

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209714

# 图像式路基沉降监测系统的温度补偿方法\*

杨 锋, 闵永智, 孙天放

(兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070)

**摘要:**为减小图像式路基沉降监测系统中温度变化对测量结果的影响,通过对其核心设备—CMOS工业相机的温度漂移进行研究,提出一种针对该监测系统的温度补偿方法。首先,分析说明了温度变化会对监测系统测量精度造成影响;然后,建立漂移参数补偿模型并设置实验进行验证。漂移参数补偿模型使相机的像点误差从1.0~2.5 pixel降低到0.1~0.4 pixel,验证了该模型的正确性;同时设置对比实验,与系统辨识的方法相比,两种方案补偿效果接近,但提出的补偿方法过程简单,更具实用性;最后,提出路基沉降监测系统的温度补偿方法并验证。结果表明,该方法能够提高监测系统测量精度。所提补偿方法,对于提高图像式路基沉降监测系统的测量精度具有重要意义。

**关键词:** 沉降监测; CMOS工业相机; 漂移参数; 温度补偿

**中图分类号:** TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Temperature compensation method for the image subgrade settlement monitoring system

Yang Feng, Min Yongzhi, Sun Tianfang

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To reduce the influence of temperature change on the measurement results in the image-based roadbed settlement monitoring system, this article proposes a temperature compensation method for this monitoring system by studying the temperature drift of its core device—CMOS industrial camera. First, it is analyzed and explained that the temperature variation can affect the measurement accuracy of the monitoring system. Then, a drift parameter compensation model is formulated and experiments are set up for evaluation. Experimental results show that the drift parameter compensation model reduces the image point error of the camera from 1.0~2.5 pixel to 0.1~0.4 pixel, which shows the correctness of the model. Meanwhile, a comparison experiment is set up, and the compensation effect of the drift parameter model schemes is close with the compared method of system identification. But, the proposed compensation method has a simple process and is more practical. Finally, the temperature compensation method of the roadbed settlement monitoring system is proposed and evaluated. Results show that the method can improve the measurement accuracy of the monitoring system. The proposed compensation method is of great significance to improve the measurement accuracy of the image-based roadbed settlement monitoring system.

**Keywords:** settlement monitoring; CMOS industrial cameras; drift parameters; temperature compensation

## 0 引 言

随着我国高铁事业的不断发展,其路基建设与维护的要求也越来越严格,传统的路基测量方法如水力法,沉降板法,沉降水杯法已经不能满足其施工控制与维护任务,本文在于起峰等<sup>[1]</sup>和孙鹏等<sup>[2]</sup>提出的基于激光测量

形变方法的基础上,提出并设计了一种图像式路基沉降监测系统<sup>[3-5]</sup>。该系统具有非接触式、高精度、全自动、实时性高等特点,其测量精度取决于给定相机获取的数字图像的质量。研究发现,对于此类摄像测量系统,除了相机的光轴失调误差<sup>[6-7]</sup>、图像畸变<sup>[8]</sup>、处理算法误差<sup>[9]</sup>、校准误差<sup>[10]</sup>等因素外,温度变化导致的成像误差也会导致测量精度下降。图像式路基沉降监测系统所在环境(以

收稿日期:2022-04-29 Received Date: 2022-04-29

\* 基金项目:国家自然科学基金(61663022,6206020128)、甘肃省自然科学基金(18JR3RA105)项目资助

兰州为例)一年内温差可达 40℃,抑制温漂带来的误差已成为提高该系统测量精度的重要方法。

早在 1993 年,人们就对温度变化影响图像坐标的现象引起了注意,Robson 等<sup>[11]</sup>发现相机的自热导致图像像素沿着  $x$  和  $y$  方向移动了约 0.2 pixels。Smith 等<sup>[12]</sup>研究了温度对数码相机的影响,通过冰箱改变相机温度来探究温度变化对成像信息的影响。Daakir 等<sup>[13]</sup>指出温度改变会对相机焦距等参数产生影响,进而影响成像信息。Ma 等<sup>[14]</sup>研究了数码相机自热与环境温度的耦合效应引起的图像畸变,并提出了环境温度与热致图像畸变关系的模型。Handel<sup>[15]</sup>研究了相机自热引起的图像平移误差,并建立模型解释其机理,但其准确度较低不能实际应用。针对这一问题,Yu 等<sup>[16]</sup>采用系统辨识方式建立温度补偿模型。该模型利用相机参数的变化量确定辨识参数,进而利用辨识参数对像点漂移坐标进行补偿,存在的问题是相机参数的标定相对复杂不易确定,且在确定参数过程中有可能引入新的误差。柴家贺等<sup>[17]</sup>通过有限元仿真分析,提出了一种针对相机自热引起像点漂移的补偿方法。该研究考虑了自热引起的像点漂移,但未考虑环境温度变化对像点的影响。以上研究难以实现对沉降监测系统的温度补偿,本文需要提出一种新的温度补偿模型。

