**基于机器视觉的水准仪补偿误差检定**

**摘要：**对十字丝图像的中心位置定位算法进行了研究，提出了一种基于机器视觉与图像处理技术的水准仪补偿误差检定算法。使用平行光管将水准仪目镜十字丝图像作为无穷远的测量目标呈现给观测者。使用CCD相机构建视觉测量系统，对采集到的图像进行处理，通过灰度平方重心法和迭代加权拟合法对十字丝图像的中心位置进行定位，得到亚像素级别的位置坐标。在标定CCD的x方向和y方向的角度格值，x轴和y轴的不垂直误差角以及光管坐标系和姿态等参数后完成对补偿误差的检定。使用Python语言完成测量程序的编写以及实验数据处理与分析。实验结果表明使用机器视觉的方法符合水准仪补偿误差检定的要求，测量结果的精确度更高，特别是当水准仪倾斜角度小的时候。且比传统方法自动化程度更高，可以降低检定人员的劳动强度，此方法对检定工作自动化具有一定借鉴意义。

**关键字**：机器视觉；图像处理；灰度重心法；拟合；亚像素；补偿误差

**中图分类号**：TH **文献标识码**：A

**Machine vision-based level compensation error verification**

（1.Institude of earthquake, China Earthquake Agency）

**Abstract:** The algorithm for locating the center position of the crossline image is studied, and a level compensation error verification algorithm based on machine vision and image processing technology is proposed. The level eyepiece crossline image is presented to the observer as an infinitely far measurement target using a parallel light tube. The visual measurement system is constructed using a CCD camera, and the acquired image is processed to locate the center position of the crossline image by the gray squared center of gravity method and the iterative weighted fitting method to obtain the sub-pixel level position coordinates. The calibration of the compensation error is completed after calibrating the angular grid values of the CCD in the x- and y-directions, the non-perpendicular error angles of the x- and y-axes, and parameters such as the coordinate system and attitude of the optical tube. The measurement program is written in Python and the experimental data are processed and analyzed. The experimental results show that the machine vision method meets the requirements of the level compensation error verification, and the accuracy of the measurement results is higher, especially when the tilt angle of the level is small. It is also more automatic than the traditional method, which can reduce the labor intensity of the calibrators.

**Keywords**：Machine vision; Image processing; Geometric center of gravity method; Fit; Sub-pixel; Compensating error

**0引言：**

水准仪是以仪器的水平视准线作为基准线，进行高差测量的计量器具。它广泛地使用于大地水准测量，地形变测量，各种工程水准测量与大型精密机械安装等。因其灵敏构件的不同又分为水准管水准仪，自动安平水准仪和数字水准仪。

自动安平水准仪补偿误差是水准仪计量性能要求中关键的一项。补偿误差是指装有补偿器的水准仪在仪器垂直轴倾斜时，会自动进行补偿，但往往因为补偿器技术不完善，无法给出的正确的补偿量，不是补偿不足就是补偿过量，此时产生的误差称为补偿误差。目前的水准仪补偿误差检定方法为：检定人员将待检仪器放到微顷台上，整平，对准测微光管使仪器十字丝与测微光管横丝吻合，旋转微顷台纵向测微器定量倾斜一个角度，倾斜后进行读数，最后求得仪器的补偿误差[1]。这种方法在人眼读数的时候需要照准水准仪十字丝和测微器的横丝，所以在倾斜角度比较小的时候会产生较大的照准误差，不确定度比较大，自动化水平低。

