

计算机视觉技术在家禽养殖与公鸡选种中应用综述

孙一平 李 丹 蔺旭鸿 陈一飞
(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 我国家禽养殖规模和数量在不断扩大,智能化养殖是当前家禽饲养监管的热点研究方向。计算机视觉技术能够提供无创、非侵入式、低成本、高效益的动物行为识别方式,用于检测鸡群活动水平、诊断疾病和发现死禽。总结了用于检测鸡和识别鸡行为的视觉系统,并从表型参数和行为参数两方面分别回顾了与繁殖性能的相关关系、表型性状特征提取与识别以及行为识别算法;分析了当前视觉系统存在的问题并提出其优化策略;讨论了基于计算机视觉技术选留优质种公鸡的可行性,并初步提出了公鸡选种算法框架。最后展望了计算机视觉技术在家禽养殖行业的应用前景及优化方向。

关键词: 计算机视觉; 种公鸡; 行为识别; 表型性状; 繁殖性能

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0219-10

Computer Vision in Poultry Breeding and Rooster Selection

SUN Yiping LI Dan LIN Xunhong CHEN Yifei
(College of Information and Electronics Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With Chinese poultry production scale and quantity expanding, intelligent breeding is the current hot research direction of the regulation of poultry. Computer vision technology can be used to provide a noninvasive, non-invasive, low-cost and highly effective way to identify animals' behaviors to detect the activity level, diagnose the diseases of chickens and find the dead ones. The visual systems of chicken detection and behavior recognition were summarized, and the correlativity between the phenotypic parameters, behavior parameters and reproductivity respectively, phenotypic feature extraction and recognition and behavior recognition algorithm were reviewed; the problems in visual system were analyzed, the optimization strategy was put forward; the feasibility of using computer vision technique to select high quality breeder rooster was discussed, and the rooster selection algorithm framework was preliminarily proposed. Finally, the applied prospects and the optimization directions of computer vision technology in the poultry industry were expected.

Key words: computer vision; breeding rooster; behavior recognition; phenotypic characteristic; reproductivity

0 引言

计算机视觉利用计算机模拟人类视觉系统,使计算机获得类似人类能够提取特征、处理特征、理解和分析图像的能力。应用计算机视觉技术可提取影响繁殖性能的表型特征来对种公鸡繁殖性能进行识别,进而实现对种公鸡的选种。这为家禽智能化养殖领域提供了新的发展方向,并且在提高动物福利

的同时推动了计算机视觉技术在养殖方面的应用,加速推进农业与人工智能领域的全面结合。提高动物福利的同时快速、高效地筛选繁殖潜力较好的种公鸡进行选留是一个全新领域,可为家禽生产企业淘汰繁殖潜力低的公鸡,增加雏鸡出栏量,实现低成本到高效益的转化。

目前基于计算机视觉技术实现智能化家禽饲养的研究受到了国内外学者的广泛关注。本文首先总

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-09-10
基金项目: 国家重大科技基础建设项目(4444-1009609)
作者简介: 孙一平(1996—),女,硕士生,主要从事农业人工智能研究,E-mail: sunyiping@cau.edu.cn
通信作者: 陈一飞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事人工智能与农业机器人研究,E-mail: glhfei@126.com

结应用于家禽养殖的视觉识别系统,并从公鸡表型参数、行为参数两方面分别回顾与繁殖性能的相关关系以及计算机视觉技术在家禽表型特征提取、行为识别方面的研究;分析当前视觉系统存在的问题并提出其优化策略;最后初步提出公鸡选种算法框架,展望计算机视觉技术在家禽养殖行业的应用前景及优化方向。

1 背景

世界人口对家禽需求的不断增长刺激了家禽养殖产业的发展,其主要原因是家禽肉制品提供了相对低成本的动物蛋白^[1]。人均生活水平的提高和饮食变化致使对鸡蛋的需求日益增加。2016 年,世界鸡蛋产量达到近 7.4×10^7 t,几乎是 1990 年产量的两倍^[2]。随着鸡蛋需求量逐年上升,蛋种鸡产业的持续发展关系到国家经济和人民对生活质量的需求。农业农村部在《“十三五”农业科技发展规划》中明确指出充分发挥科技对农业现代化建设的作用,其中包含以蛋鸡和肉鸡等为对象的畜禽育种重大科技任务,创建优秀核心育种群,开展标准化、规范化基础性育种和畜禽育种繁殖新技术等研究,完善畜禽良种扩繁体系,提升主要畜禽良种自主供种能力。

目前,国内饲养技术的进步和管理水平的提高使得母鸡的产蛋潜力得到了有效挖掘。家禽养殖产业在扩大笼养规模的同时,需要在保持母鸡产蛋率的基础上,不断寻找有效提高种公鸡繁殖性能的方法。精液品质直接影响公鸡的繁殖潜力^[3-7],具体取决于精子浓度、精子存活率和精子活力^[8],其中精子活力作为新陈代谢活动和精子存活率的间接衡量指标对能否正常受精至关重要^[9]。种公鸡精液品质不仅影响着种蛋的受精率和孵化率^[10],而且还影响鸡的人工授精和雏鸡质量。受精率是决定种鸡繁殖效率的重要因素,同时也与种鸡场的经济效益密切相关。因此,家禽养殖中选择优良种公鸡能够降低饲养成本、提高公母比,保证种蛋受精率、雏鸡品质、种鸡场经济效益。

在实际生产中,种公鸡的精液品质在个体之间存在很大差异。确保种公鸡繁殖性能最直接有效的方式是对进入性成熟期的种公鸡逐一进行精液品质检测,淘汰不育和精液品质低的雄性可提高群体的繁殖力^[11]。但这种方法存在精液质量检测程序复杂、检测设备和成本要求高、检测速度慢且难以进行大规模推广等问题。另一种方法是筛选外观发育良好、体型硕大^[12-16]、胸宽宽阔^[17-18]、腿部健壮^[19-22]、鸡冠^[23-27]和肉髯^[28-30]厚实且颜色鲜亮等

与精液品质和性成熟程度呈正相关的表型性状,此过程贯穿种公鸡整个生长发育阶段。依靠人工肉眼选留表型性状良好的种公鸡不仅受到人为主观因素影响,判断误差较大,且评估单个禽类的繁殖潜力是一项耗时、耗力、高成本的工程,同时近距离观察个体会引起群体应激反应,降低了动物福利也增加了人畜共患病的风险。

2 鸡表型与行为检测视觉系统

家禽养殖中视觉识别系统由视觉传感器、图像或视频处理分析算法以及输出部分组成。对获取的鸡行为视频、表型图像数据应用视觉算法实现鸡行为分类、生长状况评估和疾病检测等。采集数字图像信息所用到的视觉传感器有可见光相机(CCD 相机或 CMOS 相机)、深度相机和红外热成像仪,通过图像算法完成识别目标的任务。

