

文章编号: 1007-2780(2013)05-0770-06

基于机器视觉的钢包头检测系统设计

郭 杰¹, 雷 刚¹, 陈健生², 向守兵¹

(1. 四川工程职业技术学院 电气系, 四川 德阳 618000, E-mail: guojie@scetc.net;

2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 为了降低工人劳动强度, 提高检测速度和检测准确度, 将机器视觉引入到钢包头在线检测, 并设计了检测样机。首先分析钢包头变形特点, 提出了基于 8 个变形敏感区域 14 项重要指标的检测模型和流程, 重点介绍了具体图形算法, 最后基于 halcon 软件编程测试了系统性能, 并分析了运动对测量的影响、误差来源及其消除方法。实验结果表明: 在线检测的最大误差小于 0.2 mm, 漏检率 0%, 检测精度远高于人工检测, 平均视觉检测时间为 213.71 ms, 整体检测速度约是人工检测的 3.5 倍, 所设计系统可以满足流水线检测需要。

关 键 词: 机器视觉; 钢包头; 在线检测; 图像处理

中图分类号: TP274.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132805.0770

Design of Steel Toecaps Inspection System Based on Machine Vision

GUO Jie¹, LEI Gang¹, CHEN Jian-shen², XIANG Shou-bing¹

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College,

Deyang 618000, China, E-mail: guojie@scetc.net;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a prototype online system for the visual inspection of steel toecaps. Using this system can not only reduce the labor intensity of workers, but also improve the inspection speed and accuracy. By analyzing the deform characteristics of the steel toecaps, an inspection method was put forward based on 14 important indexes of the 8 main deformation areas. The specific graphics algorithm was focused. The system performance was tested based on the Halcon software, and the influence of motion on measurement, error sources and their eliminating methods was analyzed. Experimental results show that the maximum error of the system is less than 0.2 mm and the missing rate of defective product is 0%. The inspection accuracy is much higher than the manual inspection, and the average inspection speed is 213.71 ms, which is faster 3.5 times than manual inspection. The design of the steel toecaps online vision inspection system can meet the demand of industrial production.

Key words: machine vision; steel toecaps; on-line inspecting; image processing

1 引 言

军警战靴和劳保鞋等特殊用鞋为了有效保护足趾免于来自外界的冲击或者静压伤害, 会在鞋

头部分加装一种叫钢包头的配件, 如图 1 所示。钢包头在制作过程中会经过下料→冲片→深冲→切分→卷边→热处理工序(淬火-回火)→表面涂层(表面抛光-镀膜)等多道工序^[1]。在热处理阶

收稿日期: 2013-04-15; 修订日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61101152)

作者简介: 郭杰(1971—), 男, 四川泸州人, 硕士, 副教授, 现主要从事机器视觉与工业自动化方面研究。

段,容易造成“变肥”、“变瘦”和“变斜”等形变,因此在此工序后需要对钢包头进行检测,检测部位是钢包头的端口截面。目前,我国在该行业内普遍还是采用人工检查,方法是先制作一块和正品钢包头端口截面相同的标准模板,检查时用该模板与待检测钢包头的端口截面进行比对,从而确定合格与否,如图 2 所示,一个熟练工人平均 1 h 最多能检查约 2 000 个。显然,人工检测存在劳动强度大、生产效率低、误检率高、质量管理困难等缺点,研究钢包头自动检测装置有其现实意义,但目前国内还未见学者对此发表过相关论文。

近年来机器视觉技术取得长足进步,已日渐成为工业自动化系统的重要组成部分,广泛应用于大规模或者具有高测试要求的生产线上,以及野外、核电等不适合人员工作的环境中^[2-3]。利用机器视觉方式代替传统人工测量或检试,可以实现人工条件下无法达到的可靠性、精确度及自动化度^[4]。本文在分析钢包头的主要变形特征以及企业生产状况的基础上,提出了基于视觉图像信息的检测方法和若干指标以及检测流程,设计了相应的检测流水线,分析了误差产生的原因,并通过大量现场测试验证了该方案的可行性。

2 检测原理与系统总体设计

2.1 检测原理

图 1 是钢包头的实物图,图 2 所示为人工检测钢包头检测的方法。利用机器视觉进行检测的基本原理是:首先利用工业摄像机拍摄传送带上钢包头的图像,运用标定好的摄像机内外参数对图像进行转换,图像经预处理后用灰度阈值分割出钢包头图形,再根据合适的检测方法和质量标准对钢包头图形进行检测以判定产品是否合格。

