

基于固定靶标阵列的双目立体视觉温湿度耦合场误差校正方法

赵洪伟 尹伟 王刚

Error correction method for binocular stereo vision in temperature-humidity coupling field based on fixed target array

ZHAO Hong-wei, YIN Wei, WANG Gang

引用本文:

赵洪伟, 尹伟, 王刚. 基于固定靶标阵列的双目立体视觉温湿度耦合场误差校正方法[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0117

ZHAO Hong-wei, YIN Wei, WANG Gang. Error correction method for binocular stereo vision in temperature-humidity coupling field based on fixed target array[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0117

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0117>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深度相机的测量误差建模及校正

Modeling and correction of measurement errors based on depth cameras

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 271 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0047>

基于插值超分辨率的双目三维重建方法

Binocular 3D reconstruction method based on interpolation super-resolution

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 862 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0214>

基于双自由度转台的全向空间单目视觉室内定位测量方法

Omnidirectional spatial monocular vision indoor localization measurement based on a two-degree-of-freedom rotary platform

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 605 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0106>

基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正

Error correction of complex texture objects based on bidirectional fringe projection point cloud matching

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1086 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0040>

拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展

Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using raman lidar

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 243 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0145>

条纹投影非线性误差主动编码最优估计校正方法

Nonlinear error active coding optimal estimation correction method for fringe projection

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1365 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0167>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

基于固定靶标阵列的双目立体视觉温湿度耦合场误差校正方法

赵洪伟, 尹 伟, 王 刚

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对飞机结构气候强度试验宽温湿度耦合环境中, 铝合金相机支架温变形引发双目相机外参漂移以及现有自校正方法难以适配高低温-高低湿耦合工况的问题, 本文提出基于高刚度地坪固定靶标阵列的双目视觉实时误差校正方法, 构建含热膨胀、湿膨胀及交叉耦合项的位姿偏移数学模型, 推导温湿度扰动下外参误差传递方程, 增设辅助校正相机观测固定靶标, 采用 EPnP 算法解算支架位姿偏移, 动态补偿双目系统外参。并通过仿真及 9 组环境箱实验开展验证, 以光栅尺(精度为 $0.5\ \mu\text{m}$)作为参考基准, 实验覆盖低温、高温、全温域综合循环工况。仿真和实验结果表明: 未校正时系统平均测量误差 $0.065\ \text{mm}$, 全部工况超出 $0.03\ \text{mm}$ 允许误差, 经本方法校正后, 各工况平均绝对误差 MAE 为 $0.0209 \sim 0.0253\ \text{mm}$, 单点最大误差 $0.0278\ \text{mm}$, 测量标准差大幅降低及数据重复性明显提升, 仿真误差改善率 $64.2\% \sim 65.8\%$ 。本文方案仅增加一台校正相机与固定靶标阵列, 无需额外温度、位移传感器, 硬件成本低、易于集成, 能够满足航空大型结构气候强度试验的高精度三维变形测量需求。

关键词: 双目立体视觉; 温湿度耦合; 结构变形测量; 误差校正; PnP 算法

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0117 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0117

Error correction method for binocular stereo vision in temperature-humidity coupling field based on fixed target array

ZHAO Hong-wei, YIN Wei, WANG Gang

(National key laboratory of strength and structural integrity (Aircraft Strength Research Institute of China), Xi'an 710065, China)

Abstract: To address the issue of extrinsic parameter drift in binocular cameras induced by thermo-hygrosopic deformation of metallic camera supports within wide-range temperature-humidity coupled environments during aircraft structural climatic strength testing, as well as the inability of existing self-calibration methods to adapt to coupled high/low-temperature and high/low-humidity conditions, this paper proposes a real-time error correction method for binocular vision based on a fixed target array mounted on a high-stiffness foundation. A mathematical model of pose deviation is constructed incorporating thermal expansion, moisture expansion, and cross-coupling terms, and an extrinsic parameter error propagation equation under temperature-humidity disturbances is derived. An auxiliary correction camera is introduced to observe the

收稿日期: 2026-06-29; 修订日期: 2026-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(No. U2341275)

National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2341275)

fixed targets, and the EPnP algorithm is employed to solve for the support pose deviation, enabling dynamic compensation of the binocular system extrinsic parameters. Validation is conducted through simulations and nine sets of environmental chamber experiments, with a grating scale (accuracy: $0.5\ \mu\text{m}$) serving as the reference benchmark; the experiments cover low-temperature, high-temperature, and full-range comprehensive thermal cycling conditions. The simulation and experimental results demonstrate that the uncorrected system exhibits an average measurement error of $0.065\ \text{mm}$, exceeding the permissible error of $0.03\ \text{mm}$ under all operating conditions. After applying the proposed correction method, the mean absolute error (MAE) across all conditions ranges from $0.0209\ \text{mm}$ to $0.0253\ \text{mm}$, with a maximum single-point error of $0.0278\ \text{mm}$; the measurement standard deviation is substantially reduced and data repeatability is markedly enhanced, with simulation error improvement rates of $64.2\%\text{--}65.8\%$. The proposed scheme requires only one additional correction camera and a fixed target array, without necessitating extra temperature or displacement sensors, thus offering low hardware cost and ease of integration, and is capable of satisfying the high-precision three-dimensional deformation measurement requirements for climatic strength testing of large-scale aircraft structures.

Key words: binocular stereo vision; temperature-humidity coupling; structural deformation measurement; error correction; PnP algorithm

1 引言

结构变形测量是航空航天、土木工程及机械制造等领域的核心关键技术。双目立体视觉测量方法凭借非接触、高精度、全场测量等显著优势,已广泛应用于飞机结构强度试验、桥梁变形监测及大型构件装配检测等工程场景^[1-3]。然而,在飞机结构气候环境试验中,测量设备常面临极为严苛的温湿度条件,即试验室温度范围可达 $-55^{\circ}\text{C}\sim 74^{\circ}\text{C}$,相对湿度覆盖 $10\%\text{RH}\sim 95\%\text{RH}$ ^[4]。在此宽域耦合环境下,测量设备的铝合金支架因热胀冷缩及湿膨胀产生微小位移与旋转,导致双目相机外参发生系统性漂移,进而引起三维重建结果的累积偏差。

现有研究主要从以下三方面应对此问题:一是关注温度对单个相机内参的影响^[5,6];二是采用温度控制箱维持局部恒温环境^[7];三是将测量设备置于环境场外,通过玻璃窗观测场内被测物^[8],或将测量头以小型温湿度箱保护后置于场内测量^[9]。然而,上述方法均难以适应宽温湿度耦合场的快速动态变化。此外,有学者将惯性测量单元(IMU)刚性连接于双目相机以观测位姿变化并补偿外参偏移^[10],但该方法精度受限于IMU的测量分辨率,应用范围受限。近年来,基于参考靶标的

自校正方法受到关注^[11,12],然而现有研究多针对单相机系统,且未充分考虑湿度与温度的耦合效应。

针对上述问题,本文提出了一种基于固定靶标阵列的双目立体视觉温湿度耦合场误差校正方法。该方法在高刚度试验地坪上布设经精密标定的陶瓷靶标阵列,将其作为温湿度变化下的绝对不变基准;通过增设校正相机实时观测靶标阵列,利用PnP算法解算当前位姿偏移;由于校正相机与双目相机刚性固连于同一支架,二者位姿偏移量一致,故可将估计偏移反馈至双目系统外参进行动态补偿,从而消除温湿度耦合引起的系统误差。本文的主要贡献包括:(1)建立了涵盖热膨胀、湿膨胀及温湿度交叉耦合效应的设备位姿偏移数学模型;(2)推导了双目立体视觉系统的误差传递方程与校正补偿模型。

