

基于物像尺度变换的河流水面流场定标方法*

张振^{1,2}, 吕莉^{1,2}, 石爱业², 刘海韵², 王慧斌²

(1 江西省水信息协同感知与智能处理重点实验室 南昌 330099; 2 河海大学计算机与信息学院 南京 211100)

摘要:河流水面成像测速是一种非接触式测流技术,其中流场的定标主要基于直接线性变换法(DLT)。由于严重依赖于河流两岸控制点的数量、分布及坐标勘测精度,现有测量系统受到野外复杂施测条件的制约而难以快速安全布设。对此提出了一种基于物像尺度变换(OIS)的流场定标方法。在考虑相机倾角及水位变化的基础上,通过建立倾斜视角下变高平面的成像模型,推导出像平面和河流水面间“点-距离”的变换关系。进而设计一种激光测距仪辅助的测量装置及其检校方法用于模型参数的获取。实验结果表明,OIS法在精度方面与DLT法相当,但无需在现场采用全站仪布设控制点,显著提高了野外作业的效率 and 安全性。研究有望为新型集成一体化光学测流仪器的设计提供理论和技术方法上的支撑。

关键词:单目视觉;平面测量;流场定标;免控制点;激光测距仪辅助

中图分类号: TH815 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

River surface flow field calibration method based on object-image scaling

Zhang Zhen^{1,2}, Lv Li^{1,2}, Shi Aiye², Liu Haiyun², Wang Huibin²

(1 Key Laboratory of Water Information Cooperative Sensing and Intelligent Processing, Jiangxi Province, Nanchang 330099, China;
2 College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: River surface imaging velocimetry is a non-intrusive flow measurement technology, in which the flow field calibration mainly uses the Direct Linear Transform (DLT) method. Since DLT is greatly limited by the quantity, distribution and accuracy of ground control points (GCPs) set on the river banks, the current measurement systems cannot layout fast and safely under complex field conditions. To handle this problem, a flow field calibration method based on Object-Image Scaling (OIS) is proposed. An imaging model of variable-height plane under oblique angle is built by introducing the tilt of camera and variation of water level. Then, a “points-distance” transformation between image plane and river surface is derived. Finally, a measuring device assisted by a laser range finder is designed and calibrated to obtain the model parameters. Experimental results show that the accuracy of OIS is close to the DLT, and no control points are needed to be deployed or surveyed with a total station, which significantly improves the efficiency and security of the field work. This study is expected to provide theoretical and technical support for the design of new integrated optical instrument for river flow measurement.

Keywords: monocular vision; plane measurement; flow field calibration; ground control points (GCP)-free; laser range finder-assisted

0 引 言

河道水流的原型观测是河流动力学及河流水文学等水科学相关研究的重要手段^[1]。其中流场信息的获取不仅是确定河床床面剪切力、紊动和涡强度与泥沙输移关

系等的关键,也是研究断面流态、估计断面流量和总径流变化速率的基础。对于揭示水流运动规律、完善水利工程设计,以及延长洪水预见期、减少灾害损失具有重要意义^[2]。近20年来,非接触式测流仪器显著提高了流场原型观测的效率及安全性,但相对成熟的声学法及雷达法在河道水流监测中仍然存在测验适宜性弱、精度稳

定性低和施测安全性差等问题^[3]。以大尺度粒子图像测速 (large-scale particle image velocimetry, LSPIV) 为代表的河流水面成像测速法由于具有瞬时全场测量的特点, 在快速获取瞬时流场、时均流场、湍流特征、流动模式等方面具有明显优势, 因此越来越多地被应用于高洪期及浅水、低流速等极端条件下河流水面流场及断面流量的监测^[4-15]。

将图像坐标系下的运动矢量变换到世界坐标系下的流速矢量、实现流场定标是河流水面成像测速的关键问题之一^[4]。不同于实验室中 LSPIV 系统采用的多相机垂直拍摄方式^[5], 由于在河流现场采用单相机以正射视角拍摄完整断面需要利用系留气球^[6]、无人机^[7]等低空观测平台, 难以实现长期自动监测, 因此多采用岸基布设^[8-15]。但倾斜拍摄视角将导致图像的透视畸变, 通常采用正射校正来补偿远场空间分辨率的损失, 但可能引入灰度插值误差^[8]。此外, 高洪期山溪性河流的水位暴涨暴落, 短时间内变幅可达数米, 因此施测中必须考虑水面高程动态变化的影响。

