

精准畜牧业中动物信息智能感知与行为检测研究进展

何东健 刘冬 赵凯旋

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 动物个体信息和行为的智能感知与分析是精准畜牧业的核心。牛、猪、羊等大型动物因与人类关系密切、经济价值高受到国内外学者的广泛关注。为了促进中国精准畜牧业的发展,分别从国外和国内视角,详细总结、分析了精准畜牧业中动物信息感知与行为检测的研究现状、尚待研究的问题。包括个体识别、生长状况评估及体况评价各种方法的优势和不足,呼吸频率与异常检测、肢蹄运动评分与跛行检测等异常和疾病检测,发情检测、产前检测及高危动作识别等动物生理周期关键时间段的行为感知方法等。结合精准畜牧的发展趋势和应用需求,在分析的基础上指出,动物信息智能感知与行为检测未来将向无接触、高精度、高自动化程度方向发展,结合动物病理学的早期肢蹄病灶自动化检测方法、不依赖评分结果的具有普遍性的状态参数、接触式传感器对动物的应激作用、动物高级行为的识别理论与方法、动物身体区域精细识别研究、检测设备/系统的有效性验证及效益研究与评估等将成为未来研究的方向。

关键词: 精准畜牧业; 大型动物; 信息感知; 行为检测

中图分类号: S811 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0231-14

Review of Perceiving Animal Information and Behavior in Precision Livestock Farming

He Dongjian Liu Dong Zhao Kaixuan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The behavioral information on individual animal has a considerable relationship with animal's welfare and diseases. Thus, perceiving animal information and behaviors are fundamental to precision livestock farming. A research review of respiration detection, locomotion score, body condition score, individual identification, behavioral analysis, etc. were summarized focusing on large animals, including cows, pigs, sheep, which are prevalent instock farming industry. And a summary of the advantages and disadvantages of different methods applied in all the aspects was presented in this review. In term of individual information acquisition and analysis (e. g., individual identification and body condition score), solutions based on 3D camera and depth image processing technology were emphasized, because such cameras were more robust to the environment when extracting the animal target from the image. In addition, locomotion score was one of the most important topics in precision livestock farming. Electronic sensors, audio recorder and digital cameras were used to perceive the individual information and prove feasible to detect the animals' lameness automatically. Because of the earlier lameness detection requirements of practical application, the pathology of the limbs and hooves disease, the automatic trauma detection and universal parameters of lameness without scoring system should be considered in the future. In the behavior analysis aspect, some new research approaches were emphasized including the limb segmentation algorithm and the combination with human behavior analysis theory and method.

收稿日期: 2016-03-24 修回日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61473235)

作者简介: 何东健(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事机器视觉、智能化检测与控制研究,E-mail: hdj168@nwsuaf.edu.cn

Considering the development trend and requirements of practical application in precision farming, animals' social behavior should be considered. The precision live farming should also consider the effectiveness, robustness and the stress to animals of the detection equipments, continue to move in contactless, high precision and automation direction.

Key words: precision livestock farming; large animal; information perception; behavior detection

引言

我国养殖业呈现规模养殖、小区和散养模式共存的局面并逐步向规模化方向发展。规模化养殖必须考虑群体中的个体在品种、年龄、胎次、泌乳阶段的差异,随着人工、饲料和粪污处理等成本上涨以及乳品安全问题日益突出,规模化养殖对饲养管理方式提出更高的要求,以信息技术为支撑的精准养殖是现代牧业发展的必然要求^[1]。动物个体信息的感知与分析是精准养殖的关键,只有准确、实时地获取动物的个体信息、呼吸状况、体态体况、运动状况等,才能对动物生长、健康和妊娠状态做出客观评价,并及时采取防治处理、人为介入等措施将损失降到最低。为此,本文重点围绕精准畜牧业中大型动物信息智能感知与分析技术,对国内外研究进行总结分析,并给出未来研究和发展方向。

1 精准畜牧与相关技术

精准畜牧(Precision livestock farming, PLF),主要指由动物科学、信息技术所支持的根据个体差异定时、定量实施的一整套科学养殖与管理方法,其目标是优化动物个体贡献,促使畜牧业高效益、低成本、生态、可持续发展,并确保畜牧产品的质量和安全。其基本思想是利用各种电子传感器持续地获取动物个体各时段资料,例如:体温、体重、呼吸、活动量、采食量、体况、肢蹄运动等指标,用于动物个体识别、营养评估、行为分析、疾病检测等;对利用物联网系统获取的动物个体信息资料进行整理,作为动物个体属性数据制成具有时效性和可操作性的自动化畜牧管理系统;在此基础上结合决策支持系统(Decision support system, DSS)、专家系统、计算机和自动化设备等,促使日趋规模化的畜牧业低成本、高效率、安全、可持续发展。此外,动物个体信息也为饲料选优、疫病机理与预防等相关科学研究提供数据支撑和客观指标。其中关键是动物个体信息持续获取与理解,因此高效、准确的信息获取手段和分析方法是重要基础。

2 动物信息智能感知与分析研究进展

精准畜牧养殖中的大型动物,如:奶牛、肉牛、猪

和羊等,因其经济价值高,与人类营养、健康关系密切,成为精准畜牧研究的重点。大型动物由于其体型较大,故其微小运动难以捕捉和分析,且大型动物具有关节多、运动形式多样、运动空间广等特点,并伴有与心理状态相关的高级行为。因此,大型动物相关信息获取手段、分析方法与鼠类、禽类、蟹类等小型动物不同,其信息感知更为困难。近年来,国内外学者以自动化精准养殖、提升动物福利为目标,以个体识别、呼吸检测、运动评分、体况评价及行为分析为重点开展研究。然而行为感知的研究中,运动的步态检测作为一项重要的研究内容,受到了国内外学者的高度关注,跛行检测与肢蹄运动评分研究总结如表1所示。除步态行为以外的其他行为的检测研究总结如表2所示。

2.1 国外研究进展

2.1.1 个体识别

精准养殖体系中个体档案的建立、信息的采集、执行方案的制定,以及畜牧产品溯源等,都需要对动物进行快速准确的个体识别。射频识别(Radio-frequency identification, RFID)技术目前是世界畜牧管理应用最成熟的技术,在畜牧管理、个体识别、肉品和奶品溯源、疾病控制及食品安全等方面均发挥重要作用^[51]。近年来,基于图像处理、音频分析技术等非接触个体识别方法迅速发展。YAJUVENDRA等^[32]从混养牛群叫声信号中提取了存在显著性差异的各种声学特征,证明了基于声学分析的个体识别的可行性。KIM等^[52-53]基于荷斯坦奶牛身体黑-白花纹差异,设计并训练人工神经网络实现个体区分。对于没有黑-白花纹的品种,例如:日本和牛(Japanese black cattle),通过分析牛脸图像,同样实现了个体识别。

2.1.2 生长状况评估及体况评价

GILLESPIE等^[54]研究发现,饲料成本占据总成本的60%~65%,其中超过10%的饲料因过量喂食、管理不当而浪费。过量喂食导致动物体脂过高,影响肉质;营养不良会导致生长过慢、生产效率降低。因此,建立“喂食—生长评估—饲料调整”的科学养殖体制是提高品质、降低成本的必要措施。其中,生长状况评估包括体重测量、体脂测定,生长发育状况评估、体况评分等。