2.1 可见光相机视觉系统

许多学者利用可见光相机获取鸡舍俯视图,实现对鸡个体的行为识别与目标跟踪。刘修林^[31]利用多 CMOS 相机以垂直俯拍的安装方式获取鸡在舍内的活动行为信息,实现啄食、饮水、运动、静止以及群体行为的识别;LEROY 等^[32]在俯视角下利用多 CCD 相机判别个体蛋鸡姿态从而识别站立、坐卧、睡觉、梳理、抓挠以及啄食行为;劳凤丹等^[33]使用单 CMOS 相机获取俯视图,完成单只蛋鸡运动、饮水、采食、修饰、抖动、休息、拍翅膀、探索、举翅膀 9 种行为的识别;WANG 等^[34]利用单 CMOS 相机在俯视拍摄中完成对个体蛋鸡的目标跟踪。

另有学者对整个鸡群的活动进行图像采集,在对个体行为识别的基础上,实现对群体的目标跟踪与整体的活动检测。FUJII 等^[35]用配有鱼镜头的单 CMOS 相机获取鸡群俯视图实现同时跟踪多个目标,用于分析感染禽流感的家禽行为;KRISTENSEN 等^[36]利用单 CMOS 相机采集俯视角度下肉鸡群体连续图像,通过群体运动的变化量来监测鸡群聚集等异常行为;VAN HERTEM 等^[37]采用多 CMOS 相机组成的视觉系统作为行为监测工具从俯视角度来识别肉鸡可能出现的步态问题。

2.2 深度相机视觉系统

为了精确识别行为与运动轨迹,利用深度信息识别动物行为成为研究热点之一。劳凤丹等^[38]利用 Kinect 相机采集俯视角下蛋鸡深度图像,对采食、躺、站和坐等行为进行识别。PU 等^[39]将 Kinect 相机安装于鸡舍天花板以获得融合彩色和深度图像的多模态图像来提取特征信息,实现对家禽聚集行为的识别。

当多目标相互遮挡时,二维特征信息容易丢失,而三维视觉系统所采集的空间信息对个体鸡的行为识别更加准确。NAKARMI 等^[40]将具有 TOF (Time of flight) 技术的 3D 成像传感器 Cambube3 置于鸡笼顶部获取俯视视角的深度图像,以无线射频技术为辅助手段对蛋鸡进行连续跟踪;AYDIN^[41]利用一台 3D Kinect 相机采集俯视角度下肉鸡行走视频,对鸡背部姿态进行三维重建用于跛行行为的识别。

2.3 红外热成像仪视觉系统

红外热成像技术对温差敏感且不受光照影响,是一种非接触式的红外电磁波探测方式,可有效识别温度分布情况。ZANINELLI 等^[42]从安装于蛋鸡养殖场的热像仪中获取俯视视角下的红外热成像,利用模式识别技术识别蛋种母鸡个体。

3 家禽表型参数相关性与识别

当前商品父母代蛋鸡和肉鸡养殖模式以传统笼养与人工授精相结合进行生产,笼养空间的局限性极大地限制了鸡的行为表达能力,而公鸡的表型性状与精液品质具有一定的相关性^[12-30],使其能够作为判定繁殖能力的指标。

3.1 公鸡表型性状与繁殖性能关系

鸡驯化过程中进化出适应新环境的基因,导致形态、生理和行为的显著表型变化^[43]。质量^[12-16]、胸围^[17-18]、胫长^[19-22]、鸡冠^[23-27]、肉髯^[28-30]和喙长^[44]主要表型性状与精液品质之间的相关性表明通过表型性状判定精液品质优劣具有一定的可行性。

3.1.1 质量相关性

不同的研究表明,公鸡质量在适当范围内与繁殖性能呈正相关,即质量越大,繁殖性能相对越好。JONES 等^[12]在研究不同品系来亨鸡时发现,高繁殖力品系的雄性成熟得更早、产生更多的精液并且明显比低繁殖力品系雄性质量大。SOLLER 等^[13]研究种公鸡子代之间以及个体之间质量增长速率与繁殖力的遗传相关性皆为负相关且前者更加显著。

ANSAH 等^[14]采用逐步回归分析的方法表明,在人工授精的条件下,6 周龄质量较大的商品父母代肉种公鸡可能具有更好的生殖能力;精液量与 8 周龄的公鸡胫长呈显著正相关,精子浓度与 8 周龄的公鸡胸角呈正相关。李曙光等^[15]研究发现,不同日龄公鸡获得较好精液品质的适宜质量并不相同,即 136 日龄公鸡质量为 2.05 ~ 2.5 kg 时,368 日龄公鸡质量为 2.75 ~ 2.95 kg 时,公鸡射精量多,精子活力和精液密度大。GEBRIEL 等^[16]研究发现质量较大公鸡精液在精子浓度、活精子数、精子活力上

显著高于质量较小公鸡和对照组公鸡。

3.1.2 胸围相关性

胸围同样与繁殖性能相关,尤其是与精子密度相关。王志跃等^[17]经过统计分析表明,在公鸡体型结构的选育中,应注重对质量和胸围的选择,而将胫长控制在适当的水平,则在改善质量和体型结构性状的同时不会严重影响公鸡的精液品质。贾汝敏等^[18]运用典型相关分析方法发现体尺性状与精液品质存在相关关系,它们之间的相关主要是由胸围和精子密度之间密切相关引起的,且此相关为负相关。

3.1.3 鸡冠相关性

鸡冠是鸡第二性征中最明显、最重要的特征,常用作衡量性成熟程度的指标。MCGARY 等^[23]研究两个主要肉鸡育种品系的育性差异,并寻找与育性一致的表型性状。结果表明能够将鸡冠面积作为雄性繁殖性能的可靠指标,以便从繁殖群体中识别和剔除亚育性雄性,提高肉鸡群整体育性。NAVARA 等^[24]研究了鸡冠大小和颜色与精液品质的关系,发现鸡冠大小与精子活力呈负相关,而鸡冠颜色与精子活力呈正相关。鸡冠颜色信号与精子质量的关系支持表型联系繁殖能力假说。

IFEANYICHUKWU^[25]运用主成分分析和多元线性回归确定蛋种公鸡体尺与精液特征之间的关系,其中鸡冠长、喙长与精子浓度呈显著正相关。胫长、喙长、大腿长和肉髯长对精子活力的变化贡献显著,可用于预测精子活力;质量对精子浓度的变化贡献显著,可用于预测精子浓度。赵振华等^[26]对鸡冠大小和公鸡血液中性激素含量的比较分析表明高鸡冠能为优质肉公鸡早熟性状的进一步选育提供依据,以提高生殖期的繁殖能力。TALEBI 等^[27]将同周龄但不同表型性状的肉种公鸡分成最佳、中等、最差表型性状 3 组,分别对不同组检测精液特征,结果表明最佳表型性状种公鸡的精液品质检测指标相较于另两组更高。

3.1.4 肉髯相关性

表型性状之间的正相关和显著相关意味着一个性状的改变会对其他性状产生积极影响,肉髯、鸡冠次级性特征可作为种公鸡数量性状的选择性状^[28]。GALAL^[29]研究表明质量、胫长、鸡冠和肉髯长度是公鸡精液品质的良好预测因子,从选育角度上对次级性特征的任何选择性改变都会导致公鸡繁殖力降低、性欲减少。GEBRIEL 等^[16]研究公鸡精液物理性状与遗传、生理之间的关系表明鸡冠、肉髯次级性特征与大部分精液物理性状呈正相关,同时与大部分精液的遗传性状呈正相关。MCGARY 等^[30]在进

