

# 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法

祝振敏<sup>1\*</sup>, 裴爽<sup>1\*\*</sup>, 陈世明<sup>1</sup>, 张福民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;

<sup>2</sup>天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 搭建了一种基于反向传播神经网络与高斯分布函数的图像高光去除模型。该模型可以优化图像的特征提取及特征匹配。以高反射率金属工件表面作为实验对象,进行了边缘特征提取及视觉测量精度分析,实验结果表明,所提方法可实现 0.75 mm 的视觉测量精度,一定程度上验证了所提方法的可行性。

**关键词** 测量; 视觉测量; 图像高光去除; 偏振信息; 特征提取; 测量精度

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1112005

## Highlight Removal of High Reflectivity Workpiece and Vision Measurement Based on Polarization Information

Zhu Zhenmin<sup>1\*</sup>, Pei Shuang<sup>1\*\*</sup>, Chen Shiming<sup>1</sup>, Zhang Fumin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** A model of the image highlight removal based on the back propagation neural network and the Gaussian distribution functions is established, which is beneficial to optimize the image feature extraction and the image feature matching. With the high reflectivity workpiece as the experimental object, the extraction of edge features and the analysis of the vision measurement accuracy are conducted. The experimental results show that the proposed method can be used to realize a vision measurement accuracy of 0.75 mm, which verifies the feasibility of this proposed method to a certain degree.

**Key words** measurement; vision measurement; image highlight removal; polarization information; feature extraction; measurement accuracy

**OCIS codes** 120.4820; 100.3010; 100.2960

## 1 引 言

立体视觉非接触式测量方法通过采集不同视角下的被测物体图像,利用相机标定与图像处理技术最终实现被测物体信息的三维重构,进而实现被测物体的无接触高精度测量<sup>[1]</sup>。在视觉测量图像的采集过程中,受自然光照分布不均匀及镜面反射的影响,高反射率物体表面容易产生高光区域。高光区域掩藏了物体的固有纹理颜色信息,对应的三维空间信息无法被高精度还原,对视觉测量精度造成一定程度的影响<sup>[2-3]</sup>。基于视觉测量过程中存在的问

题,研究人员在高反射率工件物体表面的视觉测量系统中引入偏振装置,以提高对应的视觉测量精度<sup>[4]</sup>。

偏振光在自然界中是普遍存在的,在图像采集过程中可以借助偏振装置来优化高反射率工件物体的表面成像。Miyazaki 等<sup>[5]</sup>提出了一种利用偏振滤波器测量透明物体表面形状的方法,并指出从物体表面反射出的光是部分极化的,极化的程度取决于入射光角度,而反过来又取决于物体表面的法线。通过比较两个物体表面采集到的偏振数据,即法线位置和小角度倾斜位置,实现了较高精度的物体表面三维建模,表明偏振信息可以用来优化视觉测量

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-06-11; 录用日期: 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51675380)、江西省杰出青年资助计划(20162BCB23047)、江西省科技支撑计划(20151BBE50116)

\* E-mail: zhuzhenmin1984@163.com; \*\* E-mail: 1808522061@qq.com

系统并提高对应的测量精度。Morel 等<sup>[6]</sup>提出了一种新颖的高反射率金属物体三维表面的重建方法,在偏振成像系统中利用菲涅耳系数获取物体表面法线的信息,利用基于泰勒级数的松弛算法对实测的法线进行积分运算,得到了高精度的物体三维模型表面。Feng 等<sup>[7]</sup>提出了一种用于高动态范围的三维形状测量方法,将条纹反射与偏振装置同时加载到视觉测量系统中,并通过适当旋转垂直偏振片的角度采集得到强反射镜面上具有高对比度条纹图案的图像,在此基础上得到了一种新的复合条纹图像,有效地提高了物体表面的视觉测量精度。Umeyama 等<sup>[8]</sup>研究得出漫反射和镜面反射在图像形成过程中是同时存在的,与漫反射分量相比,镜面反射分量的强度和偏振度都更大。在旋转偏光片并采集高反射率物体表面图像的过程中,采集图像中含有恒定漫反射分量和不同强度的镜面分量,当将独立分量分析方法应用于不同偏振角度下采集得到的物体图像时,对应物体表面反射光的漫反射和镜面反射分量可以分离为两个独立的分量,较好地实现了漫反射与镜面反射分量的有效分离。Yamaguchi 等<sup>[9]</sup>在视觉测量系统中引入偏振装置,降低了光源亮度以及相机入射光的光强度数值,但是却无法高精度地对所采集图片中的较暗区域进行测量。Liang<sup>[10]</sup>在基于偏振装置的视觉测量系统中对图像中的暗黑区域进行测量,却无法高精度地还原图像中亮区域的纹理信息。Lin 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于多视图颜色和偏振信息极坐标分量集成的图像高光检测方法,该方法基于颜色直方图差值特征与偏振装置,在融合后的颜色和极坐标信息空间中将传感器数据的分布与多个视图下的图像进行比较,实现了较精准的高光区域检测。偏振装置可用于改善视觉测量物体的表面成像,但是对应图像采集要求的偏振角度精度较高,尤其是当被测工件的光学特征以及工件内部的反射强弱未知时,视觉测量系统中偏振装置的引入增大了系统操作的复杂程度<sup>[12]</sup>;另一方面,偏振装置的引入很难保证所采集图像中的暗区域与亮区域同时被高精度地测量,通过偏振片的旋转获取不同偏振角度下的视觉测量图像并不能完全实现高光区域的消除<sup>[13-14]</sup>。

本文以提高工件的视觉测量精度为研究目的,搭建了一种基于偏振信息的图像高光去除模型,采用暗通道图像 mean-shift 分割算法准确定位出图像中的高光区域,通过反向传播(BP)神经网络与高斯分布函数实现了高光区域的有效去除。在此图像高

光去除模型的基础上进行了图像特征提取与视觉测量精度的分析计算,实验结果表明,高光区域去除后的图像可以更好地实现特征提取及特征匹配的优化,对应工件的尺寸测量精度为 0.75 mm,一定程度上验证了所提方法的可行性。

