doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.026

蛋鸡羽毛覆盖度计算及其与体温关系研究

杨断利[1,2]　张　然[1,2]　陈　辉[3]　鲍惠玲[4]　宣凤苓[3]　高　媛[1,2]

(1.河北农业大学信息科学与技术学院,保定 071001;2.河北省农业大数据重点实验室,保定 071001;
3.河北农业大学动物科技学院,保定 071000;4.石家庄市动物疫病预防控制中心,石家庄 050026)

摘要:为解决通过人工及温度阈值分割评估蛋鸡羽毛覆盖度准确度不够的问题,提出基于热红外图像和彩色图像计算羽毛覆盖度的方法。利用 Otsu 算法结合不同的颜色模型提取鸡体目标及背部羽毛覆盖完好区域,通过计算面积比值,获取背部羽毛覆盖度。针对热红外图像目标鸡体边缘模糊导致分割效果较差的问题,提出基于分量 R、B 灰度直方图的自适应性热红外图像增强方法,该方法突出了前景与背景的差异,增强了边缘的清晰度。实验结果表明,热红外图像鸡体目标及羽毛覆盖完好区域的分割准确度达到 97.18% 和 96.86%,彩色图像分割准确度达到 99.58% 和 97.86%。对于羽毛覆盖度,热红外图像的计算结果接近羽毛覆盖度真实值。对同一批蛋鸡计算羽毛覆盖度,热红外图像比彩色图像的计算结果最少时高 2.01 个百分点,最大时高 30.29 个百分点。通过分析原因,发现蛋鸡剐蹭鸡笼等行为露出的白色羽毛根部,是彩色图像计算覆盖度结果出现偏差的主要因素。羽毛覆盖度会影响鸡体体表温度。通过实验发现,鸡体羽毛覆盖度与体表温度呈极显著负相关($P<0.01$),依据羽毛覆盖度对蛋鸡进行分级,对比相同级别、不同区域的蛋鸡体表温度,发现相同级别的羽毛严重损伤区域平均温度比背部平均温度高 10℃以上,对比相同区域、不同级别的蛋鸡体表温度,发现背部平均温度最高相差 3.89℃,损伤区域平均温度最高相差 5.36℃。

关键词:蛋鸡;羽毛覆盖度;体表温度;图像处理;彩色图像;热红外图像

中图分类号:S24;TP391.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)10-0242-10　　**OSID**:

Calculation of Feather Coverage and Relationship between Coverage and Body Temperature in Laying Hens

YANG Duanli[1,2]　ZHANG Ran[1,2]　CHEN Hui[3]　BAO Huiling[4]　XUAN Fengling[3]　GAO Yuan[1,2]

(1. *College of Information Science and Technology*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*
2. *Hebei Key Laboratory of Agricultural Big Data*, *Baoding* 071001, *China*
3. *College of Animal Science and Technology*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071000, *China*
4. *Shijiazhuang Center of Animal Disease Control*, *Shijiazhuang* 050026, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient accuracy in evaluating the feather coverage of laying hens by using manual and temperature threshold segmentation methods, thermal infrared images and color images approaches were proposed to calculate the feather coverage. By using Otsu algorithm combined with different color models to extract the chicken body target and the well-covered area of the back feathers and calculate the area ratio, the coverage of the back feathers was obtained. Aiming at the problem of poor segmentation effect caused by the blurred edge of the target chicken body in thermal infrared images, an adaptive thermal infrared image enhancement method based on the gray histogram of R and B components was proposed. The experimental results showed that the segmentation accuracy of chicken body targets and well-covered areas with feathers in thermal infrared images reached 97.18% and 96.86%, and the segmentation accuracy of color images reached 99.58% and 97.86%. The calculation result of the thermal infrared images was closer to the real value of feather coverage than that of color images. The analysis revealed that the roots of white feathers exposed by behaviors of laying hens rubbing against the chicken coop were the main factors for the deviation of the coverage results of the color image calculation. Feather coverage affected chicken body surface temperature. The results showed that the

收稿日期:2022-07-07　修回日期:2022-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(32172779)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-40)

作者简介:杨断利(1973—),女,副教授,主要从事机器视觉和智能检测与控制研究,E-mail:502217591@qq.com

chicken body feather coverage was significantly negatively correlated with the body surface temperature ($P<0.01$), and the average temperature of the damaged area of the same level was 10℃ higher than the average temperature of the back.

Key words: laying hens; feather coverage; body surface temperature; image processing; color image; thermal infrared image

0　引言

鸡体羽毛覆盖状况能直接反映鸡只的生长发育和健康情况[1-2]。蛋鸡受生理、营养、环境及疾病等多种因素的影响,会产生脱羽现象,背部是主要的脱羽部位[3-4]。羽毛缺失不仅影响鸡只外观,而且羽毛覆盖度的降低,会造成鸡体热量的大量散失,对鸡体体表温度产生影响,迫使蛋鸡通过增加采食量以维持生理需求,致使养鸡成本增加,影响蛋鸡生产性能及养殖效益[5-6]。

国外学者对蛋鸡羽毛覆盖度的估算及表示方法进行了相关研究[7-9]。研究表明,红外热成像是评价蛋鸡羽毛覆盖度的有效手段。但红外热成像仪采集到的温度信息受室温、距离等多种客观因素影响[10-11],当拍摄条件发生变化时,手动阈值分割方法需要重新调节温度阈值,这不利于蛋鸡及其羽毛损伤区域的分割与温度提取,而基于图像处理的鸡体及羽毛受损区域分割方法不需要手动设置温度阈值,克服了温度变化的影响。数字图像处理的方法可以准确地提取目标区域,文献[12-21]研究表明,Otsu 算法结合颜色空间可准确地分割前景与背景。目前为止,暂未发现基于数字图像处理进行羽毛分割处理的相关研究报道。文献[22-24]研究表明,红外热成像技术已应用于鸡体温度检测。鸡体温度可以反映鸡只的健康状况,鸡体体表温度受羽毛覆盖度影响[25-27]。但关于不同程度的羽毛覆盖度对鸡体体表温度影响情况的研究,目前还未查到相关的文献。本文利用图像分割技术,计算鸡体羽毛覆盖度,并通过提取热红外图像目标区域的方法,计算出鸡体体表平均温度,对不同程度羽毛覆盖度与鸡体体表温度之间的量化关系进行研究。

1　材料与方法

1.1　蛋鸡背部图像、体表温度数据采集

实验蛋鸡品种为海兰褐蛋鸡,养殖基地位于河北省保定市某养殖场,饲养场景如图 1 所示。养殖场内养殖有背部不同羽毛覆盖度的蛋鸡 50 只,在相同的饲养条件下,养殖有 20 只背部羽毛覆盖完好的蛋鸡作为对照组,每天 09:00、16:00 喂食,养殖 5 d 后,采集羽毛覆盖完好及不同羽毛覆盖度的蛋鸡体表温度,作为研究羽毛覆盖度与鸡体温度关系的原始数据。采用 testo890 型红外热成像仪拍摄羽毛覆盖完好及不同覆盖度的蛋鸡背部彩色图像 200 幅,热红外图像 200 幅,用于分割鸡体背部及羽毛损伤区域,同时为算法提取鸡体体表温度提供热红外图像。为了验证本研究提出的,基于热红外图像的自适应性图像增强算法是否具有普适性,实验同时选择了价格及配置与 testo890 型红外热成像仪差异较大的海康 HM-TPH11-3AXF 型手持测温热像仪,拍摄热红外图像 200 幅进行对比。拍摄时间为 2021 年 11 月 19 日,09:00—11:00,室内温度保持在 16℃,为了获取完整的蛋鸡背部图像,相机位于鸡体正上方,距离鸡体约 0.4 m 处,俯视拍摄,室内光照较充足,为了消除复杂背景对分割鸡体效果的影响,采集背景为绿色,数据采集示意图如图 2 所示。通过 IRsoft2 软件进行铁虹色热红外图像、彩色图像及温度矩阵的信息提取与保存。通过 SPSS 25.0 软件中的平均值检验进行体表温度平均值、方差分析,利用 Pearson 相关性检验进行羽毛覆盖度与体表温度相关性分析。



