

# 基于机器视觉的深沟球轴承滚珠遗漏检测

郝勇<sup>1</sup>, 赵翔<sup>1</sup>, 温钦华<sup>1</sup>, 商庆园<sup>1</sup>, 陈斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013;

<sup>2</sup>江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用机器视觉检测方法对深沟球轴承装配过程中的滚珠遗漏缺陷进行自动检测。引入3种光源照明方案用于采集轴承图像,采用中值滤波去除图像噪声,基于圆形 Hough 变换和极坐标展开方法进行轴承图像的圆形检测和矩形展开。选用完好轴承80个、滚珠遗漏轴承60个进行实验。结果表明:采用背光配合同轴光的照明方式可有效减少轴承表面反光;采用中值滤波对图像进行预处理,可以在消除图像孤立噪声点的同时,使图像少一些模糊;采用圆形 Hough 变换可以快速获取轴承的内外环图像并对其进行定位,然后通过笛卡尔极坐标展开方法将经过预处理的深沟球轴承图像归一化展开成矩形,最后通过设置灰度阈值实现滚珠遗漏位置的检测和识别。本文方法对80个完好轴承的识别率为92.5%,对60个滚珠遗漏轴承的识别率为93.3%。

**关键词** 机器视觉; 滚珠遗漏检测; 图像处理; 深沟球轴承

中图分类号 O657.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021502

## Roller Missing Detection in Deep Groove Ball Bearings Based on Machine Vision

Hao Yong<sup>1</sup>, Zhao Xiang<sup>1</sup>, Wen Qinhu<sup>1</sup>, Shang Qingyuan<sup>1</sup>, Chen Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

<sup>2</sup>School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** The roller missing defect in the assembling process of deep groove ball bearings is detected automatically with the machine vision method. Three lighting schemes are presented for acquisition of bearing images. The image noise is removed by median filter. The Hough transform algorithm and the polar coordinate expansion method are used for circular detection and rectangular expansion of bearing images. 80 perfect bearings and 60 roller missing bearings are selected for test. The results show that the lighting system of coaxial light source combined with backlight can effectively reduce the surface reflection of bearings. The pre-processing of the image with the median filter can eliminate the isolated noise and make the image less vague. The Hough transform algorithm can quickly obtain the images of bearing inner and outer rings and locate them. The Cartesian polar coordinate expansion method can expand the roller bearing images into rectangles. The detection and recognition of the roller missing position are realized by setting the gray threshold. The recognition rates of the proposed method for 80 perfect bearings and 60 roller missing bearings are 92.5% and 93.3%, respectively.

**Key words** machine vision; roller missing detection; image processing; deep groove ball bearing

**OCIS codes** 150.0155; 140.1835; 100.2960

## 1 引言

在轴承生产装配过程中,由于各种不确定因素,轴承可能会存在滚珠缺少、表面划痕、表面凹坑、表

面锈蚀、铆钉不合格等缺陷<sup>[1-4]</sup>,轻者会影响轴承的使用性能,重者会使得轴承报废,影响设备的正常运行,给日常生产带来安全隐患;所以,轴承产品在出厂前,必须经过严格的检测,以确保轴承产品合格。

收稿日期: 2017-06-28; 收到修改稿日期: 2017-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(21265006,31171697)、江西省自然科学基金(2015ZBAB201003)

作者简介: 郝勇(1978—),男,博士后,副教授,主要从事农产品无损检测技术和化学计量学方面的研究。

E-mail: haonm@163.com

目前,在机器视觉技术的发展方面国内外差距较大。国外的机器视觉技术已基本完成高精度、大面积快速检测的工业化转化,而国内的机器视觉技术还局限于小区域车辆、人口密度的监测控制,以及小型产品制造和装配过程中的检测分选<sup>[5-8]</sup>。监测系统的搭建和核心算法的编写是机器视觉技术成功应用的关键。然而,国外在这2个方面对我国实行严密的技术封锁,因此当下国内机器视觉发展受阻。