一步的研究中发现肉鸡肌肉骨骼性状以及次级性特征能表明肉种公鸡遗传品系中的雄性育种水平,即形态性状有助于预测生育能力。

3.1.5 胫长相关性

多项研究指出胫长与表达繁殖性能的精液量、精子活力等指标相关,能够作为改善繁殖性能的可靠指标。GALAL 等^[19]指出控制胫、鸡冠、肉髯长度的基因往往与公鸡射精量和精子浓度遗传基因相关。魏法山等^[20]在研究快羽固始鸡体尺与繁殖性状间关系中表明胫长与死精子率、精子计数呈显著正相关。PRIETO 等^[21]对蛋种公鸡表型性状与精液品质的相关性研究得到胫长与精子活力呈负相关。IBRAHIM 等^[22]对 4 种不同品系的公鸡次级性特征

和精液性状进行相关分析得到胫长、肉髯长和宽、鸡冠长和宽与射精量、精子数以及正常精子数分别呈正相关;其中胫长与精子活力呈正相关,与活精子数呈负相关,表明选择较大胫长、鸡冠和肉髯能改善精液品质并提高群体繁殖性能。

3.1.6 喙长相关性

公鸡个体间喙长的差异虽小,但基于多元线性回归分析表明喙长能够良好预测精子浓度和精子活力。UDEH 等^[44]研究得到公鸡喙长与精子浓度和精子活力、鸡冠长与精子浓度、胫长与精子活力呈显著正相关。公鸡主要表型性状与精液品质相关关系如表 1 所示,其中“+”表示正相关;“++”表示显著正相关;“-”表示负相关。

表 1 公鸡表型性状与精液品质相关关系
Tab.1 Correlationship between phenotypic characteristic and semen quality in rooster

精液质量指标	精液量	精子浓度	精子活力	活精子数	精子总数
体质量	+ ^[12]	+ ^[15-16] 、++ ^[25]	+ ^[15-16]	+ ^[16]	
胸围		- ^[18]			
鸡冠长	+ ^[22]	++ ^[25,44]		+ ^[22]	+ ^[22]
鸡冠宽	+ ^[22]			+ ^[22]	+ ^[22]
鸡冠颜色			+ ^[24]		
肉髯长	+ ^[22]		++ ^[25]	+ ^[22]	+ ^[22]
肉髯宽	+ ^[22]			+ ^[22]	+ ^[22]
胫长	++ ^[15] 、+ ^[22]		++ ^[25,44,21] 、+ ^[22]	+ ^[22]	++ ^[20] 、+ ^[22]
喙长		++ ^[25,44]	++ ^[25,44]		

3.2 鸡表型性状特征提取与识别

公鸡主要表型性状与繁殖性能具有相关性,则可以利用计算机视觉技术和图像分析提取鸡表型性状特征以达到判别繁殖性能优劣的目的。现阶段以表型性状特征提取为基础的研究实现了鸡只目标分割与提取、质量预测、疾病监测和死禽检测等用途。

3.2.1 鸡只目标分割与提取

图像目标提取主要采用分水岭算法、阈值分割法、K 均值聚类、最大类间方差法以及深度神经网络等理论方法。NAKARMI 等^[40]采用背景差分法对蛋鸡图像进行前景检测,使用各向异性扩散滤波器对前景图像进行滤波增强蛋鸡的轮廓,然后利用改进的分水岭算法进行分割。劳凤丹等^[38]根据蛋鸡躯干部分高度比相互粘连区域高度高的特点,获取蛋鸡群深度图像信息并将低于粘连蛋鸡连通区域平均高度一定程度的像素点赋值为 0,实现对蛋鸡躯干粘连的分割。ZHUANG 等^[45]采用 K 均值聚类与 Lab 椭圆模型相结合来弥补边缘分割的不足,该方法提取的边缘平滑、准确且具有鲁棒性,使分割效果更加准确。刘修林^[31]针对真实舍内平养蛋鸡复杂饲养环境,将图像分割成相同大小的区域,对每个区

域使用最大类间方差分割方法避免因光照不均对图像分割产生大量噪声;通过形态学开运算滤除鸡舍图像中的细丝网;设定单只鸡体面积阈值,在滤除小面积伪目标的同时重新绘制目标区域轮廓,最终得到分割效果良好的鸡群二值化图像。

在个体识别方面,ZANINELLI 等^[42]从安装于蛋鸡养殖场的热像仪中获取红外热成像,通过计算图像中温度高于定义阈值的像素数实现蛋种母鸡个体的检测,在实际工作条件下达到 98.7% 的灵敏度和 95.1% 的特异性。

3.2.2 质量预测

在商业家禽饲养场中,质量是最直接关联繁殖性能的指标,淘汰质量较小鸡只能够提高鸡群整体育性,利用计算机图像处理技术预测质量可实现判别鸡只繁殖性能的优劣。当前鸡只质量预测研究主要通过将质量相关的特征描述子如体表面积与质量建立回归方程。MOLLAH 等^[46]将采集到的图像用栅格图像分析软件(IDRISI 32)进行分析确定肉鸡的体表面积,并建立由体表面积像素估计肉鸡质量的线性方程,进而对肉鸡质量进行预估。DE WET 等^[47]同样是基于体表面积像素个数和边缘像素个

数建立非线性回归方程估算肉鸡日质量变化,平均质量相对误差约为 11%。MORTENSEN 等^[48]基于 3D 摄像机采用分水岭算法对图像进行分割后提取 12 个不同的质量描述子,最后采用贝叶斯人工神经网络对肉鸡质量进行预估。AMRAEI 等^[49]采用广义 Hough 变换的椭圆拟合算法对鸡舍内的肉鸡进行定位,并用 Chan - Vese 方法去除鸡头和鸡尾来减少额外的误差,并提取面积、凸面面积、周长、偏心率、长轴和短轴长度 6 个特征进行活体肉鸡质量预测,结果表明与人工测量基本一致。

3.2.3 疾病检测

健康状况不良的公鸡由于生理机能失调其精子生长过程将会受影响,任何疾病的发生都会不同程度地降低精液的品质,影响鸡群的繁殖性能。通过疾病检测可预测繁殖性能优劣,疾病检测主要通过捕捉姿态特征并结合分类器实现。ZHUANG 等^[45]利用细化算法得到肉鸡骨骼的拓扑结构,构建了 7 个特征向量来描述健康鸡和病鸡的姿态特征,使用多项式核函数的支持向量机在测试样本上的准确率高达 99.469%,实现准确、快速地识别出肉鸡的健康状况。郑双阳等^[50]开发了识别病、死鸡自动化监视系统,通过对高阶直立式鸡笼内蛋鸡进食时的腿部图像进行图像处理,计算特征区域的面积并与蛋鸡俯卧时特征面积作比较,来判断是否存在病、死鸡。