现有 LSPIV 中的流场定标方法大多将河流水面近似为平面, 基于经典近景摄影测量原理中的中心透视投影模型建立像平面和物平面间“点-点”的坐标变换关系 (平面单应), 并采用直接线性变换法 (direct linear transformation, DLT) 整体求解由一组没有明确物理意义的中间参数建立的单应矩阵^[9-10]。该方法仅需 4 个控制点, 具有计算简单, 无需内、外方位元素初始值的特点。但必须保证控制点与水面共面, 否则在图像上的投影并不能反映真实的水面高程^[11]。然而在流动的水面上布设控制点绝非易事, 部分研究尝试利用水面上漂浮的标定板^[12]或激光投影点^[13]建立映射关系, 但由于这些局部参照物相对于待测水面的面积很小, 不仅难以精确定位, 而且坐标检测误差将在大尺度下被显著放大。基于变高单应的方法^[14-16]在模型中考虑了控制点到水面的距离, 并引入水位和比降参数来表征水面高程的动态变化, 能够有效改善小倾角下的测量精度, 但至少需要在河流两岸布设 6 个非共面的地面控制点 (ground control point, GCP)。由于控制点的布设及坐标勘测需要用到全站仪等专业设备, 不仅费时费力、存在安全隐患, 而且布设数量、分布方式及勘测精度对 DLT 法均较为敏感, 导致水面坐标的实际解算精度不易评定^[16], 大大限制了 LSPIV 在高洪期等极端条件下应急测流的实用性。机器视觉领域广泛采用的两步法^[17]将单应矩阵分解为内、外参数矩阵, 在室内标定畸变像差等内参, 在现场标定平移、旋转等外参, 最少仅需布设 4 个控制点^[18]。Bechle A. J. 等人^[19]设计采用二维云台上的刻度盘测量方位角和俯仰角参数, 尽管需要设计复杂的精密云台及其控制系统, 但进一步降低了对控制点的依赖。可见, 两步法具有实现

免控制点单目视觉测量的应用潜力。

实际上对于河流水面成像测速而言, 最终需要的测量结果是流速值和起点距, 而不是水面坐标, 可见建立“点-点”的坐标变换关系并不是必须的。由于单视平面测量中的物像尺度因子定义为单位像素对应的物理尺寸, 描述了物平面和像平面间“距离-距离”的尺度变换关系, 因此物平面上任意两点间的距离可以看作是其在像平面中对应点间所有像素物像尺度因子的累加。如果能够考虑河流水面视觉测量的特点, 建立一个相对精确且合理简化的成像模型来描述这种物像尺度变换关系, 从而可以利用廉价而便携的测距、测角传感器协同获取模型参数, 将有望实现免控制点的水面流场定标。

鉴于上述思想, 本文提出了一种基于物像尺度变换 (object-image scaling, OIS) 的河流水面成像测速流场定标方法。首先研究倾斜视角下的中心投影成像模型, 建立变高平面和像平面间的物像尺度变换关系; 然后以此为基础设计一种激光测距仪辅助的测量装置及检校方法; 最后通过实验验证方法用于河流水面流场定标的有效性。

1 河流水面的物像尺度变换及流场定标

1.1 正射视角下的物像尺度变换关系

根据中心 (透视) 投影成像原理, 若忽略相机光学镜头的畸变像差, 像平面上的像点、透镜平面上的光心和物平面上的对应物点满足 3 点共线的线性关系, 如图 1 所示。当物距 u 远大于像距 v 时, 焦距 f 与像距 v 近似相等, 此时物平面和像平面间满足:

$$\frac{X}{x} = \frac{u}{f} \quad (1)$$

式(1)为正射视角下的物像尺度变换关系。

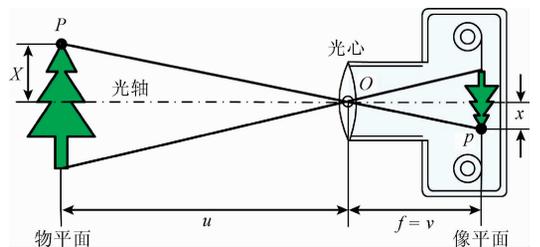


图1 正射视角下的中心投影成像模型

Fig. 1 Model of central projection imaging under ortho view

1.2 倾斜视角下的中心投影成像模型

在倾斜视角下, 若完全考虑俯仰角、横滚角和方位角, 这种物像尺度变换关系会变得复杂得多。考虑到岸基式系统在实际布设时可以通过对齐测量断面及调节云

台水平将相机的方位角和横滚角置零,仅考虑相机主光轴平行于断面方向且仅存在俯仰角的情况,如图2所示。因此可以对成像模型进行合理地简化。

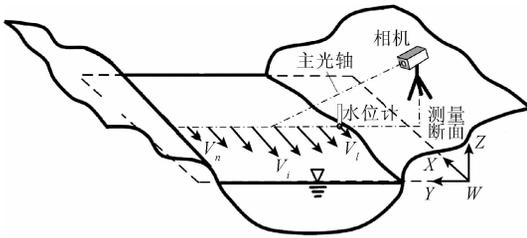


图2 岸基式测量系统布设示意图

Fig.2 Diagram of bank-based measurement system

建立倾斜视角下的中心透视投影成像模型,如图3所示。其中,像平面和物平面坐标系分别用 (x, y) 和 (X, Y) 表示; O 为透镜平面的光心, o, O' 分别为其在像平面和物平面上的投影点; c 为像平面延长线和通过光心的水平线的交点; H 为光心到物平面间的垂直距离, C 为对应的垂足点;相机的俯仰角 α 定义为相机主光轴和物平面间的夹角; s 表示图像传感器的像元尺寸; (m, n) 表示图像的大小;下标 (i, j) 表示像素的坐标,为亚像素精度。

在 x 方向,假设像素 $p_{i,j}$ 位于像主点 o 的左侧(见图3(a))。 $p_{i,j}$ 及其相邻像素 $p_{i+1,j}$ 在物平面上的投影点分别为 $P_{i,j}$ 和 $P_{i+1,j}$,射线 $P_{i,j}O$ 和 $P_{i+1,j}O$ 与投影线 P_jO 的夹角分别为 φ 和 ϕ 。对于 $p_{i,j}$,满足以下三角关系:

$$\tan \angle p_{i,j}Op_j = \frac{P_{i,j}P_j}{P_jO} = \frac{(m/2 - i)s}{P_jO} \quad (2)$$

由于 $\phi = \angle p_{i,j}Op_j$,且:

$$P_jO = \sqrt{(p_jo)^2 + (Oo)^2} = \sqrt{[(n/2 - j)s]^2 + f^2} \quad (3)$$

代入式(2),有:

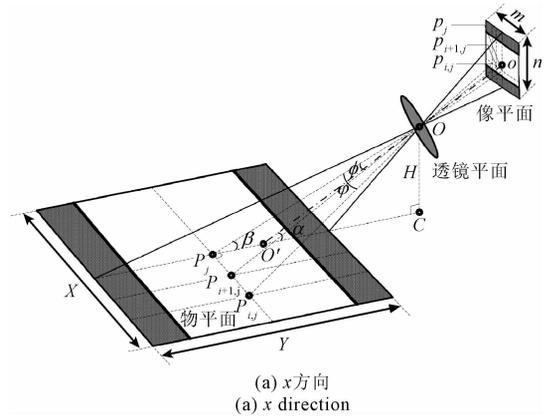
$$\tan \phi = \frac{(m/2 - i)s}{\sqrt{[(n/2 - j)s]^2 + f^2}} \quad (4)$$

同理,对于 $p_{i+1,j}$,有:

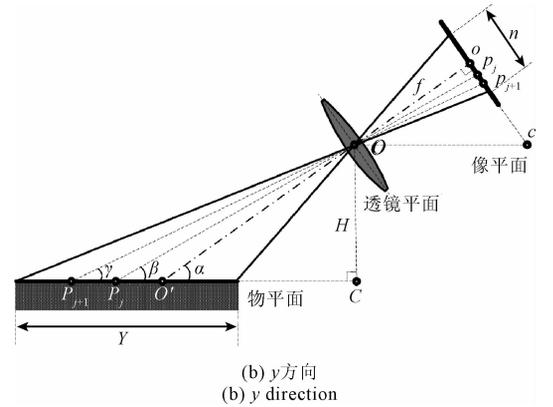
$$\tan \phi = \frac{(m/2 - i - 1)s}{\sqrt{[(n/2 - j)s]^2 + f^2}} \quad (5)$$

由于正切函数是奇函数,当像素 $p_{i,j}$ 位于像主点 o 的右侧时同样满足上式。

在 y 方向,假设像素 $p_{i,j}$ 位于像主点 o 的下方(见图3(b))。 $p_{i,j}$ 及其相邻像素 $p_{i,j+1}$ 在物平面主纵线上的投影点分别为 P_j 和 P_{j+1} ,射线 P_jO 和 $P_{j+1}O$ 与物平面 $P_{j+1}C$ 的夹角分别为 β 和 γ 。对于 $p_{i,j}$,其在像平面主纵线上的投影点 p_j 满足以下三角关系:



(a) x方向
(a) x direction



(b) y方向
(b) y direction

图3 倾斜视角下的中心投影成像模型

Fig.3 Model of central projection imaging under tilt view

$$\tan \angle p_jOo = \tan(\angle cOo - \angle cOp_j) =$$

$$\frac{P_jO}{Oo} = \frac{(j - n/2)s}{f} \quad (6)$$

由于 $\alpha = \angle cOo, \beta = \angle cOp_j$,代入式(6)得:

$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{(j - n/2)s}{f} \quad (7)$$

