

基于骨架扫描策略的生猪耳根体表温度 FDSST 检测方法

马 丽¹ 张旭东² 邢子正² 冯彦坤² 刘 刚² 刘元杰²

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001;

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: 为了实现生猪耳根体表温度自动检测,减少快速判别尺寸空间跟踪(Fast discriminative scale space tracking, FDSST)方法在热红外视频中头部跟踪产生的误差,提出了一种利用骨架扫描策略改进 FDSST 的生猪耳根体表温度检测方法。首先对视频的初始帧进行预处理,提取精简后的生猪整体骨架;其次,设计骨架扫描策略,扫描头部骨架前端关键点,实现头部在初始帧的定位;再次,采用 FDSST 跟踪生猪头部,每连续跟踪 N 帧后,采用骨架扫描策略重新定位头部,减少跟踪框漂移;最后提出耳根体表温度提取方法,根据头部左右耳侧温度分布,提取耳根温度并误差校正。利用采集到的 30 只生猪的视频数据,在 Matlab 平台上进行了测试,并与 FDSST 算法、压缩感知跟踪和核相关滤波跟踪等高效算法对比分析。结果表明,本文方法的跟踪平均精确度分别提高了 7.82、11.82、8.78 个百分点,提取的耳根最大温度误差为 0.32℃。

关键词: 猪耳根; 体表温度; 快速判别尺寸空间跟踪; 热红外视频

中图分类号: TP391.4; S828 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0371-07

FDSST Detection Method for Pig Ear Base Surface Temperature
Based on Skeleton Scanning Strategy

MA Li¹ ZHANG Xudong¹ XING Zizheng¹ FENG Yankun¹ LIU Gang¹ LIU Yuanjie¹

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

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

Abstract: To realize the automatic detection of pig ear-based surface temperature and reduce the error caused by fast discriminative scale space tracking (FDSST) in the head tracking in the thermal infrared video, an improved detection method of pig ear-based surface temperature by using the skeleton scanning strategy was proposed. Firstly, the initial frame of the video was preprocessed to extract the simplified pig skeleton. Secondly, the skeleton scanning strategy was designed to scan the key points of the head skeleton and realize the head positioning in the initial frame. Thirdly, FDSST was used to track the hog head. After each continuous tracking of N frames, skeleton scanning strategy was adopted to reposition the head and reduce the tracking frame drift. Finally, a method for extracting the surface temperature of the ear base was proposed. According to the temperature distribution of the left and right ear sides of the head, the temperature of the ear base was extracted and the error was corrected. The method was tested on the Matlab platform by using the collected videos of 30 pigs. Compared with FDSST, compressed sensing tracking and nuclear correlation filtering tracking, the average tracking accuracy of the proposed method was improved by 7.82 percentage points, 11.82 percentage points and 8.78 percentage points, respectively. The maximum error of the extracted ear base surface temperature was 0.32℃. This study can provide technical support for automatic detection of pig ear base surface temperature.

Key words: pig ear base; surface temperature; fast discriminative scale space tracking; thermal infrared video

收稿日期: 2020-08-17 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)和河北农业大学精准畜牧学科群建设项目(1090064)

作者简介: 马丽(1979—),女,讲师,博士,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,主要从事农业信息技术应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

0 引言

生猪处于不同日龄、不同生理状态时体温会有所不同^[1]。体温是评估生猪健康水平、畜禽舍环境的重要指标,也是评估猪的压力、生育力、代谢、福利的重要依据^[2-3]。对体温进行在线检测是实现我国生猪产业精细化养殖的发展趋势^[4]。

生猪体表温度与体温具有相关性^[5-6],耳根体表温度是生猪体表温度的典型代表^[2,7]。采用红外热像仪可以无损、非接触地采集到二维平面温度数据^[8-10]。通过图像处理技术可以获取感兴趣区域的温度,近年来热红外技术在动物生理健康研究^[1,11]、疾病预防^[12]和畜禽舍内设施环境^[13-14]研究等多个领域有广泛的应用^[15]。

