

基于特征间几何约束的指针仪表读数识别方法

刘昶¹, 卢景峰¹, 刘青²

(1. 沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159; 2. 闪捷信息科技有限公司, 杭州 311121)

摘要: 在指针式仪表示值监控系统中, 倾斜拍摄仪表图像时会导致识别结果出现偏差, 为此提出一种基于仪表特征间几何约束的识别方法。首先利用一幅平铺于仪表上表面的平面标定板图像实现相机参数标定, 生成仪表在标定平面上的虚拟图像; 然后利用表壳上表面、刻度平面、指针平面与虚拟像平面间的平行关系, 确定表壳圆的圆心、仪表刻度圆心、指针转轴中心特征间的透视投影约束关系, 利用图像的极坐标变换和离散傅里叶变换提取仪表刻度圆心的最优位置及起始刻度线的角度, 利用 Hough 变换的投票原理估计指针的转动角度; 最后利用角度法实现仪表读数的解算。以某型号指针式温度计为测试对象进行实验验证, 识别结果的平均误差为 0.23 °C, 最大误差为 0.7 °C, 本文方法能够准确识别仪表读数且识别精度优于人工读数。

关键词: 指针式仪表; 透视投影约束; 相机标定; 离散傅里叶变换

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.001

Pointer Instrument Value Identification Method Based on Geometric Constraints among Features

LIU Chang¹, LU Jingfeng¹, LIU Qing²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Secsmart Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: In pointer instrument value monitoring system, in the case that the instrument image is sideways captured, the scale pointed in the image might deviate from the true. A pointer instrument value identification method based on geometric constraints among features was presented to address this problem. Firstly the camera parameters were calibrated from an image of a planar calibration pattern which was put on the top surface of the instrument. The instrument's virtual image on the calibration plane was created. From the parallel property among the instrument shell's top plane, the scale plane, the pointer plane and the virtual image plane, the perspective projection constraints among the center of the shell circle, the center of the scale lines, and the rotation center of the pointer can be obtained. Next the optimal locations of the scale center, the angle of the start scale line were extracted from polar coordinate transform and discrete Fourier transform of the image. The pointer rotation angle was estimated from the voting principle of Hough transform. Finally the instrument value was computed by the angle method. The method was tested on a pointer thermometer. The average error is 0.23 °C, the maximum error is 0.7 °C. The experimental results showed the proposed method can identify the value correctly, and the accuracy is higher than manual reading method.

Key words: pointer instrument; perspective projection constraint; camera calibration; discrete Fourier transform

指针式仪表具有结构简单、抗电磁干扰强、使用寿命长等优点,在电力、煤炭、铁路等行业中被广泛采用,但由于其无法提供数字信号输出,传统上仍需依靠人工进行读表,不利于相应指标数据的实时监控和管理。近年来,随着计算机视觉技术的发展,开始采用相机拍摄仪表表面板图像,利用图像处理和计算机视觉方法进行仪表读数识别,并应用于巡检机器人、仪表示值监控等系统中,指针式仪表的读数识别方法也成为近期的研究热点问题之一。

由于仪表的种类繁多,某一种识别算法一般无法适用于不同类型的仪表,但该类算法的基本思路相近,即通过提取仪表图像中的关键特征进行示值解算,这些关键特征一般包括仪表轮廓、仪表指针转轴的中心点、仪表刻度线、指针等。当相机倾斜拍摄仪表表面板时,会导致图像中的仪表产生几何畸变,如将圆形表盘拍摄成椭圆形,针对此类问题,有的学者提出先进行图像校正,再进行仪表关键特征提取。文献[1-3]针对圆形外观仪表,采用基于深度学习的方法对图像中的仪表进行定位,在提取仪表轮廓的椭圆特征后,再将其校正成圆形;文献[4]直接通过深度网络提取表盘的椭圆特征,再对其进行校正;文献[5]首先提取并匹配待检测图像与标准模板图像的 ORB 特征,再通过计算两者间的单应矩阵实现校正。

多数仪表的刻度线呈圆弧形排列,所在圆的圆心是所有短直刻度线的公共交点,也是指针转轴的中心点,该几何性质对提取指针和刻度特征具有重要作用。针对圆形外观仪表的刻度圆心提取,文献[1-2]直接提取轮廓圆或刻度圆的圆心;文献[6]采用提取刻度直线交点的方法;文献[7]采用提取不同位置指针直线求交点的方法。针对刻度线特征的提取,文献[6]采用对图像的刻度区域进行极坐标变换的方法,将圆弧排列的刻度线转换为竖直排列;文献[8]通过事先建立的包含刻度线识别区域信息的模板库,先截取待识别图像中的刻度特征子区域,再进行刻度直线提取,最后通过聚类方法获取特征;文献[9]采用对刻度线进行角点提取确定位置的方法。提取指针特征时一般将指针近似看作一条直线,利用指针的颜色或形状特征提取出指针区域后,再利用 Hough 变换^[5,10-11]、最小二乘拟合^[7]、戴明回归^[12]等提取直线方程,也有学者直接采用深度学习方法提取指针特征^[13-14]。仪表读数的解算方法一般分为角度法^[7-8]和距离法^[6];角度法提取指针的旋转