3.2.4 死鸡检测

公鸡选种首先排除病死鸡,从健康公鸡中选择繁殖性较好的留作种用,能够降低传播扩散疫病风险的同时确保繁殖性能。计算机视觉技术可以实现无接触、无人为主观因素影响且实时进行死鸡检测,大大降低了生产所需成本并提高了检测效率。ZHU 等^[51]提出了一种基于支持向量机的死禽自动检测方法,采用中心辐射向量表示法作为提取的轮廓特征,将在同一鸡笼上连续采集两幅图像的向量差作为支持向量机的输入,实验结果表明该方法的分类可行性好、速度快、准确率超过 95%。但鸡笼栅栏、拍摄角度和灯光过暗等问题都会增加图像提取特征的难度,造成图像分类结果的误差。彭彦松^[52]对鸡笼图像选用 Lab 颜色空间模型,将 *a* 分量作为特征量将原图转换为灰度图像,采用改进的最大类间方差法和抗噪形态边缘检测算子对其进行分割和边缘检测,提取鸡冠周长、面积、偏心率、复杂度和球形性特征对最小二乘支持向量机进行训练,将训练好的分类器对有无死鸡进行分类,检测率达到 92% 以上,能够及时准确地检测死鸡。

4 家禽行为参数相关性与识别

目前种公鸡繁殖多采用人工授精和本交笼两种方式,其中以自然交配方式进行繁殖的本交笼饲养模式受公鸡行为参数的影响显著,因其充分利用了动物的交配本能,极大放大了行为参数在交配中的作用。本节阐明公鸡行为与繁殖性能之间的影响关系,并归纳总结利用计算机视觉技术实现目标追踪和行为识别研究。

4.1 公鸡行为与繁殖性能关系

个体行为与群体的等级结构、基因型的竞争与合作有着密不可分的关系,其中高等级地位公鸡的交配行为次数高于低等级地位^[53]。在公鸡选种工作中,行为参数包括交配行为、啄斗行为等能够反映大量的个体品质特征,尤其能够侧面反映繁殖性能。

4.1.1 交配行为相关性

交配积极性能在一定程度上反映公鸡的繁殖性能。ArAPOBAВНИИРГЖ 等^[53]对鸡舍中的鸡观察 10 min,记录公鸡完成和未完成的交配次数,求偶和拒绝的数量,对具有不同交配积极性的肉用公鸡研究其对繁殖性能的影响。结果表明对于交配积极的公鸡,蛋的受精率提高 3.0%,孵化率提高 4.0%,后代存活率提高 6.3%。

4.1.2 啄斗行为相关性

攻击行为增加和求偶频率降低是影响雄性肉种鸡繁殖能力的行为特征^[54]。林兴涛等^[55]利用亲缘鉴定技术探究种公鸡行为与遗传贡献率的相关性,实验结果表明罗曼粉父母代种公鸡各组内存在明显的啄斗序列,且斗性最弱的公鸡遗传贡献率最低,公鸡遗传贡献率与啄斗次数和交配行为次数呈正相关,且相关系数为 0.14 和 0.35。交配次数与啄斗次数相关系数为 0.21,说明具有啄斗行为的公鸡在交配方面具有一定优先权,为选择高繁殖性能的公鸡提供可能性。

4.2 鸡行为识别

有研究表明,鸡的日常行为能反映健康状况,从而侧面反映繁殖性能。目前,利用计算机视觉技术已经实现了目标跟踪、鸡站立、坐卧、啄食饮水、踱足行为识别以及活动水平评估的检测。

4.2.1 目标跟踪

目标跟踪是行为识别的前提,只有持续地跟踪并检测各种行为才能准确全面地评估健康状况与繁殖性能。鸡只目标跟踪包括基于特征的鸡只跟踪、基于无线射频辅助的鸡只跟踪和基于模型的鸡只跟踪。

(1) 基于特征的鸡只跟踪。SERGEANT 等^[56]

开发了一个基于颜色信息的跟踪系统,在视频序列的每一帧上标记个体的质心给出帧到帧间的对应关系来表示跟踪轨迹。FUJII 等^[35]用颜色和轮廓信息开发了一个基于粒子滤波算法的家禽跟踪系统,可同时跟踪多个目标,用于分析感染禽流感的家禽行为。WANG 等^[34]提出了一种基于混合支持向量机(HSVM)的个体蛋鸡自动跟踪算法,利用方向梯度直方图检测蛋鸡,有效地描述了蛋鸡的轮廓,并将蛋鸡位移和身体角度纳入跟踪策略,相比于常规方法具有更好的实时性和鲁棒性。但算法的局限性在于方向梯度直方图是基于目标边缘梯度,如目标被长时间遮挡,HSVM 算法也会丢失目标。

(2)基于无线射频辅助的鸡只跟踪。NAKARMI 等^[40]利用 3D 视觉摄像机捕捉蛋鸡俯视图,将前一帧识别的区域和当前帧分割的分水岭区域之间的重叠部分来检测蛋鸡,同时每只蛋鸡腿下部捆绑一个无线射频识别(Radio frequency identification devices, RFID)应答器,有助于在视觉无法正确跟踪的情况下进行定位,在无线射频识别系统的支持下能够精确跟踪群体中的个体。该方法虽然可以获得准确的跟踪结果,但为每只蛋鸡佩戴 RFID 不利于实际应用,也会增加蛋鸡不适感而间接影响行为。

(3)基于模型的鸡只跟踪。FANG 等^[57]提出了基于深度回归网络的个体肉鸡跟踪算法 TBroiler,参考了 AlexNet 的网络结构确定了其由 5 个卷积层和 3 个全连接层组成。与现有的算法如 MeanShift、多任务学习和跟踪学习检测等相比,该算法在重叠率、像素误差和失效率方面都有较好的表现。但当肉鸡快速行走时,该跟踪算法容易丢失目标。

4.2.2 站立与坐卧行为识别

群养鸡站立与坐卧行为是否正常是判断其健康状况的重要依据,长时间坐卧可视为患病表现。LEROY 等^[32]开发了一种计算机视觉系统,能够连续测量个体蛋鸡的行为并识别为 6 种不同的行为,包括站立、坐卧、睡觉、梳理、抓挠以及啄食。根据鸡俯视图中的轮廓提取姿势的参数表示,构建姿势模型参数的时间序列,为每个行为类型预定义姿势的参数模板。实验表明该系统的分类结果介于70% ~ 96%之间,识别睡眠和站立行为的效果最佳分别为96%和90%,而对啄食行为的识别精度仅为21%,这是由对鸡头部难以精准追踪导致的。

4.2.3 啄食饮水行为识别

啄食饮水行为识别分为识别鸡体姿态和鸡位置区域两种方式。MEHDIZADEH 等^[58]对肉鸡摄食过程中出现的特定部位运动进行检测,通过对视频帧进行阈值化处理计算眼睛中心位置并建立坐标系获