## 2 基于偏振信息的图像高光去除方法

在视觉测量图像的采集过程中,受到自然光分布不均匀的影响,物体表面会同时产生镜面反射与漫反射,其中镜面反射表征了光源光照的分布,漫反射则体现了目标物体表面的纹理特征信息<sup>[15]</sup>。偏振光可以改善物体局部区域成像,故提出了一种基于偏振信息的视觉测量图像的高光检测与去除方法,并引入菲涅耳偏振反射原理进行理论分析。 $p$ 类偏振光是较为普遍存在的一种偏振光,其照射到物体表面的示意图如图 1 所示,其中  $Ox'y'z'$  为坐标系。

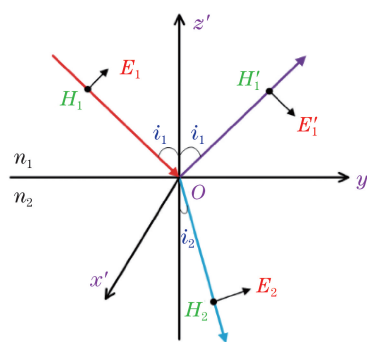


图 1  $p$  类偏振光

Fig. 1  $p$  type polarization light

$p$ 类偏振光的入射角和折射角分别为  $i_1$  和  $i_2$ ,对应的电场强度分别为  $E_1$  和  $E_2$ ,对应的磁场强度分别为  $H_1$  和  $H_2$ ,反射光的电场强度和磁场强度分别为  $E_1'$ 、 $H_1'$ ,  $n_1$  和  $n_2$  对应不同光传播介质的折射率,令  $r_p$  为  $p$  类偏振光的反射率,则有

$$r_p = \frac{E_1'}{E_1} = \frac{n_1 \cos i_2 - n_2 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1} = \frac{\frac{n_1}{\cos i_1} - \frac{n_2}{\cos i_2}}{\frac{n_1}{\cos i_1} + \frac{n_2}{\cos i_2}}. \quad (1)$$

当  $i_1 + i_2 = 90^\circ$  时, $p$ 类偏振光对应的入射角与折射角互余,则  $r_p = 0$ ,此时  $p$ 类偏振光的反射率等于 0。该偏振光状态即为最优偏振状态,所采集到的物体表面图像中对应的镜面反射分量也会降低到极小值。基于上述理论,搭建基于偏振装置的视觉测量图像采集系统,如图 2 所示,其中 CCD 为电荷耦合器件。

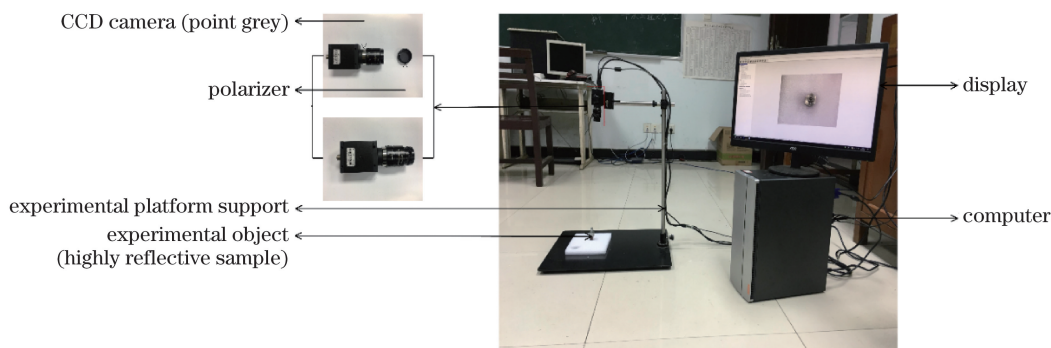


图 2 基于偏振装置的视觉测量图像采集系统

Fig. 2 Image acquisition system for vision measurement based on polarization device

在图像采集系统中,以高反射率工件物体表面作为实验对象,基于偏振信息采集视觉测量图像,对应的实验步骤为

- 1) 搭建基于偏振装置的视觉测量图像信息采集系统,连接电脑主机使其能以正常帧频采集图像信息;
- 2) 选择高反射率工件物体作为实验对象,并旋

转偏振镜片  $n$  次,得到不同偏振角度  $\theta_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  下的被测物体二维图像  $I_i$ ;

- 3) 旋转偏振片一周范围内,有一个偏振角度下的图像反光量最小,将其作为实验图像  $I_{\text{Optimal}}$ 。

上述实验步骤下物体表面的反射光情况如图 3 所示。

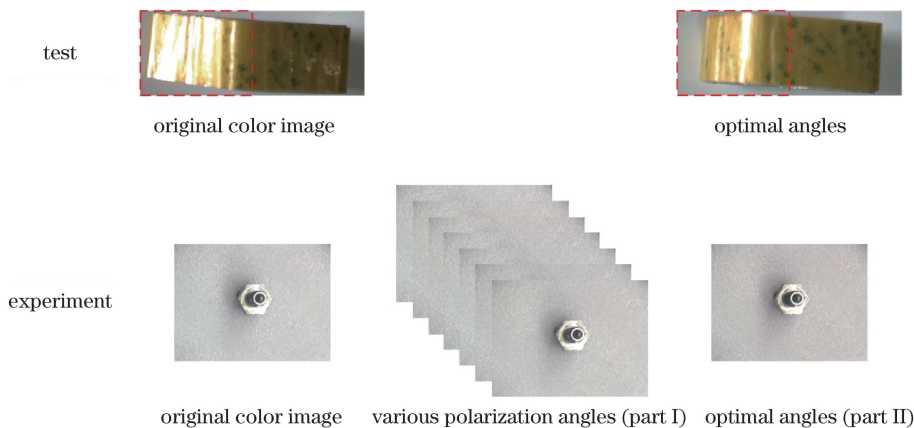


图 3 不同偏振角度下的物体表面图像采集

Fig. 3 Image acquisition on object surface under different polarization angles

由图 3 可知,虽然偏振装置在物体表面图像采集过程中可以有效地减弱图像中存在的高光区域,但是在最优偏振角度下仍然存在可见的高光区域。为了更有效地消除高反射率物体表面的图像高光区域,对所采集的不同偏振角度下的物体图像进行基于动态阈值的白平衡处理,白平衡处理可以对图像的颜色强度信息进行全局调整,恢复物体的固有颜色信息特征<sup>[16]</sup>。

