

基于热红外视频的生猪耳根温度检测方法

冯彦坤^{1,2} 康熙^{1,2} 王彦超^{1,2} 李孟飞^{1,2} 刘刚^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 基于热红外视频的生猪体温实时检测过程中,针对生猪头部姿态多变不能准确检测耳根温度的问题,提出了一种生猪耳根温度精准检测方法。首先,根据生猪头部运动轨迹数据,对饲喂栏通道进行最佳耳根测温区域划分;然后,提出了一种位置偏移算法,检测最佳耳根测温区域中的头部姿态端正帧(Head posture correct frame,HPCF);最后,构建了基于YOLO v4的生猪头部和耳根检测模型,对生猪头部和耳根区域进行精准定位,实现了HPCF的自动检测,分别提取HPCF的左、右耳根检测框内的最高温度作为各自的耳根温度。试验结果表明,基于YOLO v4模型的平均检测精度(mAP)达到93.15%,头部和耳根定位精准;HPCF检测准确率为91.33%;将算法提取的耳根温度和手动提取的耳根温度进行比较,分析结果表明,对于测试的HPCF中的左右耳根温度,误差在0.3℃以内的测试图像分别占97%和98%。上述研究结果可为生猪体温异常实时监测与预警提供技术手段。

关键词: 热红外视频; 生猪; 耳根温度; 目标检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)S0-0284-07

Detecting Method of Surface Temperature of Pig Ear Root
Based on Thermal Infrared Video

FENG Yankun^{1,2} KANG Xi^{1,2} WANG Yanchao^{1,2} LI Mengfei^{1,2} LIU Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of real-time detection of pig body temperature based on thermal infrared video, a method for accurately detecting the ear root temperature of pigs was proposed to solve the problem that the head posture of pigs cannot accurately detect the ear root temperature. Firstly, according to the pig head movement trajectory data, the feeding pen channel was divided into the best ear root temperature measurement area; then, a position offset algorithm was proposed to detect the head posture correction frame in the best ear root temperature measurement area (head posture correct frame, HPCF). Finally, a pig head and ear root detection model based on YOLO v4 was constructed, and the pig head and ear root area were accurately positioned to realize the automatic detection of HPCF, and extract the left and right ear root detection of HPCF respectively. The highest temperature in the frame was taken as the root temperature of each ear. The test results showed that the average detection accuracy (mAP) based on the YOLO v4 model reached 93.15%, and the head and ear roots were positioned accurately; the HPCF detection accuracy rate were 91.33%; the ear root temperature extracted by the algorithm and the manually extracted ear root temperature were compared, and the results were analyzed. It showed that for the temperature of the left and right ear roots in the tested HPCF images, the errors of 97% and 98% of the test images were within 0.3℃. The above research results can provide technical means for real-time monitoring and early warning of abnormal body temperature of pigs.

Key words: thermal infrared video; pig; ear root temperature; target detection

收稿日期: 2021-07-14 修回日期: 2021-09-02
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)
作者简介: 冯彦坤(1994—),男,硕士生,主要从事农业健康养殖智能信息技术研究,E-mail: fyk_2018@163.com
通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术农业应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

0 引言

随着畜禽精细养殖业的转型升级,智能化、设施化养殖已成为生猪养殖行业的最新发展趋势^[1-3]。生猪养殖业需要准确、实时地获取生猪个体生理数据,用来反映生猪的健康状况。体温作为生猪的一项重要生理指标^[4],对生猪疾病早期诊断具有较大的帮助^[5],因此开展生猪体温自动、准确检测具有重要意义^[6]。

生猪体温检测的传统方法是利用人工检测生猪的直肠温度^[7],这种方法不仅效率低,而且容易造成生猪应激反应和疾病传染^[8]。近年来,热红外技术作为一种非接触式体表温度测量方法,已经被广泛用于动物行为分析^[9]、疾病检测^[10]以及畜舍温度调控^[11-12]等研究领域。众多利用热红外技术获取生猪体表温度的研究中,多采用手动标记方式获取感兴趣区域(Region of interest, ROI)温度^[13],该方法自动化水平较低,耗费时间长^[14-17]。有些学者采用热红外技术结合图像处理的方法,自动提取生猪 ROI 温度^[18-19],建立了利用生猪特定部位的体表温度估算直肠温度的模型^[20],表明生猪耳根温度与直肠温度之间相关性较高^[21]。因此,利用热红外技术自动获取耳根温度成为当前研究的热点。

