

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221117001

# 基于双目视觉的灾后玻璃幕墙变形检测方法\*

舒晨洋<sup>1</sup>, 王文韞<sup>1</sup>, 李寿科<sup>2</sup>, 杨景云<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201;  
2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 为解决高层建筑玻璃幕墙年久失修、经历突发自然灾害以及常年受到高压荷载导致幕墙变形且难以精确检测的问题, 提出一种基于双目立体视觉检测玻璃幕墙变形的检测方法。该方法首先根据双目成像原理对左右相机进行高精度标定, 获取相机的内外参数; 然后通过预处理、形态学处理消除图像中的干扰项, 并通过霍夫圆变换基于标识点对图像进行特征提取; 最后, 采用奇异值分解(SVD)和列文伯格-马夸尔特优化算法(LM)计算玻璃幕墙变形前后标识点的三维坐标, 从而确定玻璃幕墙的形变。结果表明: 借助双目立体视觉测量的方法能够精确检测玻璃幕墙的变形程度, 平均相对误差为2.276%, 能够有效满足玻璃幕墙变形检测的实际需求。

**关键词:** 玻璃幕墙; 双目立体视觉; 奇异值分解; LM优化算法; 变形检测

**中图分类号:** TU196<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0175-08

## Detection Method for Post-disaster Glass Curtain Wall Deformation Based on Binocular Vision

SHU Chenyang<sup>1</sup>, WANG Wenyun<sup>1</sup>, LI Shouke<sup>2</sup>, YANG Jingyun<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in accurate deformation detection for glass curtain wall in high-rise buildings, a new detection method based on binocular stereo vision is proposed to identify its deformation induced by long-term disrepair, sudden natural disasters and perennial high wind pressure loads. The cameras on the left and right sides are first calibrated precisely according to the binocular imaging principle to obtain the internal and external parameters of the cameras. Then the interference terms in the images are eliminated through pre-processing and morphological processing, and the image features are extracted based on the identification points through the Hough circle transform. Finally, the three-dimensional coordinates of the identification points before and after the deformation of the glass curtain wall are calculated by using singular value decomposition (SVD) and the Levenberg-Mar-

\* 收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 重点领域研发计划(2021GK2005)、中央引导地方科技发展资金项目(2022ZYT012)、湖南省自然科学基金项目(2020JJ5187, 2021JJ30251)资助

作者简介: 舒晨洋(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 1453254608@qq.com

通讯作者: 王文韞(1985—), 女, 副教授, 博士。主要从事机器视觉检测、深度学习与模态辨识的研究。

E-mail: wwy73210693@163.com

quardt (LM) optimization algorithm to determine the deformation of the glass curtain wall. The experimental results show that the binocular stereo vision measurement method can accurately detect the deformation of glass curtain walls with a mean relative error of 2.276%, which can effectively meet the practical needs of glass curtain wall deformation detection.

**Keywords:** glass curtain wall; binocular stereo vision; singular value decomposition; LM optimization algorithm; deformation detection

## 0 引言

随着世界建筑领域的高速发展,以及中高层建筑数量大幅度增长,玻璃幕墙作为一种重量轻、施工方便、采光、防护、外观皆适宜的新型建筑围护结构被广泛应用于城市的中高层建筑<sup>[1-2]</sup>。然而玻璃幕墙作为建筑材料抗拉强度和脆性相对较弱,与传统使用的混凝土、钢材或木材相比,玻璃窗和外墙通常很脆弱,再加上不合理的维护和保养措施,以及在不同强度风载荷的反复作用或地震、冰雹等灾害载荷的作用下,玻璃幕墙极易发生大变形,导致玻璃破裂坠落,引发更为严重的次生灾害,严重威胁建筑物下行人及居住者的生命安全<sup>[3-6]</sup>。若是企业停工花费大量时间进行安全检查则会造成巨额的经济损失,因此高效准确地检测幕墙高精度变形信息并对其结构失效做出判断尤为重要<sup>[7-8]</sup>。目前,高层建筑玻璃幕墙的变形检测主要依靠人工检测或者接触式的方法检测,苏荣等<sup>[9]</sup>设计了一种监测玻璃幕墙结构形变的传感器,通过检测传感器松动后的耦合变形量引起的无线信号反射谐振频率点的漂移,反推出结构的松动或变形程度;王单单等<sup>[10]</sup>提出一种数字剪切散斑干涉玻璃幕墙缺陷无损检测的方法,利用四步相移法测量玻璃加热冷却后不同时段的散斑相位图,计算全场形变的空间位移梯度;J.Lin等<sup>[11]</sup>提出一种基于扫描激光深度加热的红外热成像方法,可有效检测出玻璃幕墙结构胶粘剂的缺陷问题;D.Xu等<sup>[12]</sup>提出了一种基于光纤传感技术的玻璃幕墙变形监测方法,能够准确的完成幕墙的变形检测分析。上述研究主要是通过外接检测装置或者对玻璃幕墙及其结构进行特殊方法处理,从而有效检测出玻璃幕墙的各种缺陷。然而,考虑到玻璃幕墙服役环境以及检测速度和检测成本的限制,需要一个能够做到大规模推广和实现的检测方法。

