

基于最优步长的生猪头部快速检测方法

马 丽^{1,2} 张旭东¹ 冯彦坤¹ 李彦超¹ 刘 刚¹

(1. 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;

2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

摘要: 为了提高生猪头部在线检测的实时性,实现基于热红外视频的生猪耳根体表温度在线监测,提出一种基于最优步长的生猪头部快速检测方法。首先在生猪头部左右两侧的可能运动区域,设计5条动态扫描线,从通道入口开始扫描头部的运动状态。在生猪头部左右两侧可能的运动区域,沿水平方向分别设计生猪头部检测框的左边线和右边线。在生猪头部前侧可能的运动区域,沿垂直方向依次设置了生猪头部检测框的下框动态扫描边线、垂直区间动态扫描线和垂直区间动态扫描线的下限线;其次,当生猪进入通道时,将高温阈值分别与左边线和右边线的温度进行比较,计算左框和右框的动态扫描线是否需要水平平移,进而确定生猪头部检测框体左边线和右边线的位置;最后,将高温阈值与垂直区间动态扫描线的温度进行比较,计算出最优垂直移动步长,进而分别确定生猪头部检测框体上边线 and 下边线的位置,实现基于最优步长的头部快速检测。利用采集到的40头生猪视频数据,在Matlab及C#平台上进行了测试,并与骨架扫描策略、压缩感知、核相关滤波等方法进行对比分析。结果表明,本文方法检测平均帧速分别比骨架扫描策略、压缩感知方法提高了74.4%和54.1%,检测精度比压缩感知、核相关滤波分别提高了11.03、13.82个百分点,耳根温度平均误差为0.235℃。

关键词: 生猪头部; 快速检测; 热红外视频; 自适应尺度检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0291-06

Fast Detection Method for Pig Head Based on Optimal Step

MA Li^{1,2} ZHANG Xudong¹ FENG Yankun¹ LI Yanchao¹ LIU Gang¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: To improve the on-line monitoring rate of pig ear skin surface temperature and realize the long-term monitoring of pig ear skin surface temperature, a fast detection method based on optimal step for pig head was proposed. Firstly, five dynamic detection lines were designed to scan at the entrance of the channel. Secondly, as soon as the pig entered the channel, the optimal vertical step size was calculated by using the high temperature threshold and two vertical dynamic detection lines, so as to determine the position of the frame on the left and right sides of the pig head box. Finally, the results of the comparison between the high temperature threshold value and the temperature of the dynamic scan line in the vertical interval were used to calculate the optimal vertical movement step, and then the positions of the upper and lower edge lines of the pig head detection box were determined respectively, so as to realize the fast detection of the head based on the optimal step. The video data of 40 pigs were collected and tested on Matlab and C# platforms. The results showed that the average frame rate of the proposed method was 74.4% and 54.1% higher than that of the skeleton scanning strategy and the compressed sensing method, respectively. Compared with compressed sensing and kernel correlation filtering, the detection accuracy was improved by 11.03 percentage points and 13.82 percentage points, respectively. The mean error of ear base skin surface temperature was 0.235℃. The research result can provide technical support for the integration of the automatic detection system of pig body surface temperature.

Key words: pig head; fast detection; thermal infrared video; adaptive box detection

收稿日期: 2021-07-12 修回日期: 2021-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)

作者简介: 马丽(1979—),女,博士生,河北农业大学讲师,主要从事图像视频处理和农业物联网应用研究,E-mail: mlhebau@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

生猪耳根体表温度与其直肠温度存在相关性^[1],是生猪体表温度的典型代表,是评估生猪健康水平、畜禽舍环境的重要指标^[2],也是评估猪的压力、生育力、代谢、福利的重要依据^[3-5]。生猪处于不同日龄、不同生理状态时的体表温度会有所不同^[6-7]。生猪养殖业迫切需要大量、准确、长期的生猪个体生理信息来指导和服务生猪生产管理,需要研究无损、无应激、自动的耳根温度检测方法,从而实现生猪群体与个体的精细化养殖和提高动物福利^[8-9]。