角度,同时提取首尾刻度线的角度,根据其间角度关系计算示值;距离法通过计算指针与相邻两个刻度线间的距离,按比例关系进行示值计算。

由于表盘的刻度平面与指针转动平面并不共面,在倾斜拍摄仪表的情况下,图像中刻度圆心与指针轴心不重合,图像中指针指向的刻度并非真实刻度。现有方法大多忽略相机拍摄中透视投影对特征提取的影响,而依据图像中的指针指向进行读数识别,导致识别结果偏差较大。文献[15]注意到该问题,但在处理时将相机的透视投影近似为仿射投影,结果不够精确。

本文针对倾斜拍摄情况下的仪表示值监控问题,提出一种基于特征间几何约束的读数识别方法。通过生成平行于仪表表盘平面的虚拟图像,建立仪表主要特征间的透视投影约束关系,指导关键特征提取过程和仪表读数的解算,解决由于图像中指针指向偏差导致识别结果误差大的问题,并以圆形外观的指针式温度计为研究对象,通过实验证明本文方法的有效性。

1 仪表图像校正

1.1 基于单幅标定图像的相机标定

在仪表示值监控系统中,相机与仪表间一般具有固定的位姿关系,考虑到相机存在镜头畸变及倾斜拍摄的情况,拍摄的仪表图像同时存在镜头畸变和几何畸变,为进行有效的特征提取有必要对其进行校正。首先对相机进行标定,当前主流的张正友相机标定方法一般需要采集多幅标定板图像,工作量相对较大,本文仅利用一幅标定板图像进行相机标定。选用平面棋盘格标定板并将其置于仪表表壳的上表面,在标定平面上定义平面世界坐标 $O-xy$,再由右手法则生成三维坐标系 $O-xyz$ 。设标定平面上物点 (x, y) 对应的图像中无畸变像点坐标为 (u, v) ,由相机针孔模型可得

$$t \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{T}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: t 为尺度因子; $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 为相机内参矩阵,其中 f_u 和 f_v 分别是两个方向的焦比, (u_0, v_0) 为主点坐标; \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 为相机坐标系与世界坐标系变换的旋转矩阵 \mathbf{R} 的左两列向量, $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1,$

$\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$); \mathbf{T} 为平移向量。记 $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{pmatrix}$, 为

标定平面与像平面间的单应矩阵, 则有

$$t \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\begin{cases} u = \frac{h_1 x + h_2 y + h_3}{h_7 x + h_8 y + 1} \\ v = \frac{h_4 x + h_5 y + h_6}{h_7 x + h_8 y + 1} \end{cases} \quad (3)$$

记 (u, v) 经畸变后的实际像点坐标为 (\check{u}, \check{v}) , 仅考虑一阶径向畸变, k_1 为畸变参数, 可得

$$\begin{cases} \check{u} = u + (u - u_0) k_1 \left[\frac{(u - u_0)^2}{f_u^2} + \frac{(v - v_0)^2}{f_v^2} \right] \\ \check{v} = v + (v - v_0) k_1 \left[\frac{(u - u_0)^2}{f_u^2} + \frac{(v - v_0)^2}{f_v^2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

设 $f_u = f_v$, 记 $\bar{k}_1 = k_1 / f_u^2 = k_1 / f_v^2$, $\boldsymbol{\alpha} = (h_1, \dots, h_8, u_0, v_0, \bar{k}_1)$, 则式(4)可简化为

$$\begin{cases} \check{u} = F_u(x, y; \boldsymbol{\alpha}) \\ \check{v} = F_v(x, y; \boldsymbol{\alpha}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $F_u(\cdot)$ 和 $F_v(\cdot)$ 表示相应的关系函数, 具体表达式略。式(5)说明在给定参数 $\boldsymbol{\alpha}$ 的条件下, 可由标定板上的物点坐标 (x, y) 计算其对应的有畸变像点坐标 (\check{u}, \check{v}) 。

设在原始图像中通过特征提取得到的标定板上特征点 (x_i, y_i) 的对应点为 (\hat{u}_i, \hat{v}_i) , 将其作为有畸变像点 $(\check{u}_i, \check{v}_i)$ 的近似值。定义目标函数

$$J(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_i [(\hat{u}_i - F_u(x_i, y_i; \boldsymbol{\alpha}))^2 + (\hat{v}_i - F_v(x_i, y_i; \boldsymbol{\alpha}))^2] \quad (6)$$

通过 LM 方法求解如下优化问题, 得到最优解 $\boldsymbol{\alpha}^*$ 。

$$\boldsymbol{\alpha}^* = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\alpha}} J(\boldsymbol{\alpha}) \quad (7)$$