较多研究者采用人工标定方法获取热红外图像中感兴趣区域的温度^[16-17]。但是这种方法费时费力,且不能满足在线检测的需求^[12]。因此,基于图像处理技术的热红外图像测温技术可以自动检测感兴趣区域^[9-10,18-19],是近年来的研究热点。

快速判别尺寸空间跟踪(Fast discriminative scale space tracking, FDSST)算法通过特征降维和插值,对 DSST(Discriminative scale space tracking)算法进行加速优化,在可见光跟踪领域取得了较好的性能^[20-21]。采用 FDSST 算法实现生猪头部跟踪,需要两个步骤,首先实现初始帧的头部定位,之后采用 FDSST 算法跟踪。由于热红外图像分辨率低、对比度低、目标边缘存在假边界且容易受到高温物体影响^[22],并且生猪自然走动时头部姿态多变,在热红外图像中使用 FDSST 算法时,头部初试帧跟踪框的初始位置对后续的跟踪性能影响较大,经过若干帧跟踪后常出现跟踪框漂移到颈部、背部甚至脱离生猪身体的问题。

因此,需要对 FDSST 算法进行改进,使其适用于热红外图像,从而进一步提高目标检测的准确率。本文以俯视图下的生猪热红外视频为研究对象,提出一种利用骨架扫描策略改进 FDSST 算法的生猪耳根体表温度检测方法。通过骨架扫描策略,每跟踪 N 帧,重新定位初始帧,有效减小跟踪框的漂移,提高头部检测的精度。在检测到头部的基础上,利用头部温度分布,实现左右两侧耳根体表温度的自动提取。

1 材料和方法

1.1 热红外数据采集

图 1 为搭建的热红外数据采集平台。为了避免生猪的运动给测温带来误差,数据采集设置了一个

检测通道。在热红外采集支架上,垂直安装红外热像仪(FLIR A615 型,分辨率 640 像素×480 像素),计算机(ThinkPad S3-S440)与热像仪连接,采用 FLIR Tools 软件录制俯视角下的生猪热红外视频(6.5 f/s),录制的热红外视频文件存入计算机硬盘。在热像仪垂直视场内,放置了用来校正测温误差的腔式黑体和温湿度传感器。

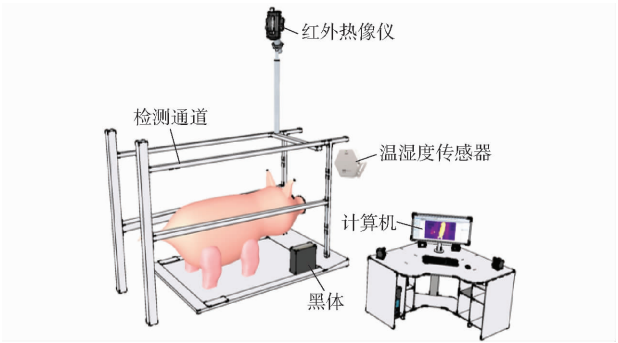


图 1 热红外视频采集示意图
Fig. 1 Thermal infrared video acquisition schematic

试验人员在远离通道处操作计算机,录制热红外视频,避免对通过的生猪带来应激影响。整个试验期间环境温度在 20~30℃ 之间,相对湿度为 40%~70%,用温湿度传感器测量获得最小/最大温度和湿度。

