

文章编号: 1001-4888(2021)04-429-11

远程多点三维实时运动测量仪^{*}

黄 诚¹, 关棒磊², 苏志龙¹, 张东升¹, 于起峰²

(1. 上海大学 力学与工程学院, 上海应用数学和力学研究所, 上海市能源工程力学重点实验室, 上海 200444;

2. 国防科技大学 空天科学学院, 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 基于图像和视觉的非接触运动跟踪是目前光测力学中一个活跃的研究领域, 在科研和工程测量方面都得到了广泛的应用。本文基于立体视觉原理介绍了一种远程多点三维实时运动测量仪, 该系统由 2 个可独立工作的测量站构成, 每个站具备完整的高速图像采集、距离测量、姿态感知、运动控制和数据处理功能。为了实现远程测量, 站点之间通过网线或者无线传输的方式进行通信和数据交互, 形成“主站+辅站”的协作测量模式。在三维计算上, 利用场景特征实现双站相机的自动标定, 并基于高效的数字图像相关原理进行立体匹配和时序跟踪, 实现了多点三维运动的实时测量。通过室内刚体平移实验评估了该测量系统的精度; 对实际风电叶片运动轨迹的测量, 证明了该测量系统在远程大视场测量中的可行性。

关键词: 三维视觉测量; 数字图像相关; 外参标定; 相机同步; 运动测量

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-039

0 引言

随着国家基础设施建设的发展, 不同类型的桥梁、高塔、隧道、起重机械等大型设施不断涌现, 但大型设施结构的安全性和健康性问题也频繁发生^[1, 2], 迫切需要在远距离检测大型结构关键部位的运动和变形情况。近年来, 光学测量技术的快速发展及其在航空航天、生物技术、机械与电子设备制造和大型工程结构测量等重大科技领域的成功应用^[3-9], 使得远程、高精度、多点动静态实时运动测量设备的研发成为了可能。在应用需求和相关技术发展的双重驱动下, 已经建立了诸如近景摄影测量^[10]和数字图像相关^[11-14]等具有高精度远程二维和三维运动感测能力的典型方法和测量系统。

摄影测量技术多利用相机等设备对安装在目标上的光学标志点进行成像和自动跟踪, 可测量物体的形貌、运动和变形参数等, 具有全场、非接触、高精度等优点, 因此该方法也被广泛应用于大型结构的运动和变形测量, 典型应用包括开展大型工程结构沉降位移监测并建立监测预警系统^[15]、测量航天飞机 TT&C 船的船体变形^[16]、实现对大型风力发电机叶片变形的视频测量研究^[17]等。这些研究需事先在目标物体上布置标志点, 通过提取和识别标志点确定两幅图像中的对应点^[18-20], 然而在既有大型结构测量中需面临标志点布置难的实际问题。二维数字图像相关方法由于操作简单且可利用目标物上的自然特征点进行计算, 已被广泛用于各种材料和结构表面的全场面内位移和应变测量^[21, 22]。基于数字图像相关原理, 已经发展出了用于桥梁等大型结果测量的单目视频挠度仪^[23]。由于单目视频挠度仪仅使用一个相机即可实现多点挠度测量, 因此可以很灵活地应用于实际测量中, 但是其测量结果容易受到

^{*} 收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-05

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFF01014200); 国家自然科学基金(编号: 12002197, 12072184, 11727804); 中国博士后科学基金第 67 批面上资助(编号: 2020M671070); 上海市“超级博士后”资助计划(编号: 2019192)资助

通信作者: 苏志龙(1988—), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 三维视觉与光测力学。Email: zhilong8845@shu.edu.cn

张东升(1967—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 光测力学。Email: donzhang@staff.shu.edu.cn

离面位移的影响^[24]。为了消除离面变形的影响,可通过多视角的方式构建立体测量系统,其中最典型的为三维数字图像相关技术^[25]。三维数字图像相关可以同时测量 3 个位移分量,适用于平面和曲面的三维形状和变形测量^[26,27],但目前研究多集中在近距离的中小视场测量。此外,也有研究利用单相机设备,在不同时刻不同位置,对同一物体进行成像,从而实现较大视场的多视角测量^[28],但由于在测量时需要移动相机,因此很难应用于实际的变形测量中,尤其是动荷载工况下的变形测量。

为了克服现有单相机设备以及三维数字图像相关测量系统的局限性,本文基于双目立体视觉测量原理,开发了一种多点实时三维运动测量系统。相比于单目三维测量设备而言,本文介绍的测量仪可以实时计算运动中的物体的三维位移;相比于现有的双目视觉设备,本文介绍的测量系统具有“主站+辅站”的协作测量模式,主站作为控制站,通过网线或者无线的方式控制辅站,实现两测量站之间的同步和数据传输,从而可在辅站无人值守的情况下实时进行相机标定以及三维位移计算,测量视场更大,可实现远程三维测量。

1 三维实时运动测量仪

1.1 系统架构及测量流程

本文介绍的三维运动测量仪由 2 个测量站和站间数据同步模块组成,每个测量站由相机测量单元、姿态感知单元、测距单元、运动控制单元和数据处理单元组成,系统组成及连接关系如图 1 所示。相机测量单元由一个高速 CMOS 相机组成,最高分辨率为 5120×5120 ,最高帧率为 200Hz,可根据不同的测量要求搭配 25~500mm 的定焦镜头,实现 1~500m 范围内的测量。姿态感知单元由 2 个倾角传感器构成,一个安置于平台上,量程 5° ,精度 0.002° ;另一个安置于相机旁,量程 60° ,精度 0.05° 。测距单元主要由一个干涉式激光测距仪构成,用于测量相机和被测目标之间的距离以及基线宽度。运动控制单元由一个水平电动转台和对应的控制器组成,可为相机单元提供水平方向的旋转运动控制。数据处理单元为一台工控机,集成有一块高速固态硬盘以及 PCIE 高速图像采集卡。各单元之间通过数据传输线连接。相机拍摄的画面由 4 根高速连接线传入计算机中,姿态感知单元的角度信息以及测距单元获得的距离信息均通过数据传输线由串口传入计算机,2 个测量站之间通过站间数据同步模块进行连接。双站测量系统的立体结构如图 2 所示。