将白平衡处理后的目标图像从红、绿、蓝(RGB)颜色空间转换到色彩、纯度、明度(HSV)颜色空间并得到对应的明度通道图像,其像素点的分布反映了目标图像的亮度信息分布。基于动态阈值图像的白平衡处理效果以及对应的直方图特征图如图 4 所示。可以看出,经过白平衡处理后的图像质量有了明显改善,较大程度上恢复了目标图像的固有颜色

信息,对应的直方图特征分布较为均匀。

提出了一种基于暗原色图像<sup>[17]</sup> mean-shift 分割算法<sup>[18]</sup>下的视觉测量图像的高光区域检测方法,暗黑通道先验算法求解目标图像像素在 RGB 三通道中的最小值,然后进行局部区域的最小滤波处理,对应的暗原色图像的数学模型可以表述为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)], \quad (2)$$

式中  $J^{\text{dark}}$  为暗原色图像,其对应的图像像素强度数值趋于 0;  $J^c$  (上标  $c = r, g, b$ ) 分别为 RGB 通道图像;  $x$  为图像对应的像素点位置;  $y \in \Omega(x)$  表示以  $x$  为中心的局部像素区域模块。为了较好地归纳图像中的高光区域像素,引入 mean-shift 算法对暗黑图像进行聚类分析,对应算法应用下的目标物体图像如图 5 所示。

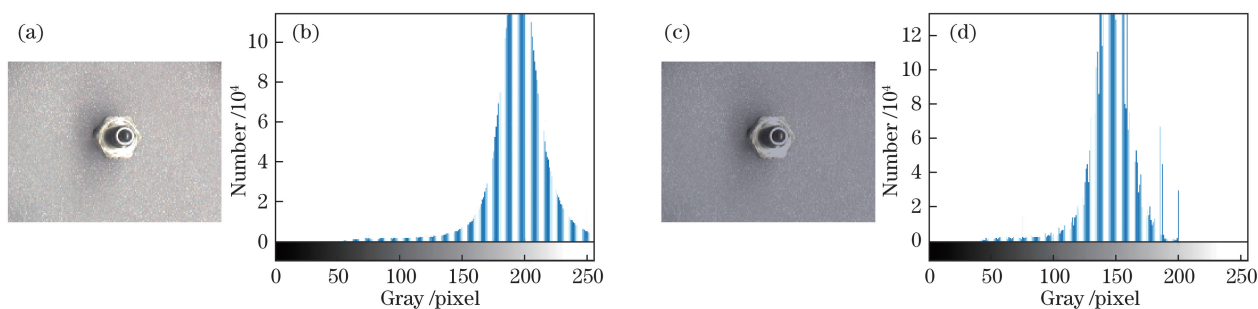


图 4 图像白平衡处理及对应的直方图特征。(a)彩色图像;(b)彩色图像的直方图;  
(c)白平衡图像;(d)白平衡图像的直方图

Fig. 4 White balance processing of image and corresponding histogram features. (a) Color image;  
(b) histogram of color image; (c) white balanced image; (d) histogram of white balanced image

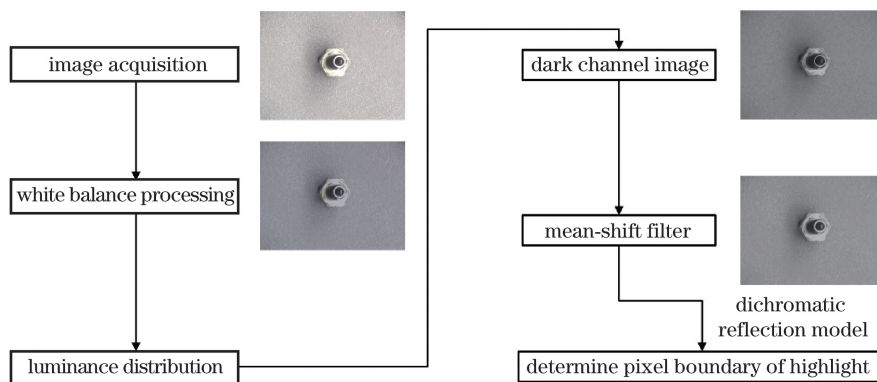


图 5 基于暗原色图像的 mean-shift 分割算法流程

Fig. 5 Flowchart of mean-shift segmentation algorithm based on dark channel images

图 5 所示包含图像白平衡算法、暗黑通道先验算法及 mean-shift 分割算法,其中白平衡算法用于初步还原物体的固有颜色信息,暗黑通道先验算法用于确定目标图像中的高光像素点,mean-shift 分割算法用于对目标图像的高光像素进行聚类处理。

采集 7 个不同偏振角度下的工件表面图像后,通过双色反射模型<sup>[2-3]</sup>得到对应的高光成份图像,采取暗通道图像的 mean-shift 算法提取出对应高光图像的亮度分布后确定其高光像素分布区间  $[I_i, 1](i=1, 2, 3, \dots, 7)$ 。假设工件物体表面图像采集时短时间内场景的光照分布是不变的,故提取  $[I_i, 1](i=1, 2, 3, \dots, 7)$  的区间均值  $[k_1, k_2]$ ,并将其作为最优偏振图像对应的高光像素分布区间。算法已对图像像素的亮度值进行了均一化处理,故区间端值  $k_2=1$ 。不同偏振角度下采集图像提取的高光成份图像以及对应的像素亮度分布如图 6 所示。

图 6 所示为不同偏振角度下采集的图像、双色反射模型中的高光成份图像和像素亮度分布。不同偏振角度下图像的高光像素区间分别为  $[0.6765, 1]$ ,  $[0.7251, 1]$ ,  $[0.6834, 1]$ ,  $[0.7012, 1]$ ,  $[0.6918, 1]$ ,  $[0.7004, 1]$ ,  $[0.6815, 1]$ , 平均得到最优偏振角度下

图像的高光像素分布区间为  $[k_1, k_2]([0.6943, 1])$ 。

高斯函数在图像处理领域有着较为广泛的应用,高斯函数的傅里叶变换仍然是其本身,将高斯函数应用于图像处理领域既可以保留对应频谱的低频分量,同时也可以保留对应频谱的高频分量,因此被广泛应用于处理图像信息与信号滤波操作<sup>[19]</sup>。引入 BP 神经网络对不同偏振角度图像对应的高光区域像素集进行训练,使得图像中的高光区域像素亮度值以高斯函数的形式进行有效减低,进而实现视觉测量图像较深层次的高光区域去除与图像质量优化<sup>[20]</sup>。