图 1　饲养实物图

Fig. 1　Single cage feeding

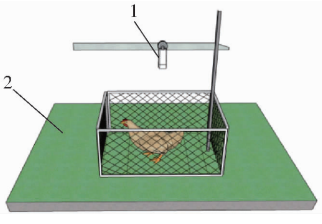


图 2　数据采集示意图

Fig. 2　Data acquisition diagram

1. 相机　2. 背景

1.2　热红外图像中目标鸡体与羽毛覆盖完好区域提取

蛋鸡热红外图像中呈现的不同颜色,与该区域

的温度有关,环境温度为低温区域呈暗蓝色,羽毛覆盖完好区域为中温区域呈洋红色,蛋鸡羽毛损伤区域为高温区域呈黄白色,基于蛋鸡图像颜色特征对蛋鸡、低温环境及羽毛覆盖完好区域进行分割。

1.2.1 目标鸡体提取

热红外图像中普遍存在分辨率低、前景边缘模糊等问题,当蛋鸡羽毛覆盖完好区域与环境背景温差较小时,二者的对比度更差,影响最大类间方差法[28](Otsu)对目标鸡体的分割效果,基于 RGB 颜色模型的蛋鸡热红外图像分割结果如图 3 所示。

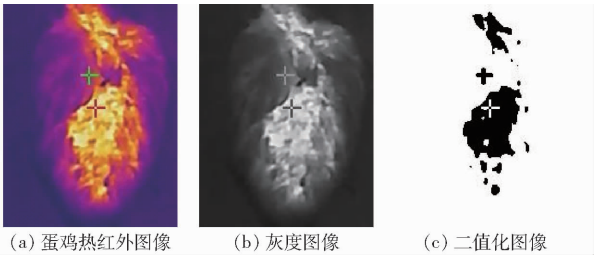


图 3 蛋鸡热红外图像 RGB 颜色模型分割示意图

Fig. 3 Segmentation diagrams of RGB color model of thermal infrared image of laying hens

通过分析蛋鸡热红外图像中的灰度,发现鸡体与背景中分量 R、B 灰度存在显著变化,分量 R、G、B 灰度分析如图 4 所示,其中纵坐标对应每个像素点的灰度。因此选取 Lab 颜色空间中的分量 a 进行目标鸡体的提取,分量 a 二值化结果如图 5b 所示。

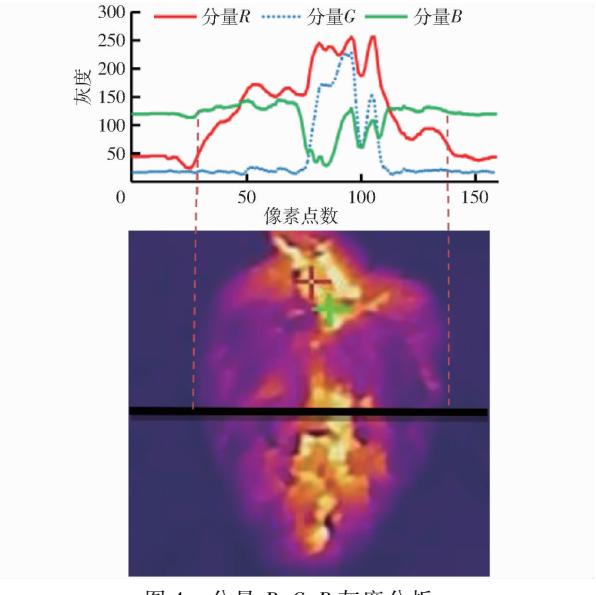


图 4 分量 R、G、B 灰度分析

Fig. 4 Gray analysis of R, G and B components

图 5a 中分量 a 图像中鸡体边界依然模糊,与背景差异较小,导致 Otsu 算法提取到的鸡体不完整。本文针对 Otsu 算法的分割特性提出了一种基于分量 R、B 灰度直方图的自适应性图像增强的方法,增强图像中鸡体边缘对比度。该方法遍历图像全部灰度级,设概率最大的灰度级数为自适应性图像增强

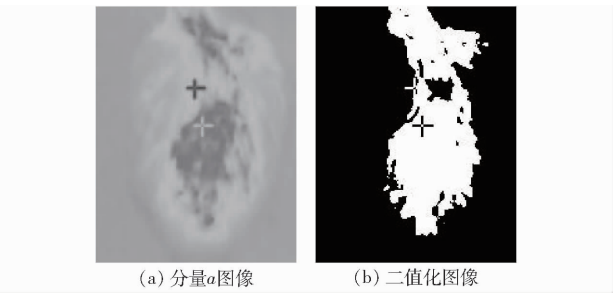


图 5 分量 a 及 Otsu 算法分割示意图

Fig. 5 a component and Otsu algorithm segmentation diagram

的阈值,并增设最佳阈值限制条件,防止因阈值过大造成的颜色特征丢失。

首先,设鸡体图像像素数为 N,灰度级为 L,图像中分量 R、B 像素总数计算公式为

$$n_r = \sum_{i=0}^{L-1} n_{r_i} \tag{1}$$

$$n_b = \sum_{i=0}^{L-1} n_{b_i} \tag{2}$$

式中 n_{r_i}——R 分量中第 i 个灰度级像素数

n_{b_i}——B 分量中第 i 个灰度级像素数

其次,对灰度直方图进行归一化处理,统计每个像素级的概率,分量 R、B 归一化处理公式分别为

$$P_{r_i} = \frac{n_{r_i}}{n_r} \tag{3}$$

$$P_{b_i} = \frac{n_{b_i}}{n_b} \tag{4}$$

然后,计算分量 R、B 中最大概率的灰度级,公式为

$$P_{r\max} = \max(P_{r_i}) \tag{5}$$

$$P_{b\max} = \max(P_{b_i}) \tag{6}$$

获取灰度概率最大的灰度级,公式为

$$\begin{cases} T_r = r_i & (P_{r\max} = P_{r_i}) \\ T_b = b_i & (P_{b\max} = P_{b_i}) \end{cases} \tag{7}$$

式中 T_r——分量 R 中自适应性图像增强阈值

T_b——分量 B 中自适应性图像增强阈值

r_i——分量 R 第 i 个灰度级

b_i——分量 B 第 i 个灰度级

在图像增强处理中,少数图像存在因增强阈值大于背景灰度造成原图像颜色信息丢失的情况,因此在图像增强过程中加入限制条件,阈值根据背景中各分量灰度范围设定,本次实验分量 R、B 的阈值分别是 50 和 125,分量 R、B 图像增强表达式为

$$R' = \begin{cases} R - T_r & (T_r < 50) \\ 50 & (50 \leqslant T_r \leqslant 255) \end{cases} \tag{8}$$

$$B' = \begin{cases} B - T_b & (T_b < 125) \\ 125 & (125 \leqslant T_b \leqslant 255) \end{cases} \tag{9}$$