目前,生猪耳根检测研究对象多为固定视角的热红外图像,而很少以生猪热红外视频为研究对象。利用手持式红外热像仪获取生猪热图像数据,费时费力,且不能满足在线检测的需求^[22]。利用在线式热像仪对生猪进行监测,可以实现生猪体表温度的自动提取。但是,监测视频中的生猪头部姿态多变,而多变的生猪头部姿态会影响耳根区域的定位。饲喂栏通道中的生猪在行走过程中,头部位置和姿态都会发生相应的变化,并且头部的姿态变化还时常引起耳根遮挡,不能准确定位耳根,导致测得的温度 and 实际温度误差较大。因此,需要找到饲喂栏通道中生猪头部姿态端正且耳根没有遮挡的图像帧,进而得到准确的耳根温度,减小测温误差。

针对以上问题,本文以俯视图下的饲喂栏通道中生猪热红外视频为研究对象,提出一种生猪耳根温度精准检测方法,实现生猪体温自动化精准检测,用于生猪体温异常监测和预警。

1 材料和方法

1.1 试验数据采集

试验数据采集于北京天鹏兴旺养殖场的群养猪舍,采集对象为自然穿过饲喂栏通道的约克夏猪,拍摄时间为 2019 年 10—11 月。采集示意图如图 1 所

示,生猪进食前,需要依次通过饲喂栏通道进入采食区,在饲喂栏通道出口处安装 RFID(射频识别器),用于确定视频中生猪身份。FLIR - A615 型红外热像仪安装在饲喂栏通道中心的上方,热像仪镜头距离饲喂栏 1.5 m,以确保可以通过热像仪拍摄生猪的头部和耳根,热像仪通过以太网与计算机通信。由于热像仪测温本身存在固有误差,故将黑体腔放置在饲喂栏通道的一侧,用于热像仪校准,校正后的热像仪测量精度在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 内,可用于生猪体表温度获取。使用 HOBO U14 - 001 型智能温湿度记录仪,记录热像仪安装处的环境温度和相对湿度,调整热像仪的发射率、相对温湿度和镜头到物体的距离等参数。热像仪的发射率设定为 0.97,与研究人员对生猪耳根温度的研究一致^[23-24]。当系统输出数据稳定后,对 51 头约克夏猪进行热红外视频采集,采集的视频以 SEQ 格式存储于计算机硬盘中,视频分辨率为 640 像素 $\times$ 480 像素,帧率为 6.5 f/s。

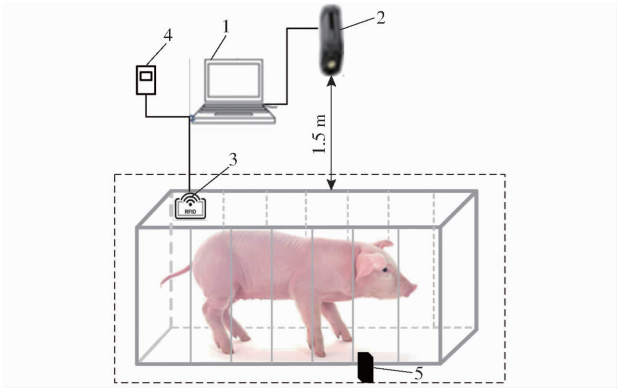


图 1 生猪视频采集示意图

Fig.1 Sketch of live pig video collection

1. 计算机 2. FLIR - A615 型热像仪 3. RFID 采集器 4. HOBO U14 - 001 型智能温湿度记录仪 5. 黑体腔

1.2 生猪耳根温度检测方法

1.2.1 最佳耳根测温区域划分

通过对生猪行走的长期观察与生猪进出饲喂栏通道时头部姿态的分析,生猪进入饲喂栏通道时,头部行进方向常偏离饲喂栏通道中线方向,头部姿态歪斜,如图 2a 所示。在饲喂栏通道行走过程中,头部姿态相对端正,易定位耳根,如图 2b 所示。在等待饲喂栏通道出口门打开期间,头部在饲喂栏通道中线两侧左右晃动,姿态多变,易导致耳根遮挡,耳根出现遮挡时头部呈现的 3 种姿态,如图 2c ~ 2e 所示。