图 7 所示为所搭建的基于偏振信息的视觉测量图像高光去除模型的框架图,BP 神经网络输入端为不同偏振角度下采集目标图像对应的高光像素集,输出端为高斯函数分布随机数,通过训练得出最优的基于偏振信息的图像高光去除模型,其中  $x$  为不同偏振角度下图像高光区域像素, $y, z$  为模型权重,  $\Delta$  为模型前向反馈值,  $T$  为不同偏振角度下高光去除后的图像。对应的流程框图如图 8 所示。

基于偏振信息的视觉测量图像高光区域去除方法对应的实现步骤如下。

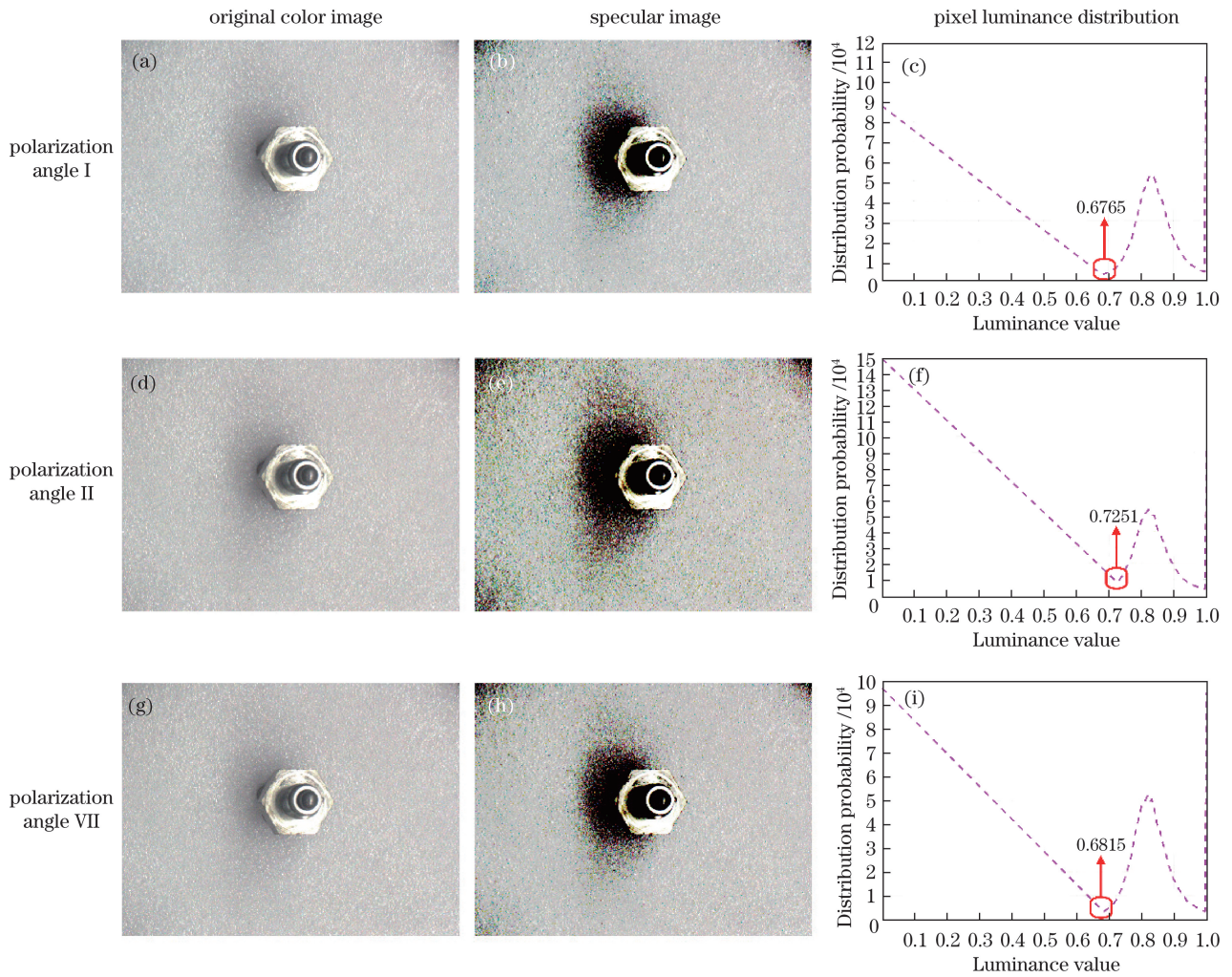


图 6 不同偏振角度下采集的图像、双色反射模型中的高光成份图像和像素亮度分布

Fig. 6 Images acquired under different polarization angles, image with highlight components and pixel luminance distribution in two-color reflection model