本文提出一种使用平行光管并以视觉测量技术为基础的水准仪补偿误差检定方法。视觉测量技术是一种以图像处理技术为核心的检测技术[2]。无穷远处的目标经过平行光管后，成像在物镜焦平面上，通过CCD图像传感器采集图像信息，利用亚像素定位技术对图像十字丝中心位置进行定位，标定平行光管的坐标系，姿态，格值以及不垂直度，利用十字丝中心坐标的改变量求得水准仪视准线的改变量，最终计算出补偿误差的大小。目前图像目标区域位置提取的方法主要有基于灰度阈值和重心的位置坐标提取法[3]；基于图像目标区轮廓分析的亚像素定位算法[4]；基于边缘梯度和霍夫变换的十字丝目标检测算法[5]；基于边缘检测算子Canny和其改进形式的方法[6]；基于一阶微分期望法定位十字丝图像的边缘位置[7]；基于多项式函数对图像边缘进行拟合定位的方法[8]，此外，还有使用卷积神经网络的算法来实现对十字像整体特征的识别和定位[9]。多种以重心法为基础的算法可以对目标图像进行亚像素定位，包括二值重心法，灰度重心法以及灰度值平方重心法[10]。考虑到在水准仪补偿误差检定工作中十字丝图像的特点以及各算法的运算量大小，最终决定使用一种基于灰度中心平方的亚像素中心位置检测算法。

平方加权重心法使用灰度值的平方代替原始灰度值，加强了灰度值较大（距离中心比较近）的像素对重心位置的影响，加大了信噪比高的像素点的权重，使算法抗干扰能力更强，精度更高[11]。除了灰度重心法以外，还有多种方法可以获得亚像素级别的位置信息。主要包括，基于矩的方法[12]，基于边缘拟合的方法[13][14][15][16][17]，基于灰度相关的方法[18]，以及基于插值的方法[19][20][21]。

**1算法原理：**

测量系统主要由硬件部分和软件部分组成。硬件部分主要包括CCD相机，平行光管，光源，微倾台，如图1所示。软件部分包括图像采集部分，图像处理部分，以及数据处理部分。

图 1 硬件系统组成

Figure 1 copm

基于机器视觉的水准仪补偿误差检定方法为：将待检水准仪放在微倾台上，并将水准仪整平，之后将水准仪的透镜对准平行光管的透镜，平行光管分划板上的图像就会作为无穷远处测量目标呈现给观测者。通过微倾台旋钮改变水准仪的倾斜姿态，呈现在CCD图像传感器中的十字丝图像也会发生对应的改变。通过测量图像之间十字丝位置的改变量来计算水准仪的补偿量，进而计算水准仪的补偿误差。原理图如图2所示，水准仪倾斜一个α角后，测量成像位置改变量Δd。

图 2 测量原理图

Figure 2 pri

测量系统的光路图如图3所示，光源发出的光照射到水准仪的目镜上，通过水准仪透镜的光线为平行光，通过平行光管后汇聚到平行光管透镜的焦平面上。

图 3 光路图

Figure 3 light

软件部分中的图像采集部分主要将CCD中的图像采集到电脑中。图像处理部分包括图像预处理部分，十字丝中心位置亚像素坐标计算部分。数据处理部分即是对定位结果的分析以及对补偿误差的计算。此外还有平行光管参数标定等程序。

**2** **算法实现：**

**2.1 测量环境搭建**

搭建视觉测量系统，使用的CCD相机分辨率设置为19201080。本算法采用Python语言（Python 3.8）实现，开发环境为PyCharm，并使用OpenCV（OpenCV-python 4.5.4）开源库构建部分基础功能函数。图4为搭建的测量测试系统，由CCD相机；平行光管，焦距为550mm；光源；微顷台；电脑和待检定的水准仪组成。

图 4 测量系统

Figure 4 system

几种常见的水准仪十字丝如图5所示，主要包括十字型和十字叉型十字丝，本文的研究目标主要为这两种十字丝图像。

图 5 常见的十字丝图像

Figure 5 common

**2.2 十字丝图像处理**

2.2.1 图像预处理

接收到CCD采集到的图像后要对图像进行一些必要的处理。图像预处理步骤如图6所示：

图 6 图像预处理

Figure 6 preprocessing

读取一幅图像过后，首先将三通道的彩色图像转为灰度化图像。然后对图像进行裁剪，去除因为摄像头原因产生的非实际图像部分。再对图像进行去噪，采用一个3×3的中值滤波器对图像进行滤波操作。最后对图像进行取反操作，这样，图像的高灰度值部分为十字丝图像，低灰度值部分为背景。经过以上几步轴就完成了对图像的预处理。