1.2 改进 FDSST 算法的生猪头部跟踪方法
本文检测方法流程图如图 2 所示。

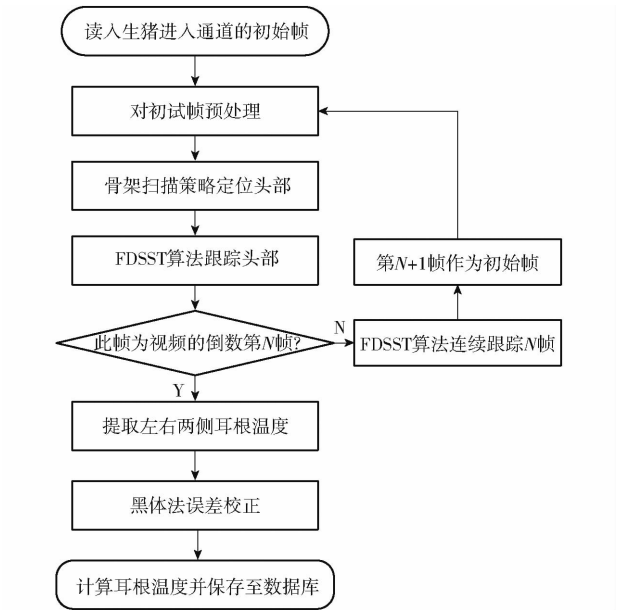


图 2 生猪耳根体表温度检测流程图
Fig. 2 Flow chart of pig ear base surface temperature detection

本研究以俯视图下的生猪热红外视频为研究对象,采用骨架扫描策略改进 FDSST 算法用于初始帧定位,最终实现耳根体表温度提取。

1.2.1 热红外视频预处理

提取生猪骨架首先需要提取生猪目标。利用

FLIR 提供的基于 Matlab 语言环境的软件开发包 FLIR Atlas SDK, 获取热红外视频流各帧图像。图 3a 为采用灰度伪色彩显示的检测通道图像。通道左侧圆形亮点为黑体腔。热像仪与检测通道的位置相对固定, 因此可从图 3a 中标定检测通道的位置, 设置预设检测区域。从而减少计算量, 去除检测通道的背景干扰, 如图 3b 所示。当有猪进入时, 通过 FLIR Atlas SDK 对图 3b 所示区域进行温度阈值分割, 提取生猪前景, 并采用图 4 所示伪色彩显示。

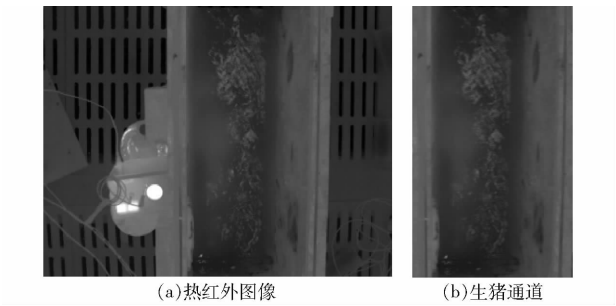


图 3 无猪只的通道检测结果

Fig. 3 Channel detection without pig

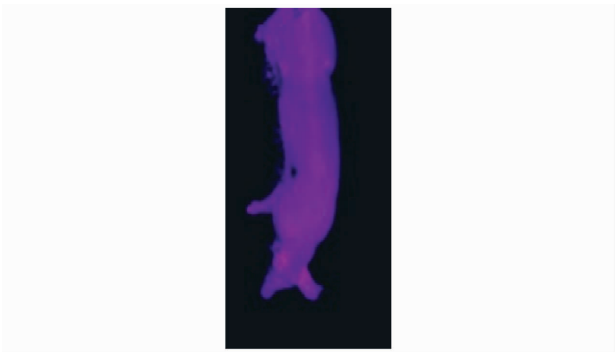


图 4 生猪目标提取的伪色彩显示

Fig. 4 Pseudo-color display of pig target extraction

以有猪的通道图像为研究对象, 对图像进行预处理。经过图像二值化、多次膨胀法、去除小连通区域、填补黑白空洞后, 进行骨架提取。为避免过多分支对检测的影响, 需要进一步剔除骨架毛刺, 得到精简的生猪整体骨架, 如图 5 所示。

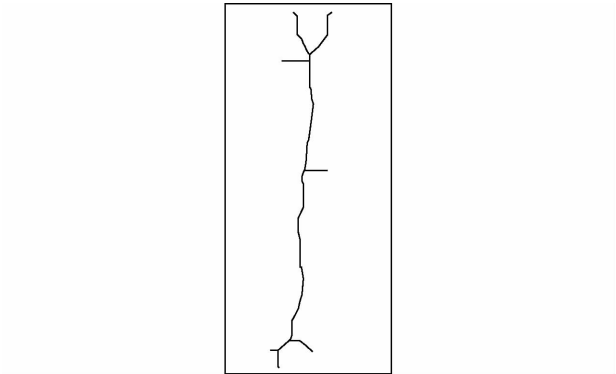


图 5 精简后的骨架

Fig. 5 Simplified pig skeleton

1.2.2 骨架扫描策略定位头部

获取生猪整体骨架后, 设计合理的扫描策略。检测步骤为:

(1) 扫描检测头部骨架右下角关键点 P 。在图 6 右下角位置, 按照从右到左、从下到上逐行扫描, 直到检测到第 1 个零点为止。该零点即为头部骨架右下角关键点 $P(x_p, y_p)$ 。

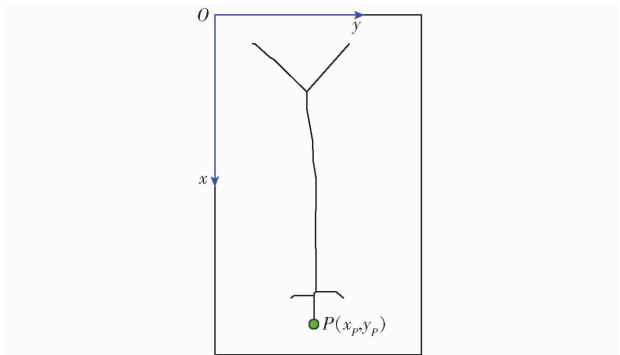


图 6 关键点 P 检测示意图

Fig. 6 Detection diagram of key point P

(2) 扫描检测图 7 所示头部骨架左侧关键点 Q 。根据点 P 所在位置, 设置点 Q 预设检测区域, 如虚线矩形框所示。首先以点 P 为基准, 求出预设检测区域左下角坐标 $K(x_k, y_k)$, 之后设置预设检测区域的长度和宽度, 进而确定预设检测区域。

在图 7 中, 按照从下到上、从左到右逐列扫描, 直到检测到第 1 个零点为止。该点即为头部骨架左侧关键点 $Q(x_q, y_q)$ 。

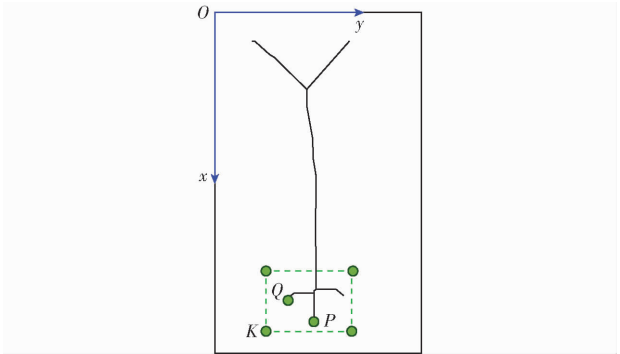


图 7 关键点 Q 检测示意图

Fig. 7 Detection schematic of key point Q

(3) 检测头部跟踪框体的关键点 A 。在图 8 中, 根据 x_p 和 y_q , 设置头部跟踪框体的高度和宽度的调节因子 ΔW 和 ΔH , 求出的跟踪框体左上角即为关键点 $A(x_a, y_a)$ 。使得跟踪框体覆盖整个头部区域, 如图 9 所示。

1.2.3 FDSST 算法骨架扫描策略改进

获取每帧头部位置后, 采用骨架扫描策略改进 FDSST 算法跟踪头部的步骤如下:

(1) 图像采集与预处理。对视频帧进行预处理, 获取精简骨架。

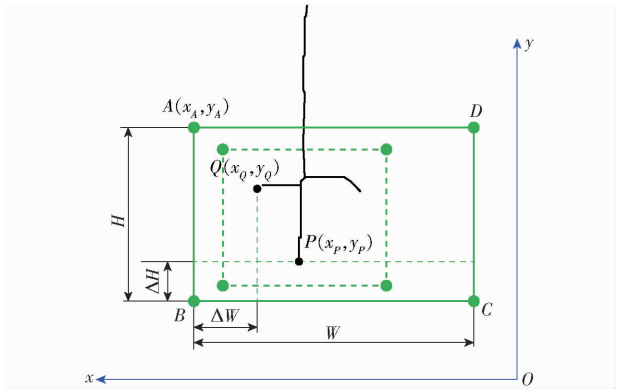


图 8 关键点 A 检测示意图

Fig.8 Detection schematic of key point A

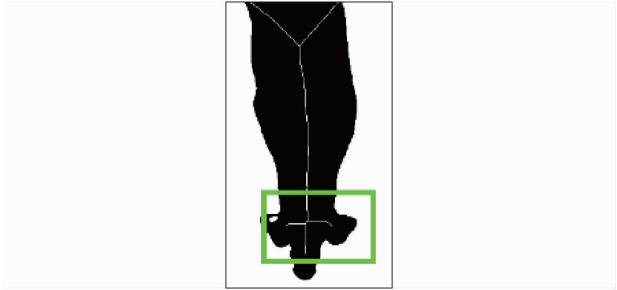


图 9 头部检测示意图

Fig.9 Head detection schematic

(2)确定首帧跟踪框位置。当视频帧中出现头部时,采用骨架扫描策略定位生猪热红外视频首帧头部跟踪框位置,并采用 FDSST 算法跟踪头部。

(3)更新头部跟踪框。检测当前帧是否是视频的倒数第 N 帧(本文取 $N = 5$),如果不是倒数第 N 帧,则采用 FDSST 算法连续跟踪 N 帧,之后重复步骤(1)、(2)。采用骨架扫描策略重新定位头部,采用新的头部位置作为 FDSST 算法的初始帧进行定位跟踪。如果是倒数第 N 帧,则停止跟踪,保存头部跟踪数据至数据库。

1.3 耳根体表温度提取方法

1.3.1 耳根体表温度提取

由于生猪耳根皮下血管分布比较密集,因此耳根位置的体表温度高于头部其他位置。将跟踪框平分为左右两部分,如图 10 所示,分别提取左右跟踪框的最高温区域作为左右耳根。用红色 3×3 矩形框表示耳根测温区域,取该区域 9 像素点温度均值作为该区域的温度。取视频中所有帧的温度均值作为该猪只的耳根体表温度。

1.3.2 误差校正

影响热红外温度测量结果的因素有距目标物的距离^[23-24]、辐射率^[2]、环境温湿度、光照、风速等环境因素^[25-26]以及硬件系统的温漂等。采用黑体对测量值进行校正的方法,可以获取环境因素和系统误差的综合误差,从而实现对测温结果

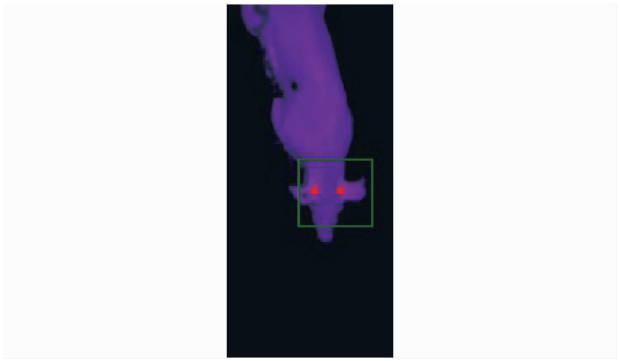


图 10 耳根检测示意图

Fig.10 Ear base detection schematic

的校正。

黑体有一个空腔,可以提供在 $-10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 之间的恒定准确温度。设置一个固定的黑体腔输出温度 T_b ,作为基准来校正误差。

黑体腔内壁边缘虚化会对黑体腔测温产生负面影响,因此需要减少黑体腔的检测区域。设定黑体腔的有效区域为以 $2/3$ 黑体腔半径为半径的圆形区域,如图 11 蓝色圆形区域所示。