现在,轴承质量监控方面的研究发展较快,如: Rai 等<sup>[9]</sup>提出了基于人工智能等技术的多种用于滚动轴承缺陷检测的信号处理方法; Klein 等<sup>[10]</sup>通过对基线、距离时频重新分配(TFR)、脊线检测和选择匹配脊4个阶段的分析实现轴承检测; Cha 等<sup>[11]</sup>运用 Hough 变换和支持向量机实现轴承上滚动螺栓的检测; Shen 等<sup>[12]</sup>发现了轴承密封件变形缺陷投影分布的常见规律,并设计了一种基于规则的简单而有效的检测算法。在轴承在线装配和检测方面,很多学者也做出了杰出的实验成果: Feng 等<sup>[13]</sup>通过包络谱计算识别不同轴承缺陷的特征频率; 刘明周等<sup>[14]</sup>应用 Petri 网模型构建了面向机械产品装配作业过程的视觉集成。

本文采用机器视觉系统对深沟球轴承滚珠缺失现象进行检测,采用 MATLAB 程序驱动 AVT Manta 工业相机对被检测轴承实现单帧和多帧图像采集,并对采集到的轴承图像进行处理,从而实现深沟球轴承滚珠遗漏的检测。该方法有望应用于深沟球轴承缺陷的实时在线检测中。

## 2 实验部分

### 2.1 图像采集系统

图1所示为本文设计的图像采集系统,其中最主要的2个部分是相机和光源。

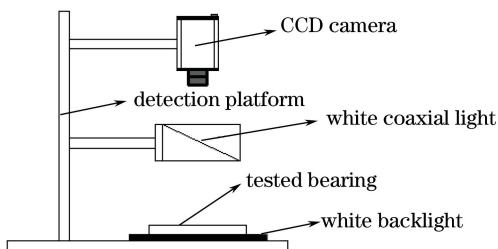


图1 图像采集系统结构

Fig. 1 Diagram of image acquisition system

选定德国 AVT Manta 系列工业相机中的 Allied Vision Manta G125 1/3 Monochrome CCD Camera 用于实验,其分辨率可以达到 1292 pixel ×

964 pixel,可完全满足实验需求,且价格实惠。

### 2.2 光源布置

光源的选取对轴承缺陷检测的影响很大,若是照明达不到一定的要求,即使再好的相机也无法采集到理想的图像,而一旦采集到的图像存在问题,那么运用再先进的算法也无法得到想要的结果<sup>[15-16]</sup>。本文的检测对象是轴承,为金属器件,所以优先考虑对金属器件检测能达到较好照明效果的白色同轴光源。为了形成一定的实验对比,进一步优化实验效果,同时考虑到要对轴承的轮廓进行提取,因此选购了白色背光源。

本文在实验初期设计了3种照明方案用于轴承图像的采集:方案1,采用同轴光源作为图像采集光源;方案2,采用背光光源作为图像采集光源;方案3,采用同轴光源和背光光源组合而成的照明系统作为图像采集光源。

### 2.3 照明方案确定

3种照明方案的实验结果如图2所示。图2(a)为利用照明方案1得到的图像,虽然反光少,但是图像比较灰暗,轮廓不够清晰,轴承和背景的分度度不够明显;图2(b)为利用照明方案2得到的图像,轮廓清晰,但细节完全丢失;图2(c)为利用照明方案3得到的图像,轴承与背景的分度度明显,在显示出轴承细节部分的同时,能够很清晰地显现出轴承轮廓。最终,本文选择照明方案3。

## 3 结果与分析

确定光源方案之后,设计图像采集界面,实现相机驱动、图像参数设置和图像显示与保存等,控制相机对轴承图像进行多次采集,便于后续图像处理。完好的轴承有7颗滚珠,遗漏1颗滚珠的轴承只有6颗滚珠,采集到的图像如图3(a)所示。

### 3.1 轴承的内外环提取

采集到的轴承图像经中值滤波,对其采用圆形 Hough 变换(CHT)来确定轴承的内外环。当内外环确定之后,被检测轴承也就相当于被定位了。轴承的内外环提取如图3(a)所示。

CHT 是一种特别的算法,它的作用是寻找图像中存在的圆,该算法的优点在于,外界大部分对图像处理存在干扰的因素,比如光照、噪声等,很难对它检测结果的稳定性和精确性产生较大影响。CHT 的实现步骤为:1)累加器数组计算;2)中心点估计;3)最终所得圆半径的估计。

