

引用格式: Zhang Qiang, Hu Biao, Wang Yongwei, et al. A Method for Correcting Temperature-Induced Errors in Vision-Based Measurement Systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0712005

张强,胡彪,王永威,等. 视觉测量相机温致误差的在线修正方法[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0712005

视觉测量相机温致误差的在线修正方法

张强^{1,2,3}, 胡彪^{1,3*}, 王永威⁴, 梁慧萍^{1,3}, 陈文均^{1,3}, 尹义贺^{1,3}, 刘肖琳^{1,3},
梁展宇¹, 黄洽豪¹, 于起峰^{1,3}

(1 深圳市智能光测与感知重点实验室, 深圳 518060)

(2 澳门大学科技学院, 澳门特别行政区 999078)

(3 深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

(4 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430048)

摘 要:在视觉测量系统长期运行条件下,相机自身发热以及环境温度波动会引起相机成像模型变化,进而显著降低测量系统的稳定性与精度。本文提出了一种基于双通道共视成像系统的相机温致误差在线修正方法。该方法采用紧凑的双通道光路结构,使测量点与校准点同时成像于同一图像平面;在此基础上,构建基于针孔成像模型的简化像点漂移方程,实现温致误差的在线补偿。通过搭建原型系统并开展室内动态温度实验与室外长期监测实验,对所提方法的有效性进行了验证。实验结果表明,在室内动态温度变化条件下,温致误差修正后像点漂移精度优于 0.30pixel;在室外长期监测场景中,位移修正误差优于 0.50pixel,相较于未修正前精度提升最高可达 90.2%。与传统离线标定方法不同,所提方法仅需完成系统初始标定,在共视成像结构保持不变的条件下,可直接适用于不同型号相机,无需重新构建温度—参数映射关系。所提方法适用于野外工程结构的长期、无人值守位移监测及其他对温度稳定性要求较高的视觉测量应用场景。

关键词:视觉测量;温度漂移;共视成像系统;在线修正;结构健康监测

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265507.0712005

0 引言

位移测量作为大型工程结构建设与运维的基础性、常规性任务,是实验力学^[1-2]及结构健康监测^[3-6]领域的核心研究内容。摄像测量技术凭借非接触、高精度及高时空分辨率等显著优势,近年来在结构位移监测中得到了广泛应用^[3,6-10]。随着视觉测量技术向长期在线监测、远距离观测和复杂环境适应方向发展,环境温度波动及相机自身发热所引起的成像模型漂移问题日益突出。已有研究表明^[11-13],温度变化不仅会引起主点、焦距及姿态参数的时变偏移,还可能通过镜头材料热膨胀、折射率变化及结构热变形进一步影响成像几何稳定性,进而削弱视觉测量系统在长期户外及工业场景下的测量精度与鲁棒性。然而,现有研究多假设监测期间成像模型保持恒定,这与实际工况存在明显偏差。因此,亟需研发一种能够适配复杂环境的温致误差抑制与修正方法,以确保视觉测量系统在长期户外及工业场景下的鲁棒性与测量精度。

目前,国内外相关研究可大致分为两类:基于参数建模的方法与基于数据驱动和实验统计分析的方法。在参数化模型方面,Handel H^[11]揭示了相机预热阶段的成像偏移机制,认为传感器热膨胀引起的微位移是像点漂移的主因,并提出利用双指数函数实时更新外参以校正热效应。Podbreznik P 等^[14]则假设相机内参

基金项目:国家自然科学基金(52208399),深圳市新引进高水平紧缺人才科研启动基金

第一作者:张强(1996—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为视觉测量技术。Email: yc27957@um.edu.mo

通讯作者:胡彪(1996—),男,助理教授,博士,主要研究方向为计算机视觉技术。Email: bhu@szu.edu.cn

收稿日期: 2026-02-14; **录用日期:** 2026-05-18

<http://www.photon.ac.cn>

在温度变化过程中保持恒定,仅基于外参平移分量构建修正模型,但该假设在精密测量中难以成立。Yu Qifeng等^[12]建立了“坐标漂移—相机参数—温度”的两级关联模型,指出主点偏移是像点漂移的核心贡献项。Adamczyk M等^[15]通过优化相机结构设计,建立了像点漂移与温度的多项式关系,但其特制结构限制了通用性。Daakir M等^[16]尝试利用空间相似变换对热致成像漂移进行建模,但在刻画焦距变化及图像旋转和平移等复杂热效应方面仍存在不足。Zhou Huafei等^[17]进一步研究了环境温度变化条件下摄像位移监测技术的测量性能,结果表明环境温度会导致不可忽略的位移测量误差,且误差在不同方向上具有不同的变化规律。同时,Zhou Huafei等^[18]提出基于温度诱导图像平面位移函数的补偿方法,虽然在一定程度上拓展了建模思路,但其线性映射假设限制了模型在非线性温变环境下的泛化能力。Wang Kunfeng等^[19]面向双目视觉里程计场景研究了相机自发热引起的温度漂移问题,指出相机自热会导致内参数约千分之二量级的变化,并进一步造成视觉位姿计算误差;通过引入温度畸变系数进行补偿,温度引起的视觉里程计误差可降低约80%,表明温漂补偿对长期连续视觉感知系统具有重要意义。Liu Qilin等^[20]进一步在变温环境下对相机内参数与镜头畸变参数进行了联合标定与预测,说明温度变化对相机成像参数的影响已不再局限于主点和焦距等传统参数,而是呈现出更为复杂的耦合特征。在数据驱动与实验统计分析方法方面,Zhou Huafei等^[13]通过长时程实验发现成像平面位移具有明显的方向异性:垂直方向漂移与镜头温度显著线性相关,而水平

方向漂移则在超过特定温度阈值后趋于平缓。Lin Zechun等^[21]利用回归分析方法建立了温度与相机内外参之间的映射关系,实现了对热致像点漂移的预测。进一步地,Man Yuan等^[22]提出了基于LSTM的相机成像参数温度补偿预测方法,利用温度时序数据直接预测相机主距和主点变化,其主距的预测RMSE约为1/13pixel,主点偏移预测RMSE约为1/30 pixel,说明深度学习方法能够有效刻画温度与成像参数之间的非线性映射关系。该类方法通常依赖温度信息输入,在缺乏温度传感器或环境变化复杂的情况下,其适用性仍受到一定限制。尽管上述方法在特定场景下能提升补偿精度,但由于不同硬件配置(如相机型号、镜头结构)的热响应特性方面存在显著差异,此类方法的泛化能力与自适应性能仍然受到限制。综上所述,现有方法多依赖于离线标定策略,在面对复杂且随机变化的工程环境温度场时,预设的“温度—参数”关系难以长期稳定维持,从而导致校正方法的鲁棒性不足。因此,亟需发展一种无需严苛离线预标定、能够在线感知并抑制复杂外界环境下温致误差的新方法。

针对现有方法在复杂环境下难以在线抑制温致成像漂移的问题,本文提出了一种基于双通道共视成像系统的温致误差在线修正方法。该方法利用双通道共视成像结构与多参量像点漂移模型,在无需额外温度测量设备的条件下,实现对相机投影参数扰动的在线估计与校准。通过同步获取校准平面与测量平面的图像信息,结合校准平面特征点像素漂移,反演当前温度条件下相机投影模型参数的扰动量,并据此对测量点像素坐标进行统一修正,以恢复测量平面内的真实位移。为验证所提方法的有效性,本文开展了室内温控实验与外场测试。结果表明,该方法能够有效抑制温度变化引起的成像误差,在室内场景下温致误差修正精度优于0.30 pixel,在远距离位移测量场景下修正精度优于0.50 pixel,较未修正前最高可提升90.2%,表明该方法具有较好的工程适用性与鲁棒性。

2 基本原理

2.1 测量系统

共视成像系统通过在相机前端布置光学转向元件(如分光棱镜、反射镜等),将来自不同观测视场方向的光路汇聚至同一感光面,从而实现多目标的同时成像与观测^[23-28]。本文构建了一种双通道共视成像系统,其整体光路结构与装置组成如图1所示。系统通过分光棱镜将测量通道与校准通道耦合至同一相机视场,实现不同物距目标的同时观测。其中,图1(a)为系统成像光路示意图,图1(b)为实验装置结构示意图。系统主要由分光棱镜、准直透镜及红外滤光片等组成光学耦合模块。其中,准直透镜设置于校准通道,用于对近距离校准平面的光路进行准直与重聚焦,保证在相机对远端目标成像清晰的同时,近端校准靶仍可获得良好成像。红外滤光片安装于测量通道,用于抑制环境杂散光的干扰,提高成像对比度与信噪比。由于校准通道与测量通道最终耦合至同一相机成像系统,二者共享统一的成像投影模型。因此,校准平面与测量点的在成像平面上的像点漂移可在统一模型下进行描述,从而为后续建立相机投影参数扰动与像点漂移之

