DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90199 [文章编号] 1003-5788(2022)10-0093-06

基于机器视觉技术的罗非鱼去鳞率无损快速在线检测系统

Design of on-line nondestructive rapid detection system for tilapia descaling rate based on machine vision

李朋朋[1] 李雨乐[1] 曾凡一[1] 刘 阳[1] 张 旭[1] 王慧慧[1,2]

LI Peng-peng[1] *LI Yu-le*[1] *ZENG Fan-yi*[1] *LIU Yang*[1] *ZHANG Xu*[1] *WANG Hui-hui*[1,2]

(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院,辽宁 大连 116034;
2. 国家海洋食品工程技术研究中心,辽宁 大连 116034)

(1. *School of Mechanical Engineering & Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning* 116034, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Seafood, Dalian, Liaoning* 116034, *China*)

摘要:目的:提高罗非鱼加工质量和效率、提升产品附加值。**方法:**利用鱼鳞、鱼皮在紫外激发下的荧光响应差异构建基于机器视觉技术的罗非鱼去鳞率快速检测系统。罗非鱼鱼体图像经预处理、背景分割、ROI 区域选取、未去鳞区域快速识别等算法处理后得到未去鳞和去鳞区图像,计算去鳞率并测试系统检测精度。**结果:**系统的去鳞率检测精度范围为 90.18%~94.14%。**结论:**该系统可实现被测罗非鱼样品的自动输送、检测图像自动触发与采集和图像的快速处理并提高罗非鱼去鳞率检测效率,满足生产线检测要求。

关键词:罗非鱼;去鳞率;紫外激发;机器视觉

Abstract: Objective: Improve the quality and efficiency of tilapia processing and increase the added value of products. **Methods:** For the fluorescence response difference of fish scales and fish skin under ultraviolet excitation, a rapid detection system for tilapia descaling rate based on machine vision technology was constructed. After image pre-processing, background segmentation, ROI region selection, and rapid identification of discaled areas, the scaled and descaled area images were obtained. Then the scaling rate was calculated and the detection accuracy of the system was tested. **Results:** The accuracy of the system scaling rate detection ranged from 90.18% to 94.14%. **Conclusion:** The automatic transmission of the tilapia sample, the automatic triggering and acquisition of the detection image, the rapid image processing can be realized by the system, which can effectively improve the detection efficiency of tilapia descaling rate and meet the requirements of the production line.

Keywords: tilapia; scaling rate; ultraviolet excitation; machine vision

罗非鱼(Tilapia),又称非洲鲫鱼,具有肉质鲜美、蛋白质含量高、脂肪含量低等特点[1]。中国罗非鱼的加工制品主要为条冻鱼和冷冻鱼片[2],其中条冻鱼的前处理加工过程主要包括去鳞、去内脏和清洗等环节,而去鳞质量直接影响罗非鱼的外观品质和商业价值[3-4]。目前去鳞率的检测主要由人工完成,主观性较强,效率低且无法为去鳞设备加工状态检测和优化提供实时或统计数据支持。

随着光学仪器和传感器技术的发展,机器视觉技术作为一种快速、无损、经济的检测方法,已被广泛应用于水产品的品质评估、分类、分级等研究中[5-7]。Sture 等[8]使用 3D 彩色成像的机器视觉系统根据鱼的三维几何特征和颜色信息完成了对大西洋鲑鱼的质量分级。Issac 等[9]基于计算机视觉建立的鱼鳃质量与新鲜度评估模型可以较准确地预测鱼的新鲜度。Wang 等[10]研究表明高光谱技术可用于鲤鱼去鳞率检测,但该技术仅利用光谱数据预测鲤鱼去鳞率,并未实现去鳞区域的可视化,此外高光谱设备价格昂贵,将其应用于实际生产中还比较困难。朱鑫宇等[11]建立了基于荧光响应的去鳞率视觉检测系统,该系统具有较好的识别效果,但系统对于去鳞区域的识别由卷积神经网络算法实现,图像处理和数据运行时间相对较长。