采用在线红外热像仪能满足无损、无应激要求^[10]。通过检测热红外图像中的生猪头部,结合头部热红外图像的温度分布特点,以实现自动、在线、准确、快速的生猪耳根温度监测,是近年来的研究热点^[11]。

采用计算机视觉技术进行热红外目标检测有两种情况:第1种是基于特定角度的单幅动物热红外图像处理。研究表明,拍摄角度会影响生猪耳部检测和识别精度^[12-14]。第2种是基于自然行走的动物热红外视频处理。在目标检测方面,近年来精细农业研究中用到了许多性能优异的深度学习技术^[15-16]。赵海涛^[17]以生猪面部为研究对象,采用U-Net-4网络模型识别生猪的眼睛和耳朵,平均区域重合度达78.75%。WANG等^[18]针对羊可见光监视录像数据,提出了一种基于快速卷积神经网络CNN的目标检测方法,通过关键帧提取、前景分割和快速R-CNN等关键环节,获得92.49%的增益平均精度。肖德琴等^[19]提出一种基于YOLO v4和形态学的生猪耳温自动提取方法,对热红外图像中的生猪耳部进行提取,耳根检测准确率达97.6%,单帧平均检测时间为12ms,具有检测精度高、速度快的特点,但是在系统集成方面还有待研究。

在目标跟踪方面,压缩感知(Compressive sensing, CT)^[20]、核相关滤波(Kernel correlation filter, KCF)^[21]是近年来应用比较多且性能比较优异的方法。但是热红外图像存在噪声大、图像分辨率低、对比度低、缺少纹理、缺少清晰的边缘等问题,致使检测和跟踪在热红外视频中性能下降。基于骨架扫描策略的生猪热红外视频目标跟踪方法^[22]可实现高精度头部定位,获取耳根温度,但是在系统集成方面需要进一步简化算法,提高单帧的平均检测速度。因此,为了满足系统实时在线检测,需要研究基于热红外图像简易、检测快速的生猪头部检测方法,在保证检测精度不降低的前提下,进一步简化头部检测算法和提高体温检测速度。

本文提出基于最优步长的生猪头部快速检测方

法。采用5条动态扫描线结合高温阈值,分别确定动态扫描线在水平和垂直方向的最优移动步长,获取头部检测框的位置和自适应尺度,进而快速获取生猪耳根体表温度,为后续开展生猪体表温度实时在线检测提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 热红外数据采集

热红外数据采集平台如图1所示。采集通道位于活动区和采食区之间,并且远离猪舍的光线直射区域和通风区域,生猪可以自然地、无应激地单向走过通道。



图1 热红外视频采集平台示意图

Fig.1 Schematic of thermal infrared image acquisition platform

热成像摄像机(FLIR-A615型,分辨率640像素×480像素)安装在通道基座上方2.40m处,并通过以太网电缆连接到便携式计算机(ThinkPad S3-S440)。用于校正测量温度的黑体炉(ISOTECH R982型,发射率优于0.995,精度为±0.1℃)放置于通道左侧,使黑体腔高度与生猪的耳根高度相同。使用热成像摄像机厂家提供的FLIR Tools软件采集热红外视频,每个视频只包含1头猪只数据。当有猪只通过时,视频开始录制,当猪只离开时,结束录制。

为了测量环境参数,在通道左侧1m内安装了温度计和湿度计。整个试验期间环境温度在24~33℃之间,相对湿度为55%~70%,用温湿度计测量获得温度和相对湿度的最小值与最大值^[23]。

1.2 数据预处理

1.2.1 检测通道提取

通过FLIR Atlas SDK软件中的开发套件包获取热红外视频中每帧热图像的温度矩阵。图2采用铁红调色板,显示热红外图像帧。为了提高检测速度,去除通道左右两侧的背景图像,仅保留生猪通道图像,如图3所示。