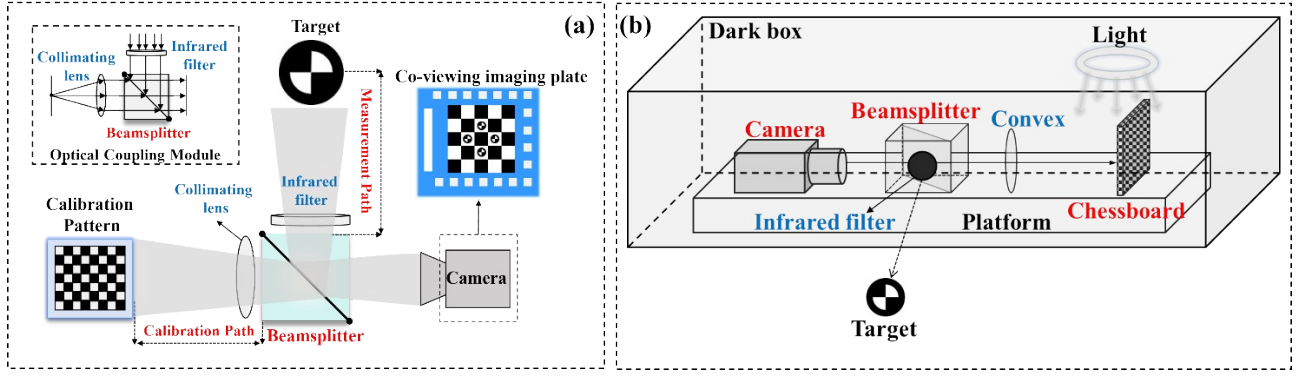


图1 共视成像结构系统光路及组成结构。(a)共视场成像光路;(b)测量系统装置示意图

Fig.1 Schematic of the common-field-of-view imaging system. (a) Principle of the imaging optical path; (b) Schematic of the measurement experimental setup

间的关系提供基础。

2.2 修正模型

为描述双通道共视成像系统在温度变化作用下的成像几何漂移,本文以平面棋盘格靶标所在平面建立世界坐标系,并取该平面为XY平面,此时靶标特征点的Z坐标恒为0。设空间点在世界坐标系中的坐标为 $P_w = [X_w, Y_w, 0]^T$,其在相机坐标系中的坐标为 $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$,对应像点齐次坐标为 $\tilde{p} = [u, v, 1]^T$,则理想投影模型可表示为:

$$Z_c \tilde{p} = K(RP_w + T) = KP_c \quad (1)$$

其中 $K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为相机内参数矩阵, R 和 T 分别为相机外参中的旋转矩阵和平移向量, Z_c 为投影比例

因子。在长期连续监测条件下,环境温度变化会诱发传感器热膨胀、光学材料折射率变化及机械结构微变形等一系列热致效应。这些效应在成像几何层面主要表现为相机投影参数随时间缓慢漂移,进而在测量结果中引入累积误差。已有研究表明^[11,14,29-30],在相机由启动至热平衡的过程中,内热源与外部环境温场的耦合作用会导致像面产生显著漂移。因此,在温度变化条件下,相机投影模型不再是静态不变的,而应视为随温度扰动缓慢变化的时变模型。为刻画温度变化对相机投影关系的影响,本文在式(1)的基础上引入温致参数小扰动项,将扰动后的投影关系表示为:

$$(Z_c + \delta Z_c)(\tilde{p} + \delta \tilde{p}) = (K + \delta K)[(R + \delta R)P_w + (T + \delta t)] \quad (2)$$

其中, $\delta \tilde{p} = [\delta u, \delta v, 0]^T$ 表示像点齐次坐标扰动, $\delta K = \begin{bmatrix} \delta f_u & 0 & \delta u_0 \\ 0 & \delta f_v & \delta v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为内参矩阵扰动, δR 为旋转矩阵扰动,

$\delta t = [\delta t_x, \delta t_y, \delta t_z]^T$ 为平移向量扰动, δZ_c 表示投影比例因子扰动。由于温度变化通常具有缓慢、连续且扰动幅值较小的特点,因此可将上述参数变化视为小扰动量^[11-12,18]。基于这一假设,对式(2)在式(1)附近进行一阶展开,并由式(2)减去式(1),可得温致扰动下像点漂移与投影参数变化之间的差分关系式:

$$Z_c \delta \tilde{p} + \delta Z_c \tilde{p} + \delta Z_c \delta \tilde{p} = K \delta R P_w + K \delta t + \delta K P_c + \delta K \delta R P_w + \delta K \delta t \quad (3)$$

其中, $\delta Z_c \delta \tilde{p}$ 、 $\delta K \delta R P_w$ 与 $\delta K \delta t$ 为二阶小量。上述二阶小量相对于一阶项可忽略不计,故后续建模中仅保留一阶近似项,从而建立像点漂移与投影参数扰动之间的线性关系为:

$$Z_c \delta \tilde{p} + \delta Z_c \tilde{p} = K(\delta R P_w + \delta t) + \delta K P_c \quad (4)$$

进一步地,在小角度条件下,旋转矩阵的微小变化量 δR 可由欧拉角微扰表示。设相机绕 x 、 y 、 z 轴的微小转角分别为 $(\delta \alpha, \delta \beta, \delta \gamma)$,则对应的旋转矩阵一阶变化量可表示为:

$$\delta R = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\gamma & \delta\beta \\ \delta\gamma & 0 & -\delta\alpha \\ -\delta\beta & \delta\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(4)左右两段按分量展开,可得:

$$Z_c \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ 0 \end{bmatrix} + \delta Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0 & -\delta\gamma & \delta\beta \\ \delta\gamma & 0 & -\delta\alpha \\ -\delta\beta & \delta\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta t_x \\ \delta t_y \\ \delta t_z \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \delta f_u & 0 & \delta u_0 \\ 0 & \delta f_v & \delta v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

也即:

$$\begin{bmatrix} Z_c \delta u + u \delta Z_c \\ Z_c \delta v + v \delta Z_c \\ \delta Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u(-\delta\gamma Y_w + \delta t_x) + u_0(-\delta\beta X_w + \delta\alpha Y_w + \delta t_z) + \delta f_u X_c + \delta u_0 Z_c \\ f_v(\delta\gamma X_w + \delta t_y) + v_0(-\delta\beta X_w + \delta\alpha Y_w + \delta t_z) + \delta f_v Y_c + \delta v_0 Z_c \\ -\delta\beta X_w + \delta\alpha Y_w + \delta t_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

并结合针孔成像关系:

$$u = u_0 + \frac{f_u X_c}{Z_c}, \quad v = v_0 + \frac{f_v Y_c}{Z_c} \quad (8)$$

将式(7)第三行代入式(7)前两行,并结合式(8)消去 δZ_c ,可得:

$$\begin{cases} \delta u = \delta u_0 + \frac{X_c}{Z_c} \delta f_u + \frac{f_u}{Z_c} (-\delta\gamma Y_w + \delta t_x) - \frac{f_u X_c}{Z_c^2} (-\delta\beta X_w + \delta\alpha Y_w + \delta t_z) \\ \delta v = \delta v_0 + \frac{Y_c}{Z_c} \delta f_v + \frac{f_v}{Z_c} (\delta\gamma X_w + \delta t_y) - \frac{f_v Y_c}{Z_c^2} (-\delta\beta X_w + \delta\alpha Y_w + \delta t_z) \end{cases} \quad (9)$$

为统一变量形式,定义像点相对于主点的横向和纵向归一化偏移量,进而将漂移方程整理为标准线性表达式,即将式(8)改写为:

$$\Delta u = u - u_0 = \frac{f_u X_c}{Z_c}, \quad \Delta v = v - v_0 = \frac{f_v Y_c}{Z_c} \quad (10)$$

则式(9)可进一步整理为:

$$\begin{cases} \delta u = \left(\delta u_0 + \frac{f_u}{Z_c} \delta t_x \right) + \Delta u \left(\frac{\delta f_u}{f_u} - \frac{\delta t_z}{Z_c} \right) - \frac{\Delta u Y_w}{Z_c} \delta\alpha + \frac{\Delta u X_w}{Z_c} \delta\beta - \frac{f_u Y_w}{Z_c} \delta\gamma \\ \delta v = \left(\delta v_0 + \frac{f_v}{Z_c} \delta t_y \right) + \Delta v \left(\frac{\delta f_v}{f_v} - \frac{\delta t_z}{Z_c} \right) - \frac{\Delta v Y_w}{Z_c} \delta\alpha + \frac{\Delta v X_w}{Z_c} \delta\beta - \frac{f_v X_w}{Z_c} \delta\gamma \end{cases} \quad (11)$$