同理,对于 $p_{i,j+1}$,有:

$$\tan(\alpha - \gamma) = \frac{(j + 1 - n/2)s}{f} \quad (8)$$

当像素 $p_{i,j}$ 位于像主点 o 的上方时同样满足式(8)。

2.3 变高平面的物像尺度变换

基于以上成像模型,将像素 $p_{i,j}$ 在 x, y 方向上的二维物像尺度因子用其物点 $P_{i,j}$ 和相邻像素对应物点间的距离来描述,即:

$$\begin{cases} \Delta S_x(i, j) = P_{i+1,j}P_j - P_{i,j}P_j = \\ H \cdot (\tan \varphi - \tan \phi) / \sin \beta \\ \Delta S_y(i, j) = P_{j+1}C - P_jC = \\ H \cdot (1/\tan \gamma - 1/\tan \beta) \end{cases} \quad (9)$$

代入式(4)~(8),得式(10)。

$$\begin{cases} \Delta S_x(i, j) = \frac{Hs}{\sqrt{[(n/2-j)s]^2 + f^2}} \sin\left[\alpha + \arctan\left(\frac{(n/2-j)s}{f}\right)\right] \\ \Delta S_y(i, j) = H \cdot \left\{ 1/\tan\left[\alpha + \arctan\left(\frac{(n/2-j-1)s}{f}\right)\right] - 1/\tan\left[\alpha + \arctan\left(\frac{(n/2-j)s}{f}\right)\right] \right\} \end{cases} \quad (10)$$

可见,物像尺度变换和 j, n, s, f, α 及 H 有关,其中仅相机俯仰角 α 和水面高程 H 为未知量。对于需要长期连续观测或测验期间存在显著水位变化的情况,设计在断面上设置一台自动水位计,通过测量相机到水面的初始高程 H_0 、初始水位值 L_0 及动态水位值 L 求得图像采集时相机到水面的动态高程:

$$H = H_0 - L_0 + L \quad (11)$$

1.4 河流水面的流场定标

根据单应关系,采用像平面中任意两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 间各像素物像尺度因子的累加来表示它们在物平面上的距离 (D_x, D_y) ,即:

$$\begin{cases} D_x = \sum_{i=x_1}^{x_2} \Delta S_x(i, j) = \sum_{i=x_1}^{x_2} \Delta S_x\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(i - x_1)\right) \\ D_y = \sum_{j=y_1}^{y_2} \Delta S_y(i, j) = \sum_{j=y_1}^{y_2} \Delta S_y(j) \end{cases} \quad (12)$$

对于河流水面流场中的运动矢量,若将分析区域的中心作为矢量起点 (x_1, y_1) ,将叠加运动偏移量后的坐标 $(x_1 + v_x, y_1 + v_y)$ 作为矢量终点 (x_2, y_2) ,则可得流速值 (V_x, V_y) ;若将断面起始的参考点作为 (x_2, y_2) ,则可得起点距 (D_x, D_y) 。由此实现流场定标。

2 激光测距仪辅助的测量装置及检校

基于上述原理,设计一种激光测距仪辅助的测量装置,并对硬件结构引起的系统误差进行检校。

2.1 测量装置的设计

测量装置设计由一台相机和激光测距仪固连构成,如图4所示,通过调校使二者的光轴近似平行。激光测距仪可采用 Leica 公司的 DISTO D5 等内置倾角传感器和勾股测量功能的机型。D5 的室外测量距离可达 200 m,测距精度优于 3 mm;内置倾角传感器的俯仰角测量范围为 $-45^\circ \sim +45^\circ$,测角精度为 0.1° 。

2.2 倾角差值的检校

上述测量装置在安装时如果不能保证相机和激光测距仪的光轴严格平行,可能导致倾角传感器的读数无法精确代表相机光轴的实际俯仰角,从而影响测量精度。对此,设计了一种利用平面标准距离对二者倾角差值进行检校的方法,基本思路是采用相机拍摄一幅网格距离 D 已知的平面棋盘格模板并记录倾角传感器测得的俯仰角 α_0 ,将 $\Delta\alpha_i$ 作为修正值计算相机俯仰角:

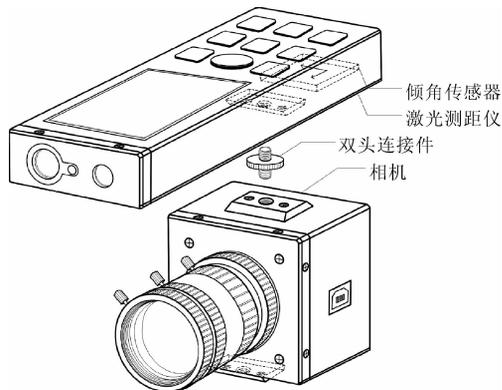


图4 激光测距仪辅助的测量装置

Fig. 4 Laser range finder-supported measuring device

$$\alpha_i = \alpha_0 + \Delta\alpha_i \quad (13)$$

代入式(10)~(12)求解距离 D_i ,直到 $|D - D_i|$ 小于阈值 δ 停止迭代,将得到的俯仰角差值 $\Delta\alpha$ 用于后续测量中的相机倾角补偿。在现场进行检校时可以利用激光测距仪测得的水面两点间的距离作为标准距离,如测量断面上两岸水面边界间的距离。