1.2.2 自适应框体初始化

检测生猪头部的框体尺寸可以根据生猪头部运

动状态的变化而变化。表 1 为自适应框体尺寸计算所使用的参数。

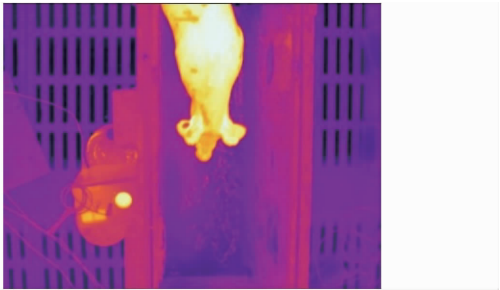


图 2 热红外图像帧
Fig. 2 Thermal infrared image

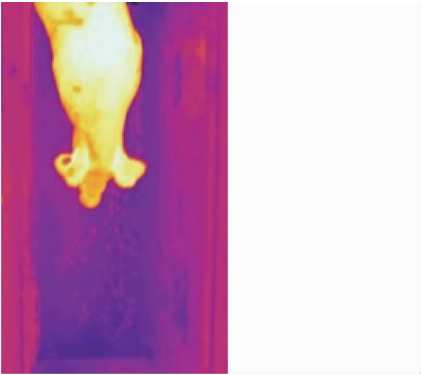


图 3 生猪通道
Fig. 3 Pig detection channel

表 1 自适应框体尺寸相关参数

Tab. 1 Description of all related parameters

参数	含义
T_{Left}	左边线最高温
T_{Right}	右边线最高温
T_R	下边线(红线)最高温度
T_Y	垂直区间动态扫描线(黄线)最高温度
T_G	垂直区间动态扫描线的下限线(绿线)最高温度
T_d	高温阈值
D_{Opt}	左边线最优步长
D	红线与绿线之间的距离
D_0	红线与黄线之间的最小距离

表 1 中,高温阈值是检测是否有生猪的标志。生猪体表温度一般高于 33°C ,因此设定 $T_d = 33^{\circ}\text{C}$ 。如果温度高于 33°C ,说明通道内有生猪通过且测量温度有效,记录此时温度;如果温度低于 33°C ,说明检测的温度无效,则不记录此时温度。

图 4 为头部检测框的检测示意图。框体由上下左右 4 条边线组成,分别是左边线、右边线、下边线和上边线。左边线、右边线和下边线是图 4 中的黑线。下边线为下框动态扫描边线,是图 4 中的红线。红线下面有黄线和绿线,分别表示垂直区间动态扫描线和垂直区间动态扫描线的下限线。垂直区间动态扫描黄线只能在红线和绿线之间扫描。红线与绿

线之间的距离为常数 D 。黄线与红线之间的最小距离为常数 D_0 ,本文中 D_0 取 2 像素。

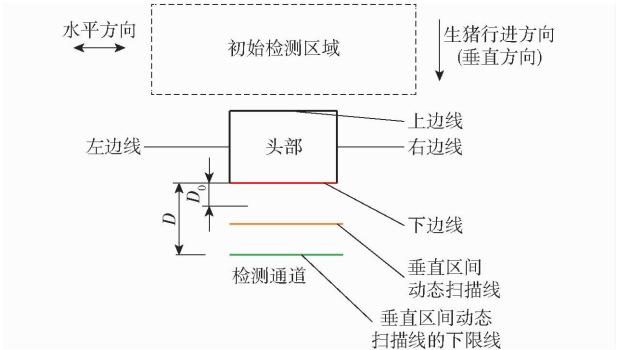


图 4 自适应框体检测示意图
Fig. 4 Adaptivebox detection schematic

当通道内没有生猪进入时,左边线(图 5 中的白线)和右边线(图 5 中的蓝线)在初始检测区域沿水平方向扫描,垂直区间动态扫描线在初始检测区域沿垂直方向扫描,检测系统为等待生猪进入状态。5 条扫描线在红外热图中的位置关系如图 5a 所示。