初值确定方法: 以 (\hat{u}_i, \hat{v}_i) 近似 (u_i, v_i) ; 利用式(1)及 (x_i, y_i) 和 (u_i, v_i) 的对应关系, 采用最小二乘法估计标定平面与像平面间的单应矩阵 \mathbf{H} , 并将其各元素作为 h_1, \dots, h_8 的初值; 以图像中心作为 (u_0, v_0) 的初值; $\bar{k}_1 = 0$ 。以式(7)的优化结果作为主点 (u_0, v_0) 和单应矩阵 \mathbf{H} 的估计值。

将 \mathbf{H} 表达为列向量形式 $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3)$, 则由式(1)和式(2)可得 $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{T}) = t\mathbf{K}^{-1}(\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3)$, 进一步由 $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 = 0$ 可得

$$\mathbf{H}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_2 = 0 \quad (8)$$

由 $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\|$ 可得

$$\mathbf{H}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_2 \quad (9)$$

令

$$\begin{cases} S_u = 1/f_u^2 \\ S_v = 1/f_v^2 \\ A_{11} = h_1 h_2 - h_2 h_7 u_0 - h_1 h_8 u_0 + h_7 h_8 u_0^2 \\ A_{12} = h_4 h_5 - h_5 h_7 v_0 - h_4 h_8 v_0 + h_7 h_8 v_0^2 \\ B_1 = -h_7 h_8 \\ A_{21} = h_1^2 - 2h_1 h_7 u_0 + h_7^2 u_0^2 - h_2^2 + 2h_2 h_8 u_0 - h_8^2 u_0^2 \\ A_{22} = h_4^2 - 2h_4 h_7 v_0 + h_7^2 v_0^2 - h_5^2 + 2h_5 h_8 v_0 - h_8^2 v_0^2 \\ B_2 = h_8^2 - h_7^2 \end{cases} \quad (10)$$

则由式(8)和式(9)可构成如下方程组。

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_u \\ S_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

由于已获得 (u_0, v_0) 的估计值, 方程组(11)中实际仅包含 f_u 和 f_v 两个未知量, 求解式(11)得

$$S_u = \frac{A_{22} B_1 - A_{12} B_2}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}}, \quad S_v = \frac{A_{11} B_2 - A_{21} B_1}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}} \quad (12)$$

由式(10)可得 $f_u = 1/\sqrt{S_u}$, $f_v = 1/\sqrt{S_v}$, 进一步可得到内参矩阵 \mathbf{K} 的估计值。记 $\lambda = \|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_1\| = \|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_2\|$, 由式(9)可得到 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 的估计值为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_1 / \lambda \\ \mathbf{r}_2 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_2 / \lambda \end{cases} \quad (13)$$

由 $\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2$ 得到旋转矩阵 \mathbf{R} , 由 $\mathbf{T} = \lambda \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H}_3$ 得到平移向量 \mathbf{T} , 以 $k_1 = \bar{k}_1 f_u f_v$ 作为一阶径向畸变参数的估计值。至此, 相机的内、外参数及一阶径向畸变参数的估计值全部获得。

1.2 校正图像生成

将标定平面看作相机的虚拟像平面, 设虚拟图像的左上角世界坐标为 (x_{LT}, y_{LT}) , 虚拟图像的像素距为 δ , 对于每个虚拟像点 (i_v, j_v) , 其对应的世界坐标为 $(x_{LT} + i_v \cdot \delta, y_{LT} + j_v \cdot \delta)$, 利用式(1)和式(4)计算该点对应的原始图像坐标, 再利用双线性插值法估计该点的像素灰度值, 由此可生成原始图像在标定平面上的虚拟图像。

本文以匡建(上海)仪表科技有限公司生产的 WSS-311 系列指针式温度计为监控对象, 其外壳为圆柱形。图 1(a) 为相机拍摄的该仪表原始图像, 可见拍摄的仪表存在倾斜; 图 1(b) 为拍摄的标定板原始图像, 选用的标定板具有 11×9 个角点, 角点间距为 5 mm; 图 1(c) 和图 1(d) 分别为仪表和标定板原始图像生成的虚拟图像。虚拟图像尺寸为 600×600 (单位: 像素); $(x_{LT}, y_{LT}) = (0, -10)$, $\delta = 0.1$ (单位: mm)。

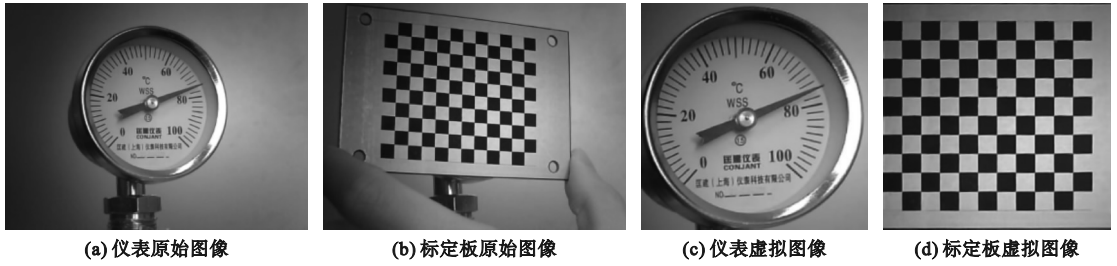


图1 仪表和标定板的原始图像和虚拟图像

Fig.1 Original and virtual images of the instrument and the calibration pattern

由图1可见,虚拟图像消除了原始图像中的镜头畸变和几何畸变,并维持了原有的透视投影关系,因此虚拟图像可看作原始图像目标兴趣区的校正图像,虚拟图像上任意像点的图像坐标与其虚拟像平面上的世界坐标一一对应,可相互转换,在不引起误解的情况下,下文中图像特征点的坐标采用世界坐标表示。为便于后续处理,将生成的虚拟图像进行直方图均衡化处理,得到校正图像。

