

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.005

基于 Canny 边缘检测和加权最小二乘法的气泡水平仪实时检测方法*

盛 伟¹, WANG Qing-guo², 朱善安^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. Institute of Intelligent Systems, School of Electrical Engineering, Johannesburg 2000, South Africa)

摘要:针对气泡水平仪的自动标定问题,对机器视觉领域中的边缘提取算法、最小二乘法、轮廓跟踪算法等方面进行了研究。提出了一种基于 Canny 边缘检测和加权最小二乘法的气泡水平仪实时自动检测方法,以提高检测气泡水平仪的准确度和效率。引入了 Canny 边缘提取算法对工业摄像机所拍摄的水准柱侧面图像进行处理,以得到参考线和气泡的边缘信息。引入了一种自适应选取 Canny 边缘提取算法的阈值的方法,以克服工业现场光照变化的影响。同时针对本应用场合,采用了加权最小二乘法对左右平行参考线进行拟合,并结合二分搜索算法对水平尺上的气泡位置进行了搜索,从而实现了气泡水平仪的高准确度实时检测。研究结果表明,该方法能够准确、快速地对气泡进行定位,能够较好地适应光照变化。

关键词:图像处理;Canny 边缘检测;加权最小二乘法;实时检测;气泡水平仪

中图分类号:TP274;TH878

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1182-06

Real-time automatic level bar calibration based on Canny edge detection and weighted least squares method

SHENG Wei¹, WANG Qing-guo², ZHU Shan-an¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Institute of Intelligent Systems, School of Electrical Engineering, Johannesburg 2000, South Africa)

Abstract: Aiming at the automatic calibration problem of the bubble level, the edge detection algorithm, the least square method and the contour tracking algorithm in the field of machine vision were studied. A real-time automatic detection method for the level bar based on Canny edge detection and weighted least square method was proposed to improve the accuracy and efficiency of the bubble detection. The Canny edge extraction algorithm for image pre-processing was introduced to deal with the image of the level column taken by the industrial camera to get the edge information of the reference lines and the bubble. The thresholds of Canny edge extraction algorithm was set adaptively to reduce the effects of changes in the light field on detection accuracy. The weighted least squares was employed to model the parallel reference lines and the binary search algorithm was used to search the bubble position, so as to achieve high-accuracy detection of the level bar. The results indicate that the proposed method can accurately and quickly locate the bubble, and can well adapt to the changes of the light.

Key words: image processing; Canny edge detection; weighted least squares; real-time detection; level bar

收稿日期:2016-05-18

作者简介:盛 伟(1990-),男,湖北武汉人,主要从事计算机数字图像处理、模式识别方面的研究. E-mail: Saintway@qq.com

通信联系人:朱善安,男,博士,教授,博士生导师. E-mail: zsa@zju.edu.cn

0 引言

水平仪是一种测量小角度的常用量具,常用于建筑、机械、仪表制造等行业。水平仪按照工作原理可分为气泡水平仪、电子水平仪、激光水平仪等。气泡水平仪根据水平仪上气泡偏离中心的刻度来判断平面是否水平,是应用最广泛的传统水平仪。电子水平仪分为电感式和电容式。电感式水平仪是靠感应线圈的电压变化来判断工件是否水平,而电容式水平仪则靠两端间隙的电容量来判断水平。电子水平仪主要用来测量高精度的工具机。激光水平仪是将激光装置发射的激光束导入水平仪的望远镜筒内,使其沿视准轴方向射出,并判断待测物是否水平的水平仪。本研究中提到的水平仪是一种气泡水平仪。

气泡水平仪在出厂前需要严格校准,即把气泡水平仪放在标准水平面上,从气泡偏离中心的程度来检验气泡水平仪是否合格。目前国内厂家在检测中主要依据人眼判断。由于人眼判断存在速度慢,误差大,不稳定,易受外界环境因素影响等问题,使得产品精度很难提高。因此,迫切需要一种能够对气泡水平仪进行精确检测的仪器。对于需要出口的产品,这个问题更显得刻不容缓。