将处理后的分量 R'、B' 与原图像中的分量 G 进行拼接，生成经过图像增强处理后新图像 RGB_new，图像增强后鸡体图像如图 6 所示。

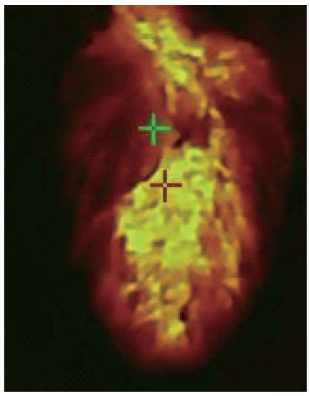


图 6　图强增强后的鸡体图像 RGB_new

Fig. 6　RGB_new of chicken body image after enhancement

将经图像增强处理后的蛋鸡背部热红外图像 RGB_new 转换到 Lab 颜色空间并提取分量 a，然后采用 Otsu 算法进行鸡体背部与低温环境的分割，初步获取鸡体轮廓二值图，要获得完整的鸡体背部轮廓，还需经过杂点去除、形态学运算、孔洞填充等操作，并结合凸包检测、孔洞填充操作获得完整的鸡体背部轮廓图像，目标鸡体分割结果如图 7 所示。

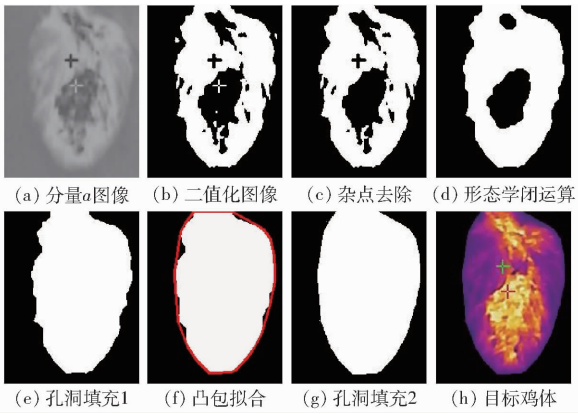


图 7　目标鸡体分割结果

Fig. 7　Segmentation results of target chicken body

1.2.2　羽毛覆盖完好区域提取

为了突出热红外图像中羽毛损伤与完好区域的灰度差异，选取 HSV 颜色空间模型[29] 中的分量 H 分割羽毛覆盖完好区域。HSV 颜色空间的颜色结构模型是一个锥体，如图 8 所示，H 表示色调，S 表示纯度，V 表示亮度。分量 R、G、B 与分量 H、S、V 的转换关系为

$$H=\begin{cases}0 & (R=G=B)\\ \theta & (B\leqslant G)\\ 2\pi-\theta & (B>G)\end{cases} \tag{10}$$

$$S=1-\frac{\min(R,G,B)}{\max(R,G,B)} \tag{11}$$

$$V=\frac{\max(R,G,B)}{255} \tag{12}$$

其中

$$\theta=\arccos\frac{R-G+R-B}{2\sqrt{(R+G)^2+(R-B)(G-B)}} \tag{13}$$

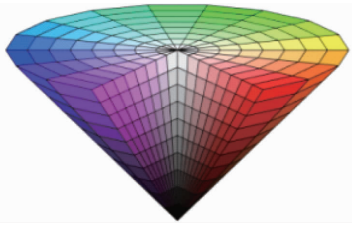


图 8　HSV 颜色空间结构示意图

Fig. 8　Schematic of HSV color space structure

将目标鸡体背部热红外图像转换到分量 H，采用 Otsu 算法进行羽毛覆盖完好区域的提取，获得目标鸡体背部羽毛覆盖完好区域二值图像；利用目标鸡体背部与羽毛覆盖完好区域的二值图像进行减运算，获得目标鸡体背部羽毛损伤区域二值图像。并以目标鸡体背部羽毛覆盖完好及损伤区域二值图像为掩膜，获得对应的热红外图像。羽毛覆盖完好及损伤区域分割结果如图 9 所示。

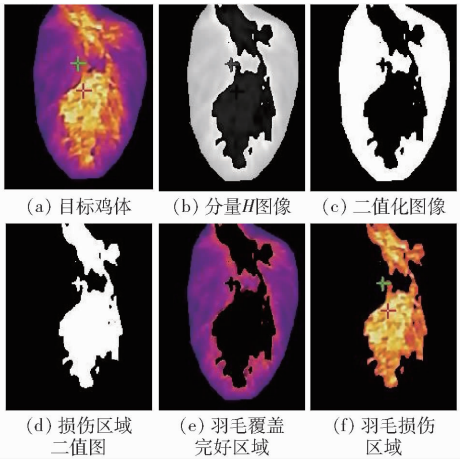


图 9　羽毛覆盖完好及损伤区域图像分割结果

Fig. 9　Image segmentation results of intact feather cover and damaged areas

采用 Otsu 双阈值分割算法对羽毛损伤区域进一步分割，将图像分割为背景、轻度损伤和重度损伤 3 部分，灰度级最低的一类为背景，灰度级最高的一类为重度损伤区。首先需要对蛋鸡羽毛损伤区域彩色图像进行灰度化处理，然后对蛋鸡羽毛损伤区域灰度图像进行双阈值分割，Otsu 双阈值分割算法理论[30] 与 1.2.1 节单阈值分割算法理论相同，双阈值类间方差计算表达式为

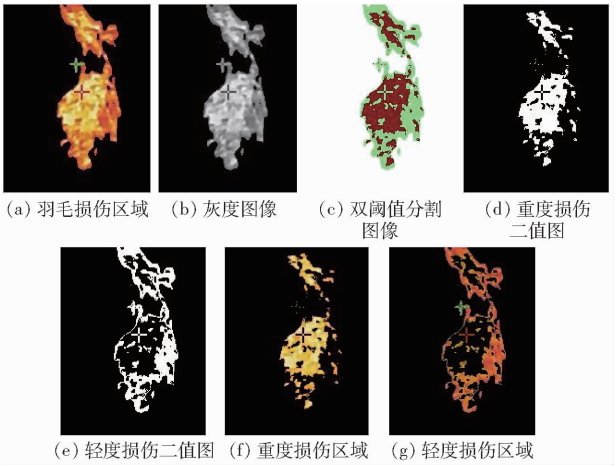
$$\sigma_B^2=w_0(\mu_0-\mu_G)^2+w_1(\mu_1-\mu_G)^2+w_2(\mu_2-\mu_G)^2 \tag{14}$$

式中　w_0、w_1、w_2——C_0、C_1、C_2类概率

μ_0、μ_1、μ_2——C_0、C_1、C_2类平均灰度

μ_G——全局平均灰度

蛋鸡羽毛轻度损伤和重度损伤分割结果如图 10 所示。首先设 C_0、C_1和 C_2分别表示背景、轻度损伤区和重度损伤区，分别是灰度级$[0,1,\cdots,t_1]$、$[t_1+1,t_1+2,\cdots,t_2]$和$[t_2+1,t_2+2,\cdots,L-1]$的像素，其中 t_1和 t_2为分割阈值，当 σ_B^2取得最大值时，t_1和 t_2 为最佳分割阈值。



(a) 羽毛损伤区域 (b) 灰度图像 (c) 双阈值分割图像 (d) 重度损伤二值图

(e) 轻度损伤二值图 (f) 重度损伤区域 (g) 轻度损伤区域

图 10 羽毛覆盖完好及损伤区域的二值图及热红外图像

Fig. 10 Binary images and thermal infrared images of intact and damaged areas of feather cover