表1 跛行检测与肢蹄运动评分研究结果

Tab.1 Report of studies on lameness detection and locomotion score

文献	实验设置						评判标准	
	传感器	物种(数量)	环境	特征类型(特征数)	自动化	实时性	评价标准	描述
MAIRIER 等 ^[2] ,2006	计步器(后腿)	牛(400)	自然环境	活动量(步/h)	是	否		
CHAPINAL 等 ^[3] ,2011	3D 加速度仪 (四肢+躯干)	牛(12)	实验平台	速度特征(2)	是	否	5 分制	
MUNKSGAARD 等 ^[4] ,2006	加速度仪		实验平台	行走、躺卧、站立	是	否		
THORUP 等 ^[5] ,2015	加速度仪(后腿)	牛(348)	自然环境	速度特征(20)	是	否	5 分制	正常:1 跛行:2~5
YUNTA 等 ^[6] ,2012	计步器(后腿)	牛(250)	自然环境	躺卧行为(4)	是	否	5 分制	正常:1 跛行:2~5
蒋晓新等 ^[7] ,2014	计步器(后腿)	牛(1280)	自然环境	活动量(步/h)	是	是		
任晓丹等 ^[8] ,2014	光电传感器	牛	实验平台	行走速度	否	否		
RAJKONDAWAR 等 ^[9-10] , 2002,2006	2 通道 -4 压敏 组件	牛(23) 牛(31)	实验平台	力学特征(6)	否	否	5 分制	
PASTELL 等 ^[11] ,2007	测重平台	牛(73)	自然环境	力学特征(26)	否	是	5 分制	
CHAPINAL 等 ^[12-13] ,2010	测速仪 测重平台 计步器	牛(66) 牛(57)	实验平台	速度 力学特征(12) 躺卧行为(2)	否 否	否	5 分制	跛行:1,2 正常:3~5
PASTELL 等 ^[14] ,2010	测重平台	牛(55)	实验平台	力学特征(16)	否	否	5 分制	跛行:1,2 正常:3~5
LIU 等 ^[15] ,2011	StepMatrix	牛 346	实验平台	力学特征(5) 对称性指标	是	是	5 分制	跛行:1,2,(3) 正常:(3),4,5 严重跛行:3
NUFFEL 等 ^[16-17] , 2013,2014	压敏垫	牛(40) 牛(36)	自然环境	步态指标(20)	是	是	3 分制	跛行:2 正常:1
刘彩霞等 ^[18] ,2015	三维应力测试系 统	奶牛(8)	实验平台	力学特征(5)	是	是		
SONG 等 ^[19] ,2008	数字摄像机	牛(15)	实验平台	腿部轨迹	否	否	5 分制	
PLUK 等 ^[20] ,2010	数字摄像机	牛(70)	自然环境	接触角、关节点 活动范围	是	否	3 分制	
POURSABERI 等 ^[21] ,2010	数字摄像机	牛(28)	自然环境	背拱	否	否	3 分制	
BLACKIE 等 ^[22] ,2013	标签、数字摄像 机	牛(56)	实验平台	步态特征(7)	否	否	3 分制	正常:1 跛行:2,3
HERTEM 等 ^[23] ,2013	数字摄像机 3D 摄像机	牛(273)	自然环境	背部姿态 2D、3D	否	否	5 分制	正常:1,2 跛行:3~5
HERTEM 等 ^[24] ,2014	3D 摄像机	牛(186)	实验平台	背部姿态 3D	是	否	2 分制	
EDDY 等 ^[25] ,2001	红外摄像机	马	实验平台	背部姿态 步态特征	否	否	5 分制	
ZHAO 等 ^[26-27] , 2014,2015	数字摄像机	牛	自然环境	腿部轨迹(6)	是	是		

(1) 生长评估及体脂测定

由于个体差异,动物个体质量无法直接反映其生长状态,但体重随时间的变化趋势却体现了动物的健康情况。传统测重系统中需要人为引导动物登上称重台或通过称重通道,规模化养殖时个体日常称重成为极为繁重的工作。为此,有学者提出通过

测量动物的胸围、体高、臀宽、体长等体型参数建立回归模型来估算其质量。这些参数的测量经历了人工测量阶段^[55]、计算机辅助测量阶段^[56],并向基于图像分析和机器视觉的全自动化方向发展^[57]。其中,KASHIHA 等^[58]基于椭圆拟合算法全自动估计生猪质量,对平均质量从(23 ± 4.4) kg 到(45 ±

表2 行为检测研究结果
Tab.2 Report of studies on perceiving behavior

文献	行为类型	实验设置						实验结果
		传感器	物种(数量)	环境	特征类型(特征数)	自动化	实时性	正确率/%
FELTONC 等 ^[28] ,2012	发情	计步器(四肢)	牛	实验平台	活动量	是	是	
BREHME 等 ^[29] ,2008	发情	ALT-pedometer	牛	实验平台	活动量	是	否	>90
JÓNSSON 等 ^[30] ,2011	发情	计步器(四肢)	牛(88)	自然环境	活动量	否	否	88.9
BRUNASSI 等 ^[31] ,2010	发情	计步器 温度计 激素水平	牛(750)	自然环境	活动量 气温 体温	是	否	84.2
YAJUVENDRA 等 ^[32] ,2013	发情	声传感器	牛	自然环境	声波特征(11)	是	否	
CHUNG 等 ^[33] ,2013	发情	声传感器	牛	实验平台	MFCC	是	否	>94
TSAI 等 ^[34] ,2014	发情	数字摄像机	牛	自然环境	攀爬行为特征	是	否	0.33(假阳性率)
DEL 等 ^[35] ,2006	发情	数字摄像机 着色剂(尾部)	牛	实验平台	攀爬行为导致染料变化	是	是	>95
CHUNG 等 ^[36] ,2015	发情	数字摄像机	牛	自然环境	攀爬行为特征	是	是	
PAOLUCCI 等 ^[37-38] , 2008,2013	分娩	C6 Birth Control [®]	牛	实验平台	自动检测产道分离	是	是	100
CANGAR 等 ^[39-40] , 2007,2008	分娩	数字摄像机	牛	实验平台	行为特征	是	否	85
AOKI 等 ^[41] ,2005	分娩	温度计	牛	自然环境	温度变化	是	是	
SHAH 等 ^[42] ,2007	分娩		牛		激素水平	否	否	100
朱伟兴等 ^[43] ,2010	疾病 (腹泻)	嵌入式系统 数字摄像机	猪(8)	自然环境	个体识别 检测频次	是	是	78.38
尹令等 ^[44] ,2010	基本行为	温度 加速度器	奶牛	自然环境	体温、呼吸频率、 活动量	是	是	
蒋晓新等 ^[45] ,2014	分娩后期	计步器	奶牛	自然环境	活动量	是	是	
蒋晓新等 ^[46] ,2013	发情	计步器	奶牛	自然环境	活动量	是	是	较人工提高 24.01%
田富洋等 ^[47] ,2013	发情	计步器 温度计	奶牛	自然环境	活动量 温度	是	是	100
刘龙申等 ^[48] ,2013	分娩	三轴加速度传感器	母猪	自然环境	活动量、典型行为特征	是	是	87.93
温长吉等 ^[49] ,2014	分娩	数字摄像机	奶牛	实验平台	时-空特征	是	否	88.3
闫丽等 ^[50] ,2016	高危行为	加速度传感器	母猪	实验平台	典型行为特征	是	是	77.40

6.5) kg 变化的生猪进行连续跟踪测量,实验结果与人工称量结果对比表明,正确率达到 97.5% (误差 0.82 kg)。ZHU 等^[59]将 3D 视觉设备引入体重测定,使用微软 Kinect 设备获取生猪深度图像数据,从 3D 数据中获取目标轮廓参数进行质量估计。由于增加深度信息,评估结果更加精确,且对环境背景变化更具鲁棒性。

体脂测定对牲畜品质优化、遗传选择具有重要意义^[60]。传统方法为超声波测脂法^[60],近年来,机器视觉技术越来越多的被用于体脂测量^[61-62],主要通过测量颈、肋、尾沟等处的身体尺寸并进行回归分析来估计体脂含量。

(2) 体况评分

体况评分(Body condition score, BCS)可以合理、准确评估动物个体的能量储备,是国际畜牧业近 30 年来总结出的最优评价体系。BCS 能够客观地反映动物个体的饮食状况、产奶能力、繁殖能力、健康以及福利水平,甚至影响到未出生幼仔未来的生产力。研究人员对不同动物制定了不同的标准,如奶牛最常用的为 WILDMAN 等^[63]和 EDMONSON 等^[64]建立的 5 分制评价标准。BCS 随奶牛的生产周期按一定规律变化,若评分超过期望值则表示奶牛过度肥胖,造成饲料浪费且影响奶牛健康;若评分过低则表示奶牛摄入不足,严重影响产量。因此需

