

近红外成像的便携式大尺度粒子图像测速仪^{*}张 振¹, 严锡君¹, 樊棠怀², 王 鑫¹, 徐立中¹

(1 河海大学计算机与信息学院 南京 211100; 2 南昌工程学院信息工程学院 南昌 330099)

摘 要: 开发了一种用于河流表面流速场测量的便携式大尺度粒子图像测速仪 (large-scale particle image velocimeter, LSPIV)。该仪器基于一台以图像处理专用 DSP 为核心的智能相机, 代替 PC 高效地完成图像采集和处理的任務。首先利用近红外波段下水流示踪物(弱小目标)和水体光强反射率的差异, 在单色 CMOS 传感器前加装红外滤镜抑制水面光学噪声, 增强弱小目标与背景间的对比度, 提高了后续运动矢量估计中相关曲面的峰值信噪比。其次, 提出了一种基于时空联合滤波的时均流场重建方法, 利用河流流场中的先验和冗余信息识别并修正错误矢量, 改善了天然河流中由于示踪物密度过低或分布不均造成的表面流速估值过低问题。最后, 通过静水和动水条件下的 2 组现场实测验证了近红外成像系统及图像处理算法的有效性。

关键词: 大尺度粒子图像测速仪; 河流表面流速场; 近红外成像; 智能相机; 时间平均流场; 时空联合滤波

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

Portable large-scale particle image velocimeter based on NIR imaging

Zhang Zhen¹, Yan Xijun¹, Fan Tanghuai², Wang Xin¹, Xu Lizhong¹

(1 College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2 School of Information Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: A portable large-scale particle image velocimeter (LSPIV) system has been developed for river surface velocity field measurement. Based on a smart camera that takes an image-processing-oriented DSP as the core, the instrument can handle the image acquisition and processing tasks with higher efficiency than a PC-based system. Firstly, according to the difference of light intensity reflectivity between flow tracers (dim targets) and water body under near-infrared (NIR) band, an NIR filter is mounted in front of the monochrome CMOS sensor to suppress the river surface optical noise. As a result, the contrast between dim targets and background is enhanced, and the peak signal-to-noise rate (PSNR) on the correlation surface in subsequent motion vector estimation is improved. Secondly, the paper presents a time-averaged flow field reconstruction method based on a spatial-temporal filtering strategy. By means of identification and correction of error vectors with the prior and redundant information in river flows, this method can overcome the underestimation problem of surface velocities caused by the low density and ununiform distribution of tracers in natural rivers. Finally, the effectiveness of the NIR imaging system and image processing algorithm have been verified by two sets of field experiments under static and dynamic water conditions.

Key words: large-scale particle image velocimeter (LSPIV); river surface velocity field; near-infrared (NIR) imaging; smart camera; time-averaged flow field; spatial-temporal filtering

收稿日期: 2012-05 Received Date: 2012-05

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (61263029) 资助项目

1 引言

洪水期间精确的流速、流场、时序信息以及总径流变化速率的高分辨率估计,是河流水文学、河流地貌学以及河流生态学研究的重要依据。然而,高洪时期的水流往往具有含沙量高、混杂物多、流速快等特点,导致传统测流仪器无法正常施测。大尺度粒子图像测速是一种安全、高效的全场流速测量技术。它采用模式识别的方法匹配、跟踪连续视频图像中的水流示踪物,实现流速场的定量表示及可视化。作为实验室环境下的粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术在大尺度现场环境下的扩展,不仅可用于常规条件下天然河道水流紊动特性的研究,其非接触特性更使之成为极端条件下河流量测量少数可行的方法之一^[1]。

在 LSPIV 发展与应用的十多年中,各研究团队在原型系统开发方面开展了积极的研究,构建的实验样机验证了 LSPIV 在现场应用的可行性^[2-5]。但现有系统多是水文或水利学专家采用电子消费类数码相机或监控摄像机产品和其他测量设备组合而成,没有形成产品化的专用仪器。这些基于可见光成像的系统难以满足复杂水面光学环境下可靠、稳定、连续检测水面弱小示踪物的要求,易造成流速估计误差过大;并且在图像采集能力、系统处理能力、数据传输能力以及集成度和便携性等方面都存在不足,限制了技术的推广。

本研究开发了一种基于近红外成像的便携式大尺度粒子图像测速仪。其目的在于提高水面弱小示踪物的检测精度及连续图像采集的定时精度,进而增强复杂水面光学环境下流速测量的稳定性和可靠性。仪器的硬件系统设计采用智能相机的体系结构,以图像处理专用 DSP 为核心代替 PC 高效地完成图像采集和处理的任務;同时利用近红外波段下水面示踪物和水体光强反射率的差异,在单色 CMOS 传感器前加装红外滤镜来抑制水面光学噪声,从而提高相关曲面的峰值信噪比。软件方面,智能相机首先在上位机的控制下以连续图像捕获模式采集图像序列至 DSP 的内存;然后依次读入图像对并采用频域快速傅里叶互相关算法估计各分析区域的位移矢量;接下来结合瞬时流场中的冗余和先验信息,采用一种基于时空联合滤波的方法重建时间平均流场;最后,采用直接线性变换 (direct linear translation, DLT) 的方法对位移矢量进行正射校正,实现流场定标及可视化。

2 需求分析

相比采用人工粒子示踪的传统 PIV 技术,LSPIV 在大尺度河流的应用下面临着许多特有的挑战:

1) 水面光学环境复杂。现场条件下河流的水面光学

环境相比实验室条件下水槽及河工模型的光学环境要复杂得多。根据产生的机理,大致可将水面光学噪声分为水面反射噪声和水下散射噪声 2 种。这些噪声不随水流运动但却随时间动态变化,在图像中形成极明、极暗或纹理复杂的干扰模式并具有一定的空间尺度,降低了目标和水面背景间的对比度。不仅人眼难以辨识,而且极易导致运动矢量估计中相关曲面的信噪比低,引起误匹配。利用直方图均衡化或背景建模等图像处理的软方法要么不能有效去除上述水面光学噪声,要么费时费力、不易在实时系统中实现^[6]。

2) 视场大。测量面积覆盖几十至数千平方米的水域,小角度下拍摄会使图像产生严重失真,图像校正算法也难以纠正,要求将成像系统尽可能地架高。

3) 目标弱小。尽管相关文献已探索利用水面反射光、悬浮物云团、波纹及泡漩等水面天然模式进行水流示踪^[2-7],但尚无法给出二者间相互关系的严格论证。纸屑、淀粉发泡粒^[8]等人工示踪物或树叶^[9]、泡沫^[10]等天然水面漂浮物依然是目前被普遍接受的示踪物。这些满足水流跟随性要求的水面示踪物通常在图像中表现为缺乏丰富细节的弱小目标,甚至是点目标。