针对实际工程背景和研究难点,本文提出一种基于双目立体视觉的玻璃幕墙检测方法。双目立

体视觉测量的方法具有非接触、高精度、成本低廉、实时性好、测量方式灵活等性质<sup>[13]</sup>,在物体形变及距离检测中应用良好,且相比较于单目视觉测量具有更高的变形感知精度,更适宜应用于实际工程中。通过对相机进行标定获取相机的内外参数;并由双目相机采集玻璃幕墙变形前后的图像,对图像进行预处理、特征提取后,基于标识点进行图像匹配;最后运用SVD和LM算法计算玻璃幕墙的精确变形,并结合IMETRUM非接触式位移视频测量分析仪测量结果,以验证该方法应用于玻璃幕墙变形检测的适用性和有效性。

## 1 玻璃幕墙变形检测原理

### 1.1 双目测量系统

双目立体视觉是基于双目立体空间交会,采用光束法平差将立体像对中目标点的图像像素坐标转换为空间三维定位坐标的过程。从三维世界坐标到二维像素坐标的转换过程主要涉及四个坐标系之间的转换,其详细过程如图1所示。

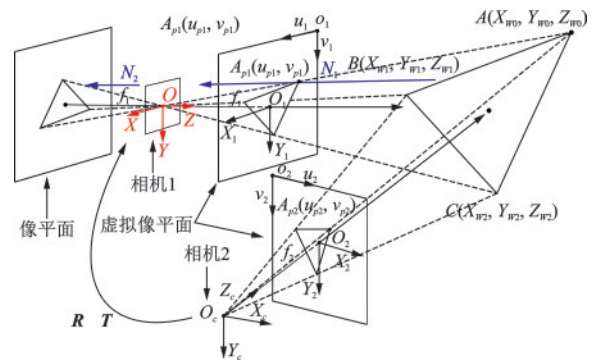


图1 双目视觉测量模型

Fig.1 Binocular vision measurement model

通常设相机1所在的相机坐标系为世界坐标系,记为 $O-XYZ$ ,而平面三角形 $ABC$ 位于世界坐标系下的 $A、B、C$ 三个点则可以表示为 $A(X_{w0}, Y_{w0}, Z_{w0})$ 。

$Z_{w0}$ )、 $B(X_{w1}, Y_{w1}, Z_{w1})$ 、 $C(X_{w2}, Y_{w2}, Z_{w2})$ ,相机的成像过程如图中  $N_1N_2$  过程所示,位于世界坐标系下的三角形通过相机1最终在像平面上呈现倒立的图像,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为相机1和相机2的焦距,为了方便计算,我们一般研究与光圈  $O$  等焦距反方向的虚拟像平面上的像素点,相机1虚拟像平面与相机主光轴的交点建立的坐标系为图像坐标系,记为  $O_1-X_1Y_1$ ,在相机1虚拟像平面的左上角建立像素坐标系  $o_1-u_1v_1$ ,同理,相机2所在的相机坐标系为  $O_2-X_2Y_2$ ,在相机2虚拟像平面的左上角建立像素坐标系  $o_2-u_2v_2$ 。记双目相机视野中任意一点的世界坐标为  $G(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$ ,点  $G$  在相机1和2像素坐标系下分别记为  $G_{p1}(u_{p1i}, v_{p1i})$ 、 $G_{p2}(u_{p2i}, v_{p2i})$ 。

世界坐标系与相机1和相机2像素坐标系的变换关系如下。

$$G_{p1} = \begin{bmatrix} f_{x1} & s & c_{x1} & 0 \\ 0 & f_{y1} & c_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \end{bmatrix} G \quad (1)$$

$$G_{p2} = \begin{bmatrix} f_{x2} & s & c_{x2} \\ 0 & f_{y2} & c_{y2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \end{bmatrix} G \quad (2)$$