目前,图像边缘检测与提取算法已有一些在工业环境下的相关应用。例如:王博^[1]在车道偏离预警系统设计及方法的研究中,为了识别出车道线,引进了一种一维颜色差图像边缘检测方法对图像的边缘进行识别;林克正^[2]在小波多尺度变换的基础上结合压缩判决和求取导数提出了一种新的一维边缘检测方法;吴庆岗^[3]将一种改进的基于纹理特征的非封闭边缘检测算法应用于输电线图像中的部件的边缘提取之中;冯卫东^[4]在工业零件形状尺寸图像检测技术研究中提出一种新的矩边缘检测方法。

王金宝^[5]详细阐述了图像处理技术在水准柱几何参数检测和激光水平仪光点精度检测中的应用。魏煜和朱善安^[6-7]提出了一种基于最优阈值变换的气泡水平仪检测算法。本研究提出了一种新的基于 Canny 边缘检测和加权最小二乘法的气泡水平仪实时自动检测的方案。为了减少光照变化对检测精度的影响,在这里采用一种自适应设置 Canny 边缘检测阈值的方法。相比于文献[6]中所采用的全局阈值分割的方法,这里所采用的 Canny 边缘检测算法能更好地利用图像的局部信息、更准确地将目标从图像中分割出来。并且为了满足算法实时性的要求,提出一种基于二分

搜索算法的更快速的轮廓跟踪算法。实验结果表明该方案是切实可行的。

几乎所有实时的数字图像采集系统都会碰到光源照明方法的选取问题。这个问题也是影响气泡位置检测的准确性的一个相当重要的因素。气泡水平仪的气泡是由加注了 4/5 的绿色油状液体的圆柱形腔体内剩余的空气形成的。由于气泡是封闭在一段上表面凸起的透明水准柱中,假如直接用光线在不恰当的角度下照射水准柱,将会产生强烈的反射光线进而干扰气泡边缘的检测。同时,如果从上方摄入图像,总会有或多或少如上所述的镜面反射效应。在本研究中,考虑一种背光照明的方法。当光源与摄像机位于被测物两侧时,此时的光称作背光,当被测物是透明物体时称作透射光。对于透明物体,背光可以用于检测被测物的内部部件。在本研究中,将采取从侧面摄入图像并且背光照明的方法。这样就可以避免使用正面照明造成的反射。

本研究针对气泡水平仪的自动标定问题,对机器视觉领域中的边缘提取算法、最小二乘法等进行研究。

1 图像预处理与图像分割

在进行目标识别与定位前,需要对采集到的图像作预处理,以便得到目标识别所需的输入图像。预处理是重要的环节,其效果直接影响到算法的检测精度^[8-9]。预处理的主要流程包含图像灰度化、图像增强、图像滤波等过程。本研究中工业摄像机所采集到的图像是 200 W 像素的灰度图。在预处理阶段,只需要进行图像滤波即可。图像分割是将图像分成若干个特定的,具有独特性质的区域。图像分割后可以进行目标提取等后续处理。

1.1 高斯平滑滤波

由于在工业现场的图像采集会受到电磁干扰、粉尘等因素影响,采集到的图像中会含有一定噪声成分。Canny 提出了一种新的边缘检测方法,它对受到白噪声影响的阶跃形边缘是最优的^[10]。这种检测方法是具有 3 个基本目标:①低错误率:所有边缘都应被找到,并且没有伪响应,也就是检测到的边缘必须尽可能是真实边缘;②边缘点应被很好地定位:已定位边缘必须尽可能接近真实边缘,也就是由检测器标记为边缘的点和真实边缘的中心之间的距离应该最小;③单一边缘响应:对于真实的边缘,检测器仅应返回一个点,也就是真实边缘周围的局部最大数

