更多标定点,布设位置选择岸基或水面均可,设置新的标定点仅需调整激光方向即可,平均设置一个标定点并完成测量的时间一般不超过1 min,整个测量过程工作人员基本无需移动,避免涉水或跨桥作业。该标定方法思路简明,操作方便快捷,可轻易获取大量标定点数据,从而保障最终标定精度。为获取更加精准的测量结果,实际应用中还应充分考虑和解决工作布设方案、水面激光光斑坐标测量及相机光心坐标确定等问题。

1.1 工作布设方案

由于激光在水体中会发生折射、散射及弥散,处于不同角度观察可能造成光斑中心发生视觉偏移的问题,因此根据现场条件,应设置相机、全站仪水平方向角较为接近为宜,使得光斑在相机中的成像和全站仪镜头中的成像一致,将相机与全站仪就近或同向布设即可。在镜头固定安装完成后,应根据实际地形和视野条件,尽量选取合适的位置架设全站仪,尽量减少移站操作。不同相机对不同光谱的感光系数不同,需要根据相机的感光系数

选取合适波长的激光光源。以本文案例使用的黑白工业相机为例,相机对波长520 nm左右的光谱感光系数最大,因此本文选取的为绿源激光。为增加光斑与环境的区分度,同时保证一定的工作光照,工作时间宜选取清晨或傍晚,避免晴天正午太阳光照过强,掩盖了激光光斑在相机中的成像效果。

1.2 水面激光光斑坐标测量

由于全站仪的测量原理是根据自带激光反射获取距离,同时获取准确的方位角,进而解算测点对象的准确三维坐标,一般百米测量精度可以达到毫米级,理想情况下不超过3 mm,有反射棱镜模式下精度更高。然而水面不仅无法架设反射棱镜,在无棱镜模式下水体对激光信号的吸收极强,根据实际工作经验,一般超过10 m距离就无法获取水面全站仪测距激光的反射信号,也就无法获取距离值。因此,通常无法直接利用全站仪测量水面光斑的准确三维坐标。

根据立体几何基本理论方法,可采用射线与平面交汇点求解光斑准确坐标,即通过全站仪测量的方向角构建射线,该射线与水面的交点即为光斑坐标。水面的实时水位值可通过附近水位监测站点(如水文站)获取或由全站仪直接测量岸基线获得,水位误差一般要求不超过2 cm即可。解算过程如下,设水位为 H ,全站仪坐标为 G ,待求光斑坐标为 S ,全站仪垂向、水平向方向角分别为 θ_1, θ_2 ,其中垂向角定义为水平 0° ,向上为正,水平角定义为正东方向 0° ,逆时针为正,全站仪测量值需要根据上述定义转换。

三维坐标系中,全站仪坐标、视方向向量如式(1)~(2)所示。

$$G = (G_x, G_y, G_z) \quad (1)$$

$$\mu = (\cos \theta_1 \times \sin \theta_2, \cos \theta_1 \times \cos \theta_2, \sin \theta_1) \quad (2)$$

构建射线方程参数形式,如式(3)所示。

$$L(t) = G + t \times \mu, t > 0 \quad (3)$$

当水位为 H 时,求解得到参数 t ,如式(4)所示。

$$t = \frac{(H - G_z)}{\sin \theta_1} \quad (4)$$

与水平面的交点即待求光斑坐标,如式(5)所示。

$$S(x, y, z) = G + \frac{(H - G_z)}{\sin \theta_1} \times \mu \quad (5)$$

1.3 相机光心坐标确定

采用单目成像模型,相机光心坐标需要被确定,但一般光心位置并无实体,且位于相机内部无法直接测量,但其距离感光芯片(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)中心的距离近似为焦距长。路思意等^[18]提出当被测表面对激光光斑形成均匀散射时,在CMOS的像面上生成的像的光强分布与入射到被测表面上的激