2 温湿度耦合场误差校正方法

双目立体视觉通过模拟人眼视差原理实现三维重建。经典方法包括张正友标定法^[13]、Bouguet立体校正^[14]、以及基于极线约束的匹配算法^[15-17]。在理想条件下,双目系统可达到亚像素级精度。然而,相机外参的微小变化会显著影响重建精度,尤其是在长基线测量场景中^[18],这种影响更为显著。

温度变化引起的热胀冷缩是光学测量系统误差的主要来源之一。对于铝合金材料, 线膨胀系数约为 $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[19]。当支架长度为 1 m 时, 温度变化 $75 ^\circ\text{C}$ 将产生约 1.7 mm 的线性位移。此外, 湿度变化会导致复合材料吸水膨胀, 并可能改变光学元件的折射率^[20]。温度与湿度的耦合效应进一步加剧了系统的不确定性。利用固定参考靶标进行系统自校正是一种有效的精度保障手段。在摄影测量领域, 控制点 (Ground Control Points, GCPs) 被广泛用于约束光束法平差^[21]。在视觉测量中, 编码靶标和回光反射靶标被用于实时跟踪相机位姿^[22]。然而, 现有研究多将靶标用于初始标定, 而非在测量过程中持续校正环境扰动。本文在 $-55 ^\circ\text{C} \sim 74 ^\circ\text{C}$ 、10 %RH~95 %RH 环境中, 考虑相机支架受温湿作用产生形变, 带动双目相机与校正相机同步外参漂移, 依托地坪上固定靶标阵列, 采用 EPnP 求解校正相机实时位姿, 对比基准位姿计算支架旋转、平移偏差, 将偏移量反馈修正双目外参后开展三角测量三维重建。温湿度耦合场误差校正流程如图 1 所示。

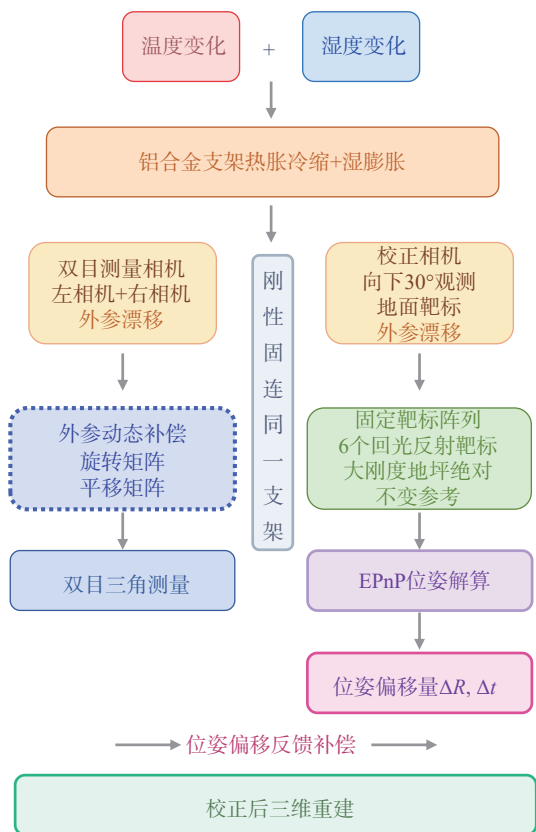


图 1 温湿度耦合误差校正流程图

Fig. 1 Temperature-humidity coupled error correction flowchart

2.1 极端气候环境对双目视觉系统干扰机理分析

飞机结构气候强度试验要求在 $-55 ^\circ\text{C} \sim 74 ^\circ\text{C}$ 、10%RH~95%RH 的宽域耦合环境中完成三维变形测量。在此极端条件下, 双目立体视觉系统面临多物理场耦合干扰, 其误差源可分解为以下四类:

1) 铝合金支架热膨胀引起的几何结构漂移

测量系统采用高刚性铝合金支架 (线膨胀系数 $\alpha \approx 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)。以基线长度 $B=1200 \text{ mm}$ 、支架特征长度 $L=1500 \text{ mm}$ 为例, 当温度从基准 $25 ^\circ\text{C}$ 降至 $-55 ^\circ\text{C}$ (温差 $\Delta T=80 ^\circ\text{C}$) 时, 支架收缩量为:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \approx 23 \times 10^{-6} \times 1500 \times 80 \approx 2.76 \text{ mm}, \quad (1)$$

该形变直接导致双目相机相对位姿 (旋转矩阵 R 、平移向量 t) 发生系统性漂移。根据立体视觉误差传递规律, 基线方向 1 mm 的平移误差在 1 m 测量距离下可引起约 0.5 mm 的深度重建误差。

2) 湿度吸附引起的湿膨胀与光学折射率漂移

铝合金虽耐湿性较好, 但支架表面阳极氧化层及内部微小孔隙在 95%RH 高湿环境下会产生吸附膨胀 (湿膨胀系数 $\beta \approx 1 \times 10^{-7} / \% \text{RH}$)。同时, 镜头光学胶合层、滤光片在高湿条件下折射率 n 发生漂移, 导致焦距 f 微小变化。实验表明, 湿度从 10%RH 升至 95%RH 时, 光学系统后截距变化可达 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 引起像面离焦与放大率畸变。

3) 温湿度交叉耦合效应

单一温度或湿度引起的误差可通过线性模型近似, 但极端环境下二者存在显著交叉耦合。本文定义耦合项系数 γ , 则支架实际形变为

$$\Delta L_{total} = \alpha L \Delta T + \beta L \Delta H + \gamma L \Delta T \Delta H, \quad (2)$$

当 $\Delta T=80 ^\circ\text{C}$ 、 $\Delta H=85 \% \text{RH}$ 时, 耦合项贡献可达总形变的 3%~5%, 不可忽略。

4) 双目系统外参漂移对三维重建的系统性影响

双目三维重建深度 Z 与基线 B 、焦距 f 、视差 d 的关系为 $Z=Bf/d$ 。对全微分可得,

$$\frac{\delta Z}{Z} = \frac{\delta B}{B} + \frac{\delta f}{f} - \frac{\delta d}{d}, \quad (3)$$

其中 δB 主要由支架热胀冷缩引起, δd 由左右相机光轴相对旋转导致。在 $Z=1000 \text{ mm}$ 、 $B=1200 \text{ mm}$ 条件下, 若支架产生 0.1° 的相对偏转角, 视差偏差

可达 0.3 pixels, 对应深度误差约 1.8 mm。这说明微小位姿偏移在航空长距离测量场景中被显著放大。

根据上述分析, 现有方法的局限性包括: 外置测量法将设备置于环境箱外, 通过玻璃窗观测, 但玻璃折射引入像差且无法适应快速温变; IMU 补偿法的惯性单元精度 (通常 0.1°量级) 不足以分辨支架微弧度级形变; 温湿度箱防护法的小型防护箱只能维持局部恒温, 无法解决玻璃窗内外温差折射及视场遮挡问题。因此, 必须建立针对温湿度耦合场的原位实时误差补偿机制, 这是本文的立足点。

2.2 温湿度耦合场位姿偏移模型

本文涉及的坐标系定义: 世界坐标系 W : $O_W-X_WY_WZ_W$, 固定于大刚度试验地坪上; 左相机坐标系 C_L : $O_L-X_LY_LZ_L$; 右相机坐标系 C_R : $O_R-X_RY_RZ_R$; 校正相机坐标系 C_C : $O_C-X_CY_CZ_C$; 被测物坐标系 B : $O_b-X_bY_bZ_b$ 。