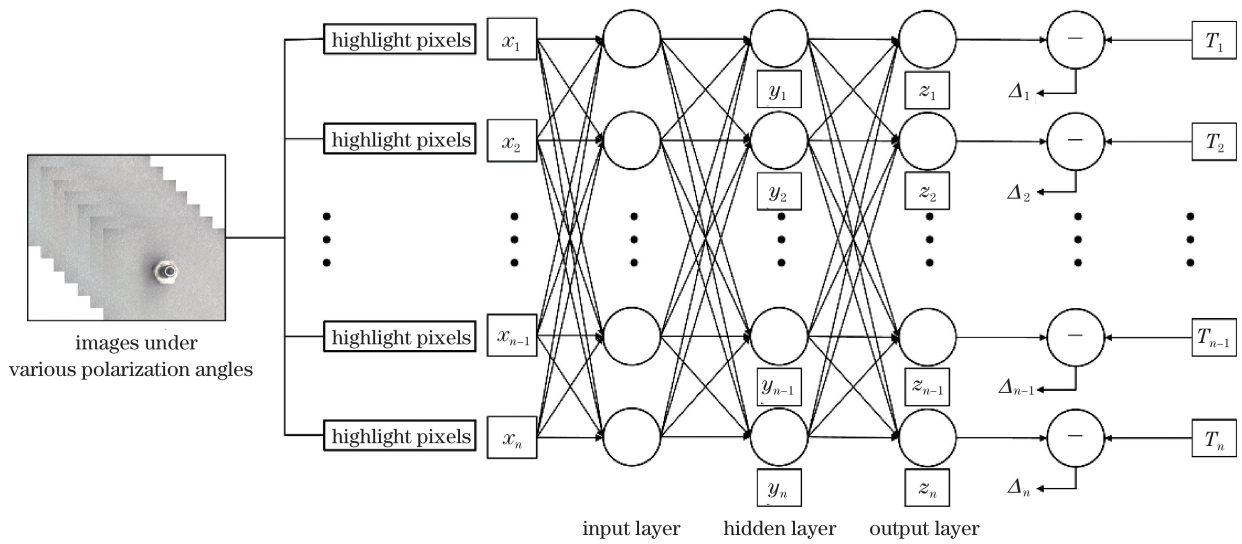


图 7 基于偏振信息高光去除的 BP 神经网络模型

Fig. 7 BP neural network model for highlight removal based on polarization information

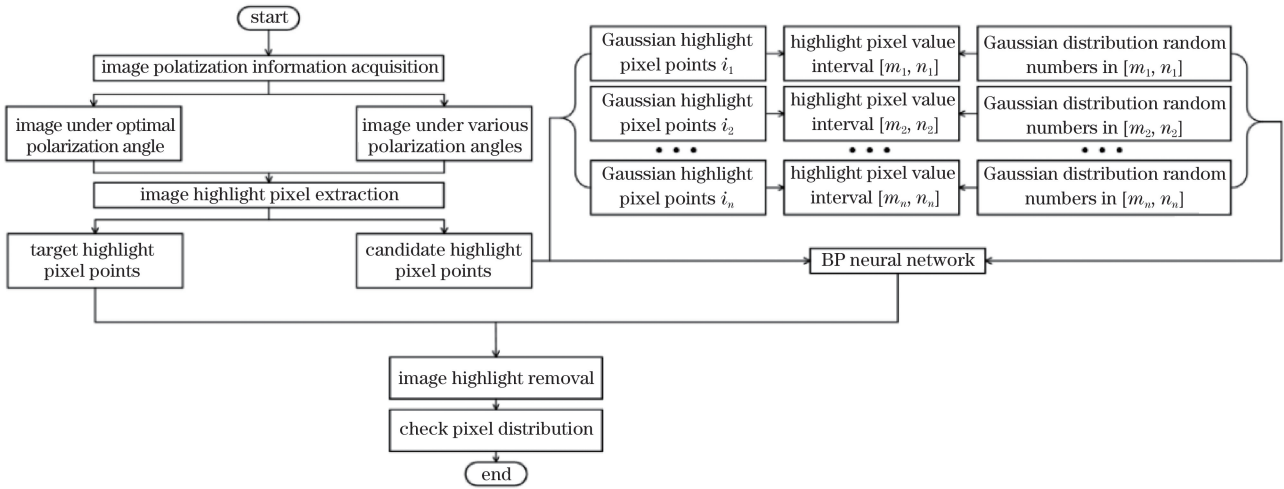


图 8 基于偏振信息的图像高光去除流程

Fig. 8 Flowchart of image highlight removal based on polarization information

1) 以高反射率工件物体表面作为实验对象, 并保证 CCD 相机能够以正常帧频进行图像信息采集, CCD 相机的前置偏振片可以正常旋转;

2) 旋转 CCD 相机镜头前的偏振镜片, 在旋转  $360^\circ$  范围内采集得到最优偏振角度下的目标图, 记为  $I_{\text{target}}$ ;

3) 依次旋转偏振镜片  $n$  次并采集不同偏振角度  $\theta_i (i=1, 2, 3, \dots, n')$  下目标物体的偏振信息图像, 记为  $I_i (i=1, 2, 3, \dots, n')$ ;

4) 将所提目标图像高光区域的检测方法应用于图像集  $\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$  并提取出对应的高光区域像素集, 记为

$$P = \begin{bmatrix} P_{1_1} & P_{1_2} & P_{1_3} & \cdots & P_{1_{n'_1}} \\ P_{2_1} & P_{2_2} & P_{2_3} & \cdots & P_{2_{n'_2}} \\ P_{3_1} & P_{3_2} & P_{3_3} & \cdots & P_{3_{n'_3}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n_1} & P_{n_2} & P_{n_3} & \cdots & P_{n_{n'_n}} \end{bmatrix},$$

其中下标  $n$  为采集图像的数目,  $n'$  为不同偏振角度下采集的图像数量;

5) 将该方法应用于最优偏振角度采集的目标图像  $I_{\text{target}}$ , 提取出对应的高光像素集并记为  $Q = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ \cdots \ P_m]$ , 其中  $m$  为目标图像个数;

6) 对矩阵  $P$  和  $Q$  进行归一化操作;

7) 设定不同偏振角度图像  $\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$  与最优偏振图像  $I_{\text{target}}$  对应的高光区域像素值区间  $[k_1, k_2]$ , 令矩阵  $Y$  表示高斯函数分布的随机数矩阵, 矩阵  $X$  表示不同偏振角度下所采集图像的高光区域像素集;

8) 将矩阵  $X$  的前  $n$  行向量作为 BP 神经网络

的输入数据, 将矩阵  $Y$  的前  $n$  行向量作为 BP 神经网络的输出数据, 搭建神经网络模型并训练多次得到最优网络  $n_{\text{et}}$ ;

9) 将矩阵  $X$  的第  $n+1$  行向量作为 BP 神经网络的输入数据, 在  $n_{\text{et}}$  中得到对应的输出数据  $P_{\text{BP}}$ ;

10) 以向量  $P_{\text{BP}}$  的前  $m$  个数据作为像素替换矩阵  $Q$ , 通过替换最优偏振角度下的目标图像中高光区域的像素实现较深层次的图像高光去除效果。

### 3 基于偏振信息的视觉测量实验

#### 3.1 基于偏振信息的图像高光去除实验

选取高反射率的金属工件表面作为实验对象, 在基于偏振信息的图像高光去除模型上进行实验论证, 实验结果如图 9 所示。

图 9(a)、(c) 所示分别为最优偏振角度下采集的图像以及高光去除后的图像, 分析可知所提模型可实现较大面积的图像高光区域去除, 改善了图像采集质量。图 9(b) 和图 9(d) 分别对应图 9(a) 和图 9(c) 随机行像素的像素亮度分布, 可以看出, 高光区域去除后的图像像素亮度分布较为集中, 图像中的高光区域像素得到了较好程度的抑制。