4) 目标运动。特别是高流速下的水面扰动使得水面示踪物的运动表现为存在仿射、尺度、旋转变换及遮挡的非刚体运动,目标特征的提取更加困难。

5) 目标分布不均。天然漂浮物和天然水面模式通常密度较低,并且在空间上分布不均,在时间上具有随机性,极易导致运动矢量的错误和缺失。

综上所述,理想的 LSPIV 系统应满足以下 4 点要求: 1) 为保证位移估计精度,成像系统应当具有**较高的信噪比**并能抑制环境噪声; 2) 为保证流场定标精度, **图像分辨率应当足够大**以检测图像中微观尺度的水面示踪物及地面控制点 (ground control point, GCP); 3) 为保证测量的动态范围,系统应当具有**足够高的帧速率及定时精度**; 4) 为保证连续采集、处理及传输高分辨率图像序列的实时性,系统还应当具有**较强的数据处理能力、较大的通信带宽及传输能力**。

3 硬件系统设计

已有的研究成果表明^[11]: 水体对太阳电磁辐射的吸收在 700 ~ 1 600 nm 的近红外波段较强,1 400 nm 和 1 900 nm 附近的吸收率甚至接近 100%; 对于河流、湖泊、湿地等天然水体,即使水很浅也能吸收绝大部分的红外辐射;而多数陆生植物以及滨海浅水的海草却总在近红外波段出现反射峰。因而在近红外图像中,水面背景与树叶、小木片等水面示踪物间必然存在较大的亮度差异。基于上述原理,若 LSPIV 的成像系统设计采用近红外波段可在一定程度上抑制水面光学噪声,较之目前现有的

基于可见光成像的 LSPIV 方法,有利于提高峰值信噪比。

3.1 体系结构

仪器的硬件系统设计采用一体化智能相机的体系结构。智能相机是一种高度集成化、智能化、可独立操作的嵌入式机器视觉系统^[12]。它将图像的采集、处理及通信功能集成于单一系统内,能够在信息获取的前端处理原

始数据,并提取特征信息甚至直接获得用户关心的流场、流量结果。可大大降低高分辨率图像在远距离传输时对通信带宽的要求和监测中心的处理压力,有利于分布式水情遥测物联网的构建。本仪器设计的智能相机由处理器模块、CMOS 图像传感器模块、光学系统、以太网及电源模块组成,如图 1 所示。

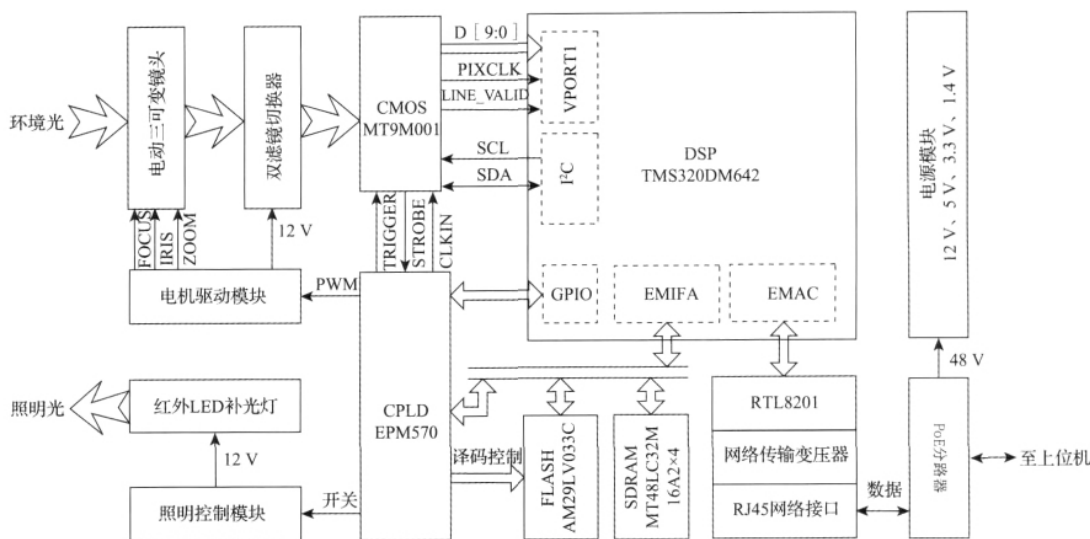


图 1 硬件系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of the hardware system

3.2 处理器模块

处理器模块以 32 位定点 DSP 芯片 TMS320DM642 为核心,并配合 CPLD 芯片 EPM570 外扩数据存储器、程序存储器及部分数字接口。DM642 在片内集成了 VPORT 视频接口、EMIF 接口、多通道 EDMA、EMAC 控制器和 I²C 总线等功能模块用于连接各种外设。系统在 DM642 的 CE0 空间通过 EMIFA 接口外扩了 4 片 32M × 16 b 的 SDRAM 存储芯片 MT48LC32M16A2,使相机的数据存储器空间达到 256 MB;在 CE1 空间外扩了 1 片 4 MB 的 Flash 存储芯片 AM29LV033C 作为程序存储器。当 DM642 上电或复位时,自动从 Flash 上加载程序代码,由于 DM642 的地址线不够 Flash 芯片使用,因此通过 CPLD 外扩了 3 根地址线。

3.3 CMOS 图像传感器模块

基于光电效应的 CCD 及 CMOS 器件对近红外波段的电磁波具有一定响应能力。近红外成像将导致色彩信息的丢失,而实际上现有的 LSPIV 图像处理算法也仅利用了图像的灰度信息。因此直接采用单色图像传感器并获取 Raw 图像数据,不仅可以避免图像转换过程带来的细节损失和冗余计算,而且可以获得比彩色图像传感器更好的近红外响应能力。在前端直接获取数字图像不仅

在参数设置上具有更高的灵活性,而且可减少模拟视频信号的重采样次数并消除传输过程中噪声引起的降质。

综合考虑成像性能、系统功耗、电路设计复杂度和硬件成本等因素,选用 130 万像素的单色 CMOS 图像传感器 MT9M001C12STM 作为成像器件。其光谱响应范围为 400 ~ 1 050 nm;采用 DigitalClarity™ 技术提高成像信噪比 (45 dB) 和动态范围 (68.2 dB),已能够达到 CCD 的水平;5.2 μm × 5.2 μm 的像元尺寸相比高像素器件具有更高的弱光灵敏度 (2.1 V/lux-sec);而 SXGA (1 280 × 1 024) 分辨率下 30fps 的帧速率能够满足对 LSPIV 测流的需求。