图 3 所示为钢包头端口截面曲线及其最小外接矩形,最小外接矩形的宽度 w 和高度 h 反映是否“变肥”或“变瘦”。通过大量的样品分析发现钢



图 1 钢包头外形
Fig. 1 Appearance of steel toecaps



图 2 人工检查钢包头
Fig. 2 Manual inspection of steel toecaps

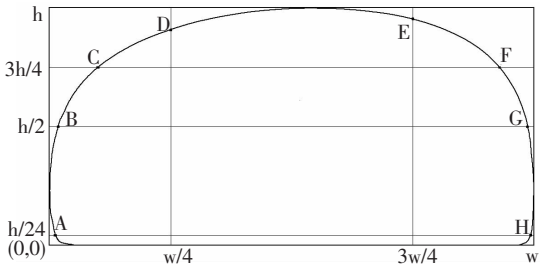


图 3 钢包头边沿与重要检测点
Fig. 3 Edge of steel toecaps and important checking points

包头“变斜”可以通过图 3 所示 A~H 共 8 个敏感点的坐标变化来检测,实践证明可以保证检测有效性和实时性。检测方法和流程如下:

①将一个标准的钢包头置于传送带上正常位置拍摄,图像经标定、预处理、分割后提取出钢包头图形,创建形状模板;提取亚像素边沿,测量出其最小外接矩形宽度 w 、高度 h , A、B、C、F、G、H 共 6 个点的横坐标 x_A 、 x_B 、 x_C 、 x_F 、 x_G 、 x_H 和两 D、E 点的纵坐标 y_D 、 y_E , 边沿曲线长度 L_C 以及曲线与矩形下边沿围合区域的面积 A_C 等 12 个参数作为检测指标。

②检测过程中,将采集到的传送带上的待检测钢包头图像经标定和预处理后,与形状模板进行匹配,相似度 s 低于下限值的可直接判定为不合格。如创建了多个形状模板,形状匹配还可以用于筛选出左脚、右脚或不同鞋码的钢包头。参照第①步检测其 12 项指标是否合格,合格标准由生产企业视具体质量要求而设定。

采用相似度 s 和 w 、 h 、 x_A 、 x_B 、 x_C 、 x_F 、 x_G 、 x_H 、 y_D 、 y_E 、 L_C 、 A_C 已经可以准确判断出钢包头形状是否合格,但对于边沿缺陷的检测能力不强,对于钢包头而言过大的边沿缺陷尤其是毛刺是不允许

的,因此需进行下一步检测。

③检测图形边沿的毛刺和凹陷是否超过规定尺寸,规定尺寸可以用缺陷对应的最小外接圆半径 r 表示。

2.2 系统总体结构设计

检测系统结构如图 4 所示,由传送带、拍摄单元、分拣机构、中央处理单元和人机界面等部分组成,图 5 所示为开发的样机。

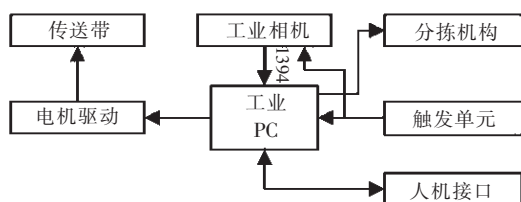


图 4 系统电气结构图

Fig. 4 Structure of system

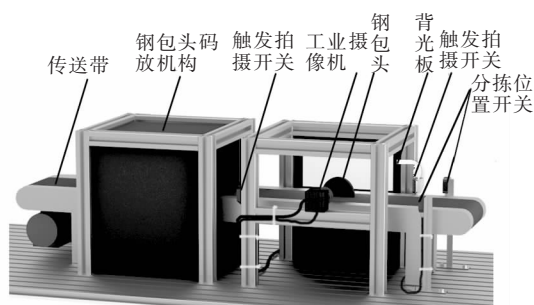


图 5 实验样机图

Fig. 5 Structure of experimental prototype

由于运算量较大,中央处理单元采用配置为 Intel Core 2 Duo i7 620M CPU,1G DDR3 内存的工业 PC,负责工业摄像机控制、图像处理和分析、传