要确保奶牛在不同生理周期内保持合适的BCS值,以控制成本并提高产量。例如,若产仔后BCS下降到3分,则必须对奶牛采取必要的急救措施。但调查发现美国仅有不到5%的畜牧场将BCS引入养殖管理,主要原因在于缺乏自动化设备支持,而人工评价成本过高且主观性强。因此,基于图像处理、计算机视觉的自动化体况评分系统逐渐成为近期研究热点。在自动化体况评分系统中,动物轮廓信息的精准分割最为关键^[65]。AZZARO等^[66]为避免荷斯坦奶牛身上黑白花纹对分割的影响,人工校准23个关键轮廓点,然后依靠轮廓坐标信息结合kernel-PCA与机器学习算法实现了奶牛半自动化评分,识别准确率为69%。VIEIRA等^[67]用标准模板匹配的方法研究了山羊的体况评分方法,但由于山羊毛发影响较大,依然需要人工调整关键点。

2.1.3 跛行检测与肢蹄运动评分

有蹄动物由于遗传、细菌、营养、环境、管理等多种因素容易诱发蹄间皮肤和软组织腐败、恶臭、真皮坏死与化脓、角质溶解,导致肢蹄疼痛、跛行等症状,称为肢蹄病。若不及时发现治疗将造成过早淘汰,影响经济效益。因此,跛行检测和运动评分的目的是确诊奶牛是否患肢蹄病。

国外跛行智能检测研究主要集中在基于运动或行为差异的四肢运动状况的感知和评价上,取得了一些研究成果,并开发出一些实用产品和应用系统。

(1) 肢蹄病的外在表现

为实现跛行检测和运动评分,有必要研究跛行的外在表现及其相对于正常奶牛的行为区别。在奶牛肢蹄病的研究中,学者用步态特征、身体姿态及头部动作、四肢承重变化、肘关节与膝关节损伤等作为肢蹄病的诊断依据。

BLACKIE等^[22]、FLOWER等^[68]、TELEZHENKO等^[69]研究发现患病个体具有行走缓慢、步进时间长、步幅短、步距角小,脚印位置、步长、步宽、力度不对称性及四肢重量分布不均匀等特点,这些步态的外部变化可用于确诊患病肢蹄。

SPRECHER等^[70]和FLOWER等^[68]研究提出,牛在行走或直立过程中背部拱形姿态的变化以及头部动作(如:奶牛病肢与地面触碰时伴随头部上下摆动)可作为跛行检测的指标。肢蹄病除了影响运动外,也会导致躺卧时间长、进食减少以及活动量减少等^[71-72],但导致这些行为的变化因素过多,无法通过躺卧时间、进食量变化得出奶牛患肢蹄病的结论。

KEYSERLINGK等^[73]研究发现肘、膝的损伤给细菌感染制造机会,容易发展成肿胀、溃疡甚至跛

行。因此,肘、膝损伤可视为动物运动障碍的早期成因。

(2) 评分系统与特征自动检测

为了检测群体中患病个体的数量和病患程度,常采用一系列指标建立评分系统,评价肢蹄相关的系统包含:运动评分、肘关节和膝关节病变评分。美国奶牛协会及相关奶牛专家和学者建立了超过25种评分标准^[74-75],其中SPRECHER等^[70]所建立的5分制标准最为常用。

上述评分系统最先应用于人工目视对奶牛进行运动评分。近年来,自动化跛行检测受到人们的重视,以该评分方法为基础,许多技术被用于提取关键的跛行信息,例如:力学平台、加速度计、图像处理和机器视觉等。总体技术路线通常是:通过多种传感器检测活动数据;数据处理、分析,获取动物状态信息;传感器信息融合;综合决策(专家系统)。

接触式传感器检测方面,多用计步器、加速度计等设备获取步态参数曲线,以评估步态模式并统计活动量等。MAZRIER等^[2]采用计步器来测量活动量(步/h),通过对群体7~10h的连续实验发现,肢蹄损伤者中有92%的活动量少于正常者15%以上。CHAPINAL等^[3]使用5个3D加速度仪(四肢和躯干)评估奶牛的行走速度,结果与奶牛的运动评分值具有高度相关性。MUNKSGAARD等^[4]从传感器数据中有效区分出奶牛行走、站立、躺卧行为,准确率达到96.3%,并指出躺卧行为的准确检测可以帮助管理者更早发现患病个体。随着这一方法的深入研究,已有大量相关仪器设备投入市场,例如CowScoutTM(Gea Farm Technologies GmbH, Bönen, Germany. <http://www.gea.com/>)安装于腿部可用于动物健康检测和发情预测。以色列PedometerTM(Afimilk Ltd, Kibbutz Afikim, 15148 Israel. <http://www.afimilk.com/>)计步器可对奶牛进行编号并可以24h不间断监控奶牛的活动、休息和躁动不安等行为模式,使牧场人员能够及时做出繁育、健康管理等方面的有效决策。

SANDERSON等^[76]首次使用计算机视觉技术测量奶牛行走的时-空步态特征,证明了计算机视觉进行步态检测的可行性。由于计算机视觉技术具有设备简单、无接触测量等优势,奶牛步态特征感知、背拱程度及运动描述方法等已成为研究的热点(表1)。PLUK等^[20]开发出基于图像分析的四肢交错算法,其结果与专家评分结果高度相关($R^2 = 0.81$);POURSABERI等^[21]通过3个特征点自动拟合出牛在行走时背部拱形,并计算出反转半径、曲率,依此特征评价每头牛的运动状态,与专家评分结

果相比正确率超过 96%。这一思路逐步发展成肢体运动参数 (body movement pattern, BMP), 并用于肢蹄动物的运动描述^[77-78]。然而, 上述方法存在因畜牧场空间狭小, 侧视图难以采集的问题; 且光照和环境的突变及背景物的变化对目标物的分割带来极大挑战。为此, HERTEM 等^[23]采用顶视 3D 摄像机, 并比较了 2D 与 3D 摄像机实现跛行检测的优劣。此外, EDDY 等^[25]采用红外光源进行检测以避免环境变化的影响。

四肢承载分析也是实现跛行检测的另一种思路。RAJKONDAWAR^[79]开发了 1D-Ground Reaction Force (GRF) 系统, 该系统平台长 1.98 m, 包含 2 个力学实验通道, 每个通道有 4 组压敏测试元件。当奶牛通过平台时, 可以测得每侧后肢 7 组峰值力, 实验准确测量出 11 只正常奶牛和 12 只跛行奶牛的行走数据^[9]。2006 年, 该系统增添了平均力、着地时间、冲量、频域等特征参数作为步态模式分析指标^[10]。基于上述研究开发的便携式电子通道 GAITRite (CIR System Inc., Havertown, PA, USA. <http://www.gaitrite.com/>), 可自动测量动物四肢的承载力、压力测痛仪 Pain Test FPX 50 Algometer (Wagner instruments, Greenwich, CT. <http://www.wagnerinstruments.com/>), 依据蹄肢受激回撤时所施加的力来判断其受损程度, 这些测试设备已进入市场。

肢蹄感染是导致跛行的主要因素之一, 肢蹄伤疤是感染的病理表现。及时、准确地检测到个体伤疤, 便可及时治疗, 防止病情加重, 从而大大减少跛行牛只的数量。但由于肢蹄伤疤具有局部性和隐蔽性, 传统方法很难检测出, 因此未见相关报道。但有经验的饲养员借助类似 Infrared Thermography Camera (Flir, Boston, MA. <http://www.flir.com/>) 红外热成像仪, 可以检测出肢蹄红肿、发炎等症状。

2.1.4 行为分析

动物的行为十分复杂, 通过行为分析能够得知其身体、生理状况以及外界对其产生的影响。国外主要以牛、猪为对象, 研究其与生产效益联系紧密的行为。其中发情自动检测、产前行为识别等研究, 已经取得了一定的成果 (表 2)。

(1) 发情自动检测方法

及时、准确地检测出发情行为, 便可在最合适的时间实施人工受精, 从而降低产犊间隔及受精成本。自动检测发情主要依靠动物在发情期攀爬、活动量增大、采食量减小等特征行为。检测方法可分为基于电子计步器和加速度仪、攀爬行为检测、声学检测及计算机视觉等方法。