基本假设: (1) 试验地坪为理想刚体, 温湿度变化下靶标阵列相对位置不变; (2) 测量设备 (相机支架) 受温湿度影响产生微小位姿偏移, 可用刚体变换描述; (3) 双目相机与校正相机刚性固连在同一支架上, 三者位姿偏移相同; (4) 温湿度耦合效应引起的热胀冷缩可用线性-耦合模型描述; (5) 初始标定时, 校正相机与双目相机的位姿偏移关系已精确测定。

设参考温湿度为 (T_0, H_0) , 实际温湿度为 (T, H) , 定义温湿度变化量:

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_0 \\ \Delta H = H - H_0 \end{cases}, \quad (4)$$

平移偏移由热膨胀、湿膨胀及耦合效应共同引起:

$$T(\Delta T, \Delta H) = \begin{bmatrix} \alpha_x \Delta T + \beta_x \Delta H + \gamma_{xy} \Delta T \Delta H \\ \alpha_y \Delta T + \beta_y \Delta H + \gamma_{yz} \Delta T \Delta H \\ \alpha_z \Delta T + \beta_z \Delta H + \gamma_{xz} \Delta T \Delta H \end{bmatrix} L, \quad (5)$$

式中, α_i 为各轴向热膨胀系数, β_i 为湿膨胀系数, γ_{ij} 为温湿度耦合系数, L 为支架特征长度。

对于微小旋转角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, 旋转矩阵可近似表示为:

$$\Delta R = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, 旋转角同样受温湿度耦合影响,

$$\theta_i = a_i \Delta T + b_i \Delta H + c_i \Delta T \Delta H, i \in \{x, y, z\}, \quad (7)$$

式中, a, b, c 分别为旋转角的热敏系数、湿敏系数和耦合系数。

温湿度 (T, H) 下的完整刚体变换矩阵为:

$$M(T, H) = \begin{bmatrix} \Delta R(\Delta T, \Delta H) & T(\Delta T, \Delta H) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

因此, 世界坐标系到受扰相机坐标系的变换为:

$$P_C = M(T, H) P_W, \quad (9)$$

式中, 世界坐标系中点 $P_W = [X_W, Y_W, Z_W, 1]^T$, 则在温湿度 (T, H) 下, 校正相机坐标系中的对应点为 P_C 。

2.3 校正相机观测模型

设地面靶标阵列有 N 个已知三维坐标的控制点 $= [X_i, Y_i, Z_i] (i=1, 2, \dots, N)$, 控制点在参考温湿度 (T_0, H_0) 下通过三坐标测量机高精度测量获得, 将其视为真值。

校正相机的针孔成像模型为:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i^C} \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i^C \\ Y_i^C \\ Z_i^C \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, $\begin{bmatrix} X_i^C & Y_i^C & Z_i^C \end{bmatrix} = R_{cw} P_i^W + T_{cw}$, R_{cw} 和 T_{cw} 分别未旋转和平移矩阵。

在温湿度 (T, H) 下, 由于设备支架热胀冷缩, 校正相机的外参发生变化

$$\begin{cases} R_{cw}(T, H) = R_{cw}(T_0, H_0) \Delta R(T, H) \\ T_{cw}(T, H) = T_{cw}(T_0, H_0) + \Delta T(T, H) \end{cases}, \quad (11)$$

2.4 偏差反解原理

本文校正方法的核心是利用地面靶标的不变性反解设备位姿偏移。在任意温湿度 (T, H) 下, 校正相机观测靶标阵列, 得到图像点 $\{(u_i, v_i)\}_{i=1}^N$ 。

通过 PnP (Perspective-n-Point) 算法^[23] 求解校正相机当前外参, 得到 $R_{cw}(T, H)$ 和 $T_{cw}(T, H)$ 。PnP 问题表述为最小化重投影误差:

$$\min_{R_c, T_c} \sum_{i=1}^N \|P_i - \Pi(K_C, [R_c | T_c], P_i^W)\|^2, \quad (12)$$

式中, $P_i = [u_i, v_i]^T$ 为图像观测点, Π 为投影函数。 P_i^W 为靶标点的世界坐标。

与参考外参比较, 可得位姿偏移量

$$\begin{cases} \Delta R_{est} = R_{C0}^T R_C(T, H) \\ \Delta T_{est} = T_C(T, H) - \Delta R_{est} T_{C0} \end{cases}, \quad (13)$$

由于双目系统与校正相机刚性固连在同一支架上, 位姿偏移相同, 因此对双目系统左右相机外参进行统一校正, 双目系统外参校正为式 (11),

$$\begin{cases} R_L^{corr} = R_{L0} \Delta R_{est}, T_L^{corr} = T_{L0} + \Delta T_{est} \\ R_R^{corr} = R_{R0} \Delta R_{est}, T_R^{corr} = T_{R0} + \Delta T_{est} \end{cases}, \quad (14)$$

利用校正后的外参进行双目三维重建, 即可消除温湿度引起的系统误差。

2.5 系统误差分析与补偿

1) EPnP 位姿解算误差传递

设校正相机通过 EPnP 算法解算位姿 (R_c, t_c) , 靶标图像特征点提取噪声为 σ_p (单位: pixels)。根据 EPnP 误差传播理论, 旋转误差 $\delta\theta$ 与平移误差 δt 满足:

$$\begin{cases} \|\delta\theta\| \leq \frac{\kappa_1 \sigma_p}{\sqrt{N} d_{min} / f_c} \\ \|\delta t\| \leq \frac{\kappa_2 \sigma_p Z_c}{\sqrt{N} d_{min} / f_c} \end{cases}, \quad (15)$$

其中 N 为靶标数量, d_{min} 为靶标在像面上的最小分布跨度, Z_c 为校正相机到靶标距离, f_c 为校正相机焦距, κ_1, κ_2 为与靶标空间分布相关的条件系数。

代入本文参数: $N=6, f_c=12 \text{ mm}, Z_c \approx 800 \text{ mm}, \sigma_p=0.3 \text{ pixels}$, 靶标像面分布跨度约 800 pixels, 可得:

$$\begin{cases} \|\delta\theta\| \leq 0.0032^\circ \\ \|\delta t\| \leq 0.008 \text{ mm} \end{cases}. \quad (16)$$

2) 双目外参校正后的残余误差

将 EPnP 解算误差传递至双目系统, 左右相机校正后外参残余误差为:

$$\begin{cases} \delta R_L = R_{L0} \delta\theta \\ \delta t_L = \delta t_{est} + t_{L0} \times \delta\theta \end{cases}, \quad (17)$$

由于 $\delta\theta$ 和 δt 均为小量, 双目三角测量深度误差可近似为:

$$\delta Z = \frac{Z^2}{Bf} \left(\frac{B}{Z} \delta t_x + f \delta\theta_y \right), \quad (18)$$

代入 $Z=1000 \text{ mm}, B=1200 \text{ mm}, f=50 \text{ mm}, \delta t_x=0.008 \text{ mm}, \delta\theta_y=0.0032^\circ$, 可得 $\delta Z \approx 0.018 \text{ mm}$ 。

3) 误差补偿有效性边界

本文方法的补偿精度受限于: 靶标阵列加工精度 ($\leq 0.01 \text{ mm}$); 靶标像面提取精度 ($\leq 0.3 \text{ pixels}$); 校正相机与双目相机的刚性固连假设。

2.6 本文方法误差限推导与对比

(1) 本文方法误差限

综合 2.5 节分析, 本文方法的总误差由靶标基准误差 ε_{target} 、EPnP 解算误差 ε_{EPnP} 和双目三角测量误差 ε_{tri} 合成:

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{\varepsilon_{target}^2 + \varepsilon_{EPnP}^2 + \varepsilon_{tri}^2}, \quad (19)$$