由于图像式沉降监测系统的测量精度与成像质量密切相关,本文将对 CMOS 相机的温度漂移进行研究,探究温度变化与像素坐标之间的关系,通过对像点坐标的温度补偿,结合像素坐标与沉降值之间的转换关系,进而实现监测系统的温度补偿。

## 1 沉降监测系统概述及温度漂移模型

### 1.1 图像式沉降监测系统概述

图像式沉降监测终端系统由许多单元链式连接组成,每一个单元由监测靶面、激光器、CMOS 工业相机及

嵌入式图像处理系统组成,监测系统终端原理示意图如图 1 所示。工作原理为发射端的激光器发射器发出激光束到达接收端的到靶面上,会呈现一个圆形光斑。发射端与接收端均采用刚性连接固定在路基上,当路基发生沉降时,光斑在靶面的位置会发生改变,通过相关算法计算出光斑的竖直位移量就可以得到路基沉降量<sup>[5]</sup>。在这个过程中,温度变化引起的像点漂移会影响图像信息出现误差,进而对测量结果造成影响,降低摄像测量系统测量的精度。温度变化导致的像点漂移可以用热膨胀理论加以解释。为了更好地理解这一过程,先对相机成像原理进行简单介绍。

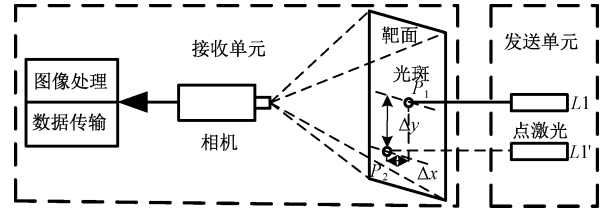


图 1 图像式沉降监测终端原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image settlement monitoring terminal

### 1.2 相机成像模型及简单漂移模型

相机的成像过程,可用中心透视模型解释。该模型认为物体表面的反射光都经过相机透镜,然后投射在成像面上。这一过程中光由于沿直线路径传播,因此成像物体和相机中心以及图像中心都在同一条直线上。采用前投影模型,即成像平面与目标点在相机同一侧。如图 2 所示,记目标点  $P_w(x_w, y_w, z_w)$  在相机坐标下的坐标值为  $P_c(x_c, y_c, z_c)$ ,在图像坐标系上的投影点则为  $P(u, v)$ ,对应像素坐标系下坐标为  $P(u, v)$ 。

世界坐标系下坐标为  $P_w(x_w, y_w, z_w)$  与相机坐标系下坐标  $P(u, v)$  转换关系为:

$$z_c \mathbf{P} = \mathbf{KRP}_w + \mathbf{KT} \quad (1)$$

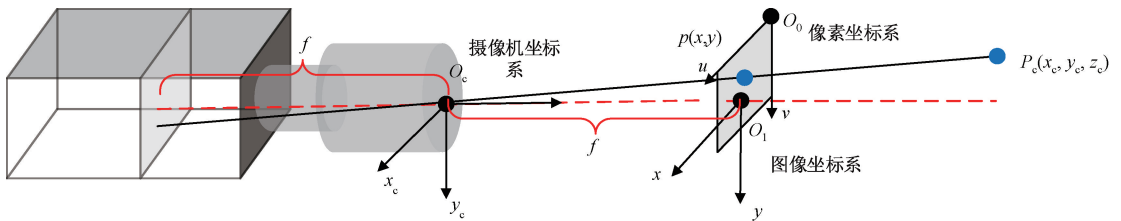


图 2 相机中心透视成像原理图

Fig. 2 Schematic diagram of camera center perspective imaging

式中:  $\mathbf{K}$  为相机内参矩阵;  $\mathbf{R}$  为旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  为平移矩阵<sup>[14]</sup>。温度变化会引起相机参数发生变化,设温度改变后相机内参数矩阵、旋转矩阵和平移向量分别为  $\mathbf{K}_b$ 、 $\mathbf{R}_b$  和  $\mathbf{T}_b$ ,特征点的世界坐标为  $P_{wb}(x_{wb}, y_{wb}, 0)$ ,对应像点齐