电子计步器、加速度仪: ARNEY 等^[80]研究发现奶牛在发情前 80 h 活动量开始明显增加。依此原理, 在动物四肢、脖颈等位置安装电子计步器, 自动、实时地量化评估动物的活动量, 以判断是否发情。FELTONC 等^[28]对该方法的有效性进行了研究, 结果表明, 有效检测率超过 92%。然而, 饲养密集度、温度、跛行会降低该方法的准确性, SAKAGUCHI 等^[81]研究表明, 该方法的有效检测率在 52% ~ 92% 之间。

攀爬行为检测: 攀爬是发情期最明显的行为。依此已开发出 Estrotec[®] (www.estrotec.com)、KaMaR[®] (<http://kamarinc.com>) 等检测设备。将此类设备安装于动物尾部, 当发生攀爬行为时可触发内置压力传感器报警。然而, EERDENBURG 等^[82]研究发现, 超过 50% 的发情奶牛并无攀爬行为, 且在规模较小的养殖场中, 多头牛同时发情的概率也很小, 这些因素限制了该方法广泛应用。

声学检测: IKEDA 等^[83]研究发现动物叫声包含疼痛、发情、离乳、饥渴等情绪, 甚至个体身份等丰富的信息, 能反映其身体、生理状况。YAJUVENDRA 等^[32]分析了一群混养牛的叫声信号, 建立了具有个体显著性差异的多个声学特征, 从理论上证明了声学特征可作为“指示器”。CHUNG 等^[33]提出一种数据挖掘算法用于奶牛发情检测。该算法从奶牛叫声中提取梅尔频率倒谱系数, 并使用 SVDD (Support vector data description) 进行早期异常检测。实验结果表明, 该方法准确性大于 94%, 且系统成本低, 可实现无接触、实时检测。

计算机视觉检测: 现代化养殖业向规模化、自动化方向发展, 传统人工巡视^[84]已无法满足实际需求, 借助计算机视觉将观察指标量化, 对动物行为进行智能理解成为新的发展方向。在计算机视觉检测中, 目标分割方法、行为特征提取及行为识别方法是关键技术。TSAI 等^[34]考虑到奶牛的群居习性, 采用顶视摄像机, 开发出基于计算机视觉的发情检测辅助系统, 解决了自然环境下目标分割问题, 提出攀爬行为特征提取方法, 将疑似视频段分割出来供饲养员查验, 从而大大减少工作量, 实验结果表明, 该系统的假阳性率为 0.33%。DEL 等^[35]在奶牛尾部着色, 由于奶牛攀爬行为会改变颜料形状或擦除颜料, 因此用图像识别算法可自动判断颜料形状变化, 并依此自动检测发情行为。

(2) 产前行为检测方法

PALOMBI 等^[38]发现奶牛难产的风险高达 23.4% ~ 33.3%。有效的产前监管可以减少分娩时间, 缩短初乳摄入间隔, 对母牛和犊牛的健康十分重

要。为了对分娩进行准确预测,已经提出许多自动化检测方法,包括温度变化^[41]、激素水平^[42]、视频监控。PAOLUCCI 等^[37-38]应用 C6 Birth Control[®] 分娩检测系统对 32 头母牛的生产时间进行预测,该系统安装于母牛产道,分娩导致产道扩张进而触发报警,具有较高的准确性。CANGAR 等^[39-40]为了实现奶牛产前监控,分析了爱尔兰农庄 8 头奶牛临产前 24 h 的体态和位置变化视频监控图像,提取顶视图像中牛只轮廓,计算每头奶牛 7 种时变数据(中心坐标、运动轨迹角度等),然后设计分类算法,对奶牛的站立、卧倒、饮水、采食等行为以及行为的正常与否进行了识别分类,平均识别率达 85%。

2.2 国内研究进展

我国畜牧业发展正在从小区养殖模式向规模化养殖转型,精准养殖技术起步较晚,近几年在呼吸频率检测、个体识别及行为分析等领域取得了一些研究成果。尽管在生产实践和动物科学研究中对动物的体温^[85]、体重^[86]、生长、体况十分重视,深入探讨了其与疾病、繁殖性能等方面的关系,但其自动化检测技术发展却相对落后,相关文献报道较少。

2.2.1 个体识别

国内个体识别技术通常作为畜牧产业管理信息服务平台的一部分,用于个体信息管理和产品溯源,常采用无线射频识别技术^[87-89]。为了降低系统成本,也有学者研究探索基于图像处理的无接触识别方法。赵凯旋等^[90]提出用视频分析方法提取奶牛躯干图像,用卷积神经网络识别奶牛个体的方法。该方法采用目标分割算法定位奶牛躯干位置,将躯干黑-白花纹图像作为卷积网络输入。实验结果表明,有效识别率为 93.33%。蔡骋等^[91]为实现奶牛溯源,将牛脸图片分割为互不重叠的独立小块,然后以每个块中的局部二值化模式分布作为特征,选取卡方距离进行特征度量,使用 LBP 方法提取纹理特征,并设计了特征描述子,建立面部描述模型。对 4 组共计 30 头普通灰脸牛只进行了算法训练实验。实验表明,基于 LBP 的描述子能够高效准确地进行牛脸识别。

2.2.2 体型参数、体况评价

国内动物科学及生产实践中针对牛、羊等的体况评分及其影响因素已有成熟的理论分析^[92-93]。实际应用仍处于人工评价阶段,其自动化检测方法也刚刚起步。张海亮等^[94]利用图像分析技术,对自然条件下获取的肉牛图像进行了分析和检测,对体长、胸宽、体高、腰角、胸深等指标进行了测量,与人工测量结果相比,最大相对误差为 2.73%。吴复争等^[95]对奶牛尾部后视图取样,建立奶牛尾部图像

库,提出了基于 Kernel-PCA 的奶牛体况评分方法,误差区间取 ± 0.5 时,识别率为 96.7%。李卓等^[96]为实现生猪生产过程中体尺无接触检测,开发了基于双目视觉原理的猪体尺检测系统,提出基于深度图像的猪体轮廓提取算法,后结合优化的基于凹陷结构的拐点提取算法,筛选体尺检测关键点,计算出体长、体宽、体高、臀宽、臀高 5 个体尺,该系统在 2 m 物距范围内相对误差均小于 1%。近年来,三维点云技术快速发展,刘同海等^[97]通过激光三维扫描仪,获取了生猪体长、体宽、臀宽、体高、臀高、胸围等体型参数,检测最大相对误差仅为 0.42%。郭浩等^[98]提出双深度摄像头动物实时三维重建系统,该系统以 15 帧/s 的速度重建猪体全身,获取误差在 4% 以内的体尺信息,达到农业上动物体尺测量的一般要求,该系统可用于动物体尺测量。

2.2.3 肢蹄运动评分与跛行检测

近几年,我国在肢蹄动物运动及跛行智能检测方面取得了一些成果(表 1)。在基于压敏传感器设备研发方面,刘彩霞等^[18]提出利用地面三维应力测试系统对行走奶牛的支撑相自动识别,同时进行处理判断,从而获取前后蹄部各自完整的支撑相;计步器、加速度器设备应用方面,蒋晓新等^[7]初步探讨了奶牛步履活动与肢蹄病发病率的关系,研究表明将计步器引入畜牧场管理能将奶牛蹄病治愈率提高 19.60%。任晓丹等^[8]开发出基于光电传感器的奶牛行走速度的测量系统,但尚未验证其检测的准确性;基于计算机视觉方面,赵凯旋等^[26-27]提出了畜牧场复杂环境下的运动奶牛目标提取算法,在此基础上准确定位肢干所处位置并提取出运动曲线,该曲线涵盖了奶牛行走动力学的逻辑顺序及轨迹。为评估跛行,对运动参数设计了 6 个特征,采用分类决策树对 614 头牛测试识别算法,结果表明平均正确率 94.13%。但上述技术均尚未产业化,缺乏上市的应用产品。此外,在实际生产中动物肘关节、膝关节外伤十分重要,应尽量避免感染引发肢蹄跛行,但未见对动物肘关节、膝关节外伤自动检测的文献报道。

2.2.4 呼吸频率与异常检测

研究发现,呼吸急促症状是动物常见的一种病状,与疾病、棚舍舒适度、环境胁迫等因素相关,也是饲养员重点关注的牲畜行为表现。国内学者针对这一领域进行了初步探索,主要借助视频分析手段,寻找呼吸特征提取方法,避免传统人工观察的局限性。纪滨等^[99]设计了猪脊腹线波动描述子,描述了猪呼吸过程,实现了猪呼吸急促识别,识别精度高于 85%。赵凯旋等^[100]分析了奶牛呼吸过程,根据侧

