

引用格式:刘胜书,顾国华,王俊舟,等.基于机器视觉的协作式机器人 Baxter 目标识别算法[J].电光与控制,2019,26(4):95-99,105. LIU S S, GU G H, WANG J Z, et al. An object recognition algorithm based on machine vision of collaborative robot Baxter[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4): 95-99, 105.

## 基于机器视觉的协作式机器人 Baxter 目标识别算法

刘胜书<sup>1</sup>, 顾国华<sup>1</sup>, 王俊舟<sup>2</sup>, 曹行健<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;  
3. 电子科技大学, 成都 611731)

**摘要:** 为了提升协作式机器人 Baxter 在工作应用中识别抓取目标物体的准确性和鲁棒性, 对所涉及到的一些图像处理算法进行研究, 提出了基于 HSV 颜色模型和形态学处理的工作区域轮廓检测算法, 改进了传统识别圆的 Hough 变换算法。实验结果表明, 所提出和改进的算法能够提升协作式机器人 Baxter 对目标识别的准确性和鲁棒性。

**关键词:** 机器视觉; 协作式机器人 Baxter; 目标识别

**中图分类号:** O213.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.019

## An Object Recognition Algorithm Based on Machine Vision of Collaborative Robot Baxter

LIU Sheng-shu<sup>1</sup>, GU Guo-hua<sup>1</sup>, WANG Jun-zhou<sup>2</sup>, CAO Xing-jian<sup>3</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** To improve the accuracy and robustness of the cooperative robot Baxter when identifying and grasping target objects, the relevant image processing algorithms are studied. An algorithm for detecting the contour of the workspace is proposed based on HSV color model and morphological treatment, and the traditional Hough transform algorithm for detecting circles is improved. The experimental results show that, the proposed and improved algorithms can improve the accuracy and robustness of the cooperative robot Baxter when it is identifying and grasping target objects.

**Key words:** machine vision; collaborative robot Baxter; target recognition

### 0 引言

美国机器人工业协会和美国制造工程师协会对机器视觉的定义如下:“机器视觉是通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理一个真实物体的图像,以获得所需信息或用于控制机器人运动的装置”。在现代工业生产中,从零配件的尺寸检查到元器件表面各种字符的识别,机器视觉被广泛用于各类生产环节,以提高生产的效率和精度。

机器视觉识别是以图像的主要特征为基础的,每个图像都有其特征。研究表明,人眼的视线总是集中在图像的主要特征上,也就是集中在图像轮廓曲度最大或轮廓方向突然改变的地方,这些地方的信息量最大,

而且眼睛的扫描路线也总是依次从一个特征转到另一个特征上。由此可见,在图像识别过程中,机器视觉识别机制必须排除输入的多余信息,抽出关键的信息。同时把分阶段获得的信息整理成一个完整的知觉映象。当工作区域内有多种物体,而且部分物体的图像特征有一定的相似度时,机器人能否准确识别出目标物体、降低误判率,是该研究领域的难点之一。

算法研究的主要任务是控制协作式机器人 Baxter 去完成一个在工作区域中识别目标物体然后将其抓取并放置在指定位置的任务,同时在工作区域内放入其他物体,用改进的算法验证机器人识别目标物体的准确率。

该任务可以分为 5 个阶段。阶段 1:控制 Baxter 使其将机械爪移动到预先设定好的  $(X, Y, Z)$  坐标;阶段 2:结合相机,使用 OpenCV 识别出放置在工作区域内的目标物体的形状和形心;阶段 3:手动将在阶段 2 过程中所获得的坐标值输入机器人,结合阶段 1 的程序,

收稿日期:2019-02-28

修回日期:2019-03-13

作者简介:刘胜书(1994—),男,河南洛阳人,硕士生,研究方向为光电探测与图像处理技术。

使机器人能够在这些坐标所对应位置将目标物体抓起;阶段4:综合阶段1和阶段2,控制机器人使其能够在无人干预下自动识别并抓取物体;阶段5:当完成前4个阶段后,控制机器人使其不断地抓起放置在工作区域内的目标物体并将它们移动到指定的纸盒中,直至工作区域内没有物体。