因此,本文提出一种最佳耳根测温区域划分算法,根据生猪头部运动轨迹,对饲喂栏通道区域进行划分,筛选出头部姿态相对端正、耳根部位明显的饲喂栏通道区域。

将热红外视频分成 JPG 格式的图像,手动标记

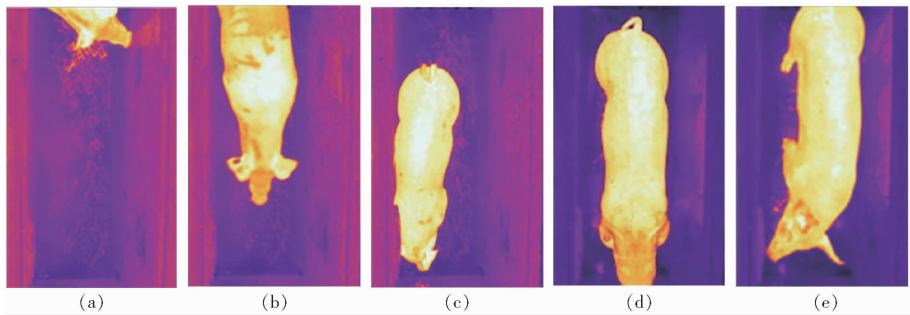


图 2 饲喂栏通道内不同区域的头部姿态

Fig.2 Head postures in different areas of feeding tunnel

图像中生猪头部位置。在图像中建立二维空间坐标系,根据生猪头部位置坐标,获取头部运动轨迹,如图 3 所示,其中红色虚线代表饲喂栏通道的中线,绿色和橙色虚线为饲喂栏通道的 2 条四等分线,设定饲喂栏通道的宽度为 W ,长度为 H 。

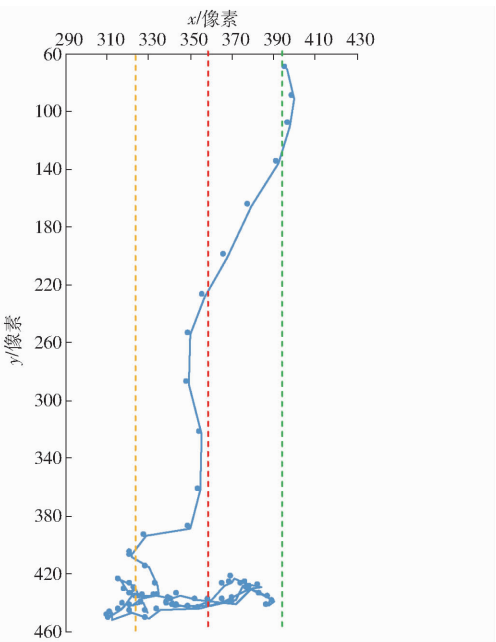


图 3 生猪头部运动轨迹

Fig.3 Pig head movement trajectory

分析生猪头部运动轨迹数据,发现在生猪头部进入饲喂栏通道时,前几帧图像中生猪头部到饲喂栏通道中线的距离 Δd_j 较大,头部运动轨迹偏移饲喂栏通道中线方向程度较大,头部姿态歪斜,不易定位耳根。生猪头部在进入饲喂栏通道和通道中行走阶段,相邻两帧图像中生猪头部纵坐标差值 Δy_i 较大,而生猪头部在等待饲喂栏通道门打开期间的 Δy_i 较小,即生猪行走的速度相对变慢,头部开始出现在饲喂栏通道中线两侧来回晃动的现象,姿态多变,易导致耳根遮挡。本文根据这一特性,对饲喂栏通道进行划分,即设定头部姿态相对端正、耳根部位明显的饲喂栏通道区域为最佳耳根测温区域。

以生猪行走方向为正方向,最佳耳根测温区域的下边界可以利用 Δd_j 进行计算。下边界纵坐标计

算公式为

$$\begin{cases} y_{A_down} = \min(y_j | y_j \leq y_{T_down}) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \Delta d_j = x_j - x_Q \\ \Delta d_j > \Delta d_{T_max} \\ \Delta d_{j+1} \leq \Delta d_{T_max} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_j ——视频中第 j 帧图像中生猪头部横坐标,
 j 的取值范围为 $1 \sim n$
 x_Q ——饲喂栏通道中线横坐标
 Δd_{T_max} ——头部与饲喂栏通道中线距离阈值
 y_{A_down} ——最佳耳根测温区域下边界纵坐标
 y_{T_down} ——最佳耳根测温区域下边界划分
阈值