卧呼吸时腹部变化明显这一特点,用光流法计算视频帧图像各像素点的相对运动速度,根据各点速度,对像素点进行循环 Otsu 处理筛选出呼吸运动点,动态计算速度方向曲线的周期即可检测牛只呼吸频率,并根据单次呼吸耗时检测呼吸是否异常,实验结果表明,呼吸频率计算准确率为 95.68%,异常检测成功率为 89.06%。宣传忠等^[101]为检测杜泊羊只呼吸道疾病,通过检测其咳嗽声进行疾病预警和健康状况诊断,在不增加羊咳嗽声特征参数维度的前提下,提出一种改进的梅尔频率倒谱系数(MFCC)。结果表明,MFCC、短时能量、过零率组合的 14 维特征参数,经过隐马尔科夫模型(HMM)识别系统,识别率为 86.23%,经主成分分析降维后(9 维)识别率为 92.54%。

2.2.5 行为分析

大型动物疾病检测、产前行为及发情检测已成为国内动物行为分析领域中的研究热点,运用的技术手段主要为计步器、加速度器,也有学者研究基于视频分析的动物行为感知技术(表 2)。

在疾病监测方面,朱伟兴等^[43]针对猪平时不会驻留排泄区,除非猪患有病毒性腹泻或肠胃炎等疾病这一特点,研究了基于 ARM 平台的猪舍排泄区嵌入式控制设备,通过改进的运动目标检测算法和基于像素块对称特征的图像识别算法定位具有异常行为的疑似病猪,结果显示正确率为 78%。尹令等^[44]采用佩戴式传感器节点获取了奶牛体温、呼吸频率和运动加速度等参数,并采用 K-means 聚类算法对奶牛静止、慢走、攀爬等行为特征准确区分,从而可以长时间检测奶牛的健康状况。蒋晓新等^[45]运用计步器对荷斯坦奶牛妊娠后期活动量进行监测,并据此进行了奶牛活动量控制研究。

在发情检测方面,蒋晓新等^[46]研究用计步器对泌乳高峰期荷斯坦奶牛进行发情鉴定,与人工观察相比发情检出率提高了 24.01%。田富洋等^[47]根据奶牛发情期活动量上升、静卧时间变短和体温升高等生理特征,建立了以步数、静卧时间及温度为输入的 LVQ 神经网络发情行为辨识预测模型,经初步验证,发情检测准确率 100%,预测成功率 70%。尹令等^[102]对三轴加速度传感器所采集的时间序列数据用基于结构相似度的子序列段加速算法(Subsequence clustering based on structural similarity, SC-SS)进行聚类,结果显示较常用的 K-means 算法运行效率更高,可有效完成奶牛行为分类,提高发情检测的准确率。

在产前与产后行为检测方面,刘龙申等^[48]设计实现了一种基于三轴加速度传感器和无线传感器网

络的母猪产前行为特征实时检测系统,并用 K-means 算法对产前行为特征进行识别分析,实验表明,该系统能正确检测出母猪产前躺卧、站立、进食、筑窝等典型行为,正确率为 87.93%。温长吉等^[49]将“人”行为识别模型引入动物行为识别领域,提出一种基于改进时-空局部二值模式用于行为特征描述,构建视觉词典实现对母牛基本行为的识别,并对母牛临产期分娩前后 13 h 进行观察,该算法不仅能对母牛产前行为进行识别,还能对行为规律进行量化描述。闫丽等^[50]研究了母猪高危动作识别,认为哺乳母猪从站立、坐立转为趴卧的高危动作是导致断奶前猪仔死亡的主要原因,然后利用 MPU6050 传感器采集母猪哺乳期内 10 d 的三轴加速度数据,利用直方图统计法快速定位高危动作区间,结果表明,对高危动作区间的标注准确率为 77.4%,为母猪繁殖性能的科学评价及遗传选种提供了数据支撑。闫丽等^[103]以小梅山母猪的哺乳声、饮水声、采食声及无食咀嚼声等常见声音为研究对象,以功率比作为特征向量,对频域进行更精细的能量计算,提出基于偏度的子带聚类法合并特征不显著的子带,构建支持向量机(SVM)的声音分类识别器,统计各类声音的发声时长;进一步以单个哺乳周期为对象,建立成功哺乳的声音模式。声音判别模型的识别率达 96.61% 以上,与等间隔子带划分及主成分分析法比较,减少了特征向量的数量,且显著提高了识别算法的精度,进一步应用在母猪分娩舍内,实现了对哺乳母猪的母性能力及其健康状况的无应激、实时监测。

3 未来研究方向分析

从文献数量分布情况来看,国内以肉猪行为检测为主,国外则以奶牛行为检测尤其是奶牛跛行检测和运动评分为研究重点。未来精准畜牧在充分考虑动物群居习性及检测设备布设条件等因素的前提下,持续向无接触、自动化、实时、连续检测的方向发展。如下几个方向将成为未来研究重点:

(1)肢蹄病灶、外伤自动检测:现有基于加速度传感器和机器视觉系统的跛行检测方法和技术,主要关注动物步态变化、背弓变化等肢蹄因疾病疼痛造成的“可见的”跛行特征。但是,当肢蹄动物出现上述“可见”指标时,肢蹄病已非常严重且往往不可逆。因此,肢蹄病检测应与动物病理学相结合,研究早期肢蹄病灶自动化检测方法。

(2)不依赖评分结果的具有普遍性的状态参数:奶牛跛行检测和体况研究中通常使用评分规则对奶牛进行运动或体况评分作为系统验证的标准。

现阶段不仅评分规则未统一,而且即使最常用的评分系统(5分制),不同文献对其的解读也大相径庭,且观察员的经验等因素对评分结果影响较大。以评分结果为研究导向所提取的行为特征,往往具有鲁棒性差的缺陷,难以反映动物运动和体况变化的本质。因此有必要开发一种不依赖主观评分结果的具有普遍性的动物状态(运动或体况)参数,该参数应该具有客观属性,同时是一个可测的定量数值。

(3)接触式传感器对动物的适用性、应激性研究:针对跛行和体况以外的其它与生产实践息息相关的动物行为,如发情、待产和危险动作等行为的识别、检测技术主要分为佩戴式(接触式)传感器、声学检测和计算机视觉3类。目前,佩戴式传感器适用于个体识别和躺卧等基本行为的检测,设备有向小型化、多功能集成化发展的趋势,但接触式传感器作为一种外来设备,其本身会对动物行为造成不利影响,因此接触式传感器对动物的应激作用还有待研究。

(4)动物高级行为的识别理论与方法:感知动物的高级行为可为自动判定其健康状况,进行精准养殖提供依据,也可为动物福利、神经生理学、行为药理学等领域研究提供新的手段。计算机视觉或声传感器因其非接触、信息量大等特点已经成为研究热点,但用于动物行为检测与识别的研究才刚刚起步,目前的研究成果还局限于实验平台,尚未形成商业产品。人的行为识别研究已经取得了丰硕的成果,且已有成熟的姿态识别设备投入市场(Kinect 体感器),未来借鉴人的行为识别理论和方法,研究动物高级行为模型及检测理论与方法,具备重要理论意义和潜在的应用价值。

(5)动物身体区域精细识别研究:目前针对动物的目标检测方法只能将视频图像中的动物作为一个整体进行分割,动物身体区域的精细识别未见报道。用图像进行姿态检测和识别时,若能分割出头部、颈、躯干、四肢等区域,然后观测头部和四肢的动作,不仅能够提高姿态和行为识别的准确度,而且能提供更加丰富多元的行为信息。因此,需要研究鲁棒性强的动物肢干分割算法以区分动物身体各部分区域。

(6)无接触、自动化、准确检测与评价动物体况的方法:准确评估动物个体生长状况对养殖生产具有重要意义。基于图像分析的体况评价方法,其难点是从自然养殖环境中准确提取出感兴趣区域,目前多数研究依然需要对图像关键信息进行矫正。3D摄像机的普及及深度图像处理技术快速发展为体况评分提供了新的思路,具备高精度、全自动检测的发展潜力。