针对阶段2中使用的目标识别算法进行研究并加以改进,从而提升机器人识别目标的速度,可以适应工业生产需要。

本文算法研究所用的实验平台是Baxter机器人,该机器人是一款触地式双臂机器人<sup>[1]</sup>,其周身装有3部相机以及多个传感器,主要利用Baxter机器人双臂末端的2个相机进行目标识别,所用的图像处理工具是OpenCV。在此项目中,OpenCV被用来识别工作区域的边界以及放置在工作区域内目标物体的边界和形心。

## 1 Baxter 机器人目标识别工作原理

传统的Baxter机器人目标识别的工作流程共包含图像灰度化、低通滤波、工作区域轮廓检测、目标物体识别4个步骤。

### 1.1 图像灰度化

图像灰度化用于将包含红(R)、绿(G)、蓝(B)3个颜色通道的彩色图像转化为只含1个颜色通道的灰度图,其目的是减少与目标物体轮廓检测无关的颜色变量,从而降低计算量。常用的图像灰度化方法有分量法、最大值法、平均值法和加权平均法。

#### 1) 分量法。

将每个彩色像素的红、绿、蓝3个色光分量的强度值中的某一个重新赋给该像素,使其变为单通道灰度像素,从而得到灰度图像。其算式为

$$f(i,j) = R(i,j) [or] G(i,j) [or] B(i,j) \quad (1)$$

式中: $R(i,j)$ ,  $G(i,j)$ ,  $B(i,j)$  分别代表彩色图像中 $(i, j)$ 位置像素的红、绿、蓝3个色光分量的强度值;  $[or]$  表示将三者进行或运算。该方法是将3个色光分量的强度值中的某一个重新赋给该像素,至于使用哪一个色光分量的强度值,是由使用者根据不同的场景情况选择决定的。

#### 2) 最大值法。

将每个彩色像素的红、绿、蓝3个色光分量的强度值中最大的一个重新赋给该像素,使其变为单通道灰度像素,从而得到灰度图像。其算式为

$$f(i,j) = \max[R(i,j), G(i,j), B(i,j)] \quad (2)$$

式中, $f(i,j)$  代表3个色光分量强度值中的最大值。

#### 3) 平均值法。

将每个彩色像素中红、绿、蓝3个色光分量强度值

的平均值重新赋给该像素,使其变为单通道灰度像素,从而得到灰度图像。其算式为

$$f(i,j) = \frac{R(i,j) + G(i,j) + B(i,j)}{3} \quad (3)$$

式中, $f(i,j)$  代表3个色光分量强度值的平均值。

#### 4) 加权平均法。

将每个彩色像素中红、绿、蓝3个色光分量的强度值进行加权平均,并将此加权平均值重新赋给该像素,使其变为单通道灰度像素,从而得到灰度图像。其算式为

$$\begin{cases} f(i,j) = A * R(i,j) + B * G(i,j) + C * B(i,j) \\ A + B + C = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A, B, C$  分别代表3个色光分量强度值的权值; $f(i,j)$  代表3个色光分量强度值的加权平均值。

由于工作区域轮廓为红色,目标物体为黄色小球,故本文使用加权平均法,将 $A$ 和 $B$ 分别设为0.5, $C$ 设为0,从而达到凸显工作区域轮廓和目标物体的效果。