最佳耳根测温区域的上边界可以利用 Δy_i 进行计算, Δy_i 满足以下条件可以获取上边界的纵坐标。上边界纵坐标计算公式为

$$\begin{cases} y_{A_up} = \min(y_i | y_i \geq y_{T_up}) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \Delta y_i = y_{i+1} - y_i \\ \Delta y_{avi} = \frac{\sum \Delta y_i}{n - 1} \\ \Delta y_i \leq \Delta y_{avi} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中 y_i ——视频中第 i 帧图像中生猪头部纵坐标,
 i 的取值为 $1 \sim n - 1$

y_{A_up} ——最佳耳根测温区域上边界纵坐标
 y_{T_up} ——最佳耳根测温区域上边界划分阈值
 Δy_{avi} ——头部纵坐标差值的平均值
 n ——视频中图像的帧数

从样本库中随机选取 30 头生猪的热红外视频进行统计分析,当 Δd_{T_max} 取 $W/4$ 、 y_{T_down} 取 $H/4$ 、 y_{T_up} 取 $5H/6$ 时,能够计算出 y_{A_down} 和 y_{A_up} 的值,即可得到最佳耳根测温区域。本文将整个饲喂栏通道划分为区域Ⅰ、区域Ⅱ和区域Ⅲ共 3 部分,区域Ⅱ为最佳耳根测温区域,如图 4 所示。

1.2.2 位置偏移算法

在获取最佳耳根测温区域的基础上,分析头部姿态端正帧(Head posture correct frame, HPCF)和其

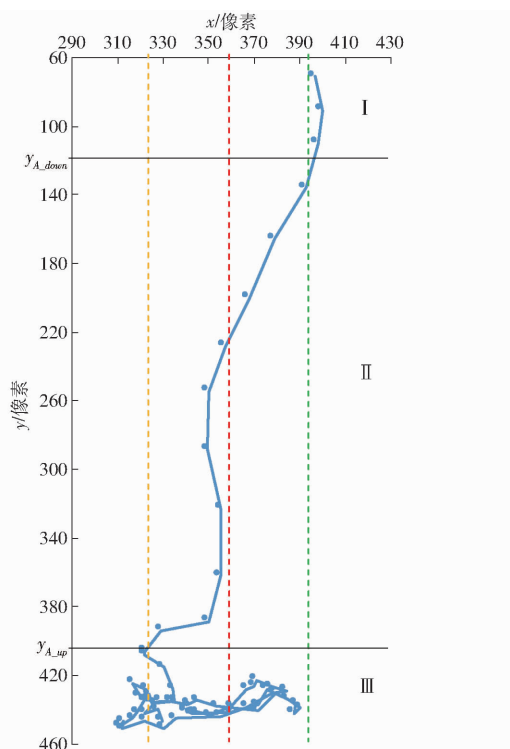


图4 最佳耳根测温区域

Fig. 4 Best ear root temperature measurement area

对应的头部运动轨迹数据,发现 HPCF 图像中头部坐标和其相邻下一帧图像中头部坐标的连线与饲喂栏通道中线的夹角较小,生猪头部偏移饲喂栏通道中线的距离较小。此外,由于生猪头部骨架宽度约为 $W/4$,生猪头部到饲喂栏通道的距离大于 $W/4$ 时,会导致其中一个耳根被遮挡。根据这一特性,本文提出一种位置偏移算法,可以检测最佳耳根测温区域中的 HPCF。

设相邻两帧图像中生猪头部坐标的连线与饲喂栏通道中线的夹角为 A_m , 夹角 A_m 计算公式为

$$A_m = \begin{cases} \arctan \left| \frac{x_{m+1} - x_m}{y_{m+1} - y_m} \right| & (\text{其他}) \\ \frac{\pi}{2} & (x_{m+1} > x_m, y_{m+1} = y_m) \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x_m, y_m) 、 (x_{m+1}, y_{m+1}) ——图像中生猪头部坐标

利用 A_m 和 Δd_j 两个参数进行 HPCF 的筛选,满足以下条件的图像视为 HPCF,即

$$\begin{cases} \Delta d_j \leq \frac{W}{4} \\ A_m \leq A_{T_angle} \end{cases} \quad (4)$$