2 仪表关键特征提取与读数识别

2.1 仪表特征的透视投影关系

本文研究的指针式温度计共有三个主要的特征平面,分别为仪表外壳上表面、指针转动平面、刻度平面,三个平面相互平行。该仪表的刻度线呈圆形排列,刻度圆的圆心、指针转动轴心、表壳上表面边缘圆的圆心三点共线,且连线与上述三个平面垂直,由于标定板平放于表壳上表面,因此标定平面也与上述三个平面平行。考虑到仪表的物理结构参数均可认为是已知的先验知识,标定板的厚度也已知,因此上述平面间的距离为已知量,记外壳上表面、指针平面、刻度平面到虚拟像平面的距离分别为 h_T 、 h_P 、 h_B 。由于相机已经完成外参标定,相机光心 O_C 在世界坐标系下的坐标也是已知量,记 O_C 在虚拟像平面上的垂直投影点坐标为 (x_C, y_C) , O_C 到虚拟像平面的距离为 z_C 。

通过仪表的侧视图展示几个主要特征间的透视投影关系,如图2所示。图中: C_T 是外表壳边缘圆的圆心; C_P 是指针转轴中心点; C_B 是刻度圆的圆心; P_T 、 P_P 、 P_B 分别为校正图像中目标点 C_T 、 C_P 、 C_B 对应的像点,考虑透视投影时, P_T 、 P_P 、 P_B 并不重合。

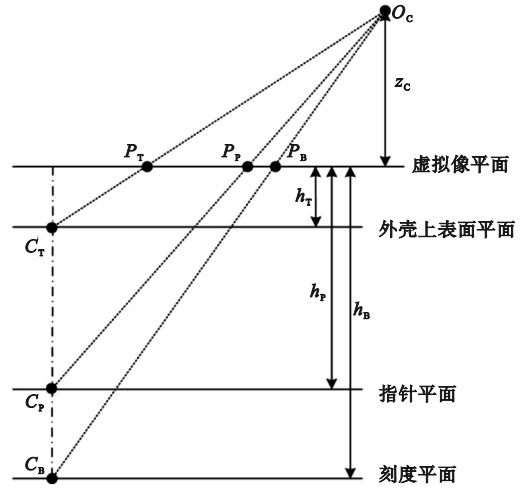


图2 仪表主要特征间的透视投影关系

Fig.2 Perspective projection relationship among key features

2.2 仪表刻度圆心提取

在校正图像上利用仪表外轮廓边缘为圆形的特征提取轮廓圆心 (x_{PT}, y_{PT}) ,作为 $P_T(x_{PT}, y_{PT}, 0)$ 坐标的近似值,则 $C_T(x_{CT}, y_{CT}, -h_T)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{CT} = x_C + (x_{PT} - x_C)(z_C + h_T)/z_C \\ y_{CT} = y_C + (y_{PT} - y_C)(z_C + h_T)/z_C \end{cases} \quad (14)$$

计算得到 $C_B(x_{CT}, y_{CT}, -h_B)$ 的虚拟像点 $P_B(x_{PB}, y_{PB}, 0)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{PB} = x_C + (x_{CT} - x_C)z_C/(z_C + h_B) \\ y_{PB} = y_C + (y_{CT} - y_C)z_C/(z_C + h_B) \end{cases} \quad (15)$$

目前一般按上述方法得到刻度圆心 P_B 的粗提取结果,本文则提出一种基于极坐标图像变换及离散傅里叶变换的方法对刻度圆心进行精提取。

以 P_B 为极坐标原点,对校正图像上刻度区域进行极坐标变换,将校正图像点坐标 (x, y) 转换为极坐标 (ρ, θ) ^[6],其中 θ 是 $(x - x_{PB}, y - y_{PB})$ 与 $(0, 1)$ 方向的夹角, $\rho = \sqrt{(x - x_{PB})^2 + (y - y_{PB})^2} - \rho_0$, ρ_0 用于控制刻度区域范围的起始长度。图3所示为 P_B 在两个不同位置时刻度区域的极坐标变换结

果图像,图中纵向表示 ρ ,横向表示 θ ,图像宽度 W 的值取决于 θ 的范围和离散化间隔,图中 θ 的范围设为 $0^\circ \sim 360^\circ$,离散化间隔设为 $\Delta\theta = 0.269^\circ$,于是 $W = 360^\circ/\Delta\theta \approx 1\,338$ 。由图 3 可见,选择不同的极坐标原点,变换结果图中刻度的周期性差别较大,刻度线段越直且间隔越均匀,说明对应的极坐标原点距离真实的刻度圆心越近。