式中,  $(c_{x1}, c_{y1})$ 、 $(c_{x2}, c_{y2})$  分别为相机1和2的主点坐标;  $f_{x1}=f_1/dx$ 、 $f_{y1}=f_1/dy$ 、 $f_{x2}=f_2/dx$ 、 $f_{y2}=f_2/dy$  称为相机在  $u$  轴和  $v$  轴方向上的尺度因子,其作用是实现坐标单位由像平面坐标系的毫米制(mm)向像素平面的像素(pixel)单位转换,  $dx$ 、 $dy$  分别表示单个像素在  $x$  轴、 $y$  轴的物理尺寸即像元大小;  $s$  为坐标轴的倾斜参数;  $R$ 、 $T$  分别为坐标系  $O_2-X_2Y_2$  向坐标系  $O_1-X_1Y_1$  转换的旋转矩阵和平移矩阵,统称为相机的外参矩阵。

## 1.2 基于LM与SVD算法的玻璃幕墙变形检测

列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM)<sup>[14]</sup> 算法在高斯牛顿法的基础上引入了信赖域,将优化问题从无约束的最小二乘问题转变为有约束的最小二乘问题,在一定程度上解决了实际计算过程中可能出现奇异矩阵或者病态矩阵的问题。在LM算法中,最小二乘问题可以表述为:

$$\min_x F(x) = \|f(x)\|^2 \quad (3)$$

对误差  $f(x)$  进行一阶泰勒展开,并引入信赖域半径  $\mu$ , 可得:

$$\min_{\Delta x} F(x + \Delta x) = \|f(x) + J(x)^T \Delta x\|^2 \quad (4)$$

$$s.t. \|D\Delta x\|^2 \leq \mu \quad (5)$$

式中,  $\mu$  用于控制  $\Delta x$  对迭代步长的影响;  $J(x)$  是雅可比矩阵,表示  $f(x)$  关于  $x$  的导数;  $D$  为系数矩阵,一般为单位矩阵或为  $J(x)J(x)^T$  对角元素平方根构成的对角矩阵。对优化目标函数  $F$  进行求导,使其一阶导数为零计算函数的极值,求得迭代公式如下:

$$\Delta x = (J(x)^T J(x) + \mu I)^{-1} J(x)^T f(x) \quad (6)$$

$$\rho = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{J(x)^T \Delta x} \quad (7)$$

在LM算法中,信赖域半径  $\mu$  的更新策略由比例因子  $\rho$  来确定,当  $\rho$  接近1时,说明数据拟合程度较好,当  $\rho$  过大或过小时,则需要适当的将  $\mu$  缩小或放大。在迭代公式中,当  $\mu \approx 0$  时,  $J(x)^T J(x)$  占主导地位,此时LM算法接近高斯牛顿法;当  $\mu$  取值较大时,  $\mu I$  占主导地位,LM算法更接近一阶梯度下降法<sup>[15]</sup>。在LM算法采用  $J(x)J(x)^T$  和  $\mu I$  代替 Hessian 矩阵,省略了大量繁琐的计算,提高了算法计算效率,能有效处理冗余的参数问题。

LM算法虽然具备了牛顿法和梯度下降法的特点,且具有较强的鲁棒性,但是当数据数量较为庞大时,由于需要对每一个目标点不断的计算更新收敛域半径  $\mu$ , 变化梯度下降步长,导致收敛速度较慢,并且LM算法进行收敛时,若是初值选择不当,则会陷入局部最优的困境之中,故本文使用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 的方式对数据进行压缩、降噪,计算出目标点的三维世界坐标初值,再导入LM算法中进行优化,大大减少了收敛域半径  $\mu$  的迭代次数,并且降低了其收敛时陷入局部最优的概率,使得收敛更加准确和迅速。

SVD是一种对矩阵数据压缩的方法,可以将一个复杂非零的  $m \times n$  实矩阵分解为三个涵盖原矩阵重要特征的简单小矩阵的乘积<sup>[16-17]</sup>。三个简单矩阵分别是  $m$  阶正交矩阵  $U$ 、由降序排列非负对角线元素组成的  $m \times n$  矩形对角矩阵  $\Sigma$  和  $n$  阶正交矩阵  $V$ 。

$$Q = U \Sigma V^T \quad (8)$$

式中,  $Q$  为待分解的矩阵。  $Q Q^T$  的特征向量构成正交矩阵  $U$  的列项,  $U$  的列向量也被称作左奇异向量;  $Q^T Q$  的特征向量构成正交矩阵  $V$  的列项,  $V$  的列向量被称作右奇异向量,  $Q^T Q$  特征值的平方根由大到小排列作为对角线元素,构成对角矩阵  $\Sigma$ 。