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFD0700905);辽宁省自然科学基金(编号:2020-MS-273);辽宁省教育厅项目(编号:LJKZ0511)

作者简介:李朋朋,男,大连工业大学在读硕士研究生。
通信作者:王慧慧(1982—),女,大连工业大学教授,博士。
E-mail:whh419@126.com

收稿日期:2022-02-17 **改回日期:**2022-05-13

研究拟在文献[11]的基础上，利用罗非鱼鱼鳞和鱼皮的荧光响应差异构建罗非鱼去鳞率在线检测系统，建立针对罗非鱼去鳞率检测的图像预处理、背景分割、ROI区域选取、未去鳞区域快速识别等算法实现去鳞区域和未去鳞区域的快速识别和去鳞率计算。并在生产现场进行系统的验证，以期为实现罗非鱼加工生产线自动化提供技术支持。

1　检测系统设计

1.1　检测原理

鱼鳞主要由胶原蛋白和羟基磷灰石组成，在可见光下呈半透明状[12]。前期研究[11]表明，在紫外光源激发下，鱼鳞会呈现较强的荧光反射，而鱼皮则在相同条件下荧光响应较差。因此可利用鱼鳞与鱼皮的荧光响应差值区分有鳞区域和无鳞区域从而计算鱼体的去鳞率。在360～370 nm紫外光照射下，罗非鱼的鱼鳞、鱼皮荧光响应差距较大，视觉检测效果最好。

1.2　去鳞检测系统

构建如图1所示的罗非鱼去鳞率检测系统。该系统工业相机(Basler acA2000-165um)为CMOS彩色面阵相机，分别率为2 048像素×1 088像素；镜头固定焦距为8 mm，光圈范围为F1.4～F16，分辨率为2 MP；紫外激发光源为条形光源；滤波片中心波长为365 nm；输送装置由调速电机控制；计算机内集成了自行开发的控制软件，可实现图像的自动采集、处理过程实时显示、去鳞率的统计及与上位机的通讯等，软件开发采用LabVIEW2016。为防止外界光线对检测的干扰，将相机与光源安装于暗箱内；8条光源分两组安装于暗箱两侧，与水平方向呈45°，与输送带表面的垂直距离为55 mm；输送装置运行速度为0.3 m/s，输送带表面为草纹状以防止鱼体滑动给检测带来干扰。