次坐标为  $P_b(u_b, v_b, 1)$ 。则有:

$$z_{cb} \mathbf{P}_b = \mathbf{K}_b \mathbf{R}_b \mathbf{P}_{wb} + \mathbf{K}_b \mathbf{T}_b \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_b = u + \delta u \\ v_b = v + \delta v \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\delta u$  和  $\delta v$  分别表示水平漂移量和竖直漂移量。应用热膨胀理论分析相机成像时像点漂移过程。以标定板为拍摄目标进行分析, 设标定板的线膨胀系数为  $\alpha_L$ , 测试系统环境温度的改变量为  $\Delta t$ , 根据材料的热膨胀公式有<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \delta x_w = \alpha_L \cdot \Delta t \cdot x_w \\ \delta y_w = \alpha_L \cdot \Delta t \cdot y_w \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\delta x_w$  和  $\delta y_w$  分别表示标定板在温度变化时产生的应变变量。通过推理和简化, 可以得到像点坐标漂移量与和相机内外参数的变化量之间的关系如下所示:

$$\begin{cases} \delta u = \delta u_0 + \delta f_u \frac{x_c}{z_c} - \delta A_z \frac{y_w}{z_c} f_u + \delta x_w \frac{f_u}{z_c} \\ \delta v = \delta v_0 + \delta f_v \frac{y_c}{z_c} + \delta A_z \frac{x_w}{z_c} f_v + \delta y_w \frac{f_v}{z_c} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)即为文献[16]的简单漂移模型, 其中,  $\delta u_0$  和  $\delta v_0$  分别为像点在水平和竖直方向的主点漂移,  $\delta f_u$  和  $\delta f_v$  表示相机横纵焦距的变化量,  $\delta A_z$  表示滚转角。

### 1.3 漂移参数模型

线性图像漂移简化模型很好地表述了由温度变化导致的像点漂移, 但所用到的相机参数较多, 需要标定出各个参数再进行计算, 而参数标定过程复杂并且可能会引入新的误差。因此本文提出了一种不依赖于相机参数的补偿算法, 推理过程如下: 对式(12)的部分项进行抽象化处理, 其中含  $\delta u_0$ ,  $\delta v_0$ ,  $\delta f_u$ ,  $\delta f_v$ ,  $\delta A_z$ ,  $z_c$  的部分也可以看作是  $x_c$ ,  $y_c$  项的系数, 而  $x_c$ ,  $y_c$  可以用  $x_w$ ,  $y_w$  表示, 而因而可以将像点像素变化量看作是关于世界坐标系下目标点的纵横坐标的函数。为了简化表达, 令  $c_1 = \delta u_0$ ,  $c_2 = \delta f_u/z_c$ ,  $c_3 = -\delta A_z f_u/z_c$ ,  $c_4 = \delta x_w f_u/z_c$ ,  $c_5 = \delta v_0$ ,  $c_6 = \delta A_z f_v/z_c$ ,  $c_7 = \delta f_v/z_c$ ,  $c_8 = \delta y_w f_v/z_c$ 。因此将式(5)改写为:

$$\begin{cases} \delta u = c_1 + c_2 x_c + c_3 y_w + c_4 x_w \\ \delta v = c_4 + c_5 y_c + c_6 x_w + c_8 y_w \end{cases} \quad (6)$$

因为  $x_c$ ,  $y_c$  与  $x_w$ ,  $y_w$  存在如下关系:

$$\begin{cases} x_c = r_{11} x_w + r_{12} y_w + r_{13} z_w + t_x \\ y_c = r_{21} x_w + r_{22} y_w + r_{23} z_w + t_y \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r$  为坐标转换过程用到的旋转矩阵  $R$  的矩阵元素, 由于  $r_{12}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{21}$ ,  $r_{23}$  考比  $r_{11}$ ,  $r_{22}$ ,  $t_x$ ,  $t_y$  小一个量级, 可以将含  $r_{12}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{21}$ ,  $r_{23}$  的项省略。令  $a_1 = c_1 + c_2 t_x$ ,  $a_2 = c_2 r_{11} + c_4$ ,  $a_3 = c_3$ ,  $a_4 = c_4 + c_5 t_y$ ,  $a_5 = c_5 r_{22} + c_8$ ,  $a_6 = c_6$ , 则式(7)转换为:

$$\begin{cases} \delta u = a_1 + a_2 x_w + a_3 y_w \\ \delta v = a_4 + a_5 y_w + a_6 y_w \end{cases} \quad (8)$$

考虑到相机在温变时参数部分参数非线性改变也会导致像点漂移, 这类漂移过程类似径向畸变, 可用复合项

$b x_w y_w$  表示, 由此, 式(8)改进如下:

$$\begin{cases} \delta u = a_1 + a_2 x_w + a_3 y_w + b_1 x_w y_w \\ \delta v = a_4 + a_5 y_w + a_6 x_w + b_2 x_w y_w \end{cases} \quad (9)$$