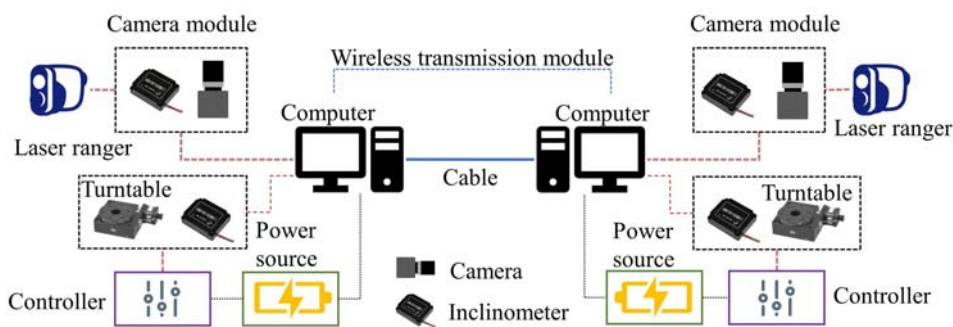


图 1 硬件系统架构

Fig.1 Hardware system architecture

在远程测量中,测量系统距离目标往往比较远(比如近百米的距离),考虑到双目测量中立体角的要求(一般在 20° 到 30°),系统的基线(2 个测量站相机之间的距离)往往比较宽,而且可能需要跨越障碍物,因此,在测量系统和软件的设计上,采用了“主站+辅站”的模式:主站作为控制中心,在 2 个测量站开机之后所有操作指令均由主站发出,辅站负责接收主站指令,并根据指令进行图像采集、本地计算和必要的回传数据等操作,站点之间的通信可根据实地测量环境选择有线和无线的方式进行。这一设计不仅避免了 2 个站之间因协作而需要的繁杂人工通信和交流,而且有助于提高远程测量的可操作性和实用性,总体测量流程如图 3 所示。

1.2 远程三维测量关键技术

根据第 1.1 节可知,远程双站运动测量中为使双站同步获得立体图像数据,需要实现主站和辅站之

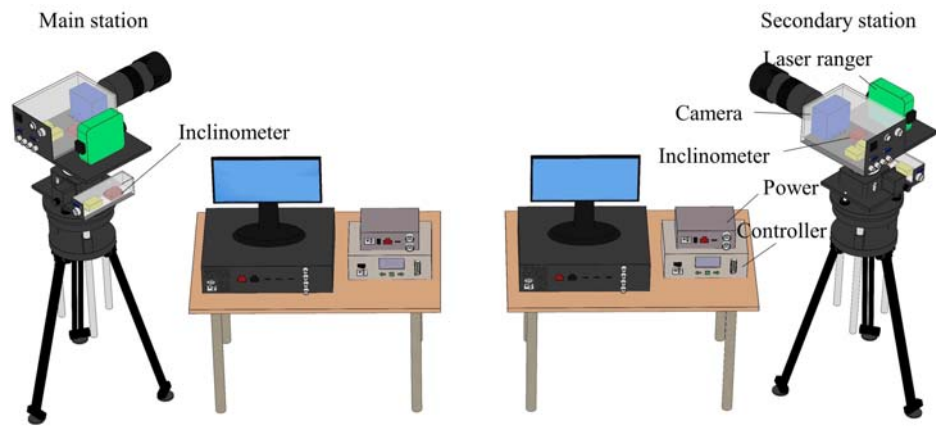


图 2 “主站+辅站”测量系统

Fig. 2 “main station + secondary station” measuring system

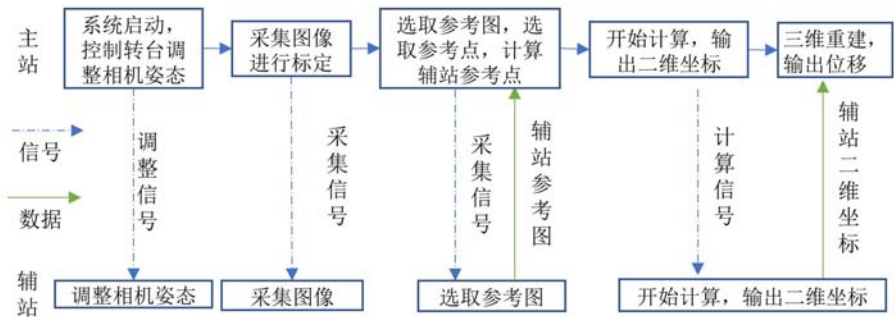


图 3 系统测量流程示意图

Fig. 3 System measurement process diagram

间的数据通信和同步控制;为了从立体图像中恢复三维信息,需要实现双站相机的标定、测量图像的立体匹配和目标点跟踪等。以下分别对这些关键技术进行介绍。

1. 2. 1 双站数据通信

根据上述介绍可知,“主站+辅站”的架构模式以主站计算机作为控制和三维数据处理终端,辅站响应主站的控制并回传必要的信息,因此双站之间的通信和数据传输是测量系统正常工作的关键基础之一。本文应不同测量模式需要分别使用有线和无线数传两种数据通信方式。有线通信基于 TCP/IP 协议,采用网线进行信号和数据的传输,其中所有的指令与数据转化为套接字的形式,在双站之间相互传递。无线数传使用串口协议(ANSI/EIA-232 标准),利用数传模块进行通信操作。相比于网线传输,使用数传模块虽然速度较慢,但不受地形限制,对于野外测量来说,无线通信更灵活和实用。双站实时同步测量涉及到大量且同时进行的数据交互,在通信设计上分为独立的图像、命令与消息三路传输,可实现重叠且互不干扰的数据通信模式,如图 4 所示。