2.2.2 图像增强

经过预处理后的图像灰度级分布较为集中。对图像进行指数变换，目的是将图像的低灰度值部分进行压缩，将其高灰度值部分进行拓展，从而强调了图像的高灰度部分，这是因为在一幅十字丝图像中，十字丝图像集中在灰度值较高的部分，进行指数变换可以很好的拓展像素值变化较小的灰度级分布图像，突出图像中的细节部分。变换公式为：

F(x, y)是图像的像素灰度值，INPUT是输入图像，OUTPUT是输出图像。对原图进行的指数变换，原图中的高灰度值部分得到拓展，也就是说，十字丝图像的更多细节部分被强调，可以在拓展灰度级的同时较好的平衡噪声与原信号。

2.2.3 基于图像形态学处理确定ROI

ROI（Region of Interest）即感兴趣区域，是需要进行重心计算的区域。使用形态学方法确定拟合的起始点和终止点。对上述图像增强后的图像进行二值化阈值处理，选取合适的结构元对图像进行膨胀后再乘以原图像，就得到了进行拟合的区域，过程如图7所示：

图 7 roi

Figure 7 roi

在ROI内使用灰度重心法，计算重心位置，如图8所示。

图 8 重心计算区域

Figure 8 重心计算区域

**2.3 基于灰度平方重心法的亚像素图像十字丝坐标计算模型**

经过灰度化处理的图像都可以看成一个由图像灰度值组成的二维矩阵。假设一副图像由W行L列像素组成，那么，图像第i行的像素分布模型为：

图像第j列的像素分布模型为：

其中f(i,j)为对应位置上的灰度值。

重心法进行亚像素定位时需设定阈值为T，即只有灰度值大于T的像素点会参与运算。对原图像src阈值进行处理，即图像对应像素位置灰度值进行如下变换：

图 9 灰度阈值变换

Figure 9 gray value

大于阈值T的像素，其灰度值保持不变，对于小于阈值T的像素，其灰度值则置为0。

提取出了图像的目标区域，设目标区域起始位置为start，结束位置为end，所以，在目标区域内，用灰度重心法计算目标区域内第i行的重心坐标为：

用灰度重心法计算目标区域内第j列的重心坐标为：

本文采用的是基于灰度值平方的重心法，即，目标区域内第i行的重心坐标为：

区域内第j列的重心坐标为：

使用算法进行定位后，记录一系列posi和posj点，对posi和posj进行最小二乘法拟合，拟合出两条直线，l1: y=ax+b, l2: y=cx+d。得到图像十字丝中心位置亚像素坐标为：

**2.4 对定位结果进行拟合**

2.4.1 概述

如果待拟合的数据集合存在少量离群点，使用最小二乘法对数据点进行拟合会得到满意的效果，但当数据集中存在较多的离群点时，最小二乘法的结果会变得不可靠。使用迭代重加权最小二乘法，在一步步的迭代之后，会降低那些离群点在最后拟合中的权重，相比于标准最小二乘法每个点的权重都是一样的，IRLS法在离群点多的数据集中更可靠[23]。

2.4.2 基于IRLS法拟合直线

设直线方程为y=kx+b

建立最小化误差函数E：

引入距离权值

分别对k和b求偏导：

写成矩阵形式：

通过上式可以解出k和b。在第一次进行迭代时，使用的时标准最小二乘法。即。

在目标区域内，利用灰度重心法进行亚像素定位并对定位的结果进行拟合。拟合点和拟合直线如图10所示：

图 10 拟合点和拟合直线

Figure 10 拟合点和拟合直线

拟合得到的直线l1和直线l2以及交点p，如图11所示

图 11 拟合结果

Figure 11 拟合结果

**2.5 CCD光管的标定**

CCD图像传感器输出的图像坐标是图像平面格值坐标，而水准仪补偿误差检定中需要测量的是角度信息，因此需要通过标定将图像平面格值转换为角度。在精确识别光学角度仪器的十字丝目标及亚像素拟合十字丝中心的基础上，利用其望远镜十字丝作为测量目标对准平行光管，在CCD图像传感器去中成像，获取十字丝中心像平面坐标，同时读取仪器角度测量示值，在成像范围内均匀测量N个校准点，利用校准点坐标信息角度示值拟合参数。