光束光强分布相似,光斑的能量中心对应激光光斑的中心位置。因此,可通过确定感光芯片的中心位置,再根据相机焦距估算光心坐标。确定感光芯片的方法是通过全站仪测量相机外壳多个外标记点,通过三维空间几何计算得到感光芯片中心位置,外标记点由工作人员根据现场视角情况确定,尽量做到全站仪不移站,方便求解。如图2所示一种外标记点典型布设方案,首先根据对称标记点 L_1 与 L_2 ,求解得到镜头中心坐标 O_1 ,再由 L_3 、 L_4 求解得到主光线(镜头方向)方向角及 O 与 O_1 点之间距离,根据三维空间参数形式方程,求解得到感光芯片中心坐标,再由焦距计算得到光心点 P 坐标。尽管通过相机外壳定位感光芯片中心和光心坐标可能存在误差,但相较于相机距水面标定点百米左右的距离,该误差对标定的影响较小,一般要求测量误差不超过1 cm即可。

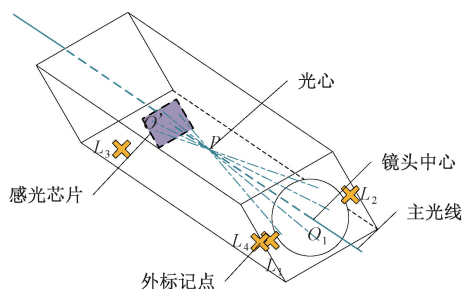


图2 外标记点典型布设方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical layout scheme of external target points

2 标定解算方案

本文采用单目针孔相机成像模型计算标定参数,其基本思路是构建光心至每个像素的三维直线参数方程,进而可实时获取任意水位条件下每个像素所代表的实际物理坐标值,示意图如图3所示。

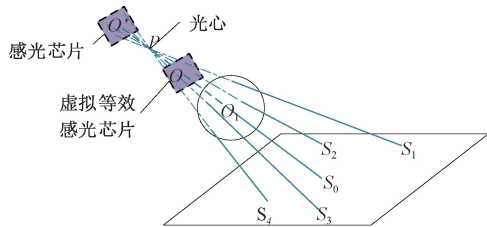


图3 测点光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path of target points

根据针孔相机的成像原理,可构建与光心对称的虚拟感光芯片,通过直接计算虚拟芯片中的成像,不仅将倒置影像转正,也减少了非必要的计算量,最少仅需要设置现实世界坐标系(经纬度投影坐标)和像素坐标系两个

坐标系,大大减少了系统程序设计和解算难度。

设像素坐标系的原点为虚拟感光芯片中心点 O ,观察者位于光心 P 点, x 与 y 轴的正向分别为向右和向上,各像素在像素坐标系中的值需要根据图像像素位置进行转换。一般工业相机的像素为正矩形,设像素坐标系单位长度为感光芯片单个像素的边长,则对于 $N \times M$ 分辨率的相机,对应的坐标范围应为横向 $[-N/2, N/2]$,纵向 $[-M/2, M/2]$ 。例如对于本研究采用的相机参数,按CMOS横向边长0.013 m占横向像素数2 448个计算,对应横坐标范围为 $[-1\ 224, 1\ 224]$,单个像素边长则为 $5.31\ \mu\text{m}$ 。为方便理解和表述虚拟感光芯片中建立的坐标系,将单个像素边长称为一个像素单位,像素单位既表示图像中的像素个数或距离,也表示在虚拟感光芯片中建立的坐标系单位坐标长度(即 $5.31\ \mu\text{m}$)。

本标定方法的目标是要确定自 P 点发射穿过各个像素的空间直线方程参数,如图3所示,对于测量点 $S_0 \sim S_4$,光心坐标 P 与标记点均已测量,视为已知,根据两点坐标可确定空间唯一一条直线,对于实测点来说,其对应的空间直线方程参数视为已确定。对于其他像素的求解,需要确定光心距感光芯片(焦距)的像素长度。由于像素坐标系横纵角度是相对独立的,即单个维度像素值便可确定该方向的方向角,可将三维像素坐标系转化为二维,即每次只求解纵向或横向方向。

设有测量点 S_1 和 S_2 , P 为光心, O 为坐标原点,则相关坐标条件包括: $S_1(0, m)$ 、 $S_2(0, n)$ 、 $P(-f_x, 0)$ 、 $O(0, 0)$ 和 $\angle S_1PS_2$,其中 m, n 为实测像素坐标(横向或纵向), f_x 为待求焦距(长度单位为像素长度), $\angle S_1PS_2$ 可根据实际坐标由三角函数直接计算,令其为 α 。