2　去鳞检测算法

系统的检测流程如图2所示，包括图像自动采集、图像预处理与背景分割、ROI区域确定、未去鳞区域识别等模块。

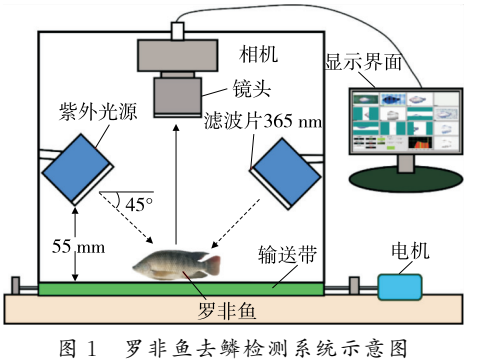


图1　罗非鱼去鳞检测系统示意图

Figure 1　Schematic diagram of tilapia descaling detection system

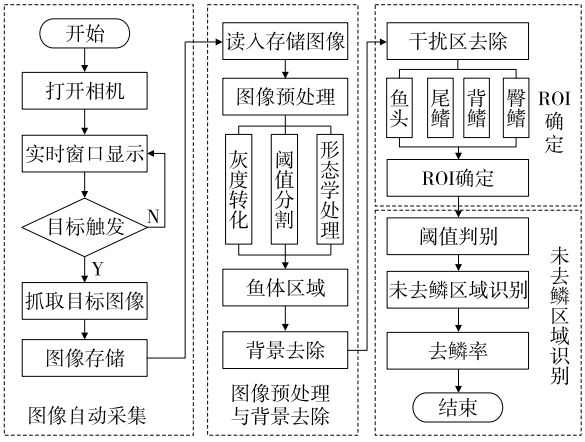


图2　系统检测流程图

Figure 2　Flow chart of system detection

2.1　图像自动采集

为了使相机准确抓取目标，采用阈值法对相机输出的实时图像设置目标触发检测线。图3为鱼体触发相机获取图像示意图。设图像左上角O为像素坐标系的原点，图像中某一像素点坐标(u,v)代表该点在数字图像数组中的行列数。在图3中，检测线AB的起点位置A的坐标为(u_A,v_A)，终点位置B的坐标为(u_A,v_B)。当鱼通过检测线位置时，鱼体与接触线接触的起点位置A'的坐标为$(u_A,v_{A'})$，终点B'的坐标为$(u_A,v_{B'})$，此时$A'B'$位置检测线上像素值发生变化，当检测线上发生改变的像素值达到一定数目时触发图像采集。

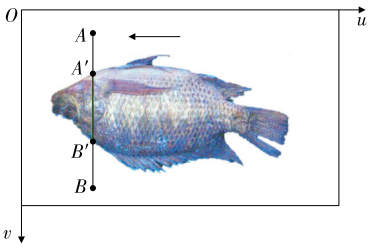


图3　鱼触发采集图像示意图

Figure 3　The schematic diagram of fish trigger acquisition image

为了减小输送带绿色背景和鱼鳞蓝色荧光反射对触发造成的干扰，选取R通道颜色值作为颜色特征值。无鱼经过检测线时，检测线AB上所有像素的R通道值的总和为S_{AB}；有鱼通过检测线时，检测线上的所有像素的R通道值的总和为$S_{AA'B'B}$。分别按式(1)、式(2)计算S_{AB}和$S_{AA'B'B}$。

$$S_{AB}=\sum_{i=v_i}^{v_B}R_{u_A v_i}\ , \tag{1}$$

$$S_{AA'B'B}=\sum_{i=v_A}^{v_{A'}}R_{u_A v_i}+\sum_{i=v_{A'}}^{v_{B'}}R_{u_A v_i}+\sum_{i=v_{B'}}^{v_B}R_{u_A v_i}\ , \tag{2}$$

式中:

$R_{u_A v_i}$ ——数字图像数组中第 u_A 行 v_i 列处像素的红色通道颜色值。

当满足 $S_{AB} < S_{AA'B'B}$ 时,即达到图像采集触发条件。但在实际检测过程中,输送带上的散落鱼鳞可能会对触发造成干扰。为保证准确采集目标图像,对检测线与鱼体接触位置 $A'B'$ 上红色通道颜色值数量设定阈值 $T = v_{B'} - v_{A'}$,经试验可得当 $T > 55$ 时,可触发图像采集。

2.2 图像预处理与背景分割

2.2.1 阈值分割　采用加权平均值法[13]对彩色鱼体图像[图 4(a)]进行灰度化处理,处理结果如图 4(b)所示。为将鱼体区域与输送带背景进行分割,采用最大类间方差法[14-15]对灰度图像进行二值化处理。该方法基于图像的统计特性实现阈值自动选取,即选取确定灰度值将整幅图像进行背景分割,计算分割后的类间方差,当类间方差最大时所对应的灰度值为最佳阈值[16]。通过试验得知,当灰度值为 80 时分割效果最好,分割结果见图 4(c)。

2.2.2 形态学处理　阈值分割后,鱼体区域仍有孔洞区域存在,可能对后续背景的分割产生影响。采用 Canny 算子[17-18]对阈值分割后的图像进行轮廓提取,然后将轮廓内鱼体区域中的内部孔洞进行填充。设内部孔洞大小为 N,像素值为 0,填充粒子大小为 M,像素值为 1,孔洞填充按式(3)运算:

$$H(u,v) = \begin{cases} 1, & N_{max} < M_{min} \\ 0, & N_{max} \geqslant M_{min} \end{cases}, \tag{3}$$