由此可见,公式(11)中包含内参扰动 $\delta f_u, \delta f_v, \delta u_0, \delta v_0$ 、旋转扰动 $\delta\alpha, \delta\beta, \delta\gamma$ 以及平移扰动 $\delta t_x, \delta t_y, \delta t_z$,共计10个待估参数。若直接在该高维参数空间进行求解,易因参数间较强相关性而降低估计稳定性^[31]。已有研究表明,在平面靶标观测、小视场及小扰动条件下,部分参数扰动在像平面上的作用形式具有较强相似性^[12-13,18]。基于此,本文采用等效参数对强耦合项进行合并:横向与纵向平移扰动 $\delta t_x, \delta t_y$ 在像面上主要表现为整体平移效应,其作用形式分别与主点漂移 $\delta u_0, \delta v_0$ 一致,即在式(11)中可令:

$$\begin{cases} a_1 = \delta u_0 + \frac{f_u}{Z_c} \delta t_x \\ a_2 = \delta v_0 + \frac{f_v}{Z_c} \delta t_y \end{cases} \quad (12)$$

其中 a_1 和 a_2 分别表示像点坐标在 u 方向和 v 方向的整体平移。而深度方向平移扰动 δt_z 则主要体现为尺度变化,其影响形式与焦距变化 $\delta f_u, \delta f_v$ 相似,即在式(11)中可令:

$$\begin{cases} a_3 = \frac{\delta f_u}{f_u} - \frac{\delta t_z}{Z_c} \\ a_4 = \frac{\delta f_v}{f_v} - \frac{\delta t_z}{Z_c} \end{cases} \quad (13)$$

其中 a_3 和 a_4 分别表示像点坐标沿 u 方向和 v 方向的尺度变化。与此同时,旋转角度扰动仍保留为独立变量: $\delta\alpha$ 主要影响纵向坐标, $\delta\beta$ 主要影响横向坐标, $\delta\gamma$ 则主要引起像平面内横纵坐标的耦合变化。由此,可将原始 10 参数模型简化为 7 参数像点漂移模型,从而在保留主要温致变化特征的同时,提高模型求解的稳定性和工程适用性。定义等效参数向量为:

$$a_5 = \delta\alpha, \quad a_6 = \delta\beta, \quad a_7 = \delta\gamma$$

则式(11)可由如下公式表达:

$$\begin{cases} \delta u = a_1 + a_3 \Delta u + \frac{\Delta u Y_w}{f_v} a_5 - \frac{\Delta u X_w}{Z_c} a_6 - \frac{f_u Y_w}{Z_c} a_7 \\ \delta v = a_2 + a_4 \Delta v - \frac{\Delta v Y_w}{Z_c} a_5 + \frac{\Delta v X_w}{f_v} a_6 - \frac{f_v X_w}{Z_c} a_7 \end{cases} \quad (14)$$

上式即为图像上像点坐标的漂移量 δu 和 δv 与相机投影参数的变化量之间的数学关系式。式中相机 f_u, f_v, u_0, v_0 可通过事先标定得到,特征点在相机坐标系下的深度信息 Z_c 可通过式(1)得到。为提高参数估计的稳定性,通常选取分布于同一平面且空间分布尽可能均匀的特征点参与求解。对于选取的 n 个特征点,每个特征点在 u, v 两个方向各提供一个像点漂移观测值,因此可构建 $2n$ 个线性观测方程,并进一步写成如下形式:

$$\delta p = J \cdot \delta \theta \quad (15)$$

其中, $\delta \theta = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7]^T$ 为待估参数向量, δp 为像点漂移观测向量, J 为由特征点坐标决定的雅可比矩阵。当 $n \geq 4$ 时,观测方程数量多于未知参数个数,可采用最小二乘法对温致投影参数进行估计。

在获得各待估参数后,可进一步重构当前时刻温度扰动引起的像面几何变化,并据此实现对温致像点漂移的补偿。由于校准通道与测量通道在本文系统中共享主要成像链路及成像传感器,且后续实验结果表明两通道对温度变化的漂移响应具有较好一致性,因此可将由校准平面估计得到的温致扰动参数近似传递至测量点。具体而言,在完成校准平面参数估计后,将所得参数代入式(14),并结合测量点当前时刻的像素坐标,即可计算该测量点在当前温度条件下对应的温致像点漂移估计量。当前时刻由校准平面特征点估计得到的参数向量为:

$$\delta \theta(t) = [a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), a_5(t), a_6(t), a_7(t)]^T \quad (16)$$

设测量点在当前时刻的像素坐标为 $p(t) = [u(t), v(t)]^T$,则可根据其在图像坐标系下相对于主点的横向与纵向偏移量 $\Delta u, \Delta v$,将 $\delta \theta(t)$ 代入式(14),求得该测量点在当前温度条件下对应的温致像点漂移估计量:

$$\delta p(t) = [\delta u(t), \delta v(t)]^T \quad (17)$$

进而可将当前受温致扰动影响的测量点坐标修正为:

$$p'(t) = p(t) - \delta p(t) \quad (18)$$

其中, $p'(t)$ 表示去除温致漂移后的测量点坐标。在获得补偿后的测量点坐标后,再将其与初始参考时刻的测量点坐标进行差分,并结合像素-物理尺寸转换系数,即可恢复测量点在测量平面内的真实位移分量。由此,温致误差首先在像素平面内得到补偿,再进一步传递至物理位移恢复过程,从而实现对温致像面漂移误差的有效抑制。

2.3 修正流程

本文基于双通道共视场成像原理与摄像测量方法,设计了一种能够在线修正温致像点漂移误差的测量流程。如图2所示,该系统的运行流程有以下关键环节:

1) 系统组装与光路调校。如图1所示,系统通过光学耦合模块实现双通道共视成像,其中透射光路用于监测校准平面特征点(校准通道),反射光路用于观测待测结构目标(测量通道)。为保证物距差异显著的校准平面和测量点能同步清晰成像,在校准通道中引入准直透镜对近距离校准平面的光路进行重聚焦。当相机镜头聚焦于远端测量目标时,可依据组合透镜成像原理^[32]调节校准平面与准直透镜间的相对位置,使近端校准靶标在图像传感器平面上实现精准对焦。在测量通道中配置红外滤光片,有效抑制户外环境下的自

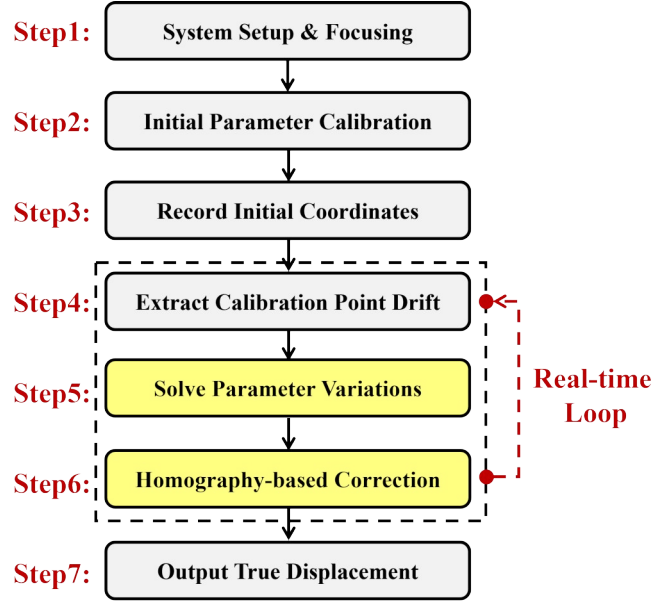


图2 温致误差在线修正流程图

Fig.2 Flowchart of the proposed online thermal error correction algorithm

然光干扰与杂散光影响。系统的相机、分光棱镜、准直透镜、滤光片及校准靶标等核心光学组件均统一集成于刚性测量平台,并封装于防护暗箱内,以提升系统的环境适应性与结构稳定性。

2)初始参数基准标定。在系统运行前,需获取相机在初始热平衡状态下的内、外参基准值,为后续温致误差建模与在线修正提供参考。系统装调完成后,利用平面棋盘格标定板获取相机初始时刻的内参矩阵 K_0 以及相机相对校准平面的初始外参旋转矩阵 R_0 。此外,还需建立像素坐标与实际物理尺寸之间的尺度转换关系,以实现像素位移向真实位移的定量映射。在测量场景中放置一块近似平行于图像平面的平面标定板来辅助比例系数的确定,设测量场景中已知几何尺度的参考靶标真实间距为 L ,其在图像中的像素间距为 l_{pixel} ,则测量平面的尺度转换系数 s 可表示为:

$$s = \frac{L}{l_{pixel}} (mm/pixel) \quad (19)$$

为减小像素测量噪声对尺度转换系数估计的影响,可在测量区域内拍摄多组参考靶标进行重复标定,并取其平均值作为最终结果。

3)在线自标定模型解算。在完成初始参数基准标定后,系统首先在线提取校准平面特征点在当前时刻相对于初始参考时刻的像点漂移量,并据此构建温致扰动参数的线性观测模型。将全部特征点观测方程堆叠后,可得式(15)所示的观测模型,观测向量定义为式(16)。对应的雅可比矩阵 $J \in \mathbb{R}^{2N \times 7}$ 其具体表达式为:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta u_1 & 0 & \frac{\Delta u_1 Y_{w,1}}{f_v} & -\frac{\Delta u_1 X_{w,1}}{Z_c} & -\frac{f_u Y_{w,1}}{Z_c} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta v_1 & -\frac{\Delta v_1 Y_{w,1}}{Z_c} & \frac{\Delta v_1 X_{w,1}}{f_u} & -\frac{f_v X_{w,1}}{Z_c} \\ 1 & 0 & \Delta u_2 & 0 & \frac{\Delta u_2 Y_{w,2}}{f_v} & -\frac{\Delta u_2 X_{w,2}}{Z_c} & -\frac{f_u Y_{w,2}}{Z_c} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta v_2 & -\frac{\Delta v_2 Y_{w,2}}{Z_c} & \frac{\Delta v_2 X_{w,2}}{f_u} & -\frac{f_v X_{w,2}}{Z_c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \Delta u_n & 0 & \frac{\Delta u_n Y_{w,n}}{f_v} & -\frac{\Delta u_n X_{w,n}}{Z_c} & -\frac{f_u Y_{w,n}}{Z_c} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta v_n & -\frac{\Delta v_n Y_{w,n}}{Z_c} & \frac{\Delta v_n X_{w,n}}{f_u} & -\frac{f_v X_{w,n}}{Z_c} \end{bmatrix} \quad (20)$$