式中 A_{T_angle} ——HPCF 的角度阈值

随机选取 30 头生猪的热红外视频进行统计分析,当 A_{T_angle} 取 $\pi/10$ 时,即可在最佳耳根测温区域中筛选出 HPCF。由此,得出 HPCF 的判定条件

$$\begin{cases} \Delta d_j \leq \frac{W}{4} \\ A_m \leq \frac{\pi}{10} \end{cases} \quad (5)$$

当视频中的图像满足上述条件时,判定该图像为 HPCF。

1.2.3 HPCF 耳根温度的自动获取方法

为自动获取 HPCF 的耳根温度,构建了基于 YOLO v4 的目标检测模型,对生猪头部和耳根进行自动检测。

YOLO v4 选择 CSPDarknet53 作为主干网络,并采用路径聚合网络 (PAN) 替换特征金字塔网络 (FPN) 进行多通道特征融合^[25],提升了小目标的检测效果,有利于更加精准定位生猪的头部和耳根。

为适应有限的训练样本,采用迁移学习策略,引入预训练好的模型,结合训练集中标注数据进行微调,得到生猪头部和耳根检测模型,该模型具有从输入图像中检测头部和耳根矩形框坐标的功能。图 5 为检测结果示例图。



图5 头部和耳根检测结果示例图

Fig. 5 Example image of head and ear root detection results

HPCF 耳根温度自动获取方法流程图如图 6 所示,主要步骤如下:

(1)运动目标定位:使用训练好的模型进行生猪头部和耳根定位。

(2)最佳耳根测温区域划分:利用 1.2.1 节的最佳耳根测温区域划分算法,对饲喂栏通道进行区域划分。

(3)HPCF 自动检测:利用 1.2.2 节的位置偏移算法,自动检测最佳耳根测温区域中的 HPCF。

(4)耳根温度提取:分别提取 HPCF 中左、右耳根检测框内的最高温度作为各自的耳根温度。

左耳根温度 T_L 和右耳根温度 T_R 的计算公式为

$$T_L = \text{Max}(\mathbf{T}(x_{el}, y_{el})) \quad (6)$$

$$T_R = \text{Max}(\mathbf{T}(x_{er}, y_{er})) \quad (7)$$

式中 $\mathbf{T}(x_{el}, y_{el})$ ——左耳根检测框温度矩阵

$\mathbf{T}(x_{er}, y_{er})$ ——右耳根检测框温度矩阵

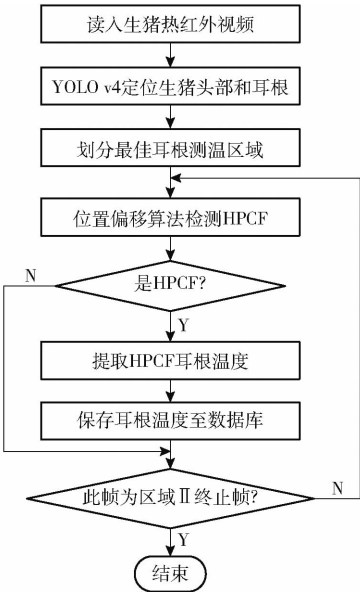


图 6 HPCF 耳根温度自动获取流程图

Fig.6 HPCF’s ear root temperature automatic acquisition flow chart

2 结果与讨论

2.1 生猪头部和耳根检测试验

图像数据集共包含 2 000 幅图像,从该数据集中随机选择 1 500 幅图像作为训练集,其余 500 幅图像作为测试集。生猪头部和耳根检测模型在 NVIDIA GeForce RTX 2070 GPU 上进行训练和测试。

模型在训练前需要进行参数设置,本试验将批量处理尺寸设置为 32,训练共迭代 6 000 次。调整初始学习率为 0.001,采用 steps 模式更新学习率,在训练迭代次数达到 4 800、5 400 次时,将学习率分别降低至初始学习率的 10% 和 1%。动量参数为 0.949,数据增强参数为 1.5,权值衰减系数为 0.000 5。

