

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205767

基于轮廓的圆形仪表自动透视校正*

胡东华 闫坤 辛文凯 曹宇 甘海铭

(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541000)

摘要:针对利用机器视觉对圆形仪表进行读数识别的过程中,由于镜头平面与仪表平面不一定平行导致采集图像发生几何畸变的问题,提出一种基于轮廓的圆形仪表自动透视校正算法。该算法分为校正矩阵估计与图像校正两个部分,首先通过圆形仪表的轮廓来计算校正矩阵,再利用双线性插值校正畸变图像,该算法只需要获得圆形仪表轮廓的坐标集合就可以校正畸变图像。仿真实验结果表明,基于轮廓的校正算法与传统四点投影变换算法相比,校正精确度提高了2%~6%,同时实际仪表校正实验也表明轮廓校正算法有着更高的精确度以及稳定性,对圆形仪表的自动读数的预处理有实际应用价值。

关键词: 图像预处理;几何校正;圆形仪表;椭圆拟合;图像插值

中图分类号: TP391;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6

Contour-based automatic perspective correction for circular meters

Hu Donghua Yan Kun Xin Wenkai Cao Yu Gan Haiming

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: A contour-based automatic perspective correction algorithm for circular meters is proposed for the problem of geometric distortion of the collected images in the process of using machine vision to recognize the readings of circular meters. The algorithm is divided into two parts: correction matrix estimation and image correction. First, the correction matrix is calculated by the outline of the circular meter, and then the distorted image is corrected by bilinear interpolation, the algorithm only needs to obtain the coordinate set of the outline of the circular meter to correct the distorted image. The simulation experiment results show that the correction algorithm based on contour can improve the correction accuracy by 2%~6% compared with the traditional four-point projection transformation algorithm, and the actual instrument calibration experiment also shows that the contour calibration algorithm has higher accuracy and stability. It has practical application value for automatic reading of circular meters.

Keywords: image preprocessing; geometric correction; circular meters; ellipse fitting; image interpolation

0 引言

随着机器视觉技术的发展,一些巡检机器人或者固定位置的相机可以拍摄仪表并利用图像处理技术进行读数,取代人工巡逻读数,实现自动化监测生产设备^[1-2]。但在实际应用中,相机平面与仪表平面存在一定角度,导致相机所拍摄的仪表图像发生了几何畸变,这种拍摄角度造成的图像变形对于后续的图像处理造成了很大的困

难,因此仪表读数的关键步骤就是对畸变的仪表图像进行校正。

目前对于图像的畸变校正,多数基于外形轮廓为几何矩形的目标,例如方形仪表^[3]、芯片^[4]、车牌^[5-6]和二维码^[7]等,这类方法根据目标的边界线交点找到透视变换参考点。但对于圆形仪表,其轮廓没有明显的参考目标,难以获得准确的变换参考点。部分研究者通过人眼目测手动标记参考点^[8],但人的主观因素以及复杂的生产环境对误差的影响较大,因此部分研究者使用模版匹配的

收稿日期: 2022-08-20 Received Date: 2022-08-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(62101147)、广西自然科学基金(桂科 2020GXNSFAA159146)、广西创新驱动发展专项(桂科 AA21077008)、“认知无线电与信息处理”教育部重点实验室基金项目(CRKL190108)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2021YCX032)资助

方式^[9-11],寻找目标仪表中的参考点或者人为添加参考点,但这类方法对匹配模板样式要求比较严格,对于不同的仪表样式要设计不同的匹配模版,不同匹配模版的选择也对校正误差存在影响。

针对目前圆形仪表校正方法的不足,本文提出一种基于轮廓的圆形仪表自动透视校正算法,通过拟合仪表的轮廓,构造变换矩阵,有效解决了圆形仪表的校正问题。

1 基于轮廓的自动校正算法

本文设计的自动校正算法主要分为校正矩阵估计与图像校正两部分。算法流程如图1所示,其中源图像表示在不同角度下采集到的仪表图片,目标图像表示校正后仪表轮廓为正圆的图像。