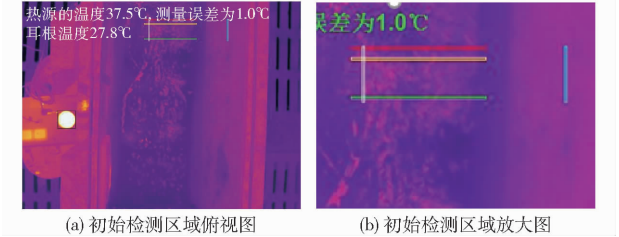


图 5 检测区域初始化

Fig. 5 Initializing of detection area

1.3 基于最优步长的头部快速检测方法

基于最优步长的头部快速检测方法流程,如图 6 所示。具体步骤为:

(1)动态扫描线初始化。当通道内没有生猪进入时,左边线和右边线在初始检测区域沿水平方向扫描,垂直区间动态扫描线(黄线)在下边线(红线)和垂直区间动态扫描线的下限线(绿线)之间沿垂直方向扫描。

(2)确定检测框左边线位置。当生猪进入检测区域,左边线上的最高温 T_{Left} 大于 T_d 时,检测框左边线向左平移 1 像素。否则左边线位置不变。

(3)确定检测框右边线位置。当生猪进入检测区域,右边线的最高温 T_{Right} 大于 T_d 时,检测框右边线向右平移 1 像素。否则右边线位置不变。

(4)计算垂直方向的最优步长 D_{Opt} ,确定检测框下边线位置。最优步长 D_{Opt} 为红线与黄线之间的距离。黄线在红线和绿线之间上下扫描。当生猪头部沿行进方向移动,黄线上的最高温 T_Y 大于 T_d 时,计算黄线与红线的垂直距离为最优步长 D_{Opt} 。红线按照最优步长 D_{Opt} 跳跃到黄线位置,同时绿线沿垂直

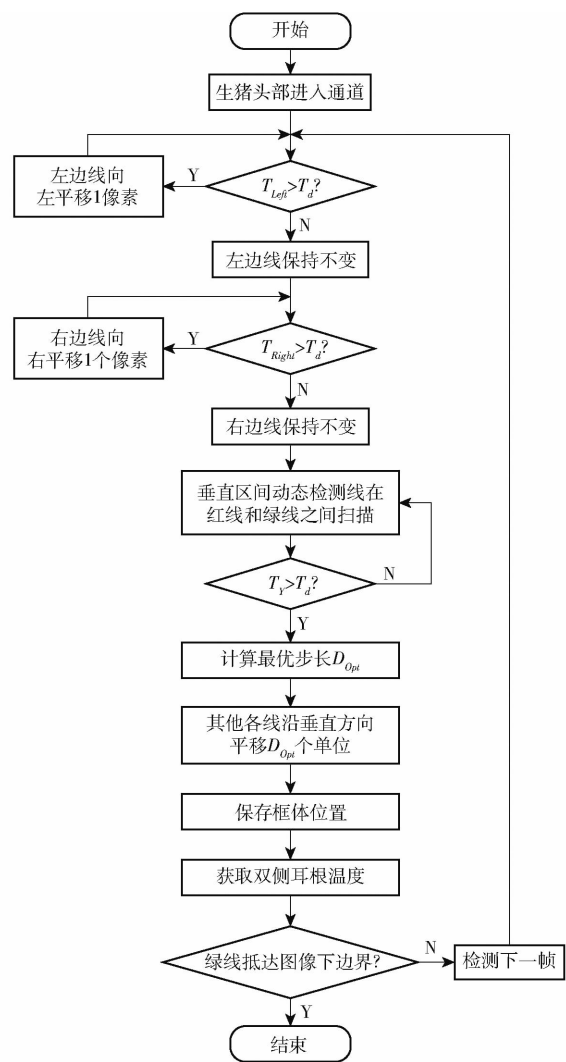


图6 基于最优步长的生猪头部快速检测方法流程图

Fig.6 Flow chart of the proposed method

方向平移 D_{opt} , 保持与红线的距离始终为常数 D 。同时左边线、右边线、头部检测框的左边线、右边线和上边线均沿垂直方向平移最优步长 D_{opt} 。如果黄线上的最高温 T_y 小于 T_d , 继续扫描, 各线在移动方向上的位置不变。