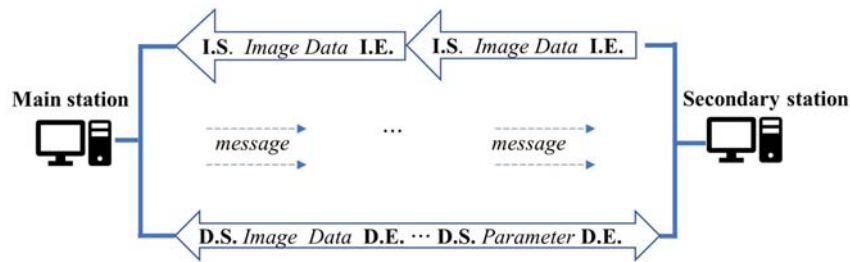


图 4 图像、命令和消息三路数据通信

Fig. 4 Image, command and message three-way data communication

第一路为实时图像传输。系统设计上,使主站负责标定、图像显示和三维计算,而辅站在无人值守

状态下响应主站控制和执行本地实时图像跟踪,因此主站需要在测量过程中以一定的方式获取辅站图像信息。其中,标定阶段辅站需向主站回传原图像,而在测量阶段则实时回传降分辨率的图像数据用以显示。传输时,辅站采集到的图像数据被转化为套接字形式,以数据流的形式进行传输,并在开头与结尾加上特定的关键字以标记每帧图像范围。第二路为主站到辅站的操作命令传输:主站发出的每一条命令被转化为套接字,然后以一个数据包的形式发送,辅站接收到数据包之后,根据数据包中包含命令的不同,执行诸如打开相机、采集图像、开始计算等操作。第三路为信息传输,涉及双站之间的图像点坐标交互操作。主站与辅站都具有独立的图像采集及二维时序跟踪功能,但三维测量时参考图与目标点的选择均在主站完成,在进行初次的立体匹配时,需要辅站将参考图发送给主站,待主站完成立体匹配后将目标点在辅站图像中的坐标发送到辅站,从而实现各站之间同步但独立的时序跟踪。在时序跟踪过程中,辅站计算出的二维图像坐标需回传到主站,以进行三维重建和三维位移计算。数据以数据流的形式传递,并在开头与结尾加上特定的关键字,用于区分数据片段。

1.2.2 双站时间同步

在室内常规实验中,相机之间的距离较近,各相机可以通过有线外触发的方式进行高精度同步。在室外进行远程测量时,为了满足良好的立体成像几何,相机基线往往很宽(可达几十米甚至上百米),很难使用有线的方式进行相机同步。为了解决这一问题,本文在测量系统设计上采用 GPS 授时的方式对主站和辅站相机单元进行同步控制,原理如图 5 所示。

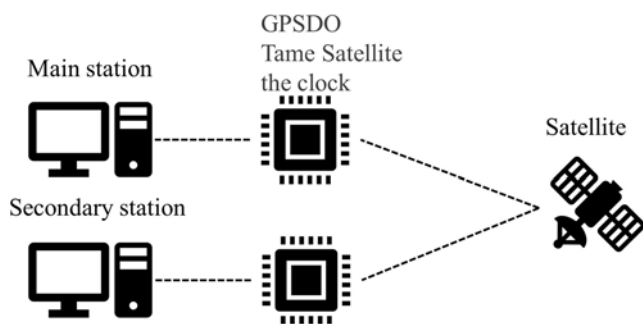


图 5 GPS 同步授时

Fig. 5 GPS synchronization time service

在主站的计算单元上设置好采图时间点,采图时间点与当前时间点之差需大于信号通过网线或无线模块的传输速度,并将此时间数值通过网线或者无线模块传输给辅站。主站与辅站循环等待,直到到达设置好的采图时间,主站与辅站同时采集图像,从而达到同步采集和位移计算的目的。此方法有一个前提条件,就是 2 个测量站的计算机系统时间需要一致,若两测量站的计算机系统时间不一致,则无法实现,因此在进行同

步采图之前需要校核两测量站的系统时间,使其保持一致。本文使用基于 GPS 的时间同步网络技术(NTP, Network Time Protocol),可接收北斗等卫星定时信号来驯服 GPS 内部恒温晶振(OCXO, Oven Controlled Crystal Oscillator),提供基于世界标准时间(UTC, Coordinated Universal Time)的高稳定的 NTP 等一级时钟同步信号,校核测量站的系统时间与世界标准时间,校核精度在 3ms 以内。在进行采集图像之前,先利用 GPS 同步授时系统,将两站测量系统时间与北斗卫星时间进行校核,之后使 2 个测量站同时观察刷新率为 144Hz 的时钟显示器,时钟显示精度为 1ms。设置相机采用频率后,比较两相机采集照片的时间差,发现两系统采集图像时间间隔小于 10ms。为进一步验证时间同步性,在程序中输出采集照片的时间戳列表,发现主站与辅站之间的时间间隔大约在 3ms 左右。在校准好主站与辅站的系统时间之后,再按本文上述原理进行同步采集图像,实现双站同步采图。

1.2.3 双站系统标定

本文基于立体视觉原理实现三维坐标和运动测量,在主辅站完成同步后,需先对双站相机进行标定,包括确定各相机内部参数(以下简称内参)和相机间的外部参数(以下简称外参)。由于测量系统使用的是定焦镜头,可以假设相机内参不变,并可在室内用张氏标定法进行标定;但相对外参与测量时双站构成的立体几何相关,需要在测量时根据测量场景进行标定,因此以下主要介绍外参标定方法。

双站相机间的外参包括 3×3 的旋转矩阵和一个三维平移向量,分别记为 $R \in SO(3)$ 和 $T \in \mathbb{R}^3$,其中 $SO(3)$ 是三维空间 $\mathbb{R}^3$ 中所有旋转构成的特殊正交群。对于已知内参的双目成像系统,相机外参标定的确定可被转化为一个相对姿态(即 R 和 T)求解问题。假设主站相机的坐标系为世界坐标系,则 R 和