2.3 初始高程的检校

根据下式对相机到水面的初始高程 H_0 进行检校:

$$H_0 = H_L - h = D \cdot \sin\sigma - d \cdot \cos\alpha \quad (14)$$

式中: H_L 表示激光测距仪到水面参考点的高程,根据测得的斜距 D 和俯仰角 σ 采用勾股定理求得;具体实施时可直接选取断面水边界处的反射物用于指示当前水位,或在改造的岸坡上绘制垂直于河道的标志线,将其和水面的交点作为参考点。 h 表示测距仪光学中心到相机光学中心的高程,取决于二者间的距离 d 和相机拍摄时的俯仰角 α ,大小为 cm 级。

3 实验及敏感性分析

为验证方法用于河流水面成像测速中流场定标的有效性,设计并开展了室内和现场两组实验,并通过数值模拟的方式分析了主要参数的敏感性。

3.1 滚动画幅的速度测量实验

室内实验旨在验证方法对于一维流场定标的有效性和精度。采用印刷有一组河流水面图像的滚动画幅来模拟河流水面的运动并提供相对稳定的运动参数,如图5所示。画幅尺寸为 $2 \text{ m} \times 0.78 \text{ m}$,经多次计时测量,匀速滚动速度约为 0.058772 m/s ;为了和基于变高单应的

DLT 法^[8]进行对比,在画幅两侧均匀布设 10 个 GCP 并采用全站仪勘测世界坐标,GCP 坐标的实际解算精度为 99.660%。

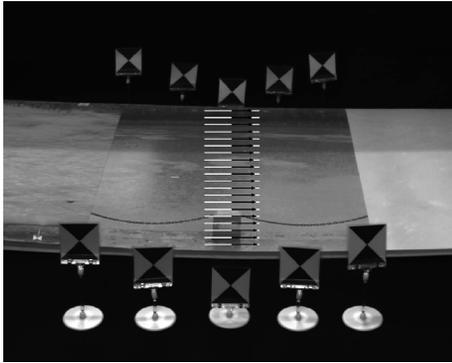


图 5 滚动画幅的一维速度场测量

Fig. 5 1D velocity field measurement of a rolling painting

测量装置如图 6 所示,工业相机采用 130 万像素的黑白 CMOS 图像传感器,图像分辨率为 1 280 × 1 024 像素,像元尺寸 $s = 4.8 \mu\text{m}$,通过 USB 接口实现数据传输。光学镜头采用 $f = 12 \text{ mm}$ 的工业定焦镜头以减少非线性畸变。采用 1/4" 螺纹的双头连接件将工业相机和激光测距仪固连。室内实验的定标结果如表 1 所示。



图 6 室内实验中的测量装置

Fig. 6 Measurement device for indoor experiment

表 1 室内实验的定标结果

Table 1 Calibration results of indoor experiment

测速线	OIS 法			DLT 法		
	起点距/m	速度值/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	误差/%	起点距/m	速度值/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	误差/%
1	0.456	58.997	0.383	0.474	59.304	0.905
2	0.505	59.147	0.638	0.525	58.820	0.082
3	0.553	58.769	0.005	0.574	59.194	0.718
4	0.600	59.251	0.815	0.621	59.329	0.948
5	0.645	58.630	0.242	0.666	58.642	0.221
6	0.689	58.311	0.784	0.710	58.832	0.102
7	0.731	58.869	0.165	0.753	59.058	0.487
8	0.772	58.879	0.182	0.794	58.149	1.060
9	0.812	58.911	0.237	0.834	58.717	0.094
10	0.851	58.372	0.681	0.872	58.731	0.070
11	0.889	58.740	0.054	0.910	58.772	0.000
12	0.926	59.139	0.624	0.946	58.838	0.112
13	0.962	58.949	0.301	0.982	58.012	1.293
14	0.996	59.087	0.536	1.016	58.425	0.590
15	1.030	58.617	0.264	1.050	58.248	0.892
16	1.063	58.789	0.029	1.082	58.720	0.088
17	1.095	58.984	0.361	1.114	58.585	0.318
18	1.127	58.876	0.177	1.145	58.469	0.516
19	1.157	58.459	0.533	1.175	58.048	1.232
20	1.187	58.056	1.218	1.205	58.290	0.820