(5) 本帧检测完成后, 重复执行步骤(1)~(4), 直到视频中某帧的垂直区间动态扫描线的下限线(绿线)抵达图像的下边界, 检测结束。

1.4 耳根温度提取方法

检测到生猪头部后, 将头部检测框平均分成左右两部分。由于生猪耳根区域的血管分布最为密集, 因此可以通过分别定位左右两个区域的最高温像素点的位置, 来实现左右两个耳根的定位。对于每帧图像, 检测框左右两侧的最高温即为生猪耳根温度, 分别用 T_{ELi} 和 T_{ERj} 表示。对于每只生猪, 其左侧和右侧的耳根温度 T_{EBL} 和 T_{EBR} 为

$$T_{EBL} = \max(T_{ELi})$$
$$1 \leq i \leq n_i$$
 (1)

$$T_{EBR} = \max(T_{ERj})$$
$$1 \leq j \leq n_j$$
 (2)

式中 i ——生猪左侧耳根帧的帧号
 j ——生猪右侧耳根帧的帧号
 n_i ——生猪左侧耳根帧的总数
 n_j ——生猪右侧耳根帧的总数

保存耳根温度数据至数据库, 耳根检测效果如图7所示。

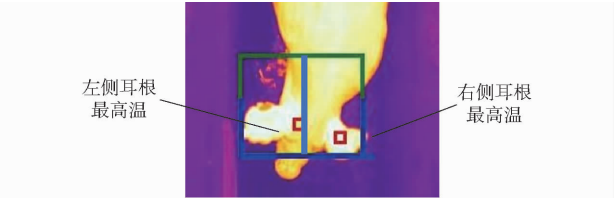


图7 耳根检测效果

Fig.7 Ear base detection effect

2 结果与分析

试验数据采集于2017年7月6日, 在北京天棚兴旺种猪场的试验育肥猪舍中进行。试验录制了在检测通道内自然行走的100头大白猪(体质量30~50 kg)的热红外视频。

2.1 本文方法性能分析

为了验证跟踪算法的有效性, 采用平均精确度和平均帧速来评估头部跟踪方法的性能^[23]。

随机选择录制了40头自然行走的生猪的40段视频数据进行分帧, 获得5608帧原始数据, 其中通道内有生猪通过的共3544帧。对这3544帧中的生猪头部进行标定, 建立生猪头部数据集。

图8和图9为采用本文方法检测任意1段视频中生猪头部的效果。



图8 扫描线随生猪头部移动的变化效果

Fig.8 Effect of scan line with movement of pig's head

图8显示当生猪进入通道后, 左边线和右边线沿垂直方向扫描。下框动态扫描边线(红线)随着垂直区间动态扫描线(黄线)位置的变化而变化。

从图9中可看出, 当头部姿态端正(图9c)或者侧偏不严重(图9a、9b)时, 检测框体可以覆盖整个头部, 测温数据可信, 记录这些数据到数据库中。当头部姿态偏移严重(图9d)或当绿线抵达热图底部边界(图9e)时, 生猪头部姿态变化较大, 检测框体丢失部分头部信息, 检测数据不可靠, 因此不记录此