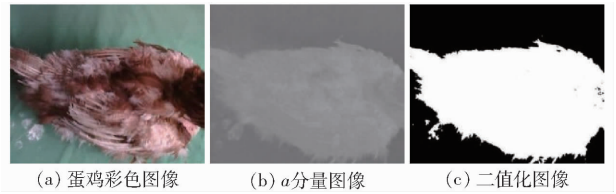
实验结果表明，自适应性图像增强的方法可以突出鸡体目标与背景的颜色差异，有利于目标鸡体的提取；基于热红外图像的目标鸡体、羽毛损伤区域及羽毛覆盖完好区域的分割流程合理有效。

1.3 蛋鸡彩色图像中目标鸡体及羽毛覆盖完好区域提取

由于热成像设备价格较高，因此现实生活中彩色图像的拍摄设备应用更为广泛，根据海兰褐蛋鸡全身羽毛呈红褐色的特点，通过 Otsu 算法结合颜色空间模型对鸡体及羽毛覆盖完好区域进行分割。

1.3.1 目标鸡体提取

为了准确地提取目标鸡体，将原始图像转换到 Lab 颜色空间提取 a 分量，采用 Otsu 算法对 a 分量图像进行二值化分割，目标鸡体初次分割结果如图 11 所示。

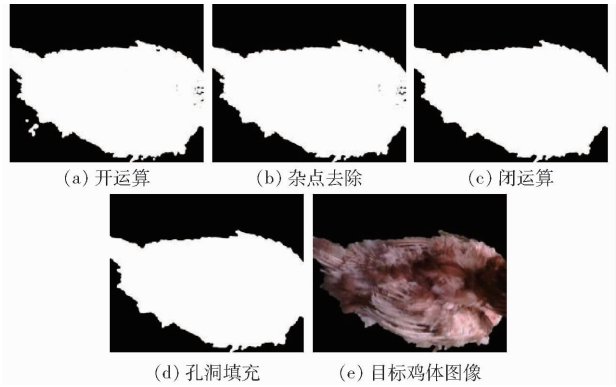


(a) 蛋鸡彩色图像 (b) a分量图像 (c) 二值化图像

图 11 目标鸡体的初次分割结果

Fig. 11 Initial segmentation results of target chicken body

初次提取的目标鸡体二值图一般存在噪声，如图 11c 鸡体外存在明显的干扰信息和孔洞，所以需要对初次分割得到的二值化图形进行二次处理。采用形态学开运算、杂点去除操作去除噪声，保证提取的目标鸡体较完整且无杂点残留；采用形态学闭运算、孔洞填充操作进行鸡体内孔洞的填充，二次处理结果如图 12a ~ 12d 所示。将经过形态学等操作处理后的目标鸡体二值图像作为掩膜，通过与运算去除彩色图像中的背景，提取目标鸡体的彩色图像，目标鸡体彩色图像如图 12e 所示。



(a) 开运算 (b) 杂点去除 (c) 闭运算

(d) 孔洞填充 (e) 目标鸡体图像

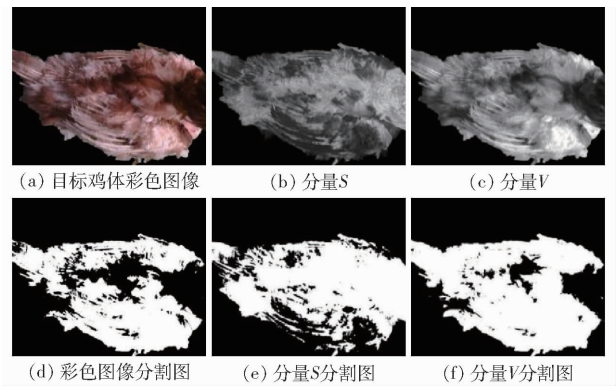
图 12 完整鸡体二值图像提取过程

Fig. 12 Extraction process of binary image of complete chicken body

结果表明，提取到的目标鸡体周围没有噪声，且鸡体完整，基于彩色图像的目标鸡体分割流程完整有效。

1.3.2 羽毛覆盖完好区域提取

海兰褐蛋鸡羽毛覆盖完好区域会被褐红色羽毛覆盖，而羽毛损伤区域会显现出白色的羽毛根部和浅粉色的皮肤，因此可以利用颜色特征提取羽毛覆盖完好区域及羽毛损伤区域。首先通过选取 RGB 颜色空间及 HSV 颜色空间的 S、V 分量进行羽毛覆盖完好区域颜色特征提取，然后采用 Otsu 算法进行羽毛损失区域的分割。目标鸡体彩色图像、S 分量、V 分量及其各自分割结果如图 13 所示。结果



(a) 目标鸡体彩色图像 (b) 分量S (c) 分量V

(d) 彩色图像分割图 (e) 分量S分割图 (f) 分量V分割图

图 13 目标鸡体彩色图像、分量 S、分量 V 及其各自分割结果

Fig. 13 Color image of target chicken body, S component, V component and their respective segmentation results

表明基于 S 通道的分割效果更接近于羽毛的实际情况，以 S 分量分割结果为掩膜提取羽毛覆盖完好区域彩色图像，羽毛覆盖完好区域彩色图像如图 14 所示。

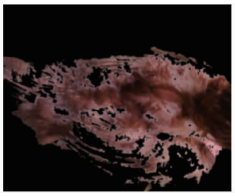


图 14　羽毛覆盖完好区域彩色图像

Fig. 14　Color image of intact feather cover

1.4　蛋鸡背部羽毛覆盖度计算

利用经过分割得到的目标鸡体及羽毛覆盖完好区域二值图进行羽毛覆盖度的计算。首先，统计目标鸡体和羽毛覆盖完好区域二值图像中像素总数；然后，以羽毛覆盖完好区域总像素数为分子，蛋鸡背部羽毛覆盖度计算式为

$$F_b = \frac{K_1}{K_2} \times 100\% \tag{15}$$

其中

$$K_1 = \mathrm{sum}(J_1(x,y) = 1) \tag{16}$$

$$K_2 = \mathrm{sum}(J_2(x,y) = 1) \tag{17}$$

式中　x、y——像素坐标

J_1——背部羽毛覆盖完好区域二值图

J_2——目标鸡体背部二值图

F_b——蛋鸡背部羽毛覆盖度，%

查阅文献[8]可知，热红外图像中蛋鸡背部羽毛覆盖度与全身羽毛覆盖度的相关系数为 0.94，则背部羽毛覆盖度与全身羽毛覆盖度的转换表达式为

$$F = 0.94F_b \tag{18}$$

式中　F——蛋鸡羽毛覆盖度，%

2　结果分析

2.1　图像分割结果

2.1.1　自适应性图像增强结果

选择了两种不同价格、不同配置的相机拍摄蛋鸡的热红外图像，测试自适应性图像增强算法的普适性。testo890 型红外热成像仪的配置及价格远高于海康 HM－TPH11－3AXF 型便携式测温热像仪，testo890 拍摄图像的清晰度、对比度等图像属性均高于海康 HM－TPH11－3AXF，testo890 型红外热成像仪的热红外图像增强效果及分割对比结果如图 15 所示，海康 HM－TPH11－3AXF 型便携式测温热像仪热红外图像增强效果及分割对比结果如图 16 所示。结果表明，本文提出的图像增强方法对两种型号相机拍摄的图像均有效，突出了鸡体区域的特征，该方法能较好地初步分割出鸡体区域，算法具有普适性。