取头部高度变化,采用大津法确定上下喙尖位置并计算欧几里得距离以确定咬合运动速度和加速度,该方法能够精确地对家禽进食中颞部的机械过程进行检测。劳凤丹等^[33]开发了一种针对单只蛋鸡的计算机视觉行为识别模型,将俯视角度鸡群 RGB 原图转换成 Lab 颜色模型,提取个体质心点坐标、面积、周长、移动位移等 17 个描述蛋鸡行为的关键参数。利用像素间的欧氏距离对运动、饮水、采食行为进行识别,识别率达到 99.4%、80.7%、87.3%,在不属于以上 3 种行为的前提下使用朴素贝叶斯对其中 10 个特征参数建立识别模型,识别率依次为修饰 81.6%、抖动 69.8%、休息 86.2%、拍翅膀 100%、探索 54.0%、举翅膀 64.6%。刘修林^[31]通过椭圆拟合边缘轮廓得到鸡体的位置信息,将食槽或水槽半径加上鸡体的最大长度设定为啄食、饮水行为的判别阈值,当鸡体质心与料槽或水槽间距离小于相应判别阈值时,则识别到啄食或饮水行为,正确识别率分别为 93.1%、92.9%。

4.2.4 跛足行为识别

跛足会导致鸡采食和饮水困难,引起活动水平偏低等问题,降低繁殖性能的表达能。当前对跛足行为评估的人工步态评分非常耗时,劳动成本也很高,而且无法在整个家禽生命周期内以无创和非侵入的方式自动、连续地进行测试^[59]。AYDIN^[60]对连续记录的 5 种不同步态评分的肉鸡进行特征检测,包括速度、步频、步长和侧摆,利用每幅图像中肉鸡覆盖的像素和每一步的像素差随时间的变化来测量这些特征变量,通过相关性检验,确定了特征变量与步态评分水平的相关系数。

由于二维图像信息的局限性,AYDIN^[41]又开发了具有深度传感器的 3D 视觉摄像系统自动监测和评估肉鸡俯卧和俯卧潜伏期与跛行发生率关系。首先采集俯视角度的肉鸡行走视频,通过对深度矩阵应用最小和最大阈值来分割图像,计算个体轮廓并对肉鸡背部姿势进行重构,最后利用整体姿态最高点与传感器之间的距离对肉鸡俯卧和站立进行分类,其平均准确率为 93%,相较于 2D 检测系统,该算法节省大量时间计算参数,可达到实时检测的目的。研究进一步表明肉鸡的步态得分与运动行为之间存在显著的相关性来确定发生跛行的概率。

4.2.5 活动水平评估

自动监测肉鸡群体的活动水平能够衡量在本交笼饲养模式下公鸡试图自然交配行为的活跃程度。性行为主要有求偶、爬跨、交配、射精等一系列行为,群体性行为的增加不仅提高了群体活动水平,而且表示群体具有较高繁殖性能。KRISTENSEN 等^[36]

通过俯视角度下肉鸡群体连续图像变化的像素块总和来反映群体运动的变化量,从数据序列中过滤掉被多进程动态线性模型递归算法识别的离群点。随后,在标准化误差累计总和的时间上应用 $V - mask$ 方法监测模型偏差,当群体的活动水平偏离预期水平一定程度时,可视为群体出现异常活动。DAWKINS 等^[61]利用光流法从视频数据中检测鸡群的整体活动水平,而群体运动的偏斜和峰度与个体水平的行为和福利显著相关。OKINDA 等^[62]基于二维的姿势形态描述符和移动性特征提取特征变量对姿势和活动性进行评估,探索的模型有支持向量机、人工神经网络和逻辑回归,在测试集上测试表明径向基函数的支持向量机分类精度最高,达到 97.8%。

5 计算机视觉技术在种公鸡选种中应用展望

基于上述计算机视觉技术在家禽领域的研究基础,初步提出了在公鸡选种中应用的设想。主要包括利用多模态交互扩增数据类型的多元性,针对由可见光相机和红外热像仪获取的信息采用基于多尺度变换的图像融合算法等,分别从表型性状相关性与行为相关性两方面给出种公鸡选种可行性算法,并结合家禽领域内视觉算法共性缺点进行算法优化。

5.1 视觉系统优化

各种模态的成像原理、空间分辨率、纹理特征等方面有巨大差异,不同模态图像之间存在互补与冗余,因单个视觉传感器成像波段有限,数据类型单一等缺点,建议采用多模态数据融合传感器视觉系统。实现多模态多元融合,由传感器采集到大量具有差异性、多元性和互补性特征的信息,完成对目标对象的多方面完整描述。

(1)采用多可见光相机组合视觉系统。基于双目立体视觉的可见光相机,是模拟人类双眼处理环境信息的方式,通过两个摄像机从外界采集多幅不同视角的图像,从而建立被测物体的三维坐标。组合多可见光相机于不同位置可获得三维特征如胸围以及微妙的行为特征,结合二维和三维信息得到鲁棒性更高的特征进行三维重建,可大大提高检测准确性。

(2)采用可见光相机与热成像仪组合视觉系统。由于单个可见光摄像机采集图像受限于图像精度低以及数据稳定性差等问题,可与热红外传感器共同工作提取鸡只表型、轮廓和行为信息。由于鸡舍暗光环境,可见光摄像机采集图像信息有限图像精度低,热红外传感器根据目标的热辐射差异成像,

两者结合可获得清晰的轮廓、表型特征纹理与颜色信息,提高了抗干扰能力。

(3)多种传感器组合感知系统。针对同种鸡群个体间识别难度较大问题,无线射频识别技术(RFID)使应答器通过无线电波与阅读器进行非接触式的双向通信实现自动个体识别。相对复杂度高的个体识别算法需要更高的硬件设备提供计算,RFID 能够便捷且实时地定位鸡只个体,可辅助优化可见光相机或深度相机视觉系统完成行为识别和表型特征提取的同时确定个体身份,另外深度相机、激光雷达等也能提供对移动鸡只个体的感知信息。除此之外,其他传感器如声谱仪获取鸡鸣音频信息可辅助诊断疾病,辨别生长阶段与健康状态;可穿戴的微型传感器能够采集不同行为下加速度、角速度和姿态角等信息用于行为识别以及地毯式压力传感器监测跛脚、刨地等行为。

5.2 基于视觉的公鸡选种算法及其优化

采用人工授精的繁殖方式使公鸡行为表达能力受限,可主要依靠表型性状进行繁殖性能评估;当采用本交笼养或平养的养殖模式时,动物交配本能使行为表达能力在空间上得以满足,在行为识别的基础上建立与繁殖能力的关联模型。为此,本文从公鸡表型性状识别和行为识别两个方面提出可行性算法来实现利用计算机视觉技术完成公鸡选种工作。

5.2.1 基于表型性状识别繁殖性能算法

算法主要由两部分组成:基于图像获取表型关键特征;基于机器学习算法进行分类。首先,从实际生产所在复杂背景中分割出鸡只个体是进行表型特征提取的前提。因养殖场光照不均、亮度低等因素的影响,最大类间方差法和 Chan - Vese 活动轮廓模型分割算法都能够高效地对目标进行分割。公鸡质量、鸡冠和肉髯面积是与精液品质有显著相关性的表型性状,准确提取以上表型性状特征对评估繁殖性能至关重要。在 $L^* a^* b^*$ 颜色空间中, a^* 分量表示绿色到红色的变化范围,能够有效区分红色鸡冠和棕红色羽毛,基于 K-means 聚类算法提取鸡冠和肉髯能降低需处理的数据量、提升计算速度。质量是无法从图像上直接表征的,可利用目标分割获取体表面积,进一步建立非线性回归方程预测个体质量。