为便于表述, 将  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, b_1, b_2$  统称为漂移参数。当其他条件不变, 温度改变  $\Delta T$  时, 其漂移参数模型为:

$$\begin{cases} u = u' - (a_1 + a_2 x_w + a_3 y_w + b_1 x_w y_w) \\ v = v' - (a_4 + a_5 y_w + a_6 x_w + b_2 x_w y_w) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $(u', v')$  为改变温度后目标点坐标,  $(u, v)$  温度初始值。在确定漂移参数后就可以利用式(10)对像点坐标进行温度补偿。

## 2 温度漂移实验

### 2.1 温度漂移实验

以平面标定板为采集目标, 设计温度漂移实验探究温度变化对相机采集的像点坐标的影响。实验装置由成像系统, 温度采集系统, 温度控制部分组成。成像系统由相机、标定板、支架、计算机组成。

摄像测量装置示意图如图3所示。温度采集系统由温度传感器, 温度变送器, 数据采集卡和计算机组成。温度控制由制冷风机和空调来完成。标定板选用  $12 \times 9 \times 40$  的氧化铝棋盘格标定板, 其优点是不反光不透光, 线性膨胀系数小。相机选用型号为 MV3000UC、CMOS 工业相机, USB2.0 接口可直接将采集到的图片传入计算机。温度传感器选取 PT1000 铂电阻传感器, 其量程为  $-50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ , 精度为  $0.1^\circ\text{C}$ , 可贴在相机机身四周用来采集温度, 采集的温度信号通过 USB5935 数据采集卡传入电脑。

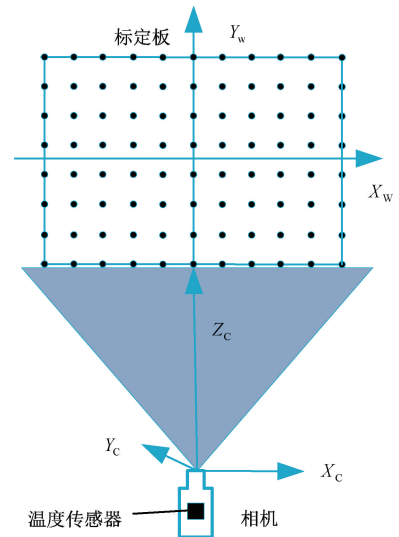


图3 摄像测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of camera measuring device



图 4 所示为摄像测量装置的实物,标定板安装在 1 个由膨胀系数极小(热变形可以忽略)的殷钢材料制成的基座上,可以通过旋钮调节位置。相机固定在三脚架上,拍摄时调整位姿使相机镜头垂直对着平面标定板,同时调整位置使标定板位于摄像机视场中央;采集的图像和温度信息由计算机存储和显示。整个摄像测量系统装置安装在密闭室内,可通过调温装置改变环境温度。为避免光照变化对实验结果产生影响,窗口用挡板遮住,光源仅由荧光灯提供。图 5 所示为摄像测量装置采集的图像。



图 4 摄像测量装置实物

Fig. 4 Physical drawing of camera measuring device

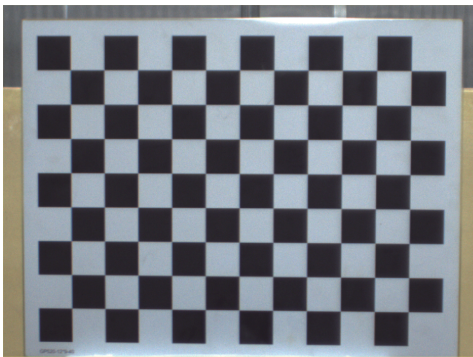


图 5 摄像测量系统采集的图像

Fig. 5 Images collected by the camera measurement system

## 2.2 环境温度变化对相机温度的影响

文献[13]认为环境温度变化会导致机身温度改变,进而引起了相机各部件产生热形变,这是温致像点漂移的主要原因。为探究环境温度与相机温度的关系,待相机自热平衡后,改变环境温度,观察机身温度变化情况。调节环境温度从 7℃ 上升至 17℃ 时,相机温度(侧面温度平均值)变化情况如图 6 所示。计算可得相机温度与环境温度的相关系数为 0.995,说明环境温度与相机温度密切相关。