DM642 通过 I²C 接口 (SDA 及 SCL) 设置 MT9M001 的内部寄存器,实现图像大小、位置、曝光时间及亮度增益等的调节。CPLD 向 CMOS 传感器提供 48 MHz 的主时钟 (CLKIN),并通过内嵌的可编程脉冲信号发生器完成单帧捕获模式下触发信号 (TRIGGER 及 STROBE) 的时序控制。由于 MT9M001 的像素采样深度为 10 b,因此将 DM642 的视频端口 VPORT1 的 A 通道配置为 10 b 原始数据采集方式。VP1CLK0 和 VP1CTL0 引脚分别作为像素时钟信号 (PIXCLK) 和行同步信号 (LINE_VALID) 的输入端。

表 1 各模块电源参数
Table 1 Power parameters of the modules

模块名称	处理器模块		CMOS 传感器	光学系统			网络通信模块
	CPLD	DSP	模块	双滤镜切换器	三可变镜头	LED 补光灯	
电压/V	3.3、1.4	3.3	3.3	12	12	12	3.3
功耗/W	< 3	< 1	< 0.5	< 0.2	< 0.3	3~15	< 0.5
总功耗/W	< 20.5						

3.4 光学系统

智能相机的光学系统由双滤镜切换器、电动三可变镜头、红外 LED 补光灯及其驱动模块组成: 1) 软磁式双滤镜切换器安装于 CMOS 传感器前,内嵌 850 ~ 1 050 nm 的近红外滤镜和 400 ~ 1 050 nm 全光谱滤镜。CPLD 将 DM642 输出的电平控制信号变换为脉宽为 0.1 s 的触发脉冲,经 H 桥电路放大后驱动旋转式磁控体,实现双滤镜的切换;2) 光学镜头采用 1/2 型标准 C 口的电动三可变镜头 H10Z0812M,并设计了一种带光耦隔离的三通道直流电机驱动电路,可对其焦距、光圈和对焦进行远程控制;3) 辅助光源采用波长为 850 nm 的防水型 LED 补光灯以满足弱光下的拍摄需求。补光灯的启闭由光敏电阻 (CDS) 和 DM642 控制的继电器共同完成。

3.5 以太网及电源模块

智能相机通过符合 IEEE 802.3 协议的以太网和上位机通信,用以传输全部图像数据、流场数据、状态信息及控制指令。传输带宽为 100 Mb,无中继传输距离可达百米。以太网模块在 DM642 片外扩展了物理层芯片 RTL8201、网络传输变压器和 RJ45 接口作为物理层接口,提供一条以太网的接入通道。而 DM642 内部集成了 EMAC 接口用以控制物理层芯片与 DSP 内核之间的数据包交换。

电源模块综合表 1 中各模块的供电电压及功耗需求进行设计。采用以太网供电 (PoE) 方式以便和数据传输共用一根电缆。在上位机处通过 PoE 合路器将 24 ~ 50 V 直流电加载至以太网电缆中的空闲线对,并在智能相机处由 PoE 分路器分离;双路输出电源模块 HKS014R5 将其转换为 12 V/1.25 A 和 5 V/1.5 A 的 2 路电源,输出功率可达 22.5 W;为了给处理器模块提供足够大的电流,采用降压式 DC-DC 变换器 AOZ1010 设计 2 路开关电源:一路输出 3.3 V 作为 DM642 的 IO 电源及整个系统的数字电源,一路输出 1.4 V 作为 DM642 的内核电压,2 路的最大输出电流均为 2 A。

采用上述智能相机构建的便携式 LSPIV 系统原型机及现场部署方法如图 2、3 所示。智能相机的光学系统及电路板放置于 BA-360 型防水罩内避免风雨侵蚀,并和 LED 补光灯共同架设于高杆顶端。



图 2 便携式大尺度粒子图像测速仪原型机
Fig. 2 Prototype of portable LSPIV system

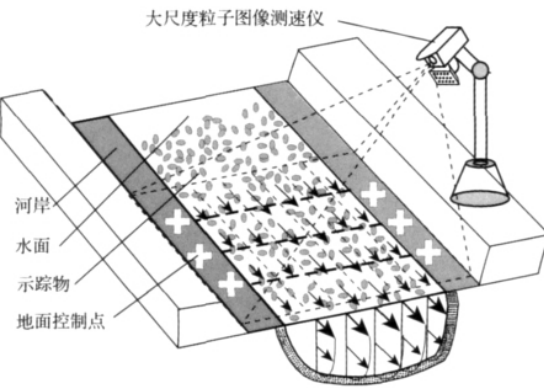


图 3 系统现场部署示意图
Fig. 3 The schematic diagram of system field deployment

4 软件系统设计

LSPIV 的软件系统可分为图像采集、图像处理、流场定标及流场可视化 4 部分,如图 4 所示。前二者在智能相机上完成,仅上传时间平均流场信息及序列的首帧图像用于直观显示和流场定标中变换系数的求解。图像及流场数据的传输通过智能相机和上位机端分别基于 TI NDK 开放包和 WinSocket API 函数开发的网络通信模块实现。流场定标完成首帧图像的正射校正及位移矢量从像素到米的变换。考虑到定标过程可能涉及复杂的模型和多变的参数,并需要进行人机交互,将其交由上位机利用计算机视觉函数库 OpenCV 开发完成并显示流场结果。

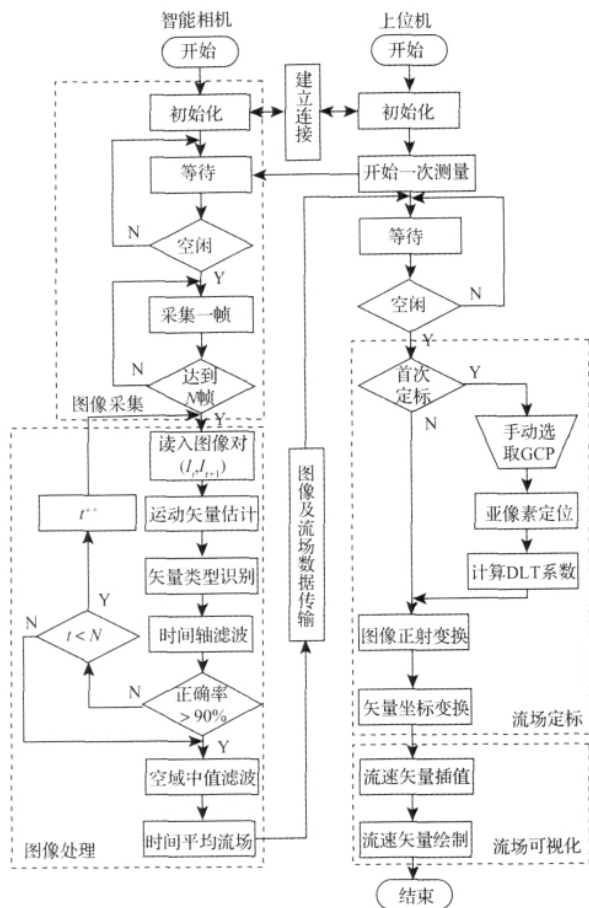


图 4 一次时间平均流场测量的流程图

Fig. 4 Flow chart of a measurement of time-averaged flow field

4.1 图像采集

测量任务开始后, DM642 首先根据上位机传递的参数对 CMOS 图像传感器进行初始化设置。本系统将 MT9M001 配置为连续捕获模式。由于 DM642 的视频口不支持 FRAME_VALID 信号, 因此通过记录每行的水平消隐脉冲数和每帧的垂直消隐脉冲数来实现帧同步, 如图 5(a) 所示。当 LINE_VALID 有效时, DM642 在 PIXCLK 的同步