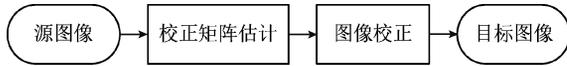


图1 校正算法流程

Fig. 1 The process of correction algorithm

1.1 校正矩阵估计

相机拍摄得到的源图像为真彩色图像,图像中的每个像素点的颜色由 R 、 G 、 B 三个分量决定。为了便于后续进行椭圆拟合,需要对源图像进行灰度化处理,对源图像中每个像素点的 R 、 G 、 B 分量进行加权计算,得到图2(a)所示的灰度化图像 I 。

$$I = 0.2989 \times R + 0.5870 \times G + 0.1140 \times B \quad (1)$$

为了获得仪表轮廓的坐标点,需要通过椭圆拟合在图像中找到仪表轮廓。椭圆拟合的基本思想是使用椭圆方程去表示图像上特定像素点的分布,即找到一个椭圆,使得平面上的特定像素点集合尽可能多的靠近这个椭圆。目前椭圆拟合常用方法有最小二乘拟合^[12-14]、霍夫变换拟合^[15]和五点拟合^[16]等。圆形仪表中的轮廓样式多为密集的刻度线或者圆弧线条,因此本文使用了一种基于弧线段的椭圆拟合方法^[17],该方法利用圆弧的最小二乘值点对直线的最小二乘值点进行过滤,并合理利用局部区域的整体梯度方向、弧方向和极性几何特征,保证了高精度的椭圆拟合,拟合的效果如图2(b)所示。

得到拟合的椭圆之后,如图3(a)所示建立坐标系 (x_a, y_a) 。设此时仪表轮廓的坐标集合定义为 $\beta \triangleq [X_a \ Y_a]^T$,其中 X_a 与 Y_a 分别表示椭圆轮廓坐标点在坐标系 (x_a, y_a) 上构成的二维点集合,椭圆轮廓的几何中心计算如下:

$$\mathbb{E}[\beta] = [\lambda_a \ \mu_a]^T \quad (2)$$

其中, $\mathbb{E}[\beta]$ 表示对坐标集合 β 求数学期望, λ_a 和



(a) 仪表灰度图像
(a) Grayscale image of the meter
(b) 拟合椭圆
(b) The fitted ellipse

图2 仪表轮廓拟合椭圆

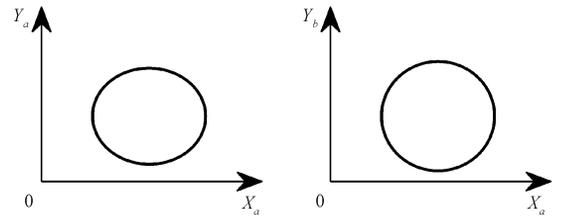
Fig. 2 Fitting ellipse of meter profile

μ_a 分别表示椭圆轮廓几何中心的横纵坐标值。

若设校正之后的仪表轮廓为正圆,如图3(b)所示,令该坐标系为 (x_b, y_b) 。设正圆轮廓坐标点集合为 $\gamma \triangleq [X_b \ Y_b]^T$,正圆的圆心为 $\mathbb{E}[\gamma] = [\lambda_b \ \mu_b]^T$,那么从坐标系 (x_b, y_b) 到坐标系 (x_a, y_a) 的变换为:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \end{bmatrix} = \mathbf{H} \times \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{H} 为变换矩阵。



(a) 椭圆轮廓坐标系
(a) Coordinate system of ellipse
(b) 正圆轮廓坐标系
(b) Coordinate system of circle

图3 椭圆与正圆坐标系

Fig. 3 Coordinate systems of ellipse and circle

对正圆坐标集合构造矩阵:

$$\mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X_b - \lambda_b \\ Y_b - \mu_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_b - \lambda_b \\ Y_b - \mu_b \end{pmatrix}^T \right] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 \\ 0 & \varepsilon_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\varepsilon_x = \mathbb{E}[(X_b - \lambda_b)^2]$, $\varepsilon_y = \mathbb{E}[(Y_b - \mu_b)^2]$,由于轮廓为正圆,此时 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = r^2/2$, r 为正圆半径。

根据式(3)和(4)可得:

$$\mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X_a - \lambda_a \\ Y_a - \mu_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_a - \lambda_a \\ Y_a - \mu_a \end{pmatrix}^T \right] = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \frac{r^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{r^2}{2} \end{bmatrix} \mathbf{H}^T \quad (5)$$

将式(5)等号左边的实对称矩阵进行特征值分解:

$$\mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X_a - \lambda_a \\ Y_a - \mu_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_a - \lambda_a \\ Y_a - \mu_a \end{pmatrix}^T \right] = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^T \quad (6)$$