点  $G$  的像素坐标与世界坐标通过投影矩阵相联系,通过对(1)、(2)两式进行整理,可将三维齐次坐标转换为二维欧氏坐标得到(7)式:

$$\begin{cases} u_{p1i}m_{13}G - m_{11}G = 0 \\ v_{p1i}m_{13}G - m_{12}G = 0 \\ u_{p2i}m_{23}G - m_{21}G = 0 \\ v_{p2i}m_{23}G - m_{22}G = 0 \end{cases} \Rightarrow \mathbf{Q}G = 0 \quad (9)$$

上式方程组为超定齐次方程组,其方程个数大于未知数元数,此时  $\mathbf{Q}$  的解为右奇异矩阵  $V$  的最后一列,即  $\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}$  最小特征值对应的特征向量就是所求  $G$  点的世界坐标的初值。

本文待求的世界坐标利用LM算法进行优化的问题可以表述为:

$$\min F(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) = \left\| \sqrt{(u_{p1i} - u_1)^2 + (v_{p1i} - v_1)^2} + \sqrt{(u_{p2i} - u_2)^2 + (v_{p2i} - v_2)^2} \right\|^2 \quad (10)$$

优化目标函数  $F$  表示实际像素坐标与计算求得的像素坐标间误差的平方和,首先通过SVD的方法求解  $G$  点世界坐标的初值,随后将结果代入优化函数  $F$  中进行优化,使得误差平方和达到最小。式中  $u_1 = m_{11}G/m_{13}G$ ;  $v_1 = m_{12}G/m_{13}G$ ;  $u_2 = m_{21}G/m_{23}G$ ;  $v_2 = m_{22}G/m_{23}G$ 。

### 1.3 检测流程设计

实验首先使用张正友标定法对固定好拍摄位姿的左右相机进行标定,获取相机的内外参数,外参数包括:旋转矩阵  $R$ 、平移矩阵  $T$ ,内参数包括:焦距  $f$ 、主点坐标  $(u_0, v_0)$ 、3个径向畸变  $(k_1, k_2, k_3)$  以及2个切向畸变  $(p_1, p_2)$ ; 然后进行数据采集,并对采集

的图像进行预处理操作,随后对灰度图像进行阈值分割以及形态学处理,去除图像中无关的干扰,通过霍夫圆变换提取图像中圆形标识点的轮廓和圆心坐标,并对标识点进行匹配;最后,通过SVD和LM优化算法求解圆形标识点圆心精确的三维世界坐标,得出实验幕墙的精确变形。玻璃幕墙变形检测过程框图如图2所示。

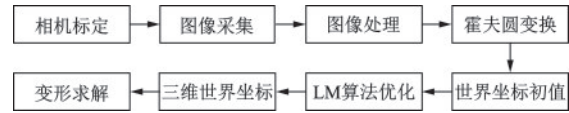


图2 玻璃幕墙变形检测框图

Fig.2 Block diagram for glass curtain wall deformation detection

## 2 玻璃幕墙变形检测实验

### 2.1 相机标定

高效、高精度相机标定是保证双目立体视觉实现精确三维测量的关键<sup>[18]</sup>。相机标定即是求解相机的内外参数,本文采用张正友相机标定法,该方法是一种基于单平面棋盘格的相机标定方法,克服了传统标定法中需要高精度标定物的缺点,只需一个棋盘格标定板即可操作,相比自标定法,其精度更高、操作更容易,因而被广泛应用于相机标定<sup>[19]</sup>。相机标定时,共使用了十二组图像数据,确保标定误差降到最低值,得到相机内参标定结果见表1,外参标定结果见表2,表2中平移向量  $T$  以 mm 为单位。

表1 外参标定结果

Table 1 Calibration results of external parameters

$R$	0.964 796 639 0	0.018 936 578 2	-0.262 314 413 1
	-0.017 014 628 5	0.999 809 186 2	0.009 596 531 1
	0.262 446 085 4	-0.004 795 518 7	0.964 934 741 4
$T$	-661.729 130 972	-11.934 861 596 1	61.396 971 267 4

表2 内参标定结果

Table 2 Calibration results of internal parameters

相机	$u_0/\text{pixel}$	$v_0/\text{pixel}$	$k_1/10^{-1}$	$k_2/10^1$	$k_3/10^3$	$p_1/10^{-4}$	$p_2/10^{-4}$	$f/dx$	$f/dy$
1	660.07	510.86	-3.35	3.095	-1.418	-4.05	-5.24	5 347.51	5 347.74
2	660.35	550.38	-2.33	1.890	-1.058	-2.80	27.57	5 272.26	5 272.05