### 1.2 低通滤波

低通滤波用于滤除图像中的噪点,使其变得平滑,从而减少噪声对后续边缘检测工作的干扰。低通滤波主要分为频域低通滤波和空域低通滤波。从滤波效果来看,空域滤波的算法相对简单,处理速度较快,在锐化方面效果明显;频域滤波的算法相对复杂,计算速度慢,有微量振铃效果<sup>[2]</sup>。算法研究使用尺寸为 $3 \times 3$ 的空域高斯低通滤波模板对图像进行处理即可满足要求,该模板如图1所示。

$$\frac{1}{16} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

图1 尺寸为 $3 \times 3$ 的高斯平滑滤波模板

Fig.1  $3 \times 3$  Gaussian smoothing filter template

### 1.3 工作区域轮廓检测

使用Canny边缘检测算法来检测工作区域的轮廓。检测过程可以分为以下3步<sup>[3-7]</sup>。

#### 1) 寻找梯度强度极值。

Canny算法的基本原理是在灰度图中寻找灰度等级变化最剧烈的位置并将其标记为边界。为了实现这一目标,Canny算法使用Sobel算子分别算出横向和纵向的梯度,结果分别用 $G_x$ 和 $G_y$ 表示。由这两个参数可计算出总梯度的模为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

经过高斯滤波后的图像中每一个像素的灰度值用梯度值 $G$ 来代替。处于边缘的像素因为有更小的 $G$ 值所

以被标记为白色,其余区域均标记为黑色,这样一来,图像中的边缘就高亮显示了出来。然而,边界的实际位置有时会因边缘过宽而模糊,在这种情况下,梯度的方向角也应一并计算出,为

$$\theta = \arctan (G_y, G_x)。(6)$$

2) 非极大值抑制。

这一步处理的作用是将过宽的白色边界细化。得到图像的大致边界后,为了得到位置更准确的边界,逐个比较每个像素和周围相邻像素的梯度值大小。如果此像素的梯度值大于相邻像素的梯度值,则该像素被置为黑色,而相邻的像素被置为白色。

3) 双阈值处理。

经过抑制后的图像仍存在很多噪点,为了去除这些噪点,对图像进行双阈值处理。首先,分别设定一个高阈值和一个低阈值,梯度强度超过高阈值的点一定是边缘,梯度强度低于低阈值的点一定不是边缘,对于梯度强度落在高低阈值中间的点,与边界点相连的视为边缘,其余的视为噪声。

经过 Canny 边缘检测处理后得到的结果见图 2。

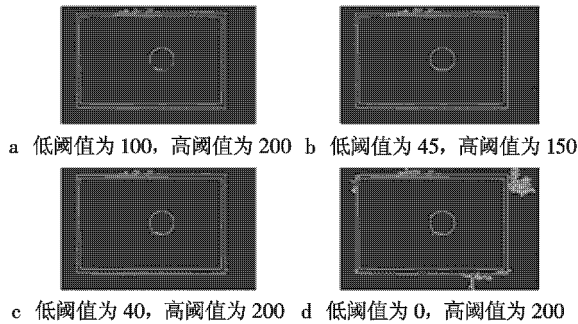


图 2 经不同阈值的 Canny 边缘检测后得到的轮廓图

Fig. 2 Image obtained by using Canny edge detection with different thresholds

从图 2a 中可以看出,工作区域的轮廓是连续的,但目标物体的轮廓是不连续的,除此之外,背景环境中有些不属于轮廓的部分也被识别为轮廓。为了解决边界不连续的问题,将低阈值降低至 45,将高阈值降低至 150,处理结果如图 2b 所示。此结果和预想的一致,虽然圆球的轮廓还有缺口,但是比之前更加连续。背景中的噪声因为阈值的降低而变得更多。在此情况下,将低阈值降至 40 而把高阈值升至 200,结果如图 2c 所示。从图 2c 中可以看出,圆形轮廓的缺口减小了一点但是噪声变得更多了。于是将低阈值设为 0,保持高阈值不变,结果如图 2d 所示。与之前的结果相比,圆形轮廓的缺口并没有减小,噪声反而越来越多,占据了大片的边缘部分。造成该现象的主要原因是 Canny 边缘检测算法的鲁棒性差,检测效果容易受到光