使用精确率(P)、召回率(R)、类别平均精度(AP)平均检测精度(mAP)作为评价指标,来衡量检测模型的性能。mAP 越大说明模型检测性能越好。

表 1 为生猪关键目标检测模型的性能参数,表明检测精度达到了较高水平,能够较准确地定位生猪的头部和耳根。

表 1 生猪关键目标检测模型的性能参数
Tab.1 Performance parameters of pig key target

detection model		%		
部位	R	AP	mAP	
头部	96.59	98.5		
左耳	93.11	90.56	93.15	
右耳	93.76	90.38		

2.2 HPCF 自动检测试验

为验证算法的有效性,随机选取 10 头生猪进行

试验,将人工观察得到的 HPCF 与本文方法检测结果进行对比,结果如表 2 所示。人工观察得 HPCF 为 79 帧,算法检测出 74 帧,与实际结果相比,正确检测出的 HPCF 为 70 帧,将非 HPCF 错误识别成 HPCF 共 4 帧,未检测出的 HPCF 为 9 帧。出现误判的主要原因是生猪在饲喂栏通道行走的过程中,出现大幅度仰头或者低头状态,导致耳根被遮挡。如图 7 所示,该图像满足判定条件,但是该图像为非 HPCF;此外,出现漏判的原因是生猪在饲喂栏通道内身体处于静止状态,只有头部小幅度左右晃动时,相邻两帧图像生猪头部位置坐标接近重合,不满足判定条件,但是这两帧图像均为 HPCF。

表 2 HPCF 检测结果

Tab.2 HPCF test results

检测方法	猪只编号										帧
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
本文方法	7	6	6	8	8	9	6	7	10	7	
人工观察	9	5	8	8	11	8	7	6	9	8	

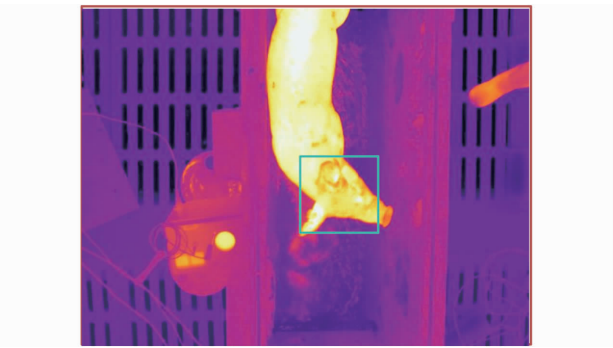


图 7 仰头引起的误判

Fig.7 Misjudgment caused by looking up

通过计算每一类分类样本数量所产生的混淆矩阵如表 3 所示。从表 3 可以看出,70 个 HPCF 和 67 个非 HPCF 样本被正确分类。总的来说,150 个样本中有 137 个被正确分类,准确率为 91.33%,敏感度为 88.6%,特异性为 94.37%。试验结果表明,本文算法可以用于饲喂栏通道中 HPCF 的自动化精准检测。敏感度和特异性计算公式为

$$S_e = \frac{C_{M_{a,a}}}{\sum_{j=1}^k C_{M_{a,j}}} \times 100\%$$
 (8)

$$S_p = \frac{\sum_{i=1, i \neq a}^k \sum_{j=1, j \neq a}^k C_{M_{i,j}}}{\sum_{i=1, i \neq a}^k \sum_{j=1}^k C_{M_{i,j}}} \times 100\%$$
 (9)

式中 S_e ——敏感度 S_p ——特异性
 $C_{M_{a,a}}$ ——混淆矩阵第 a 行和第 a 列的值
 $C_{M_{i,j}}$ ——混淆矩阵第 i 行和第 j 列的值

k ——类的数量 a ——特定的类

表 3 HPCF 自动检测方法的混淆矩阵
Tab.3 Confusion matrix of HPCF automatic detection algorithm

人工观察	本文方法	
	HPCF	非 HPCF
HPCF	70	9
非 HPCF	4	67

2.3 HPCF 耳根温度提取试验

从数据集中随机选取 5 头生猪,用来测试耳根温度检测的准确性。将采用 FLIR Tools 软件人工检测的左右耳根区域的最高温度作为真值,用于验证本文方法的准确性。

FLIR Tools 软件提取的左右耳根温度分别用 T_{FL} 和 T_{FR} 表示。 δ_L 为左耳根的真值 T_{FL} 与测量值 T_L 之间的误差, δ_R 为右耳根的真值 T_{FR} 与测量值 T_R 之间的误差。5 头生猪的 HPCF 的 δ_L 和 δ_R 试验结果分布如图 8 所示。