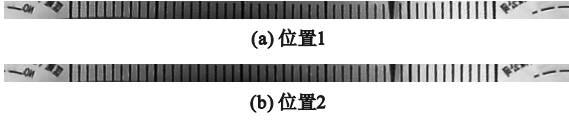


图 3 不同刻度圆心位置下刻度区域极坐标变换结果图
Fig. 3 Images of the scale region with different centers after polar coordinate transform

为合理评价极坐标展开图的周期性,本文采用离散傅里叶变换方法。对极坐标变换图中每列进行像素点灰度值累加,得到一维信号序列 $s[w]$ ($w=0,1,\dots,W-1$)。考虑到刻度线构成 $s[w]$ 中一个近似周期信号,对于本文研究的仪表型号,起止刻度线的夹角为 269° ,共有 51 条刻度线,即 $M=51$,则相邻两条刻度线的夹角 $\Delta\varphi = 5.38^\circ$,因此当 $\Delta\theta = 0.269^\circ$ 时,信号 $s[w]$ 中的刻度周期 $T = \Delta\varphi/\Delta\theta = 20$ 。对 $s[w]$ 进行扩展,使其长度 N 为 T 的整数倍,本文取 $N=1\,340$,当 $W \leq w < N$ 时,令 $s[w] = s[w - 1]$ 。对扩展后的序列 $s[w]$ 进行离散傅里叶变换,获得该信号的频域信息,变换区间长度亦设为 N ,变换结果记为 $S[k]$ ($k=0,1,\dots,N-1$)。与周期 T 对应的频域采样序号为 $k^* = N/T = 67$,由于最佳 $s[w]$ 的周期性最好,因此与之对应的 $S[k^*]$ 表达的余弦波具有最大的振幅。

图 4 所示为图 3 中两个展开图对应信号序列的离散傅里叶变换结果图像,其中横向表示频率序号 k ,纵向表示与该频率对应的余弦波振幅,图中去掉了直流分量。可见,图 4(b) 中 $k=67$ 处的振幅明显大于图 4(a),说明图 3(b) 对应的信号量周期性较图 3(a) 更好。

精提取的具体过程为:以前面粗提取的 P_B 为中心,设定一个兴趣区范围;分别以该区域内的每个点为极坐标原点对校正图像的刻度区进行极坐标变换;计算第 k^* 点的离散傅里叶变换值 $S[k^*]$,计算式为

$$S[k^*] = \sum_{w=0}^{N-1} s[w] \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi w k^*}{N}\right) = a_{k^*} + b_{k^*} j \quad (16)$$

式中: j 为虚数单位; a_{k^*} 和 b_{k^*} 分别表示 $S[k^*]$ 的

实部和虚部。 $S[k^*]$ 代表的时域余弦波振幅 $A_{k^*} = 2 \sqrt{a_{k^*}^2 + b_{k^*}^2}$,相位 $\psi_{k^*} = \arctan(b_{k^*}/a_{k^*})$,选择振幅最大者对应的极坐标原点作为刻度圆心 P_B 最终的估计结果。图 3 和图 4 中位置 1 选用的是刻度圆心粗提取的位置,位置 2 选用的是优化后的位置。可见,本文提出的基于离散傅里叶变换求取刻度圆心的方法较一般方法更准确。

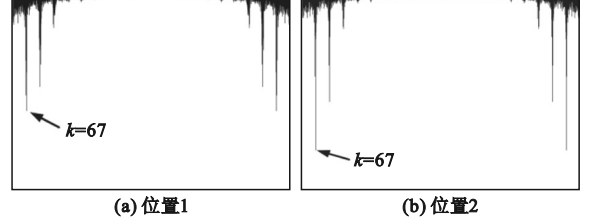


图 4 不同刻度圆心位置对应的离散傅里叶变换结果图
Fig. 4 Discrete Fourier transform results at different centers of scale lines

2.3 起始刻度线角度提取

将 2.2 中得到的最优估计 P_B 对应的信号序列记为 $s^*[w]$,离散傅里叶变换的计算结果记为 $S^*[k^*]$,起始刻度必位于 $S^*[k^*]$ 对应的时域余弦波峰值上,即起始刻度在极坐标变换图中的横坐标 i_L 满足

$$\frac{2\pi}{T} i_L + \psi_{k^*} = 2n\pi \quad (n=0,1,2,\dots,k^*-1) \quad (17)$$

式中 ψ_{k^*} 为 $S^*[k^*]$ 对应的余弦波相位。另外,由于 M 条刻度线均在信号范围内, i_L 还应满足

$$0 \leq i_L < W - (M-1)T \quad (18)$$

记 $I(\cdot)$ 为四舍五入取整函数,通过穷举法求解如下优化问题。

$$\begin{cases} i_L^* = \operatorname{argmin}_{i_L} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} s^*[I(i_L + mT)] \right\} \\ \text{s. t. 式(17),式(18)} \end{cases} \quad (19)$$