式中:

$H(u,v)$——轮廓区域内第 v 行 u 列像素值;

N_{max}——孔洞最大尺寸;

M_{min}——填充粒子最小尺寸。

经试验得知 M_{min} 为 5 像素×5 像素时填充效果最好,轮廓内部像素值设为 255,此时填充后灰度图像见图 4(d)。

图像填充后,采用低通滤波法[19]去除鱼体轮廓外部杂散的噪声点。该方法是利用待处理像素与周围领域内像素的均值进行像素间的差值比较,若待处理像素与周围领域内像素均值的差值大于指定的百分比,则将待处理像素设置为周围领域内像素均值,否则待处理像素值保持不变。当领域尺寸设置为 7 像素×7 像素、百分比为 40 时,滤波除杂效果最好,处理后图像如图 4(e)所示。低通滤波处理后的图像中仍有少量离散点,采用闭运算处理进一步消除离散点。图像的闭运算是图像依次进行膨胀、腐蚀处理后的过程,能够消除图像中鱼体轮廓外的离散点,平滑轮廓边界的同时不改变其面积。经试验,当结构元素尺寸为 3 像素×3 像素时,离散点被消除且鱼体区域轮廓形状保持不变,处理结果见图 4(f)。

2.2.3 背景分割　将图 4(f)与图 4(a)进行图像运算以获得去除背景后的彩色鱼体区域。设未处理彩色图像位置像素为 $SrcA(x,y)$,图像预处理后的位置像素为 $SrcB(x,y)$,式(4)为去除背景的彩色鱼体区域位置像素 $Dst(x,y)$ 的表达式。

$$Dst(x,y) = SrcA(x,y) \times SrcB(x,y), \tag{4}$$

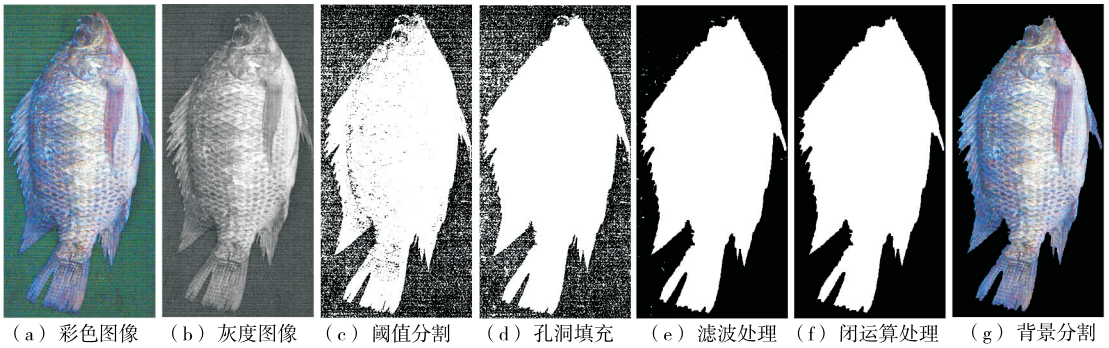
式中:

(x,y)——图像中像素点的位置坐标。

图 4(g)为去除背景后的彩色鱼体图像。

2.3 ROI 确定

原始彩色图像去除背景后,鱼体区域的鱼头、腹鳍、尾鳍、背鳍和臀鳍均会对去鳞检测造成干扰。生物体虽具有其自身的形状和大小,但鱼头、鱼尾、鱼鳍比例近似,据此,基于最小外界矩形法[20]并结合统计计算对上述干扰区域予以去除。随机选择 10 个批次共计 300 条罗非鱼进行图像采集和处理,对图像进行横向和纵向扫描,构建最小外接矩形。鱼的长度(L)和宽度(W)、鱼头($K_{头}$)、尾鳍($K_{尾}$)的长度,腹鳍($K_{腹}$)、背鳍($K_{背}$)的宽度测量见图 5,计算 $K_{头}$ 和 $K_{尾}$ 所占鱼体长度的比例以及 $K_{腹}$ 和 $K_{背}$ 所占鱼体宽度的比例,统计数据见表 1。根据统计结果将 $K_{头}/L$、$K_{尾}/L$、$K_{腹}/W$、$K_{背}/W$ 分别确定为 0.212,0.238,0.084,0.166,由此可得去除头部、尾鳍、腹鳍和部分背鳍的 ROI 区域,即图 6 中的矩形 mnrs。由图 6 中的椭圆区域可以看出,臀鳍和部分背鳍对去鳞率的计算有干