(7)动物智能化行为检测设备/系统的有效性验证研究:由于行为检测设备中的智能算法通常比较复杂,因此检测设备的应用条件比较苛刻,此外算法开发环境与实际养殖环境差异较大,因此新设备投入牧场应用或者用于动物学研究之前,在应用环境下,对其进行采集参数优选、行为敏感性、环境鲁棒性等有效性验证,将成为新的研究热点。

(8)动物智能化行为检测设备/系统的效益研究与评估:行为智能检测设备的最终目标是为了服务于养殖生产,因此对设备投入使用所产生的经济效益进行研究也尤为重要。在收集牧场信息(如动物数量、产量、年收益、目标收益、员工数量等)基础上,结合设备所能提供的动物行为信息,建立产量及成本预测模型,并以此进行经济效益评估,为智能行为检测设备的推广提供数据支撑和科学依据,有利于智能检测设备的市场化,并建立研究成果转化的良性循环。

4 结束语

信息化和数字化技术是精准畜牧业发展的关键和核心技术,通过对信息获取、处理、理解与应用,并建立科学管理系统、决策支持系统,能够促使日趋规模化的畜牧业低成本、高效率、安全和可持续发展。对比国外发展现状,我国精准畜牧业发展尚处于初级阶段,与新西兰、澳大利亚等畜牧业发达国家尚有一定差距。未来几年,以早期肢蹄病灶及外伤检测、奶牛跛行检测、高精度全自动体况检测、动物高级行为检测方法与技术研究为重点,开发相应的自动检测设备和系统,并对其进行适用性、精度及经济效益研究,对促进我国精准畜牧业的发展具有重要的理论意义和重大的应用价值。

参 考 文 献

- 1 李栋. 中国奶牛养殖模式及其效率研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
LI Dong. Study on efficiency and model of dairy cattle breeding[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- 2 MAZRIER H, TAL S, AIZINBUD E, et al. A field investigation of the use of the pedometer for the early detection of lameness in cattle[J]. The Canadian Veterinary Journal, 2006, 47(9): 883.
- 3 CHAPINAL N, PASSILLE A M D, PASTELL M, et al. Measurement of acceleration while walking as an automated method for gait

- assessment in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(6): 2895–2901.
- 4 MUNKSGAARD L, VAN REENEN C G, BOYCE R. Automatic monitoring of lying, standing and walking behavior in dairy cattle [C]//ADSA/ASAS 2006 Annual Meeting, 2006.
- 5 THORUP V M, MUNKSGAARD L, ROBERT P E, et al. Lameness detection via leg-mounted accelerometers on dairy cows on four commercial farms[J]. *Animal*, 2015, 9(10): 1704–1712.
- 6 YUNTA C, GUASCH I, BACH A. Short communication: Lying behavior of lactating dairy cows is influenced by lameness especially around feeding time[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(11): 6546–6549.
- 7 蒋晓新,魏星远,邓双义,等. 计步器监测荷斯坦奶牛蹄病的效果[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(2): 178–180.
- 8 任晓丹,张永. 奶牛跛行早期识别中奶牛行走速度的测量系统研究[J]. *内蒙古农业大学学报:自然科学版*, 2014, 35(6): 110–112.
- REN Xiaodan, ZHANG Yong. Study on measurement system of dairy cow lameness early recognition of walking speed[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2014, 35(6): 110–112. (in Chinese)
- 9 RAJKONDAWAR P G, LEFCOURT A M, NEERCHAL N K, et al. The development of an objective lameness scoring system for dairy herds: pilot study[J]. *Transactions of the ASABE*, 2002, 45(4): 1123–1125.
- 10 RAJKONDAWAR P G, LIU M, DYER R M, et al. Comparison of models to identify lame cows based on gait and lesion scores, and limb movement variables[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(11): 4267–4275.
- 11 PASTELL M E, KUJALA M. A probabilistic neural network model for lameness detection[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(5): 2283–2292.
- 12 CHAPINAL N, PASSILLÉ A M D, RUSHEN J, et al. Effect of analgesia during hoof trimming on gait, weight distribution, and activity of dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(7): 3039–3046.
- 13 CHAPINAL N, PASSILLÉ A M D, RUSHEN J, et al. Automated methods for detecting lameness and measuring analgesia in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(5): 2007–2013.
- 14 PASTELL M, H NNINEN L, PASSILLÉ A M D, et al. Measures of weight distribution of dairy cows to detect lameness and the presence of hoof lesions[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(3): 954–960.
- 15 LIU J, DYER R M, NEERCHAL N K, et al. Diversity in the magnitude of hind limb unloading occurs with similar forms of lameness in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Research*, 2011, 78(2): 168–177.
- 16 NUFFEL A V, VANGEYTE J, MERTENS K C, et al. Exploration of measurement variation of gait variables for early lameness detection in cattle using the GAITWISE[J]. *Livestock Science*, 2013, 156(1–3): 88–95.
- 17 VAN NUFFEL A. Development of an automated detection system for lameness in cattle: the gaitwise system[D]. Belgium: Katholic University of Leuven, 2014.
- 18 刘彩霞,张永,杨丽娟,等. 基于三维应力对跛行奶牛蹄部参数的提取[J]. *安徽农业科学*, 2015(36): 14–17.
- LIU Caixia, ZHANG Yong, YANG Lijuan, et al. Parameter extraction of lameness cows based on 3-dimensional reaction force [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015(36): 14–17. (in Chinese)
- 19 SONG X, LEROY T, VRANKEN E, et al. Automatic detection of lameness in dairy cattle—Vision-based trackway analysis in cow's locomotion[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(1): 39–44.
- 20 PLUK A, BAHR C, LEROY T, et al. Evaluation of step overlap as an automatic measure in dairy cow locomotion[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(4): 1305–1312.
- 21 POURSABERI A, BAHR C, PLUK A, et al. Real-time automatic lameness detection based on back posture extraction in dairy cattle: shape analysis of cow with image processing techniques[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 110–119.
- 22 BLACKIE N, BLEACH E C L, AMORY J R, et al. Associations between locomotion score and kinematic measures in dairy cows with varying hoof lesion types[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(6): 3564–3572.
- 23 HERTEM T V, MALTZ E, ANTLER A, et al. Lameness detection based on multivariate continuous sensing of milk yield, rumination, and neck activity[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(7): 4286–4298.
- 24 HERTEM T V, VIAZZI S, STEENSELS M, et al. Automatic lameness detection based on consecutive 3D-video recordings[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 119(2): 108–116.
- 25 EDDY A L, HOOGMOED L M V, SNYDER J R. The role of thermography in the management of equine lameness[J]. *Veterinary Journal*, 2001, 162(3): 172–181.
- 26 ZHAO K X, HE D J. Target detection method for moving cows based on background subtraction[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2015, 8(1): 42–49.
- 27 ZHAO K, HE D J. Real-time automatic classification of lameness in dairy cattle based on movement analysis with image processing technique[C]//2014 ASABE Annual Meeting Paper 141891474, 2014.
- 28 FELTONC A, COLAZOM G, PONCE-BARAJAS P, et al. Dairy cows continuously-housed in tie-stalls failed to manifest activity changes during estrus[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2012, 92(2): 189–196.
- 29 BREHME U, STOLLBERG U, HOLZ R, et al. ALT pedometer—New sensor-aided measurement system for improvement in oestrus detection[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2008, 62(1): 73–80.