图3(b)所示为一个在实际圆(实心圆圈)上的

候选像素,及其经过经典 CHT 投票模式在其周围投票产生的新圆(虚线圆圈)。候选像素的投票结果是单个圆,它们的共同交点趋向于累加器数组对应的圆心;因此,通过检测累加器数组的峰值即可以估算

出圆心。图 3(c)显示了估计出的中心点,即检测出的圆心。用同一个累加器数组检测多个半径值,一般采用经典 CHT 算法完成。通过该检测算法发现,圆的半径估计必须作为一个单独的步骤来进行<sup>[17-18]</sup>。

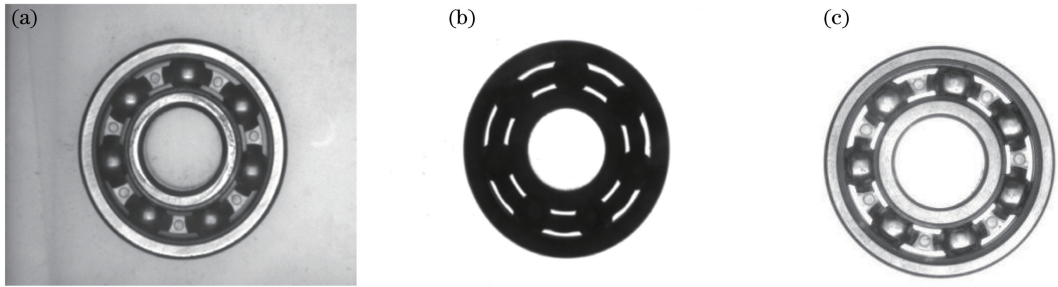


图 2 不同照明方案下得到的图像。(a)同轴光源;(b)背光光源;(c)同轴光源和背光光源

Fig. 2 Obtained images under three lighting schemes.

(a) Coaxial light source; (b) backlight source; (c) coaxial light source and backlight

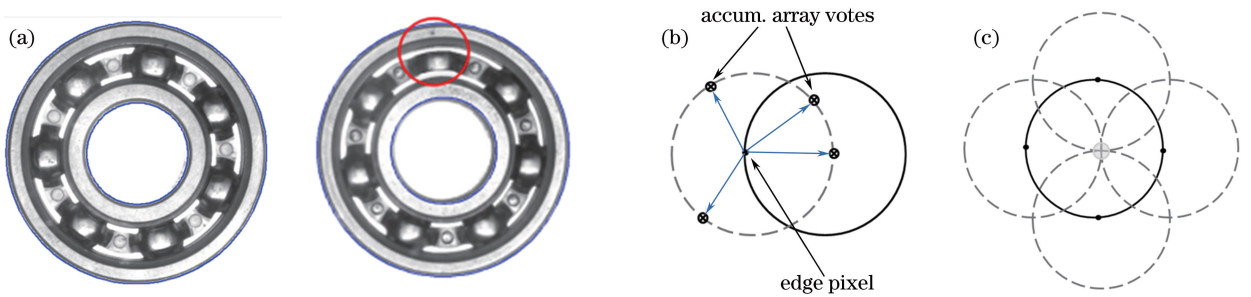


图 3 (a)轴承的内外环提取结果;(b)经典 CHT 模式下产生的新圆;(c)估计的圆心

Fig. 3 (a) Extraction bearing inner and outer rings; (b) a new circle produced under the traditional CHT model; (c) the estimated circle center

### 3.2 轴承图像分割

为了便于后续图像处理,将被定位的轴承从背

景图像中分割出来,以排除背景对图像处理不良影响。轴承内外环图像的分割如图 4 所示。



图 4 轴承的内外环分割图像

Fig. 4 Segmentation of bearing inner and outer rings

### 3.3 轴承图像展开

图像归一化是对图像进行一系列标准的处理,使之变换为具有固定标准形式的过程,该具有固定标准形式的图像被称作归一化图像。极坐标归一化原理如图 5(a)所示,沿  $Q$  的方向对内外环之间的圆周进行展开( $Q$  由沿圆环半径方向上的一条射线与