基于双色反射模型提取出不同偏振角度下采集图像对应的高光成分, 进而确定最优偏振角度下图像的高光像素分布区间为  $[0.6943, 1]$ 。通过基于偏振信息的图像高光检测与去除模型, 视觉测量系统中采集得到的图像实现了较好的高光区域去除, 且像素亮度均落在高光像素分布区间外, 一定程度上验证了该模型的有效性。

#### 3.2 基于偏振信息的特征匹配实验

图像的尺度不变特征变换 (SIFT)、加速稳健特

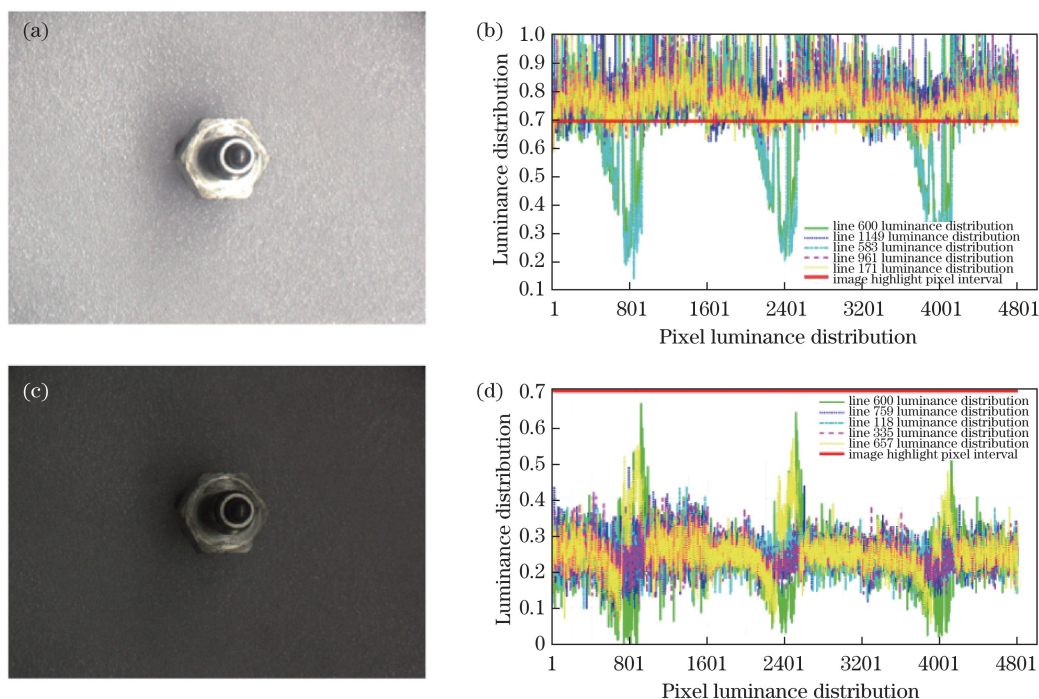


图 9 基于偏振信息的图像去高光效果。(a)最优偏振角度下采集的图像;(b)图(a)对应的像素亮度分布;  
(c)高光去除后的图像;(d)图(c)对应的像素亮度分布

Fig. 9 Effect of image highlight removal based on polarization information. (a) Image acquired under optimal polarization angle; (b) pixel luminance distribution corresponding to (a); (c) image after highlight removal; (d) pixel luminance distribution corresponding to (c)

征(SURF)因子被用于目标物体辨识、拍摄影像的追踪与缝合、生物动作对比与手势辨别以及三维信息模型重构技术等。图像的 SIFT 特征具有多量性,即少数空间物体成像就可以提取大量的 SIFT、SURF 图像特征向量。另外,图像的 SIFT、SURF 特征检测提取算法具有快速性与可拓展性,算法可

实现图像的在线实时检测,并且与其他图像特征提取算法有很好的联合性和适应性。在 SIFT、SURF 特征提取过程中引入随机抽样一致性(RANSAC)算法<sup>[21]</sup>对左右视图图像的 SIFT、SURF 特征匹配进行优化<sup>[22]</sup>,对应高光去除前后图像的 SIFT、SURF 特征提取匹配效果图如图 10、11 所示。

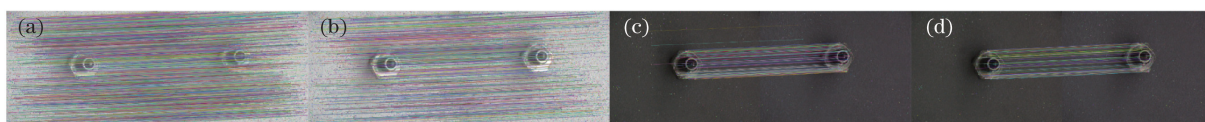


图 10 SIFT 特征提取细节的对比。(a)最优偏振角度下图像的 SIFT 特征提取;(b)经 RANSAC 算法处理后,最优偏振角度下图像的 SIFT 特征提取;(c)高光去除后图像的 SIFT 特征提取;(d)经 RANSAC 算法处理后,高光去除后图像的 SIFT 特征提取

Fig. 10 Detail comparison of SIFT feature extraction. (a) SIFT feature extraction of image under optimal polarization angle; (b) SIFT feature extraction of image under optimal polarization angle after treatment by RANSAC algorithm; (c) SIFT feature extraction of image after highlight removal; (d) SIFT feature extraction of image after highlight removal and treatment by RANSAC algorithm

由图 10、11 可知,高光去除后的图像特征提取较为集中,图像高光区域部分提取的特征点数量增多,不同条件下高反射率工件物体表面提取特征点的数量对比见表 1,其中  $I_{Left}$ 、 $I_{Right}$  分别为左右相机采集的工件图像亮度值。

分析表 1 可知,高光去除后图像对应的工件表面上的 SIFT 和 SURF 特征点数量明显增多,即图像高光区域遮掩了固有纹理和颜色信息,研究图像高光区域的去除方法具有一定的实践意义。