其中, \mathbf{Q} 和 $\mathbf{\Lambda}$ 分别表示相应的特征向量与特征值矩阵。

将 \mathbf{H} 矩阵进行奇异值分解:

$$H = USV^T \quad (7)$$

其中, V 表示原始域的标准正交基, U 表示经过了 H 变换后的标准正交基, 设 $V = \text{diag}(1, 1)$ 。

根据式(5)~(7), 可以得到:

$$Q\Lambda Q^T = \frac{r^2}{2} US^2 U^T \quad (8)$$

根据式(8)可推:

$$\begin{cases} U = Q \\ S = \frac{\sqrt{2}}{r} \Lambda^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (9)$$

因此可得:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{r} Q\Lambda^{\frac{1}{2}} V^T \quad (10)$$

推导证明, 虽然镜头下的圆形仪表的轮廓存在畸变, 但只要采集仪表轮廓坐标点构造相关矩阵进行特征值分解, 就可以获得一个校正矩阵 H , 利用这个矩阵可以将仪表的轮廓从椭圆变换到正圆。

1.2 图像校正

这一步利用计算出的变换矩阵 H 对整个图像进行变换。首先将真彩色源图像分离为 R 、 G 、 B 三个单通道的灰度图, 再进行插值变换。图像插值变换的原理是对于目标图像中的像素点, 将其按照变换矩阵对应到源图像中, 寻找源图像汇总对应点的像素值, 但计算得出的源图像中对应像素点的横纵坐标值可能为小数, 因此需要插值处理。

最邻近插值^[18]、双线性插值^[19-20]和双三次插值^[21]是图像变换中常用的线性插值方法。其中当源图像的分辨率较低时, 最邻近插值方法得到的结果图像在边缘部分会产生比较严重的马赛克现象。双三次插值获得的图像在边缘上的效果最好, 但代价是计算量大, 计算耗时较长。表 1 为分辨率为 1 200×900 的源图像使用 3 种插值方式的耗时对比。综合考虑插值变换的效果以及计算耗时, 本文使用双线性插值方法对源图像进行变换。

表 1 3 种插值方式对比

Table 1 Comparison of three interpolation methods

插值方式	插值耗时/s
最邻近	0.491 8
双线性	0.530 6
双三次	6.186 1

双线性插值利用源图像的 4 个点去计算目标图像的 1 个点。原理如图 4 所示, 设目标图像中的像素点 $T(x_s, y_s)$ 对应源图像中的 $S(x_s, y_s)$, 源图像中的点横纵坐标值 x_s 与 y_s 不一定为整数, 找到距离点 (x_s, y_s) 最近的 4 个整数点坐标 (i, j) 、 $(i + 1, j)$ 、 $(i, j + 1)$ 和 $(i + 1, j + 1)$, 分别在 x 轴和 y 轴上进行线性插值。计算公式如下:

$$S(x_s, y_s) = (1 - u)(1 - v)S(i, j) + u(1 - v)S(i + 1, j) + v(1 - u)S(i, j + 1) + uvS(i + 1, j + 1) \quad (11)$$