图 11 检测的黑体腔区域

Fig.11 Black body cavity region of detection

以有效区域的平均温度作为黑体检测温度。环境因素和系统误差构成的综合误差 ε 计算公式为

$$\varepsilon = T_b - T_B \tag{1}$$

式中 T_b ——黑体腔检测温度

误差校正前的左、右耳根温度为 T_l, T_r ,采用黑体校正法校正后的左、右耳根温度计算公式分别为

$$T_L = T_l - \varepsilon \tag{2}$$

$$T_R = T_r - \varepsilon \tag{3}$$

式中 T_L ——校正后的左耳根温度

T_R ——校正后的右耳根温度

2 结果与分析

2.1 改进的 FDSST 算法跟踪生猪头部性能分析

基于热红外的生猪耳根体表温度自动检测试验于 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。参与试验的是 100 头 $30 \sim 50 \text{ kg}$

的大白猪。录制生猪在检测通道内自然行走期间的视频。

随机选择 30 段视频数据,分帧后获得 4 581 帧原始图像,其中通道内有猪只通过的共 2 897 帧。对这 2 897 帧中的生猪头部进行标定,建立生猪头部数据集。对 30 段视频采用改进的 FDSST 算法进行跟踪。

将改进的 FDSST 算法与 FDSST 算法进行比较,跟踪效果如图 12、13 所示。可见改进的 FDSST 算法初始帧的跟踪方法可以有效减少颈部和耳部的漂移。

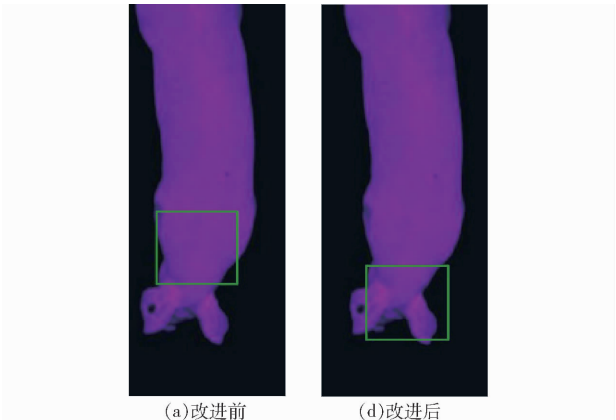


图 12 改进前后 FDSST 算法颈部跟踪效果对比

Fig. 12 Comparison of neck tracking effects

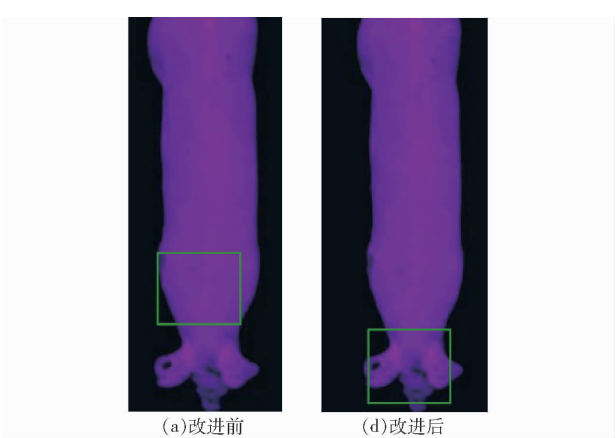


图 13 改进前后 FDSST 算法耳部跟踪效果对比

Fig. 13 Comparison of ears tracking effects

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跟踪算法的性能^[27]。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。将改进的 FDSST 算法分别与跟踪性能较优的骨架扫描法、FDSST 算法、压缩感知跟踪算法和核相关滤波跟踪算法进行比较,结果如表 1 所示。

由表 1 可看出,本文算法在阈值为 20 像素时的跟踪精度达到 66.24%,分别比 FDSST 算法、压缩感

表 1 不同算法跟踪性能对比

Tab.1 Comparison of tracking performance of different algorithms

算法	平均精确度/ %	平均帧速/ (f·s ⁻¹)
改进 FDSST 算法	66.24	34.46
FDSST 算法	58.42	245.56
压缩感知跟踪算法	54.42	36.62
核相关滤波跟踪算法	57.46	116.43

知跟踪算法和核相关滤波跟踪算法高 7.82、11.82、8.78 个百分点。

在运行速率上,本文算法的平均帧速为 34.46 f/s,虽然低于其他 3 种算法,但是在线检测系统的平均帧速要求为 25 f/s 以上,本文算法满足养殖场在线监测的要求。因此,与 FDSST 算法相比,本文算法在保证跟踪速度的情况下,提高了头部检测的精度。