当选取的特征点数量满足观测方程数大于未知参数时,可采用最小二乘法对当前时刻的温致扰动参数进行求解,即:

$$\delta\theta = (J^T J)^{-1} J^T \delta p \quad (21)$$

从而获得相机投影模型参数随温度变化所引起的扰动量。本文采用棋盘格角点作为校准特征点,角点数量远大于模型求解所需的最小点数,且特征点在平面内呈二维均匀分布,能够为七参数模型提供充分约束。基于上述条件,本文模型在实验中具有良好的可解性与数值稳定性。

4)修正计算。在获得当前时刻的温致扰动参数后,将其代入式(14),并结合测量点当前时刻的像素坐标,可计算该测量点在当前温度条件下对应的温致像点漂移量,进而将受温致扰动影响的测量点坐标修正为参考状态下的像面坐标。随后,将修正后的测量点坐标与初始参考时刻的测量点坐标进行差分,并结合尺度转换系数 s ,即可恢复测量点在测量平面内的二维真实位移分量:

$$p_{\text{displacement}} = s \cdot (p'(t) - p_{\text{initial}}) \quad (22)$$

上述过程完全在像素平面内完成,无需测量点的三维空间坐标信息,即可实现温致误差补偿与测量点相对相机成像平面的二维面内位移测量。第三节将通过室内与室外实验对所提方法进行验证。

3 结果与讨论

3.1 室内验证

本文利用图3所示的实验装置开展室内验证实验。在相同温度变化条件下,本文首先评估了校准光路与测量光路热漂移响应的一致性。图4给出了两种光路配置下,校准通道与测量通道在成像平面 u, v 方向平均像素漂移差值相对于零漂移参考状态的统计结果,评价指标包括平均误差(Mean Error, ME)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。结果表明,无论是仅加入分光棱镜,还是同时加入分光棱镜和准直透镜,两通道之间的平均漂移差值均保持在较小范围内。尽管准直透镜的引入使校准光路与测量光路在光学结构上并不完全相同,但实验结果说明该差异并未显著破坏两通道热漂移响应的一致性。因此,在本文实验条件下,基于校准通道建立的热致参数变化模型仍可有效用于测量通道的参数补偿。

之后采用两组棋盘格分别模拟校准平面靶标(反射光路)与待测目标(透射光路),在室内实验中由于两个光路成像距离可以保持近似一致且环境光可控,因此并未添加准直透镜和滤光片。两路成像光路经分光棱镜合束后,在相机图像传感器平面上同时成像,如图3(c)所示。为精确感知环境温度变化,在相机上方布置温度传感器,对相机本体及其周边环境温度进行在线监测。实验过程中,整套装置完全密封于温控箱内,以保证各光学组件受热均匀。通过调节温控箱,使环境温度在15℃至50℃的预设区间内进行三组往复循环,每组循环历时约180 min,用以模拟实际工况下相机因自身发热与环境温变共同作用所引发的动态漂移特性。温度传感器的实时记录曲线如图5(c)所示。实验中选用分辨率为3072×2048pixel、像素尺寸为

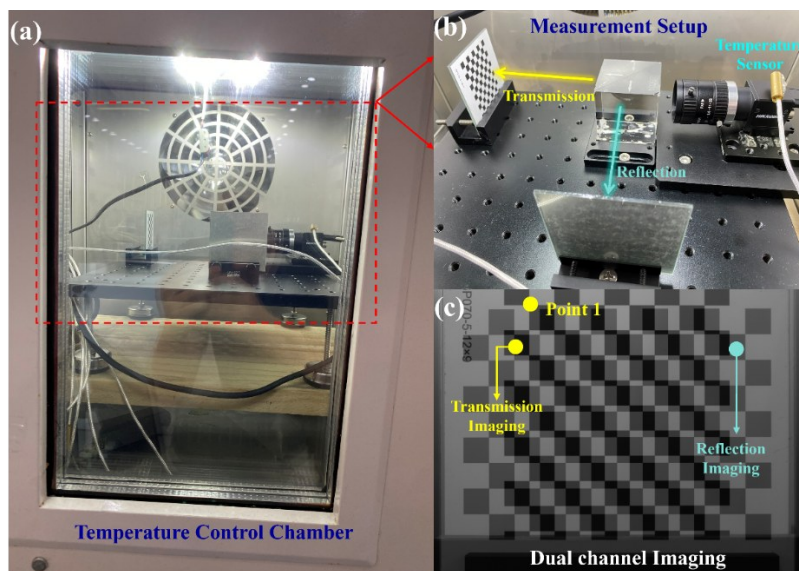


图3 室内实验测量装置示意图。(a)实验装置;(b)双通道成像系统;(c)相机成像示意图

Fig.3 Schematic diagram of the indoor experimental measurement setup. (a) Experimental setup; (b) Dual-channel imaging system; (c) Schematic of camera imaging

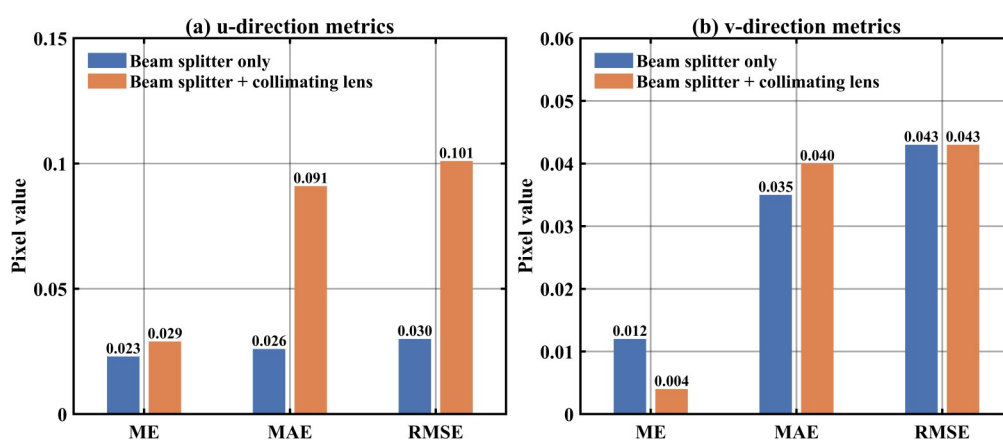


图4 相同温度变化条件下双通道成像系统校准通道与测量通道平均漂移差值的误差统计。(a) u 方向;(b) v 方向。统计指标为ME、MAE和RMSE

Fig.4 Error statistics of the average drift difference between the calibration and measurement channels under identical temperature variations; (a) u direction; (b) v direction. Metrics include ME, MAE, and RMSE

2.4 μm 的工业相机(型号: MV-CE060-10UM),接口类型为C-Mount,相机焦距为16mm。由于温致扰动通常表现为缓慢变化过程,因此,系统以10 s为时间间隔同步采集图像,并采用模板匹配与亚像素定位方法^[6-7]提取视场内校准点及待测目标的像素坐标,通过在线获取校准平面特征点的像素位移,并结合式(20)与式(21),从而求解相机投影模型参数随温度变化的扰动矢量,各参数的温致变化规律如图5和图6所示。