其中, $u = x_s - i, v = y_s - j$ 。

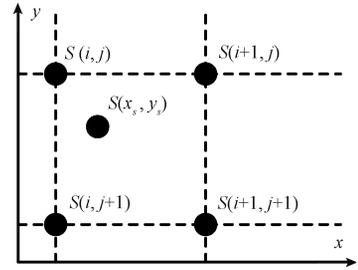


图 4 双线性插值原理

Fig. 4 The principle of bilinear interpolation

如图 5 所示, 不同角度拍摄的各种样式圆形仪表通过校正都能将刻度线还原到正圆, 便于后续的读数。

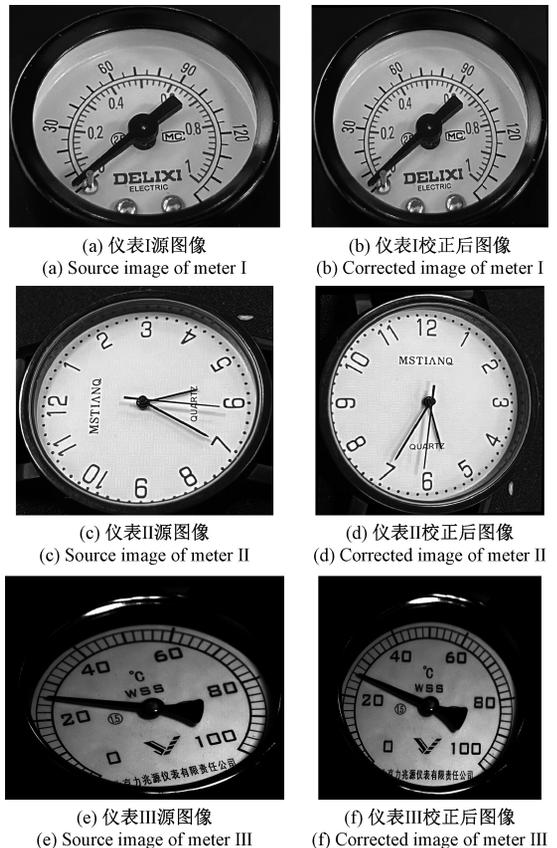


图 5 不同样式仪器校正效果

Fig. 5 Calibration effect of different types of meters

2 仿真实验与误差分析

2.1 仿真模板设计

为了更好地统计不同算法的误差, 将常见的圆形仪表简化成线与点的形式。设计图 6(a) 所示的模版, 在圆

环上标记 8 个点模拟仪表的刻度,中间的标记点表示仪表的圆心,根据实际圆形仪表的参数,将模板的圆形轮廓与标记点的半径像素比设为 35 : 1。通过设置模板的方位角 Az 与仰角 El 来模拟不同角度下拍摄的圆形仪表图像,方位角与仰角如图 6(b) 所示,不同角度参数的模板图像如图 6(c)、(d) 所示。

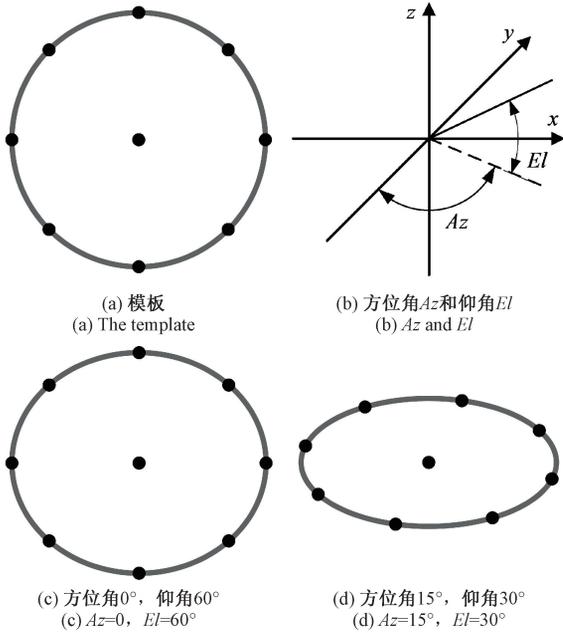


图 6 实验模板设计
Fig. 6 Design of experimental template

2.2 角度误差评估

大部分研究者使用仪表的指针角度来判断仪表的校正准确率^[22],但仪表指针角度不能完全代表整个仪表平面上的校正情况,因此本文提出一种基于多个角度的校正准确率计算方法。误差评估的图像处理流程如图 7 所示。

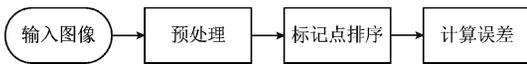


图 7 轮廓校正误差评估流程

Fig. 7 Error evaluation of contour correction algorithm

其中输入图像为校正后的图像,图 6(d) 模板在轮廓校正算法下的校正效果如图 8(a) 所示,预处理对其进行一个初步的处理,主要是进行阈值分割。

阈值分割可分为固定阈值与自适应阈值,根据模板图像的特点以及准确得到标记点区域,减少后续角度的计算误差,使用了固定阈值分割:

$$O(r,c) = \begin{cases} 255, I(r,c) > T \\ 0, I(r,c) \leq T \end{cases} \quad (12)$$

其中, $I(r,c)$ 和 $O(r,c)$ 分别表示输入和输出图像

第 r 行第 c 列像素的灰度值, T 表示设置的阈值。

利用固定阈值分割出图像中的标记点区域后,如图 8(b) 所示,以中心点区域几何中心为原点建立坐标系,将图像分为 4 个象限,对 8 个轮廓标记点进行排序,分别计算 8 对相邻轮廓标记点区域 $P_i(x_i, y_i)$ 、 $P_j(x_j, y_j)$ 与中心点区域几何中心 $C(x_c, y_c)$ 连线的夹角 θ_i , 得到夹角集合 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_8\}$ 。夹角计算公式如下:

$$\theta_i = \arccos \frac{l_{ic}^2 + l_{jc}^2 - l_{ij}^2}{2l_{ic}l_{jc}} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, 8 \quad (14)$$

$$j = \begin{cases} i + 1, i < 8 \\ 1, i = 8 \end{cases} \quad (15)$$

其中, l_{ic} 和 l_{jc} 分别表示第 i 、 j 个轮廓点与中心点的距离, l_{ij} 表示第 i 个轮廓点与第 j 个轮廓点之间的距离,单位为 pixel。