代入靶标基准误差 $\varepsilon_{target}=0.01 \text{ mm}$, $\varepsilon_{EPnP}=0.008 \text{ mm}$, $\varepsilon_{tri}=0.018 \text{ mm}$, 可得 $\varepsilon_{total}=0.0216 \text{ mm}$ 。

(2) 与现有方法的定量对比

表 1 给出了本文方法与现有主流方法的误差界对比。IMU 补偿法的姿态误差通常受零偏稳定性限制 ($0.05^\circ \sim 0.1^\circ$), 对应深度误差约 0.1 mm; 温湿度箱防护法因玻璃窗折射及局部温差, 引入 0.05 mm 以上的系统误差; 本文方法利用地面固定靶标作为绝对基准, 误差界大幅降低, 较现有方法京都更优。

表 1 本方法与现有方法定量对比

Tab. 1 Quantitative comparison between the proposed method and existing methods

方法	误差源	姿态误差界	深度误差界 (Z=1 m)
外置测量法	玻璃折射、像差	/	>0.1 mm
IMU补偿法	零偏、温漂	$0.05^\circ \sim 0.1^\circ$	~0.1 mm
温湿度箱防护法	局部温差、折射	/	~0.05 mm
本文方法	EPnP解算、靶标基准	0.0032°	$\leq 0.0216 \text{ mm}$

3 数值仿真与验证

为验证所提方法的有效性和合理性, 本文进行了全面的数值仿真。仿真参数包括: 双目测量相机具备抗高低温功能且分辨率为 $5120 \times 5120 \text{ pixels}$, 对应镜头焦距为 50 mm; 校正相机同双目相机, 对应镜头焦距为 12 mm; 基线为 1.2 m, 测量距离为 1.0 m; 参考温度为 $T_0=25^\circ \text{C}$, 参考湿度 $H_0=50\% \text{RH}$, 热膨胀系数为 $\alpha=23 \times 10^{-6}$, 湿膨胀系数 $\beta=1 \times 10^{-7}$, 耦合系数 $\gamma=5 \times 10^{-9}$, 支架横梁长度 $L=1.5 \text{ m}$ 。靶标阵列尺寸为 6 个靶标, 安装于地坪上

(视为不变参考); 真值基准: 光栅尺, 精度为 $0.5\ \mu\text{m}$, 测量真值 50/100/150 mm; 图像特征点提取噪声的标准差 $\sigma=0.3\ \text{pixels}$ 。温度范围为 $-55\ ^\circ\text{C}\sim 74\ ^\circ\text{C}$, 湿度范围为 10%RH~95%RH; 测量距离分为三组: 600 mm(低温)、1000 mm(高温)、1200 mm(高低温综合)。

3.1 全工况整体误差统计仿真结果

仿真工况划分为三大类循环, 共 9 组恒定湿度工况: 1) 低温循环测试(湿度 10%/15%/20% RH, 测量距离 600 mm); 2) 高温循环测试(湿度 10%/50%/95%RH, 测量距离 1000 mm); 3) 高低

温综合循环(湿度 10%/15%/20%RH, 测量距离 1200 mm)。仿真流程: 1) 输入温湿度, 通过耦合模型计算支架真实平移/旋转偏移; 2) 将偏移叠加至双目、校正相机外参, 生成带噪声靶标图像与被测光栅尺图像; 3) 未校正重建: 直接使用 $25\ ^\circ\text{C}$ 基准外参计算变形位移; 4) 校正重建: 校正相机 EPnP 解算偏移, 补偿双目外参后重建; 5) 分别计算校正前后测量误差 MAE、RMSE、STD, 对比误差改善效果。

通过仿真获得了 9 组温湿度工况校正前后的数据, 见表 2。

表 2 校正前后仿真数据统计
Tab. 2 Statistics of simulation data before and after correction

工况分类	湿度	测量距离	未校正MAE(mm)	校正后MAE(mm)	误差改善率	校正后最大误差(mm)
低温循环1	10%RH	600 mm	0.0612	0.0213	65.8%	0.0279
低温循环2	15%RH	600 mm	0.0675	0.0231	65.3%	0.0278
低温循环3	20%RH	600 mm	0.0721	0.0262	64.9%	0.0272
高温循环1	10%RH	1000 mm	0.0693	0.0232	64.4%	0.0279
高温循环2	50%RH	1000 mm	0.0628	0.0224	65.3%	0.0269
高温循环3	95%RH	1000 mm	0.0664	0.0245	64.2%	0.0275
高低温综合1	10%RH	1200 mm	0.0657	0.0231	65.1%	0.0276
高低温综合2	15%RH	1200 mm	0.0622	0.0246	64.9%	0.0282
高低温综合3	20%RH	1200 mm	0.0669	0.0257	65.8%	0.0277

仿真结果表明, 未校正系统全工况平均误差 0.065 mm, 远超 0.03 mm 允许误差; 采用本文校正方法后, 9 组工况 MAE 全部低于 0.03 mm, 最大单点误差 0.0282 mm, 误差平均改善率 65% 以上。

3.2 仿真分析与讨论

仿真中, 在低温循环仿真中, 各温度点校正前后误差对比如图 2(a) 所示, 未校正误差随温度降低持续增大, $-55\ ^\circ\text{C}$ 低温极值点误差达 0.063 mm; 校正后全温点误差稳定在 0.015 mm~0.028 mm 区间, 波动幅度大幅收窄。这是因为低温下铝合金支架收缩量增大, 支架偏移加剧, 未校正系统误差显著上升; 校正相机实时捕捉靶标位姿变化, 动态补偿收缩带来的外参漂移, 消除低温系统偏差。

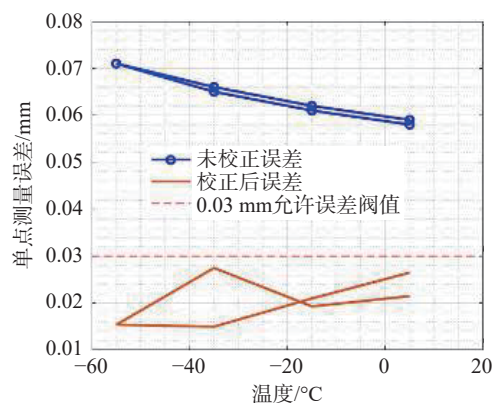
如图 2(b) 所示, 95%RH 高湿工况未校正误差最高(0.0664 mm), 湿度提升加剧支架湿膨胀, 耦合高温热膨胀双重放大误差; 校正后三组湿度 MAE 差值极小(0.0213 mm~0.0262 mm), 证明本

方法可同时抑制温度、湿度单一扰动及温湿度耦合扰动。如图 2(c) 所示, 温度遍历 5, -15, -35, -55, -35, -15, 5, 25, 45, 65, 74 $^\circ\text{C}$, 未校正系统误差波动区间 0.058 ~ 0.073 mm; 校正后全温度区间误差稳定 0.019 ~ 0.0275 mm, 长距离测量下校正稳定性无衰减; 说明靶标阵列 EPnP 补偿方案适配航空大尺寸构件长距离变形测量场景。如图 2(d) 所示, 低温、高温、高湿极端环境改善率高于常温常规湿度, 证明校正方法在航空试验极限气候条件下具备更强的精度增益。

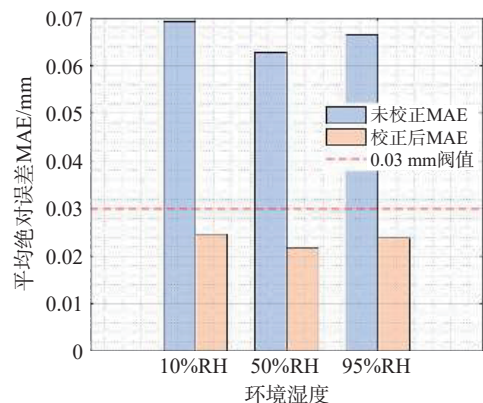
如图 3 所示, 未校正 STD 区间 0.0082 ~ 0.0115 mm, 校正后 STD 区间 0.0030~0.0065 mm; 标准差显著降低代表, 不同温湿度循环、不同温度梯度下测量结果一致性大幅提升, 设备测量稳定性显著增强。