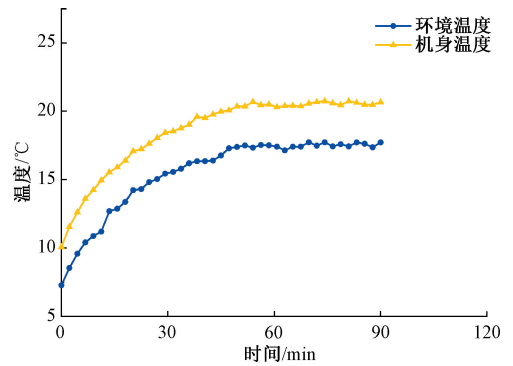


图 6 环境与相机温度变化

Fig. 6 Environment and camera temperature change diagram

## 2.3 温度变化对标定板成像的影响

通过调温装置调节环境温度,使室内气温发生改变,分别做升温 and 降温实验。利用摄像机连续采集标定板在不同温度下的图像,并利用 MATLAB 平台对标定板各个角点坐标进行精确提取。实验发现,当环境温度改变时,标定板角点的坐标将会产生漂移现象,与文献[16]观测到的结果基本一致。由于升温 and 降温的漂移状况类似,以升温情况为例,对面板的漂移现象进行说明。此外,为便于观察,将漂移量放大 100 进行分析。图 7 所示为机身温度从 10℃ 上升至 20℃ 时图像产生的像点漂移,其中圈点表示初始时刻的像点坐标,叉点表示温度改变后的像点坐标。可以看到不同位置漂移量具有差异性。靠近图像中心漂移量较小,远离图像中心漂移量较大,且漂移方向也是不同的。为了解释这种现象,可以将实际的图像漂移,分解为如下 3 部分之和:1) 主点漂移,可以看作由感光元件相对移动引起的图像漂移;2) 径向漂移,可以看作由摄像机焦距等参数变化引起的图像漂移;3) 随机漂移,可以看作是相机内部光电二极管中电子不规则运动造成的。实际的图像漂移如图 7(a) 所示,主点漂移如图 7(b) 所示,径向漂移如图 7(c) 所示,随机漂移如图 7(d) 所示。

分解规则如下:定义主点漂移为棋盘格板中所有角点实际漂移平均值。径向漂移可以从方向与模长两方面定义,漂移方向为角点指向原点的方向,模长为距原点同半径的角点实际漂移减去主点漂移后模的平均值。随机漂移为实际漂移减去主点漂移和径向漂移,其大小和方向是随机的。

## 3 基于漂移参数模型的补偿实验结果与分析

### 3.1 漂移参数的确定

基于漂移参数的温度补偿模型在补偿像点坐标时首先需要确定漂移参数。利用 4 个已知的角点初始坐标和



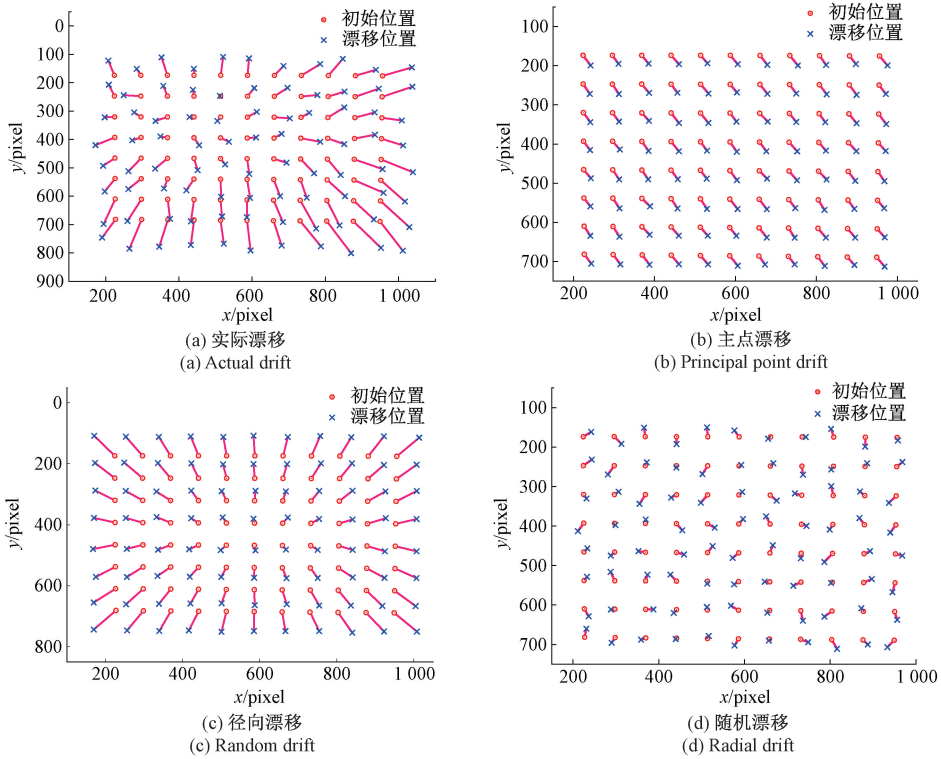


图7 升温时角点坐标漂移图

Fig.7 Coordinate drift diagram of heating

对应的漂移量,通过式(9)得出实验相机在某温度下的漂移参数。通过重复上述步骤,可以得到多组温变量与其漂移参数。通过数拟合得出相机温变量与漂移参数间的关系,再结合式(10)可以得到:

$$\begin{cases} u = u' - 0.02\Delta T + 2.01 \times 10^{-4} \Delta T x_w - \\ \quad 4.72 \times 10^{-5} \Delta T y_w + 3.91 \times 10^{-6} x_w y_w \\ v = v' - 0.03\Delta T + 2.51 \times 10^{-4} \Delta T y - \\ \quad 3.19 \times 10^{-5} \Delta T x_w + 1.57 \times 10^{-5} x_w y_w \end{cases} \quad (11)$$

3.2 补偿实验结果与分析

式(11)即为实验相机漂移参数补偿模型。为表明漂移参数模型的正确性,需要通过实验数据与计算进行比较验证。由于远离图像中心的像点漂移量较大,故此选取两个图像边缘的成像角点(1,1),(8,11)的

坐标值进行分析。降温与升温的情况类似,仍以升温情况为例进行说明。现以-10℃为初始状态进行模拟,根据式(11)计算得出温度升高引起的像点漂移量,对初始坐标进行补偿,将补偿后的坐标与实测坐标进行对比,结果如图8所示(模型1)。由图8可以看出,经过补偿计算模拟的像点漂移曲线与实测值曲线变化趋势一致且差值较小,这说明了基于漂移参数补偿模型的有效性。另外,温度从-10℃升高到30℃这一过程中,导致的温度漂移可以达到1~2.5个像素。以像坐标实测值作为基准,将运用漂移参数模型补偿后的像点坐标值与基准值作差处理,就可以得到通过文中所提补偿模型得到的坐标与实测值的误差,其统计结果如表1所示。

表1 像点漂移补偿模型误差

Table 1 Image point drift compensation model error

pixels

角点	角点(1,1)补偿模型误差值				角点(8,11)补偿模型误差值			
数据特征	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
水平	0.223	0.001	0.060	0.057	0.319	0.001	0.103	0.078
垂直	0.205	0.001	0.069	0.045	0.379	0.001	0.134	0.096

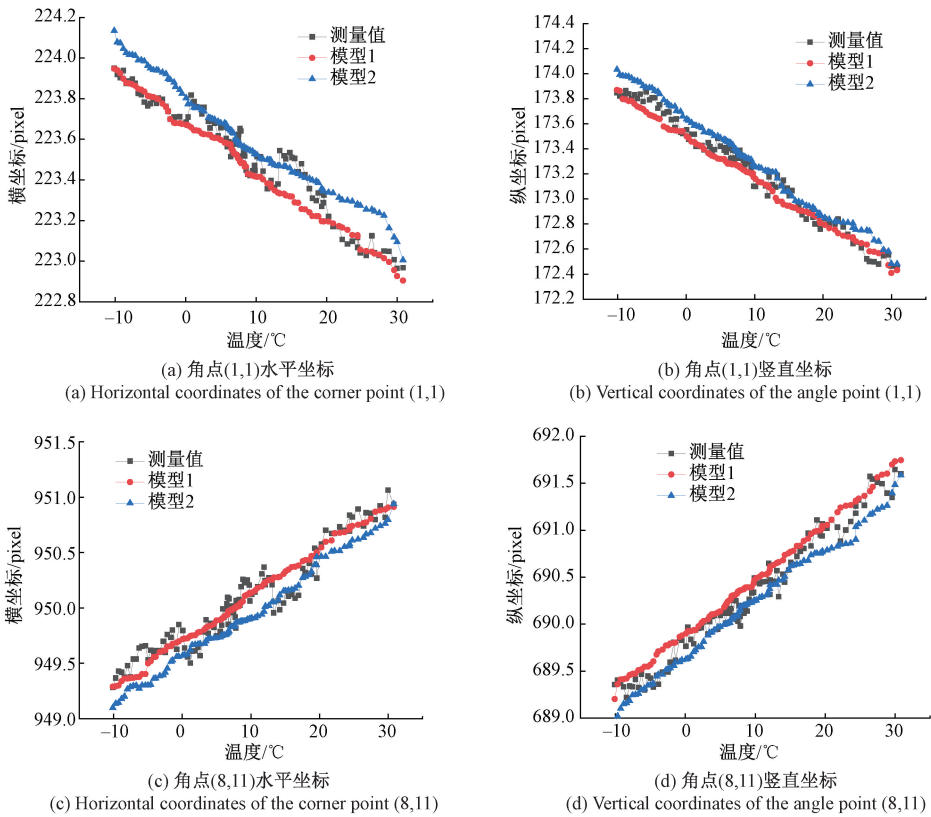


图 8 温度升高时角点补偿值与实验测量值的对比

Fig. 8 Comparison of corner point compensation coordinate values with experimental measurements at elevated temperatures