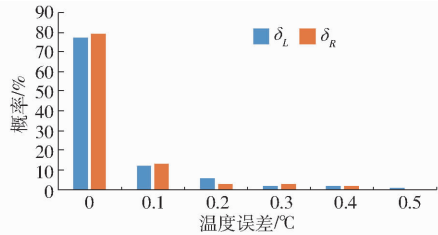


图 8 手动提取和本文方法提取的 HPCF 的耳根温度之间的误差分布

Fig.8 Error between manual extraction and algorithm extraction of HPCF ear base temperature

由图 8 可知,测试的 HPCF 图像中,能以 100% 准确率获取左、右耳根温度的图像数分别占总数的 77%、79%;对于左、右耳根温度,误差在 0.3℃ 以内的图像数分别占 97% 和 98%;左、右耳根温度误差最大值不超过 0.5℃。本文方法实现了生猪耳根温度的自动提取,其精度可用于生猪体温异常监测。

图 9 为左右耳根温度最大误差超过 0.3℃ 示例图。图 9a 为非 HPCF 被错误识别成 HPCF,左耳根错误的定位到耳内,导致 δ_L 较大;图 9b 虽然是 HPCF,但由于生猪耳部姿态的变化,左耳根区域不明显,定位不准,造成 δ_L 偏大。

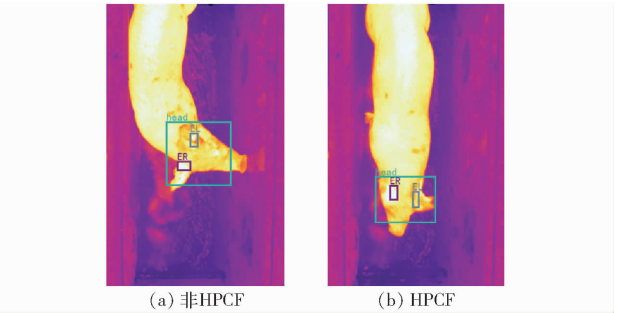


图 9 耳根温度误差较大的图像
Fig.9 Image with large error of ear temperature

3 结论

- (1)提出了一种最佳耳根测温区域划分算法,通过对生猪头部运动轨迹数据的分析,筛选出饲喂栏通道中头部姿态相对端正、耳根部位明显的饲喂栏通道区域,提高了耳根温度的检测效率和准确率。
- (2)提出了一种位置偏移算法,通过计算生猪头部到饲喂栏通道中线的距离和相邻两帧图像中生猪头部坐标连线与饲喂栏通道中线的夹角,用于检测最佳耳根测温区域中的 HPCF。
- (3)构建了基于 YOLO v4 的生猪头部和耳根检测模型,可以对生猪头部和耳根区域进行精准定位,实现了 HPCF 中耳根温度的自动获取。将通过 FLIR Tools 手动提取的耳根温度作为标准,评估了本文方法提取耳根温度的准确性,结果表明,对于测试的 HPCF 中的左、右耳根温度,分别有 97% 和 98% 的测试图像的误差在 0.3℃ 以内,为生猪体温异常监测提供了研究基础。

参 考 文 献

[1] ALBERNAZ-GONÇALVES R, OLMOS G, HÖTZEL M J. My pigs are OK, why change? —animal welfare accounts of pig farmers[J]. Animal, 2021, 15(3): 100154.

[2] 赵一广,杨亮,郑姗姗,等. 家畜智能养殖设备和饲喂技术应用研究现状与发展趋势[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 20–31. ZHAO Yiguang, YANG Liang, ZHENG Shanshan, et al. Research status and development trend of intelligent livestock breeding equipment and feeding technology[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 20–31. (in Chinese)

[3] GARCÍA R, AGUILAR J, TORO M, et al. A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105826.

[4] COOK N J, CHABOT B, LUI T, et al. Infrared thermography detects febrile and behavioural responses to vaccination of weaned piglets[J]. Animal, 2015, 9(2): 339–346.

[5] MCMANUS C, TANURE C B, PERIPOLLI V, et al. Infrared thermography in animal production: an overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 10–16.

[6] 肖德琴,刘勤,陈丽,等. 基于红外技术的设施猪场生猪体温巡检装备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 194–200.