圆环的内外环交点的连线所确定),使其变成一条直线。以其作为参照,对内外半径之间的圆环进行展开操作,得到矩形图。取参照圆中的一点  $P(x, y)$ ,  $R_1$  为内圆半径,  $R_2$  为外圆半径,圆的半径  $R = (R_1 + R_2)/2$ ,  $O(x_0, y_0)$  为所取参照圆的圆心。展开之后图像的规格为  $W \times H$ , 其中  $H$  是矩形展开图的高度

$R_2 - R_1$ ,  $W$  为矩形展开图的宽度  $\pi(R_1 + R_2)$ 。图像展开前后的像素对应关系如图 5(b)所示,点  $P(x, y)$  对应到展开图像中的点为  $P_1(x_1, y_1)$ , 展开图像和原图像中点  $P$  对应的点  $P_1$  的坐标值为

$$x_1 = x_0 + \sin(A \cdot \Delta W + D + \pi/2) \cdot (R_1 + \Delta H), \tag{1}$$

$$y_1 = y_0 + \cos(A \cdot \Delta W + D + \pi/2) \cdot (R_1 + \Delta H), \tag{2}$$

式中  $A = \arctan(s/R)$ ;  $R$  为参照圆半径;  $s$  为图像

展开精度, 设为 1.0;  $D$  表示  $Q$  方向;  $\Delta W$  为宽度增量;  $\Delta H$  为高度增量。

本文将采集到的圆环状的轴承图像利用极坐标方式归一化为矩形的轴承图像, 这样既去掉了圆环内外不需要的像素, 压缩图像的大小, 又便于后续对轴承中的各类缺陷, 如滚珠的遗漏、表面存在的铁锈、表面的划痕、铆钉的不合格等, 进行识别和特征值提取。图 6(a)、(b) 分别为完好轴承与滚珠遗漏轴承的极坐标展开图。

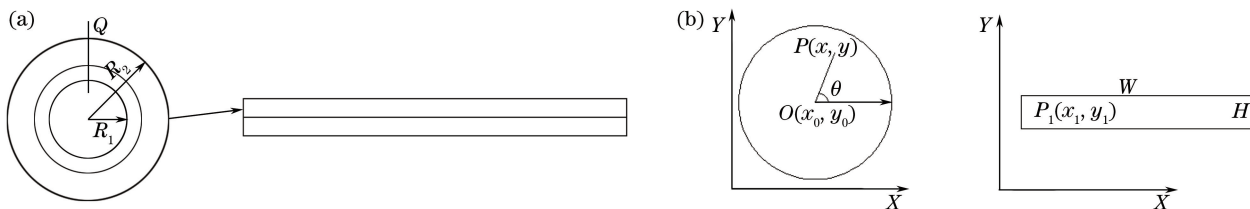


图 5 轴承展开的原理图。(a)圆环展开;(b)图像展示前后的像素对应

Fig. 5 Schematic of bearing expansion. (a) Ring expansion; (b) pixel correspondence before and after ring expansion

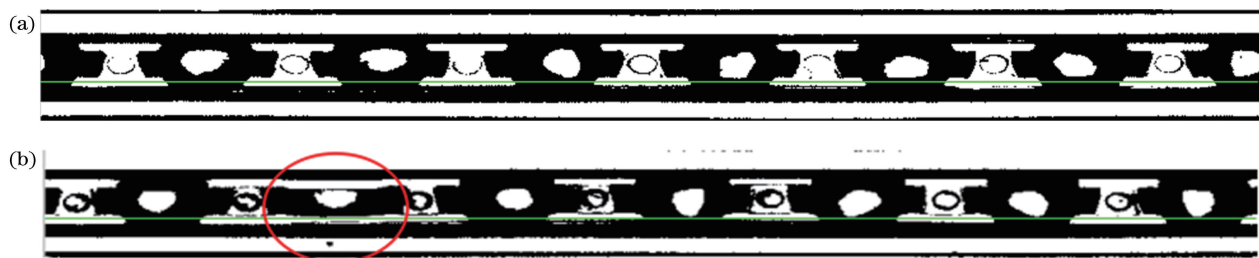


图 6 完好轴承(a)与滚珠遗漏轴承(b)的极坐标展开图

Fig. 6 Polar coordinate expansion of a perfect bearing (a) and a roller missing bearing (b)