其次,将以上提取的特征传入机器学习分类器中训练。由于 SVM 能够在小样本、非线性和高维模式识别问题上表现突出,运用 SVM 在训练集特征空间中构造最优超平面来达到最优分类效果,其中核函数和参数的选取可由序贯最小优化算法得出。

5.2.2 基于行为识别繁殖性能算法

求偶、爬跨、交配以及跛足行为也能够反映公鸡繁殖性能。现阶段大部分行为识别研究是针对个体对象,而鲜有算法识别对象间互动行为。基于行为识别繁殖性能算法主要由两部分组成:基于视频获取行为关键特征;基于机器学习算法进行分类。

首先,当产生互动性行为时,多个体可能粘连在一起,而形态学分水岭分割算法能够对粘连鸡体分离。椭圆拟合是目标跟踪最常用的方法,可对分离后的个体进行识别跟踪,获得椭圆质心、角度、长短

轴长等参数。多个体间的互动行为伴随着持续性位置移动特点,最短距离匹配算法可将当前帧与前一帧中捕捉到的所有目标个体间的椭圆短轴最短距离完成匹配追踪。例如,运动中的个体位置由拟合椭圆的质心代表,当两个拟合椭圆长轴方向趋于平行或夹角足够小且质心间的距离小于设定阈值时,可判断发生了爬跨行为。

其次,识别表征公鸡繁殖能力的其他行为作为决策树,让所有决策树参与投票,最后对分类结果进行整合实现随机森林集成学习算法,识别跟踪到繁殖能力好的公鸡个体。公鸡选种算法如图1所示。

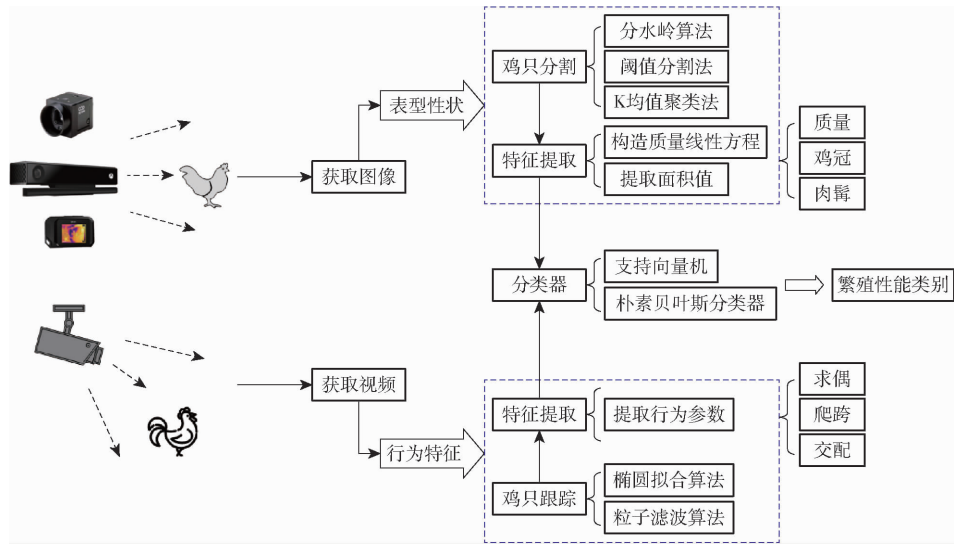


图1 公鸡选种算法
Fig. 1 Rooster selection algorithm

5.2.3 领域应用共性缺点与算法优化

计算机视觉技术在家禽养殖领域中的应用研究存在以下几点共性缺点:

(1)检测精度有待提高。目前鸡蛋品质检测已在蛋鸡养殖企业投入使用,家禽的行为检测、质量和疾病等生长状况识别的准确率较低。其中鸡只身体姿态的微小变化就会对质量预测结果产生较大影响,同时不同品种对质量预测模型的通用性没有经过检验,离实际生产线的使用还有相当的距离。

(2)应用场景单一。虽然国内外学者在家禽行为检测、目标追踪、生长状况评估和蛋品质检测方面都有了一定的研究成果,但这些研究都只适用于特定的饲养环境,对不同场景不具有兼容性。

(3)仪器设备要求高。应用计算机视觉系统对硬件设备要求高,但一般家禽养殖场环境恶劣,空气中布满粉尘与氨气,对仪器设备的损耗也大大增加,影响仪器的寿命和测量精度。

(4)图像采集方式具有局限性。目前针对鸡行为研究中,大部分将视觉传感器置于鸡舍顶部采集俯视角度的图像,没有充分利用鸡只的各个具体部

位,多是对鸡冠、腿部和躯干等单个部位提取特征,识别检测结果仍有提升空间。

针对现有识别算法以及本文提出的可行性算法给出以下几点优化建议:

(1)消除鸡笼铁丝对分割算法的影响。在实现图像鸡体目标分割时,鸡笼铁丝会对分割效果产生一定误差,通过形态学开运算和闭运算、孔洞填充等可滤除图像噪声干扰,准确分割出鸡体。

(2)提高特征提取的质量。对于分类识别问题的准确性很大程度上取决于提取的特征质量,良好的分类模型依赖于相关度大的特征集合,剔除不相关和冗余特征,能够提高分类精确度、降低运行时间。

(3)平衡数据集。不平衡数据对于训练分类问题有很大影响,可通过对不平衡数据采用欠抽样和过抽样处理使数据达到平衡状态,或者随机抽取等量的少数类与多数类样本构建训练样本集都能够有效缓解不平衡数据对模型的影响。

(4)基于深度神经网络的智能选种。深度神经网络由于优异的算法性能逐渐成为研究热点,已成

为解决图像中对象检测和识别问题的强大工具, 可以作为计算机视觉技术解决智能选种问题的进一步尝试。

5.3 行业发展

随着家禽业的集约化、现代化和产业化发展, 结合计算机视觉技术以促进动物福利养殖可持续发展得到逐步重视, 其发展方向主要包括以下几个方面:

(1) 农业与人工智能相结合实现公鸡智能选种。应用计算机视觉技术实现公鸡选种是一种模式识别, 根据与繁殖性能相关联的表型性状特征和行为特征作为识别公鸡繁殖能力的指标, 为遗传学公鸡的选育提供辅助手段。这为家禽智能化养殖提供了新的发展方向, 不仅为低成本、低风险、高效益的企业生产模式提供更多可能, 并且在提高动物福利的同时推动了计算机视觉技术在养殖方面的应用, 加速推进农业与人工智能领域的进一步结合。

(2) 探索关联公鸡繁殖性能的共性行为。不同品系鸡的外貌与行为特征差异较大, 针对特定品系的算法泛化能力较弱。为提高普适性, 不仅需要提高表型性状特征提取与行为识别算法的适用性和鲁棒性, 还需探索对繁殖性能存在潜在影响的不同品系公鸡的共性行为。

(3) 扩大数据集规模并规范数据集采集标准。数据集的质量直接影响后续识别算法的有效性, 扩大数据集规模并规范数据集采集标准可以提升识别算法的准确率, 利于推动家禽养殖领域智能化研究进展, 吸引越来越多的学者投入研究, 开拓领域发展可能性。

(4) 开发移动式系统。利用自动巡逻小车对笼养鸡群行为进行实时监测, 集选种、识别死鸡、病鸡等多任务并行处理, 实现无创、非侵入式家禽养殖场的监管模式。

参 考 文 献

[1] MUELLER S, KREUZER M, SIEGRIST M, et al. Carcass and meat quality of dual-purpose chickens (Lohmann Dual, Belgian Malines, Schweizerhuhn) in comparison to broiler and layer chicken types[J]. Poultry Science, 2018, 97(9): 3325–3336.