(a) 彩色图像　(b) 灰度图像　(c) 阈值分割　(d) 孔洞填充　(e) 滤波处理　(f) 闭运算处理　(g) 背景分割

图 4　图像处理结果

Figure 4　Results of image processing

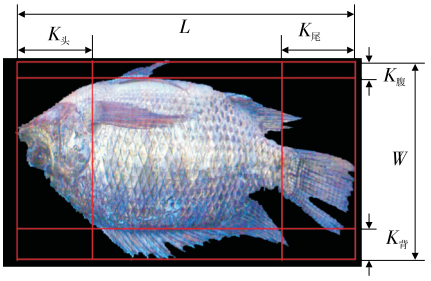


图 5　干扰区去除

Figure 5　Removal of interference zone

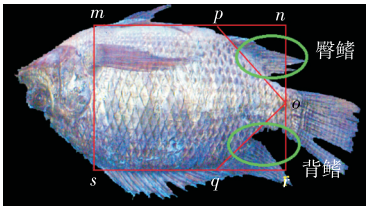


图 6　ROI 选取

Figure 6　Selection of ROI

扰，因此分别构建 opn 和 oqr 2 个掩膜区域来去除干扰，其中所选 o 点为 bc 的中点，p 点和 q 点分别为 ab 和 cd 的三等分点。综上，将图 6 中 mpoqs 区域作为去鳞与未去鳞的 ROI 识别区域。

2.4　未去鳞区域识别

随机选择 300 个未去鳞区域和去鳞区域分别计算 R（红色）、G（绿色）和 B（蓝色）通道颜色平均值，结果如图 7 所示。由图 7 可知，未去鳞区域和去鳞区域的 B、G 通道平均颜色值有明显差异，B 通道颜色值差异最大，R 通道颜色平均值无明显规律；未去鳞区域的 B 通道颜色平均值大于 180，G 通道颜色平均值小于 140；去鳞区域的 B 通道颜色值小于 180，G 通道颜色值大于 140。因此采用 B 通道颜色值和 G 通道颜色值作为颜色特征值来建立像素阈值 T_1 和 T_2 从而对罗非鱼进行未去鳞区域和去鳞区域的识别。T_1 和 T_2 分别按式(5)、式(6)计算。

$$T_1 = B - G > 0 \parallel B > 180, \tag{5}$$

$$T_2 = B - G < 0 \parallel B < 140, \tag{6}$$

式中：

B——蓝色通道颜色值；

G——绿色通道颜色值。

以彩色鱼体未去鳞区域图像为例，进行像素阈值计算和灰度化处理，未去鳞识别效果见图 8。

表 1　鱼头和尾鳍长度占比、腹鳍和背鳍宽度占比统计

Table 1　Statistics of fish head, caudal, pelvic fin and dorsal

占比	最大值	最小值	平均值	标准差
$K_{头}/L$	0.226	0.202	0.212	0.006 77
$K_{尾}/L$	0.248	0.228	0.238	0.008 23
$K_{腹}/W$	0.089	0.078	0.084	0.003 73
$K_{背}/W$	0.172	0.158	0.166	0.004 59