由图可见,在温度升降循环过程中,环境温度呈现稳定的周期性波动,相机主点(u_0, v_0)和等效焦距(f_u, f_v)随温度变化出现明显的周期性漂移,表明相机内参在温度扰动下发生了可重复的时变偏移。该现象主要源于温度变化引起的相机成像靶面发生热致平移及热胀冷缩;与此同时,镜头材料折射率的温度敏感性会进一步引发等效焦距随温度变化。图6所示的三个角度偏差表征了镜头光轴相对于相机机身或传感器像面坐标系的微小姿态变化,其主要原因在于温度循环过程中镜头与传感器之间的相对倾斜改变了相机的实际成像几何关系。基于上述温致参数扰动量,对测量平面1号测量点(见图3(c))进行校准,校准前后的像点漂移对比结果如图7所示。其中,红色曲线表示原始像素漂移轨迹,可见其受温度波动影响显著;蓝色曲线表示经本文双通道在线修正方法补偿后的结果。对比结果表明,该方法能够有效抑制温致几何畸变,修正后像点坐标在水平方向与竖直方向上的波动均小于0.3 pixel,显著改善了视觉测量系统在温度快速变化

环境下的坐标定位稳定性。

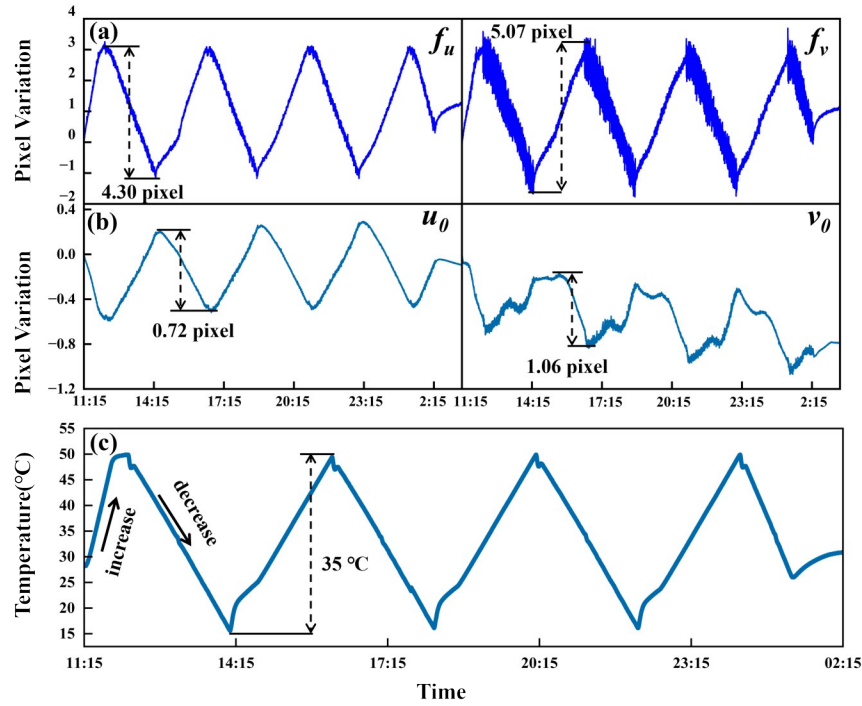


图5 室内实验中相机内参随温度变化曲线图。(a)等效焦距变化曲线;(b)主点变化曲线;(c)温控箱温度变化曲线

Fig5 Variation of camera intrinsic and extrinsic parameters with temperature in indoor experiments. (a) Changes in equivalent focal length; (b) Changes in principal point; (c) Temperature fluctuation in the temperature-controlled chamber

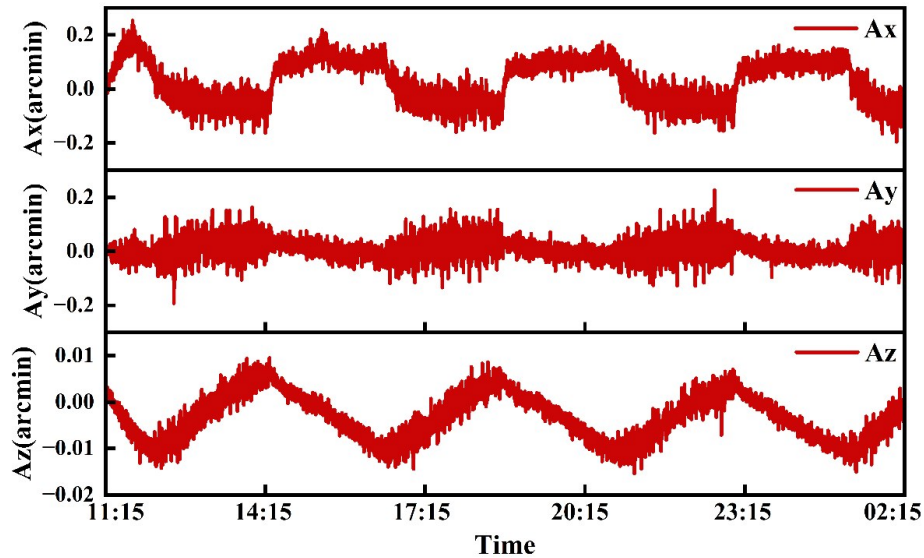


图6 室内实验中相机光轴旋转角随温度变化曲线图

Fig6 Variation of camera extrinsic parameters with temperature in indoor experiments

图8给出了修正前后残余像点漂移的空间分布结果。由图8(a)可见,修正前测量棋盘格平面在全视场范围内残余漂移具有明显的空间相关性和方向一致性,表明温度变化引起的成像误差主要表现为作用于整个像面的系统性几何漂移,而非局部随机噪声,其平均残余误差RMSE为0.704 pixel。相比之下,图8(b)表明经本文方法修正后,测量棋盘格平面在全视场范围内漂移矢量幅值显著减小,空间相关误差得到有效抑制,平均残余误差RMSE降低至0.085 pixel,降幅约为87.9%。同时,图像边缘区域未出现明显误差放大现象,说明所提方法在当前视场范围内具有较好的整体适用性。上述结果进一步表明,本文方法能够有效削

弱温度变化引起的系统性像面几何漂移,提高视觉测量系统在全视场范围内的坐标定位稳定性。为定量评估温致误差在线修正效果,本文选取像点均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、最大误差(Peak)以及两个像轴方向的均方根误差(RMSE_u、RMSE_v)作为评价指标,对全像面、全时间序列内的像点漂移进行统计分析,如图9所示。其中,RMSE、MAE与Peak基于像点在像素平面内的径向漂移

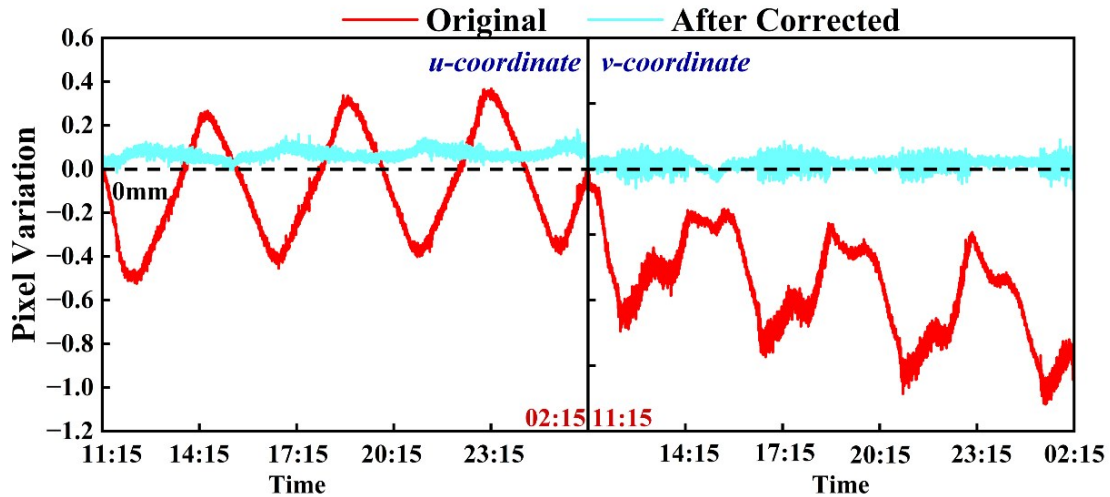


图7 测量平面1号测点像点漂移曲线修正前后对比

Fig7 Image Point Drift Correction Comparison for Measurement Point 1

幅值进行统计,用以表征整体误差水平及极端误差特性;RMSE_u与RMSE_v分别反映水平方向和垂直方向的残余误差,用于分析温致误差在不同图像坐标方向上的分布特征。结果表明,经过温致误差修正后,RMSE与MAE均显著降低,修正比例分别为87.9%和89.2%,说明像点在整体意义下的平均漂移得到有效抑制。与此同时,峰值误差明显减小,表明所提出方法在温度变化剧烈或热梯度较大的工况下,能够有效抑制像点漂移。从方向性误差角度分析,修正前RMSE_u与RMSE_v存在一定差异,反映了温度扰动对相机成像几何关系在不同像轴方向上的非均匀影响;而修正后两者幅值趋于一致且显著降低,表明温致内外参数扰动在两个方向上均得到了有效补偿。综上分析可知,所提出的在线修正方法不仅在平均意义下显著提升了测量精度,同时有效抑制了极端温致误差。此外,本实验对系统施加了连续三轮热循环,在每轮约为180 min的循环周期内,环境温差跨度高达35℃,有效模拟了非稳态热工况条件。实验结果表明,即便在温度剧烈波动的环境下,所提在线修正方法仍能将全局像点漂移的补偿效率稳定控制在87%以上,充分验证了该算法在非热平衡条件下的在线响应能力,以及对复杂温致漂移扰动的高鲁棒性补偿性能。