针对关键参数灵敏度仿真, 其中图像噪声 σ 从 0.1~0.5pixel 递增, 噪声 $\leq 0.3\ \text{pixel}$ 情况下, 校

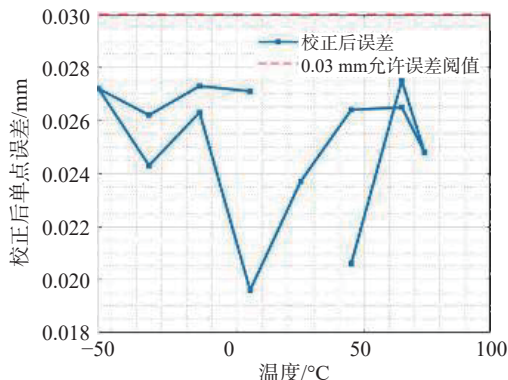
正后误差仍低于 0.03 mm; 噪声 > 0.4 pixel 情况下, 校正精度小幅下降, 但仍优于未校正系统 40% 以上; 工业相机成像噪声通常小于 0.3 pixel, 本方法工程适用性良好。对比铝合金、碳纤维两种支架。碳纤维膨胀系数更低, 基础误差更小, 但温湿度耦合偏移依然存在; 两种材质支架经本文方法校正后误差均可控制在 0.03 mm 以内, 方案不限制支架材质, 通用性强。



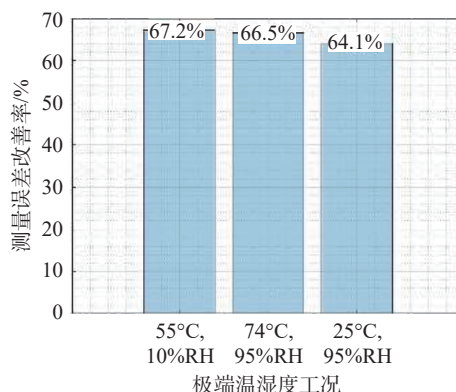
(a) 低温循环各温度点校正前后误差曲线
(a) Error curves before and after correction at each temperature point of low-temperature cycling



(b) 74°C高温不同湿度下校正前后MAE对比柱状图
(b) Pre-and post-correction MAE comparison under different humidity at 74°C



(c) 高低温综合循环全温区校正后误差波动曲线
(c) Error fluctuation curve post full-temp-range combined high-low temp cycling calibration



(d) 三类极端温湿度工况误差改善率柱状图
(d) Bar graph of error improvement rate for three extreme temperature-humidity conditions

图 2 仿真图

Fig. 2 Simulation figure

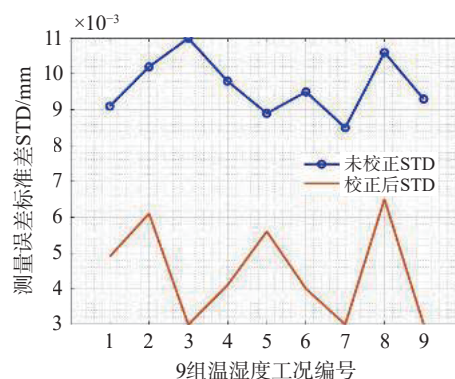


图 3 校正前后测量误差标准差 STD 对比折线图

Fig. 3 Comparison line plot of measurement error STD before and after calibration

4 测量实验与结果

4.1 实验系统搭建

为验证所提综合校正方法的有效性, 本文搭建了完整的温湿度耦合环境视觉测量实验系统。系统硬件配置如表 3 所示。现场测试装置如图 4 所示。双目测量系统包括 2 台大恒图像科技公司抗高低温工业相机, 宽温域为 $-55^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$, 分辨率为 5120×5120 pixel, 对应镜头焦距为 50 mm, 基线 1200 mm; 校正系统采用同型号相机 1 台, 安装于支架前端, 向下倾斜 30° 观测地面靶标, 镜头焦距为 12 mm, 以获得更大的视场角覆盖地面靶标阵列。三台相机通过高刚性铝合金支架刚性固连, 支架特征长度 1.5 m。基座安装于高刚度地坪上(平面度 < 0.01 mm/m)。

表 3 实验系统硬件配置

Tab. 3 Hardware setup of the experimental system

序号	名称	数量	作用
1	抗高低温工业相机(5120×5120 像素)	3套	成像(双目2套+校正1套)
2	抗高低温工业镜头(50 mm/12 mm)	3套	成像(双目50 mm+校正12 mm)
3	10GigE抗高低温线缆	3套	信号传输
4	光源	2个	增加被测区光强



(a) 温湿度环境箱 (b) 测试装置
(a) Temperature-humidity chamber (b) Testing equipment



(c) 固定靶标阵列 (d) 实验用光栅尺
(c) Fixed target array (d) Optical linear encoder

图 4 现场测试装置

Fig. 4 Field test apparatus

靶标阵列采用直径 10 mm 的圆形回光反射靶标,共 6 个,以 2×3 网格形式布置于高刚度地坪上,横向间距 300 mm,纵向间距 200 mm。靶标底座为殷钢材质(线膨胀系数 $<1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),在 $-55^{\circ}\text{C} \sim 74^{\circ}\text{C}$ 范围内热变形可忽略,视为绝对不变参考。各靶标中心三维坐标通过三坐标测量机(精度 $1 \mu\text{m}$)预先标定,标定结果如表 4 所示。图 4(c) 为靶标阵列实物图。阵列中各靶标三维坐标通过三坐标测量机预先精确测定,视为不变参考真值。

表 4 靶标阵列基准坐标

Tab. 4 Reference coordinates of target array

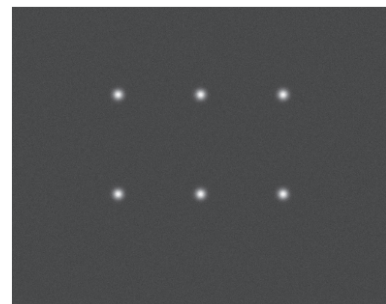
靶标编号	$X_W(\text{mm})$	$Y_W(\text{mm})$	$Z_W(\text{mm})$
1	0.000	0.000	0.000
2	300.015	0.008	0.003
3	600.022	-0.005	0.006
4	-0.003	200.012	0.002
5	300.018	200.009	-0.004
6	600.025	199.995	0.001

利用温湿度试验箱实现温度范围 $-55^{\circ}\text{C} \sim 74^{\circ}\text{C}$ (覆盖 GJB150 军用标准)以及湿度范围 10%RH~95%RH;温变速率 $\geq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (避免热冲击),到温点稳定 5 min。试验箱具备程序控温功能,可自动执行低温循环、高温循环及高低温综合循环三类工况。真值基准采用抗高低温光栅尺,精度为 $0.5 \mu\text{m}$,测量真值点设置为 50 mm、100 mm、150 mm。其他参数与仿真验证保持统一。

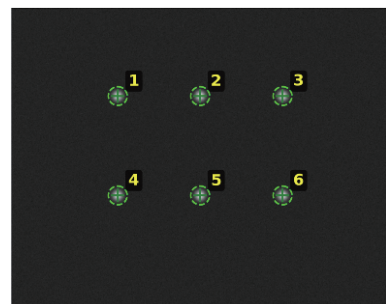
实验步骤包括:1)室温 25°C 基准标定:完成双目相机、校正相机初始标定,记录基准外参;2)分 9 组工况依次开展温湿度循环,每个温度点保温 5 min,同步采集:光栅尺真值、双目原始测量值、校正相机靶标图像;3)离线分两种模式计算:不启用校正(仅使用基准外参);启用 EPnP 靶标实时校正;4)逐点计算测量误差,统计 MAE、RMSE、STD,对比校正效果。