T 描述了辅站相机相对于世界坐标的相对姿态。假设 $x_i \in \mathcal{R}^3 (i=1,2)$ 分别为以齐次坐标表示的同一个三维场景点 P 到主站和辅站相机中的图像坐标,根据标定相机的极线几何,相对姿态 R 和 T 可使用本质矩阵(Essential Matrix) $\mathbf{E}$ 进行描述:

$$x_2^T \mathbf{E} x_1 = 0 \quad (1)$$

式中 $\mathbf{E} = [T]_{\times} R$ 。假设主站和辅站相机的内参参数矩阵为 $\mathbf{A}_1$ 和 $\mathbf{A}_2$,则等式(1)可以改写为

$$p_2^T \mathbf{A}_2^{-T} \mathbf{E} \mathbf{A}_1^{-1} p_1 = 0 \quad (2)$$

式中 p_1 和 p_2 分别为主辅站相机观测到的上述场景点 P 的投影。公式(2)给出了相对外参求解的基本方程。由于旋转矩阵构成了正交 Lee 群,只有 3 个自由度;而平移向量因具有尺度不确定性,往往采用归一化描述(即 $\|T\|=1$),从而只有 2 个自由度,因此,本质矩阵只有 5 个独立未知参数,在理想情况下,只需要 5 对不同场景点的投影就可以确定本质矩阵。对本质矩阵进行奇异值分解(SVD),可求解出相对外参 R 和 T 。

尽管从本质矩阵出发,可以使用五点法^[29]确定外参的最小限度解,但实际测量中图像噪声和误匹配难以避免,还需要结合基于“假设-检验”框架的一致采样算法(如 RANSAC)来获得外参的鲁棒估计,因此实际中往往需要更多的、全视场分布的特征点。在空间特征点不足的情况下,可采取无人机补点的方式获得更多的标定^[30],实现对相对外参的可靠估计。为了得到尺度信息,使用激光测距单元测量主站和辅站相机之间的距离,根据测得的基线距离,可对归一化的平移向量进行恢复。

1.2.4 基于相关性的图像点匹配与跟踪策略

为了获得目标点的三维坐标和运动信息,需要在主辅站对目标点的图像信息进行匹配和跟踪。考虑到实时计算和站间数据通信效率,采用如图 6 所示的匹配和跟踪策略:首先在主站与辅站参考图像之

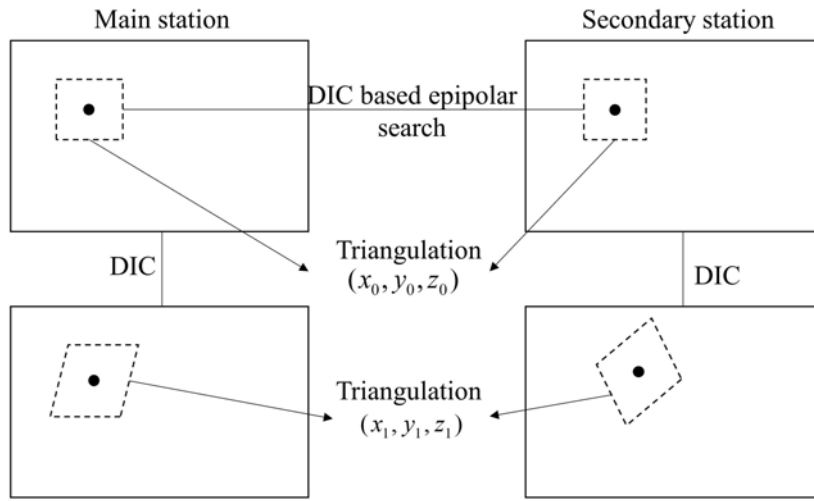


图 6 左右视图中对应图像子区的匹配示意图

Fig. 6 The matching diagram of the corresponding image sub-regions in the left and right views

间基于 DIC 算法进行极线立体匹配(Epipolar search),建立目标点图像的立体对应关系,之后由主站和辅站分别在本地数据处理单元上执行 DIC 时序跟踪。DIC 算法在匹配图像点时一般包括 2 个步骤,即整像素搜索和亚像素优化。得益于反向组合相关(IC-GN)算法的提出和发展,在得到良好的初值之后,亚像素 DIC 优化可以通过求解以下归一化最小平方距离相关函数^[31]可靠实现:

$$C_{ZNSSD} = \sum \left\{ \frac{[f(X + \xi) - f_m]}{\Delta f} - \frac{[g(X + W(\xi; p)) - g_m]}{\Delta g} \right\} \quad (3)$$

相比之下,由于整像素搜索需要在一个较大的范围内进行局部灰度相似性匹配,是实际测量中的主要问题所在,因此本文针对立体匹配和时序跟踪采用了基于如下相关函数的不同的搜索策略:

$$C_{ZNCC} = \sum \left\{ \frac{[f(X + \xi) - f_m] \times [g(X + W(\xi; p)) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\} \quad (4)$$

式中: $X = [x \ y \ 1]^T$ 表示所选点的齐次坐标; $\xi = [\Delta x \ \Delta y \ 1]^T$ 表示围绕 X 的子集中像素的局部坐标;

$W(\xi; p)$ 为目标子区相对于参考子区变化的形函数; $f_m = \frac{1}{N} \sum_{\xi} f(X + \xi)$ 表示所选子区灰度均值; $g_m = \frac{1}{N} \sum_{\xi} g(X + W(\xi; p))$ 表示目标子区的灰度均值; $f(X + \xi)$ 和 $g(X + W(\xi; p))$ 分别表示参考子区和目标子区在 $X + \xi$ 和 $X + W(\xi; p)$ 处的灰度值; $\Delta f = \sqrt{\sum_{\xi} [f(X + \xi) - f_m]^2}$, $\Delta g = \sqrt{\sum_{\xi} [g(X + W(\xi; p)) - g_m]^2}$ 。

实际进行计算时,在参考图上会选择多个点进行测量,这种情况下,若采用暴力搜索(Brute-force search),在辅站参考图上全图搜索与主站参考图对应的参考点,无疑增加计算时间。此时,可采用极线搜索的方式进行搜索,对于主站上每个测量点,在辅站参考图上找到相应的极线,在极线附近进行搜索,如图 7 所示。