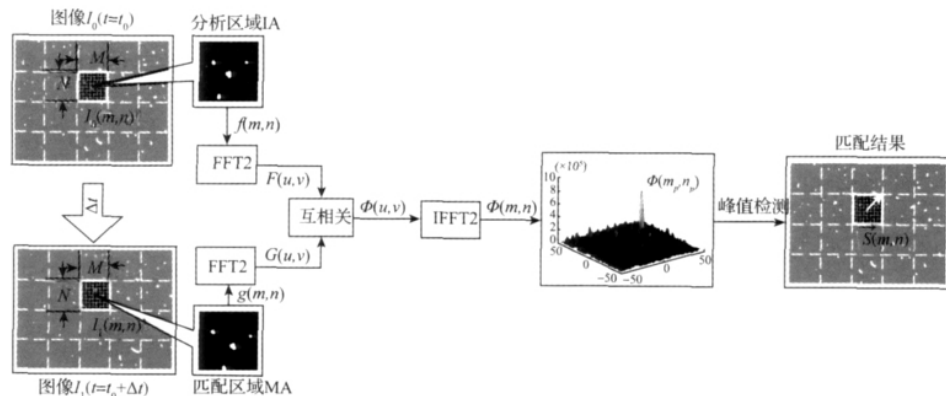


图 6 FFT-CC 算法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of FFT-CC algorithm

下并行读入像素数据 $D[9:0]$, 并暂存于视频端口内部集成的 FIFO 中; 当 FIFO 达到溢出状态时触发产生一个 EDMA 事件, 通过 EDMA 通道将数据送入外扩的 SDRAM 中, 供 DSP 调用进行图像处理, 如图 5(b) 所示。

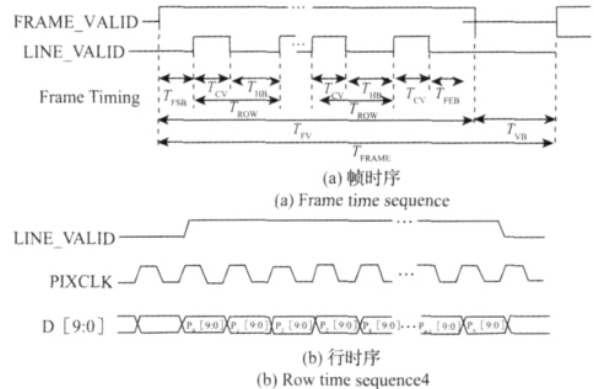


图 5 数据读出时序

Fig. 5 Data read out time sequence

4.2 图像处理

图像处理主要包括运动矢量估计及时间平均流场重建 2 项任务, 必要时可增加图像增强的环节。由于 DM642 采用 uint16 表示 10 b 的像素数据, 将占用大量的存储空间, 因此仅取其高 8 b 用于图像分析。

4.2.1 运动矢量估计

目前 PIV 系统中用于位移/流速信息提取的运动矢量估计算法主要有基于区域的 PIV 方法和基于单个粒子的 PTV 方法^[13]。前者跟踪的是更加一般的水面图像模式, 而后者适用于示踪物可视性强但密度低的情况。本仪器旨在扩展 LSPIV 在天然示踪条件下连续稳定测流的性能, 因此采用基于区域匹配的快速傅里叶变换互相关算法(FFT-CC)估计运动矢量。FFT-CC 算法采用频域矩阵乘法运算代替空域矩阵卷积运算, 相比直接互相关算法, 计算量要低两个数量级以上。其算法流程如图 6 所示, 分以下 3 步完成:

1) 选取分析区域。读入 $t = t_0$ 时刻的图像 A 和 $t = t_0 + dt$ 时刻的图像 B 作为运动矢量估计的一组图像对。在两图中分别选取以点 $I_0(m, n)$ 和 $I_1(m, n)$ 为中心、大小均为 $M \times N$ 个像素的子区域, 称为分析区域(IA) 和匹配区域(MA), 每个 IA 对应一个位移矢量 S 。 M 、 N 的取值应为 2 的整数倍, 并需兼顾流场的空间分辨率、示踪物的位移及区域内的信息量等因素。为保证计算精确度, 通常取示踪物位移大小的 2 倍以上^[14]。

2) 求解相关系数。首先将 IA 和 MA 对应的两个二维实矩阵 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 扩充成 $M \times N$ 的复数型矩阵, 即每个像素由整型的实部和整型的虚部组成, 其中虚部为 0。接着进行二维快速傅里叶变换(FFT2), 采用 TI 公司针对 C64x 系列 DSP 优化设计的快速傅里叶变换库函数 DSP_fft32x32() 实现。先逐行进行 k 点一维行变换, 然后对所得矩阵进行转置, 再逐列进行 k 点一维列变换, 得到频域形式:

$$\begin{cases} F(u, v) = \text{FFT2}(f(m, n)) \\ G(u, v) = \text{FFT2}(g(m, n)) \end{cases} \quad (1)$$

则功率谱即为频域互相关函数:

$$\Phi(u, v) = F(u, v) G^*(u, v) \quad (2)$$

式中: $G^*(u, v)$ 为 $G(u, v)$ 的共轭, 矩阵的点乘采用 DSP_mul32() 函数实现。最后进行二维傅里叶逆变换(IFT2), 采用 DSP_ifft32x32() 函数依次对行和列进行一维逆变换, 得到空域互相关函数:

$$\phi(m, n) = \text{IFT2}(\Phi(u, v)) \quad (3)$$

所形成的相关曲面反映了互相关系数在 X 和 Y 方向上的分布情况。

3) 检测相关峰值。对相关曲面中各点及其邻域进行遍历搜索得到峰值 $\phi_{\max}(m, n) = \phi(m_p, n_p)$, 其对应坐标 (m_p, n_p) 即为分析区域内模式在 X 和 Y 方向上相对位移的估计值。