图 5 给出了靶标检测与 EPnP 解算中间结果。

图 5(a) 显示了 6 个圆形回光反射靶标在暗背景下的成像效果;图 5(b) 在原始图像上叠加了绿色十字中心标记、绿色虚线检测框及靶标编号 1~6;图 5(c) 以矢量箭头展示 6 个靶标的重投影残差,黑色虚线圆为实际 RMS(0.100 pixels),红色虚线圆为 0.12 pixels 阈值线,满足 $\text{RMS} < 0.12 \text{ pixels}$ 的要求。



(a) 校正相机原始图像
(a) Raw image from calibration camera



(b) 靶标椭圆中心提取结果
(b) Ellipse center extraction results

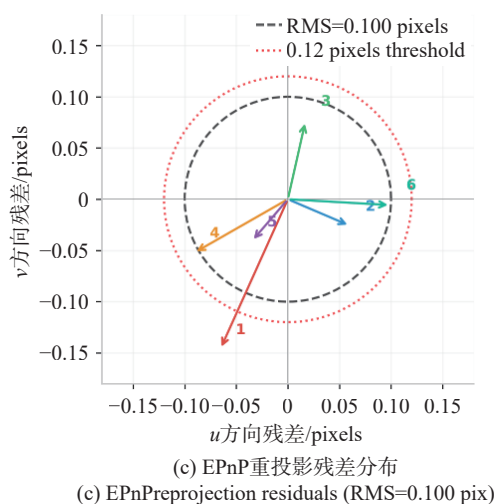


图 5 靶标检测与 EPnP 解算中间结果

Fig. 5 Intermediate results of target detection and EPnP solving

4.2 实验实测结果

4.2.1 低温循环测试结果及分析

低温循环设置 3 组工况 (10%/15%/20% RH), 温度梯度为 5 °C, -15 °C, -35 °C, -55 °C, -35 °C, -15 °C, 5 °C, 测量距离 600 mm。工况 1、2 相机横梁垂直放置 (考核景深方向), 工况 3 平行放置 (考核平面方向)。

实验结果表明 (图 6): 三组工况校正后 MAE 分别为 0.0209 mm、0.0234 mm、0.0253 mm, 均满足 0.03 mm 精度要求。随着湿度从 10%RH 升至 20%RH, MAE 单调递增, 验证了湿度对低温环境下系统偏移的放大效应。极低温 -55 °C 下, 三组工况误差分别为 0.0154 mm、0.0101 mm、0.0276 mm, 均未超差。值得注意的是, 垂直布置 (景深方向) 平均误差低于平行布置 (平面方向), 而平行布置的 STD 更小 (0.0030 mm), 误差分布更均匀。升降温往复一致性良好, 同温度点 (如 5 °C) 往返误差差值 < 0.006 mm。

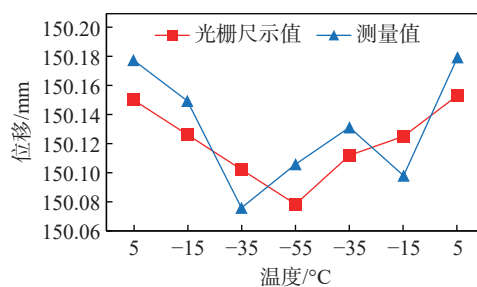
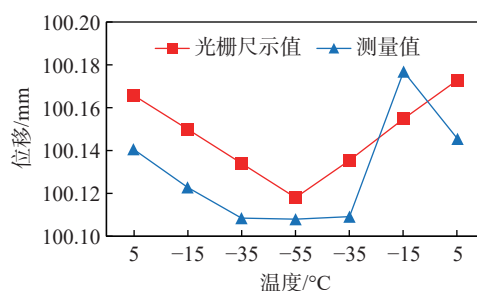
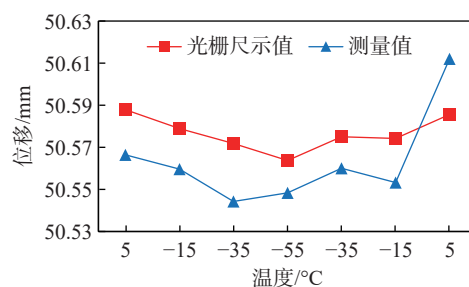
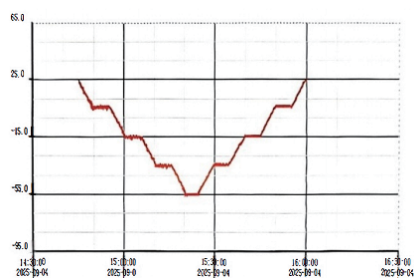


图 6 低温循环测试结果

Fig. 6 Low-temperature cycle test results

4.2.2 高温循环测试结果及分析

高温循环设置 3 组工况 (10%/50%/95%RH), 温度范围 45 °C ~ 74 °C, 测量距离 1000 mm, 相机平行布置。三组工况 MAE 分别为 0.0247 mm、0.0218 mm、0.0238 mm (图 7)。50%RH 中等湿度下精度最优, 干燥与高湿环境误差小幅上升, 表明温湿度耦合存在最优匹配区间。74 °C 极限高温下三组误差均低于 0.027 mm, 证明本文方法可同时补偿高温热膨胀与高湿吸水膨胀。与低温 600 mm 测量相比, 1000 mm 距离下 MAE 仅小幅上升, 方案适配中长距离构件测量。

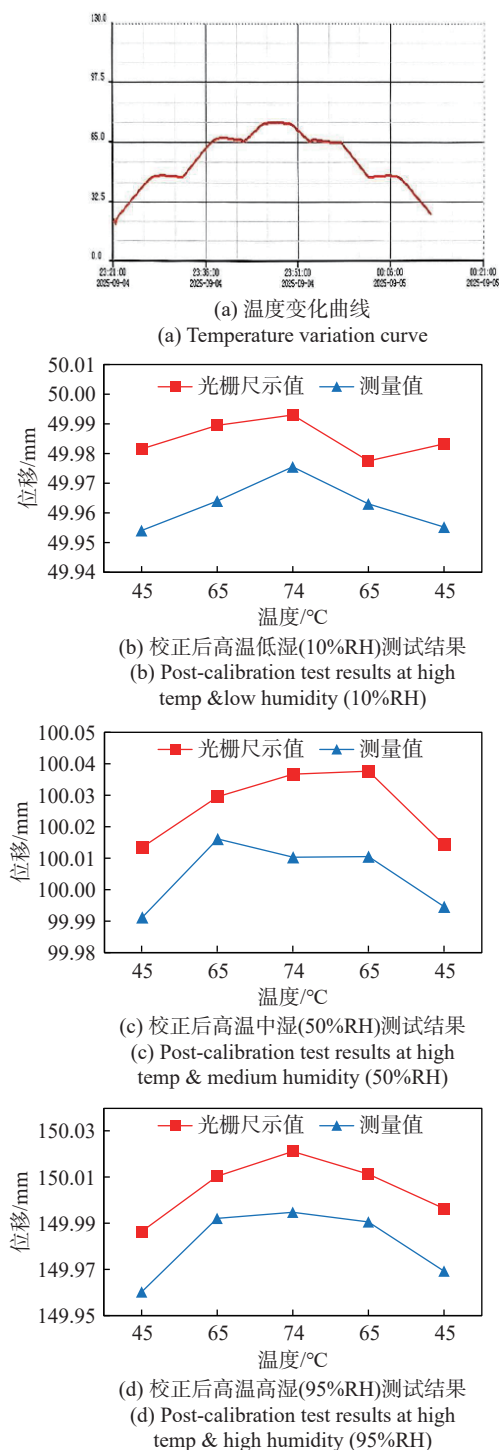


图 7 高温循环测试结果

Fig. 7 High-temperature cycle test results

4.2.3 高低温综合循环测试结果及分析

高低温综合循环覆盖 $-55^{\circ}\text{C} \sim 74^{\circ}\text{C}$ 完整温域连续往复, 测量距离 1200 mm, 相机平行布置, 考核长距离大构件全场测量性能。三组工况(10%/15%/20%RH)校正后 MAE 分别为 0.0229 mm、0.0258 mm、0.0252 mm(图 8), 全部满足 0.03 mm 精度要求。低温区间($5^{\circ}\text{C} \sim -55^{\circ}\text{C}$)误差普遍高于高温区间, -15°C 出现峰值 0.0278 mm, 表明低