相机标定误差如图3所示,相机2的标定误差略大于相机1,整体误差均低于0.07个像素,平均误差低于0.05个像素,满足实验精度要求。

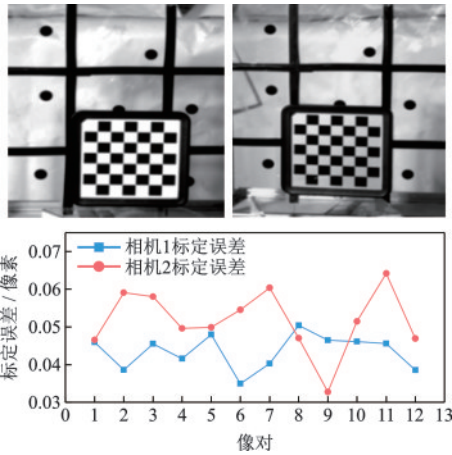


图3 双目相机标定误差示意

Fig.3 Diagram of the calibration error of the binocular camera

## 2.2 特征提取

在实验透明幕墙前方合适的位置安置两台相机,使相机视野能够涵盖完整的透明幕墙,位于左侧的相机记为相机1,右侧的相机记为相机2,2台相机均为130万像素同一型号的CCD工业相机,分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ ,像元尺寸为 $4.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$ ,镜头焦距为25 mm,实验模型如图4所示。

本文采用基于圆形标识点图像匹配的方法,在透明幕墙8个不同的位置粘贴的圆形标识点,此方法能够有效避免实验对亮度条件的严重依赖,并且匹配速度快、精度高,对研究对象本身与实验无关

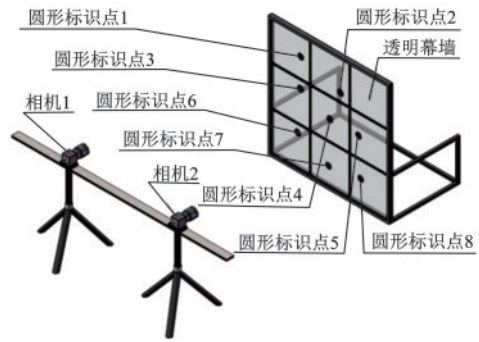


图4 实验模型

Fig.4 Experimental model diagram

的特征也有较强的过滤作用。实验开始时,通过人工给予实验透明幕墙外部激励,迫使其发生形变,并采用双目测量系统以50 Hz的采样频率同步采集实验透明幕墙发生变形时的图像,实验共计进行10 s,持续采集1 000张图像。随后,对采集的图像进行预处理操作,包括增强对比度、高斯滤波、阈值分割;对图像进行预处理能够突出圆形标识点的边缘轮廓特征,减少环境等多方因素引起的噪声干扰,利于后续圆形标识点轮廓及圆心坐标的提取;随后对图像使用形态学方法中的开运算,对阈值分割和连通区域后的图像先后进行腐蚀和膨胀操作,通过腐蚀能够去除微小的非关键区域,膨胀则能够填补关键大区域的空隙,使得图像特征呈现的更加明显且完整,最后采用霍夫圆变换,检测图像中的圆形轮廓特征,提取其圆心坐标。图像特征提取过程如图5所示,其中5(a)为未做任何处理的原图,5(b)为预处理后的图像,5(c)为阈值分割、区域连通以及形态学处理后的图像,5(d)为霍夫圆变换提取圆轮廓以及圆心坐标后的图像。

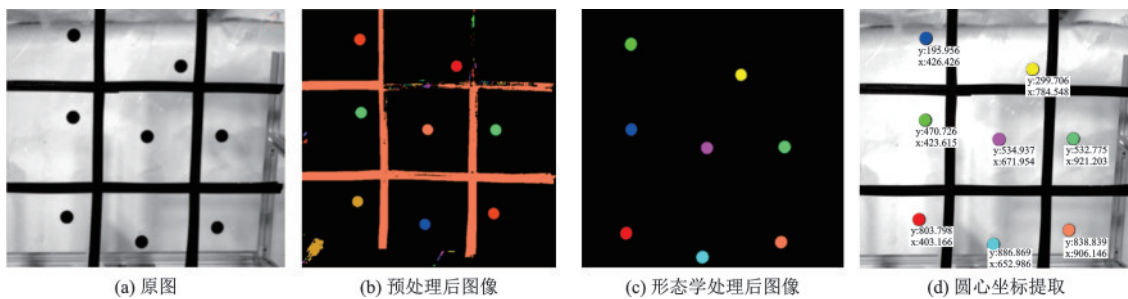


图5 特征提取

Fig.5 Feature extraction

## 3 试验结果与分析

实验共提取出8 000个圆心坐标,按照时间以

及左右相机顺序一一对应,通过SVD对相应的世界坐标进行求解,共计得到4 000个世界坐标初值,随后通过LM算法对世界坐标初值进行优化,使得误差的平方低于目标值,随后退出迭代,确定每个点