校正的角度精确率 CA 计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\theta_i - \tau)^2}{8}} \quad (16)$$

$$CA = \frac{\tau - \sigma}{\tau} \quad (17)$$

其中,角度标准值 $\tau = 45^\circ$,精确率 CA 表示校正后图像相邻轮廓标记点与中心点夹角偏离标准值 τ 的程度。

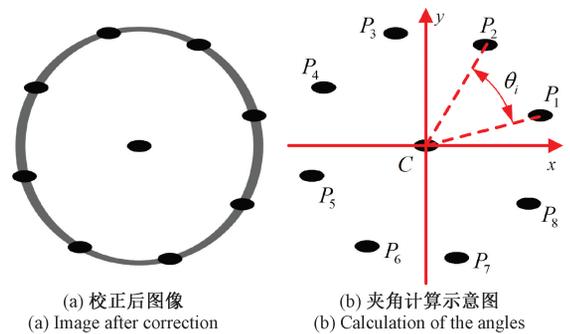


图 8 区域分割与角度计算

Fig. 8 Segmentation of regions and calculation of the angle

现有常用的校正方法利用投影变换原理,在变换前需要至少确定 4 组参考点^[23]。四点校正算法的误差评估流程如图 9 所示。

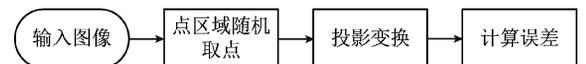


图 9 四点校正算法误差评估流程

Fig. 9 Error evaluation of four-point correction algorithm

其中输入图像是没有经过校正的原始图像,为了模拟实际人为标定参考点带来的误差,选择 4 个不共线的标记点作为投影变换参考点区域,分别在各个参考点区

域中随机选择一个坐标点作为投影变换的参考点。投影变换后图像的角度误差计算方式与式 (13) ~ (17) 相同, 重复随机选取参考点做 n (n 的值等于标记点区域像素面积的两倍) 次投影变换, 最后计算准确率集合的统计期望 $E[CA]$ 。

仿真实验中共设计了 3 种像素半径 (120、600 和 1 200) 的模板, 并在不同的方位角与仰角下评估两种校正方法的误差情况。图 10 (a)、(b) 分别为 120 与 1 200 pixels 半径轮廓的模板在不同方位角下两种校正方法的精确度对比。数据表明轮廓校正方法在不同像素大小和不同角度的目标下与四点校正方法相比校正精确度提高了 2% ~ 6%。在小仰角的情况下, 模板轮廓椭圆度大, 此时四点校正算法随机选取的参考点与变换目标点的欧氏距离较大, 校正算法将目标从椭圆变为正圆的这个变换幅度较大, 大幅度的投影变换加重了随机选取参考点时的误差对校正精确度的影响, 而轮廓校正方法选择的参考点是拟合目标的轮廓得到的一组坐标点集合, 与传统的四点校正方法相比, 变换选择的参考点误差可以忽略不计, 因此在小仰角、目标轮廓椭圆度大的情况下, 轮廓校正方法的校正效果提升最为明显。