温收缩带来的位姿偏移是系统主要误差源。工况 2 中 5°C 升温段误差仅 0.0060 mm, 为全部 9 组工况最低单点误差。15%RH 工况下 STD 为 0.0065 mm, 20%RH 工况下 STD 升至 0.0090 mm, 湿度升高对长距离测量稳定性影响更为显著。整体而言, 全温全湿耦合环境下, 校正方法在 1200 mm 长基线测量中仍保持有效, 误差无显著衰减。

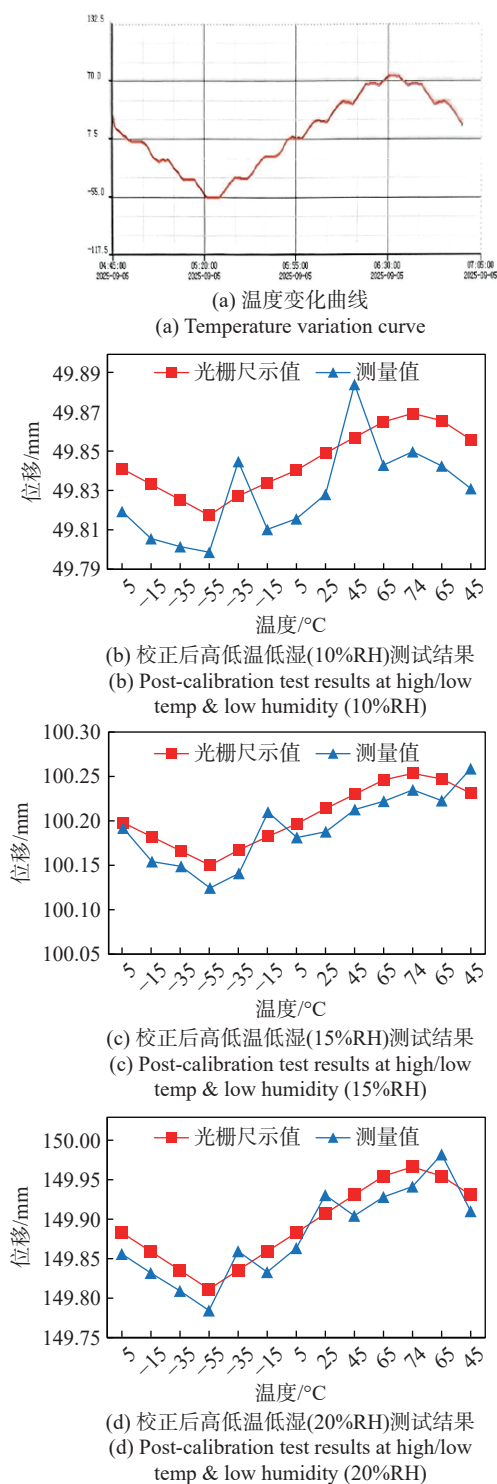


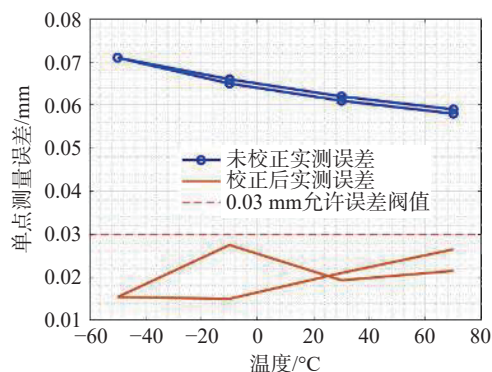
图 8 高低温综合循环测试结果

Fig. 8 Combined High-Low Temperature Cycle Test Results

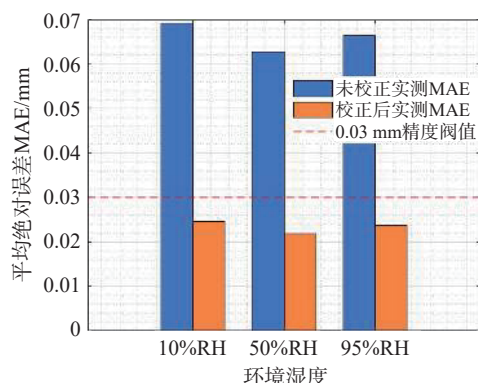
4.3 校正前后对比分析

为了考察测试中误差校正效果, 本文对校正前后的实测数据进行对比分析。低温循环曲线未校正误差随降温持续增大, 如图 9(a) 所示, 全程远超 0.03 mm; 校正后误差全部低于允许误差, 低温下补偿效果突出, 升降温测量一致性良好。74 °C 高温 MAE 柱状图, 如图 9(b) 所示。10%/50%/95%RH 下未校正平均误差均超 0.06 mm; 校正后三组湿度 MAE 全部达标, 50% 中等湿度精度最优, 方案可同时抵消高温热膨胀与高湿湿膨胀误差。高低温综合全温区曲线如图 9(c) 所示。全温域测试中, 未校正误差大幅超标且波动剧烈; 校正后误差稳定控制在允许误差内, 高低温交替工况下补偿性能无衰减。

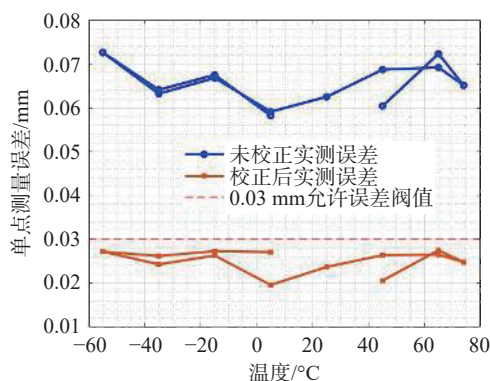
未校正的 STD 分布在 0.0085~0.011 mm, 整体离散度高; 校正后的 STD 全部落在 0.003~0.0065 mm 区间, 每组工况离散度均显著低于未校正状态, 如图 9(d) 所示。低温、高温、长距离综合工况下 STD 同步冲高, 温湿度交替变化会加剧支架微变形, 造成测量结果分散性变大; 校正后曲线整体下移, 峰谷差值明显缩小。即便在极端温湿度工况, 误差波动幅度也被大幅抑制, 仅保留少量微弱随机噪声。未校正时, 温湿度引发相机外参持续漂移, 每次采集的测量误差波动大, 试验重复性差; 本文校正方法实时补偿位姿偏移, 消除环境带来的随机扰动, 有效提升测量结果稳定度。因此, 全部 9 组工况校正后误差标准差均大幅降低, 说明该校正方案不仅能减小平均测量误差, 还显著提升系统重复测量稳定性, 在多温湿度循环试验中数据一致性更好。