根据三角几何关系可计算得到 f_x ,如式(6)所示。

$$f_x = \sqrt{\frac{(m^2 + n^2) \times (\cos \alpha)^2 - 2 \times m \times n + \sqrt{D}}{2 \times (\sin \alpha)^2}} \quad (6)$$

式(6)中 D 的表达式为:

$$D = [2 \times m \times n - (m^2 + n^2) \times (\cos \alpha)^2]^2 - 4 \times m^2 \times n^2 \times (\sin \alpha)^4 \quad (7)$$

计算得到 f_x 后,对于任意测量点,可计算该点偏离镜头主轴方向(PO 方向)的角度,如式(8)所示。

$$\beta = \arctan\left(\frac{m}{f_x}\right) \quad (8)$$

其中, β 为偏离角度值(横向或纵向), m 为对应方向像素坐标。

得到偏离角度值后,结合测量点实际角度值,即可计算得到镜头主轴方向 PO 的方向角。该方法最低需要两个测量点,但实际作业时,为提升测量精度及可靠性,测量的标定点通常较多,可以不同测点对计算的均值作为最终计算值。

在确定镜头光心位置及主轴方向后,对于任意像素,即可根据像素坐标,计算该像素偏离镜头主轴的方向角,并根据光心坐标及方向角,最终确定该像素的三维空间直线方程参数。

3 案例分析

本文以西霞院水文站视频测流设备标定为案例,开展了该方法的应用研究和检验分析。西霞院水文站位于黄河干流中下游,监测断面宽 1 500 m,日常水面宽约 300 m。本文标定工作安排在河道右岸水文站缆道房二楼,相机镜头安装于缆道房顶部,相机安装位置及激光定位现场情况如图 4 所示。

图 4(b)为激光发生器开启后的实际拍摄照片,开展标定工作时需要从相机影像中采集光斑像素位置,同时使用全站仪测量经纬度投影坐标,一般是逐个标定点(光斑)采集,因此,可同时开启多个激光发生器逐个采集,也可以单个激光发生器开启并采集完成后,通过转换方向,采集下一个点。

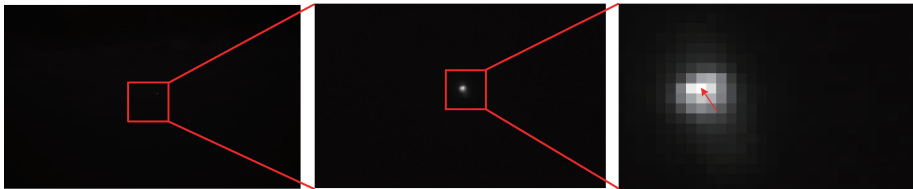


图 5 相机中光斑影像
Fig. 5 Laser spot image in camera

采用全站仪对镜头各特征点进行测量,计算得到光心位置,对各标定点进行测量解算,得到光斑经纬度投影坐标。对各标定点进行经纬度坐标测量时,同步截取相机影像照片,后期读取标定点(光斑)的像素位置,测量结果如表 1 所示。

由上述介绍的解算方法可知,取 17 个标定点中的任意两点,任意单个方向可计算得到相机焦距 f_x 。那么由 17 个标定点,可计算得到 272 个计算值,其中横纵各 136 个,计算结果分布如图 6 所示。

从结果中可以看出,当采用的两个标定点夹角较小时,计算得到 f_x 相差非常大。这是由于夹角角度较小时,角度误差对计算结果的影响更显著。因此在计算时,应剔除较小角度的计算结果,本文采用夹角 $>2^\circ$ 测点对的计算结果,如图 7 所示。

计算得到的平均焦距为 22 138 pixels,根据相机 CMOS 尺寸参数,其 CMOS 横向边长为 0.013 m,横向像素数为 2 448 个,计算得到实际焦距为 0.117 4 m,换算为 2/3 画幅则为 0.078 m,与相机镜头焦距标称值 0.075 m 基本吻合。