送带速度控制以及向分拣机构 CPU 发送数据。

拍摄单元中摄像机选用分辨率为 $1\,280 \times 960$ 、像素尺寸 $4.65\,\mu\text{m}$ 的面阵 CCD 工业黑白摄像机,镜头为 8 mm、最大光圈 F1.4 的工业定焦镜头,光源为亮度可调的 LED 白色背光源板,同时为消除钢包头下方的暗角,在两侧各增加一个辅助点光源。触发拍摄开关采用对射式光电开关,成斜向 45° 安装。

分拣机构实现合格品和不合格品的分类处理,CPU 采用 NXP 公司的 P89V51RD2 单片机,通过串口与 PC 进行通信以获得分拣信息,机械臂上使用旋转编码器实现位置的检测,利用机械臂前端电磁铁进行钢包头的提取和释放操作。

3 图形处理与算法

3.1 摄像机标定

因需要精确测量 12 项几何尺寸,故须准确标定摄像机以消除图形畸变并完成从图像坐标系到世界坐标系的转换。通过标定可以得到焦距 f 、畸变因子 k 、缩放比例因子 s_x 和 s_y ,径向畸变中心点坐标 c_x 和 c_y 等 6 个反映面阵摄像机特性的主要内部参数,以及反映摄像机位姿状态的 6 个外部参数:世界坐标系绕摄像机坐标系 x 、 y 、 z 轴旋转的角度 α 、 β 、 γ 以及两个坐标系在 x 、 y 、 z 三个方向的平移参数 t_x 、 t_y 、 t_z 。通过外部参数可以将世界坐标系中点 $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ 变换到摄像机坐标系的点 $P_c = (x_c, y_c, z_c)^T$,关系式为:

$$P_c = RP_w + T \quad (1)$$

其中:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 1 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = (t_x, t_y, t_z)^T \quad (3)$$

因无法保证传送带平面成像和摄像机 CCD 的水平线基准线绝对平行,因此需对参数 γ 进行修正以使钢包头底部在图像上保持水平便于裁减矩形 ROI 区域。关于摄像机具体的标定过程已有文献详细介绍^[5-6],此处不再赘述。

3.2 基于 Canny 算子的亚像素边缘提取

本应用中所采用 Canny 算子提取钢包头亚像素边缘。1986 年,Canny 在文献中定义了边缘

检测 3 条准则:信噪比准则、定位精度准则和单边边缘响应准则,并提出一种最佳边缘检测算子即 Canny 边缘检测算子,其检测流程为^[7-8]:

(1) 首先用高斯滤波器对输入图像进行卷积滤波,滤除噪声,减小噪声对梯度计算的影响。高斯滤波器的表述为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

(2) 使用一阶差分算子计算水平方向和垂直方向的梯度幅值分量,从而得到图像的梯度的幅值 M 和梯度的方向 θ 。

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \theta = \arctan(G_y/G_x) \quad (5)$$

(3) 非极大值抑制,遍历梯度幅值图像 $M[i,j]$ 上每个像素,插值计算当前像素梯度方向上相邻两个像素的梯度幅值,如当前像素的梯度幅值不小于这两个值,则当前像素是可能的边缘像素,否则为非边缘像素,将图像边缘细化到一个像素宽度。 $M[i,j]$ 经过非极大值抑制得到图像 $NMS[i,j]$ 。

(4) 双阈值检测和边缘连接,检测过程遍历图像 $NMS[i,j]$,凡幅值大于高阈值 T_h 的点立即作为安全边缘点被接受,小于低阈值 T_l 的点立即剔除,介于二者之间的点如能按某一路径与安全边缘点相连才被接受。

上述为像素级边缘提取,其精度往往是不够

的,通过将边缘幅度拟合成一个二维多项式,然后在梯度向量方向上提取出其最大值所在位置,将这些点连接起来便得到图像亚像素边缘。多项式拟合能通过一个专用滤波器掩码进行卷积来实现^[9]。