[2] CONWAY A. Changing diets change egg consumption worldwide [M] // WATT executive guide to world poultry trends. Rockford: WATT Global Media, 2018: 32–47.

[3] COOPER D M, ROWELL J G. Relations between fertility, embryonic survival and some semen characteristics in the chicken [J]. Poultry Science, 1958, 37(3): 699–707.

[4] SOLLER M, SCHINDLER H, BORNSTEIN S. Semen characteristics, failure of insemination and fertility in Cornish and White Rock males[J]. Poultry Science, 1965, 44(2): 424–432.

[5] WISHART G J, PALMER F H. Correlation of the fertilising ability of semen from individual male fowls with sperm motility and ATP content[J]. British Poultry Science, 1986, 27(1): 97–102.

[6] LAKE P E. Recent progress in poultry reproduction[J]. World's Poultry Science Journal, 1989, 45(1): 53–59.

[7] KIRBY J D, TRESSLER C J, KIRBY Y K. Evaluation of the duration of sperm fertilizing ability in five lines of commercial broiler breeder and Delaware cross males[J]. Poultry Science, 1998, 77(11): 1688–1694.

[8] PARKER H M, YEATMAN J B, SCHULTZ C D, et al. Use of roosters for the sperm quality index increases fertile egg production[J]. Poultry Science, 2000, 79: 771–777.

[9] BERLINGUER F, MADEDDU M, PASCIU V, et al. Semen molecular and cellular features: these parameters can reliably predict subsequent ART outcome in a goat model[J]. Reproductive Biology and Endocrinology, 2009, 7(1): 125.

[10] PETERS S O, OMIDIJI E A, IKEOBI C O N, et al. Effect of naked neck and frizzled genes on egg traits, fertility and hatchability in local chicken[C] // Self sufficiency of animal protein in Nigeria. Proceeding of the 9th Annual Conference of Animal Sci. Association Nig. Ebonyi State University, 2004: 262–264.

[11] PERRR M. Fertility in the male in relation to natural and artificial insemination[M] // HORTON-SMITH C, AMOROSO E C. Physiology of the Domestic Fowl, 1966: 44–51.

[12] JONES D G, LAMOREUX W F. Semen production of White Leghorn males from strains selected for high and low fecundity [J]. Poultry Science, 1942, 21(2): 173–184.

[13] SOLLER M, RAPPAPORT S. The correlation between growth rate and male fertility and some observations on selecting for male fertility in broiler stocks[J]. Poultry Science, 1971, 50(1): 248–256.

[14] ANSAH G A, CROBER D C, BUCKLAND R B, et al. Artificial insemination of individually caged broiler breeders: 1. reproductive performance of males in relation to age and strain of females[J]. Poultry Science, 1980, 59(2): 428–437.

[15] 李曙光, 杜志强, 张孝峰. 种公鸡体重和体躯结构对精液品质及受精率的影响[J]. 中国家禽, 2000, 22(7): 7.

[16] GEBRIEL G M, KALAMAH M A, EL-FIKY A A, et al. Some factors affecting semen quality traits in Norfa cocks[J]. Egyptian Poultry Science Journal, 2009, 29(2): 677–693.

[17] 王志跃, 刘桂琼, 龚道清. 新扬州鸡公鸡体型结构和精液品质的测定分析[J]. 中国家禽, 2001, 23(22): 13–14.

[18] 贾汝敏, 刘映娴, 叶昌辉, 等. 隐性白 H 系公鸡体尺性状与精液品质间的典型相关分析[J]. 中国农学通报, 2007(7): 23–27.

[19] GALAL A, SHEMEIS A R, FATHI M M. Selection indexes to improve semen quality of naked neck cocks[J]. Egyptian Poultry Science Journal, 2002, 22: 1143–1157.

[20] 魏法山, 黄艳群, 孙桂荣, 等. 快、慢羽固始鸡体尺与繁殖性状间关系的研究[J]. 河南农业科学, 2005(6): 93–95.