对于任意一个标定点,已知标定点的像素坐标以及

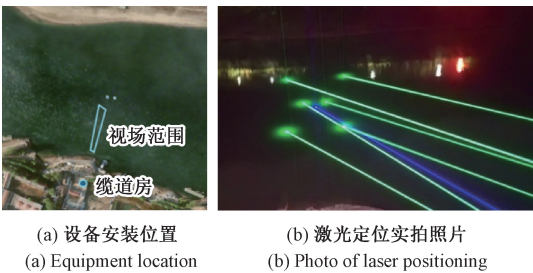


图 4 现场图示
Fig. 4 Field Diagram

本案例中采用的是黑白相机,典型相机中的光斑影像如图 5 所示。一般实际采集时,为尽量消除背景环境光线干扰,会选取自然光强较弱的时候开始工作,同时将相机曝光度尽量调低,使得标定点更加明显。另外,一般激光光斑并非正圆型光斑,而是趋近线条型,同时向两边有所映射扩散,因此在采集像素行列位置时,会根据线条方向寻找最亮的紧邻像素。如图 5 所示线条方向接近水平方向,最亮的像素约占据 2~3 pixels,因此,像素位置存在小数位估读。

表 1 标定点测量结果					
Table 1 Measurement results of target points					
名称	投影经度/m	投影纬度/m	高程/m	像素行位置	像素列位置
全站仪坐标	3 448. 345	8 349. 632	128. 73		
光心坐标	3 438. 714	8 315. 871	135. 47		
标 定 点	1	3 457. 933	8 388. 384	121. 72	84. 5 1 838. 0
	2	3 460. 278	8 387. 587	121. 72	807. 5 1 840. 0
	3	3 462. 697	8 387. 325	121. 72	1 506. 5 1 814. 0
	4	3 464. 901	8 386. 718	121. 72	2 165. 0 1 809. 0
	5	3 461. 314	8 399. 386	121. 72	194. 5 1 308. 0
	6	3 463. 792	8 399. 829	121. 71	766. 5 1 262. 0
	7	3 466. 306	8 397. 638	121. 71	1 539. 5 1 314. 0
	8	3 468. 725	8 397. 364	121. 71	2 142. 5 1 295. 0
	9	3 466. 280	8 417. 931	121. 71	179. 0 681. 0
	10	3 469. 694	8 419. 032	121. 71	799. 0 624. 0
	11	3 475. 038	8 420. 554	121. 72	1 728. 5 548. 0
	12	3 476. 656	8 417. 206	121. 72	2 269. 0 612. 0
	13	3 472. 445	8 441. 307	121. 72	152. 0 148. 5
	14	3 475. 730	8 438. 946	121. 72	802. 5 174. 5
	15	3 481. 179	8 439. 813	121. 72	1 647. 0 124. 5
	16	3 484. 246	8 436. 843	121. 72	2 310. 5 157. 5
	17	3 466. 887	8 403. 545	121. 72	1 221. 0 1 098. 0

注:表中经纬度坐标已作偏移处理。

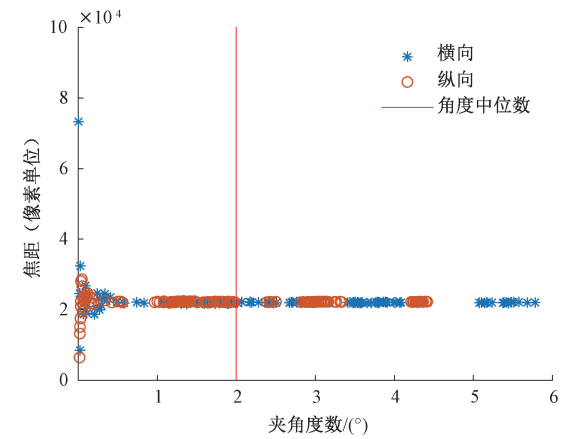


图 6 f_x 计算结果(按不同测点对的方向夹角角度排列)

Fig. 6 f_x calculation results (sorted by directional angle of different target point pairs)

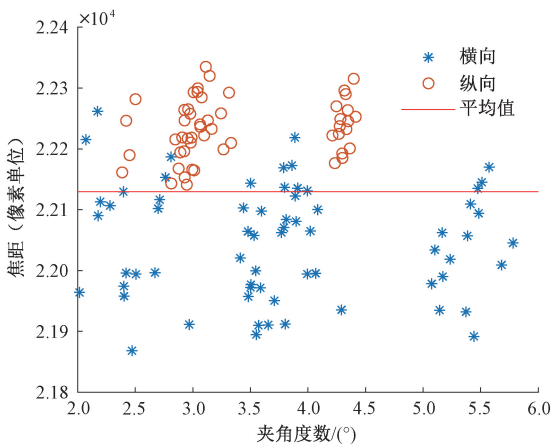


图 7 夹角 2°以上测点对的计算结果

Fig. 7 Calculation results of target point pairs (angle >2°)