3.3 图像处理流程

因应用中采用了漫反射背光源、所获取图像质量较好,如图 6(a);利用 3×3 中值滤波技术消除噪点后,用标定所得摄像机内部和外部参数对图像进行几何变换得到图 6(b);为方便提取钢包头的亚像素边缘,沿传送带平面以固定矩形裁减出钢包头图形如图 6(c);亚像素边缘如图 6(d);按照前述检测模型测量出 $w, h, x_A, x_B, x_C, x_F, x_G, x_H, y_D, y_E$ 和 L_C 等 11 项指标,如图 6(e) 所示;采用灰度自动阈值分割提取钢包头区域如图 6(f),计算出面积 A_C ,并通过形状匹配得到相似度 s 。

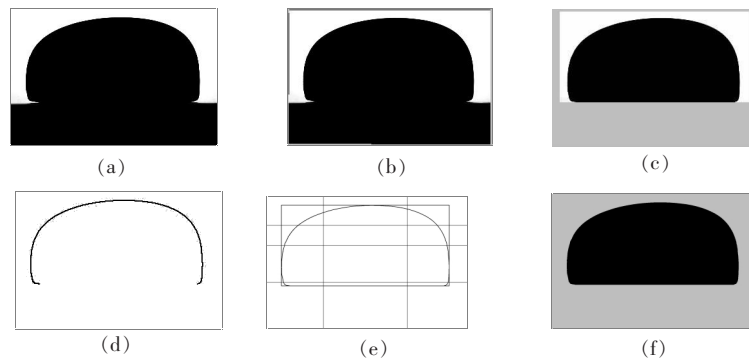


图 6 图像处理过程。(a)原始图像;(b)标定后的图像;(c)裁减后的图像;(d)亚像素边缘;(e)亚像素测量;(f)钢包头区域。

Fig. 6 Processing of image. (a)Original image; (b)Calibrated image; (c)Reduced image; (d)Sub-pixel edge; (e)Sub-pixel measuring; (f)Toecaps region.

3.4 边缘缺陷检测

图 7(a)~(d)所示为提取毛刺的算法过程。首先用前述阈值分割得到图 6(f)所示二值化钢包头图形区域。在检测边缘毛刺前,先用较大半径的圆形图元通过闭运算(先膨胀后腐蚀)消除潜在的边缘凹陷。图 7(a)黑色所示为带毛刺的局

部边缘。求出闭运算后二值钢包头图形的背景如图 7(b)中黑色部分,对其进行闭运算得到图 7(c)所示图形区域,将图 7(b)和图 7(c)差分可得到图 7(d)所示图形,该图形包括了毛刺和少许边缘图形。要检测毛刺是否超过规定尺寸,只需对图 7(d)再进行一次腐蚀运算,腐蚀半径为毛刺规定

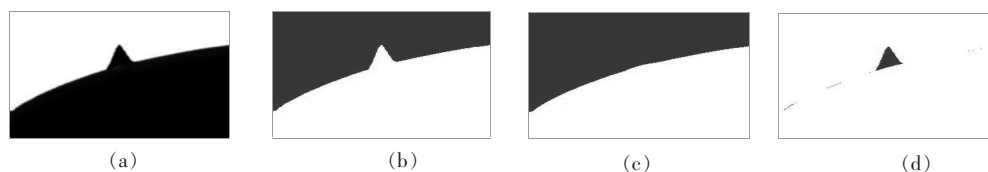


图 7 毛刺提取。(a)带毛刺的边缘;(b)背景;(c)闭运算后的背景;(d)毛刺。

Fig. 7 Segmenting of burr. (a)Edge with burr; (b)Background; (c)Closed background; (d)Segmented burr.

尺寸对应的最小外接圆半径 r 对应的像素个数,如果腐蚀运算后仍有残留,则说明毛刺尺寸超标。

检测边缘凹陷是否超标的算法与检测毛刺基本相同,只不过是直接对图形而不是背景进行闭运算和差分提取。

4 实验与分析

4.1 测量与数据分析

实验中拍摄物距约为 144 mm,标定后的拍摄平面视场宽度为 107.19 mm,单位像素对应宽度 83.745 μm ,这一分辨率对于钢包头测量已足够。由于传送带上钢包头处于运动状态,必然会在拍摄中造成一定程度的边缘模糊,影响测量精度。假设传送带速度为 v ,摄像机电子快门时间为 t ,则运动造成运动方向边缘模糊对应的像素数量 ΔN 为:

$$\Delta N = v \times t \times 106 / 83.745 \tag{6}$$

实验中设定 $v = 0.2 \text{ m/s}$ 、 $t = 1/2\ 500 \text{ s}$,则 $\Delta N = 0.955$,运动给图像边缘上某个点带来横向误差 $\Delta x \approx 90 \text{ }\mu\text{m}$,竖向误差 $\Delta y \approx -k \times 90 \text{ }\mu\text{m}$, k 为边缘曲线在该点的切线斜率,图 3 中 D、E 两点 k 值绝对值均小于 1,因此 y_D 、 y_E 受运动影响比 w 、 x_A 、 x_B 、 x_C 、 x_F 、 x_G 、 x_H 、 L_c 小,钢包头高度 h 不受影响。

为方便说明,图 8 选择了 6 个钢包头作为测试对象,其中,图 8(a)作为测试模板,(b)~(f)为

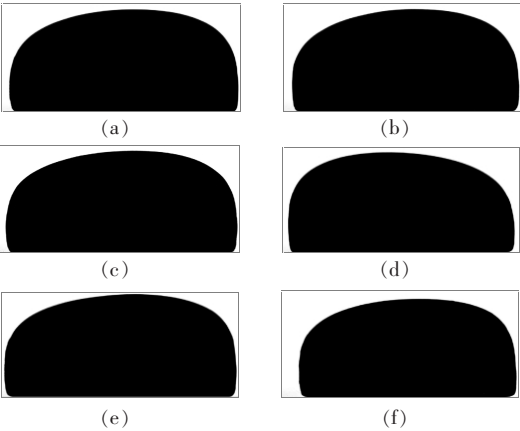


图 8 模板与待检品图像。(a)模板-10L;(b)待检品 1-10L;(c)待检品 2-10L;(d)待检品 3-10R;(e)待检品 4-11L;(f)待检品 5-9L。

Fig. 8 Model and 5 testing toecaps. (a) Model-10L; (b) Toecaps1-10L; (c) Toecaps2-10L; (d) Toecaps 3-10R; (e) Toecaps 4-11L; (f) Toecaps 5-9L.

5 个待检测钢包头,“10L”代表 10 号鞋码左脚,“10R”代表 10 号鞋码右脚,其他类推。

表 1 是用德国 Mvtec 公司 Halcon 软件编写相应程序在前述工控机上所得到的测试结果。为方便比较,在表中列出了用游标卡尺所测得的最大宽度 w' 和最大高度 h' 。

表 1 图 8 所示钢包头检测结果

Table 1 Inspection result of toecaps in figure 8

钢包头	模板	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5
x_A/mm	1.14	1.08	1.24	0.99	1.03	0.98
x_B/mm	1.50	1.13	1.39	0.76	1.06	0.58
x_C/mm	8.74	8.80	8.15	6.70	8.52	5.19
x_F/mm	83.14	83.15	84.04	86.62	79.82	80.14
x_G/mm	88.28	88.25	88.84	90.31	84.49	87.24
x_H/mm	88.67	88.30	88.68	90.18	84.90	88.02
y_D/mm	39.90	39.78	39.93	42.01	38.23	42.56
y_E/mm	41.82	42.04	42.28	43.52	41.30	39.69
w/mm	89.37	89.28	89.78	91.07	85.52	88.87
h/mm	43.82	43.99	44.00	45.60	42.77	44.19
L_c/mm	155.43	156.76	156.84	160.77	155.16	155.81
A_c/pix	488 382	489 361	494 496	522 429	461 374	490 696
相似度	/	0.953	0.739	空	空	空
时间/S	215.47	208.27	227.17	213.14	206.25	232.44
w'/mm	89.36	89.24	89.68	90.94	85.26	88.64
h'/mm	43.74	43.90	43.98	45.52	42.66	44.08

表中数据反映出用机器视觉测量出的最大宽度和最大高度与用游标卡尺测的结果均存在一定偏差。宽度测量偏差除了成像质量和前述传送带运动的因素外,另一个主要的因素是由于钢包头端口截面带一定倾角,不同钢包头的倾角差异会影响式(2)中的转换矩阵 R ,从而影响了测量结果,该因素同样也影响高度测量准确度。影响高度测量的因素还有就是传送带厚度的不均匀性和细微震动。不过通过大量实验验证本实验机构中几何尺寸的测量误差范围均小于 0.2 mm,这在钢包头行业已经是一个很高的测量精度和准确度了。表中鞋号为 9L、10R 和 11L 的匹配相似度得分分为空,表明 3 个图形与模板形状匹配的相似度得分低于下限值(本例中设定为 0.5),很容易被剔除。