3.3 与系统辨识法对比

文献[18]曾经提到用系统辨识的方法也可以对像点温度坐标进行补偿。设置此类补偿方法与文中所提补偿方法形成对比,选取相同的初始状态和成像角点,运用系统辨识的方法对初始像点坐标漂移量进行补偿计算,将所得计算值与实测坐标值进行比较,结果如图 8 所示

(模型 2)。从图 8 可以发现,经过系统辨识的方法补偿后的像点坐标与实测值差值较小,也具有较好的温度补偿效果。为了便于对比,以像坐标实测值作为基准,将运用补偿模型后的像点坐标值与基准值作差处理,就可以得出系统辨识方法所得坐标值与实测值的误差,误差绝对值统计结果如表 2 所示。

表 2 像点漂移补偿模型误差

Table 2 Image point drift compensation model error

pixels

角点	角点(1,1)补偿模型误差值				角点(8,11)补偿模型误差值			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
数据特征								
水平	0.233	0.002	0.100	0.062	0.401	0.000 4	0.165	0.102
垂直	0.243	0.001	0.089	0.054	0.473	0.004	0.124	0.102

通过比较两种方法补偿后的误差平均值,发现两种方案对像点漂移抑制效果非常接近。考虑到系统辨识的补偿方法在确定辨识参数时要进行参数标定,这个步骤比较复杂且需要严格的标定过程,另外计算过程复杂。相比之下,本文提出的温度补偿模型参数确定简单、计算方便、更具实用性。

3.4 补偿方法总结

本文提出的基于漂移参数的温度补偿模型,可以对图像式路基沉降监测系统进行有效的补偿,总结步骤如下:1)对沉降监测系统所用型号相机进行温度漂移实验,并利用图像处理工具提取角点坐标,统计漂移数据;2)依据所得角点坐标和漂移数据,确定该型号相机漂移参数;3)利用漂移参数及补偿模型进行像素坐标补偿计算;

4)将像素补偿量换算为沉降补偿值对监测系统进行补偿。其中,步骤1)和2)可以概括为漂移参数特性标定。由于监测系统中的相机采用同厂家生产的同型号的相机,其漂移参数特性差异不大,只需做一次试验即可。步骤3)和4)可以概括为补偿计算,通过以上步骤,即可对图像式监测系统进行温度补偿。

### 3.5 监测系统补偿验证

为验证本文所提补偿方法,设计了验证实验如图9所示。在人工气候调节室进行实验,将激光安装在三轴精密位移平台上,激光前方放置一个监测单元。监测单元内部通过相机和中心定位算法确定激光中心坐标,调整激光器的高度,发现激光高度每增加2 mm,其竖直方向像素坐标增加4 pixel,即说明激光中心像素坐标与沉降量的关系为0.5 mm/pixel。保持激光与监测单元的相对位置固定不动,调节环境温度至10℃,以此为初始温度,此时纵坐标定位结果为337 pixel,改变环境温度至20℃时,纵坐标定位结果为337.8 pixel。此时由温度导致的误差为0.32 mm,经过温度补偿后纵坐标为337.2 pixel,经过换算测量精度提高了0.24 mm。即本文所提补偿方法有效地提高了监测系统测量精度。