测量时相机距待测平面的高程 $H = 1\ 151 \text{ mm}$,经检校得到的俯仰角 $\alpha = 29.9^\circ$ 。运动矢量估计采用的是频

域时空图像测速法(FFT-STIV)^[20]。在图像中沿断面方向设置了 20 条测速线,长度 $L = 155$ 像素;以 0.04 s 为

间隔采集了 $N = 255$ 帧用于合成时空图像,得到测量时长 $T = 10.16$ s 的一维时均速度场。对比表1给出的结果可以看出:由于参考点不同,两种定标方法获得的起点距绝对值不同,但相对值的误差在 1 mm 以内。速度测量误差的均值分别为 0.411% 和 0.527%,一致性较好。此外,OIS 法的最高测量误差和标准差分别为 1.218% 和 0.305%,均低于 DLT 法的 1.293% 和 0.419%,说明 OIS 法的测量精度在平面中的分布更加平稳,而 DLT 法由于易受 GCP 布设条件的影响会产生较大波动。

3.2 河流水面的流场定标实验

现场实验旨在验证方法用于真实河流环境下的适应性。选择江西省吉安市坳下坪水文站禾源水断面作为试验点开展和转子式流速仪间的流速比测,测验河段为典型的山溪性中小河流测量断面^[21]。相机采用一台 Nikon D7100 单反数码相机,像元尺寸 $s = 12.24 \mu\text{m}$ 。相机架设于河流左岸,距水面高程 $H = 4\ 510$ mm,光轴垂直于顺流方向。激光测距仪安装于相机热靴上,经检校得到相机拍摄的俯仰角 $\alpha = 17.4^\circ$ 。测量时镜头焦距设为 $f = 35$ mm,拍摄 1080P@30fps 的视频。在河流水面图像中沿断面方向设置 17 条测速线,长度 $L = 155$ 像素,并选取 $N = 255$ 帧合成时空图像,得到测量时长 $T = 8.47$ s 的时均流场,如图 7 所示。现场实验的定标结果如表 2 所示。

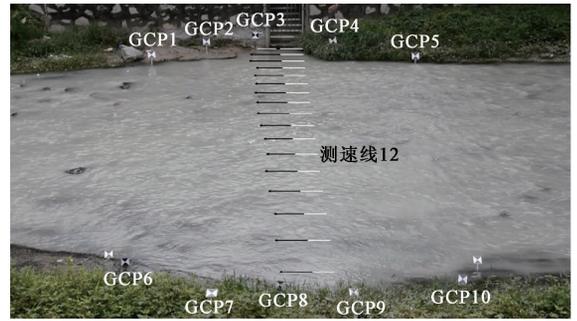


图 7 河流水面的一维流速场测量

Fig. 7 1D velocity field measurement of river surface



图 8 现场实验中的测量装置

Fig. 8 Measurement device for field experiment

表 2 现场实验的定标结果

Table 2 Calibration results of field experiment

测速线	OIS 法		DLT 法		误差	
	起点距/m	流速值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	起点距/m	流速值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	起点距/%	流速值/%
1	0.110	0.053	0.106	0.053	3.774	0
2	1.166	0.050	1.124	0.050	3.737	0
3	2.238	0.769	2.162	0.767	3.515	0.261
4	3.315	0.827	3.209	0.826	3.303	0.121
5	4.383	0.786	4.253	0.787	3.057	0.127
6	5.435	0.737	5.285	0.739	2.838	0.271
7	6.496	0.796	6.330	0.799	2.622	0.375
8	7.521	0.657	7.343	0.660	2.424	0.455
9	8.586	0.623	8.399	0.627	2.226	0.638
10	9.617	0.636	9.425	0.641	2.037	0.780
11	10.651	0.563	10.457	0.568	1.855	0.880
12	11.688	0.600	11.494	0.605	1.688	0.826
13	12.724	0.562	12.531	0.567	1.540	0.882
14	13.766	0.520	13.576	0.524	1.400	0.763
15	14.798	0.451	14.611	0.455	1.280	0.879
16	15.828	0.421	15.642	0.424	1.189	0.708
17	16.859	0.410	16.672	0.412	1.122	0.485

从表2可以看出,流速值和起点距的标定误差分别分布在0%~0.882%和1.122%~3.774%以内,说明采用OIS法和DLT法的标定结果具有较好的一致性。参考室内实验的结果并考虑DLT法本身存在的不确定性,该误差范围是合理的,说明OIS法同样适用于大尺度的河流水面。值得注意的是,倾斜视角下的图像透视畸变使得像素在y方向的物像尺度因子随距离逐渐变大,因此起点距的误差呈现出由近场向远场递增的趋势;相反,x方向受此影响较小,使得流速值的标定精度优于起点距。鉴于水文测验中对流速测量精度的要求通常要高于起点距,因此这种平面上测量精度的不对称性对于流速、流量监测的应用而言是可以接受的。在观测顺流方向的一维流场时,推荐将相机光轴平行于断面方向架设以获得最佳的流速测量精度。