### 3.4 轴承滚珠遗漏检测

轴承归一化后相当于一个数据矩阵, 图像中的每个像素包含着 3 个数据, 分别为该点的  $x$  轴、 $y$  轴坐标, 以及灰度数值。检测轴承滚珠遗漏的方法是: 提取矩阵中某行的数据, 然后对其包含的灰度数值进行比较, 得出该被检测轴承是否为有滚珠遗漏的残次品。为了检测过程更加快捷, 检测结果更加明显, 在对采集到的轴承进行检测前, 先对归一化的图像进行二值化处理, 二值化的阈值选用系统提供的

最佳值。图 7(a)、(b) 分别为完好轴承与滚珠遗漏轴承的数据提取结果。

图 8(a) 为完好轴承的检测结果, 获取的数据有 7 个柱状图, 表明被检测轴承拥有 7 颗滚珠, 为完好轴承。图 8(b) 为滚珠遗漏轴承的检测结果, 获取的数据只有 6 个柱状图, 表明被检测轴承只拥有 6 颗滚珠, 最终判别为滚珠遗漏轴承, 为残次品, 应被剔除。根据实验结果可知, 该方法对 80 个完好轴承的识别率为 92.5%, 对 60 个滚珠遗漏轴承的识别率为 93.3%。

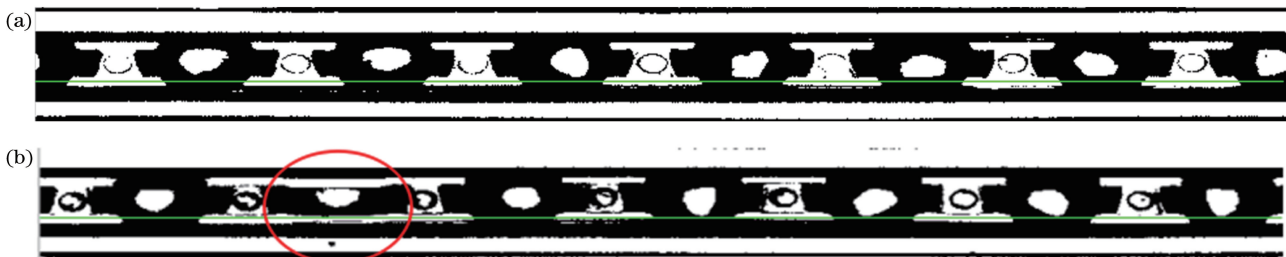


图 7 完好轴承(a)与滚珠遗漏轴承(b)的数据提取

Fig. 7 Data extraction of a perfect bearing (a) and a roller missing bearing (b)

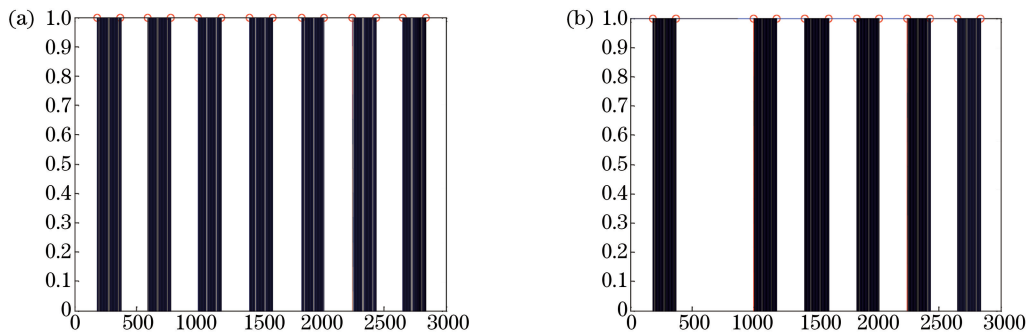


图 8 完好轴承(a)与滚珠遗漏轴承(b)的检测结果

Fig. 8 Identification results of a perfect bearing (a) and a roller missing bearing (b)