的三维世界坐标。

为了验证本文测量方法的准确性和优越性,在进行双目测量透明幕墙变形实验的同时,采用IMETRUM非接触式位移视频测量分析仪以50 Hz的频率同步测量作为验证,该仪器采用亚像素技术,位移测量精度能够达到 $0.05\ \mu\text{m}$ ,另外使用手持式激光测距仪搭配三脚架对实验幕墙的变形前后进行测量作为对比,实验现场布置如图6所示。

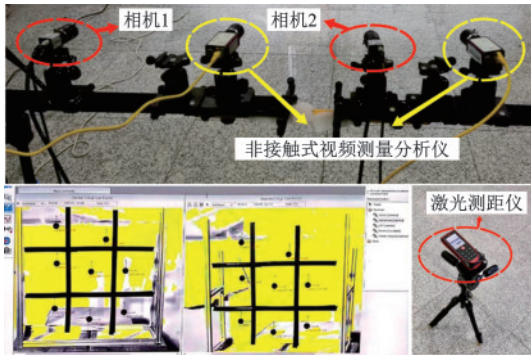


图6 实验现场布置

Fig.6 Experimental site layout

由于实际工程中玻璃幕墙的变形主要发生在 $z$ 轴上,且在 $x$ 、 $y$ 轴上的变形极其微小,故本文主要研究玻璃幕墙在 $z$ 轴上的变形。将经过计算优化得到的 $z$ 轴世界坐标与视频测量分析仪所测的 $z$ 轴坐标按照时间和点的顺序相对应排列,绘制折线图,并填充其误差区间,得到变形全程误差如图7所示。

图中实线为IMETRUM非接触式位移视频测量分析仪所测量的结果,虚线为使用双目立体视觉测量方法测量的结果。从图中可以明显看出,透明幕墙上8个标识点所在位置的变形范围在 $0\sim 32\ \text{mm}$ ,在整个完整的变形过程中,点1点3在 $1\sim 4\ \text{s}$ 以及点6点7在 $8\sim 9\ \text{s}$ 误差波动明显增大,分析其原因主要是图像采集及处理过程中产生了一定的误差,由于实验设备的采集频率可能出现不稳定的情况,再加上测量环境等其他因素的突发性干扰,以及在提取标识点圆心坐标时,也会产生一定的测量误差,导致某一时刻某点测量误差偏大。在测量进入第9 s时,实验透明幕墙的变形过程完全结束,可以明显的看出测量进入了平稳的阶段,此时,误差波动最小。