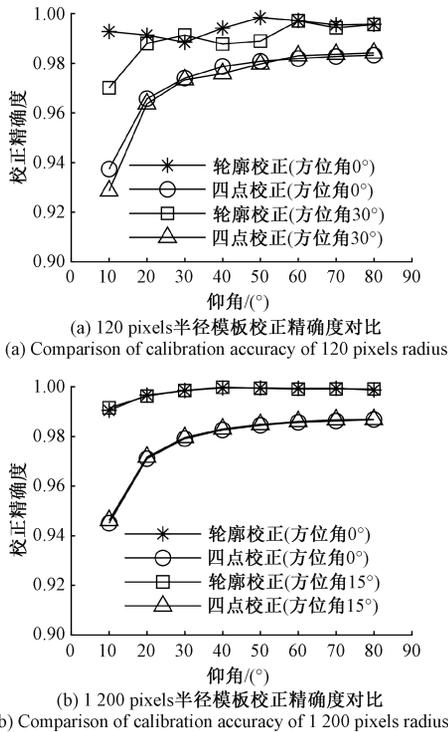


图 10 两种校正算法的精确度对比

Fig. 10 Accuracy comparison of two calibration algorithms

仿真实验也对比了轮廓校正方法在不同像素大小的目标下的校正精确度情况。结果数据如图 11 所示, 实验结果表明待校正图像的分辨率越高, 校正效果越好, 同时

也遵循仰角越高, 精确度越高的规律。原因是校正方法采用的线性插值算法是利用已有的像素点去计算估计变换后的像素点, 图像分辨率低的情况下, 描述图像信息的像素点数量少, 线性插值后的图像边缘处的马赛克效应更加明显, 增加了校正误差, 导致校正精确度低。同时由于椭圆拟合算法的效果与目标的轮廓椭圆度正相关, 在仰角较小的时候, 模板轮廓的椭圆拟合效果较差, 算法的校正精确度也相对较低。

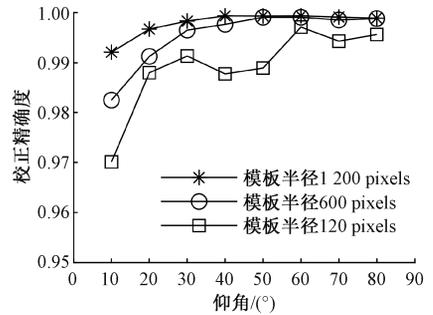


图 11 不同像素半径模板的轮廓校正精确度对比
Fig. 11 Comparison of contour correction accuracy of templates with different pixel radius

3 仪表图像校正误差分析

实际的仪表读数算法中, 图像的畸形校正只是预处理中的一部分, 算法的最终目的是能够准确读出仪表当前的示数。

为了验证本文提出的自动校正算法在实际仪表读数的有效性, 如图 12 所示, 采集了不同样式以及不同角度下的实际仪表图像, 分别使用两种校正算法进行畸变校正, 并使用相同的读数算法, 比较最后的读数精确度。

仪表的读数方法使用工业中常用的角度法^[23], 该方法通过图像处理技术获得仪表图像的中心点、指针和零刻度位置, 根据指针与零刻度的夹角计算出当前仪表的读数 V_r , 计算公式如下:

$$V_r = \omega \times \eta \tag{18}$$

其中, ω 表示零刻度与指针之间的夹角, η 表示表盘上的刻度对应实际角度的比值。计算出仪表的读数之后与人工读出的估计读数做比较, 通过角度比值来计算校正精确度 $\bar{\omega}$:

$$\bar{\omega} = 1 - \frac{|V_r - V_i|}{V_i} \tag{19}$$

实际仪表读数的结果如表 2、3 所示, 从结果数据可以看出实际仪表的校正中, 与四点校正方法相比, 采用轮廓校正方法的仪表读数精确度有着明显的提升, 最高相差 7%, 这个结果与仿真实验相符合。