起始刻度线对应角度 $\theta_L = i_L^* \cdot \Delta\theta$,最大刻度线对应角度 $\theta_R = \theta_L + (M-1) \cdot \Delta\varphi$ 。

2.4 指针轴心位置解算

根据图 2 描述的约束,由 P_B 的精提取结果计算 $C_B(x_{CB}, y_{CB}, -h_B)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{CB} = x_C + (x_{PB} - x_C)(z_C + h_B)/z_C \\ y_{CB} = y_C + (y_{PB} - y_C)(z_C + h_B)/z_C \end{cases} \quad (20)$$

则 C_P 的坐标表示为 $C_P(x_{CB}, y_{CB}, -h_P)$,由此计算 $P_P(x_P, y_P, 0)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_P = x_C + (x_{CB} - x_C)z_C/(z_C + h_P) \\ y_P = y_C + (y_{CB} - y_C)z_C/(z_C + h_P) \end{cases} \quad (21)$$

由此得到指针轴心在校正图像中的位置。

2.5 指针旋转角度提取

在校正图像中以提取到的指针轴心为中心、以刻度圆心到短刻度线中点距离为半径,设定圆形兴趣区,指针区域对应颜色较暗的部分,对该兴趣区进行二值化处理,搜索面积最大的连通区作为指针区域。图5显示了针对图1(c)的处理结果,其中白色区域为提取到的指针区域。

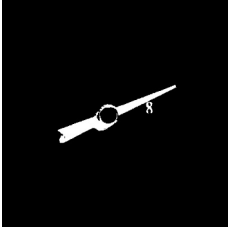


图5 指针区域提取结果

Fig. 5 Extracted pointer region

本文只关注指针的旋转角度特征,采用一维 Hough 变换,即基于投票原理的角度提取方法。取 Hough 空间为角度参数空间,对于指针区域中的每个像素点,计算其和指针轴心点 P_p 的连线与 $(0,1)$ 方向的夹角,根据计算结果对已经离散化的角度参数空间进行投票,选择投票最多的角度值作为指针旋转角度的估计值,记为 θ_p 。

2.6 仪表读数解算

由于指针平面与刻度平面不共面,应先将指针直线向刻度平面作垂直投影,再以投影直线指向的刻度值作为仪表读数。图6所示为指针直线 L_p 及其在刻度平面上的垂直投影直线 L_B 在虚拟像平面上的透视投影,两者对应的透视投影直线分别为 l_p 和 l_B ,由于三个平面相互平行,故 $L_p \parallel l_p \parallel L_B \parallel l_B$ 。若采用角度法进行读数解算,只需提取直线 l_p 的角度;若采用距离法进行读数解算,则

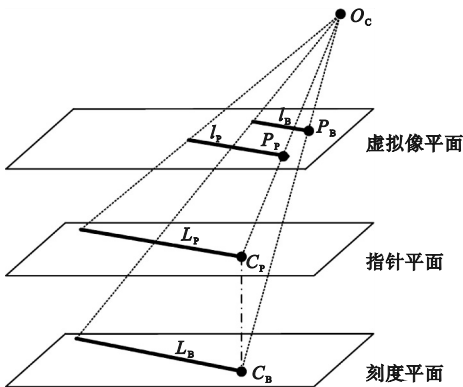


图6 指针直线透视投影原理图

Fig. 6 Illustration of perspective projection of the pointer line

应提取出 l_B ,再利用其与校正图像上相邻刻度线的距离关系进行解算,相对复杂。本文采用角度法,根据2.3和2.5中的估计结果,以 V_L 和 V_R 分别表示仪表的最小和最大刻度示值,则仪表读数 V 的值为

$$V = V_L + (V_R - V_L) \cdot \frac{\theta_p - \theta_L}{\theta_R - \theta_L} \quad (22)$$

2.7 算法总结

本文提出的识别算法总体流程如图7所示。

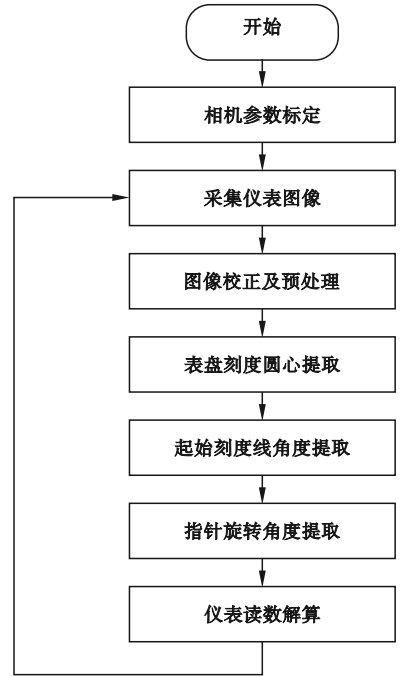


图7 算法流程图

Fig. 7 Flow chart of the proposed algorithm

相机参数标定过程采用基于单幅图像的方法,较当前主流的张正友标定方法更简单,能有效节省现场标定工作量,并能达到满意的效果;利用虚拟图像实现图像校正,同时消除镜头畸变和几何畸变,保留特征间存在的透视投影关系;提取表盘刻度圆心时,从频域特征的角度出发,通过离散傅里叶变换方法计算并比较单一频率对应的幅值,相比现有方法可有效提高提取精度;提取起始刻度线特征时,利用离散傅里叶变换得到的相位特征,可有效减少计算量;提取指针旋转角度特征时,采用一维 Hough 变换,较一般情况下在二维 Hough 空间中进行直线提取的方法更简单。