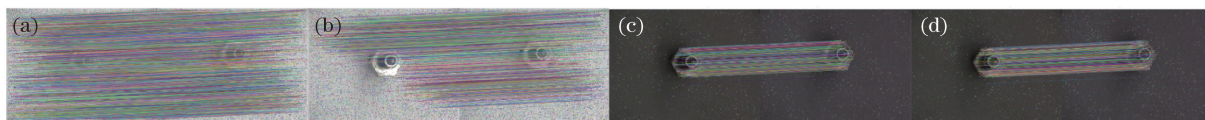


图 11 SURF 特征提取细节对比。a)最优偏振角度下图像的 SURF 特征提取;(b)经 RANSAC 算法处理后,最优偏振角度下图像的 SURF 特征提取;(c)高光去除后图像的 SURF 特征提取;(d)经 RANSAC 算法处理后,高光去除后图像的 SURF 特征提取

Fig. 11 Detail comparison of SURF feature extraction. (a) SURF feature extraction of image under optimal polarization angle; (b) SURF feature extraction of image under optimal polarization angle after treatment by RANSAC algorithm; (c) SURF feature extraction of image after highlight removal; (d) SURF feature extraction of image after highlight removal and treatment by RANSAC algorithm

表 1 不同条件下检测工件的表面特征点数目

Table 1 Number of feature points on workpiece surface under different conditions

Condition	Optimal polarization angle		Image highlight removal	
	$I_{Left}$	$I_{Right}$	$I_{Left}$	$I_{Right}$
SIFT	70	85	150	162
SIFT matching	70	70	150	150
SIFT matching after RANASC	55	55	89	89
SURF	82	93	180	205
SURF matching	82	82	180	180
SURF matching after RANASC	65	65	165	165

### 3.3 基于偏振信息的视觉测量精度分析实验

在已知相机标定参数<sup>[23]</sup>的基础上,可以得出被测物体的图像像素坐标与空间三维坐标间的映射函数关系,将基于偏振信息的图像高光检测与去除方法应用于视觉测量实验,并对高反射率工

件边长尺寸的测量精度进行分析。将高光去除后的金属工件图像进行边缘特征提取<sup>[24]</sup>,六边形工件对应不同边界上提取的特征点进行数据一项式拟合,进而提取出工件对应的六边形边界如图 12 所示。

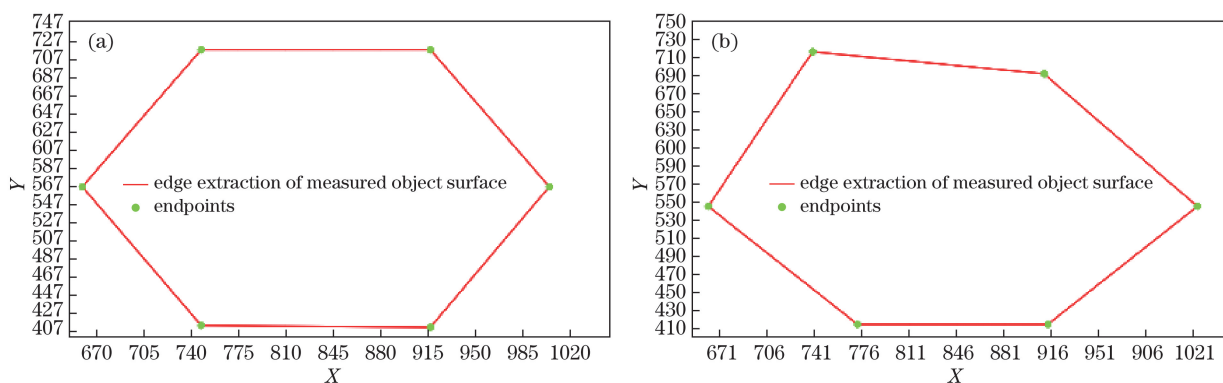


图 12 不同条件下提取边界轮廓。(a)高光去除后;(b)最优偏振角度

Fig. 12 Boundary contours extracted under different conditions. (a) After highlight removal; (b) under optimal polarization angle

图 12(a)所示为高光区域去除后的工件表面图像对应的边界轮廓提取效果,较符合工件实际的六边形轮廓分布,图 12(b)对应最优偏振角度下图像的轮廓提取效果,对应边界轮廓不符合实际的工件边界分布。均匀提取出图 12(a)中对应的工件表面图像轮廓特征点,经过相机标定参数计算转换到三

维空间世界坐标系 XYZ 中,对应的工件边界三维空间特征点如图 13 所示。

设计两组实验,其中参照组实验为最优偏振角度下的工件物体边长尺寸的视觉测量精度分析,对照组实验为高光区域有效去除后的工件物体边长尺寸的视觉测量精度分析。采用 Sobel 边缘检测算子提取



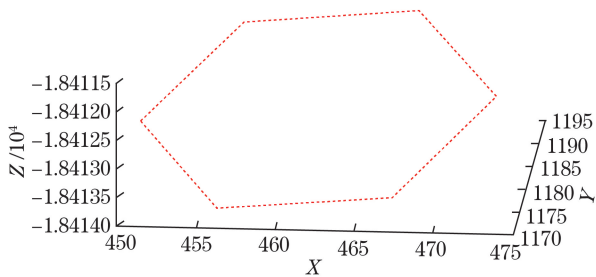


图 13 实验对象轮廓特征点对应的三维空间坐标  
Fig. 13 Three-dimensional space coordinates of feature points of experimental object's contour

表 2 Sobel 边缘检测特征点坐标及对应的世界坐标

Table 2 Coordinates of feature points for Sobel edge detection and corresponding world coordinates

No.	(x, y)	(X, Y, Z)	Space length /mm
1	(917.5, 719.5)	(467.18, 1192.5, -18412)	11.07
2	(747.5, 719.5)	(456.12, 1192.5, -18412)	11.28
3	(659.5, 567.5)	(450.37, 1182.8, -18413)	11.34
4	(747.5, 413.5)	(456.08, 1173, -18414)	11.07
5	(917.5, 411.5)	(467.14, 1172.9, -18414)	11.50
6	(1005.5, 567.5)	(472.89, 1182.8, -18413)	11.23

表 3 图像高光去除的测量精度对比

Table 3 Comparison of measurement accuracy based on image highlight removal

Condition	Side length /mm	Measurement accuracy /mm
Optimal polarization	11.25	0.75
Image highlight removal	10.09	1.91