3.2 室外验证

为了进一步验证该方法在实际环境中的适应性和稳定性,将系统放置于户外环境条件下进行验证。图10展示了在室外环境下的实验装置,其中5个红外主动发光标志点放置于距离相机测量系统视线方向约27米至28.5米的位置;相机测量系统如图10(b)和图10(c)所示,整个双通道测量系统被安置于黑色光学暗箱内,确保系统受热均匀且充分;温度传感器的两个探头分别置于暗箱内外,用于实时监测系统内外温度变化。为了保证测量系统整体的成像对比度,在暗箱内部放置LED补光灯,以增强校准平面标志点成像质量;测点固定于磁吸底座,并放置在光学面包板上。相机分辨率为1440×1080,镜头焦距为25mm。由于温致扰动通常表现为缓慢变化过程,因此测量系统每10s在线更新一次参数。测量系统中测点实际布置图以及实际成像图分别如图10(d)和(e)所示。

实验于07:00至次日09:30期间开展。在此过程中,相机周围环境温度的变化曲线如图11(b)所示。图11(a)分别给出了测点1在温致误差修正前后的位移变化对比结果。对比可见,经本文方法修正后,由环境温度变化引起的误差位移显著减小,且X、Y两个方向上的位移修正误差均控制在2 mm以内。为进一步验证所提方法在室外位移测量场景中的适用性与准确性,将测点3安装于二维位移台上,并施加已知的位移变化作为真值输入。所用位移台的定位精度为0.1mm,每次步进量为1mm。图12给出了测点3在X方向与Y

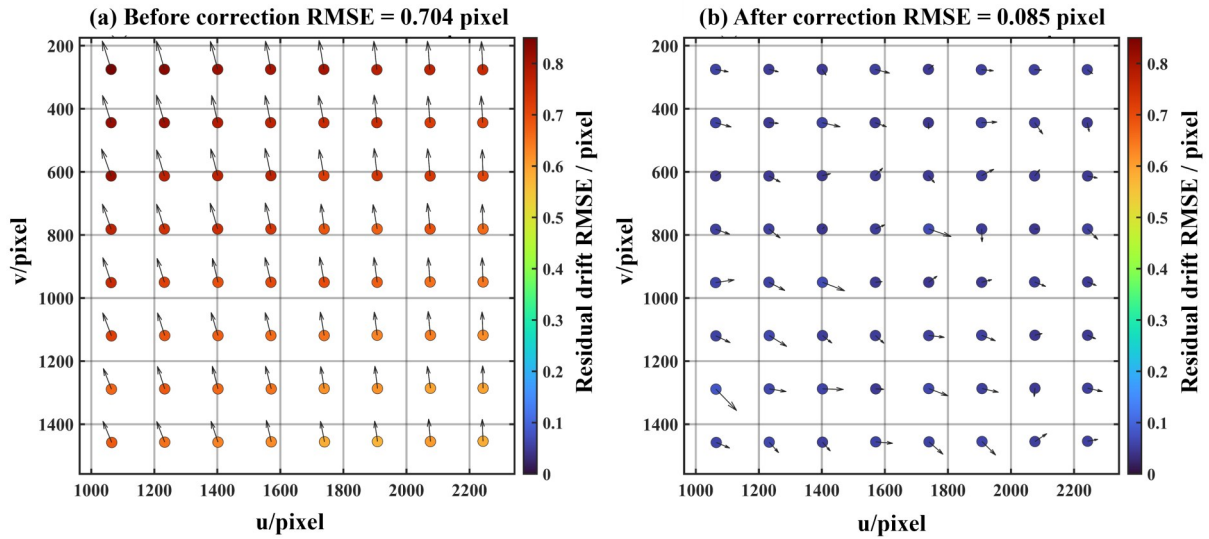


图8 测量平面全视场范围内修正前后残余像点漂移的空间分布。(a)修正前残余漂移分布;(b)修正后残余漂移分布

Fig8 Spatial distribution of residual image-point drift over the full field of view before and after correction.

(a) Residual distribution before calibration;(b) Residual drift distribution after calibration

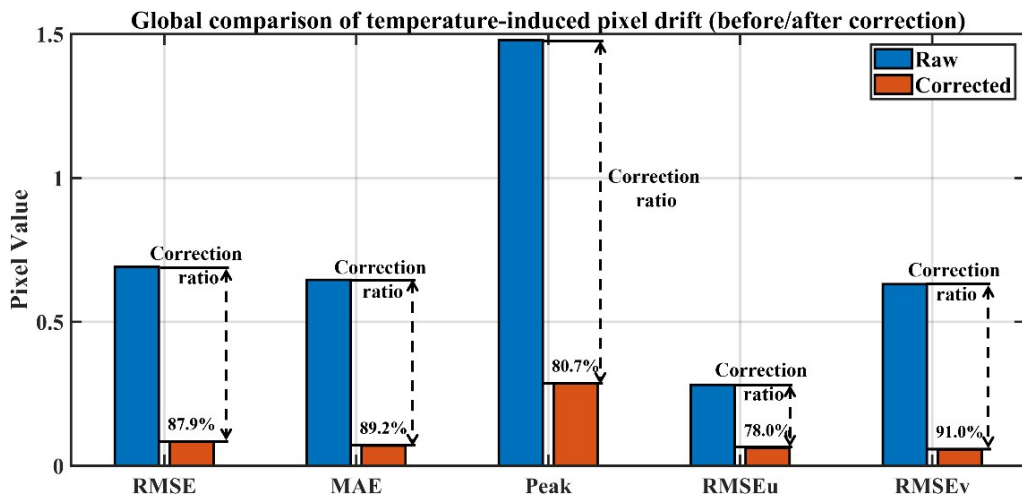


图9 全局温致像点漂移修正前后统计对比分析

Fig9 Comparison of Global Thermal Image Drift Before and After Correction

方向上的位移变化曲线对比,其中蓝色曲线表示未进行温致误差修正的测量结果,红色曲线表示采用本文方法修正后的结果,图中绿色值表示该时间段内的位移均值。由图13中的对比分析结果表明,本文提出的温致误差在线修正方法能够有效抑制温度变化引起的像点漂移,从而显著提升位移测量精度。在X方向,修正前后的最大位移误差分别为1.01mm和0.42mm,最大误差降低约73.2%;在Y方向,修正前后的最大位移误差分别为5.42mm和0.78mm,最大误差降低约90.2%。此外,从图11(b)所示的室外温度变化曲线可以看出,在07:00至13:00时段内,测量系统经历了较为剧烈的温度波动。在此非稳态环境条件下,所提方法仍能够保持良好的修正效果,体现出较强的环境适应性与鲁棒性。综上所述,实验结果充分表明,本文提出的温致误差修正方法能够有效削弱环境温度变化对视觉测量结果的影响,显著提升系统在复杂室外环境下的测量稳定性与精度。

4 结论

本文针对视觉测量系统在复杂温度环境下易产生热致成像漂移的问题,提出了一种基于双通道共视成像结构的相机温致误差在线修正方法,该方法无需外部温度传感器及离线温度—参数映射标定,通过校准

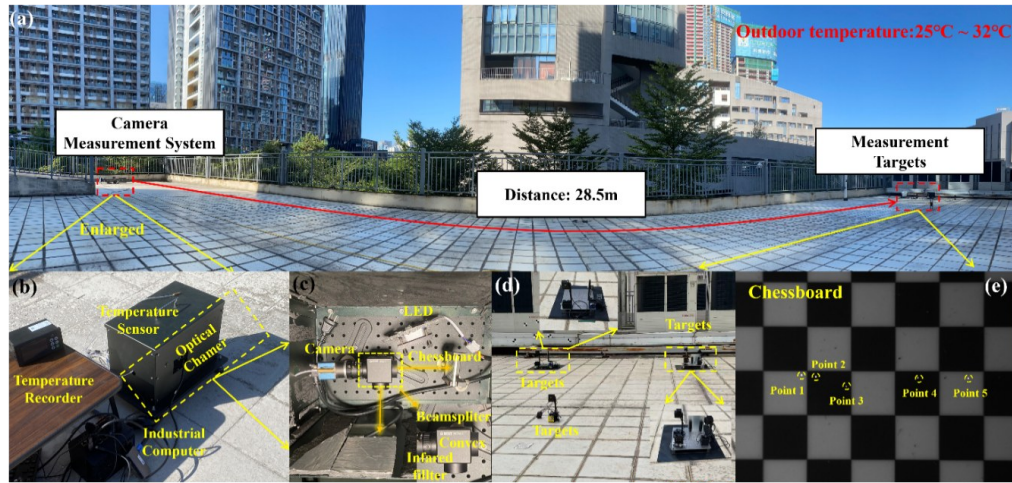


图10 室外实验测量装置示意图。(a)测量系统;(b)和(c)室外相机测量装置;(d)和(e)分别为测点实际分布图以及在成像平面分布图

Fig10 Schematic of the outdoor experimental measurement setup. (a) Overview of the measurement system; (b) and (c) Outdoor camera measurement setup; (d) and (e) show the actual distribution of measuring points and their distribution on the imaging plane, respectively.