应该是最小的。这意味着在仅存一个单一边缘点的位置,检测器不应指出多个边缘像素。Canny 用泛函求导的方法推导出高斯函数的一阶导数即为这种最优边缘检测算子的最佳近似。由于卷积和微分是满足结合律的运算,可以首先采用二维高斯函数对图像进行平滑:

$$Gauss(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: σ —控制平滑程度的高斯滤波器参数。

σ 较小的滤波器,由于分离事件的尺度较小,定位边缘的精度较高,但信噪比较低; σ 较大,则反之。在采集到的图像中,左右参考线大约宽 15 个像素。反复试验可以得到,高斯平滑滤波器的掩模的边长大约要取为线宽的一半。这样的边缘提取是效果最好的。因此,本研究中的高斯平滑滤波器的掩模的边长取为 $n = 7$,标准差取为 $\sigma = 1.55$ 。

1.2 梯度幅值和方向的计算

Canny 算子利用一阶微分算子来计算平滑后图像各点处的梯度幅值 G 和梯度方向 θ 。这里,选用有限差分算子作为一阶微分算子,点 (x, y) 处坐标轴方向的偏导数 $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别为:

$$G_x(x, y) = f(x + 1, y) - f(x - 1, y) \quad (2)$$

$$G_y(x, y) = f(x, y + 1) - f(x, y - 1) \quad (3)$$

式中: f —经过平滑后的图像。

点 (x, y) 处的梯度幅值和梯度方向分别为:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \quad (5)$$

1.3 非极大值抑制

为了精确定位边缘,必须细化梯度幅值图像 G 中的屋脊带,而只保留幅值的局部极大值,即非极大值抑制(NMS)。非极大值抑制(NMS)可以看成一种局部最大值的搜索问题。它是许多计算机视觉算法的组成部分。Canny 算子在梯度幅值图像 G 中以点 (x, y) 为中心 3×3 的领域内沿梯度方向进行插值 $\theta(x, y)$ 。如果点 (x, y) 处的梯度幅值 $G(x, y)$ 大于 $\theta(x, y)$ 方向上与其相邻的 2 个插值,则将点 (x, y) 标记为候选边缘点,反之则标记为非边缘点,从而得到候选边缘图像 N 。

1.4 检测和连接边缘

Canny 算子采用双阈值法从候选边缘点中通过检测和连接来得到最终的边缘。首先,研究人员应该确定

高阈值 T_h 和低阈值 T_l 。高、低阈值的选取决定了边缘点的数量。边缘点太少意味着一部分真实边缘信息的丢失,而且影响连接边缘,导致边缘连续性下降。边缘点太多又会引入噪声边缘,影响检测效果。然后,扫描图像,遍历候选边缘图像 N 中所有被标记为候选边缘点的像素点 (x, y) 。若点 (x, y) 梯度幅值 $G(x, y)$ 大于阈值 T_h ,则可以断定该点一定是边缘点;若点 (x, y) 梯度幅值 $G(x, y)$ 小于阈值 T_l ,则该点一定不是边缘点。而对于那些梯度幅值处于两个阈值之间的像素点,则将其看作疑似边缘点,需进一步依据边缘的连通性来断定它们是否是边缘点。若该像素点的邻接像素中有边缘点,则认为该点也为边缘点,否则,该点为非边缘点。

在本研究中,自适应选取高阈值 T_h 使得大于该高阈值 T_h 的强边缘点的数量占图像像素总量的 5%。笔者选取 $T_l = T_h \times 40\%$ 。反复试验表明,使用该方法选取的阈值能够有效提取图像的边缘信息且对光照变化有较强的鲁棒性,图像分割结果如图 1、图 2 所示。



图 1 图像分割的结果(光照不足、镜头倾斜、 $T_h = 91.4$ 、 $T_l = 36.5$)