利用全站仪作为角度标准，对相机x轴的旋转角θ，影像测量平行光管x, y方向的角度格值kx, ky，影像测量平行光管的y轴与x轴不垂直误差角p进行标定。测量得到N组校准点，每组数据为十字丝中心位置的亚像素坐标(x,y)以及对应的经纬仪水平角h以及天顶距v，根据转换关系公式2-18

令，有

矩阵形式：

拟合值：

差平方和最小，

得

标定结果：kx≈1.04″/像素 ，ky≈1.06″/像素 ，θ≈-0.0068 ，p≈-8.33×10-3 。取图像的中心点坐标（957.5， 539.5）为原点，每次对竖直角（相对于原点）v进行读数。

**3实验数据分析**

**3.1 对十字丝图像中心位置的模拟定位。**

可以使用模拟图像检验法，建立数学模型，通过计算机软件生成模拟图像以代替实际图像，验证算法的性能与精度[24]。使用制作好的已知十字丝图像中心位置坐标的图像对上述亚像素定位算法就行仿真实验。共有5幅已知十字丝中心位置坐标的图像，每幅图像的尺寸大小为1600×1200。使用的仿真图像共有五幅，每幅模拟图像的十字丝的亮度，宽度以及中心位置各不相同，如图12所示：

图 12 模拟图像

Figure 12 moni

定位的结果如表1所示

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | IMAGE1 | | IMAGE2 | | IMAGE3 | | | IMAGE4 | | IMAGE5 | |
|  | X | Y | X | Y | X | Y | X | | Y | X | Y |
| 理论坐标 | 799.90 | 599.90 | 959.70 | 539.70 | 479.90 | 539.90 | 959.90 | | 269.90 | 1359.90 | 939.90 |
| 定位结果 | 799.90 | 599.90 | 959.67 | 539.69 | 479.88 | 539.89 | 959.89 | | 269.90 | 1359.94 | 939.92 |
| 误差 | 0 | 0 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | | 0 | 0.04 | 0.02 |

表 1 模拟图像定位结果

Table 1 模拟图像定位结果

由上表可知，本文算法对模拟图像的定位误差在0.1个像素以内。

**3.2 对实际十字丝图像中心位置的定位。**

搭建视觉测量系统后，对三类十字丝图像进行定位实验。采集得到的三幅图像如图13所示：

图 13实际图像

Figure 13 实际图像

定位的结果如表2所：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Image1 | | Image2 | | Image3 | |
| x | y | x | y | x | y |
| 亚像素坐标 | 927.5 | 645.1 | 788.0 | 643.0 | 1035.7 | 658.1 |
| MSE | 0.017 | 0.019 | 0.023 | 0.050 | 0.021 | 0.019 |

表 2 实际图像定位结果

Table 2 实际图像定位结果

对定位的结果采用样本均方误差（MSE）评判其定位的准确与否，MSE越小，定位的误差越小。

**3.3 测量系统测试**

对CCD相机θ角进行标定后，测量水准仪的补偿误差。首先将一台北京博飞仪器公司生产的DZS3-1自动安平水准仪放置到微倾台上，高度调至与平行光管一致，在视觉系统内将十字丝目镜十字丝图像调清晰。将水准仪气泡调平。调平时的位置为0′。具体的测量过程为：从-8′（前倾）开始到8′（后倾）不等间隔测量，从8′转动微倾台旋钮到-2′，每次的转动量为2′，从-2′到2′，每次的转动量为1′，从2′到8′，每次的转动量为2′。从起始位置开始的每一个点，测量记录5次数据，计算这5个数据的平均值，以该平均值作为一次测量的结果，一共进行三次测量。三次测量结果，每个角度值的平均值以及三次测量的重复性如表3所示，重复性计算公式：设共有i次测量，每次测量j个点，那么第i此测量第j个点的测量结果为yij，则测量重复性