3 实验研究

为验证本文提出方法的有效性,选择量程为

[0,100](单位:℃)的 WSS-311 型温度计进行实验,相机选用 OminiVision 公司的 OV2640 嵌入式图像传感器,配 8 mm 定焦镜头,采集的图像为 640×480 (单位:像素)的灰度图。通过改变探针温度使温度计示值发生变化,在不同温度下共采集仪表图像 30 幅,同时记录人工读数作为真值。采用本文方法对仪表图像进行读数识别,均能准确识别出温度计的读数。图 8 所示为其中两幅图像的校正图像,以 V 表示识别结果, V_T 表示真值,图 8(a)中 $V=44.6$ ℃、 $V_T=44$ ℃,图 8(b)中 $V=54.2$ ℃、 $V_T=54$ ℃。

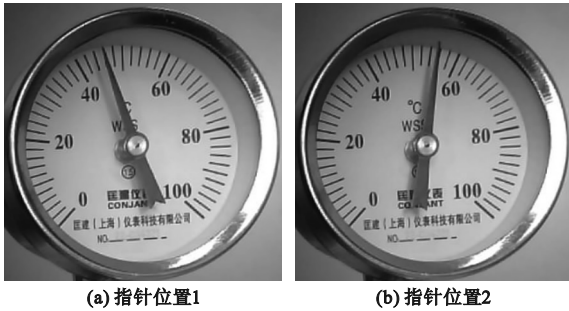


图 8 部分实验图像的校正图像

Fig. 8 Examples of calibrated experimental images

由于仪表图像为倾斜拍摄所得,图像中的指针并未指向真实读数。图 8(a)中真实值 $V_T=44$ ℃,而图像中指针指向约 46 ℃,图 8(b)中真实值 $V_T=54$ ℃,图像中指针指向约 56 ℃,这是由于刻度平面与指针转动平面不共面而导致。可见,采用本文方法能准确识别仪表读数。

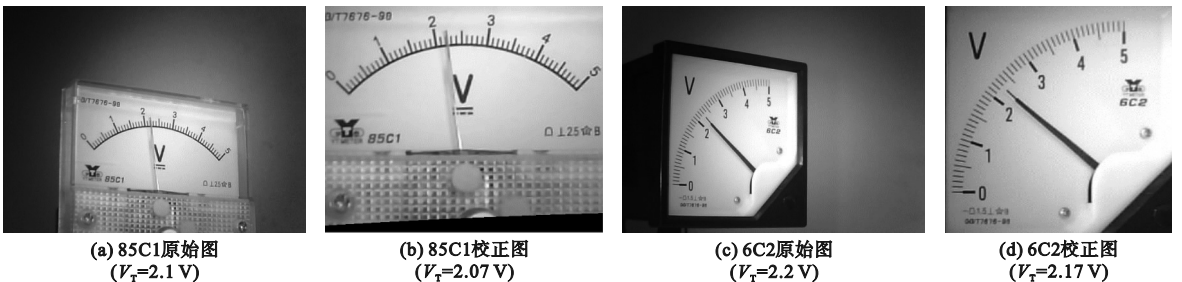


图 10 其他类型指针仪表的实验图像及结果样例

Fig. 10 Examples of experimental images and results on other model pointer instruments

4 结论

针对仪表监控系统中指针式仪表的读数识别问题,考虑到相机拍摄时存在倾斜、仪表图像存在镜头畸变和几何畸变的情况,提出一种基于特征间几何约束的读数识别方法。基于极坐标变换和

将 30 幅图像的识别结果与人工读数结果对比,进行误差统计,平均误差为 0.23 ℃,最大误差为 0.7 ℃,误差分布情况如图 9 所示。该温度计的分辨率为 2 ℃,仪表识别的误差限为 1 ℃。可见,本文识别方法的误差小于误差限,说明该方法能纠正倾斜拍摄引起的指针指向偏差,符合应用中对识别误差的要求,同时获得较人工读数更高的精度。

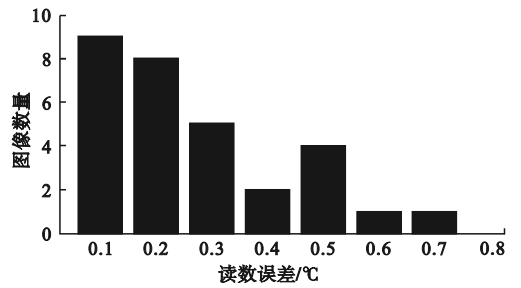


图 9 WSS-311 温度计读数识别误差分布直方图
Fig. 9 Histogram of errors of identified results of WSS-311 thermometer