- XIAO Deqin, LIU Qin, CHEN Li, et al. Design and test of pig body temperature inspection equipment in facility pig farm based on infrared technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (7): 194 – 200. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z, ZHANG H, LIU T. Study on body temperature detection of pig based on infrared technology: a review [J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 1: 14 – 26.
- [8] KAMMERSGAARD T S, MALMKVIST J, PEDERSEN L J. Infrared thermography—a non-invasive tool to evaluate thermal status of neonatal pigs based on surface temperature [J]. Animal, 2013, 7(12): 2026 – 2034.
- [9] 冯泽猛, 张云华, 贺玉敏, 等. 智能养殖: 生猪行为研究及其应用 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42(1): 1 – 9.
- FENG Zemeng, ZHANG Yunhua, HE Yumin, et al. Intelligent breeding: research and application of pig behavior [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(1): 1 – 9. (in Chinese)
- [10] LOKESH B D S, JEYAKUMAR S, JITENDRA V P, et al. Monitoring foot surface temperature using infrared thermal imaging for assessment of hoof health status in cattle: a review [J]. Journal of Thermal Biology, 2018, 78: 10 – 21.
- [11] RICCI G D, SILVA-MIRANDA K, TITTO C G. Infrared thermography as a non-invasive method for the evaluation of heat stress in pigs kept in pens free of cages in the maternity [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 403 – 409.
- [12] BARRETO C D, ALVES F V, RAMOS C, et al. Infrared thermography for evaluation of the environmental thermal comfort for livestock [J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 63(3): 1 – 8.
- [13] SALLES M S V, DA SILVA S C, SALLES F A, et al. Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography [J]. Journal of Thermal Biology, 2016, 62: 63 – 69.
- [14] MOE R O, FL A, BOHLIN J, et al. Experimental factors affecting the within- and between-individual variation of plantar foot surface temperatures in turkeys (*Meleagris gallopovo*) recorded with infrared thermography [J]. Infrared Physics and Technology, 2018, 92: 381 – 386.
- [15] BYRNE D T, BERRY D P, ESMONDE H, et al. Investigation of the relationship between udder quarter somatic cell count and udder skin surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography [J]. Journal of Animalence, 2018, 96(10): 4458 – 4470.
- [16] RYDYGIER D R F, HENRIQUE Y P, GUSTAVO B B L, et al. Effect of estrous cycle phase on vulvar, orbital area and muzzle surface temperatures as determined using digital infrared thermography in Murrah buffalo [J]. Animal Reproduction Science, 2018, 197: S1845117360.
- [17] MATTHEWS S G, MILLER A L, CLAPP J, et al. Early detection of health and welfare compromises through automated detection of behavioural changes in pigs [J]. The Veterinary Journal, 2016, 217: 43 – 51.
- [18] 马丽, 张旭东, 邢子正, 等. 基于骨架扫描策略的生猪耳根体表温度 FDSST 检测方法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 371 – 377.
- MA Li, ZHANG Xudong, XING Zizheng, et al. FDSST detection method of pig ear root body surface temperature based on skeleton scanning strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 371 – 377. (in Chinese)
- [19] 周丽萍, 陈达, 陈志, 等. 基于图像处理的生猪耳部颜色异常检测技术 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 166 – 172.
- ZHOU Liping, CHEN Da, CHEN Zhi, et al. Detection technology of pig ear color abnormality based on image processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 166 – 172. (in Chinese)
- [20] FENG Y Z, ZHAO H T, JIA G F, et al. Establishment of validated models for non-invasive prediction of rectal temperature of sows using infrared thermography and chemometrics [J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(10): 1405 – 1415.
- [21] SOERENSEN D, PEDERSEN L. Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review [J]. Acta Veterinaria Scandinavica, 2015, 57(1): 5.
- [22] LU M, HE J, CHEN C, et al. An automatic ear base temperature extraction method for top view piglet thermal image [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 339 – 347.
- [23] ZHANG K, JIAO L, ZHAO X, et al. An instantaneous approach for determining the infrared emissivity of swine surface and the influencing factors [J]. Journal of Thermal Biology, 2016, 57: 78 – 83.
- [24] SOERENSEN D D, CLAUSEN S, MERCER J B, et al. Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 52 – 58.
- [25] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [J]. arXiv preprint arXiv, 2020, 2004:10934.