线条件制约,因此,需要寻找新的算法来检测工作区域轮廓。

### 1.4 目标物体识别

由于目标物体是球体,所以使用 Hough 变换对其进行识别<sup>[8-11]</sup>。Hough 变换是图像处理领域中常用的一种特征提取算法,它一般用于提取图像中的直线、圆或者椭圆。该算法的数学原理是先将变量空间中函数曲线上的点映射为参数空间中的曲线,并记录不同曲线之间的交点;然后在参数空间中设定合适的阈值并利用投票机制选出曲线累计数量大于或等于该阈值的交点;最后再将这部分交点映射为变量空间中的曲线,这些曲线就是要提取的特征。

圆的函数方程为

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 (7)$$

在参数空间中的方程为

$$(a - x)^2 + (b - y)^2 = r^2 (8)$$

式(8)代表的是以圆上点为圆心,半径为  $r$  的圆的集合。这个集合里的圆可以用来确定半径  $r$  和圆心  $(a, b)$ ,如图 3 所示,这个过程分为以下五步。

1) 找到圆形物体的轮廓,假设图 3a 中红色圆为该物体的轮廓。

2) 在该圆形轮廓上找一些点,以图 3b 中上下左右 4 个白色点为例。

3) 以标记的白色点为圆心,画半径相同的蓝色圆,然后在这些蓝色圆的半径时刻保持相等的情况下,逐渐增大半径,同时记录这些蓝色圆之间的交点,交点设为绿色,结果如图 3c 所示。

4) 当所有的圆都过同一交点时,停止增大圆半径并保持其不变,此时的交点就是红色轮廓圆的圆心,半径也是红色轮廓圆的半径,结果如图 3d 所示。

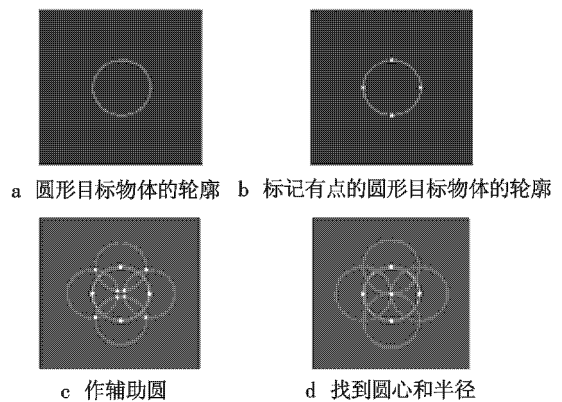


图 3 Hough 变换流程

Fig. 3 The process of Hough transform

5) 使用 Hough 变换准确识别出目标圆的位置,结果如图 4 所示。



图 4 识别出目标圆

Fig. 4 Identifying the target circle

## 2 改进的工作区域及目标物体识别方法

由于 Canny 边缘检测算法的鲁棒性差,检测效果容易受到光线条件制约。因此,使用 HSV 颜色检测算法来识别工作区域,并将目标识别的工作流程调整为:使用 HSV 颜色检测算法识别工作区域轮廓、图像灰度化、低通滤波、目标物体识别。

### 2.1 基于 HSV 颜色模型的工作区域轮廓识别

因为工作区域的边界为红色,与周围背景的颜色存在较大反差,所以使用 HSV 颜色检测算法来检测工作区域。HSV 颜色模型是一种表征颜色属性的模型,由 SMITH 于 1987 年提出<sup>[12-13]</sup>。相较于 RGB 颜色模型,这种模型能更准确地表示人眼对色彩属性的感知。在 HSV 中,‘H’代表色调(Hue),‘S’代表饱和度(Saturation),‘V’代表明度(Value)。在该模型中,不同色调的颜色绕着一根从底部到顶部颜色由黑至白的中轴径向排列开。越接近顶部,颜色的饱和度就越高,颜色就越鲜艳。该模型如图 5 所示。