为验证本文方法的适用性,另外选用宇泰 85C1 电压表和宇泰 6C2 电压表作为实验对象。图 10 所示为部分实验样例,图中两种仪表的准确值分别为 2.1 V 和 2.2 V,但从图像上可见,指针指向的读数均发生了大约 0.1 V 的偏差,采用本文方法均纠正了这种偏差。在不同电压下对两种仪表各采集 51 幅图像,平均识别误差分别为 0.034 V 和 0.025 V,均小于仪表的 0.05 V 误差限,说明本文方法具有广泛的适用性和有效性。

离散傅里叶变换提取刻度圆心,识别结果较一般方法更有效。利用特征间存在的几何约束进行特征提取,有效解决了倾斜拍摄情况下由于刻度平面与指针转动平面不共面引起的识别误差问题。以指针式温度计为研究对象,通过实验验证了本文提出的方法具有较高的精度和可靠性,且该方法对其他类型指针式仪表的读数识别也具有借鉴

意义。

参考文献(References):

- [1] 侯卓成,欧阳华,胡鑫,等.基于深度学习的模糊指针式仪表矫正读数方法[J].电子测量技术,2023,46(9):158-165.
HOU Z C, OUYANG H, HU X, et al. Correction reading method of fuzzy pointer instrument based on deep learning[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 158-165. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 夏臻康,李维刚,田志强.基于YOLOv5的指针式仪表自动读数方法研究[J].仪表技术与传感器,2023(6):44-51.
XIA Z K, LI W G, TIAN Z Q. Research on automatic reading method of pointer meter based on YOLOv5[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(6): 44-51. (in Chinese)
- [4] WU X, SHI X B, JIANG Y C, et al. A high-precision automatic pointer meter reading system in low-light environment[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4891.
- [5] 高建龙,郭亮,吕耀宇,等.改进ORB和Hough变换的指针式仪表识读方法[J].计算机工程与应用,2018,54(23):252-258.
GAO J L, GUO L, LV Y Y, et al. Pointer meter reading method based on improved ORB and Hough algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(23): 252-258. (in Chinese)
- [6] 盛庆华,李竹,邵展坚,等.基于双重霍夫空间投票的指针表自动读数方法[J].仪器仪表学报,2019,40(5):230-239.
SHENG Q H, LI Z, SHAO Z J, et al. Automatic reading method of pointer meter based on double Hough space voting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 230-239. (in Chinese)
- [7] 郝永飞,唐旭晟,程良利.基于机器视觉的自动仪表盘指针检测研究[J].机电工程,2022,39(1):134-140.
HAO Y F, TANG X S, CHENG L L. Auto dashboard pointer detection based on machine vision[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(1): 134-140. (in Chinese)
- [8] 童伟圆,葛一粟,杨程光,等.基于机器视觉的指针式仪表示数识别方法研究[J].计算机测量与控制,2018,26(3):162-166.
TONG W Y, GE Y S, YANG C G, et al. Research on recognition method of pointer type meter based on machine vision[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(3): 162-166. (in Chinese)
- [9] 向友君,江文,阮荣钜.基于刻度准确定位的指针式仪表示数识别方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(10):129-135.
XIANG Y J, JIANG W, RUAN R J. Reading recognition method of pointer-type meter based on accurate scale localization[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(10): 129-135. (in Chinese)
- [10] 胡秀军,于凤芹.基于单参数同态滤波与全局对比度增强的指针仪表读数识别方法[J].仪表技术与传感器,2021(5):42-46,51.
HU X J, YU F Q. Pointer meter reading method based on single-parameter homomorphic filtering and global contrast enhancement[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(5): 42-46, 51. (in Chinese)
- [11] WANG L, WANG P, WU L H, et al. Computer vision based automatic recognition of pointer instruments: data set optimization and reading[J]. Entropy, 2021, 23(3): 272.
- [12] 徐小强,陈旭,冒燕.基于戴明回归和ROI细化的指针式仪表读数技术[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(3):324-329.
XU X Q, CHEN X, MAO Y. Reading technology of pointer instrument based on Deming regression and ROI thinning[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 324-329. (in Chinese)
- [13] LIN Y, ZHONG Q H, SUN H L. A pointer type instrument intelligent reading system design based on convolutional neural networks[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 618917.
- [14] LIU H L, WANG J L, MA B. Instrument pointer recognition scheme based on improved CSL algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7800.
- [15] 孙志周,田克超,刘璇,等.基于图像识别的圆形指针式仪表读数矫正方法[J].山东理工大学学报(自然科学版),2022,36(4):71-75.
SUN Z Z, TIAN K C, LIU X, et al. A method of reading correction for circular pointer instrument based on image recognition[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(4): 71-75. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)