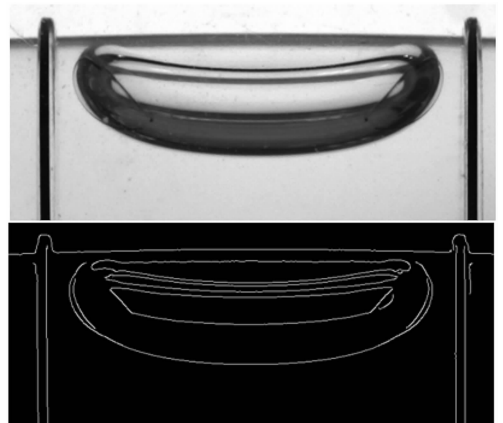


图 2 图像分割的结果(光照充足、镜头正对、 $T_h = 201.3$ 、 $T_l = 80.5$)

2 左、右平行参考线识别与气泡位置测量

要判断水准柱的水平程度,就必须对分割后的图像中的气泡和左、右两条平行参考线进行准确定位。首先应该把左、右两条平行参考线从图像中识别出来。

2.1 左、右平行参考线的识别和定位

左、右平行参考线的识别和定位,可以采用霍夫变换,也可以采用最小二乘法,来得到左、右平行参考线的直线方程。

霍夫变换是在二值图像中寻找直线的一种相对快速的方法^[11-12]。它检测已知点的共线性,是一种全局性的检测方法。当在已知点集中存在着干扰点和噪声时,它可以很好地抑制干扰和噪声,同时它还可以找到已知点集中的多条直线。但是,霍夫变换的精度却不容易控制,当实际问题对拟合直线的精度要求较高时,则不能用霍夫变换。霍夫变换的输出是共线点直线方程的参数。当需要得到线段时,还需进一步处理。

在本研究的霍夫变换中,采用参数化的直线方程 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 。其累加平面的横轴 θ 的取值范围为 $[-45^\circ, +45^\circ]$,分辨率为 0.1° 。纵轴 ρ 的取值范围为 $[0, 1\ 000]$ pixel,分辨率为 1 pixel。

另一种方法是采用最小二乘法来拟合左右平行参考线的直线方程。最小二乘法是一种数学优化技术。它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。

设左参考线的直线方程为 $\hat{\rho}_n = x \cos \hat{\theta} + y \sin \hat{\theta}$,右参考线的直线方程为 $\hat{\rho}_m = x \cos \hat{\theta} + y \sin \hat{\theta}$ 。左、右平行参考线的识别和定位可以表述为如下极小值问题:

$$\begin{pmatrix} \hat{\rho}_n \\ \hat{\rho}_m \\ \hat{\theta} \end{pmatrix} = \underset{(\rho_n, \rho_m, \theta)^T}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{e}_n \rho_n + \mathbf{e}_m \rho_m - \mathbf{x} \cos \theta - \mathbf{y} \sin \theta \|^2 \quad (6)$$

$$\mathbf{e}_n = \begin{bmatrix} \overbrace{1 \cdots 1}^{n \uparrow} & \overbrace{0 \cdots 0}^{m \uparrow} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_m = \begin{bmatrix} \overbrace{1 \cdots 1}^{n \uparrow} & \overbrace{0 \cdots 0}^{m \uparrow} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

式中: n —左参考线上采集到的点的数量, m —右参考线上采集到的点的数量, \mathbf{x} —左右两条平行参考线上

的点的横坐标组成的列向量, \mathbf{y} —左右两条平行参考线上的点的纵坐标组成的列向量。

令:

$$J(\rho_n, \rho_m, \theta) = \| \mathbf{e}_n \rho_n + \mathbf{e}_m \rho_m - \mathbf{x} \cos \theta - \mathbf{y} \sin \theta \|^2 = (\mathbf{e}_n \rho_n + \mathbf{e}_m \rho_m - \mathbf{x} \cos \theta - \mathbf{y} \sin \theta)^T \cdot (\mathbf{e}_n \rho_n + \mathbf{e}_m \rho_m - \mathbf{x} \cos \theta - \mathbf{y} \sin \theta) \quad (9)$$