焦距 (像素单位), 即可根据正切函数计算得到横(纵)向偏角, 即 PS 偏离 PO 的角度, 已知 PS 的角度, 便可计算得到相机方向 PO 横纵方向角度。计算结果如表 2 所示。

表 2 PO 方向角计算成果表
Table 2 Table of calculation results of PO direction angle

标定点	像素		横向偏角/(°)	纵向偏角/(°)	PS		PO	
	行坐标	列坐标			横向角/(°)	纵向角/(°)	横向角/(°)	纵向角/(°)
1	-1 140.0	-814.5	-2.95	2.11	75.15	-10.39	72.21	-8.28
2	-417.0	-816.5	-1.08	2.11	73.26	-10.41	72.19	-8.30
3	282.0	-790.5	0.73	2.05	71.45	-10.34	72.18	-8.30
4	940.5	-785.5	2.43	2.03	69.71	-10.32	72.15	-8.29
5	-1 030.0	-284.5	-2.66	0.74	74.86	-9.03	72.19	-8.30
6	-458.0	-238.5	-1.19	0.62	73.37	-8.92	72.18	-8.30
7	315.0	-290.5	0.82	0.75	71.35	-9.06	72.17	-8.31
8	918.0	-271.5	2.38	0.70	69.78	-9.00	72.16	-8.30
9	-1 045.5	342.5	-2.70	-0.89	74.88	-7.41	72.18	-8.30
10	-425.5	399.5	-1.10	-1.03	73.28	-7.28	72.18	-8.31
11	504.0	475.5	1.30	-1.23	70.86	-7.08	72.17	-8.31
12	1 044.5	411.5	2.70	-1.07	69.47	-7.25	72.17	-8.31
13	-1 072.5	875.0	-2.77	-2.26	74.95	-6.05	72.17	-8.31
14	-422.0	849.0	-1.09	-2.20	73.26	-6.11	72.17	-8.31
15	422.5	899.0	1.09	-2.33	71.09	-5.99	72.18	-8.32
16	1 086.0	866.0	2.81	-2.24	69.37	-6.07	72.18	-8.32
17	-3.5	-74.5	-0.01	0.19	72.19	-8.50	72.18	-8.30
平均值	-29.5	44.2	-0.08	-0.11	72.25	-8.19	72.18	-8.30

对于任意一个标定点, 理论上其计算得到的相机方向角 PO 应相等, 但由于测量误差的存在, 使得不同标定点计算得到的相机方向角存在一定的偏差, 本例中计算得到 PO 水平角与纵向角均方差分别为 $0.013\ 2^\circ$ 和 $0.009\ 4^\circ$, 误差属正常范围, 后续计算采用平均值作为相机方向角。

在计算得到光心坐标、焦距(像素单位)和 PO 方向角后,对于任意给定的像素坐标,即可根据基本三角函数计算得到方向偏角及方向角,进而得到关于该像素的空间直线方程,其过程可理解为 PO 方向角求解过程的逆运算。同样,对于任意已知的实际空间经纬度投影坐标,也可计算得到对应的像素坐标,即其在相机中的成像位置。

本案例中一共测量了 17 个标定点,可通过对这些标定点的验证计算,评估标定精度。图 8(a)是通过标定点的像素坐标计算实际坐标并与实测值进行对比分析,图 8(b)则是通过实际坐标计算像素坐标并与采集值进行对比分析。

如图 8 所示标定的整体误差较小。经纬度坐标误差最大为 0.407 m,最小为 0.010 m,平均误差为 0.108 m,相机距离视场中心距离为 95.2 m。各标定点的实际误差与标定距离总体呈正相关性,一般距离越远,实际误差越大,为便于比较,可将误差按照标定点离相机距离折算到百米误差,折算到百米的平均误差为 0.101 m,平均像素误差为 4.94 pixels。