为了得到透明幕墙变形的精确结果,减少其他因素对双目立体视觉测量玻璃幕墙变形的干扰,本文选取测量进入平稳阶段后测得的最后十组数据

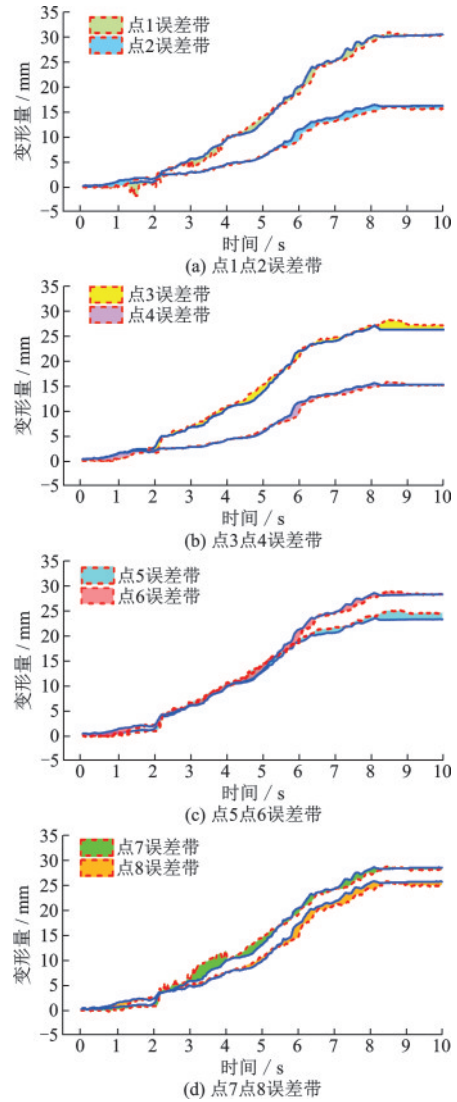


图7 变形全程误差

Fig.7 Error diagram for deformation history

的均值为变形最终结果,并使用激光测距的结果作为对比,透明幕墙变形测量的误差分析见表3~4。

由表3~4可知:基于双目立体视觉的测量方法在玻璃幕墙变形测量的实验中取得了较好的效果,实验透明幕墙上8个标识点所在位置变形测量误差的极差为 $1.195\ \text{mm}$ ,绝对误差和相对误差最大的点均为点6,绝对误差为 $1.264\ \text{mm}$ ,相对误差达到了 $5.396\%$ ;变形测量绝对误差和相对误差最小是点4,绝对误差仅有 $0.024\ \text{mm}$ ,相对误差仅有 $0.085\%$ ;除了点6和点4外,其他6个点的相对测量误差均在 $4\%$ 之下,8个点的平均相对测量误差为 $2.276\%$ ,平均绝对误差仅有 $0.526\ \text{mm}$ ,而激光测距仪所测量8个点的平均相对误差为 $6.881\%$ ,平均绝对误差为 $1.665\ \text{mm}$ ,并且相比较于激光测距仪的逐点测量,本文方法可在同一时刻获取众多实验所需数据。

幕墙玻璃挠度极限值为短边边长的1/60,其对应的形变限值达到了厘米级,按照变形观测中误差小于允许变形值的1/10~1/20的基本准则,即毫米级精度能够满足玻璃幕墙案例变形检测的需求,且依据行业标准,建筑幕墙挠度变形的观测等级可采用二等或三等,二等水平方向观测误差允许范围为±3.0 mm,三等水平方向的观测误差允许范围为±10.0 mm。因此,本文方法满足工程检测要求。

表3 逐点误差分析

Table 3 Point by point error analysis

被测点	本文方法		激光测距	
	绝对误差/ mm	相对误差/ %	绝对误差/ mm	相对误差/ %
1	0.091	0.297	1.294	4.217
2	0.807	3.129	1.809	11.041
3	0.404	1.412	2.625	9.943
4	0.024	0.085	0.510	3.342
5	0.639	3.997	1.384	5.907
6	1.264	5.396	1.564	5.490
7	0.908	3.441	2.408	8.414
8	0.069	0.454	1.726	6.688

表4 整体误差分析

Table 4 Overall error analysis

方法	极差/ mm	标准偏差/ mm	平均绝对 误差/mm	平均相对 误差/%
本文方法	1.195	0.425	0.526	2.276
激光测距	2.115	0.661	1.665	6.881

## 4 结论

(1) 为了保证双目测量参数的精确性和稳定性,使用了两台工业相机同步采集图像作为原始输入数据,通过增强对比度、高斯滤波、阈值分割和开运算等方法减少无关干扰,提高标识点特征质量,然后使用霍夫圆变换正确提取了标识点圆心图像坐标,最后通过SVD方法求解目标点三维世界坐标的初值并使用LM算法对初值进行优化,从而计算出精确和稳定的参数,为双目立体视觉的玻璃幕墙变形检测提供了精确和稳定的算法。

(2) 根据以上算法编程实现了基于双目立体视觉的玻璃幕墙变形检测平台,并通过本文提出的双目测量方法和IMETRUM非接触式位移视频测量

方法的结果对比,其平均相对误差仅为2.276%,平均绝对误差仅有0.526 mm,标准偏差为0.425 mm,从而验证了本文提出的双目摄像测量方法的有效性,为高层建筑玻璃幕墙变形难以检测的问题提供理论基础和简便有效的测量方法。