图 13 所示为图像边界特征点对应的三维空间坐标分布,在此坐标系中分别计算工件对应的 6 个边长尺寸,分别为 11.07, 11.28, 11.34, 11.07, 11.50, 11.23 mm, 取其平均值即 11.25 mm 作为工件尺寸的视觉测量结果。由数控机床加工得到的工件边长尺寸为 12 mm, 故所提方法可实现 0.75 mm 的视觉测量精度,一定程度上验证了方法的可行性。

对比了最优偏振角度下采集的图像以及高光去除模型中无高光图像的视觉测量精度,得出图像高光区域的有效去除可以提高视觉测量精度,即所提方法具有一定的可行性与实践性。

## 4 结 论

搭建了一种基于偏振信息的图像高光去除模型,采用暗原色图像与 mean-shift 分割算法提取出

出工件边缘特征点后,对工件 6 个边长对应的直线方程进行拟合,等间隔选取边缘特征的像素坐标,通过相机标定参数转换到空间坐标系中,对应的工件 6 个端点像素坐标以及三维空间坐标见表 2。

选取 Sobel 边缘检测特征作为被测物体高度尺度的参考,图像像素坐标系中两点间的距离转换到世界坐标系中两点间的距离即为被测物体的空间尺寸<sup>[25]</sup>,通过计算对应空间的点距离即可求解出目标物体的高度,自然图像与偏振信息高光去除后的视觉测量精度对比效果见表 3。

目标图像中的高光区域像素,然后将不同偏振角度下采集图像中的高光像素集作为 BP 神经网络的输入端,将高斯函数分布规律的随机矩阵作为对应输出端,多次训练后有效地去除了高反射率工件物体表面中的高光区域。

在此模型的基础上进行了视觉测量方法的研究,通过提取对应高光去除后的目标图像对应的 SIFT、SURF 特征并统计提取特征点的数目,将此模型应用于高反射率工件高度尺寸的视觉测量。研究表明,在视觉测量系统中,高光去除后的目标采集图像对应的特征点数目明显增多,对应的工件尺寸测量精度为 0.75 mm,一定程度上验证了所提方法的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X P, Wang J Q, Zhang Y X, *et al.* Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.  
张旭苹, 汪家其, 张益新, 等. 大尺度三维尺寸视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- [2] Su G Y, Qu X H, Zhang F M. Experiments on mental surface characteristics' effect on differential visual measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0115001.  
苏国营, 曲兴华, 张福民. 金属表面特性对差动式视

- 觉测量的影响实验[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0115001.
- [3] Li J J, Zhao H. Feature patch-based vision measuring technique for complex surface and silhouette[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812003.  
李进军, 赵宏. 基于特征面片的复杂型面轮廓视觉测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812003.
- [4] Shen Y, Wang T, Wang Y, *et al.* Broad-band polarization characteristics on transmission and reflection of metal array structures in terahertz region[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0513001.  
沈云, 汪涛, 汪云, 等. 太赫兹波段金属阵列结构的透射及反射宽谱偏振特性[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0513001.
- [5] Miyazaki D, Kagesawa M, Ikeuchi K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(1): 73-82.
- [6] Morel M, Gorria P. Polarization imaging for 3D inspection of highly reflective metallic objects[J]. Optics and Spectroscopy, 2006, 101(1): 11-17.
- [7] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, *et al.* General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 59: 56-71.
- [8] Umeyama S, Godin G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(5): 639-647.
- [9] Yamaguchi Y, Miyake H, Nishikawa O, *et al.* Shape measurement of glossy objects by range finder with polarization optical system[R]. The Institute of Image Electronics Engineers of Japan, 2003: 43-50.
- [10] Liang R G. Short wavelength and polarized phase shifting fringe projection imaging of translucent objects[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 014104.
- [11] Lin S, Lee S W. Detection of specularity using stereo in color and polarization space[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 65(2): 336-346.
- [12] Wolff L B. Spectral and polarization stereo methods using a single light source[J]. Proceedings of the IEEE first International Conference on Computer Vision (ICCV), 1987: 708-715.
- [13] Lin H, Gao J, Zhang G J, *et al.* Review and comparison of high-dynamic range three-dimensional shape measurement techniques[J]. Journal of Sensors, 2017: 9576850.
- [14] Guo H W, Feng P, Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 166-171.
- [15] He X, Liu C, Zhu J Q. Beam splitting amplitude modulation phase retrieval imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0911002.  
何西, 刘诚, 朱健强. 基于振幅分束调制的相位恢复成像技术[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0911002.
- [16] Xu L J. White balance error compensation technique for fuzzy color difference image[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 76-80.  
许丽娟. 模糊色差图像的白平衡偏差补偿技术[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 76-80.
- [17] Guo H, Xu X T, Li B. Study on image dehazing method based on dark channel prior[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0410002.  
郭翰, 徐晓婷, 李博. 基于暗原色先验的图像去雾方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0410002.
- [18] Li J, Chen H F, Li G, *et al.* Salient object detection based on mean-shift filtering and fusion of color information[J]. IET Image Processing, 2015, 11(9): 977-985.
- [19] Zhao J, Lü L, Wang H, *et al.* Particle swarm optimization based on vector Gaussian learning[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2017, 11(4): 2038-2057.
- [20] Xu M X, Sun Q S, Lu Y S, *et al.* Nearest-neighbors based weighted method for the BOVW applied to image classification[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(4): 1877-1885.
- [21] Mufti F, Mahony R, Heinzmann J. Robust estimation of planar surfaces using spatio-temporal RANSAC for applications in autonomous vehicle navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(1): 16-28.
- [22] Azab M M, Shedeed H A, Hussein A S. New technique for online object tracking-by-detection in video[J]. IET Image Processing, 2014, 8(12): 794-803.
- [23] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, *et al.* Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315005.  
姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315005.
- [24] Hua C J, Xiong X M, Cheng Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021011.

- 化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021011.
- [25] Sun T, Wang C J, Wang R, *et al.* Contour bag of feature applied in laser active lighting recognition system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0109002.
- 孙涛, 王灿进, 王锐, 等. 轮廓特征包在激光主动照明识别系统中的应用 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0109002.