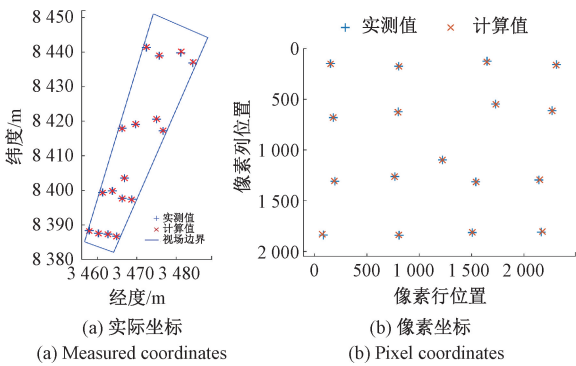


图 8 计算值与实测值对比分析

Fig.8 Evaluation of calculated values against measured values

上述求解过程主要采用对大量标定点解算值求均值的做法,且没有考虑各求解参数之间的相互影响,这是为了展示该方法的可靠性及总体平稳性,可更加直观的看出每个标定点可能偏离的误差。实际工作中,为了追求更好的标定精度,同时还需要考虑各参数之间的相互影响,作者采用了单目标多参数求解最优化迭代算法,以 17 个标定点实测值为输入,以相机安装的滚动角、横纵方向角、焦距为参数,以平均最小像素误差为单目标求解,经纬度投影坐标误差最大为 0.267 m,最小为 0.001 6 m,平均误差为 0.046 m,折算到百米的平均误差为 0.040 m。平均像素误差为 1.85 pixels,标定误差显著减小,最优化算法求解结果如图 9 和表 3 所示。标定成果参数如表 4 所示。

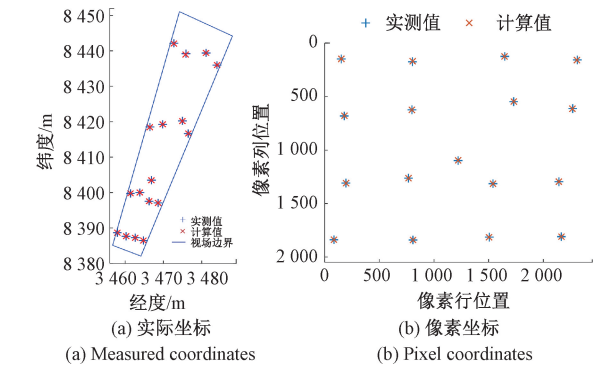


图 9 最优化迭代算法的计算值与实测值对比分析
Fig.9 Evaluation of calculated values against measured values under the condition of optimization iterative algorithm

表 3 最优化迭代算法计算成果表
Table 3 Table of calculation results under the condition of optimization iterative algorithm

标定点	像素误差	实际误差/m	测量距离/m
1	0.181	0.002	76.6
2	0.523	0.002	76.2
3	3.294	0.012	76.5
4	0.820	0.004	76.5
5	1.197	0.028	88.0
6	0.583	0.014	88.9
7	0.551	0.013	87.3
8	0.379	0.009	87.6
9	2.077	0.064	107.2
10	1.946	0.012	108.9
11	2.626	0.086	111.4
12	3.132	0.063	108.5
13	1.490	0.084	131.5
14	5.488	0.267	129.6
15	2.152	0.015	131.3
16	3.148	0.056	129.1
17	1.844	0.049	93.1
平均值	1.850	0.046	100.5

表 4 标定成果参数表
Table 4 Table of calibrated parameters

名称	值	名称	值
相机分辨率	2 448×2 048	视场近宽/m	7.987
焦距/m	0.078 3	视场中宽/m	11.723
镜头滚动角/(°)	0.854 6	视场远宽/m	15.458
镜头水平角/(°)	72.177 0	视场纵长/m	67.384
镜头垂向角/(°)	-8.303 0	视场中心距离/m	95.200
平均像素误差	1.850 0	视场总面积/m ²	782.260
平均实际误差/m	0.046 0	百米折算平均误差/m	0.040

标定完成后即可采用相机对河道流速进行连续测量,本研究采用的是 LSPIV 方法,对西霞院主河道进行了二维流速视频反演,如图 10 所示。在高流速时,测量结果与缆道测速结果基本一致,但在非汛期低流速时比测效果不佳,主要受风致波速干扰而非标定精度影响,本文不做深入讨论。