4) 确定绝对位移。在计算相关函数时, 实际是把有限长度的序列看作周期性序列中的一个周期来处理, 也就是把有限长度为 $M \times N$ 的序列延拓到整个变量空间, 形成周期性序列。这样, 所得到的相关函数 $\phi(m, n)$ 也是周期性的, 即:

$$\phi(m, n) = \phi(m \pm M, n \pm N) \quad (4)$$

因此 $\phi(m, n)$ 取得最大值对应于模式正向移动和反向移动这 2 种情况。由于步骤 1 中假设示踪物的位移小于 IA 大小 $1/2$, 则绝对位移可以按以下方式确定:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \begin{cases} m_p, & m_p \leq [M/2] \\ m_p - M, & m_p > [M/2] \end{cases} \\ \Delta y &= \begin{cases} n_p, & n_p \leq [N/2] \\ n_p - N, & n_p > [N/2] \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

将分析区域按照预设的步进或重叠度在图像中漫游, 可得到图像对 A 和 B 的瞬时位移场 S , 其中单个位移矢量 $S(m, n)$ 可用其分析区域的中点坐标 (m, n) 和矢量

长度 $D_{m, n}(\Delta x, \Delta y)$ 唯一表示。

4.2.2 时间平均流场重建

研究表明, 在天然河流中, 短时间内某一点的流速瞬时值通常呈现出脉动现象, 而其均值则保持稳定^[14]。因此, 对于面向流量监测等现场应用的 LSPIV 系统而言, 时间平均流场的重建比瞬时流场的获取更为重要。但由于水面示踪物密度低、时空分布不均及水面光学噪声的影响, 视场中的某些待测区域可能会暂时性地缺乏明显的可视模式, 导致无法估计出这些区域的瞬时位移场或出现伪矢量, 若采用直接求平均等线性方法将导致表面流速及流量的估值过低^[3]。

然而明渠水流多为单向流, 由于边壁效应, 其水平流速分布呈现出中泓流速往两岸方向逐渐减小的趋势。这种变化性使得基于矢量大小全局统计的判别方法失效。但在实验中发现, 80% 以上大小错误的矢量, 其方向也具有明显差异。本系统结合上述河流流场的先验信息及流速的时空冗余信息, 采用矢量角度的全局统计作为错误矢量识别的依据, 设计了一种基于时空联合滤波的时间平均流场重建方法, 具体步骤如下:

1) 矢量类型识别。首先计算瞬时位移场中各矢量 S 与 X 方向的夹角 $\theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}$ 并建立方向矩阵。矢量在极坐标下的分布如图 7 所示。然后以 10° 为角度区间统计矢量方向在 $0^\circ \sim 359^\circ$ 范围内的全局直方图, 如图 8 所示。将对应矢量数量最多的区间标记为流场的主方向 θ_M (深色区域)。最后根据角度阈值 θ_{TH} (如 15°) 形成的判别窗口 (浅色区域) 依次识别每个矢量的类型, 并建立矢量类型查找表 T 如下:

$$T = \begin{cases} 0, & |\theta - \theta_M| > \theta_{TH} \\ 1, & |\theta - \theta_M| \leq \theta_{TH} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 1 表示正确矢量, 0 表示错误矢量, 其个数分别用 N_1 、 N_0 表示。则流场的矢量正确率为 $P = N_1 / (N_1 + N_0)$, 若 P 大于一个可接受的低阈值 P_{TH} (如 50%), 则认为是有有效的瞬时流场, 参与后续处理, 否则丢弃。

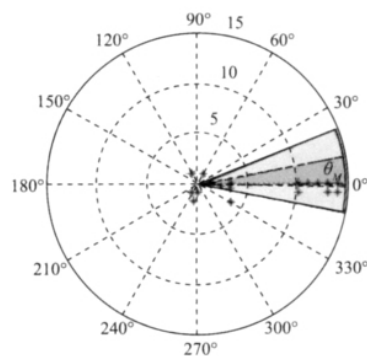


图 7 矢量极坐标分布图

Fig. 7 Vector distribution in polar coordinates

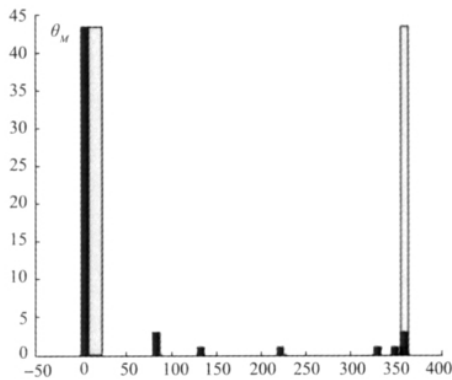


图8 矢量角度全局直方图

Fig. 8 Globe histogram of vector angles

2) 时间轴滤波。按步骤1计算得到 t_0 和 t_1 时刻2个有效流场的查找表 T_0 和 T_1 后,对瞬时位移场 S_0 和 S_1 进行时间轴滤波得到更新的时间平均位移场 S_{TA} ,其原则如下:

$$S_{TA} = \begin{cases} S_0; & T_0 = 1, T_1 = 0 \\ S_1; & T_0 = 0, T_1 = 1 \\ (S_0 + S_1) / 2; & T_0 = 1, T_1 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{TA} 为更新后的时间平均位移矢量。然后对 T_0 和 T_1 进行“或”运算得到新的时间平均查找表 T_{TA} 并统计 F_{TA}

的正确率 P_{TA} 。若 P_{TA} 小于一个高阈值 P_{Thh} (如90%),则读入下一时刻的图像对 (I_t, I_{t+1}) 、估计瞬时位移矢量场并重复步骤1和2,直到 P_{TA} 大于 P_{Thh} 或处理完一次测量的所有 N 个瞬时流场。

3) 空域中值滤波。若时间轴滤波后的流场依然存在错误矢量,则采用 3×3 的中值滤波模板分别选取1A邻域内正确的位移分量,按大小排序后取其中值,就此得到时空联合滤波后重建的时间平均流场,并以网络帧的形式发送给上位机。

4.3 流场定标

LSPIV系统中的流场定标实质上是一个单目视觉测量问题。在大多情况下,可以将河流表面看作一高程随水位变化的平面,水面示踪物的运动限定于该平面内。若不考虑镜头畸变引起的图像失真,当水面与相机光轴垂直时,根据中心透视投影关系,目标及其所成的像满足相似关系,只相差一个尺度因子;但由于LSPIV系统通常是在一个倾斜视角下拍摄,如图9所示,水面图像存在透视畸变,它和真实水面间存在单应关系。为获得正射视角下的矢量场,需要对矢量进行透视畸变校正并从图像坐标变换为2D世界坐标,因此将该过程称为流场定标。