2.2 耳根体表温度提取准确性分析

从数据集中随机选取 5 头猪只视频,用来检测耳根体表温度检测的准确性。

把采用 FLIR Tools 软件人工检测的左右耳根温度作为真值。人工选取每段视频中姿态端正的 3 帧,分别求出这 3 帧中左耳根温度的平均值,作为左耳根的温度真值 T_{FTL} 。右侧耳根温度计算方法类似,用 T_{FTR} 表示。

表 2 为试验结果,其中 δ_L 为猪只左耳根的真值 T_{FTL} 与测量值 T_L 之间的误差。 δ_R 为猪右耳根的真值 T_{FTR} 与测量值 T_R 之间的误差。

表 2 人工检测和算法检测的不同生猪的左右耳根温度与误差

Tab.2 Results and errors of different pig ear base surface temperatures detected by manual detection and algorithm

℃						
猪只序号	T_L	T_{FTL}	δ_L	T_R	T_{FTR}	δ_R
1	38.31	38.23	0.07	38.08	38.18	0.10
2	37.55	37.23	0.32	37.35	37.47	0.11
3	37.14	37.07	0.07	36.98	36.93	0.05
4	38.36	38.50	0.14	38.18	38.33	0.16
5	38.30	38.23	0.20	38.15	37.90	0.25

猪只序号	T_L	T_{FTL}	δ_L	T_R	T_{FTR}	δ_R
1	38.31	38.23	0.07	38.08	38.18	0.10
2	37.55	37.23	0.32	37.35	37.47	0.11
3	37.14	37.07	0.07	36.98	36.93	0.05
4	38.36	38.50	0.14	38.18	38.33	0.16
5	38.30	38.23	0.20	38.15	37.90	0.25

由表 2 可知, δ_L 和 δ_R 的最大值为 0.32℃。本文算法实现了生猪耳根体表温度的自动提取,其精度可以用于生猪体温的筛查与预警。

图 14 为出现较大误差的帧。图 14a 虽然准确定位到耳根,但是生猪低头侧偏,导致耳根没有正对热像仪,造成测量误差较大。

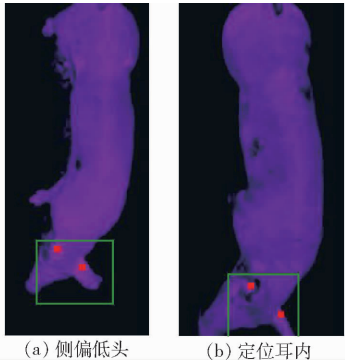


图 14 头部侧偏测温误差图

Fig.14 Head lateral temperature measurement error diagrams

图 14b 中,由于猪只头部出现较大姿态偏转,造成左耳根定位到左侧耳内部,而耳内温度比耳根温度高,因此出现高温偏差。

3 结 论

(1)利用骨架扫描策略改进 FDSST 算法的生猪耳根体表温度检测方法,能够有效解决生猪头部自动跟踪和耳根体表温度自动提取问题。结果表明,本文算法适用于在检测通道内自然行走的生猪,平均跟踪精确度比改进前的 FDSST 算法提高了 7.82 个百分点,高于性能较好的压缩感知跟踪算法和核相关滤波跟踪算法。

(2)本文算法能够无损、无应激地自动提取生猪耳根体表温度。试验结果表明,本文算法与人工检测法的最大温度误差为 0.32℃,可以用来进行生猪日常健康评估和异常预警。

(3)本文算法的平均跟踪帧速为 34.46 f/s,满足监测实时性的需求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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.

[3] SYKES D J, COUVILLION J S, CROMIAK A, et al. The use of digital infrared thermal imaging to detect estrus in gilts[J]. Theriogenology, 2012, 78(1): 147 – 152.