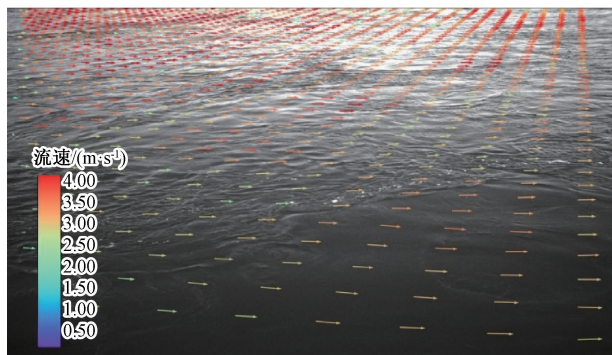


图 10 基于标定的 LSPIV 方法对二维流速场的反演
(2025 年 11 月 1 日 7 时)

Fig. 10 Inversion of a 2D flow field using a calibrated
LSPIV method(7:00, November 1, 2025)

根据大量的大江大河水文站实际工作过程与经验,认为本方法标定误差来源包括测量误差、水面波动影响、未做畸变校正等方面,其中测量误差是误差主要来源。水面波动会引起定位光斑在视频图像中抖动或晃动,实际工作中会选取水流平稳的无风或微风条件开展工作,水面波动引起的光斑位移一般为 1 cm 以内,最大不超过 2 cm,在较远测距(50~200 m)时,以本文相机镜头参数为例,换算为像素数约为 0.4 pixels,且实际测量和视频读取时,会人为控制读取抖动的中心位置以减小这部分误差,因此这部分误差一般不超过总误差的 10%。镜头畸变会引起边缘图像的畸变位移,按照本文的工业相机和镜头参数,其最大畸变为 0.08%,在 100 m 测距条件下,所引起的最大边缘畸变不超过 1 cm,且图像中心区域畸变会显著减小,同时数量足够多、分布均匀的标定定点会在标定过程中“平抑”一定的畸变效应,这部分误差估计不超过总误差的 5%。测量误差主要来源于全站仪测量误差以及像素位置读取误差,全站仪的测量误差主要受工作环境影响较大,例如缺少理想稳定的地面设站位置、阵风对全站仪或激光发射器造成晃动、设备本身的测量误差等,因泥土、钢板等弹性地面或阵风对全站仪和激光发射器造成的角度偏差在远距离测绘中是较为致命的,根据经验,不理想的设站环境造成的角度偏差最大甚至能达到 0.1°,可造成约 25 pixels 的位移偏差。此外,在视

频中的像素位置读取也存在读数误差,一般像素位置读取误差约为 0.5~2 pixels,误差主要受图像清晰度影响,因此需要激光标定点与环境具有明显的区分度,且镜头垂向倾角不宜过小。综上所述,采用该标定方法应选取环境适宜、自然光线较弱、水面波动较小、无风或微风的工作场景。

4 结 论

本文提出的基于激光定位的视频测流相机标定方法使用激光辅助定位,不仅便捷高效,还具有较高的标定精度。该方法在黄河中上游西霞院水文站进行了应用,采用均匀布点的方式在相机视场范围内共布设了 17 个标定点,建立了像素坐标系和实际经纬度坐标系,以多控制点平均的方法和最优化求解算法求解了焦距、方向角等关键参数,实现对相机的三维标定,取得了较好的应用效果。按照最优化算法求解的平均百米标定误差为 0.04 m,平均像素误差为 1.85 pixels,研究成果为视频测流设备提供了一种准确高效的标定方案。

参考文献

- [1] 朱蕾,徐凌,王冬梅,等. 视频测流技术在都江堰灌区的应用研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 235-242.
 - [2] 姚光强,张亚,袁有为,等. 视觉测流技术综述[J]. 水文, 2025, 45(4): 17-21, 28.
 - [3] LE COZ J, HAUET A, PIERREFEU G, et al. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers[J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(1/2): 42-52.
 - [4] 周安骐,徐振山,陈雨航,等. 多时距 PIV 技术在复杂流场测量中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 114-121.
- ZHOU AN Q, XU ZH SH, CHEN Y H, et al. Application of multi time-interval PIV technique in complex flow field measurement[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 114-121.