- 30 JÓNSSON R, BLANKE M, POULSEN N K, et al. Oestrus detection in dairy cows from activity and lying data using on-line individual models[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 6–15.
- 31 BRUNASSI L D A, MOURA D J D, NÄÄS I D A, et al. Improving detection of dairy cow estrus using fuzzy logic[J]. *Scientia Agricola*, 2010, 67(5): 503–509.
- 32 YAJUVENDRA S, LATHWAL S S, RAJPUT N, et al. Effective and accurate discrimination of individual dairy cattle through acoustic sensing[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2013, 146(1): 11–18.
- 33 CHUNG Y, LEE J, OH S, et al. Automatic detection of cow's oestrus in audio surveillance system[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(7): 1030–1037.
- 34 TSAI D, HUANG C. A motion and image analysis method for automatic detection of estrus and mating behavior in cattle[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 104: 25–31.
- 35 DEL FRESNO M, MACCHI A, MARTI Z, et al. Application of color image segmentation to estrus detection[J]. *Journal of Visualization*, 2006, 9(2): 171–178.
- 36 CHUNG Y, CHOI D, CHOI H, et al. Automated detection of cattle mounting using side-view camera[J]. *Ksii Transactions on Internet & Information Systems*, 2015, 9(8): 3160–3177.
- 37 PAOLUCCI M, DI GIAMBATTISTA A, SYLLA L, et al. Predicting time of parturition in Holstein Friesian cows by using C6 Birth Control®[C]//*Proceedings of the 16th International Congress Animal Reproduction*, 2008:57–58.
- 38 PALOMBI C, PAOLUCCI M, STRADAIOLI G, et al. Evaluation of remote monitoring of parturition in dairy cattle as a new tool for calving management[J]. *BMC Veterinary Research*, 2013, 9(10): 191.
- 39 CANGAR Ö, LEROY T, GUARINO M, et al. Automatic real-time monitoring of locomotion and posture behaviour of pregnant cows prior to calving using online image analysis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(1): 53–60.
- 40 CANGAR Ö, LEROY T, GUARINO M, et al. Model-based monitoring of behaviour of pregnant cows prior to calving using online image analysis[C]//*Proof of concept: Calving identification using model-based calving monitor*, 2007.
- 41 AOKI M, KIMURA K, SUZUKI O. Predicting time of parturition from changing vaginal temperature measured by data-logging apparatus in beef cows with twin fetuses[J]. *Animal Reproduction Science*, 2005, 86(1–2): 1–12.
- 42 SHAH K D, NAKAO T, KUBOTA H, et al. Peripartum changes in plasma estrone sulfate and estradiol-17beta profiles associated with and without the retention of fetal membranes in holstein-friesian cattle[J]. *Journal of Reproduction & Development*, 2007, 53(2): 279–288.
- 43 朱伟兴,浦雪峰,李新城,等. 基于行为监测的疑似病猪自动化识别系统[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 188–192.
ZHU Weixing, PU Xuefeng, LI Xincheng, et al. Automatic identification system of pigs with suspected case based on behavior monitoring[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 188–192. (in Chinese)
- 44 尹令,刘财兴,洪添胜,等. 基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统设计[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 203–208.
YIN Ling, LIU Caixing, HONG Tiansheng, et al. Design of system for monitoring dairy cattle's behavioral features based on wireless sensor networks[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(3): 203–208. (in Chinese)
- 45 蒋晓新,邓双义,刘炜,等. 运用计步器对北方地区荷斯坦奶牛妊娠后期活动量进行控制的研究[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014(17): 102–104.
- 46 蒋晓新,刘炜,魏星远,等. 运用计步器鉴定泌乳盛期荷斯坦奶牛的发情效果研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(15): 6728–6729.
JIANG Xiaoxin, LIU Wei, WEI Xingyuan, et al. Study on the effects of identifying the estrus of Holstein cows during peak lactation by using pedometer[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(15): 6728–6729. (in Chinese)
- 47 田富洋,王冉冉,刘莫尘,等. 基于神经网络的奶牛发情行为辨识与预测研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 277–281.
TIAN Fuyang, WANG Ranran, LIU Mochen, et al. Oestrus detection and prediction in dairy cows based on neural networks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp.1): 277–281. (in Chinese)
- 48 刘龙申,沈明霞,姚文,等. 基于加速度传感器的母猪产前行为特征采集与分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 191–194.
LIU Longshen, SHEN Mingxia, YAO Wen, et al. Acquisition and analysis of sows' behavior before farrowing based on acceleration sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 191–194. (in Chinese)
- 49 温长吉,王生生,赵昕,等. 基于视觉词典法的母牛产前行为识别[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 266–274.
WEN Zhangji, WANG Shengsheng, ZHAO Xin, et al. Visual dictionary for cows sow behavior recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 266–274. (in Chinese)
- 50 闫丽,沈明霞,谢秋菊,等. 哺乳母猪高危动作识别方法研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 266–272.
YAN Li, SHEN Mingxia, XIE Qiuju, et al. Research on recognition method of lactating sows' dangerous body movement[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 266–272. (in Chinese)
- 51 TREVARTHEN A, MICHAEL K. The RFID-enabled dairy farm: towards total farm management[C]//*ICMB'08. 7th International Conference on Mobile Business*. IEEE, 2008: 241–250.

- 52 KIM H T, CHOI H L, LEE D W, et al. Recognition of individual Holstein cattle by imaging body patterns [J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2005, 18(8): 1194 – 1198.
- 53 KIM H T, IKEDA Y H L. The identification of Japanese black cattle by their faces [J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2005, 18(6): 868 – 872.
- 54 GILLESPIE J, FLANDERS F. *Modern livestock & poultry production* [M]. Boston: Cengage Learning, 2009.
- 55 PHILLIPS R W, DAWSON W M. A study of methods for obtaining measurements of swine [J]. *Proceedings of the American Society of Animal Nutrition*, 1936(1): 93 – 99.
- 56 MINAGAWA H, TAIRA O, NISSATO H. A color technique to simplify image processing in measurement of pig weight by a hands-off method [C] // *Proceedings of Swine Housing II*, ASAE, 2003: 166 – 173.
- 57 GREEN D M, BROTHERTSTONE S, SCHOFIELD C, et al. Food intake and live growth performance of pigs measured automatically and continuously from 25 to 115 kg live weight [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83(11): 1150 – 1155.
- 58 KASHIHA M, BAHR C, OTT S, et al. Automatic weight estimation of individual pigs using image analysis [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 107: 38 – 44.
- 59 ZHU Q, REN J, BARCLAY D, et al. Automatic animal detection from kinect sensed images for livestock monitoring and assessment [C] // 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM), 2015: 1154 – 1157.
- 60 MCLAREN D G, MCKEITH F M, NOVAKOFSKI J. Prediction of carcass characteristics at market weight from serial real-time ultrasound measures of backfat and loin eye area in the growing pig [J]. *Journal of Animal Science*, 1989, 67(7): 1657 – 1667.
- 61 LAMBE N R, NAVAJAS E A, SCHOFIELD C P, et al. The use of various live animal measurements to predict carcass and meat quality in two divergent lamb breeds [J]. *Meat Science*, 2008, 80(4): 1138 – 1149.
- 62 LAMBE N R, NAVAJAS E A, FISHER A V, et al. Prediction of lamb meat eating quality in two divergent breeds using various live animal and carcass measurements [J]. *Meat Science*, 2009, 83(3): 366 – 375.
- 63 WILDMAN E E, JONES G M, WAGNER P E, et al. A dairy cow body condition scoring system and its relationship to selected production characteristics [J]. *Journal of Dairy Science*, 1982, 65(3): 495 – 501.
- 64 EDMONSON A J, LEAN I J, WEAVER L D, et al. A body condition scoring chart for Holstein dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 1989, 72(1): 68 – 78.
- 65 刘冬, 赵凯旋, 何东健. 基于混合高斯模型的移动奶牛实时提取方法 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 288 – 294.
LIU Dong, ZHAO Kaixuan, HE Dongjian. Real-time target detection method for moving cows based on Gaussian Mixture Model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 288 – 294. (in Chinese)
- 66 AZZARO G, CACCAMO M, FERGUSON J D, et al. Objective estimation of body condition score by modeling cow body shape from digital images [J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(4): 2126 – 2137.
- 67 VIEIRA A, BRAND O S, MONTEIRO A, et al. Development and validation of a visual body condition scoring system for dairy goats with picture-based training [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(9): 6597 – 6608.
- 68 FLOWER F C, SANDERSON D J, WEARY D M. Effects of milking on dairy cow gait [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(6): 2084 – 2089.
- 69 TELEZHENKO E, BERGSTEN C, TELEZHENKO E. Influence of floor type on the locomotion of dairy cows [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2005, 93(3): 187 – 197.
- 70 SPRECHER D J, HOSTETLER D E, KANEENE J B. A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance [J]. *Theriogenology*, 1997, 47(6): 1179 – 1187.
- 71 BLACKIE N, BLEACH E, AMORY J R, et al. Impact of lameness on gait characteristics and lying behaviour of zero grazed dairy cattle in early lactation [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2011, 129(2): 67 – 73.
- 72 GONZÁLEZ L A, TOLKAMP B J, COFFEY M P. Changes in feeding behavior as possible indicators for the automatic monitoring of health disorders in dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(3): 1017 – 1028.
- 73 KEYSERLINGK M A G V, BARRIENTOS A, ITO K, et al. Benchmarking cow comfort on North American freestall dairies: lameness, leg injuries, lying time, facility design, and management for high-producing Holstein dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(12): 7399 – 7408.
- 74 VAN N A, ZWERTVAEGHER I, PLUYM L, et al. Lameness detection in dairy cows, Part 1: how to distinguish between non-lame and lame cows based on differences in locomotion or behavior [J]. *Animals An Open Access Journal from Mdpi*, 2015, 5(3): 838 – 860.
- 75 NUFFEL A V, ZWERTVAEGHER I, WEYENBERG S V, et al. Lameness detection in dairy cows, Part 2: use of sensors to automatically register changes in locomotion or behavior [J]. *Animals An Open Access Journal from Mdpi*, 2015, 5(3): 861 – 885.
- 76 SANDERSON D J, FLOWER F C. Hoof pathologies influence kinematic measures of dairy cow gait [J]. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88(9): 3166 – 3173.
- 77 POURSABERI A, BAHR C, PLUK A, et al. Online lameness detection in dairy cattle using body movement pattern (BMP) [C]