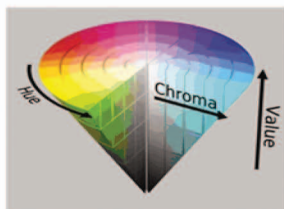
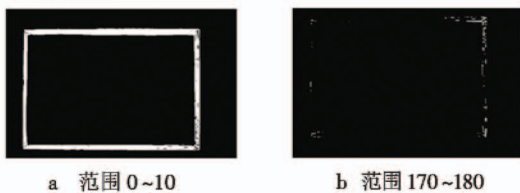


图 5 HSV 锥,明度值沿色度值展开

Fig. 5 HSV cone, the values of hue are measured along the values of chroma

在此实验中,工作区域的边界为红色,对于红色而言,参数  $S$  和参数  $V$  的范围分别是  $70 \sim 255$  和  $50 \sim 255$ 。但是参数  $H$  有两个范围,一个是  $0 \sim 10$ ,另一个是  $170 \sim 180$ 。对于参数  $H$ ,当只使用一种范围时,结果如图 6 所示。



a 范围 0~10

b 范围 170~180

图 6 使用不同范围的 HSV 颜色模型的结果

Fig. 6 The effect of using HSV color model with different ranges

从图 6a 和图 6b 中可以看出,使用范围  $0 \sim 10$  所得的结果比使用范围  $170 \sim 180$  所得的结果要好。但是图 6a 白色轮廓中的黑色部分差不多就是图 6b 中的白色部分,这意味着两个图存在一定的互补关系。所以为了得到理想的结果,只需使用“或”逻辑将两个图结合,其结果如图 7a 所示。这次得到的轮廓比之前两次完整了许多,但是白色轮廓部分中仍存在有黑色的缺口,对于这些缺口,需使用图像处理中的闭合操作来填补。闭合操作实质上是一种基于形态学的图像处理方法<sup>[14-15]</sup>,该方法适用于去除图像中前景目标之内的噪点,处理后的结果如图 7b 所示。从图 7b 中可以看出,经过闭合操作后,所有缺口均被填补。相较于 Canny 边缘检测算法而言,HSV 颜色模型检测算法的检测效果更好,鲁棒性更强,所检测出的工作区域轮廓更加接近实物。



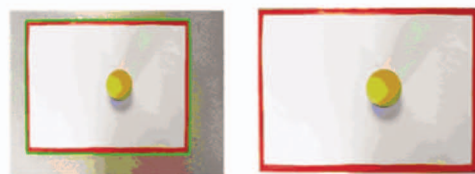
a 结合后

b 经闭合操作后

图 7 两种范围结合后的结果以及闭合操作后的结果

Fig. 7 The effects of using both ranges together and after morphological operation

在得到工作区域轮廓后,使用 OpenCV 内自带的 *findContours* 函数检测出该轮廓的外围,并在原图中将该轮廓外围用绿色线条标记出,然后将图像收缩至轮廓外围部分以求排除无关背景环境的干扰。结果如图 8 所示。



a 加轮廓后

b 收缩至轮廓外围

图 8 标记轮廓并收缩

Fig. 8 Marking the contour and shrinking the image to the contour

### 2.2 改进的目标圆识别算法

实验表明,当工作区域内只存在一个目标圆时,传统 Hough 变换可以准确地识别出其轮廓和形心。但若工作区域内存在有非圆形目标物,传统 Hough 变换在进行目标圆识别时就时常会产生误判,将非圆形目标物识别为圆形目标物。比如,当在非圆形目标物的轮廓上提取到若干散点样本时,传统 Hough 变换依然能够根据这些散点样本在参数空间中的映射找出曲线累计数量大于所设定阈值的交点,并将该交点映射为变

量空间中的圆。

为了解决上述问题,考虑增加在轮廓上选取的散点样本的数量并将参数空间中的阈值设为散点样本数。这样做的原因在于圆上所有的点到其形心的距离都相等,而其他非圆图形则不具备这一特点。因此,提取的散点样本越多,二者的差别就越大,这就为准确区分圆形目标物和非圆形目标物提供了条件。