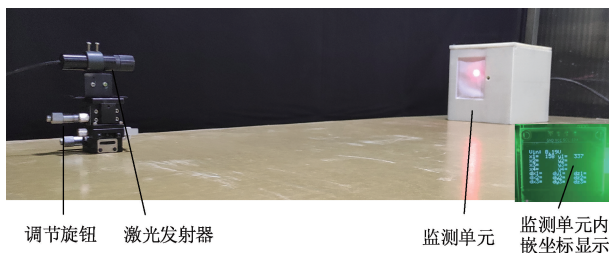


图9 监测系统温度补偿实验

Fig. 9 Temperature compensation experiment of the monitoring system

## 4 结 论

本文对图像式路基沉降监测系统中相机的热漂移进行了系统研究。首先通过理论分析推理和对简单漂移模型的改进,建立了漂移参数补偿模型。并通过实验和计算对文中所提到的温度补偿模型进行了验证。实验结果表明,本文提出补偿模型使相机的像点误差从1.0~2.5 pixel降低到0.1~0.4 pixel,对温度漂移进行了有效抑制。然后通过对比说明了该模型的优点。最后在此基础上总结了关于监测系统的温度补偿方法,并验证了该方法的有效性。这对于提高图像式路基沉降监测系统的测量精度具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 于起峰,尚洋. 摄像测量学简介与展望[J]. 科技导报, 2008, 26(24): 84-88.  
YU Q F, SHANG Y. Introduction and Prospect of photogrammetry[J]. Science and Technology Herald, 2008, 26(24): 84-88.
- [2] 孙鹏. 大尺寸动态摄影测量关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019: 27-33.  
SUN P. Research on key technologies of large-scale dynamic photogrammetry[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019: 27-33.
- [3] 闵永智,党建武,张振海. 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1621-1627.  
MIN Y ZH, DANG J W, ZHANG ZH H. Image type ballastless track surface settlement online monitoring system[J]. Optical Precision Engineering, 2013, 21(6): 1621-1627.
- [4] 闵永智,胡捷,孙天放. 图像式路基监测系统中站内多相机间位姿标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 461-469.  
MIN Y ZH, HU J, SUN T F. Inter-station multi-camera positional calibration method in image-based roadbed monitoring system[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(12): 461-469.
- [5] MIN Y ZH, TAO J, REN W Z. A high-precision online monitoring system for surface settlement imaging of railway subgrade[J]. Measurement, 2020, 159: 107707.
- [6] LAVA P, COPPIETERS S, WANG Y, et al. Error estimation in measuring strain fields with DIC on planar sheet metal specimens with a non-perpendicular camera alignment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(1): 57-65.
- [7] PAN B, YU L, WU D, et al. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 140-147.
- [8] SCHREIER H W, BRAASCH J R, SUTTON M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation[J]. Optical Engineering, 2000, 39(11): 2915-2921.
- [9] 齐乃新,张胜修,杨小冈,等. 基于相机状态方程多模增广的改进MSCKF算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 89-98.  
QI N X, ZHANG SH X, YANG X G, et al. Improved MSCKF algorithm based on multi-mode widening of camera state equation[J]. Journal of Instrumentation, 2019, 40(5): 89-98.



- [10] 康国华,张琪,张晗,等.基于点云中心的激光雷达与相机联合标定方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(12):118-126.  
KANG G H, ZHANG Q, ZHANG H, et al. Research on the joint calibration method of LIDAR and camera based on point cloud center[J]. Journal of Instrumentation, 2019,40(12): 118-126.
- [11] ROBSON S, CLARKE T A, CHEN J. Suitability of the Pulnix TM6CN CCD camera for photogrammetric measurement [C]. Videometrics II. International Society for Optics and Photonics, 1993, 2067: 66-77.
- [12] SMITH M J, COPE E. The effects of temperature variation on single-lens-reflex digital camera calibration parameters [ J ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010, 38: 554-559.
- [13] DAAKIR M, ZHOU Y, DESEILLIGNY M P, 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.
- [14] MA S, ZHOU S, MA Q. Image distortion of working digital camera induced by environmental temperature and camera self-heating [ J ]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 115: 67-73.
- [15] HANDEL H. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition[C]. Asian Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 258-268.
- [16] YU Q F, CHAO Z C, JIANG G W. The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method[J]. Image and Vision Computing, 2014;32(12):1021-1029.
- [17] 柴家贺,董明利,孙鹏,等.工业相机自热引起像点漂

移模型与补偿方法[J].红外与激光工程,2021,50(6):240-250.

CHAI J H, DONG M L, SUN P, et al. Model and compensation method of image point drift caused by self heating of industrial camera [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2021,50 (6) : 240-250.

- [18] 晁志超.摄像测量的温度补偿方法和位姿传递像机网络研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011.

CHAO ZH CH. Research on temperature compensation method of camera measurement and pose transfer camera network[D]. Changsha: National University of Defense Science and technology, 2011.

### 作者简介



**杨锋**,2018年于兰州交通大学获得学士学位,现为兰州交通大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉与数据处理。

E-mail: 750742910@qq.com

**Yang Feng** received his B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include machine vision and data processing.



**闵永智**(通信作者),2004年于武汉大学获得硕士学位,2014年于兰州交通大学获得博士学位,现为兰州交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为图像处理、机器视觉与人工智能测试。

E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn

**Min Yongzhi** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Wuhan University in 2004, and received his Ph. D. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include image processing, machine vision and artificial intelligence testing.