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数  角度值 | 1 | 2 | 3 | 平均值 | 重复性 |
| -8′ | 113.76″ | 113.61″ | 113.68″ | 113.68″ | 0.20 |
| -6′ | 115.14″ | 115.20″ | 114.92″ | 115.09″ |
| -4′ | 116.28″ | 116.53″ | 116.34″ | 116.38″ |
| -2′ | 117.80″ | 117.89″ | 117.40″ | 117.70″ |
| -1′ | 117.92″ | 118.00″ | 118.33″ | 118.08″ |
| 0′ | 118.84″ | 118.59″ | 118.90″ | 118.78″ |
| +1′ | 119.79″ | 119.34″ | 119.68″ | 119.60″ |
| +2′ | 120.52″ | 120.45″ | 120.66″ | 120.54″ |
| +4′ | 121.15″ | 120.71″ | 121.23″ | 121.03″ |
| +6′ | 123.42″ | 123.21″ | 123.12″ | 123.25″ |
| +8′ | 124.88″ | 124.20″ | 124.43″ | 124.50″ |

表 3三次测量结果

Table 3 三次测量结果

将三次测量的结果绘制成折线图，如下图所示。

图 14 三次测量折线图

Figure 14 三次测量折线图

在水准仪综合检校平台上，对同一台水准仪采用光学方法测量其补偿误差，将水准仪置于微倾台上，如图所示，同样，从-8′到+8分测量，并且将结果记录到表中。测得的数据如表4所示：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 角度值 | -8′ | -6′ | -4′ | -2′ | -1′ | 0′ | +1′ | +2′ | +4′ | +6′ | +8′ |
|  | 6.1″ | 6.1″ | 7.9″ | 9.5″ | 10.5″ | 10.9″ | 11.4″ | 12.5″ | 14.1″ | 14.9″ | 16.1″ |

表 4 光学法测量结果记录表

Table 4 光学法测量结果记录表

根据测量结果计算水准仪补偿误差，补偿误差计算公式：

本文算法和传统光学方法在各个点的补偿误差值，标准差，以及线性程度（使用皮尔逊相关系数描述，越接近1说明线性关系越强）如表5所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 角度值 | 本文方法 | 传统方法 |
| -8′ | 0.65 | 0.60 |
| -6′ | 0.66 | 0.80 |
| -4′ | 0.64 | 0.75 |
| -2′ | 0.75 | 0.70 |
| -1′ | 0.57 | 0.40 |
| +1′ | 0.78 | 0.50 |
| +2′ | 0.88 | 0.80 |
| +4′ | 0.58 | 0.80 |
| +6′ | 0.70 | 0.67 |
| +8′ | 0.69 | 0.65 |
| 标准差 | 0.09 | 0.14 |
| 线性度 | 0.998 | 0.993 |

表 5 两种方法补偿误差测量对比

Table 5 duibi

图 15 补偿误差对比

Figure 15 补偿误差对比

实验结果表明，使用机器视觉测量系统对水准仪的补偿误差进行测量在重复性，标准差，测量时间以及自动化程度均优于传统光学方法。综上所述，该方法是可行的。

**4结束语**

本文介绍了一种基于机器视觉的水准仪视觉误差检定方法。采用图像处理技术对水准仪目镜十字丝图像进行处理后，通过灰度重心法确定十字丝的亚像素级中心位置，使用迭代加权最小二乘法对灰度重心法得到的十字丝的中心位置进行拟合，得到两条拟合直线，两条直线的交点确定为十字丝的中心位置。将图像的坐标信息与水准仪竖直角信息进行标定，搭建视觉测量系统后，通过计算十字丝的中心的改变量得到水准仪的竖直角的改变量。最后得到水准仪的补偿误差，并且在水准仪综合检定平台上对同一台水准仪的补偿误差进行检定，综合分析对比传统方法与本文算法。