### 3 实验测试

#### 3.1 概览

操作流程可分为以下4步:

- 1) 把 Baxter 机器人的末端执行器分别移到4个角的位置,记录4个角的坐标;
- 2) 用末端执行器上的相机给工作区域和圆球拍照,然后识别出工作区域外轮廓和球心;
- 3) 根据4个角的坐标,计算出球心坐标;
- 4) 把机械爪移动到该坐标然后将球抓起。

#### 3.2 录入工作区域坐标值

工作区域是由红色边界围起来的白色长方形区域。依照逆时针的顺序,把 Baxter 机器人的机械爪依次移动到工作区域4个角的位置。因为机械臂长度有限,用左臂记录0号角和3号角,用右臂记录1号角和2号角。

#### 3.3 识别和移动

首先右臂移动到工作区域正上方,把末端执行器上的相机垂直桌面指向工作区域。然后相机对工作区域及物体拍照,把拍好的照片收缩至工作区域大小,发布在顶部显示器左上角,用算法识别出圆球的轮廓以及圆心。将机械爪移动到球心位置并将其抓起,然后放入纸盒中。

为了进一步验证代码功能的完整性,把圆球从工作区域中移走,然后再让相机识别。这次,图中没有标记出圆形,字符串“no ball found”显示在电脑屏幕上。

#### 3.4 进阶任务

在完成了基本的识别、捡起、放置任务之后,开始进行进阶任务。

工作区域内有两个圆球和一个长方体白色物块,机械爪应该忽略白色物块,而不断地捡起工作区域内的圆球,将它们放到纸盒中,直至工作区域内只剩下物块。为了实现上述目标,将这一系列动作放入以下循环中。实验环境和具体流程见图9和图10。

在图9所示实验环境中将上述工作流程进行10次反复实验,发现在10次实验中,相机在进行目标圆识别时会产生4次误判,将白色物块目标识别为圆形目标物。对于产生该问题的相关阐述详见2.2节。

根据产生问题的原因,修改了传统 Hough 变换中的

阈值,增加了散点样本数量,重新按照图10所示流程进行10次实验。结果表明,在这10次实验中,Baxter 机器人均能够准确地将两个小球识别出来,没有出现误判。

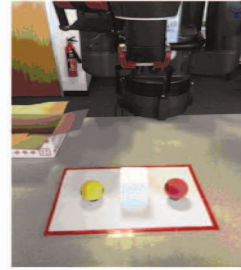


图9 工作区域及目标物体

Fig.9 Workspace and target object

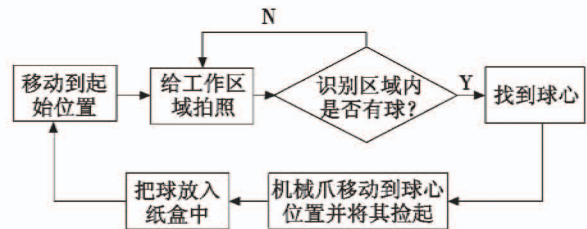


图10 工作流程

Fig.10 Flow chart of the operation

## 4 结论

本文主要针对两个方面进行了研究:1) 比较了 Canny 边缘检测算法和 HSV 颜色检测算法在区域轮廓识别效果方面的优劣并选出了较优的算法;2) 对传统 Hough 变换算法进行了改进,以降低其在进行目标圆识别时出现误判的几率。实验结果表明,相较于 Canny 边缘检测算法,在检测带有特定颜色的区域轮廓时,HSV 颜色检测算法的鲁棒性更强。相较于传统 Hough 变换,改进的 Hough 变换在进行目标圆识别时出现误判的几率更低,能够更加准确地识别圆形目标物体。

### 参考文献

- [1] 刘想德. 基于视觉引导的 Baxter 机器人运动控制研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2018, 30(4): 552-557.
- [2] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. London: Pearson, 2007.
- [3] 周超. 边缘检测 Canny 算子的研究与改进[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.
- [4] 靳艳红. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测的研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2011.
- [5] MCILHAGGA W. The Canny edge detector revisited[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(3): 251-261.