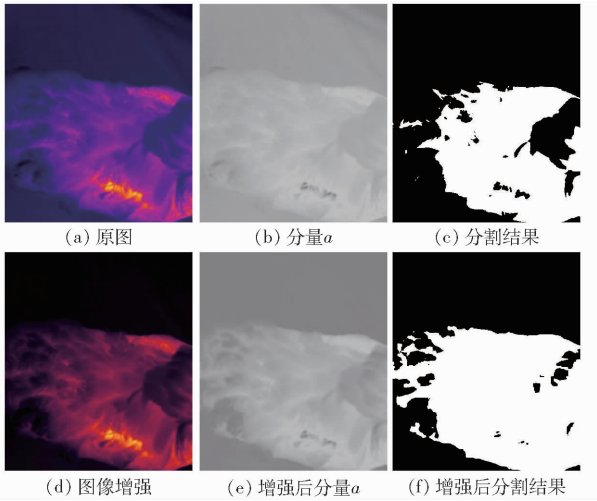


图 15　testo890 型红外热成像仪图像的增强及分割对比结果

Fig. 15　Image enhancement and segmentation comparison results of testo890 infrared thermal imager

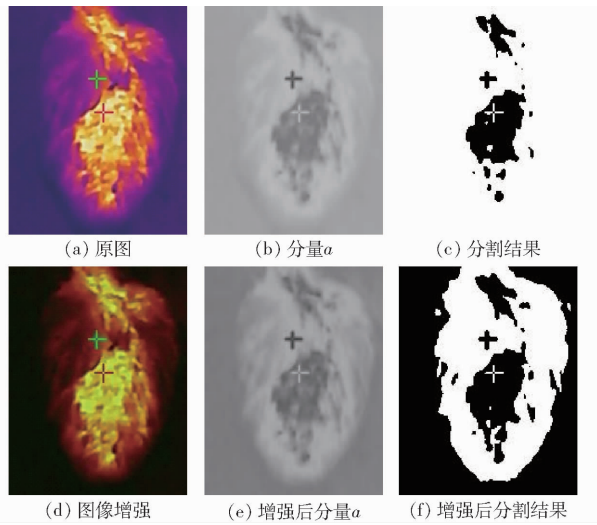


图 16　海康 HM－TPH11－3AXF 型便携式测温热像仪图像的增强及分割对比结果

Fig. 16　Image enhancement and segmentation comparison results of Hikvision HM－TPH11－3AXF portable thermal imager

2.1.2　鸡体及羽毛完好区域分割结果

通过 Matlab 2016a 平台进行目标鸡体及损伤羽毛分割仿真实验，通过手动阈值二值化分割蛋鸡彩色图像及热红外图像，灰度大于手动阈值的区域为视觉目标区域，区域内每个像素值设为 1；其他区域像素值设为 0。手动阈值分割计算公式为

$$Q(x,y) = \begin{cases} 1 & (I(x,y) > M_{th}) \\ 0 & (I(x,y) \leqslant M_{th}) \end{cases} \tag{19}$$

式中　$I(x,y)$——原始图像中第 x 行、第 y 列像素块的灰度

M_{th}——手动分割阈值

为了进一步客观评价本文分割方法是否有效，采用准确率、精准度、召回率和交并比 4 个指标进行定量评价。

基于彩色图像及热红外图像的目标鸡体、羽毛覆盖完好区域分割精度如表 1 所示，基于热红外图像的羽毛轻度、重度损伤区域分割精度如表 2 所示。基于热红外图像的目标鸡体分割准确率为 97.18%、羽毛覆盖完好区域分割准确率为 96.86%，基于彩色图像的目标鸡体分割准确率为 99.58%、羽毛覆盖完好区域分割准确率为 97.86%，基于热红外图像羽毛轻度、重度损伤区域的分割准确率分别为 97.55%、99.57%，实验结果表明，基于热红外图像的分割精度略低于彩色图像，但准确率、精准度、召回率和交并比均在 95% 以上，彩色图像及热红外图像均达到了分割标准。

表 1 蛋鸡背部羽毛覆盖度分割精度

Tab. 1 Segmentation accuracy of back feather coverage of laying hens %

类别	目标区域	准确率	精准度	召回率	交并比
热红外图像	鸡体	97.18	98.02	97.52	96.65
	羽毛覆盖完好区域	96.86	97.00	96.91	95.62
彩色图像	鸡体	99.58	98.27	98.75	97.35
	羽毛覆盖完好区域	97.86	97.32	97.79	96.98

表 2 蛋鸡热红外图像羽毛损伤区域分割精度

Tab. 2 Segmentation accuracy of feather damage in thermal infrared image of laying hens %

目标区域	准确率	精准度	召回率	交并比
轻度损伤	97.55	98.76	99.95	97.41
重度损伤	99.57	98.51	99.95	97.86

2.2 热红外图像与彩色图像羽毛覆盖度对比结果

由彩色图像及热红外图像计算出的蛋鸡羽毛覆盖度如表 3 所示。由表 3 可知，彩色图像羽毛覆盖度平均值为 76.68%，热红外图像羽毛覆盖度平均值为 87.74%。经对比发现，同一个蛋鸡样本的彩色图像羽毛覆盖度与红外图像羽毛覆盖度的最小差值为 2.01%，且二者最大差值为 30.29%，所有鸡只差值平均值为 11.07%，且所有样本中，蛋鸡的彩色图像羽毛覆盖度均小于热红外图像羽毛覆盖度。

通过对比图 17 中蛋鸡热红外图像及图 18 中彩色图像的分割结果，分析差异产生原因。研究发现基于彩色图像的鸡体羽毛分割，会误将蛋鸡修饰行为、剐蹭鸡笼行为导致白色羽毛根部显现的部分分割为损伤区域，导致羽毛覆盖度下降的问题产生，而热红外图像中相同区域的辐射值和羽毛覆盖度并未受影响，因此基于红外热图像的羽毛覆盖度计算效果更接近于蛋鸡的真实羽毛覆盖情况。

表 3 部分蛋鸡背部羽毛覆盖度计算结果对比

Tab. 3 Comparison of calculation results of back feather coverage of some laying hens %

类别	样本编号																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
彩色图像	55.98	60.42	71.79	81.76	79.17	42.11	62.47	62.25	69.50	66.35	91.81	88.90	89.18	91.90	87.50	88.35	89.58	85.91	80.65	87.92
热红外图像	85.52	85.94	83.86	84.06	88.63	72.40	82.32	80.14	83.50	81.95	93.87	92.12	93.82	93.91	92.23	92.89	93.12	91.25	90.59	92.76

2.3 羽毛覆盖度分级

为了突出羽毛缺失的程度，对羽毛覆盖度数据进行分级处理。文献[7]提出的 4 分制评分方法中，1 分表示鸡体羽毛严重受损，仅存在小部分或没有羽毛覆盖鸡体，羽毛覆盖度为 3.7% ~27.2%；2 分表示羽毛损伤明显或皮肤大面积裸露，羽毛覆盖度为 33.4% ~70.7%；3 分表示羽毛出现损伤，但几乎能够完全覆盖鸡体，羽毛覆盖度为 55.67% ~90.4%；4 分表示没有或很少的羽毛出现损伤，羽毛覆盖度为 96.6% ~99.3%。文献[8]提出了手动分割温度阈值估算羽毛覆盖度的方法 IRT，使用 IRT 得到的羽毛完好区域的面积与 4 分制评分相关性显著（$P<0.01$），其中背部羽毛覆盖度与整体得分的相关系数为 0.94。