3.3 主要参数的敏感性分析

为了评估相机俯仰角和水面高程两个主要参数的测量精度对流速值和起点距标定的影响,采用数值模拟的方法对两者的敏感性进行分析。分析基于3.2节的现场实验数据,选取位于图像中部的第12条测速线作为分析对象,以减小图像非线性畸变的影响。

图9和10所示分别为相机俯仰角在16.5°~18.4°变化、水面高程在4410~4600mm间变化时流速值和起点距的相对误差。两种参数对测量结果的影响呈现出线性或近似线性的关系,其中前者的影响更为显著。当俯仰角的偏差为0.1°时,对应的流速值和起点距相对误差分别在0.5%和2%左右;而当高程的偏差为10mm时,对应的流速值和起点距相对误差均在0.25%左右。该结果和表2中测速线12的实际比测误差相当且规律相符,说明数值模拟的分析方法是有效的。在应用中采用测量精度为0.1°的倾角传感器和10mm的水位计能够满足中小断面的河流水面流场测量需求。

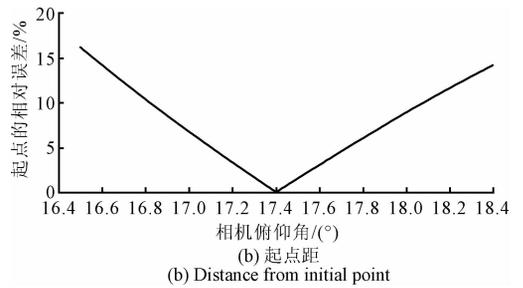
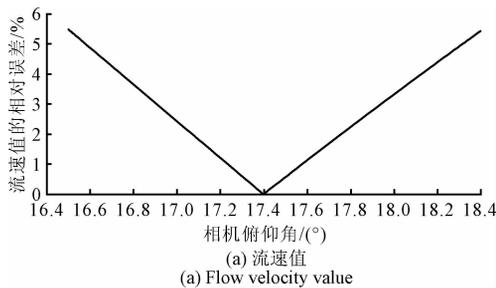


图9 相机俯仰角的敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of camera tilt

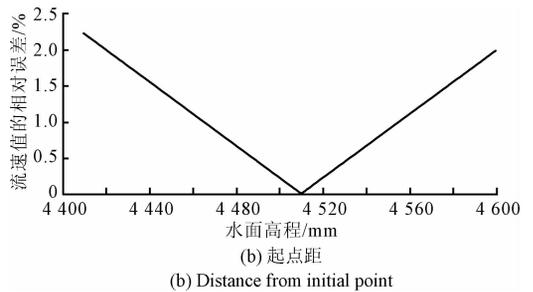
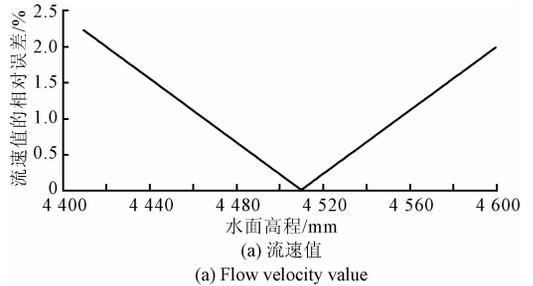


图10 水面高程的敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of water level elevation

4 结 论

针对野外复杂施测条件下系统快速安全布设受限的问题,提出了一种基于物像尺度变换的河流水面成像测速流场定标方法。在考虑河流水面视觉测量存在倾斜视角及水位变化的条件下,以现场可精确测量的距离和角度信息表征相机的外方位元素,建立了一个相对精确且合理简化的成像模型来描述“点-距离”的物像尺度变换关系,模型中的每个参量都有明确的物理意义,且数值已知或可精确测量。进而能够利用廉价而便携的激光测距仪及其内置的倾角传感器辅助获取模型参数,最终实现水面流速值和起点距的标定。实验表明,本方法不仅在标定精度方面与传统基于直接线性变换的方法相当甚至

更优,而且无需在现场布设控制点,显著提高了野外作业的效率 and 安全性。未来将进一步引入相机畸变像差的检校,并针对方法的敏感性分析和不确定度评估开展更加全面深入的研究,为集成一体化光学测流仪器的设计提供理论和技术方法上的支撑。