- //2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), IEEE, 2011: 732-736.
- 78 VIAZZI S, BAHR C, SCHLAGETER-TELLO A, et al. Analysis of individual classification of lameness using automatic measurement of back posture in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(1): 3083-3092.
- 79 RAJKONDAWAR P G. A system for identifying lameness in dairy cattle[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002, 18(1): 87-96.
- 80 ARNEY D R, KITWOOD S E, PHILLIPS C J C. The increase in activity during oestrus in dairy cows[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1994, 40(3): 211-218.
- 81 SAKAGUCHI M, FUJIKI R, YABUUCHI K, et al. Reliability of estrous detection in Holstein heifers using a radiotelemetric pedometer located on the neck or legs under different rearing conditions[J]. *Journal of Reproduction & Development*, 2007, 53(4): 819-828.
- 82 EERDENBURG F J C M, KARTHAUS D, TAVERNE M A M, et al. The relationship between estrous behavioral score and time of ovulation in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(5): 1150-1156.
- 83 IKEDA Y, ISHII Y. Recognition of two psychological conditions of a single cow by her voice[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2008, 62(1): 67-72.
- 84 VAN EERDENBURG F J C M. Estrus detection in dairy cattle: how to beat the bull[J]. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift*, 2006, 75(2A): 61-69.
- 85 周丽萍, 陈志, 陈达, 等. 基于改进 Otsu 的生猪耳根特征区域检测方法[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)
- 86 刘同海, 李卓, 滕光辉, 等. 基于 RBF 神经网络的种猪体重预测[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 245-249.
LIU Tonghai, LI Zhuo, TENG Guanghui, et al. Prediction of pig weight based on radical basis function neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 245-249. (in Chinese)
- 87 庞超, 何东健, 李长悦, 等. 基于 RFID 与 WSN 的奶牛养殖溯源信息采集与传输方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 147-152.
PANG Chao, HE Dongjian, LI Changyue, et al. Method of traceability information acquisition and transmission for dairy cattle based on integrating of RFID and WSN[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 147-152. (in Chinese)
- 88 耿丽微, 钱东平, 赵春辉. 基于射频技术的奶牛身份识别系统[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 137-141.
GENG Liwei, QIAN Dongping, ZHAO Chunhui. Cow identification technology system based on radio frequency[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 137-141. (in Chinese)
- 89 王玲, 邹小昱, 刘思瑶, 等. 基于 RFID 与 ZigBee 的羊场养殖信息管理系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 247-253.
WANG Ling, ZOU Xiaoyu, LIU Siyao, et al. Development of handheld terminal for sheep breeding information management based on RFID and ZigBee[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 247-253. (in Chinese)
- 90 赵凯旋, 何东健. 基于卷积神经网络的奶牛个体身份识别方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 181-187.
ZHAO Kaixuan, HE Dongjian. Recognition of individual dairy cattle based on convolutional neural networks[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(5): 181-187. (in Chinese)
- 91 CAI C, LI J. Cattle face recognition using local binary pattern descriptor[C] // *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA)*, 2013 Asia-Pacific. IEEE, 2013: 1-4.
- 92 朱小瑞, 邢世宇, 张成龙, 等. 中国荷斯坦奶牛体况评分对繁殖性能的影响[J]. *家畜生态学报*, 2015, 36(8): 45-49.
ZHU Xiaorui, XING Shiyu, ZHANG Chenglong, et al. Effect of body condition on reproduction performances of Chinese Holstein cows[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2015, 36(8): 45-49. (in Chinese)
- 93 郭勇庆, 刘洁, 刘进军, 等. 体况评分在养羊生产中的应用[J]. *中国草食动物科学*, 2014(增刊1): 388-390.
- 94 张海亮, 何东健. 肉牛体形参数计算机视觉检测[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2): 164-167.
- 95 吴复争, 姜威, 张美杰. 核-主成分分析在奶牛体况自动评分中的应用[J]. *光学技术*, 2013, 39(3): 222-227.
WU Fuzheng, JIANG Wei, ZHANG Meijie. Kernel-PCA application on dairy cow automatic body condition score[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(3): 222-227. (in Chinese)
- 96 李卓, 杜晓冬, 毛涛涛, 等. 基于深度图像的猪体尺检测系统[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 311-318.
LI Zhuo, DU Xiaodong, MAO Taotao, et al. A pig dimension detection system based on depth image[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 311-318. (in Chinese)
- 97 刘同海, 滕光辉, 张盛南, 等. 基于点云数据的猪体曲面三维重建与应用[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 291-295.
LIU Tonghai, TENG Guanghui, ZHANG Shengnan, et al. Reconstruction and application of 3D pig body model based on point cloud data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 291-295. (in Chinese)
- 98 郭浩, 马钦, 张胜利, 等. 基于三维重建的动物体尺获取原型系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 227-232.
GUO Hao, MA Qin, ZHANG Shengli, et al. Prototype system of shape measurements of animal based on 3D reconstruction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 227-232. (in Chinese)
- 99 纪滨, 朱伟兴, 刘波, 等. 基于脊腹线波动的猪呼吸急促症状视频分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 191-195.
JI Bin, ZHU Weixing, LIU Bo, et al. Video analysis for tachypnea of pigs based on fluctuating ridge-abdomen[J]. *Transactions*

- of the CSAE, 2011, 27(1): 191 – 195. (in Chinese)
- 100 赵凯旋,何东健,王恩泽. 基于视频分析的奶牛呼吸频率与异常检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 258 – 263.
ZHAO Kaixuan, HE Dongjian, WANG Enze. Recognition of individual dairy cattle based on convolutional neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 258 – 263. (in Chinese)
- 101 宣传忠,武佩,张丽娜,等. 羊咳嗽声的特征参数提取与识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2016,47(3):342 – 348.
XUAN Chuanzhong, WU Pei, ZHANG Li'na, et al. Study on feature parameters extraction and recognition method of sheep cough sound[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):342 – 348. (in Chinese)
- 102 尹令,洪添胜,刘汉兴,等. 结构相似子序列快速聚类算法及其在奶牛发情检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012,28(15): 107 – 112.
YIN Ling, HONG Tiansheng, LIU Hanxing, et al. Subsequence clustering algorithm based on structural similarity and its application in cow estrus detection[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(15): 107 – 112. (in Chinese)
- 103 闫丽,邵庆,吴晓梅,等. 基于偏度聚类的哺乳期母猪声音特征提取与分类识别[J]. 农业机械学报, 2016,47(5):300 – 306.
YAN Li, SHAO Qing, WU Xiaomei, et al. A clustering algorithm based on skewness as a tool to classify vocalizations of lactating sow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):300 – 306. (in Chinese)