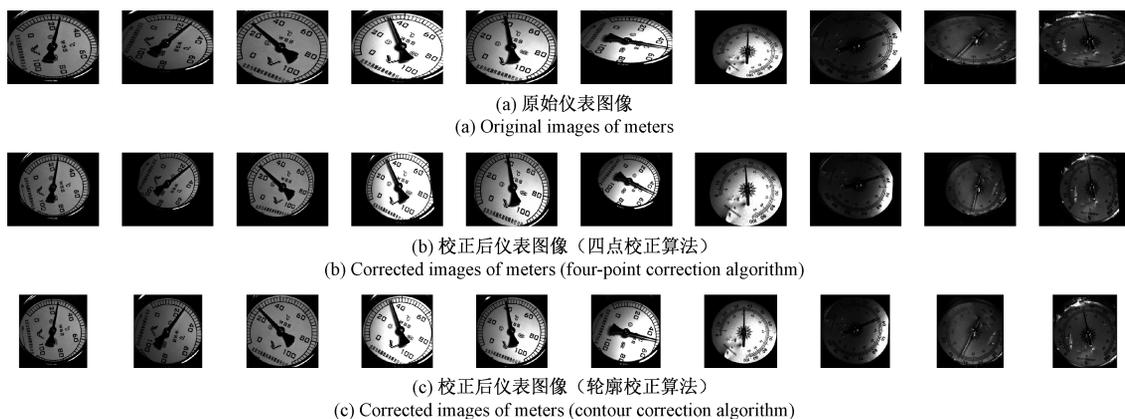


图 12 仪表校正示意图

Fig. 12 Correction diagrams of meters

表 2 温度计仪表的校正精确度对比

Table 2 Comparison of calibration accuracy of thermometers

图像 序号	校正方法		实际示数 (温度/℃)	估计精确度	
	轮廓校正 仪表读数估计值 (温度/℃)	四点校正		轮廓校正	四点校正
1	23.57	26.40±1.13	24.10	97.80%	90.39%±4.52%
2	22.64	26.34±1.27	24.10	93.40%	90.63%±5.16%
3	24.87	25.23±0.99	24.80	99.70%	96.41%±2.79%
4	32.09	34.02±1.13	32.40	99.05%	94.72%±3.04%
5	38.59	39.81±1.12	39.10	98.70%	97.26%±2.00%
6	44.84	50.46±1.27	47.70	94.00%	94.20%±2.63%

表 3 湿度计仪表的校正精确度对比

Table 3 Comparison of calibration accuracy of hygrometers

图像 序号	校正方法		实际示数 (湿度/℃)	估计精确度	
	轮廓校正 仪表读数估计值 (湿度/℃)	四点校正		轮廓校正	四点校正
7	35.33	38.76±1.31	35.90	98.41%	92.03%±3.65%
8	34.45	38.62±0.99	35.50	97.05%	91.20%±2.79%
9	46.59	43.44±1.29	44.80	96.01%	96.49%±2.29%
10	44.06	46.93±0.94	43.50	98.70%	92.12%±2.15%

在采集实际仪表图像的时候,容易受到环境光照不均匀、相机对焦不准确等因素影响,获得的图像并不像仿真实验中的理想,因此从结果数据中可以看出,不同序号的图像仪表读数的精确度波动较大。在某些极端角度下,仪表表盘无法完全显示,增加了四点校正方法去选择参考点时的随机性,导致最后的读数精确度偏低,而轮廓校正方法在已有的轮廓上去计算拟合未显示的轮廓,减轻了图像显示不全给读数带来的误差影响。因此与四点校正方法相比,轮廓校正不仅有着更高的精确度,也有着更高的读数稳定性,能满足实际复杂情况下的仪表校正

需求。

4 结 论

本文提出一种基于轮廓的圆形仪表自动透视校正算法。该算法利用目标仪表轮廓的坐标点集合来构造相关矩阵计算图像变换矩阵,与常用四点投影变换校正方法相比,不仅避免了人为主观标定参考点带来的校正误差,而且有着更好的校正精确度与稳定性,作为预处理的关键步骤,提高了后续仪表读数的精度及效率,对工业生产中的圆形仪表自动读数有着实际意义。

参考文献

[1] 丁蓉,杨俊杰,吴猛,等. 变电站巡检机器人高精度定位增强系统的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2018,429(10):43-46,62.
DING R, YANG J J, WU M, et al. Design and implementation of high precision positioning augmentation system for inspection robot in substations[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, 429(10):43-46,62.

[2] XU W, YANG S, MU S, et al. Modularization design of inspection robot based on substation[C]. 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2018: 2230-2233.

[3] 胡鑫,欧阳华,尹洋,等. 一种改进的指针式仪表读数识别方法[J]. 电子测量技术,2021,44(13):132-137.
HU X, OUYANG H, YIN Y, et al. An improved recognition method of pointer [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13):132-137.

[4] 周伟,巢渊,李龔,等. 基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正[J]. 电子测量与仪器学报,2020, 34(10):74-81.