基于机器视觉的算法的标准差小于传统方法。但由于实际的视觉测量过程中，存在因实验平台振动引起的随机噪声误差，导致水准仪的十字丝抖动，进而会影响定位结果的精密度。下一步的研究工作将进一步提高算法的鲁棒性和适用性以及测量系统的自动化程度，以满足仪器检定工作的需求。

**参考文献**

1. JJG 425-2003 水准仪 [S]
2. 邾继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 机械工业出版社, 2012.
3. 甘宏,张超,李林,罗文婷.复杂背景下激光条纹中心亚像素提取方法[J].光电工程,2019,46(02):85-92.
4. 张亿,史雨辉,路杰,郑勇,黄兴.基于机器视觉的经纬仪检定辅助观测装置设计[J].电子技术与软件工程,2021(20):98-100.
5. 李立春, 冯卫东, 于起峰. 根据边缘梯度方向的十字丝目标快速自动检测[J]. 光学技术, 2004, 30(3):4.
6. 高燕，侯艳杰，夏霏，等．改进的 Canny 算子在靶场光学数据处理中的应用［J］． 无线电工程，2019，49( 8) : 689－ 694.
7. 徐凤茹, 林玉池, 赵美蓉,等. 基于视觉跟踪式自准直仪的十字线提取技术[J]. 激光与红外, 2011, 41(11):4.
8. 王楚,王亚刚.基于拟合的亚像素边缘检测的算法比较[J].软件导刊,2018,17(02):60-62+67.
9. 武华敏, 杨漠雨, 黄晓雪,等. 基于CNN的十字像中心检测[J]. 光学仪器, 2019, 41(5):10.
10. Zhou J , Chen X L , Li S J , et al. Centroid Localization Algorithm Based on Bicubic Interpolation Gray Square Weighted[J]. Advanced Materials Research, 2013, 655-657:895-899.
11. Liu C , Gao Y , Yong Z . Squared gray weighted centroid algorithm based on bi-cubic interpolation[C]// International Symposium on Instrumentation Science & Technology. International Society for Optics and Photonics, 2009.
12. 黄霄霄,吕勇,刘力双.红外图像边缘亚像素定位算法研究[J].激光杂志,2020,41(12):57-60.
13. 尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1):179-181.
14. 刘凌霄,王德成,程鹏,郎宁.基于改进亚像素算法的弹簧内外径尺寸检测[J].光学技术,2021,47(05):587-593.
15. 孙维健. 基于反正切函数拟合的亚像素边缘检测方法[D]. 长春工业大学, 2015.
16. 段振云, 王宁, 赵文辉,等. 基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法[J]. 计量学报, 2016, 37(4):4.
17. Chen P , Chen F , Han Y , et al. Sub-pixel dimensional measurement with Logistic edge model[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(9):2076-2080.
18. 潘兵, 续伯钦, 陈丁,等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报, 2005, 26(2):7.
19. 孙秋成, 周亚洲, 宁闯,等. 基于三次样条插值的亚像素边缘检测方法[J]. 控制工程, 2014, 21(2):4.
20. 来跃深, 陈琛, 田军委,等. 高斯插值亚像素边缘检测算法的优化[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(10):6.
21. 张美静, 石振刚. 改进形态学梯度的样条插值亚像素边缘检测方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2012, 31(3):5.
22. 阮秋琦. 数字图像处理学（第三版）[M]. 北京：电子工业出版社, 2013.1
23. Mohan K , Fazel M . Iterative reweighted least squares for matrix rank minimization[C]// 2010 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). IEEE, 2011.
24. 何平安, 杨燕思, 范若. 基于曲面拟合相关法的十字丝目标中心定位算法研究[C]// 第十三届全国光学测试学术讨论会. 0.r