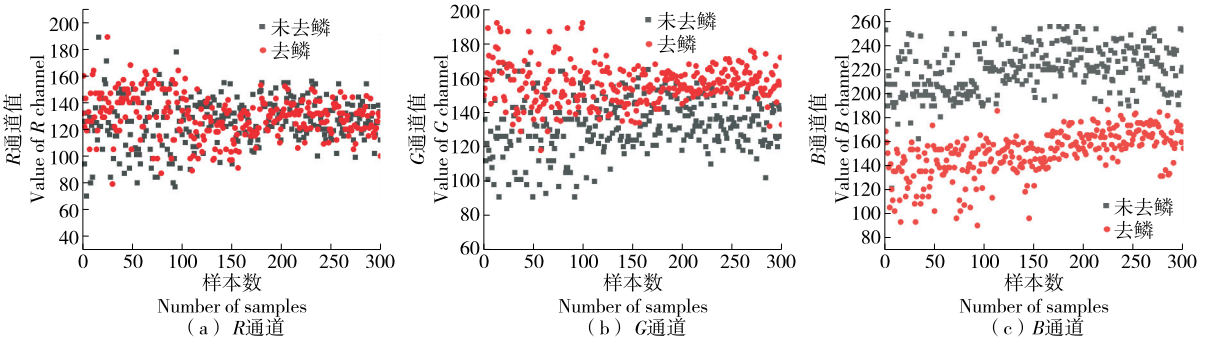
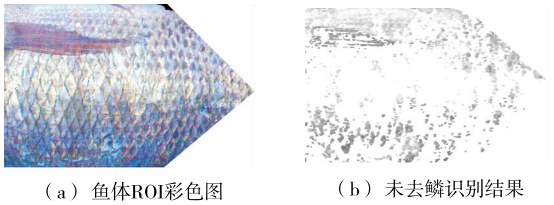


图 7　未去鳞区域与去鳞区域通道颜色值

Figure 7　Channel color values of scaled region and descaled region



（a）鱼体ROI彩色图　　（b）未去鳞识别结果

图 8　未去鳞区域识别

Figure 8　The identification of descaled areas

3　去鳞检测系统测试

3.1　试验设备与方法

为对去鳞检测系统进行评估，在罗非鱼加工企业进行系统性能测试，现场测试系统如图 1 所示。

3.1.1　人工去鳞率计算　采用硫酸纸法[21-22]，即将硫酸纸覆盖在鱼体单侧，用铅笔勾勒出鱼体轮廓和鱼鳞的外形，再使用单位坐标纸对硫酸纸上鱼的外轮廓及去鳞外形的面积进行统计，按式(7)计算去鳞率。

$$P=\frac{S_2-S_1}{S_2}\times 100\%, \tag{7}$$

式中:

P——罗非鱼的去鳞率,%;

S_1——未去鳞区域面积之和;

S_2——加工前被加工面上鱼鳞面积总和。

3.1.2　去鳞率检测精度验证　选取不同转速条件下滚筒去鳞加工后的罗非鱼,鱼长约为 290～330 mm,鱼宽约为 100～120 mm,鱼重约为 588～712 g,将选取的罗非鱼分成 3 个批次,每个批次 10 条罗非鱼,依次进行传统去鳞率检测和机器视觉去鳞率检测,按式(8)计算去鳞率检测。

$$A=\left(A-\frac{|P_1-P_2|}{P_2}\right)\times 100\%, \tag{8}$$

式中:

A——去鳞率检测精度,%;

P_1——人工检测去鳞率,%;

P_2——机器视觉检测去鳞率,%。

3.2　结果与分析

由表 2 可知,机器视觉检测去鳞率的精度为 90.18%～94.14%,检测速度为 0.294 4～0.341 1 m/s,均满足生产线检测要求。当罗非鱼的去鳞率较低时,机器视觉的去鳞率检测的精度也随之下降。滚筒式去鳞机难以将靠近背鳍和腹鳍位置的鱼鳞去除,而正好靠近背鳍位置的鱼鳞颜色较暗,紫外激发光源照射下的鱼鳞荧光反射较弱;靠近腹鳍位置的鳞片较小,都可能是造成去鳞率降低检测精度下降的原因。