经过实验统计发现，多数蛋鸡羽毛覆盖度处于 70% ~90% 之间，而 4 分制评分方法将 55.67% ~90.4% 划分为一级，每分代表的范围过大，分级较粗糙。针对这一问题，本文在 4 分制评分的基础上提出了 A、B、C、D 四级评分方法，其中 A 级羽毛覆盖度为 70% ~82%，B 级为 82% ~85%，C 级为 85% ~90%，D 级为 90% ~94%。

3 羽毛覆盖度与体表温度关系研究

羽毛的缺失会导致鸡体热量散失速度加快[31]，影响蛋鸡的健康，为了研究羽毛覆盖度对体表温度的影响，摒弃其他外界环境干扰因素，本实验利用同等饲养条件下、羽毛覆盖完好的蛋鸡作为对照组，采集不同羽毛覆盖度的蛋鸡体表温度，分析羽毛覆盖度和鸡体体表温度的关系。

3.1 体表温度获取与分析

通过 Otsu 算法分割得到的目标区域二值化图像和温度矩阵得到目标区域平均温度，平均温度计

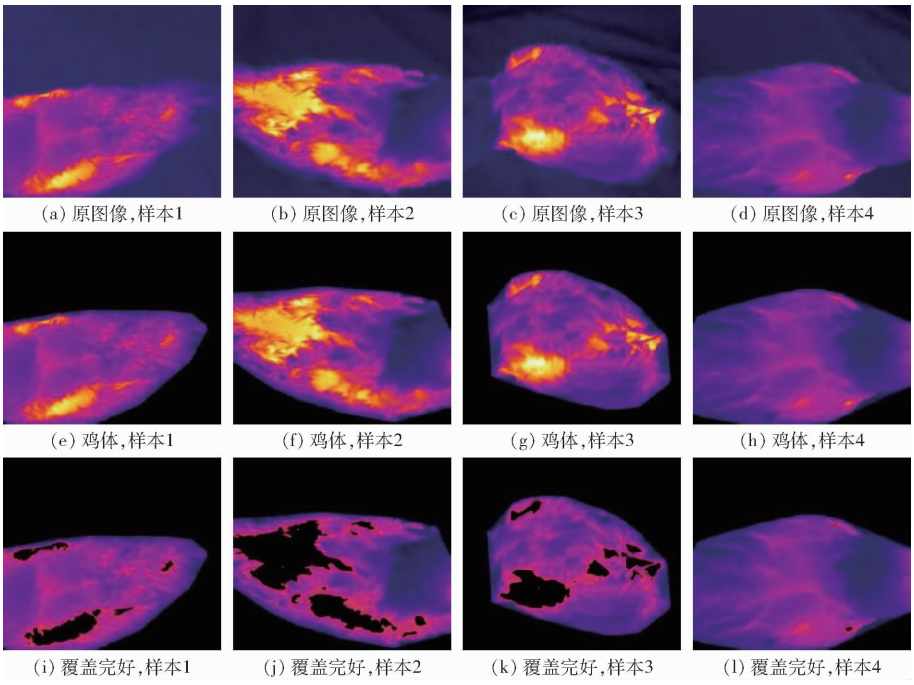


图 17　热红外图像分割效果

Fig. 17　Segmentation effects of thermal infrared images of laying hens

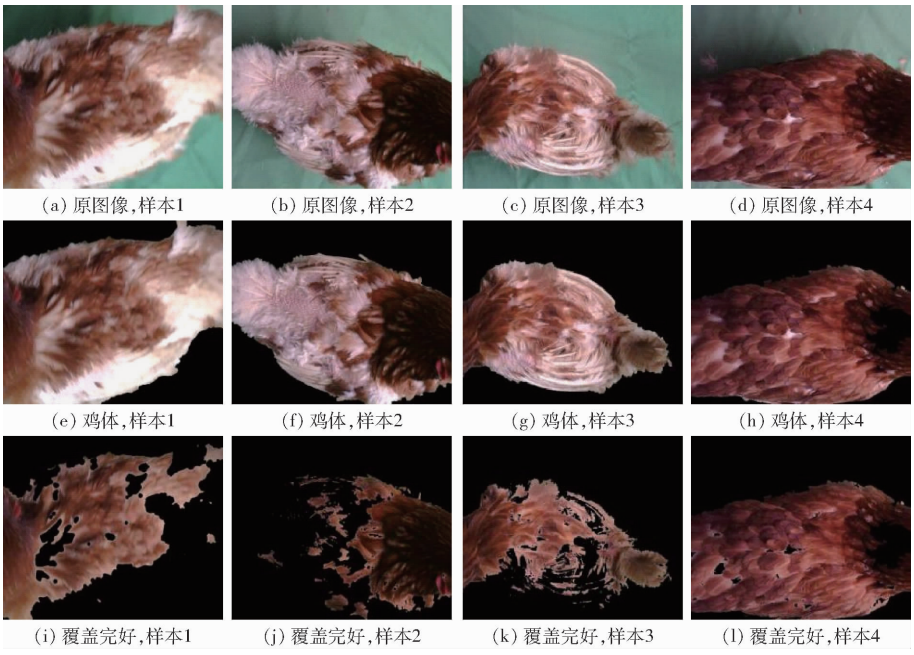


图 18　蛋鸡彩色图像分割效果

Fig. 18　Segmentation effects of color images of laying hens

算式为

$$T_{ave}=\frac{\mathrm{sum}((\boldsymbol{X}_{temp}\odot\boldsymbol{A})_{xy})}{\mathrm{sum}(\boldsymbol{A})} \tag{20}$$

式中　$\boldsymbol{X}_{temp}$——红外热成像仪采集的温度矩阵

$\boldsymbol{A}$——目标区域二值矩阵

下角标 x、y 表示矩阵中点的位置。

本实验共采集 5 类数据，包括蛋鸡羽毛覆盖度及背部、羽毛覆盖完好区域、羽毛损伤区域、羽毛严重损伤区域的温度平均值，蛋鸡羽毛覆盖度及各区域的温度平均值折线图如图 19 所示。蛋鸡背部、羽毛覆盖完好区域、羽毛损伤区域、羽毛严重损伤区域的温度平均值均随着羽毛覆盖度的变化出现明显波动，温度较高的鸡只羽毛覆盖度较低，且同一个样本中羽毛严重损伤区域温度最高，羽毛覆盖完好区域温度最低。

将所有数据依据羽毛覆盖度人工分为两组，组 1 中蛋鸡羽毛存在明显损伤，组 2 中蛋鸡羽毛较完整，表 4 以平均值 ± 标准差的形式表示羽毛覆盖度对各区域体表温度的影响。组 1 中各区域平均温度比组 2 高 1 ~ 5℃，且组 1 各区域温度标准差明

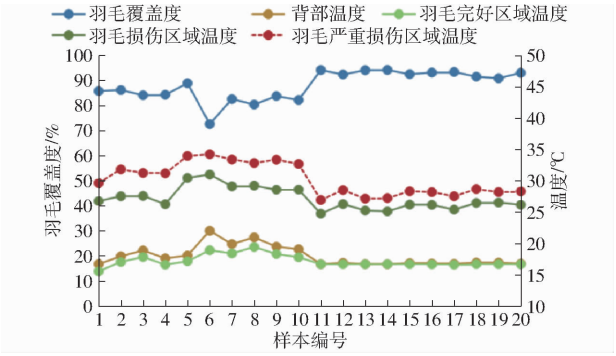


图 19 部分蛋鸡羽毛覆盖度和各区域温度平均值

Fig. 19 Average value of feather coverage and temperature in different areas of some laying hens