- ZHOU W, CHAO Y, LI Y, et al. Fast correction of chip image based on improved Harris corner detection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(10):74-81.
- [5] 张建国, 齐家坤, 李颖, 等. 倾斜图像的车牌识别方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(6):58-61, 65.
- ZHANG J G, QI J K, LI Y, et al. Research on license plate recognition method based on tilted image [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(6):58-61, 65.
- [6] YANG D, ZHOU H, TANG L, et al. A license plate tilt correction algorithm based on the character median line algorithm de correction d' inclinaison de plaque d' immatriculation basé sur la ligne médiane du caractère[J]. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018, 41(3): 145-150.
- [7] 陈佳倩, 金晖宏, 王轶炜. 基于非线性畸变 QR 码校正算法的研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(19):32-36.
- CHEN J Q, JIN X H, WANG Y W. Research on QR code correction algorithm based on nonlinear deformation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(19): 32-36.
- [8] 霍凤财, 王迪, 李政璋. 工业线性指针仪表识别改进方法[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2018, 36(4): 423-429.
- HUO F C, WANG D, LI ZH ZH. Improved recognition method of industrial linear pointer meter[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2018, 36(4):423-429.
- [9] 沈卫东, 李文韬, 刘娟, 等. 基于改进 Canny 边缘检测的指针式仪表自动读数算法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(2):60-66.
- SHEN W D, LI W T, LIU J, et al. Research on automatic reading algorithm of pointer instrument based on Canny edge detection [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(2):60-66.
- [10] 周登科, 杨颖, 朱杰, 等. 基于深度学习的指针式仪表倾斜校正方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(12):1976-1984.
- ZHOU D K, YANG Y, ZHU J, et al. Tilt correction method of pointer meter based on deep learning [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2020, 32(12):1976-1984.
- [11] 陈梦迟, 黄文君, 张阳阳, 等. 基于机器视觉的工业仪表识别技术研究 [J]. *控制工程*, 2020, 27(11): 1995-2001.
- CHEN M CH, HUANG W J, ZHANG Y Y, et al. Research on industrial analog instrument recognition based on machine vision [J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(11):1995-2001.
- [12] CHEN Q R, WANG Q, SUN T, et al. Iris segmentation based on matting [J]. *Instrumentation*, 2022, 9(1): 12-22.
- [13] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 247-255.
- KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4):247-255.
- [14] 任彦良, 陈鸿, 李建鑫, 等. 适用于眼镜片轮廓数据的分段拟合算法 [J]. *电子测量技术*, 2021, 44(12): 51-56.
- REN Y L, CHEN H, LI J X, et al. Piecewise fitting for the contour data of the spectacle lens [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(12):51-56.
- [15] 陈余根, 杨艳. 基于霍夫变换椭圆检测的两种改进算法 [J]. *半导体光电*, 2017, 38(5):745-750.
- CHEN Y G, YANG Y. Two improved algorithms for ellipse detection based on Hough transform [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(5):745-750.
- [16] 吴美容, 王建国. MATLAB 在离散点拟合椭圆及极值距离计算中的应用 [J]. *地矿测绘*, 2016, 32(4): 20-23.
- WU M R, WANG J G. Application of MATLAB in fitting ellipse and calculating [J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2016, 32(4):20-23.
- [17] LU C, XIA S, SHAO M, et al. Arc-support line segments revisited: An efficient high-quality ellipse detection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 29: 768-781.
- [18] 彭金柱, 孙贝贝. 基于低秩特性的鱼眼图像畸变矫正方法 [J]. *现代电子技术*, 2020, 43(10):148-152.
- PENG J ZH, SUN B B. Fisheye image distortion correction method based on low-rank characteristic [J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(10):148-152.
- [19] 焦传佳, 江明. 基于 AprilTag 图像识别的工业机器人定位研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 110-119.
- JIAO CH J, JIANG M. Research on positioning of mobile robot based on low complexity AprilTag image recognition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(1):110-119.
- [20] 陈明曦, 侯涛, 赵晏章, 等. 基于新型改进 Canny 算法的铁轨边缘检测研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(11):48-52.
- CHEN M X, HOU T, ZHAO Y ZH, et al. Research on

rail edge detection based on new improved Canny algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(11):48-52.

- [21] 秦彦平,张军,多化琼,等. 木材节子图像增强的小波变换与双三次插值融合方法[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 183-189.

QIN Y P, ZHANG J, DUO H Q, et al. Fusion method of wavelet transform and bicubic interpolation for wood knot image enhancement [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5):183-189.

- [22] 孙慧媛. 基于机器视觉的电力仪表自动识别方法研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.

SUN H Y. The research on automatic identification method for power meter based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.

- [23] 胡彬,江宁,潘雨. 基于 KAZE 特征匹配的指针式仪表自动读数方法[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 424(5): 31-34.

HU B, JIANG N, PAN Y. Auto-reading method for pointer meter based on KAZE feature matching [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, 424(5):31-34.

作者简介



胡东华, 2020 年于桂林电子科技大学获得学士学位, 现桂林电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为自适应信号处理、图像处理。

E-mail: donghua3413@163.com

Hu Donghua received his B. Sc. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Guilin University of Electronic Technology. His main research interests include adaptive signal processing and the image processing.



闫坤(通信作者), 2011 年于美国路易斯安那州立大学获得博士学位, 现为桂林电子科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理。

E-mail: kyan5702@gmail.com

Yan Kun (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Louisiana State University. Now she is a professor in Guilin University of Electronic Technology. Her main research interest includes adaptive signal processing.