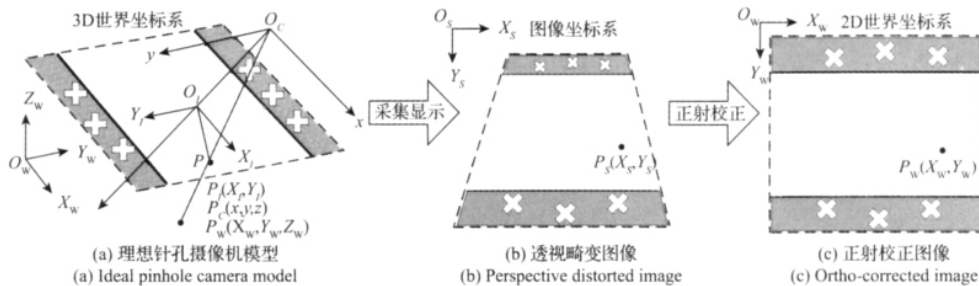


图9 流场定标示意图

Fig. 9 Schematic diagram of flow field calibration

流场定标的关键是单应矩阵的求解,本系统采用直接线性变换的方法实现。当LSPIV的成像系统与待测水面相对位置固定时,DLT系数是恒定的,因此在连续测量时,求解单应的过程仅需执行一次。文献[16]和文献[8]分别给出了基于8参数2D透视变换模型和11参数3D透视变换模型的详细求解过程。DLT方法无须知道相机的内外参数,是一种隐性的标定方法,具有简单、快捷、灵活的特点,但它依赖于GCP坐标的提取精度。对此,在软件上设计了一种人机交互的GCP坐标提取方法:当智能相机上传首帧图像后用户手动选取目标点,然后系统在目标点的邻域内自动检测GCP的中心角点并拟合得到亚像素图像坐标,如图10所示。

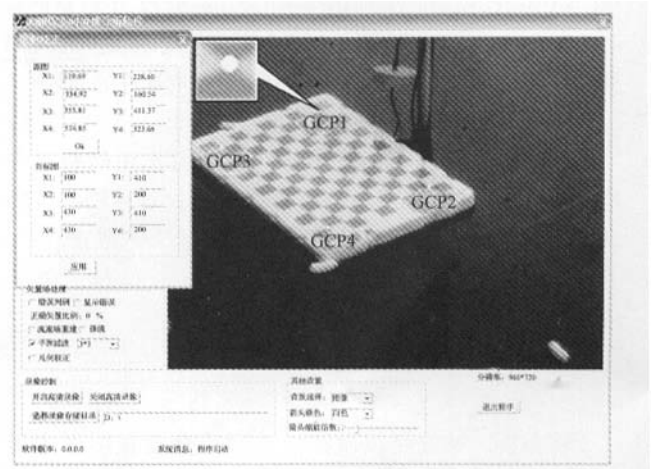


图10 GCP坐标提取

Fig. 10 Extraction of GCP coordinates

值得注意的是, 现有 LSPIV 系统在运动矢量估计前首先对所有图像中的每个像素进行坐标变换。实际上, 对于以获取流场信息为目的的 LSPIV 而言, 对每幅图像作正射变换并不是必需的。因此, 本系统仅处理首帧图像和时间平均的位移矢量, 大大减少了高分辨率图像坐标变换所需的计算量。

4.4 流场可视化

但在倾斜视角下采用上述方法会引起分析区域大小的不均匀, 可以先采用线性插值的方法对流场进行网格化处理^[17], 然后采用三线法将矢量箭头绘制于图像 I_0 中。由于帧间时间间隔 Δt 已知, 则点 $I_0(m, n)$ 处的时间平均流速矢量可表示为:

$$V_{TA}(m, n) = S_{TA}(m, n) / \Delta t \quad (8)$$

其大小为 $V_{m, n}(\Delta u_w, \Delta v_w) = D_{m, n}(\Delta x_w, \Delta y_w) / \Delta t$ 。

至此完成一次时间平均流速场的测量。

5 实验及结果分析

通过现场实测的方式, 采集了 2 组水面图像序列来验证 LSPIV 系统在软硬件方面的性能。

5.1 近红外成像效果验证

摄像机架设于 20 m 高的楼上拍摄附近一水生植物丰富的河流, 将镜头焦距调节至 $f=8$ mm 的广角, 通过观察水面图像验证近红外成像对水面反射噪声的抑制作用, 如图 11 所示。实验期间该河流始终处于流动静止状态且未受风力扰动的影响, 因此可以认为在滤镜切换前后拍摄的场景一致, 具有可比性。

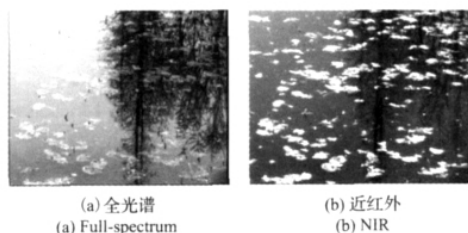


图 11 测试图像
Fig. 11 Tested images

大量互相关图像匹配实验表明, 错误矢量对应的相关曲面通常具有低信噪比导致的多峰现象^[18], 故可以认为运动矢量估计的正确概率与相关曲面的峰值特征有关。实验以运动矢量估计算法中相关曲面的峰值信噪比作为图像对比度增强的客观评判标准。若将相关峰值看作包含位移信息的有效信号, 则其余相关系数可视为干扰噪声, 定义峰值信噪比如下:

$$PSNR = \frac{\phi_{\max}(m, n)}{\phi_{\text{mean}}(m, n)} \quad (9)$$

式中: $\phi_{\max}(m, n)$ 、 $\phi_{\text{mean}}(m, n)$ 分别为相关曲面的峰值和均值。

取 IA 的大小为 96×96 像素, 对 2 幅图像分别作自相关运算, 并统计所有 35 个 IA 的 PSNR, 其分布规律如图 12 所示。在全光谱波段, 受耀光影响, 图像左侧亮区对应的 3 组 IA 均表现出接近于 1 的低信噪比; 右侧倒影对应的暗区 PSNR 稍高, 但最大值不超过 1.25; PSNR 均值为 1.088 8。而在近红外波段, 两区域的 PSNR 均提升明显, 亮区接近前者暗区的水平; 暗区的最大值接近 1.6; PSNR 均值为 1.317 4, 比前者提高了 20%。从图 13 中 2 图对应 IA 的相关曲面可以看出, 后者的噪声曲面更为平坦, 说明背景噪声被抑制。