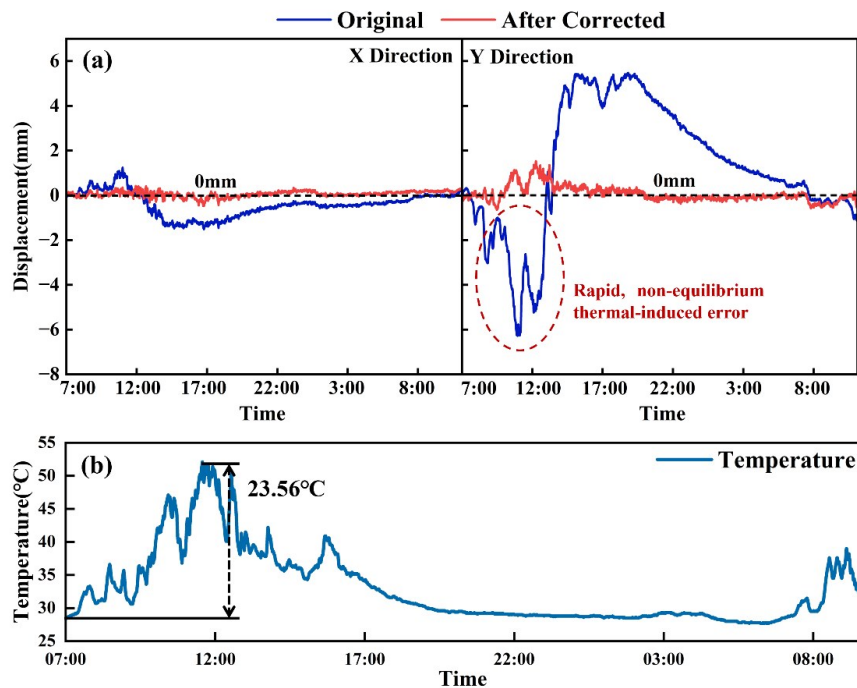


图11 室外实验位移修正前后对比。(a)X与Y方向位移修正前后对比;(b)室外温度变化曲线

Fig11 Comparison of displacement before and after correction in the outdoor experiment. (a) Comparison of displacement in the X and Y direction before and after correction; (b) Outdoor temperature variation curve

平面特征点像素漂移在线估计相机投影参数扰动,并在像素平面内实现对测量点坐标的逐点修正。主要结论如下:

(1)构建了双通道共视成像结构下的温致误差在线修正框架。通过将校准平面与测量平面耦合至同一成像链路,实现了温致扰动的统一感知;在此基础上,结合针孔成像模型线性化分析与参数耦合简化,建立了七参数像点漂移模型,可用于相机投影模型参数温致扰动的稳健估计与测量点像素坐标修正。

(2)室内动态温控实验表明,相机投影模型参数在温度循环过程中均呈现可重复的时变偏移,说明温致误差具有明显的系统性与可建模性。利用校准平面估计得到的参数对测量点进行修正后,单点像点漂移波动显著减小;全视场范围内残余漂移的空间相关误差模式得到有效抑制,平均残余误差 RMSE 由 0.704 pixel

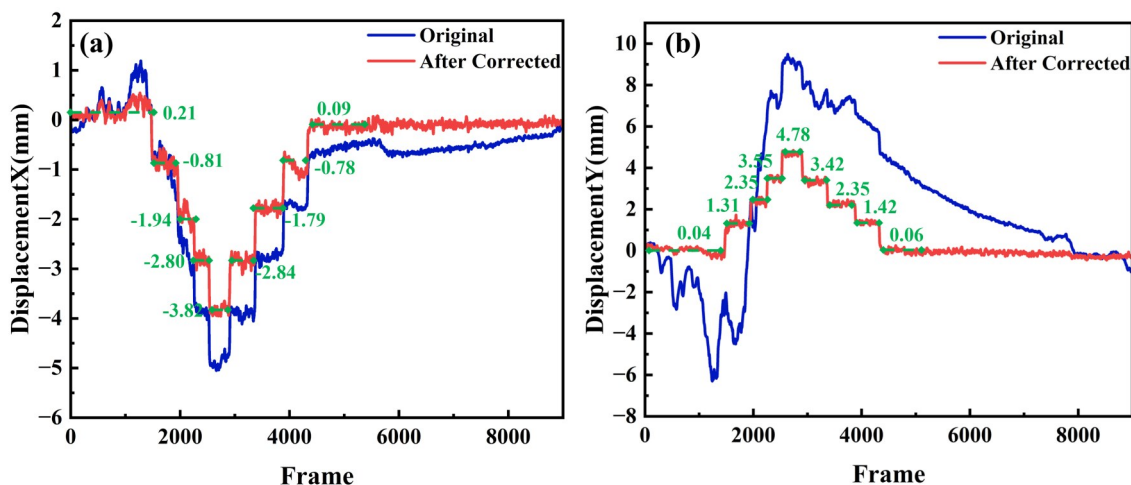


图12 室外位移测量实验修正前后像点漂移曲线。(a)X方向对比;(b)Y方向对比

Fig12 Image-point drift curves before and after correction in the outdoor displacement measurement experiment. (a) Comparison in the X direction; (b) Comparison in the Y direction

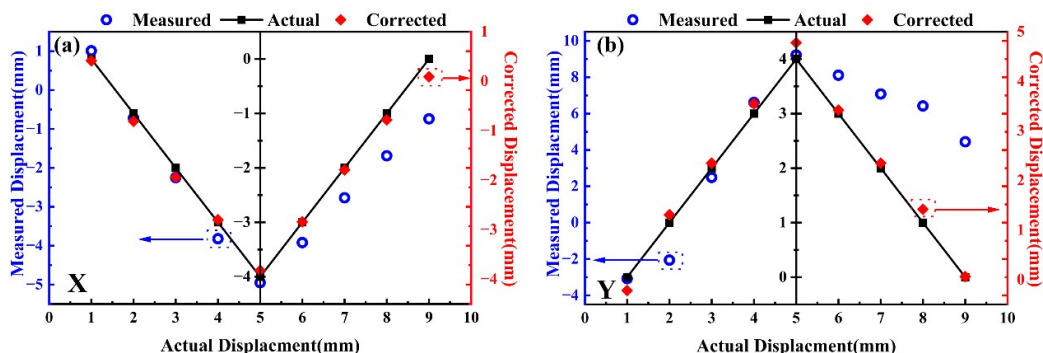


图13 室外测量修正前后位移值对比图。(a)X方向对比;(b)Y方向对比

Fig13 Comparison of displacement measurement before and after correction in the outdoor experiment. (a) Comparison in the X direction; (b) Comparison in the Y direction

降至0.085 pixel,室内温致误差修正精度优于0.30 pixel。

(3)室外长期监测实验结果表明,所提方法在远距离、非稳态温度环境下仍具有良好的适用性。对静态测点,温度变化引起的误差位移得到显著抑制;对二维位移台控制位移输入,修正后位移误差优于0.50 pixel,最大误差降低幅度可达90.2%。结果表明,所提方法能够有效提高视觉测量系统在复杂环境下的稳定性、鲁棒性和工程应用能力。

此外,与传统多温度点离线标定方法相比,本文方法仅需完成系统初始标定,在共视成像结构保持不变的条件下,可直接适用于不同型号相机,无需重新建立温度—参数映射关系。综上,本文提出的方法为复杂环境条件下长期、无人值守的视觉位移监测提供了一种可行的温致误差在线修正思路,在结构健康监测及其他温度敏感型视觉测量场景中具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] Reu Phillip L, Rohe Daniel P and Jacobs Laura D. Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 2-16.
 - [2] K.V Santhosh and Roy B. K. Online implementation of an adaptive calibration technique for displacement measurement using LVDT[J]. Applied Soft Computing, 2017, 53: 19-26.
 - [3] Yu Q, Zhang Q, Chen W, et al. Videometrics Methods and Applications of Static and Dynamic Deformation of Large-Scale Structures[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2024, 61(1): 0112001.
- 于起峰,张强,陈文均,尹义贺,陈铭杰,雷雨,刘立豪,刘肖琳,张跃强,胡彪,丁晓华.大型工程结构静态变形图像测量方法与应用(特邀)[J].激光与光电子学进展,2024,61(1):0112001.