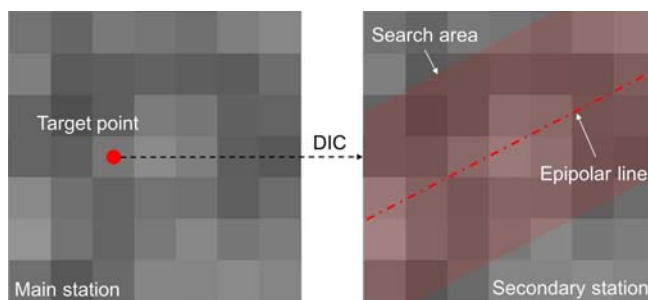


图 7 极线搜索

Fig. 7 Epipolar search

对于时序上的二维数字图像相关,两测量站各自分别进行。为提高搜索效率以及搜索精度,在整像素相关计算中采用了三种搜索方式,分别为逐点搜索、螺旋搜索和旋转搜索,如图 8 所示。其中逐点搜索是对搜索范围内的每一点都进行匹配,搜索速度较慢,但精度最高;螺旋搜索是在搜索范围内每距离参考点一定的距离进行匹配,速度较快,并且与最大梯度下降算法相结合,可以准确、快速地搜索到目标点,但在某些条件下,可能会出现搜索偏差;当图像中的物体出现明显的旋转时,传统相关匹配算法会失效。这主要是由于传统的匹配算法仅考虑了子区的平移而忽略了旋转, Pan 等指出当变形图像相对于参考图像存在一定量的旋转时,相关系数呈现多峰分布,这会导致参考子区和变形子区的去相关^[21],因此,本文采用基于参考子区反向旋转的相关匹配策略计算测点的像素位移^[32],同时在亚像素优化的过程中,需记录下每次的旋转角度,在下次进行整像素搜索时,选择对应角度的子区,进行参考图更新,从而避免因位移过大而导致无法进行匹配或误匹配。

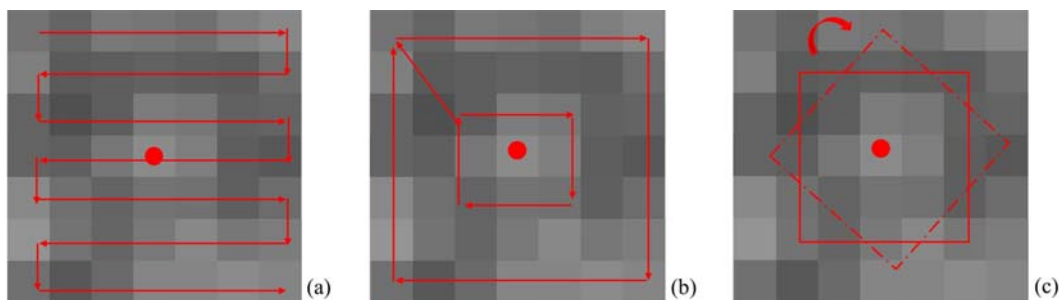


图 8 整像素相关搜索:(a)逐点搜索;(b)螺旋搜索;(c)旋转搜索

Fig. 8 Integer pixel related search: (a) point-by-point search; (b) spiral search; (c) rotation search

2 实验结果及分析

2.1 室内精度验证

本节对以上介绍的多点三维运动测量仪进行精度验证,实验布置如图 9 所示。由于 2 个测量站均

由本地计算机控制图像采集,为了保证双站图像采集的同步性,利用GPS授时模块对主站和辅站的控制终端进行了同步校验。为了验证同步性,使2个测量站同时观察刷新率为144Hz的时钟显示器,时钟显示精度为1ms。设置相机采用频率后,采集时钟图像如图9中的2个时间片段所示,主辅站同步获得的时刻均为15:57:51.532,结果说明,1.2节中介绍的系统同步控制方法可以实现毫秒级的同步性能。

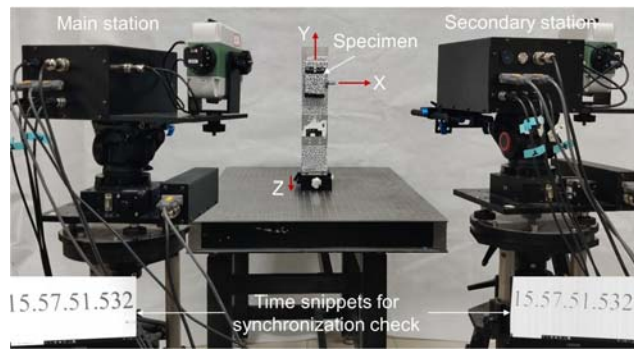


图9 室内精度验证实验布置

Fig. 9 Experimental setup for indoor accuracy evaluation

在双站同步后,通过测量图9中的散斑平面目标在3个方向的位移,验证了系统的位移测量精度。在测试中,相机焦距为50mm,曝光时间为6ms,采集帧率为80fps,目标在各个方向的位移均有一个精度为0.01mm的平移台控制,分别移动15次,移动步长为0.1mm。由于是刚体平移,在被测目标上随机选择了15个计算点,计算各点的位移后取平均作为位移测量值,测量结果如图10所示。为了验证测量精度,计算了每一步中所有计算点的测量位移相对于真实位移的绝对误差均值,并计算了误差标准差,结果如图11所示。根据测量结果可以看出,3个方向的位移测量结果与真实位移一致,平均绝对误差均在很小的范围内波动,变化范围分别为 $[-0.009, 0.008]$ mm、 $[-0.001, 0.010]$ mm和 $[-0.010, 0.003]$ mm;在误差标准差方面,X和Y方向上的最大值均为0.002mm,Z方向上的最大值为0.0009mm,这说明每次测量中各计算点处的位移测量值表现一致。实验结果表明,上述的三维运动测

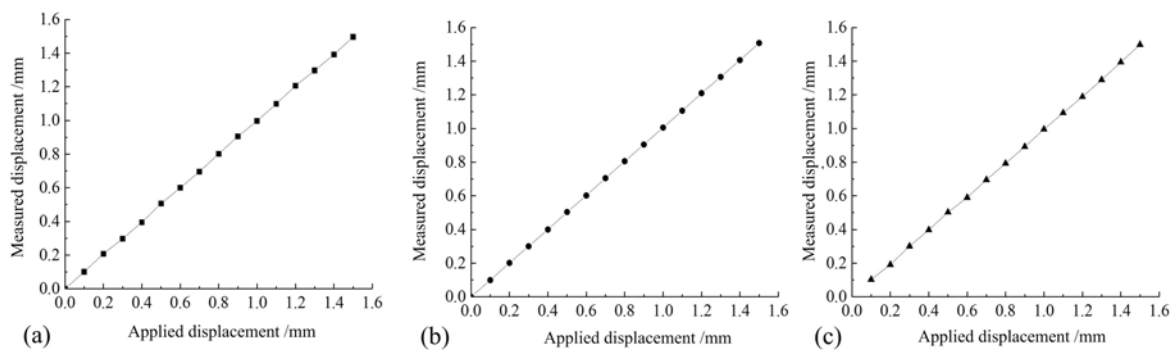


图10 (a)、(b)和(c)分别为X、Y、Z方向的位移测量均值

Fig. 10 (a), (b) and (c) are the mean values of measured displacements in the X, Y and Z directions, respectively