表 2　3 个批次下罗非鱼的去鳞率检测试验结果

Table 2　Test results of descaling rate of three batches of tilapia

试验号	批次 1				批次 2				批次 3			
	人工检测去鳞率/%	视觉检测去鳞率/%	检测精度/%	检测速度/(m·s^{-1})	人工检测去鳞率/%	视觉检测去鳞率/%	检测精度/%	检测速度/(m·s^{-1})	人工检测去鳞率/%	视觉检测去鳞率/%	检测精度/%	检测速度/(m·s^{-1})
1	92.35	86.22	92.89	0.312 3	75.70	70.19	92.15	0.290 7	69.10	63.95	91.95	0.296 8
2	86.72	81.51	93.61	0.340 5	77.68	72.18	92.38	0.294 4	69.07	63.39	91.04	0.293 2
3	90.01	84.34	93.28	0.321 3	74.16	68.71	92.07	0.331 2	68.89	63.03	90.70	0.318 7
4	96.90	90.75	93.22	0.303 4	85.12	78.62	91.73	0.325 6	67.97	62.58	91.39	0.327 5
5	93.35	87.22	92.97	0.294 6	71.77	66.58	92.20	0.330 1	73.05	67.49	91.76	0.339 0
6	97.98	91.61	93.05	0.292 6	80.12	74.76	92.83	0.341 1	65.35	59.63	90.41	0.321 7
7	92.11	87.01	94.14	0.310 5	69.24	64.48	92.61	0.292 9	64.95	59.14	90.18	0.324 9
8	93.47	87.45	93.12	0.330 4	83.03	76.92	92.06	0.294 6	69.56	64.39	91.97	0.319 7
9	97.15	91.53	93.86	0.342 1	78.81	73.22	92.36	0.296 5	69.34	63.86	91.42	0.341 1
10	93.06	87.73	93.92	0.351 3	74.04	68.77	92.34	0.318 4	65.23	60.03	91.34	0.328 7

4　结论

基于机器视觉技术构建了针对罗非鱼加工生产线的去鳞率无损、快速检测系统。利用鱼鳞和鱼皮在紫外激发下的荧光响应差异,提出了专门针对罗非鱼去鳞率检测的图像预处理、背景分割、ROI 区域选取、未去鳞区域快速识别等算法,生产现场验证去鳞率检测精度为 90.18%～94.14%,满足生产线检测要求。由于检测精度与光源照射有关,后期将通过调整光源角度优化在线检测系统从而提高检测精度。

参考文献

[1] DUAN Z H, JIANG L N, WANG J L, et al. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(4): 472-476.

[2] 李振铎, 张健, 赵云苹, 等. 影响冷冻罗非鱼鱼片品质的因素分析及控制措施[J]. 齐鲁渔业, 2017, 34(7): 2.
LI Z D, ZHANG J, ZHAO Y P, et al. Analysis of factors affecting quality of frozen tilapia fillet and its control measures[J]. Shandong Fisheries, 2017, 34(7): 2.

[3] 李锐, 孙祖莉, 李来好, 等. 不同热加工方式对罗非鱼片食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46 (14): 127-135.
LI R, SUN Z L, LI L H, et al. Effects of different thermal processing methods on edible quality of tilapia fillets[J]. Food & Fermentation Industries, 2020, 46(14): 127-135.

[4] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 我国罗非鱼加工研究现状[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 363-367, 373.

ZHAO Z X, WU Y Y, LI L H, et al. Current research situation of tilapia processing in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9): 363-367, 373.

[5] 贾磊, 陈俊超. 机器视觉的水产食品外观品质检测系统[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 266-268.
JIA L, CHEN J C. Machine vision inspection system for appearance quality of aquatic food[J]. Food Industry, 2021, 42(5): 266-268.