且由 $\partial J / \partial \rho_n = 0, \partial J / \partial \rho_m = 0, \partial J / \partial \theta = 0$ 可得:

$$\hat{\rho}_n = \frac{\mathbf{e}_n^T \mathbf{x} \cos \hat{\theta} + \mathbf{e}_n^T \mathbf{y} \sin \hat{\theta}}{n} \quad (10)$$

$$\hat{\rho}_m = \frac{\mathbf{e}_m^T \mathbf{x} \cos \hat{\theta} + \mathbf{e}_m^T \mathbf{y} \sin \hat{\theta}}{m} \quad (11)$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2 \left[y^T \mathbf{x} - \frac{y^T \mathbf{e}_n \mathbf{e}_n^T \mathbf{x}}{n} - \frac{y^T \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^T \mathbf{x}}{m} \right]}{\left[(\mathbf{x}^T \mathbf{x} - \mathbf{y}^T \mathbf{y}) - \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{e}_n \mathbf{e}_n^T \mathbf{x} - \mathbf{y}^T \mathbf{e}_n \mathbf{e}_n^T \mathbf{y}}{n} - \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^T \mathbf{x} - \mathbf{y}^T \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^T \mathbf{y}}{m} \right]} \quad (12)$$

在本研究中,采用形态学中的轮廓跟踪方法,从下往上,搜索左、右两条平行参考线上所有连通的采样点。在实际应用中,取景框截取的图像通常不是整个工件而是类似于图1和图2的局部图像,且气泡上方会留有一定的白色区域,它们之间会有一条黑色边缘。从下往上搜索采样点既能够避开这条边缘,也能够更加简便快捷地找到左、右平行参考线。

原始的最小二乘法存在着一个缺点,即所有数据的贡献都是均等的。它没有考虑到其中存在着影响最后结果的异常点。如果仅仅是简单地采用最小二乘法,最后得到的结果将不能准确地反映实际情况。又由于在本研究中存在着采样结束的判定问题,考虑采用加权的最小二乘法。其具体步骤如下:

(1) 从左、右两条平行参考线上各取 3 个点,计算出 $\hat{\rho}_n, \hat{\rho}_m, \hat{\theta}$ 。

(2) 反复从左右两条平行参考线上各取 1 个点,分别计算它们到 $\hat{\rho}_n = x \cos \hat{\theta} + y \sin \hat{\theta}, \hat{\rho}_m = x \cos \hat{\theta} + y \sin \hat{\theta}$ 的距离。若这个距离大于某个阈值(本研究中取 3 pixel),则将这个采样点舍弃。否则,使用这个采样点更新 $\hat{\rho}_n, \hat{\rho}_m, \hat{\theta}$ 。

在本研究中,采用如上所述的加权最小二乘法可以得到与采用霍夫变换相比相当的稳健性,且前者比后者在计算时间和内存占用上都要少得多。

2.2 气泡左右端点的识别和定位

识别和定位了左右平行参考线后,实现气泡左右端点的识别和定位就比较容易了。在本研究中,将采用基于二分变步长的轮廓跟踪算法。

假设通过加权最小二乘法拟合出来的左参考线的

直线方程为 $\rho_n = x \cos\theta + y \sin\theta$, 右参考线的直线方程为 $\rho_m = x \cos\theta + y \sin\theta$ 。则中线到原点的距离 $\rho_o = (\rho_n + \rho_m)/2$ 。

识别和定位气泡左端点 A 的轮廓跟踪算法, 步骤如下:

(1) 取点为 $A(\rho_o/\cos\theta, 0)$, 步长为 $d = (\rho_m - \rho_n)/4$ 。此时, 点 A 的精度为 $\pm 2d$ 。