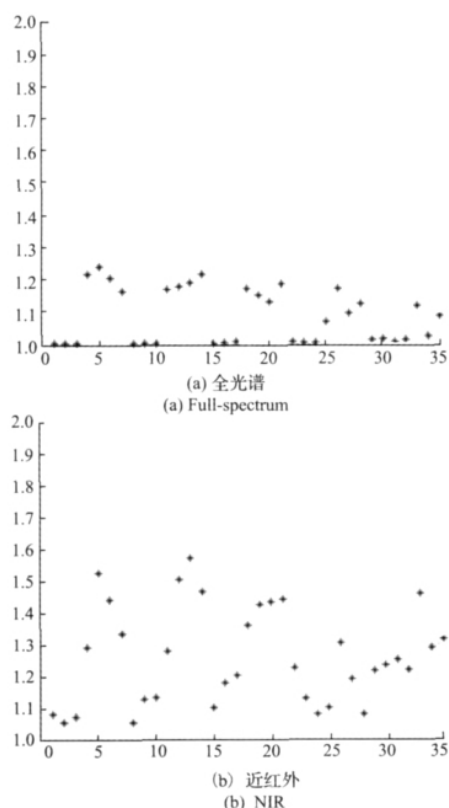
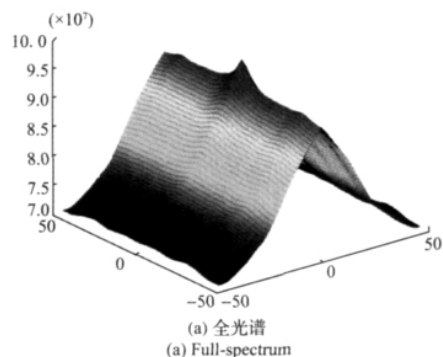


图 12 峰值信噪比分布
Fig. 12 PSNR distribution



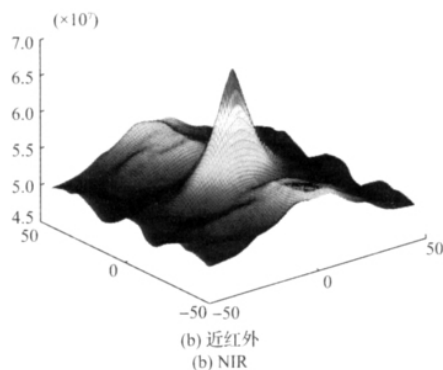


图13 相关曲面

Fig. 13 Correlation surface

5.2 算法效果验证

为进一步验证 LSPIV 算法在现场环境下的应用效果,选取南京市外秦淮河的清涼门段为测流断面,如图 14 所示。该河段为穿城而过的景观河段,水中树叶及各种细小的漂浮物较多,不适合架设缆道测流。断面为浆砌石护坡的矩形断面,河宽约 54 m,水流顺直平缓,流速分布均匀。枯水期水深约 0.7 m,中泓平均流速小于 1 m/s;汛期水流溢出主河槽漫至一级防洪堤,水深可达 3 m,最高流速在 3 m/s 左右。系统架设于河岸东侧的二级防洪堤上,相机光轴与水面成 30°。采用一台基于 ATOM 双核处理器的平板电脑(WIN7 操作系统)作为上位机运行自行开发的 LSPIV 实时流场分析软件;配备 24 V/3 Ah 的大容量锂电池可使系统连续工作 3 h 以上。遗憾的是,在该测点处智能相机所处位置距水面高程仅有 3 m,远场分辨率损失较为严重,故仅拍摄了大约占河道 1/2 宽度的中泓部分用于图像处理算法的验证。

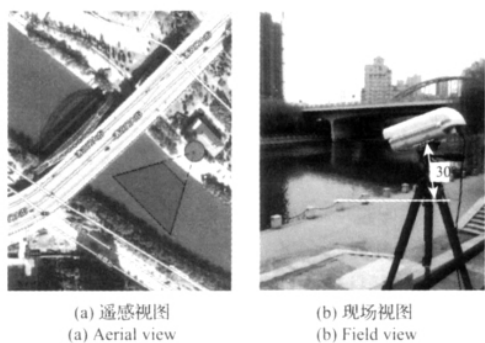


图14 测流环境

Fig. 14 Flow measurement environment

一次测量采集时长为 1 s 的 30 帧图像序列,分辨率为 1 280 × 1 024。IA 的大小取 96 × 96 像素,移动步进取 86 像素,故矢量总数为 154。经运动矢量估计和矢量类型识别后得到如图 15(a) 所示的瞬时位移场,其中白色箭头表示正确矢量、黑色箭头表示错误矢量,黑色圆圈表示缺失矢量。受水面倒影和镜头污点的影响,瞬时流场

的矢量正确率仅为 50% 左右,错误和缺失矢量所占的比例远大于采用人工示踪粒子的实验室 PIV 系统的比例。随着时间轴滤波过程的进行,错误和缺失矢量逐渐被正确矢量代替,如图 15(b) 所示。更新速率和有效的水面示踪物的运动速度有关。由于强噪声的存在,某些区域依然无法获得正确矢量,当正确率到达 90% 后,采用空域中值滤波对流场进行平滑及插补,得到如图 15(c) 所示的第 18 帧时间平均流场。

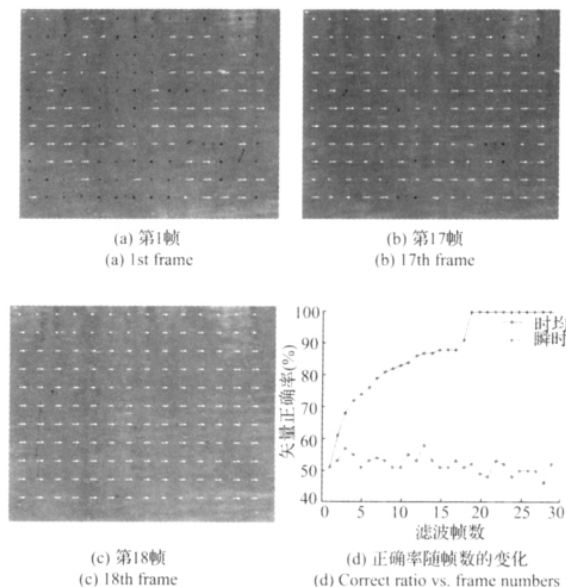


图15 时间平均流场重建

Fig. 15 Time-averaged flow field reconstruction

可见,时间轴滤波充分利用了示踪物在水面运动的时间冗余信息,而空域中值滤波对奇异矢量的修正和缺失矢量的插补十分有效,填充率可达 100%。相比直接求平均等线性方法,这种基于非线性滤波的时间平均流场重建方法更加适用于示踪物密度低、时空分布不均,且受环境干扰影响更大的天然河流。

6 结 论

大尺度粒子图像测速技术已被证明是一种安全、高效的全场流速测量技术。本研究在前人工作的基础上,针对现场环境下的应用特点,特别设计了一种基于近红外成像的便携式大尺度粒子图像测速系统,它具有以下特点:1) 抗干扰能力强。对比实验证明,近红外波段成像可有效抑制复杂的水面光学噪声,增强目标与背景间的亮度对比,从而提高水面示踪物运动矢量估计的准确性。实际上若采用可见光波段,其效果比全光谱波段还要差。成像方案采用“红外滤镜+单色 CMOS”这种简单易行的