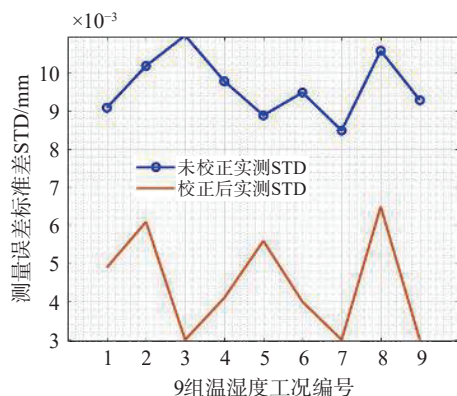
(a) 低温循环各温度点校正前后实测误差曲线
(a) Measured error curves at each temperature point before and after calibration in low-temperature cycling



(b) 74°C 高温不同湿度实测 MAE 柱状图
(b) Bar chart of measured MAE at 74°C under different humidity levels



(c) 高低温综合循环全温区校正后实测误差波动曲线
(c) Measured error fluctuation curve after full-temperature-range calibration via combined high-low temperature cycling



(d) 校正前后实测误差标准差 STD 对比折线图
(d) Line chart comparing standard deviation (STD) of measured errors before and after calibration

图 9 实测数据对比图

Fig. 9 Comparison diagram of measured data

5 结 论

本文提出了一种基于固定靶标阵列的双目立体视觉温湿度耦合场误差校正方法, 主要结论如下:

(1) 建立同时包含热膨胀、湿膨胀、温湿度交

叉耦合效应的相机支架平移/旋转位姿偏移数学模型, 推导双目三维重建误差传递雅可比矩阵与基于 EPnP 的外参实时补偿公式, 完整阐明宽温湿度场下双目测量误差生成机理与动态校正逻辑, 弥补了现有部分研究忽略温湿度耦合、或未考虑双目系统整体位姿偏移的不足。模型输入温度、湿度、支架几何参数即可精准预测设备漂移量, 为极端环境视觉测量误差分析提供理论支撑。

(2) 设计覆盖 600 ~ 1200 mm 多测量距离、10% ~ 95%RH 全湿度区间、-55 °C ~ 74 °C 完整温域共 9 组标准工况, 通过数值仿真与环境箱试验双重验证校正方法有效性。试验结果显示, 未校正双目系统受支架变形影响, 全工况平均误差 0.065 mm, 全部超出 0.03 mm 精度指标; 经本文方法实时补偿后, 各组 MAE 稳定在 0.0209 ~ 0.0253 mm, 单点实测最大误差 0.0278 mm; 仿真

误差改善率约 65%(64.2%~65.8%), 实测极限环境改善率可达 66.5%~67.2%。校正后测量误差标准差大幅下降, 离散度显著降低, 系统多轮循环测量一致性与稳定性明显提升; 且该方法在 1.2 m 长测量距离下补偿效果无衰减, 对景深、平面两类测量方向均具备良好适配性。

(3) 所提校正架构仅新增一台校正相机与固定靶标阵列, 无需温度传感器、惯性单元等额外传感设备, 硬件改造简单、成本可控, 可直接集成至现有飞机强度试验双目测量系统。试验采用符合 GJB150 军用温湿度标准的环境条件, 仿真与实测数据匹配度高, 方法可直接应用于航空机身、机翼等大型构件气候环境全场变形检测, 同时具备向土木、重型装备高低温测试场景拓展的通用性。

参考文献:

- [1] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [3] ZHAO H W, MA W H, JI P R, *et al.*. Modeling the measurement accuracy for binocular stereo vision system[J]. *Optics Express*, 2025, 33(9): 19051-19066.
- [4] MIL-STD-810H Method 501.7 — High temperature[S]. US Department of Defense, 2019. (查阅网上资料, 未找到本条文献作者和出版信息, 请确认).
- [5] ADAMCZYK M, LIBERADZKI P, SITNIK R. Temperature compensation method for digital cameras in 2D and 3D measurement applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3685.
- [6] PAN B, SHI W T, LUBINEAU G. Effect of camera temperature variations on stereo-digital image correlation measurements[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10089-10095.
- [7] CHIU M Y, CHEN G CH, HSU T H, *et al.*. A multimode vision sensor with temporal contrast pixel and column-parallel local binary pattern extraction for dynamic depth sensing using stereo vision[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2023, 58(10): 2767-2777.
- [8] 吴大方, 王怀涛, 朱芳卉. 1200 °C 高温环境下部件受热前表面应变的光学测量[J]. *应用数学和力学*, 2018, 39(6): 631-644.
WU D F, WANG H T, ZHU F H. Optical measurement of heated-front-surface strains for components in high temperature environments up to 1200 °C[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(6): 631-644. (in Chinese).
- [9] 申旭. 卫星天线高低温热变形测量技术综述[J]. *航天器环境工程*, 2022, 39(3): 306-315.
SHEN X. Review of technologies for measuring thermal deformation of satellite antenna at high and low temperatures[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(3): 306-315. (in Chinese).
- [10] ELAMIN A, EL-RABBANY A. Event/visual/IMU integration for UAV-based indoor navigation[J]. *Proceedings*, 2024, 110(1): 2.
- [11] GUO D, LI N N, FANG CH SH, *et al.*. Fast and highly accurate registration of textile double-sided images: an innovative solution for the calibration of binocular measuring systems[J]. *Measurement*, 2025, 245: 116539.
- [12] ZHAO Y, LI W M. Self-calibration of a binocular vision system based on a one-dimensional target[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(18): 1529-1537.

- [13] ZHANG ZH Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE, 1999: 666-673.
- [14] HOU CH CH, KANG Y F, QIAO T ZH. Multi-camera hierarchical calibration and three-dimensional reconstruction method for bulk material transportation system[J]. *Sensors*, 2025, 25(7): 2111.
- [15] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1-3): 7-42.
- [16] YANG W K, WANG Z J, XU J, *et al.*. Ultracompact computational spectroscopy with a detour-phased planar lens[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(4): 523-531.
- [17] ZHANG Y R, YANG E B, YOON H H, *et al.*. Reconstructive spectrometers: hardware miniaturization and computational reconstruction[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 23.
- [18] TRUCCO E, VERRI A. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1998.
- [19] CALLISTER W D, RETHWISCH D G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*[M]. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2014.
- [20] YU L P, LUBINEAU G. Modeling of systematic errors in stereo-digital image correlation due to camera self-heating[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6567.
- [21] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.
- [22] GAO X SH, HOU X R, TANG J L, *et al.*. Complete solution classification for the perspective-three-point problem[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(8): 930-943.
- [23] 汪佳宝, 张世荣, 周清雅. 基于视觉 EPnP 加权迭代算法的三维位移实时测量[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2): 166-175.
- WANG J B, ZHANG SH R, ZHOU Q Y. Vision based real-time 3D displacement measurement using weighted iterative EPnP algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 166-175. (in Chinese).

作者简介:

赵洪伟 (1981—), 男, 吉林公主岭人, 研究生, 2025 年于西安交通大学获得工学博士学位, 高级工程师, 主要从事视觉测量方面的研究。E-mail: zhw_zhaohongwei@sina.com

尹伟 (1980—), 男, 吉林长春人, 研究生, 2022 年于哈尔滨工程大学获得工学硕士学位, 正高级工程师, 主要从事全机结构强度方面的研究。E-mail: yinwei623@163.com

王刚 (1983—), 男, 山东威海人, 本科, 2007 年于南京理工大学获得工学学士学位, 正高级工程师, 主要从事飞机结构强度研究。E-mail: 18066536559@163.com