参考文献

- [1] 钟强, 陈启刚, 曹列凯, 等. 高坝泄洪水面曲面及流速场的原型测量方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 829-836.
ZHONG Q, CHEN Q G, CHAO L K, et al. An in-situ method for measuring surface topography and velocity field of flood flow discharged from high-dam reservoir [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 829-836.
- [2] 何秉顺, 李青. 山洪灾害防御技术现状与发展趋势探索[J]. 中国水利, 2014(18): 11-13.
HE B SH, LI Q. Exploration on present situation and developing tendency of mountain flood disaster prevention [J]. China Water Resources, 2014 (18): 11-13.
- [3] 徐立中, 张振, 严锡君, 等. 非接触式明渠水流监测技术的发展现状[J]. 水利信息化, 2013 (3): 37-44.
XU L ZH, ZHANG ZH, YAN X J, et al. Advances of non-contact instruments and techniques for open-channel flow measurements [J]. Water Resources Informatization, 2013(3): 37-44.
- [4] 张振, 徐枫, 王鑫, 等. 河流水面成像测速研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1441-1450.
ZHANG ZH, XU F, WANG X, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (7): 1441-1450.
- [5] LI D X, ZHONG Q Q, YU M ZH, et al. Large-scale particle tracking velocimetry with multi-channel CCD cameras [J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(1): 103-110.
- [6] WANG X, YAN X, LV G, et al. Balloon-borne spectrum-polarization imaging for river surface velocimetry under extreme conditions [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 58(5): 5-11.
- [7] DETERT M, WEITBRECHT V. A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(4): 532-539.
- [8] HAUET A, CREUTIN J D, BELLEUDY P. Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(1): 178-190.
- [9] JODEAU M, HAUET A, PAQUIER A, et al. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19(2): 117-127.
- [10] LEE M C, LEU J M, CHAN H C, HUANG W C. The measurement of discharge using a commercial digital video camera in irrigation canals [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(2): 150-154.
- [11] DRAMAIS G, LE COZ J, CAMENEN B, et al. Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2011, 5(5): 301-312.
- [12] DAIGLE A, BÉRUBÉ F, BERGERON N, MATTE P. A methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 89(5): 36-47.
- [13] TAURO F, PORFIRI M, GRIMALDI S. Orienting the camera and firing lasers to enhance large scale particle image velocimetry for streamflow monitoring [J]. Water Resources Research, 2014, 50(9): 7470-7483.
- [14] FUJITA I, AYA S. Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows [C]. ASCE Joint Conference. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, 2000: 1-9.
- [15] JODEAU M, HAUET A, PAQUIER A, et al. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2008, 19(2): 117-127.
- [16] 张振, 徐枫, 沈洁, 等. 基于变高单应的单目视觉平面测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1860-1868.
ZHANG ZH, XU F, SHEN J, et al. Plane measurement method with monocular vision based on variable-height homography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1860-1868.
- [17] 刘广琦, 李德强, 郝颖明. 一种改进的摄像机两步标定法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(增刊2): 149-155.

LIU G Q, LI D Q, HAO Y M. Umproved two-stage approach for camera calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrumen, 2010, 31(Suppl. 2): 149-155.

[18] HOLLAND K T, HOLMAN R A, LIPPMANN T C, et al. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(1): 81-92.

[19] BECHLE A J, WU C H, LIU W C, KIMURA N. Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(4): 327-339.

[20] 王慧斌, 董伟, 张振, 等. 基于时空图像频谱的时均流场重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 623-631.

WANG H B, DONG W, ZHANG ZH, et al. Time-averaged flow field reconstruction method based on spectrum of spatio-temporal image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 623-631.

[21] 张振, 徐立中, 樊棠怀, 等. 河流水面成像测速方法的比测试验研究 [J]. 水利信息化, 2014(5): 31-41.
ZHANG ZH, XU L ZH, FAN T H, et al. Comparative experiment study on river surface imaging velocimetry method [J]. Water Resources Informatization, 2014(5): 31-41.

作者简介



张振(通讯作者), 分别在2007年和2013年于河海大学获得学士学位和博士学位, 现为河海大学讲师, 主要研究方向为光电成像与多传感器系统、大尺度粒子图像测速。

E-mail: zz_hhuc@163.com

Zhang Zhen (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hohai University in 2007 and 2013, respectively. Now he is lecturer in Hohai University. His main research interests include optical imaging and multi-sensor system, large-scale particle image velocimetry.



吕莉, 2004年于南昌航空大学获得学士学位, 2008年于江西师范大学获得硕士学位, 现为南昌工程学院副教授, 主要研究方向为目标跟踪、图像处理及群智能计算。

E-mail: lvli623@163.com

Lv Li received her B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2004, received her M. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 2008. Now she is an associate professor in Nanchang Institute of Technology. Her main research interests include visual tracking, image processing and swarm intelligence algorithm.