- [21] PRIETO M T, CAMPO J L, SANTIAGO-MORENO J. Relationship among fluctuating asymmetry, morphological traits, and sperm quality in layers[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(12): 2845–2854.
- [22] IBRAHIM A A, ALADE N K, ALIYU J, et al. Relationship between phenotypic sexual characters and semen characteristics in four strains of cocks in northern Nigeria[J]. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 2014, 4(3): 603–608.
- [23] MCGARY S, ESTEVEZ I, BAKST M R, et al. Phenotypic traits as reliable indicators of fertility in male broiler breeders[J]. *Poultry Science*, 2002, 81(1): 102–111.
- [24] NAVARA K J, ANDERSON E M, EDWARDS M L. Comb size and color relate to sperm quality: a test of the phenotype-linked fertility hypothesis[J]. *Behavioral Ecology*, 2012, 23(5): 1036–1041.
- [25] IFEANYICHUKWU U. Use of factor scores for determining the relationship between body measurements and semen traits of cocks[J]. *Open Journal of Animal Sciences*, 2012, 2(1): 41–44.
- [26] 赵振华,黎寿丰,王钱保,等.肉鸡鸡冠发育对激素分泌及胴体性能的影响[J].*四川农业大学学报*,2017,35(2):251–255.
ZHAO Zhenhua, LI Shoufeng, WANG Qianbao, et al. Effect of cockscomb development of broiler on hormone and carcass performance[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(2):251–255. (in Chinese)
- [27] TALEBI A, ALIMEHR M, ALAVI M H, et al. Comparative study of semen traits and histomorphometric features of testes of broiler breeder males with different phenotypic traits[C]//*Veterinary Research Forum*. Urmia:Urmia University, 2018: 1.
- [28] ABDELLATIF M A. Inheritance of comb and wattle lengths and its indicator to select cockerels in a population of Dandarawi chickens[J]. *Assiut. J. Agric. Sci.*, 1999, 30(4): 123–131.
- [29] GALAL A. Predicting semen attributes of naked neck and normally feathered male chickens from live performance traits[J]. *Poultry Science*, 2007, 6(1): 36–42.
- [30] MCGARY S, ESTEVEZ I, BAKST M R. Potential relationships between physical traits and male broiler breeder fertility[J]. *Poultry Science*, 2003, 82(2): 328–337.
- [31] 刘修林.基于视觉技术的蛋鸡信息监测方法与应用研究[D].太原:中北大学,2018.
- [32] LEROY T, VRANKEN E, STRUELENS E, et al. Computer vision based recognition of behavior phenotypes of laying hens[C]//2005 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005: 1.
- [33] 劳凤丹,滕光辉,李军,等.机器视觉识别单只蛋鸡行为的方法[J].*农业工程学报*,2012,28(24):157–163.
LAO Fengdan, TENG Guanghui, LI Jun, et al. Behavior recognition method for individual laying hen based on computer vision [J]. *Transactions of the CSAE*,2012,28(24):157–163. (in Chinese)
- [34] WANG C, CHEN H, ZHANG X, et al. Evaluation of a laying-hen tracking algorithm based on a hybrid support vector machine [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2016, 7(1): 1–10.
- [35] FUJII T, YOKOI H, TADA T, et al. Poultry tracking system with camera using particle filters[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2009: 1888–1893.
- [36] KRISTENSEN H H, CORNOU C. Automatic detection of deviations in activity levels in groups of broiler chickens—a pilot study[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 369–376.
- [37] VAN HERTEM T, NORTON T, BERCKMANS D, et al. Predicting broiler gait scores from activity monitoring and flock data [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 173(1): 93–102.
- [38] 劳凤丹,杜晓冬,滕光辉.基于深度图像的蛋鸡行为识别方法[J].*农业机械学报*, 2017, 48(1): 155–162.
LAO Fengdan, DU Xiaodong, TENG Guanghui. Automatic recognition method of laying hen behaviors based on depth image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(1):155–162. (in Chinese)
- [39] PU H, LIAN J, FAN M. Automatic recognition of flock behavior of chickens with convolutional neural network and kinect sensor[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, 32(7): 1850023.
- [40] NAKARMI A D, TANG L, XIN H. Automated tracking and behavior quantification of laying hens using 3D computer vision and radio frequency identification technologies[J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57(5): 1455–1472.
- [41] AYDIN A. Using 3D vision camera system to automatically assess the level of inactivity in broiler chickens[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 135: 4–10.
- [42] ZANINELLI M, REDAELLI V, LUZI F, et al. A monitoring system for laying hens that uses a detection sensor based on infrared technology and image pattern recognition[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1195.
- [43] RUBIN C J, ZODY M C, ERIKSSON J, et al. Whole-genome resequencing reveals loci under selection during chicken domestication[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 587–591.
- [44] UDEH I, UGWU S O C, OGAGIFO N L. Predicting semen traits of local and exotic cocks using linear body measurements [J]. *Asian Journal of Animal Sciences*, 2011, 5(4): 268–276.
- [45] ZHUANG X, BI M, GUO J, et al. Development of an early warning algorithm to detect sick broilers[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 102–113.
- [46] MOLLAH M B R, HASAN M A, SALAM M A, et al. Digital image analysis to estimate the live weight of broiler[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 72(1): 48–52.
- [47] DE WET L, VRANKEN E, CHEDAD A, et al. Computer-assisted image analysis to quantify daily growth rates of broiler chickens[J]. *British Poultry Science*, 2003, 44(4): 524–532.
- [48] MORTENSEN A K, LISOUSKI P, AHRENDT P. Weight prediction of broiler chickens using 3D computer vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123: 319–326.
- [49] AMRAEI S, MEHDIZADEH S A, SALLARY S. Application of computer vision and support vector regression for weight prediction of live broiler chicken[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2017, 10(4): 266–271.

- 1): 1-8, 33.
- LI Wentao, ZHANG Yan, MO Jinqiu, et al. Detection of pedestrian and agricultural vehicles in field based on improved YOLOv3-tiny[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 1-8, 33. (in Chinese)
- [20] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(8): 2011-2023.
- [21] 刘学平, 李珣乾, 刘励, 等. 嵌入 SENet 结构的改进 YOLOV3 目标识别算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(11): 243-248.
- LIU Xueping, LI Yuqian, LIU Li, et al. Improved YOLOV3 target recognition algorithm with embedded SENet structure[J]. Computer Engineering, 2019, 45(11): 243-248. (in Chinese)
- [22] 嵇杨培, 杨颖, 刘刚. 基于可见光光谱和 YOLOv2 的生猪饮食行为识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1588-1594.
- JI Yangpei, YANG Ying, LIU Gang. Recognition of pig eating and drinking behavior based on visible spectrum and YOLOv2[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1588-1594. (in Chinese)
- [23] 何东健, 宋子琪. 基于热红外成像与骨架树模型的奶牛眼温自动检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 243-250.
- HE Dongjian, SONG Ziqi. Automatic detection of dairy cow's eye temperature based on thermal infrared imaging technology and skeleton tree model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 243-250. (in Chinese)
- [24] SATHIYABARATHI M, JEYAKUMAR S, MANIMARAN A, et al. Infrared thermography to monitor body and udder skin surface temperature differences in relation to subclinical and clinical mastitis condition in karan fries (bos taurus x bos indicus) crossbred cows[J]. Indian J. Anim., 2018, 88(6): 694-699.
- [25] ZANINELLI M, REDAELLI V, LUZI F, et al. First evaluation of infrared thermography as a tool for the monitoring of udder health status in farms of dairy cows[J]. Sensors, 2018, 18(3): 862.
-

(上接第 228 页)

- [50] 郑双阳, 王琳琳. 基于机器视觉对高阶直立式鸡笼内蛋鸡的监视系统的开发[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(4): 476-480.
- ZHENG Shuangyang, WANG Linlin. Development of monitoring system for layers rearing in multi-tier vertical cages using machine vision[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(4): 476-480. (in Chinese)
- [51] ZHU W, LU C, LI X, et al. Dead birds detection in modern chicken farm based on SVM[C] // 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2009: 1-5.
- [52] 彭彦松. 基于支持向量机的养鸡场死鸡检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- PENG Yansong. Study on detecting dead birds in modern chicken farm based on SVM[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [53] АрПОВАВНИИРГЖ, 林文忠. 对种公鸡行为的评价[J]. 黑龙江动物繁殖, 1995(3): 20-22.
- [54] MILLMAN S T, DUNCAN I J H. Do female broiler breeder fowl display a preference for broiler breeder or laying strain males in a Y-maze test? [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2000, 69(4): 275-290.
- [55] 林兴涛, 蓝芳仁, 李俊英, 等. 本交笼养模式公鸡遗传贡献率与公鸡行为研究[J]. 中国家禽, 2020, 42(4): 9-14.
- [56] SERGEANT D, BOYLE R, FORBES M. Computer visual tracking of poultry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998, 21(1): 1-18.
- [57] FANG C, HUANG J, CUAN K, et al. Comparative study on poultry target tracking algorithms based on a deep regression network[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 176-183.
- [58] MEHDIZADEH S A, NEVES D P, TSCHARKE M, et al. Image analysis method to evaluate beak and head motion of broiler chickens during feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114: 88-95.
- [59] MARCHEWKA J, WATANABE T T N, FERRANTE V, et al. Welfare assessment in broiler farms: transect walks versus individual scoring[J]. Poultry Science, 2013, 92(10): 2588-2599.
- [60] AYDIN A. Development of an early detection system for lameness of broilers using computer vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 140-146.
- [61] DAWKINS M S, CAIN R, ROBERTS S J. Optical flow, flock behaviour and chicken welfare[J]. Animal Behaviour, 2012, 84(1): 219-223.
- [62] OKINDA C, LU M, LIU L, et al. A machine vision system for early detection and prediction of sick birds: a broiler chicken model[J]. Biosystems Engineering, 2019, 188: 229-242.