[4] 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)

[5] JARA A L, HANSON J M, GABBARD J D, et al. Comparison of microchip transponder and noncontact infrared thermometry with rectal thermometry in domestic swine (sus scrofa domestica) [J]. Journal of the American Association for Laboratory Animal Science: JAALAS, 2016, 55(5): 588 – 593.

[6] 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.

[7] 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)

[8] YÁÑEZ-PIZAÑA A, MOTA-ROJAS D, RAMÍREZ-NECOECHEA R, et al. Application of infrared thermography to assess the effect of different types of environmental enrichment on the ocular, auricular pavilion and nose area temperatures of weaned piglets[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 33 – 42.

[9] 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)

[10] QU Z, JIANG P, ZHANG W. Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(14): 3851 – 3877.

[11] MOE R O, FLØ 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 & Technology, 2018, 92: 381 – 386.

[12] LOKESHBABU D S, JEYAKUMAR S, VASANT P J, 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.

[13] 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.

[14] BARRETO C D, ALVES F V, RAMOS C E C D, et al. Infrared thermography for evaluation of the environmental thermal comfort for livestock[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 63(3): 1 – 8.

[15] ZHANG C, XIAO D, YANG Q, et al. Review: application of infrared thermography in livestock monitoring[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(2): 389 – 399.

[16] 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.
- [17] EDGAR J L, NICOL C J, PUGH C A, et al. Surface temperature changes in response to handling in domestic chickens[J]. *Physiology & Behavior*, 2013, 119: 195 – 200.
- [18] 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.
- [19] 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)
- [20] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F S, et al. Accurate scale estimation for robust visual tracking[C] // *British Machine Vision Conference*, 2014.
- [21] DANELLJAN M, HAGER G, KHAN F S, et al. Discriminative scale space tracking[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(8): 1561 – 1575.
- [22] YAO C, DUAN M, HE X, et al. Review of temperature measurement technology with infrared thermal imager[C] // *China International Conference on Electricity Distribution*, 2018: 1065 – 1067.
- [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] ZHANG Y, CHEN Y, FU X, et al. A method for reducing the influence of measuring distance on infrared thermal imager temperature measurement accuracy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 1095 – 1101.
- [25] TALUKDER S, THOMSON P C, KERRISK K L, et al. Evaluation of infrared thermography body temperature and collar-mounted accelerometer and acoustic technology for predicting time of ovulation of cows in a pasture-based system[J]. *Theriogenology*, 2015, 83(4): 739 – 748.
- [26] VIEIRA SALLES M S, 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(A): 63 – 69.
- [27] 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/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 256 – 260, 242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s040&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.040. (in Chinese)
-

(上接第 332 页)

- [25] 刘刚, 张伟洁, 郭彩玲. 基于动态 K 阈值的苹果叶片点云聚类与生长参数提取[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 163 – 169, 178. LIU Gang, ZHANG Weijie, GUO Cailing. Apple leaf point cloud clustering based on dynamic-K-threshold and growth parameters extraction[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 163 – 169, 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190418&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.018. (in Chinese)
- [26] 郭彩玲, 刘刚. 基于三维点云的苹果树冠层点-叶模型重建方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 173 – 180. GUO Cailing, LIU Gang. Reconstruction method of apple tree canopy point leaf model based on 3D point clouds[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 173 – 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200420&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.020. (in Chinese)
- [27] SU J Y, WU F F, AO Z R, et al. Evaluating maize phenotype dynamics under drought stress using terrestrial LiDAR[J]. *Plant Methods*, 2019, 15: 11.
- [28] JIN S C, SU Y J, GAO S, et al. Deep learning: individual maize segmentation from terrestrial LiDAR data using faster R-CNN and regional growth algorithms[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 866.
- [29] 刘立超, 张青松, 肖文立, 等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 38 – 47. LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(12): 38 – 47. (in Chinese)
- [30] 徐胜勇, 卢昆, 潘礼礼, 等. 基于 RGB-D 相机的油菜分枝三维重构与角果识别定位[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 21 – 27. XU Shengyong, LU Kun, PAN Lili, et al. 3D reconstruction of rape branch and pod recognition based on RGB-D camera[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 21 – 27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190203&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.003. (in Chinese)