[6] 杨东海, 张胜茂, 汤先峰. 基于机器视觉技术的鱼类识别研究进展[J]. 渔业信息与战略, 2019, 34(2): 112-120.
YANG D H, ZHANG S M, TANG X F, et al. Research and development of fish species identification based on machine vision technology[J]. Fishery Information & Strategy, 2019, 34(2): 112-120.

[7] 贾志鑫, 傅玲琳, 杨信廷, 等. 机器视觉技术在水产食品感官检测方面的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 320-325.
JIA Z X, FU L L, YANG X T, et al. A review of the application of machine vision technique in sensory testing of aquatic foods[J]. Food Science, 2019, 40(13): 320-325.

[8] STURE Y, ELLING R Y, AMUND S, et al. A 3D machine vision system for quality grading of Atlantic salmon[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 123: 142-148.

[9] ISSAC A, DUTTA M K, SARKAR B. Computer vision based method for quality and freshness check for fish from segmented gills[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 139: 10-21.

[10] WANG H, WANG K, ZHU X, et al. Integration of partial least squares regression and hyperspectral data processing for the nondestructive detection of the scaling rate of carp (Cyprinus carpio)[J]. Foods, 2020(9): 500.

[11] 朱鑫宇, 李朋朋, 邱新静, 等. 基于荧光响应的罗非鱼去鳞质量视觉检测方法研究[J]. 计算机科学与应用, 2021, 11(7): 1 896-1 905.
ZHU X Y, LI P P, QIU X J, et al. Research on visual detection method of Tilapia descaling quality based on fluorescence response[J]. Computer Science and Application, 2021, 11(7): 1 896-1 905.

[12] QIN D, BI S, YOU H, et al. Development and application of fish scale wastes as versatile natural biomaterials[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 428: 131102.

[13] 王士明. 基于计算机视觉的车辆单目测距系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 11.
WANG S M. Research of vehicle monocular measurement system based on computer vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 29.

[14] 张丽, 李潇, 吴皓天, 等. 基于最大类间方差的图像分割算法研究[J]. 科技创新与应用, 2021(8): 39-41, 46.
ZHANG L, LI X, WU H T, et al. Research on image segmentation algorithm based on maximum interclass variance[J]. Technology Innovation and Application, 2021(8): 39-41, 46.

[15] CAO J, CHEN L, WANG M, et al. Implementing a parallel image edge detection algorithm based on the Otsu-Canny operator on the hadoop platform[J]. Computational Intelligence & Neuroscience, 2018, 2 018: 1-12.

[16] 李宝芸, 范玉刚, 高阳. 基于 OTSU 和 Canny 算子的红外图像特征提取[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 33-40.
LI B Y, FAN Y G, GAO Y, et al. Infrared image feature extraction based on OTSU and Canny operator[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 35(6): 33-40.

[17] 刘成刚, 刘二林, 姜香菊. 改进 Canny 算子的列车轮对踏面边缘检测算法[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 22-25.
LIU C G, LIU E L, JIANG X J, et al. Edge detection algorithm of wheelset tread based on improved canny operator[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(1): 22-25.

[18] XIN M. Research on simulation rendering technology of watercolor painting based on Canny edge darkening[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1 748(2): 022011.

[19] 罗志刚, 宋旭, 王东. 基于低通滤波器的图像处理方法: CN107801015A[P]. 2018-03-13.
LUO Z G, SONG X, WANG D. Image processing method based on low pass filter: CN107801015A[P]. 2018-03-13.

[20] 张文霞, 王春光, 王海超, 等. 无芒隐子草叶片卷曲度和厚度测量方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 184-191.
ZHANG W X, WANG C G, WANG H C, et al. Measurement method of leaf rolling index and thickness of Cleistogenes songorica[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 184-191.

[21] 王玖玖. 淡水鱼鱼鳞去除方法的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 35.
WANG J J. Research on scaling method for freshwater fish[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011: 35

[22] 张均波. 淡水鱼机械除鳞技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2004: 32.
ZHANG J B. Study on mechanical shelling scale for freshwater fish[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004: 32.