- [5] 张振, 李华宝, 袁章, 等. 频域时空图像测速法的图像滤波器敏感性分析[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 43-53.
- ZHANG ZH, LI H B, YUAN ZH, et al. Sensitivity analysis of image filter for space-time image velocimetry in frequency domain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 43-53.
- [6] 张振, 王慧斌, 严锡君, 等. 时空图像测速法的敏感性分析及不确定度评估[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1763-1771.
- ZHANG ZH, WANG H B, YAN X J, et al. Sensitivity analysis and uncertainty evaluation of space-time image velocimetry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1763-1771.
- [7] TAURO F, TOSI F, MATTOCCIA S, et al. Optical tracking velocimetry (OTV): Leveraging optical flow and trajectory-based filtering for surface streamflow observations[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 2010.
- [8] LEITÃO J P, PEÑA-HARO S, LÜTHI B, et al. Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry[J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 791-804.
- [9] 黄鹏, 周益航, 谢中毅, 等. 一种用于小景深相机的快速标定算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(12): 148-154.
- HUANG P, ZHOU Y H, XIE ZH Y, et al. A fast calibration algorithm for small depth of field camera[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(12): 148-154.
- [10] 邹方星, 范百兴, 陈哲. 基于运动学标定和空间插值的机器人定位误差补偿[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 51-57.
- ZOU F X, FAN B X, CHEN ZH. Robot positioning error compensation based on kinematic calibration and spatial interpolation[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 51-57.
- [11] 刘同龔, 吴长水. 自主泊车场景下的激光雷达和IMU紧耦合的建图与定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 95-102.
- LIU T Y, WU CH SH. Tightly coupled algorithm for the LiDAR and IMU in the context of autonomous parking vehicle[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(5): 95-102.
- [12] 王禹, 王彬彬, 王斐, 等. 基于闭环检测和地面优化的激光雷达惯性里程计建图与定位[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 205-213.
- WANG Y, WANG B B, WANG F, et al. Research on the localization and mapping based on closed-loop detection and ground optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 205-213.
- [13] 俞贵涛, 张榆平, 梁冬泰, 等. LDS距离与ToF深度传感器外参数标定方法研究[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-11[2026-02-28].
- YU G T, ZHANG Y P, LIANG D T, et al. Application of image-based flow measurement technology in drainage ditches of high-arch dam galleries[J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-11[2026-02-28].
- [14] 郭润泽, 孙晓永, 孙备, 等. 无人机载激光测距仪校准和引导定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 44-55.
- GUO R Z, SUN X Y, SUN B, et al. Calibration and guidance-positioning method for UAV-mounted laser rangefinders[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 44-55.
- [15] HUANG W CH, YOUNG C C, LIU W CH. Application of an automated discharge imaging system and LSPIV during typhoon events in Taiwan[J]. Water, 2018, 10(3): 280.
- [16] ZHANG ZH, ZHAO L J, LIU B Y, et al. Free-surface velocity measurement using direct sensor orientation-based STIV[J]. Micromachines, 2022, 13(8): 1167.
- [17] 张振, 姜天生, 赵丽君, 等. 基于断面水边线定向的视频测流摄像机标定[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(4): 1428-1437.
- ZHANG ZH, JIANG T SH, ZHAO L J, et al. Camera calibration using cross-section waterline orientation for video-based flow measurement[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(4): 1428-1437.
- [18] 路思意, 贾菊, 南卓江, 等. 基于反正切边缘模型拟合的激光三角光斑定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 61-71.
- LYU S Y, JIA J, NAN ZH J, et al. Laser triangulation spot positioning algorithm based on arctangent edge model fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 61-71.

作者简介



E-mail: xmin@nhri.cn

Min Xing received his B. Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2006, his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Hohai University in 2009 and 2013, respectively. He is currently a senior engineer at the Nanjing Hydraulic Research Institute. His main research interest is hydrology and water resources.

闵星,2006 年于华北水利水电大学获得学士学位,2009 年于河海大学获得硕士学位,2013 年于河海大学获得博士学位,现为南京水利科学研究院高级工程师,主要研究方向为水文水资源研究。



E-mail: 1007206959@qq.com

Wang Yue (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2013, and her M. Sc. degree from Hohai University in 2016. She is currently an engineer at the Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources. Her main research interest is hydrological monitoring technology.

王越(通信作者),2013 年于郑州大学获得学士学位,2016 年于河海大学获得硕士学位,现为水利部南京水利水文自动化研究所工程师,主要研究方向为水文监测技术研究。