显比组 2 高 0.7 ~ 2.9℃,说明鸡体羽毛覆盖度对体表温度造成了一定的影响。

为了探究蛋鸡羽毛覆盖度与体表温度的相关性,分析了羽毛覆盖度与背部、羽毛覆盖完好、羽毛损伤及羽毛严重损伤区域体表温度的相关性及相关系数,如表 5 所示。蛋鸡羽毛覆盖度与背部、羽毛覆盖完好、羽毛损伤及羽毛严重损伤区域体表温度呈极显著负相关($P < 0.01$),其中羽毛严重损伤区域体表温度与羽毛覆盖度相关性最高,背部、羽毛覆盖完好、羽毛损伤、羽毛严重损伤区域体表温度之间呈极显著正相关($P < 0.01$)。

表 4 羽毛覆盖度对各区域体表温度的影响

Tab. 4 Effect of feather coverage on body surface temperature in each region

组别	羽毛覆盖度/%	背部区域温度/℃	羽毛完好区域温度/℃	羽毛损伤区域温度/℃	羽毛严重损伤区域温度/℃
组 1	82.19 ± 4.08	19.12 ± 1.66	17.71 ± 1.20	28.22 ± 1.44	32.18 ± 1.41
组 2	92.70 ± 1.18	16.74 ± 0.10	16.63 ± 0.03	25.72 ± 0.66	27.78 ± 0.65

表 5 蛋鸡羽毛覆盖度与各区域体表温度相关系数

Tab. 5 Correlation analysis between feather coverage and body surface temperature of layers

	羽毛覆盖度	背部区域温度	羽毛完好区域温度	羽毛损伤区域温度	羽毛严重损伤区域温度
羽毛覆盖度	1	-0.920 **	-0.745 **	-0.937 **	-0.941 **
背部区域温度	-0.920 **	1	0.940 **	0.947 **	0.902 **
羽毛完好区域温度	-0.745 **	0.940 **	1	0.837 **	0.787 **
羽毛损伤区域温度	-0.937 **	0.947 **	0.837 **	1	0.939 **
羽毛严重损伤区域温度	-0.941 **	0.902 **	0.787 **	0.939 **	1

注:** 表示差异性显著($P < 0.01$)。

3.2 羽毛覆盖度对体表温度的影响

鸡体的羽毛覆盖度对体表温度影响显著,根据 3.1 节的相关性分析发现羽毛覆盖度与背部、羽毛损伤及羽毛严重损伤区域体表温度的相关系数均在 0.9 以上。根据 2.3 节中羽毛覆盖分级方法,对羽毛覆盖度不同的实验蛋鸡分级处理,通过各级别间的体表温度差值,分析相同外界环境下羽毛覆盖对体表温度的影响。

表 6 为背部、羽毛损伤、羽毛严重损伤区域在各分级中的体表温度平均值,各区域体表温度随着分级级别的上升而逐渐降低,在 A ~ D 每个分级中,背部与羽毛严重损伤区域的平均温度差值分别为 12.54、13.3、13.47、11.07℃,相同分级、不同区域的体表温度对比结果表明,羽毛严重损伤区域比背部区域平均温度均高 10℃以上。背部、羽毛损伤及羽毛严重损伤区域在各级别中的体表温度均值差值,所有数据都在 0℃以上。在 3 类区域中,级别 A 与 D 的体表温度均值差值都在 3.8℃以上,其中羽毛严重损伤区域的级别 A 与 D 体表温度均值差值最大,达到 5.36℃。相同区域、不同分级的蛋鸡体表温度对比结果表明,相同区域、相邻级别的蛋鸡体,体表温度差值较小,随着间隔级别的增加,体表温度的差值增大,且羽毛覆盖级别高的蛋鸡体表温度均小于级别低的蛋鸡体表温度。

表 6 各级别中蛋鸡体表温度平均值

Tab. 6 Average body surface temperature of laying hens in each level ℃

分级	背部区域	羽毛损伤区域	羽毛严重损伤区域
A	20.62	29.52	33.16
B	18.92	27.81	32.22
C	17.36	27.74	30.83
D	16.73	25.68	27.80

综上所述,不同羽毛覆盖级别间的蛋鸡背部体表温度最大差值为 3.89℃,不同羽毛覆盖级别间的蛋鸡羽毛损伤区域体表温度最大差值为 5.36℃,相同羽毛覆盖级别间的背部与蛋鸡羽毛损伤区域体表温度的最大差值为 13.47℃。

4 结论

(1)以蛋鸡为研究对象,设计了一种基于图像处理分割鸡体及羽毛覆盖完好区域的方法。针对热红外图像中鸡体边界模糊的问题,提出了一种自适应性

图像增强算法。实验结果表明，利用热红外图像分割鸡体及羽毛覆盖完好区域的分割准确率为 97.18% 和 96.86%，平均准确率为 97.02%，利用彩色图像分割鸡体及羽毛覆盖完好区域准确率为 99.58% 和 97.86%，平均准确率为 98.72%，分割准确率均在 95% 以上，能够满足蛋鸡羽毛覆盖度的计算要求。提出的自适应性图像增强方法，突出了前景与背景的差异性，可应用于前景与背景的分割研究。

（2）通过分析发现，蛋鸡剐蹭鸡笼、修饰等行为会造成白色羽毛根部露出，在彩色图像中，由于图像颜色受羽色的影响，因而白色羽毛根部露出的部位会被错误地认定为羽毛损伤区域，而热红外图像则不受羽色的影响，白色羽毛根部露出部位的热辐射值无明显升高，因而两种图像计算出的羽毛覆盖度有较大差异，热红外图像更适用于客观评定蛋鸡羽毛覆盖度。

（3）利用热红外图像，通过面积比值计算羽毛覆盖度，对羽毛覆盖度与背部各区域体表温度进行了相关性分析，羽毛覆盖度与各区域体表温度呈极显著负相关（$P<0.01$），除羽毛完好区域外，羽毛覆盖度与各区域体表温度相关系数均大于 0.9。依据羽毛覆盖度计算结果对蛋鸡进行分级，并分析了各级蛋鸡体表温度差异，结果表明，相同区域、不同级别的蛋鸡体表温度最大差值达到 3℃ 以上，相同级别的蛋鸡羽毛严重损伤区域均比背部平均体表温度高 10℃ 以上。

参 考 文 献

[1] 仝宗喜，卞建春. 笼养蛋鸡被毛损失的原因及其对生产性能的影响[J]. 中国家禽，2005，27(12)：22－24.

[2] IQBAL Z，DRAKE K，SWICK R，et al. Effect of pecking stones and age on feather cover，hen mortality，and performance in free-range laying hens[J]. Poultry Science，2020，99(5)：2307－2314.

[3] 司兴奎，陈建红，张济培，等. 家禽羽毛异常的原因及防制措施[J]. 中国家禽，2006，28(22)：51－53.

[4] 王强，童海兵. 蛋鸡养殖福利的影响因素与评价方法研究进展[J]. 中国家禽，2018，40(10)：40－45.

[5] 李俊营，詹凯，张程杰，等. 羽毛损伤和饲养密度对产蛋后期蛋鸡生产性能和行为的影响[C]//中国畜牧兽医学会. 2018 年学术年会禽病学分会第十九次学术研讨会论文集，2018：334.

[6] 刘萌，刘雪露，曾丹，等. 产蛋后期蛋种鸡羽毛损伤度与生产性能，血液生化指标相关性研究[J]. 中国家禽，2021，43(3)：53.

[7] TAUSON R，AMBROSEN T，ELWINGER K. Evaluation of procedures for scoring the integument of laying hens—independent scoring of plumage condition[J]. Acta Agriculturae Scandinavica，1984，34(3)：400－408.