## 参考文献:

- [1] Huang Z, Xie M, Song H, et al. Modal analysis related safety state evaluation of hidden frame supported glass curtain wall[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20: 671-678.
- [2] 何京波, 余忠辉, 谢宇芳, 等. 高温高湿环境下的隐框玻璃幕墙结构胶加速老化设备[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(3): 122-124.  
He J B, Yu Z H, Xie Y F, et al. Accelerated aging equipment for structural silicone sealant of hidden frame glass curtain wall under high temperature and humidity environment[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(3): 122-124. (in Chinese)
- [3] Bedon C, Amadio C. Numerical assessment of vibration control systems for multihazard design and mitigation of glass curtain walls[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 1-13.
- [4] 黄宝锋, 符帅, 卢文胜, 等. 花岗石幕墙销钉式节点承载力性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1254-1263, 1270.  
Huang B F, Fu S, Lu W S, et al. Experimental study on bearing capacity of granite curtain wall pin joints [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1254-1263, 1270. (in Chinese)
- [5] 舒畅, 王元清, 马冬霞. 合肥新桥国际机场航站楼索支承点支式玻璃幕墙的动力性能分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 54-59.  
Shu C, Wang Y Q, Ma D X. Dynamic performance analysis of cable-supported point supported glass curtain wall in the terminal building of Hefei Xinqiao International Airport[J]. Building Structure, 2021, 51(1): 54-59. (in Chinese)
- [6] 郑晓伟, 吕恒林, 李宏男, 等. 高层建筑风致疲劳分析中的钢材强度退化模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 276-282.  
Zheng X W, Lyu H L, Li H N, et al. Steel strength degradation model in wind-induced fatigue analysis of high-rise buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 276-282. (in Chinese)

- [7] 任重翠, 刘军进, 李建辉, 等. 风荷载与地震耦合作用下超高层建筑的结构损伤与玻璃幕墙坠落研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 129-140.  
Ren C C, Liu J J, Li J H, et al. Study on structural damage and falling of glass curtain wall of super high-rise building under coupling action of wind and earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 129-140.(in Chinese)
- [8] Aiello C, Caterino N, Maddaloni G, et al. Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 596-609.
- [9] 苏荣, 蔡勋明, 吴锦行, 等. 玻璃幕墙结构形变高灵敏度无线监测系统研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 41-44.  
Su R, Cai X M, Wu J X, et al. Research on high sensitivity wireless monitoring system for structural deformation of glass curtain wall [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6): 41-44. (in Chinese)
- [10] 王单单, 高岩, 李伟仙, 等. 数字剪切散斑干涉玻璃幕墙缺陷无损检测[J]. 中国测试, 2022, 48(4): 29-34.  
Wang D D, Gao Y, Li W X, et al. Digital shearing speckle pattern interference non-destructive testing of glass curtain wall defects [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(4): 29-34.(in Chinese)
- [11] Lin J, Hong X, Ren Z, et al. Scanning laser in-depth heating infrared thermography for deep debonding of glass curtain walls structural adhesive [J]. Measurement, 2022, 192: 110902.
- [12] Xu D, Wang Y, Xie J. Monitoring and analysis of building curtain wall deformation based on optical fiber sensing technology [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(4): 3081-3091.
- [13] Wang W, Li X, Ahmat Y, et al. Vibration measurement method based on point tracking for irregular structures [J]. Optik, 2019, 176: 482-490.
- [14] 孙庆飞, 金仁成, 刘忱, 等. 基于偏振光的无人机航姿 LM 优化解算方法 [J]. 机械工程与自动化, 2022(3): 1-3.  
Sun Q F, Jin R C, Liu C, et al. LM optimization method for UAV attitude based on polarized light [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(3): 1-3 (in Chinese).
- [15] 周爱国, 于江洋, 蒲家坤, 等. 基于加权 Levenberg-Marquardt 的多目视觉同名物点定位算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 351-359.  
Zhou A G, Yu J Y, Pu J K, et al. Positioning algorithm of homonymous object points in multi-vision system based on weighted LM [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 351-359. (in Chinese)
- [16] 唐鑫鑫, 陆安江, 王彬. 结合 SVD 与 GAN 的图像检测分类模型 [J]. 激光杂志, 2022, 43(5): 128-133.  
Tang X X, Lu A J, W B. Image detection and classification model combining SVD and GAN [J]. Laser Journal, 2022, 43(5): 128-133.(in Chinese)
- [17] 刘雅名, 郭宏翔, 陈彦虎, 等. 基于光子计算的随机奇异值分解 [J]. 光学学报, 2022, 42(19): 162-167.  
Liu Y M, Guo H X, Chen Y H, et al. Randomized singular value decomposition based on optical computation [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 162-167. (in Chinese)
- [18] 姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 360-368.  
Jiang T, Cheng X S, Cui H H, et al. Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 360-368.
- [19] 贾畅, 卞永鑫, 金伟峰, 等. 一种基于主动式双目视觉的三维测量方法 [J]. 仪表技术, 2022(3): 66-71.  
Jia C, Bian Y X, Jin W F, et al. A three dimensional measurement method based on active binocular vision [J]. Instrumentation Technology, 2022(3): 66-71. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)