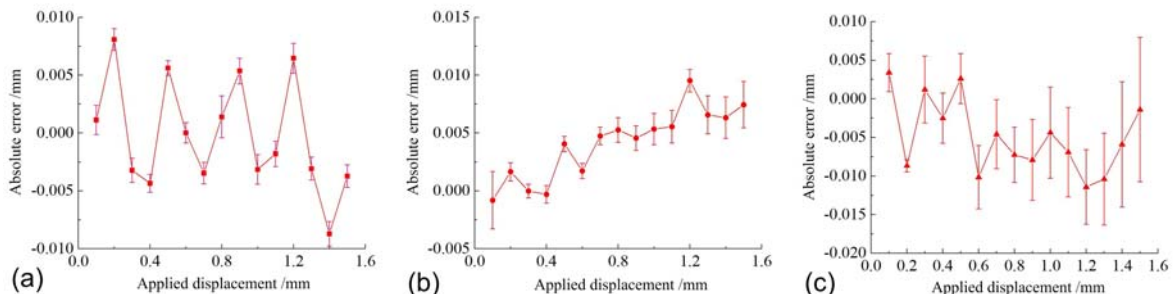


图11 (a)、(b)、(c)分别为测量的X、Y、Z方向上位移的绝对误差均值和标准差

Fig. 11 (a), (b), (c) are the mean values and standard deviations of the measured absolute error for displacement in the X, Y and Z directions, respectively

量仪具有较好的测量精度。为对远距离测量提供参考,以水平视场作为参考对3个方向的相对误差进行了评估:X方向最大误差占水平视场的1/33125,约为0.030mm/m,Y方向的最大误差占水平视场的

1/29444, 约为 0.034mm/m, Z 方向的最大误差占水平视场的 1/88333, 约为 0.011mm/m。

2.2 风电叶片运动测量

本节使用上述的多点实时三维运动测量仪测量了运转中的风力发电机叶片的运动轨迹, 用于说明该测量仪在实际远程测量中的实时性、可行性和正确性, 测量系统与被测风力发电机的相对位置关系如图 12(a) 所示。目标风力发电机的叶片长度为 47m, 旋转直径可达 94m, 其上事先粘贴有如图 12(b) 所示的散斑标识。为了获得运转过程中叶片的完整图像, 双站相机的公共视场尺寸至少为叶片的旋转直径, 因此测量仪被放置在距离风机水平距离约 248m 的位置处, 主、辅站之间的距离 (即基线宽度) 约为 63.9m, 相机焦距为 70mm, 曝光时间为 2ms, 采集帧率为 80fps, 主站现场设置如图 12(b) 所示。系统设置完成后, 即可根据 1.1 节中的测量流程对目标叶片的运动进行测量。

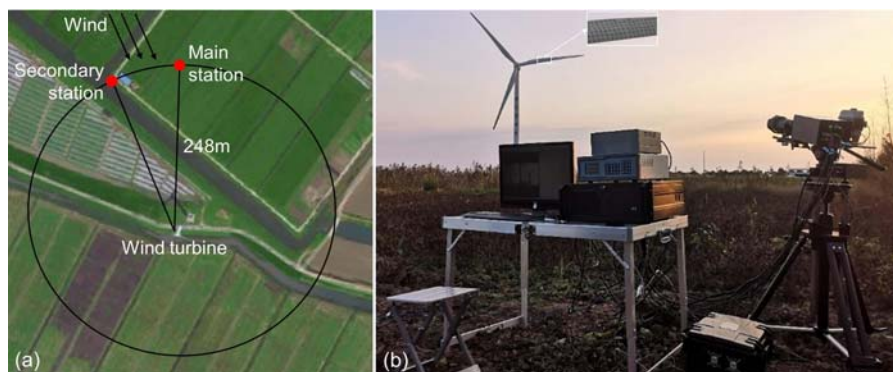


图 12 (a) 风电叶片测量示意图; (b) 主站布置现场图

Fig. 12 (a) schematic diagram of wind turbine blade measurement; (b) main station layout site map

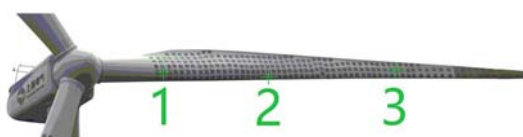


图 13 目标叶片上计算点的位置

Fig. 13 The position of the calculated point on the target blade

为了得到运转状态下被测叶片的运动轨迹, 先通过主站控制相机获得目标风力发电机的一对初始图像, 在主站获得的图像中选择一个叶片作为跟踪对象, 在其上选择如图 13 所示的 3 个计算点, 并执行立体匹配和三维重构得到目标的初始三维坐标; 然后启动实时系统实时测量功能, 主站和辅站分别通过本地数据处理单元在目标

点的初始位置处以 160Hz 的速度同步搜索运动中的目标点, 当二者同时成功地再次捕获目标点之后, 系统以 25Hz 的速度实时地执行三维运动轨迹测量并输出测量数据。

以左相机坐标系为世界坐标系, 前 4 个运动周期内测量的位移时程如图 14 所示。可以看出在这 4 个旋转周期内, 随着计算点离叶片旋转中心越来越远 (即从点 1 到点 3), 各个方向的位移幅值越来越