光学滤波技术,使后续流程中原本复杂的图像增强算法得以省略或简化。2) 时空分辨率高。仪器在成像性能方面突破了现有模拟视频系统在图像分辨率和帧速率上的限制,实现了130万像素分辨率下30 fps的图像捕获能力,并向上兼容同系列300万像素的CMOS传感器,可在大视场下捕获更多微观尺度的水面示踪物。3) 系统灵活高效。基于智能相机的系统架构将图像采集、网络通信及镜头、滤镜和补光灯控制等任务集成在DSP和CPLD芯片内完成,实现了多任务的并行执行和各系统间的紧耦合,在提高系统可靠性的同时,仪器得以小型化和轻量化,能够满足应急测验对便携性的要求。4) 系统实时性强。仪器在软件方面综合考虑了嵌入式系统和上位机的处理能力及传输带宽,采用的算法占用更少的系统资源并满足实时性要求。经实测,完成一次测量所需时间在1 min以内。

鉴于以上特点,本系统能够克服传统接触式测流仪器的不足,以较小的代价安全、快速地完成现场部署,可实现对关键河段的水位、流速、流量等水情信息进行常规监测,并在突发性洪水等极端条件下及时、准确地捕获测验信息,为洪水成因及季节性、区域性演进规律的科学研究提供数据积累,进而为防洪规划设计提供参考,降低洪灾损失。

此外,系统设计、开发及实测中的经验教训也给进一步研究带来了新的思路。未来工作将围绕以下几点展开:1) 在成像性能方面,采用全局快门式CMOS传感器代替电子卷帘式快门式CMOS传感器可改善逐行扫描拍摄高速运动目标造成的系统误差;验证量化深度从8 b提升至10 b后对提高运动矢量估计准确性和可靠性的贡献;测试夜间补光效果并进行敏感性分析。2) 在系统架构方面,设计搭载本仪器的球载式LSPIV系统,使之能够在覆盖数千平方米水域的同时获得近乎垂直的拍摄角度,减小远场分辨率不足引起的误差。3) 在软件算法方面,设计合适的图像增强算法进一步抑制倒影等准静态的强背景噪声,加速时间平均流场重建的收敛速度;设计迭代的频域快速互相关算法以自适应选取合适的分析区域大小,提高位移估计精度;发掘并利用测流现场度量信息已知的结构,如河宽、渠深、水尺水位、桥墩间距、闸门开度等,以及较为规则的几何关系,如河岸线平行、岸堤与水面垂直、边坡的斜交角度及其他共面、共点、对称的关系,甚至水面示踪物的运动及流速分布规律等先验信息,摆脱或减少流场定标算法对人工布设地面控制点的依赖。

参考文献

[1] MUSTE M, FUJITA I, HAUET A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments

- [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 (W00D19): 1-14.
- [2] FUJITA I, HINO T. Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter [J]. *Journal of Visualization* 2003 6(3): 245-252.
- [3] TSUBAKI R, FUJITA I, TSUTSUMI S. Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system [J]. *Journal of Hydro-environment Research* 2011 5: 313-321.
- [4] HAUET A, KRUGER A, KRAJEWSKI W F et al. Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method [J]. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 2008 13 (2): 105-110.
- [5] KIM Y, MUSTE M, HAUET A, et al. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept [J]. *Water Resources Research* 2008 44 (W09502): 1-4.
- [6] WANG H B, ZHENG SH N, WANG X. An approach for target detection and extraction based on biological vision [J]. *Intelligent Automation And Soft Computing* 2011 17 (07): 909-921.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] BRADLEY A A, KRUGER A, MESELHE E A et al. Low flow measurement in streams using video imagery [J]. *Water Resources Research* 2002 38(12): 1315-1323.
- [10] CREUTIN J D, MUSTE M, BRADLEY A A et al. River gauging using PIV techniques—A proof of concept experiment on the Iowa River [J]. *Journal of Hydrology*, 2003 277(3-4): 182-194.
- [11] 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008 28(10): 2273-2277.
- XU J P, ZHANG B, SONG K SH et al. Bio-optical model of total suspended matter based on reflectance in the near infrared wave band for case II waters [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* 2008 28(10): 2273-2277.
- [12] AHMED N B. *Smart Cameras* [M]. New York: Springer, 2010: 1-10.
- [13] 许联锋, 陈刚, 李建中, 等. 粒子图像测速技术研究进展 [J]. *力学进展* 2003 33(4): 533-540.

- XU L F ,CHEN G ,LI J ZH ,et al. Reserch progress of particle image velocimetry [J]. *Advances in Mechanics* , 2003 ,33(4) : 533-540.
- [14] WILLERT C E ,GHARIB M. Digital particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids* ,1991 ,10: 181-193.
- [15] 张振 ,徐立中 ,韩华 ,等. 基于径向基神经网络的明渠流量软测量方法 [J]. *仪器仪表学报* ,2011 ,32(12) : 2648-2655.
- ZHANG ZH ,XU L ZH ,HAN H ,et al. RBFNN model-based discharge soft-sensing method for open channel [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* ,2011. 32(12) : 2648-2655.
- [16] HOLMAN R A ,LIPPMANN T C ,STANLEY J ,et al. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* ,1997 , 22(1) : 81-92.
- [17] 陈红. 实体模型表面流场、河势数字图像测试方法及应用研究 [D]. 南京: 河海大学 2005: 69.
- CHEN H. The research and application of digital image measurement technique for surface flow field and river-regime in physical model [D]. Nanjing: Hohai University , 2005: 69.
- [18] 刘扬 ,李兵 ,金善良. 基于互相关峰特征的景象匹配性能预测方法 [J]. *战术导弹技术* 2001(3) : 54-57.
- LIU Y ,LI B ,JIN SH L. A method of scene matching performance forecast based on cross-correlation peak [J]. *Tactical Missile Technology* 2001(3) : 54-57.

作者简介



张振 2007 年于河海大学获得学士学位 现为该校博士研究生 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 received his bachelor degree from Hohai University in 2007. He is now a doctoral student in the same university and his current research interests are mainly focused on optical imaging and multi-sensor system ,large-scale particle image velocimetry.



徐立中(通讯作者) ,1997 年于中国矿业大学获得博士学位 现任河海大学计算机与信息学院教授、博士生导师、副院长 主要研究方向为遥感遥测信号处理、多传感器系统与信息融合、信息处理系统及应用、系统建模与优化。

E-mail: lzhxu@hhu.edu.cn

Xu Lizhong(Corresponding author) received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 1997. Currently he is a professor and Ph. D. supervisor and the vice dean in College of Computer and Information Engineering ,Hohai University. His current research areas include signal processing in remote sensing and remote control ,multi-sensor system and information fusion ,information processing system and its applications ,system modeling and optimization.