(2) 沿着 $\theta + 90^\circ$ 方向, 以 1 pixel 为步长, 移动点 A, 逐点搜索。如果在点 A 的移动轨迹上存在着边缘点, 则将点 A 沿着 $\theta + 180^\circ$ 方向, 移动 d pixel。否则, 将点 A 退回到初始位置, 沿着 θ 方向, 移动 d pixel。将步长 d 减为一半, 重复此步骤(2), 直到点 A 的精度 $2d$ 小于 0.5 pixel。识别和定位气泡左端点 B 的轮廓跟踪算法, 以此类推。

假设算法搜索出点 $A(x_A, y_A), B(x_B, y_B)$ 。则有, 过点 A 的切线到原点的距离为 $\rho_A = x_A \cos\theta + y_A \sin\theta$ 。过点 B 的切线到原点的距离为 $\rho_B = x_B \cos\theta + y_B \sin\theta$ 。

气泡偏离中心的距离 D_{bias} 由下式计算:

$$D_{bias} = (\rho_A + \rho_B)/2 - \rho_o \quad \text{pixel} \quad (13)$$

式中: $D_{bias} < 0$ — 气泡偏左; $D_{bias} > 0$ — 气泡偏右; $D_{bias} = 0$ — 气泡位于中心。

为得到以毫米为单位的物理距离, 在检测前需对摄像机进行标定。此标定较简单, 只需得到毫米数值与像素数值之比 γ 即可。

3 实验及结果分析

本研究应用该算法对气泡水平仪进行检测, 任取的两个图像的检测结果如表 1 所示。

表 1 测量结果(原图分辨率 $1\ 600 \times 1\ 200, \gamma = 0.037\ 5$)

图像	特点	偏离距离 /pixel	偏离距离 /mm	偏离方向
图 3	光照不足	8	0.300	左偏
图 4	镜头倾斜	3.5	0.131	右偏

不同光照条件下采集到的图像如图 3、图 4 所示。



图 3 采集到的图像(光照不足)

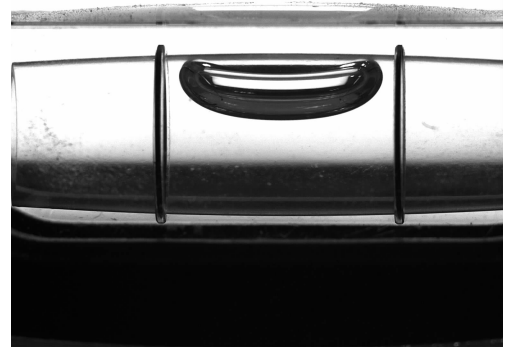


图 4 采集到的图像(光照充足但镜头倾斜)

不同光照强度下气泡偏离中心的实测距离如图 5 所示。

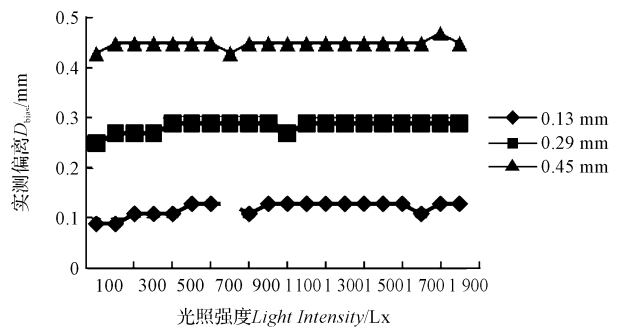


图 5 不同光照强度下气泡偏离中心的实测距离

从实际检测结果可以看出, 在处理成像质量不好的图像(如光照不足、水平尺与摄像机光轴斜交所采集到的图像)时, 该算法依然能得到较为满意的检测效果。

该检测算法已制成软件包, 并已投入实际应用。该软件的界面是基于 MFC 框架的。本研究使用 OpenCV v1.0 中的 cvSmooth 和 cvCanny 函数完成了图像预处理和图像分割^[13-15]。左、右平行参考线识别与气泡位置测量是用 C 语言实现的。软件界面如图 6 所示。