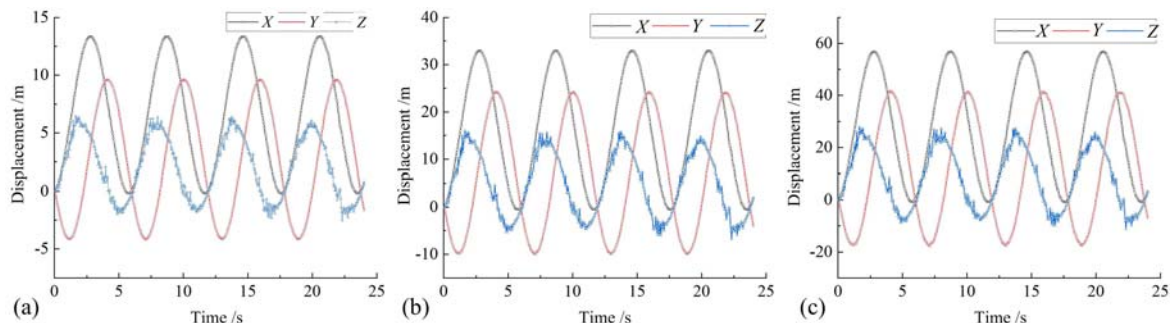


图 14 目标叶片上计算点的位移时序曲线: (a) 点 1; (b) 点 2; (c) 点 3

Fig. 14 The displacement sequence curve of the calculated point on the target blade: (a) point 1; (b) point 2; (c) point 3 大, 与圆周运动的规律基本一致。比较图 14(a)、(b) 和 (c) 可以发现, 各点处 3 个方向的位移幅值基本一致, 原因是在较短的测量时间内 (约为 24s) 风速和风向都比较稳定。为了进一步说明叶片运动情况,

对得到的位移—时间曲线进行拟合,根据拟合曲线计算出角速度,结果发现在测量时间内叶片的角速度基本一致(见图 15),这说明在测量时间内,整个叶片在空间上做匀速圆周运动。此外,从图 14 可以看出 3 个测点在 Z 方向都表现出了比较明显的测量误差,而其他 2 个方向的误差很小。为此,对 Z 方向的位移进行 sine 曲线拟合,可以得到 3 个测点相对于拟合值的相对误差,结果如表 1 所示。由表可以看出 3 个测点的相对误差均值约在 5% 左右,尽管从叶根到叶尖相对误差维持一个稳定水平,但也意味着绝对误差在逐渐增大。主要原因在于相机是由 GPS 同步后的计算机控制采集图像,两台计算机内部的耗时延迟导致 2 个相机采集照片时存在一定延迟,从而导致离叶根点距离越远,2 个测量站采集的图像偏差越大,使得最终位移存在一定的偏差。

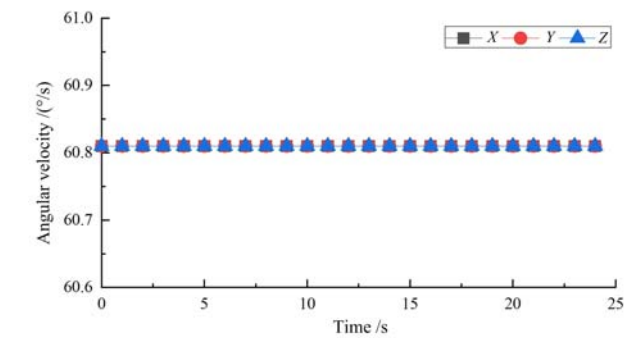


图 15 目标叶片的角速度

Fig. 15 Angular velocity of the target blade

表 1 测量的 Z 方向位移相对于其 sine 曲线拟合的误差

Tab. 1 Relative errors of measured displacements in Z-axis relative to the sine-wave fittings

点	1	2	3
相对误差均值/%	5.13	5.33	5.33
相对误差标准差/%	4.20	4.27	4.38

3 结论

本文介绍了一种具有“主站+辅站”协作架构的远程多点三维实时运动测量仪。主站作为控制中心,可根据测量场景选择有线或者无线的方式控制辅站进行同步测量。为了解决远距离测量相机同步问题,本文采用了基于 GPS 同步授时的方法,可以实现毫秒级的同步测量。利用相机自标定技术和数字图像相关匹配策略实现三维计算,保证了多点测量的实时性。室内外实验验证了本文所介绍的三维运动测量仪在对应测量环境和运动条件下的精度和有效性,结果表明该系统在诸如风电叶片变形和桥梁挠度等户外大视场测量中具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 毛建平,周小冬,覃乐勤. 智能全站仪在大跨径桥梁荷载试验中的应用[J]. 西部交通科技, 2016(9):87—89, 105 (MAO Jianping, ZHOU Xiaodong, QIN Leqin. Application of intelligent total station in large-span bridge load test[J]. Western China Communications Science & Technology, 2016(9):87—89, 105 (in Chinese))
- [2] 张俊中,朱义朝,刘乾,等. 基于全站仪在桥梁挠度检测中的应用和研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(1):41—44 (ZHANG Junzhong, ZHU Yichao, LIU Qian, et al. Application and study of the bridge deflection with total station[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(1):41—44 (in Chinese))
- [3] 阴雷,王向军,秦贯宇. 基于视觉结构光的大型曲面动态测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13):150—159 (YIN Lei, WANG Xiangjun, QIN Guanyu. Dynamic measurement method of large-scale surface based on visual structured light technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13):150—159 (in Chinese))
- [4] 马少鹏,赵永红,金观昌,等. 光测方法在岩石力学实验观测中的应用述评[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(10):1794—1799 (MA Shaopeng, ZHAO Yonghong, JIN Guanchang, et al. Review on application of optical measurement methods to experimental inspection of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(10):1794—1799 (in Chinese))
- [5] Cong-Shun Wang, Chun-Yang Xiong, Sheng Chang, et al. Testing and simulation of comb-driven MEMS relay by applying digital image correlation technology[C]. IEEE, 2002:1204—1207.
- [6] Kogut B M, Artemyeva Z S, Kirillova N P, et al. Organic matter of the air-dry and water-stable macroaggregates (2-1mm) of haplic chernozem in contrasting variants of land use[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(2):141—