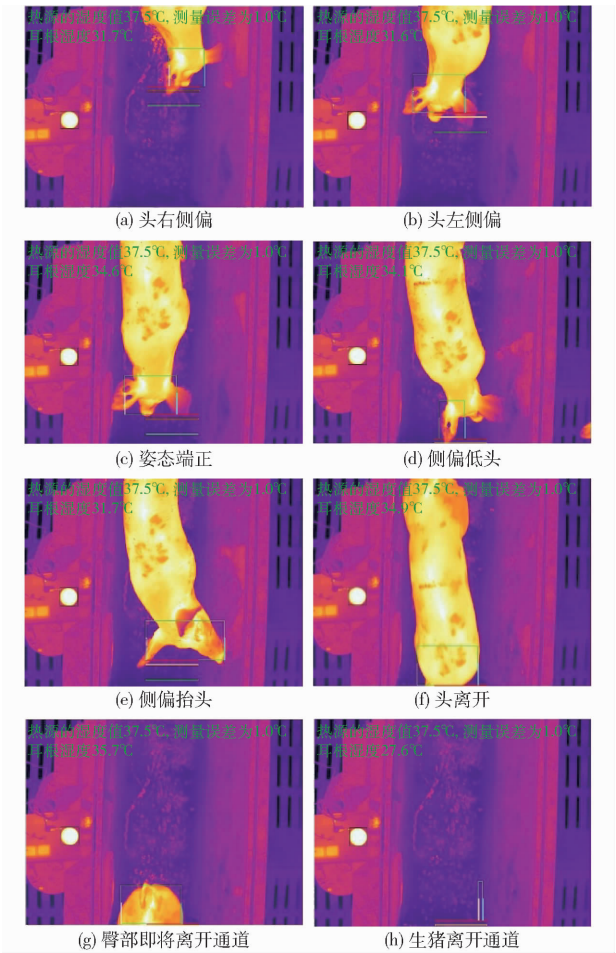


图9 头部检测效果

Fig. 9 Head detection effect in a video

时的耳温数据。当图像中不存在生猪头部时,不记录测温数据,如图9f~9h所示。

采用平均精确度和平均帧速来评估跟踪算法的性能^[23]。所有试验显示结果为所有视频的平均值。平均帧速是所有视频运行帧速的平均值。每段视频的帧速为视频运行总时间除以视频的帧数。将本文方法分别与检测性能较优的骨架扫描策略、压缩感知、核相关滤波方法进行比较,检测结果如表2所示。

表2 不同方法的检测性能对比

Tab.2 Comparison of tracking performance of different algorithms

方法	平均帧速/(帧·s ⁻¹)	平均精确度/%
本文方法	56.35	68.28
骨架扫描策略	32.32	71.59
压缩感知	36.57	57.25
核相关滤波	114.73	54.46

由表2可以看出,本文方法虽然比骨架扫描策略的平均精确度低3.31个百分点,但是其平均帧速提高了74.4%,更适合应用于在线检测系统。

本文方法在平均帧速和平均精确度方面都优于压缩感知法。

本文方法的检测速度虽然为核相关滤波的50.9%,但其平均帧速满足在线检测系统的要求,且其精确度比核相关滤波高13.82个百分点,算法更简单,更适合于系统集成。

综上,本文方法在具有较高检测精确度的情况下,提高了头部检测速度。

2.2 耳根温度提取准确性分析

为了比较耳根温度提取的准确性,采用热像仪厂家提供的温度读取软件FLIRTools检测左右耳根温度作为真值,分别用 ET_L 和 ET_R 表示。

表3为不同检测方法对数据集中40头生猪进行测试的试验误差,其中 δ_L 和 δ_R 分别为生猪左右两侧耳根的真值与测量值之间的平均误差。测量总误差 δ_{ET} 的计算公式为

$$\delta_{ET} = \frac{\delta_L + \delta_R}{2}$$

(3)

表3 不同方法检测耳根温度误差对比

Tab.3 Ear base skin surface temperature errors detected by different algorithms

方法	δ_L	δ_R	δ_{ET}
本文方法	0.22	0.25	0.235
骨架扫描策略	0.17	0.14	0.155
压缩感知	0.54	0.65	0.595
核相关滤波	0.67	0.71	0.690

由表3可看出,本文方法的测量总误差比压缩感知和核相关滤波低0.36℃和0.455℃。本文方法的测量总误差虽然比骨架扫描策略高0.08℃,但其可以满足日常体温检测的需求。