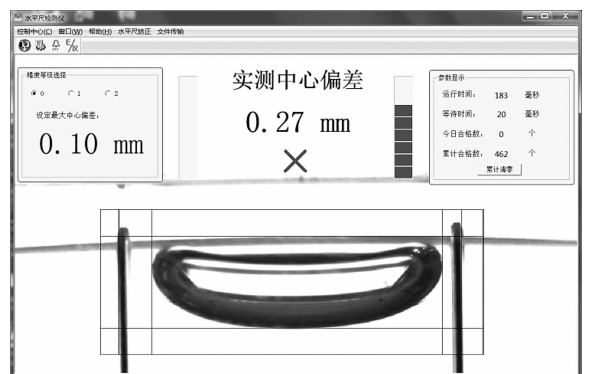


图 6 软件的界面

4 结束语

本研究所提出的气泡水平仪实时自动检测系统不仅对质量较差的图像有很强的鲁棒性,而且具有很高的实时性和检测精度。使用方对检测效果感到满意。

本研究所开展的工作只是阶段性的,还有很多方面需要改进。例如:为了能在工业现场中长时间使用,需要在将来加入抗震装置来应对工业环境中的震动,加入光屏蔽罩来防止外界环境光对图像采集区的干扰。为了进一步提高气泡检测定位的速度和精确度,可以考虑在将来使用一种基于灰度图像的轮廓跟踪算法来更加快速地把左、右参考线上端点和气泡左右端点给找出来。另外,可以考虑进一步开发具有自动矫正水准柱倾斜角度功能的机电控制系统。

参考文献(References):

- [1] 王博. 车道偏离预警系统设计及方法研究[D]. 长春: 吉林大学软件学院, 2012.
- [2] 林克正, 师晶, 赵洪. 多尺度压缩求导的一维图像边缘检测[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(3): 287-290.
- [3] 吴庆岗. 复杂背景输电线图像中部件边缘提取算法[D]. 大连: 大连海事大学信息科学技术学院, 2012.
- [4] 冯卫东. 工业零件形状尺寸图像检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学航天科学与工程学院, 2002.
- [5] 王金宝. 图像处理在水平尺综合检测系统中的应用[D].

- 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2007.
- [6] 魏煜, 朱善安. 最优阈值变换和轮廓跟踪在轮廓检测中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(24): 88-90.
- [7] 魏煜, 朱善安. 图像处理在水平尺标定系统中的应用[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(12): 168-169, 172.
- [8] STEGER C. Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images[D]. München: Fakultät für Informatik, Technische Universität, 1998.
- [9] STEGER C. Analytical and empirical performance evaluation of subpixel line and edge detection[C]// IEEE, Empirical Evaluation Methods in Computer Vision. LOSAlamitos: IEEE Computer Society Press, 1998: 188-210.
- [10] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 698.
- [11] HOVUGH P. Machine analysis of bubble chamber pictures[C]// Proceedings of the International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation. Geneva, Switzerland: CERN, 1959: 554-556.
- [12] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. **Communications of the Association for Computing**, 1972, 15(1): 11-15.
- [13] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [14] GARY BRADSKI, ADRIAN KAEBLER. Learning OpenCV [M]. California: O'Reilly Media, 2013.
- [15] DUDA R O, HART P E, STORK D G. Pattern Classification[M]. 2nd ed. . 北京: 机械工业出版社, 2003.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

盛伟, WANG Qing-guo, 朱善安. 基于Canny边缘检测和加权最小二乘法的气泡水平仪实时检测方法[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1182-1187.
 SHENG Wei, WANG Qing-guo, ZHU Shan-an. Real-time automatic level bar calibration based on Canny edge detection and weighted least squares method[J].
 Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(10): 1182-1187.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>