- 149.
- [7] Yuyang Pang, Gang Wu, Haitao Wang, et al. Experimental study on the bond behavior of CFRP-steel interfaces under quasi-static cyclic loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140:426—437.
- [8] 于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. *实验力学*, 2011, 26(5):479—490 (YU Qifeng, SHANG Yang, FU Sihua, et al. Device of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(5):479—490 (in Chinese))
- [9] 尚洋, 于起峰, 关棒磊, 等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(5):593—600 (SHANG Yang, YU Qifeng, GUAN Banglei, et al. Recent advances of videometrics for large-scale structure deformation monitoring [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(5):593—600 (in Chinese))
- [10] Sánchez-Aparicio L J, Herrero-Huerta M, Esposito R, et al. Photogrammetric solution for analysis of out-of-plane movements of a masonry structure in a large-scale laboratory experiment[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16):1871.
- [11] 颜轲. 数字图像三维立体显示算法研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010 (YAN Ke. Research and implement on digital image 3D stereoscope display algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese))
- [12] 曾祥福, 刘程林, 马少鹏. 高速三维数字图像相关系统及其动载三维变形测量[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(4):364—369 (ZENG Xiangfu, LIU Chenglin, MA Shaopeng. Measurement of dynamic three-dimensional deformation of structures using high-speed 3-D digital image correlation system[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(4):364—369 (in Chinese))
- [13] Pan B, Yu L P, Zhang Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(1):2—20.
- [14] Felipe-Sesé L, López-Alba E, Hannemann B, et al. A validation approach for quasistatic numerical/experimental indentation analysis in soft materials using 3D digital image correlation[J]. *Materials*, 2017, 10(7):722.
- [15] Yu Q F, Jiang G W, Shang Y, et al. A displacement-relay videometric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(6):1105—1111.
- [16] Liu H B, Sun C, Zhang Y Q, et al. Hull deformation measurement for spacecraft TT&C ship by Photogrammetry [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(8):1339—1347.
- [17] Sun X, Yuan Y, Zhu Z, et al. Videometric research on deformation measurement of large-scale wind turbine blades[J]. *Theoretical and applied mechanics letters*, 2011, 1(1):011005.
- [18] 孟祥丽, 陈聘, 丁华. 摄影测量中编码标志点设计方案概述[J]. *计量与测试技术*, 2019, 46(1):54—56 (MENG Xiangli, CHEN Pin, DING Hua. An overview of coded marker points design schemes in photogrammetry[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2019, 46(1):54—56 (in Chinese))
- [19] 倪章松, 成垒, 顾艺, 等. 视觉测量中环形编码标志点的精确识别算法研究[J]. *新技术新工艺*, 2016(12):21—25 (NI Zhangsong, CHENG Lei, GU Yi, et al. Research on detection algorithm of circular coded reference point in vision measurement[J]. *New Technology & New Process*, 2016(12):21—25 (in Chinese))
- [20] 孟祥丽, 刘瑶, 吴涛. 一种圆形编码标志点的设计及解码算法研究[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(7):42—44 (MENG Xiangli, LIU Yao, WU Tao. Design of a circular encoding marker point and research on decoding algorithm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(7):42—44 (in Chinese))
- [21] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6):062001.
- [22] 顾国庆, 王开福, 许星. 基于数字图像相关的刚体面内微小转动测量及转动中心定位[J]. *中国激光*, 2012, 39(1):185—191 (GU Guoqing, WANG Kaifu, XU Xing. Measurement of in-plane micro-rotations and rotation-center location of a rigid body by using digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1):185—191 (in Chinese))
- [23] 王硕, 李晓东, 张东升. 基于视觉的结构挠度无损检测技术[J]. *无损检测*, 2020, 42(1):46—49 (WANG Shuo, LI Xiaodong, ZHANG Dongsheng. A vision-based nondestructive testing technology for structural deflections[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(1):46—49 (in Chinese))
- [24] 戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(1):10—

- 19 (DAI Xianglu, XIE Huimin, WANG Huaixi. Analysis of the error caused by off-plane displacement in two-dimensional digital image correlation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1):10—19 (in Chinese))
- [25] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10):746—757.
- [26] Pan B, Yu L P, Zhang Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(1):2—20.
- [27] 刘强, 周轶昊, 孙晨, 等. 基于数字图像相关的裂纹端部全场三维变形实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1):49—58 (LIU Qiang, ZHOU Yihao, SUN Chen, et al. Experimental investigation on full three-dimensional deformation near crack tip based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):49—58 (in Chinese))
- [28] Yu L, Pan B. Color stereo-digital image correlation method using a single 3CCD color camera[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(4):649—657.
- [29] Nistér D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6):756—770.
- [30] Feng W, Zhang S, Liu H, et al. Unmanned aerial vehicle-aided stereo camera calibration for outdoor applications [J]. Optical Engineering, 2020, 59(1):014110.
- [31] Pan B, Yuan J, Xia Y. Strain field denoising for digital image correlation using a regularized cost-function[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:9—17.
- [32] Yang D, Su Z, Zhang S, et al. Real-time matching strategy for rotary objects using digital image correlation[J]. Applied Optics, 2020, 59(22):6648—6657.

Long-range multi-point three-dimensional real-time motion measuring instrument

HUANG Cheng¹, GUAN Banglei², SU Zhilong¹, ZHANG Dongsheng¹, YU Qifeng²

(1. School of Mechanics and Engineering, Shanghai University, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai Key Laboratory of Energy Engineering Mechanics, Shanghai 200444, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Visual Navigation, College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: Non-contact motion tracking based on image and vision is currently an active research field in photomechanics, and it has been widely used in scientific research and engineering measurement. This paper introduces a long-range multi-point 3D real-time motion measuring instrument based on the principle of stereo vision. The system is composed of two independently working stations. Each station has complete high-speed image acquisition, distance measurement, attitude perception, motion control and data processing function. To realize remote measurement, the stations communicate and exchange data through network cables or wireless transmission to form a cooperative measurement mode of “main station + secondary station”. In the three-dimensional calculation, the automatic calibration of the dual-station camera is realized by using scene features, and the stereo matching and temporal tracking are performed based on the efficient digital image correlation principles, realizing the real-time measurement of multi-point three-dimensional motion. The accuracy of the measurement system is verified by the indoor rigid body translation experiment; the feasibility of the measurement device in the long-distance large field of view measurement is proved through the measurement of the actual wind turbine blade movement trajectory.

Keywords: three-dimensional visual measurement; digital image correlation; external parameter calibration; camera synchronization; motion measurement