如果把合格标准设定为: $s \geq 0.9$, $\Delta L_C/L_C$ 和 $\Delta A_C/A_C \leq \pm 1\%$, Δw 、 Δh 、 Δx_A 、 Δx_B 、 Δx_C 、 Δx_F 、 Δx_G 、 Δx_H 、 Δy_D 、 Δy_E 均 $\leq \pm 0.5$ mm, $r \leq 0.7$ mm。图 8(b)所示钢包头与图 8(a)所示模板相比较各项指标均合格,而图 8(c)所示钢包头因 C 点和 G 点变形超标导致相似度太低而被判定为次品。为进一步验证检测可靠性,选用了成都某钢包头生产企业通过人工检测的“合格品”和“次品”各 1 000 个作为测试对象,在本实验检测线上以上述 14 项指标进行检测,结果 1 000 件“次品”无一合格,漏检率为 0%,1 000 个“合格品”中有 184 个未达到指标要求或边缘缺陷过大而判定为不合格,表明本检测指标比人工检测要更加严格和准确。

4.2 检测时间

实际应用中检测时间是一个关键的指标,表 1 中 6 个钢包头的平均检测时间 217.2 ms。在上述进行的 2 000 个钢包头检测实验中,最长的检测时间为 268.334 ms,平均检测时间 213.71 ms。前述摄像机视场宽度 $W_f=107.19$ mm,传送带速度 $v=0.2$ m/s,前后两个钢包头拍摄时间间隔

$t_i=W_f/v \approx 536$ ms,由此可见检测时间满足 $v=0.2$ m/s 的在线检测需要,可以达到每小时 7 000 个的检测速度。如果进一步提高 v 还可以提高产能,不过提高 v ,又不想增大图像边缘模糊,就只有减少摄像机曝光时间,需要在镜头光圈、景深和背光源亮度上综合考虑,另外还得考虑后续分拣机构的分拣速度。

5 结 论

将机器视觉引入到钢包头的在线检测,提出用相似度、8 个变形敏感点的坐标、最大宽度、最大高度、周长、面积和边缘缺陷尺寸等 14 项指标综合检测钢包头的变形,实现了 0.2 mm 以下的检测精度,能可靠识别边缘缺陷,检测质量远远超过传统的检测方法;平均视觉检测时间不足 300 ms,能满足在线检测时间要求,达到了 7 000 个/h 的检测能力,检测速度大约是数量工人的 3.5 倍;通过形状模板匹配还可实现自动识别和分拣不同型号的钢包头等其他功能。机器视觉运用于钢包头在线检测是一种完全可行的自动化解决方案。

参 考 文 献:

- [1] 孝缠民,戴盛涛. 钢包头用冷轧窄带钢质量改进 [J]. 特钢技术,2011,17(2):46-63.
- [2] 李一芒,何昕,魏仲慧. 红外预警实时图像处理系统设计 [J]. 液晶与显示,2013,28(1):110-114.
- [3] 陈洪财,张荣学. 基于图像识别的液晶盒厚在线测量系统 [J]. 液晶与显示,2011,26(4):561-564.
- [4] 美国国家仪器(NI)公司. 机器视觉如何应对与工业自动化系统集成应用的挑战 [J]. 电子技术应用,2009,35(6):24-25.
- [5] 唐启敬,田行斌,耿明超. CCD 视觉检测系统的整体标定 [J]. 光学精密工程,2011,19(8):1903-1910.
- [6] 刘源洞,孔建益,王兴东,等. 基于 HALCON 的非线性摄像机标定算法研究与应用 [J]. 机械设计与制造,2012(2):61-63.
- [7] 曾俊. 图像边缘检测技术及其应用研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [8] 屈玉福,浦昭邦,王亚爱. 视觉检测系统中亚像素边缘检测技术的对比研究 [J]. 仪器仪表学报,2003,24(Z1):460-462.
- [9] Carston Steger, Markus Ulrich. *Machine Vision Algorithms and Application* [M]. 北京:清华大学出版社,2008:176-238.