## 4 结 论

运用图像处理的基本原理,从深沟球轴承的特点出发,选择相应的相机和光源搭建检测平台展开实验。通过检测平台获得清晰易处理的轴承图像,利用图像处理技术,实现对轴承的预处理和特征数据的提取,最终实现轴承是否存在滚珠遗漏缺陷的判别。结果显示,该方法对完好轴承的识别率为92.5%,对滚珠遗漏轴承的识别率为93.3%,表明该方法可以稳定地检测出目标轴承是否存在滚珠遗漏,并且能实现对滚珠遗漏轴承的剔除。为了使该方法能应用于工业化生产,本文方法在特征信息提取方面仍有待于提高。

## 参 考 文 献

- [1] Huang J, Xu B. A machine vision system for position measurement of small holes on spherical surface[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(1): 28-34.  
黄劫, 许斌. 基于机器视觉的半球面微小孔位置的精密测量系统[J]. *纳米技术与精密工程*, 2016, 14(1): 28-34.
- [2] Wang R, Qi T Y. Study on crack characteristics based on machine vision detection[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 123-128.  
王睿, 漆泰岳. 基于机器视觉检测的裂缝特征研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(7): 123-128.
- [3] Ding W M, Zhao S Q, Zhao S Q, *et al.* Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 1-10.  
丁为民, 赵思琪, 赵三琴, 等. 基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 1-10.
- [4] Wang H J, Xiong J T, Li Z Z, *et al.* Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 272-277.  
王红军, 熊俊涛, 黎邹邹, 等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 272-277.
- [5] Min Y Z, Yin C, Dang J W, *et al.* Fast recognition method of rail region based on hue value mutation feature of image [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(1): 46-54.  
闵永智, 殷超, 党建武, 等. 基于图像色相值突变特征的钢轨区域快速识别方法[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(1): 46-54.
- [6] Zhang B, Ni K Z, Wang L J, *et al.* New algorithm of detecting optical surface imperfection based on background correction and image segmentation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911004.  
张博, 倪开灶, 王林军, 等. 基于背景校正和图像分割定量分析光学元件表面疵病的新算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911004.
- [7] Huang C, Fei J Y. Online apple grading based on decision fusion of image features[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 285-291.  
黄辰, 费继友. 基于图像特征融合的苹果在线分级方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 285-291.
- [8] Wang Y W, Qu G T, Liu X L, *et al.* Image subtraction detection algorithm for surface defect of steel ball [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(10): 1699-1704.  
王义文, 屈冠彤, 刘献礼, 等. 钢球表面缺陷的图像差分检测算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(10): 1699-1704.
- [9] Rai A, Upadhyay S H. A review on signal processing

- techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Tribology International, 2016, 96: 289-306.
- [10] Klein R, Masad E, Rudyk E, *et al.* Bearing diagnostics using image processing methods [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1): 105-113.
- [11] Cha Y J, You K, Choi W. Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines [J]. Automation in Construction, 2016, 71: 181-188.
- [12] Shen H, Li S, Gu D, *et al.* Bearing defect inspection based on machine vision[J]. Measurement, 2012, 45(4): 719-733.
- [13] Feng G J, Gu J, Zhen D, *et al.* Implementation of envelope analysis on a wireless condition monitoring system for bearing fault diagnosis[J]. International Journal of Automation and Computing, 2015, 12(1): 14-24.
- [14] Liu M Z, Ma J, Zhang M, *et al.* Online operation method for assembly system of mechanical products based on machine vision [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(9): 2343-2353.  
刘明周, 马靖, 张森, 等. 基于机器视觉的机械产品装配系统在线作业方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2343-2353.
- [15] Hua H, Mao X L, Tan J H, *et al.* Research on dynamic lighting design method based on LED array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102202.  
花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于 LED 阵列的动态照明设计方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102202.
- [16] Huang Z L, Zhu Q B. Research on red skin area of red Fuji apple based on RGB color model [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041001.  
黄兆良, 朱启兵. 基于 RGB 颜色模型的红富士苹果表皮红色区域检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041001.
- [17] Zhang M, Jin L X, Wu F L, *et al.* Non-metric method for camera distortion correction based on Hough transform [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(11): 2217-2223.  
张敏, 金龙旭, 吴凡路, 等. 基于 Hough 变换的摄像机畸变非量测标定方法 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(11): 2217-2223.
- [18] Guo M, Hu L L, Zhao J T. Preparation detection of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0904001.  
郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0904001.