- [4] Lee Y., Lee G., Moon D. S., et al. Vision-based displacement measurement using a camera mounted on a structure with stationary background targets outside the structure[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(11): e3095.
- [5] Yin Y., Yu Q., Hu B., et al. A vision monitoring system for multipoint deflection of large-span bridge based on camera networking[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023, 38(13): 1879-1891.
- [6] Chen Wenjun, Yin Yihe, Hu Biao, et al. Multipoint dynamic displacement monitoring of long-span beam bridges and their time-space evolution using a camera-chain system[J]. *Computers in Industry*, 2025, 168: 104271.
- [7] Hu B, Chen W, Zhang Y, et al. Vision-based multi-point real-time monitoring of dynamic displacement of large-span cable-stayed bridges[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 204: 110790.
- [8] Yin Yihe, Liu Xiaolin, Hu Biao, et al. A displacement measurement methodology for deformation monitoring of long-span arch bridges during construction based on scalable multi-camera system[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2025, 40(13): 1871-1885.
- [9] Jian Zhang, HuBiao, ChenWenjun, et al. Gravity-Balanced Visual Self-Calibration Method for Structural Settlement Monitoring[J]. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2025, 46(2): 0212002.
张健, 胡彪, 陈文均, 尹义贺, 刘肖琳, 王永威, 于起峰. 基于重力平衡的结构沉降视觉自校准测量方法[J]. *光学学报*, 2026, 46(2): 0212002.
- [10] Zhang Y, Chen M, Hu B, et al. Transmission Mechanism and Suppression Methods of Measurement Error Based on Camera Networking[J]. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2023, 43(21): 2112002.
张跃强, 陈铭杰, 胡彪, 陈文均, 尹义贺, 于起峰, 刘肖琳. 基于相机组网的测量误差传递机理及抑制方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(21): 2112002.
- [11] Handel H. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition[J]. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, 2009, 1: 12-20.
- [12] Yu Qifeng, Chao Zhichao, Jiang Guangwen, et al. The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method[J]. *Image and Vision Computing*, 2014, 32(12): 1021-1029.
- [13] Zhou HF, Zheng JF, Xie ZL, et al. Temperature effects on vision measurement system in long-term continuous monitoring of displacement[J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 968-983.
- [14] Podbreznik Peter and Potočník Božidar. Assessing the influence of temperature variations on the geometrical properties of a low-cost calibrated camera system by using computer vision procedures[J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 23(5): 953-966.
- [15] MarcinAdamczyk, Liberadzki Paweł and Sitnik Robert. Temperature Compensation Method for Digital Cameras in 2D and 3D Measurement Applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3685.
- [16] Daakir M, Zhou Y, Pierrot Deseilligny M, et al. Improvement of photogrammetric accuracy by modeling and correcting the thermal effect on camera calibration[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 148: 142-155.
- [17] Zhou H. F., Lu L. J., Li Z. Y., et al. Performance of videogrammetric displacement monitoring technique under varying ambient temperature[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(16): 3371-3384.
- [18] Zhou Hua-Fei, Li Zhao-Yi, Lu Lin-Jun, et al. Mitigating thermal-induced image drift for videogrammetric technique in support of structural monitoring applications[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 29(2): e2869.
- [19] Wang K., Zhao K., Lu W., et al. Temperature Drift and Compensation in Stereo Visual Odometry[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(23): 39744-39750.
- [20] Liu Q., Dong M., Sun P., et al. A calibration and prediction method of the camera imaging parameters in variable temperature environment[J]. *Optics Communications*, 2024, 560: 130428.
- [21] Lin Z, Liang H, Liu L, et al. Modeling and Compensation Method of Camera Temperature Drift Effect[J]. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2024, 44(23): 2312002.
林泽纯, 梁慧萍, 刘立豪, 王宝琼, 张逸, 张跃强, 刘肖琳, 于起峰. 相机温度漂移效应建模及补偿方法[J]. *光学学报*, 2024, 44(23): 2312002.
- [22] Man Y., Wang J., Yan B., et al. Temperature compensation prediction of camera imaging parameters based on LSTM [C]//*Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2025, 2025, 13720.
- [23] KatiaGenovese, LucianaCasaletto, Rayas JA, et al. Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 278-285.
- [24] KosukeTakahashi, Nobuhara Shohei and Matsuyama Takashi. Mirror-based camera pose estimation using an orthogonality constraint[J]. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, 2016, 8: 11-19.
- [25] Deng Zhaojun, Li Anhu and Liu Xingsheng. Equivalent virtual cameras to estimate a six-degree-of-freedom pose in restricted-space scenarios[J]. *Measurement*, 2021, 184: 109903.
- [26] Xing Lei, Dai Wujiao and Zhang Yunsheng. Improving displacement measurement accuracy by compensating for camera motion and thermal effect on camera sensor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 167: 108525.
- [27] Deng Zhaojun and Li Anhu. A large depth-of-field virtual measurement network for non-cooperative 6DOF pose estimation

- tion in occlusion scenes[J]. *Measurement*, 2023, 218: 113111.
- [28] Chen Yutian, Guo Shi, Yu Fangzheng, et al. Event-Based Motion Magnification[C]//European Conference on Computer Vision, 2024, Springer, 2024, 428-444.
- [29] Ricolfe-Viala Carlos and Sánchez-Salmerón Antonio-José. Using the camera pin-hole model restrictions to calibrate the lens distortion model[J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, 43: 996-1005.
- [30] Ma Shaopeng, Pang Jiazhi and Ma Qinwei. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(2): 025403.
- [31] Finsterle Stefan and Kowalsky Michael B. A truncated Levenberg - Marquardt algorithm for the calibration of highly parameterized nonlinear models[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(6): 731-738.
- [32] .. [B]. .

A Method for Correcting Temperature-Induced Errors in Vision-Based Measurement Systems

Zhang Qiang^{1,2,3}, Hu Biao^{1,3*}, Wang Yongwei⁴, Liang Huiping^{1,3}, Chen Wenjun^{1,3}, Yin Yihe^{1,3},
Liu Xiaolin^{1,3}, Liang Zhanyu¹, Huang Qiahao¹, Yu Qifeng^{1,3}

(1 *Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China*)

(2 *Faculty of Science and Technology, University of Macau, Avenida da Universidade, Taipa, Macau SAR, China*)

(3 *College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(4 *China Communications Second Harbor Engineering Co., LTD, Wuhan 430048, China*)

Abstract: Temperature variation in long-term vision-based measurement systems can cause time-varying drift of camera projection parameters, leading to image-point instability and degradation of measurement accuracy. To address this problem, an online correction method for temperature-induced errors is proposed based on a dual-channel co-view imaging system. The method is designed to suppress thermally induced image-point drift without relying on external temperature sensors or pre-established temperature-parameter mapping databases. A compact dual-channel co-view imaging system is constructed by optically coupling a calibration plane and a measurement plane onto the same image sensor through a beam-splitting module. Since the two channels share the same imaging lens, sensor, and principal optical path, temperature-induced perturbations can be treated as highly correlated within a unified imaging model. Based on the pinhole projection model, a simplified image-point drift model is established by introducing small perturbations to the intrinsic and extrinsic parameters. Through parameter coupling analysis, the original model is reduced to a seven-parameter linear form, which is solved online by least squares using the pixel drift of multiple calibration feature points. The estimated parameter vector is then directly substituted into the image-point drift model to calculate the thermally induced drift of measurement points, enabling point-wise correction of distorted image coordinates and recovery of in-plane displacement on the measurement plane. The effectiveness of the proposed method is validated through controlled indoor thermal cycling experiments and outdoor long-term monitoring tests. Indoor experiments simulate dynamic temperature variations within a temperature-controlled chamber, while outdoor experiments evaluate system robustness under real environmental fluctuations and known displacement inputs. Indoor experiments demonstrate that camera intrinsic parameters, including principal point and equivalent focal length, exhibit repeatable periodic drift under temperature cycling. After applying the proposed online correction strategy, residual image-point fluctuations in both horizontal and vertical directions are reduced to less than 0.2 pixels, and the overall drift accuracy is better than 0.30 pixels. Statistical evaluation using RMSE, MAE, and peak error indicators shows that global image-point drift is reduced by more than 87%, with consistent suppression across both image axes. In outdoor long-duration experiments, the system maintains stable performance under significant ambient temperature variations. For static measurement points, displacement drift induced by temperature changes is effectively suppressed, with corrected errors controlled within 2 mm. For controlled displacement tests using a precision translation

stage, the maximum displacement error is reduced from 1.01 mm to 0.42 mm in the X direction and from 5.42 mm to 0.78 mm in the Y direction, corresponding to a maximum improvement of 90.2%. These results confirm that the proposed approach remains effective under non-steady thermal conditions. The proposed dual-channel co-view online correction strategy enables real-time estimation and compensation of thermally induced projection parameter drift without external temperature sensing or offline recalibration, significantly enhancing the stability, robustness, and engineering applicability of long-term vision-based displacement monitoring systems under complex thermal environments.

Key words: vision-based measurement; thermal drift; co-viewing imaging system; online correction; structural health monitoring

OCIS Codes: 120.0120; 120.4820; 120.4640

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0712005