[8] ZHAO Y，XIN H，DONG B. Use of infrared thermography to assess laying-hen feather coverage[J]. Poultry Science，2013，92(2)：295－302.

[9] PICHOVÁ K，BILČÍK B. Assessment of the effect of housing on feather damage in laying hens using IR thermography[J]. Animal，2017，11(4)：661－669.

[10] 王海娟，胡振琪，夏清，等. 距离和湿度对煤矸石山表面温度探测的影响研究[J]. 红外技术，2015，37(7)：618－623.
WANG Haijuan，HU Zhenqi，XIA Qing，et al. Research on measuring distance and humidity effects on thermal infrared temperature measurement precision of temperature field of waste piles[J]. Infrared Technology，2015，37(7)：618－623.（in Chinese）

[11] 杜玉玺，胡振琪，葛运航，等. 距离对不同强度热源红外测温影响及补偿[J]. 红外技术，2019，41(10)：976－981.
DU Yuxi，HU Zhenqi，GE Yunhang，et al. Distance influence and compensation of infrared temperature measurement with different intensity heat sources[J]. Infrared Technology，2019，41(10)：976－981.（in Chinese）

[12] 劳凤丹，滕光辉，李卓，等. 复杂环境中蛋鸡识别及粘连分离方法研究[J]. 农业机械学报，2013，44(4)：213－216，227.
LAO Fengdan，TENG Guanghui，LI Zhuo，et al. Recognition and conglutination separation of individual hens based on machine vision in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(4)：213－216，227.（in Chinese）

[13] 毕敏娜，张铁民，庄晓霖，等. 基于鸡头特征的病鸡识别方法研究[J]. 农业机械学报，2018，49(1)：51－57.
BI Minna，ZHANG Tiemin，ZHUANG Xiaolin，et al. Recognition method of sick yellow feather chicken based on head features[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：51－57.（in Chinese）

[14] 周丽萍，陈志，陈达，等. 基于改进 Otsu 算法的生猪热红外图像耳根特征区域检测[J]. 农业机械学报，2016，47(4)：228－232，14.
ZHOU Liping，CHEN Zhi，CHEN Da，et al. Pig ear root detection based on adapted Otsu[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(4)：228－232，14.（in Chinese）

[15] PRASETYO E，ADITYO R D，SUCIAT N，et al. Mango leaf image segmentation on HSV and YCbCr color spaces using Otsu thresholding[C]//2017 3rd International Conference on Science and Technology-Computer（ICST）. IEEE，2017：99－103.

[16] FU L，DUAN J，ZOU X，et al. Banana detection based on color and texture features in the natural environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2019，167：105057.

[17] RIEHLE D，REISER D，GRIEPENTORG H W. Robust index-based semantic plant/background segmentation for RGB-images[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2020，169：105201.

[18] DUTTA K，TALUKDAR D，BORA S S. Segmentation of unhealthy leaves in cruciferous crops for early disease detection using vegetative indices and Otsu thresholding of aerial images[J]. Measurement，2022，189：110478.

（下转第 276 页）

[16] YIN Y, TU D, SHEN W, et al. Recognition of sick pig cough sounds based on convolutional neural network in field situations [J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 8(3): 369 - 379.
[17] 李江丽,田建艳,张苏楠. 生猪咳嗽声识别与定位方法的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(14): 36 - 41.
LI Jiangli, TIAN Jianyan, ZHANG Su'nan. Research on recognition and localization of porcine cough sounds[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020(14): 36 - 41. (in Chinese)
[18] EXADAKTYLOS V, SILVA M, AERTS J M, et al. Real-time recognition of sick pig cough sounds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 207 - 214.
[19] 杨磊,赵红东. 基于轻量级深度神经网络的环境声音识别[J]. 计算机应用, 2020, 40(11): 3172 - 3177.
YANG Lei, ZHAO Hongdong. Environment sound recognition based on lightweight deep neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(11): 3172 - 3177. (in Chinese)
[20] 苍岩,罗顺元,乔玉龙. 基于深层神经网络的猪声音分类[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 195 - 204.
CANG Yan, LUO Shunyuan, QIAO Yulong. Classification of pig sounds based on deep neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 195 - 204. (in Chinese)
[21] 杜晓冬,滕光辉. 蛋鸡声音信号去噪方法对比分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 327 - 333.
DU Xiaodong, TENG Guanghui. Improved denoising method of laying hens' vocalization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 327 - 333. (in Chinese)
[22] KERSTA L G. Voiceprint identification[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(5): 725.
[23] Librosa development team. Librosa 0.8.1[EB/OL]. [2021 - 09 - 02]. http://librosa.org/doc/latest/index.html.
[24] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W, BUCK J R. Discrete-time signal processing[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
[25] FAVARO L, GAMBA M, GILI C, et al. Acoustic correlates of body size and individual identity in banded penguins[J]. PLOS ONE, 2017, 12(2): e170001.
[26] WANG K, WU P, CUI H, et al. Identification and classification for sheep foraging behavior based on acoustic signal and deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106275.

(上接第 251 页)

[19] LI H, LI Z, DONG W, et al. An automatic approach for detecting seedlings per hill of machine-transplanted hybrid rice utilizing machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106178.
[20] INDRA D, HASANUDDIN T, SATRA R, et al. Eggs detection using Otsu thresholding method[C]//2018 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT). IEEE, 2018: 10 - 13.
[21] FAN Y, CHEN Y, CHEN X, et al. Estimating the aquatic-plant area on a pond surface using a hue-saturation-component combination and an improved Otsu method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106372.
[22] SOUZA-JUNIOR J B F, El-SABROUT K, DE ARRUDA A M V, et al. Estimating sensible heat loss in laying hens through thermal imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105038.
[23] 沈明霞, 陆鹏宇, 刘龙申, 等. 基于红外热成像的白羽肉鸡体温检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 222 - 229.
SHEN Mingxia, LU Pengyu, LIU Longshen, et al. Body temperature detection method of ross broiler based on infrared thermography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 222 - 229. (in Chinese)
[24] 许志强, 沈明霞, 刘龙申, 等. 基于红外热图像的肉鸡腿部异常检测方法[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 384 - 393.
XU Zhiqiang, SHEN Mingxia, LIU Longshen, et al. Abnormal recognition method of broiler leg based on infrared thermal image[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(2): 384 - 393. (in Chinese)
[25] 刘修林, 王福杰, 刘烨红, 等. 病理与健康蛋鸡体表温度的对比研究[J]. 中国家禽, 2017, 39(2): 53 - 56.
[26] NÄÄS I A, ROMANINI C E B, NEVES D P, et al. Broiler surface temperature distribution of 42 day old chickens[J]. Scientia Agricola, 2010, 67: 497 - 502.
[27] COOK N J, SMYKOT A B, HOLM D E, et al. Assessing feather cover of laying hens by infrared thermography[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2006, 15(2): 274 - 279.
[28] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 - 66.
[29] 鄢黎. 基于 HSV 变换模型的静态口型识别算法的研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
YAN Li. The research of static lip recognition based on HSV transformation[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
[30] 龚立雄. 基于 Com Ⅵ和双阈值 OTSU 算法的农作物图像识别[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 363 - 368.
GONG Lixiong. Crop image recognition based on Com Ⅵ and double threshold OTSU algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 363 - 368. (in Chinese)
[31] LOYAU T, ZERJAL T, RODENBURG T B, et al. Heritability of body surface temperature in hens estimated by infrared thermography at normal or hot temperatures and genetic correlations with egg and feather quality[J]. Animal, 2016, 10(10): 1594 - 1601.