3 结论

(1)以检测通道内自然行走的生猪为研究对象,提出了一种基于最优步长的生猪头部快速检测方法,能够无应激地快速检测出自然行进中的生猪头部区域并提取出耳根温度。

(2)采用2条垂直动态扫描边线和3条水平动态扫描线在检测区域扫描,结合高温阈值,判断生猪头部位置。

(3)本文方法平均帧速为56.35帧/s,耳根温度检测平均误差为0.235℃,综合性能优于压缩感知、核相关滤波等方法,比骨架扫描策略的平均帧速提高了74.4%。

(4)针对热红外视频,在保证检测精度符合要求的前提下,实现了生猪头部快速定位,可用于生猪耳根温度在线监测系统。

参 考 文 献

- [1] SOERENSEN D D, PEDERSEN L J. Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review[J]. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2015, 57(1): 5–15.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] TZANIDAKIS C, SIMITZIS P, ARVANITIS K, et al. An overview of the current trends in precision pig farming technologies[J]. *Livestock Science*, 2021, 249: 104530.
- [5] 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.
- [6] 孟祥雪. 红外热像仪在母猪皮温现场检测中的应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
MENG Xiangxue. Application of infrared thermography in the field detection of sow's skin temperature [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] 张泽峰. 母猪体温红外监测系统设计与实现[D]. 太谷:山西农业大学, 2019.
ZHANG Zefeng. Full-time professional master degree dissertation [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [8] 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 Shangshan, 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)
- [9] 滕光辉. 畜禽设施精细养殖中信息感知与环境调控综述[J]. *智慧农业*, 2019, 1(3): 1–12.
TENG Guanghui. Information sensing and environment control of precision facility livestock and poultry farming[J]. *Smart Agriculture*, 2019, 1(3): 1–12. (in Chinese)
- [10] RICCI G D, SILVA-MIRANDA K O D, 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.
- [11] 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.
- [12] 朱伟兴, 刘波, 杨建军, 等. 基于改进主动形状模型的生猪耳部区域检测方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 288–295.
ZHU Weixing, LIU Bo, YANG Jianjun, et al. Pig ear area detection based on adapted active shape model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 288–295. (in Chinese)
- [13] 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.
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. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] KAMILARIS A, PRENAFETA-BOLDÚ F X. Deep learning in agriculture: a survey[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 147: 70–90.
- [17] 赵海涛. 基于红外热成像技术的猪体温检测与关键测温部位识别[D]. 武汉:华中农业大学, 2019.
ZHAO Haitao. Pig body temperature detection and key temperature measurement part recognition [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [18] WANG D, TANG J, ZHU W, et al. Dairy goat detection based on Faster R-CNN from surveillance video[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 154: 443–449.
- [19] 肖德琴, 林思聪, 刘勤, 等. 基于红外热成像的生猪耳温自动提取算法[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 255–262.
XIAO Deqin, LIN Sicong, LIU Qin, et al. Automatic ear temperature extraction algorithm for live pigs based on infrared thermography [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 255–262. (in Chinese)
- [20] 徐华伟, 颜晶晶. 图像压缩感知的目标跟踪多特征提取算法[J]. *计算机与数字工程*, 2019, 47(9): 2170–2175.
XU Huawei, YAN Jingjing. Multi-feature extraction algorithm based on image compressed sensing for target tracking [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2019, 47(9): 2170–2175. (in Chinese)
- [21] 周正松, 陈虹君, 周红. 基于多特征融合的尺度自适应 KCF 目标跟踪算法[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2020, 57(4): 697–703.
ZHOU Zhengsong, CHEN Hongjun, ZHOU Hong. Scale-adaptive kernel correlation filtering tracking algorithm based on multi-feature fusion [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2020, 57(4): 697–703. (in Chinese)
- [22] 马丽, 张旭东, 邢子正, 等. 基于骨架扫描策略的生猪热红外视频目标跟踪方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 256–260, 242.
MA Li, ZHANG Xudong, XING Zizheng, et al. Automatic pig target tracking based on skeleton scanning strategy for thermal infrared video[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 256–260, 242. (in Chinese)
- [23] 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.