(下转第105页)

- operators for visual tracking[C]//European Conference on Computer Vision, 2016:472-488.
- [12] KUMAR B V K V, MAHALANOBIS A, JUDAY R D. Correlation pattern recognition[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [13] GALOOGAHI H K, SIM T, LUCEY S. Correlation filters with limited boundaries[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:4630-4638.
- [14] GALOOGAHI H K, FAGG A, LUCEY S. Learning background-aware correlation filters for visual tracking[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 1144-1152.
- [15] NAM H, HAN B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:4293-4302.
- [16] NAM H, BAEK M, HAN B. Modeling and propagating CNNs in a tree structure for visual tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:1-10.
- [17] DEKEL T, ORON S, RUBINSTEIN M, et al. Best-buddies similarity for robust template matching[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:2021-2029.
- [18] POSSEGGER H, MAUTHNER T, BISCHOF H. In defense of color-based model-free tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:2113-2120.
- [19] 徐福来,王鸿鹏,张普,等. 基于贝叶斯模型与最佳伙伴相似度量的目标跟踪[J]. 计算机应用研究, 2018(8):2498-2502, 2526.
- [20] WU Y, LIM J, YANG M H. Online object tracking: a benchmark[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013: 2411-2418.
- [21] WU Y, LIM J, YANG M H. Object tracking benchmark[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9):1834-1848.

(上接第94页)

可以预测 LCD 白场图像在高温时会偏蓝,与实际的显示效果相符,所以可以测量通过液晶盒后 450 nm, 550 nm, 650 nm 波长光线的偏振态来预测 LCD 在高温时的显示效果。

## 5 结论

为了研究液晶显示器件在高温下的显示性能,提出一种通过测试液晶显示器件在高温下的偏光特性的测试方法。本文详细介绍了该测试系统以及测试原理,通过测量高温环境下经过液晶盒出射光的偏振态,计算出红绿蓝 3 种波长的光通过上偏振片的透过率,从而预测 LCD 在高温时的显示效果。

## 参考文献

(上接第99页)

- [1] 朱骞,王竞,武汉,等. 军用液晶显示器抗振加固技术[J]. 现代显示, 2012, 23(5):13-15.
- [2] 姚慧慧. 加固液晶显示模块高温环境热力学分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- [3] 王元庆,董戴,洪光烈. 液晶显示屏温度特性的试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2001, 15(4):52-55.
- [4] 王伟. 液晶电控双折射率温度效应的研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2003.
- [5] 陆吕晨,冯奇斌,弓欣,等. 液晶显示偏光片温度特性分析[J]. 电光与控制, 2016, 23(3):92-94, 99.
- [6] 黄金苹. 偏振照明系统中偏振实现及检测方法研究[D]. 成都:中国科学院研究生院, 2014.
- [7] LOHITHASWA M H. Canny edge detection algorithm on FPGA[J]. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 2015, 10(1):15-19.
- [8] 韩君君. 彩色图像边缘检测算法研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2009.
- [9] 陈小艳,王强,李柏林. 改进的 Hough 变换检测圆方法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(8):197-201.
- [10] 朱桂英,张瑞林. 基于 Hough 变换的圆检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(6):1462-1464.
- [11] MOCHIZUKI Y, TORII A, IMIYA A. N-point Hough transform for line detection[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2009, 20(4):242-253.
- [12] SATZODA R K, SUCHITRA S, SRIKANTHAN T. Parallelizing the Hough transform computation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15(1):297-300.
- [13] 孙滔. 基于颜色空间的图像特征提取的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2006.
- [14] KAU L J, LEE T L. An HSV model-based approach for the sharpening of color images[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013:150-155.
- [15] 蒋东升. 基于数学形态学的边缘检测算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012.
- [16] 沈阳. 基于形态学的图像边缘检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.